

神奈川工科大学
先端工学研究センター研究所研究報告

第 2 1 卷

2 0 1 7

The Memoirs
of
Experiment and Research Center, Kanagawa
Institute of Technology
(1030 Shimoogino, Atsugi-shi,
Kanagawa, Japan) Vol.21(2017)

先端工学研究センター研究報告第21巻(2017)目次

1. 超撥水面による流体摩擦損失の低減に関する研究
機械工学科 根本光正 1
2. 都市環境がスギ花粉被曝に与える影響に関して
(特に屋根・屋上からの再飛散がスギ花粉被曝に与える影響の予測)
機械工学科 中根一朗 5
3. 種々の活性が期待できる含窒素化合物の合成とその活性評価
応用化学科 山口淳一 9
4. 超低消費電力フォトニックノード回路のためのシリコンフォトニクスデバイスの基礎研究
電気電子情報工学科 中津原克己 12
電気電子情報工学科 小室貴紀
ホームエレクトロニクス開発学科 黄啓新
電気電子情報工学科 瑞慶覧章朝
電気電子情報工学科 工藤嗣友
情報工学科 木村誠聡
情報ネットワーク・コミュニケーション学科 丸山充
ホームエレクトロニクス開発学科 三栖貴行
5. バイオマス由来のフラン含有高分子の合成
応用化学科 森川浩 18
6. マグネシウム電池による発電と海水のアルカリ化
電気電子情報工学科 瑞慶覧章朝 22
7. 有彩色照明光が生体に及ぼす非視覚的効果の検証
電気電子情報工学科 高橋宏 30

8. 高空風力を利用する浮遊型発電システムの開発研究	
機械工学科 大久保博志	38
機械工学科 水野敏広	
自動車開発工学科 石濱正男	
首都大学東京客員教授 藤井裕矩	
9. 結合非線形線路を用いた極短電気パルス列発生に関する研究	
電気電子情報工学科 檜原浩一	42
10. スマートフォン群の連携による分散アルゴリズムの実装に関する研究	
情報工学科 山本富士男	45
11. 仮想対象と自然なインタラクションを可能にする 3 次元表示対象の視覚的知覚位置の推定に関する研究	
情報ネットワーク・コミュニケーション学科 海野浩	50
12. パーソナルなセンシングデータも蓄積するソフトウェアリポジトリ開発と知識抽出の研究抽出の研究	
I 科 松本一教, I 科 鷹野孝典, N 科 岩田一, I 科 宮崎剛	60
13. エンドユーザの操作特性解析によるタブレット対応ソフトウェアの操作支援手法	
情報ネットワーク・コミュニケーション学科 岩田一	64
14. ソフトウェア開発プロジェクトのモニタリング手法の研究	
情報工学科 田中哲雄	68
15. 多重化による合理的配慮対応・教育用ディスプレイシステムの開発	
情報メディア学科 白井暁彦	74
16. 果樹園農家支援のための気象データ取得・解析に関する研究	
情報工学科 大塚真吾	80
17. レバレッジド ETF 取引が株式市場に与える影響分析 ～人工市場シミュレーションシステムによる検討～	
情報工学科 八木勲	83

18. 効果的な繰り返し表現による3DCGアニメーションと裸眼立体視を用いた創作技術	
情報メディア学科 牧奈歩美	93
19. 胎動計測による胎児の成長監視システムの開発	
情報メディア学科 小坂崇之	95
20. 味覚ディスプレイ開発のための基礎検討	
情報メディア学科 坂内祐一	99
21. 8K映像コンテンツを自在にハンドリング可能なストリーミングクラウド環境の実現	
情報ネットワーク・コミュニケーション学科 丸山充	102
情報ネットワーク・コミュニケーション学科 塩川茂樹	
情報工学科 清原良三	
情報メディア学科 小島一成	
情報ネットワーク・コミュニケーション学科 井家敦	
電気電子情報工学科 高取祐介	
情報ネットワーク・コミュニケーション学科 岩田一	
22. 一般道路上でのV2X通信による予防安全方式	
情報工学科 清原良三	112
情報工学科 宮崎剛	
電気電子情報工学科 高取祐介	
自動車システム開発工学科 狩野芳郎	
23. 多人数でマルチモバイルデバイスを用いた際の立体的連携に関する研究	
情報メディア学科 安本匡佑	125
24. 転動中のタイヤ変形・振動の計測・予測・制御の基礎研究	
自動車システム開発工学科 石濱正男	128
25. 日本語入力効率化のための同時打鍵方式の研究	
ホームエレクトロニクス開発学科 杉村博	132

26. ポリ(ビニルアルコール)ハイドロゲルの高性能化に及ぼす諸因子の検討	
応用バイオ科学科 岡部勝、清水秀信、和田理征	137
基礎教養教育センター 三井和博	
27. 模擬実験による細胞内凍結時の氷結晶形成挙動解析の検討とそれを活用した凍結損傷低減の可能性	
応用バイオ科学科 鳴海明	145
28. 「タンパク質間相互作用 (PPI) の制御を狙いとする生物活性天然物アルカロイドの構造を基盤とする化合物の合成研究」	
応用バイオ科学科 野田毅	159
29. 海岸漂着プラスチックの残留性有機汚染物質の吸着と吸着能評価	
応用バイオ科学科 和田理征	161
30. 界面活性剤添加型高機能含油廃水処理法の開発と処理メカニズム解析	
応用バイオ科学科 局俊明、市村重俊、仲亀誠一、和田理征	166
栄養生命科学科 澤井淳	
31. リグノセルロースからのイソプレレン製造法の開発	
応用バイオ科学科 仲亀誠	169
32. 維持透析患者の足切断を予防する対策の検討	
一足病変のチェックシートを改訂し、その効果を検証	
看護学科 田村幸子	172

超撥水面による流体摩擦損失の低減に関する研究

工学部機械工学科 根本光正

1. 研究の目的

下地材表面に撥水剤を散布・塗布することで液滴と撥水面との接触角を大きくし、液滴が同一質量であれば接触面積が小さくなって留まろうとする摩擦力が小さくなることから、防水や着雪着氷防止を目的に、衣類はじめ構造物や航空機、寒冷地用風速計などの様々な方面で撥水剤が使用され、その用途の有効性が示されている。一方、配管内や流路内を気体や液体が流れるとき、壁面近傍では速度勾配（隣り合う層の速度差）を有する境界層が発達し、この速度勾配による流体間摩擦によって流動エネルギーの損失が起こる。輸送コストの省エネルギー化の観点から、この流体摩擦損失の低減法が期待されている。

本研究では、撥水剤を塗布あるいは含ませた壁面材の撥水性に着目し、撥水面による流体摩擦損失の低減効果を、実験的に明らかにすることを目的とする。

2. 研究の必要性及び従来の研究

これまで研究代表者らは、ポンプはじめ水車などの実機大型流体機械の製作に際して実施される模型による性能予測試験との相似則の精度向上を目的に、鋳物面はじめ機械加工面や塗装面などの算術平均粗さ R_a と Prandtl-Nikuradse らが粗さ要素として用いた砂の平均粒径 ϵ との等価砂粒径の相関係数を提案してきた。

管内壁面凹凸の影響を受けない流体力学的に滑らかな円管（壁面粗さ要素の高さが粘性低層厚さ以下）流れの場合、流体管摩擦損失係数 λ は、層流域（ $Re \leq 2.3 \times 10^3$ ）では $\lambda = 64/Re$ （Hagen-Poiseuille の式）、乱流域（ $Re \geq 2.3 \times 10^3$ ）では $\lambda = 0.3164/Re^{0.25}$ （Blasius の式、 $3 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^5$ ）、あるいは $\lambda^{-1/2} = 2.0 \log_{10}(Re \lambda^{1/2}) - 0.8$ （Prandtl-Kármán の式、 $1 \times 10^5 \leq Re \leq 1 \times 10^7$ ）、また、凹凸の影響を受ける流体力学的に粗い壁面では、粗さ要素の平均粒径 ϵ と内径 d の比で表した管内相対粗度 ϵ/d を λ の算出式に導入した Prandtl-Nikuradse らの式があり、これらの諸式は Moody 線図としてグラフ化され、流体管摩擦損失見積もりの際、工学上、重要な資料とされている。しかし、この Moody 線図では流体力学的に滑らかな円管内での流体摩擦損失係数 λ の値は、これらの諸式より小さい値になることはないとしている。

流体摩擦損失係数 λ を低減することは、流体輸送における膨大なエネルギーコスト低減に直接寄与する。流体摩擦損失係数 λ を低減する方法として、壁面上の流れ方向に三角溝を施したリブレットや微細な泡を液体と壁面間に注入するマイクロバブル法などが提案され試験使用されているが、加工上の問題やコスト面等の課題などから実用化への広がりが少ないようであり、代替となる流体摩擦損失の低減法の検討が期待されている。

例えば、撥水剤を塗布した管材を配管の後に流体を通す（流体を流すまでは大気に曝されている）ことから撥水面と流体との界面には空気の薄い層を抱き込み、流体は壁面と接

触しない“界面でのすべり現象”が生じ、流体管摩擦損失低減の一要因となることが予想されことから、本研究では撥水剤を塗布あるいは含んだ壁面材の撥水性に着目し、撥水面による流体摩擦損失の低減効果を、実験的に明らかにすることを目的とする。

3. 期待される効果

新規あるいは既設設備メンテナンス時における防錆塗装施工の際、撥水剤あるいは撥水剤を塗料に混合塗布することで流体と壁面との摩擦損失を低減することは、例えば、ポンプによる流体輸送や船舶運航に必要な動力を低減させることから省エネルギーに直接寄与し、如いては二酸化炭素排出を抑えて地球環境保全に関与する技術資料を提案でき、そのこと自体に学術的な特色がある。

4. 研究の経過及び結果

流体摩擦損失低減用の供試撥水面としては、管壁面素材のアクリル面に撥水剤（商品名：セフラルコート、以下、撥水面という）を塗布したものを用いた。撥水性の確認として液滴に水を用いた場合の、壁面との接触角 θ を測定した結果、アクリル面では $\theta = 59.3^\circ$ 、撥水面では $\theta = 100.3^\circ$ という値が得られ、撥水面の接触角はアクリル面の約 1.7 倍であった。参考までに、自動車ガラス面用の撥水コーティング剤（商品名：ガラコ）をアクリル面に処置した場合では $\theta = 86.4^\circ$ であった。

流体摩擦損失低減効果の実験には循環式管路（内径 $d = \phi 20\text{mm}$ ）を用い、直管長さ $L = 2000\text{mm}$ 間の損失ヘッドから流体管摩擦損失を算出、管内速度および乱れ分布については、管路末に設けられた水槽内に流出する際の管出口直後の断面にて、レーザドップラ流速計を用いて計測した。それぞれの計測には完全に発達した速度分布を必要とするため、助走距離（計測部上流側必要直管長さ）を十分に確保した。管の材料には管内壁面が流体力学的に滑らかな管（滑面管）といえるアクリル管（塩ビ管）を用い、このアクリル管（塩ビ管）に撥水塗装を施した撥水管の場合について実験を行った。実験範囲はレイノルズ数 $\text{Re} = u_a d / \nu \doteq 6.0 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^4$ （ u_a ：管内平均流速[m/s]、 d ：円管直径[mm]、 ν ：動粘度[m²/s]）である。

計測に先立ち、本循環式管路に用いられたアクリル管（あるいは塩ビ管）が滑らかな管とみなせるか、従来より実験研究された流体力学的に滑らかな管に適用される Blasius の式と比較検討した結果、測定誤差内で良好な一致性が得られた。このことから、アクリル管に撥水塗装を施した管（撥水管）による管摩擦損失低減の効果を、本実験装置において検討しても問題がないことが確認できた。

図 1 に撥水管による $\lambda - \text{Re}$ 曲線の実験結果を示す。撥水管（図中▲印）では滑らかな管に適用される Blasius の式に比べ、同じ Re 値において λ の値が低く、管摩擦損失が低減されているのがわかる。また、 $\text{Re} < 1 \times 10^4$ では、 λ は減少する傾向にある。これは遷移領域を経て層流域に移り変わるためであり、また層流域（ $\text{Re} \leq 2.3 \times 10^3$ ）での撥水管の λ は $\lambda = 41/\text{Re}$ と

なり、 $\lambda=64/Re$ (Hagen-Poiseuille の式) より小さい値で推移していることが分かる。

図 2 は管摩擦損失係数の減少率 $\beta=(\lambda-\lambda')/\lambda'$ (λ' : Blasius の式より求まる管摩擦係数、 λ : 実験値) を示す。滑らかな管 (○印) は Blasius の式にほぼ一致 ($\beta=0$) しているが、撥水管 (▲印) の β は滑らかな管 (○印) より減少していることがわかる。従来から知られている Blasius の式と比較すると、撥水管は乱流域においても最大約 5% の管摩擦損失低減の効果が見られた。ただし、撥水剤による管摩擦損失低減効果は、レイノルズ数 Re が増加するに従って減少する傾向にある。

図 3 は、滑らかな管 (滑面) と撥水管 (撥水面) での管内速度分布および乱れ強さ分布を示す。図 (a) は管内壁面近傍、図 (b) は壁から管中心までの差異を示す。縦軸は壁面からの距離 y を半径 R で割った無次元距離 y/R を、下横軸には速度 u を管内平均速度 u_a で割った無次元速度 u/u_a を、また、上横軸には乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/u_{\max} \times 100$ (%) を示す。壁面近傍の速度分布に関しては、撥水面 (○印) の方が滑面 (●印) に比べ速度は遅くなり、管中心付近では撥水面の方が滑面に比べ速くなる。壁面近傍での速度勾配は滑面に比べ撥水面の方が緩やかであることから、摩擦損失に影響する壁面せん断応力も撥水面の方が小さいと予想される。また、壁面近傍で乱れ強さも撥水面 (△印) の方が小さくなっていることから、撥水面は壁面近傍で乱れを抑制することが確認できた。図 4 は、レイノルズ数 Re による管中心速度の差異を示す。縦軸には中心速度 $u_{\max}$ を平均流速 u_a で除した無次元中心速度 $u_{\max}/u_a$ を示す。レイノルズ数 Re が大きくなるに従って撥水面と滑面との差異が小さくなることから、撥水面による管摩擦損失の低減効果はレイノルズ数 Re の数値に上限が存在することは否めないと考えられる。

5. 今後の計画

本報告では、円管内の圧力損失 (損失ヘッド) や管内および壁面近傍の速度分布および乱れ強さ分布の計測より、内壁への撥水剤塗布による流体摩擦損失低減の効果が期待できることを示した。今後の計画としては、境界層の対数則分布ならびに形状係数 (=境界層厚さ/運動量厚さ) の差異の検討、さらに二次元 (矩形) 流路等の内部流れや平板や翼周りの外部流れについて、撥水剤塗布による流体摩擦損失低減効果の検討を加えたい。

6. 研究成果の発表

研究成果報告については、日本機械学会はじめ流体工学部門講演会等で発表する予定である。最後に、実験装置の制作に際しては本学実験研究センター工作工場ならびに KAIT 工房の関係諸氏のご指導をいただいた。ここに、感謝の意を表します。

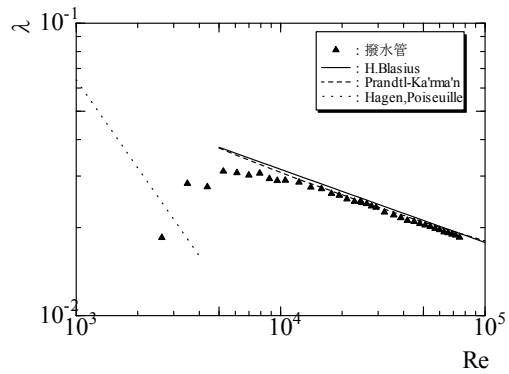


図1 撥水管における $\lambda - \text{Re}$ 線図

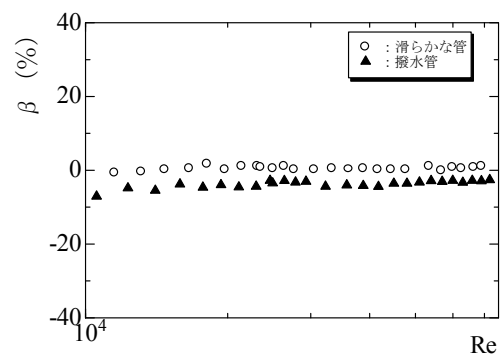
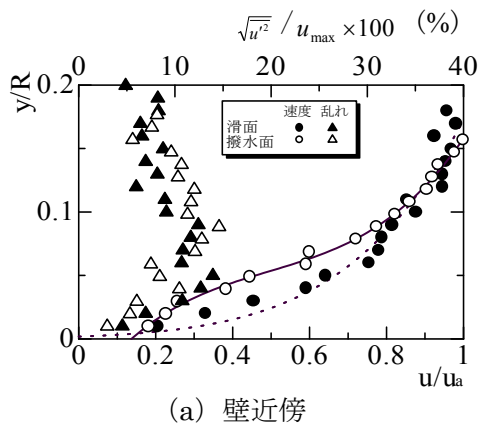
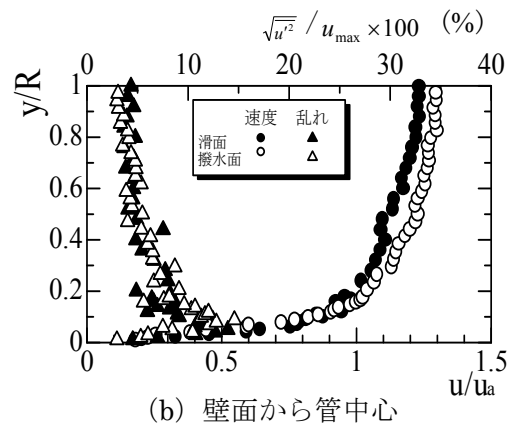


図2 管摩擦損失の減少率 β



(a) 壁近傍



(b) 壁面から管中心

図3 管内速度分布

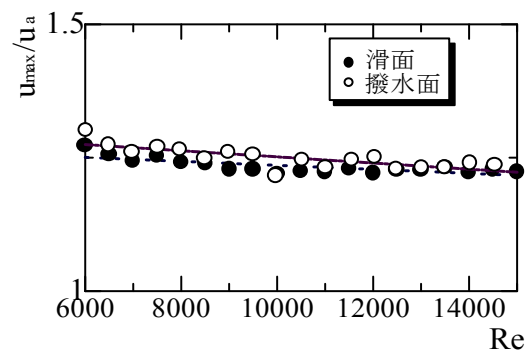


図4 レイノルズ数による管中心速度の差異

研究課題名： 都市環境がスギ花粉被曝に与える影響に関して
(特に屋根・屋上からの再飛散がスギ花粉被曝に与える影響の予測)

研究者名： 機械工学科 中根一朗

1. 研究の目的

スギ花粉は、風が弱いと落下し、風が強いと再浮遊するとされている。特に、都市部においては、大規模な大気流動を妨げ突風を引き起こす高層ビルに代表される建造物、ならびに、落下したスギ花粉を吸着することなく再浮遊をもたらす路面舗装や建造物の屋根・屋上等が存在することから、これらによる花粉の再浮遊と花粉被曝量の増加が予測される。実際、東京都の調査によると、その多くが都下で生まれ育っている0～14歳のスギ花粉有病率は、この20年間で10倍以上にもなっており、単純に都下での著しい被曝量の増加が疑われる。

このため、我々は、これまでに、スギ花粉被曝に与える都市環境の影響を明らかにすることを目的として、実際の飛散状況を調査するフィールドワーク、基礎的なモデル実験、花粉飛散の数値シミュレーションを行っている。そして、これらの結果から、地表面に落下した花粉では、再飛散の主たる移動形態が転動・跳躍であり、例え浮遊したとしても、その高さの低いことを明らかにしている。また、花粉飛散ピーク時の都市キャノピー層内における計測結果においては、その上部において、花粉飛散量が、下部の3倍強、キャノピー層外の2倍弱となる場所が存在した。従って、これらの結果を考え合わせることで、現在、都市環境下での花粉被曝量増加に最も寄与すると推察しているのが、建物の屋根・屋上からの再飛散である。特に、屋根が軒を接している都市においては、屋根・屋上は、あたかも漏斗のように機能し、花粉を集めて落下させていることすら考えられる。従って本研究では、屋根・屋上からの再飛散がスギ花粉被曝に与える影響を明らかにすること、そしてさらには、それを定量的に予測することを目的とする。

2. 研究の必要性及び従来研究

上記した通り、我々は都市特有の環境・気候が、スギ花粉被曝に影響を与えていると推察している。しかしながら、これに関わる報告例はほとんど無く、管見において知り得たのは、王らが(埼玉大学地域オープンイノベーションセンター紀要, vol.1(2008),120.), クレーン車を用いて都市部での花粉飛散量の高さによる違いを計測した報告だけである。このため、都市環境下において花粉被曝量が増加すると記述している場合もあるが、増加するかどうかは、あくまで推測でしかない。

このため本研究では、まず、都市環境が花粉飛散量に与える影響を明確にすることを目的としており、現時点において、そのポイントとなるのが、建物の屋根・屋上からの再飛散の存在である。つまり、上記した通り、地表面に落下した花粉の再浮遊が、花粉被曝量を著しく増加させる可能性は低いと考えられることから、建物の屋根・屋上からの再飛散の可能性が低いとすると、花粉飛散量と花粉被曝量は、単に風速だけの問題に帰着してしまう。そしてそうした場合、都市化や都市型気候が、花粉被曝に与える影響は極めて限定的な物となる。これに対して、建物の屋根・屋上からの再飛散の可能性が高いとすると、花粉被曝に与える都市化や都市型気候の影響は、極めて重要となる。

なお、上記した王らの報告においては、地表面近傍とその35m上空の花粉量を比較しており、風速の速い35m上空の花粉量が多い結果となっている。

3. 期待される効果

本研究では、都市化や都市型気候が花粉被曝に与える影響を問題視しているが、我々の最終的な目標は花粉被曝量の低減化であり、そのためには、花粉飛散の状況を正しく明確にすることが重要であると考え、本研究等を行っている。つまり、それを正確に把握することが出来たなら、被曝量を低減する対策に繋がると考えられるためである。また、本研究では飛散・浮遊物質をスギ花粉に絞っているが、この研究において提供される手法とその成果は、広く大気汚染物質等の粒子状物質の飛散・再浮遊に関しても適用が可能であり、この観点からも有用性が高いと考えられる。

4. 研究の経過及び結果

4.1 花粉粒子輸送物理モデルの作成

前記した経緯により、花粉再飛散の物理モデルを作成した。ただし、本研究では花粉粒子を球形と仮定しているため、例えば、地表や屋根等の表面上に落下して静止している粒子に作用する力は下図1となる。右図より分かる通り、表面上に落下した花粉が転動・滑動するためには、抗力 F_D が水平方向の付着力 F'_A と摩擦力 F_f の合力以上になること（ $F_D \geq F_f + F'_A$ ）が必要となる。一方、鉛直上向きに浮遊するため

には、サフマン揚力 F_s が重力 mg と鉛直下向き付着力 F_A との合力以上となる必要がある。なお、図1は静止している場合であるが、本研究では粒子回転を気流回転に等しいと仮定することから、転動・滑動している状態の粒子に作用する力は、粒子中心風速 u を気流との相対速度とした上で、摩擦係数を動摩擦係数とするだけである。また、浮遊している粒子の運動に関しては、我々の提案する $u_p = u, v_p = v - V_t, w_p = w$ （添え字 p ：粒子速度、 V_t ：粒子終端速度）を適用する（中根，機論B編，Vol.78，No.790(2012)，1220.）。

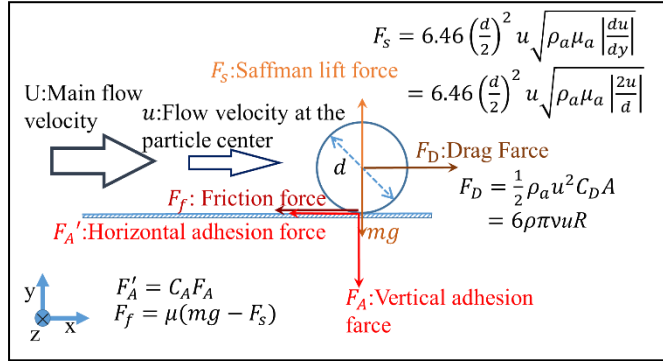
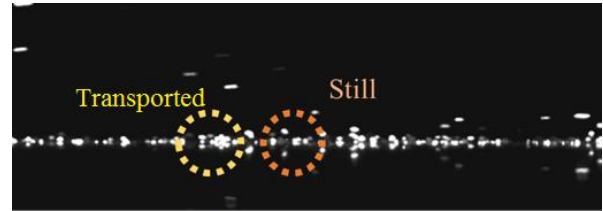


Fig. 1. Illustration of forces on the stationary pollen particle

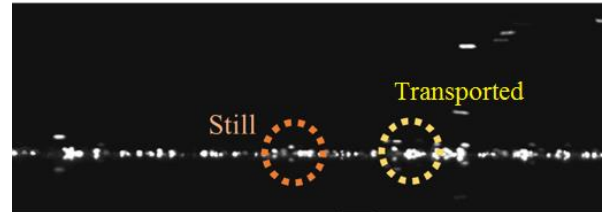
4.2 花粉粒子の摩擦力と付着力のモデル化

上記の仮定により、大まかには再飛散挙動のモデル化が可能となるが、問題となるのが、表面上の摩擦力と付着力の定式化である。このため、我々は、空気動力学径がスギ花粉にほぼ等しく、粒径分布が既知の石松子を試験粒子として用いた実験を通し、これらを定式化した。なお、本研究において、スギ花粉粒子を使用しなかったのは、主にアレルギー発症のためである。

まず、付着力が作用しない堆積した状態の石松子に対する傾斜実験より、静止摩擦係数を算出することで、石松子の静止摩擦係数を $\mu = 0.591$ とした。さらに、板バネに付着した石松子が鉛直下向きにはがれる際の重力加速度と慣性加速度から、鉛直方向の単位質量当たりの付着力（ 63.31 m/s^2 ）を算出した。ただし、この状態においても、水平方向の付着力を仮定できていない。そこで、アモントン・クーロンの摩擦法則と同様に、水平方向の付着力と垂直方向の付着力が比例関係にあると仮定した上で、上図2に示す風洞実験結果から、これを決定した。ここ



(a) $t = 0 \text{ s}$



(b) $t = 1.0 \times 10^{-3} \text{ s}$

Fig. 2. Sequential images of the particles transported over the surface ($U = 5 \text{ m/s}$)

で、図2は気流を受けて転動・滑動する平板上の石松子の時系列画像であり、図(b)は、図(a)に対して 1.0×10^{-3} s 後の画像となっている。同図より、平板上を移動する石松子と移動せず静止したまま石松子の混在していることが明らかであり、この割合と石松子の粒径分布を照らし合わせることで、静止している粒子の粒径が推察され、その粒径、気流による抗力、摩擦係数から水平方向の付着力の係数 $C_A=0.35$ を決定した。また、同図においては浮遊・飛散する粒子も撮影されているが、これは、回流風洞中を浮遊して回流している石松子である。

上記した通り、本物理モデルの摩擦力、付着力に関わる定数は石松子によるものであるが、本研究では、これをそのままスギ花粉に適用する。そしてこれにより、再飛散の第1段階である転動・滑動する条件（閾値）を、スギ花粉に対して求めると右図3となる。同図より分かる通り、花粉が転動・滑動する粒径に対して、その移動の閾値となる粒子中心風速は2次関数となっている。これは、微小粒子の抗力が粒子中心風速と粒径に比例することと、本研究におけるモデル化では、摩擦力と付着力が粒径の3乗に比例するためである。またこのため、付着力の有無が転動・滑動に対する閾値風速に大きく影響することも分かる。

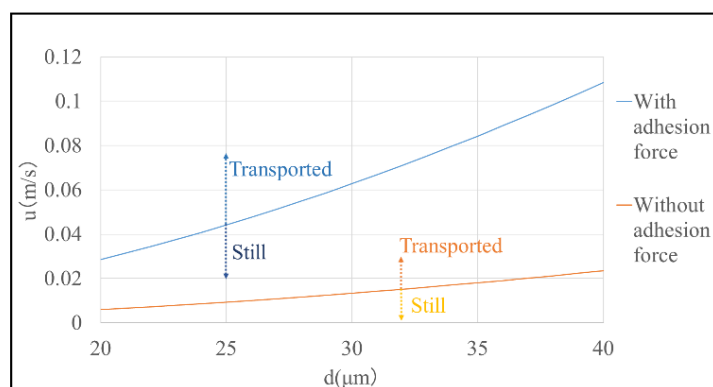


Fig.3. Threshold flow velocity at the center of particle to hold still on the surface

また、スギ花粉の平均粒径を $30\mu\text{m}$ として、この平均粒径のスギ花粉が静止している場合に、サフマン揚力によって浮遊するために必要な風速も算出した。その結果、付着力が作用する場合と作用しない場合とで、それぞれ 17.48m/s 以上と 8.49m/s 以上の風速が必要となり、転動・滑動する風速よりもはるかに速い風速が必要となる。特に付着力が作用している場合の風速は、人の歩行が困難となる程度にまで達する。なお、サフマン揚力は気流との相対速度に比例するため、静止している場合が最大となる。従って、表面上に落下した花粉が転動・滑動する可能性はあるものの、表面上からいきなり浮遊する可能性は非常に低いと考えられる。

4.3 表面形状の違いが再飛散挙動に与える影響の予測

本研究では、オープン CFD ソルバである OpenFOAM を用いて気流の数値シミュレーションを行い、その結果から、表面条件の違いによるスギ花粉の再飛散挙動を予測することとした。計算対象場は、次図4の計算結果より分かる通り、1辺 2m の立方体と、この入口あるいは出口に高さ 15cm のステップを設けたものである。また、初期条件と境界条件は、本年度の気流計測結果に基づき、主流速を 5m/s とし、乱流モデルとして SST $k-\omega$ を使用している。なお、本研究での計算自体は非定常で行っているが、図4は定常となった状態の結果であり、この気流条件を基にして、 $30\mu\text{m}$ （平均粒径）のスギ花粉の再飛散挙動を検討した。

同図より分かる通り、障害物のない平坦な表面では、付着力の有無に関わらず、ほぼ全ての位置において転動・滑動する。これに対して、ステップのある場合には、ステップの位置により顕著に傾向が変わる。後ろ向きステップの場合には、付着力が作用していると花粉粒子は移動することはなく、付着力が作用していない場合も、その移動する範囲は狭い。これに対して、前向きステップの場合に特筆すべき事柄として、表面から 1mm 程度の高さにおいても、スギ花粉粒子を浮遊させることができるような上向き風速の存在がある。ただし、この場合においても、表面上の花粉粒子は、転動・滑動する可能性はあるものの、浮遊する可能性はない。つまり、平均粒径の花粉が平らな地

表面等に落下した場合には、基本的には転動・滑動するだけである。しかしながら、ステップのように流線を曲げてしまう物体が置かれている場合、この上に落下してくる花粉は、表面上に落下する前に再浮遊する可能性がある。例えば、屋根や屋上などの空間上部からステップのような物体に向かって転動・滑動して落下した際には、その時の風速次第で再浮遊する可能性がある。

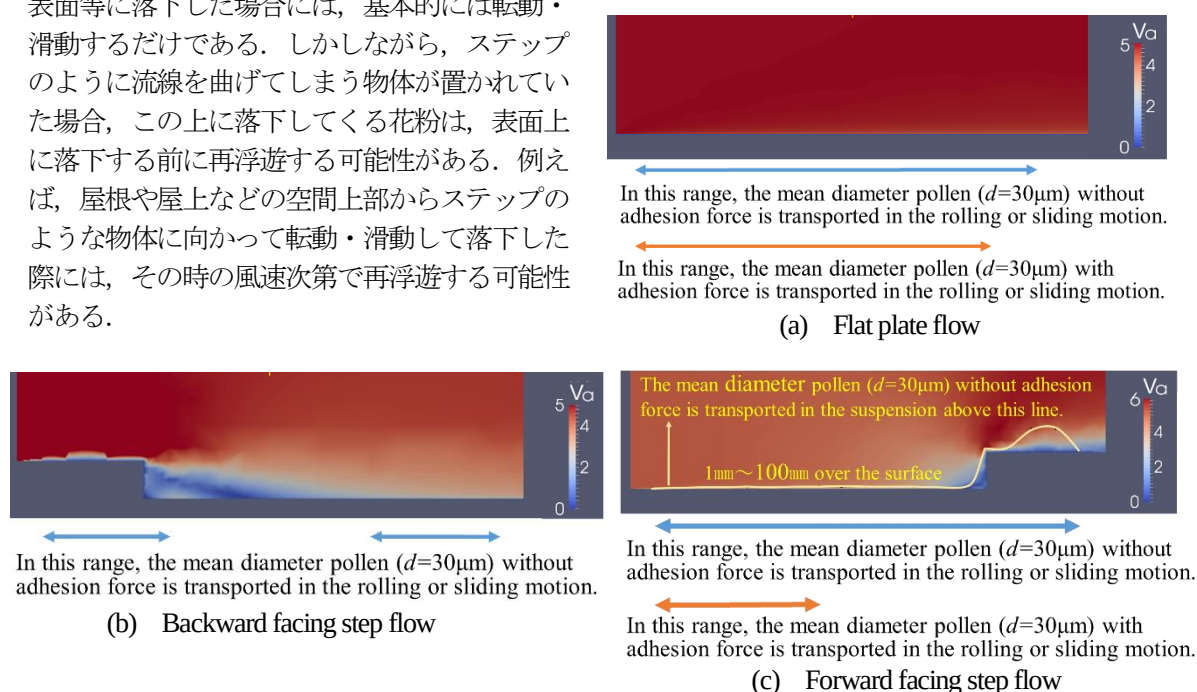


Fig.4. Simulated absolute velocity V_a and the predicted transport field and condition of pollen

4.4 結果のまとめ

本研究課題では、再飛散を含む花粉輸送に関して、以下の知見を得た。

- (1)再飛散モデルにおいて必要な付着力をモデル化した。
- (2)平らな表面に落下した場合、転動・滑動する可能性は有るが、浮遊する可能性は極めて低い。
- (3)ステップが有る場合、その表面から浮遊する可能性は低いが、落下途中の表面上に到達する以前に再浮遊する可能性がある。

5. 今後の計画

副題より分かる通り、本研究課題では、屋根・屋上からの再飛散がスギ花粉被曝に与える影響を明確にすることを目的としていた。しかしながら、昨年度において実行できたのは、再飛散と付着力を考慮した物理モデルの作成と、基礎的な数値シミュレーション結果の評価だけであった。このため、現在、スギ花粉の屋根・屋上からの再飛散挙動の数値シミュレーションを行っている。そして、その結果をフィールドワークにより客観的に評価した上で、屋根・屋上からの再飛散がスギ花粉被曝に与える影響を明確にすることを計画している。

6. 研究成果の発表

本研究課題においては、昨年度、以下の2回の口頭発表を行った。

- (1) 物理モデルによる花粉再飛散の検討, 日本花粉学会第57回大会講演論文集/p.13/2016/中谷望夢, 中根一朗
- (2) 都市環境下における花粉再飛散挙動の物理モデルによる検討, 日本機械学会関東学生会第56回学生員卒業研究発表講演会/p.118/2016/中谷望夢, 中根一朗

種々の活性が期待できる含窒素化合物の合成とその活性評価

研究者名：所属学科 応用化学科 氏名 山口 淳一

1. 研究の目的

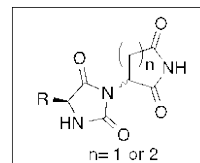
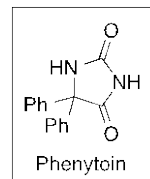
今回の研究目的は以下のように大別でき、箇条書で記す。

- 1) ヒダントイン部を有する新しい化合物の合成研究
- 2) 新規光学活性 3-アミノピペリジン誘導体の合成研究
- 3) 合成した化合物の阻害活性評価

すなわち、当大学内で合成されたオリジナルの化合物の中から、生理活性を示すものの探索を行い、その結果を基により活性の強い新たな化合物合成を行う。これを繰り返しながら、より活性の高い化合物の合成を目指すのが最終目的である。

2. 研究の必要性及び従来の研究

医薬品が目指す標的の一つに「生体内酵素の機能を阻む」がある。これは、医薬品が標的酵素と結合し、酵素の働きを低下または失わせるものであり、「酵素阻害剤」とも呼ばれる。この特定の酵素阻害を目指した医薬品は、例えば、ペニシリンに代表されるβ-ラクタム系抗生物質、高血圧薬であるカプトプリルに代表されるアンジオテンシン変換酵素(ACE)阻害薬など数多く知られている。現在も多くの酵素を標的とする阻害剤の開発研究が行われている。このような阻害剤の構造を見てみると、窒素原子が分子内に存在することが多く、それが重要な役割を果たすことが多い。例えば、ヒダントイン(imidazolidine-2,4-dione)は神経系に作用する化合物であり、Phenytoin(フェニトイン)など抗てんかん薬の基本骨格として知られている。すなわちクロロギ酸 4-ニトロフェニルを用いたアミノ酸アミドから多置換光学活性ヒダントインを合成する手法を開発し、報告してきた。¹⁾この手法を用い、抗がん剤として用いられているThalidomideを模倣した、グルタルイミドあるいはスクシンイミド部を有するヒダントイン誘導体を合成し、これらの化合物の中にはある種の抗がん活性、β-セクレターゼ阻害活性等の生物活性を示すことを明らかにしてきた(右図)。²⁾合成した化合物をベースとし、さらに活性の高い化合物を探索合成することが必要である。



References 1) J. Yamaguchi, M. Harada, T. Kondo, T. Noda, and T. Suyama, *Chem. Lett.*, **32**, 372 (2003). 2) Yamaguchi, J.; et al. *Heterocycles* **2015**, *91*, 764. 2) 山口ほか、日本薬学会第 134 年会, 29amS-057(熊本, 2014); 山口ほか、第 31 回メディシナルケミストリーシンポジウム, 2P-25(広島, 2013).

3. 期待される効果

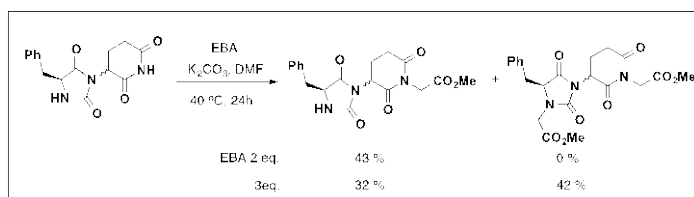
本研究によって高活性を示す化合物を見つけられれば、本分野の発展に大きく寄与できると考えられる。さらに、本大学の地位向上に向けても良い影響を与えると予測できる。

4. 研究の経過及び結果

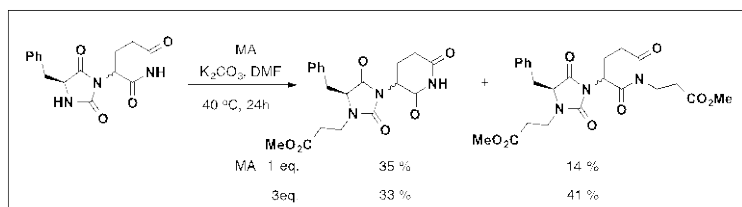
1) ヒダントイン部を有する新しい化合物の合成研究

まず N-保護アミノ酸の導入を試みた。縮合剤+添加剤を用いるペプチド合成法を適用したが反応は全く進まないことが分かった。そこでグルタルイミド部でのα-ブロモ酢酸エステルを用いた S_N2 による伸長を試みた。報告例を参考に、塩基存在下 2 当量のα-ブロモ酢酸メチル (EBA) を作用したところ、対応するグルタルイミド部での置換体を 43%の収率で得、ヒダントイン部で置換した化合物は確認されなかった。収率の向上を目指しさらに、EBA の使用量を増やしたところヒダントインの 1 位にも導入

された2置換体も得られることが分かった(下式)。一方、 α, β -不飽和エステルである、アクリル酸メチル (MA) を用いる共役付加反応も試



みた。意外なことに本反応ではグルタリイミド部よりもヒダントイン部が優先して反応することが分かった(右式)。しかしながら、グルタリイミド部も同時に導入



されることが分かり、その選択性を上げることが今後の課題である。

2) 新規光学活性 3-アミノピペリジン誘導体の合成研究

化合物 B はオルニチンより簡便に合成できるラクタムである。アミド部から伸長を行うには、アミド部の半還元によるアセタールへの変換、そこから増炭が可能である。まず、アミノ基の保護基としてカーバマート系の保護基 (Boc 基や Z 基など) を用いて変換を行ったところ、アミノ基が置換している炭素原子が若干ラセミ化し、光学純度の低下が見られた。これは反応条件下では、エナミンへの平衡が存在することからと推察している。

3) 合成した化合物の阻害活性評価

FIA 法は簡便な評価システムであるが、酵素を担持したカラムの調製が不可欠で有り研究のネックとなる。今年度はカラムの調製を行いこれに成功した。現在カラムを用いる FIA 法による評価を行っている。今回の結果を基に今後の研究対象化合物の構造を決定する予定である。

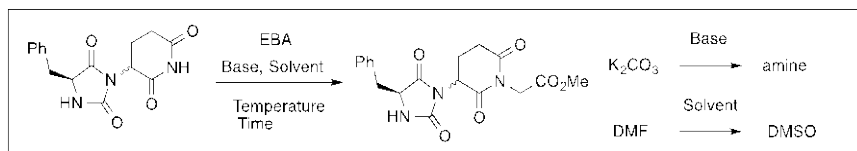
5. 今後の計画

1) ヒダントイン部を有する新しい化合物の合成研究

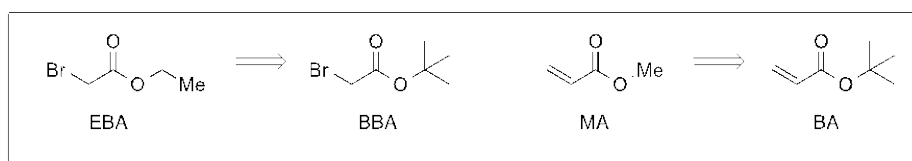
i) 伸長時における選択性の向上

昨年度の結果よりイミド部位への伸長は S_N2 を用いるのが良いとの感触を得ている。今年度はイミド部位のみに収率かつ選択性良く α -ブromo酢酸メチル (EBA) を導入する反応条件を検討する。昨年度の反応は、加熱を行いながら長時間の反応が必要であった。そこで反応性を上げるための工夫を行う。例えばヨウ化物イオンを共存し、EBA を反応性の高いヨウ化物を系内で反応性を高める試みを行う。また、塩基として炭酸カリウムを用いており不均一系であり反応速度が遅いと考えられるため、均一系の塩基例えば amine

も試すこととする(右式)。また、 α, β -不飽和カルボニル化合物



を用いる反応も同様に、ヒダントイン部位のみへの選択的な合成法の開発を行う。さらに下研究 ii)を見越し、メチルエステルではなく第三ブチルエステルなどを選択肢その反応性を検討する(右図)。すなわち、それぞれのエステル



部位をエチルまたはメチルエステルから第三ブチルエステルへと換えた化合物を使用する。

ii)伸長後の官能基変換反応

伸長後エステル部位が残るため、これより先の伸長等を考慮するとエステルをカルボン酸に変換する必要がある。ヒダントインやイミドは塩基性に比較的弱いいため酸性条件で除去可能な第三ブチルエステルを第1候補に考え研究を進める。第三ブチル基が適用しがたい場合には、接触水素化によって除去可能なベンジルエステルを用いることも検討する。

さらにカルボン酸部位での伸長反応を検討するアミンを縮合し、その伸長法が適用できるかを確認し、より生物活性の高い化合物の合成を行っていく予定である。

2)新規光学活性 3-アミノピペリジン誘導体の合成研究

化合物 C から 2 環性環状化合物 D への変換が目標となる。すなわち、まず不飽和部の還元を行い、続いてアミノ基の保護基を除去すると環状アミドであるラクタム D が生成すると期待できる。まずこの活性について検討を行う。また不飽和部をジオール化したものやエポキシド化した化合物からラクタム合成は可能であり、多種類の 2 環性新規化合物を合成することが可能となる。このように 6-6 員環を有し化合物群の合成はほとんど報告されて居らず、その合成自体についても未知の領域である。

3)合成した化合物の阻害活性評価

新たに合成に成功した側鎖がアルキル基系(イソロイシン、メチオニン)、ヒドロキシル系(セリン)カルボン酸系(グルタミン酸)、アミノ基系(リシン)、(カッコ内はヒダントイン合成したアミノ酸残基を示す)の化合物について検討している。これらの中から活性評価の高いものを選び出し、構造と活性の相関が見られるかどうか検討し、平行して 1)で行っている誘導化を行いさらに高活性な化合物の合成を模索する。

6. 研究成果の発表

本研究ではないが、当研究室から発表された関連研究の印刷論文を記す。

Conjugate Addition of an Ynone Containing Azulene with a Tertiary Amine, J. Yamaguchi and S. Sugiyama, *Tetrahedron Letters*, **57**, 4514-4518 (2016).

超低消費電力フォトニックノード回路のためのシリコンフォトニクスデバイスの基礎研究

研究者名：工学部 電気電子情報工学科 中津原 克己
工学部 電気電子情報工学科 小室 貴紀
創造工学部 ホームエレクトロニクス開発学科 黄 啓新
工学部 電気電子情報工学科 瑞慶覧 章朝
工学部 電気電子情報工学科 工藤 嗣友
情報学部 情報工学科 木村 誠聡
情報学部 情報ネットワーク・コミュニケーション学科 丸山 充
創造工学部 ホームエレクトロニクス開発学科 三栖 貴行

1. 研究の目的

近年、写真や動画など大量のデータをユーザが増え、ネットワークにおける通信量は飛躍的に増大し、さらなる通信容量の増大が求められている。特にデータセンタ内のサーバ間で通信量の増大が顕著であり、光化が進んでいるデータセンタ内のサーバ間通信においてもネットワーク機器の小型化、低消費電力が望まれている。シリコンフォトニクスは、データセンタ内のサーバ間通信を含め、信号経路の選択スイッチおよび波長選択スイッチ、波長可変フィルタなどの機能を高密度に集積し、光の特長を最大限に活かす技術として盛んに研究されている。本研究は、超低消費電力で動作するシリコンフォトニクスデバイスを実現する要素技術として、強誘電性液晶 (FLC: Ferro-electric Liquid Crystal) 装荷導波路を用いた種々のデバイスとそれらの集積化技術の基礎研究を進めることを目的とした。

2. 研究の必要性及び従来の研究

増大を続ける通信需要への対応が求められている光通信ネットワークでは、多値変調技術やデジタルコヒーレント技術を取り入れ、通信容量のさらなる大容量化を図っている。このような状況において、光信号の経路切り替えを行う OXC (Optical Cross Connect) や光信号の波長割り当ての再構成を行う ROAD (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) といったネットワークノードでの機能の部分でボトルネックが生じないようにするため、光デバイスは重要で不可欠である。また、通信量の急激な増大への対応に迫られているデータセンタ内ネットワークにおいても OXC や ROAD の導入が図られ、これらの機能の集積化が望まれている。シリコンフォトニクスではシリコン導波路による光配線で素子の集積化の際に光軸調整が不要となり、その強い光閉じ込めにより OXC や ROAD の実現にも欠かせない信号経路の選択スイッチおよび波長選択スイッチ、波長可変フィルタなどの機能の超小型化・高密度集積化が期待されている。しかし、可変機能を実現するためには従来から熱光学効果や電流注入による屈折率変化または静電効果などを利用しており、状態維持維にも電力が必要である。さらに高密度な集積化をする際には素子の消費電力で発生する熱により、素子間での熱干渉が起こり、動作に影響することが懸念されている。

3. 期待される効果

シリコンフォトンクスに異種材料を組み合わせる技術を実現することにより、シリコンフォトンクスデバイスの可変動作の低消費電力化、複合化、高機能化が期待できる。

本研究ではこれまでに小型の素子を実現できるシリコンフォトンクスとFLCの屈折率変化を利用した光デバイスの研究を進めてきている。シリコンフォトンクス技術では生産技術として高精度な加工プロセス技術が活用可能であり、小型、低コスト、高信頼性を有する光デバイスが実現可能である。液晶材料は他の電気光学効果材料に比べ、大きな屈折率差を持ち、本質的に電界で屈折率変化を制御するため、従来から熱光学効果や電流注入を利用する場合とは異なり、消費電力が少ない。さらにFLCは比較的高速な応答速度に加え、自己保持特性によって状態維持電力が不要になることで超低消費電力化が期待できるうえ、素子間での熱干渉もなく高密度集積化に有利である。光機能デバイスとして、シリコンフォトンクスデバイスとFLCによる可変機構の集積化技術の開発を行うことにより、高密度集積化時に懸念されるエネルギー消費や素子間の熱干渉問題への知見が得られ、超低消費電力で動作するフォトニックノード回路の実現に貢献するものと考えられる。

また、本研究での成果をもとに平成27年度から産業技術総合研究所との Si_3N_4 を用いたi光スイッチ高性能化の研究、香川大学主導の科研費基盤(B)でのレーザドップラー稠密断面速度分布計測用センサプローブの共同研究に繋がっている。さらに新たな異種材料との融合技術の開発にも発展し、シリコンフォトンクスへの機能実装が望まれている非相反デバイスに必要な磁気光学材料の形成について、東工大と沼津高専とともに共同研究を進めている。この技術により、光アイソレータや光サーキュレータ等の非相反デバイスの集積化を容易にし、シリコンフォトンクスの機能を画期的に高めることが期待できる。さらに、平成28年11月には(株)昭和真空から反応性DCスパッタ装置の無償貸与を受け、本学ナノテクノロジー室に導入した。本装置を用いた導波路形成技術を開発することで、シリコンフォトンクス技術に低温かつ高速に成膜可能な導波路材料の組み込みが可能になり、可変機能の向上とセンサデバイス応用時の検出感度の向上にも効果が期待できる。シリコンフォトンクスの機能向上に向け、これまで開発してきた要素技術を融合し、1チップ集積化技術による新たな機能を創成し、通信ネットワークのノードの機能の高度化とともに新たな展開としてセンサデバイスにも適用範囲を拡大することが期待される。

4. 研究の経過及び結果

光信号の経路切り替えを行うOXC、波長多重された信号を抽出する波長可変フィルタおよび波長割り当ての再構成を行うROADMの機能が集積されたフォトニックノード回路の開発を進めるため、各要素技術に関する基礎研究を行った。

4.1 1×Nチャンネルの光スイッチの基礎研究

光信号の経路切り替えを行うOXC機能を担う1×Nチャンネルのフェーズドアレイ型光スイッチの開発を行った。図1に製作した1×4フェーズドアレイ型光スイッチの構造図を示

す。図3に通信波長のC-band帯の光を入射した際の出力光の近視野像を示す。入射側の第1電極の印加電圧極性を切り替えることで出力ポートが切り替えられていることがわかる。

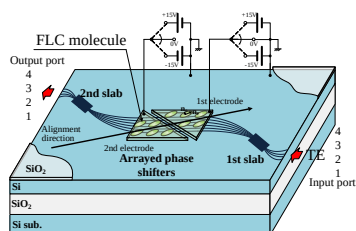


図1 1×4 フェーズドアレイ型光スイッチ

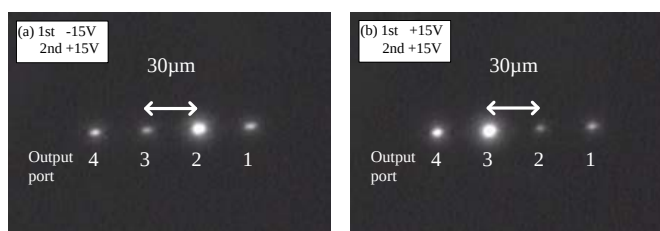


図2 1×4 フェーズドアレイ型光スイッチの動作例

4.2 波長選択光スイッチの基礎研究

可変の波長フィルタリングおよび波長割り当ての再構成機能を実現する波長選択素子の基礎研究を行っている。図3にグレーティング導波路を用いた波長選択動作の構成例を示す。この機能を実現するFLC装荷グレーティング導波路として、本研究ではコア層に Si_3N_4 を用いたデバイスと Nb_2O_5 を用いたデバイスの研究を開始した。

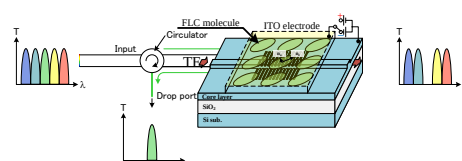


図3 グレーティング導波路型光スイッチを用いた波長選択動作

4.2.1 Si_3N_4 コア層グレーティング導波路

Si_3N_4 は半導体デバイスのパッシベーション膜として使用され、シリコンフォトリソグラフィのプロセスに親和性がある。比較的高い屈折率を有し、強い光閉じ込め効果と低損失導波路としての実績もあり、TE-TMモード変換器での動作実証報告がある。本研究では産総研で成膜された Si_3N_4 薄膜を用いて素子試作を行った。試作素子は Si_3N_4 コア層厚300nm、リブ高さ75nm、導波路幅2μmのリブ形導波路上に、周期471nm、領域長300μmのグレーティングパターンをEB描画によって形成し、RIEによって20nmエッチングしたものである。

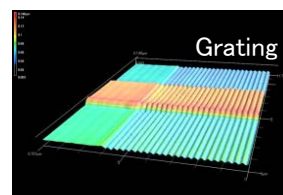


図4 Si_3N_4 グレーティング導波路

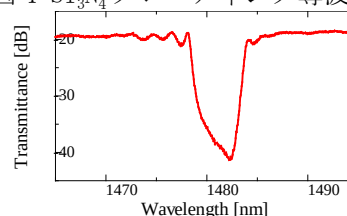


図5 Si_3N_4 グレーティング導波路の波長特性測定結果

図4にキーエンス製レーザ顕微鏡を用いた Si_3N_4 グレーティング導波路の観察結果を示す。図5にFLC装荷前のAirクラッド時の Si_3N_4 グレーティング導波路の波長特性測定結果を示す。グレーティングの阻止帯域中心波長1481.2nm、阻止帯域幅5.2nmであった。

本研究過程でFLC装荷位相可変シフタ導波路をグレーティング領域 (DBR : Distributed Bragg reflector) で挟んだ可変波長フィルタを着想し、基礎研究を開始した。このDBR型波長可変フィルタは、Bragg条件を満たす阻止帯域内に高密度波長分割多重 (DWDM : Dense WDM) の1チャンネル分の波長選択が可能である。 Si_3N_4 コア層を用いて試作した導波路型DBR共振器の鳥瞰図を図6、FLCL非装荷のAirクラッド状態で測定した波長特性例を図7に示す。また、同一チップ上に導波路幅を変えて製作した導波路型DBR共振器のFSR、透過帯域幅、消光比、Q値をまとめた結果を表1に示す。いずれにおいても阻止帯域内に幅1nm程度の透過帯域が得

られている。さらにこれらの結果を用いた数値解析により、 Si_3N_4 を用いたDBR型波長可変フィルタは従来用いていたSiコアで構成した素子と比較して小型化することを明らかにした。

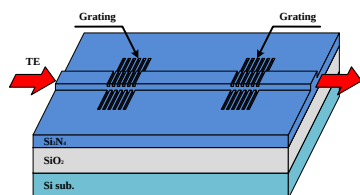


図6 Si_3N_4 導波路型DBR共振器

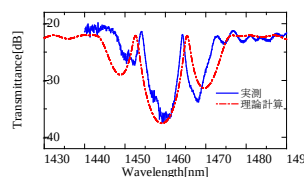


図7 波長特性の測定結果

表1 Airクラッド状態の Si_3N_4 導波路型DBR共振器の評価結果

導波路幅	波長	FSR	消光比	透過帯域幅	Q値
3 μm	1462nm	10.1nm	10.6dB	1.0nm	1461.5
4 μm	1464nm	10.1nm	11.6dB	1.1nm	1331.2
5 μm	1466nm	10.3nm	13.3dB	1.0nm	1466.1

4.2.2 Nb_2O_5 コア層グレーティング導波路

本学ナノテクノロジー室に導入した反応性DCスパッタ装置を用いて導波路形成技術の開発を開始した。レンズ等の無反射コーティングに用いられる Nb_2O_5 、 SiO_2 多層膜形成条件をもとに低温かつ高成膜レートで低損失な導波路の形成条件の確立を目指している。コア層厚300nm、リブ高さ50nm、導波路幅2 μm の設計で試作した Nb_2O_5 導波路の出射光の近視野像を図8に、導波路の伝搬特性を表2に示す。これまで我々が製作してきたSi導波路に比べてファイバとの結合損失、伝搬損失の低損失化が図れた。

表2 導波路幅2[μm]における損失

	Si	Nb_2O_5
結合損失	8.38[dB/端]	6.58[dB/端]
伝搬損失	0.83[dB/mm]	0.10[dB/mm]

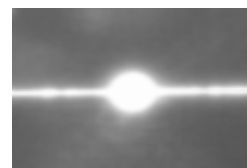


図8 Nb_2O_5 導波路の近視野像

導波路試作で用いたプロセス条件をもとにリブ型導波路を製作後、干渉露光によるグレーティングを形成し、 Nb_2O_5 グレーティング導波路を試作した。グレーティング周期416nm、グレーティング深さが20nm、グレーティング領域長400 μm とした。なお、上部クラッドとしてFLC材料であるFELIX-016/100を装荷した。図9にFLC装荷 Nb_2O_5 グレーティング導波路の構造図、図10にFLCへの印加電圧極性変化に対する波長特性を示す。図10より、実際に製作したデバイスで0.8nmの波長シフト量を得ることができ、 Nb_2O_5 をコア層に用いたFLC装荷グレーティング導波路で、動作実証に成功した。今後は液晶装荷した素子の試作及び動特性を測定するとともに、消光比やFSRの改善、構造パラメータの最適化を行い、さらなる小型化、波長選択性の向上に向けて進めていく予定である。

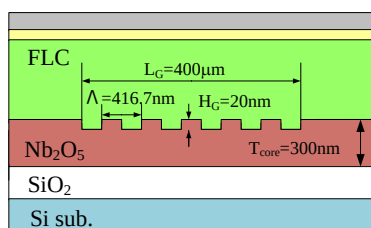


図9 FLC装荷 Nb_2O_5 グレーティング導波路の構造

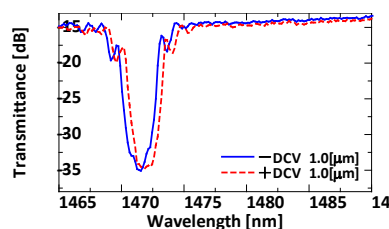


図10 実測波長特性

4.2.3 高密度集積化に向けた非相反光デバイスの基礎研究

コンタクトエピタキシャル法の熱処理温度およびコンタクト圧力等の条件探索を行い、シリコン上のCe:YIG薄膜の特性評価を行った。コンタクトエピタキシャルプロセスの前後の表面観察用にSiO₂上へ成膜したCe:YIG薄膜の表面写真を図11に示す。成膜したCe:YIGの膜厚は440nmであり、スパッタリング後の非晶質状態は濃い茶褐色の不透明な状態で、一方、温度800℃、圧力1N/m²の条件でコンタクトエピタキシャルプロセスを行った試料は薄緑色の透明な状態となった。

シリコン基板上に成膜したCe:YIG薄膜を用いてコンタクトエピタキシャルプロセスを実施し、X線回折により結晶性を評価した。図6に測定したX線回折の回折角-回折強度特性を示す。シリコン基板上に成膜したまま未処理のCe:YIG薄膜および種結晶SGGG片とのコンタクトなしに熱処理したCe:YIG薄膜と比較し、コンタクトエピタキシャル法を施したシリコン上のCe:YIG膜から強いX線回折のピークが得られ、結晶性の向上が示された。また、波長1550nmの光を用いて磁気光学特性の指標となるファラデー回転の測定を行った。表2に測定結果を示す。コンタクトエピタキシャル法を施したCe:YIG薄膜では-1960deg./cmのファラデー回転係数が得られ、ガーネット基板上にエピタキシャル成長した単結晶Ce:YIGの-4500deg./cmに対して43%程度であるが、コンタクトエピタキシャル法を施すことで磁気光学効果を発現すること明らかにした。

5. 今後の計画

反応性DCスパッタリング装置を用いた高屈折率酸化物材料の成膜は、シリコンフォトニクス技術によって得られる小型化、高密度集積化、低コスト化という長所を活かしつつ、導波路コア部周辺の材料と導波路伝搬光との相互作用の増大をもたらす。特にNb₂O₅はレンズの無反射コーティングにも用いられ、化学的な安定性を有し、液晶、磁気光学材料およびセンサでの検出対象物質等と導波路伝搬光の相互作用の増大が見込まれる。今後、Nb₂O₅を用いた低損失導波路の形成技術の確立後、グレーティング導波路を組み込んだ、マッハツェンダー干渉計(MZI)導波路、フェーズドアレイ導波路を試作し、動作特性の評価を行う。また、併せて集積化に適した光アイソレータや光サーキュレータ等の非相反デバイスを実現し、シリコンフォトニクスの新機能創成を目指す。

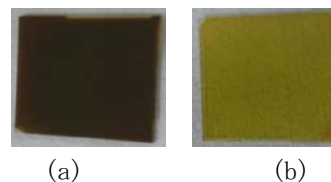


図11 SiO₂基板上に成膜したCe:YIG膜(a)成膜直後のCe:YIG膜<アモルファス>、(b)コンタクトエピタキシャルプロセス後のCe:YIG膜

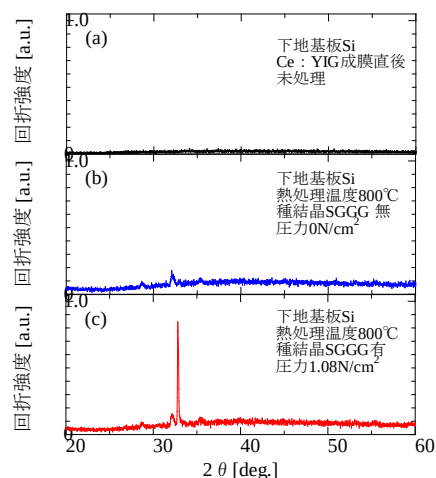


図6 X線回折結果

(a)成膜直後のCe:YIG膜<アモルファス>、(b)熱処理のみのCe:YIG膜、(c)コンタクトエピタキシャルプロセス後のCe:YIG膜

表2 Ce:YIG薄膜のファラデー回転係数

下地基板	処理温度 [°C]	種結晶	圧力 [N/cm ²]	回転量 [deg./cm]
Si	未処理	無	—	0 [*]
SiO ₂	800	有	1.08	-1620
Si	800	有	1.08	-1960

[*]測定限界以下

6. 研究成果の発表

- (1) 榑原 健太郎, 稲森 翔, 武田 正行, 中津原 克己, “可変波長フィルタのための強誘電性液晶装荷 Nb_2O_5 導波路の検討”, 第64回応用物理学会春季学術講演会, 16a-316-6, 横浜, 2017.3.16.
- (2) 岩田将輝, 野毛悟, 中津原克己, “集積型光アイソレータ実現のための薄膜形成条件の検討,” 電子情報通信学会 総合大会, C-6-4, 名城大, 愛知, 2017. 3. 24.
- (3) 中津原 克己, “強誘電性液晶を用いたシリコンフォトニクスデバイス”, スマートインフォメディアシステム研究会, SIS2016-53, 2017.3.2. [招待講演]
- (4) 稲森 翔, 榑原 健太郎, 武田 正行, 山本 宗継, 中津原 克己, “液晶装荷可変波長フィルタのための Si_3N_4 を用いた導波路型DBR共振器の波長特性”, 光エレクトロニクス研究会, OPE2016-108, 石垣, 2016. 12. 8.
- (5) W. Kanakubo, K. Nakatsuhara, M. Takeda, “Fundamental operation of a phased array switch using ferroelectric liquid crystal claddings”, OECC/PS2016, ME1-3, Niigata, 2016. 7. 4.
- (6) 稲森 翔, 榑原健太郎, 加藤亜希文, 武田正行, 山本宗継, 中津原克己, “DBR構造を用いたFLC装荷 Si_3N_4 導波路型共振器の基礎検討”, 光エレクトロニクス研究会, P1-3, 熱海, 2016. 4. 21.
- (7) 飯島 夏来, 清藤 将人, 武田 正行, 中津原 克己, 野毛 悟, 水本 哲弥, “コンタクトエピタキシャル法を用いたCe:YIG膜形成のためのSi導波路製作プロセスの検討”, 光エレクトロニクス研究会, P1-2, 熱海, 2016. 4. 21.

[展示会出展]

科学と技術のひろば, 沼津, 2016年11月.

バイオマス由来のフラン含有高分子の合成

応用化学科 森川 浩

1. 研究の目的

環境にやさしい高分子の合成法構築は、社会的要請の大きなテーマである。本計画は、バイオマス由来の高分子として、フラン環を有する高分子化合物を新規に合成する内容である。既存のポリ乳酸を凌ぐバイオマス由来のフラン含有高分子の創製をめざし、基礎研究を行う。

2. 研究の必要性及び従来の研究

バイオマス由来のプラスチック及び高分子材料は、炭素循環の点から最も材料創製として要望がある。循環型社会構築の時代の要請でもある。現在、でんぷんやトウモロコシを原料とするポリ乳酸は最も普及が進んだバイオマス由来の高分子である。しかし、ポリ乳酸は、本質的に耐熱性が低い ($T_g = ca. 60^{\circ}C$)、その構造が極端にシンプルであるがゆえに化学変換・化学修飾が難しい。したがってポリ乳酸に関しては、他のモノマーとの共重合や他のポリマーとのブレンドが行われている。もう一方では、他の「新たな」バイオマス由来の高分子が模索されており、その中でもフラン骨格を有する高分子化合物は、フラン樹脂として昔から用いられ、古くて新しいバイオマス由来の材料である。

五単糖や六単糖を原料として酸性下で脱水させることにより、フルフラールやヒドロキシメチルフルフラール HMF が生成することが報告されている。フルフラールや HMF は、医薬・農薬原料、バイオ燃料原料やプラスチック原料となるために、バイオマスからの効率的合成法が、近年新たに脚光を浴びている (*Nature*, 2007, **316**, pp.1597)。さらに、HMF をさらに酸化させた 2,5-フランジカルボン酸では、エチレングリコールとの縮合重合により、ポリエチレンテレフタレート PET に準じたフラン含有ポリエステルが合成され、PET との物性の比較検討が研究されている (*Macromolecules*, 2014, **47**, pp.1383)。

3. 期待される効果

下記の事項により、フラン環含有高分子は優れた熱/力学物性を有することが期待される。

- (1) フラン環は芳香族性を有するために、比較的耐熱性や力学物性がよい。
- (2) HMF などのフラン環の 2,5-位の置換基を変化させることで、様々な二官能性モノマーとなる。
- (3) 上 (2) のモノマーを反応させることで、エステルやアミドなどの様々なスペーサーを高分子内に導入できる。

フラン環は芳香族性を有するので比較的安定であるが、合成条件が厳しくなると副反応を起しやすい (着色化、黒色化しやすい)。したがって、フラン含有高分子の合成の方法論

の一つを確立することは、バイオマス由来の高分子合成において大きな意味をもつ。

4. 研究の経過及び結果

(1) ポリエステルの合成

主鎖だけではなく側鎖にもフラン環を有するポリエステルの合成(図 1, **P-I**)を試みた。側鎖にもフラン環を有する事で、含有しないものと比べ非晶性が増し、物性の変化(溶解性、透明度など)が期待される。原料のジオール **FDL** は、バイオマスのフルフラールより合成した。

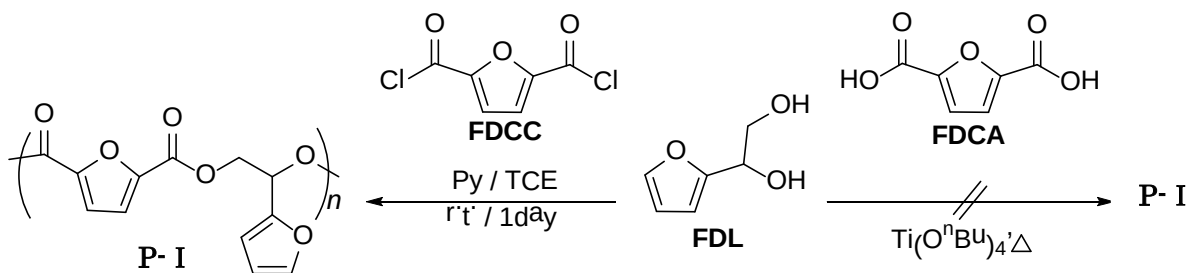


図 1. ポリマーの合成

ポリエステル **P-I** の合成では、テトラブチルチタネートを触媒として **FDCA** と **FDL** を用い、縮合反応を行った(図 1 右)。また、別の合成ルートとして、ジカルボン酸塩化物である **FDCC** を用い、**FDL** との縮合反応を行った(図 1 左)。

図 1 右に示す「ジカルボン酸体 **FDCA** と **FDL** の重合」では、その反応温度が 120°C 以上ではフラン環が分解してしまった。一方、90°C 以下では反応が進行しなかった。そこで、反応性の高いカルボン酸塩化物である **FDCC** を用い、**FDL** と溶液重縮合させた(図 1 左)。この反応では、メタノール不溶分として **P-I** が得られた(収率 46%)。この **P-I** の ^1H NMR の結果(下図 2)から、各ピークと構造が対応したため、目的化合物ができたと判断した。

また、GPC 測定の結果から数平均分子量は 2000 であり、MS スペクトルの結果から、**P-I** の環状構造体が主として存在した。

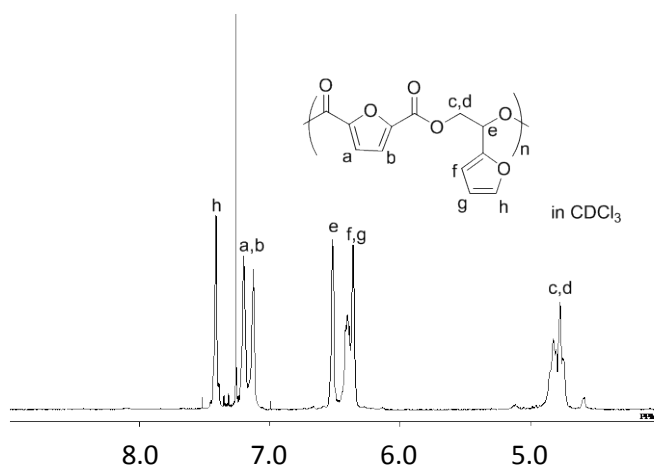


図 2. ポリエステル **P-I** の ^1H NMR (in CDCl_3)

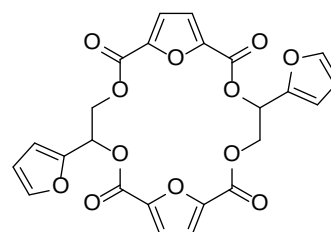


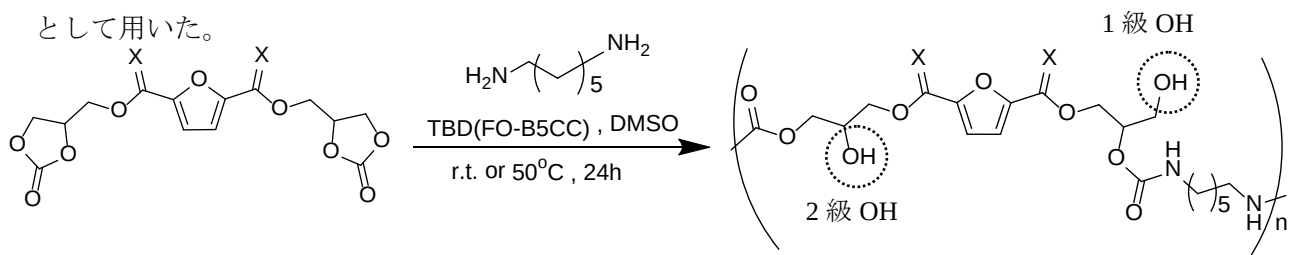
図 3. ポリエステル **P-I** の環状構造の例(二量体)

例えば、図 3 のような二量体環状構造に Na 付加した場合の分子量 519.1 (計算値) に対し、519.1 のピークが検出された。

また、**P-I** はクロロホルムに溶解したことから、側鎖にフラン環を持つことによる溶解性の向上が確認できた。

(2) 環状カーボナートからのポリウレタンの合成

バイオマス由来のフラン化合物を原料とし、CO₂と反応させて二官能性の五員環カーボナートを合成した。この五員環カーボナート 5CC をジアミンと重合させ、ポリウレタンの合成を試みた。原料モノマー合成として、対応するエポキシドと CO₂を反応させて、エステル化合物 FE-B5CC、エーテル化合物 FO-B5CC を 3~4 段階で合成した (図 4)。重合反応として、等モル量の B5CC 体とジアミノヘキサンを DMSO 中で重合させて、再沈殿を行い、ポリウレタン合成を試みた。反応温度は FE-B5CC (実験 1 とする) の場合には室温で、FO-B5CC (実験 2 とする) の場合には 50°C とした。また、実験 2 では TBD 10mol% を触媒として用いた。



実験 1 : FE-B5CC (X=O)

P-(FE-B5CC) (X=O)

実験 2 : FO-B5CC (X=H₂)

P-(FO-B5CC) (X=H₂)

図 4.ポリウレタンの合成

実験 1 では、重合反応液の ¹H NMR の結果から、アミンは FE-B5CC の 5CC 部位と反応せずに、エステル部位と反応することがわかった。また、IR 測定では、アミンがエステル部位に反応した場合のアミド部位 (-CO-NH-) に基づくピークが 1579 と 1653 cm⁻¹に観測された。以上から、対応するポリウレタンは合成できなかった。

実験 2 では、5CC 部位は定量

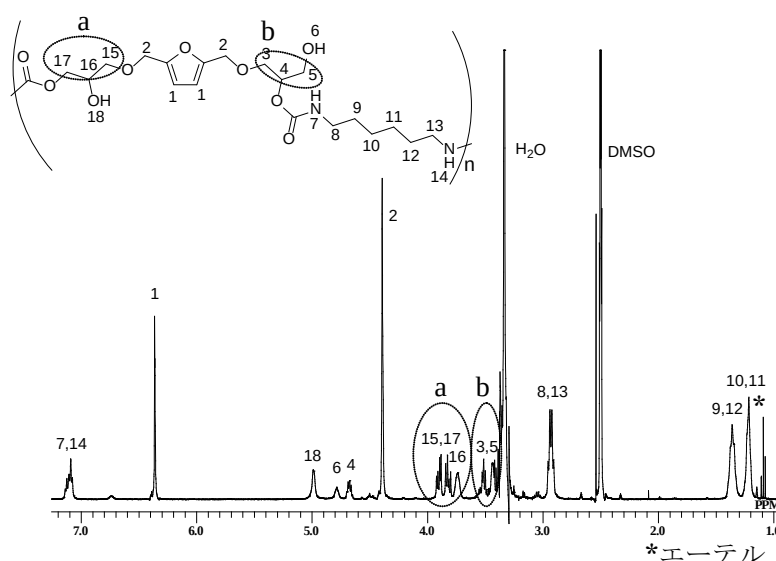


図 5. P-(FO-B5CC) の ¹H NMR (in DMSO-d₆)

的に反応し、P-(FO-B5CC)を収率 72%で得ることができた。得られた P-(FO-B5CC)の構造を HH-COSY 等を用いて構造を決定した (図 5)。領域 a に 2 級アルコール部位、領域 b に 1 級アルコール部位のピークが観測された。その面積比から、1 級アルコール部位は 25%、2 級アルコール部位は 75%であった。IR 測定の結果から、ウレタン構造のピークが 1699 cm^{-1} に確認されたため、目的のポリウレタンが合成されていることが分かった。このポリウレタンをアセチル化したポリマーを GPC 測定した結果、数平均分子量は 3460 であり、重合度は大きく伸びていないと思われる。

5. 今後の計画

上記の (1) (2) のいずれのポリマー合成でも、代表的な反応条件でのみ重合を行った。したがって、種々の反応条件を検討し、得られるポリマーの分子量が大きくなる条件を探す。

また、(2) のウレタン合成においては、ジアミンとして、ヘキサンジアミンでのみ重合を行った。今後は、デカンジアミンやプロパンジアミンなどのアルキル鎖長の異なるジアミンを用いて重合を行う (得られるポリマーの結晶性やガラス転移温度が異なるはずである)。化学構造と物性との相関を定性的に明らかとする。

6. 研究成果の発表

(1) S. Motokucho, H. Morikawa, H. Nakatani, B. J. Noordover, *Tetrahed. Lett.*, **2016**, 57, 4742.

(2) 今後、学会発表予定

マグネシウム電池による発電と海水のアルカリ化

電気電子情報工学科 瑞慶覧章朝

1. 研究の目的

ディーゼル排ガス中の SO_2 は大気汚染物質であり、これを除去するためには、アルカリ性の海水に吸収させるのが有効である。本研究では、マグネシウム電極を利用し、低消費電力で海水のアルカリ度を $200 \text{ mg-CaCO}_3/\text{L}$ に上昇させる新しい電解処理装置の開発に取り組む。

昨年度までに、海水を溶液として用い、マグネシウム空気電極を使用した電解処理が、他の方法と比べエネルギー効率の面で有効であることを明らかにしてきた、本年度は、アルカリ度を上昇させた海水を用いて、ガス中の SO_2 の除去効果について検討したので、報告する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

国際海事機関が条約を発効し定めている船舶排ガス中の SO_x の低減に対して、海水による SO_x 吸収が実用化されている。

我々は海水の SO_x 吸収効率を向上させるため、2010 年度から電解処理による海水のアルカリ化について研究をすすめてきた。当初の目的は、実機換算で消費電力 120 kW 以内、電解槽容量 10 m^3 以内で海水のアルカリ度を $200 \text{ mg-CaCO}_3/\text{L}$ にすることであった。その結果、①実験設備（水槽、電極、電源、各種測定器、各種薬品）の完成、②食塩水、模擬海水、実海水の電解における化学反応プロセスの解明、③隔膜の効果、④マグネシウム電極の効果、⑤空気電極の効果を明らかにし、海水量を半減すること及び電解槽を 10 m^3 にすることにはある程度のめどがついた。さらに、開発初期 2010 年度における消費電力は実機換算で 1500 kW であったのに対し、昨年度までに 55 kW まで改良でき当初目標をクリアした。

3. 期待される効果

本研究は、マグネシウム電極による電池作用を利用しており、海水のアルカリ化は十分に可能であることが明らかになった。本装置が実現すれば、電源設備が不要か極めて小さな電解処理が可能となり技術的にも実用的にも革新的である。船舶排ガスによる大気汚染の防止に極めて大きな効果をもたらす新技術である

4. 研究の経過及び結果

4. 1 実験方法

実験システムを図1に示す。濃度 400 ppm の SO_2 ガスをスクラバ装置内の溶液(300 mL)に 1.0 L/min の流量でバブリングした。スクラバはアクリル製の容器(100×100×370 mm)でできている。スクラバ装置の前後の配管を切り替え、入口と出口の SO_2 濃度を赤外吸収法を用いたガス分析計(堀場製作所、PG350)にて測定し、除去率を(1)式から求めた。ただし、ガス分析計の上流側にはデミスター(堀場製作所、VS3000)を設け、ガス中の水分を除去している。

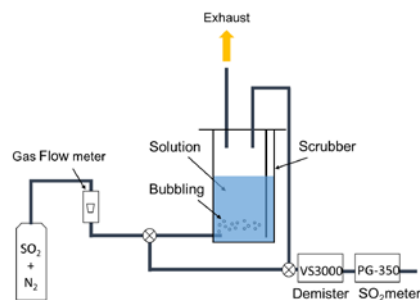


図1. 実験システム

$$\eta = \left(1 - \frac{\text{スクラバ出口 } \text{SO}_2 \text{ 濃度 [ppm]}}{\text{スクラバ入口 } \text{SO}_2 \text{ 濃度 [ppm]}} \right) \times 100 [\%] \quad \cdots (1)$$

スクラバ溶液には、純水、模擬海水(マリンアート・スーパーフォーミュラ、富田製薬(株))、電解海水を使用した。電解海水は、模擬海水をマグネシウム電極を用いた電解装置で処理し生成した。電解海水のアルカリ度は約 200 mg- CaCO_3/L とした。なお模擬海水のアルカリ度は約 100 mg- CaCO_3 である。

4. 2 結果及び検討

1) 電解処理によるアルカリ度の変化

電解処理によるアルカリ度上昇量と電解時間の関係を図2に示す。ただし、電解装置は参考文献1に示したものを使用し、電極は陽極にマグネシウム、陰極にカーボンを用いた。電極間隔は 50 mm、電流密度は 33.3 mA/cm² 一定とした。電解開始とともにアルカリ上昇量は増加し、約 5 分で上昇量は 100 mg- CaCO_3 となっている。海水のアルカリ度は約 100 mg- CaCO_3 なので、海水を 5 分間電解処理することで、アルカリ度は 2 倍の 200 mg- CaCO_3 となる。

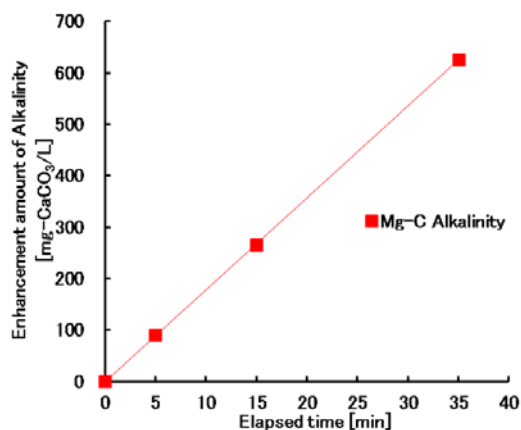


図2. アルカリ度上昇量と電解時間の関係

以下の SO_2 除去の検討では、5 分間電解処理した海水を用いた。

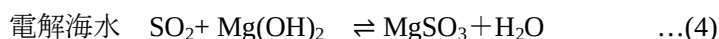
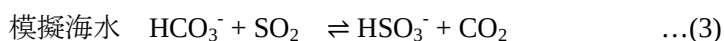
参考文献1) 乾 他, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 50 巻, 第 1 号, pp. 113-118 (2015)

2) SO_x 除去性能

純水、模擬海水及び電解海水を用いたときのスクラバによる SO_2 除去プロセスを(2)～(4)

式に示す。除去プロセスは、スクラバに用いる溶液によって変化する。純水をスクラバ溶液に使用した場合、(2)式のようにガス中の SO_2 が H_2O と反応し、 HSO_3^- となることで SO_2 が除去される。この際、水分子と反応しきれなかった SO_2 はそのまま大気中に放出される。これに対し、たとえば HCO_3^- などのアルカリ物質を含む海水を溶液に用いた場合、(2)式の反応に加え、(3)式で SO_2 が HCO_3^- と反応し、 HSO_3^- と CO_2 を生成する。同じ溶液量であれば、高い SO_2 除去率を純水よりも海水の方が長時間維持できると考えられる。

海水を電解処理するとアルカリ物質である $\text{Mg}(\text{OH})_2$ が生成される。このため、(2)と(3)式に加え、(4)式で SO_2 が $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と反応し、 MgSO_3 と H_2O を生成する。高い SO_2 除去性能を海水よりもさらに長く維持できると考えられる。



スクラバによる SO_2 除去率と処理時間の関係を図3に示す。純水時の SO_2 除去率は、 SO_2 ガス流入開始時が約 100 % であり、時間の経過と共に低下している。純水中で SO_2 が除去されるのは、前述のように(2)式の反応によるものである。

これに対して、模擬海水時の場合、ガス流入開始後約 35 分間は高い除去率を維持し、その後低下している。これは、(2)式に加え(3)式の反応が追加になったためである。初期の約 35 分間は、(3)式の反応によりガス中の SO_2 が除去され、その後は(2)式の反応が進んでいると考えられる。

電解海水の場合、ガス流入開始後約 70 分間は高い SO_2 除去率を維持し、その後純水、模擬海水と同様に低下している。(4)式の反応が追加されたためである。これらの結果から、電解海水の SO_2 除去に対する有効性が明らかである。

ここで、高い SO_2 除去率を維持する時間は、模擬海水が約 35 分、電解海水が約 70 分であり、電解海水は模擬海水の約 2 倍となっている。これは、純水、模擬海水及び電解海水のアルカリ度が 0, 100 及び 200 mg-CaCO₃ であり、電解海水は模擬海水よりも 2 倍のアルカリ度を有するためである。データ数は少ないが、 SO_2 除去性能が海水中のアルカリ度と比例関係にあることが示唆される。

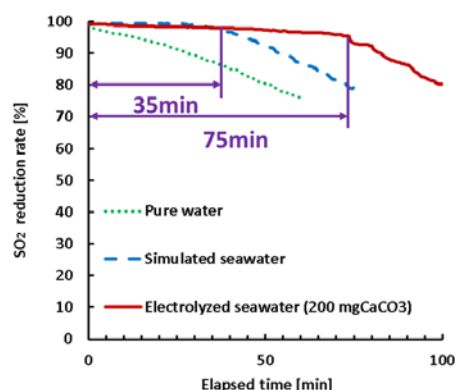


図3. スクラバによる SO_2 除去率と処理時間の関係

5. 今後の計画

本研究の目的を達成するため、今後は実用サイズの検討を進める予定である。

6. 研究成果の発表

学術論文（査読付）

- 1) 乾貴誌、豊角浩之、浅川大輔、瑞慶覧章朝、澤井淳、當山広幸、江原由泰、「海水のアルカリ化に対する2室電解処理法によるエネルギー効率向上」、日本マリンエンジニアリング学会誌、51(4),118-123頁, 2016

学会発表

- 1) 須藤耀介, 瑞慶覧章朝, 澤井淳, 豊角浩之, 乾貴誌, 「電解処理海水を用いたスクラバによるディーゼル排ガス中の SO_2 除去」, 第86回（平成28年）マリンエンジニアリング学術講演会(姫路商工会議所), 2016
- 2) 深谷諒, 瑞慶覧章朝, 澤井淳, 乾貴誌, 「海水の電解による水素生成」, 第86回（平成28年）マリンエンジニアリング学術講演会(姫路商工会議所), 2016

ナノセカンドパルスコロナによる空気殺菌技術の研究開発

電気電子情報工学科 瑞慶覧章朝

1. 研究の目的

本研究では、電気集塵装置（以下、ESP）にて高効率で空気中から浮遊菌を捕集し、さらに捕集した菌をナノセカンドパルスコロナ放電を用いて殺菌することを最終目的としている。

これまでに、実験装置の設計製作、パルスコロナ放電の確認を行った。また、パルスコロナの比較対象として、直流コロナ放電時における殺菌特性を検討してきた。その結果、直流コロナ放電に殺菌効果があること、加湿によってその効果が向上し、特に相対湿度が85%以上で殺菌効果が著しく向上することが分かった。

本年度は、直流コロナ放電による殺菌プロセスについて検討したので報告する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

病院などの一般公共施設や食品関係など多くの工場では、病原性微生物の感染リスク低減向け、様々な殺菌方法が利用されている。殺菌法としては、高圧水蒸気滅菌、酸化エチレンガス滅菌、放射線滅菌など様々であるが、従来の滅菌・殺菌方法に変わる技術として、近年、プラズマ利用が注目されている。

そのなかで、空気中の浮遊菌に対する殺菌に対しては、プラズマで生成した活性種を放出する方法が用いられている。しかし、この方法は、例えば1 m³程度の非常に小さな空間では効果が示されるものの、一般的な居住空間では、ほとんど効果がないことが明らかとなっている。これは、人体への影響を考慮し、活性種の濃度を低くしているためであると考えられる。よって、病院待合室や一般家庭などの空気中の浮遊菌を効果的に除去し殺菌する技術が切望されている。

3. 期待される効果

直流またはパルスコロナ放電を利用し、数 10nm～数 μ mの超微小な浮遊菌を高効率に帯電させ確実に捕集する。また、放電により生成された活性種によって捕集した菌を高効率で殺菌する。

4. 研究の経過及び結果

4. 1 実験装置

実験装置の概略を図 1 に示す。装置は、二段式 ESP を模擬し、放電部と静電部で構成し

た。放電部は、高圧印加用線電極 1 本と接地平板電極 2 枚で構成した線対平板電極構造とした。高圧印加用線電極の直径は 0.26 mm、接地平板電極(厚さ 1 mm)長は 100 mm、電極間隔は 10 mm とした。電極間に DC-8.5 ~ -9.0 kV (放電電流は 0.018 ~ 0.019 mA)を印加し、ESP 内のオゾン濃度を約 1 ppm に調整した。静電部は電極間隔 10 mm の平行平板電極構造であり、電極間に DC -5 kV を印加した。装置内湿度は常湿時を 5 ~ 75 %、加湿時を 75 ~ 95 %とし、温度は 20 ~ 30 °C、装置内の風速は 0.5 m/s とした。

使用する菌は、黄色ブドウ球菌とした。菌の原液を希釈し、0.02 ml を放電部接地平板電極上に 25 mm 間隔で 3 箇所(Location 1 ~ 3)、静電部接地平板電極上に 43.5 mm 間隔で 3 箇所(Location 4 ~ 6)に塗布した。菌の自然死滅を考慮するため、上流部に Ctrl を設置した。その後、0.5 h 自然乾燥させ、高電圧を 1 h 印加した。電圧印加後、ラスパーチェックで各電極上の菌を拭き取り、寒天培地で 24 h 培養後コロニー数をカウントし、生菌率を求めた。

装置内の ROS の分布を観測するため放電部及び静電部の接地平板電極上に ROS 呈色用の寒天を設置した。寒天の厚みは 1 mm とし、コロナ放電に 10 min 暴露した。この寒天は、ROS と反応すると黒紫色に呈色されるため、電極表面の ROS 分布が観測できる。

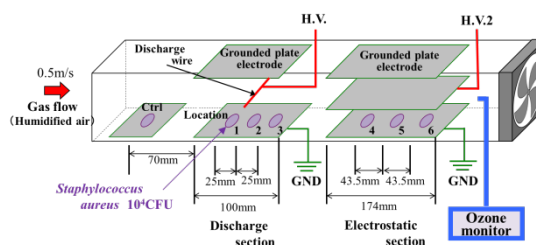


図 1．実験装置の概略

4. 2 結果及び検討

各 Location における生存率に対する加湿の効果を図 2 に示す。図中のエラーバーは標準偏差を表している。常湿時の放電部の Location 1 では、生存率は 1.04 であり、ほとんど殺菌されていない。一方、Location 2 と 3 では、生存率は 0.24 と 0.32 であり、殺菌効果が得られている。また、静電部の Location 4 ~ 6 の生存率は 0.87 ~ 0.94 であり、殺菌効果は認められない。

これに対し加湿時では、Location 1 の生存率は 1.00 以上となっており、殺菌効果は認められないものの、Location 2 ~ 6 の全てで生存率は 0.30 以下であり、著しく殺菌効果が向上している。

これらの結果の要因を検討するため接地電極表面における ROS 分布を観測した。常湿時における ROS の分布を図 3 に示す。図中には、各 Location の位置を示してある。呈色

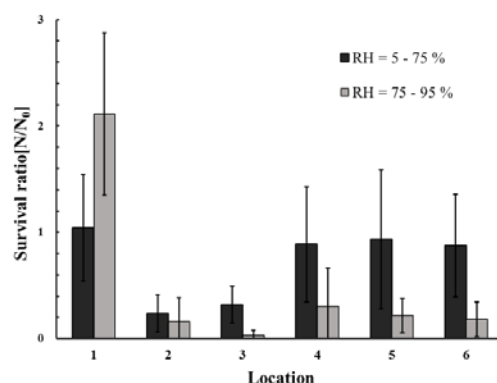


図 2．各 Location における生存率に対する加湿の効果

反応の濃い箇所ほど、ROS が多く存在していると考えられる。a)の放電部では、放電線直下の Location 2 及びその下流の Location 3 における呈色反応が濃い、上流部の Location 1 では、呈色はみられない。このことから、図 2 の Location 2 と 3 で殺菌効果が得られたのは、ROS が十分に存在していたためといえる。b)の静電部においても、呈色反応が確認されたが、いずれの Location においても、放電部の Location 2 及び 3 と比べて薄い。このことから、静電部接地電極表面には、十分な量の ROS が到達していないため、殺菌効果が得られなかったといえる。

加湿時における ROS の分布を図 4 に示す。a)の放電部及びb)の静電部ともに呈色反応が確認できた。しかし、図 3 の常湿時と比べると呈色の濃さに特徴的な変化はなく、接地電極表面にける ROS の存在量は、常湿時と同等といえる。これらの結果から、図 2 に示された加湿による殺菌効果の向上は、ROS の存在量ではなく、他の要因によると考えられる。

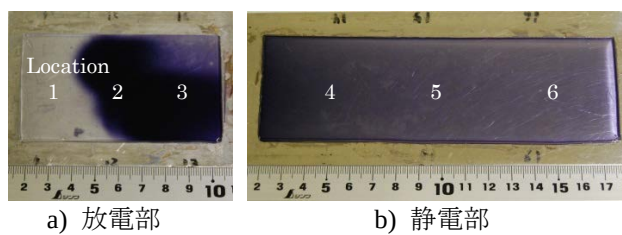


図 3. 加湿なし時の ROS 分布

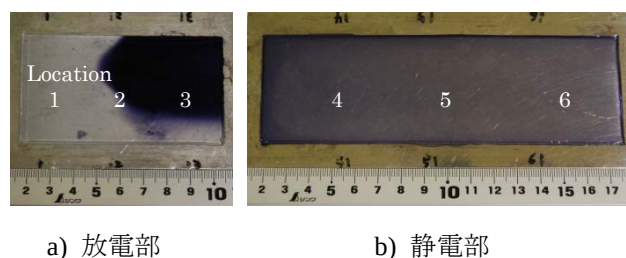


図 4. 加湿時の ROS 分布

5. 今後の計画

今後は、加湿時の殺菌プロセス及びパルスコロナによる殺菌効果とそのプロセスについて検討していく必要がある。

6. 研究成果の発表

学術論文（査読有）

- 1) A. Zukeran, T. Miura, T. Oku, R. Mano, H. Miyashita, R. Wada, J. Sawai, Y. Ehara, Humidification effect on inactivation of *Staphylococcus aureus* in an electrostatic precipitator, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, Vol. 10, No. 2, 2016/12, pp. 181-185

学会発表

- 1) Soma Toguchi, Ryo Oi, Munehiro Shiraishi, Akinori Zukeran, Risei Wada, Jun Sawai, “Investigation of inactivation process in an electrostatic precipitator by estimating protein quantitation”, European Aerosol Conference 2017, 2017（発表予定）
- 2) Koji Yasumoto, Akinori Zukera¹, Iori Kobayashi, Wada Risei, Jun Sawai, “Improving

inactivation effect for microorganisms in an electrostatic precipitator operated under low ozone concentration by humidification”, European Aerosol Conference 2017, 2017 (発表予定)

- 3) Akinori Zukeran, Ryo Ono, Iori Kobayashi, Risei, Wada, Jun Sawai, “Investigation of Inactivation Process for Microorganism Collected in an Electrostatic Precipitator”, The International Symposium on Electrohydrodynamics (Jun 19-21, Ottawa, Canada), 2017.
- 4) 鷺巣祐貴, 大井諒, 中田悠太, 和田理征, 澤井淳, 瑞慶覧章朝, 「電気集塵装置による捕集菌の殺菌と活性酸素種の分布の関係」, 第40回静電気学会全国大会(群馬大学), 2016
- 5) 大井諒, 小林生織, 中田悠太, 瑞慶覧章朝, 澤井淳, 和田理征, 「コロナ放電を用いて処理した菌の電子顕微鏡観察」, 日本防菌防黴学会第43回年次大会(品川区立総合区民会館), 2016
- 6) A. Zukeran, I. Kobayashi, Y. Nakada, T. Oku, R. Wada, J. Sawai, “Investigation Of Inactivation Process For Staphylococcus Ureus In An Electrostatic Precipitator”, 21st International Conference on Gas Discharge and Their Applications (Nagoya University, Nagoya, Japan), 2016
- 7) Ryo Oi, Iori Kobayashi, Akinori Zukeran, Risei Wada, Jun Sawai, “Investigation of inactivation effect by corona discharge using a fluorescence microscope”, 22nd European Aerosol Conference (Tours, France), 2016

有彩色照明光が生体に及ぼす非視覚的効果の検証

研究者：電気電子情報工学科 高橋 宏

1. 研究の目的

近年、LED 照明の普及に伴い、照明の光色が注目されている。しかし、これまでの照明光色に関する研究では、完全放射体軌跡に近い範囲の色温度を扱っており、LED 光源で再現が可能な、より鮮やかな光色範囲についての研究はほとんど行われていない。本研究では、有彩色照明光の応用利用を目標とし、照明光色が生体に及ぼす非視覚的効果の中でも「時間感覚」と「覚醒度」に着目した研究を行う。特に平成 28 年度は有彩色光と時間感覚の関係を明らかにすることを目的とする。有彩色光下で実作業を行い、計測している実作業時間と体感時間を比較することで、光色と時間感覚の関係を明らかにする。

2. 研究の必要性及び従来の研究

近年、照明技術の発展によって LED の低価格化が実現し広く LED 照明が普及しつつある。日本政府は、2020 年までに普及率 100%とする目標を掲げている。このことより、普段の生活でもこれまで以上に LED と多く接する機会が増えることが予想される。この LED 照明は一般的に昼白色や白色が使用されているが、フルカラーLED の登場により有彩色を簡単に使用できる環境にある。実際に光色制御可能な LED シーリングライトや LED 電球も市販されており、照明の光色は今後ますます注目されることが考えられる。過去には、青は精神的にリラックスできる色等、色による心理的影響があることが明らかにされている。日本各地でも青色防犯灯や自殺抑制効果を目的とした青色灯が鉄道の駅のホームに使われ始めている。このことから照明環境を変化させ心理的影響を変えることで、作業している時の集中力や思考力が変化するのではないかと考えられる。しかし、LED 光源で再現が可能な、鮮やかな光色がヒトに与える影響についての研究はほとんど行われていない。また、光環境が覚醒度へ及ぼす影響に関しては、数多くの研究がなされているが、色純度の高い有彩色光が覚醒度へ及ぼす影響は明らかにされていない。LED 光源で再現可能な有彩色光下での作業時は、通常の白色照明光下とは違い、作業中の覚醒度が変化することが予想される。

3. 期待される効果

LED 照明の普及に伴い、照明の光色についても注目されている。これまでの照明光色に関する研究では、完全放射体軌跡に近い範囲の色温度を扱っており、LED 光源で再現が可能な、より鮮やかな光色範囲についての研究はほとんど行われていない。

本研究は、有彩色照明光が生体に及ぼす影響をヒトの感覚と実作業の両面からアプローチする非常に独創的な研究である。特に、本研究で着目する時間感覚と光色の関係が明ら

かとなり、時間を短く感じる光色が明らかとなれば、病院の待合室など、待ち時間を要する環境への有彩色光の導入が期待できる。

4. 研究の経過及び結果

本研究では、有彩色照明光下で、読書・安静座位の作業を行い、その時の時間感覚を検討する。また、アミラーゼ測定、心電図測定、自覚症しらべを実施することで覚醒度合いを測定する。光色は白、赤、緑、青の4色であり、被験者は20代男性8名である。

作業内容である読書は、公平性を保つ為に各色で異なる内容の物を読み、光色と内容をランダムにする。内容は個人差が出ないよう教科書に載るようなものを採用した。安静座位は、安静状態で椅子に座る作業とした。

測定手順を以下に示す。

- (1) 実験内容について説明を実施する。
- (2) アミラーゼ測定、自覚症しらべを実施する。
- (3) 暗室にて11分間順応を実施する。
- (4) アミラーゼ測定を実施する。
- (5) 読書と安静座位時の作業を各14分間実施する。なお、それぞれの作業中に時間感覚の測定を実施する。
- (6) アミラーゼ測定、自覚症しらべを実施する。
- (7) (3)～(5)の間、心電図を測定する。
- (8) (1)～(6)の手順を赤、緑、青、白の各色でランダムに実施する。

図1に読書時の10分間の申告時間、図2に安静座位時の10分間の申告時間を示す。図1より、被験者の申告時間は全ての光色において、600秒よりも長いことがわかる。これは、被験者が時間を短く感じていることを示している。読書をすることで、読書作業に意識が集中するため時間感覚が短くなると考えられる。ここで、光色間で一元配置の分散分析を行ったところ、各光色間に有意差は見られなかった。図2より、被験者の申告時間は緑色光を除き、600秒よりも長いことがわかる。これは、緑色光の条件下でのみ被験者が時間を長く感じていることを示している。光色間で一元配置の分散分析を行ったところ、白色光と緑色光、青色光と緑色光の間では緑が有意($p < 0.05$)に申告時間が短く、時間感覚が長くなることが示された。

図3に心電図計測から得られた順応中と両作業中のLF/HF値の平均を示す。全光色で順応中より読書時にLF/HF値が減少する傾向がみられた。さらに、全光色で読書時よりも安静座位時にはLF/HF値が上昇する傾向がみられた。また、順応中は赤色光のLF/HF値が低いことが示された。しかし、時間感覚における光色とLF/HF値の間に関連はみられなかった。

図4に自覚症しらべの結果を示す。緑色のねむけ感と赤色と青色のぼやけ感に関しては

差が見られた。緑色は、色の効果としてリラックスさせる作用があるのでねむけ感が高くなったと考えられる。ぼやけ感に関しては、色の純度が高く、さらにこれらの光色は放射エネルギーが高い為、目に負荷がかかり、ぼやけ感が高くなったと考えられる。

アミラーゼ測定の結果からは、全光色においてストレス反応はみられなかった。

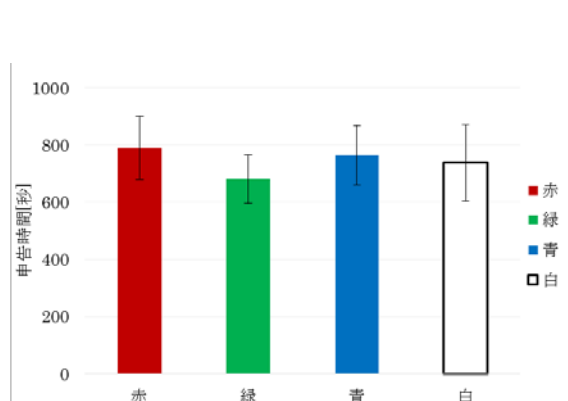


図1 読書時の600秒申告時間

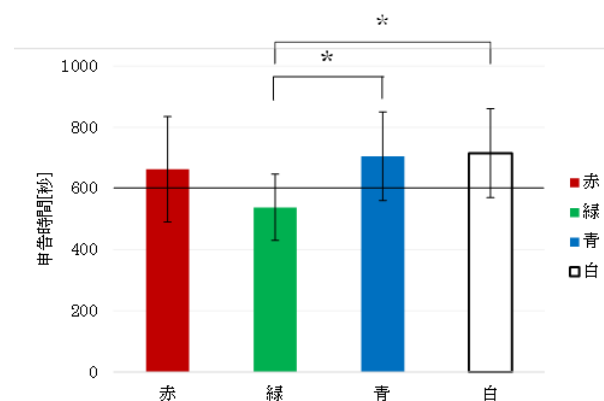


図2 安静座位時の600秒申告時間

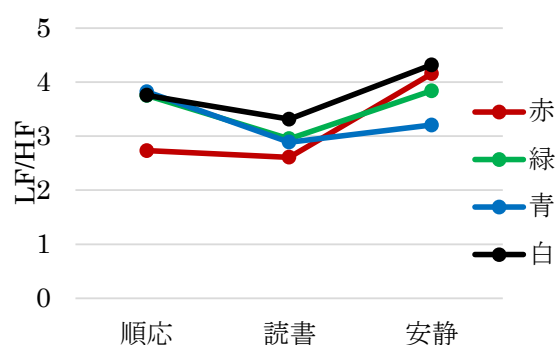


図3 各作業時のLF/HF値の平均

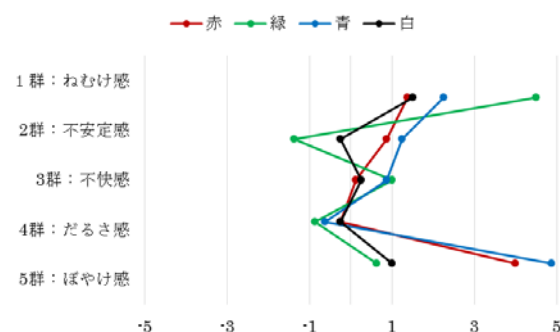


図4 自覚症しらべ結果

5. 今後の計画

本研究では、有彩色光が時間感覚に及ぼす影響の一部を確認することができた。しかし、過去に実施した結果とは異なる部分もあり、より詳細な検討の必要性が明らかとなった。今後の展望として、異なる色純度でのデータ数を増やすことでより詳細な時間感覚への影響が明らかになると考えられる。また、並行して覚醒度への影響も検討する予定である。

6. 研究成果の発表

- (1) Hiroshi TAKAHASHI, Shohei KOHAMA, Tomohito UETSUHARA 「Effects of chromatic color lighting on time sense」 KEER2016 (2016, 9)
- (2) Hiroshi TAKAHASHI, Hayato KIKUCHI 「Effects of high-purity LED light colors on time sense perception」 Lux Europa2017 発表予定

Effects of chromatic color lighting on time sense

Hiroshi TAKAHASHI¹, Shohei KOHAMA¹, Tomohito UETSUHARA¹

¹ Kanagawa Institute of Technology, Japan, htakahashi@ele.kanagawa-it.ac.jp

Abstract: The use of LED lighting has become widespread. LED light sources are manufactured in the primary colors of red, green, and blue, and are able to reproduce most chromatic colors. Chromatic color lighting is considered to have physical and psychological effects on humans. Therefore, the aim of this study is to investigate the time sense affected by chromatic color lighting. The experiments were conducted to test the effect of light color on the time sense in different working tasks. The result is suggested that green and red lighting seem to shorten the time sense, and green lighting is considered to be practical from the results of subjective evaluation scores.

Keywords: Chromatic color lighting, time sense, green lighting.

1. INTRODUCTION

The use of LED lighting has become widespread. LED light sources are manufactured in the primary colors of red, green, and blue, and are able to reproduce most chromatic colors. Chromatic color lighting is considered to have physical and psychological effects on humans. For example, blue lighting is reported as having the effect of suicide prevention [1]. Red lighting has an awakening effect. Some studies have reported that long-wavelength (red) light increases alertness in the daytime [2],[3],[4]. Katsuura [5] reported that experimental participants judged 180 seconds to be shorter in a red lighting environment than in a blue lighting environment. However, the comparison of white color lighting has not been previously studied. Therefore, the aim of this study is to investigate the time sense affected by chromatic color lighting.

2. EXPERIMENT

An experiment was conducted to test the effect of the lighting environment on different work tasks. An experimental work space with a desk was lit by LED light source and various colored films. The partition that created paste the white wallpaper in white styrene board was installed on the desk. The light source was adjusted to a height of 0.7 m from the desk surface. The illuminance was adjusted to 500 lx by a DC power supply. Table 1 shows the experimental conditions.

The general procedure of the experiment is presented in the following. Eight male participants are asked to perform six different tasks. Thinking task 1 is solving a Sudoku puzzle, in which players input numbers from one to nine into a grid consisting of nine squares, subdivided into a nine smaller squares, with the goal of ensuring that every number appears once in each row, column, and square. Each participant is asked to declare when he feels 180 seconds has passed since starting the task. The time sense of the participant is then compared to the actual time. Creative task A is creating a new application task. The participant is given a topic and is asked to suggest many ideas in 3 minutes. Creative task B is a “predict results” task, in which the participant is given an impossible situation as a topic and asked to suggest many ideas on the predicted results in 3 minutes. The concentration task is making a card tower. The participant makes a three-stage card tower. Thinking task 2 is a crossword puzzle. Each participant is asked to declare when he feels 300 seconds have passed, and this time sense is then compared to the actual time. Subjective evaluation tasks are evaluated by the semantic differential (SD) method. In the SD method, 16 pairs of words are employed in this study: able to concentrate/not able to concentrate, not uncomfortable/uncomfortable, not sleepy/sleepy, bright/dark, not oppressive/oppressive, warm/cool, calm/restless, stress-free/stressful, easy to work/difficult to work, rested eyes/tired eyes, feels short/feels long, easy to think/difficult to think, like/dislike, strong/weak, motivated/not motivated, not glaring/glaring).

The following procedure was used in the experiment:

- (1) The participant is given 10 minutes to adapt to the chromatic color lighting while performing a subjective evaluation task by the SD method before the experiment in the laboratory.
- (2) The participant performs thinking task 1.
- (3) The participant performs creative task A for 3 minutes.
- (4) The participant performs creative task B for 3 minutes.
- (5) The participant performs the concentration task.
- (6) The participant performs thinking task 2.
- (7) The participant performs the subjective evaluation task.

Steps (1) to (7) are repeated for each light colour at random to avoid the order effect.

Table 1: Experimental conditions

Light source	LED
Illuminance of work space	500 lx
Uniformity ratio of work space	0.9 or more
The height of light source	700 mm
Desk size	H:750 mm×W:1040 mm×D:730 mm
Chromaticity	White : (0.31, 0.33) Red : (0.64, 0.32) Green : (0.30, 0.56) Blue : (0.16, 0.16) Yellow : (0.47, 0.51)
participants	9 males in their 20s

3. RESULTS AND DISCUSSION

One-factor analysis of variance (ANOVA) was performed in this study. The factor was light color and multiple comparisons were performed by using Fisher's least significant difference (LSD) method. Analyses were conducted to determine significant differences between the white light and the other colors. The results are shown in the following figures. In the figures, the error bars represent the standard error.

Figure 1 shows the time senses for thinking task 1. The participants' declared times were over 180 seconds for all colors. This result indicates that the participants felt the time was shorter. Under green light and red light, the time was felt to be shorter than under white light. On the other hand, under yellow light, the time was felt to be longer than under white light. A significant difference ($p < 0.05$) was observed between the green light and yellow light.

Figure 2 shows the time sense for thinking task 2. The declaration times were over 300 seconds except under yellow light. This result indicates that the participants felt the time was shorter except under yellow light. Under red, green or blue light, the time was felt to be shorter than under white light. A significant difference was not observed in the thinking task 2 for each light color.

These results suggest that green and red lighting seem to shorten the time sense. Moreover, yellow lighting might lengthen the time sense.

Figure 3 shows the subjective evaluation scores. All evaluation scores for the white and yellow light were positive. Many of the evaluation scores for the red light were negative, and many of the evaluation scores for the green and blue light were positive. By comparing the green light and red light, it is suggested that the green light left a better impression than the red light, because the green light had a lot of positive subjective evaluation scores.

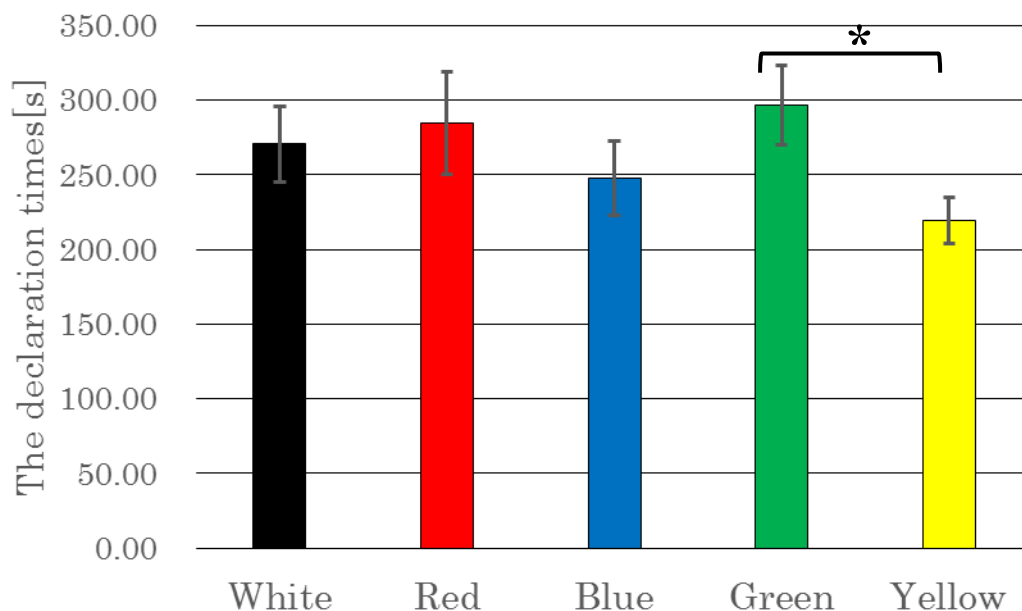


Figure 1: Declaration times for thinking task 1

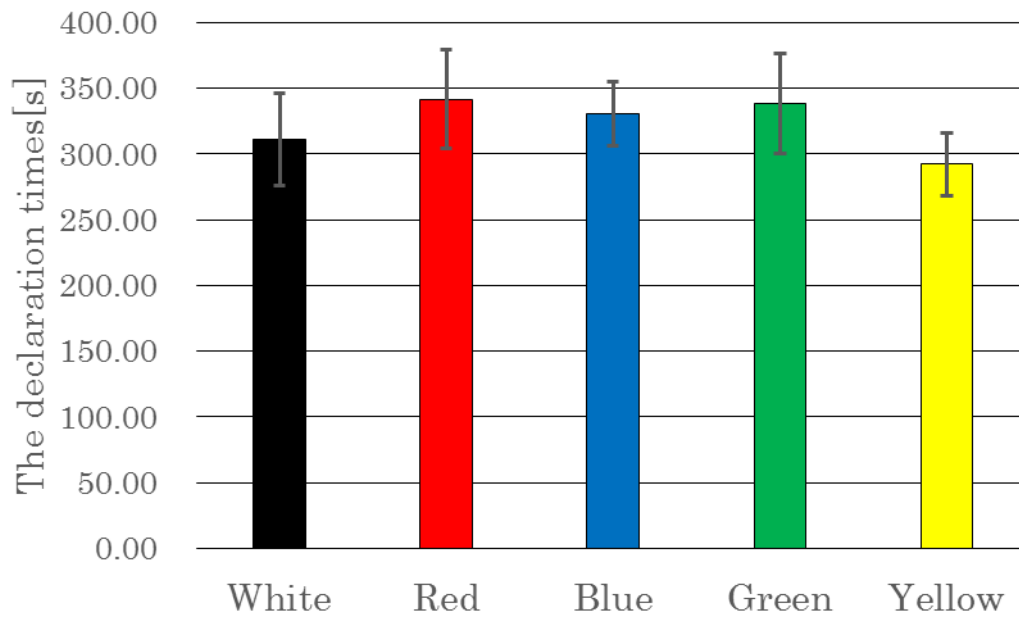


Figure 2: Declaration times for thinking task 2

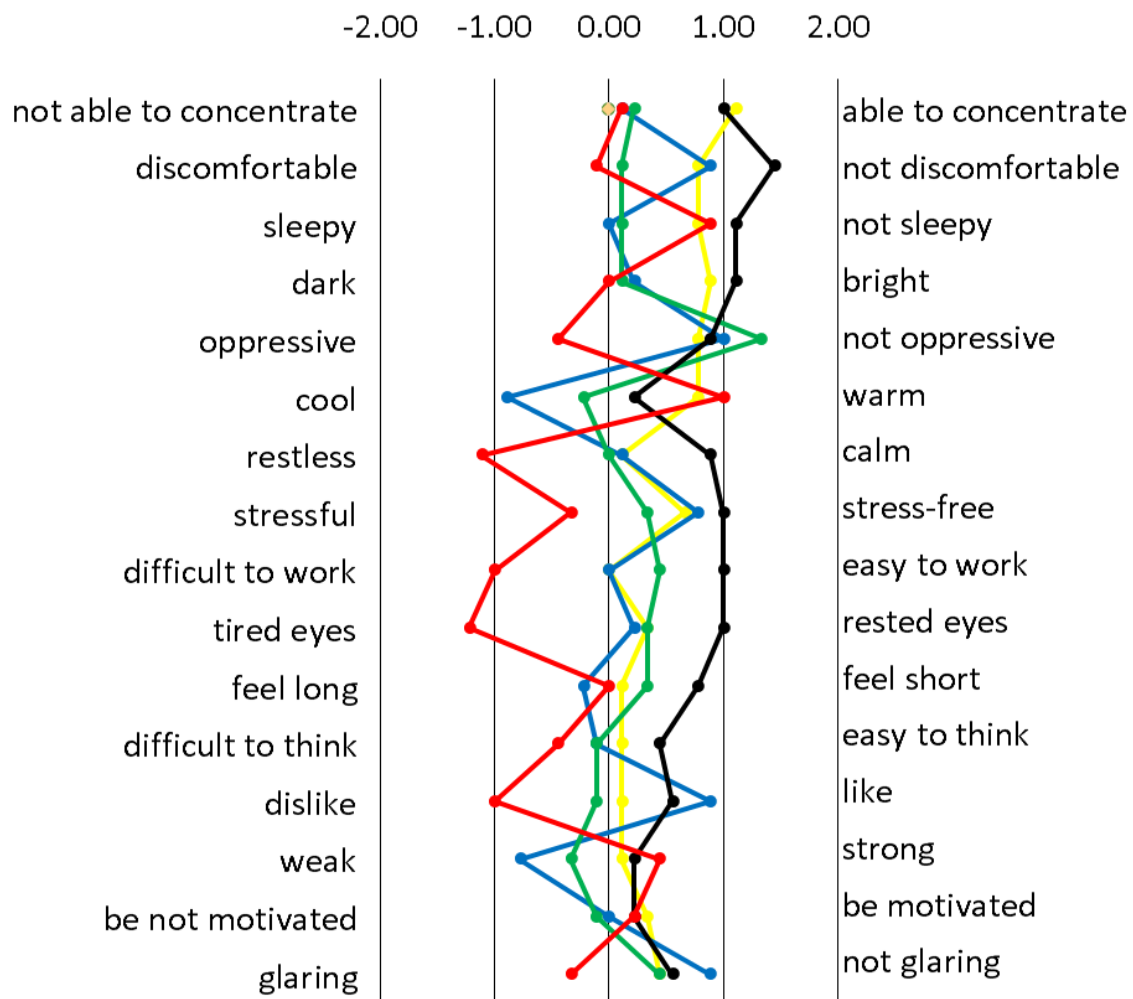


Figure 3: Subjective evaluation scores after five tasks

4. CONCLUSION

In this study, the effects of a chromatic color lighting environment on time sense were investigated. The results are summarized as follows:

- (1) Green and red lighting seem to shorten the time sense, and green lighting is considered to be practical from the results of subjective evaluation scores.
- (2) Yellow lighting might lengthen the time sense.

REFERENCES

1. Matsubayashi, T., Sawada, Y., & Ueda, M. (2013). Does the installation of blue lights on train platforms prevent suicide? A before-and-after observational study from Japan. *Journal of Affective Disorders* 147, 385-388.
2. B. Plitnick, MG Figueiro, B. Wood, & MS Rea (2010). The effects of red and blue light on alertness and mood at night. *Lighting Research and Technology*, 42(4), 449-458.
3. L. Sahin, & MG. Figueiro (2013). Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon. *Physiology & Behavior*, 116-117, 1-7.
4. L. Sahin, BM. Wood, B. Plitnick, MG. Figueiro (2014). Daytime light exposure: Effects on biomarkers, measures of alertness, and performance. *Behavioural Brain Research*, 274, 176-185.
5. Katsuura, T., Yasuda, T., Shimomura Y., & Iwanaga K. (2007). Effects of Monochromatic Light on Time Sense for Short Intervals. *Journal of Physiological Anthropology*, 26, 95-100.

研 究 課 題 名： 高空風力を利用する浮遊型発電システムの開発研究

研究者名：工学部機械工学科	大久保博志
〃	水野 敏広
創造工学部自動車開発工学科	石濱 正男
首都大学東京客員教授	藤井 裕矩

1. 研究の目的

本研究は高空風力のエネルギーを利用する発電システムの初期実証モデルを開発することを目的としている。都市部のキャノピー層を越えたところでの恒常的で安定している風力を用いるために宇宙新技術であるテザー技術、さらに、宇宙エレベーターで技術開発が進んでいるクライマー技術を適用する点にある。このためには、1) 都市部のキャノピー層より上本研究の最終目標は浮遊型装置を用いた高空風力発電システムの初期実証モデルの開発であるが、将来的にはギガワット級の風力発電を都市部上空の安定した風力エネルギーを利用できるシステムに発展させることが最終目標である。

本研究の成果をベースに NEDO や神奈川県等の資金を得て、地域からの自然エネルギー活用の情報発信をすすめ、神奈川工科大学がその牽引者としての役割を果たせることを目指す。ルギーを、損失を得ることなく地上に伝達する必要がある。風車を装備する飛行体のデザインを決定し、テザー制御技術により安定的に地上にトルクを伝達するシステムを開発することが目標である。

2. 研究の必要性及び従来の研究

風力発電システムは、洋上モデルなど大型化が進んでいるが、建設コストが高いこと、台風などの気象条件への適合性など課題も多い。一方、良質な風力が高空で得られることから浮遊式の風力発電手法が注目されている。特に最近の材料技術、IT 技術、制御技術など最先端技術により、その実用性、可能性が広がっている。世界的にみても、飛行船型、風型、飛行機型など様々なシステムが提案されており、とりわけオランダの Delft 工科大ベンチャー Ampyx Power 社による 8 の字飛行する自動誘導グライダーを用いたシステムは、本研究と同様にテザーを用いて地上設置の発電機を駆動するシステムであり注目される。わが国では、浮遊型プラットフォームを用いる高空風力発電の研究グループ (TMIT、神奈川工科大学、九州大学、都立産業高専、大阪府立大学、日本大学、前田建設など) が風型飛行船とテザー技術を用いる風力発電システムの開発を進めている。本研究では、その成果をもとに初期実証モデルを開発し、中低空での発電試験を実施する。

3. 期待される効果

他の浮遊型浮力発電システムが発電機を機上に装備するのに対して、本研究で提案するシステムは発電機を地上に設置し、上空の風車のエネルギーをテザー技術により地上に伝達し発電する独創的なものである。都市近郊における風力エネルギーを有効利用する発電システムとして、また、本研究は航空宇宙学専攻を有する神奈川工科大学が牽引するのにふさわしい有望なシーズ技術であり、世界的にも注目される研究である。

高空大気の風力エネルギーを利用する浮遊型発電システムを実現するために下記の技術の獲得を目指す。

1) 高空の風力を利用するために風車を、都市部キャノピー上空の安定した位置に設置すること。

2) 上空で得られた風力エネルギーを地上に損失が少なくなるように送ること。

そのために必要とされる以下の技術的な課題に取り組む。

- ・ 浮上型プラットフォームを、風車を高空に安定な位置と姿勢で設置するための技術を、設計による受動的、また、制御による能動的な技術として開発する。古来より伝統のある凧の技術、アドバルーン浮揚技術、モデルロケット打ち上げ技術、(無人) 模型飛行機技術について、すでに実験経験を有しており、風車を高空に浮遊させる場合の安全性の確保についても経験がある。
- ・ テザー（引き綱）によって効率良くエネルギー伝送を行うため、受動的あるいは制御による能動的な技術として設計開発する。
- ・ 風力発電における定常的な発電による利便性の向上、高空の強い風を用いることによる品質向上、性能改良に資する技術を開発する。
- ・ 短時間の停電時においても、地域・ビル・家屋等に非常用電源を供給可能な再生可能エネルギー利用システムに関連する技術の開発。
- ・ 独立運転可能な再生可能エネルギー利用システムに関連する技術開発（例えば建設現場、ODA、発展途上国、極地、原野、レジャー、山間地：整地困難でソーラーなどが活用できない山村、離島での使用。）離島をはじめとする無電源地帯への電力の供給などの応用について検討する。

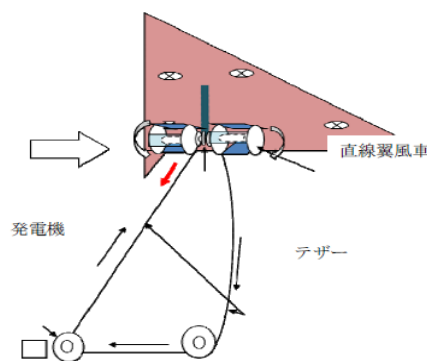


図 1. 高空風力発電システムの概念図

4. 研究の経過及び結果

■第1 フェーズモデルの野外実証実験

2016 年 5 月には福井大学高橋泰明研究室の協力を得て、凧ロボットを用いてフェーズ 1 モデルを浮揚させ発電試験を実施したが、風が弱く発電には至らなかった。



図 2. フェーズ 1 モデルのフィールド試験（敦賀気比の松原，2016 年 5 月）

■第 1.5 フェーズモデル（0.60m×スパン 0.6m×1 対）の風洞試験

2016 年 9 月にフェーズ 1.5 モデル（モーター＋トルク計＋風車）の風車性能試験、発電実験を九州大学応用力学研究所 4m 風洞において実施した。九州産業大学が製作したカーボン FRP 製の軽量風車モデルを開発した風洞実験用治具を用い、モーター駆動による風車性能実験およびテザー駆動による発電試験を実施した。発電試験は風車を風洞床面に設置して行ったほか、飛行試験を模擬して風洞上面から懸垂した状態での試験も実施した。

2017 年 2 月に敦賀気比の松原においてフェーズ 1.5 モデルの風洞試験を試みたが、風況が悪く凧を用いて風車を上空に上昇させることが出来なかった。

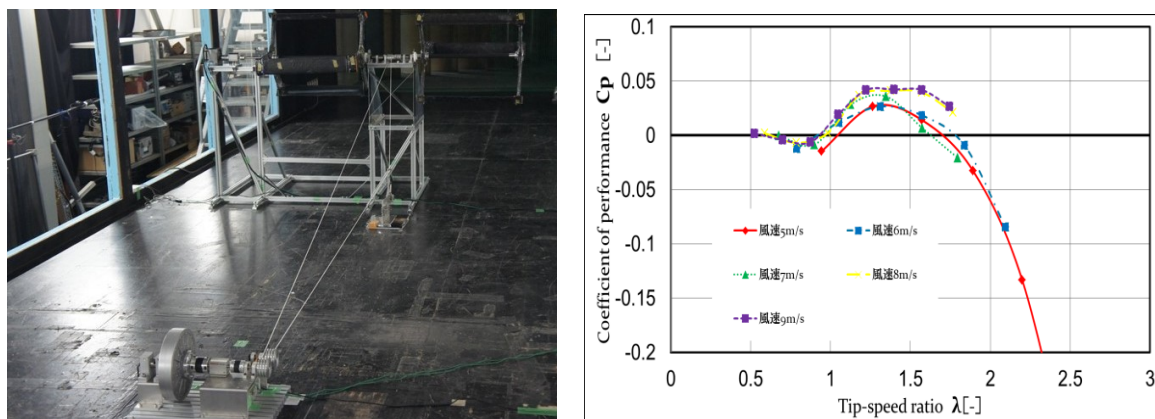


図 3. フェーズ 1.5 モデルの風洞試験（九州大学，2016 年 9 月）

5. 今後の計画

- ・改良型フェーズ 1.5 モデル (0.6m×スパン 0.6m×1 対) およびフェーズ 1 第 2 モデル (直径 0.3m×スパン 0.3m) を用いたフィールド試験を TMIT および都立産業高専の協力のもとに実施し、テザー機構による発電を実証する。
- ・地元民間企業の協力を得て、テザーによる動力伝達を継続しながらテザーの繰り出し、収納を可能にする機構の開発を行う。
- ・係留用テザーに沿って発電用風車を上空へ上昇・下降させることが可能なライダーシステムについて研究する。

以上の開発研究を通して NEDO プログラムへの採択、目標を達成する実証モデルの開発をめざす。

6. 研究成果の発表

- 1) 大久保博志、佐藤強、原田恭輔、渡辺大誠、藤井裕矩、「高空プラットフォームを利用した風力発電に関する研究」第 60 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4187, 函館 (2016 年 9 月).
- 2) 藤井裕矩, 大久保博志, 丸山勇祐, 栗田篤, Zxivanovich Sava, テザーシステムによる再生可能エネルギーの伝達について, 日本機械学会 2016 年度年次大会, J0550404, 九州大学伊都キャンパス (2016 年 9 月).
- 3) 丸山勇祐、藤井裕矩、大久保博志、岩原誠、佐藤強、原田恭輔、松井正宏、関和市、「テザーを活用した浮遊風車への縦軸直線翼風車の特性について」、日本機械学会 2016 年度年次大会、J0550405、九州大学伊都キャンパス (2016 年 9 月).
- 4) Hironori A. Fujii, Hiroshi Okubo, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, and Takeo Watanabe, "Air Borne Wind Energy Generation on Tethered System," Proceedings of WWEC2016 TOKYO, C-3-6, The University of Tokyo, Japan (2016 年 11 月).
- 5) 藤井裕矩, 丸山勇祐, 大久保博志, 草谷大郎, テザーを用いた風力発電について (機能試験), 第 38 回風力エネルギーシンポジウム/第 38 回風力エネルギー利用シンポジウム, C4-, 日本科学技術館, 東京 (2016 年 11 月).
- 6) Hiroshi Okubo, Airborne Wind Power Generation - Get the High-Sky Wind Energy, Vienna Congress COM-SULT, Jan. 16-17, City Hall/House of Industry, Wien, Austria (2017 年 1 月). 招待講演
- 7) 藤井裕矩, 丸山勇祐, 大久保博志, 草谷大郎, テザー型高空風力発電の研究-2016 年度進捗報告, 日本機械学会関東支部第 23 期総会講演会, OS0201-01, 東京理科大学 (2017 年 3 月).
- 8) 原田恭輔, 佐藤強, 相原浩司, 小川慎平, 大久保博志, 藤井裕矩, 遠藤大希, 丸山勇祐, テザー型高空風力発電の研究ー直線翼風車モデル(Phase1.5)の風洞試験, 日本機械学会関東支部第 23 期総会講演会, OS0201-02, 東京理科大学 (2017 年 3 月).
- 9) 大久保博志、小川慎平、相原浩司、原田恭輔、佐藤強、藤井裕矩、岩原誠、丸山勇祐、「テザー型高空風力発電の研究ーテザーによる動力伝達について」、日本機械学会関東支部第 23 期総会講演会, OS0202-02, 東京理科大学 (2017 年 3 月).

結合非線形線路を用いた極短電気パルス列発生に関する研究

研究者名：所属学科 氏名
電気電子情報工学科 檜原 浩一

1. 研究の目的

本研究は、新しい動作原理に基づいて、従来困難とされる高繰り返し電気パルス列発生を全電氣的に達成する代替のない手法を提供するものである。数多い電子デバイスのなかで最も単純で最も速度性能に秀でるショットキーダイオードを唯一の半導体素子として用いていること、そして素子の寄生容量・寄生抵抗による特性劣化を低減しうる分布定数型回路構成をとることで比類無い効果を発揮する。本申請はその原理実証を目的としており、将来の外部資金獲得のために必要な説得力を本研究にもたらしめるものである。研究代表者が並行して進めている研究との相乗効果も十分に期待されるところでもあり、萌芽研究の趣旨に整合する。昨年度からの継続申請である。昨年度の配分研究費が申請した試作回路製作費に満たなかったため、今年度の研究費で同回路の完成を目指す。

2. 研究の必要性及び従来の研究

研究代表者は H18 年度以降、科研費等の支援のもと、共鳴トンネルダイオード線路やメタマテリアル線路を用いた極短電気パルス生成制御の研究を遂行している。従来にない大きなパルス圧縮の実現など、まったく新しい素子設計指針を考案し、全電氣的な極短パルス生成実現に資する成果を挙げている。この間、非線形線路の結合系において、非線形孤立波の伝搬モード間遷移現象を新たに見出し、パルス制御の新手法の考案に至った。本申請は、かかる研究の経緯において、「結合非線形線路のモード間遷移を用いた新規パルス制御法」を提供する、活動の水平展開をはかる端緒を与えるものといえる。

本研究の中心をなす非線形孤立波（ソリトン）は、非線形性と分散性をともに持つ伝送線路において両者のつりあいが図られる場合に生成される形状不変のパルス波であり、数理的な興味にとどまらず工学的利用においても盛んに研究が行われている。近年では、非線形線路のリング状構成（Ricketts et al. 2007）や、境界からの反射を重畳する構成（Yildirim et al. 2009）をとることによって、パルス列の繰り返しレートを向上させる手法が各所で提案されている。しかしながら繰り返しレートはまだ小さく、非線形線路の本来の高速性を引き出すには至っておらず、また、その相互作用を積極利用する研究は立ち遅れている。本研究では、これまで注目されていなかった結合非線形線路上のソリトンを史上初め

て精査し、複数の伝搬モードと非線形孤立波の相乗効果を設計することで高速性を損なうことなく高繰り返しパルス列を生成するメカニズムの提案に至っている。現状を打破する革新的手法を提供するものといえる。

3. 期待される効果

エレクトロニクス分野においてはソリトンやショックの発生に関するものにとどまり、非線形波動の相互作用を積極利用する研究は立ち遅れている。本研究は、結合非線形線路をプラットフォームとし、逆相ソリトンの相互作用により生成される同相パルスを用いるという独創的なアイデアにより、従来困難とされている高繰り返し極短パルス列発生技術を創出するものである。かかる「結合非線形線路上のソリトン相互作用」を動作の源とする研究は他に類をみない。また、これまでの研究実施によって、結合非線形線路上のソリトン相互作用の描写に特化した回路解析ツールを世界に先駆けて準備し課題解決の具体的な枠組みを構築している。

第一に、結合非線形線路上の逆相・同相ソリトンの相互作用の体系化によって高度の設計性を得ることができるようになる。そして、SPICE などの汎用回路シミュレータを用いた実践設計に道がひかれる。一方、プリント回路ボード (PCB) による試作評価による原理確認は重要なマイルストーンとなる。これまでの理論的検討結果の定量的妥当性検証は以降の研究遂行のためにマストである。

4. 研究の経過及び結果

平成 28 年度限りの計画である。昨年度の研究実施によって試作回路の基板設計まで完了している。部品調達とアセンブルを第 2 四半期以降速やかに行った。そして期末までに回路試作を完成させた。この間、進行波型トランジスタの結合系を議論し、誘起される散逸ソリトンに関する蛙飛び現象を見いだした。保存系におけるそれは徐々に振動エネルギーを失う結果有限寿命であることがしられるが、散逸系では解析する限りにおいて恒久的であるように思われる。散逸ソリトン同士の共鳴作用はこれからの非線形科学の重要な検討項目であるという認識である。試作による実証を含め新規に実施すべき研究計画を立案するに至った。

5. 今後の計画

今後は、実証実験が最大の検討項目である。試作回路の動作周波数帯域は、計測の利便性から MHz 帯に求めている。逆相ソリトンの衝突前後の波形を時間領域で計測する。高繰り返しパルス列発生には、同相、逆相ソリトンの速度差を大きくする必要がある。試作回路では速度差を小とし、短線路長で効率的な特性把握につとめる。対称性の破れ・蛙飛びパルスに基づく機能拡張を主軸として、結合非線形線路のエンジニアリング応用の検討を継続する。上述の進行波型トランジスタ中の蛙飛びパルスについては実測における時間窓の

確保が容易であることから実証を優先したアプローチもありうる。研究実施の具現化を急ぐ。

6. 研究成果の発表

本研究実施によって査読付き論文 4 件，研究界報告 1 件の外部発表を行った。査読付き論文[1]は，量子効果デバイスを装荷した伝送線路の相互同期を用いたマルチフェーズ発振器に関する。同[2]は，非線形メタマテリアル線路における停留パルスに関する。同[3]は，点結合したトンネルダイオード線路の相互同期の定量化に関する。同[4]は半導体プラズマにおける Dyakonov-Shur 不安定性の数値解析に関する。研究会報告[5]は，非線形メタマテリアルに関するレビューである。

1. "Multiphase oscillator using dissipatively coupled transmission lines with regularly spaced tunnel diodes," Koichi Narahara, Int. J. Circ. Theor. Appl., DOI: 10.1002/cta.2284.
2. "Numerical characterization of nonlinear oscillatory waves in a composite right- and left-handed traveling-wave field-effect transistor," Koichi Narahara, Int. J. Circ. Theor. Appl., DOI: 10.1002/cta.2245.
3. "Mutual synchronization of oscillating pulse edges in point-coupled transmission lines with regularly spaced tunnel diodes," Koichi Narahara, Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 42, pp. 236-246.
4. "Numerical Characterization of Dyakonov-Shur Instability in Gated Two-Dimensional Electron Systems," Akira Satou and Koichi Narahara, International Journal of High Speed Electronics and Systems, 25, pp. 1640024 1-10.
5. "非線形メタマテリアル線路における共鳴相互作用," 梶原浩一, 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 2016 年 7 月 (首都大学東京) .

スマートフォン群の連携による分散アルゴリズムの実装に関する研究

山本富士男

神奈川工科大学 情報学部 情報工学科

1. 研究の目的

社会人や学生のほとんどが所有するスマートフォンを、分散アルゴリズム実装の研究に生かせることは、社会、教育における影響と効果が大きいので推進したい。

スマートフォンでは、近年、WiFi Direct が装備され、アドホックなネットワーク利用も可能となった。さらに、単にノード同士の原始的な通信機能に止まらず、NSD (Network Service Discovery) も出現してきた。NSD は、現代の Web サービスの基盤となっているサービスの登録、発見、結合の仕組みを、スマートフォン同士でも可能にするものである。それらをベースとして、スマートフォン群の上に、現実環境に沿った分散アルゴリズムを実装／評価する一般的構成法を明らかにする。

2. 研究の必要性及び従来の研究

現代の実用情報システムを支える基盤としての「分散アルゴリズム」の重要性は高まっている。種々の「分散アルゴリズム」を現実環境へ実装する方法を研究し、それらの発展と IT 教育への適用を図る。従来、この分野では、PC によるエージェント指向のシミュレーションが利用されてきたが、その方法では、分散アルゴリズムを現実世界へ適用する際、実動作の的確な把握が難しい。すなわち、(1) 独立したエージェントの並列動作、(2) それらの間の通信の現実性能の考慮、(3) エージェント間の実距離に応じた相互作用、等々を的確に反映したうえでの、リアルな動作把握は難しい。これに対して、本研究は、各エージェントを1台のスマートフォンに割り当て、多数のスマートフォンの連携で種々の分散アルゴリズムを実装する一般的な方式と、そのための汎用分散通信 API の仕様を明らかにする。

情報システムの基盤となる「大域スナップショット」、「分散デッドロック」、「ビザンチン合意」、「名前付け」等々の実装方法は重要である。しかしながら、「紙に記述された」分散アルゴリズムを、現実世界に適用する場合、その概念の把握と発展への取り組みには、いくつかの困難がある。第一に、分散アルゴリズムでの多数の要素が並列的に動作する状況を的確にイメージしながら、その全体像を把握するのは難しい。第二に、それを緩和するマルチエージェント指向のシミュレーションでは、エージェント間の物理的な距離や、メッセージ交換における具体的な通信経路や通信遅延は通常、隠蔽されてしまうので、現実環境を的確に反映しない。筆者は、分散アルゴリズムの理論を現実環境へ実装する場合の課題を検討してきた。

3. 期待される効果

従来は分散アルゴリズムの動作把握が、ソフトウェアシミュレーションを通してしか行われていなかった不完全な（実ネットワーク環境や実距離の効果等を反映できない）状況の打破をめざすものである。スマートフォン Android 端末1台をひとつの要素（自律した個体）と考え、

現実のネットワーク上での多数の要素間のインタラクションを、的確な実感を持って把握できることは、現実世界における分散アルゴリズムの発展と高度な IT 教育にも大きく寄与できると考える。

4. 研究の経過及び結果

まず、概要を示す。

- ① 共有資源競合問題として有名な「食事する 5 人の哲学者」等を取り上げた。各エージェント（哲学者など）を一台のスマートフォンで実装してネットワーク接続し、分散デッドロック検出を行い、従来型のシミュレーションとの比較において、利点と技術課題を明らかにした。特に、デッドロックを分散的に検出するための古典的アルゴリズムである Chandy-Misura の方法を、Android スマートフォン実機に実装することを試みて、本研究の基本アイデアを検証した。ここでは、マルチエージェントシミュレーション（by NetLogo）と、スマートフォン 5 台の実機への実装イメージを比較した。
- ② スマートフォン同士の通信機構としての、揭示版型（Web データベース利用）や P2P 型（WiFi Direct などを利用）、NSD(Network Service Discovery)をベースに、分散アプリケーション向けの汎用的通信 API を構築するための基本アイデアを示した。
- ③ 以上をベースにして、数種類の基本分散アルゴリズムを実装し、分散アルゴリズムの実世界への実装についての一般的方式を構成するための知見を得た。

4.1 事例：共有資源競合問題（食事する哲学者）

従来、分散アルゴリズム／分散システムの設計や検証には、エージェント指向モデリングが多用されてきた。しかし、この方法では、物理的通信や実距離の効果が反映されず、現実感に欠ける。本研究では、各エージェントを 1 台のスマートフォン等を実装し、それらの相互通信を使った現実感の高いシミュレーションを行う。ここでは、本研究で実現した事例のひとつを示す。「食事する 5 人の哲学者」として知られる、共有資源競合問題である。（図 4.1 参照）

【食事する哲学者の問題の要点】

- A) 哲学者は思索と食事を繰り返す。
- B) 哲学者の間にフォークが 1 本ある。
食事するには、両方のフォークが必要である。
- C) 食事は有限時間で終わる。終わり次第、両方のフォークをテーブルに戻すので、他の哲学者が使えるようになる。
- D) 時として、ライブロック、またはデッドロックに至る。
- E) 哲学者は他人の状況には無関心なため、たとえデッドロックであっても、それが分からず、フォークを確保しようとして、いつまでも待つ。
- F) ここでの主要な課題は、分散的にデッドロック検出を行うことである。



図 4.1 食事する哲学者の問題

[Agent 指向シミュレーション (by NetLogo)]

この問題を、NetLogo を使ってシミュレーションを行う。シミュレーションなので、哲学者数を増加させることや、哲学者全体の動作を把握することは容易である。その反面、以下の難点がある。(図 4.2 参照)

- ① エージェント（哲学者）の独立感に欠ける。（全員同一画面上に見えている。）
- ② 「他人に関心を持たない」という前提を保ち難い。
- ③ 物理的通信（フォーク使用状況把握のため）の影響を反映できない。

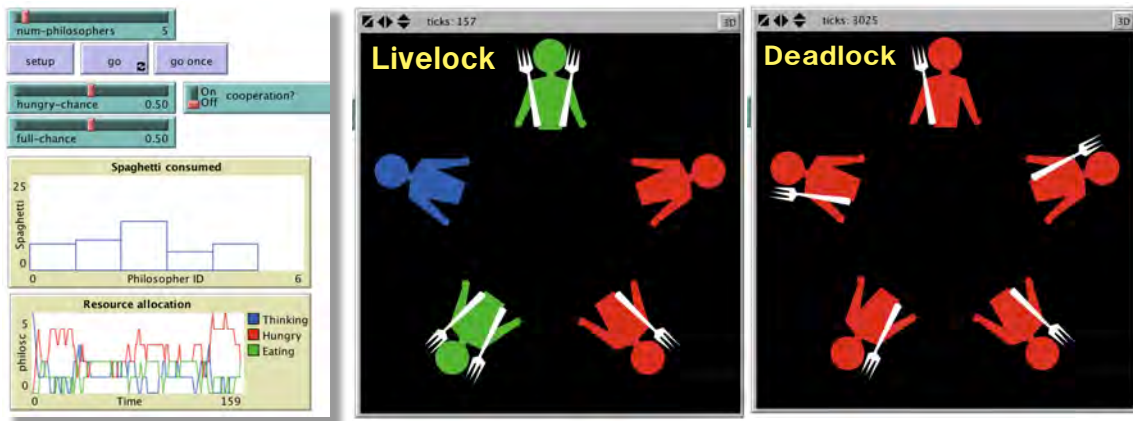


図 4.2 マルチエージェントモデリングソフト NetLogo によるシミュレーション

[Android スマホによる実装]

次に、哲学者をひとりずつ、1 台のスマートフォン（Android）に割当て実装を行った。(図 4.3 参照)

- ① 各哲学者を 1 台の Android に載せることで、真に独立した Agent を実現した。
- ② 実際のローカルネットワークで、フォークの使用状況を知る。
- ③ 分散デッドロック検出法（Chandy-Misra 法, Peterson 法）を実装できた。



図 4.3 スマートフォン（Android）5 台を使った実装例（分散デッドロック検出）

ここで用いた分散的デッドロック検出は、Chandy-Misra 法に準拠している。この方法では、デッドロックか否かを検査したい Android（哲学者）が、以下の形式の probe（信号）を発信する。

<検査起動者 ID, 送信者 ID, 受信者 ID>

この場合の「受信者」は、送信者が要求している資源（フォーク）を確保している相手となる。この問題では、フォークを確保しているのは、自分の隣接の哲学者に限られる。もしも、最終的に検査起動者が、[検査起動者 ID = 受信者 ID]である probe を受信した場合、それはデッドロック状態であると確認できる。図 4.3 の右図がそれに該当する。

一方、誰かが食事中（2 本ともフォークを確保している場合）のため、フォークを待っているのであれば、それはライブロックなので、発信された probe はそれ以上伝達されなくなる。図 4.3 の左図がそれに該当する。

5. 今後の計画

今後、本研究で得られた方式と知見を、さらに多くの分散アルゴリズムへ適用し、通信や同期などに関する共通的设计パターンを抽出してライブラリ化を図る。

6. 研究成果の発表

本研究の成果内容をまとめ、下記シンポジウムにてポスター発表を行った。

山本富士男：エージェント指向モデルの現実感を高めるスマートフォン等による実装，「KAIT シンポジウム 2016」，ポスターセッション，神奈川工科大学，2016-12.

【付録】

上記の研究成果の発表で示したポスターのコピーを添付する。


神奈川工科大学
KANAGAWA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



エージェント指向モデルの現実感を高める スマートフォン等による実装

研究者氏名 **教授 山本 富士男** 情報学部 情報工学科

■背景と目的

- 分散アルゴリズム、分散システムの設計や検証には、エージェント指向モデリングが多用される。
- 物理的通信や実距離の効果が反映されず、現実感に欠ける。
- 各エージェントを1台のスマートフォン等に実装し、それらの相互通信を使った現実感の高いシミュレーションを行う。
- 現実環境に適合する分散アルゴリズム開発への寄与。

■まとめ

- 共有資源への競合問題、指揮者なし同期問題等を含むいくつかの分散アルゴリズムを、現実感の高い手法で実装できた。
- さらに多くの分散アルゴリズムへ適用し、通信や同期などに關する共通的设计パターンを抽出してライブラリ化を図る。

[1] 共有資源競合問題(食事する哲学者)

- 哲学者は思索と食事を繰り返す。
- 哲学者の間にフォークが1本。食事には両方が必要。
- 時として、**デッドロック**に至る。
- 哲学者は他人の状況には無関心なため、いつまでも待つ。
- 分散デッドロック検出法が必要。



[2] 指揮者なしの集団の同期動作

- ホテルの集団の同期明滅現象のモデル化(4匹の場合) →
- 自然界のホテル大群の明滅↓



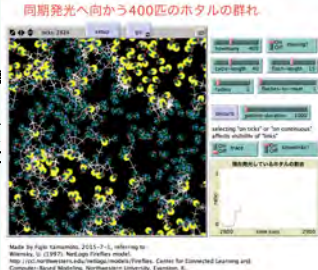
●Agent指向シミュレーション (NetLogo)

- エージェント(哲学者)の独立感に欠ける。(全員同一画面上)
- 「他人に関心を持たない」という前提を保ち難い。
- 物理的通信(フォーク使用状況)の影響を反映できない。



●同左

- ホテルの大群の同期の再現も可能
- 現実感に欠ける点
 - ホテル間の距離は座標から即時計算
 - 柱時計の存在
 - Phase遅延の契機となる受光機構が現実的でない。(色のみで判定)



●Androidスマホによる実装

- 各哲学者をAndroidに載せることで**真に独立したAgent**を実現。
- 実際のローカルネットワークで、フォークの使用状況を知る。
- 分散**デッドロック**検出法(**Chandy-Misra法**, **Peterson法**)を実装。



●SunSPOT (Javaマシン)による実装

- 各ホテルをSunSPOTに載せることで**真に独立したAgent**を実現。
- 近距離無線通信(ZigBee)とマルチスレッドによる受光模倣機構。
- ホテル間の**実距離**に応じた動作(同期の可否)を実現。



仮想対象と自然なインタラクションを可能にする 3次元表示対象の視覚的知覚位置の推定に関する研究

研究者名：情報ネットワーク・コミュニケーション学科 海野 浩

1. 研究の目的

本研究では、3次元表示された仮想対象に対してユーザがそれを見えていると知覚する位置を取得する技術を確立させることにより、ユーザが自身の手など自らの身体で仮想対象と相互作用する場合に、実対象と相互作用する場合と同様に、自然な相互作用を可能とするヒューマン・コンピュータ・インタラクション技術の実現を目的とする。

2. 研究の必要性及び従来の研究

ユーザが素手などの自らの身体で、3次元表示された映像の仮想対象と直接相互作用するシステムは、娯楽や遠隔操作、遠隔医療など様々な分野で、数多くの魅力的な応用が期待されている。このようなシステムにおいて、実対象との相互作用と同様に、自然な相互作用を実現するためには、仮想対象が見えている位置（視知覚位置）にユーザの身体が位置し、仮想対象に触れたと見えた時に、仮想対象を反応させたり、触力覚デバイスによって触力覚を与えたりするなど、仮想対象との相互作用のための処理を実行することが必要となる。ユーザが仮想対象に触れて見えているにもかかわらず仮想対象との相互作用のための処理が実行されなかった場合、および、仮想対象に触れて見えていないのに仮想対象との相互作用のための処理が実行された場合、ユーザは、実対象との相互作用と同様な自然な相互作用とは感じられず、その相互作用に違和感を持つ。このように仮想対象との相互作用システムは仮想対象が見えている位置を正確に獲得する必要がある。

従来技術では、仮想対象が見えている位置を正確に獲得することが困難であったため、実対象との相互作用と同様な自然な相互作用を実現することができなかった。仮想対象が見えている位置の正確な獲得が困難な理由は、両眼視差から計算して獲得する点にあった。両眼視差は奥行き知覚に用いられる主要な情報である。しかし奥行き知覚に用いられる情報は両眼視差のみではなく他にもある。それらの影響によって、仮想対象が見えている位置は必ずしも両眼視差から計算される位置とはならない。また、仮想対象が見えている位置は、同一のユーザが同一のコンテンツを観察する場合でも、必ずしも毎回同一にはならない。

以上の理由から、ユーザ自らの身体と仮想対象との相互作用において、実対象との相互作用と同様な自然な相互作用を実現するためには、仮想対象が見えている位置を正確に獲得する技術の開発が不可欠である。

3. 期待される効果

仮想対象が見えている位置を正確に獲得できると、上記のようにユーザ自身の身体と仮想対象との相互作用において、実対象との相互作用と同様に、自然な相互作用が実現できる。その結果、遠隔操作や遠隔医療などのアプリケーションにおいて各種の作業の作業効率を向上させることが期待される。特に、精密な作業を必要とするアプリケーションにおける本技術の効果は大きいと考える。

4. 研究の経過及び結果

これまで、静止している仮想対象に対するリーチング運動、静止している仮想対象に対するヒッティング運動、および、運動する実対象に対するヒッティング運動に対して、それぞれ視知覚位置を推定・獲得する技術を提案し、評価してきた。

静止している仮想対象に触れるリーチング運動に対しては、リーチング運動の運動時間の関数としての運動速度にガウス関数、 χ^2 関数を適合して、リーチング運動が終了する前に、リーチング運動終了時の手の位置を推定した。手の速度が 0 になる位置を仮想対象の視知覚位置とすることで、視知覚位置を正しく推定でき、これにより自然な相互作用が可能であることを実証した。

また、静止している仮想対象を叩くヒッティング運動に対しては、ヒッティング運動もガウス関数で表現できることを明らかにした。ヒッティング運動では運動速度が最大となるとき手が対象に触れる。そこでヒッティング運動の運動時間の関数としての加速度にガウス関数の微分関数を適合して、運動速度が最大となる前に、運動速度が最大となる手の位置を推定した。手の速度が最大となる位置を仮想対象の視知覚位置とする、提案技術の実現可能性を実証した。

さらに、ゲームなどのアミューズメントへの応用を想定して、運動する対象を扱った。運動する仮想対象との相互作用では、仮想対象が静止している場合とは異なり、仮想対象の視知覚位置が時間とともに変化する。そこで、まずは、運動する実対象を素手で打つヒッティング運動の特性を検討した。その結果、静止した対象を打つ場合と同様に、動作時間の関数としての動作速度がベル型となり、運動速度が最大となる時刻付近で手が対象と触れることを明らかにした。

平成 28 年度においては、対象を打つヒッティング運動から視知覚位置を推定する技術を実装し、そのシステムを評価した。提案技術は、ヒッティング運動の運動時間の関数としての運動速度をガウス関数に適合して、運動速度が最大となる前に、運動速度が最大となる位置を推定することで、それを視知覚位置の推定値として獲得する。評価実験では、実対象を打つヒッティング動作から視知覚位置の推定値を獲得して、推定した視知覚位置の確度・精度を検討した。ここで、対象は実対象とした。これは、ヒッティング運動の視知覚位置の推定値の誤差については、対象が実対象の場合についても過去の研究例がほとん

どないためである。そこで、仮想対象との相互作用に向けて、実対象の場合について調べた。

実験では、実対象として起き上がり子法師を被験者の正面において、被験者には起き上がり子法師を人差し指で正面からまっすぐに突く課題を与えた。このような被験者のヒッティング運動を、上方に設置したビデオカメラで測定して、手の位置、運動速度、加速度の計算、および視知覚位置の推定を実時間処理で行った。獲得した視知覚位置の推定位置と実際の視知覚位置（起き上がり子法師の位置）とを比較するために、両者の位置を算出した。実験では、提案システムの性能を評価するために、ヒッティング運動における運動距離、および、運動開始点を実験パラメータとして、推定の遂行率および視知覚位置の誤差を算出した。運動距離を実験パラメータとした実験では、運動開始点を固定し、実対象の位置を変えることにより運動距離を 2 種類（10 cm, 20 cm）とし、ヒッティング運動の手の位置、視知覚位置の推定値をシステムから獲得し、推定の遂行率と推定位置の誤差を評価した。運動開始点を実験パラメータとした実験では、ヒッティング運動における運動距離を 20 cm に固定し、肘の位置を 3 種類（基準位置、基準位置+5 cm, 基準位置+10 cm）とし、ヒッティング運動の手の位置、視知覚位置の推定値をシステムから獲得し、推定の遂行率と推定位置の誤差を評価した。

運動距離を実験パラメータとした実験の結果、遂行率は 86%以上、誤差の平均値は 4.67 cm であり、運動距離の依存性はなかった。運動開始点を実験パラメータとした実験の結果、遂行率はほぼ 100%, 誤差の平均値は 4.75 cm であり、運動開始点による依存性はなかった。推定した視知覚位置と実際の視知覚位置との差、すなわち空間的な誤差の平均値は、運動距離の実験では 4.67 cm, 運動開始点の実験では 4.75 cm であった。ここで、空間的な誤差 4.67 cm を時間的な誤差に換算すると約 1/67 秒（約 15 ms）であった。人間はこの時間差をほとんど感じることはできない。すなわち、この時間差は自然な相互作用の範囲内であるといえる。したがって、獲得した視知覚位置の推定位置と実際の視知覚位置との時間的な差はわずかであった。提案技術を実装したシステムの実現可能性を実証した。

また、平成 28 年度においては、未来時刻の運動推定を用いたアプリケーションの可能性検討や技術・知識の体系化、適用限界の明確化にも取り組んだ。未来時刻の運動推定を用いたアプリケーションの可能性検討では、ネットワークを用いた遠隔操作システムや遠隔コラボレーションシステム、また、複合現実感以外への応用として、危険回避システムの実現性の検証をおこなった。技術・知識の体系化では、心理的な知覚量が身体運動にフィードバックされる過程を考慮した心理・生理モデルの構築を試み、全期間を通して得た知見、技術の体系化を検討した。適用限界の明確化では、未来時刻の運動予測について、その適用条件を調べ、本技術の適用限界を明確にすることを検討した。

5. 今後の計画

平成 28 年度の成果に基づき、叩く動作の対象が仮想対象である場合の提案システムの性

能を評価する。また、提案技術を実用場面で適用するうえで必要となるリーチング動作とヒッティング動作との動作の種類の弁別方法について検討を進める予定である。提案技術を実用場面で適用するためには、システムは、ユーザが実行しようとする動作がリーチング動作であるか、ヒッティング動作であるかという動作の種類を知る必要がある。ここで、提案技術は、動作の種類に応じて獲得すべき位置の種類が異なる。しかし、ユーザは、自分がこれから実行しようとする動作の種類を宣言するわけではない。つまり、システムはユーザの動作の種類を判断して適切な種類の位置を獲得しなければならない。このように、リーチング動作とヒッティング動作との弁別は、提案技術の実用化のために重要である。また、提案技術を応用した、危険回避など緊急動作を補助・支援するシステムの実現にも取り組む。

6. 研究成果の発表

[1] Hiroshi Unno, Masahiro Suzuki, and Kazutake Uehira: “New Technique of Obtaining Positions of Virtual Objects from Users’ Hitting Movements for Augmented Reality Simulations”, 2017 International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations, Sydney, Australia, 2017-02-18/21, pp. 32-33.

[2] 永岡拓人, 海野浩, 鈴木雅洋, 上平員丈: 打動作を利用した視知覚位置の実時間取得技術, 画像電子学会第 280 回研究会予稿集, 長崎県長崎市, 2017-03-09/10, pp. 112-115.

打動作を利用した視知覚位置の実時間取得技術

永岡 拓人[†] 海野 浩[‡] 鈴木 雅洋[‡] 上平 員丈[‡]

[†] [‡] 神奈川工科大学 〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030

E-mail: [†] no.scared.00.1@gmail.com, [‡] {unno@nw, msuzuki@ctr, uehira@nw}.kanagawa-it.ac.jp

あらまし 3D ディスプレイの画面の手前に呈示された仮想対象の視知覚位置を獲得する技術を評価した。仮想対象と、ユーザーが自分の肉眼で直接見るユーザー自身の身体との相互作用では、仮想対象の視知覚位置でそれを実行することが要求される。従来技術では両眼視差から計算される位置で相互作用を実行するが、仮想対象の視知覚位置はしばしばそれとは異なる。提案技術では、仮想対象の視知覚位置をユーザーの身体運動から獲得することで、上述の要求を満たす。評価実験では、対象を打つヒッティング運動から実時間で獲得した視知覚位置の確度・精度を検討する実験をおこなった。その結果、獲得した視知覚位置と実際の視知覚位置との時間的な差はわずかであった。提案技術の実現可能性を実証した。

キーワード 3D ディスプレイ・相互作用・身体運動

Technique of Obtaining Visually Perceived Positions From Hitting Movements in Real Time

Takuto NAGAOKA[†] Hiroshi UNNO[‡] Masahiro SUZUKI[‡] and Kazutake UEHIRA[‡]

[†] [‡] Kanagawa Institute of Technology 1030 Shimo-ogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292 Japan

E-mail: [†] no.scared.00.1@gmail.com, [‡] {unno@nw, msuzuki@ctr, uehira@nw}.kanagawa-it.ac.jp

Abstract We evaluated a technique of obtaining the visually perceived position of a virtual object presented in front of the screen of a 3-D display. Interactions between the virtual objects and users' bodies actually seen by the users require executing them at the visually perceived positions of the virtual objects. Although conventional techniques execute interactions at the positions calculated from binocular disparity, the visually perceived positions of the virtual objects are often different from them. The proposed technique meets the requirement described above by obtaining the visually perceived positions from users' body movements. In the evaluation, we conducted the experiment in which the accuracy and precision of the visually perceived positions obtained from hitting movements in real time. The results obtained from the experiment indicated that the visually perceived positions obtained with the proposed technique were temporally accurate and precise. We demonstrated that the proposed technique was feasible.

Keyword 3-D Display, Interaction, Body Movement

1. はじめに

ビデオカメラで撮影したビデオ映像の世界の中ではなくて、ユーザーが自分の肉眼で直接見る世界の中で、ユーザー自身の身体と、3D ディスプレイの画面の手前に呈示された3D 映像の仮想対象とが相互作用するアプリケーションは、3D ディスプレイの大変魅力的なアプリケーションの一つである。仮想対象のボールを打つゲームはその一例である。このようなゲームでは、仮想対象のボールは3D ディスプレイの画面の手前に呈示されて、ユーザーは自分の肉眼で直接見る自分の素手で仮想対象のボールを打ち、あたかも実対象のボールを打ったかのように感じる。このようなアプリケーションはさかんに研究が進められており [1-3]、近い将来の実用化が期待されている。

上述のようなアプリケーションでは、ユーザーは自分の身体が仮想対象と同じ位置に位置したときに仮想対象と相互作用できると期待する。日常生活では身体が実対象と同じ位置に位置したときに実対象と相互作用できるのであるから、同じことがアプリケーションでも起こると期待することは自然である。したがって、このような期待に反して、身体が仮想対象と同じ位置に位置しているのに仮想対象と相互作用できなかったり、身体が仮想対象から離れて位置しているのに相互作用したりすれば、ユーザーは混乱する。このように、身体が仮想対象と同じ位置に位置したときに相互作用を実行することは、身体と仮想対象との相互作用で極めて重要である。

仮想対象が両眼視差による奥行き知覚によって画面の手前に呈示されることから、従来技術では、両眼視差から計算される仮想対象の位置に身体が位置したときに相互作用を実行する。しかし、仮想対象は、両眼視差から計算される位置にはしばしば見えない。ユーザーは仮想対象が見えている位置で仮想対象と相互作用できると期待して身体を動かすので、両眼視差から計算される位置に仮想対象が見えなければ、従来技術が上述の要求を満たすことは難しい。両眼視差から計算される仮想対象の位置ではなくて、仮想対象が見えている位置、つまり、視知覚位置に身体が位置したときに相互作用を実行する技術が必要である。

筆者らは、ユーザーの身体運動から仮想対象の視知覚位置を取得する技術を提案して、評価してきた[4-9]。身体運動に関する先行研究によると、手で対象に触れようとするリーチング運動には運動時間の関数としての運動速度がベル型になる特性がある[10-15]。提案技術では、ユーザーが仮想対象に手で触れようとするリーチング運動の運動時間の関数としての運動速度にガウス関数を適合して、リーチング運動が終了する前にリーチング運動終了時の手の位置を獲得する。リーチング運動は手が仮想対象の視知覚位置に位置したときに終了するので、獲得したリーチング運動終了位置は、つまり、仮想対象の視知覚位置である。これまでの研究では、提案技術で獲得した視知覚位置の確度・精度や、提案技術で実行した相互作用の正確性を検討して、提案技術の実現可能性や有用性を実証した。

また、筆者らは、手で対象を打つヒッティング運動への提案技術の適用も評価した[16]。筆者らのこれまでの研究によると、ヒッティング運動の運動時間の関数としての運動速度はベル型となり、運動速度がピークとなるときに手が対象に触れる。そこで、運動時間の関数としての加速度をガウス関数の微分関数に適合して、運動速度がピークになる前に運動速度がピークになる位置を獲得することで、ヒッティング運動に提案技術を適用する。評価実験では提案技術で獲得した視知覚位置の確度・精度を検討して、ヒッティング運動への適用が実現可能であることを実証した。しかし、ヒッティング運動が極めて短時間で終了することから、実時間処理で実現可能かは明らかではなかった。

本研究では、提案技術のヒッティング運動への適用を実時間処理の側面から検討する。ヒッティング運動への適用の原理を次の第2節で述べる。提案技術を用いてヒッティング運動から実時間で獲得した視知覚位置の確度・精度を検討した実験の方法を第3節で、

結果と考察を第4節で述べる。最後に、本研究の結論を第5節で述べる。

2. 打動作を利用した視知覚位置獲得技術

提案技術のヒッティング運動への適用の原理を図1に示す。リーチング運動と同じように、ヒッティング運動でも運動時間の関数としての運動速度がベル型となる。したがって、リーチング運動と同じように、運動時間の関数としての運動速度にガウス関数を適合することで、ヒッティング運動でも未来時刻での手の位置を獲得できる。リーチング運動では、運動の終了位置で手が仮想対象に触れるので、運動が終了する前に運動の終了位置を獲得するが(図1[A])、ヒッティング運動では、運動速度がピークとなるときに手が仮想対象に触れるので、運動速度がピークとなる前に運動速度がピークとなる位置を獲得する(図1

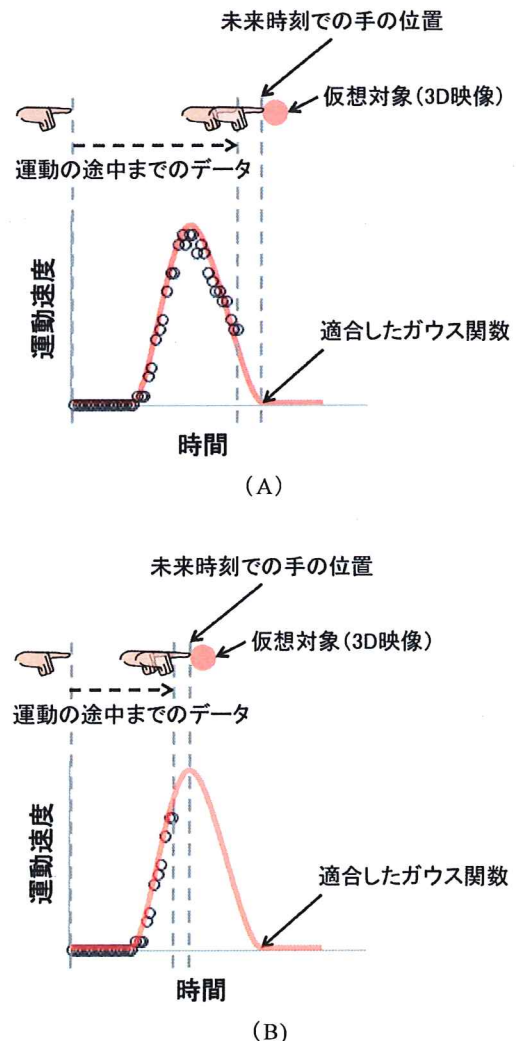


図1 提案技術のヒッティング運動への適用の原理。

(A) リーチング運動からの視知覚位置の獲得。

(B) ヒッティング運動からの視知覚位置の獲得。

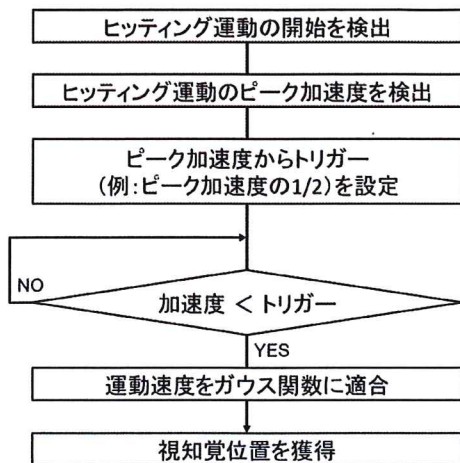


図2 ヒッティング運動から視知覚位置を獲得する処理の流れ

[B]) . このように、適合したガウス関数から獲得する位置を変えることで、提案技術をヒッティング運動へ適用できる。

ヒッティング運動から視知覚位置を獲得する処理の流れを図2に示す。最初に、ヒッティング運動の開始を検出する。次に、ヒッティング運動のピーク加速度を検出する。次に、ピーク加速度からトリガー（例えば、ピーク加速度の2分の1）を設定して、加速度がトリガーを下回ったら、運動時間の関数としての運動速度を次式のガウス関数に適合する。

$$v = \frac{p_2}{p_1 \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(t-p_3)^2}{p_1^2}} \quad (1)$$

v は運動速度、 t は運動時間、 p_1 、 p_2 、 p_3 は適合のためのパラメーターである。 p_2 は適合したガウス関数の面積で、運動開始から運動終了までの運動距離となる。運動速度がピークとなるまでの運動距離はこの値の2分の1となるので、これにより運動速度がピークとなる位置を獲得して、視知覚位置を獲得する。

3. 方法

実対象を打つヒッティング運動から実時間処理で視知覚位置を獲得して、獲得した視知覚位置の確度・精度を検討した。実験装置の略図を図3に示す。起き上がり小法師を被験者の正面20cmの距離に置いて、被験者には起き上がり小法師を人差し指で正面からまっすぐに突く課題を与えた。このような被験者のヒッティング運動を上方に設置したビデオカメラで測定して、手の位置や運動速度、加速度の抽出、および視知覚位置の獲得を実時間処理でおこなった。獲得した視知覚位置を実際の視知覚位置、つまり、起き上が

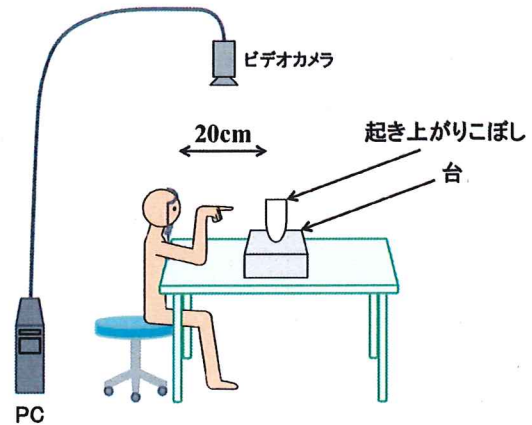


図3 実験装置の略図

表1 獲得した視知覚位置と実際の視知覚位置との差 (標準偏差)

空間差 (cm)	時間差 (ms)
5.3 (2.0)	12 (7)

り小法師の位置と比較するために、両者の差を算出した。

4. 結果と考察

獲得した視知覚位置と実際の視知覚位置との差を表1に示す。獲得した視知覚位置と実際の視知覚位置との空間的な差は大きかったが、時間的な差はわずかであった。なお、リーチング運動からの視知覚位置獲得では、適合する関数を改良することで確度・精度を向上させられることが報告されている[4]。ヒッティング運動からの視知覚位置獲得でも同様に適合する関数を改良することで確度・精度を向上できると考えられるので、今後の課題としたい。

5. おわりに

対象を打つヒッティング運動から視知覚位置を獲得する技術の評価した。提案技術では、ヒッティング運動の運動時間の関数としての運動速度をガウス関数に適合して、運動速度がピークとなる前に運動速度がピークとなる位置を獲得することで、視知覚位置を獲得する。評価実験では、実対象を打つヒッティング動作から視知覚位置を実時間処理で獲得して、獲得した視知覚位置の確度・精度を検討した。その結果、獲得した視知覚位置と実際の視知覚位置との時間的な差はわずかであった。提案技術の実現可能性を実証した。

文 献

- [1] N. Inoue, "Application of ultra-realistic communication research to digital museum," Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH Conference

- on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry, pp. 29–32.
- [2] J. Liu, H. Ando, “Real-time contact sound synthesis for multisensory interaction,” *Interaction 2008*, pp. 43–44, 2008.
 - [3] J. Liu, H. Ando, “Hearing how you touch: Real-time synthesis of contact sounds for multisensory interaction,” *IEEE Conference on Human System Interaction*, pp. 275–280, 2008.
 - [4] P. Silapasuphakornwong, M. Suzuki, H. Unno, K. Matushima, K. Uehira, and Y. Takeda, “New technique to estimate positions of 3-D images by fitting velocity of reaching movements into function of *chi*-squared distribution,” *International Conference on Multimedia and Human-Computer Interaction*, pp. 125-1–125-4, Prague, Czech Republic, Aug. 2014.
 - [5] M. Suzuki, K. Takazawa, K. Uehira, and H. Unno, “Prediction of visually perceived location using reaching action and effect of reaching distance on it,” *Proceedings of SPIE on CD-ROM: Electronic Imaging 2012*, Volumes no. 8288–8305, pp. 82890N-1–82890N-6, Burlingame, CA, Jan. 2012.
 - [6] M. Suzuki, K. Uehira, “New technique of obtaining visually perceived positions of 3-D images using movements of users’ bodies,” *Displays* vol. 42, pp. 19–24, 2016.
 - [7] M. Suzuki, M. Yokono, K. Uehira, “New technique for prediction of visually perceived location of virtual object in mixed/augmented reality using observer’s action,” *The Eleventh IEEE International Symposium on Multimedia*, pp. 418–424, 2009.
 - [8] K. Takazawa, M. Suzuki, and K. Uehira, “Prediction of visually perceived location of virtual objects using observer’s reaching motion: Influence of reaching distance on precision and accuracy,” *International Conference on Imaging and Printing Technology*, pp. 106–110, Bangkok, Thailand, Aug. 2011.
 - [9] K. Uehira, M. Yokono, M. Suzuki, “Prediction of visually perceived depth of virtual objects from observer’s actions using approximation obtained by Gaussian function,” *Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 189–192, 2010.
 - [10] C. G. Atkenson, J. M. Hollerbach, “Kinematic features of unrestrained vertical arm movements,” *J. Neurosci.*, vol. 5, pp. 2318–2330, 1985.
 - [11] E. Bizzi, F. A. Mussa-Ivaldi, “Geometrical and mechanical issues in movement planning and control,” *Foundation of Cognitive Science*, M. I. Posner (Ed.), MIT Press, Cambridge, MA, pp. 769–792, 1989.
 - [12] D. R. Melmoth, S. Grant, “Advantages of binocular vision for the control of reaching and grasping,” *Exp. Brain Res.* vol. 171, pp. 371–388, 2006.
 - [13] P. Morasso, “Spatial control of arm movements,” *Exp. Brain Res.* vol. 42, pp. 223–227, 1981.
 - [14] P. Servos, M. A. Goodale, L. S. Jakobson, “The role of binocular vision in prehension: A kinematic analysis,” *Vision Res.* vol. 32, pp. 1513–1521, 1992.
 - [15] K. Flowers, “Ballistic and corrective movements on an aiming task: Intention tremor and Parkinsonian movement disorders compared,” *Neurology*, vol. 25, pp. 413–421, 1975.
 - [16] H. Unno, P. Silapasuphakornwong, M. Suzuki, K. Uehira, “Technique for estimating interactive position with 3-D objects based on human hand movements in forehand hitting action,” *Proceedings of KCIC 2015: The Fourth Indonesian-Japanese Conference on Knowledge Creation and Intelligent Computing 2015*, pp. 1–6, Surabaya/Bali, Indonesia, Mar. 2015.

	extension of the HMMs using interval type-2 fuzzy sets to produce interval type-2 fuzzy HMMs to model uncertainties of hypothesis spaces. The advantage of this extension is that it can handle both the randomness and fuzziness of traditional HMM mapping. This system aspires to be a solution to the scalability problem, i.e. has real potential for application on a large vocabulary. Furthermore, does not rely on the use of data gloves or other means as input devices, and operates in isolated signer-independent modes. Experimental results show that the type-2 FHMM has a comparable performance as that of the FHMM but is more robust to the gesture variation.
A2007 17:45-18:00	Stencil Cutouts for Virtual Reality Inputs Natalie Ausmeier and Turgay Celik Council for Industrial and Scientific Research, Pretoria, South Africa <i>Abstract</i>—Virtual Reality (VR) is widely used in training simulators of dangerous or expensive vehicles such as aircraft or heavy mining machinery. The vehicles often have very complicated controls that users need to master before attempting to operate a real world version of the machine. VR allows users to safely train in a simulated environment without the risk of injury or damaging expensive equipment in the field. VR however visually cuts off the user from the real environment, which may obtain obstructions. Users are unable to safely move or gesture while wearing a VR headset. Additionally, users are unable to use standard input devices such as mice and keyboards. By using stencils to cutout sections of the virtual world and insert a live video feed of the real world the user can still see and interact with the physical environment.
A2009 18:00-18:15	iMAP-CampUS (an Intelligent Mobile Augmented Reality Program on Campus as a Ubiquitous System): A theoretical framework to measure user's behavioural intention Hamed Alqahtani and Manolya Kavakli King Khalid University, Saudi Arabia <i>Abstract</i>—Technology has become a part of our daily life, growing the vital need for institutions to provide rapid access to information available all the time. Recently, Augmented Reality (AR) has emerged as a technology for educational institutions to enhance students' and visitors' experience through its capability to overlay information into the real world environment. The iMAP_CampUS is a mobile augmented reality application that would have the capability to show campus-related information superimposed on a map of Macquarie University, Sydney. In spite of the popularity of widespread AR applications and user acceptance of geo-based AR technology, there is limited academic research conducted to study users' acceptance of AR applications. In this paper, our goal is to review and clarify the factors influencing the acceptance of iMAP_CampUS systems using the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT), IS success factors and Motivation theory. This integration results in three success measures (information quality, system quality, and user satisfaction) and two acceptance constructs (effort expectancy and facilitating condition). As stated by motivation theory, perceived enjoyment has been affected by visual quality. Therefore, visual quality is one of the external factors in the AR acceptance model we propose.
VS014-A 18:15-18:30	New Technique of Obtaining Positions of Virtual Objects from Users' Hitting Movements for Augmented Reality Simulations Hiroshi Unno, Masahiro Suzuki, and Kazutake Uehira Kanagawa Institute of Technology, Japan <i>Abstract</i>—We evaluated our proposed technique in which the positions of virtual objects were obtained from the movements of users' bodies. This technique is proposed for augmented reality simulations where users' actual bodies, but not their video images, interact with virtual objects floating above the screens. Such simulations require carrying out interactions at the positions of

	virtual objects. However, this requirement is difficult to meet with conventional techniques because of the human visual characteristics. Therefore, the proposed technique utilizes the characteristics of human body movements to obtain the positions of virtual objects. The velocities of movements as a function of time are first fitted into a Gaussian function in the proposed technique. The positions where users' bodies will collide with virtual objects are then obtained before collisions by using the fitted function. In the evaluation, we created a new system in which the proposed technique was running in real time. We also conducted experiments to measure the success rate of obtaining, or the accuracy and precision of obtaining. The results obtained from the experiments indicate that the positions of virtual objects can be obtained in real time. We demonstrated that the proposed technique was feasible.
A3009 18:30-18:45	Augmented Reality Game for People with Traumatic Brain Injury: Concept and Prototypical Exploration Leah Gilbert, <i>Annika Hinze</i>, and Judy Bowen University of Waikato, New Zealand <i>Abstract</i>—Traumatic Brain Injury is the leading cause for disability in young people in New Zealand, and has long-term effects on memory and other cognitive functions. There is increasing evidence linking body movement with memory and memory improvements. We explore here the concept of a mobile memory game which encourages body movements to interact with an augmented reality environment. This paper describes the reasoning for and exploratory design of an Augmented Reality card game for people with Traumatic Brain Injury.
VS019-A 18:45-19:00	VR ethics – A response to the Virtual Reality Code of Ethical Conduct proposed by Madary and Metzinger (2016) <i>James Hazelton</i>, Tweedie Dale and Annaliese Finnane Macquarie University, Australia <i>Abstract</i>—VR offers great potential rewards but also risks to the community. Mindful of these risks, Madary and Metzinger (2016) have proposed a code of ethics for VR and call for further discussion of VR ethics. We respond to this call and make four comments in relation to the proposed code. First, we suggest that such a code is necessary but not sufficient as many key ethical aspects of VR (such as providing the background skills to make access beneficial) will likely be beyond the audience of the code; second any code must be developed via an inclusive and consultative process; third many of the ethical issues raised by VR may be better addressed via extensions to existing codes and finally in a stand-alone code key areas are likely to be access, privacy and psychological triggers.

パーソナルなセンシングデータも蓄積するソフトウェアリポジトリ開発と 知識抽出の研究抽出の研究

I 科 松本 一教, I 科 鷹野 孝典, N 科 岩田 一, I 科 宮崎 剛

1. 研究の目的

高品質なソフトウェア開発技術の確立はソフトウェア工学での重要課題である。そのため的手段として、ソフトウェア開発に関わるデータを網羅的に収集したソフトウェアリポジトリを構築することが有効であることが確認されている。従来は開発に関わるドキュメント類のみが蓄積対象であったが、本研究では開発に携わる技術者等についてのセンシングデータも総合的に収集蓄積することを特徴とする。それらセンシングデータを利用して、ソフトウェア品質との関係をビッグデータ解析技術を使って抽出し知識化する。その知識を活用することで、技術者のセンシングデータからソフトウェア品質を予測したり、品質上の問題がある箇所を予測したりする技術を開発する。

2. 研究の必要性及び従来研究

ソフトウェアの欠陥（バグ）は、時として重大な社会問題につながる。高品質なソフトウェア生産技術確立は、産業界が強く期待する重要課題である。ソフトウェアは人間の高度な知的活動の産物であり、大部分が技術者の手作業で開発される。従来は開発技術者等の人間側に焦点を絞った生産技術研究がほとんどない。技術者のパーソナルなセンシングデータを大規模かつ詳細に収集し、品質管理につなげる手法の開発が必要である。

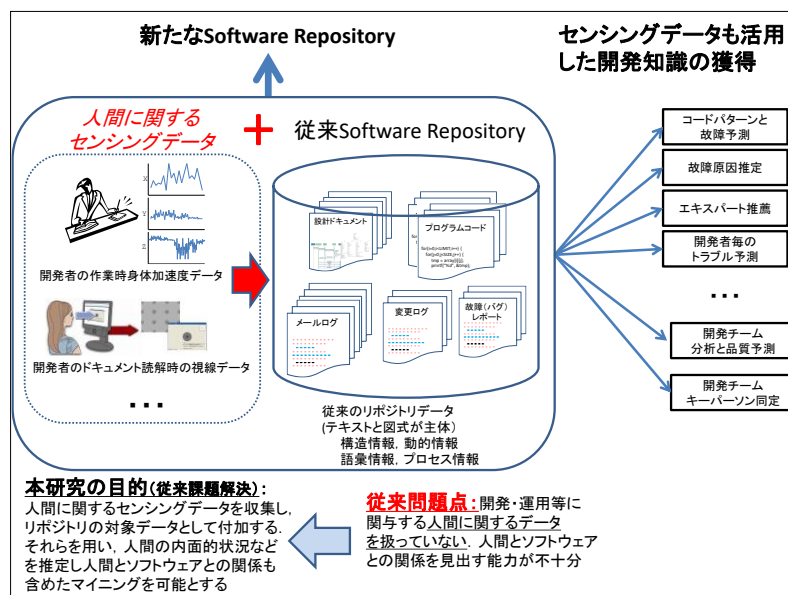


図1 本研究の全体イメージ

この目的を達成するために、まずは視線データ（アイトラッキング）を活用する手法を検討する。可視化以外の視線データ処理技術は未確立であり、データ規格化やノイズ除去手法も未開発十分とは言い難い。従来から申請者らが開発してきている GTD（Global Tracking Diagram）と命名した手法に基づいてプログラムレビュー時の効率を（バグ同定率）レビュー者の視線パターンから推測する技術を開発する。図 1 が本研究の全体イメージを示している。

平成 27 年度では、GTD に関する基本的な技術を開発した。平成 28 年度では基本技術の開発を継続すると同時に、その活用技術に関する発展的研究を行った。また同時に、ソフトウェアドキュメント作成において、文書中に用いる色（テキスト類の彩色）が利用者に影響を与えることが判明したので、その効果とソフトウェア品質に与える影響を測定する研究を実施した。

3. 期待される効果

従来のソフトウェア工学には人間に関するセンシングデータを扱うという発想がない。また、従来は開発に携わる技術者からのデータ収集コストが高い上に、大規模データからの有効な知識抽出技術が不十分であった。本研究は、ビッグデータ等の研究で得られている最新技術成果を利用することで、従来にないセンシングデータを活用していくという点が特徴的である。ソフトウェア開発は完全自動化が困難な領域であり、開発を担当する技術者の能力に依存する部分が多い。本研究により、開発技術者の特性も組み込んだ新たな品質保証技術の開拓が期待できる。

4. 研究の経過及び結果

本年度の研究では前年度の研究を継続して、視線データの活用手法検討を行った。従来の視線データ解析においては、ヒートマップ、Gaze プロットなどを用いた可視化が中心であった。可視化はデータ解析の有力な手段ではあるが、定量的な解釈を得ることが難しく解析者個人の能力に依存することが問題となる。また、数百人程度以上の大規模データに対する解析は現実的に処理が不可能となる問題もある。このために、本研究に置いては、視線データの自動的かつ定量的な解析手段を開発することを目標の 1 つとした。

4.1 GTD（Global Tracking Diagram）の開発

視線データは 2 次元データである。本研究の主目的はソフトウェア開発中の技術者の視線に注目することである。技術文書特にプログラムや関数仕様書の特徴から、1 行当たりの情報量は比較的少なく、多くの行を用いることで必要な情報を提供しているという特徴がある。この特徴を用いて、文書解読時の経過時間と解読している位置（行数）に着目す

るという方式を開発した。これにより、解読行位置の1次元時系列データとして処理できることになる。1次元時系列データとして処理可能になったことから、申請者らが所有するパターン抽出などに関する様々な技術が適用できるようになった。基本的な方式については前年度（平成27年度）と同じであるが、今年度は実装アルゴリズムの改良による高速化などを行った。

4.2 視線部分パターンの抽出とクラスタリングおよび正規圧縮距離方式

GTD で表現された視線データの分析から、いくつかの特徴的なパターンが出現することが平成27年度の研究で判明している。これらのパターンは技術文書の理解度と関係が深いことも判明している。今年度は、これらのパターンを自動的に抽出するために、正規圧縮距離（NCD, Normalized Compression Distance）を用いる手法を開発評価した。NCDの概要は以下の通りである：

データ x に対して、圧縮器 C により x を圧縮したときのサイズを $C(x)$ で表す。データ x とデータ y を結合したデータを yx で表す。これらを逆の順番で結合したデータを同様に xy と表す。これらに対する圧縮後のサイズが $C(yx)$, $C(xy)$ である。 $C(yx)-C(y)$ は、 x と y との違いを示していると考えることができる。 $C(xy)-C(x)$ についても同様である。これらを、元データである $C(x)$ や $C(y)$ で正規化したものが NCD であり、以下で定義される。

$$NCD(x,y)=\max\{C(yx)-C(y),C(xy)-C(x)\} / \max(C(x),C(y))$$

x と y を結合したデータは結合する順番を変えてもデータサイズも変わらないと仮定すれば $C(yx)=C(xy)$ が成り立つので、この仮定の下では以下のようなになる。

$$NCD(x,y)=C(yx)-\min\{C(x),C(y)\} / \max(C(x),C(y))$$

上記の NCD を距離として用いることにより、視線データに対するクラスタリングを行うことができる。クラスタリングアルゴリズムとしては、任意の手法を利用することができる。今年度では、 k -means 法を採用して、この手法による有効性を評価することができた。今回開発した NCD を用いる方法において、昨年度までのパターン抽出手法とは異なり、特徴量を事前に計算する必要がないという利点を持つ。実験により本手法の有効性を実証するとともに、現在の圧縮器の能力に伴う手法の限界についてもある程度明らかにすることができた。

4.3 ソフトウェアドキュメントにおける色の問題

平成27年度研究を進める中で、ソフトウェアドキュメント中の色が品質に影響を与える可能性が判明した。今年度はこの状況を開発者や利用者の視線データを用いて詳細に検証して、品質の高いドキュメントを作成するための方法論を検討した。概要は以下である。

ソフトウェア文書中の主要なキーワードを文書作成者が判定する重要度に応じて着色し、作成者の意図の可読性を高めた文書を作成する。このとき、着色する色の選択方法、色の

輝度、および着色するキーワード数による可読性の変化について測定を行った。同時に可読性の変化だけではなく、読者の短期記憶に与える影響についても測定した。これらの測定により、着色方法（色と輝度）および着色キーワード数が可読性と短期記憶に与える影響を定量的に示すことができた。また、読解時の視線移動データ（アイトラッキングデータ）の解析により、変化が生じる理由についてもほぼ明らかにすることができた。ただし、年齢などの被験者の条件による違いについては、今後の課題として実験と検討を継続することになった。今年度に得られた結果を応用することにより、読者の特性に応じた効率的なキーワード着色を半自動的に行うことで、文書の可読性の向上によるソフトウェア生産性を向上させる可能性を示すことができた。

5. 今後の計画

今年度の研究により基本的なデータ表現技術や機械学習適用のための前処理方式などの準備が整備できてきた。これらの成果にもとづき、更に他のデータも組み込んで活用できるようにして知的なソフトウェアリポジトリ開発の実現を目指す。

6. 研究成果の発表

- (1) 中澤 舜, 鈴木 孝幸, 田中 哲雄, 松本一教, ウィンドウの枠線描画機能を持つクラウドサービス向けウィンドウマネージャ, 電気学会論文誌 C, Vol. 136, pp. 1237 – 1245, 2016.
- (2) Kazunori Matsumoto, Tetsuo Tanaka, Considerations on Web Document Designs, IIAI AAI 2016.
- (3) 中澤 舜, 田中哲雄, 松本一教, 実働時間計測機能とコスト見積り機能を持つデジタルカンバンの開発と適用, 電気学会 情報システム研究会, 2016.
- (4) 杉村 博, 田中哲雄, 松本一教, 文書の著者推定方式の実装と比較, 電気学会 情報システム研究会, 2016.
- (5) Kazunori Matsumoto, Tetsuo Tanaka, Shigenori Ioroi, Possible Worlds Framework for Decision Making of Intelligent Agents, ACIS 2016, 2016.
- (6) Shun Nakazawa, Tetsuo Tanaka, Kazunori Matsumoto, Prototype of Functions for Actual Work Time Measurement and for Task Cost Estimation on the Digital Kanban, ACIS 2016, 2016.
- (7) 高畑 悠, 前川凌佑, 後藤翔太, 松本一教, 類似性に基づく視線データの分析, 電気学会 情報システム研究会, 2016.
- (8) 中澤 舜, 小松和樹, 田中哲雄, 松本一教, スマートフォン操作が可能な大画面デジタルカンバンの開発, 電気学会 情報システム研究会, 2016.

エンドユーザの操作特性解析によるタブレット対応ソフトウェアの 操作支援手法

研究者名：情報ネットワーク・コミュニケーション学科 岩田 一

1. 研究の目的

一般的なユーザが使用する情報端末として、従来の PC(Personal Computer)に代わる形で、スマートフォンおよびタブレット型デバイスが普及してきている。主に Web ブラウジング、電子メール、SNS(Social Networking Service)といった閲覧を中心としたエンドユーザ用の端末として広く用いられてきている。タブレット型デバイスの OS は従来の PC で広く使用されている Windows に限らず、スマートフォンで使用する Android や iOS などが使用されていることも多い。しかし、キーボードやマウスが入力デバイスとして前提となる従来の PC と違い、タブレット型デバイスはタッチパネルでの操作が中心であり、入力の方法が限られてくる。ソフトウェアの場面によって受け付ける入力の種類や操作の結果が異なることも多く、エンドユーザがすぐに操作方法に気づかない場面も増えてきている。

このようなタブレット型デバイス向けのエンドユーザの操作支援として、ソフトウェアの初回起動時にタッチできる場所と機能を図示する、操作説明画面に遷移できるボタン等を設置する、操作説明の Web ページを別途インターネット上に用意し必要に応じてアクセスしてもらう、などの対応が一般的である。しかし、これらの支援を使用するためにはエンドユーザが能動的に参照する必要がある。

そこで本研究では、タブレット型デバイスを使用するエンドユーザの現在の使用状況に応じて、エンドユーザが期待する機能を実現するための操作について支援を行うことを目的とする。また、エンドユーザがタブレット型デバイスの操作に迷う、戸惑う場면을指摘して、開発者に対してユーザインタフェースの改善を行うことができるようにする。タブレット型デバイスにおける適切なユーザインタフェースデザインやエンドユーザに対する操作支援はまだ十分ではなく、本研究の重要性は高いといえる。

2. 研究の必要性及び従来の研究

タブレット型デバイスの入力デバイスは従来型の PC と違い、液晶画面のタッチパネルと、数種類程度のボタンのみで構成されることが多い。PC 向けソフトウェア開発のユーザインタフェースデザインにおいては、入力キーの数が多く多種多様な組み合わせも実現が可能なキーボードや、画面上の場所を精密にポイントすることが可能なマウス等を使用することが前提であり、タブレット型デバイスのユーザインタフェースとは大きな違いがある。タッチパネル上にソフトウェアでキーボードを再現するスクリーンキーボード機能が OS の機能としてサポートされているが、現在の画面にオーバ

ーラップして表示されるため、PC と同様な使い方をすることは難しい。

そのため、タッチパネルのみで多くの操作を受け付けるためのジェスチャーを取り入れているが、ソフトウェアによって受け付けるジェスチャーの種類や、対応する機能が違うために、エンドユーザの行った操作とエンドユーザが求める機能の対応に気づきにくい場面もある。そのため、タブレット型デバイスに合わせた、操作環境を改善する研究を行う必要がある。

既存 PC 上のソフトウェアにおける、エンドユーザの操作環境を改善する手法として、ソフトウェアの操作ログを対象に、マウス操作やキーボード操作の頻度からエンドユーザのソフトウェアの習熟度を分析することで、それぞれの習熟度の段階に適した操作支援を行えるようにする手法について提案した[1]。操作の一貫性を確保するためのガイドラインを独自に制定できるようにし、レイアウトを調整する手法について提案した[2]。Web ブラウザなど同じジャンルに属する複数ソフトウェアにおける操作方法の違いに着目し、ショートカットキーの差異について提示することで学習支援を行うシステムを生成する手法について提案した[3]。タブレット型デバイスの操作支援およびユーザインタフェースデザインの改善においても、これらの手法を応用することができると考えている。

これまでに、タブレット型デバイスの操作支援の手法として、Android ベースのソフトウェアにおいて音声入力による操作を受け付ける機能を、多くのソフトウェアで標準的に使用されている機能の単語を登録することによって、少ない修正で使えるようにする手法について提案した[4]。また、タブレット型デバイスにおけるエンドユーザの操作情報の履歴を取得し、タッチパネル特有の各種操作のアクション回数や、タスクの操作時間などを統計学的に分析することによって、ユーザビリティ評価を支援する手法を提案した[5]。

3. 期待される効果

本研究では、エンドユーザのタブレット型デバイス特有の操作状況を確認し、タッチパネルの操作履歴などから、エンドユーザが期待する結果を推測し検出できるようにする。さらに、それぞれの場面においてソフトウェアが受け付けることのできるタッチパネルの操作と機能についても提示できるようにし、エンドユーザの期待する機能が実行できるようにする。これらによって、タブレット型デバイスにおけるユーザインタフェースデザインの問題点および改善箇所も検出できる。

タブレット型デバイスを使用するエンドユーザ層は厚くなっており、慣れないソフトウェアを使用するときに戸惑うエンドユーザは、今後確実に増加することが予想される。本研究により、エンドユーザが操作に戸惑う場面が減り、タブレット型デバイス用ソフトウェア全体の満足度の向上が期待できる。

4. 研究の経過及び結果

タブレット型デバイス向けのソフトウェアの操作支援を行うにあたり、ソフトウェアごとに操作方法が異なることに着目した。従来型 PC 向けソフトウェアでは、ボタンなどの GUI (Graphical User Interface) 部品の配置方法や、キーボードのショートカットキーの組み合わせがソフトウェア間で共通になるようにする、一貫性の確保が重視されている。しかし、タブレット型デバイス向けのソフトウェアは、従来型 PC 用ソフトウェアと比べて操作の一貫性が十分に確保されていない。

そこで、タブレット型デバイス向けソフトウェアにおける操作と対応する機能を調査し、またエンドユーザのこれまでのソフトウェアの使用経験をもとにして、場面ごとの操作においてエンドユーザが期待する機能を導き出す手法について研究を行っている。具体的には、タブレット型デバイスのソフトウェアに現れる操作の特徴をソフトウェアのジャンルごとにまとめ、ジャンル内の典型的なソフトウェアの操作方法と異なる操作方法が実装されている場合は修正案を開発者に提示するシステムについて提案した[6]。Web ブラウザやカレンダーといったソフトウェアの種類ごとに備える基本的な機能と、ソフトウェアごとに備える独自機能を切り分けてデータベースを作成した。このデータベース作成については、アプリケーションのストアなどを用いて自動化および精度の向上を行えるような仕組み作りを進めている。

また、ユーザのソフトウェア操作時の履歴を踏まえて、ソフトウェアのトップ画面からゴール画面までの全てのパスを導出した上で、ユーザの現在地を把握してユーザの現在地からゴールまでの手順を示すことで、ユーザの操作支援を行う手法も提案した[7]。これらの研究により、エンドユーザのソフトウェア操作の環境を改善することができた。

5. 今後の計画

平成 28 年度内の研究によって、タブレット型デバイスにおける操作の一貫性を保つことによって、エンドユーザの操作を支援する手法を提案することができたが、まだ開発者に手動で修正を必要とする箇所が多くある。そのため、ソフトウェアのソースコードの解析などを行い、できる限り開発者にかかる負担を減らすことができるようにしたい。

また、タブレット型デバイスの操作履歴からユーザビリティを評価する手法についても、タッチパネルの操作履歴だけでなく、加速度センサーなどのログなどからもエンドユーザの戸惑う場面を解析することも引き続き検討している。ログの収集方法も、クラウド上に設置したサーバに対して利用者の個人が特定できないよう配慮をした上で収集を行うことで解析の精度を上げること、解析の結果を他のソフトウェア開発においても共有できるように公開することを検討している。

合わせて、従来型 PC 向けソフトウェアの操作支援手法をタブレット型デバイス

のソフトウェアに対応させる方法についても進めている。ソフトウェアの対応しない操作を繰り返し行っている場面を操作履歴から検知するシステム、Android の GUI に関するガイドラインをまとめ、レイアウトの修正案を提示するシステム、などである。従来型 PC の操作を対象としたソフトウェア操作や Web アプリケーションに関しても、ユーザビリティ向上のための支援を進めていきたい。

6. 研究成果の発表

本成果報告書に対応する成果発表は以下の通りである。

- [1] Hajime Iwata, Nobuo Ikumi, Junko Shirogane and Yoshiaki Fukazawa:
“Automatic Assessment of End-user Adaptive Operation Styles for Software Tutorial Systems”, 7th IADIS International Conference on Information Systems 2014(IS2014), March, 2014.
- [2] Junko Shirogane, Kazuya Sugiuchi, Hajime Iwata and Yoshiaki Fukazawa,
“Support Method to Apply User Interface Guidelines to GUIs Using Guideline Templates”, Proceedings of the 11th Joint Conference on Knowledge-Based Software Engineering (JCKBSE 2014), September 2014.
- [3] Hajime Iwata, “Method to Generate an Operation Learning Support System by Shortcut Key Differences in Similar Software”, The 17th International Conference on Human-Computer Interaction (HCII 2015), August 2015.
- [4] Hajime Iwata and Kazuhide Koyama: “Method of Software Operation Consistency for Tablet Devices by Sound Recognition”, Proceedings of the 11th Joint Conference on Knowledge-Based Software Engineering (JCKBSE2014), September 2014.
- [5] Misaki Matsuzawa, Hajime Iwata, Junko Shirogane and Yoshiaki Fukazawa,
“Support Method of Usability Evaluations for Android Applications Based on Operation Histories”, The Fifth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC2015), October 2015.
- [6] Hajime Iwata, Yusuke Sekino, “A Support Method of Common Gesture Operation Consistency for Android Applications”, The Fifth Asian Conference on Information Systems (ACIS 2016), October 2016.
- [7] 中村史門, 岩田一, 白銀純子, 深澤良彰, “ユーザの状況を考慮した操作支援システムの自動生成”, 電子情報通信学会 知能ソフトウェア工学研究会 (KBSE), 2016 年 11 月 3~4 日.

以上

ソフトウェア開発プロジェクトのモニタリング手法の研究

研究者名：情報工学科 田中哲雄

1. 研究の目的

アジャイルソフトウェア開発では、壁やホワイトボードに付箋などを貼りプロジェクトの状況を見える化するカンバン手法（トヨタ生産方式（TPS）をソフトウェア開発に応用したもの）が用いられる。カンバン手法では、カンバンボードを TODO, DOING, DONE というステージに分け、タスクを書いた付箋を対応ステージに貼り、それを移動させていくことでプロジェクトを管理する。報告者らは、この手法（カンバン手法と呼ぶ）をコンピュータ上で運用するデジタルカンバンを開発し、現在、本学の学生プロジェクトに適用中である。

デジタルカンバンは壁と付箋などを利用した物理カンバンに比べて柔軟性は劣るが遠隔作業が行えるほか、タスクの更新ログを容易に記録できるという特徴を持つ。蓄積されたログを解析し可視化することによって、プロジェクトの支援が可能である。本研究では、デジタルカンバンにおけるタスクカードのステージ移動ログ（移動した時刻や移動元ステージ、移動先ステージなど）を記録・分析してリアルタイムにプロジェクトメンバーに提示することで、問題やその予兆の早期発見を支援することを目的とする。

2. 研究の必要性及び従来の研究

カンバン手法は、①ワークフローの見える化、②仕掛りの制限、③フローの測定と管理、④プロジェクトの運用ルールの明示化、⑤改善のための仕組み、の5つの特性を備えることにより効果を最大限に発揮する。例えば、2004年、Microsoft社のソフトウェア保守チームはカンバン手法により、リードタイムを90%以上減少させ、スループットを3倍以上にし、200%を超える生産性向上を達成した。しかし、これは経験豊富なコンサルタントの支援があつてのことであり、一般には①～⑤の特性を完備したカンバン手法の実践は容易ではない。報告者らは、タスク移動ログを記録・分析することで①～⑤の特性を備えた手法の実践を支援できると考え、そのためのデジタルカンバンを開発中である。

既存のデジタルカンバンツール Microsoft社の Kanban basics や Frédéric Guillot の Kanboard は、タスクのステージ更新ログを解析し、Cumulative Flow Diagram (CFD, 累積フローダイアグラム)を生成し、チーム全体のサイクルタイム、リードタイム、WIP量の推移などを可視化している。Pivic社の Zube や AXIOM ZEN社の ZenHub は、バーンダウンチャートを生成し、タスク残量とベロシティの推移を可視化している。

しかし、学生プロジェクトのように断続的に開発を進めるプロジェクトでは、時期によって確保できる作業時間が安定しないため、リードタイムやベロシティの変動が激しく、CFDやバーンダウンチャートが機能しにくい。そこで報告者らは、時期による変動が小さい

実働時間に着目し、筆者らが開発したデジタルカンバンツールに実働時間計測機能とコスト見積り機能を実装した。

3. 期待される効果

カンバンボード上を移動するタスクのログを可視化することにより、メンバーが感覚的にその存在を感じていたプロジェクトの問題点や改善点について明確な根拠をあたえる。これをプロジェクトメンバー全員で共有することにより、問題を言い出せないという問題はなくなる。もちろん隠し立てもできなくなり、早期の問題解決、プロセス改善が可能になる。特に、タスクごとの実働時間の把握と解析により、学生プロジェクトのような断続的なプロジェクトにおける精密なタスク分析を可能にし、プロジェクト改善のための知見を得ることができる。

4. 研究の経過及び結果

4.1 実働時間計測機能とコスト見積り機能

学生プロジェクトのような断続的なプロジェクトにおける精密なタスク分析のために、開発者の実働時間計測機能とタスクのコスト見積り機能を実装した。

実働時間計測機能は開発者が各タスクに対して実際に取り組んだ時間を計測する機能である。タスクカード上の開始ボタンをクリックすることによって計測を開始し、停止ボタンをクリックすることによって計測を停止する。総作業時間や作業履歴がタスク詳細ダイアログに表示される。開発者が開始/停止ボタンによる計測を忘れても作業履歴の編集により修正できる。また、ブラウザの「閉じる」や「戻る」などの画面遷移時に実働時間計測機能が動いている場合、確認アラートを表示し、計測停止忘れを防止する。

コスト見積り機能は、開発者が開発前に各タスクにコスト見積り値を付加する機能である。コストは、low(1 point), medium(3 points), high(5 points)から選ぶ。大雑把に3つに分けているのは、詳細にコストを分析するのは難しく、また意味がないと考えるからである。コスト見積り値が付加されたタスクは、タスクカードの右下にコスト見積り値を表示する。開発者ごとのWIP量(仕掛かり量)はコスト見積り値の総和で計算する。

4.2 実プロジェクトへの適用

コスト見積り機能と実働時間計測機能を備えた本カンバンツールを、神奈川工科大学の二つの実プロジェクトへ適用した。ひとつは筆者一人による本カンバンツールの開発(以下プロジェクトA)であり、もうひとつは学生6人からなるソフトウェア開発プロジェクト(以下プロジェクトB)である。プロジェクトBでは筆者のうち一人が参加し、

プロジェクトのマネージメントと共に本カンバンツールの利用方法を説明しながら進
行した。両プロジェクトの概要を表 1 に示す。

表 1 対象プロジェクトの概要。

	subject developers	subject tasks	measurement term
Project A	1 person	13 tasks	25 days
Project B	6 persons	28 tasks	47 days

各タスクのステージ更新ログ，実働時間，コスト見積り値から，CFD，バーンダウンチ
ャート，サイクルタイムとコスト見積り値の分布，実働時間とコスト見積り値の分布を算
出した。また，開発者ごとに，サイクルタイムを目的変数，コスト見積り値を従属変数と
して回帰直線を求めた。同様に，実働時間を目的変数，コスト見積り値を従属変数として
回帰直線を求めた。

4.3 結果と考察

(1) Cumulative Flow Diagram

プロジェクト A の CFD を図 1 に，プ
ロジェクト B を図 2 に示す。CFD は各
ステージの累計タスク数の推移を表
すグラフであり，タスク増加量やタス
ク残量，サイクルタイム，リードタイ
ム、WIP 量の推移を読み取ることがで
きる。プロジェクト A とプロジェクト
B では，Backlog ステージの使い方が
異なる。プロジェクト A の Backlog ス
テージは 1, 2 ヶ月からなる 1 イテレ
ーションのうちにやるべき未着手タ
スクを示し，プロジェクト B の Backlog
ステージは近いうちにやるべき未着
手タスクを示す。そのため，プロジェ
クト A では，ある時点での TODO, Doing,
Review, Done の 4 つのステージに属す
るタスクの合計を，プロジェクト B では，これに Backlog を加えた 5 つのステージに属す
るタスクの合計を WIP 量とする。また，プロジェクト A ではタスクのステージが TODO から
Done へ遷移する時間を，プロジェクト B では Backlog から Done 遷移する時間をサイクルタ
イムとする。

一般的に，WIP 量が減るとサイクルタイムは短くなる。しかし，両プロジェクトにおける

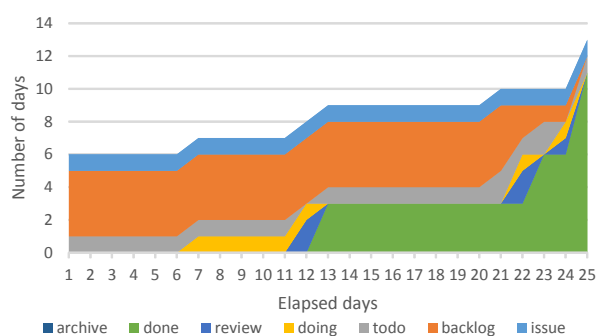


図 1 プロジェクト A の CFD

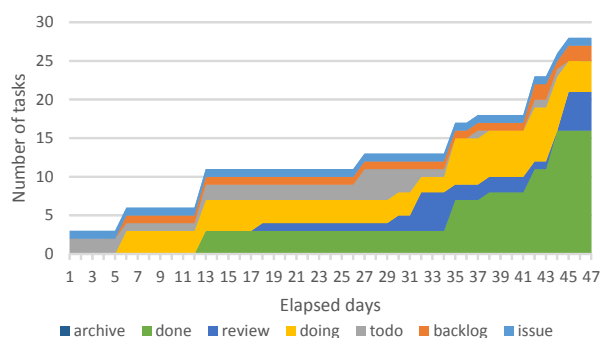


図 2 プロジェクト B の CFD

WIP 量とサイクルタイムは比例しなかった。むしろ、後半になるにつれて WIP 量が増え、サイクルタイムは短くなった。また、断続的に作業が行われるため、数日間数値が変わらないことが多く、さらにその期間は不規則であった。このような断続的に開発を行うプロジェクトでは、CFD を使って WIP 量やサイクルタイム、リードタイムの改善を行うのは難しい。ただし、プロジェクトが継続的に動いていないこと、最終日直前に活動が活発化していることは可視化できている。

(2) バーンダウンチャート

両プロジェクトのバーンダウンチャートを図 3 に示す。バーンダウンチャートは、タスク残量の推移を表すグラフであり、グラフは一般的に右下に傾く。グラフの傾きから、チームのベロシティとその変化がわかり、ベロシティやタスク残量からプロジェクトやイテレーションの完了期日を予測できる。

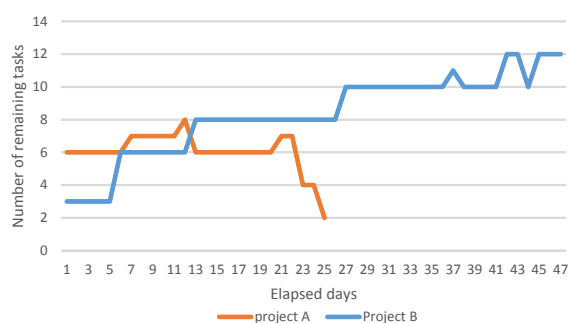


図 3 バーンダウンチャート

プロジェクト A のバーンダウンチャートは、23 日目までほぼ横ばいで、23 日目以降右肩下がりになった。プロジェクト B のバーンダウンチャートは、ほとんど右肩上がりであった。また、図 3 からわかるように、完了タスクは増えていたが、増加タスク数のほうが多かった。プロジェクト B は、最初にタスクを列挙してから作業するという方針を取っていなかったため、バーンダウンチャートによる可視化が適応できなかったと考えられる。どちらのプロジェクトでもバーンダウンチャートから、ベロシティの計測や完了期日の予測は難しい。ただし CFD 同様、プロジェクト A では継続的にプロジェクトが動いていないことは可視化できている。

(3) サイクルタイムとコスト見積り値の関係

両プロジェクトのサイクルタイムとコスト見積り値の分布を図 4 に示す。開発者ごとに分析するため、サイクルタイムはアサインしてから完了するまでの時間、すなわち、タスクが TODO ステージへ変更されてから Done ステージへ変更されるまでの時間とする。また、次節で示す実働時間とコスト見積り値の分布と対比するため、実働時間を計測したタスクが 2 個未満の開発者およびそのタスクは除外する。図 5 も同様である。

開発者ごとの回帰直線の寄与率は、プロジェクト B の渡辺は 0.8128、古川は 0.9135 と、高い数値を示す人もいたが、プロジェクト A の中澤は 0.01389、プロジェクト B の中澤は 0.0193 と、非常に低い数値を示す人もいた。仮にコスト見積り値が正確であると仮定すると、寄与率が高い人は安定して成果を出せる開発者だと言える。

外れ値を分析すると、タスクの放置やレビューの放置、ほかのタスクよりアサインのタイミングが少し早いタスク、追い込み時期にアサインしたタスク、などの原因があった。原因は様々であるが、外れ値のタスクを分析することで、CFD やバーンダウンチャートよりも踏み込んだ反省を得るきっかけとなる。

(4) 実働時間とコスト見積り値の関係

実働時間とコスト見積り値の分布を図 5 に示す。

開発者ごとの回帰直線の寄与率は、プロジェクト B の一人を除いて向上した。増加量はプロジェクトや人に依存するが、コスト見積り値との相関はサイクルタイムよりも実働時間のほうが高かった。開発者ごとの回帰係数は、開発者のスキルと反比例した。例えば、学部 3 年生と学部 2 年生を比較すると、3 年生の回帰係数は 79.467、2 年生は 126.68 と、3 年生のほうが小さい。分布をみると、コスト見積り値 low のタスクは開発者によって実働時間の差も小さいが、コスト見積り値が medium または high のタスクは開発者によって実働時間の差が顕著である。期日までに余裕があるならば、スキルの低い人（古川や浦野）に medium や high のタスクを割り当てられるが、余裕がないときは、スキルの低い人には low のタスクを、高い人（渡辺や中澤）には medium や high のタスクを中心に割り当てるのが効率的である。開発者ごとに確保できる作業時間を決めることで、図 4 からスキルの低い人にどの程度タスクを任せられるか計画できる。

外れ値は、タスクの分析不足のみが原因であった。分析不足の結果、大きすぎるタスクの作成や、コスト見積りミスが発生し、外れ値となった。例えば、プロジェクト A のコスト見積り値 high のあるタスクは、ひとつの機能の実装のために、リファクタリング、ロジックの実装、見た目の実装を要した。これらはそれぞれ、コスト low か medium のタスクとして分割できる。この分析例からは、タスクのコスト見積り値に high を付加する前に、上記のように二つ以上のタスクに分割できないか検討すべきだという学びが得られた。このように実働時間とコスト見積り値の外れ値の原因を分析することにより、コスト見積り精度の向上を図ることができる。

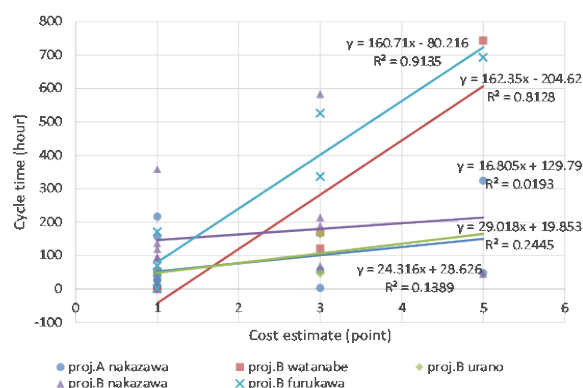


図 4 サイクルタイムとコスト見積り値の分布

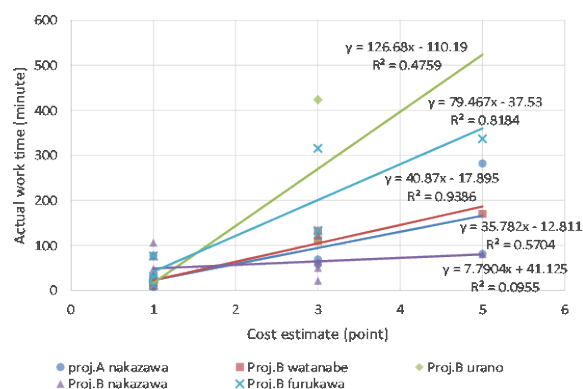


図 5 実働時間とコスト見積り値の分布

4.4 まとめ

断続的な開発を行うプロジェクトでも時期によって変化しないタスクの実働時間に着目し、デジタルカンバン上に実働時間計測機能とコスト見積り機能を開発した。開発したデジタルカンバンをふたつの学生プロジェクトに適用し、CFD、バーンダウンチャート、サイクルタイムとコスト見積り値の分布、および実働時間とコスト見積り値の分布を算出した。断続的なプロジェクトでは CFD やバーンダウンチャートを利用するのは難しいが、サイクルタイムとコスト見積り値の分布から開発フローやステージポリシーの改善のきっかけが得られること、実働時間とコスト見積り値の分布から期日と開発者ごとのスキルを考慮したタスク割り当てが可能になること、およびタスクの分析不足の改善の反省が得られることがわかった。

5. 今後の計画

上記で述べた機能のほか、プロジェクトの完了日予測機能と問題タスクの検知機能を実装し、別の学生プロジェクトで試用した。その結果と開発者らへのインタビューの結果から、これまで開発してきた機能により計測されるさまざまなデータを用いることで、プロジェクトのアジャイル度ともいえるべきある種の成熟度の指標を導くことができ、それをプロジェクトの改善に役立てることができるとの感触を得た。今後、指標の具体化とその指標を用いた成熟度向上のための方法を検討していく。

6. 研究成果の発表

本研究の成果を以下の通り発表した。

- [1] Shun Nakazawa, Tetsuo Tanaka, and Kazunori Matsumoto, Toward Visualization of Software Project using Digital Kanban Log Analysis, The Twenty-First International Symposium on Artificial Life and Robotics 2016(AROB 21st 2016) Proceedings, pp. 861-864, 2016
- [2] Shun Nakazawa, Tetsuo Tanaka, Development and Application of Kanban Tool Visualizing the Work in Progress, 5th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI AAI2016) Proceedings, pp. 908-913, 2016
- [3] 中澤 舜, 田中哲雄, 松本一教, 実働時間計測機能とコスト見積り機能を持つデジタルカンバンの開発と適用, 電気学会情報システム研究会資料, IS-16-022, 2016

平成28年度重点配分経費（研究）成果報告書

多重化による合理的配慮対応・教育用ディスプレイシステムの開発

研究者名：所属学科 情報メディア学科 白井暁彦

研究費配分額：700千円

1. 研究の目的

本研究「多重化による合理的配慮対応・教育用ディスプレイシステムの開発」は、多重化ディスプレイを教育・トレーニング用途に使用する場合の特性を明らかにすることを目的としている。従来の情報保障・情報アクセシビリティの向上といった一方通行の技術から、合理的配慮における障害者と非障害者の平等性、特に演習系講義やグループワークといった同時双方向性の必要となるシチュエーションにおける、複数のソリューションの融合による、あらたなコンセプトの合理的配慮ソリューションを提案する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

本研究が実施された2016年4月より、「障害者差別解消法」が施行された。この法律は国連「障害者権利条約」の日本での批准に向けた「障害者基本法」の改正および「障害者差別解消法」による一連の法整備である。障害者差別解消法の理念として、障害(disability)に基づく差別を禁止し、平等な機会、待遇などを保証するなどの「合理的配慮」が提供されることにある。ここでの「合理的配慮」とは「障害者から何らかの助けを求める意思の表明があった場合の、負担になり過ぎない範囲の社会的障壁を取り除くために必要な便宜」と定められており（同法第2条）、同様の配慮はアメリカにおいては「リハビリテーション法」で定められており、具体的にICT技術における配慮について条項がある（第508条）。これによると、アメリカ政府機関が所有する電子技術や情報技術は、身体障害を持つものも等しく使えることを条件としており、様々なバリアフリー技術の研究開発や社会展開が望まれている。この法整備によって、義務ないしは努力目標として制定されており、日本企業においてもグローバルで商品展開をする場合は当然考慮しなければならない。

我が国における合理的配慮の整備および社会理解は、上記のような法整備の遅れもあって世界的には遅れをとっている。国内での情報のアクセシビリティについての研究や整備は、点字化、音声化、拡大文字化、出版物と図書館の複製変換サービス、オーディオブック、DAISYや「サピエ」といった音訳化、EPUBなどの電子出版形式が中心に実施されており、筑波技科大の研究が特徴的である。一方ではその研究成果は個々の障害に寄りそう研究であることが多く、一般化は難しい。例えば会議においては視覚・聴覚の障害に対して情報保障といった話者のテキストを書き起こす活動が行われている。近年ではモバイル機器による集合知や機械学習技術の貢献もあり、音声認識ソフトウェアの進歩がめざましいが、実際にはこれらの要素技術は合理的配慮に向けた基盤となる一般化されたシステム、ソリューション、展開方法論が必要となるが、これまでのアプローチのままでは「健聴者→聴覚障害者」という組み合わせに対しての一方通行のソリューションでしかない側面は否定できない。つまり日本国内において、従来のバリアフリーやユニバーサルデザインという既存の概念とは別に、合理的配慮という障害者への情報保障のための新たな概念への理解・周知・対応が必要になる。

本学においても、障害者差別解消法にそって2016年度より合理的配慮が実施されている。講義系科目であればノートテイクによる情報保障である程度の配慮は行えるが、プログラミングなどの演習系科目や、就職活動やセミナーのようなグループワーク、卒研指導のような未知の対話と実験によって構成されるアクティブラーニングでは、より幅広い利用シーンや、障害者からみた情報空間を想定して、他のユーザ（いわゆる健聴者・教授者など）との同時・双方向性を踏まえた「多様性」を考慮することが、今後の合理的配慮のためのICTソリューションに

求められると考える。

本研究では、このような社会的背景に沿って、教育機関や企業において、従来の「話者から聴講者」の一方通行のサポートを目的とした技術に加え、演習、自発的な学びといったシーンにおける、合理的配慮のためのICTソリューションを提案する。

3. 期待される効果

提案の基盤となる技術は、第4世代多重化不可視映像技術「ExPixel」である。本技術は、従来からも多言語の同時表示や、「2x3D」方式による立体盲と呼ばれる立体視知覚が十分でない、もしくは難がある視聴者と、通常視聴が可能である視聴者を同時に成立させることができるソリューションとなる可能性が期待できる。

2016年度、研究プロジェクト開始時、液晶フラットパネルディスプレイでの多重化不可視映像を実現する第4世代不可視技術「ExPixel」、そして偏光メガネ等のデバイスの装着が不要な、多人数視聴を可能とする第5世代多重化技術「ExField」が実現していた。「ExPixel」は民生品のパッシブ3D液晶を使用したハードウェアの改造不要な多重化不可視映像技術であり、CPUベースのコンバータツール、Unityで動作するGPUベースのリアルタイムシェーダー、FPGAベースのリアルタイム変換ハードウェアとしての実装に加え、教育やビジネスの現場に広く利用できるマイクロソフト「PowerPoint」のアドインとしての実装「ExPixel Generator」を、富士通SSLと共同で開発を行っているが、合理的配慮を想定とした聴覚障害者や他の健聴者との講義のハイブリッド化には一定の効果を期待できつつも、定量的・定性的データは存在していなかった。

もうひとつの核となるソリューションが音声認識ソフトウェアである。本研究では株式会社富士通ソーシャルサイエンスラボラトリから発売されている聴覚障害者支援を目的とするネットワーク対応の口述筆記ソフトウェア「LiveTalk」との連携を行う。

多重化技術と音声認識ソフトウェアの統合により、講義や演習、グループワークなど、複数人が情報を共有する場において、発話者の発言を音声認識し、即時テキストに自動変換して複数のパソコン画面に表示することで、参加者全員が双方向・リアルタイムに情報を共有できる環境の構築が期待できる。

4. 研究の経過及び結果

研究初期は白井研究室・菊崎駿介、鈴木久貴ら、そして富士通グループの障害者雇用の中心にある富士通ラーニングシステム社と協力し、聴覚障害および合理的配慮の現状について、また「Live Talk」を通じた企業における先進的取り組みを学ぶ時間に充てた。

この予備調査により、本学でも行われているノートテイクによる口述筆記には、演習やグループワークにおいてはいくつかの問題があることが発見できた。まず「あと10分です」といった進行に関わる重要な音声情報が伝わりづらいこと。この情報が伝わらないことで障害者には「（何故かわからないが）突然周囲が慌て始めた」といった情報格差を生む。また聴覚障害者が集まる職場では「健聴者が障害を生む」という現象も発生することが理解できた。健聴者のほとんどは「手話難聴者」であり、そもそも聴覚障害者どうしの協働であれば問題にならない環境も存在するということである。「音声認識の誤認識」をどう捉えるか？についても知見ができた。同音異義語がある日本語においては、音声認識ソフトウェアの認識率は理論上100%にはならない。誤認識を修正することは理解度を上げるが、リアルタイム性を損なう。そして、多くの誤認識は他の健聴聴講者にとって「笑い」のタネになり、話者自身が集中できない。一方で、誤認識は全く不要ということではなく、むしろ聴覚障害者にとって必要なのは、要約筆記ではなく口述筆記であるという。要約されると、細かなニュアンスが伝わらず、要約者の意思が入る。例えば健聴者であるノートテイクには不要に感じる「あー」「えっと…」

といった感動詞・感嘆詞も、その場の雰囲気を理解するためには重要な情報であるという。またノートテイクによる情報保障は「場所とタイミングが一致しない」という問題点があるという。例えば「ここが重要」と話者が示す情報がテキストに変換された時には、すでに話者はその場所を指し示してはいない。このような場所とタイミングの不一致は、演習、特にプログラミング系講義などでは特に必要とされる。

以上のような予備調査から、講義や演習などの話者（教員）の音声は音声認識ソフトウェアのような自動化ソリューションも十分に貢献の可能性はあるが、一方では、誤認識は完全に解消されるわけではなく、健聴者に表示すれば笑いのタネになってしまい、講義の進行を妨げる。クローズドキャプション、テレビの「字幕」ボタンのように選べるなら許容されるが、全員には不要な情報であり、多重化不可視技術やセカンドディスプレイといった方法を比較して検討する必要があることがわかった。

次に多重化技術と合理的配慮の適合性と社会理解を図る目的で、フィールドテストを実施した。2016年6月18日、本学主催にて横浜・青少年センターにおいて実施された小学生向け科学イベント「科学のひろば2016」において、本学指定のヒト倫理審査（承認番号20160920-13）および同意書を取得の上、PowerPoint Generatorを用いた実験を実施した。合理的配慮に関して教育向け授業支援手法を提案し、その評価をクイズ形式のプレゼンテーションを用いて公開実験で実施した。一般参加者の4歳から9歳の男女56人を対象に多重化プレゼンテーションを行い、全4問を通して、それぞれ「ヒント」、「正答」、「ルビ」を多重化提示した場合について、またその画質についてアンケートによる主観評価を行なった。結果としては、ルビとヒントにおいて効果が高いことが可能性として示唆された。

続いて研究室内の実験環境において「ExPixel Generator」を用いた教育向け授業支援手法について引き続き詳細の評価実験を実施した。学内の学生12名、教員1名を対象にSPI試験対策本から15問をスライド化して使用し、「ヒント」、「正答」、「メガネなし（コントロール条件）」の提示を行い、アンケートによる主観評価、メガネ使用時間による客観評価、15問のSPI試験・非言語問題3セッション試行を通した正解数の変化による学習成果の客観評価を調査した。主観評価は偏光メガネの使い方を理解していなかった被験者を除くN=55（人）、「ルビ」が70.7%で最も役に立ったと評価された。正解数の変化による客観評価は、実験を完了しなかった被験者を除くN=10（人）で、{ヒント、正答、メガネなし}

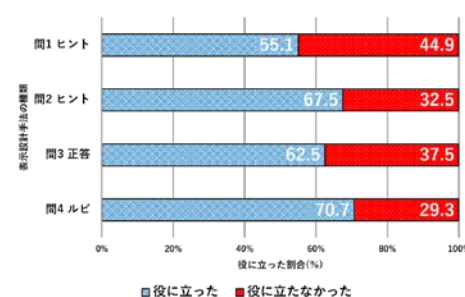
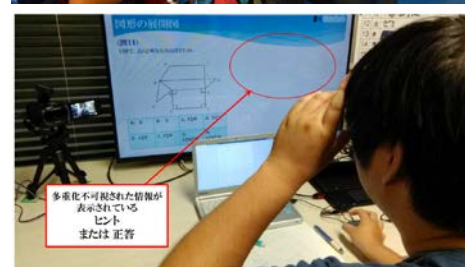
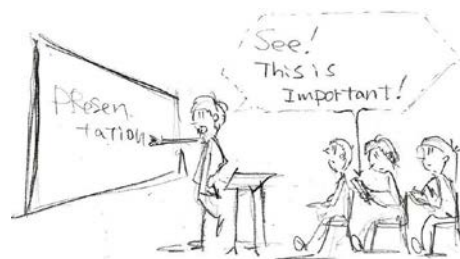


表 2: メガネ使用時間の差と変化

表示設計手法	セッション2	セッション3
手法 A	0:03:18	0:00:41
手法 B	0:00:20	0:00:08

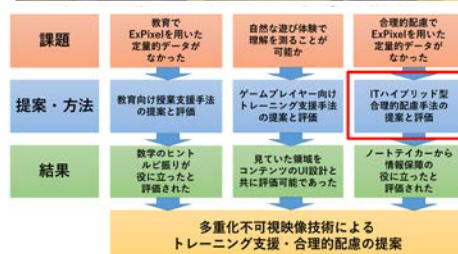
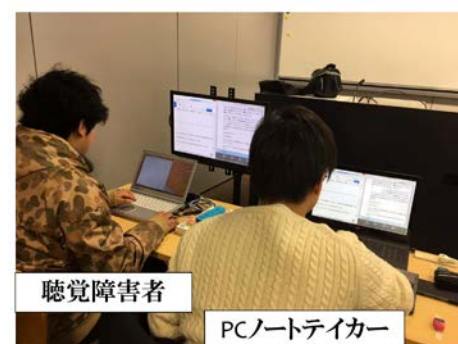
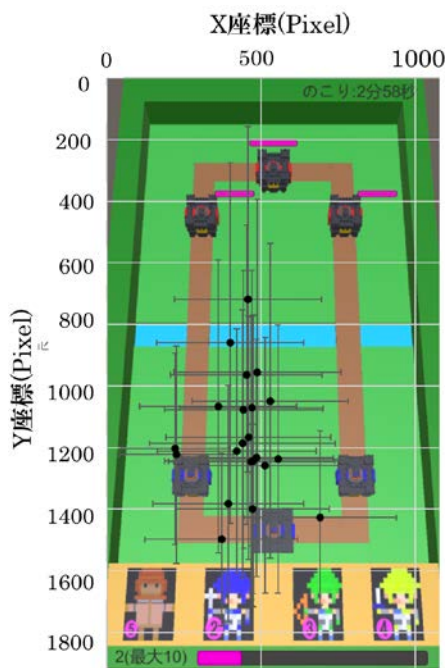
= {3, 4, 3}, 最も正解数が多かったのは「正答」, 次いで「ヒント」. ただし「正答」は第2セッションから正解数の変化が見られなかった. メガネ使用時間による客観評価は, 第2セッションでは「ヒント」のメガネ使用時間が一番長く, 第3セッションでは「ヒント」, 「正答」とともに時間が減っていた. ここまでの結果は「多重化不可視映像技術(第4報): 多重化不可視映像技術による授業支援手法の提案」として, 第21回 日本バーチャルリアリティ学会大会 (2016/9/14) [1]において発表を行った.

続いて, 多重化不可視技術と視線トラッカーによる評価システムを開発した. 視線トラッカー「Tobii EyeX」と「ExPixel FPGA」を同時使用することで, 被験者が画面中のどの場所を注視しているか, 被験者自身の注視を引かずに測定することが可能になった. この技術により, ゲームシステムやその習熟を評価可能になった「RTSゲームのプレイログ分析によるプレイヤー養成システム」としてエンタテインメント・コンピューティング・シンポジウム2016にて発表を行なった (2016年11月5日) [2].

本研究プロジェクトの最終形態として上記の「ExPixel」, 「LiveTalk」, 「Tobii EyeX」を統合し, ノートテイカーを補助する「ITハイブリッド型合理的配慮手法」を提案し, 実際の演習授業で評価を行なった. 本学の情報メディア学科 2年生後期必修科目「情報メディア基礎ユニット」を受講する聴覚障害者 (等級2級) の学生とPCノートテイカーを対象に, 全15回中3回視線データによる客観評価を実施し, 視線データによる客観評価, カウンタによる主観評価を行なった. 詳細については, KAITシンポジウム2016 「多重化不可視映像技術による合理的配慮・授業支援手法の提案」(2016年12月10日)において報告している[6].

5. 今後の計画

本重点研究により, 合理的配慮という社会実装を達成した意味は大きい. また関連した研究成果として, 基盤技術としてのExPixelおよびExFieldの基盤技術[4]やツール・応用開発[5]と並行し, 被験者のアテンションを引かない視線評価ツールを構築し[2], ゲームの習熟評価や, 人工知能との協調作業による上達支援ツールを開発できた. 特に「A. I. See: 多重化不可視映像技術を用いたボードゲームプレイ上達支援ツール」[3]では, アナログボードゲームである将棋をコンピュータビジョンで認識し, 将棋AIにより最善手を解析し, 多重化不可視画



面にて表示する．人工知能と人々の理解と信頼，協調作業とその使われ方についての研究，メディアアート作品としてのメッセージ・意義も大きい．

6. 研究成果の発表

[1] 菊崎 駿介，鈴木 久貴，白井 暁彦：多重化不可視映像技術(第4報)：多重化不可視映像技術による授業支援手法の提案，第21回 日本VR学会大会，4 pages, 2016/9/14

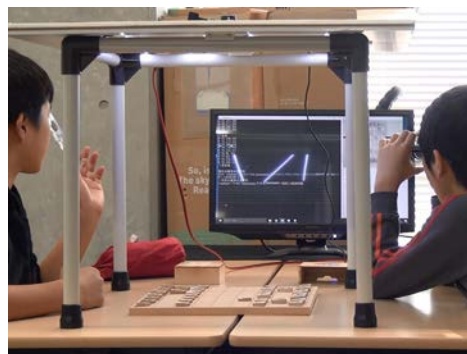
[2] 榊原 諒，白井 暁彦：RTSゲームのプレイログ分析によるプレイヤー養成システム，エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2016論文集, 2016, 42-45, 2016/11/05

[3] 古田 真緒，白井 暁彦：A. I. See：多重化不可視映像技術を用いたボードゲームプレイ上達支援ツール，エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2016論文集, 2016, 52-54, 2016/11/05

[4] 鈴木 久貴，山口 裕太，須貝 孝明，白井 暁彦：裸眼多重化映像技術(第1報)：裸眼多重化映像生成アルゴリズム“ExFeild”，第21回 日本VR学会大会，4 pages, 2016/9/15

[5] 山口 裕太，鈴木 久貴，須貝 孝明，白井 暁彦：裸眼多重化映像技術(第2報)：ExFieldを利用したテーブルトップ型ARゲームシステム -DualDuel-，第21回 日本VR学会大会，4 pages, 2016/9/15

[6] KAITシンポジウム2016 「多重化不可視映像技術による合理的配慮・授業支援手法の提案」，2016/12/10



【将棋AIとの融合「A. I. See」】

多重化不可視映像技術による 合理的配慮・授業支援手法の提案

研究者氏名 菊崎駿介, 榊原諒, 鈴木久貴, 白井曉彦 准教授 情報学部 情報メディア学科/情報工学専攻

研究の概念

市販され一般に普及している液晶フラットパネルディスプレイでの 多重化不可視映像 を実現する第4世代不可視技術「ExPixel」,そして偏光メガネ等の一切の装着型デバイスが不要な、多人数視聴を可能とする第5世代多重化技術「ExField」が実現している。本研究は、それぞれのアルゴリズムについて、CPUベースのコンバータツール、富士通SSL社と共同開発によるPowerPointアドイン「ExPixel Generator」、ゲームエンジン「Unity」で動作するGPUベースのリアルタイムシェーダー、FPGAベースのリアルタイム変換ハードウェアとしての実装をそれぞれ行っているが、教育やビジネスに広く利用できる実用性、特に合理的配慮を想定とした聴覚障害者や他の健聴者との講義のハイブリッド化については、PoC(Proof of Concept)実験を通して一定の効果を期待できつつも、定量的・定性的データは存在していなかった。本研究では上記のような背景から、多重化ディスプレイを教育・トレーニング用途に使用する場合の特性を明らかにすることを目的としている。

研究成果

【教育支援への応用】

「ExPixel Generator」を使用した教育向け授業支援手法として、不可視情報の表示設計手法を3種類提案して評価した。「ヒント」は問題を解くのに必要な考え方、計算式をヒントとして提示(図1)。「正答」は選択問題の正答記号のみを提示。「ルビ」は問題文と選択肢の漢字すべてにルビを振る。実験の結果、ヒントは偏光メガネ使用時間が長いことから聴講者の主体的な理解を把握するのに適していた(表1)。正解数の変化から、正答よりアクティブ・ラーニング効果が見込まれた(表2)。ルビは幅広い年齢層に対して有効であった。

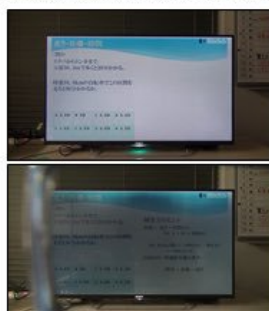


図1: ヒントの提示(上:裸眼/下:不可視)

表1: メガネ使用時間の差と変化

表示設計手法	セッション2	セッション3
ヒント	0:03:18	0:00:41
正答	0:00:20	0:00:08

表2: 正解数の変化(正解数/全15問)

種類	セッション1	セッション2	セッション3
ヒント	7.7±0.44	11.7±0.44	12.0±0.67
正答	5.5±1.25	13.0±1.00	13.0±1.00
メガネなし	7.3±2.44	9.0±2.00	9.3±1.56



図2: ゲーム向けトレーニング支援手法のシステム構成図

【ITハイブリッド型合理的配慮のための聴覚障害学生支援】

FPGAとTobii EyeX, 加えて聴覚障がい者参加型コミュニケーションツール「Live Talk」を統合し、ITハイブリッド型合理的配慮手法を構築し、演習系講義を使い評価中。

裸眼では画面左半分にPCノートブックのテキスト、右半分にLive Talkによる音声認識テキストを提示し、限られた空間において、視線データから利用者がどれだけ音声認識テキストを利用していたか、左右の視線カウント数の比較より評価可能。

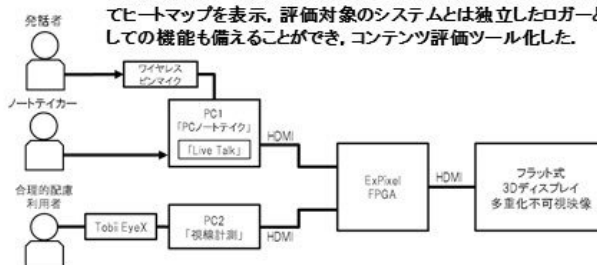


図3: 合理的配慮手法のシステム構成図

今後の展望

今年度はラーニング・トレーニングのためのより具体的・実用的な多重化技術の応用と、定性的・定量的評価を実施し、一定の効果を得た。一方で、人々が抱える障害は多種多様であり動的な問題であり、共通解・一般解は存在しても、完全解を得ることは難しい。特に「ITハイブリッド型の合理的配慮」という着地点は生きた教育現場をフィールドとした倫理と先進性・学生主体が融合した教育研究の先端融合研究であり、今後、聴覚障害以外のディサビリティにおいても広く展開されるべきと考える。ツールとしての完成度を高めいくためにも、他分野・他大学・他業種への展開やコラボレーションを期待する。

【外部発表・公開実験・展示予定リスト】

2016/6/18 科学のひろば2016
2016/9/14 第21回日本バーチャルリアリティ学会
2016/11/5-6 第41回 幾徳祭
2016/11/12 Entertainment Computing 2016
2016/11/26 第5回 科学と技術のひろば
2016/12/7-9 ICAT EGV(米国)
2016/12/10 KAITシンポジウム2016

果樹園農家支援のための気象データ取得・解析に関する研究

研究者名：情報工学科 大塚真吾

1. 研究の目的

現在、果樹園農家の高齢化や後継者問題、輸入果物との価格競争など様々な要因により、果樹園農家の数や果樹栽培面積が年々減少している。このため、代々受け継がれてきた農業に関する経験則や熟年者の栽培の感覚が継承されずに失われるケースが増加している。果物栽培の多くは各農家独自の感覚や経験則によって行われているため、作物の育成に関するデータが公的機関を除いてはほとんど存在しない。この問題を解消すべくサービスを提供している企業も存在しているが、そのほとんどが大規模農業に向けた高価格設定になっており、一般的な果樹園農家の経済状況では導入することが難しい状況にある。

そこで本研究では、果物栽培に必要な経験則を様々な気象情報を記録することにより客観的に示すことができると考え、生育に大きな影響を与えたいくつかの気象情報を記録するシステムを低コスト・省電力で構築することを目的とする。具体的には、島根県隠岐郡のみかん農園の樹木に気象センサを設置し、定期的にサーバ(クラウド上)へ送信を行うシステムの構築をおこなう。また、気象センサを設置したみかんの糖度・酸度・水分量・大きさなどを調査し、気象センサから取得したデータと収穫した果実の品質との相関関係を抽出することも試みる。

2. 研究の必要性及び従来研究

我々は果樹園農家に対して「果物栽培の経験則の数値化」を低コストで実現するため、Arduino や Raspberry Pi などの小型シングルボードコンピュータを用いて、果物の生育データを効率的に取得する手法の検討を行っている。本研究に関連する研究テーマとして、科研費若手(B) (平成 24-26 年度)や科研費基盤(C) (平成 28-29 年度)に採択されており、この分野の研究が対外的にもその必要性が評価されていると考えている。また、我々は現在、島根県隠岐郡海士町のみかん農家の協力の下、実データ取得の実証実験を行っており、実際にみかん農家のニーズのもとに研究を行っている点に関しては、研究の重要性が認められていると認識している。

農業と IT に関する研究分野では、富士通、NEC、日立ソリューションズなどの大手企業が農業クラウドサービスを立ち上げており、最近では中小ベンダも参入をしてい

るが、導入コストやランニングコストが高価であり、家族経営などの小規模農家で導入することは難しい状況にある。本研究では、小規模農家でも手軽にデータ取得ができる環境を提供することを目指しており、研究の必要性は高いと考えている。

3. 期待される効果

我々は島根県隠岐郡のみかん農園の樹木に気象センサを設置し、定期的にサーバ送信を行うシステムを構築し、気象センサを設置したみかんの糖度、酸度などを調査し、気象センサから取得したデータと収穫した果実の品質との相関関係の抽出を目指す。みかん農家において、環境データの取得・解析・比較を低価格で行うという試みや、ランニングコストも考慮して太陽光発電を用いて気象データを取得する試みは独創的であると考えている。期待される効果として、生育環境とみかんの品質の関連抽出が挙げられ、高品質の農作物を大量に生産するための基盤になると考えている。

4. 研究の経過及び結果

本研究では、低価格で導入可能な Arduino や Raspberry Pi といった小型シングルボードコンピュータを使用してシステムの構築を行っている。また、本システムは電源の確保が難しい山間部に設置するため、電源にはソーラーシステムを用い、ソーラーシステムの発電によって得た電力で各センサを稼働させ、モバイルルータを介してセンサが取得したデータをサーバへアップロードすることを目指している。我々が作成・設置したプロトタイプシステムでは、Arduino UNO に温度・湿度・気圧・照度・土壌温度センサを接続したものや、風速計・風向計・雨量計を接続したもの、Raspberry Pi に USB カメラ・温度湿度センサを接続したものを作成した。気象センサによって取得された観測データは 5 分毎にシングルボードコンピュータごとに、それぞれサーバへ転送を行う。受信したサーバ側では、PHP スクリプトにより CSV ファイルとして保存する。HTML の GET メソッドを利用して気象データをアップロードしているため、GET メソッドの属性名をもとにタイムスタンプも付与して保存を行う。

実際に作成した気象システムを島根県隠岐郡海士町のみかん農家に設置し、定期的にサーバへデータ送信されるかの検証を行っている。実際に機器の設置を行った場所では台風の通過や降雪があるため防水加工は必須である。そこで、各機器にそれぞれ防水加工を施した。ソーラーシステムに利用するソーラーバッテリーは専用のバッテリーボックスを利用し、チャージコントローラーは市販のタップを利用した。気象センサは市販のプラボックスの中にシングルボードコンピュータを格納した。照度センサは光の当たるところに設置する必要があるため、別途市販のタップを利用した。土壌センサは直接畝に差し込み、ケーブル部分は癒着性絶縁テープを巻きつける処置を施した。また、各センサを繋ぐケーブルにも絶縁テープ等により防水加工を施した。

今年度の実証実験では 5 分間隔でサーバへデータを転送するよう設定を行ったが、

データの転送はおおよそ問題ないという結論に達した。保存したデータは Web 上でグラフとして可視化されたものを確認することができたため、現地のみかん畑へ直接行かずに果樹園の状況把握が可能であることを確認した。グラフはサーバに保存された CSV ファイルをもとに表示を行っており、グラフ上にカーソルを合わせることでその時点の時刻と任意の気象データを表示することが可能である。また、風向データは数値や折れ線グラフで表示しても、直感的な理解が難しいため、グラフ下部に別途方向を示す画像を表示させるという工夫を行った。

5. 今後の計画

今年度は Arduino や Raspberry Pi を用いて、安価・低電力で動作可能なシステムの構築を行った。実際に設置・稼動をしたところ通信失敗があったが、継続して通信が行われていたため、本ソーラーシステムで長期的な電源供給が可能であり、各機器に施した防水加工により耐環境性が向上したことが確認できた。

今後の計画として、潮風などにより防水加工に使用したタッパがもろくなったことを確認したため、よりよい防水加工の検討を行う必要があると考えている。さらに、現在 5 枚のソーラーパネルと 4 台のバッテリーを用いて複数のシングルボードコンピュータに電力を供給しているが、電源コードの取り回し等が不便なため、小型のソーラーパネルとバッテリー各 1 台でシングルボードコンピュータを稼動させる手法の検討を行う。また、気象センサの台数を増やすことで通信データ量が増加するため、効率の良い転送方法についても検討を行う予定である。さらに、生産者が取得した気象データの可視化方法の検討を行い、生産者が農作物の異変に素早く気づくことが可能なシステムの構築も行う。

6. 研究成果の発表

今年度の研究成果の発表は 2 件である。まず、ARG 「Web インテリジェンスとインタラクション」研究会の第 8 回研究会(2016 年 6 月)において、「IoT を用いたみかん農家支援」というタイトルで発表を行った。つぎに、KAIT シンポジウム 2016(2016 年 12 月)のポスター展示において、「みかん農園における継続的な気象データ取得の取組み」というタイトルで発表を行った。

レバレッジド ETF 取引が株式市場に与える影響分析 ～人工市場シミュレーションシステムによる検討～

研究者名：情報工学科 八木 勲

1. 研究の目的

近年リーマンショックやギリシャ危機により金融市場のボラティリティが大きくなることが度々起こっている．このとき市場を不安定にする直接的な原因として指数先物（日経平均 225 先物，S&P500 先物など）取引やプログラムによる自動売買などが挙げられてきたが，最近ではレバレッジド ETF のリバランス取引も一因ではないかと言われている．

レバレッジド ETF は原資産（例えば，日経平均 225 など）の収益率の何倍かの収益率を目指す ETF である．これらの ETF は，金融市場指数に投資するため，個別株式銘柄よりもローリスクでありながら，レバレッジの恩恵により収益が望めるので，運用残高が飛躍的に伸びてきている．レバレッジド ETF は，レバレッジを維持する（保有する原資産の純資産総額を，レバレッジ ETF の純資産総額の決められた倍数に維持する）よう，原資産が上昇すれば原資産を買い，原資産が下落すれば原資産を売るというリバランス取引を日々行わなければならない．そのため，これらの売買が原因で原資産の価格を不安定にするのではないかとされている．

レバレッジド ETF が原資産の与える影響についてはこれまでにいくつかの実証研究がなされてきたが，千差万別な結果が得られている．また，金融市場の形成にはさまざまな事象と要因が複雑に関わってくるため，実証分析では一部の要因だけを抽出して分析することが困難である．

この課題を解決する分析法の 1 つとして人工市場を用いる方法がある．人工市場とはコンピュータ上に人の手によって人工的に作りだされた架空の金融市場のことである．人工市場に参加している投資家は，エージェントとよばれる，計算機プログラムによって表現された仮想的なディーラーである．人工市場上の各エージェントは，金融価格の変動に関連する情報を入力として受け取り，その情報とエージェントルールに基づき行動し，その売買行動の修正を行っていく．人工市場には現実の金融市場を反映した価格決定メカニズムがあり，各エージェントの投資行動が集積して，人工市場における仮想的な金融価格が決定される．そこで，本研究ではこれまでに構築した人工市場モデルをもとにレバレッジド ETF 取引モデルを実装し，レバレッジの違いが原資産価格変動に与える影響について実験を行った．

2. 研究の必要性及び従来の研究

上記のように，市場を不安定にする直接的な原因として，これまでは指数先物（日経

平均 225 先物、S&P500 先物など）取引やプログラムによる自動売買などが挙げられてきたが、最近ではレバレッジド ETF のリバランス取引も一因ではないかと言われている。これらの ETF は金融市場指数に投資するため、個別株式銘柄よりもローリスクでありながら、レバレッジの恩恵により収益が望めるので、運用残高が飛躍的に伸びてきている。レバレッジド ETF が原資産の与える影響についてはこれまでにいくつかの実証研究がなされてきた。例えば、Cheng らは、1 日で株式指標が 1% 動くと、その日の市場取引終了時点のレバレッジド ETF の売買量は全体の 16.8% を占める可能性があることを示唆している。一方、Trainor Jr. は、レバレッジド ETF のリバランスが S&P500 のボラティリティに与える影響を、前日の取引終了前のボラティリティと翌日の取引開始後のボラティリティを比較することで検証したが、悪影響を与えるという結果は得ることができなかったと結論づけている。

このように実証分析を主とした先行研究では、レバレッジド ETF が市場に与える影響は千差万別である。また、金融市場の形成にはさまざまな事象と要因が複雑に関わってくるため、実証分析では一部の要因だけを抽出して分析することが困難である。

この課題を解決する分析法の 1 つとして、上述した人工市場を用いる方法がある。人工市場を用いた金融市場シミュレーションによる先行研究は数多くあるが、まだレバレッジド ETF に関する研究は行われていない。

そこで、昨年度からこれまでに構築した人工市場モデルをもとにレバレッジド ETF 取引モデルを実装し、レバレッジの違いが原資産価格変動に与える影響について実験を行ったところ、レバレッジドエージェントのレバレッジや初期キャッシュ量が大きくなるにしたがって、市場価格のヒストリカルボラティリティが小さくなることが判明した。

しかし、昨年度モデルでは検証を簡単にするために価格決定方式を簡略化していたため、本年度は価格決定方式をより現実に近い形で実験しなおした。

3. 期待される効果

本結果は、金融当局はレバレッジド ETF の売買を規制すべきか否かの判断材料の 1 つになると考えられる。また、投資家もレバレッジド ETF の動きを考慮した投資戦略が考えられるようになる。

4. 研究の経過及び結果

今年度は従来の人工市場の価格決定方式（価格決定の際に一般投資家エージェントとレバレッジドエージェントとインバースエージェントを含む全エージェント取引を板寄せする方式）から、一般投資家エージェントのみの取引を板寄せし、このとき決定した仮の取引価格からレバレッジドエージェントとインバースエージェントの売買行動を行うことで、一般投資家エージェントとレバレッジドエージェントとインバースエージェントの価格決定を分けて行うように変更し、レバレッジド ETF のリバランス取引が原

資産の価格変動に与える影響について検証した。

その結果、レバレッジド ETF の初期キャッシュ量が大きくなるほど、原資産のリバランス取引量が増大するとともにマーケットインパクトも大きくなり、原資産市場のボラティリティが大きくなることがわかった。そして、レバレッジド ETF の売買が、少なくともボラティリティより大きなマーケットインパクトを与えると、市場を破壊してしまう可能性があることも判明した。

5. 今後の計画

レバレッジド ETF が市場に与える影響について、一定の結果を得ることができたので、本テーマはクローズする予定である。しかし、ここで構築した人工市場は他の金融市場分析、例えば、市場規制等の検証にも利用可能であるので、そちらへと水平展開していきたい。

6. 研究成果の発表

1. Isao Yagi and Takanobu Mizuta: “Analysis of the Impact of leveraged ETF rebalancing trades on the underlying asset market using artificial market simulation,” 12th Artificial Economics Conference, (2016-9).
2. 八木 勲, 水田 孝信: “人工市場シミュレーションを用いたレバレッジド ETF が原資産価格変動に与える影響分析,” 第 18 回 人工知能学会 金融情報学研究会予稿集, SIG-FIN-018, pp. 9--15, (2017-3).

以上

人工市場シミュレーションを用いたレバレッジドETFが原資産 価格変動に与える影響分析

Analysis of the Impact of Leveraged ETF Rebalancing Trades on the Underlying Asset Market Using Artificial Market Simulation

八木 勲^{1*} 水田 孝信²
Isao Yagi¹ Takanobu Mizuta²

¹ 神奈川工科大学情報学部

¹ Faculty of Information Technology, Kanagawa Institute of Technology

² スパークス・アセット・マネジメント株式会社

² SPARX Asset Management Co., Ltd.

Abstract: Financial markets occasionally become highly volatile, as a result of a financial crisis or other factors. Previously, index futures trading and program trading have been singled out as direct causes of market destabilization, but more recently it has been suggested that leveraged ETFs (funds aimed at amplifying several-fold the movement of a price index such as the Nikkei Stock Average or underlying assets) rebalancing trades may also be a factor. This study uses a financial market simulation (artificial market) constructed virtually on a computer to assess the impact of leveraged ETF rebalancing trades on the underlying assets market. Analysis results showed that a larger amount of the managed assets of leveraged ETFs corresponds to a higher volatility of the underlying securities market. They also demonstrated that leveraged ETF trading can destroy the underlying assets market, if the leveraged ETF trading impact on the market is greater than that of ordinary volatility of the underlying assets.

1 はじめに

近年リーマンショックやギリシャ危機、トランプショックなどにより金融市場のボラティリティが大きくなることが度々起こっている。このとき市場を不安定にする直接的な原因として指数先物（日経平均 225 先物、S&P500 先物など）取引やプログラムによる自動売買などが挙げられてきたが、最近ではレバレッジドETF（Exchange Traded Funds）のリバランス取引も一因ではないかと言われている。

レバレッジドETFは原資産や原指数（例えば、日経平均 225 など）の収益率の何倍かの収益率を目指すETFである。これらのETFは、金融市場指数に投資するため個別株式銘柄よりもローリスクでありながら、レバレッジの恩恵により比較的高いリターンが望めるので、運用残高が飛躍的に伸びてきている。レバレッジドETFは、レバレッジを維持する（保有する原資産の純資産総額を、レバレッジドETFの純資産総額の決

められた倍数に維持する）よう、原資産が上昇すれば原資産を買い、原資産が下落すれば原資産を売るというリバランス取引を日々行わなければならない。そのため、これらの売買が原因で原資産の価格を不安定にするのではないかとされている [2]。

一例を挙げると、日経平均 225 を原指標とするレバレッジドETFでは、日経平均先物を運用することで日経平均の収益率の何倍かの収益率を得ることを目指している。このレバレッジドETFのリバランス取引は、株式市場の取引が終了した後から日経平均先物市場の取引が終了するまでの間に行われる可能性が高く、その期間ボラティリティが高くなり市場が不安定になっているのではないかと考えられている。また、日経平均 225 は日経平均先物と価格の連動性が高いため、日経平均先物が大量に売買されボラティリティが上昇すると、日経平均 225 のボラティリティも同じように上昇し市場が不安定になるのではないかと危惧されている。

レバレッジドETFが原指標の与える影響についてはこれまでにさまざまな実証研究がなされてきた。

Cheng ら [1] は、ETF の原指標が 1 日に 1% 動くと、レバレッジドETFのリバランス取引の大きさは、そ

*連絡先: 神奈川工科大学情報学部情報工学科
〒 243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030
E-mail: iyagi2005@gmail.com

の日の市場取引終了時点の原指標の出来高の16.8%を占める可能性があることを示唆している。また、従来より景気後退時や株価が大暴落した後は原指標のボラティリティは大きくなる傾向があり、レバレッジ取引が多いほどその傾向が強くなることが報告されている[8]。レバレッジドETFは近年盛んに取引されてきた商品であるので、原指標のボラティリティの上昇の原因がレバレッジドETFにあるとは一概に言い難い。また、Deshpandeら[3]は、レバレッジドETFによって取引される売買量は、S&P500のそれに対してわずか0.0079%であるため、市場に与えるインパクトは限定的だと結論づけている。さらに、Trainor Jr.[9]は、レバレッジドETFのリバランス取引がS&P500のボラティリティに与える影響を、前日の取引終了前のボラティリティと翌日の取引開始後のボラティリティを比較することで検証したが、明確な結果は得ることができなかったと結論づけている。

このように実証分析を主とした先行研究では、レバレッジドETFが市場に与える影響は千差万別である。また、金融市場の形成にはさまざまな事象と要因が複雑に関わってくるため、実証分析では一部の要因だけを抽出して分析することが困難である。

金融市場の分析法の1つとして人工市場を用いる方法がある。人工市場とは計算機上に仮想的に構築した金融市場マルチエージェントシステムである[4, 5, 7]。エージェントにそれぞれ独自の売買手法を与え、それらに投資家として金融資産の取引をさせ、市場がどのような振る舞いをするかを確認することができる。その一方で、市場側に何らかの制約（市場安定化や効率化のための制度等）をモデル化し組み込むことで、投資家がどのように振る舞うか、さらに、彼らの振る舞いによって市場にどのような影響が現れるかを検討することも可能である。しかし、これまでに人工市場を用いたレバレッジドETFに関する研究はあまり行われていない[10]。

そこで、本研究では、八木ら[11]が構築した人工市場モデルにレバレッジドETF取引モデルを実装し、レバレッジドETFのリバランス取引が原資産価格変動に与える影響について検証を行った。その結果、レバレッジドETFの運用資産が大きくなるほど、原資産のリバランス取引量が増大し、ボラティリティが大きくなることがわかった。そして、レバレッジドETFの売買が、少なくともボラティリティより大きなマーケットインパクトを市場に与えると、原資産市場を破壊してしまう可能性があることも判明した。

2 人工市場モデル

本研究では、八木ら[11]の人工市場モデルを基にモデルを構築した。本モデルでは原資産を想定したリスク資産1つのみを売買対象とする。以下、本モデルにおける取引価格決定法と、本モデルに参加する投資家エージェントについて述べる。

2.1 取引価格決定法

2.2節にて述べる一般投資家エージェントは、それぞれの手法で発注価格と発注資産数を決め注文を出す。市場では、第 t 期の全てのエージェントの売り注文と買い注文をつき合わせて売買を成立させる。買い手側は高い発注価格のエージェントから、売り手側は安い発注価格のエージェントから優先的に取引に参加する。買い手側の発注価格が売り手側の発注価格を上回る、もしくは一致するとき売買が成立する。この決定法のことを一般に板寄せ方式という。

一方、レバレッジドETFを構成するために原資産を売買するレバレッジドエージェントは、上述したように、今期の収益率が原資産の収益率の何倍かになるように市場取引終了間際にリバランス取引を行う。このレバレッジドエージェントの取引法を模倣するため、上記板寄せ方式を以下のように拡張する。まず、一般投資家エージェントの注文を仮につき合わせて、今期の原資産の仮価格を求める。レバレッジドエージェントはこの仮価格に基づいて自分自身の資産保有ポジションを計算し、そのポジションと現在保有している資産数の差分を注文する。最後に、先ほどの一般投資家エージェントの注文にレバレッジドエージェントの注文をつき合わせて、今期の原資産価格を求める。

2.2 エージェント

取引に参加するエージェントタイプは、ファンダメンタリスト、チャートリスト、ノイズトレーダー、レバレッジドエージェントの4種類である。なお、レバレッジドエージェントを除くエージェントのことを総じて一般投資家エージェントと呼ぶ。

2.2.1 ファンダメンタリスト

本市場におけるファンダメンタリストは、リスク資産の理論価格に基づいてその資産の当期価格を予想し、その予想価格において当期資産価値が最大になるようリスク資産保有数を調整する。第 t 期の理論価格 P_t は外部より与えられ、エージェント i の第 t 期の予想価格 $\tilde{P}_{i,t}$ は、平均が $(1 + \epsilon_{i,t})P_t$ で、分散が $(\alpha(1 + \epsilon_{i,t})P_t)^2$

の正規分布に従うものとする。ただし、 P_t は理論価格、 $\epsilon_{i,t}$ はエージェント i の第 t 期における強気度¹、 α はエージェント i の予想価格のばらつきを表す係数である。なお強気度は平均 0、分散 σ_ϵ^2 の正規分布に従うものとする。その他、第 t 期の取引価格を P_t 、第 t 期の取引前のキャッシュを $C_{i,t-1}$ 、第 t 期の取引前の資産保有数を $q_{i,t-1}$ とすると、第 t 期の資産価格決定前のエージェント i の総資産 $W_{i,t-1}$ は次のように表される。

$$W_{i,t-1} = C_{i,t-1} + P_{t-1} \cdot q_{i,t-1} \quad (1)$$

その結果、条件式 (1) の下で、価格決定後の総資産量から計算される効用の主観的期待値を最大にするリスク資産保有数（最適リスク資産保有数） $\tilde{q}_{i,t}$ は、

$$\tilde{q}_{i,t} = \frac{(1 + \epsilon_{i,t})P_t - P_{t-1}}{a(\alpha(1 + \epsilon_{i,t})P_t)^2}$$

と表すことができる。ただし、 $a(>0)$ はリスク回避係数で、この値が大きいほど、リスクを回避するためファンダメンタリストは保有資産数を小さくする。

ファンダメンタリスト i は $\tilde{q}_{i,t}$ を基に売買方針を決定する。第 t 期において、 $\tilde{q}_{i,t}$ が $q_{i,t-1}$ より大きいとき、エージェント i は、価格 $\tilde{P}_{i,t}$ で資産数 $\tilde{q}_{i,t} - q_{i,t-1}$ の買い注文を出す。一方、 $\tilde{q}_{i,t}$ が $q_{i,t-1}$ より小さいとき、エージェント i は価格 $\tilde{P}_{i,t}$ で資産数 $q_{i,t-1} - \tilde{q}_{i,t}$ の売り注文を出す。第 t 期において、 $\tilde{q}_{i,t}$ と $q_{i,t-1}$ が同じとき、エージェント i は売買せずに待機する。

2.2.2 チャーティスト

本市場のチャーティストは移動平均に基づいた売買を行う。チャーティストには順張り（逆張り）が存在する。エージェント i が利用する、第 t 期における $n_{i,t}$ 期間移動平均を $MA_{t,n_{i,t}} = \sum_{j=1}^{n_{i,t}} P_{t-j}/n_{i,t}$ とし、 $\Delta MA_{t,n_{i,t}} = MA_{t,n_{i,t}} - MA_{t-1,n_{i,t}}$ とする。

エージェント i が順張り（逆張り）のとき、次の方針で売買を行う。 $\Delta MA_{t,n_{i,t}}$ が 0 より大きいとき、価格 $(1 + \alpha_T)P_{t-1}$ で資産数 $q_{i,t}^T$ の買い（売り）注文を出す。 $\Delta MA_{t,n_{i,t}}$ が 0 より小さいとき、価格 $(1 + \alpha_T)P_{t-1}$ で資産数 $q_{i,t}^T$ の売り（買い）注文を出す。 $\Delta MA_{t,n_{i,t}}$ が 0 のときは売買せずに待機する。

なお、 $n_{i,t}$ の初期値は、 $[1, 25]$ の一様分布に従う乱数とし、 α_T は平均 μ_P^T 、分散 $(\sigma_P^T)^2$ の正規分布に従う乱数とする。 $q_{i,t}^T$ は平均 μ_V^T 、分散 $(\sigma_V^T)^2$ の正規分布に従う乱数とする。

2.2.3 ノイズエージェント

ノイズエージェント i はそれぞれ $1/3$ の確率で、買い、売り、待機を選択する。エージェント i は、売り買いともに、価格 $(1 + \alpha_N)P_{t-1}$ で資産数 $q_{i,t}^N$ の注文を出す。ただし、 α_N は平均 μ_P^N 、分散 $(\sigma_P^N)^2$ の正規分布に従う乱数とし、 $q_{i,t}^N$ は平均 μ_V^N 、分散 $(\sigma_V^N)^2$ の正規分布に従う乱数とする。

2.2.4 レバレッジドエージェント

レバレッジドエージェントは、原資産の収益率の L 倍を目指すレバレッジド資産を運用するエージェントである。原資産価格が上昇もしくは下降すると、各エージェントのレバレッジド資産のレバレッジ²も変化する。そこでレバレッジドエージェントは、保有純資産総額の収益率が原資産の収益率の L ($-L$) 倍になるよう原資産のリバランス取引を行う³。

例えば、キャッシュを 1,000 のみ保有するレバレッジドエージェントが、価格 100 の原資産をレバレッジ 2 倍で運用するとする（表 1）。はじめにレバレッジドエージェントは原資産を 20 購入する（キャッシュの不足分 1000 は借金するものとする）。このときのレバレッジドエージェントの保有純資産総額は 1,000 ($= 100 \times 20 - 1,000$) で、エクスポージャーは 2,000 となり、レバレッジは 2 ($= (100 \times 20)/(100 \times 20 - 1,000)$) である。第 1 期の原資産価格が 110 になると、レバレッジドエージェントの保有純資産総額は 1,200 ($= 1,000 \times 1.2$)、エクスポージャーは 2,200 ($= 2,000 \times 1.1$) となる。このとき、必要とされるエクスポージャーは 2,400（レバレッジは 1.83 ($= 2,200/1,200$)) であるので、原資産を 1.81 ($= (2,400 - 2,200)/110$) だけ追加購入して、レバレッジを 2 倍に維持しなければならない。次に第 2 期の原資産価格が 99 になると、レバレッジドエージェントの保有純資産総額は 960 ($= 1,200 \times 0.8$)、エクスポージャーは 2,160 ($= 2,400 \times 0.9$) となり、レバレッジは 2.25 ($= 2,160/960$) となる。必要とされるエクスポージャーは 1,920 であるので、原資産を 2.42 ($= |1,960 - 2,160|/99$) だけ売却して、レバレッジを 2 倍に維持しなければならない。

以上のような売買を行うレバレッジドエージェントを次のようにモデル化する。

第 t 期の一般投資家エージェントのみの取引によって決まる原資産の仮価格を P_t' とし、第 t 期のエージェント i の資産保有数を $S_{i,t}$ とする。そして、目標となるレバ

²レバレッジ＝保有原資産総額/保有純資産総額。ただし、保有原資産総額＝原資産価格 × 原資産保有数、保有純資産総額＝原資産価格 × 原資産保有数 + キャッシュ。

³原資産価格が変動するごとに、レバレッジが L 倍になるよう修正していかないと、保有原資産総額の収益率が保有純資産総額の収益率の L 倍にならなくなるため。

¹強気派ほど予想価格を理論価格より高く設定するので、正方向に大きな値を設定し、弱気派ほど予想価格を理論価格より低く設定するので、負方向に大きな値を設定する。

表 1: 原資産の収益率に対する 2 倍のレバレッジド ETF のリバランス取引例

期	原資産		2x 原資産		2x レバレッジド ETF			
	(1) 価格	(2) 収益率	(3) 収益率	(4) エクスポージャー (前期の (6)×(2))	(5) 純資産総額 (レバレッジ) (前期の (5)×(3) (= (4)/(5)))	(6) 必要な エクスポージャー (= (5)×2)	(7) 必要な 売買 (= (6)-(4))	(8) 必要な 原資産取引数 (= (7)/(1))
0	100			2,000	1,000 (2)	2,000		
1	110	10%	20%	2,200	1,200 (1.83)	2,400	200	1.81
2	99	-10%	-20%	2,160	960 (2.25)	1,920	-240	-2.42

レッジ L が達成されている状態で取引を開始する。すなわち、初期資産保有数 $S_{i,0}$ は、 $S_{i,0} = L \cdot C_{i,0} / P_0$ とし、それに伴い、初期キャッシュ $C_{i,0}$ は、 $C_{i,0} = C_{i,0} - P_0 \cdot S_{i,0}$ となる（レバレッジ分、借金をするようになる）。第 t 期のエージェント i の保有純資産総額 $NAV_{i,t}$ 、レバレッジ $L_{i,t}$ はそれぞれ次のように表される。

$$NAV_{i,t} = P'_t \cdot S_{i,t} + C_{i,t}$$

$$L_{i,t} = \frac{P'_t \cdot S_{i,t}}{NAV_{i,t}}$$

第 t 期のエージェント i の発注数 $V_{i,t+1}$ は次のように表される⁴。ただし、上記のように発注数に端数が出る場合は切り捨てる。

$$V_{i,t+1} = \left\lfloor \frac{(L-1)P'_t \cdot S_{i,t} + L \cdot C_{i,t}}{P'_t} \right\rfloor$$

本エージェントの注文は可能な限り約定させないといけなないので、買い注文の際の発注価格はどの一般投資家エージェントよりも高く、売り注文のときの発注価格はどの一般投資家エージェントよりも安く設定する。

$NAV_{i,t}$ が 0 以下となったとき、本エージェントは破産したものとし、一旦初期状態に戻した後、破産した次の期から再度市場に参加させる。

2.3 周囲の好成績投資家の投資法に影響される投資家のモデル化

エージェントの評価学習機能についても既述の人工市場モデル [11] に従う。すなわち、取引終了後、各エージェントは運用成績の評価を行い、他のエージェントと比較して相対的に成績が悪いエージェントは、成績のよいエージェントの売買ルールの模倣を行う。ファンダメンタリストは強気度を、チャーティストは移動平均の期間を模倣する。さらに、エージェントが試行錯誤的に新しい売買ルールを求める姿を客観的に表す

⁴ $V_{i,t+1}$ は次の式から求められる。

$$L = \frac{P'_t(S_{i,t} + V_{i,t+1})}{P'_t(S_{i,t} + V_{i,t}) + (C_{i,t} - P'_t \cdot V_{i,t+1})}$$

ため、一部のエージェントの売買ルール変更 randomness をもたせた。

本市場ではエージェントの売買タイプの割合を固定しているため、エージェントが他の売買タイプに移ることはない。すなわち、成績の悪いファンダメンタリストは成績のよいファンダメンタリストの模倣を試みるが、運用成績のよいチャーティストやノイズエージェントを模倣することはない。なおノイズエージェントは、運用成績の評価と模倣は行わない。以下、各タイプにおける運用成績評価と模倣の手順について述べる。ここで、あるエージェント i の第 $t-1$ 期から第 t 期の資産変化率を $R_{i,t}$ ($= W_{i,t} / W_{i,t-1}$)、過去 N 期の資産変化率の平均 $\bar{R}_{i,t}$ ($= \sum_{j=1}^N R_{i,t-(j-1)} / N$) とする。

2.3.1 ファンダメンタリスト

エージェント i の $\bar{R}_{i,t}$ が、全てのファンダメンタリスト中の下位 $N_L\%$ に属するとき、確率 p_i ($=$ エージェント i の順位 / 全ファンダメンタリスト数) でエージェント i の強気度を変更する。すなわち、資産変化率の平均がすべてのファンダメンタリスト中の上位 $N_H\%$ に属するエージェントを 1 つランダムに抽出し、そのエージェントの強気度を i の新しい強気度 $\epsilon_{i,t+1}$ とする。

さらに、より多くの利益を期待するエージェントの売買ルール変更を実現するために、資産変化率の平均が、全てのファンダメンタリストのその上位 $N_H\%$ 以外のエージェントに対し、それぞれ P_ϵ の確率で強気度をランダムに変更する。

2.3.2 チャーティスト

エージェント i の $\bar{R}_{i,t}$ が、全てのチャーティスト中の下位 $N_L\%$ に属するとき、確率 p_i ($=$ エージェント i の順位 / 全チャーティスト数) でエージェント i の移動平均の期間を変更する。すなわち、資産変化率の平均が全てのチャーティスト中の上位 $N_H\%$ に属するチャーティストを 1 つランダムに抽出し、そのエージェントの移動平均期間を i の新しい移動平均期間 $n_{i,t+1}$ とする。

さらに、より多くの利益を期待するエージェントの売買ルール変更を実現するために、資産変化率の平均が、全てのチャートリストの上位 $N_H\%$ 以外のエージェントに対し、それぞれ P_n の確率で売買方針（順張りとは逆張り）および移動平均期間 $n_{i,t+1}$ を変更する。ただし、 $1 \leq n_{i,t+1} \leq 25$ とする。

3 実験

本研究では、レバレッジドエージェントの初期キャッシュ量を、一般投資家エージェントの1倍、10倍、100倍、500倍、1,000倍、1,500倍、1,600倍、1,700倍、1,800倍、1,900倍、2,000倍、5,000倍、10,000倍として実験を試みた。実験環境は以下のとおりである。資産価格と資産の仮価格の初期値はともに10,000とする。資産の理論価格は10,000とし試行期間中固定値とする。一般投資家エージェントの個体数は10,000とする。内訳は、ファンダメンタリストが4,500、チャートリストが4,500、ノイズトレーダーが1,000とする。これらの初期資産は1,000,000とする。レバレッジドエージェントの個体数は1とする。各エージェントタイプに関するパラメータは次のとおりである。 $\alpha = 0.02$, $a = 0.001$, $\sigma_\epsilon = 0.1$, $\mu_P^T = 0$, $\sigma_P^T = \sqrt{0.02}$, $\mu_V^T = 2$, $\sigma_V^T = 0.1$, $\mu_P^N = 0$, $\sigma_P^N = \sqrt{0.02}$, $\mu_V^N = 2$, $\sigma_V^N = \sqrt{0.1}$, $N = 5$, $N_H = N_L = 20\%$, $P_\epsilon = P_n = 0.05$ 。

実験期間は10,000期だが、市場が安定した5,001期から10,000期までの5,000期を市場のボラティリティのサンプリング期間とした。なお、一般投資家エージェントの取引が安定してからレバレッジドエージェントを参入させるため、レバレッジドエージェントの取引は3,001期から開始している。

3.1 モデルの妥当性

実験を始めるにあたって、本研究にて提案した人工市場モデルの妥当性を検証する。検証法として、既の実証分析 [6] で得られている代表的な統計的性質 (Stylized Facts) のうち、下記の2つを満たしているかどうかで判断した。

- 価格収益率の尖度が正である。
- 価格収益率の自己相関の2乗が正の相関関係である。

表2は、レバレッジドエージェントが未参加のとき（左から2列目）と、初期キャッシュ量が一般投資家エージェントの1倍から10,000倍（左から3列目以降）までのレバレッジドエージェントが参加したときの、5,000期から10,000期までの価格収益率に基づいた Stylized

Facts の平均（試行回数は各20回）である。表2から、レバレッジドエージェントが未参加のときと、初期キャッシュ量が一般投資家エージェントのそれに対してそれほど大きくない間は上記の2つの条件を満たしている。これらの結果から本提案モデルは Stylized Facts を満たしており、実験環境として妥当であると判断できる。

4 実験結果と考察

表3からわかるように、初期キャッシュ量が大きくなるほど、価格収益率のボラティリティも大きくなっている。このような結果になる理由は以下のとおりである。

レバレッジドエージェントは、仮価格 P_t' が直前の取引価格 P_{t-1} より高ければ原資産保有数を増やすために買い注文を出し、低ければ原資産保有数を減らすために売り注文を出す。このときレバレッジドエージェントは目標とする保有数を確保するために、原資産を非常に高い価格で買ったり、非常に低い価格で売ったりすることがある。初期キャッシュ量が大きくなればなるほど、リバランス取引が増すため、思わぬ価格での売買を行う可能性が高くなり、マーケットへのインパクトも大きくなる。よって、初期キャッシュ量が大きくなると、一取引あたりの発注量が増大し、マーケットへのインパクトも大きくなるため、ボラティリティも大きくなると考えられる。

表3からも、レバレッジドエージェントの初期キャッシュ量が大きくなるほど、1取引あたりの平均発注数も、マーケットインパクト MI （ここでは第 t 期のマーケットインパクト MI_t を $MI_t = |P_t - P_t'|/P_t$ とし、1試行あたりの平均を MI としている）も、ボラティリティもすべて大きくなっていることが見てとれる。

表2からは、初期キャッシュ量が大きくなりすぎると、市場収益率の2乗の自己相関が負になることが見てとれる（本現象は、表2からは初期キャッシュ量が一般投資家の1,700倍以上から発生しているように見えるが、正確には1,600倍から発生している。これは、本結果は試行回数20回の平均で示しているからであり、ごく数回しか本現象が発生していない1,600倍の場合は表2に顕在化していないからである）。これは現実市場では見受けられない現象であり、市場が破壊されたことを示唆している。注目すべき点は、表3において、レバレッジドエージェントの初期キャッシュ量が1,600倍以上の市場の MI が、レバレッジドエージェントが未参加の市場のボラティリティより大きくなっている点である。これは、初期キャッシュ量が大きくなり、レバレッジドエージェントの取引がボラティリティより大きなマーケットインパクトを与えるようになると、市場が破壊されてしまうことを示唆しているのではない

表 2: 各試行におけるボラティリティと Stylized Facts

	一般投資家エージェントの初期キャッシュ量に対する レバレッジドエージェントの初期キャッシュ量の倍率													
	未参加	×1	×10	×100	×500	×1,000	×1,500	×1,600	×1,700	×1,800	×1,900	×2000	×5000	×10000
ボラティリティ ($\times 10^{-2}$)	1.16	1.17	1.19	1.38	1.74	1.46	1.38	14.4	25.9	35.6	20.7	23.9	39.5	39.0
尖度	4.32	3.99	3.82	2.83	0.69	6.46	22.4	14.88	4.05	-1.31	3.88	3.06	-1.87	-1.87
ラグ														
1	0.497	0.488	0.491	0.392	0.175	0.391	0.605	0.386	-0.338	-0.769	0.089	-0.110	-0.997	-0.997
収益率の	0.701	0.713	0.719	0.719	0.789	0.609	0.497	0.534	0.751	0.982	0.450	0.340	0.999	0.999
2 乗の	0.503	0.499	0.503	0.423	0.233	0.330	0.365	0.231	-0.421	-0.775	0.270	0.186	-0.997	-0.997
自己相関	0.642	0.654	0.660	0.653	0.706	0.482	0.267	0.413	0.670	0.976	0.287	0.076	0.999	0.999
5	0.513	0.513	0.515	0.447	0.275	0.290	0.184	0.114	-0.479	-0.779	0.238	0.313	-0.997	-0.997

表 3: レバレッジドエージェントの初期キャッシュ量とマーケットインパクトの関連性

	一般投資家エージェントの初期キャッシュ量に対する レバレッジドエージェントの初期キャッシュ量の倍率													
	未参加	×1	×10	×100	×500	×1,000	×1,500	×1,600	×1,700	×1,800	×1,900	×2,000	×5,000	×10,000
(1) レバレッジド ETF エージェント の発注数	-	0.775	7.64	70.7	186	84.9	91.0	1166	2561	2745	1149	2001	2858	2860
(2) MI($\times 10^2$)	-	0.000489	0.00499	0.0392	0.0842	0.0585	0.0798	4.90	10.5	14.2	7.11	8.60	16.5	16.5
(3) ボラティリティ ($\times 10^2$)	1.16*1	1.17	1.19	1.38	1.74	1.46	1.38	14.4	25.9	35.6	20.7	23.9	39.1	39.0
(4) レート (= (2)/(3) の*1)	-	0.000421	0.00430	0.0337	0.0725	0.0503	0.0687	4.22	9.07	12.2	6.13	7.41	14.2	14.2

かと考えられる。

個人的見解であります。

5 まとめ

本研究では、人工市場を用いてレバレッジド ETF のリバランス取引が原資産の価格変動に与える影響について検証した。その結果、レバレッジド ETF の初期キャッシュ量が大きくなるほど、原資産のリバランス取引が増大するとともにマーケットインパクトも大きくなり、原資産市場のボラティリティが大きくなることがわかった。そして、レバレッジド ETF の売買が、少なくともボラティリティより大きなマーケットインパクトを与えると、市場を破壊してしまう可能性があることも判明した。今後の課題としては、レバレッジド ETF の売買がどの程度のマーケットインパクトを与えると市場が破壊されてしまうのか、詳細に調査することが挙げられる。

留意事項

本論文はスパークス・アセット・マネジメント株式会社の公式見解を表すものではありません。すべては

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K01211 の助成を受けたものです。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] M. Cheng and A. Madhavan. The Dynamics of Leveraged and Inverse Exchange-Traded Funds. *Journal of Investment Management*, 7(4), 2009.
- [2] M. Childs. Fink Says Leveraged ETFs May 'Blow Up' Industry. *Bloomberg*, May 2014.
- [3] M. Deshpande, D. Mallick, and R. Bhatia. Understanding Ultrashort ETFs. *Barclays Capital Special Report*, January 2009.
- [4] S. Kobayashi and T Hashimoto. Analysis of institutional evolution in circuit breakers using the concepts of replicator and interactor. In *The 9th*

Asia-Pacific Complex Systems Conference, pages 80–86, 2009.

- [5] B. LeBaron. Agent-based financial markets: Matching stylized facts with style. In *Post Walrasian Macroeconomics Beyond the Dynamic Stochastic General Equilibrium Model*, chapter 3, pages 221–238. Cambridge University Press, 2006.
- [6] S. Martinez-Jaramillo and E. P. K. Tsang. An heterogeneous, endogenous and co-evolutionary gp-based financial market. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(1):33–55, 2009.
- [7] T. Mizuta, K. Izumi, I. Yagi, and S. Yoshimura. Regulations’ effectiveness for market turbulence by large erroneous orders using multi agent simulation. In *Proc. IEEE Computational Intelligence for Financial Engineering and Economics (CIFEr2014)*, pages 138–143, March 2014.
- [8] G. W. Schwert. Stock Volatility and the Crash of 87. *The Review of Financial Studies*, 3(1), 1990.
- [9] W. J. Trainor Jr. Do Leveraged ETFs Increase Volatility. *Technology and Investment*, 1, 2010.
- [10] I. Yagi and T. Mizuta. Analysis of the impact of leveraged etf rebalancing trades on the underlying asset market using artificial market simulation. In *Social Simulation Conference 2016(SSC2016)*, September 2016.
- [11] I. Yagi, T. Mizuta, and K. Izumi. A study on the effectiveness of short-selling regulation in view of regulation period using artificial markets. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 7(1):113–132, 2010.

効果的な繰り返し表現による3DCGアニメーションと 裸眼立体視を用いた創作技術

研究者名： 情報メディア学科 牧 奈歩美

1. 研究の目的

映画・テレビなどの映像作品では、鑑賞者に作品の世界に入り込んだような感覚（没入感）を与えることは重要である。その目的を達成する方策としては、大画面高精細化や立体化などの表示の開発が行われている、表示の改善の例としては、IMAXやスーパーハイビジョンなどがある。また立体化は映画が先行しており、アナグリフ、偏光メガネ、液晶シャッター（時分割表示）、携帯端末における端末表示（裸眼方式）などがある。しかし、裸眼立体視においてはレンダリングする視点の膨大さから計算時間を多く必要とするため、いまだアニメーションへの応用としては未開拓である。本研究では計算量の軽減のため、ループのアニメーションを効果的に利用した、3DCGの立体視アニメーションの表現を開拓する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

現在、立体視技術はデジタルホログラフィとも称され、様々な機関で研究が行われている。その多くが3Dテレビモニタなどへの応用を目的とされているもので、映像・映画業界などへの貢献が多くみられる。しかし、その多くは縦方向のみに視差が生じるレンチキュラー方式が一般的である。縦方向だけでなく横方向にも視差が生じるインテグラルフォトグラフィは、立体感を感じるのにより効果的であるとされるが、その分、計算する視点数も大幅に増えるため、アニメーションへ応用するにはさらに計算時間が増えるという問題点がある。

3. 期待される効果

本研究では、インテグラルフォトグラフィをもちいた映像作成を行う上で、計算量の軽減のための効果的なループアニメーションの模索と、展示を目的とした制作を目標とする。本研究では、表示する一枚の絵を合成するのに $32 \times 32 = 1024$ 枚の画像を出力する必要があり、さらにアニメーションのフレーム数の分だけ画像が必要になる。そこで、展示等を目的とした、ループ表現を効果的に用いたアニメーションが応用できれば有効であると考えられる。

4. 研究の経過及び結果

インテグラルフォトグラフィとホログラムピラミッドを組み合わせたホロピラミッ

ドの研究のために効果的なループアニメーションを制作した。計算量が少しでも減るよう、ポリゴン数を最低限におさえ、形がもっともシンプルな雪だるまがジャンプする8フレームのアニメーションを制作した。質感も最も計算量の軽いマットなシェイダを用いた。そして、インテグラルフォトグラフィでは一ミリの凸レンズシートを用いるため、微細な表現は見えにくいので、キャラクタのパーツを大き目に設定した。また、ホロピラミッドの奥行き感が増すようにするため、ダイナミクスによる雪を降らせた。これにより、手前から奥にかけて、15粒ほどの雪が舞い降り、それぞれの位置関係において視差が生じ、立体感が増しながらも、雪の粒そのものは簡素な物体であるため、計算量も抑えられた。立体感を感知するにはある程度の時間を要するという特性がある為、雪の舞い降りるスピードはかなり低速度にし、それぞれの雪粒の奥行き感も検知できるようにした。また、ダイナミクスによる雪の繰り返しが自然になるようにしている。また、観測した時に、奥が透けて見えるよう、背景は黒に統一した。そのため、黒い部分は透明色となり、雪だるまと雪が宙に浮いているように見えるようにした。

5. 今後の計画

現段階では、質感、形ともに最小限の計算量になるよう設定している。今後は、物体に鏡面反射などの質感表現を持たせていくなど、より表現豊かな描画にすることと、立体感を効果的に見せる演出を、計算量を抑えることを目的とした枠組みの中で模索することを今後の目標とする。

6. 研究成果の発表

4th International Conference on Multimedia and Human-Computer Interaction (MHCI'16)において発表された論文“Holographic Pyramid Using Integral Photography”のために、研究結果の表示として提示するアニメーションとして使用された。

胎動計測による胎児の成長監視システムの開発

研究者名：情報学部 情報メディア学科 氏名：小坂崇之

1. 研究の目的

妊娠・出産は、人間が存続する上で欠かせない行為である。われわれは誰しも母親の胎内で命を授かる。精子と卵子が結びつき、生命のもとである受精卵になり成長を続ける。妊娠期間は、日ごとに大きくなるお腹と胎動を感じながら、生まれてくる子供に思いを募らせる幸せな時間である。一方で、最も命が危険にさらされやすい時期でもある。胎動とは『母胎内で胎児が動くこと。また、その動き。』と表現されている。成長過程に合わせて胎動の頻度が増加していくという考え方が一般的であり、10回の胎動を感じるまでの時間を計測し特定のチャートに記録する「胎動カウント法」により胎動の頻度を計測し成長具合を計測する手法がある。胎動が活発になる7ヶ月目で急に胎動が感じなくなり病院に駆け込むと臍帯が首に絡まっていたというケースも報告されており、胎動は胎児の健康のバロメータであるともいわれている。しかし、妊娠は病気ではなく胎動に関する研究があまり行われていないのが現状である。

妊産婦の胎動に注目し、妊娠週数毎による胎動の場所と頻度を計測することで胎児の成長状況を通知し、異常があれば病院への診療を促すことができるシステムの開発を行う。妊婦帯に複数の圧力センサを配置することにより皮膚表面に現れる胎動の場所と頻度を計測し記録することができる胎動スキャナを開発する。胎動カウント法では妊産婦が主観的に胎動の知覚を行うが、本システムではセンサを用いての客観的な計測が可能である。妊娠週数毎の胎動の頻度と場所を計測しデータベースの構築を行う。胎動スキャナを装着した妊産婦の胎動と胎動データベースに蓄積されたデータを比較することにより、現在の胎児の健康状態を妊産婦に通知することができる。また異常があれば病院への診療を促すことができる。さらに計測した胎動を体験者に呈示するデバイスの開発を行う。胎動は子宮内の胎児の状態によって感じる場所が変化する。たとえば臨月になると胎児の頭が妊産婦の骨盤に固定されるので腹部上部に胎動頻度が増加し、反対に逆子の場合は腹部上部以外に感じる事が報告されている。このような経験を、妊娠前にあらかじめ体験し学習させることができれば、実際に妊娠して異常を感じたときに迅速に対応することができる。また、胎動は妊産婦だけの特権であり夫やパートナーは体験することができない。そこで夫やパートナーに対して胎動を提示することができれば生まれてくる子供に対して愛情をもって接することができるのではないかと考える。

2. 研究の必要性及び従来研究

胎動とは「母胎内で胎児が動くこと。また、その動き。」と表現されている。成長過程に合わせて胎動の頻度が激しくなっていくという考え方が一般的であり、10回の胎動を感じるまでの時間を計測し特定のチャートに記録する「胎動カウント法」により胎動の頻度を計測する手法も存在する。胎動が活発になる7ヶ月目で急に胎動が感じなくなり病院に駆け込むと臍帯が首に絡まっていたというケースも報告されており、胎動の頻度を計測することは成長過程を示すバロメータであるともいわれている。しかし、妊娠、出産は病気ではなく、これまで胎動をセンシングする技術の開発は行われていないのが現状である。妊産婦の腹部に装着し、胎児の心拍数、胎動、子宮収縮を計測する分娩監視装置も存在するが、胎動の検出は被験者が胎動を知覚した時に主観的にボタンを押すものであり、客観的にセンシングを行う装置の開発は行われてない。

そこで我々は、胎動検出を目的とした胎動 Viewer の開発を行なう。妊婦帯に複数の圧力センサを配置することにより皮膚表面に現れる胎動を計測することが可能である。胎動カウント法では妊産婦が主観的に胎動の知覚を行うが、本システムでは客観的な計測が可能である。胎動検出の手法として被験者に筋電位センサなどの装着を行う手法も考えられるが、母体や胎児への悪影響も考えられる。妊娠期間中は非常にデリケートな期間であり、実際の妊産婦への装着は技術的、倫理的にも難しいのが現状である。そこで我々は、高分子圧幕フィルムを用いた圧力センサを用いて計測を行う。圧力センサは圧力抵抗性物質を塗った特殊フィルムに圧力を加えることで抵抗値が変化するもので人体への影響を考慮する必要はない。

胎動の種類にも複数の胎動が存在するが、我々は皮膚表面に現れる胎動のセンシングを目的とする。市販されている妊婦帯に圧力センサを複数個貼り付け妊産婦に装着を行うことで、皮膚表面に現れる胎動のセンシングを行うことができる。

本システムを用いることで胎動のセンシングとアーカイブ化が可能になる。また我々が既に開発している妊婦体験システムと組み合わせることで胎動のリアルタイム通信も可能になる。

3. 期待される効果

- 妊娠は病気ではなく胎動に関する研究があまり行われていないのが現状である。我々は胎動に着目し胎動の場所と頻度によって成長具合の判定を目指している。
- 胎動を計測し胎動データベースに蓄積し、蓄積されたデータと、現在の胎動のデータを比較することで胎児の成長具合を判定する。これまで胎動は回数のみが重要とされてきたが胎動の場所と頻度を計測することでよりリッチなデータを得ることができる。
- 出産に至るまでの妊娠期間中に欠かせないのが妊婦健診である。病院、妊娠週数などによっても異なるが、月1回から臨月になると週1回のペースで通院する必要がある。そのため、妊婦健診は一般的には合計14回、受診する計算になる。健診も健康保険がきかないため、1回4000～5000円（特別な検査を受ける場合には1万円程度）かかるともいわれており、一般的に妊娠出産にかかる費用は約100万円と高額になるといわれている。そのため体に異常を感じても健診に高額な費用がかかるため「たいしたことないかも」と健診を躊躇する妊産婦も存在し、取返しのつかない事態が発生した事例も存在する。本システムは家庭で胎動を用いた簡易的な健診を行うことができ明らかな異常の場合は、受診を促すことが可能である。
- 妊娠中にも関わらず胎動を自覚しない症例が報告されている。自覚症状がないだけなのか皮膚表面の感覚器官が鈍いだけなのか原因が明らかにされていない。胎児は体内で必ず動いているはずであり、胎動を自覚しない妊産婦に対してもセンサを用いた本システムは有効である可能性は高い。
- 申請者（小坂）は、内蔵感覚呈示による胎動呈示可能な妊婦体験システム『MommyTummy』を開発している。MommyTummyは、育っていく胎児の重さ、暖かさだけでなく胎動などの胎児の成長過程を体験者に呈示し、妊産婦が受ける身体的負担と胎児が成長する喜びを疑似体験することができるシステムである。本研究課題は胎動の計測に重点を置いており、MommyTummyは胎動の呈示に応用することができ親和性が高く胎動のリアルタイム通信やアーカイブと再生など応用分野が広がる。
- 計測した胎動データをもとにリアルタイムにプロジェクタを用いて妊産婦の腹部にプロジェクションマッピングすることにより胎児や胎動の視覚化を行うことが可能である。

4. 研究の経過及び結果

初年度(平成28年)は、胎動スキャナの構築を行った。胎動スキャナのシステム構成図を図1に示す。胎動スキャナは家庭での利用を想定しており小型化および無線化を目指していた。しかし、小型化、ウェアラブルという面では課題が残る大きさとなった。

市販の妊婦帯に複数の圧力センサがマトリックス状に配置されており、Arduinoを用いて制御を行う。データは30HzでSDカードに記録する。32GBのSDカードを用いて連続使用で約270日間の胎動データを記録することが可能となった。

開発した胎動スキャナを用いて、皮膚表面に発生する胎動の検知が実際に可能なのか実験を行った。妊娠中の被験者1名(30週)に対して5日、延べ3.5時間、助産師立ち合いのもと実験を行った。被験者の腹部に胎動スキャナを装着し、着席し安静にした状態で実験を行った。

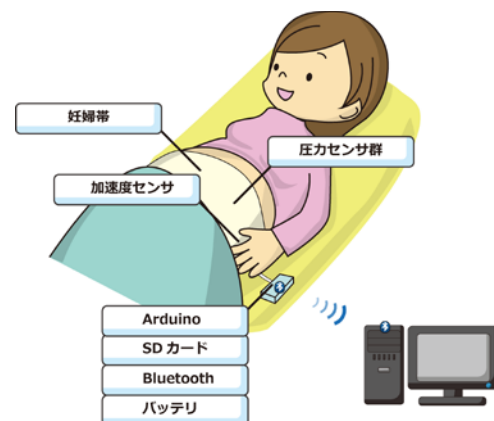


図1: 胎動スキャナ システム構成図

胎動スキャナには11個の圧力センサと、加速度センサを搭載した。圧力センサに反応した値は、皮膚表面に発生する「センサ値の胎動」として記録した。この圧力センサの値の変化が本当に胎動を記録しているのか検証する必要がある。そこで、センサ値とは別に、被験者が胎動を感じた直後に、手元のスイッチを押すことで、被験者が「知覚した胎動」として記録した。同時間において、センサ値の胎動と知覚した胎動を比較することで、圧力センサの値が胎動を検出したといえる。実験は、なるべく安静した状態で行ってもらったが、圧力センサは被験者の微かな動きにも反応する。そこで被験者の動きを加速度センサで判断しセンサ値の胎動から除外した。

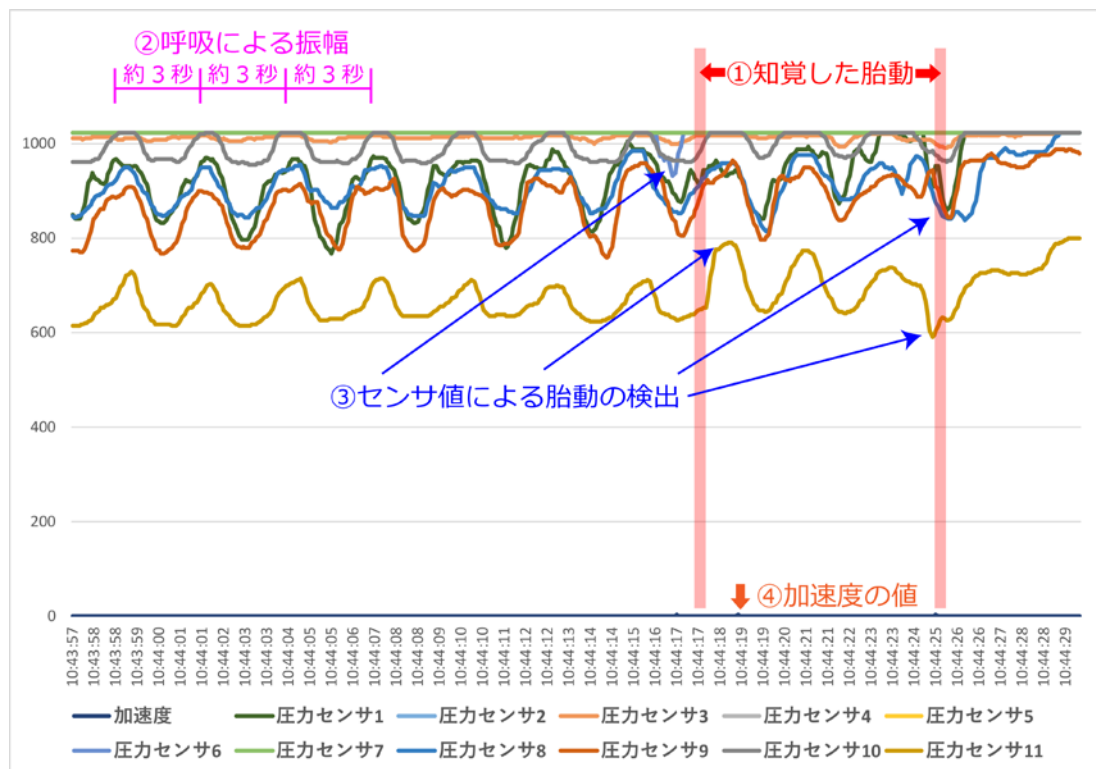


図 5:取得したセンサ値

実験で得られた特徴的なデータを図 5 に示す。横軸が時系列、縦軸が得られたセンサ値である。被験者が胎動を知覚しスイッチを押した領域を図 5-①に示す。圧力センサ 1～11 の値は、周期的な動きを繰り返しており、その周期は約 3 秒であったことから、呼吸による振幅の影響であると予想される。人の呼吸数は成人で一分間に 12～18 回とされており、1 呼吸あたり 5～3 秒となりこの予想で間違いないと考えられる (図 5-②)。①知覚した胎動あたりの圧力センサ値が、呼吸の周期と比べると乱れていることが確認された。被験者の動きによる影響の可能性も考えられるが、加速度センサの値 (図 5-④) には大きな変化は見られなかったため、これが胎動である可能性が高い。実験に用いたすべてのデータを解析したわけではないが、開発した胎動スキャナを用いることで、皮膚表面に発生する胎動の検知が可能であることが示唆された。

5. 今後の計画

本研究課題では、妊産婦の胎動に注目し、妊娠週数毎による胎動の場所と頻度を計測することで胎児の成長状況を通知し、異常があれば病院への診療を促すことができるシステムの開発を行う。開発にあたり各年度における開発および構築の研究計画表を表 1 に示す。

表 1:研究計画表

開発および構築項目	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
胎動スキャナの開発	●(計画通り 遂行中)		
胎動データベースの構築		●	
胎動比較システムの開発		●	
胎動提示システムの開発			●

●胎動スキャナの開発(図 4)

妊産婦の妊娠週数毎に合わせての胎動の場所と頻度を計測デバイスの開発を行う。妊産婦の妊婦帯に圧力センサを複数配置することで胎動の場所と頻度を計測し記録を行う。

●胎動データベースの構築(図 1)

胎動スキャナで計測された妊娠週数毎による胎動の場所と頻度のデータをデータベースに格納し蓄積する。データベースには MySQL を用いる。被験者は出産経験者ではなく実際に妊娠にしている被験者を用いる予定である。現在、名古屋市立大病院産婦人科病院 尾崎康彦教授と胎動に関する共同研究を行っており、被験者は、同病院に入院している妊産婦に協力を依頼する予定である。

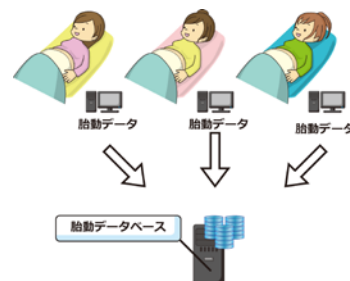


図 1:胎動データベース

●胎動比較システムの開発(図 2)

胎動データベースに蓄積されている妊娠週数毎の胎動データの種類と胎動位置、頻度について解析を行う。解析されたデータと胎動スキャナで計測された胎動データの比較を行い、胎動による胎児の成長状況の判定をおこない、異常があれば病院への診療を促すことができる。

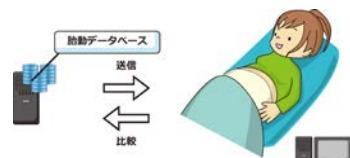


図 2:胎動比較システム

●胎動呈示システムの開発(図 3)

胎動データベースに蓄積されている胎動データをもとに既に開発を行っている胎動呈示が可能な MommyTummy に出力を行う。これまでの MommyTummy の胎動呈示は実際の胎動データを記録し再生したものではなく出産経験者のアンケート結果をもとに再現したものである。このため胎動データベースとの連動を用いることにより、よりリアルな胎動呈示が可能になる。

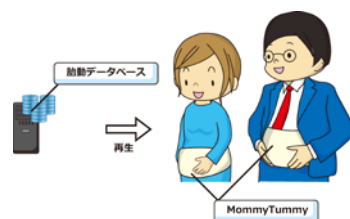


図 3:胎動呈示システム

初年度で得られた実験データの解析を行う。また、開発した胎動スキャナを用いて、実際に妊娠にしている被験者を用いて妊娠週数毎の胎動データを取得し胎動データベースを構築、解析を行う予定である。その後、解析されたデータと胎動スキャナで計測された胎動データの比較を行い、胎動による胎児の成長状況の判定をおこなう。

胎動スキャナで計測された妊娠週数毎による胎動の場所と頻度のデータをデータベースに格納し蓄積する。データベースには MySQL を用いる。被験者は出産経験者ではなく実際に妊娠にしている被験者を用いる予定である。現在、名古屋市立大病院産婦人科病院 尾崎康彦教授と胎動に関する共同研究を行っており、被験者は、同病院に入院している妊産婦に協力を依頼する予定である。

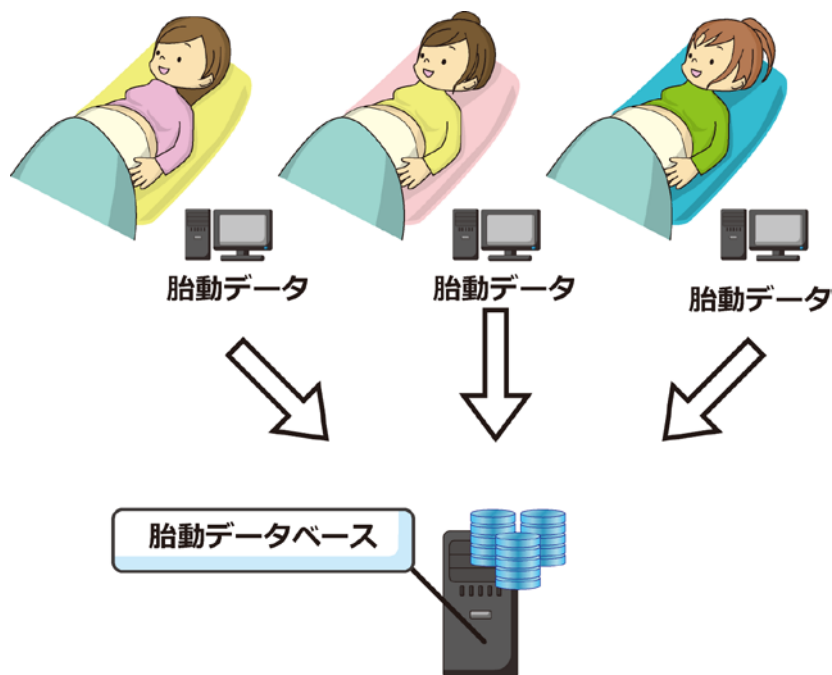


図 2:胎動データベース

6. 研究成果の発表

初年度は、プロトタイプを作成し、実験で胎動を取得できることが確認したのみで、学会などで発表できる状態まで達していない。

味覚ディスプレイ開発のための基礎検討

研究者名：情報メディア学科 坂内 祐一

1. 研究の目的

近年、VRの分野ではコンピュータを用いて五感それぞれに感覚刺激を提示する研究が行われている。ユーザに五感刺激を提示する装置を総称してディスプレイという言葉が用いられるが、ここでは味覚刺激を与える味覚ディスプレイを実現するための基礎検討を行う。本研究では、味覚溶液を舌先へ射出する手段としてピエゾ振動子を用い、コンピュータから射出量や射出時間を正確に制御するための技術課題を検討する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

味覚を提示する方法として、主に濾紙ディスク法、全口腔法、電気味覚法の3種類が用いられている。濾紙ディスク法は直径5mmの濾紙に味溶液を染み込ませ、それを被験者の口腔内に置いて味覚提示する方法である。この方法は広く用いられており、口腔内の領域を決めて提示することができるが、舌上に濾紙を置くことの違和感を被験者に生じさせることが欠点である。全口腔法は味溶液を直接提示する方法であり、味溶液を口に含ませる、または味溶液をピペットで舌に滴下するという手段がとられる。被験者が普段味覚を感じている状態に近い点が優れている反面、口全体に味刺激を提示するため口腔内の部分的な味覚検査ができないという問題点がある。電気味覚検査は、舌に数 μA の電流を流し金属味と酸味の混じったような味を発生させて味覚機能を測定する方法である。電気味覚検査の特徴として、口腔内の領域ごとの味覚機能の測定が行える点、味覚の刺激が定量的に与えられる点があげられる。しかし、提示できる味が1種類のみであり、甘味や塩味などといった基本味の味質を自由にコントロールできる技術は確立していない。

また舌先は触覚が非常に鋭敏な領域であり、温度や触感（触れた感じ）は味以上に感じ易く、味の評価に対しても大きな影響を与える。本研究で検討するピエゾ振動子により味溶液を微細な液滴に分解して舌上に滴下する方法では、触感の影響を最小に抑えることが期待できる。さらに味溶液の保温機能を設け、体温と同じ味溶液を滴下できるようにすることで、温度感覚の影響も排除した味覚提示方法の実現を目指す。

3. 期待される効果

(1) 射出量、射出時間が制御可能な味覚刺激提示

従来の味覚刺激提示では、射出量・射出時間などの制御についてそれほど関心が払われてこなかったが、味覚刺激がヒトの生理、心理反応へ及ぼす影響に加え、脳科学の実験において味覚刺激の定量化が求められていくことが予想される。本研究により射出量・射出時間がコンピュータから精密制御可能な味覚提示方法が得られる。

(2) 触覚の影響を極力排除した味覚刺激提示

舌上は触覚（温度、触感（触れた感じ））が非常に発達しており、純粹に味だけの提示をすることは困難である。温度については体温の味覚溶液を滴下できれば、温度への影響を排除することができるため、ヒーターを搭載することを試みる。また触感に関しては、ピエゾ振動子を用いて味覚溶液をピコリットルオーダーの微細液滴にして舌へ落下させることで、触感刺激を減少させることが期待される。このように触覚の影響を極力排除して味覚のみを感じさせる刺激提示方法が得られる。

(3) 嗅覚ディスプレイとしての装置化

ピエゾ振動子、味覚溶液タンク、ヒーター、および持ち手をコンパクトにまとめてヒトの口腔内で的確に刺激提示できる味覚ディスプレイ筐体と、コンピュータから利用するためインタフェースソフトウェアを設計し、全体を装置化して各種の味覚実験に利用できるようにする

4. 研究の経過及び結果

(1) ピエゾ振動子を用いた射出カートリッジ試作

まず味覚溶液を微細な液滴として射出するためのピエゾ振動子の検討を協力企業と行い、射出用カートリッジとして試作した（図1）。

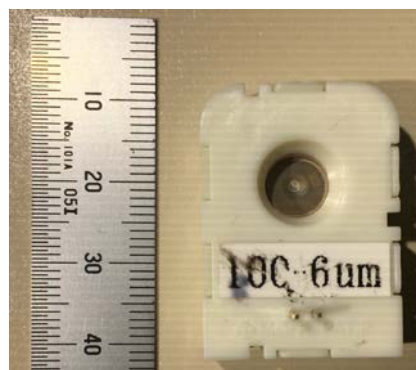


図1 射出用カートリッジ

図1の射出用カートリッジの中央にピエゾ振動子があり、 $6\mu\text{m}$ の孔が100個設けられている。ピエゾ振動子は100KHzの周波数で駆動するため、各孔からはピコリットルオーダーの液滴を100,000パルス毎秒で射出できる。今回直径 $6\mu\text{m}$ 、 $9\mu\text{m}$ 、 $90\mu\text{m}$ の3種類のカートリッジを試作し、安定して液滴が射出できることを確認した。

(2) 味覚ディスプレイ筐体試作

ピエゾ振動子の部分を被験者の口腔内に入れて味覚溶液を提示するために味溶液用のタンクを設け、持ち手を取りつけて装置として一体化する必要がある。実験での利用を考慮して

- ① ディスプレイ射出部が被験者の口腔内に収まること

- ② 口腔内にディスプレイ筐体が触れていないこと
- ③ ディスプレイ射出面が水平になっていること
- ④ ディスプレイ射出面と舌の間が10mm ほど空くようにすることを条件に筐体全体の設計を行い、図2のような模型を試作した。



図2 味覚ディスプレイ模型

5. 今後の計画

(1) ピエゾ振動子射出カートリッジの射出特性の測定

カートリッジごとに射出量を計測して、1パルスごとの射出量を求め、設計値との差を調べる。さらに単位時間あたりの射出量が、射出時間に依存せず一定であることを確認する。

(2) 嗅覚ディスプレイの試作および性能評価

ピエゾ振動子、味覚溶液タンク、持ち手、さらには温度調整用ヒーターを一体化した味覚ディスプレイを協力企業と1次試作する。試作品が味覚提示実験に使用可能かを評価しその結果をフィードバックして改良していく。

6. 研究成果の発表

なし

8K映像コンテンツを自在にハンドリング可能な ストリーミングクラウド環境の実現

研究者名：情報学部・情報ネットワーク・コミュニケーション学科 丸山 充
情報学部・情報ネットワーク・コミュニケーション学科 塩川 茂樹
情報学部・情報工学科 清原 良三
情報学部・情報メディア学科 小島 一成
情報学部・情報ネットワーク・コミュニケーション学科 井家 敦
工学部・電気電子情報工学科 高取 祐介
情報学部・情報ネットワーク・コミュニケーション学科 岩田 一

1. 研究の目的

ネットワークの広帯域化に伴い、高精細のストリームデータを扱うアプリケーションの普及が見込まれている。例えばハイビジョンの4倍の画素数である4K映像や16倍の8K映像など高画質な映像を扱うアプリケーションである。本研究では、8K/4K等のハイエンドコンテンツの作成向けに、over10Gbpsの広帯域ストリームデータを自在ハンドリングできるクラウド環境をネットワーク上の様々な計算機リソースが協調しあうアーキテクチャにより構築を目指す。

2. 研究の必要性及び従来の研究

本研究では、ストリームデータという時間連続性・リアルタイム性を持ち伝送状況の影響を受けやすいデータに着目し、変動するネットワーク状況に関わらず安定的かつ即時に配信可能なストリーミングクラウド環境を構築する。本技術を実証的に評価するため、次の2つの観点で広域実験を積極的に実施する。(a)NICTのクラウド設備StarBEDやNII(国立情報学研究所)のクラウド設備で8K/4K映像をリアルタイム処理し、仮想ネットワークと連携した安定的な伝送の検証と放送局関係者との利用実験、(b)クラウド内での大規模エミュレーション環境に連携させた8Kリアルタイム可視化機能を実現し、遠隔地の研究者と可視化データの共有実験。併せて実験中のトラヒック特性を詳細に理論解析し、技術の体系化を図ると共に、実験環境を用いて他組織・異分野の研究者との連携を積極的に進める。

3. 期待される効果

H28年度は、SINET5の開始に合わせてH28年5月に学術機関向けに8K広帯域ストリームデータのクラウド連携デモを実施して本大学を8K映像発信基地としてのプレゼンスの確立を目指す他、Interop, InterBEE, SC等の機会を通して外部に積極的なPRを行うと共に、以下の項目を順次開発し、得られた成果を論文公表する。

- (1) 広帯域ネットワーク構成機能の仮想化
- (2) リアルタイム映像処理機能の仮想化
- (3) ネットワーク構成機能とリアルタイム映像処理機能の連携や時間軸の協調動作

4. 研究の経過及び結果

4.1 学術研究成果の発表

2016年の2月5日～6日にかけてNICTが主催した“さっぽろ雪まつり”実証実験において、札幌、大阪、沖縄を結んだ広域網を用いて8K（7680×4320画素・ハイビジョンの16倍）および4K超高精細映像素材のライブ配信時に、途中経路での悪意あるコンテンツ改ざん、盗聴等を防ぐリアルタイム暗号化配信に取り組んだ。この研究成果をNICTと共にAPAN42の場で発表した^[1]。

4.2 展示イベントにおける実験および技術PR

(1) SINET5 開通式^[13]

H28年度より、学術情報基盤としてNII（国立情報学研究所）が構築、運用しているSINETが全国規模で100Gbpsの帯域を持つSINET5の運用が始まった。2016年5月25日から5月27日にかけて、NII（国立情報学研究所）が主催したSINET5開通式およびNIIオープンフォーラムにおいて、情報通信機構（NICT）が運用しているJGN-Xとの連携で、沖縄、北陸から東京まで8K超高精細映像を非圧縮でマルチキャスト配信実験を実施した。具体的には、開通式の会場の一つ橋講堂、沖縄科学技術大学院大学（OIST）の8Kカメラ、神奈川工科大学の8Kサーバ、StarBED4の仮想8Kサーバを接続した8K/4K映像伝送実験を実施し、カメラ映像送信部および映像受信部には、QG70を複数台利用した実験を行い、3日間に渡り安定的に動作した（図1）。またSINET5開通式では、豊橋技術科学大学との間でハイビジョン非圧縮を使った遠隔講演が行われた。

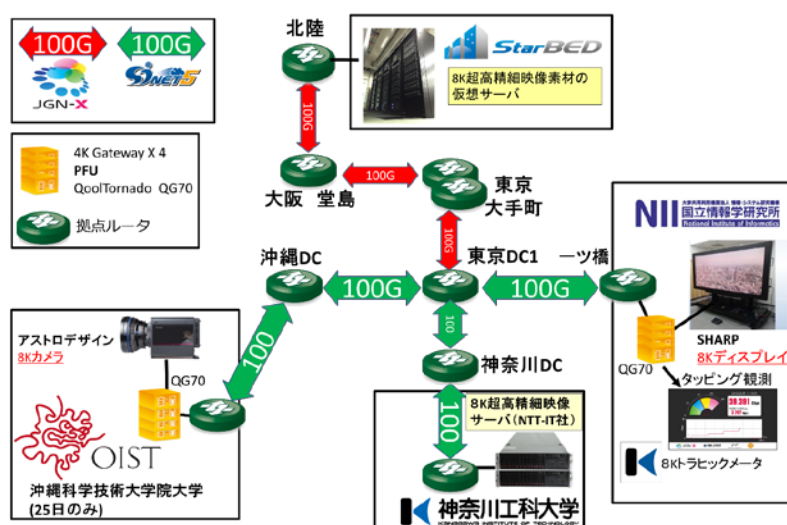


図1 NII SINET5 開通式およびオープンフォーラムの実験

(2)Interop Tokyo 2016^[14]

2016 年 6 月 10 日から 12 日にかけて、国内最大のネットワーク技術の展示会 Interop Tokyo 2016 が幕張メッセにて開催された。本展示会は、世界 4 ヶ国で開催されており、日本でも 1994 年以来、毎年開催されており、今年は 14 万人の来場者があった。

本学は、大学独自のブースを設け、以下の2つに関する実験を実施した。

A) 商用 IP 網を使った 8K 非圧縮映像伝送 (NTT 未来研, NTT-IT 社と共同)

B) 非均質計算機環境を使った高品質映像のリアルタイム処理 (NTT 未来研と共同)

A)は、商用網のバックボーン帯域が 100Gbps 化されている事から、商用網を使って 8 K 非圧縮映像伝送の伝送実験を行ってみたトライアルである。神奈川工科大学に設置した 8 Kカメラ映像を送信し、SINET5, 商用のインターネットエクスチェンジサービス JPIX, 会場内の ShowNet を経由して、神奈川工科大学のブース (40Gbps 接続) まで映像を伝送し、QG70 で受信したものを映像表示装置に出力した。(図 2) 安定的な配信を確認するためにネットワークに配置された高精度なネットワーク計測装置により伝送状況を実時間で観測した。この結果、非常に安定した伝送が行えていた。

B)は、昨年実施した総務省 SCOPE の実験内容の展示であり、各地のクラウドのCPU能力を集めて、4K 非圧縮映像を対象にリアルタイム合成を実施した。本実験結果を公表^[2,4]した。

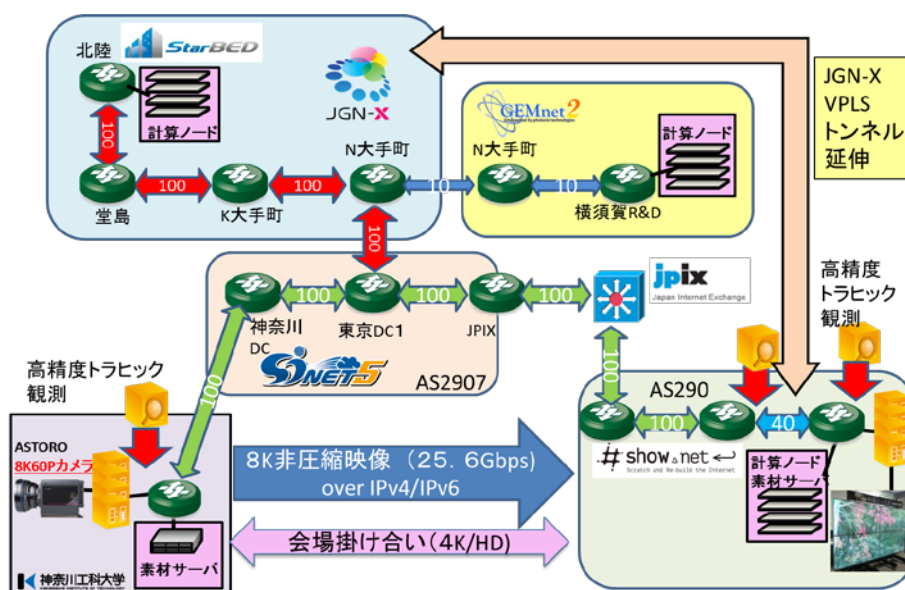


図2 Interop Tokyo 2016の実験

(3)SC16^[15]

2016 年 11 月に米国（ソルトレイクシティ）の国際会議 SC16（The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis）に併設された展示会の NICT ブースにおいて、日米間の 200Gbps の広帯域回線および暗号伝送環境を用いて、非圧縮 8K/4K の超高精細映像の配信実験を行った。

図3に示すように、国内と米国を接続する太平洋回線として、A) SINET5 が2016年4月から運用を開始した100Gbps回線、B) TransPAC/PacificWave が2015年から運用を開始した100Gbps回線の2系統の回線を併用した。

また、NICTの大手町拠点とSC16ブース間のリアルタイム暗号化配信技術として、IPsecの暗号化技術を用いて、日米間の広域ネットワーク上で非圧縮の8K超高精細映像をリアルタイムに暗号化、SC16ブース内で復号化し安全に配信できる仕組みを構築した。国内回線は、JGNとSINET5の100Gbpsの広域回線を使い、KAITとStarBEDの拠点を接続。KAITは情報発信拠点の1つとして、8Kカメラによるリアルタイム中継伝送、8Kサーバからの蓄積配信、および、後述する8KのCG映像の配信を行った。また、StarBEDからは、8K仮想サーバからの蓄積配信を行い、SC16ブース内で受信素材を選択する運用を行った。また、KAITとSC16ブース間で、グローバルなIPネットワークを使って、4K非圧縮による双方向伝送を行った。

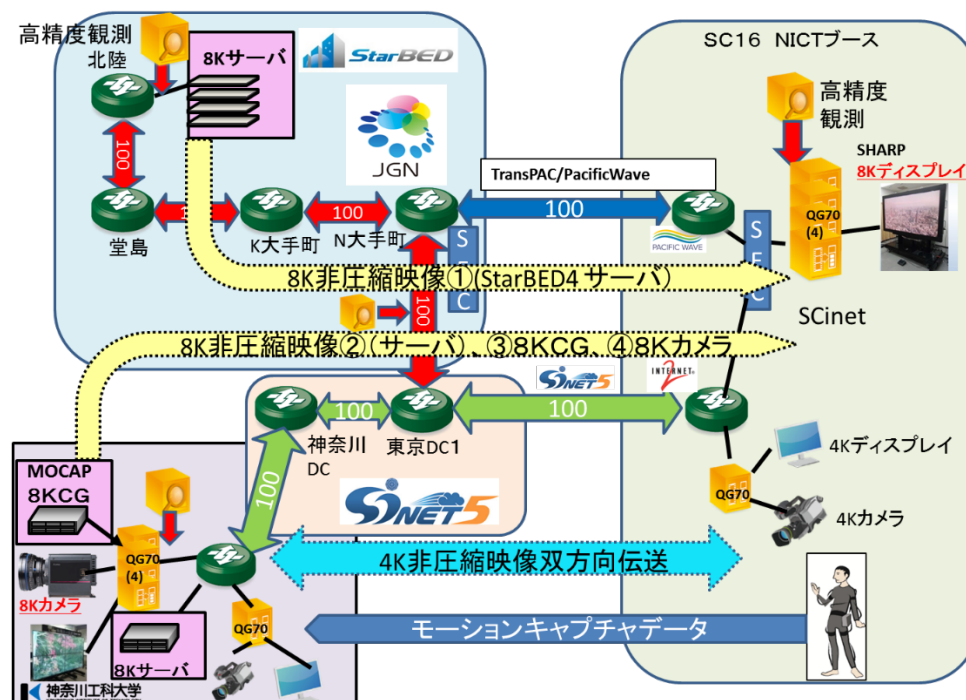


図3 SC16 8K/4K 超高精細映像素材の配信実験

この環境を用いて、モーションキャプチャ（光学式、慣性式）を使った8K映像制作の取り組みを行った。具体的には、図4に示すように米国のSC16ブース内では慣性式モーションキャプチャのボディースーツを着用した演者の動きを、データとしてKAIT拠点にモーションデータストリーミングする。同時に、日本側であらかじめ記録してあった光学式モーションキャプチャのモーションデータストリーミングと合わせて、2体のCGキャラクターの動きとしてアニメーションを生成し、背景映像と共にリアルタイムレンダリング処理を実施。この計算結果が8K非圧縮のYUV 4:2:2 10bitの映像フォーマット（48Gbps）として出力される。これを、今回は8Kカメラや8Kサーバで利用している8Kデュアルグリー

ン映像フォーマット 24Gbps に変換して、SC16 ブースまでリアルタイム伝送した。SC16 ブースの演者はリアルタイムにレンダリング結果を確認でき、CG を用いた番組制作に有効なプレビジュアライズ（プレビス）環境を日米間で非圧縮 8K の超高精細品質で実現したことになる。

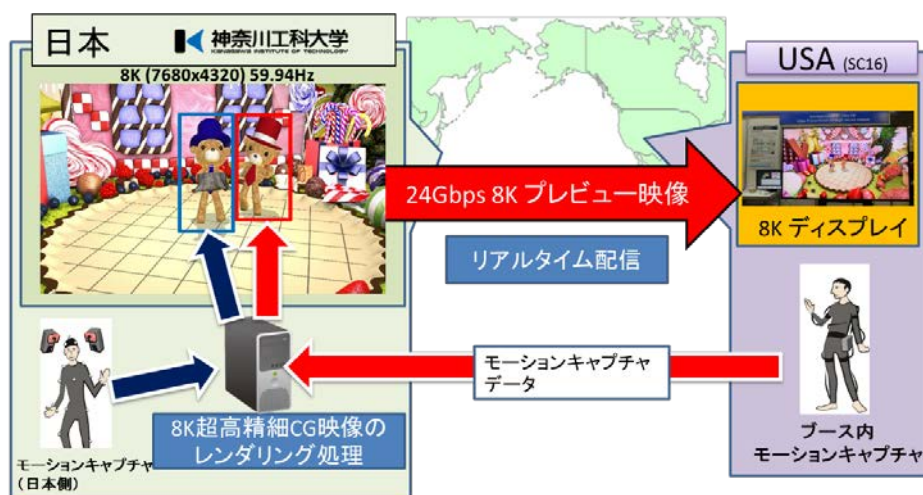


図 4 リアルタイム 8K プレビジュアライズ制作環境



図 5 SC16 ブース展示模様

ネットワーク上でのリアルタイム暗号配信状況の把握や映像素材のネットワーク上の安

定的な配信を実現するため、高精度ネットワーク計測技術と 8K 映像トラフィックメータを併用して、100Gbps 回線の伝送状況を実時間で観測する実験を行った。本実験の様子は、報道発表^[11]するとともに、NS 研究会^[6]で公表した。

(4)NICT さっぽろ雪まつり実証実験^[16]

2017 年 2 月に NICT が主催したさっぽろ雪まつり実証実験において、札幌―大阪間の複数経路から構成される 200Gbps の広帯域回線を用いて、8K (7680×4320 画素・ハイビジョンの 16 倍) 超高精細ライブの非圧縮映像と大阪と大学の 2 拠点の演者のモーション情報からリアルタイムに生成した 8K 対応の CG (コンピュータグラフィックス) 映像を用いて、複数素材を同期化し、100Gbps 超の大容量ストリームデータとして配信する実験を行った。

今回の実験では、JGN の国内 100Gbps 基幹回線に加え、国立情報学研究所が構築・運用する学術情報ネットワーク SINET5 が実証実験に参加することにより、北海道から大阪まで複数経路による 200Gbps の容量を持つ広域ネットワークを構築した。札幌から、複数の 8K カメラと高臨場音声情報を含む 8K 超高精細ライブ非圧縮映像に加えて、リアルタイムに生成した 8K 対応の CG (コンピュータグラフィックス) 映像から構成される 100Gbps 超の大容量ストリームデータを用いて、32 レーン (3Gbps/レーン) に分割して配信するマルチレーン同期配信を行った。

利用した 8K 非圧縮フォーマットは、従来の 8K-DG (デュアルグリーン) の 2 倍の帯域が必要な、8K フル映像 (YUV4:2:2 10bit) のフォーマット (48Gbps) を用いた。本実験では、2 素材を完全に同期化して大容量のストリームデータとして用いており、ネットワーク上での伝送容量 IP プロトコルのオーバーヘッドを加えると約 109Gbps になる。さらに KAIT、大阪展示会場等の 4 箇所へ 4K 非圧縮映像 4K30P (IP オーバヘッドを加えて 6.4Gbps) のマルチキャスト配信を行っている。

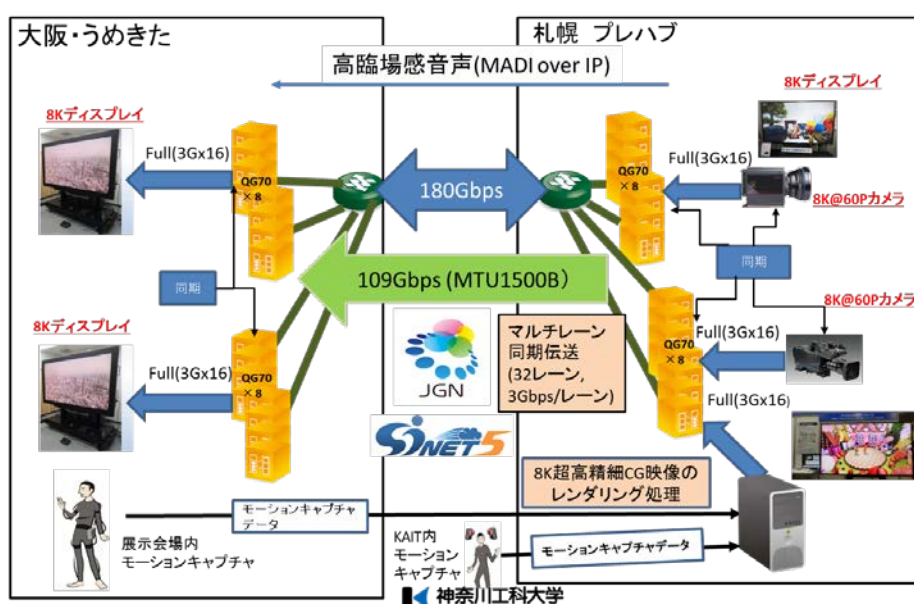


図 6 8K 超高精細映像素材の 100G 超伝送

またこの環境を用いて、複数拠点のモーションキャプチャ（光学式、慣性式）を使った 8K 映像制作の取り組みを行った。具体的には、大阪の展示会場内では慣性式モーションキャプチャのボディースーツを着用した演者の動きを、データとして札幌のサーバにモーションデータストリーミングする。同時に、KAIT で行う光学式モーションキャプチャのモーションデータストリーミングと合わせて、2 体の CG キャラクタの動きとしてアニメーションを生成し、背景映像と共にリアルタイムレンダリング処理を実施した。この計算結果が 8K フル映像フォーマットとして出力される。これを、8K カメラ映像と完全同期化して大阪までリアルタイム伝送した。大阪の演者はリアルタイムにレンダリング結果を確認でき、CG を用いた番組制作に有効なプレビジュアルイズ（プレビス）環境を遠隔地間で非圧縮 8K の超高精細品質で実現したことになる。

なお、ネットワーク上でのリアルタイム暗号配信状況の把握や映像素材のネットワーク上の安定的な配信を実現するため、高精度なネットワーク計測技術と 8K 映像トラフィックメータを併用して、回線の伝送状況を実時間で観測する実験を行っている。本実験の内容は、報道発表^[12]に繋げた。

これらのアプリケーション実験の活動について、広帯域ネットワーク利用に関するワークショップ ADVNET2016^[9]にて、これまで取り組んできた 8K 非圧縮映像伝送・蓄積アプリケーションを用いて、新たに取り組んだ(1)2016.2 の”さっぽろ雪まつり”実証実験におけるリアルタイム暗号化配信実験、(2)2016.5 の”SINET5 開通式”の沖縄間伝送実験および JGN の StarBED 4 との相互接続による蓄積配信実験、(3)2016.6 の Interop Tokyo2016 の神奈川工科大学ブースで行った商用 IP 網経由の伝送実験について、SINET5 と JGN のサービス連携および大学のアクセス回線の 100Gbps 化を中心に紹介した。また、KAIT シンポジウム^[9]でも紹介した。

4.3 8K トラフィックメータを用いた応用実験

SC および雪まつり実験では、汎用スイッチのタップ集約機能を利用した 8K トラフィックメータを利用した。8K トラフィックメータは、図 7 に示すように大学で実装したもので、当初は、TILERA という並列処理ボードを使って実装して、翌年に 80Gbps までのキャプチャ能力を確認していた。

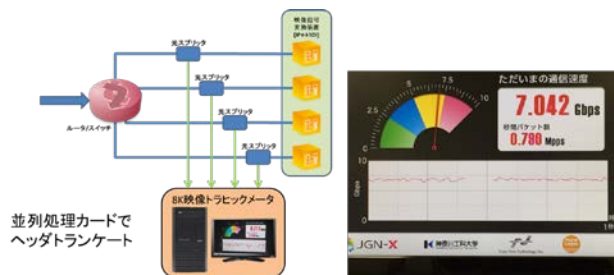


図 7 8K トラフィックメータ

今回は、新たに汎用スイッチのタップ集約機能を用いた、新しい Version の検証をアプリケーション実験を通して進めた。具体的には、ARISTA 社の 7150 シリーズのスイッチに搭載されている Tap aggregation という機能を利用する。複数の光タップからのパケットをスイッチに入力すると、タイムスタンプ付与やヘッダの切り出し処理を行い、それを特定のモニタポートにまとめて出力する機能を有する。モニタポートには、多数のヘッダ部のみが連続して入力されても処理が行えるように Intel の DPDK の機能を使った。この動作を図 8 に示す。

この機能を使う事で、多地点でのキャプチャデータをまとめて処理する拡張もできると考える。

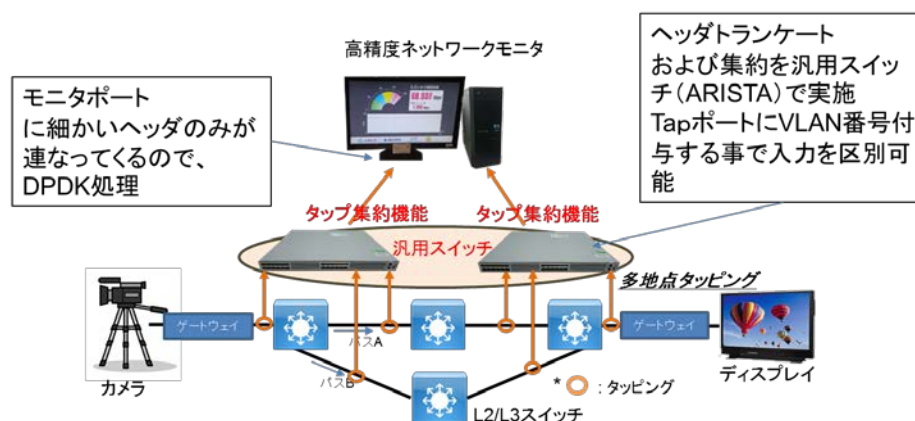


図 8 汎用スイッチのタップ集約機能を利用した多地点対応化

また、計測関係の応用実験として、OpenFlow 技術への応用や、並列処理化等に検討を進め、論文公表^[7,8,9]した。

4.4 外部連携活動の推進

本研究に関連して、SINET を運営している NII 漆谷教授との共同研究を昨年に引き続き実施している。これは、公募型の共同研究で、「SINET5 上での over10Gbps リッチコンテンツ共用サービスの実証評価」という内容で、進めている。この枠組みを利用して、映像伝送とファイル転送の共存化の検討^[10]や NII のクラウド NFV を用いた新たな共同実験を進めている。

NTT 未来研とは、広域分散リアルタイム並列処理技術の共同研究として、東京電機大学も含めた 3 者での共同研究を締結し、広域分散された共有ネットワーク・計算機リソースを使い、高精細映像やトラヒックデータなどの大容量データを、安価かつ高速に、伝送・処理するための基盤技術の研究を進めている。

NICT とは、高速モニタリングアーキテクチャの検討として、東京電機大学および NTT-IT 社を含めた共同研究を開始している。これは、今後必要となる over100Gbps のモニターアーキテクチャを検討するためのアーキテクチャ研究に発展する予定である。

5. 今後の計画

H29 年度は、先進技術研究所のテーマ、「クラウドインフラを用いた 8K 超高精細映像処理技術の開発」に移行し、8K/4K 等の高精細映像素材の制作向けに、10Gbps を超える広帯域ストリームデータをリアルタイムで自在にハンドリングできるクラウド環境をネットワーク (NW) 上の様々な計算機群が協調するアーキテクチャにより構築を目指す。またユーザアプリケーション (AP) がクラウドや NW のリソースを意識せずに利用し、高速化の恩恵を得られる環境をプラットフォームとして提供し、POC (Proof of concept) として H31 年度から試行トライアル可能なアプリケーションソフトウェアの実現を目指す。

具体的には以下を明らかにし、方式の有効性を実網環境を用いて実証する予定である。

- (1) over10Gbps の広帯域ストリームデータをリアルタイム処理可能な分散処理方式
- (2) クラウド内のノード・内部結合網の性能把握に基づく処理割り当て手法
- (3) AP の特性に応じて適切な NW とクラウドの連携を自動割り当てするインタフェース

5. 研究成果の発表

論文発表

- [1] Hideki Otsuki, Mitsuru Maruyama, Hiroyuki Kimiyama, “Uncompressed 8K live video transmission over 100G IP network with real-time encryption,” The 42th Asia Pacific Advanced Network, APAN42, Network Engineering Workshop, 100G links and the technologies session, 2016.8.4.
- [2] 藤井竜也, 君山博之, 澤部知子, 北村匡彦, 丸山充, 小島一成, 井家敦, “非均質計算機環境を使ったリアルタイム大容量データ処理アプリケーションプラットフォームの研究開発(15010004),” ICT イノベーションフォーラム 2016, 幕張メッセ国際会議場, 2016.10.4.
- [3] 丸山充, 君山博之, 大槻英樹, 小林和真, 漆谷重雄, 山田博司, 栗本崇, 小島一成, 岩田一, “100Gbps 広域ネットワークを用いた非圧縮 8K 超高精細映像の配信実験の取り組み”, 広帯域ネットワーク利用に関するワークショップ(ADVNET2016). Oct.(2016).
- [4] 君山博之, 北村匡彦, 小島一成, 丸山 充, 藤井竜也, “大容量計算のための複数クラウドを使った動的並列分散処理フレームワークの提案,”第 24 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, DPSWS2016, 情報処理学会, pp.126-136, 2016.10.20.
- [5] 丸山充, “超高精細映像を自在にハンドリング可能な次世代コンテンツ制作環境の実現 –8K 対応ストリーミングクラウド構成技術–,” KAIT シンポジウム 2016, pp.81-91, 神奈川工科大学, 2016.12.10.
- [6] 小島一成, 河合栄治, 大槻英樹, 小林和真, 漆谷重雄, 山田博司, 栗本崇, 君山博之, 岩田一, 丸山充, “多地点 MOCAP ストリーミングによる 8K リアルタイム CG 非圧縮伝送”, 信学会 NS 研究会, NS2016-122, 2017.3.3.
- [7] 鈴木健太, 樋口駿, 岩崎祐也, 丸山 充, “OpenFlow による広帯域映像スイッチング処理の最適化,” 神奈川工科大学 IT を活用した教育研究シンポジウム 2016, 第 11 巻, ISSN 2432-0285, Vol. 11, pp.73-76, 2017.3.8.
- [8] 渡部慎也, 丸山 充, “クラウドを用いた大容量キャプチャデータの並列分散処理に関する研究,” 神奈川工科大学 IT を活用した教育研究シンポジウム 2016, 第 11 巻, ISSN 2432-0285, Vol. 11, pp.69-72, 2017.3.8.
- [9] 岩崎祐也, 鈴木健太, 樋口 駿, 丸山 充, “広帯域ストリーム伝送を実現する動的なアプリケーションネットワーク制御方式の提案”, 信学会 2017 総合大会, B-6-53, 2017.3.24.
- [10] 佐々木 渉, 丸山 充, 山中顕次郎, 漆谷重雄, 栗本 崇, 山田博司, 君山博之, “広帯域映像伝送システムにおけるストリームとファイル転送の共有制御”, 信学会 2017 総合大会, B-6-88, 2017.3.25.

プレスリリース

- [11] 「神奈川工科大学が日米の複数拠点のモーションキャプチャデータから 8K 超高精細 CG 映像のリアルタイムレンダリング処理を行い、非圧縮のままリアルタイム遠隔配信する実験に成功」 神奈川工科大（大学プレスセンター）,2016.12.6.
- [12] 「神奈川工科大学が 8K 超高精細ライブ非圧縮映像とリアルタイムに生成した 8K CG 映像を用いて 100Gbps 超の大容量の遠隔配信実験に成功」 神奈川工科大（大学プレスセンター）,2017.2.3.

展示会出展・共同実験実施

- [13] SINET5 開通式・NII オープンフォーラム(2016.5.25-27 一ツ橋講堂, OIST)
- [14] Interop Tokyo 2016 (2016.6.8-10 幕張メッセ：神奈川工科大ブース)
- [15] SC16(2016.11 米国ソルトレイクシティ:NICT ブース)
- [16] 2017 さっぽろ雪まつり NICT 実験 (2017.2 札幌, グランフロント大阪)

一般道路上での V2X 通信による予防安全方式

研究者名：	情報工学科	清原良三
	情報工学科	宮崎剛
	電気電子情報工学科	高取祐介
	自動車システム開発工学科	狩野芳郎

1. 研究の目的

高速道路や自動車専用道を対象とした自動運転の実用化が盛んである。また、一般道に対しても運転を支援する目的で路側設備の整備や、車載通信機器の標準化および搭載計画が進みつつある。2016 年度発売の一部の車種には自動車と自動車の通信機能 (V2V) や、自動車と道路側の設備の通信機能 (V2R) が標準搭載されている。

このような環境で様々なアプリケーションが提案実装されている。予防安全と渋滞情報など快適な運転のための情報配信である。障害物の少ない高速道路などでは設備も充実しており自動運転にも利用される状況になりつつあるが、一般道では路側設備を網羅するのは困難である。そのため、V2V を中心に予防安全のための情報提示が必要であるが必要な時のみ提示しなければ注意しなくなるという課題と、情報を提示することによって逆に注意散漫を起こしてしまうという課題などがある。本研究ではこれらの課題を解決する手法の提案と評価を行う。

そこで研究目的は、一般道における予防安全のための車車間通信 (V2V) において、道路コンテキスト（混雑度、視界）に応じた選択的情報通信手法による通信量を削減した確実な通信方式の確立と、道路コンテキストに応じた情報のタイミングのよい表示手法の確立およびドライビングシミュレータを利用することによる注意散漫度のしつかりとした評価指標を確立することである。また自動運転導入時にも非自動運転モードに移行する際の問題点を洗い出し、自動運転時における情報表示手法も確立することも目的となる。

本年度は、(1) 道路コンテキストとしての位置コンテキスト、および視界を中心とした周辺コンテキストの認識手法の実験と評価を行う。また、(2) 車車間通信機能を有する車相互間での周辺状況（車車間通信機能を有しない車の情報をセンサで獲得したものも含めて）情報を共有することによる状況認識手法の基礎的実験と評価を交通シミュレータ上で行うとともに、ドライビングシミュレータ上でも同環境を実現するための準備としての道路地図、試験再現環境の構築などを行い、評価環境を確立することを目標とする。

2. 研究の必要性及び従来の研究

自動運転に関しては制御技術などに関しては従来より自動車メーカーを中心に、名古屋大学や金沢大学、同志社大学などで盛んに行なわれている。これらの車はミリ波レーダによる前方との距離測定、ステレオカメラによる物体が何であるかの認識、GPSによる位置認識といった予防安全機能を発展させた形で実現しつつある。一方その効果はシミュレーションなどによって確認されつつあるが、理想環境のみでシミュレーションするなど良い結果がでる場合を中心に研究が実施されている傾向にある。

そのため、理想環境に近づけるための段階で理想に遠いとして普及が妨げられることを避けるために、本研究により自動運転の効果を低減しないような技術開発が重要となる。

3. 期待される効果

本研究の成果により一般道における予防安全のための車車間通信(V2V)において、道路コンテキスト(混雑度、視界)に応じた選択的情報通信手法による通信量を削減した確実な通信方式の確率と、道路コンテキストに応じた情報のタイミングのよい表示手法が確立され、ドライビングシミュレータを利用することによる注意散漫度のしっかりとした評価指標が確立される。また自動運転導入時にも非自動運転モードに移行する際の問題点を洗い出し、自動運転時における情報表示手法も確立される。

4. 研究の経過及び結果

(1) スマートフォンのGPSを利用した道路ごとの走行頻度履歴による道路習熟度マップの生成とこれを活用したとくに丁字路を中心とした交通渋滞の発生に関してシミュレーションを行い、V2X通信により情報を交換する手法の有用性を示した。

(2) 自動運転走行時の危険予知を目的として、脇道が見えにくくしている道路コンテキストの検出方法を検討した。具体的には、道路に接している壁がある画像から壁を検出する実験を実施し、検出方法を確立した。

(3) 無線媒体アクセス制御を考慮した出会い頭衝突防止システムのシミュレーション環境の構築および普及率に対する性能解析を実施した。

(4) 最終段階で行うドライビングシミュレータでの評価に備え、それぞれの状況を再現できる環境構築の準備として、情報提供手段の一つであるスーパーインポーズ機能をサイ

ドミラーに組み込んだ。さらに VR 化などの手法を検討したが、OS が古いなど各種問題があることがわかった。今後交通シミュレータとの連携に向けて準備を行う。

5. 今後の計画

- (1) 通信モジュールを現実的なシミュレーション環境とし、通信、交通シミュレータを連動するとともに、ドライビングシミュレータとの連携を実施予定。
- (2) 脇道を見えにくくしているコンテキストは、看板や垣根など様々あるため、より多くのコンテキストを検知する手法が残課題として取り組む予定
- (3) 通信範囲の影響や種々の道路構造における評価を行い、実際の地図からいくつかの交差点を含む道路ネットワークを対象として性能解析を行う予定
- (4) 交通シミュレータのエージェントとして実現した自動車のドライビングシミュレータへのマッピングに取り組む

6. 研究成果の発表

(1) 原著論文等

Yusuke TAKATORI, Hideya TAKEO, Analysis of Vehicle Information Sharing Performance of an Intersection Collision Warning System, IEICE Trans-A, Vol.E100-A No.2 pp.457-465 (2016)

(2) 国際会議論文等

Seiji Matsuyama, Yuichi Tokunaga and Ryoza Kiyohara, Recognizing User Location Context for Car Navigation Devices(ISCE 2016)

Chihiro Miyazaki, Seiji Matsuyama, Masashi Saito, Yuichi Tokunaga, Ryoza Kiyohara, A Study of Driver's Behavior with Autonomous and Non-Autonomous Vehicle(IWIN 2016)

Yusuke Takatori, Shunsuke Onodera, Tsubasa Sugiyama, Ryoza Kiyohara, Analysis of Vehicle Information Sharing System by Microscopic Traffic Flow Simulation(IWIN 2016)

(3) 国内シンポジウム・研究会等

遠藤史貴, 清原良三, 手動運転車両のドライバの自動運転車両の挙動認識評価, 情報処理学会 ITS 研究会, 2017 年 2 月

宮崎千展, 松山聖路, 徳永雄一, 齋藤正史, 清原良三, 自動運転普及期の T 字路におけるドライバ支援方式, 情報処理学会 ITS 研究会, 2016 年 12 月

杉山翼，高取祐介，センサ情報を共有する出会い頭衝突注意喚起システムの車両情報共有性能に関する一検討 ～ V2V における媒体アクセス制御を考慮した普及率特性 ～ ，電子情報通信学会 ITS 研究会，2017 年 2 月

(4) 全国大会等

矢島貴広，清原良三，自動運転普及期における速度規制に関する検討，情報処理学会第 79 回全国大会

宮崎千展，松山聖路，徳永雄一，齋藤正史，清原良三，自動運転普及期における交差点進入支援方式，情報処理学会第 79 回全国大会

Analysis of Vehicle Information Sharing Performance of an Intersection Collision Warning System

Yusuke TAKATORI^{†a)} and Hideya TAKEO^{†b)}, *Members*

SUMMARY In this paper, the performance of a vehicle information sharing (VIS) system for an intersection collision warning system (ICWS) is analyzed. The on-board unit (OBU) of the ICWS sharing obstacle detection sensor information (ICWS-ODSI) is mounted on a vehicle, and it obtains information about the surrounding vehicles, such as their position and velocity, by its in-vehicle obstacle detection sensors. These information are shared with other vehicles via an intervehicle communication network. In this analysis, a T-junction is assumed as the road environment for the theoretical analysis of the VIS performance in terms of the mean of entire vehicle information acquiring probability (MEVIAP). The MEVIAP on OBU penetration rate indicated that the ICWS-ODSI is superior to the conventional VIS system that only shares its own individual driving information via an intervehicle communication network. Furthermore, the MEVIAP on the sensing range of the ICWS-ODSI is analyzed, and it was found that the ISO15623 sensor used for the forward vehicle collision warning system becomes a candidate for the in-vehicle detection sensor of ICWS-ODSI.

key words: intelligent transport system (ITS), intervehicle communication (IVC), intersection collision warning system (ICWS), obstacle detection sensor, vehicle information sharing (VSI)

1. Introduction

A driving assistance system that reduces vehicle accidents is one of the intelligent transport system (ITS) applications that is expected to spread widely and rapidly. In Japan, the Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism calls vehicles with such systems as advanced safety vehicles (ASV) [1], and it is promoting some ASV-related projects. The intersection collision warning system (ICWS) that uses intervehicle communication (IVC) technology is one example of an ASV application system [2]. This system allows a vehicle that has an on-board unit (OBU) with IVC function to share neighbor vehicles' driving information (position, velocity, etc.) and prevents its driver from a crossing collision caused in an intersection. Thus far, some wide-scale demonstration experiments on public roads have been conducted as a part of the ASV project. In the demonstration experiment on public roads, information sharing among vehicles with an OBU (hereafter called OBU vehicle) has already been realized. However, it is actually difficult for all vehicles to be equipped with OBUs simultaneously. Therefore, it is necessary to consider the fact that the system will be operated in situations where both OBU and non-OBU

vehicles will be present. Obviously, because an OBU vehicle cannot acquire information about non-OBU vehicles, the lack of information might lead to incorrect recognition of the driver, and the driver might cause a crossing collision. Furthermore, even if the driver is careful, when the number of vehicles provided by the OBU interface to the driver differs from the actual number of vehicles in the vehicle detection area required by the ICWS (called IVC area), the receptiveness of the driver to the ICWS might become impaired. These are unavoidable difficulties for this type of system based on IVC information sharing, which will be widely used in the ICWS. Therefore, it is necessary to acquire as much information as possible about both OBU and non-OBU vehicles.

One of the methods for acquiring information about non-OBU vehicles is to share in-vehicle detection sensor information among vehicles. Some concepts, experiments, and performance evaluations of such systems have been reported. To extend the vehicle's field of view, Tischler included remote information concerning the state of each participating vehicle and its object detections [3]. Kato developed a visual information presentation system that sends a real-time video image to other vehicles by IVC [4]. One of the authors evaluated the safety performance of a driving assistance system that uses sensor and/or communications in a freeway situation through a microscopic traffic simulator [5]. However, this concept has not been introduced into the ICWS [6], [7] and the VIS performance for the OBU penetration rate of an ICWS is not even been analyzed.

In this paper, at first, the performance of a conventional VIS of an ICWS that shares only the individual driving information for the OBU penetration rate is analyzed. Moreover the performance of the VIS of an ICWS that shares driving information of both the individual vehicle and other vehicles that is acquired by on-board front and/or rear obstacle detection sensors is analyzed.

This paper is organized as follows. In Sect. 2, the conventional ICWS and the scenario of the analysis are explained. In Sect. 3, a theoretical analysis method of the conventional ICWS is described. In Sect. 4, theoretical analysis methods of each ICWSs that shares driving information of both the individual vehicle and other vehicles that is acquired by on-board front and/or rear obstacle detection sensors is described. In Sect. 5, the VIS performance of each ICWS are analyzed. Finally, Sect. 6 concludes this paper.

Manuscript received May 9, 2016.

[†]The authors are with Department of Electrical and Electronic Engineering Science, Faculty of Engineering, Kanagawa Institute of Technology, Atsugi-shi, 243-0292 Japan.

a) E-mail: takatori@ele.kanagawa-it.ac.jp

b) E-mail: takeo@ele.kanagawa-it.ac.jp

DOI: 10.1587/transfun.E100.A.457

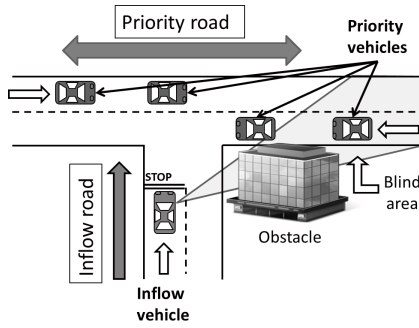


Fig. 1 Blind T-junction.

2. VIS of the ICWS that Shares Individual Vehicle Information

2.1 Overview of the ICWS [6], [7]

The ICWS discourages a driver in a vehicle that approaches a blind intersection from entering the intersection if another vehicle approaches the same intersection from another direction. In this study, a T-junction model shown in Fig. 1 is configured. The T-junction combines a priority road and an inflow road. The road extending horizontally is called the priority road, and vehicles running on it are called priority vehicles. In the priority road, priority vehicles run on the left-hand side of the road (drivers obey Japanese traffic rules). Furthermore, the road that intersects at right angles is called the inflow road, and vehicles running on it are called inflow vehicles. Inflow vehicles should not tie up priority vehicles that approach the intersection. When the line-of-sight from the inflow road to the priority road is interrupted by obstacles (by a pedestrian, hedge, wall, building, etc.), the driver of the inflow vehicle might pass over with the priority vehicles and get into danger of causing a crossing collision. To avoid this danger, the ICWS assists the inflow vehicle in entering the intersection safely by providing driving information (position, velocity, etc.) of the priority vehicles that approach the intersection. In this system, for the priority vehicle to broadcast its individual driving information repeatedly with short intervals, the OBU of the system must have two fundamental functions; a real-time IVC function and a real-time positioning function. By using these functions, the inflow vehicle's OBU can acquire other priority vehicles' driving information in real-time. In this paper, we call this conventional ICWS that shares individual vehicle information as ICWS-INDV.

2.2 Intervehicle Communication (IVC)

In this paper, IVC is defined as communication between on-board information-processing units that are coupled with the vehicle mechanically and functionally. It is assumed that the broadcasted information from priority OBU vehicles can be received by the inflow OBU vehicle that is stopped at

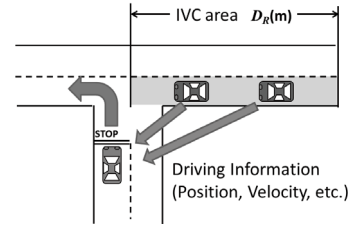


Fig. 2 Vehicle information sharing in the ICWS (left-turn situation).

the stop line when priority vehicles run within the IVC area (from the center of the intersection to D_R [m] beyond). D_R is set to 200 m because a 700-MHz bandwidth is used for IVC [6], and a report about using IVC with 700-MHz bandwidth at an intersection [6] indicated that the signal from a priority vehicle located 200 m away from the intersection reaches the inflow vehicle set back 14 m from the intersection. Figure 2 shows the broadcasting of the priority vehicles' driving information.

2.3 Operational Scenario of the ICWS at T-Junction

Naturally, an operational scenario in which an inflow OBU-vehicle approaches an intersection is considered, because this system supports a driver who drives an OBU-vehicle. There are two entry actions of an inflow vehicle: right-turn entry action and left-turn entry action. First, a left-turn entry, which is simpler in nature, is analyzed, because it takes only one-way traffic flow (from right to left) into account. The operational scenario is as follows.

- (1) An inflow vehicle is headed for the stop line.
- (2) Every priority vehicle that is running in the IVC area broadcasts its own driving information in a short time interval.
- (3) The inflow vehicle receives the driving information of the priority vehicles that are running in the IVC area.
- (4) The OBU of the inflow vehicle judges whether it should stop at the stop line based on its driving information and the priority vehicles' driving information.
- (5) If the OBU of the inflow vehicle decides that the inflow vehicle should stop, it provides warning assistance to the driver.

3. Analysis of the VIS Performance of the ICWS-INDV

3.1 Entire Vehicle Information Acquiring Probability

To analyze the VIS performance in a simple manner, an ideal T-junction in which the headway-distance distribution of priority vehicles is invariant is assumed. Then, the case in which an inflow vehicle turns left and enters the priority road is discussed. That is, the OBU of the inflow vehicle is required to collect the information of the priority vehicles that approach from the right-hand side. In this paper, the authors define an index of the VIS performance named "entire vehicle information acquiring probability" ($EVIAP_k$, where

k is the number of vehicles in the IVC area) of the inflow vehicle as the probability that the inflow vehicles arriving at the stop line can acquire entirely priority vehicles' running information in the communication area of the priority road.

$EVIAP_k$ depends on the priority road traffic condition when an inflow vehicle reaches the stop line. Because the vehicular headway-distance follows a certain probability distribution (exponential distribution or Erlang distribution), $EVIAP_k$ also shows a certain probability distribution. To evaluate the VIS performance, the mean of $EVIAP_k$ (MEVIAP) is analyzed in this paper, because the number of vehicles existing in the communication area changes depending on the traffic flow.

3.2 MEVIAP of the VIS of the ICWS-INDV

In free-flow traffic, every vehicle does not have to follow another car; in this case, it is known that intervals that each vehicle passing a fixed point in a given period of time shows an exponential distribution [8]. Moreover, when some vehicle follows the forward vehicle, it is known that intervals that each vehicle passing a fixed point in a given period of time shows an Erlang distribution [8]. When the phase parameter of the Erlang distribution is set 1, the probability distribution corresponds to an exponential distribution. In addition, when all vehicle run at a constant velocity v [km/h], the distribution of the number of vehicles in a certain road section follows the distribution of the inflow traffic of the road section. Therefore, the probability that there are k -vehicles in the IVC area of priority road $P(k, \lambda_c, n)$ can be expressed by the following Erlang distribution.

$$P(k, \lambda_c, n) = \sum_{s=nk}^{n(k+1)-1} \frac{\lambda_c^s e^{-\lambda_c}}{s!} \quad (1)$$

where k is the actual number of vehicles in the IVC area of the priority road, λ_c is the mean number of vehicles in the IVC area of the priority road, and n is the phase parameter of the Erlang distribution. Then, $EVIAP_k$ of the ICWS-INDV is the probability of all k -vehicles located in the IVC area having a communication device. Therefore, MEVIAP of the VIS of the ICWS-INDV is obtained by the sum of the product of $P(k, \lambda, n)$ and $EVIAP_k$.

$$MEVIAP = \sum_{k=0}^{k_{max}} P(k, \lambda_c, n) EVIAP_k \quad (2)$$

Here, k_{max} is set as the maximum number of vehicles in the IVC area. In this analysis, the minimum distance between two vehicles is assumed to be 4.5 m (the nominal length of a vehicle) and the length of the IVC area D_R is set to 200 m, k_{max} can be determined to be 22 vehicles. Moreover, the mean number of vehicles in the IVC area of the priority road λ_c is obtained following equation.

$$\lambda_c = \frac{N}{v} \frac{D_R}{1000} \quad (3)$$

where N is the traffic flow of the priority road [veh./h]. In the case of the VIS of the ICWS-INDV, if $k = 0$, the OBU recognizes that the number of existing vehicle is zero. Because this judgment corresponds to the actual number of vehicles in the IVC area, $EVIAP_0$ is calculated as one. Moreover, when $k > 0$, if all the vehicles in the IVC area have an OBU, the OBU of the inflow vehicle can obtain the entire vehicle information. Therefore, $EVIAP_k$ of the ICWS-INDV is calculated as follows.

$$EVIAP_k = r^k \quad (4)$$

where r is the OBU penetration rate.

Then, $MEVIAP_{INDV}$ is expressed by the following equation.

$$MEVIAP_{INDV} = \sum_{k=0}^{k_{max}} P(k, \lambda_c, n) r^k \quad (5)$$

4. Analysis of the VIS of the ICWS That Shares Obstacle Detection Sensor Information

4.1 Overview of the ICWS That Shares Obstacle Detection Sensor Information

To sharing non-OBU vehicle information among vehicles with OBUs, in-vehicle obstacle detection sensor information is added to the sharing information of VIS of the ICWS-INDV. In this section, this ICWS is called ICWS-ODSI (obstacle detection sensor information). The operational scenario is the same as that of the ICWS-INDV. The ICWS-ODSI broadcasts the other vehicles' obtained information directly or processes positional information on the road coordinate. Figure 3 shows an overview of the ICWS-ODSI.

4.2 In-Vehicle Obstacle Detection Sensor

In the ICWS-ODSI, the type of obstacle detection sensor and number of sensors are not specified. We assume the ICWS-ODSI can divert information from already standardized driving assistance systems such as FVCWS [11] and LCDAS [12]. In the ICWS-ODSI, it is expected that the safety performance will be enhanced sustainably by substituting a new

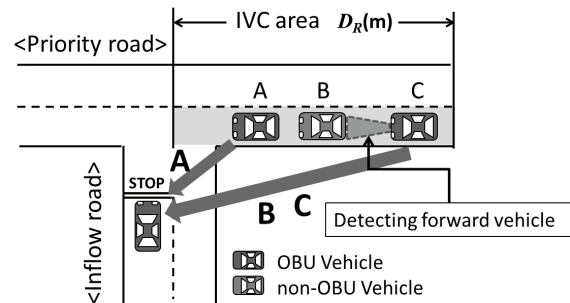


Fig. 3 VIS of the ICWS-ODSI.

high-performance sensor or installing more sensors. In this paper, it is assumed that the forward obstacle detection sensor for the FVCWS is used as the in-vehicle obstacle detection sensor in the ICWS-ODSI. For the sensor model, the forward obstacle detection sensor can detect a nearest vehicle within the forward D_s meters in the longitudinal direction. Meanwhile, when an OBU-equipped vehicle's driving information is observed by the following OBU-equipped vehicle, a waiting inflow vehicle obtains driving information of the vehicle from two sources. Because this vehicle receives duplicated information, it is assumed that the OBU integrates them into the information of one vehicle. Furthermore, in recent years, applications using both forward and rear detection sensors have attracted much attention. Therefore, an ICWS-ODSI that uses both forward and rear obstacle detection sensors is also analyzed in this paper.

4.3 MEVIAP of the VIS of the ICWS-ODSI Using Forward Detection Sensor

First, it is assumed that the forward vehicle obstacle detection sensor information is shared (called ICWS-ODSI/F). When the VIS of the ICWS-ODSI/F is analyzed, the Eq. (2) is used. Though the probability that k vehicles exist in the IVC area $P(k, \lambda_c, n)$ is the same as the analysis of the VIS of the ICWS-INDV, $EVIAP_k$ is different from the analysis of the VIS of the ICWS-INDV except for $k = 0$ or $k = 1$. In this case, $EVIAP_k$ is a probability that all vehicles in the IVC area meet the following conditions simultaneously.

- There is not more than one non-OBU priority vehicle on a line in the IVC area.
- All the non-OBU priority vehicles in the IVC area are within the range of the sensors of the posterior OBU priority vehicles.

When $k > 1$, $EVIAP_k$ is obtained from the product of the following probabilities.

- Probability that there is not more than one non-OBU priority vehicle on a line in the IVC area.
- Probability that all the non-OBU priority vehicles in the IVC area are within the range of the sensors of the posterior OBU priority vehicles.

The former probability is given by an equation. The probability that there are m non-OBU vehicles among k vehicles (k is the sum of OBU and non-OBU vehicles) is expressed as ${}_k C_m (1-r)^m r^{k-m}$. Number of combination ${}_k C_m$ is the number of ways to sample k elements from a set of m elements where order does not matter and replacements are not allowed. Therefore, the combination that every non-OBU vehicle in the IVC area is followed by a vehicle with a posterior OBU vehicle corresponds to the repeated combination of m pairs of "a non-OBU vehicle and a following OBU vehicle" and "the remaining $k - 2m$ OBU vehicles". Number of combination with repetition ${}_k H_n$ is the number of ways to sample k elements from a set of n elements allowing for duplicates but disregarding different orderings. It is

expressed as ${}_{m+1}H_{k-2m} (= {}_{k-m}C_{k-2m} = {}_{k-m}C_m)$. Therefore, the probability is expressed as ${}_{k-m}C_m (1-r)^m r^{k-m}$.

Meanwhile, the latter probability is expressed by the term $1 - P(0, \lambda_s, n)$ in the same way as Eq. (1). The probability that all the non-OBU vehicles in the IVC area are within the sensing area of the posterior OBU priority vehicles is given by the m th power of the probability that at least one vehicle is within the sensing range. Here, it is assumed that the mean number of Erlang-distributed vehicles within the sensing area of an OBU vehicle is λ_s , and the probability that k vehicles exist within the sensing range of the vehicle is denoted by $P(k, \lambda_s, n)$. Therefore, the probability that at least one vehicle is within the sensing range is given by $1 - P(0, \lambda_s, n)$. In addition, the following relationship can be obtained regarding λ_s , v , and D_s :

$$\lambda_s = \frac{N}{v} \frac{D_s}{1000} \quad (6)$$

Therefore, $EVIAP_k$ of the VIS of the ICWS-ODSI/F can be obtained as follows.

$$EVIAP_k = \sum_{m=0}^{\lfloor k/2 \rfloor} (1-r)^m r^{k-m} {}_{k-m}C_m \{1 - P(0, \lambda_s, n)\}^m \quad (7)$$

Here, $\lfloor k/2 \rfloor$ means the maximum integer that does not exceed $k/2$. Consequently, the $MEVIAP_{ODSI/F}$ is derived as follows.

$$MEVIAP_{ODSI/F} = \sum_{k=0}^{k_{max}} [P(k, \lambda_c, n) \times \sum_{m=0}^{\lfloor k/2 \rfloor} (1-r)^m r^{k-m} {}_{k-m}C_m \{1 - P(0, \lambda_s, n)\}^m] \quad (8)$$

4.4 MEVIAP of the VIS of the ICWS-ODSI Using Both Forward and Rear Detection Sensors

The basic idea to obtain $EVIAP_k$ of the VIS of the ICWS-ODSI using both forward and rear detection sensors (called ICWS-ODSI/FR) is similar to that for the ICWS-ODSI/F. $EVIAP_0$ and $EVIAP_1$ can be obtained in the same manner as the VIS of the ICWS-INDV. For $k > 1$, $EVIAP_k$ is the probability that all vehicles in the IVC area meet the following conditions simultaneously.

condition A) Every non-OBU priority vehicle is immediately before or behind an OBU vehicle.

condition B) All the non-OBU priority vehicles in the IVC area are within the range of the sensors of the prior or posterior OBU priority vehicles.

Therefore, $EVIAP_k$ can be obtained as the product of the probability of condition A being fulfilled and the probability of condition B being fulfilled. Here, the probabilities of the pattern j (j is the pattern ID of the k -vehicles arrangement, and the total number of arrangement patterns is 2^k) fulfilling conditions A and B is denoted by $P_A(j)$ and $P_B(j)$,

respectively. $P_A(j)$ is given by the following equation:

$$P_A(j) = r^{k-m_j} (1-r)^{m_j} \quad (9)$$

where m_j is the number of non-OBU vehicles in the vehicle arrangement pattern # j . Regarding $P_B(j)$, the probability that one non-OBU vehicle is within the sensing area of an OBU priority vehicle depends on the number of OBU vehicles next to it. When an OBU vehicle is next to the non-OBU vehicle, the probability P_{1v} that the non-OBU vehicle is located in the sensing range of the OBU vehicle is given by

$$P_{1v} = 1 - P(0, \lambda_s, n) \quad (10)$$

However, when the non-OBU vehicle is between two OBU vehicles, the probability P_{2v} that the non-OBU vehicle is located in at least one of the sensing range of the two OBU vehicles is given by

$$P_{2v} = 1 - P(0, \lambda_s, n)^2 \quad (11)$$

Then, $P_B(j)$ is given by the following equation:

$$\begin{aligned} P_B(j) &= P_{1v}^{a_j} P_{2v}^{m_j-a_j} \\ &= (1 - P(0, \lambda_s, n))^{a_j} \\ &\quad \times (1 - P(0, \lambda_s, n)^2)^{m_j-a_j} \end{aligned} \quad (12)$$

where a_j is the number of non-OBU vehicles that have an OBU vehicle next to them. Therefore, $EVIAP_k$ is obtained by the following equation:

$$\begin{aligned} EVIAP_k &= \sum_{j=0}^{2^k} P_A(j) P_B(j) \\ &= \sum_{j=0}^{2^k} r^{k-m_j} (1-r)^{m_j} \\ &\quad \times (1 - P(0, \lambda_s, n))^{a_j} (1 - P(0, \lambda_s, n)^2)^{m_j-a_j} \end{aligned} \quad (13)$$

Consequently, the $MEVIAP_{ODSI/FR}$ is derived as follows.

$$\begin{aligned} MEVIAP_{ODSI/FR} &= \sum_{k=0}^{k_{max}} [P(k, \lambda_c, n) \times \sum_{j=0}^{2^k} \{r^{k-m_j} (1-r)^{m_j} \\ &\quad \times (1 - P(0, \lambda_s, n))^{a_j} (1 - P(0, \lambda_s, n)^2)^{m_j-a_j}\}] \end{aligned} \quad (14)$$

To find the value of $EVIAP_k$ by this equation, we have to know the values of m_j and a_j in each vehicle arrangement pattern. In this study, the authors made all vehicle arrangement patterns on a computer and counted them. Because the maximum number of vehicle arrangement patterns is $2^{k_{max}} = 2^{22}$, the counting can be speedily done using a computer.

4.5 Upper Limit of MEVIAP for the VIS of the ICWS-ODSI

The upper limit of the MEVIAP for the VIS of the ICWS-ODSI (called $MEVIAP_{UL}$) is achieved if an ideal in-vehicle

obstacle detection sensor that can obtain information from all vehicles in the IVC area is used. This means that if at least one OBU priority vehicle with an ideal sensor exists, the inflow vehicle can obtain information about all the other vehicles through the ideal priority vehicle. A complementary event would be if there is no OBU vehicle in the IVC area. This is expressed as follows:

$$MEVIAP_{UL} = 1 - \sum_{k=1}^{k_{max}} P(k, \lambda_s, n) (1-r)^k \quad (15)$$

5. Analysis Results

5.1 Analysis of Left-Turn Merging Situation

Because the MEVIAP of the VIS of the ICWS depends on the OBU penetration rate, traffic flow, and sensing range of the obstacle detection sensor, the performance of each VIS is analyzed based on these parameters. Parameters and their specifications are given in Table 1.

5.1.1 MEVIAP on OBU Penetration Rate

At first, the VIS performance on the OBU penetration rate is analyzed for free-flow traffic (Erlang distribution phase is set as 1). The variations of the MEVIAP with the OBU penetration rate are shown for different traffic flows in Figs. 4, 5, and 6. Here, four types of VIS of ICWSs (ICWS-INDV, ICWS-ODSI/F, ICWS-ODSI/FR, and ICWS-ODSI/UL) are analyzed. In addition, the sensing range of the forward and rear sensors is set to 100 m.

These results show that each MEVIAPs does not become zero for 0% penetration rate. This is because if there is no priority vehicle in the IVC area of the priority road, the inflow vehicle will not receive any signal, and its OBU will conclude that there is no vehicle in the IVC area. This shows that the information received by the inflow vehicle agrees with the number of vehicles in the actual traffic. Besides, MEVIAP of the ICWS-ODSIs are better than that of

Table 1 Parameters and specifications of simulation.

Average velocity v [km/h]	40,60(const.)
Average traffic flow N [veh./h]	300 / 600 / 1200
Distribution of headway distance	Erlang distribution ($n > 1$), exponential distribution ($n = 1$)

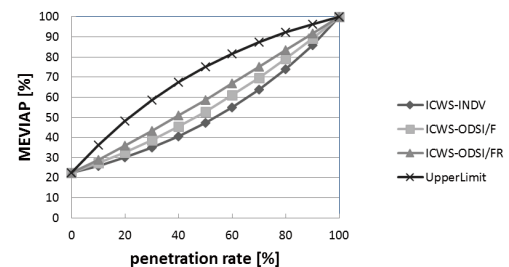


Fig. 4 MEVIAP vs. OBU penetration rate (300 veh./h).

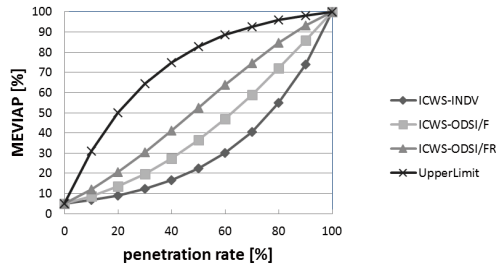


Fig. 5 MEVIAP vs. OBU penetration rate (600 veh./h).

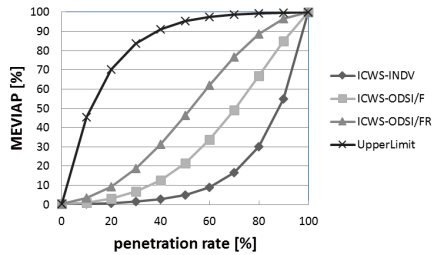


Fig. 6 MEVIAP vs. OBU penetration rate (1200 veh./h).

the ICWS-INDV. This is because the OBU of the ICWS-ODSIs can receive information about non-OBU vehicles, which is not shared in the VIS of the ICWS-INDV. Moreover, the ICWS-ODSIs can be used with lower OBU penetration rates to achieve the MEVIAP equivalent to that of the ICWS-INDV. For instance, Fig. 5 shows that MEVIAP of the ICWS-INDV with 70% penetration rate is achieved by the ICWS-ODSI/F with 50% penetration rate. Furthermore, when the traffic flow increases, the difference between the upper limit of the MEVIAP and other MEVIAPs also increases. This is because as the traffic flow increases, the probability that only non-OBU vehicles exist in the IVC area decreases.

Next, the VIS performance on the OBU penetration rate is analyzed for the vehicle speed. Figure 7 shows the results of the variation of the average vehicle speed. This result shows that the MEVIAP increases with the vehicular speed in all traffic situations (traffic: 300, 600, and 1200 veh./h, sensor type: front sensor, traffic: exponential distribution). When the average vehicle speed increases while traffic flow remains constant, the vehicle density decreases. Therefore, the MEVIAP shows a tendency similar to that of the MEVIAP when the traffic flow decreases while the vehicle speed remains constant.

5.1.2 Influence of Headway Distance Distribution on MEVIAP

In Sects. 5.1 and 5.2, free-flowing traffic for which the headway distance follows an exponential distribution is assumed. At the same time, it is necessary to consider the vehicle-following situation. Therefore, headway distance with an Erlang distribution is analyzed. It is known that the headway

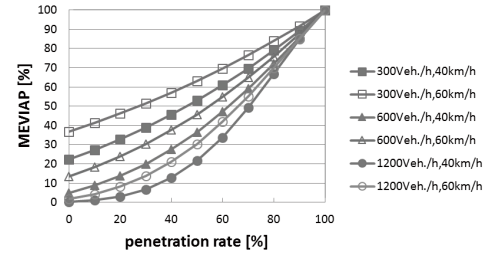


Fig. 7 Influence of average speed on MEVIAP.

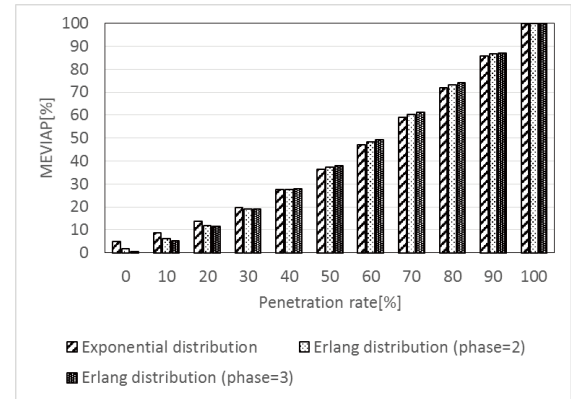


Fig. 8 MEVIAP vs. OBU penetration rate (Erlang distribution).

distance of traffic including some vehicle groups caused by vehicle-following has an Erlang distribution. Previous studies showed that an Erlang distribution with phase parameter of 2 or 3 is suitable for the actual vehicle headway distance [13]. Moreover, other studies about expressway traffic used phase parameters of 3–7 [14], [15]. According to these reports, phase parameters of 1 (corresponding to exponential distribution), 2, and 3 have been adopted in the analysis.

The result of the MEVIAP with the Erlang distribution is shown in Fig. 8. In this analysis, the left-turn situation is assumed, and the traffic in the left direction is set at 600 veh./h. The result indicates that the MEVIAP of traffic following an Erlang distribution is smaller than that of traffic following an exponential distribution when the OBU penetration is low (0%–40%). Because the breadth of the headway distance of the Erlang distribution is narrower than that of the exponential distribution, the probability at OBU penetration rate of 0% $P(0)$ that no vehicle exists in the IVC area decreases, and it leads to a decrease in the MEVIAP. Examples of histograms of the Erlang distribution and exponential distribution are shown in Fig. 9. Moreover, the MEVIAP of the traffic following the Erlang distribution is higher than that of traffic following the exponential distribution when the OBU penetration rate is 40%–80%. Figure 9 shows that the frequency of the long-headway distance of the Erlang distribution is lower than that of the exponential distribution. Therefore, it is considered that because the probability that a non-OBU vehicle detected by the forward obstacle detection sensor of its following vehicle increases, the MEVIAP

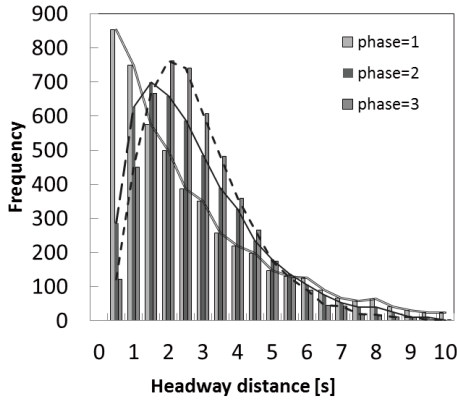


Fig. 9 Example of intervehicle distance histogram generated by Erlang distribution.

of the Erlang distribution becomes higher than that of the exponential distribution.

5.1.3 Influence of Sensing Range in Longitudinal Direction on MEVIAP

The results of the performance analysis based on the sensing range in the longitudinal direction are shown in Figs. 10, 11, and 12. The results indicate that when the sensing range is less than 100 m, there is a significant improvement in the MEVIAP with an increase in the sensing range; furthermore, when the sensing range exceeds 100 m, the MEVIAP gradually saturates. Consequently, when the sensing range is less than 100 m, increasing the sensing range significantly affects the MEVIAP, resulting in an increase in the OBU penetration rate and traffic flow. The ISO15623:2013 (FVCWS) [11] requirements for the longitudinal sensing distance are given by the following equation.

$$d_{max} = v_{rel,max} \times T_{max} + v_{rel,max}^2 / 2a_{min} \quad (16)$$

Here, it is assumed that $T_{max} = 1.5$, $a_{min} = 3.6 \text{ m/s}^2$, and $v_{rel,max} = 100 \text{ km/h}$; then, d_{max} is approximately 150 m. Therefore, this type of forward obstacle detection sensor is applicable to the ICWS-ODSI. For example, millimeter-wave radars are expected to achieve detection distance of 150 m in the longitudinal direction [16].

5.2 Analysis of Right-Turn Merging Situation

When the inflow vehicle wants to turn right, it is useful to provide information to both the right- and the left-approaching vehicles. Therefore, the MEVIAP for a right-turn situation is analyzed in this section. Figure 13 shows the IVC area that is used for a right-turn situation. In this case, it is desirable for the inflow vehicles to acquire information about entire the vehicles that run in the IVC area (R) and (L). Therefore, the MEVIAP is given by the probability of the MEVIAP of the IVC areas (R) and (L). In particular, when traffic flows

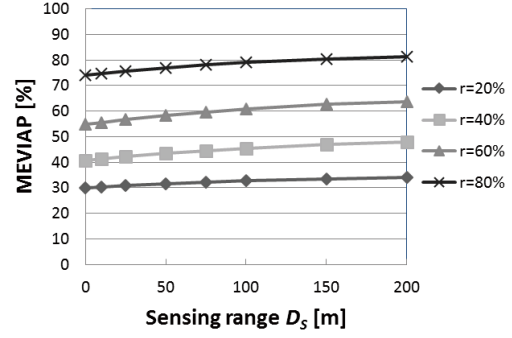


Fig. 10 MEVIAP vs. sensing range (300 veh./h.).

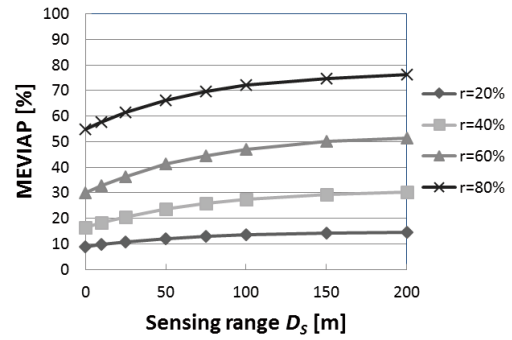


Fig. 11 MEVIAP vs. sensing range (600 veh./h.).

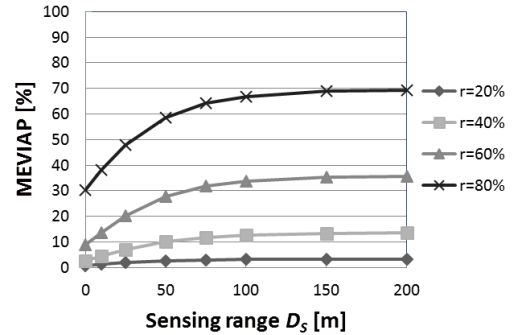


Fig. 12 MEVIAP vs. sensing range (1200 veh./h.).

in the left and right directions are the same, the MEVIAP of the right-turn situation is given by the square of MEVIAP of left-turn situation.

Figure 14 shows the result of the MEVIAP of the right-turn situation. In this analysis, the traffic in the left and right directions is set at 600 veh./h. A comparison of the results shown in Figs. 5 and 14 indicates that the MEVIAP for the right-turn situation is lower than that for the left-turn situation. When the information sensed by a forward obstacle detection sensor is shared, even for 70% penetration rate, the MEVIAP does not exceed 50%. Furthermore, if the system adopts forward and backward obstacle detection sensors, when the penetration rate reaches 70%, the MEVIAP will

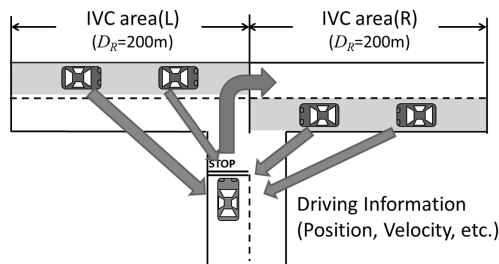


Fig. 13 IVC area of right-turn situation.

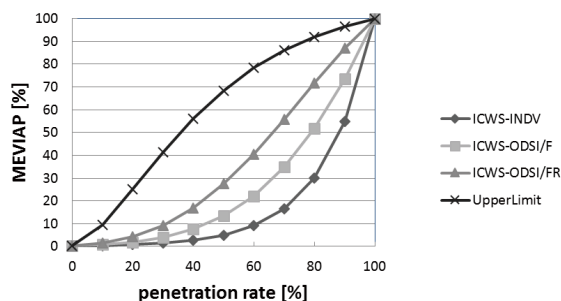


Fig. 14 MEVIAP for right turn.

finally exceed 50%. Therefore, it is evident that high OBU penetration rate is required for both ICWSs in right-turn situation. If the ICWS-ODSI achieves higher MEVIAP with lower penetration rate, it is considered effective to combine other sensors; for instance, the sharing of the information acquired by the vehicle with side obstacle detection sensors is expected to improve the performance of the ICWS-ODSI.

6. Conclusion

In this study, VIS performance of ICWSs were analyzed in terms of MEVIAP. The analysis results based on the OBU penetration rate showed that the MEVIAP of the VIS of the ICWS-ODSI was better than that of the ICWS-INDV, that shares only individual vehicle driving information via the IVC network. The results revealed that the ICWS-ODSI could be used even with lower OBU penetration rate to achieve the MEVIAP equivalent to that of the ICWS-INDV. Furthermore, the analysis results based on the sensing range indicated that an ISO15623 sensor for an FVCWS could be adequately used as the in-vehicle detection sensor for the ICWS-ODSI. Moreover, the analysis in the case of a right-turn situation indicated that high penetration rate is required if the ICWS-ODSI shares an on-board forward obstacle detection sensor, because the OBU has to acquire information about both right and left direction vehicles on the priority road. In addition, to determine the influence of vehicle groups caused by vehicle-following, in case that the headway distance follows the Erlang distribution, the MEVIAP was analyzed. The analysis result revealed that MEVIAP becomes smaller for low penetration rate and larger for intermediate penetration rate than the MEVIAP for the case in

which the headway distance follows the exponential distribution.

In this study, it is assumed that an FVCWS sensor is adopted as the forward/rear obstacle detection sensor. However, the feasibilities of other sensors such as side-rear obstacle detection sensors have attracted attention in recent years. Therefore, the authors plan a future work to study an ICWS-ODSI that obtains side vehicle information and shares it via the IVC network. Moreover, the present study considered the sharing of information in the case of a T-junction and an "X" intersection. Furthermore, it is necessary to study the effect of the ICWS-ODSI on the safety and receptiveness of drivers. Moreover, although this study assumes that the ICWSs have an ideal positioning system, the analysis result does not include the effect of some positioning errors of the positioning system. Therefore, in future work, it is also important to analyze the VIS performance in consideration of the environment and characteristics of the positioning system.

References

- [1] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, "Brouchure of ASV Project for Phase 2" <http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/resourse/data/asv2development.pdf>
- [2] M. Tamura, S. Takahashi, S. Yasuhara, M. Kojima, and K. Minegishi, "Development of intersection safety support systems using vehicle-to-vehicle communication," 12th ITS World Congress 2005, CD-ROM.
- [3] K. Tischler, C. Duchow, and B. Hummel, "Information fusion for cooperative vehicles," Informatik 2006-36. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), Seiten 374-378, Dresden, Germany, Oct. 2006.
- [4] S. Kato, N. Minobe, M. Kawai, and S. Tsugawa, "Driver assistance system by visual guide: Proposal of human machine interface and cooperative driving," IEICE Technical Report, ITS2004-67, 2005 (in Japanese).
- [5] M. Satake, Y. Takatori, and T. Hasegawa, "Performance evaluation of driving assistance systems that uses sensors and/or communications," Proc. 10th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Seattle, USA, 2007, CD-ROM.
- [6] ITS Info-communications Forum of Japan, "Experimental Guideline for Vehicle Communications System using 700 MHz-Band ITS FORUM RC-006 Version 1.0," http://www.itsforum.gr.jp/Public/E3Schedule/P13/ITSFORUMRC006engV1_0.pdf
- [7] Ministry of Internal Affairs and Communications, "Report of the committee for Advance of ITS Wireless Communication," http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/14422.html
- [8] Y. Iida, Traffic Engineering, Ohmsha, Tokyo, 2008 (in Japanese).
- [9] F.A. Haight, "The generalized Poisson distribution," Ann. Inst. Stat. Math., vol.11, Issue 1 Supplement, pp.101-105, 1959.
- [10] Y. Takatori and H. Takeo, "Crossing collision prevention system using IVC and in-vehicle obstacle detection sensor," Proc. 16th IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp.911-915, 2013.
- [11] ISO15623:2013 (FVCWS)
- [12] ISO17387:2008 (LCDAS)
- [13] W. Yoshinori and M. Tsutomu, "Studies on the prediction of road traffic noise (1st report): On the calculation model for predicting road traffic noise," Bulletin of the Kyushu Institute of Technology, Science and Technology, no.41, pp.43-52, 1980 (in Japanese).
- [14] S. Yamaguchi and Y. Kato, "A practical method for estimating the headway distribution based on the observed data of the number of flowing vehicles Erlang distribution model," The Journal of the

Acoustical Society of Japan, vol.44, no.11, pp.861–864, 1988 (in Japanese).

- [15] M. Kubo and M. Shinozuka, “Probabilistic consideration about the traffic sequence,” JSCE Annual Meeting, vol.38, pp.399–400, 1983 (in Japanese).
- [16] T. Inaba and T. Kirimoto, “Automotive millimeter wave radars,” Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, vol.64, no.2, pp.74–79, 2010 (in Japanese).



Yusuke Takatori received the B.E. and M.E. degrees in Electrical and Electronic Systems Engineering from Saitama University, Japan, in 2002 and 2004 respectively. He also received the Ph.D. degree in Information and Mathematical Science from Saitama University, Japan, in 2007. He has worked in the area of intelligent transport systems. From 2007 to 2012, he was an Assistant Professor at the Department of Management Science, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science. From 2012 to 2015, he

was an Assistant Professor at the Department of Electrical and Electronic, Kanagawa Institute of Technology. Since then, he has been an Associate Professor at the Department of Electrical and Electronic Engineering, Kanagawa Institute of Technology. His research interests include intelligent transport systems (ITSs). Dr. Takatori is a member of the IEEE.



Hideya Takeo received B.S. and M.S. degrees from Kanagawa University, Japan in 1984 and 1986 respectively. He also received Ph.D. degree on bio-applications and systems engineering from Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan in 2005. From 1986, He worked Fuji Photo Film Co., Ltd. and engaged in research on Medical Imaging Technology. From 2006 to 2009, he was an Associate Professor, and From 2009, he has been a Professor in the Department of Electrical and Electronic Engineering, Kanagawa Institute of Technology. His research interests are in the area of Image processing. He is a member of ITE (The Institute of Image Information and Television Engineers), Jamit (The Japanese society of Medical Imaging Technology), IIEEJ (The Institute of Image Electronics Engineers of Japan), and MII (Medical Imaging and Information Sciences).

His research interests are in the area of Image processing. He is a member of ITE (The Institute of Image Information and Television Engineers), Jamit (The Japanese society of Medical Imaging Technology), IIEEJ (The Institute of Image Electronics Engineers of Japan), and MII (Medical Imaging and Information Sciences).

多人数でマルチモバイルデバイスを用いた際の立体的連携に関する研究

研究者名：所属学科 安本匡佑：情報メディア学科

1. 研究の目的（以下タイトルは、11 ポイント、MS ゴシック）

本研究はモバイルのインターフェース、インタラクションに位置づけられる研究であり、その手段として、複合現実感、拡張現実感を取り入れたものである。本研究は立体的な情報を直感的に扱えるようにすることを目標とし、現在も研究を進めており国内外での評価も高く注目が集まっているため、一気に研究を推し進めて、当該分野での確固たる位置づけをし、さらなる研究の発展や、国内外との企業との連携を円滑に図るためである。

同時に多人数で参加でき、タッチの同時認識数が多く、大型のディスプレイ面をもった大型のタブレットデバイスを1台、あるいは複数台を共有スペースとし、それに対して個人のタブレットやスマートフォンをパーソナルな情報提示スペースと位置づけ、それらの間を円滑に連携させるシステムの研究開発を行う。その上で、どれくらいの数をスムーズに連携させることができるのか、従来のマウスやディスプレイとの組み合わせのシステムと比べての優位性を明らかにする。

タッチ認識によって複数の端末を連携させるため、計算コストが低く、デバイスやOSにも依存しない点において優位性がある。タブレット上に描画された地図や図面といった平面情報は、任意の位置と角度で置いたスマートフォンを窓として、本来その上に存在するはずの立体情報をのぞき込むことができる。相対的な位置関係が見えることで何を見ているのか、自分が見たいものを見るためにはどうすればいいのかのアフオーダンスが明確に存在している。これが実現されれば、地図、図面、作戦盤といったパブリックスペースに置いてあるものに対して、立体情報だけでなく、場所に関連付けられた情報を直感的に読み取ることが可能となるだろう。

2. 研究の必要性及び従来の研究

本研究では多数のモバイルデバイスを使用するが、現状数多くの新たなモバイルデバイスが登場し、その度に古いデバイスは使われなくなっていく。そのため資源の無駄になってしまい、これら使われなくなったが十分に使用可能なデバイスを別の目的で再利用することが望ましい。本研究が実現する立体ディスプレイという概念は、古くから存在す

るが、それらの多くは疑似的に立体的に見せるものであり、多数の視点ではなく決められた一視点からの映像になり、それではただの飛び出して見えるだけで立体のメリットである角度や方向を位置を変えて観察することができない。それ以外の手法でディスプレイを回転させたりすることで立体の様に見せる研究も存在するが、その場合はあくまで立体物を見ているにすぎず、多数の視点の映像ではあるが、自由にその視点を変えられるというわけでもない。現実の様々な情報を視覚化する上で考えなければならないのは、それらが立体情報であり、それを適切に見るためには従来の平面ディスプレイでは直観的ではないにもかかわらず、適切な立体ディスプレイが存在しない点にある。ディスプレイが登場して以来これは何も変わっておらず、相変わらず平面の四角い画面である。

従来の類似研究では、太田らによる pinch の研究など、多数のデバイスをインタラクティブに連携するものが存在するが、平面的であることと連携後に位置を自由に変更できず、変更した場合は再登録が必要なためリアルタイムに常に相対的位置関係を取得できない。類似する後発の研究として制限があるものの立体的に接続するものもあるが、情報工学のみの観点から行われているため、連携精度が不十分でありその解決方法も稚拙である。

3. 期待される効果

本研究は特に情報視覚化の観点では医療分野に焦点を絞っており、CT/MRI の複数の DICOM データ形式の画像を自動的に立体化し、それを本研究の VISTouch で観察できるようにした。これにより従来一部のワークステーションのみでしかできなかった自由な断面で人体を観察することが容易に可能となった。これは医療現場だけでなく、今後の医療教育や看護教育などへの応用が期待される。

また別の方向として、文化庁からの助成も受け本研究成果をアートの分野での応用も実現した。立体情報を多視点から観察できるという点から、人体のような立体情報を平面の複数のタブレットデバイスを動的に動かすことで、そこにあたかも存在する立体を表現する。それぞれのタブレットの平面の法線方向から仮想的に存在する人体を表示する。仮にそのタブレット面が仮想的に存在する人の内部に存在すればその断面を、外部に存在すれば外面をリアルタイムに表示する。それが多数合わさり、タブレットの空間的な配置による彫刻的な側面、そこに映し出されるそれぞれの視点からの平面映像はキュビズムによる立体の平面表現の様相をなす。本研究をベースとして、このような表現メディアとしての側面も期待できる。

さらに本研究から派生し、モバイルデバイスの絶対位置・角度を取得することで、HMD を使わない VR を実現した。これら従来の HMD の持つ欠点である子供が使用できない、不衛生、3D 酔い、インターフェースの脆弱なフィードバックを解決する。この成果物は高い評価を受けており、今後の VR エンターテインメントへの応用が期待される。

4. 研究の経過及び結果

本研究は VISTouch のそれぞれの分野への応用と、今後の発展の可能性を示せた。

5. 今後の計画

医療分野での応用では、将来的に医療分野での情報視覚による診断まで目論み、現在外部の医療研究所との連携を模索している。またこれに付随して、医療教育、看護教育に応用できると考えており、検体を使用せずに実物大で人体を視覚化し、自由にその断面を観察できるため、より手軽にこれらの学習に生かせると考えており、早い段階で本学や他大学での看護教育、他大学での医療教育への導入実験を計画している。

アート分野では、映像の彫刻（仮）改め CUBISTA を制作していたが、3月の文化庁の発表を持って一区切りしたが、まだ未完成の部分、ブラッシュアップしたい部分があるため作品の制作と展示公開を行っていきたいと考えている。

エンターテインメント分野での応用では、VISTouch AIR 改め VAIR として開発を進めており、今年度の東京ゲームショウ 2017 のインディーブースでの採択が決定したため、そこでさらにブラッシュアップしたものを展示したいと考えている。また実際の店舗で導入していきたいと考えている。また秋以降に海外のクラウドファンディング Kickstarter が日本からも出せるようになるため、そのローンチプロジェクトとして公開できるように現在準備を進めている最中である。

6. 研究成果の発表

本研究成果は、エンターテインメント分野ではドイツで開催された Replaying Japan 2016、台湾で開催された Taipei Game Show 2017、アート分野では文化庁メディアクリエイター育成支援事業への採択など幅広い分野での成果があった。医療分野での応用では特許出願、財団法人栢森情報科学振興財団の助成金の獲得につながった。

神奈川工科大学 重点研究成果報告書

学 長 殿

平成 29 年 3 月 31 日

研究代表者 氏 名	石濱 正男	所属・職位	自動車システム開発工学科 教授	所属長査印
経費区分（該当する経費を○で囲む）				
経費B 研究計画（B 1 準備、B 2 共同研究・ 個人研究 、B 3 若手助成、B 4 共同研究支援）				
経費D 特別補助対象（D 1 共同研究経費、D 2 ソフトウェア、D 3 学術振興、D 4 その他 ）				
教育又は研究課題（経費Cの場合は設備・装置名も記す）				
転動中のタイヤ変形・振動の計測・予測・制御の基礎研究				
研究組織（本研究に常時参加した者）				
氏 名	所属・職位		役 割 分 担	
石濱 正男	自動車システム開発工学科・教授		統括・推進 など全般	
研究概要（目的・意義、計画概要等を簡潔に記す）				
目的： 道路交通公害の主たる原因となっているタイヤ放射騒音を、路面凹凸、タイヤ表面デザイン、タイヤ構造のパラメータから予測し、それぞれの設計要素の影響を定量的に明らかにする基礎技術を得ること。 意義： 道路沿線住民、わが国の場合は人口の約1割の1,000万人、は自動車騒音の被害を受けている。世界全体でみると、欧州都市部や米国のハイウェイ沿線など、1億人以上となる。被害は単に仕事の能率低下ではすまず、静穏環境に暮らす人に対して、心臓病での死亡率が5倍に達する。また、不動産価格の低下などから、市町村の税収低下などの経済的被害も大きい。この源はタイヤ騒音であるため、この研究者が主となって作成した中央環境審議会での答申によって、わが国の環境省・国土交通省は2年後から大幅な規制を行うこと決めた。しかし、対策を行うにも生じている現象解析そのものが十分になされていないので、すべてのタイヤの対策が実現するには10年近くの歳月がかかると予想されている。また、タイヤは重量の支持、動力や制動力の路面への伝達、方向の転換、防振などの多機能を、転がり抵抗を抑制するという条件の中で果たす必要があり、騒音放射低減は多くの副作用を招くとされている。本研究は、これらの困難な状況を現象解析技術、予測技術を通じて打開する大きな意義を持っている。 計画概要： 研究は大きく分けて次の5項目で計画した。 1. 路面とタイヤの接触状況実験解析 2. タイヤへの路面凹凸による入力モデリング技術構築 3. 転動中のタイヤ構造を伝播する波動の実験解析技術構築 4. 複合構造であるタイヤ内を伝播する振動波の予測技術構築 5. タイヤトレッドへの非線形減衰付与による転がり抵抗への悪影響なしでの騒音低減技術開発				
研究経過				
平成 26 年度：				
1. 路面上の突起のトレッド（踏面）への貫入量とトレッドの歪、樽のタガに相当するスチールベルトへの分散荷重入力のモデル化。複数の突起と接触したときの重ね合わせ効果のモデル化。 2. タイヤ構造を伝播する高周波振動を予測できる構造有限要素モデルの開発。				

平成27年度*

1. 複数の路面凹凸（突起）のトレッド（踏面）へのランダムな入力数値モデル構築
2. タイヤ構造上を伝播する波動を予測できる数値モデルの構築
3. 転がり抵抗の原因であるトレッドゴムの減衰を小さくしつつ振動を抑制し、かつ転がり抵抗を激減する非ニュートン流体の利用を、ベンチャー企業との共同研究により実施した。

平成28年度

1. 路面との接触により生ずるトレッド振動とタイヤ空洞内音圧の計測技術の基礎開発
2. 路面との接触開始と接触終了時にトレッドに生ずる高周波振動の現象解析
3. これまでの現象解析結果をもとにした次世代タイヤの構造概念の創出とその実験検証
4. タイヤの転動により発生する路面接触部の圧力変動の基礎解析

研究成果の概要

得られた成果（当初に計画した成果と対比して記す）

1. 路面凹凸のタイヤ構造への入力の力学的モデル化： 世界に先駆けて Gauss 関数により分布荷重をモデリングできた。Gauss 関数の有する微分積分のし易さ、フーリエ変換のし易さにより、タイヤ構造の有限要素モデルへの荷重条件設定が、力学的合理性と数値計算の効率性を持ちつつできるようになった。
2. 転動中のタイヤ表面を伝播する高周波振動を予測できる構造有限要素モデルの開発： 世界で初めてレーザー変位計で実測をすることができた。これは、シャシダイナモ上に搭載した車両のサスペンションからレーザー変位計を防振支持することによって実現をすることができた。
3. ポンピング音に関する計画外の成果： タイヤ溝の転動による開閉を3次元スキャナーで実測、この現象を数理的に再現する有限要素モデルを開発した。そしてこの開閉により生ずる空気流を CFD（計算流体力学）により予測することにより、従来は接地による溝の深さ変動が原因とされていた誤解を打ち破り、新たな現象理解を得ることができた。
4. 転がり抵抗を増やさずにタイヤ騒音を減少する方法の開発： タイヤと路面との接触時の大きな加速度の作用時には大きな減衰を得、それ以外ではトレッドゴムの減衰を小さくする発明を行った。これを使うことにより、転がり抵抗の増大なしに高周波振動を低減することができた。
5. 路面と接触を終了するタイミングで、トレッドは特殊なすべりを伴う高周波振動を起こし、騒音発生の原因となっていることを明らかにした。この現象は駆動力あるいは制動力に依存するので、タイヤ騒音の試験法として考慮する必要があることも明らかにした。
6. 走行中のタイヤ構造振動や空洞内音圧を、空洞内に配置したマイクや加速度センサーと無線による信号送受信システムにより計測する技術を開発した。
7. 上記6の計測システムにより、舗装路面劣化のモニタリングができる可能性を証明した。
8. 本研究を始める前からの成果を含めた総合的な検討の結果、低騒音、低転がり抵抗、高ウェットグリップを実現する次世代の高性能タイヤ像が、「高圧」、「細幅」、「大直径」であることを示した。
9. 上記の次世代タイヤは、制・駆動特性、操舵特性が従来型タイヤと同等あるいは優れているが、車室内のロードノイズと乗り心地（ハーシュネス）にはやや不利であることを実験的に示した。
10. 上記のハーシュネス軽減技術として高剛性サブフレームと車体との結合用大型柔軟ゴムブッシュの適用可能性があることを示した。
11. ロードノイズの悪化防止には、大直径化によるタイヤ構造振動と空洞共鳴の固有振動数低下によるシャシー共振が一つの重要ポイントであることを実験的に解明した。

問題点

1. 適切なテストコース（走行実験路）がないこと、タイヤの試作ができないこと、などの研究資源の制約により、基礎研究の枠から出ることができていない。
2. 構築したタイヤの振動音響特性を計算するモデルを使って、実現象を再現するシミュレーションを行うには、スーパーコンピュータに近い計算機資源が不足している。

成果の活用実績と予定（学会発表、外部研究助成等への応募、産学協同研究等の具体的予定）

自動車技術会への発表： 実績：6件、予定（平成29年度）3件

InterNoise(国際騒音制御学会への発表)： 実績：2件、 予定（平成29年度）1件

自動車技術会での国際フォーラム： 実績：2回主宰

本学での先端自動車工学シンポジウム開催： 実績：タイヤを主題に2015年8月実施 160名参加

中央環境審議会： 研究者（石濱）は委員として出席しているほかに、毎年継続的に下部機関のタイヤ規制委員会で研究成果を報告。

今後の展開

中央環境審議会の組織的な行動を通じて、タイヤ製造協会、各種研究機関、国土交通省、環境省との情報交換を密にし、規制の早期実施と適用効果の確認など行政への反映を行う。

参考資料（本研究の成果発表）：

自動車技術会講演論文：

2015年：

- 1) Road Noise Reduction by Tire Tread Vibration Damping Increase
- 2) High-frequency Tire Vibration Analysis Using Multi-shingle-tread Contact Model and Multi-layer Structural FEM Model

2016年：

- 1) Evaluation of Harshness and Road Noise of Next-generation High Inflation Pressure and Large Diameter Tires
- 2) Analysis of High-frequency Vibration Wave Propagation on Tire Tread Using a Laser Displacement Sensor and FEM Simulation.

2017年（予定）：

- 1) Experimental Evaluation of Next Generation Tire Technology Represented by Large Diameter, Narrow Width and High Inflating Pressure
- 2) Perspective of Technology Development for Improving Tire NVH and Accompanying Performances
- 3) Tread Vibration Analysis by Measuring Tread Vibration in Rolling Conditions

自動車技術会フォーラムテキスト：

2015年5月22日 次世代車両開発の基礎となるタイヤ像を探る

2016年5月27日 タイヤの将来を国際調和・社会負担・トライボロジから占う

自動車技術会シンポジウム発表テキスト：タイヤ振動騒音研究最前線(2016年12月)

Internoise 発表論文：

2015年：Tire Tread Vibration Damping Increase For Better Road Noise and Minimum Adverse Effects

2016年：

- 1) Modeling of excitation stress distribution and its propagation measurement on a tire tread caused by road surface

shingles

2) Tire Cavity Sound Measurement for Identifying Characters of Road Surfaces and Tire Structures

2017 年（予定）Influence of Driving Force and Road Surface Roughness on Tire Tread Vibration

環境省・国土交通省 公開資料：タイヤ騒音規制検討委員会議事録など

日本語入力効率化のための同時打鍵方式の研究

研究者名：ホームエレクトロニクス開発学科 杉村博

1. 研究の目的

情報化が進み、世の中のほとんどの書類はパソコンで作成されている。文章入力にはキーボードと日本語入力ソフトで行われ、文章入力作業効率はタイピングの正確さと入力速度に大きく依存する。このタイピングの正確さと入力速度は必然的にキーボードの打鍵回数やキーの種類の複雑さに依存しており、この打鍵回数とキーの種類を減らすことが入力効率の向上に寄与する。

本研究は、ハードウェアとボタン配置に関してはデファクトスタンダードである 106 日本語キーボード（QWERTY 配列）をそのまま利用し、ソフトウェア上でローマ字の母音と子音に関する同時打鍵のみならず打鍵の逆順を許容することによって正確で高速な日本語入力を可能とする新たな方法を提案するものである。

2. 研究の必要性及び従来の研究

英語入力や多デバイスの対応といった汎用性から、入力方式にはローマ字入力が最も広く利用されているが、ひらがなを 1 文字入力するために、日本語 50 音のうちのほとんどが母音と子音の複数の打鍵が必要である。日本語入力を専門としたキーボードにはかな配列や親指シフトといった入力方式も開発されている。このような別の入力方式は、ライターのように日常的に文章を執筆するのでもない限り効果的と言えるまでの学習コストが高く、他人の環境では利用不可能なスキルであり、英語入力については別の学習が必要とされるため一般的には敬遠される。他にも日本語入力用のボタン配置として花配列、月配列、飛鳥配列、姫踊子草配列、50 音配列等も提案されているが、ハードウェアの変更やボタン配置そのものの変更はハードウェアの導入コストが高い。ローマ字入力を基本とした入力方式改善の従来手法として Dvorak 配列を基礎とした DvorakJP, AZIK on Dvorak, JLOD, 蒼星などがあるが、いずれも一般に普及している QWERTY 配列を利用する他の環境ではこの入力手法の学習が仇になる場合もある。

本研究の特徴は、従来のキー配置を変更せずに同時打鍵と逆順打鍵の許容によって、高速で正確な日本語入力を実現することである。1 つ目の特徴は新たなキー配置の購入と学習が必要ない為、導入コストが低いことがポイントである。2 つ目の特徴は母音と子音の同時打鍵である。日本語 1 文字を母音と子音で 2 回に分けて入力するよりも同時に打鍵したほうが時間効率は良い。しかし実際には人間が真にボタンを同時に押すことは困難であるため、解決する 3 つ目の特徴として、ある程度時間制約を設けて逆順の打鍵も許容する方式を考案した。この同時打鍵認識の時間的制約は図 1 のように 3 パタン

を検討してキーのリリースで判断を行うことで解決する。

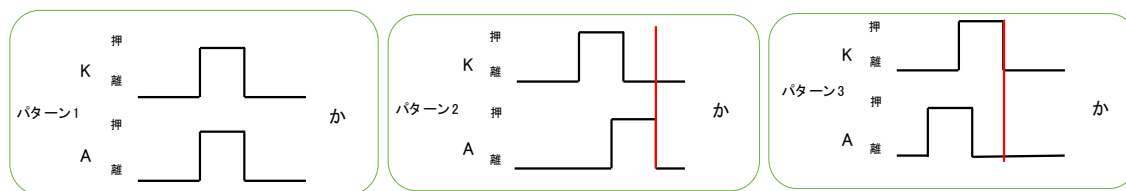


図1 キーの押されるタイミングと同時打鍵認識の時間的制約

3. 期待される効果

本研究で期待される効果は下記の3点である。

- (1) 学習にかかる時間が少ないこと
- (2) 打鍵速度が向上すること
- (3) 打鍵正確性が向上すること

4. 研究の経過及び結果

提案する日本語入力システムのエミュレータと計測システムをパソコン上に開発した。なお、安価なキーボードでは2キー同時押下までは認識できていても3キーの同時押下を認識できないハードウェアがあることが分かっていたため、多種多様のキーボードを用意して実際に比較し、事前実験によって実験に用いるキーボードを選定して実験環境の統一を図った。実験内容としては、従来の配置による学習困難度や打鍵速度、入力正確性の比較実験を行った。

実際のシステムを用いて被験者5名、入力単語数100語、計測回数2回の条件でタイピングのデータを取得した。2打鍵と3打鍵入力時に多い入力ミスの回数は図2と3のようになった。2打鍵時は「き」「く」といったキー配置の近い入力ミスが多く見られた。「ん」については必要な打鍵回数が足りていないミスが多くみられた。3打鍵時は「った」「って」のように左手で3回打鍵を行う入力や「きゃ」「きょ」の配置が近い入力はミスが多いことが分かった。

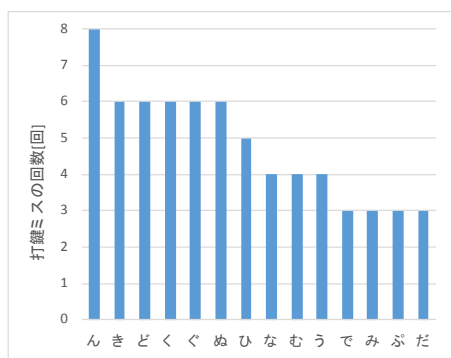


図2 2打鍵時にミスの多い字

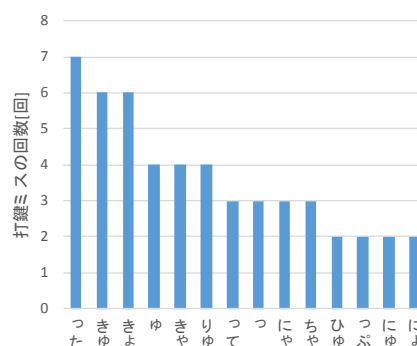


図3 3打鍵時にミスの多い字

図4と図5にそれぞれ被験者別計測時間と入力ミスの多かった配置を示す。被験者別計測時間は被験者BとEはローマ字入力に近い入力時間が計測できた。全体としては被験者によって習熟の傾向に差が見られることがわかった。入力ミスの多かった配置では「I」「U」「O」の母音は入力頻度が高く、これらのキーに関しては配置も近いいため入力ミスが多いことがわかった。

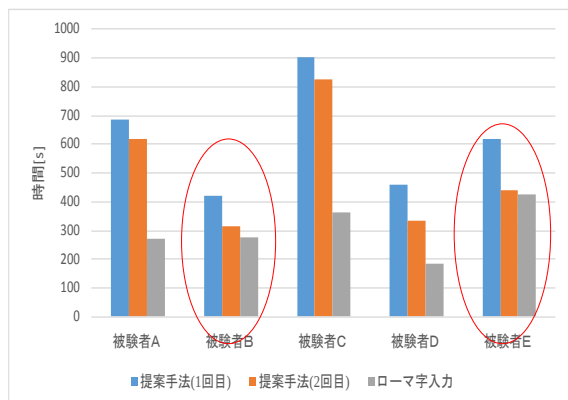


図4 被験者別計測時間

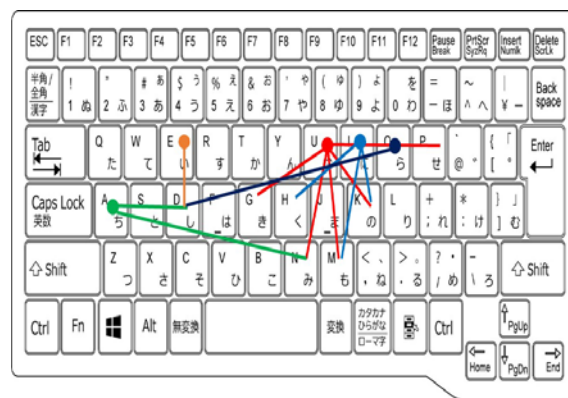


図5 入力ミスの多かった配置

5. 今後の計画

今年度はシステムを開発して実験環境を整えることが出来たため、これから長期的な運用実験とデータ蓄積並びに分析を行ってゆく予定である。特に学習コストと打鍵速度や正確性の向上に関してはデータがまだ足りていない状況であるので、こちらの分析に力を入れてゆく必要がある。

研究の発表に関しては、研究を進めていく中で、2キー同時押しキーボードシステムと手法は特許化されていることが判明しており、本研究ではさらに拗音や吃音を交えた3キー同時押しキーボード入力手法についての特許化を検討している。

6. 研究成果の発表

- [1] 松原 侃樹, 梶山 翔一, 金子 将之, 杉村 博: 日本語入力の効率化を図る同時打鍵手法, 情報処理学会 第79回全国大会, Vol. 4, pp. 333-334 (2017)

日本語入力の効率化を図る同時打鍵方式手法

松原 侃樹[†] 梶山 翔一[†] 金子 将之[‡] 杉村 博^{†‡}神奈川工科大学 創造工学部 ホームエレクトロニクス開発学科[†]神奈川工科大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻[‡]

1. はじめに

情報化が進み、文書の入力にはパソコンで行われることが多い。入力デバイスとしてはキーボードが広く使われており、文章入力の効率はタイピングの速度と正確さに依存する。英語入力や多デバイスの対応といった汎用性からローマ字入力が最も多く使用されているが、ひらがなを一文入力するためには母音と子音の打鍵が必要のため非効率である。日本語入力を効率的に行う手法としてかな入力や親指シフトと言った手法が存在するが、アルファベット入力の機会が多い昨今ではローマ字入力と比較して覚えるキーが多い。アルファベットの入力と日本語入力の高速化を両立する研究[1]やタイピングミス軽減の研究[2][3]が行われている。文献[1]では英文入力において第二のスタンダードとも言われる Dvorak 配列を用いてローマ字入力を行う。使用頻度の高いキーを中段に配置し合理的な打鍵方法の提案、シミュレーションを行っている。既存の QWERTY 配列と比較して日本語入力における合理化は図れているが、新しく配置を覚える必要性や拗音のキーストロークが特殊であるため導入の手間が大きいと考えられる。文献[2]では辞書に登録されていない単語や表現を入力した場合キーを押下する抵抗が大きくなるキーボードを使用し、タイピングミスを減らすことで入力速度の向上を図っている。しかしキーボードを構成する部品にソレノイドを使用しており、導入コストが高い。

本研究ではキーボードのデファクトスタンダードである 106 日本語キーボード(QWERTY 配列)の使用を想定した新たな入力手法を提案し、従来手法との比較実験を行う。

2. システム設計

2.1 システム概要

従来のローマ字入力では母音と子音の入力が必要であり、「さ」と入力する際には「S」「A」と順番に打鍵する必要がある。本システムでは複数のキーを同時に打鍵することにより日本語入力の効率化を図る。しかし従来の QWERTY 配列では同時に打鍵することが困難な配置があると予想されるため、本システムでは通常のローマ字入力を行うことも可能とする。

2.2 システム内容

Fig. 1 はローマ字入力と本システムの打鍵タイミングを示した図である。ローマ字入力では順番に打鍵を行い、本システムでは同タイミングで打鍵を行う。しかし人間が複数のキーを同時に打鍵することは困難であるため、Fig. 1 のように打鍵のタイミングが前後すると考えられる。解決手段として、キーを打鍵した際に一定時間の入力猶予を設ける。通常のキーボードと違い、キーを押下した際ではなく離れた際に打鍵されているキーを判別し入力を確定する。これにより逆順による打鍵であっても同じ出力が得られる。「りゃ」(rya)などの 3 回の打鍵を伴う入力に対しても同時に打鍵することで入力を可能とする。「つつ」といった子音を 2 回打鍵する必要がある入力に対しては「T」「TU」と 2 回に分けて打鍵を行う。これらの入力とローマ字入力を共存する手法として、ローマ字入力は押下時、本システムの入力時はキーを離れた際とキーフラグを分けることにより入力システムの共存させる。操作はソフトウェア上で行うため入力デバイスの変更やキーボードの配置の変更を必要としないことが利点となる。

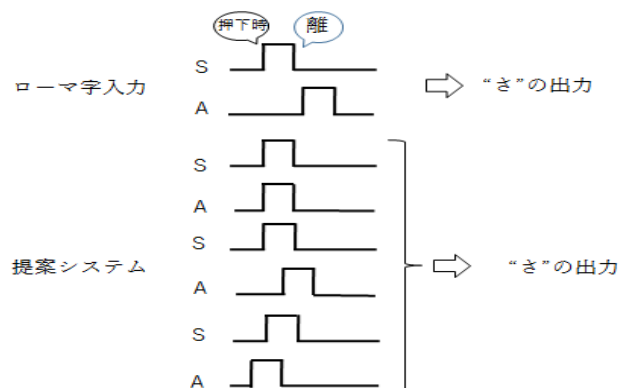


Fig. 1 キーボードを打鍵した際のフロー

Simultaneous keying for streamlining of Japanese input.

[†]Naoki Matsubara, [†]Shoichi Kajiyama, [‡]Masayuki Kaneko^{†‡}Hiroshi Sugimura[†] Department of Home Electronics, Kanagawa Institute of Technology[‡] Graduate School of Engineering, Kanagawa Institute of Technology

3. 実験

実験は 21~23 歳の大学生 5 名を被験者とした。普段からキーボードによるタイピングを行っているが、タッチタイプによる入力を習得しているのは被験者 A・D のみである。

<3.1>実験手順

ローマ字入力と本システムを比較するため 2 種類の計測システムを用いて実験を行った。使用するキーボードは被験者が普段使用しているキーボードを使用した。一度の実験につき単語を 100 語入力させ、ローマ字入力 1 回、本システム 2 回の計測を行った。本システムを採用した際に打鍵が困難であるキーが存在する場合を想定し、単語が偏らないよう指定した。実験を行う際、事前に被験者に対して本システムの説明と 30 分程度の練習時間を設けた。一度に続けて実験は行わず、30 分程度時間をおき、再度実験を行った。

<3.2>計測システム

計測はタイピングゲームを用いた。入力による変換は行わず、日本語入力のみで判定を行う。計測システムでは終了までの時間、入力ミスの多いキーの計測を行う。

<3.3>実験結果

Fig. 2 はタイピングの終了時間を被験者別に表したグラフである。いずれの被験者も提案手法の計測時間が早まっており、習熟の傾向が見られた。被験者 B・E はローマ字入力に近い時間を計測できたが、他の被験者は本システムと大きな差が生まれてしまった。

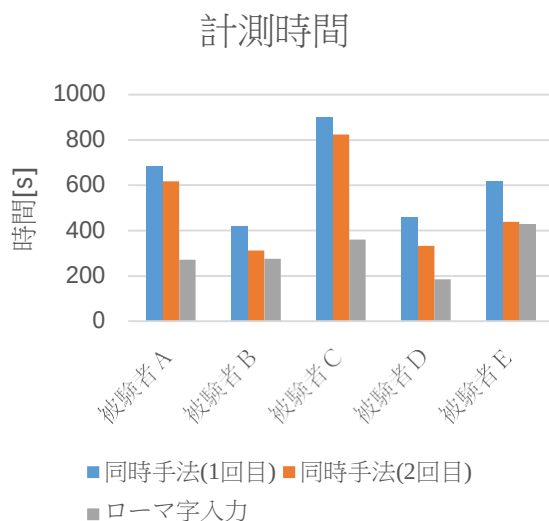


Fig. 2 被験者別計測時間

Fig. 3 において入力ミスの多い打鍵として「き」「く」「で」と言ったキーの位置が近い配置や、「ぬ」「む」と言ったローマ字入力における指使いと異なる指使いを求められる入力に関して

は入力のミスが目立つ。

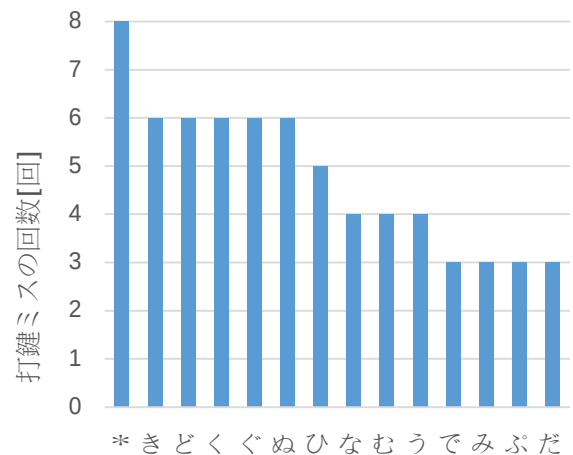


Fig. 3 2打鍵入力における打鍵ミス

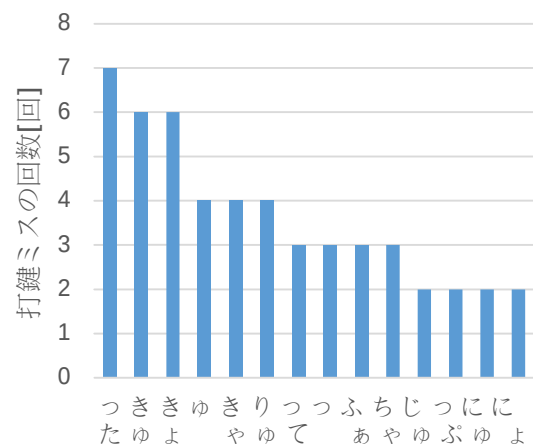


Fig. 4 3打鍵入力における打鍵ミス

Fig. 4 に 3 打鍵入力におけるミスの回数を示す。「きゆ」や「きよ」といったキーの位置が近い打鍵に関しては Fig. 3 と同様に入力精度が低い。これらのことからキー配置の近い打鍵はローマ字入力による入力が効率的と考えられる。

4. おわりに

本研究では同時打鍵手法の提案と比較実験を行った。ユーザのキーボードやローマ字入力の配置をそのまま使用することにより、既存の手法と違い導入や学習のコストの低減を図ることができた。入力速度に関してローマ字入力を上回ることが叶わなかったが、継続的な使用による習熟状況などを省みて実験を行う必要がある。

参考文献

- [1] 木村清 Dvorak 配列を用いたローマ字入力の改善について, 情報処理学会第 65 回全国大会, 3B-6, No.4, pp.65-66(2003)
- [2] Hoffman, A., TypeRight a keyboard with tactile error prevention, Proceedings CHI Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2265-2268(2009)
- [3] 上西武良他, 段差つきキーによる誤タイピング軽減, 2014 人間工学, Vol.50, No.3(2014)

ポリ(ビニルアルコール)ハイドロゲルの高性能化に及ぼす諸因子の検討

応用バイオ科学科 岡部 勝、清水秀信、和田理征

基礎教養教育センター 三井和博

1. 研究の目的

ポリ(ビニルアルコール)(PVA)を利用した材料は、様々な分野へ応用されており、例えば、液晶ディスプレイの偏光板や農薬、染料などのユニット包装、繊維類など幅広く使用されている。また、PVA は水などの溶媒中に高温で溶解し、その溶液を冷却するとゾル - ゲル転移が起こり、いわゆる、熱可逆性ゲルを形成する。PVA ハイドロゲルは、高含水性、透明性、生体適合性などの特徴を持つことから、人工血管や人工硝子体、人工軟骨、組織培養のスキャホールドなど、バイオ医療材料としても注目されている。

高分子ゲルには、物理架橋型ゲルと化学架橋型ゲルの 2 種類が知られている。物理架橋型ゲルは、ゾル - ゲル転移が熱可逆的であることから容易にゲルを作製することができる。これに対し、化学架橋型ゲルでは、架橋反応により化学的に架橋するため、未反応の架橋剤や未反応のモノマーの除去が必要になる。さらに、架橋反応は不均一に起こるため、力学物性の面で高分子本来の強度に比べ劣る場合がある。また、架橋剤は毒性のものが多く、未反応の架橋剤の除去が必要不可欠である。

PVA ゲルは物理架橋型ゲル、あるいは化学架橋型ゲルのいずれでも作ることができるが、成型加工性を考慮すれば、物理架橋型ゲルが容易であると考えられる。PVA/水系物理架橋型ゲルは、高分子鎖が水素結合などにより微結晶を形成し、それが架橋点となっていると考えられる。そのため、温水中でゾル化し、さらに、力学的強度も低いという欠点がある。PVA の物理架橋型ゲルをバイオ医療材料へ応用する場合、力学的安定性のみならず、熱力学的安定性も必要となる。これを検討するには、予め PVA 物理ゲルについて、熱力学的安定性(Flory-Huggins パラメーター χ_{12}) - 力学的安定性(物理架橋型ゲルのヤング率 E) - 成型加工性(高分子の一次構造)に関する相関性を調べる必要がある。このような物理化学的な知見から物理架橋型ゲルのキャラクタリゼーションを行った研究は見当たらない。

PVA は、主鎖が作る投影面に対して - OH 基が上下に交互に現れるシンジオタクチックと、主鎖に対して同一平面上に現れるアイソタクチックの 2 種類のタクチシティーが存在し、さらに、主鎖に対して - OH 基が無秩序に現れるアタクチックの 3 種類があることが知られている。これらの違いによって PVA の物性も大きく変化する。

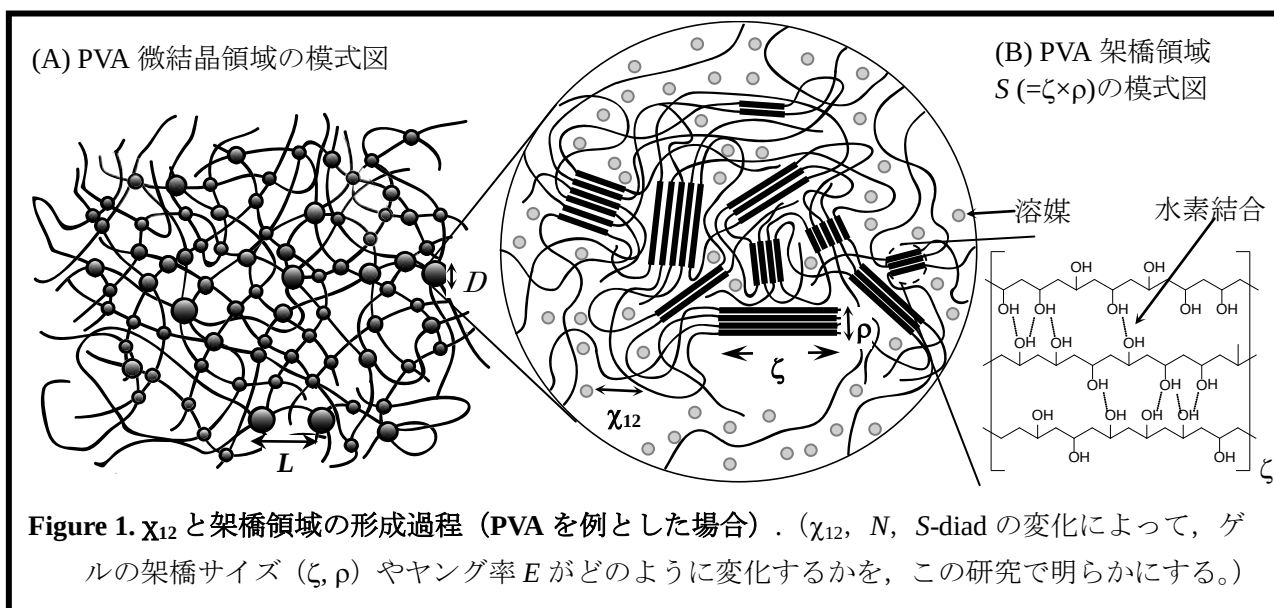
本研究の目的は、熱力学的安定性および力学的安定性、成型加工性に優れた PVA ゲルを作る条件を検討することである。特に、これらに大きく関与する一次構造は、重要なファクターと考えられることから、タクチシティーおよび重合度を変化させて PVA を重合した。得られた PVA を使用し、ゲルの成型加工性に起因すると考えられる諸因子(膨潤度 Q , 熱力学的パラメーター χ_{12} , 微結晶の大きさ)を測定した。また、力学的安定性に関するパラメーター(重合度 : N , シンジオタクチシティー : S-diad, ヤング率 : E , 微結晶間距離 : L)の検討を行った。

2. 研究の必要性および従来研究

これまで報告されている PVA の研究は、力学的に優れたゲルの作製方法のみである。本研究での主目的は、熱力学的に安定で、かつ、力学的に優れた PVA ゲルを作るための方法である。ゲル材料として使用する場合、力学強度に影響を与えている架橋領域の大きさ $S(=\zeta \times p)$ が大きくなるようにしなければならない。この指標となるのが熱力学的パラメーターである Flory-Huggins の χ_{12} である。この値が大きくなるような条件を探し出すことによって、 S のも増大すると予想できる。このような熱力学的パラメーターを導入し、重合度 N やタクチシティー(S-diad)を系統的に変化させてゲル物性を検討した研究は見当たらない。それ故、本研究は新規ゲル材料を創製するための基礎的な研究として意義がある。

3. 期待される効果

高分子/溶媒系の物理架橋型ゲルが生成するとき、高分子鎖は互いに凝集し架橋領域(架橋点)を形成する。架橋領域のコンホメーションは房状ミセル構造や平面ジグザグ構造であったりする。このような架橋領域の分子鎖方向に沿った長さ ζ (PVA では、 $-\text{[CH}_2\text{CH(OH)}]_{\zeta}-$)と分子鎖に対して垂直方向に重なった多重度 p (会合した分子鎖の数)の大きさによって、物理架橋型ゲルの機能や性能が変化すると考えられる。さらに、架橋領域内あるいはその周辺に存在する溶媒の量によっても、ゲルの機能および性能は変化すると予想される。PVA の場合、水素結合を介して、



- ① 架橋領域の大きさ $S(\zeta \times p)$ が大きくなり、Figure 1(A)に示したように、 S の密度の高い領域が微結晶 D を形成する。
- ② 高分子/溶媒間の相互作用が小さくなるような系から生成したゲルでは、架橋領域の周辺に溶媒はほとんど存在せず、高分子 - 溶媒間より高分子 - 高分子間の相互作用が大きくなり、ゲルマトリックスから溶媒をはじき出して熱力学的に不安定となる。このようなゲルでは、長期的に使用することに適さない。

本研究では、重合度 N やタクチシティーの異なる PVA を合成し、 ζ や p が大きくなるような χ_{12} を選び出し、これらの条件下で、力学的に優れた PVA ゲルを作ることによって、人工軟骨や人工関節などへの応用も検討した。

4. 研究経過および結果

高分子の一次構造は、バルクの性質のみならず、ゲル形成能にも大きな影響を及ぼす。例えば、タクチシティーは、分子間または分子内で水素結合を形成するか否かに関係するが、この差異は、融点や溶解性に大きく影響を及ぼす。PVA にはタクチシティーが存在し、特に、シンジオタクチシティーが高くなると分子間水素結合が強くなり、熱力学的に安定な PVA ゲルが生成すると予想できる。

本研究では、高いシンジオタクチシティーをもち、かつ、高重合度 PVA を合成し、アタクチック PVA と比較した。モノマーに酢酸ビニルとピバリン酸ビニルを、開始剤に α, α' -アゾビスイソブチロニトリル(AIBN)を使用し、UV バルク重合を行った。さらに、重合度 N の異なる試料を合成するために、AIBN の量を変化させて重合した。得られたポリ酢酸ビニル(PVAc)とポリピバリン酸ビニル(PVPi)を、それぞれ NaOH 水溶液および NaOH メタノール溶液を滴下してけん化し、PVA を得た。得られた PVA は 10 種類で、PVAc 由来は a-PVA、PVPi 由来は s-PVA として示してある。得られた 10 種類の PVA を再酢酸ビニル化し、(1)式より数平均分子量 M_n を算出した。

$$[\eta] = 5.63 \times 10^{-4} [M_n]^{0.62} \quad (\text{PVAc in benzene at } 30^\circ\text{C}) \quad (1)$$

Table 1. 合成したアタクチック及びシンジオタクチック PVA の物性値

Sample	N^a	DS ^b %	S-diad ^c %	T_m^d °C
a-PVA-1	8200	99.9	52.6	236.9
a-PVA-2	5600	99.8	53.3	236.9
a-PVA-3	3700	99.8	52.6	234.3
a-PVA-4	3300	99.9	53.3	232.7
a-PVA-5	1800	99.6	52.9	233.1
s-PVA-1	10500	98.5	62.7	250.4
s-PVA-2	6700	99.1	62.4	250.3
s-PVA-3	5700	98.1	62.7	250.1
s-PVA-4	1900	98.7	62.7	240.2
s-PVA-5	1700	99.0	61.4	235.6

a: 数平均重合度, 再酢酸ビニル化後の数平均重合度;

b: $^1\text{H-NMR}$ より求めたけん化度;

c: $^1\text{H-NMR}$ より求めたシンジオタクチシティー;

d: DSC より求めた融点.

得られた PVA の物性値を Table 1 に示した。いずれの試料もけん化度(DS)は 98%以上であり、S-diad は a-PVA で約 53%、s-PVA では約 62%であった。これらの試料を用い PVA ゲルのキャラクタリゼーションを行った。ゲル化溶媒はジメチルスルホキシド(DMSO)と水との混合溶媒である。を混合比率(vol%)は $X_{\text{DMSO}}=60\%$ とした。この比率は、PVA 分子鎖間の水素結合が多く生成し、力学強度に優れたゲルが得られると考えられる¹⁾。

PVA ゲルの熱的性質を調べるために、Figure 2 にゲル融点(T_m^g)の測定結果を示した。a-PVA ゲルおよび s-PVA ゲルは濃度 C とともに単調に上昇している。また、 N が増大すると T_m^g は上昇

した。さらに、a-PVA ゲルより、s-PVA ゲルの T_m^g は高くなる傾向を示した。これは、s-PVA のバルクの融点が高いことに起因していると考えられる。また、 N が増大すると T_m^g も上昇するこ

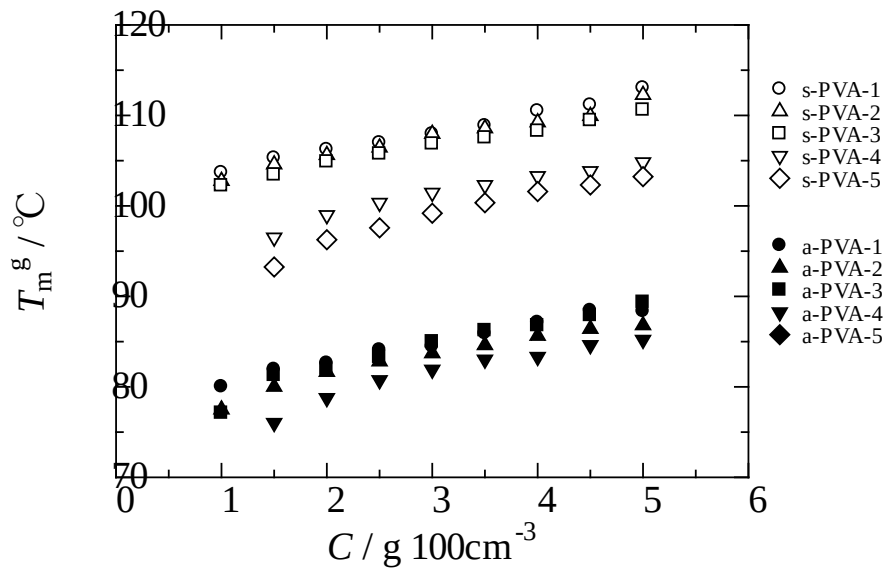


Figure 2. PVA ゲルの融点(T_m^g)と濃度 C の関係.

(s-PVA はシンジオタクチック PVA, a-PVA はアタクチック PVA である。)

とから、 N の依存性が現れている。このことより、ゲルを形成する架橋点の大きさは、 N に比例すると予想できる。そこで、架橋点の大きさを次式に示した田中 - Stockmayer(TS)理論を用いて算出した²⁾。

$$\ln C = \frac{\Delta h_0}{k_B \cdot T_m^g} - \frac{1}{s-1} \ln M + \text{const.} \quad (2)$$

ここで、(2)式のパラメーターの意味は次の通りである。 C :ポリマー濃度[g/100cm³]; k_B :ボルツマン定数[J/K]; Δh_0 :結合エンタルピー[kcal/mol]; M :ポリマーの分子量[g/mol]; T_m^g :ゲル融点[K]; ρ :多重度(架橋点に入り込む分子鎖の数)。

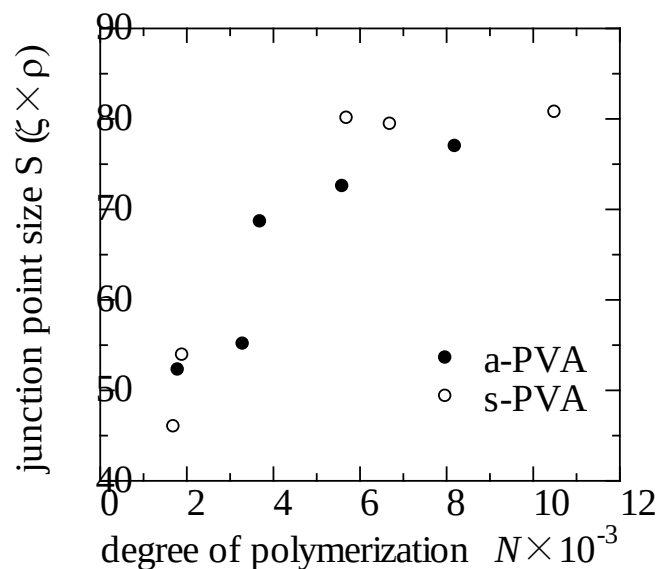


Figure 3. PVA ゲルの架橋点の大きさと重合度 N の関係.

そこで、 $10^3/T_m^g + \ln M$ を $\ln C$ に対してプロットし、分子量を一定とし、温度を変化させたときの傾きを A 、温度を一定として分子量を変化させたときの傾きを B とすると、次の(3)式及び(4)式より、架橋長 ζ と多重度 ρ を求めることができる。

$$\zeta = \frac{10^3 k_B}{|\Delta h_0|} \times A = - \frac{10^3 R}{|(\Delta h_0)_{mol}|} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{B-1}{B} \quad (4)$$

ここで、 ζ ：ゲルの架橋長(架橋点に入り込むモノマーの数)； $|(\Delta h_0)_{mol}|$ ：繰り返し当たりの結合エンタルピー(1.64kcal/mol)。

TS 理論からゲルの架橋点の大きさ S (架橋長 $\zeta \times$ 多重度 ρ)を求めた結果を Figure3 に示した。重合度 N が増大すると、架橋点の大きさ S も増大する傾向が見られる。さらに増大すると、 S の大きさは一定の値となり、これ以上増大しなかった。特に、s-PVA で顕著であり、PVA 鎖の絡み合いが関係していると考えられる。 N が増大すると、隣接する PVA 鎖間が短くなり、PVA 分子鎖間で水素結合を形成して結晶化し、 S が増大すると考えられる。さらに増大すると、絡み合いにより分子運動が抑制されて架橋領域に入り込めなくなり、これ以上 S は大きく成長できなかったと考えられる。

次に、微結晶間距離 L と微結晶の大きさを小角 X 線散乱測定より求めた。SAXS パターンを Figure 4 に示した。両者の SAXS パターンを比較すると、いずれも同心円状のパターンであることから、異方性はないと考えられる。次に、得られた SAXS 強度と散乱ベクトル q より微結晶の大きさを算出した。散乱ベクトル $q(=4\pi/\lambda)\sin(\theta/2)$ の小さい領域はギニエ領域と呼ばれ、大きな空間的情報や粒子分散状態、長周期構造が分かる。さらに、PVA ゲル中の微結晶の大きさは、ギニエの法則と呼ばれる(5)式より求めることができる³⁾。

$$I(q) = I(0)\exp\left(-\frac{q^2 R_g^2}{3}\right) \quad (5)$$

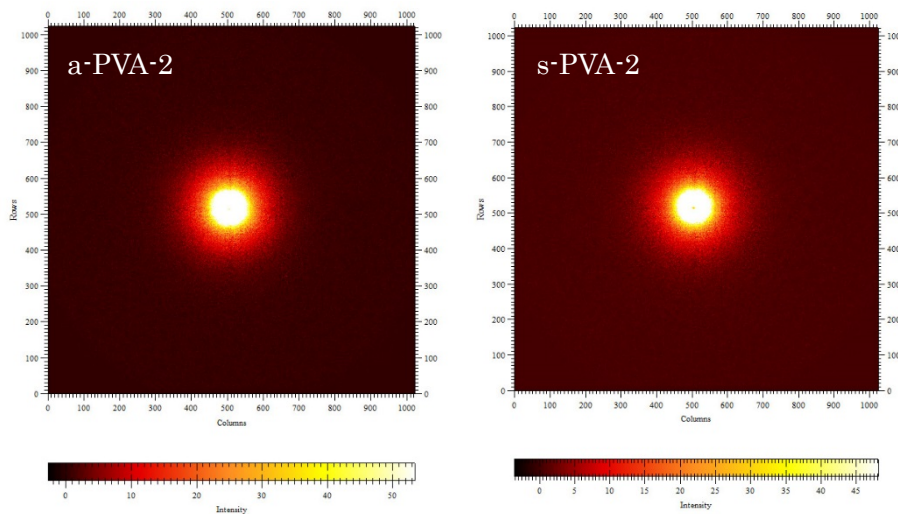


Figure 4. SAXS パターン.

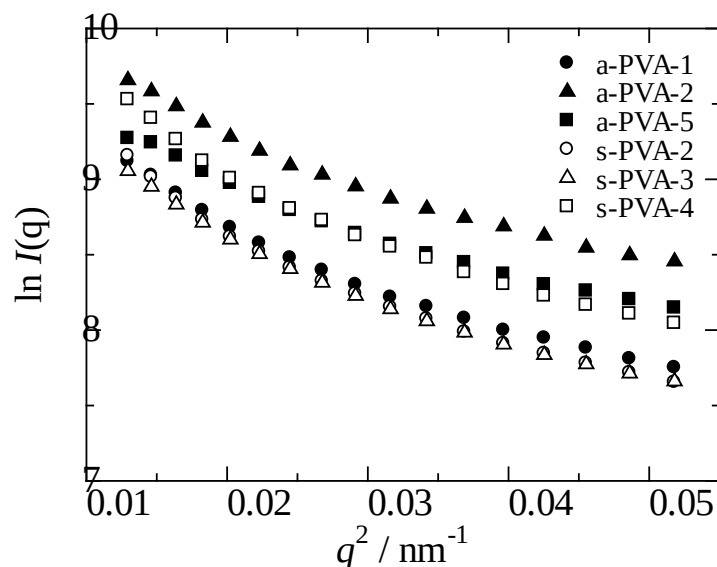


Figure 5. PVA ゲルのギニエプロット.

ここで、 R_g は粒子の慣性半径であり、粒子を球状と仮定すると、微結晶の大きさが算出できる。Figure 5 に a-PVA および s-PVA のギニエプロットを示した。重合度 N が同程度になるように、a-PVA および s-PVA を、それぞれ 3 種類選り出して SAXS 測定を行った。この図の $q^2 < 0.02$ の直線領域の傾きから、式(5)より R_g を求めることができる。粒子を球状と考えた場合、実半径 R は $R = R_g \times (5/3)^{1/2}$ の関係が成り立つことが知られている。そこで、Figure 5 のプロットより慣性半径 R_g を求めて実半径 R を算出したところ、Table 2 の結果となった。

Table 2. PVA ゲルの微結晶半径

	a-PVA-1	a-PVA-2	a-PVA-5	s-PVA-2	s-PVA-3	s-PVA-4
R (nm)	17.5	16.2	15.5	19.3	17.7	19.1

この表より、微結晶の大きさは a-PVA より s-PVA が大きい。これは、アタクチックよりシンジオタクチック構造のものが、より強く水素結合が働き、PVA 鎖同士がより凝集しやすいために増大したと考えられる。また、この結果は、Figure 3 に示した結果と同様であり、架橋点の大きさが微結晶の大きさに影響を与えていると考えられる。また、微結晶の大きさが熱的性質に影響を与えていると考えられる。

次に、微結晶が大きくなることによって、力学強度も増大すると予想される。そこで、PVA ゲルの一軸延伸を行い、初期勾配よりヤング率 E を算出した。それらの値を Figure 6 に示した。まず、a-PVA を見ると、 N が増大すると E も増大する。これに対し、s-PVA は N が増大すると、 E も増大する傾向がみられるが、 $N > 5000$ になると E は一定の値を示した。ヤング率 E は、微結晶の大きさに依存すると考えられるが、ある一定の重合度になると、分子鎖の絡み合いにより分子鎖の運動が抑制され、 E は一定になったと考えられる。ヤング率 E が一定になるならば、微結晶間同士の距離が影響すると考えられる。つまり、微結晶の大きさが大きくなっても、微結晶間距離 L が大きくなると、ヤング率 E は小さくなると考えられる。しかしながら、微結晶間距離 L の

影響は不明であり、今後の課題である。

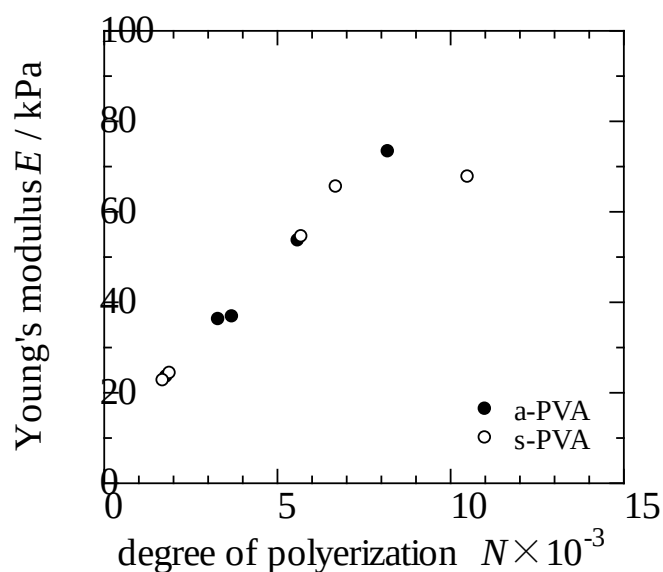


Figure 6. PVA ゲルのヤング率 E と重合度 N の関係.

5. 結論

- (1) 高重合度 PVA を合成することができた。
- (2) PVA ゲルの架橋領域の大きさ S は、重合度 N に依存する
- (3) SAXS 測定より、微結晶の大きさは、a-PVA ゲルよりタクチシティーの高い s-PVA ゲルの方が大きい。これは、アタクチックよりシンジオタクチックの方が、より強く水素結合が働くためであると考えられる。
- (4) ヤング率 E は架橋点の大きさ S に依存し、 S が増大すれば、 E も増大する。

参考文献

- 1) 和田理征, 清水秀信, 岡部 勝, 高分子論文集, 66 巻, No.11, p.623-630 (2012).
- 2) F. Tanaka and W. H. Stockmayer, *Macromolecules*, 27, 3943(1994).
- 3) 例えば, 高分子学会編, 新高分子実験学 6, 高分子の構造 2, 共立出版(1997).

6. 研究成果の発表

- 1) 和田理征, 清水秀信, 岡部 勝
「DMSO/水系混合溶媒中での PVA のゲル化とゲルのキャラクタリゼーション」
田中豊一記念シンポジウム 2014, 2014. 9 (日本ゼオンー碧荘)
- 2) 和田理征, 清水秀信, 岡部 勝
「高分子量 PVA ゲルの架橋点の大きさと機械的特性」
第 63 回高分子討論会 (高分子学会), 2014. 9 (長崎大学)

- 3)大町理未, 和田理征, 清水秀信, 岡部 勝
「ポリビニルアルコールハイドロゲル膜の構造とその特性」
第 64 回高分子学会年次大会, 2015. 5 (札幌コンベンションセンター)
- 4)和田理征, 清水秀信, 岡部 勝
「高分子量 PVA ハイドロゲルの架橋長の大きさとヤング率」
第 64 回高分子学会年次大会, 2015. 5 (札幌コンベンションセンター)
- 5)大町理未, 和田理征, 清水秀信, 岡部 勝
「抗菌性ポリビニルアルコールハイドロゲル膜の特性」
第 64 回高分子討論会 (高分子学会), 2015, 9 (東北大学)
- 6)大町理未, 和田理征, 清水秀信, 岡部 勝
「抗菌性ポリビニルアルコールハイドロゲル膜の構造とその特性」
第 27 回高分子ゲル研究討論会, 2016, 1 (東京大学)
- 7) 和田理征、清水秀信、岡部 勝
「PVA ハイドロゲルの微結晶の大きさと架橋長」
第 65 回高分子学会年次大会, 2016, 5 (神戸国際会議場)
- 8) 和田理征, 清水秀信, 岡部 勝
「PVA/キトサンプレンドフィルムの特性」
第 65 回高分子討論会, 2016, 9 (神奈川大学)

模擬実験による細胞内凍結時の氷結晶形成挙動解析の検討とそれを活用した凍結損傷低減の可能性

応用バイオ科学科 鳴海 明

1. 研究の目的

世界人口の予想を超える急増および地球温暖化に伴う異常気象の頻発化により、近い将来間違いなく世界規模での食糧危機が懸念されている。その対策の一つに低温保存技術があり、食糧自給率の低い日本においてはとくに重要な技術と言える。低温保存技術は、低温状態において菌の活動が抑えられることから、長時間の保存が可能になり、従来から用いられている。しかしながら、生体材料には多くの水が含まれているため、凝固点以下になると、一般的な冷却速度の場合、細胞外凍結を経て細胞内凍結が起き、細胞が死に至ると考えられている。とくに植物の場合は、生きた状態での保存が望まれることが多く、細胞外から細胞内凍結における氷結晶形成挙動の理解は低温保存技術の発展にとって極めて重要である。本研究はそのための基礎実験として計画されたもので、植物の場合ともすると生育環境を含む個体差の影響が大きく、その影響を避けるために細胞を模した細胞内凍結の模擬実験を行うことにより、細胞内凍結時の氷結晶形成挙動の特性をより客観的に把握しようというものである。

2. 研究の必要性及び従来の研究

細胞凍結に関する研究としては、冷却速度を変化させてその際形成される氷結晶と生存率の関係についてマクロ的観点からの研究が主として従来から行われてきた。これらの研究は、例えばマグロの凍結冷凍保存技術において最大氷結晶生成温度帯を急速に通過させる急速凍結が質の高い保存法としてよく知られている。近年、よりミクロな観点から細胞内凍結挙動に着目した研究が行われるようになってきており、植物細胞を対象として、北大藤川、岩手大学の上村らのグループによって低温馴化のメカニズム解明を目指して活発に行われている。なかでも、上村らは高速度カメラを用いてプロトプラスの細胞内凍結挙動の可視化撮影を試みたが、氷結晶形成挙動を解析できるほどの鮮明な画像を得られなかった(低温生物工学会誌, Vol. 48, No. 2, 2002)。したがって、本研究で計画している高速度カメラを用いた氷結晶の形成挙動の解析から損傷を検討するという研究は、現在までのところほとんど行われていない。以上の点から、高速度カメラ画像解析による細胞内凍結時の氷結晶形成挙動のアプローチは、氷結晶による細胞ダメージの解明に繋がる可能性のあることから、これからの低温保存技術への寄与が期待できる。

3. 期待される効果

本研究は、植物の個体差および生育時期などによる結果への影響を避けるため、細胞を模した試験部を製作し模擬実験を行い、実験条件を変化させて細胞内凍結時の特徴的な氷結晶形成挙動を再現させ、得られた結果を実際の植物での同様な実験結果と比較することにより、それらの挙動が起こるメカニズムを検討し、凍結損傷低減のヒントを掴むことを目的としている。この結果を活かし、ダメージの低減に繋がる新しい凍結技術の道筋を見出すことが期待される。

4. 研究の経過及び結果

まず、細胞凍結を行うための模擬実験を行うための試験部と冷却システムの構築を行った。試験部は、カバーガラス上に暑さ 0.2mm のアルミテープを薄く切り、それを重ね合わせて、細胞の形状を作成し、その中に純水を満たし、その上からシリコングリースを塗った上にカバーガラスを置き、作成した。冷却速度を変化させることにより細胞内凍結開始温度を変化させ、凍結の瞬間を高速度カメラにより撮影した。鮮明な凍結の瞬間画像を撮影することには成功したが(図1参照)、研究計画で狙いとした氷結晶発現の位置、進行パターンのコントロールについてはうまく行かなかった。

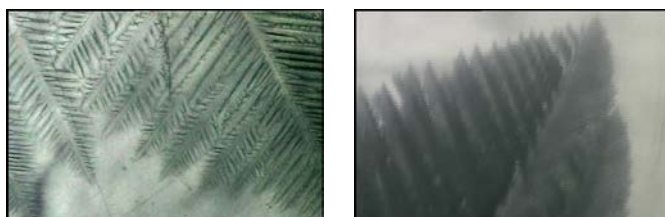


図1 高速度カメラによる氷結晶挙動写真

そこで、研究計画を変更し、実際の植物細胞を用いて冷却速度を変化させながら細胞内凍結挙動を高速度カメラで撮影し、特徴的細胞内凍結挙動を解析することとした。その際、ダメージ低減効果の可能性のある電流負荷についても、負荷しない場合と負荷した場合の電流値を冷却速度とともに変化させた。得られた高速度カメラの画像から、細胞内凍結時の氷結晶発現の位置、成長速度、粒子径に着目し、詳細な検討を行った。なお、成長速度は氷結晶の面積の時間的推移から、粒子径は氷結晶先端界面近傍の輝度分布から算出した(図2参照)。

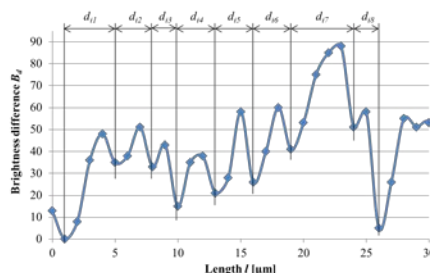
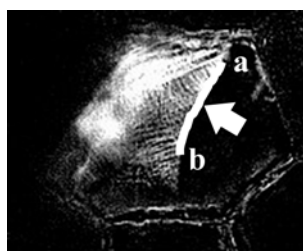


図2 氷結晶粒子径の算出方法

一例として、氷結晶の成長速度および粒子径の算出した結果を、電流負荷のない場合、ある場合について図3および4にそれぞれ示す。

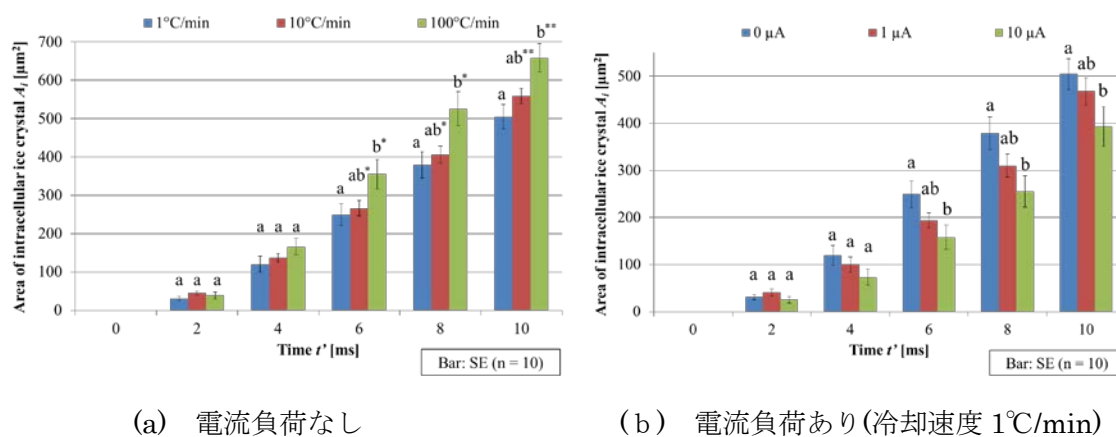


図3 細胞内凍結時の氷結晶成長速度

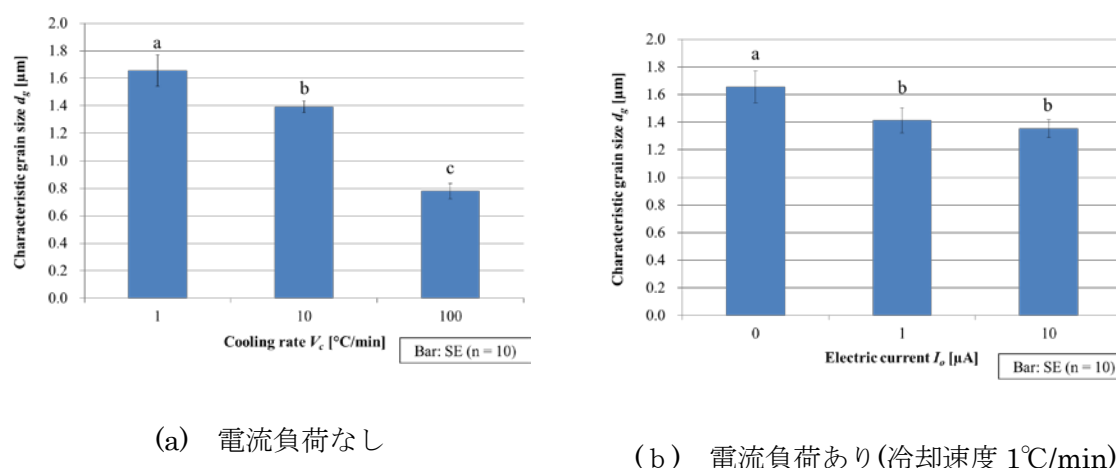


図4 細胞内凍結時の氷結晶粒子径

それらの結果から以下のことが明らかになった。

電流負荷しない場合：

発現の位置：冷却速度が低い場合、細胞壁近傍からほぼ 100%発現するのに対し、冷却速度が高くなると、細胞壁以外の位置からも発現する。

成長速度：冷却速度が高くなると、成長速度が高くなる。

粒子径：冷却速度が高くなるほど、粒子径は小さくなる。

電流負荷した場合：

電流負荷しない場合に比べ，発現の位置は冷却速度が低くても細胞壁近傍以外のところからも発現する．また，成長速度は冷却速度が高い場合でも遅くなる．粒子径は冷却速度が低くても微細化される．以上のことより，電流負荷すると，細胞内凍結時の氷結晶挙動は，発現の位置は細胞壁近傍以外からも，成長速度は遅くなり，粒子径は微細化されるという結果となり，力学的ダメージという観点からはいずれの結果もダメージ低減の方向の結果となった．

5. 今後の計画

電流負荷による細胞内凍結時の氷結晶形成挙動の違いがなぜ起こるのかを明らかにしていく必要がある．

6. 研究成果の発表

- (1) Takako Ninagawa, Akemi Eguchi, Yukio Kawamura, Tadashi Konishi, Akira Narumi
“A study on ice crystal formation behavior at intracellular freezing of plant cells using a high-speed camera”, Cryobiology, 73, pp.20-29, 2016.



A study on ice crystal formation behavior at intracellular freezing of plant cells using a high-speed camera



Takako Ninagawa^a, Akemi Eguchi^b, Yukio Kawamura^c, Tadashi Konishi^d,
Akira Narumi^{a,*}

^a Graduate School of Mechanical Engineering, Kanagawa Institute of Technology, 1030 Shimo-ogino, Atsugi, Kanagawa, 243-0292, Japan

^b Toyo Engineering Works, LTD., 1634, Shimotsuruma, Yamato, Kanagawa, 242-0001, Japan

^c Cryobiofrontier Research Center, Faculty of Agriculture, Iwate University, Ueda 3-18-8, Morioka, Iwate, 020-8550, Japan

^d Department of Mechanical Engineering, Oita National College of Technology, 1666 Maki, Oita, 870-0152, Japan

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 November 2015

Received in revised form

9 June 2016

Accepted 20 June 2016

Available online 21 June 2016

Keywords:

High-speed camera

Ice crystal

Intracellular freezing

Plant

Plasma membrane

Supercooling

ABSTRACT

Intracellular ice crystal formation (IIF) causes several problems to cryopreservation, and it is the key to developing improved cryopreservation techniques that can ensure the long-term preservation of living tissues. Therefore, the ability to capture clear intracellular freezing images is important for understanding both the occurrence and the IIF behavior. The authors developed a new cryomicroscopic system that was equipped with a high-speed camera for this study and successfully used this to capture clearer images of the IIF process in the epidermal tissues of strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaves. This system was then used to examine patterns in the location and formation of intracellular ice crystals and to evaluate the degree of cell deformation because of ice crystals inside the cell and the growing rate and grain size of intracellular ice crystals at various cooling rates. The results showed that an increase in cooling rate influenced the formation pattern of intracellular ice crystals but had less of an effect on their location. Moreover, it reduced the degree of supercooling at the onset of intracellular freezing and the degree of cell deformation; the characteristic grain size of intracellular ice crystals was also reduced, but the growing rate of intracellular ice crystals was increased. Thus, the high-speed camera images could expose these changes in IIF behaviors with an increase in the cooling rate, and these are believed to have been caused by an increase in the degree of supercooling.

© 2016 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

Cryopreservation techniques are used in various fields, including food and medical engineering. The most appropriate cryopreservation temperature depends on the properties of the object being preserved, and the preservation period varies with temperature. Cryopreservation involves placing living materials such as food, biological organs, and tissues under a low temperature, thus reducing putrefaction by bacteria and plant respiration [25]. However, since living materials contain water, they are also frozen spontaneously through supercooling when placed at a temperature below the solidification point. Therefore,

cryopreservation techniques can be classified into two categories depending on whether the living materials are frozen, with frozen preservation generally being considered to allow an extended preservation period.

The suitability of frozen preservation depends on the state of the living materials during cryopreservation. Mazur [19,20] previously described a general relation between the cooling rate and survival rate of freezing cells, which applies to both animal and plant cells. At a slow cooling rate, the inside of a cell becomes dehydrated because of the difference in chemical potential between the extracellular ice crystals and the intracellular solution [16,19]. Although absolute dehydration is lethal to a cell, partial dehydration increases the survival rate of freezing cells. As the cooling rate increases, intracellular freezing occurs as a result of supercooling following extracellular freezing [19,23], which is also lethal to cells [1,16,23,31,34]. However, a further increase in the cooling rate can lead to vitrification preservation, which significantly increases the survival rate of freezing cells [19,27]. At present, however,

* Corresponding author.

E-mail addresses: s1291001@cco.kanagawa-it.ac.jp (T. Ninagawa), ykawa@iwate-u.ac.jp (Y. Kawamura), konishi@oita-ct.ac.jp (T. Konishi), narumi@me.kanagawa-it.ac.jp (A. Narumi).

vitrification preservation can only be applied to micro-objects, making it difficult to prevent the occurrence of intracellular freezing when living materials are frozen.

Frozen preservation is used for food storage, where it is unnecessary to keep the living material alive. Rapid freezing can preserve fish and meat for a long time period with a less decline of the quality [12,18], and so is used, for example, to store tuna. However, it is difficult to apply cryopreservation techniques to plant foods, such as vegetables and fruits, as intracellular ice formation leads to a decline in their texture because of mollification of the tissue [5,13]. Plant cells are surrounded by cell walls, and it is believed that the mollification of the tissue is caused by injury to the cell wall when ice crystals form both outside and within a cell [9].

Based on this information, the authors consider that the ability to visualize intracellular ice crystal formation (IIF) behavior to understand the point at which intracellular freezing begins and how IIF progresses, is the key to developing improved cryopreservation techniques.

Studies have captured images of intracellular freezing in animal and plant cells and tissues since the 1930s [6]. Most of these studies have investigated the effect of intracellular freezing on the survival rate or level of injury to the cells [2,17,19,21,29], or relate to vitrification preservation [30,33], with fewer studies examining IIF behavior. However, Modilibowska and Rogers [22] filmed intracellular freezing in plant tissues, and reported the behavior outside and inside the cells upon intracellular freezing; Asahina [3] provided a detailed report on the freezing process in plant cells, and recently, Stott and Karlsson [32] investigated IIF using a high-speed camera. All of these previous studies used images that captured the phenomenon known as “flashing,” whereby the inside of the cell darkens upon freezing. However, the authors consider that it is necessary to capture the progress of IIF and to investigate its behavior in even more detail. It is known that intracellular freezing begins with the invasion of an ice nucleus from outside the cell [24,31]. However, it is thought that ice nucleation may occur not only as a result of extracellular factors, but also intracellular factors, with heterogeneous or homogeneous nucleation inside the cell.

To gain a better understanding of the IIF behavior, the authors developed a new cryomicroscopic system, which comprised an inverted microscope, a cooling stage, and a high-speed camera with a maximum frame rate of 2000 frames per second (fps) and a resolution of 512×512 pixels. Plant tissues consisting of a single cell layer were selected for specimens to examine in this system because they were easy to obtain in a living state. The above-mentioned system successfully captured images of IIF in these plant tissues.

This study was performed to investigate the IIF behavior in further detail using high-speed camera images of intracellular freezing acquired at different cooling rates. First, the progression of intracellular freezing was observed and patterns in the location and formation of intracellular ice crystals were determined to evaluate the effects of cooling rate on the occurrence of intracellular freezing and IIF. The ice crystals formed inside the cells due to intracellular freezing deform the cells. Thus, the relation between the degrees of supercooling and cell deformation due to intracellular freezing was shown to be the effect of cooling rate on IIF behavior. In addition, using the high-speed camera images, the growing rate and grain size of intracellular ice crystals were also evaluated. The results show that an increase in the cooling rate caused an increase in the degree of supercooling and a decrease in the degree of cell deformation and indicate that the degree of cell deformation decreases due to a decrease in the grain size of intracellular ice crystal with the increase in the degree of supercooling.

2. Materials and methods

2.1. Cryomicroscopic system

The cryomicroscopic system used in this study consisted of an inverted microscope (IX71, Olympus) equipped with a cooling stage (HCD301, INSTEC) and a high-speed camera (Phantom V4.2, Vision Research) (Fig. 1).

The plant specimens were irradiated with light from a 100-W halogen lamp (12V100WHAL-L, Olympus) passed through a condenser (IX2-LWUCD, NA: 0.55, Olympus). Intracellular freezing in the plant specimens was then captured by the high-speed camera through an objective lens (SLCPlanFI 40x Olympus). The high-speed camera could capture images at a maximum frame rate of 2000 fps and a resolution of 512×512 pixels using Phantom Camera Control software package (Version 9.0.640.0-C PhCon:640).

Cooling was performed by pouring combination air using liquid nitrogen and a heater (STC200, Instec) onto the cooling stage. The cooling rate was controlled by a computer and varied from $-1^\circ\text{C}/\text{min}$ to $-100^\circ\text{C}/\text{min}$. Nitrogen gas was also flowed onto the cooling stage to prevent the observation window from clouding.

2.2. Plant materials

Epidermal tissues on the abaxial surface of the leaves of strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) plants obtained from the campus of Kanagawa Institute of Technology, Atsugi, Japan, were used as specimens. The leaves were removed from their leafstalk and placed in a dish filled with water to prevent them from drying.

Initial trials to investigate the usefulness of our cryomicroscopic system for observing intracellular freezing behavior were carried out using specimens obtained in early summer 2007 (Figs. 2 and 3).

Specimens to investigate intracellular freezing behaviors in the tissues were obtained between late December 2014 and mid-January 2015, and in early December 2015. The strawberry geranium plants grew at the campus of Kanagawa Institute of Technology, which is located in a humid subtropical region. The meteorological station at neighboring Ebina city recorded an average air temperature of 7°C and an average day length of 172 h.

2.3. Experimental method

Each specimen was cut into a 10 mm^2 section and placed onto a cover glass with distilled water to prevent it from drying. A second cover glass with silicon grease applied around the edges was then placed over the specimen. The cover glasses were placed on the cooling stage and cooled from room temperature (approximately 22°C) to the temperature at which intracellular freezing occurred at cooling rates that ranged from $-1^\circ\text{C}/\text{min}$ to $-100^\circ\text{C}/\text{min}$.

The shutter of the high-speed camera was pressed when half of the cells (approximately seven cells) within the observation area had experienced intracellular freezing. Thus, intracellular freezing in each specimen was captured at 1000 fps for 2 s before and after pressing the shutter. The experiments were repeated at least 10 times at each cooling rate.

All images were analyzed using Image J (v1.46) [26,28].

2.4. Definition of the degree of supercooling

The temperature at which intracellular freezing occurred (T_i) was defined using the temperature when the shutter of the high-speed camera was pressed. T_i was then converted into the degree of supercooling (T_s), by subtracting the temperature at the release of supercooling from the solidification point of water (0°C). Thus, the T_s was defined as follows:

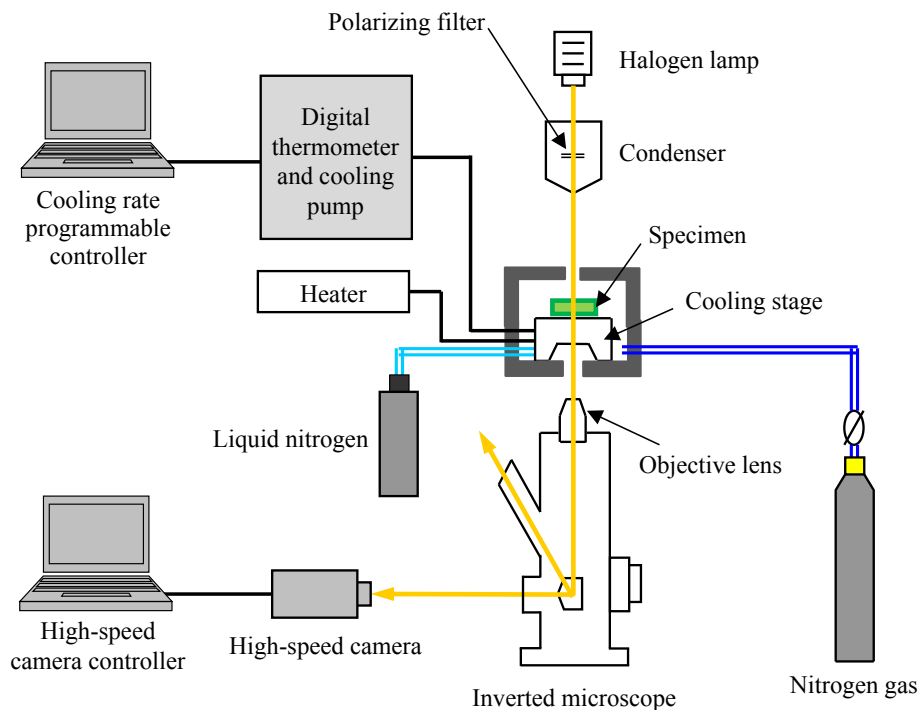


Fig. 1. Schematic illustration of the cryomicroscopic system used in this study.

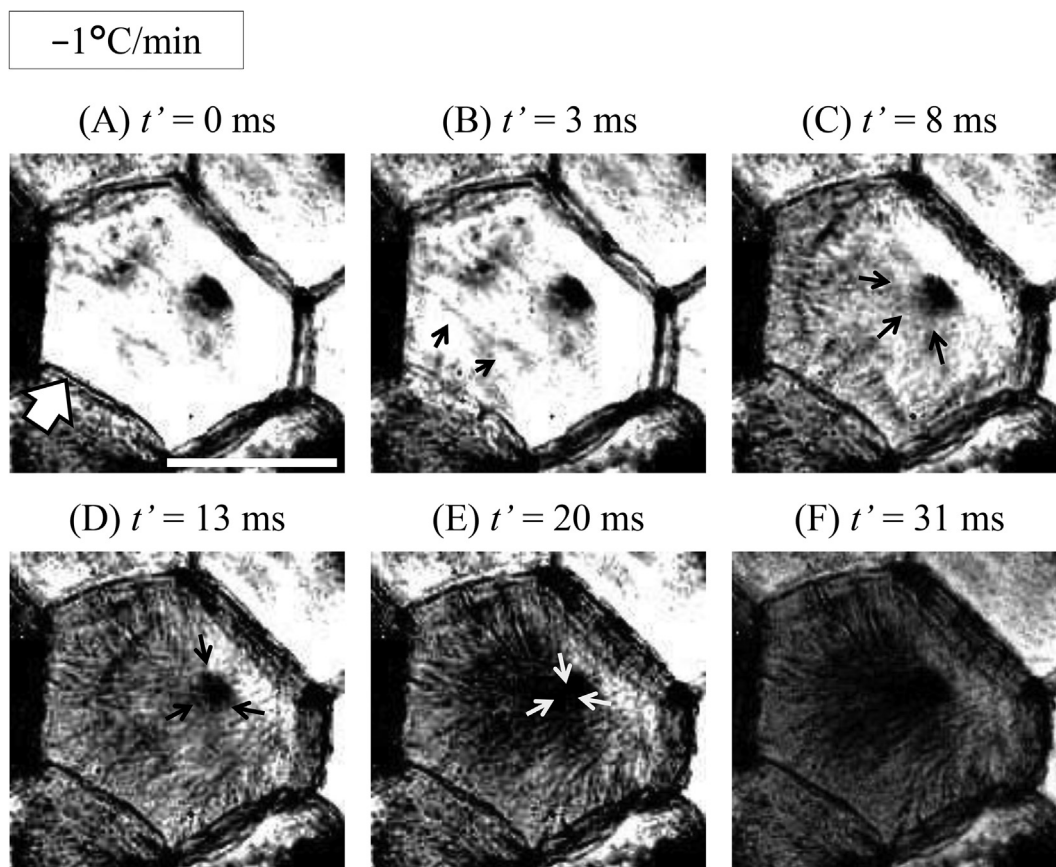


Fig. 2. Progress of intracellular freezing in the epidermal tissue of a strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaf at a cooling rate of $-1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. The temperature was approximately -8°C . These images were processed using filtering, and the contrast and brightness were adjusted using image analysis software. Bold white arrow: location where the intracellular ice crystal appeared; small arrows: direction of progress in the formation of intracellular ice crystals; white bar: 25 μm ; t' : time elapsed (ms) since the start of intracellular freezing. (A) $t' = 0$ ms, (B) $t' = 3$ ms, (C) $t' = 8$ ms, (D) $t' = 13$ ms, (E) $t' = 20$ ms, and (F) $t' = 31$ ms.

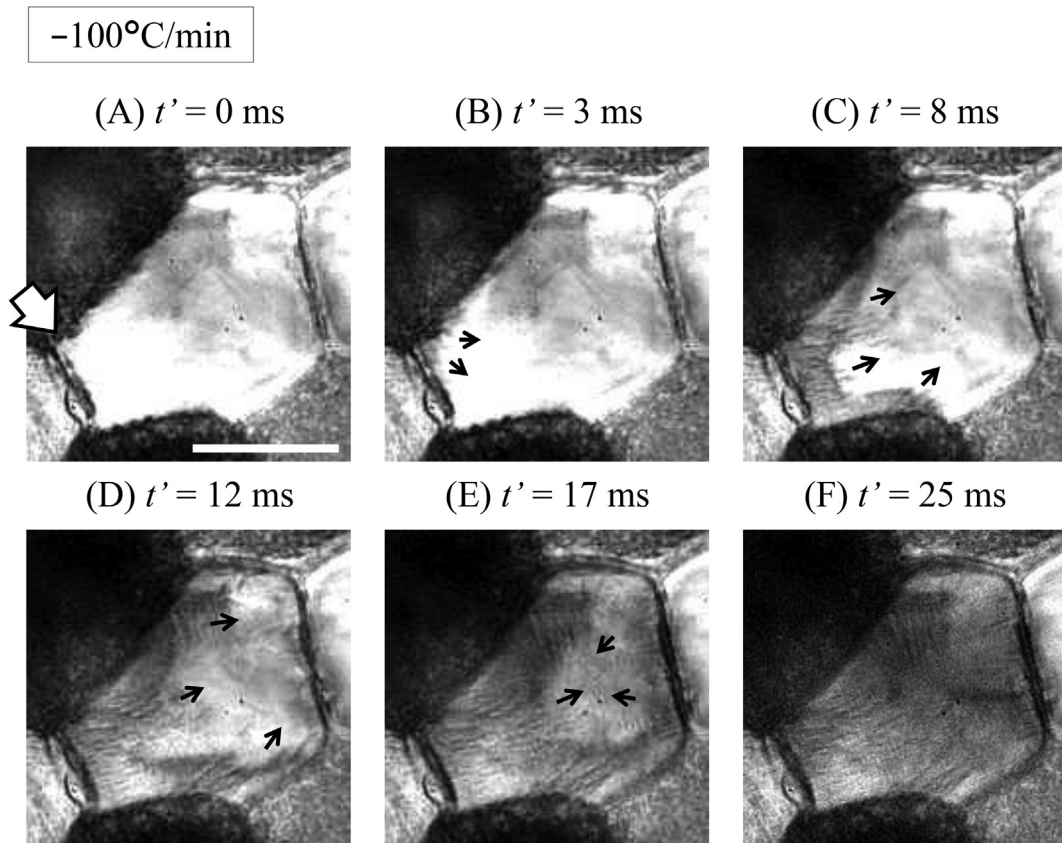


Fig. 3. Progress of intracellular ice crystal formation in the epidermal tissue of a strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaf at a cooling rate of -100 °C/min. The temperature was approximately -17 °C. These images were processed using filtering, and the contrast and brightness were adjusted using image analysis software. Bold white arrow: location where the intracellular ice crystal appeared; small arrows: direction of progress in the formation of intracellular ice crystals; white bar: 25 μ m; t' : time elapsed (ms) since the start of intracellular freezing. (A) $t' = 0$ ms, (B) $t' = 3$ ms, (C) $t' = 8$ ms, (D) $t' = 12$ ms, (E) $t' = 17$ ms, and (F) $t' = 25$ ms.

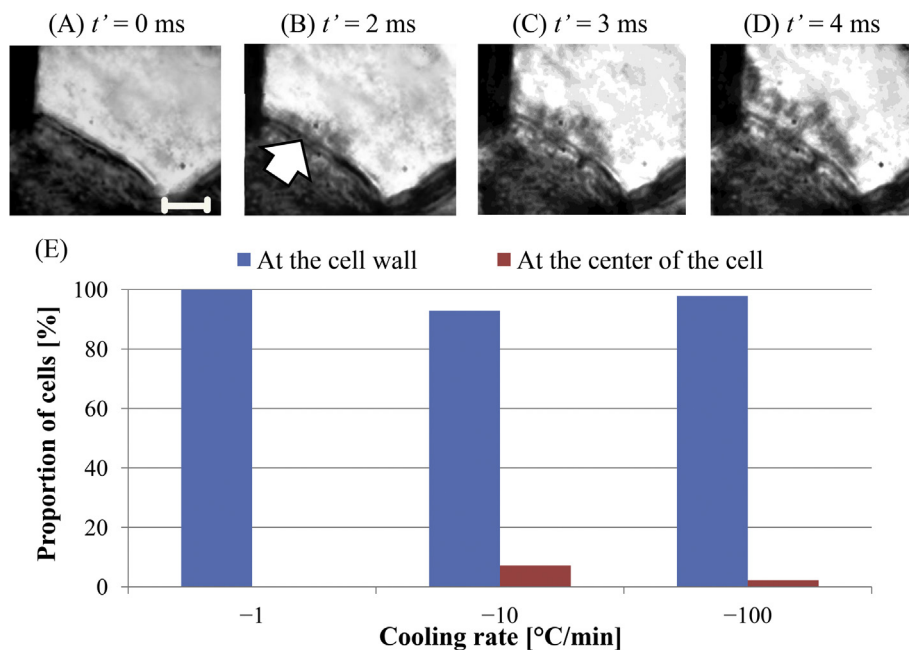


Fig. 4. Locations where intracellular ice crystals appeared in the epidermal tissues of strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaves. (A–D) Progress of intracellular ice crystal formation. Bold white arrow: location where the intracellular ice crystal appeared; white bar: 10 μ m; t' : time elapsed (ms) since the start of intracellular freezing. (A) $t' = 0$ ms, (B) $t' = 2$ ms, (C) $t' = 3$ ms, and (D) $t' = 4$ ms. (E) Proportion of cells in which intracellular ice crystals appeared at each location at cooling rates of -1 °C/min ($n = 15$), -10 °C/min ($n = 28$), and -100 °C/min ($n = 45$).

$$Ts = |Ti|$$

2.5. Definition of the degree of cell deformation

The degree of cell deformation (ε) indicates how much a cell has been deformed as a result of intracellular ice crystals, and was measured by calculating the area of cells before (A_b) and immediately after (A_c) intracellular freezing. The ε was then calculated as:

$$\varepsilon = \frac{A_c - A_b}{A_b}$$

2.6. Evaluation of the growing rate of intracellular ice crystals

The growing rate of intracellular ice crystals was evaluated

based on the area velocity of intracellular ice crystals, by measuring the area of an intracellular ice crystal every 2 ms from the time of its appearance until 10 ms had elapsed.

2.7. Statistical analyses

The degree of supercooling was presented the average value obtained from 10 specimens at each cooling rate. IIF behaviors were analyzed using four moving images obtained during intracellular freezing at each cooling rate. These images were used to examine the locations at which intracellular ice crystals appeared and the formation patterns of intracellular ice crystal. Since intracellular freezing in the same plant tissue occurred more frequently with an increase in cooling rate despite the same capture time (2 s) being used, the sample size also increased with an increase in cooling rate.

To evaluate the degree of cell deformation (ε), the growing rate, and the grain sizes at the edges of intracellular ice crystals, at least 10 cells were randomly sampled across the four moving images in

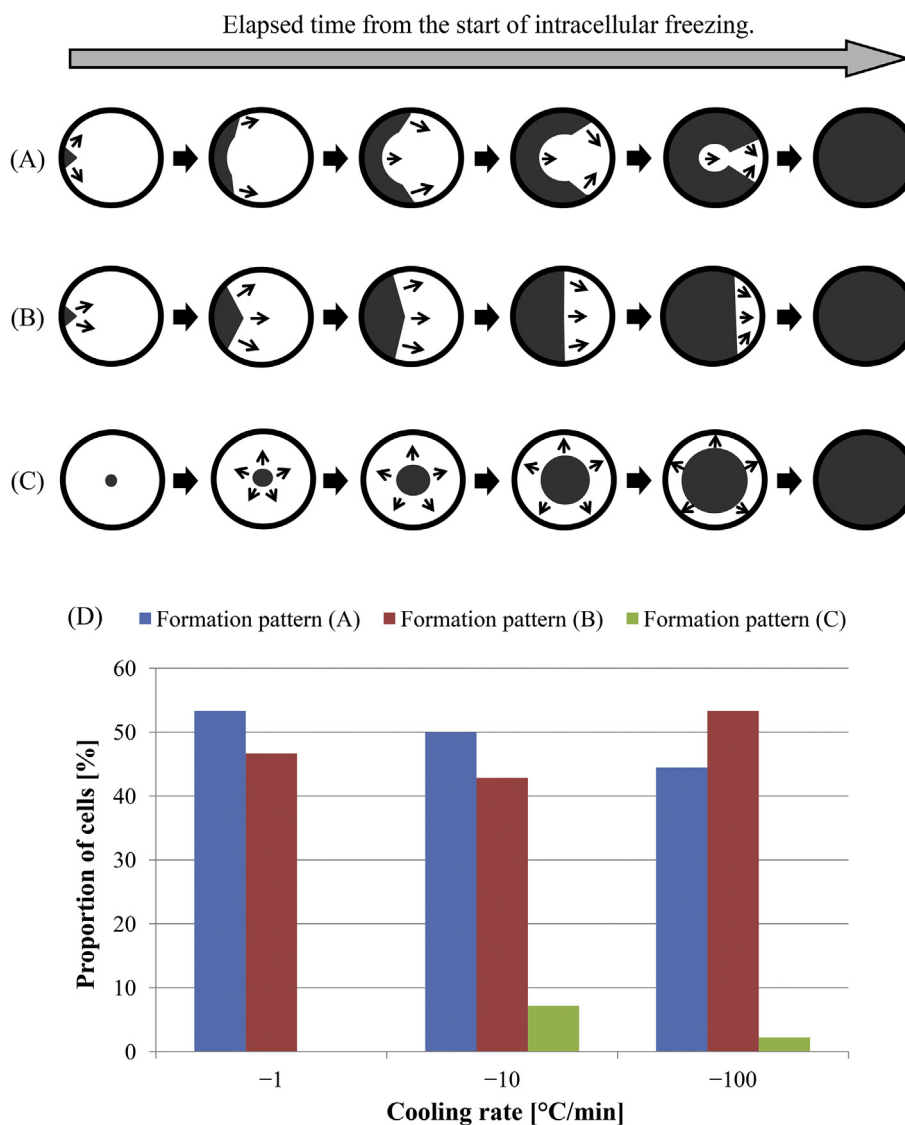


Fig. 5. Schematic illustration of the formation patterns of intracellular ice crystals in the epidermal tissues of strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaves. (A) Schematic Formation pattern A, where intracellular ice crystals formed around the outline of the cell. (B) Formation pattern B, where intracellular ice crystals formed across the center of the cell. (C) Formation pattern C, where intracellular ice crystals expanded from the center of the cell. (D) Proportion of cells exhibiting each type of formation pattern at cooling rates of -1 °C/min ($n = 15$), -10 °C/min ($n = 28$), and -100 °C/min ($n = 45$). (A–C) Small arrows: direction of progress in the formation of intracellular ice crystals.

which IIF could be clearly seen. The IIF behaviors in the selected cells were then converted into values, and the average of the 10 values was calculated. These median values were then compared using one-way analysis of variance (ANOVA) followed by the Tukey–Kramer method.

3. Results

3.1. Pattern classification of ice crystal formation at intracellular freezing

Examples of the high-speed camera images that were obtained from the start until the completion of intracellular freezing at cooling rates of $-1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ and $-100\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ are provided in Figs. 2 and 3, respectively. These images are also supported by Supplementary Videos 1 and 2, and show that our cryomicroscopic system could capture clear images of the IIF process, allowing us to observe the formation of intracellular ice crystal grains.

Supplementary video related to this article can be found at <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryobiol.2016.06.003>.

The progress in IIF following the appearance of crystals inside the cell shown in Fig. 2 is shown in Fig. 4A–D. Intracellular freezing began with the sudden appearance of ice crystals inside the cell, with intracellular ice crystals first being observed at the cell wall (Fig. 4B). At all cooling rates, over 96% of ice crystals appeared at the cell wall, but some crystals also appeared at the center of the cell as the cooling rate increased (Fig. 4E; Supplementary Video 3). However, it was not possible to determine whether these intracellular ice crystals started to appear in the inner part of the cell or at the cell wall on the closest or opposite side of the field of view because the cryomicroscopic system could only obtain images in two dimensions.

Supplementary video related to this article can be found at <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryobiol.2016.06.003>.

Schematic illustrations of the patterns of IIF over time are provided in Fig. 5A–C. These patterns could be classified into three types: formation pattern A (Fig. 5A), where intracellular ice crystals formed around the periphery of a cell after appearing at the cell wall; formation pattern B (Fig. 5B), where intracellular ice crystals formed across the center of a cell after appearing at the cell wall; and formation pattern C (Fig. 5C), where intracellular ice crystals expanded to the edges of a cell after appearing at the center. At a cooling rate of $-1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, approximately 53% of formation patterns fell into category A, while the remaining 47% fell into category B (Fig. 5D). However, as the cooling rate increased, the proportion of cells exhibiting formation pattern A decreased and the proportion exhibiting patterns B and C increased, so that at $-100\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, the proportions of formation patterns A and B were more or less reversed.

3.2. Evaluations of cell deformation and ice crystal formation at intracellular freezing

The relation between the cooling rate and the degree of supercooling and cell deformation due to IIF was examined. Compared with its initial shape (Fig. 6A), the cell area was deformed following intracellular freezing (Fig. 6B). The degree of supercooling at $-10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ was twice that at $-1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, while the degree of supercooling at $-100\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ was three times that at $-1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ (Fig. 6C). In addition, the ϵ at a cooling rate of $-10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ decreased to approximately 68% of that at $-1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, while the ϵ at $-100\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ decreased to approximately 35% of that at $-1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ (Fig. 6C). Thus, the degree of supercooling and cell deformation was affected by the cooling rate.

The growing rate of intracellular ice crystals was evaluated using the area velocity of intracellular ice crystals. The areas of intracellular ice crystals immediately after their appearance inside a cell were the same across all cooling rates (Fig. 7). However, the relation

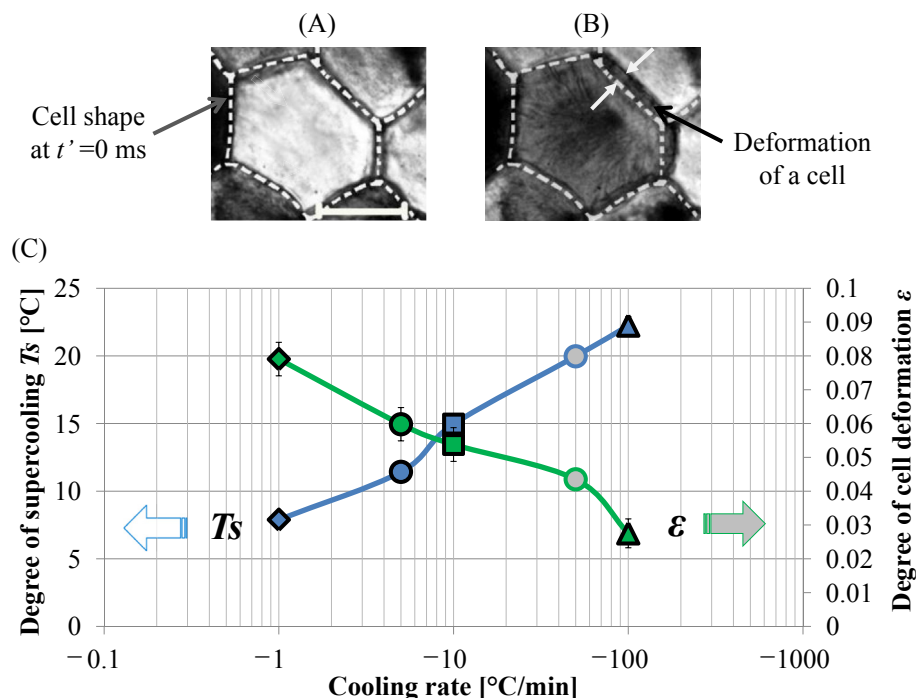


Fig. 6. Effect of cooling rate on the degree of cell deformation and supercooling in the epidermal tissues of strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaves. (A) Cell area immediately before intracellular freezing. Broken line: cell shape before intracellular freezing; white bar: $25\text{ }\mu\text{m}$. (B) Cell area immediately after intracellular freezing. The area outside the cell original shape indicates the degree of cell deformation. (C) Relation between the cooling rate and both the degree of supercooling (T_s) and the degree of cell deformation (ϵ). Bars: SE ($n = 10$).

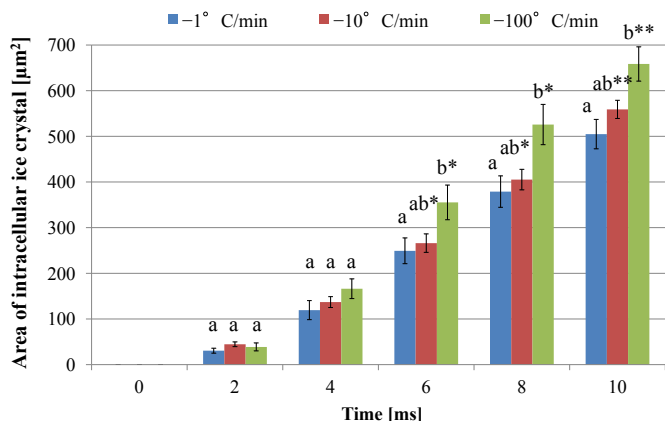


Fig. 7. Intracellular ice crystal growing rate at different cooling rates in the epidermal tissues of strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaves. Bars: SE ($n = 10$). Different lower-case letters indicate statistically significant differences between treatments using one-way ANOVA followed by the Tukey–Kramer method (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$).

between the area of intracellular ice crystals and the cooling rate became statistically significant with increased time since their first appearance.

The grain size of intracellular ice crystals was also attempted to evaluate. Fig. 8A shows an image that was obtained before intracellular freezing, while Fig. 8B was obtained when intracellular ice crystals occupied half of the cell. As can be seen, the cell appeared dark in the areas where ice crystals were located after intracellular freezing (Fig. 8B), but there was also a dark area inside the cell before intracellular freezing (Fig. 8A). Therefore, images in which the brightness of the image obtained when the intracellular ice crystals occupied half of the cell was subtracted from the brightness of the image obtained before intracellular freezing (Fig. 8C) were prepared to allow us to distinguish the formation of intracellular ice crystals. This modified image was used to evaluate the size of grains at the edges of the intracellular ice crystals (white line a–b in Fig. 8C).

The grains at the edges of the forming intracellular ice crystals became finer with an increase in cooling rate (Fig. 9A–C). Furthermore, as the cooling rate increased, the peaks in the brightness differences became lower and more numerous, and had narrower intervals between them (Fig. 9D). It is supposed that the teeth at the edges of the forming intracellular ice crystals become finer with an increase in cooling rate. Moreover, it is suggested that

the brightness difference relates to the grain size of intracellular ice crystal because the variation in that reduces with an increase in cooling rate. Thus, the standard deviation of the brightness difference was noticed and examined assuming as a character of the grain size of intracellular ice crystal. As the cooling rate increased, the standard deviations of the brightness differences decreased (Fig. 9E). It is indicated that the standard deviation of the brightness difference decreases with a decrease in ice crystal grain size.

To obtain a more accurate assessment of the grain size at the edges of intracellular ice crystals, the brightness difference was attempted to use to calculate the characteristic grain size of the forming intracellular ice crystals. First, a distance from the point where the brightness difference markedly increased to the point where it dropped was traced, and was used to estimate the grain size at the edge of an intracellular ice crystal. This was repeated at least 10 times in each selected cell and then calculated the average value to obtain the characteristic grain size. The characteristic grain size at -10 °C/min decreased to 84% of that at -1 °C/min , while the characteristic grain size at -100 °C/min decreased to 47% of that at -1 °C/min (Fig. 10). Thus, the grain size at the edges of forming intracellular ice crystals significantly decreased as the cooling rate increased.

4. Discussion

Cryo-scanning electron microscopy (cryo-SEM) is often a preferred technique for observing and measuring microscopic objects at low temperatures [4,7,10]. However, although cryo-SEM can measure microscopic objects extremely accurately, it is difficult to obtain a series of images due to the methodology used. By contrast, high-speed camera images can provide information about kinetic behavior and the microscopic object itself. Therefore, it is beneficial to capture clear images of intracellular freezing using a high-speed camera to obtain a comprehensive understanding of the mechanism of intracellular freezing.

Karlsson, who is a leader in the use of high-speed cameras to investigate intracellular freezing, recommended a frame rate of 8000 fps and a resolution of 128×128 pixels for high-speed cameras in cryomicroscopic systems [14], and Stott and Karlsson previously used a camera with a frame rate of 8000 fps and a resolution of 256×128 pixels to capture intracellular freezing [32]. The high-speed camera used in the present study had a much lower frame rate (1000 fps) than this, nevertheless the same complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) image sensor. However, a resolution was higher (512×512 pixels) than this. When considering the performances of high-speed cameras, an increased

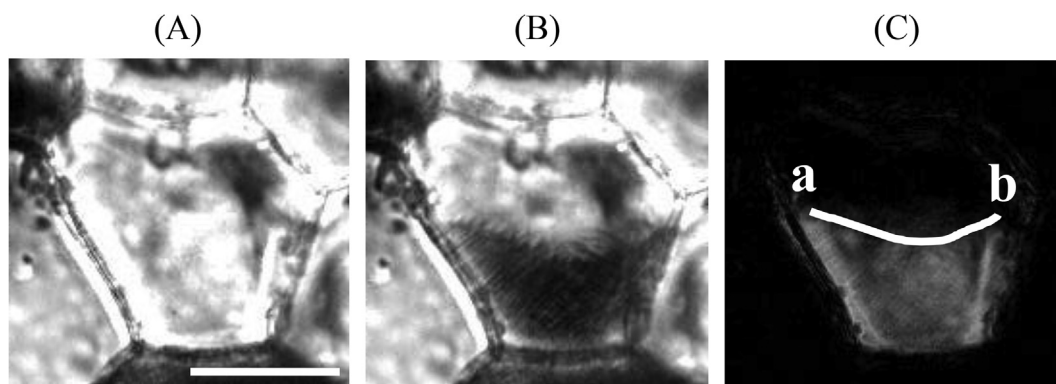


Fig. 8. Method used to evaluate the size of intracellular ice crystal grains in the epidermal tissues of strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaves. (A) Cell area immediately before intracellular freezing. White bar: 25 μm . (B) Cell area when intracellular ice crystals occupied half of the cell at a cooling rate of -1 °C/min . (C) Image that has been adjusted by subtracting the brightness of image (B) from that of image (A). The grain size that was evaluated on the edge of an intracellular ice crystal is indicated by a white line (a–b).

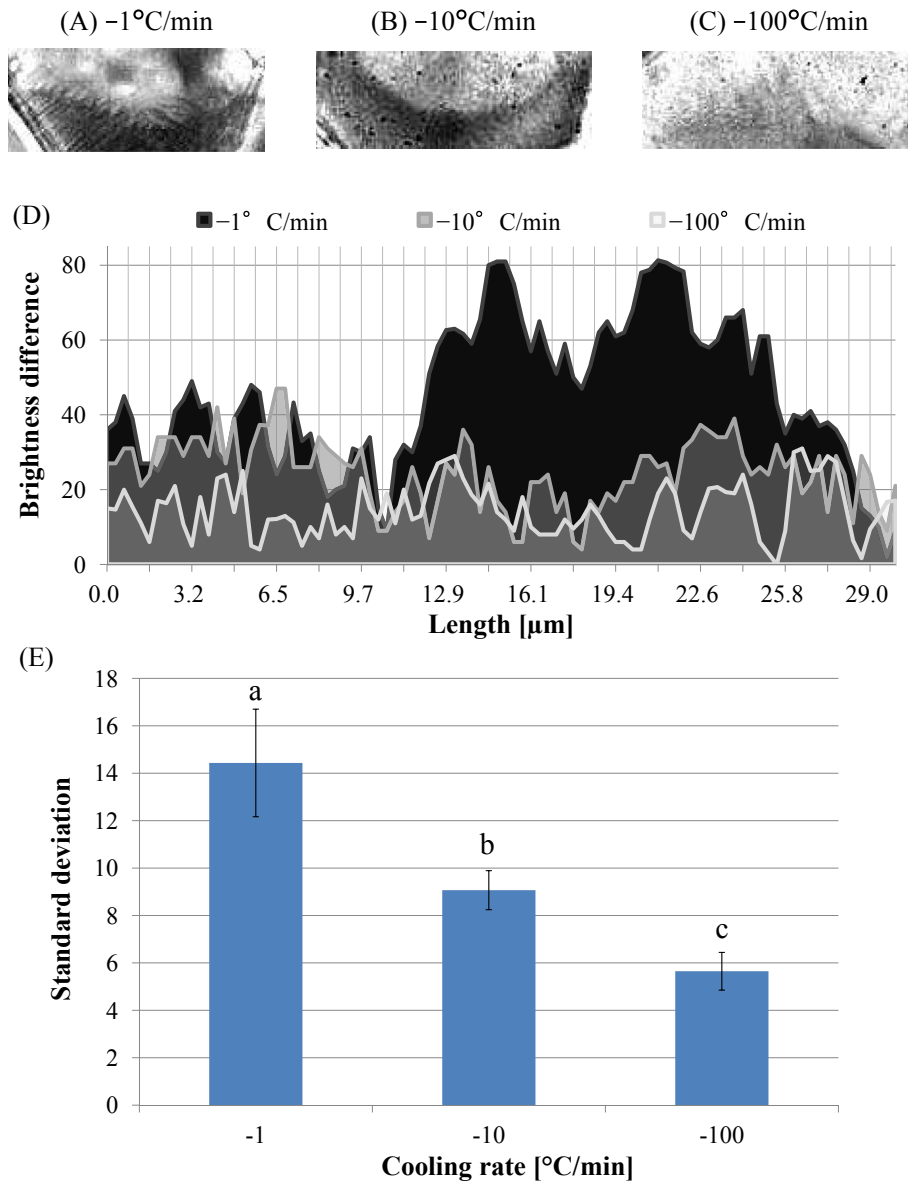


Fig. 9. Brightness differences at the edges of intracellular ice crystals in the epidermal tissues of strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaves at different cooling rates. (A) The edge of an intracellular ice crystal at a cooling rate of -1°C/min . (B) The edge of an intracellular ice crystal at a cooling rate of -10°C/min . (C) The edge of an intracellular ice crystal at a cooling rate of -100°C/min . (D) Brightness differences at the edges of the intracellular ice crystals shown in images A–C. (E) Average values of the SDs of the brightness differences at the edges of intracellular ice crystals at different cooling rates. Bars: SE ($n = 10$). Different lower-case letters indicate statistically significant differences between treatments using one-way ANOVA followed by the Tukey–Kramer method ($P < 0.05$).

frame rate can compensate for a decreased resolution, and vice versa. The frame rate is important for observing IIF through time, but the resolution is also important for observing more subtle changes that occur during that time. Therefore, we believe that the higher resolution and lower frame rate of our camera was appropriate given the specific focus of our study.

The most unique aspect of our cryomicroscopic system was the use of an inverted microscope. The movable distance between the specimen and the objective lens is shorter with an inverted microscope than with an ordinary, upright microscope. However, an inverted microscope can also observe the cells at the bottom of the culture solution in a container or a dish during freezing and post-thawing because the objective lens points upward, as a result of which biosystem laboratories often prefer to use inverted microscopes. In addition, this orientation allowed the microscope to be refocused on a cell more quickly than an upright microscope in the

short time between the distilled water inside the cover glasses freezing and the occurrence of intracellular freezing. This is because the downward expansion of water during freezing was restricted due to the presence of the cooling stage.

The initial stages of intracellular freezing were first examined using the moving images obtained with our microscopic system. Intracellular ice crystals appeared at the cell wall in over 96% of cells at all cooling rates (Fig. 4). However, IIF progressed not only in the vertical direction relative to the cell wall, but also along the cell outline. Plant cells are separated from the extracellular environment by a plasma membrane, which is extremely thin. Therefore, although the intracellular ice crystals were thought to appear at the cell wall in most cases, it may be that they sometimes appeared at the plasma membrane. These images also showed that intracellular ice crystals appeared successively around the cell outline. Thus, it is possible that when intracellular ice crystals appeared at the plasma

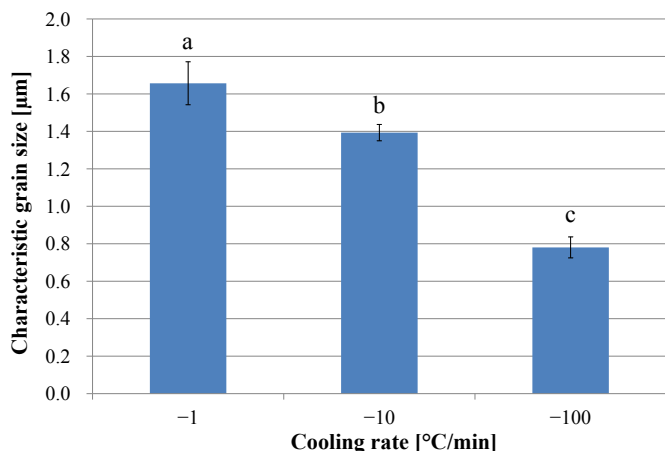


Fig. 10. Characteristic grain sizes at the edges of intracellular ice crystals in the epidermal tissues of strawberry geranium (*Saxifraga stolonifera* Curtis) leaves at different cooling rates. Bars: SE ($n = 10$). Different lower-case letters indicate statistically significant differences between treatments using one-way ANOVA followed by the Tukey–Kramer method ($P < 0.01$).

membrane, the side of the membrane inside the cell served as a nucleation site.

Our findings also suggested that the deformation of a cell due to intracellular freezing may release intracellular supercooling in the adjacent area. Supplementary Video 4 shows an example where intracellular freezing appeared to be caused by an indirect effect from the outside to the inside of the cell through the plasma membrane. In this video, the ice crystal inside the cell to the right develops in a vertical direction toward the formation direction of the ice crystal inside the cell to the left. When supercooled water in a plastic bottle is given a mechanical shock from the outside, supercooling is released and the water freezes instantly. It is generally known that an invasion of ice nuclei from outside the cell to inside causes ice nucleation inside a cell [24,31]. Moreover, the view point of thermodynamics can predict that intracellular supercooling may be released due to heterogeneous nucleation in the vicinity of a plasma membrane or organelle, or homogeneous nucleation of the intracellular liquid. However, this study showed that a new mechanism of the release of intracellular supercooling that had not been supposed ever might be presented.

Supplementary video related to this article can be found at <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryobiol.2016.06.003>.

Next, IIF behavior in randomly selected cells was examined. Although the sample size was small, this approach allowed us to examine the degree of cell deformation, the growing rate of intracellular ice crystals, and the characteristic grain size at the edges of intracellular ice crystals at different cooling rates.

The degree of supercooling increased with an increase in cooling rate, as did the intracellular ice crystal growing rate (Fig. 7). It has previously been shown that as water freezes, the growing rate at the edge of a dendritic ice crystal increases with an increase in the degree of supercooling [11]. Therefore, it is likely that the increase in the degree of supercooling that accompanied the increase in cooling rate caused the intracellular ice crystal growing rate to increase. Furthermore, it was found that as the cooling rate increased, there was a decrease in the proportion of cells exhibiting formation pattern A and an increase in those exhibiting formation pattern B, in which intracellular ice crystals formed across the center of a cell (Fig. 5D). The increase in the intracellular ice crystal growing rate may have influenced this transition between IIF patterns.

By contrast, the degree of cell deformation decreased with an

increase in the degree of supercooling (Fig. 6C), as did the brightness difference at the edges of the intracellular ice crystals (Fig. 9E). The phenomenon whereby the inside of a cell darkens during intracellular freezing is known as “flashing” and is caused by the ice crystals inside the cell interfering with the transmission of light from the light source [3,17]. Therefore, it is considered that a greater brightness difference indicates greater interference in the light transmission. Alternatively, it is also possible that a decrease in the brightness difference with an increase in cooling rate indicates that the edges of the intracellular ice crystals are becoming thinner. To better understand the processes occurring, the characteristic grain size at the edges of the intracellular ice crystals was evaluated, which was found to decrease with an increase in the degree of supercooling (Fig. 10). It has previously been shown that spending a shorter time in the maximum ice crystal generation temperature zone leads to the formation of finer ice crystals in food [8,15]. Although the present study examined grain size at the edges of intracellular ice crystals, this may affect the size of intracellular ice crystals just after their formation. An increase in the degree of supercooling caused the intracellular ice crystal grains to be finer, leading to an increased density of ice crystals inside a cell. Thus, it is considered that the degree of cell deformation decreased with increased cooling rates due to the formation of finer intracellular ice crystals.

It is known that rapid freezing can reduce the food quality deterioration due to freezing [12,18]. The present study shows that an increase in cooling rate can decrease ice crystal size formed inside not only food but also cells and suggests that a decrease in the degree of cell deformation due to this contributes to the food quality with rapid freezing. Thus, high-speed camera images present the new knowledge of IIF behavior to us.

References

- [1] J.P. Acker, L.E. McGann, Membrane damage occurs during the formation of intracellular ice, *Cryo Lett.* 22 (4) (2001) 241–254.
- [2] E. Asahina, Freezing injury in egg cells of the sea urchin, cellular injury and resistance in freezing organisms: proceedings 2, *Inst. Low. Temp. Sci.* (1967) 211–229.
- [3] E. Asahina, The freezing process of plant cell, *Cont. Inst. Low. Temp. Sci.* 10 (1956) 83–126.
- [4] J. Bastacky, C. Wodley, R. Labrie, C. Backhus, A bibliography of low-temperature scanning electron microscopy (LTSEM, Cryo-SEM) and scanning electron microscopy of frozen hydrated biological systems, *Scanning* 9 (5) (1987) 219–225.
- [5] M.S. Brown, Texture of frozen vegetables: effect of freezing rate on green beans, *J. Sci. Food Agric.* 18 (2) (1967) 77–81.
- [6] R. Chambers, H.P. Hale, The formation of ice in protoplasm, *Proc. Roy. Soc. Lond.* B110 (1932) 336–352.
- [7] P. Echlin, R. Paden, B. Dronzek, R. Wayte, Scanning electron microscopy of labile biological material maintained under controlled conditions, in: *Proc. 3rd Ann. IITRI-SEM Symp.*, 1970, pp. 49–56.
- [8] P.J. Fellows, *Food Processing Technology: Principles and Practice*, second ed., CRC Press, Boca Raton, 2000.
- [9] O. Fennema, W.D. Powrie, E.L. Marth, *Low-temperature Preservation of Food and Living Matter*, Marcel Dekker Inc., New York, 1973.
- [10] S. Fujikawa, K. Kuroda, K. Fukazawa, Ultrastructural study of deep supercooling of xylem ray parenchyma cells from *Styrax obassia*, *Micron* 25 (3) (1994) 241–252.
- [11] Y. Furukawa, W. Shimada, Three-dimensional pattern formation during growth of ice dendrites — its relation to universal law of dendritic growth, *J. Cryst. Growth* 128 (1993) 234–239.
- [12] R.M. George, Freezing processes used in the food industry, *Trends Food Sci. Technol.* 4 (5) (1993) 134–138.
- [13] V.B.C. Gustavo, A. Bilge, J.M.L. Danilo, Freezing of Fruits and Vegetables, an Agri-business Alternative for Rural and Semi-rural Areas, Food and agriculture organization of the united nations, Rome, 2005.
- [14] J.O.M. Karlsson, Measurement of intracellular ice formation kinetics by high-speed video cryomicroscopy, *Methods Mol. Biol.* 1257 (2015) 181–227, http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2193-5_7.
- [15] Kawahara H., Characterizations of functions of biological materials having controlling-ability against ice crystal growth, *Intechopen* (20 Feb. 2013), ISBN 978-953-51-1010-1, DOI: 10.5772/54535.
- [16] J. Levitt, Responses of plants to environmental stresses, in: *Chilling, Freezing,*

- and High Temperature Stresses, I, Academic Press, New York, 1980, p. 10.
- [17] B.J. Luyet, M.C. Gibbs, On the mechanism of congelation and of death in the rapid freezing of epidermal plant cells, *Biodynamica* 25 (1937) 1–18.
 - [18] C.P. Mallett, *Frozen Food Technology*, Springer Science & Business Media, 1993.
 - [19] P. Mazur, Freezing of living cells: mechanisms and implications, *Am. J. Physiol.* 247 (3 Pt 1) (1984) C125–C142.
 - [20] P. Mazur, in: H.T. Meryman (Ed.), *Physical and Chemical Basis of Injury in Single-celled Microorganisms Subjected to Freezing and Thawing in "Cryobiology"*, Academic Press, 1966, 213–315.
 - [21] J.J. McGrath, E.G. Cravalho, C.E. Huggins, An experimental comparison of intracellular ice formation and freeze-thaw survival of hela S-3 cells, *Cryobiology* 12 (6) (1975) 540–550.
 - [22] I. Modlibowska, W.S. Rogers, Freezing of plant tissues under the microscope, *J. Exp. Bot.* 6 (3) (1955) 384–391.
 - [23] K. Muldrew, L.E. McGann, Mechanisms of intracellular ice formation, *Biophys. J.* 57 (3) (1990) 525–532.
 - [24] K. Muldrew, L.E. McGann, The osmotic rupture hypothesis of intracellular freezing injury, *Biophys. J.* 66 (2 PT 1) (1994) 532–541.
 - [25] H. Platenius, Effect of temperature on the respiration rate and the respiratory quotient of some vegetables, *Plant Physiol.* 17 (2) (1942) 179–197.
 - [26] W.S. Rasband, J. Image, U.S. National Institutes of Health, 7 Mar. 2016. Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997–2016.
 - [27] A. Sakai, S. Yoshida, Survival of plant tissue at super-low temperature VI. Effects of cooling and rewarming rates on survival, *Plant Physiol.* 42 (12) (1967) 1695–1701.
 - [28] C.A. Schneider, W.S. Rasband, K.W. Eliceiri, NIH image to imageJ: 25 years of image analysis, *Nat. Methods* 9 (2012) 671–675.
 - [29] S. Seki, P. Mazur, The temperature and type of intracellular ice formation in preimplantation mouse embryos as a function of the developmental stage, *Biol. Reprod.* 82 (6) (2010) 1198–1205.
 - [30] K. Shimada, E. Asahina, Visualization of intracellular ice crystals formed in very rapidly frozen cells at -27°C , *Cryobiology* 12 (1975) 209–218.
 - [31] P.L. Steponkus, M.F. Dowgrert, W.J. Gordon-Kamm, Destabilization of the plasma membrane of isolated plant protoplasts during a freeze-thaw cycle: the influence of cold acclimation, *Cryobiology* 20 (4) (1983) 448–465.
 - [32] S.L. Stott, J.O.M. Karlsson, Visualization of intracellular ice formation using high-speed video cryomicroscopy, *Cryobiology* 58 (2009) 84–95.
 - [33] T. Tsuruta, Y. Ishimoto, T. Masuoka, Effects of glycerol on intracellular ice formation and dehydration of onion epidermis, *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 858 (1998) 217–226.
 - [34] M. Uemura, S. Yoshida, Studies on freezing injury in plant cells, *Plant Physiol.* 80 (1986) 187–195.

「タンパク質間相互作用 (PPI) の制御を狙いとする生物活性天然物アルカロイドの構造を基盤とする化合物の合成研究」

神奈川工科大学・応用バイオ科学部・応用バイオ科学科 野田 毅

1. 研究の目的

ゲノム解読以後最も世界的に注目されているエピジェネティクスの分野に貢献できる化合物を創製するため、細胞内のタンパク質間相互作用 (PPI) を調節するような阻害剤のリード化合物となるような新規化合物を見いだすことを目的とする。生物機能を調整する分子として、中分子領域の化合物 (分子量 400 ~ 4000) が注目されている。この領域の化合物には、天然物や糖鎖、ペプチド、核酸医薬などがあり、多様性に富む化合物となっている。本研究では、生物活性天然物の構造に類似した化合物により、構造上、多様性を有する化合物を合成する。

2. 研究の必要性及び従来研究

生体内に存在するタンパク質の多くは、単独ではなく他のタンパク質と協同して機能することが知られている。このようなタンパク質の相互作用を調節する分子を見いだすことができれば、多様な疾患を治療する薬物の発見につながる。タンパク質間相互作用 (PPI) を調節するためには、PPI 界面と多数の相互作用を可能にする分子が不可欠である。現在、このような機能をもつ低分子は、あまり見いだされていない。

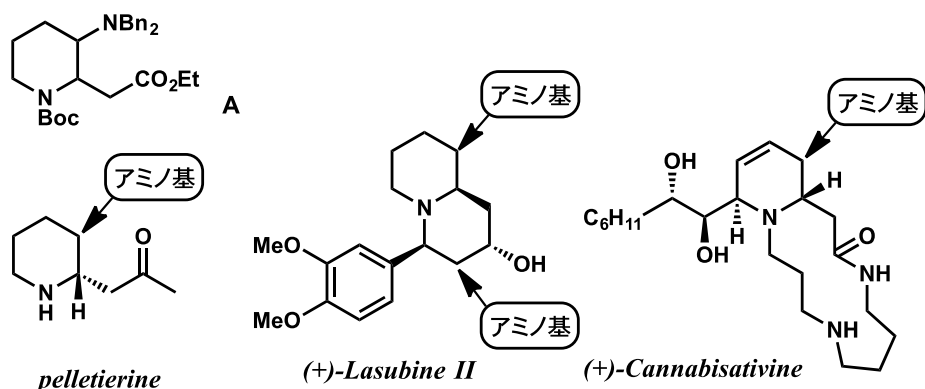
3. 期待される効果

目的とする化合物は、がん細胞の正常化や治療薬の開発が進まない難治性疾患の治療に貢献することができる。また、タンパク質間相互作用 (PPI) を調節する抗体分子と異なり、経口投与、細胞膜、血液脳関門透過性を持たせることが可能でもあり、多くの相互作用分子を提供できる。

4. 研究の経過及び結果

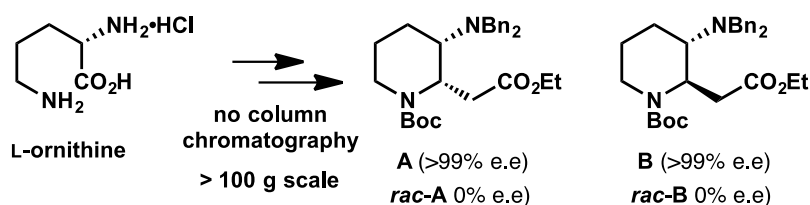
研究計画内容

- (1) ピペリジン **A** に到る環化反応の 100 g スケールでの反応条件の最適化
- (2) **Pelletierine** および **Lasubine II** の骨格をもつ類縁体の効率的な合成法を検討
- (3) 環状ペプチド **Cannabisativine** 骨格に類似した環状ペプチドの合成検討

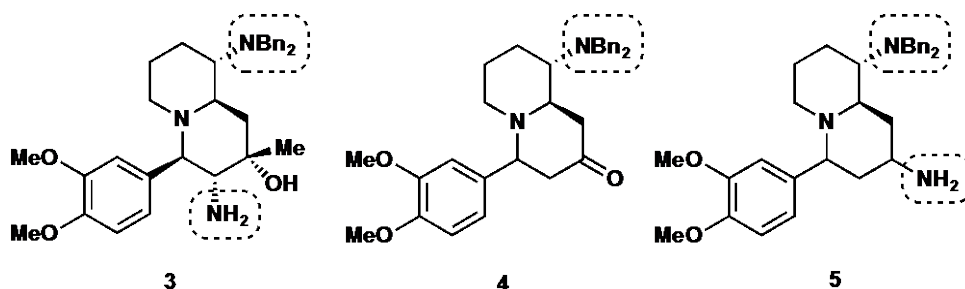


検討結果

- (1) 天然型 L-オルニチン塩酸塩より 2 種のジアステレオマー (**1**, **2**) およびそのラセミ体(*rac*-**1**, *rac*-**2**)の 100 g スケールでの合成ルートを確立した。2 種の光学活性のジアステレオマーの光学純度は 99%であり、ラセミ体を含めた 4 化合物は、原料のアミノ酸よりカラムクロマトグラフィーによる精製操作なしで合成できた。



- (2) **Lasubine II** の骨格を有する 3 化合物 (**3**, **4**, **5**)の合成に成功した。**4**, **5**については、立体化学が未決定である。いずれの化合物も、さらなる誘導化が可能なアミノ基、保護アミノ基を 1～2 つ有している



- (3) 未検討

5. 今後の計画

Lasubine II の骨格を有する合成化合物の立体構造を明らかにするとともに、誘導体合成のための合成法の検討を行う。また、環状ペプチド合成について検討する。

6. 研究成果の発表

- 1) 「Pd 触媒を用いた 2-置換-3-アミノピペリジンの合成研究」 泉水 秀斗・野田 毅
25PA-am067, 日本薬学会第 137 回年会 (2017. 3. 25)
- 2) 「2 環性縮合および架橋ピペリジン骨格の合成研究」 西村 有城・海瀬 和美・宮崎 真子・野田 毅
25PA-am068, 日本薬学会第 137 回年会 (2017. 3. 25)

海岸漂着プラスチックの残留性有機汚染物質の吸着と吸着能評価

応用バイオ科学科 和田理征

1. 研究の目的

プラスチックは、日常に欠かすことのできない材料である。特に、レジ袋などに使用されるポリエチレン(PE)は、プラスチック全体の 25%を占める。しかし、一度自然界に廃棄されると、分解されずに土壌に残ったり、また、最終的に河川から海洋へ流出することになる。プラスチックの世界生産量は、約 3 億 1 千万トンと言われ、このうち、480 万トン～1200 万トンが廃棄管理されず海へ流出していると言われている。特にアジア地域では、全世界のプラスチックの 45%生産され、その約 80%が海洋へ流出していると言われている¹⁾。海洋を漂うプラスチックは、レジ袋に代表されるポリエチレンやペットボトルに使用されているポリエチレンテレフタレート(PET)、断熱材などに使用されるポリウレタン(PU)やポリスチレン(PSt)など、一般に普及しているプラスチックが主である。プラスチックが海岸に流れ着くと、景観だけでなく、鳥類などが餌と間違え摂食することが問題となっている。図 1 に示したように、一部地域では、多くのプラスチックが漂着しているが、その多くは、PET ボトルや漁具である。Gergory の報告によると、鳥類や魚類の胃の中からペットボトルのふたやレジ袋などが見つかった²⁾。このようにプラスチックの環境汚染は、日本のみならず世界規模で起っている。近年では、マイクロプラスチックと呼ばれる 5mm 以下のプラスチックが問題となっている。主に、プラスチックが紫外線で劣化や波などにより物理的に破壊された小さな破片である。この破片を、動物プランクトンや魚類が餌と間違い摂食し、マイクロプラスチックの生物濃縮が懸念されている。



図 1. 海岸に漂着したプラスチック。

海水中には、微量の残留性有機汚染物質(POPs)が含まれていることが知られている。POP の多くは親油性の高い有機化合物であり、疎水性のプラスチックと親和性が高い。つまり、海水中の POPs はプラスチックへ吸着されやすいことを意味している。

本研究の目的は、海岸に漂着したプラスチックが、POP を吸着しているのか否かを調べることである。また、POP がプラスチックへ吸着されている場合、プラスチックからの脱着をオオミジンコの遊泳阻害実験より、POP 脱着の有無を検討した。

2. 研究の必要性および従来研究

海水中には、微量の残留性有機汚染物質(POPs)が含まれていることが知られ、POP の多くは親油性の高い有機化合物であり、疎水性のプラスチックと親和性がある。POP のプラスチックへの吸着は、定期的なモニタリングが必要になる。しかしながら、海岸に打ち上げられるプラスチックは多種多様であり、すべてのプラスチックが POP を吸着するのか不明であり、分別することは困難である。従来研究では、POP 吸着の有無は、新しいプラスチックを海水中に浸漬し、プラスチックへの POP 吸着量を検討したものである。本研究では、海岸に漂着したプラスチックを用

い、POP_s の吸着の有無を検討するものである。特に、海岸漂着プラスチックで、オオミジンコを用いて毒性試験を行った研究は見当たらない。

3. 期待される効果

海岸漂着プラスチックは景観だけでなく、鳥類や魚類のプラスチックの摂食が問題となっている。また、プラスチックは紫外線や波などの物理的に破壊され小さくなる。現在、この小さくなったプラスチック、いわゆる、マイクロプラスチックが問題となっている。マイクロプラスチックは動物プランクトンなどの体内からも見つかり、食物連鎖によってプラスチック濃縮が、さらに、POP_s などが吸着されていると POP_s の生物濃縮が懸念されている³⁾。しかし、POP_s のプラスチックへの吸着の検討は、一部のプラスチックのみ行われているだけである。海岸漂着プラスチックのように、多くのプラスチックについて POP_s 吸着の有無を系統的に検討した報告は見当たらず、また、オオミジンコを用いて毒性試験を行うことによって、安全評価が簡便に行える。

4. 研究経過および結果

本実験で使用する海岸漂着プラスチックは、鹿児島県奄美大島の笠利崎付近で採取したものである。笠利崎付近の海岸には、韓国語や中国語表記のプラスチックが多く打ち上げられていた。日本に漂着するプラスチックは 31~58 万トンと推定され、多くは韓国や中国語表記のものであると言われている。そこで、長い時間漂流していたと考えられる中国語表記のペット(PET)ボトル、特に今回は、PET ボトルの蓋について、POP_s の吸着の有無を検討した。PET ボトルの蓋を FT-IR で測定したところ、ポリエチレンであった。この蓋を用いて POP_s 吸着の有無およびオオミジンコによる毒性試験を行った。

まず、PET ボトル蓋への POP_s 吸着の有無を検討するために、ソックスレー抽出を行った。ソックスレー抽出の溶媒はヘキサンである。次に、24h ソックスレー抽出を行った後、濃縮を行い GC-MS により POP_s 吸着の有無を検討した。一例として、図 1 に一部の PET ボトルの蓋の GC-MS のトータルイオンクロマトグラム(TIC)を示した。

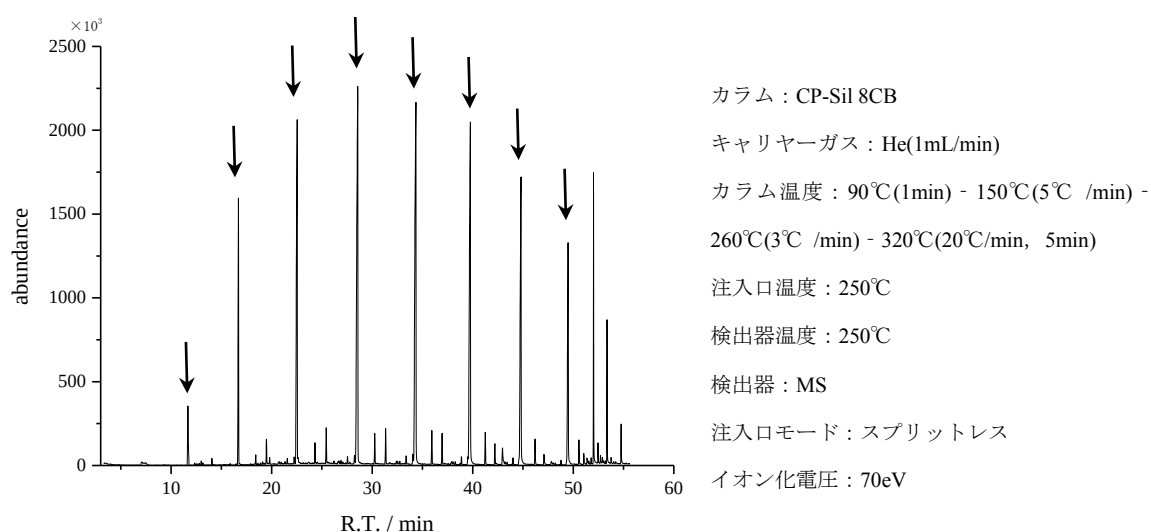


図 1. ヘキサン抽出物の TIC.

図 1 を見ると、多くの夾雑物質が検出された。特に、矢印で示したピークのマスペクトルは、

炭化水素類であった。これは、PE が紫外線あるいは波によって物理的に破壊され、表面の高分子鎖が分解されたのではないかと考えられるが、更なる検討が必要である。また、ヘキサンで抽出する際に、夾雑物質が多くヘキサン中に存在してしまうため、固相カラムによって精製を試みたが、図 1 と同様の結果であった。そこで、有機化合物除去するため、濃 H_2SO_4 で分解して測定を行ったところ、夾雑物質の減少は見られたが、POPs は検出されなかった。また、一部の PET ボト

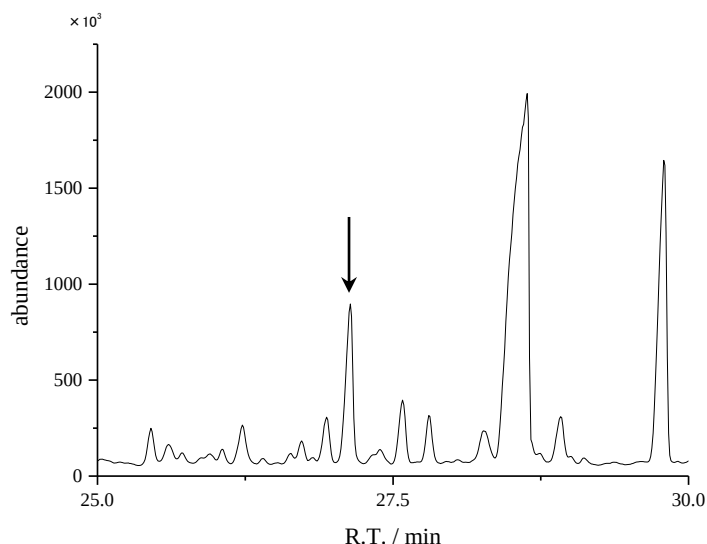


図 2. ヘキサン抽出物 GC-MS のトータルイオンクロマトグラム.

ルの蓋について、マスペクトルを解析したところ、図 2 に示したピークのマスペクトルの m/z 値が 76.0, 104.0, 123.0, 149.0, 223.1 となり、フタル酸ジブチルであった。フタル酸エステル類は、可塑剤や添加剤として使用されているが、主にポリ塩化ビニルである。今回、一部の PET ボトルの蓋からフタル酸ジブチルが検出されたが、PE 由来のフタル酸エステルか不明である。今後の検討課題である。

次に、オオミジンコによる毒性試験を行った。PET ボトルの蓋を水中に浸漬させ、超音波で 15 分間処理を行い、その後 24h 静置した。その水溶液を用いてオオミジンコによる急性遊泳阻害試験 (EC_{50}) を行ったが、急性遊泳阻害は見られなかった。プラスチックから水中への有害物質の脱着はなかったと考えられる。水中への脱着は見られなかったが、GC-MS では多くの夾雑物質が見られたことから、表面には有機化合物が多く存在していると考えられる。そこで、有機化合物の脱着を行うためにジメチルスルホキシド (DMSO) を用い、海岸漂着 PET ボトルの蓋表面からの有機化合物の脱着を試みた。まず、DMSO のみの遊泳阻害を行った。次に、DMSO 中に PET ボトルの蓋を入れて 15 分間超音波処理を行い、24h 浸漬させて濃度調整を行い、オオミジンコによる遊泳阻害実験を行った。オオミジンコの遊泳阻害試験の結果を図 3 に示した。図 3 の ■ は DMSO 中、○ は海岸漂着 PET ボトルの蓋を DMSO 中に浸漬、▲ は市販品の PET ボトルの蓋を DMSO 中に浸漬し、遊泳阻害試験を行った結果である。この図より、48h- EC_{50} を求めたところ、DMSO のみの 48h- EC_{50} は $1.78\text{g/L} \pm 30\%$ 、海岸漂着 PET ボトル蓋は $2.12\text{g/L} \pm 13\%$ 、市販品 PET ボトル蓋は $2.26\text{g/L} \pm 4\%$ であった。オオミジンコの感受性は比較的高いと言われていることから、DMSO の毒性が高い事になる。しかし、変動係数を見ると 30% とかなり大きいため、いずれの毒性はほぼ変わらないと考えられる。

今回の研究では、海岸漂着 PET の蓋を中心に行ったが、海岸に漂着するプラスチック材料は多種多様であるため、PET や PP, PSt, さらには、漁具等を検討する必要がある。今後、検討していく予定である。

5. 結論

海岸漂着プラスチックの POPs 吸着および毒性を調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 今回の実験では、海岸漂着プラスチックから POPs は検出されなかった。しかし、ヘキサン抽出物の一部にフタル酸エステルが含まれていることが分かった。主に PVC に使用されている可塑剤として使用されているフタル酸エステルが、PE の蓋から検出されたことから、PE 由来なのか検討する必要がある。今後の検討課題である。
- (2) オオミジンコの遊泳阻害試験より、POPs などが水中へは溶出することはなかった。しかしながら、継続的に行う必要があるため、今後、同様の検討を行っていく予定である。

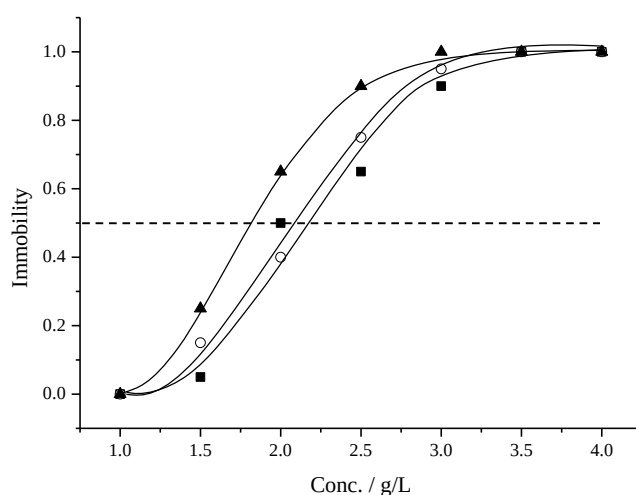


図 3. オオミジンコの遊泳阻害試験.

6. 今後の検討

海岸に漂着するプラスチックは多種多様であり、さらには、小さくなったプラスチックも存在する。今回の研究では、PET ボトルの蓋に着目したが、数多くのプラスチックについて POPs の吸着の有無や毒性試験を行う必要がある。今後、サンプルを増やして行う予定である。

汎用性プラスチックの環境問題が大きくなっているため、汎用プラスチックの代替品として、生分解性プラスチックが再注目されている。しかしながら、生分解性プラスチックは、条件により環境中に残るものが存在する。そのため、汎用性プラスチックの POPs 吸着を同様の環境問題が懸念される。そこで、生分解性プラスチックの POPs 吸着についても検討を行う予定である。

7. 研究成果の発表

この研究は、2016 年度卒業論文³⁾としてまとめた。今後、本研究で得られた成果は、適当な時期に成果発表を行う予定である。

参考文献

- 1) The New Plastics Economy, "Rethinking the future of plastics" World Economic Forum 2016
- 2) M.R.Gregory, *Phil.Trans.R.Soc.B.*, 364, p.2013-2025(2009).
- 3) Chelsea M. Rochman, Eunha Hoh, Tomofumi Kurobe, and Swee J. Teh, *Scientific Reports*, 3, 3263(2013).
- 4) 遠藤雅大, 海岸漂着プラスチックの POPs の吸着と毒性試験, 神奈川工科大学卒業論文, 2017 年

界面活性剤添加型高機能含油廃水処理法の開発と処理メカニズム解析

応用バイオ科学科 局 俊明 市村 重俊 仲亀 誠一 和田 理征
栄養生命科学科 澤井 淳

1. 研究の目的

高濃度の油脂を含む廃水が活性汚泥法などの生物学的水処理システムに流入すると、処理機能が低下することが報告されている。しかしながら、グリーストラップに代表される固液分離法では、油脂の分離が十分に行われていない実態が明らかになっている¹⁾。この油分の分解に関して、近年、界面活性剤を用いて油脂を分散させたうえで微生物処理を行う方法が、高い油分除去率が得られ、また小型装置での油分除去が可能な処理方法として注目されている。

そこで、本研究では、界面活性剤を添加した生物処理法のメカニズム、原理を解明することで、同処理方法の最適運転方法に関する知見を獲得し、その知見に基づき、油分含有廃水の新規・高効率処理方法を開発することを目的とする。

2. 研究の必要性及び従来の研究

(背景と研究の必要性)

廃水中に含まれる油分による環境汚染は大きな社会問題となっている。我々は、これまでの研究の中で廃水中に含まれる油分の分解に関して、生物処理工程において界面活性剤を添加することにより、1) 油分分解速度が上昇する、2) 生物の沈降性が改善される、3) 膜分離法に適用すると膜閉塞の問題が緩和される、4) 界面活性剤の添加濃度によって油脂の生物分解は促進される場合と効果が見られない場合がある、5) 界面活性剤添加濃度はCMCより低い濃度でも油脂除去効率の改善効果が得られる、等の知見を得た。

しかしながら、上述のような効果が得られるメカニズム、原理の解明には至っていない。廃水中の油分散・再凝集、生物分解性と界面活性剤に関わる研究は世界的に見てもほとんど行われておらず、特にメカニズム解析に関する既往の研究は見い出せない。ここで、界面活性剤を添加した生物処理法のメカニズム、原理が解明されれば、その成果は学術的に非常に高い価値を持つのみならず、同処理方法の最適運転方法に関する知見獲得や、油分含有廃水の新規・高効率処理方法の開発に結び付く社会的に非常に意義のあるものとなる。

(既往の研究・技術)

既往の含油廃水処理に関する研究としては、固液分離等の物理化学処理や微生物製剤処理に関するものが行われているが、界面活性剤を用いた生物処理方法に関する研究はほとんど行われておらず、特に、反応メカニズムに関する研究例は見いだせない。ただし、現場レベルでその効果があることが認められたとの報告はあるが、界面活性剤の選定や添加

量は経験工学の領域を脱していない。さらに、膜分離活性汚泥法に界面活性剤を添加した場合の膜の閉塞（ファウリング）に関する研究例は、他に類を見ない。

3. 期待される効果

本研究によって、界面活性剤添加による生物学的油脂分解性向上のメカニズムが解明できれば、最適界面活性剤の選定や、最適添加量の決定が可能となり、省エネルギー、小コスト、省スペース型の含油廃水処理装置の開発が可能となる。特に、膜分離活性汚泥法における膜閉塞を防止できれば、処理エネルギーの大幅な削減が可能となる。

また、有用微生物/微生物製剤やリパーゼを用いた生物/酵素利用処理においても、界面活性剤の作用により油脂が微細化（乳化/エマルジョン化）されることにより、生体触媒と油脂の接触効率が改善し、生体触媒の本来有する機能をより活用できることも期待される。

4. 研究の経過及び結果

4. 1. 界面活性剤添加による活性汚泥分離膜ろ過抵抗への影響^{3) 4)}

図1に示すような構成の実験装置3系列を用いて、膜分離型活性汚泥法による含油排水の処理実験を行った。1系列は通常の回分活性汚泥系列（コントロール）、残りの2系列はそれぞれ界面活性剤Aおよび界面活性剤B添加系列とした。流入水は一定流量でポンプによりリアクターに流入させた。処理水は処理水槽からポンプにより、流入水流量と同じ速度でリアクターに隣接させた処理水槽から引き抜きを行った。膜の閉塞が進むにつれて、処理水槽の水位が低下し、差圧が増大するため、日間平均ではほぼ定流量実験が可能となる装置構成である。運転

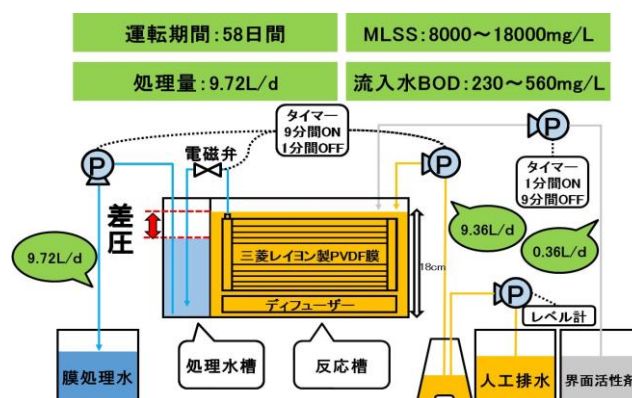


図1 膜分離活性汚泥法実験装置フロー

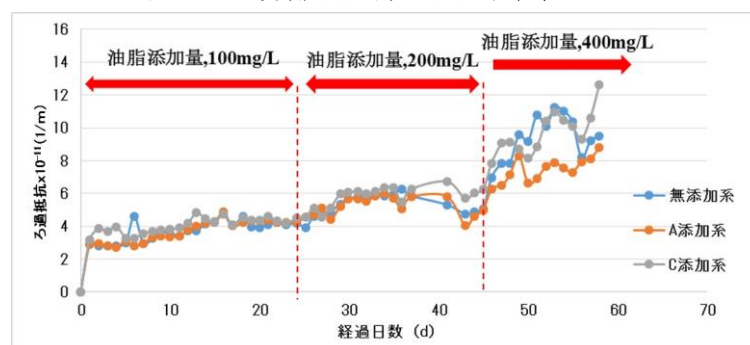


図2 ろ過抵抗の経日変化

期間は、3期に分け、流入水中の油脂濃度を100mg/L、200mg/L、400mg/L、界面活性剤添加濃度を0.17mg/L、0.85mg/L、0.85mg/Lと段階的に変化させた。

図2に、運転期間中のろ過抵抗値の経日変化を示す。油脂添加濃度が200mg/L以下の条件では、各系列の膜のろ過抵抗値に明確な差は見られなかったが、油脂添加濃度を400mg/L

とした実験水準では、界面活性剤A添加系列が他の系列と比較して低いろ過抵抗値を示し、分離膜の閉塞が抑制されていることが示唆された。

4. 2 白色腐朽を用いた含油廃水処理⁵⁾

界面活性剤添加型含油処理における界面活性剤添加効果は、油脂を微細化/乳化/懸濁させ、微生物との接触効率を高めることにあると考えられるが、より効率的な処理達成のためには高い油脂分解性を有する微生物を使用する必要がある。そこで、白色腐朽菌である *Ceriporiopsis subvermispora*、シイタケ、ヒラタケの油脂の分解能を調査した。

実験は、GP 培地ならびに $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を N 源として用いた合成培地に前培養後の菌体、脂質(オレイン酸または菜種油)を添加し 26℃で 2 週間振盪培養し、Bligh-dyer 法により油脂を回収し、油脂の回収率を求めた後、TLC により、培養液中に残存する油脂の定性を行った。脂質の回収量を図 1 に示す。図 1 に示されたように、ヒラタケが最も低い油

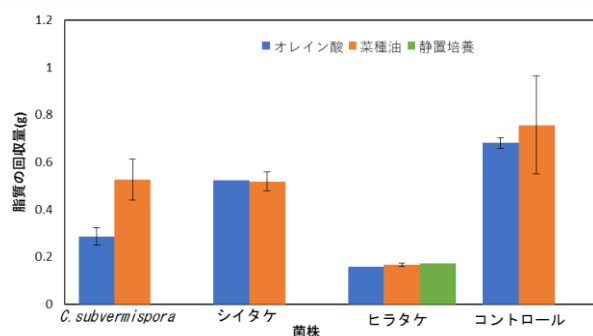


図1.Bligh-dyer法による脂質の抽出

脂回収率を示し、ヒラタケのリパーゼ生産量が大きいことが示唆された。また、TLC 分析により高級脂肪酸の生成が確認され、リパーゼの生成が TLC 分析結果からも示唆された。

5. 今後の計画

H28 年度までの結果から、膜分離法に界面活性剤 A を油脂に対して 1/200~1/400 程度投入することにより、ろ過抵抗を低減できることが確認された。今後は、最適界面活性剤の選定と最適添加量の決定が課題となる。また、界面活性剤と特定の微生物（白色腐朽菌、乳酸菌、枯草菌等）の併用による効率的処理方法の確立と、処理メカニズムの解明により最終的には、最適化された“界面活性剤-微生物製剤併用型生物処理方法”の確立につなげたい。

6. 研究成果の発表

本研究の詳細は卒業論文^{2) 3) 4)}にまとめた。今後、本研究で得られた成果は、特許出願を考慮しつつ、適当な時期に成果発表を行う予定である。

(引用文献)

- 1) 渋谷広樹、営業用飲食店におけるグリース阻集器の実態調査、第 33 回建築物環境衛生管理全国大会（2006）
- 2) 北野海、界面活性剤添加による MBR 膜ファウリング抑制効果の検証、神奈川工科大学応用バイオ科学科卒業研究論文、2017 年 2 月
- 3) 丸山竜平、界面活性剤添加の与える汚泥性状と膜ファウリングへの影響、神奈川工科大学応用バイオ科学科卒業研究論文、2017 年 2 月
- 4) 福澤雄輝、白色腐朽菌を用いた油脂の分解の検討、神奈川工科大学応用バイオ科学科卒業研究論文、2017 年 2 月

リグノセルロースからのイソプレン製造法の開発

研究者名：応用バイオ科学科 仲亀 誠司

1. 研究の目的

再生可能資源であるリグノセルロースから基幹化成品中間原料（イソプレン）を製造する方法を確立することが本研究の目的である。今までの多くの研究開発にも関わらず、リグノセルロースを用いた化成品原料の製造が実用化に至らない原因は、リグノセルロースが物理的に強固であり、多成分から構成されるために製造工程が複雑になるためである。本研究では、基幹化成品中間原料であるイソプレン合成能を有する白色腐朽菌を分子育種により作製して、バイオリファイナリーに活用により製造工程の簡略化を図ることにある。

2. 研究の必要性及び従来の研究

CO₂ 排出量の削減や海外へのエネルギー依存度軽減のために、再生可能資源であるバイオマス資源を用いた輸送用燃料や化成品原料の製造（バイオリファイナリー）の研究開発が、世界的に行われてきている。しかし、現在までに実用化されているバイオリファイナリー技術は、トウモロコシなどの可食性バイオマスを原料として用いているため、食品価格の高騰を招くという弊害が生じている。また、爆発的な人口増加の予測にも関わらず、食料をバイオリファイナリー原料として利用することへの強い懸念がある。更には近年の米国におけるシェールガス生産量の増加より、エチレン製造を目的としたナフサの熱分解設備の縮小が見込まれており、世界的にイソプレン等の C₄, C₅ 化合物の生産量の減少が見込まれている。このような背景から食料と競合しない非可食性バイオマスであり、多糖類（セルロース、ヘミセルロース）と芳香族化合物(リグニン)からなるリグノセルロースの炭素骨格を最大限活用した化成品原料の製造プロセスの早期開発が強く求められている。しかし、多くの研究開発にも関わらず、リグノセルロースを用いた化成品原料の製造が実用化に至っていない。この原因としては、リグノセルロースが物理的に強固であり、多成分から構成されるために、発酵原料となる多糖類をリグノセルロースから取り出すために必要な工程（前処理工程）、多糖類をセルラーゼ等の加水分解酵素で糖化する工程（酵素糖化工程）、単糖類を有用物質に変換する工程（発酵工程）、不純物を取り除く工程（精製工程）というように製造工程数が多くなるために、可食性バイオマスを原料とする場合と比べて製造費用が高くなることがあげられる。

イソプレン（C₅H₈）は原油由来のナフサを熱分解した際の副産物であり、工業的に年間約 40 万トン生産されている。イソプレンの主な用途はポリイソプレンゴム（IR）であり、用途の 90%以上を占めている。今後、東南アジア諸国におけるタイヤ需要の拡大が見込まれており、天然ゴムと同等の性能を有する IR は天然ゴム代替素材として重要な素材となる。しかし、上述のようにナフサの熱分解設備の縮小が見込まれており、世界的に原油由来の

イソプレン生産量の低下が見込まれている。イソプレンは、植物の葉緑体内で非メバロン酸経路による生産が知られており、イソプレン合成遺伝子がポプラやクズから単離されている¹⁾。非メバロン酸経路の最終生成物の一つであるジメチルアリル二リン酸 (DMAPP) は、イソプレン合成酵素によってイソプレンへと変換される。これらの植物由来のイソプレン合成遺伝子の塩基配列を最適化して遺伝子導入することで酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*)²⁾ や、大腸菌 (*Escherichia coli*)³⁾ 等がイソプレン発酵能を持つようになったとの報告がある。しかし、*S. cerevisiae* や *E. coli* の形質転換体を用いたイソプレン製造における炭素源は精製されたグルコースであり、リグノセルロースを炭素源としたイソプレンの製造は実現していない。また、イソプレン発酵能を持つ *E. coli* の形質転換体を用いた際の収率 8% が、既往の研究におけるイソプレンの最大収率であり、実用化には更に収率をあげる必要がある。

白色腐朽菌はリグノセルロースを分解できることを特長とする微生物であり、リグノセルロースの成分の中で難分解性の化合物であるリグニンを分解することができるため、バイオリファイナリーにおける前処理工程においてリグニンの除去のために利用する研究が行われている。しかし、イソプレン等の有用物質の発酵能を白色腐朽菌に付与し、リグノセルロースから直接製造する研究は行われていない。

本研究では、基幹化成品中間原料であるイソプレン発酵能を有する白色腐朽菌を分子育種により作製し、リグノセルロース原料から直接イソプレンを製造する方法の確立を目指している。

3. 期待される効果

基幹化成品中間原料であるイソプレン発酵能を有する白色腐朽菌を分子育種により作製し、バイオリファイナリーに応用することで、リグノセルロースからのイソプレン製造の実用化への道筋を示すことができる。また、本方法の成功により基幹化成品中間原料をリグノセルロースから製造することが可能となり得る。将来、本プロセスが実用化された際には、イソプレンを製造するための化石資源の使用量を軽減させることができるため、低炭素社会の実現に貢献できる。

4. 研究の経過及び結果

4.1 イソプレン合成遺伝子の構築

Pleurotus ostreatus (ヒラタケ) CECT 20311 のゲノム DNA をテンプレートとして、PCR 法により *gpd* 遺伝子のプロモーター領域とターミネーター領域をそれぞれ増幅させた。本増幅断片と塩基配列をヒラタケに最適化させたイソプレン合成遺伝子の ORF をダブルジョイント PCR 法で連結させた (図 1)。電気泳動後、目的産物 (4.4 kbp) のバンドを切り出し、Fast Gene Plasmid Mini Kit を用いて DNA の抽出をした。また、TA クローニングキットを用いてクローニングを行い塩基配列の確認をした。



図 1. イソプレレン合成遺伝子の模式図

4.2 プロトプラストの形質転換

ハイグロマイシン B 耐性マーカー遺伝子 (pPO_btub_HG6) とイソプレレン合成遺伝子 (pPO_gpd_Isp_6) を用いて本菌株の形質転換を行った結果、プレート 1 枚あたり 24 個のコロニーが再生され、合計で 171 個の形質転換体を得られた。一方、遺伝子導入を行わなかった場合には、プレート 1 枚あたり 5 個のコロニーが生成された。形質転換体 50 個を、ハイグロマイシン B (150 mg/mL) を含む YMG 培地に植え継いだところ、11 個の菌株の生育が確認された。PCR 法による確認により、本形質転換体にはイソプレレン合成遺伝子が含まれることがわかった。

5. 今後の計画

リグノセルロースを原料とした際の本形質転換体によるイソプレレン生産能について調べる。また、生産性を向上させるための最適なプロモーターについても調査を行っていく。

6. 研究成果の発表

本研究の詳細は卒業論文⁴⁾にまとめた。今後、学会発表等の成果発表を行う予定である。

(引用文献)

- 1) Sharkey, T. D., Yeh, S., Wiberley, A. E., Falbel, T. G., Gong, D. M., Fernandez, D. E., "Evolution of the isoprene biosynthetic pathway in Kudzu." *Plant Physiology*, 137(2).700-712.
- 2) Hong, S. Y., Zurbriggen, A. S., Melis, A. "Isoprene hydrocarbons production upon heterologous transformation of *Saccharomyces cerevisiae*." *Journal of Applied Microbiology*. 113. 52-65.(2012).
- 3) Zurbriggen, A., Kirst, H., Melis, A. "Isoprene Production Via the Mevalonic Acid Pathway in *Escherichia coli* (Bacteria)." *Bioenergy Research*, 5(4). 814-828 (2012).
- 4) 小田部 恵美、ヒラタケを用いた非可食性バイオマスからのイソプレレンの製造、神奈川工科大学応用バイオ科学科卒業研究論文、2017 年 2 月

維持透析患者の足切断を予防する対策の検討 ー足病変のチェックシートを改訂し、その効果を検証ー

神奈川工科大学看護学科 田村 幸子

1. 研究目的

足病変のチェックシートの判断基準・判断マニュアルを検討して改訂し、数施設で試用し、その効果を検証する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

透析患者は血流障害による足病変のリスクが高く、下肢切断に至った事例が多く報告されている。しかし、適切なケアにより下肢切断の85%は防ぎ得る(1987. Edmonda ME)との報告もある。足病変の予防ツールもいくつか発表されている。これらを駆使した予防的ケアが期待されるが、ケアを担う透析看護師はケアの実施に困難感をもっている。我々は2014年からの過去5年間で1県の全透析施設(約40施設)を対象に実態調査を行い、透析看護師が行なっているフットケアの実情と課題を明らかにした。課題とは透析療法中は安全管理と偶発症状への対処に主眼が置かれており、フットケアの重要性は認識しているものの簡便に行なえる方法が確立されていないことであった。そこで我々は、透析看護師が簡便に実施できる独自の足病変のチェックシートを作成し、複数施設で3ヶ月間試用した。その結果、フットケアの実施率は確実に向上したが、新たな課題が明らかになった。課題とは透析看護師による足病変の臨床判断が弱い点であった。

3. 期待される効果

フットケアチェックシートの判断基準・判断マニュアルを改善して用いることで、透析看護師による足病変の臨床判断が向上し、患者と家族への予防的セルフケアへの指導につながる。

4. 研究の経過及び結果

透析看護師による足病変の臨床判断の向上を目差すため、共同研究者で検討した結果、第1版フットケアチェックリストを以下のように改善することになった。

- ① 事前チェック項目に、関連疾患と血液凝固阻止関連薬剤使用の有無の項目を追加
- ② 観察項目に、足の変形とその他(靴・歩行状態・姿勢など)の項目を追加

一方、2016年度に診療報酬改訂でフットケアの診療報酬加算が新設され、慢性透析患者の下肢末梢動脈疾患重症化の予防は国の施策として取り組まれることになった。

下肢末梢動脈疾患管理加算

慢性透析患者の下肢末梢動脈疾患のリスクを評価し、療養上必要な指導管理を行った場合は、診療録に記録した限り、月1回を限度として100点を加算する。

【申請の条件】

- ★ABI または SPP によるリスク評価を行っていること
- ★ABI<0.7 または SPP<40mmHg の患者に対しては同意を得た上で、専門的治療体制を有する保険医療機関に紹介を行っていること
- ★連携を行う専門的治療体制を有する保険医療機関を定め、地方厚生局に届け出ていること。

以上の理由により、我々の作成した第1版フットケアチェックリストのチェック項目について再考する必要、および県内の全透析施設（約40施設）を対象に実態調査を行って、フットケアの診療報酬加算新設後の県内施設の状況変化を把握する必要も浮上してきた。このため、我々は2016年11月に実態調査を実施した。

調査依頼に対し回答のあった施設27施設（回収率70%）の結果では、フットケアは96%の施設が実施、チェックリストは89%の施設が使用、ABI検査は85%の施設が実施、SPP検査は33%の施設が実施、足病変のリスク評価は75%の施設が実施、セルフケア指導は89%の施設が実施しており、2014年の前回調査よりフットケアの実施状況は確実に向上していた。しかし前回調査での課題であった「透析看護師による足病変の臨床判断が弱い点」は、今回でも同じくあげられていた。また新たな課題として、専門的治療体制を有する保険医療機関に紹介を行う施設（86%）に対して、連携を行う専門的治療体制を有する施設（14%）が少ない現状から、施設連携の課題が浮上してきた。

したがって今後の課題は、以下のとおりとなった。

- ① 事前チェック項目ではABI検査を必須項目として重視する
- ② チェックシートの判断基準・判断マニュアルをさらに具体化する
- ③ チェックシートを用いたフットケアシステムを介して県内施設の連携強化をはかる

5. 今後の計画

- ① チェックシートと判断基準・判断マニュアルを改訂し、公表する。
- ② 透析看護師による足病変の臨床判断を向上させるために、改訂版チェックシートおよびその判断基準・判断マニュアルを用いた研修会を開催する。
- ③ 協力の得られる複数施設において改訂版チェックシートを用いたフットケアシステムを構築し、転院などの機会にチェックシートを用いて引継ぎを行う。これらのプロセスを介して県内施設の連携強化をはかる。

6. 研究成果の発表

- ① 28th International Nursing Research Congress（第28回 STTI 国際看護研究学会）/で発表予定
Ireland（アイルランド）7/27－7/31 開催

発表タイトル：Status of Foot Care for Chronic Dialysis Patients and Issues with Implementation（慢性透析患者のフットケアの実態と実施上の課題）

発表者：田村 幸子（神奈川工科大学看護学科）

② 第8回石川腎不全看護研究学会で発表予定

加賀市医療センターKMC ホール 8/5 開催

発表タイトル：1 県内透析施設のフットケアの現状

発表者：橋本 智美（石川県立中央病院看護部）、大田一美（加賀市医療センター看護部）、田村 幸子（神奈川工科大学看護学科）

③ 第20回日本腎不全看護学会で発表予定

森岡地域交流センター、いわて県民情報交流センター 10/21-10/22 開催

発表タイトル：透析施設のフットケアの現状と課題（仮称）

発表者：橋本 智美（石川県立中央病院看護部）、大田一美（加賀市医療センター看護部）、田村 幸子（神奈川工科大学看護学科）

以上