

神奈川工科大学

環境化学技術研究所

研究報告

第 10 号

2020 年度

目次

- ・ 廃棄物による廃水処理—古紙を用いた廃水の高度処理方法の開発

応用バイオ科学科 局俊明、仲亀誠司

管理栄養学科 澤井淳

- ・ 医療材料としての抗菌性ハイドロゲルフィルムの創製

応用バイオ科学科 和田理征、清水秀信

基礎教養教育センター 三井和博

- ・ 大気圧非熱平衡プラズマ下における電気流体と微粒子の帯電・軌道解析及び
その妥当性の検証

電気電子情報工学科 瑞慶覧章朝

廃棄物による廃水処理—古紙を用いた廃水の高度処理方法の開発

応用バイオ科学科 局 俊明 仲亀 誠司
管理栄養学科 澤井 淳

1. 研究の目的

本研究の延長線上にある最終目的は「低質古紙を用いた高効率下廃水高度処理システムの開発」であり、本研究段階では、最終目的達成に向けて、「古紙を効率的に還元剤/BOD成分まで分解できる微生物を選定」し、「有用微生物の反応タンク内定着性を評価」し、「古紙分解効率化のための古紙の前処理方法を確立」し、「古紙分解反応タンクの最適運転条件を明確化」した上で、「システムとしての評価を行う」ことにある。最終年度に当たる本年度は、昨年度までの成果をベースに、1) 超高温菌利用によるさらなる分解速度の向上、2) 未分解古紙繊維分による脱水性向上効果の検証、3) システムの総合評価、を実施した。

2. 研究の必要性及び従来の研究

湖沼や内湾等の閉鎖性水域において、アオコや赤潮の発生に代表される富栄養化が問題となっている。富栄養化の主たる原因は、下廃水中に含まれる窒素（以下 N と記す）とリン（以下 P と記す）であり、下廃水中の N/P の除去が喫緊の課題となっている。

現在、下廃水中の N/P 除去方法の代表的なものは、図 1 に示す嫌気（Anaerobic）-無酸素（Anoxic）-好気（Aerobic）法（以下 A2O 法と記す）である。この方法における N 除去の原理は

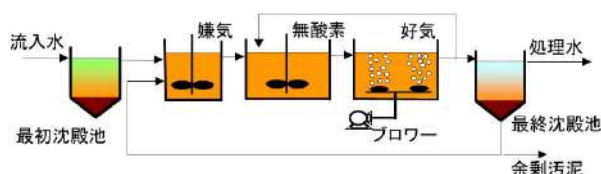


図1 嫌気-無酸素-好気法(A2O法)フロー

好気槽で硝化細菌の作用で生成した硝酸性あるいは亜硝酸性窒素を無酸素槽に返送し、無酸素槽において脱窒細菌の作用で無害な窒素ガスに変換し大気放散するものであるが、脱窒細菌が硝酸性あるいは亜硝酸性窒素を窒素ガスに変換するには還元剤が必要である。また、P 除去の原理は、微生物を嫌気槽と好気槽の間を循環させると、リン除去細菌（体内にリンを高濃度に蓄積する細菌）が増殖し、リン除去細菌を余剰汚泥として引き抜く際に P を余剰汚泥中成分として除去するものである。ここで、リン除去細菌を増殖させるためには、嫌気槽の嫌気度を上昇させる、言い換えれば嫌気槽を還元的雰囲気にする必要がある。以上のように、A2O 法における効率的 NP 除去には、還元剤が必要である。ここで、還元剤として、流入水中の生物が利用できる還元性成分である BOD 成分が十分に存在する場合、具体的には流入水の BOD/N 比が 3.5 以上の場合には高い NP 除去率が期待できる。しかしながら、我が国の一般的下水の BOD/N 比は 2.5 以下であり、高い NP 除去効率達成のために、還元剤としてメタノールや酢酸などの

有機物が添加される場合もあるが処理コストの増大が問題となる。このため、メタノール等に代わる安価な還元剤の開発が求められており、筆者らは古紙を生物分解してメタノール代替の還元剤として使用することを提案した。

下水処理に用いる還元剤の既往の研究としては、下水処理場最初沈殿池汚泥の一部を還元剤として利用する研究が行われたが、沈殿池汚泥はN分も含むため、C/N比の改善効果は小さいことが示されている。また、下水処理分野における古紙の利用に関しては、引き抜き汚泥の脱水前に、古紙を添加することによって脱水ケーキの含水率を低下させる検討が実施され、古紙添加により含水率が10%程度低下するとの報告がされている。

3. 期待される効果

古紙成分を生物学的に、還元剤成分に転換することができれば、メタノール使用量を削減することが可能となり、処理のコストダウンとともに、下水高度処理の普及が期待できる。また、未分解の古紙成分が余剰汚泥中に残存した場合、汚泥の脱水性が改善され、汚泥焼却工程における助燃剤の使用量低減効果も期待できる。また、古紙として、再生紙製造に不向きなミックス古紙が使用できれば、現在焼却処理されているミックス古紙の資源化が可能になる。

4. 研究の経過及び結果

昨年度までの研究(図2)では、使用する微生物として嫌気性消化槽汚泥(メタン発酵汚泥)を選定した。しかしながら、この微生物を用いた実験結果を用いて試算すると、古紙分解反応タンクの容積が、下水高度処理リアクターの容積より大きくなるという結果となり、反応速度の大幅な向上が必要であるとの結果となった。反応速度向上手段として、リアクター

の水温の上昇が考えられるが、メタン菌が高活性を有する35℃あるいは55℃付近では、可溶化された古紙がメタンガスに変換されてしまい、本研究の目的である還元性物質の収率が添加してしまうため、酢酸資化性メタン菌の至適温度を越え65℃程度まで水温を上昇させ、加水分解速度向上と、ガス化抑制を狙った実験を行った。

実験には、昨年度よりスケールアップした有効容積24Lのリアクターを用い、嫌気性消化槽から採取した汚泥にトイレトペーパーとドッグフードを所定量添加し、25℃から1

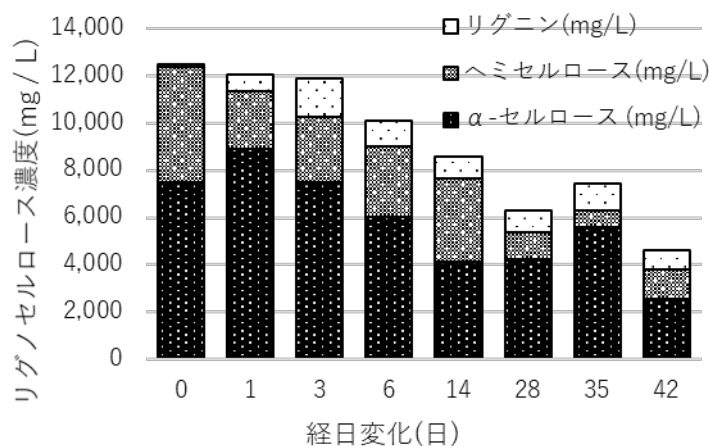


図2 回分実験におけるリグノセルロース濃度の変化

週間に 10℃ずつ水温を 65℃まで上昇させた。その結果、リアクター内でのセルロースの分解は確認できなかった。一方、同様に 24L のリアクターを用いて 20～25℃程度の室温条件下で実施した実験では、44 日間で 16000mg/L の還元性物質（S-BOD 成分）の生成が認められた。昨年度のおよそ 4.5 倍の生成量であった。今年度の実験で、昨年度より高い反応速度、分解率が得られた理由としては、装置が大型化し、攪拌強度が増大したことが考えられる。

さらに、古紙分解反応タンクからサンプリングした内容物を、ろ過し、そのろ液を測定した場合と、同内容物を、純水で 10 倍程度に希釈してからろ過操作を行い、そのろ液を測定した場合を比較すると、原液換算で後者はほぼ 2 倍の S-COD 濃度を示した。このことは、溶解性の還元性成分が汚泥に吸着していることを示唆しており、実際のシステムにおいて、最初沈殿池前の段階で古紙分解液を投入することにより、古紙分解液からより多くの還元性物質が溶出し、古紙分解リアクターのさらなる小型化、あるいは古紙使用量の低減が可能であると考えられた。

次に、未分解古紙による脱水性向上効果の検証実験を実施した。結果としては、古紙分解液の投入比率が上昇すると、期待に反して、脱水性が低下した。この理由としては、未分解古紙成分は残留するものの、一般的に脱水性が低いとされる嫌気性汚泥が投入されることの影響の方が強く出ることが考えられた。しかしながら、古紙粉砕物を脱水直前に投入することにより、古紙投入による含水率低下分以上に脱水ケーキの含水率が低下し、古紙粉砕物の添加が脱水性向上に寄与することが示された。また、余剰汚泥、古紙分解液および古紙粉砕物の混合比率の関数として脱水ケーキの含水率を推定する式を提案し、推定値（計算値）は、実測値とほぼ一致することを示した（図 3）。

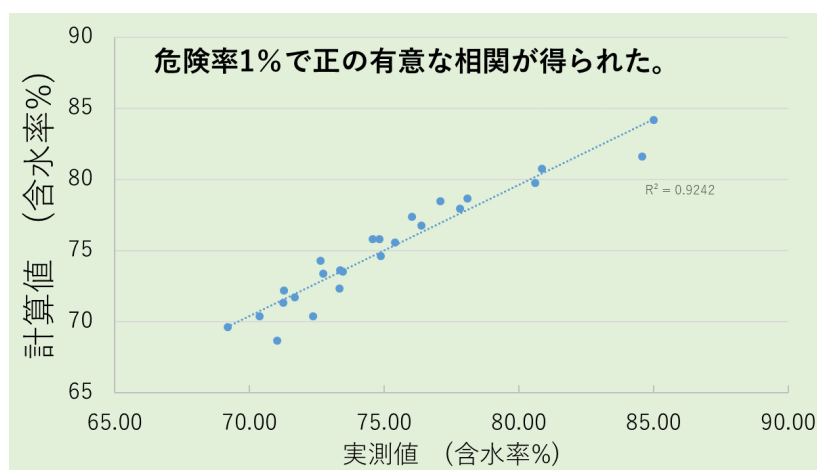


図 3 脱水ケーキ含水率に関する実測値と計算値の関係

以上より、古紙分解リアクターを用いた下水高度処理システムの構成として、図 4 に示すシステムを提案した。

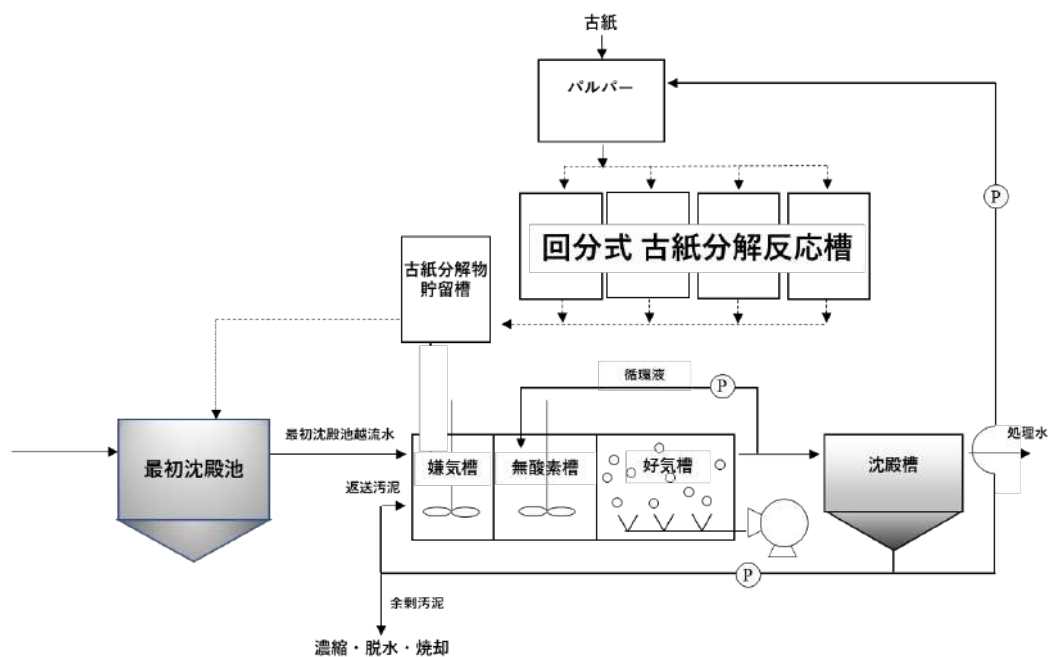


図4 提案システム構成図

5. 今後の課題

これまでの研究から、本提案システムは、廃棄物である古紙を用いて廃液を処理するシステムとして実用化できる可能性を示すことができた。ただし、実用化のためには、大型のパイロットスケールでの実証実験が必要であるとともに、より安価で、逆有償化も可能性のあるミックス古紙の利用についても検討する必要がある。

6. 研究成果の発表

研究成果をまとめ査読付き論文¹⁾として公表した。

また、本年度の研究の詳細は卒業論文^{2) 3) 4)}にまとめた。

(引用文献)

- 1) 杉之間大貴ら、古紙分解物添加型下廃水高度処理システムの開発、用水と廃水、vol.32,No.5,pp356-362(2020)
- 2) 臺 拓海、超高温菌によるセルロースの分解、神奈川工科大学応用バイオ科学科卒業研究論文、2021年2月
- 3) 山内 哲志、古紙を用いた下水高度処理の研究—超高温環境下における還元剤成分の生成—、神奈川工科大学応用バイオ科学科卒業研究論文、2021年2月
- 4) 波多野 裕佳、古紙を用いた高度下水処理の研究—超高温菌の実用性評価と今後の展望—、神奈川工科大学応用バイオ科学科卒業研究論文、2021年2月

医療材料としての抗菌性ハイドロゲルフィルムの創製

応用バイオ科学科 和田理征, 清水秀信

基礎教養教育センター 三井和博

1. 研究目的

ポリ(ビニルアルコール)(PVA)は、透明性、含水性、生分解性を示す合成高分子である。また、成型加工性に優れた高分子材料の一つであり、工業分野では接着剤や乳化剤、偏光板などの材料として使用されている。さらに、PVA は高い酸素バリア性を有することから食品包装として、また、細胞培養のスキャホールドや再生医療などへの応用が期待される材料である。

PVA は、水などの溶媒に高温で溶解し、その溶液を冷却すると熱可逆性ゲルへ転移することが知られている。このゲルは物理架橋ゲルと呼ばれ、成型加工性に優れているが温水中で容易にゾル化する欠点がある。これに対し、化学架橋ゲルと呼ばれる PVA 鎖どうしを化学的に架橋したゲルでは、熱的性質が大幅に向上する。

キチンは、カニやエビなどの甲殻類やキノコなどの細胞壁に含まれ、自然界に豊富に存在する。キチンは水に不溶で成型加工性に劣るが、キチンを脱アセチル化すると酸性条件下で溶解するキトサンとなる。キトサン(Cs)はキチンと同様に毒性がなく、安全性が高いといわれている。さらに、ポリカチオンである Cs は、細菌に対して抗菌性を示すことが知られ、抗菌活性を有する材料の一つである。しかしながら、PVA に比べて成型加工性に劣る。

今日では、抗菌性が付与された日用品は多く商品化されている。これらの商品は、例えば、プラスチックに抗菌性の有機化合物を練り込んだり、無機物であるリン酸塩や金属(銀、銅、亜鉛など)イオンを担持させた商品である。いずれの商品もドライ状態で使用を考えたものである。しかしながら、カビや細菌の温床といわれるウェットな状態で、毒性がなく、生体適合性に優れた材料に抗菌性を付与した日用品は見当たらない。

本研究では、抗菌活性を有するハイドロゲルフィルムの開発を目的としている。粘弾性的性質に優れた PVA と抗菌活性を有するキトサン(Cs)をブレンドすることによって、抗菌性ハイドロゲルフィルムが作製できると考えられる。しかしながら、PVA/Cs ブレンド物理ゲルは温水中でゾル化するため、PVA を化学架橋する必要がある。そこで本年度では、毒性が少なく、食品添加物に使用されているクエン酸を PVA の架橋剤に選び出し、PVA を CA で化学架橋する方法および PVA と Cs をブレンドして架橋する方法について検討することを目的とした。

2. 研究の必要性および従来研究

PVA ゲルの研究は、1950 年代から活発になり、ゲルの力学特性やメカニズムについて物理ゲルの研究報告が数多くされている。特に、PVA 物理ゲルの力学特性を向上させる方法として、凍結解凍法や水と有機溶媒の混合溶媒中でゲルを作製する方法が報告されている。いずれの報告も物理ゲルであり、多くが力学特性を向上させるものであるが、熱的性質は低いという欠点がある。PVA 物理ゲルの欠点である熱的性質を向上させるために、PVA 鎖どうしを化学的に架橋する方法がある。一般に化学的に架橋させたゲルは、熱的性質が大幅に向上する。PVA の場合、架橋剤にグルタルアルデヒド(GA)が用いられる。PVA 鎖を GA で化学架橋すると熱的性質は向上するが、

GA は生体毒性があるために完全に除去する必要がある。そこで、架橋剤としてクエン酸(CA)を選び出し、抗菌活性を有するハイドロゲルフィルムの開発を目的とした。また、ゲル状態(ウェット状態)でも抗菌性を示すハイドロゲルフィルムが作製できると、医療材料としての創傷被覆材や食品用の抗菌性ラップなどへの応用が期待でき、さらに、PVA および Cs は生体適合性や生分解性を示すことから、環境低負荷材料の開発としても大いに意義がある。

3. 期待される効果

ゲル材料を医療材料や食品分野で応用する場合、生体適合性や安全性が要求される。さらに、成型加工性と力学強度に優れた材料が必要となる。現在、ゲル強度を向上させた材料として、ポリロタキサンに代表される架橋点がスライドする環動ゲルや性質の異なる分子鎖どうしを化学的に架橋したダブルネットワーク(DN)ゲルなどの材料が研究開発されている。しかしながら、これらの材料は抗菌性を示さない。そこで本研究では、粘弾性的性質に優れた PVA と抗菌性を有する Cs をブレンドすることによって、相互侵入型網目構造(semi-IPN)を持つ新規な抗菌性ハイドロゲルの創製であり、また、その構造や物性および抗菌性を検討した報告例は少ない。PVA/Cs ハイドロゲルフィルムのキャラクタリゼーションを明らかにすることによって、医療分野や食品分野、さらには、化粧品分野での応用が期待できる。また現在、海洋プラスチックごみが大きな問題となっているが、PVA や Cs は生分解性を示す材料であるため、環境負荷は低いと考えられ、さらに、Cs は自然界に豊富に存在することから、SDG's の観点からも持続可能な材料である。また、架橋剤に用いる CA も食品添加物として認められているものであり、海洋生物や海洋環境への負荷は少ないと考えられる。

4. 研究経過および結果

本研究に使用した PVA は、けん化度が $98.5 \pm 0.5 \text{ mol\%}$ 、重合度 1700 である。架橋剤は無水クエン酸(CA)を用いた。また、キトサン(Cs)は低分子量を使用した。PVA-CA/Cs ブレンドフィルムの作成方法は、まず、所定量の PVA を量り取り、純水を加えて 130°C のホットプレートで加熱攪拌し、完全に溶解させた。次に、PVA に対して Cs 濃度が 5, 10, 15% となるように量り取り、Cs を溶解するために純水に CA を加えて 100°C で溶解した。また、架橋剤である CA 濃度は、PVA に対して 30% と一定になるように量り取り室温で溶解させた。これらの溶液を混合してシャーレに流し込み、 50°C で加温した。その後、溶液の水分を完全に蒸発させた。次に、化学架橋 PVA-CA/Cs ブレンドフィルムを作製するための条件検討を行った。化学架橋型 PVA-CA/Cs ブレンドフィルムの作製条件は昨年度と同様であり、加熱温度および時間を変化させて作製した。その後、溶解度試験からフィルムが架橋されているか否かの判定を行った。溶解度試験は、加熱温度および時間を変化させて作製した PVA-CA/Cs ブレンドフィルムを、沸騰水中に 1h 入れてフィルム形状が残っているものを架橋されていると判断した。その結果、 140°C で 3h 加熱すると、すべてのフィルムで溶解しなかった。このことから、 140°C で 3h 加熱を行うと、化学架橋 PVA-CA/Cs ブレンドフィルムが作製できたと判断した。この条件で作製したフィルムを実験に使用した。また、作製したフィルムを写真 1 に示す。この写真を見ると、Cs 濃度が増加するにつれて黄色が強くなっていることがわかる。これは、Cs の色に由来するものであり、そのため、Cs が増加すると黄色が強くなった考えられる。

次に、キトサンは-OH と-NH₂を含むため CA と架橋反応している可能性がある。そこで、FT-IR ATR 法で PVA-CA/Cs ブレンドフィルム表面の構造を検討した。その結果を図 1 に示す。図 1 の FT-IR スペクトルを見ると、PVA-CA フィルム、つまり Cs=0%では、1653cm⁻¹に>C=O の吸収ピークが現れた。このカルボキシ基の吸収ピークはクエン酸由来のものである。つまり、PVA と CA が架橋反応したために現れたと考えられる。また、PVA-CA/Cs フィルムについて見ると、Cs 濃度が増加すると、カルボキシ基の 1653cm⁻¹の吸収ピークの以外に、1560cm⁻¹にキトサン由来の-NH₂の吸収ピークが現れた。これは、Cs の-NH₂がフィルム表面および内部に存在していることを意味する。また、Cs の FT-IR スペクトルと比較しても、>C=O および-NH₂の吸収ピークのシフトも見られないことから、PVA と Cs の相溶は少ないと考えられる。また、シッフ塩基の形成も少ないと考えられる。



写真 1. PVA-CA/Cs ブレンドフィルム.

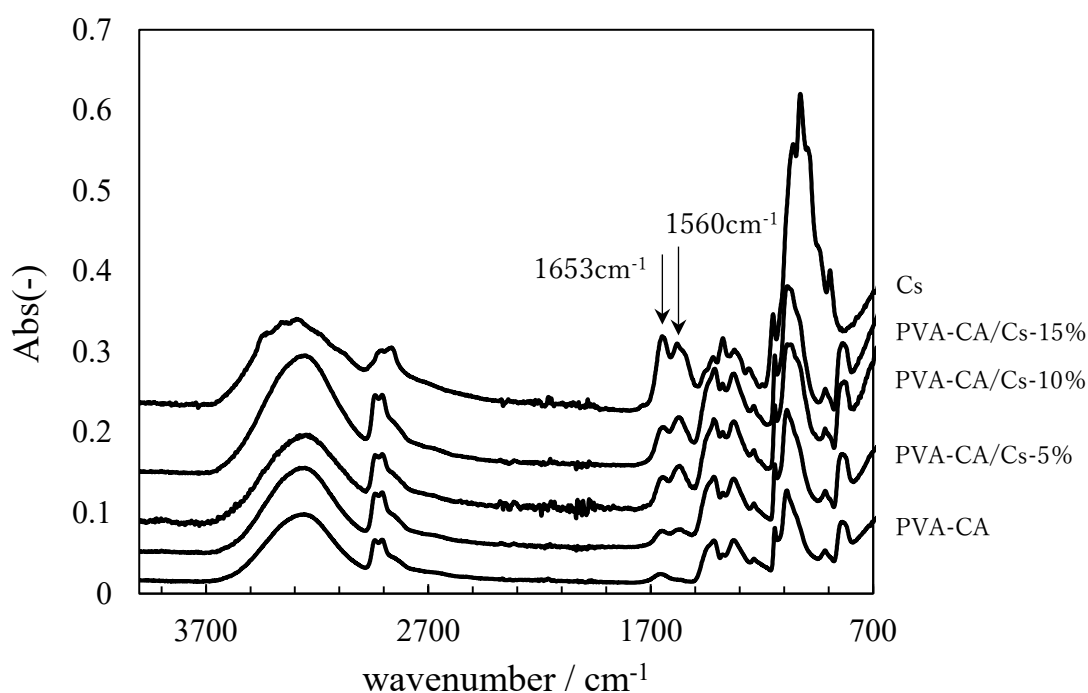


図 1. PVA-CA/Cs ブレンドフィルムの FT-IR スペクトル.

次に、PVA-CA/Cs ブレンドフィルムの力学調度を調べるため、引張試験からヤング率 E を求めた。その結果を図 2 に示す。図 2 のヤング率 E を見ると、Cs 濃度が増加するにつれ、ヤング率 E は減少した。Cs 濃度が増加するとヤング率 E が減少したことから、アモルファス部分が増大したと考えられる。つまり、PVA の微結晶の生成を Cs が阻害したと考えられる。一般に、PVA の微結

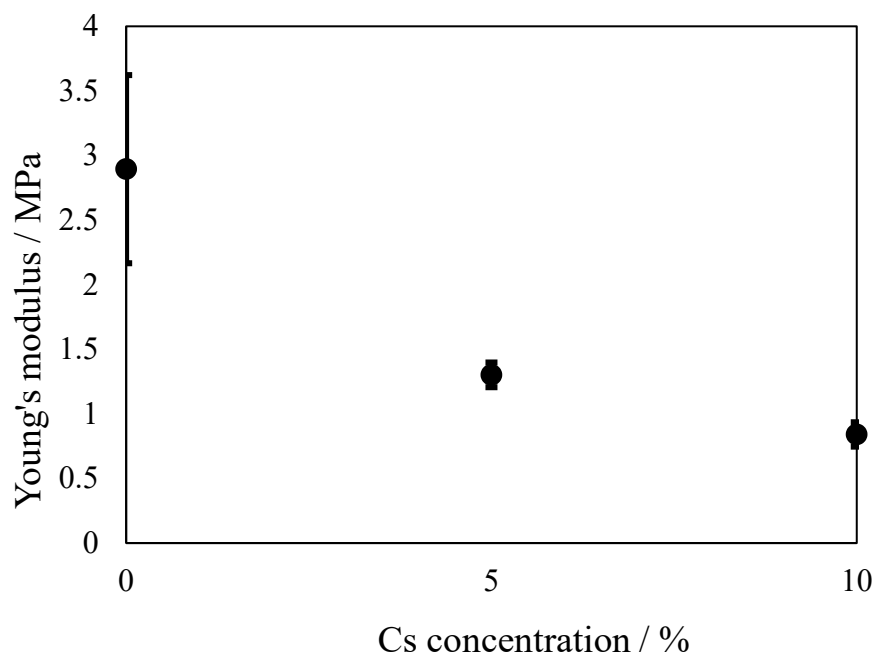


図 2. PVA-CA/Cs のヤング率 E .

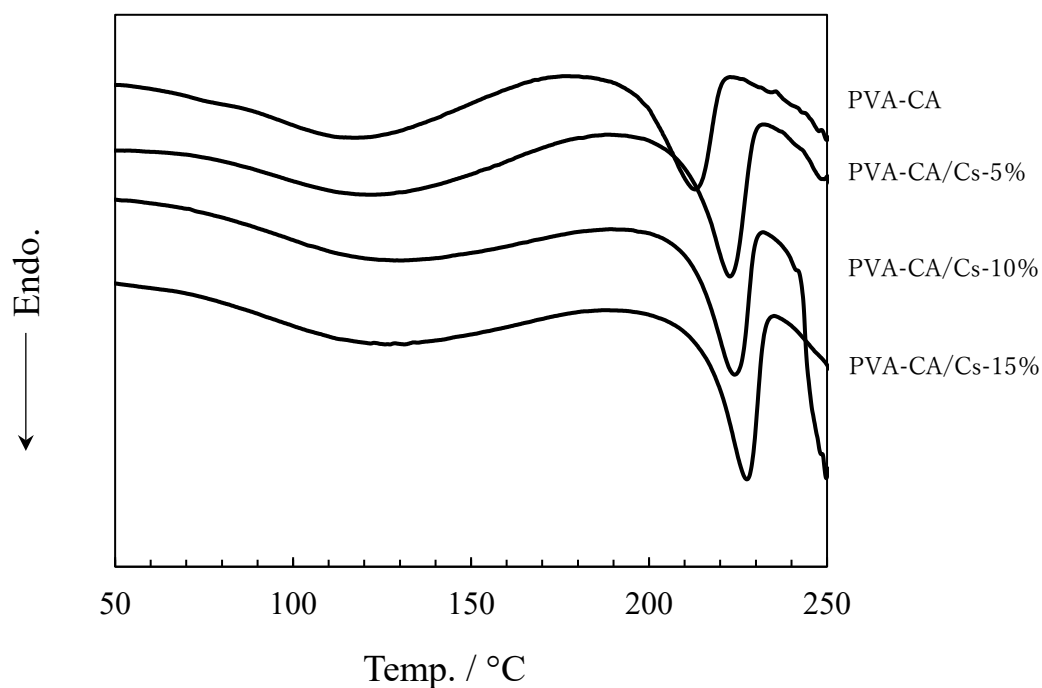


図 3. PVA-CA/Cs の DSC 曲線.

晶はラメラを形成していると考えられ、このラメラの形成を阻害したと考えられる。また、アモルファス部分増大すると、融解エンタルピー(融解熱量)も減少すると考えられる。そこで、DSC により PVA-CA および PVA-CA/Cs の融点および融解熱を測定した。昇温速度は $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ である。DSC 測定を行った結果を図 3 に示す。図 3 の DSC チャートを見ると、PVA-CA の融点(T_m)は、他の PVA-CA/Cs 試料に比べて 10°C 程度低い値を示した。次に、すべて試料について、融点(T_m)と融解熱量(ΔH_m)を表 1 にまとめた。この表を見ると、PVA-CA の T_m は 213.9°C であるのに対し、Cs を

表 1 DSC 測定による融点(T_m)と融解熱量(ΔH_m)

sample	$T_m(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H_m(\text{J/g})$
PVA-CA	213.9	31.2
PVA-CA/Cs-5%	223.4	53.7
PVA-CA/Cs-10%	225.5	50.5
PVA-CA/Cs-15%	227.3	49.6

ブレンドすると 223～227℃と高い値を示した。また、PVA の融点は 220℃程度であるが、CA で架橋した PVA の T_m はかなり低い値となった。これは、CA が PVA の微結晶の形成を阻害したと考えられる。つまり、PVA 溶液と CA 溶液を混合させると、PVA の分子鎖に CA が入り込み、その後、水分を蒸発させて 140℃で架橋反応を行うため、微結晶の形成が CA によって阻害されたと考えられる。これに対し、PVA-CA/Cs ブレンドフィルムでは、PVA と Cs が溶液中でマイクロ相分離を起こし、PVA の水素結合が強くなり、その結果、PVA の T_m が上昇したと考えられる。しかしながら、図 2 に示したヤング率 E は、Cs が増加すると減少する結果となった。これは、アモルファス部分が増加したためと考えられるが、 T_m の結果と矛盾する。一般に、ヤング率 E が増大すると結晶部分が増加すると考えられる。また、キトサンのようにガラス転移温度(T_g)が室温以上で rigid な構造を持つものは、ヤング率 E の値は高くなる。このことから考えると、PVA と Cs で相分離が起こり、PVA の水素結合が強くなり微結晶を形成すると考えられるが、化学架橋されているため、ラメラ状の微結晶を形成するのではなく、房状ミセルのような微結晶が再結晶化したのではと考えられる。そのため、 T_m と ΔH_m が上昇したのではないかと思われるが、結晶構造については今後の検討課題である。

5. 今後の課題

本年度では、PVA-CA/Cs の作製条件を検討し、PVA-CA の作製条件と同様、PVA-CA/Cs 溶液を 50℃で水を完全に除去した後、140℃で 3 時間加熱することによって作製することが分かった。また、ヤング率 E は Cs が増加すると減少するが、微結晶は増加した。これは、一般的な PVA の微結晶の構造とは異なるのではないかと考えられるが、今後の課題である。また、PVA-CA/Cs ブレンドフィルムについて、抗菌活性を検討する予定である。

6. 研究成果の発表

- 1) 和田理征, 義澤健吾, 梅沢美帆, 田中康樹, 清水秀信, 局 俊明
「リン酸を吸着する高分子材料の開発とその性質」
用水と排水, Vol62, No12, pp.867-544(2020).
- 2) 和田理征, 伊藤晃一, 澤井 淳, 瑞慶覧章朝, 清水秀信, 岡部 勝
「PVA/キトサンフィルムの特性と抗菌性」
第 68 回高分子学会年次大会, 2019, 5(大阪府立国際会議場)
- 3) 和田理征, 清水秀信, 岡部 勝, 瑞慶覧章朝, 澤井 淳
「化学架橋型 PVA/キトサンブレンドフィルムの構造とその特性」
日本防菌防黴学会第 46 回年次大会, 2019, 9(千里ライフサイエンスセンター)

大気圧非熱平衡プラズマ下における 電気流体と微粒子の帯電・軌道解析及びその妥当性の検証

研究者名：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、3次元の棘対平板型 ESP モデルを作成し、空間の電流密度分布及び気流を解析したので報告する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

工場や発電所の排ガスには粒子状物質 (PM) などが含まれており、大気汚染の原因となっている。その対策として、電気集塵装置 (Electrostatic precipitator : ESP) が使用されている。しかし、エネルギー効率の向上、低抵抗ダストによる再飛散現象、高抵抗ダストによる逆電離現象などが ESP の課題として挙げられている。ESP の開発・設計には実験によるアプローチが適していると思われるが、時間やコストが制限され実験回数に限界が生じてしまう。そこで、ESP を効率的に開発・設計する手段としてパラメータを自由に変更できるシミュレーション解析が有効であると考えられる。

著者らは、線電極 1 本時と 3 本時における線対平板型 ESP において、流体に対し $k-\omega$ model を用い、線電極表面の電荷密度を境界条件として、放電電流の解析値と実験値をフィッティングさせることで、ESP 内の粒子軌道解析の結果が実験と概ね一致することを明らかにしてきた。しかし、従来解析は 2 次元モデルであった。産業用として広く採用されている棘対平板型 ESP では 3 次元で解析する必要がある。

3. 期待される効果

精度の高い数値解析が実現すれば、放電、気体と粒子間の相互作用が引き起こす現象の解明、新技術の研究・開発、製品設計における大幅な時間削減およびコストダウンなどに繋がる。

4. 研究の経過及び結果・評価

4. 1 シミュレーション

シミュレーションに用いたモデルを図 1 に示す。解析モデルは、平板電極長を 77 mm、棘電極と平板電極の間隔を 55 mm、棘の先端角度を 30° 、棘の高さを 3 mm、奥行を 12.3 mm とした。解析モデルの一点鎖線は対称境界に設定した。本解析の条件は表 1 に示した通りである。放電電力が 0.17 W になるように棘電極に電位、放電電流の実験値と解析値が一致す

るように棘電極表面に負イオン数密度を与えた。空間の電界及び負イオン数密度、電流密度分布は定常解析、イオン風は時間依存解析とした。解析には、COMSOL Multiphysics®でを用いた。

解析領域内の電位・電界及び負イオン数密度は、ポアソン方程式と電流連続の式を連成させ解析した。ポアソン方程式は(1)式、電流連続の式は(3)式で表される。

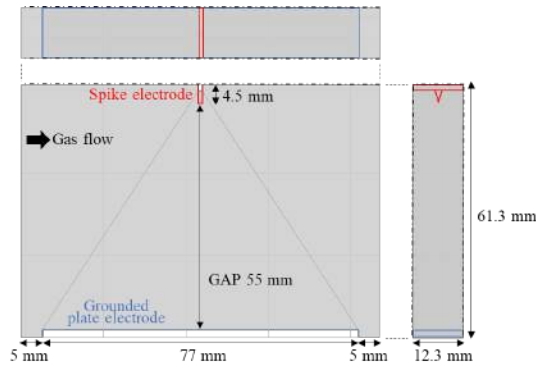


表 1． 解析条件

Discharge power	0.17 W
Applide voltage	-14.165 kV
Negative Ion Density	$9.450 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$
Gas flow	0.31 m/s
Negative Ionic diffusion coefficient	$4.26 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Mobility of negative ion	$2.11 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{Vs})$
Electronic charge	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Dielectric constant of vacuum	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
Relative permittivity	1

図 1． シミュレーションモデル

$$-\nabla \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla V = \rho \quad (1)$$

$$\rho = eN_n \quad (2)$$

$$\partial N_n / \partial t + \nabla \cdot (-D_n \nabla N_n - \mu_n E N_n + U N_n) = 0 \quad (3)$$

ここで、 ρ は空間電荷密度 $[\text{C}/\text{m}^3]$ 、 N_n は負イオン数密度 $[\text{m}^{-3}]$ 、 E は電界 $[\text{V}/\text{m}]$ 、 U はガス流速 $[\text{m}/\text{s}]$ である。ただし、本条件ではイオンの速度がガス流速に対して約 2 桁速いため(3)式の U は無視した。

イオン風の解析には、壁面付近の渦流れの解析に適した乱流 $k-\omega$ モデルを用いた。支配方程式は(4)式で表される。

コロナ放電により、放電極周辺にはイオンが発生し、電界によって接地平板電極へ向かう。その際、中性分子と衝突が起こる事によりイオンの運動エネルギーが中性分子に伝達され、中性分子はイオンと同様に接地平板電極に向かう。この移動がイオン風の要因となる。したがって、解析領域内のクーロン力を(4)式の外力項 F に代入することでイオン風を解析できる。クーロン力は(5)式で表される。

$$\rho_g (U \cdot \nabla) U = \nabla \cdot [-Pl + (\mu_{air} + \mu_T)(\nabla U + (\nabla U)^T)] + F \quad (4)$$

$$F = qE \quad (5)$$

ただし、 ρ_g は空気の密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 P は圧力 $[\text{Pa}]$ 、 μ_{air} は空気の粘性係数 $(1.822 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s})$ 、 μ_T は渦粘性係数 $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ 、 F は外力項である。

4. 2 ポアソン電界及び負イオン数密度解析結果

(1)～(3)式を用いて解析した放電電力 0.17 W 時の電界分布を図 2 に示す。カラーバーは青から赤になるに従い電界強度が強くなることを表している。電界強度は棘電極周辺が最も強く、棘電極から離れるに従い弱くなり、平均で 1.438×10^5 V/m となった。

このときの負イオン数密度分布を図 3 に示す。カラーバーは青から赤になるに従い負イオン数密度が高いことを表している。負イオン数密度は棘電極周辺が最も高く、接地平板電極方向に近づくに従い低くなり、平均で 5.049×10^{13} m⁻³ となった。

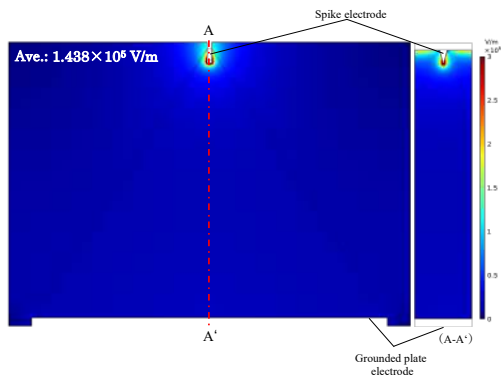


図 2. 電界分布

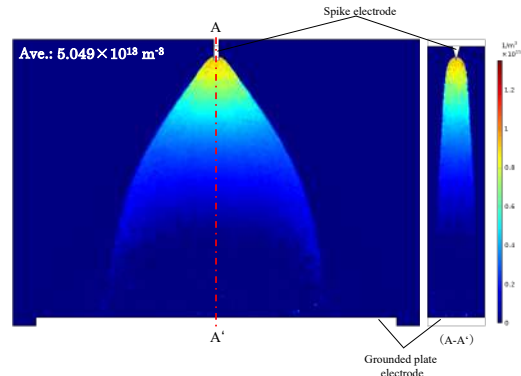


図 3. 負イオン数密度分布

4. 3 電流密度の解析結果

電流密度分布の解析結果を図 4 に示す。カラーバーは青から赤になるに従い電流密度が高いことを表している。電流密度は、棘電極表面が最も高く、接地平板電極方向に近づくに従い低くなり、平均で 3.309×10^{-4} A/m² となった。また、放電領域で面積分を行った結果、電流値は 3.152×10^{-7} A となった。実験値は 3.158×10^{-7} A であり、放電電流の解析値と実験値が概ねフィッティングできていることが確認できた。

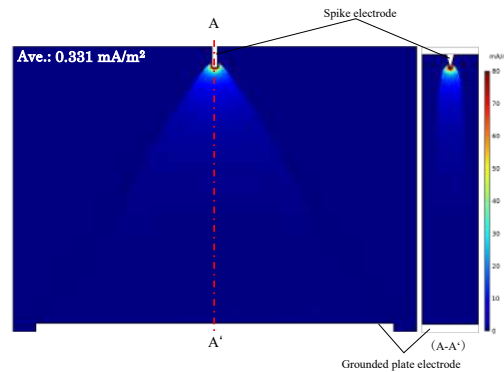


図 4. 電流密度分布

4. 4 イオン風の解析結果

風速分布の解析結果を図 5 に示す。カラーバーは青から赤になるに従い風速が速くなることを表している。平均流速 0.34 m/s で接地平板電極に対して平行に

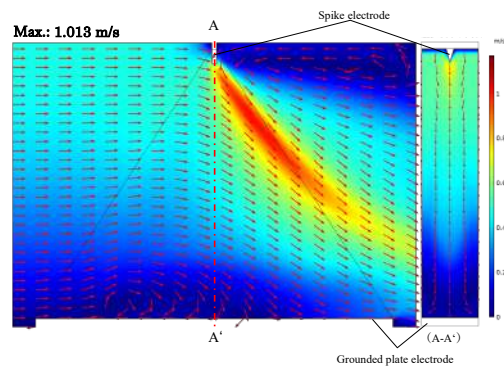


図 5. イオン風の解析結果

入った気流は、イオン風の影響により棘電極先端付近で接地平板電極方向に大きく変化している。また、風速は棘電極周辺が速く、棘電極下流側と接地平板電極表面付近で渦状の流れが生じている。解析領域におけるこの時の最大風速は 1.013 m/s となった。

5. 今後の計画

3次元の棘対平板型 ESP モデルを作成し、電流密度分布及び気流を解析した。その結果、以下のことが示された。

- ①電界は棘電極先端が高く、離れるに従い弱くなった。本解析条件では平均 $1.438 \times 10^5 \text{ V/m}$ となった。
- ②負イオン数密度は棘電極周辺が最も高く、接地平板電極方向に近づくに従い低くなった。平均で $5.049 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ となった。
- ③気流は棘電極付近で接地平板電極方向へ大きく変化し、棘周辺が速く、棘電極下流側と接地平板電極表面付近で渦流れが発生した。

今後は粒子軌道を3次元解析する予定である。また、電流密度の測定及び粒子軌道を3次元で測定し、解析結果の妥当性を検討していく。

6. 研究成果の発表

- (1) 田村亮太, 館優也, 瑞慶覧章朝, 川田吉弘, 田岡智浩, 棘対平板型電気集塵装置における電流密度及びイオン風解析, 第22回静電気学会春季講演会, 2a-1, 2021
- (2) 田村亮太, 館優也, 瑞慶覧章朝, 川田吉弘, 田岡智浩, 電気集塵装置における電力と集塵率の関係に対する線電極本数の影響, 第44回静電気学会全国大会, 24aB-6, 2020