

神奈川工科大学

先端工学研究センター

研究報告

第 30 卷

2025 年度

研究推進機構

目次

- ・量子コンピュータの活用に関する基礎的研究

清原良三、稲葉哲也、中津原克己、端山喜紀、土谷洋平、神谷克政、兒玉健

- ・認知行動特性に基づく人間中心設計に関する研究

高尾秀伸

- ・中年男性における下肢爆発的パワーの長期的推移と季節変動に関する縦断的検討

高嶋 渉

量子コンピュータの活用に関する基礎的研究

研究者名：清原良三、稲葉哲也、中津原克己、端山喜紀、土谷洋平、神谷克政、兒玉健

1. 研究の目的

本研究では、各層ごとに3つのテーマを設定した。それぞれの目的を以下に示す。

(a) ITS、配送問題への適用検討

具体的には2024年度に厚木市を例にとり、ライドシェアサービスを想定した渋滞を回避するためのサービスや、人手不足に対応した配送問題など大規模な問題への適用を検討解いた例まで示したが、従来手法の限界、AIを活用した最新の手法との限界点の違いなどの明確化が求められていた。そこで、電車の遅延時や事故時の最適な人流を事業者立場で検討するナップザック問題の例も検討することとした。

(b) 生態系の数理モデルをシミュレートするための量子計算アルゴリズムの開発

生態系は要素還元主義的なアプローチでは本質を捉えることが困難な複雑系の典型である。一方、量子アニーリングマシン（イジングモデル）は、スピン同士が相互作用する複雑系でありながら、人間が各種パラメータを制御できる孤立系でもある。本研究では、この「ある程度制御可能な複雑系」という量子アニーリングの特性を活用し、生態系のような複雑系の特徴をシミュレートするアルゴリズムおよび指標を開発することを目的とする。

具体的には、当初想定していた「微分方程式で記述される数理モデルを変分問題に書き換えてアニーリングで解く」というアプローチを起点に、ナップザック問題（KP）をスラック変数付き QUBO 形式で定式化した上で、コアアイテムと非コアアイテムの間の情報的非対称性を Kullback-Leibler 乖離度（KLD）によって定量化する枠組みを構築する。さらに問題インスタンスやパラメータに依存しない「正規化 KLD」を提案し、異なる最適化問題間での複雑性の比較を可能にする指標を確立する。

(c) 光量子情報処理向け光回路技術の基礎研究

本学でこれまで培ってきた微細加工技術をもとに、光量子演算回路の構築のための根幹となるユニバーサル線形光学回路の実現に向けた技術開発を図る。ユニバーサル線形光学回路は任意の線形光学操作を行う回路であり、マッハ・ツェンダー干渉計導波路を網目状に接続することで実現可能である。具体的に本学ではシリコン導波路および五酸化ニオブ導波路を用いたユニバーサル線形光学回路の実現のための技術開発を目的として研究を進めている。

2. 研究の必要性及び従来の研究

(a) ITS および配送・人流制御の分野では、限られた交通資源をどのように効率的に配分す

るかが重要な課題となっている。特に、都市部における道路渋滞、公共交通機関の遅延・運休、物流分野における人手不足などは、いずれも社会的影響の大きい問題であり、利用可能な経路、車両、輸送容量、利用者の目的地等を考慮した最適化が必要となる。これらの問題は、巡回セールスマン問題、ナップザック問題、割当問題などに類似した組合せ最適化問題として定式化できるが、対象規模が大きくなると探索空間が急速に拡大し、従来型計算機による厳密解の算出やリアルタイムな意思決定は困難になる。

従来、交通分野では、シミュレーション、数理計画法、ヒューリスティック手法、シミュレーテッドアニーリング等を用いた最適化が検討されてきた。これらの手法は、計画評価や限性を基準に行動するため、個人最適と全体最適が一致しない場合がある。このため、事業者や自治体の立場から、全体の待ち時間、混雑、ばらつき等を抑制する誘導方策を導出する仕組みが必要である。

本研究では、このような背景を踏まえ、量子コンピューティング、特に量子アニーリングおよびアニーリングマシンの活用可能性に着目した。量子アニーリングは、組合せ最適化問題を QUBO 形式に変換することで高速に近似解を求める手法として期待されており、ITS や配送問題のように多数の候補から適切な割当を求める課題との親和性が高い。本年度は、提案時に想定した ITS・配送問題への適用検討の一環として、鉄道運行抑止発生時に駅に滞留する乗客を複数の代替輸送手段へ効率的に誘導する問題を対象とした。これは、輸送容量が限られた複数経路へ人流を配分する問題であり、配送・ライドシェア・災害時避難誘導等にも共通する基礎的な最適化課題である。

(b) 生態系は複雑系の代表的対象であり、多数の構成要素が非線形に相互作用することで創発的な挙動が生じる。従来の数理生態学では微分方程式系 (Lotka-Volterra 方程式等) や数値シミュレーションが主流であるが、これらは基本的に要素還元主義的であり、系全体の情報構造や部分と全体の相関を可視化する手段に乏しい。環境問題や感染症対応が示すように、多くの要素が予期せぬ形で関連し合う実世界の複雑系では、原因を特定・排除するという還元主義的アプローチの限界が顕在化している。

複雑系科学はカオス理論・自己組織化・ネットワーク科学などの形で数十年にわたり発展してきたが、量子計算との接点はほとんど探索されていない。量子アニーリングマシンは、スピン間相互作用が生み出す複雑なエネルギーランドスケープを内包しており、生態系のように多体相互作用が本質的な役割を果たす系と根本的な親和性を持つ。しかし、この親和性を数理的に明確化した研究は現状では乏しく、両者を接続する指標・枠組みの開発が求められている。

生態系を対象とする顕著な成果を出すことは最終目標として、まずは本研究の道具立てである量子アニーリングが「制御可能な複雑系の、優秀な実験台」であることを示すことを中間目標とする。そのための道具として、情報幾何学的な指標である Kullback-Leibler 乖離度 (KLD) に着目する。KLD はアニーリングによって得られた解の分布構造を定量化する手段として機能し、制御パラメータを変化させたときに系の情報構造がどう変わるかを可

視化することができる。さらに、KLD がアイテムの重さやペナルティ係数に比例して変動するというスケール依存性を正規化によって除去した「正規化 KLD」を導入することで、異なる問題インスタンス間での比較が可能な普遍的指標を構築する。情報幾何を武器として量子アニーリングマシンを複雑系の「テスター」として使いこなす環境を整えることが、本研究の当面の課題である。

(c) 生成 AI の急激な普及により、データセンターでの消費電力と発熱の増加という課題が生じている。この課題に対して巨大な冷却装置などを必要としない光回路による高速な量子演算の実現が望まれている。従来の光量子演算には光学上盤上にレンズやミラーなどを精密に配置調整した空間光学系の構成で行われてきた。近年、平面光回路やシリコンフォトリソ技術の技術が向上してきたことにより、光集積回路による実現が期待されている。本学においてもこれまで培ってきた微細加工技術を向上させ、光量子演算回路を構成する要素技術の開発を進めることが必要であり、量子情報教育の促進にも貢献するものと考えられる。

3. 期待される効果

(a) 本研究により、交通・移動分野における実問題を QUBO として定式化し、アニーリングマシンを用いて求解するための基礎的手順を整理できることが期待される。特に、鉄道運行障害時のように、短時間で多数の利用者を複数の代替ルートへ配分する必要がある状況では、全体の平均待ち時間だけでなく、特定ルートへの集中や利用者間の不公平感を抑えることが重要である。本研究で構築したモデルは、平均乗車完了時間とそのばらつきを同時に考慮するものであり、単に最短時間の経路へ集中させるのではなく、全体として効率的かつ公平性の高い誘導方策を算出するための基盤となる。

また、本研究の成果は鉄道運行抑止時の乗客誘導に限定されるものではない。複数の輸送手段に対して需要を配分するという構造は、ライドシェア、オンデマンド交通、物流配送、災害時の避難誘導、イベント終了時の人流制御など、広い ITS 応用に共通している。そのため、本年度の検討は、今後、厚木市等の地域交通課題や、人手不足に対応した配送計画問題へ展開するための基礎となる。

さらに、量子コンピューティングを現実的な交通課題へ適用する際には、単に量子計算機を利用するだけではなく、対象問題をどのように QUBO 形式へ変換するか、目的関数や制約条件をどのように設計するか、得られた解を社会システム上どのように利用するかが重要となる。本研究により、ITS 分野における量子コンピューティング活用の具体的な事例を示すことができ、今後の外部研究費申請、学会発表、自治体・交通事業者との共同研究提案へつなげることが期待される。

(b) 量子アニーリングという制御可能な複雑系を用いて生態系的な情報構造を解析するという視点は、複雑系科学と量子計算の新たな接点を拓く。将来的には、種間相互作用ネットワークのような生態系の依存関係を組合せ最適化問題のグラフ構造として表現し、アニーリングを通じた解析へと展開することが期待される。

本研究の成果を核として、拡張生態系科学に関する MDPI Entropy 誌 Special Issue の提案を計画している。これにより、要素還元主義に代わる複雑系の視点から生態系を数理的に捉える国際研究コミュニティの形成に寄与することが期待される。本学における量子コンピューティング・複雑系研究の拠点化に向けて、論文発表と Special Issue 提案を軸とした研究基盤を構築する。

(c) 光によって量子演算回路を実現することで、巨大な冷却装置などを必要としない、量子コンピュータの期待できる。特に導波路型素子で構成される光集積回路は空間光学系の構成とは異なり、光学上盤上でのレンズやミラーなどの精密な配置調整が不要となって、小型で高速な演算処理能力を有する量子コンピュータが実現可能となる。近年、平面光回路やシリコンフォトリソグラフィの技術が向上してきたことにより、光集積回路による量子演算回路の実現への期待が高まり、盛んに研究されている。本学においても、これまで培ってきた微細加工技術をさらに発展させることで光量子演算回路に必要な要素技術の確立が期待できるとともに、量子情報教育への展開も図ることができる。

4. 研究の経過及び結果・評価

(a) 本年度は、ITS・配送問題への量子コンピューティング適用検討のうち、まず鉄道運行抑止発生時における効率的な人流制御問題を対象として研究を進めた。具体的には、都市鉄道において運行障害が発生し、特定駅に乗客が滞留した状況を想定し、滞留乗客を複数の代替輸送手段へどのように配分すれば、全体の乗車完了時間を短縮できるかを検討した。

モデル化においては、駅に滞留する総乗客数のうち、事業者の誘導に従う乗客割合を誘導受容率として設定し、最適化対象となる乗客群を定義した。その上で、各代替ルート of 輸送容量および運行間隔に基づき、ルートごとの乗車完了時間を近似し、全体の平均乗車完了時間とルート間の完了時間のばらつきを抑制する目的関数を構築した。これにより、乗客を特定の代替ルートに偏って誘導するのではなく、輸送容量に応じたバランスのよい配分を求める QUBO モデルを設計した。

評価では、小田急線において海老名駅から町田駅方面で運行障害が発生した状況を想定し、海老名駅から利用可能な複数の代替鉄道路線へ乗客を配分するシナリオを設定した。最適化計算には、Fixstars Amplify および Amplify AE を用い、一般的な PC 環境上でシミュレーションを実施した。その結果、提案した QUBO モデルにより、ピーク時を想定した条件でも実用的な計算時間内に代替ルートへの配分解を得られることを確認した。また、誘導受容率を変化させた評価により、乗客の協力度が高い場合には全体の待ち時間削減効果が大きい一方、誘導に従わない乗客が増えると効果が大きく低下することが確認された。この結果は、最適化計算だけでなく、利用者への情報提供や誘導方策の設計が実運用上重要であることを示している。

本成果は、鉄道運行障害時の乗客誘導を対象とした初期的な検討ではあるが、ITS 分野における量子アニーリング活用の具体例を示すものとなった。特に、提案時に想定していた配

送問題やライドシェア問題と同様に、「限られた輸送資源に対して需要をどのように割り当てるか」という共通構造を持つ課題に対して、QUBO 定式化とアニーリングマシンによる求解が適用可能であることを確認できた点は、本研究の重要な成果である。

一方で、現段階のモデルは静的な条件を前提としており、運行再開見込みの変化、新たな乗客流入、代替輸送手段側の混雑変化、利用者の個別目的地などは十分に考慮できていない。また、実際の量子コンピュータではなくアニーリングエンジンを用いた評価であり、量子計算機上での性能評価や大規模問題への拡張性については今後の検討課題である。次年度以降は、対象を鉄道運行障害時の人流制御から、地域交通、ライドシェア、配送計画へ拡張し、問題規模の拡大、動的条件への対応、従来手法および AI を用いた最適化手法との比較を進める予定である。

(b) 本年度は当初計画の「微分方程式の量子アルゴリズムによる求解」という枠組みを起点に研究を進め、より明確な数理構造を持つ対象として組合せ最適化問題の情報構造解析へと展開した。まず最速降下線問題を変分問題として定式化し、離散化した上でアニーリングによって解を求める実装を試みた。この過程でアニーリングの逐次更新が群知能的挙動（細菌が迷路を解く過程に類似した集団的解探索）を示す可能性に着目したが、現時点では顕著な挙動の確認には至っていない。

この経験を踏まえ、より明確な数理的構造を持つ対象として、ナップザック問題（KP）の QUBO 定式化に焦点を移した。スラック変数を用いた QUBO 形式で KP を定式化し、アニーリングマシンによる求解枠組みを整備した。その上で、コアアイテム（問題の最適解の構造を支配するアイテム群）と非コアアイテムの間のエッジをカットする KLD (Kullback-Leibler 乖離度) を計算し、コアではない同数アイテム群のエッジカットの KLD と比較するシミュレーションを実施した。

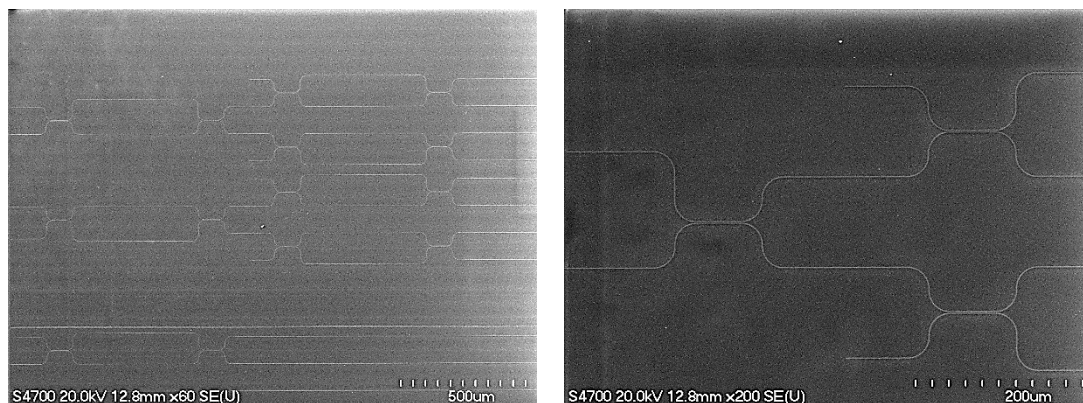
その結果、コアアイテムと非コアアイテムの境界の KLD が、非コアアイテム群の境界の KLD よりも大きくなる傾向が確認された。これはコア構造が情報的に意味のある境界を形成していることを示唆する知見である。さらに、KLD がアイテムの重さおよびペナルティ係数 A の値に比例して増大するというスケール依存性を明らかにし、これらで適切に正規化した「正規化 KLD」の概念を新たに提案した。正規化 KLD は異なる KP 問題インスタンス間で 1 前後に安定しており、インスタンス横断的な複雑性比較を可能にする指標として機能することが確認された。

これらの成果を論文にまとめ、現在執筆中である。Complexity 誌 (Wiley/Hindawi) を第一候補、MDPI Entropy 誌を第二候補として投稿準備を進めている。また、本学における量子コンピューティング・複雑系研究の認知確立に向けた戦略として、論文投稿後に MDPI Entropy 誌において拡張生態系をテーマとする Special Issue の提案を計画しており、関係者 (Funabashi Masatoshi 氏ら) との合意得ている。

今後の課題としては、正規化 KLD の理論的基礎の精緻化、より大規模な KP 問題インスタンスへの適用、および他の組合せ最適化問題（巡回セールスマン問題・グラフ彩色問題等）へ

の拡張が挙げられる。次年度以降は、組合せ最適化問題のグラフ構造と生態系の種間相互作用ネットワークとの数理的対応の構築を中心課題に据え、量子アニーリングを介した複雑系解析の枠組みをさらに深化させる予定である。

(c) 高分解能電子線描画装置を用いて、光量子演算回路に必要な導波路の形成技術の開発を検討している。シリコン細線導波路については、SOI (Silicon on Insulator) 基板上に高分解能電子線描画装置によって 500nm 幅の導波路パターンを描画し、そのパターンをもとにドライエッチング等を経た製作技術の開発を進めている。五酸化ニオブ導波路については熱酸化 Si 基板上に反応性 DC スパッタリング装置による五酸化ニオブの薄膜形成を行った後、シリコン細線導波路と同様に高分解能電子線描画装置を用いて、400nm~600nm 幅の細線導波路の製作技術の開発を進めている。さらに、現段階での細線導波路製作技術をもとに、ユニバーサル線形光学回路の基本要素となるマッハ・ツェンダー干渉計導波路を SOI 基板上のシリコン細線導波路で構成された素子の試作を行った。また、マッハ・ツェンダー干渉計導波路を直列に 2 段に接続した光回路の試作も行った。図 1 に試作した 2 段直列接続マッハ・ツェンダー干渉計導波路の電子顕微鏡写真の電子顕微鏡写真を示す。これらの試作マッハ・ツェンダー干渉計導波路は単体および 2 段直接接続のどちらの素子においても TE モードでの導波光を確認している。さらに、ユニバーサル線形光学回路の実現に向けて、非対称マッハ・ツェンダー干渉計導波路の波長特性結果の詳細な検討を始めており、光回路設計のためのデータの蓄積を進めている。



(a) 上面写真

(b) 拡大写真

図1 試作した2段直列接続マッハ・ツェンダー干渉計導波路の電子顕微鏡写真

2026 年 6 月 28 日

別紙

認知行動特性に基づく人間中心設計に関する研究

研究者名：高尾秀伸

1. 研究の目的

人間中心設計に基づいた「人に優しい」ものごと作りに資する各種研究を行う。具体的には重度視覚障害者が単独で購買行動を可能とする支援技術の開発研究および次世代車載情報機器の音声ユーザインタフェースの開発研究を行う。

2. 研究の必要性及び従来の研究

近年、AI（人工知能）の急速な進歩に象徴される社会のデジタルトランスフォーメーション（DX）が加速している。こうした現代社会における製品やメディアシステムの開発においては、超高齢社会を含むユニバーサル社会の多様なニーズに応えることが強く求められている。

そのためには、ユーザーである人間の生理機能や脳における認知機能など、人間特性を踏まえた設計が重要となる。しかし、これまでの工学研究の多くにおいては、人間特性を踏まえた研究は世界的にも少なかった。そこで、この問題を体系的に解決するアプローチが、国際標準規格「ISO 9241-210」で定義される人間中心設計（HCD: Human-Centered Design）である。HCD では、「ユーザビリティ」を含む利用時品質の向上が求められる。利用時品質とは、製品やサービスがユーザーのニーズを満たし、目標を達成する能力を評価する概念である。

当研究室では、平成 21 年度の文部科学省「私立学校施設整備費補助金」により整備された感覚・認知行動測定システムを中核とし、システムのユーザビリティ評価や、先端技術の人体への影響を科学的に解明する研究を進めている。これにより、人に優しい“ものごとづくり”を支える人間中心設計の実現を目指している。

3. 期待される効果

人間中心設計研究を推進することにより、DX 時代におけるユーザの求める豊かさについて明らかにしつつ、それらのニーズを各種人間特性に合致させることで確実に実現可能な技術、機能ならびに製品開発に資する知見を得ることが可能となる。その結果、良い UX（ユーザエクスペリエンス）の提供による製品の利用時品質の向上、障害者・高齢者の生活支援および健康寿命延伸、脱炭素社会実現への貢献等、超高齢社会を含むユニバーサル社会の多様なニーズに応えることが期待される。

4. 研究の経過及び結果・評価

4.1 次世代車載情報機器のバディ AI 機能に関する研究

本研究では、覚醒度を維持する方法として会話に着目をし、生成 AI を活用した音声対話型ドライバ覚醒度維持インタフェース・システムの提案を行っている。実験協力者 2 名を対象に生成 AI との会話が覚醒度維持にもたらす有効性について評価実験を行い、皮膚電気活動特性を計測し、主観覚醒度との関連性について検討を行った。その結果、低覚醒状態での運転時に眠気を我慢する覚醒努力時に特徴的な皮膚電気活動特性が見られることがわかった。これらについて機械学習によって特徴量が抽出できるかどうかについても検討を行った。

5. 今後の計画

5.1 次世代車載情報機器のバディ AI 機能に関する研究

今後の展望としては、覚醒努力時の皮膚電気活動特性についてさらなる検討を加えるとともに、機械学習研究を進めたいと考えている。

6. 研究成果の発表

- 1) 小椋 優太, 佐藤 達也, 高橋 俊太, 林 功明, 高尾 秀伸, 川田 歩, 谷澤 悠輔, 橋本 拓昌, 藤野 留佐子, 永田 英記, 大杉 淳, 菰山 真一: 機械学習による皮膚電気活動からの覚醒度推定手法の基礎検討, 自動車技術会秋季大会 2025 年 10 月 15 日
- 2) 小椋 優太, 佐藤 達也, 高橋 俊太, 林 功明, 高尾 秀伸, 川田 歩, 谷澤 悠輔, 橋本 拓昌, 藤野 留佐子, 永田 英記, 大杉 淳, 菰山 真一: 生成 AI と会話する自動車ドライバにおける覚醒努力の推定手法に関する基礎検討～脳波データに着目して～, 第 34 回日本人間工学会システム大会 セッション 3-2 2026 年 3 月 18 日

中年男性における下肢爆発的パワーの長期的推移と 季節変動に関する縦断的検討

研究者名：高嶋 渉

※本報告書は受理・掲載予定の既発表論文〔1〕に基づき、研究成果の概要、意義および今後の課題について整理したものである。

1. 研究の目的

本研究は、中年期における下肢爆発的パワーの経年的変化を明らかにするとともに、日常的なトレーニング負荷、体重および気温等の外部環境要因がその変動にどのように関与するかを検討することを目的とした。

近年、カウンタームーブメントジャンプ（CMJ）は、下肢爆発的パワーを評価する指標としてだけでなく、神経筋系のコンディションやトレーニングに対する適応状態を把握する簡便な手段として活用されている。しかし、中年期の一般的な運動実践者を対象として、同一条件下で長期間かつ高頻度にCMJを測定し、その推移を追跡した研究は限られている。

そこで本研究では、中年男性1名を対象として、4年間にわたるCMJ測定データを収集し、加齢に伴う長期的変化と、短期的な変動要因を区別して評価することを試みた。

2. 研究の必要性及び従来の研究

筋パワーは加齢に伴って低下し、筋力よりも早期に変化が現れる可能性が指摘されている。中年期から身体機能の推移を把握することは、将来的な身体機能低下やサルコペニアの予防を考える上で重要である。

一方、CMJを用いたコンディション評価に関する研究の多くは、若年アスリートを対象に、数週間から数か月程度のトレーニング負荷や疲労との関連を検討したものである。中年者におけるCMJの長期的推移、ならびに気温・季節などの外部環境要因を考慮した評価については、基礎資料が不足している。

また、筋力・パワー発揮は測定時の温度環境、ウォーミングアップ後の身体状態、日常生活および季節的な生活条件の影響を受け得る。そのため、長期モニタリングにおいて記録の低下を解釈する際には、加齢による持続的な変化と、一時的な疲労や気温等による変動を区別する必要がある。

同一個人を対象とする単一事例研究は、大規模な対象者集団では継続が難しい高頻度の測定を可能にし、測定条件を比較的統一した詳細な時系列データを得られる点に特長がある。本研究は、このような研究デザインにより中年期の変化を探索的に記述するものである。

3. 期待される効果

本研究により、中年期の下肢爆発的パワーを日常的なCMJ測定で継続的に把握するための基礎資料が得られると期待された。特に、加齢変化とともに気温・季節に伴う変動を考慮する必要性を示すことは、健康増進およびスポーツ実践の場におけるコンディション評価の精度向上につながる。

また、測定値が低下した場合に、その変化を直ちに能力低下と判断するのではなく、季節、生活条件および直前の活動内容を含めて評価する視点を提示できる。これは、個人が運動習慣を継続する上で、過度な不安や不適切なトレーニング調整を避けるためにも有用と考えられる。

さらに、比較的軽度の持久性トレーニングを行う中年者において、CMJが急性疲労の評価指標としてどの程度機能するかを検討することは、簡便な自己モニタリング手法の適用範囲と限界を明らかにする上でも意義がある。

4. 研究の経過及び結果・評価

本研究は、研究開始時44歳の男性レクリエーションサイクリスト1名を対象として、2022年2月から2026年1月までの4年間に実施した縦断的単一事例研究である。CMJは平日の午前中の一定時間帯に、同一の測定機器、シューズおよびウォーミングアップ条件の下で実施した。4年間で892日、週平均4.3日のデータを収集した。

各測定日にはCMJを5回実施し、その平均跳躍高を分析に用いた。測定前には、下肢を中心とした静的・動的ストレッチングおよびタックジャンプを毎回同一の内容で実施した。測定動作については、研究開始以前から十分に習熟していた。

併せて、体重、自転車トレーニングにおける心拍数から算出したTraining Impulse (TRIMP)、および観測地における日最低気温（気象庁HPを参照）のデータを得た。TRIMPは心拍応答に基づき、日々の持久性トレーニングの内的負荷を把握するために用いた。

分析では、経過日数とCMJ跳躍高との関係を回帰分析により検討した。また、経過日数、TRIMP、体重および日最低気温を同時に扱うことで、長期的な変化と各要因との関連を検討した。さらに、週末のトレーニング後に生じ得る急性または短期的な疲労の影響を確認するため、土日両日にトレーニングを実施した週の直後の平日CMJ跳躍高を比較した。

その結果、CMJ跳躍高は短期的な変動を示しつつも、4年間を通じて緩徐に低下し、年平均の低下量は0.92 cmであった。これは、一定の運動習慣を有する中年期においても、爆発的パワーが長期的には漸減する可能性を示す結果である。

重回帰分析では、時間経過に加え、日最低気温がCMJ跳躍高と有意な正の関連を示した。30日移動平均でみたCMJ跳躍高の推移も気温の年周期的変動と対応し、冬季に低値、夏季に高値を示す季節的変動が確認された（図1）。

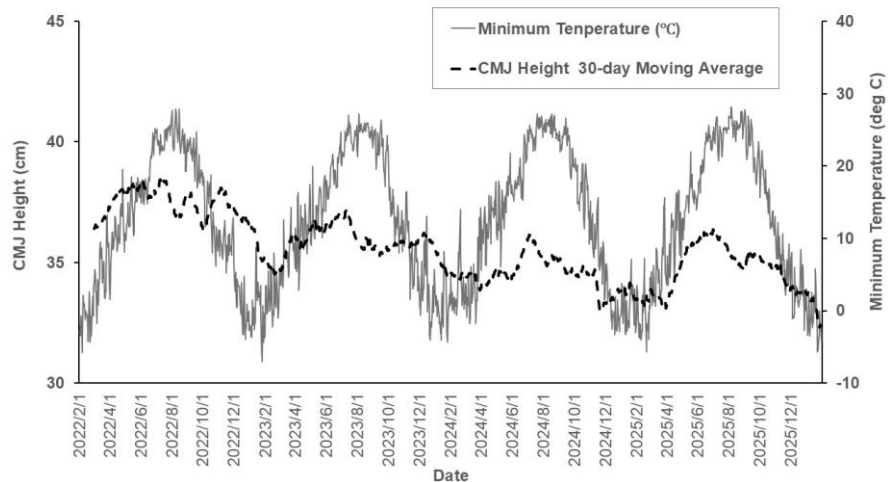


図1. 日最低気温の変動とCMJ跳躍高の長期的トレンド（30日移動平均）

一方、日々のTRIMPおよび体重については、CMJ跳躍高との有意な関連は認められなかった。さらに、土曜日および日曜日の両日にトレーニングを実施した週を対象に、直後の平日のCMJ跳躍高を比較した結果、曜日間の差、ならびに週末トレーニング実施週とそれ以外の週との差はいずれも明確ではなかった。

これらの結果から、本研究対象者のように比較的軽度の持久性トレーニングを継続する中年者では、CMJ跳躍高は日々のトレーニング負荷に伴う急性疲労を鋭敏に把握する指標というよりも、加齢や季節に伴う中長期的変化を把握する指標として有用である可能性が示唆された。また、冬季の一時的な低下を直ちに能力低下や疲労と解釈せず、測定時の温度環境や季節的条件を考慮して評価する必要がある。

本研究は単一事例であり、結果の一般化には限界がある。また、測定時の室温、筋温、筋量および筋力・パワー発揮能力との関連が指摘されている栄養指標（血中Vit D濃度等）を測定していないため、季節変動の機序を直接に検証したものではない。しかし、4年間にわたり高頻度の測定を継続したことにより、中年期の身体パフォーマンスの変化を検討するための探索的資料を提示できた。

5. 今後の計画

今後は、異なる運動習慣や競技特性をもつ中年者および高齢者を対象として同様のデータを蓄積し、CMJ跳躍高の加齢変化および季節変動の再現性を確認することを検討している。持久系運動、球技、筋力トレーニング等の実践者を比較することにより、日常の運動様式が爆発的パワーの長期的推移に及ぼす影響を明らかにしたい。

特に、サイクリングのように短縮性収縮を主とする非衝撃性の運動と、走・跳動作を含む伸張-短縮サイクル運動とでは、CMJに対する急性疲労および長期的適応の現れ方が異なる可能性がある。運動様式別の比較を通じて、CMJを用いたモニタリングの適用条件をより明確にする。

また、室温・湿度、睡眠、日常身体活動、日照曝露、栄養関連指標、骨格筋量等を併せて記録し、気温とCMJとの関連に関与する要因をより詳細に検討する。測定条件を可能な範囲で標準化するとともに、季節別の基準値や個人内の変動幅を設定する方法についても検討を進める。

さらに、跳躍高だけでなく、フォースプレート等を用いた力-時間特性、接地局面および跳躍動作の評価を組み合わせ、急性疲労や加齢に伴う神経筋機能の微細な変化を捉えることを目指す。簡便な自己モニタリングと詳細な測定を適切に組み合わせることで、測定頻度と評価の精度の両立を図る。

得られた知見は、中年期以降の健康づくりおよび運動継続支援に応用可能な評価手法の構築につなげる。運動指導の場では、単一時点の測定値だけでなく、個人内の長期的な推移を可視化することが、運動習慣の維持や適切な目標設定に役立つと考えられる。

6. 研究成果の発表

〔1〕 高嶋渉. 中年男性における下肢爆発的パワーの推移：4年間の縦断的単一事例研究. トレーニング科学. 受理・2026年9月掲載予定.