

第47号

令和6年6月5日

# 博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

(令和5年度 後学期授与分)

金沢工業大学



## 目 次

### ◇博士

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文題目)
博甲第 131 号	博士(工学)	満田 宇宙	磁束変調の原理を用いたコンシクエント 極可変界磁モータに関する研究 .....5
博甲第 132 号	博士(工学)	森 恵人	InGaN 量子井戸の電子状態と再結合過程 に関する研究 .....9
博甲第 133 号	博士(理工学)	大蔵 かおる	Mechanical stress decreases the amplitude of twisting and bending fluctuations of actin filaments (機械的ス トレスはアクチンフィラメントのねじれ と曲げのゆらぎの振幅を減少させる) .....13
博乙第 63 号	博士(工学)	平野 誠志	高速道路の安全性向上のための凍結防止 剤による塩害と COVID-19 クラスタ発 生の対策評価と改善 .....17
博乙第 64 号	博士(工学)	村上 岳	ランダム配向UDテープ強化複合材料のひ ずみ分布と損傷挙動の可視化による面内・ 面外力学特性評価に関する研究 .....21

## は し が き

本誌は、学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

氏名	みっだ ひろし 満田 宇宙
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第131号
学位授与の日付	令和6年3月15日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当
学位論文の題目	<b>磁束変調の原理を用いたコンシクエント極可変界磁モータに関する研究</b>
論文審査委員	(主査) 教授 深見 正                      教授 小山 正人 教授 大澤 直樹 東京工業大学工学院 電気電子系 教授 千葉 明 日立 Astemo 株式会社 技術開発統括本部 高橋 暁史

## 論文内容の要旨

永久磁石モータは、カーボンニュートラル社会を実現するために果たす役割は大きく、高トルク・高出力を要求される用途に幅広く用いられる。一方、永久磁石の磁束は基本的に一定であるため、高速回転時において、鉄損の増加や、弱め電流による銅損のため効率が悪化する。そこで、広範囲の高効率駆動の観点から、可変磁束モータに関する研究が盛んに研究されている。可変磁束モータの一方式であるハイブリッド界磁モータは、永久磁石に界磁巻線を組み合わせた可変磁束モータであり、永久磁石の磁束を界磁巻線に通電する界磁電流によって弱め界磁、強め界磁できる構成である。一方、実用化にあたり、課題となるのは、モータコストと製造性である。

本論文では、上記を踏まえ、実用化の課題となるモータコストとモータ製造性の障壁を低くするハイブリッド界磁モータを実現する一手段として、磁束変調の原理に着目している。磁石コスト低減を期待できるコンシクエント極と、磁束変調の原理を組み合わせることで、従来構成を踏襲するか、あるいは簡易な構成で実現可能なハイブリッド界磁モータを検討する。このような磁束変調の原理を用いたハイブリッド界磁モータは、ギャップ構成として、(i) ラジアルギャップ型及び、(ii) アキシシャルギャップ型が考えられる。

(i). ラジアルギャップ型に関しては、従来の集中巻の固定子を流用でき、回転子構造も単純であるため製造性に優位性がある。しかしながら、いくつか先行する類似構成の検討事例は存在するものの、回転軸の軸偏心を助長する不平衡磁気吸引力が発生する構成であり、またハイブリッド界磁モータとして成立する極スロットコンビネーションが明らかになっていない。

(ii). 磁束変調の原理を用いたアキシシャルギャップ型モータに関しては、いくつか先行する検討事例が存在する。界磁源に永久磁石を用いる構成は、永久磁石による鉄損や、弱め界磁電流による銅損のため、効率向上に課題がある。また、界磁源をハイブリッド界磁

モータとして採用した構成が提案されているが、界磁源に永久磁石を用いる構成に対してトルクが低い。すなわち、磁束変調の原理を用いたアキシアルギャップ型モータは、トルク及び効率の両立に課題がある。

(i)に関しては、まず理論的に不平衡磁気吸引力が発生せず、ハイブリッド界磁モータとして成立する極コンビネーションを示す。次に、既存の SPMSM 及び、IPMSM と電磁気特性を比較することで、提案モータの特徴を定量的に示す。また、製作した実験機を評価し、設計理論および電磁気特性検証の妥当性を確認する。さらに、提案構造の結線・回路構成を変更することで、高トルク化・高効率化する手法を考案し、電磁気性能を、電磁界解析及び、製作した試作機によって検証する。

(ii)に関しては、内径側に界磁巻線を配置し、シャフトを磁路とすることで、トルク密度向上を図った、コンシクエント極を有する新たな磁気回路を提案する。また、提案構造の界磁磁束をモデル化し、トルク密度向上メカニズムを明らかにする。そして、既存のアキシアルギャップ構造と電磁気特性を比較し、提案構造の優位性を定量的に示す。製作した実験機を評価し、提案した磁束モデル及び、電磁気特性検証の妥当性を確認する。本論文の構成は以下である。

第1章では、可変磁束モータの研究背景を示し、実用化の課題がコストと製造性であると仮説し、磁束変調を用いた、コンシクエント極モータに関する研究の目的を示す。

第2章では、従来の永久磁石モータ構成に近く製造性の障壁が低いラジアルギャップ型のコンシクエント極モータ構成を提案し(2.2節)、動作原理を示す(2.3節)。次に、実際のモータ設計に活かすにあたり、理論的に電磁気特性を把握できる必要がある。具体的には、モータ設計において重要な極スロットコンビネーションや平均トルク・トルクリプルの設計指針について示す(2.4節)。また、提案モータの採用を検討するにあたり、既存のモータに対して、優位性と短所を把握しておくことが重要である。そこで、トルク・効率・力率など基本的な電磁気性能を電磁界解析で検証し、(2.5節)、ある要求仕様の諸元の同一条件下における電磁気性能を比較する(2.6節、2.7節)。最後に、電磁気性能検証の妥当性を確認するため、実験機を作製し評価する(2.8節)。

第3章では、第2章で提案した磁束変調を用いたコンシクエント極の可変磁束モータに適用可能な、界磁巻線を用いない方式を提案し(3.2節)、動作原理を示す(3.3節)。また、提案する方式を第2章で提案したモータ構成に適用した際の電磁気性能を、電磁界解析及び、製作した実験機により検証する(3.4節)。最後に、提案する方式を第2章で提案したモータ構成と比較し、優位性を定量的に示す(3.5節)。

第4章では、アキシアルギャップ型の磁束変調の原理を用いたコンシクエント極モータを提案し(4.2節)、動作原理を示す(4.3節)。次に、空隙磁束密度、逆起電力の高調波成分及びトルクリプルに関して、FHCM 特有の電磁気特性を分析するため、高調波の理論式を展開する(4.4節)。また、提案する FHCM のトルク向上メカニズムに関して、界磁磁束モデルを提案し(4.5節)、電磁界解析により、インダクタンス、トルク及び、効率といった電磁気特性を検証する(4.6節)。最後に、電磁界解析の妥当性を確認するため、実験機を作製し評価する(4.7節)。第5章で、本論文の総括を示す。

## 論文審査の結果の要旨

永久磁石モータは、カーボンニュートラル社会を実現するために果たす役割は大きく、高トルク・高出力を要求される用途に幅広く用いられる。一方、永久磁石の磁束は基本的に一定であるため、高速回転時において、鉄損の増加や、弱め電流による銅損のため効率が悪化する。そこで、広範囲の高効率駆動の観点から、可変磁束モータに関する研究が盛んに研究されている。可変磁束モータの一方式であるハイブリッド界磁モータは、永久磁石に界磁巻線を組み合わせた可変磁束モータであり、永久磁石の磁束を界磁巻線に通電する界磁電流によって弱め界磁、強め界磁できる構成である。一方、実用化にあたり、課題となるのは、モータコストと製造性である。

本論文では、上記を踏まえ、実用化の課題となるモータコストとモータ製造性の障壁を低くするハイブリッド界磁モータを実現する一手段として、磁束変調の原理に着目している。磁石コスト低減を期待できるコンシクエント極と、磁束変調の原理を組み合わせることで、従来構成を踏襲するか、あるいは簡易な構成で実現可能なハイブリッド界磁モータを検討している。

磁束変調の原理を用いたハイブリッド界磁モータとしては、ギャップ構成として、シングルギャップ型とダブルギャップ型が考えられる。シングルギャップ型に関しては、従来の集中巻の固定子を流用でき、回転子構造も単純であるため製造性に優位性がある。しかしながら、いくつか先行する類似構成の検討事例は存在するものの、原理的に検討された事例は少なく、設計指針を与えるには至っていない。また、ダブルギャップ型の磁束変調の原理を用いたハイブリッド界磁モータに関してもいくつか先行する検討事例が存在するものの、回転子と電機子に囲われている界磁源の冷却性に構造的な欠点があったり、検討課題が多く残されていた。

このような検討課題に対して、本研究では、シングルギャップ型に関して、まず新たなモータ構造を提案し、これに関して、理論的に電磁気特性を把握できる設計指針を示している。次に、既存の永久磁石モータと電磁気特性を比較することで、提案モータの特徴を定量的に示している。また、製作した実験機を評価し、設計指針及び電磁気特性の妥当性を確認している。さらに、提案モータの構造、結線及び回路を変更することで、高トルクか・高効率化する手法を考案し、その電磁気性能を、電磁界解析、及び製作した実験機によって検証している。ダブルギャップ型に関しても、新たなモータ構造を提案するとともに、そのトルク発生メカニズムを明らかにするための磁束モデルを示している。併せて、既存のアキシアルギャップモータの電磁気特性と比較し、提案モータの優位性を定量的に示している。さらに、製作した実験機を評価し、構築した磁束モデルと電磁気特性の妥当性を確認している。

申請論文は全5章で構成され、各章の内容は次に示すとおりである。

第1章では、可変磁束モータの研究背景を示し、実用化の課題がコストと製造性であると述べ、磁束変調を用いた、コンシクエント極モータに関する研究の目的を示している。

第2章では、従来の永久磁石モータ構造に近く製造性の障壁が低いラジアルギャップ型

のコンシクエント極モータを提案し、その動作原理を示している。次に、実際のモータ設計において重要な極スロットコンビネーション、平均トルク及びトルクリプルの設計指針について示している。さらに、提案モータの採用を検討するにあたり、既存のモータに対して、優位性と短所を把握するため、トルク、効率、力率など基本的な電磁気性能を電磁界解析比較している。最後に、電磁気性能検証の妥当性を確認するため、実験機を作製し評価している。

第3章では、第2章で提案した磁束変調を用いたコンシクエント極の可変磁束モータに適用可能な、界磁巻線を用いない方式を提案し、動作原理を示している。また、提案する方式を第2章で提案したモータ構造に適用した際の電磁気性能を、電磁界解析及び製作した実験機により検証している。さらに、提案する方式を第2章で提案したモータ構造と比較し、その優位性を定量的に明らかにしている。

第4章では、アキシアルギャップ型の磁束変調の原理を用いたコンシクエント極モータを提案し、その動作原理を示している。また、提案モータ特有の電磁気特性を分析するため、ギャップの磁束密度、逆起電力の高調波成分及びトルクリプルに関する理論式を示している。さらに、提案モータのトルク向上メカニズムに関して、従来構造と比較するため、共通の磁束モデルを提案し、電磁界解析により、インダクタンス、トルク及び効率といった電磁気特性を検証している。最後に、電磁界解析の妥当性を確認するため、実験機を製作し評価している。

第5章では、各章の結果をまとめるとともに、研究を発展させるうえでの課題や今後の展望について述べている。

本研究成果は、博士後期課程在学中において、査読付き論文4編(和文2編、英文2編)、国際会議での発表3件、国内学会での発表3件であり、すべて申請者が筆頭著者として発表している。査読付き論文での論文賞(電気学会産業応用部門・部門論文賞)の受賞、国内学会での優秀論文発表賞(電気学会全国大会・優秀論文発表賞)の受賞を含めて、これらは申請論文の研究成果が学会において高い評価を得ていることを客観的に示すものである。なお、技術者倫理における高度な倫理観についても確認済みである。

よって、本論文は博士(工学)の学位に十分値すると判断する。

氏名	もり けいと 森 恵人
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第132号
学位授与の日付	令和6年3月15日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当
学位論文の題目	InGaN 量子井戸の電子状態と再結合過程に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 山口 敦史      教授 井田 次郎 教授 宮田 俊弘 大阪大学大学院 工学研究科 電気電子情報通信工学専攻 教授 小島 一信 三重大学基盤推進機構 半導体・デジタル未来創造センター 教授 濱口 達史

## 論文内容の要旨

窒化物半導体は光デバイスの材料として非常に潜在能力の高い材料であり、現在、InGaN 量子井戸 (Quantum Well: QW) を活性層に用いた青色・緑色発光ダイオード (Light-Emitting Diode: LED) や紫色半導体レーザ (Laser Diode: LD) は、例えば、照明や光ディスクのピックアップとして用いられている。今後も、殺菌用の新紫外線 LED やヴァーチャル・リアリティ用の三原色 LD など、新しい半導体デバイスの実現に向けた研究が進められている。最近では、InGaN 系赤色 LED や AlGaIn 系 LD、窒化物系量子カスケードレーザなど、デバイス機能・構造が複雑化しており、そのような状況では、Si のように仮想空間 (シミュレーション) 上で、デバイス設計の最適化ができると、効率的なデバイス作製に繋がると考えられる。今日の窒化物半導体分野では、物性研究よりもデバイス作製が先行している状況であるが、デバイス作製には時間も費用もかかるため、ある程度が目途が立っている状態でデバイス作製を目指すという意味でも、シミュレーションは有用な手段になると考えられる。シミュレータ作成のためには、窒化物半導体の電子状態と再結合過程の包括的な理解が必要であるが、現在のところ、完全な解明には至っていない状況である。窒化物半導体 (例: InGaN-QW の場合) は、高い欠陥密度、ポテンシャル揺らぎ、大きなピエゾ電界、強い励起子効果、歪みに敏感な価電子帯のバンド構造、など、様々な効果とそれに伴う複雑な電子状態と再結合過程を呈しているため、これらを1つずつ理解していく必要がある。例えば、InGaIn は混晶組成を変調することで、発光波長が紫外線から赤外線までに及ぶが、発光波長が長くなる (In 組成が大きくなる) につれて発光効率 (内部量子効率; Internal Quantum Efficiency: IQE) が低下する。今後、環境保全への観点から、光デバイスを窒化物半導体で全てカバーするという試みがされているが、IQE 低下の原因についての、いくつかの説が提案されているが、定量的な評価の報告

は少ない。また、IQE 低下について、きちんと議論するためには、正確な IQE を求める手法の確立が必要である。一方で、LD の偏光特性を制御する上で重要な物性定数である変形ポテンシャルについても、GaN や AlN の値は正確な値が同定されている。他方で、InN や InGaN についても変形ポテンシャルの値が報告されているものの、正確な値ではない可能性がある。

そこで、本研究では、シミュレータ作成に向けた窒化物半導体における電子状態と再結合過程の包括的な理解のために、InGaN-QW の IQE を正確に測定する方法を確立し、InGaN-QW における In 組成の増大に伴う IQE 低下の原因の解明を行い、欠陥密度が InGaN-QW のキャリアダイナミクスに与える影響を調べた。また、InGaN の変形ポテンシャルの決定とそれを応用した面発光レーザの偏光制御の実証を行った。

以下に本学位論文の構成と、各章の概要を述べる。

- ・第 1 章：序論（窒化物半導体の背景と課題）
- ・第 2 章：InGaN-QW の正確な IQE 測定方法の確立
- ・第 3 章：混晶組成の異なる InGaN-QW の放射・非放射再結合寿命の分離評価
- ・第 4 章：欠陥密度の異なる InGaN-QW の放射・非放射再結合寿命の分離評価
- ・第 5 章：InGaN の変形ポテンシャルの決定と表面発光の偏光制御の実証
- ・第 6 章：結論

第 2 章では、窒化物半導体の IQE を測定する従来の手法について問題点を提示し、本研究室で提案している、窒化物半導体の正確な IQE を実験的に求める光音響・発光同時計測法を InGaN-QW に適用できるように測定系を改善した。そして、得られた IQE の値に再現性・妥当性があることを示した。

第 3 章では、活性層の In 組成が系統的に変化している c 面 GaN 基板上 InGaN-QW 構造の放射・非放射再結合寿命を分離評価し、In 組成の増大に伴う IQE 低下は、放射再結合レートの低下が要因であることを実験的に示し、放射・非放射再結合寿命の In 組成依存性の振る舞いを矛盾なく説明した。

第 4 章では、活性層の欠陥密度が異なる c 面 GaN 基板上 InGaN-QW 構造の放射・非放射再結合寿命を分離評価し、全てのサンプルにおいて放射再結合寿命の温度・励起強度依存性は同じ値であり、非放射再結合寿命は欠陥密度に応じて系統的に変化する妥当な結果を得た。さらに、欠陥密度の高い InGaN-QW サンプルにおいては、従来の IQE 測定法は妥当な値を得られない可能性があることを示した。

第 5 章では、InGaN(InN)変形ポテンシャルの決定について、これまで過去に報告された値についての懸念点を示し、本研究で InGaN-QW に直接的に歪みを導入して、実験的に変形ポテンシャルを決定し、妥当な値であることを示した。さらに、InGaN-QW への面内歪みの導入は、面発光レーザの偏光制御への応用にも活用できることを示した。

## 論文審査の結果の要旨

窒素を含む化合物半導体である窒化物半導体材料は、白色 LED（照明用）、青色 LED（フルカラーディスプレイ用、イルミネーション用など）、緑色 LED（交通信号用、フルカラーディスプレイ用）、青紫色半導体レーザ（ブルーレイ光ディスク用）、青色半導体レーザ（プロジェクタ用）などの発光デバイスに用いられ、日常生活に広く普及している。しかしながら、今もなお、材料のポテンシャルを完全に生かし切れている状態ではなく、上記のデバイスのさらなる特性向上や、開発途上である紫外線 LED（殺菌用）、緑色半導体レーザ（プロジェクタ用）、赤色マイクロ LED（ディスプレイ用）などの研究開発が世界中で活発に行われている。もともと窒化物半導体発光デバイスは、紫色～青色で発光する InGaN 量子井戸発光層から開発がスタートしたが、InGaN の In と Ga の組成比率を変えることにより、発光する波長領域を徐々に拡大してきている。しかしながら、単純に組成比率を変えるだけでは緑色領域で発光効率などの素子特性がかなり悪くなってしまうことが知られている。これはグリーンギャップ問題と呼ばれ、業界内で大きな問題となっている。また、LED に大電流を流した際に発光効率が低下してしまう Droop 現象と呼ばれる問題もあり、これはスタジアム照明など高輝度の照明に LED を用いる際の省エネルギー化に大きな問題となっている。

申請論文は、これらの問題を解決するために、まだまだ物理的な理解が不十分である InGaN 量子井戸の電子状態や再結合過程の機構を明らかにすることを大きな目的としている。そのために、新たな光学実験手法を開発し、それによる評価を実施し、その結果を量子力学に基づく理論により解析し、あらたな知見を得ている。

申請論文は 6 章で構成されており、各章の内容は次に示すとおりである。

第 1 章では、研究を遂行するに至る学術的背景として、窒化物半導体発光デバイスの現状について説明されている。また、本論文の研究の目的が記載されている。

第 2 章では、本論文において鍵となる実験手法である「光音響・発光同時計測」について説明し、この測定における S/N 比向上の手法の発案と実際の実施について書かれている。

第 3 章では、「光音響・発光同時計測」と時間分解発光測定の結果を組み合わせ、半導体内のキャリアの輻射再結合寿命と非輻射再結合寿命を独立に決定する実験と解析の手法について説明し、In 組成が異なる InGaN 量子井戸試料シリーズにおいて、In 組成が大きくなる（すなわち、発光波長が長くなる）ほど発光効率が低下する問題の原因が、非輻射再結合確率の増大ではなく、輻射再結合確率の減少に起因することを明らかにしている。

第 4 章では、InGaN 量子井戸にイオン注入を行った試料シリーズで、同様の実験と解析を行い、イオン注入量が増えるほど非輻射再結合確率が增大する、という予想どおりの結果を得るとともに、その際に輻射再結合確率は変化しないことを明らかにしている。

第 5 章では、発光デバイスの偏光特性を決定づける価電子帯の波動関数を歪みで制御できることを実験的に実証し、それに関連する変形ポテンシャルを世界で初めて直接的な実験から決定したことを報告している。

最後に、第 6 章では、各章の結果をまとめ、総括を行っている。

申請論文に記載されている研究成果は、半導体物性理論をはじめとする物理学を深く洞察している者にしか生み出すことのできないものであり、かつ、実際のデバイスへの応用のことを常に念頭に置かれたものとなっている。このため、学会や業界内での注目度も高く、今後、本申請論文の研究成果が、窒化物半導体デバイスの高性能化・低コスト化・新機能化等に繋がっていく可能性が極めて高いと考えられる。

申請論文の研究成果は、査読付き英語論文 3 件（学位申請段階では 2 件）に公開され、国際会議 5 件（口頭発表 4 件、ポスター発表 1 件）にて発表されている。上記の各国際学会においては、口頭発表での採択の確率は 3 割～5 割程度であり、申請論文の研究成果が学会において高い評価を得ていることが客観的に示されている。

よって、本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。

氏名	おおくら 大蔵 かおる
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第133号
学位授与の日付	令和6年3月15日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当
学位論文の題目	<b>Mechanical stress decreases the amplitude of twisting and bending fluctuations of actin filaments</b> (機械的ストレスはアクチンフィラメントのねじれと曲げのゆらぎの振幅を減少させる)
論文審査委員	(主査) 教授 辰巳 仁史      教授 平田 宏聡 教授 小島 正己 名古屋大学大学院理学研究科 生命理学専攻 准教授 成田 哲博

## 論文内容の要旨

細胞生物学において「力学的な力」は、生存のための細胞シグナル伝達、発生、創傷治癒、成長、分化、シナプス棘におけるアクチンフィラメントの安定化、がん転移など、様々な生物学的役割を果たすことが提唱されてきた。機械的な力が加わると、細胞内やその周囲の環境の力学的条件が変化し、細胞骨格の再編成が起こる。アクチンフィラメントの構造変化は、様々な生化学的因子と相互作用し、アクチン制御タンパク質のフィラメントへの結合を引き起こすため、局所的な細胞骨格の再編成を誘導する上で特に重要である。再編成の過程において、外部から加えられる力による微視的な機械的伸展、ねじれ、屈曲は、個々のアクチンフィラメントの分子レベルでの構造変化を引き起こし、ADF/コフィリンのアクチンフィラメントへの結合速度に影響を与え、以前はアクセスできなかった $\alpha$ -カテニンの結合部位を露出させる。これらの研究から、アクチンフィラメントの張力を増大させるような外力が加わると、アクチンフィラメントのコンフォメーションが変化し、制御タンパク質の親和性が変化する、細胞間接着タンパク質のアクチンフィラメントに対する親和性が変化するという仮説が導かれた。しかしながら、張力に依存したフィラメントダイナミクスの変化の詳細な定量的解析は行われていない。本研究では、アクチンフィラメントの力学的挙動に対する引張力の影響を評価するために、単一分子蛍光偏光（SMFP）顕微鏡と磁気ピンセットを用いて、異なる応力下における単一アクチンフィラメントのねじれおよび曲げ揺らぎの直接測定を行った。単一アクチンフィラメントにピコニュートンの力を加えたところ、単一アクチンフィラメントのねじれゆらぎと局所的な曲げゆらぎの振幅が減少したことを報告する。また、電子顕微鏡写真解析から、アクチンフィラメントのクロスオーバー長の統計的変動は、フィラメントの応力の増加とともに減少す

ることが示され、やはり張力の増加によるねじれ揺らぎの減少が示唆された。揺らぎの振幅の減少は、コフィリンや $\alpha$ -カテニンなどのタンパク質で観察されたように、アクチン結合タンパク質のアクチンフィラメントへの結合が張力依存的に制御されていることを説明できる。アクチンフィラメントとアクチン結合タンパク質の機械的ストレス依存的相互作用には、フィラメントの平均構造よりもゆらぎの変化が重要であることが明らかになった。

## 論文審査の結果の要旨

専攻内審査委員 3 名と学外の審査委員 1 名による 2 回の研究発表会（令和 5 年 10 月 30 日、令和 5 年 11 月 22 日）と専攻内審査会（令和 5 年 11 月 29 日）を実施し、申請者が学位を申請するのに十分な学力と知識を有することを確認した。令和 6 年に実施された学位論文公聴会（令和 6 年 1 月 24 日）では論文内容の詳細説明と質疑応答が行われ、発表内容及び質疑に対する回答内容から、学位申請者は該当分野において高度な専門知識を習得していることを確認した。博士後期課程の入学後にデータ取得や分析、論文作成の段階で、学位申請者が、研究遂行に必要な技術者倫理についての知識を持ち合わせていることが確認できた。

また、本研究の研究成果については、本学大学院在学中に査読付き論文 2 編(Okura et al., 2023; Okura and Tatsumi, 2023)、国際学会発表 1 件、国内学会発表 2 件を行っており、申請論文の成果が学会において高い評価を得ていることを客観的に示すものである。

提出された申請論文の内容を精査した結果、学位申請者は博士（理工学）に値する十分な学力と知識を有すると判断する。

論文の要旨は以下である。細胞生物学において「力学的な力」は、生存のための細胞シグナル伝達、発生、創傷治癒、成長、分化、シナプス棘におけるアクチンフィラメントの安定化、がん転移など、様々な生物学的役割を果たすことが提唱されてきた。機械的な力が加わると、細胞内やその周囲の環境の力学的条件が変化し、細胞骨格の再編成が起こる。アクチンフィラメントの構造変化は、様々な生化学的因子と相互作用し、アクチン制御タンパク質のフィラメントへの結合を引き起こすため、局所的な細胞骨格の再編成を誘導する上で特に重要である。再編成の過程において、外部から加えられる力による微視的な機械的伸展、ねじれ、屈曲は、個々のアクチンフィラメントの分子レベルでの構造変化を引き起こし、ADF/コフィリンのアクチンフィラメントへの結合速度に影響を与え、以前はアクセスできなかった $\alpha$ -カテニンの結合部位を露出させると推定されている。これらの研究から、アクチンフィラメントの張力を増大させるような外力が加わると、アクチンフィラメントのコンフォメーションが変化し、制御タンパク質の親和性が変化する、細胞間接着タンパク質のアクチンフィラメントに対する親和性が変化するという仮説が導かれた。しかしながら、これまでに張力に依存したフィラメントダイナミクスの変化の詳細な定量的解析は行われていない。本研究では、単一分子蛍光偏光(SMFP)顕微鏡と磁気ピンセットを用いて、一分子のアクチンフィラメントへの力学的負荷が引き起こすアクチンフィラメントの挙動の変化を評価した。ピコニュートンレベルでの力付加による単一アクチンフィラメントのねじれおよび曲げ揺らぎの直接測定を行った。単一アクチンフィラメントにピコニュートンの力を加えたところ、単一アクチンフィラメントのねじれゆらぎと局所的な曲げゆらぎの振幅が減少したことを報告した。

また、電子顕微鏡写真解析からも、アクチンフィラメントの構造のゆらぎの減少がフィラメントの応力の増加とともに観察された。揺らぎの振幅の減少は、コフィリンや $\alpha$ -カテ

ニンなどのタンパク質で観察されたように、アクチン結合タンパク質のアクチンフィラメントへの結合が張力依存的に制御されていることを説明できる。上記の結果は、アクチンフィラメントとアクチン結合タンパク質の機械的ストレス依存的相互作用には、フィラメントの平均構造よりもゆらぎの振幅の変化が重要であることを世界に先駆けて解明する優れた研究となった。

氏名	ひらの せいし 平野 誠志
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博乙 第63号
学位授与の日付	令和6年3月15日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項相当
学位論文の題目	高速道路の安全性向上のための凍結防止剤による塩害と COVID-19 クラスタ発生への対策評価と改善
論文審査委員	(主査) 教授 宮里 心一 教授 高橋 茂樹 富山県立大学大学院 工学研究科 環境・社会基盤工学専 教授 伊藤 始
	教授 木村 定雄 教授 大嶋 俊一

## 論文内容の要旨

市民生活や経済活動に欠かせない高速道路の安全・安心・快適を確保するためには、適切な維持管理が必要である。また、その充実を図るためには、PDCA サイクルの考え方に基づき、現場に根ざした業務の継続的改善を実施して、スパイラルアップを図っていくことが重要である。一方、営業中の高速道路を維持管理する道路保全技術者は、エッセンシャルワーカーとして、24時間365日に亘り、道路を守る使命を帯びている。そのため、道路保全技術者には、道路構造物の長寿命化に向けた計画や点検・診断、補修・工事などの「通常時」の対応に加え、大地震などの自然災害や感染症パンデミック発生などの「非常時」の対応も求められている。本論文では、北陸地区の高速道路の橋梁保全を担当する中で著者が直面した、通常時の課題である「凍結防止剤による塩害」と、非常時の課題である「COVID-19 クラスタ発生」について、実際に実施した様々な対策を精査するとともに、北陸地区の橋梁保全に関する維持管理のさらなる充実を目指して、各対策の評価および改善策を提案した。具体的な論文構成と主な成果を下記する。

はじめに、論文の全体構成について、第2～5章では、通常時の課題である「凍結防止剤による塩害」に関して研究を行った。第6章では、非常時の課題である「COVID-19によるクラスタ発生」に関して研究を行った。第7章では、通常時と非常時の課題から得られた提案に対して、「相互活用の可能性」に関して研究を行った。

第1章では、序論として、研究の背景、目的および構成についてまとめた。

第2章では、「北陸地区の高速道路における凍結防止剤による塩害」に関して現状把握を行った。その結果、①凍結防止剤散布作業では、ほぼ「塩化ナトリウム」が散布使用されていた、②損傷の大部分は、プレストレスコンクリート(PC)・鉄筋コンクリート(RC)中空床版けた端部2mなどの局部的に発生していた、③RC中空床版けた端部では、一部の鉄筋のみで腐食が進行し、その他の鉄筋においては腐食が抑制されていた、④試料採取の

約2割は冬期直後「春期」に行われており、季節変動を考慮した塩害評価が必要であった、⑤補修工法は断面修復工法と電気防食工法の事例が多かった、などを確認できた。

第3章では、「凍結防止剤に用いる塩の種類と季節変動が塩分浸透に及ぼす影響」に関して評価・提案を行った。その結果、①塩の種類の違いはモルタル表面の塩分吸収に影響を及ぼさなかったため、前章の散布状況も加味し、凍結防止剤による塩害の評価には「塩化ナトリウム」の散布に注目すべきであった、②コンクリート中の塩化物イオン濃度分布は季節変動の影響を受け、また塩分浸透予測シミュレーション結果も同様に季節変動の影響を受けたため、鉄筋腐食発生時期などの予測結果に相違が生じ、点検・補修計画の精度に悪影響を与える恐れがあった、③季節変動の影響の低減のため、「測定（春）データ」を用いて算出したC0、Dcの補正式（案）を提案した、などを評価・提案することができた。

第4章では、「凍結防止剤による塩害進展メカニズムの解明」に関して、評価を行った。その結果、①実験により、実際の塩害劣化の進んだRC道路橋で発生している損傷形態を、定量的に再現することができた、②劣化過程や鉄筋部位ごとに腐食速度は大きく異なった、③凍結防止剤による塩害の進展メカニズムを解明することができた、などを評価することができた。

第5章では、「凍結防止剤による塩害に適した補修方法」に関して、評価・提案を行った。その結果、①複合防食工法は、塩害損傷が進んだ劣化期のコンクリート構造物の補修工法として有効であった、②劣化期の塩害対策に複合防食工法を選択肢に加えることで、より合理的な工法の選択機会を増やすことが可能になった、などを評価・提案することができた。

第6章では、「COVID-19クラスター発生に関する対策」に関して、評価・提案を行った。その結果、①感染状況の「変化点」は要注意であり、感染状況に応じた素早い対応が必要であった、②感染症の特徴に応じた感染症BCPや事前細則の整備・更新が必要であった、③未知の感染症の場合、事前規定だけでなく「臨機の対応」が必要であった、④一般継続重要業務の「優先度」の判定として、「損害の大きさ」を新たな判断基準として追加することを提案した、⑤感染症に対する運用細則を定める際の「検討プロセス」を提案した、などの評価・提案を行った。

第7章では、「通常時・非常時の対応から得られた効果の相互活用」に関して、検討を行った。その結果、①技術者の減少やコストの最適化に関して、通常時・非常時の課題に対する提案を、相互に活用すること、および相互作用の可能性を提案した、②高速道路以外の活用の可能性について、市町村（中小規模）での活用や鉄道事業者（中小規模）での活用を提案した、などの提案を行った。

第8章では、総論として、各章の総括と今後の課題と展望についてまとめた。

## 論文審査の結果の要旨

市民生活や経済活動に欠かせない高速道路の安全・安心・快適を確保するためには、適切な維持管理が必要である。また、その充実を図るためには、PDCA サイクルの考え方に基づき、現場に根ざした業務の継続的改善を実施して、スパイラルアップを図っていくことが重要である。

一方、営業中の高速道路を維持管理する道路保全技術者は、エッセンシャルワーカーとして、24 時間 365 日に亘り、道路を守る使命を帯びている。そのため、道路保全技術者には、道路構造物の長寿命化に向けた計画や点検・診断、補修・工事などの「通常時」の対応に加え、大地震などの自然災害や感染症パンデミック発生などの「非常時」の対応も求められている。

以上の背景を踏まえて申請論文では、北陸地区の高速道路の橋梁保全を担当する中で申請者が直面した、通常時の課題である「凍結防止剤による塩害」と、非常時の課題である「COVID-19 クラスタ発生」について、実際に実施した様々な対策を精査するとともに、北陸地区の橋梁保全に関する維持管理のさらなる充実を目指して、各対策の評価および改善策を提案した。

第 1 章では、序論として、研究の背景、目的および構成についてまとめた。

第 2 章では、「北陸地区の高速道路における凍結防止剤による塩害」に関して現状把握を行った。その結果、①凍結防止剤散布作業は、ほぼ「塩化ナトリウム」が散布されていた、②損傷の大部分は、プレストレスコンクリート(PC)・鉄筋コンクリート(RC)中空床版けた端部 2m などの局部的に発生していた、③RC 中空床版けた端部では、一部の鉄筋のみで腐食が進行し、その他の鉄筋においては腐食が抑制されていた、④試料採取の約 2 割は冬期直後「春期」に行われており、季節変動を考慮した塩害評価が必要であった、⑤補修工法は断面修復工法と電気防食工法の事例が多かった、などを確認することができた。

第 3 章では、「凍結防止剤に用いる塩の種類と季節変動が塩分浸透に及ぼす影響」に関して評価・提案を行った。その結果、①塩の種類の違いはモルタル表面の塩分吸収に影響を及ぼさなかったため、前章の散布状況も加味し、凍結防止剤による塩害の評価には「塩化ナトリウム」の散布に注目すべきであった、②コンクリート中の塩化物イオン濃度分布は季節変動の影響を受け、また塩分浸透予測シミュレーション結果も同様に季節変動の影響を受けたため、鉄筋腐食発生時期などの予測結果に相違が生じ、点検・補修計画の精度に悪影響を与える恐れがあった、③季節変動の影響の低減のため、「測定(春)データ」を用いて算出した表面塩化物イオン量( $C_0$ )と見かけの塩化物イオン拡散係数( $D_c$ )の補正式を提案した、などを評価・提案することができた。

第 4 章では、「凍結防止剤による塩害進展メカニズムの解明」に関して、評価・提案を行った。その結果、①実験により、実際の塩害劣化の進んだ RC 道路橋で発生している損傷形態を、定量的に再現することができた、②劣化過程や鉄筋部位ごとに腐食速度は大きく異なった、③凍結防止剤による塩害の進展メカニズムを解明することができた、などを評価・提案することができた。

第5章では、「凍結防止剤による塩害に適した補修方法」に関して、評価・提案を行った。その結果、①複合防食工法は、塩害損傷が進んだ劣化期のコンクリート構造物の補修工法として有効であった、②劣化期の塩害対策に複合防食工法を選択肢に加えることで、より合理的な工法の選択機会を増やすことが可能になった、などを評価・提案することができた。

第6章では、「COVID-19 クラスタ発生に関する対策」に関して、評価・提案を行った。その結果、①感染状況の「変化点」は要注意であり、感染状況に応じた素早い対応が必要であった、②感染症の特徴に応じた感染症 BCP や事前細則の整備・更新が必要であった、③未知の感染症の場合、事前規定だけでなく「臨機の対応」が必要であった、④一般継続重要業務の「優先度」の判定として、「損害の大きさ」を新たな判断基準として追加することを提案した、⑤感染症に対する運用細則を定める際の「検討プロセス」を提案した、などの評価・提案を行った。

第7章では、「通常時・非常時の対応から得られた効果の相互活用」に関して、検討を行った。その結果、①技術者の減少やコストの最適化に関して、通常時・非常時の課題に対する提案を、相互に活用すること、および相互作用の可能性を提案した、②高速道路以外の活用の可能性について、市町村（中小規模）での活用や鉄道事業者（中小規模）での活用を提案した、などの提案を行った。

第8章では、総論として、各章の総括と今後の課題と展望についてまとめた。

申請論文は、3編の国内におけるフル査読論文（土木学会論文集2編、材料1編）ならびに1編の国際会議のほか、複数の簡易査読論文および多数の国内における学会発表に基づいており、極めて高く評価されている。

以上を総じて、申請論文は博士（工学）の学位として十分に値すると判断する。

氏名	むらかみ たかし 村上 岳	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博乙 第64号	
学位授与の日付	令和6年3月15日	
学位授与の要件	学位規則第4条第2項相当	
学位論文の題目	ランダム配向 UD テープ強化複合材料のひずみ分布と損傷挙動の可視化による面内・面外力学特性評価に関する研究	
論文審査委員	(主査) 教授 影山 和郎	
	教授 田中 基嗣	教授 中田 政之
	教授 吉田 啓史郎	教授 斉藤 博嗣
	海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所	
	構造・産業システム系 材料強度研究グループ長 松尾 剛	

## 論文内容の要旨

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は金属等の従来材料と比べ、強度・剛性に優れる材料である。その卓越した機械的特性が注目され、今や航空機材料として多用されており、自動車を始めとした工業製品へと適用が拡大している。自動車への適用が期待される材料として CTT (Chopped carbon fiber Tapes reinforced Thermoplastics) が挙げられるが、強度や剛性に優れるものの、力学特性評価手法が未確立であることから自動車への実装が遅れている。CTT は、自動車などで広く使用されているシェル構造に適用できる可能性がある。シェル構造の利点は、面内応力のみによる釣り合いが可能であり、曲げモーメントを低く抑えることができ、効率的に設計できる点にある。ただし、シェル構造はその薄さゆえに曲げに弱く、局所応力を負荷すると応力の釣り合いが崩壊しやすいため、面内の力学特性だけでなく、曲げ等による面外からの負荷によって生じる損傷挙動を評価し、これらを設計に反映する必要がある。CTT をシェル構造に適用する場合は、面内でランダムに変動する力学特性を統計的に評価する必要があるが、これを評価できる試験手法は未だ確立されておらず、課題となっている。一方、厚板の場合は、板厚の増大によって生じる CTT の面外異方性の面内の力学特性への影響を把握し、損傷要因となり易い面外せん断特性を考慮した設計を実施する必要がある。これに加え、脆弱な面外方向における損傷挙動を評価し、その損傷を設計において考慮することも不可欠である。

本論文の第1章では、研究背景と研究目的について述べた。CTT は炭素繊維 UD テープが面内に等方的に配向し、高剛性・高強度を発現する優れた材料である。しかしながら、CTT は面内で力学特性がランダムに変動するために評価が難しく、これを簡易に評価できる計測手法の確立が切望されている。また、CTT の面外には炭素繊維が主だって配向されていない事から異方性が生じている。自動車で多用されているシェル構造へ CTT を適用する場

合には、面内で確率的に変動する剛性や強度等の力学特性を統計的に評価できる試験手法の確立、面外異方性を考慮した設計および曲げ等の面外負荷時の損傷挙動の可視化が必要だが、これらは未だ実現されておらず、課題となっている。

第2章では、CTTの面内および面外のひずみ特性を可視化する手段として構築した3次元DIC解析システムとテレセントリック2次元DIC解析システムの性能、評価材料および試験条件についてそれぞれ述べた。

第3章では、CTTの面外せん断における内部損傷と3点曲げ破壊における内部損傷を可視化する手段として構築したIn-situ三次元X線CT面外せん断試験システム、In-situ三次元X線CT3点曲げシステムの性能、評価材料および試験条件についてそれぞれ述べた。

第4章では、CTTの面内ひずみ分布の可視化および面内力学特性の統計的計測手法についての提案を行った。CTTの面内弾性特性を観測し、試験片幅の小さい試験片における弾性率の導出方法を統計的な観点から提案した。また、CTTの面内ひずみ特性をDIC解析で取得する際の新たな課題として、計測したひずみが試験片表層に位置するUDテープや面外異方性に影響を受ける事について述べた。

第5章では、CTTの面外異方性の発現や損傷起因となる面外せん断特性を評価する手法として、面外せん断応力とひずみ特性を同時に取得可能な新規試験法を提案した。その上で、DIC解析と数値解析の結果を比較することによって新規試験法の妥当性を評価した。

第6章では、In-situ三次元X線面外せん断CT試験システムとテレセントリック2次元DIC解析システムで取得した結果からCTTの面外せん断損傷を可視化しその損傷挙動について考察した。

第7章では、面外せん断の影響を大きく受ける3点曲げ損傷の可視化を行った。ここではIn-situ三次元X線CT3点曲げ試験システムを活用し、3点曲げポンチ直下に生じる損傷(マイクロバックリング)の定量評価を実施した。これに加えて、面外せん断によって生じる損傷の起点とその進展のメカニズムを可視化した。

最後に、第8章において本研究の成果と課題について総括した。

本研究により、CTTの面内特性のばらつきと異方性を強度設計で考慮するために必要な力学特性評価法についての道筋があきらかになった。

## 論文審査の結果の要旨

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は金属等の従来材料と比べ、強度・剛性に優れる材料である。その卓越した機械的特性が注目され、今や航空機材料として多用されており、自動車を始めとした工業製品へと適用が拡大している。自動車への適用が期待される材料として CTT (Chopped carbon fiber Tape-reinforced Thermoplastics) が挙げられるが、強度や剛性に優れるものの、力学特性評価手法が未確立であることから自動車への実装が遅れている。CTT は自動車などで広く使用されているシェル構造に適用できる可能性がある。シェル構造の利点は、面内応力のみによる釣り合いが可能であり、曲げモーメントを低く抑えることができ、効率的に設計できる点にある。ただし、シェル構造はその薄さゆえに曲げに弱く、局所応力を負荷すると応力の釣り合いが崩壊しやすいため、面内の力学特性だけでなく曲げ等による面外からの負荷によって生じる損傷挙動を評価し、これらを設計に反映する必要がある。CTT をシェル構造に適用する場合は、面内でランダムに変動する力学特性を統計的に評価する必要があるが、これを評価できる試験手法は未だ確立されておらず、課題となっている。一方、厚板の場合は、板厚の増大によって生じる CTT の面外異方性の面内の力学特性への影響を把握し、とりわけ損傷要因となり易い面外せん断特性を考慮した設計を実施する必要がある。これに加え、脆弱な面外方向における損傷挙動を評価し、その損傷を設計において考慮することも不可欠である。

CTT は UD テープが面内に等方的に配向し、高剛性・高強度を発現する優れた材料である。しかしながら、CTT は面内で力学特性がランダムに変動するために評価が難しく、これを簡易に評価できる計測手法の確立が切望されている。これに加えて、CTT の面外には炭素繊維が主だって配向されていない事から異方性が生じている。自動車で多用されているシェル構造へ CTT を適用する場合には、面内で確率的に変動する剛性や強度等の力学特性を統計的に評価できる試験手法の確立、面外異方性を考慮した設計および曲げ等の面外負荷時の損傷挙動を可視化することが必要であるが、これらは未だ実現されておらず、課題となっている。

本研究では、CTT の面内および面外のひずみ特性を可視化する手段として構築した 3 次元 DIC 解析システムとテレンセトリック 2 次元 DIC 解析システムの性能、評価材料および試験条件について分析している。さらに、CTT の面外せん断における内部損傷と 3 点曲げ破壊における内部損傷を可視化する手段として構築した In-situ 三次元 X 線 CT 面外せん断試験システム、In-situ 三次元 X 線 CT3 点曲げシステムの性能、評価材料および試験条件について検討している。