

博士学位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

第 58 号

2026 年 9 月

京 都 産 業 大 学

は し が き

本号は、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、令和 8 年 9 月 23 日に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結果の要旨を収録したものである。

学位番号に付した甲は学位規則第 4 条第 1 項によるもの（いわゆる課程博士）であり、乙は同条第 2 項によるもの（いわゆる論文博士）である。

目 次

課程博士

1.	り 李	はくぶん 博文	〔博士（マネジメント）〕		1
2.	さかべ 坂部	けんた 健太	〔博士（理学）〕		6
3.	やまだ 山田	しょうたろう 将太郎	〔博士（先端情報学）〕		9
4.	いえひら 家平	かずき 和輝	〔博士（先端情報学）〕		14
5.	わだ 和田	しょうた 匠太	〔博士（生命科学）〕		18
6.	こにし 小西	ゆうた 雄大	〔博士（生命科学）〕		21

氏 名（本 籍）	李 博文 リ ハクブン（中国）
学 位 の 種 類	博士（マネジメント）
学 位 記 番 号	甲マ 第13号
学位授与年月日	令和8年9月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論 文 題 目	技術転換期における後発企業のキャッチアップ・プロセスと成長要因 —CATLの組織能力構築を中心に—
論文審査委員	主 査 具 承 桓 教授
	副 査 久 保 亮 一 教授
	〃 中 野 幹 久 教授
	〃 富 田 純 一 教授（東洋大学）

論文内容の要旨

本研究の背景には、内燃機関（ICE）自動車から電気自動車（EV）への技術転換に伴い、自動車産業の「コア部品（産業の心臓部）」がエンジンから車載電池へと移行しているという問題意識がある。車載電池は、航続距離、充電スピード、出力、安全性、コストなど、車両全体の競争力を左右する中核部品である。このような技術の転換期において、2011年に設立された後発企業である中国のCATL（寧徳時代）は、先行していた日韓の有力企業を追い抜き、短期間で世界トップの車載電池メーカーへと台頭した。自動車のコア部品である車載電池の後発メーカーであるCATLが、なぜ短時間でキャッチアップができたのか。この要因は、中国政府の政策支援や広大な国内市場といった「外部要因」で説明されがちである。しかし、同じ環境下でありながらCATLが他の中国電池企業を圧倒して突出した成長を遂げた理由は、外部要因のみでは十分に説明できない。そこで本研究は、EVへの技術転換期における中核部品メーカー・CATLを取り上げ、同社が後発企業でありながら短期間で日韓の先発企業をキャッチアップし、世界首位へ成長した要因を、企業内部の「能力構築プロセス」から明らかにすることを目的とする。

研究課題の遂行にあたり、本研究では数量的指標で成長の実態を確認しつつ、その背後にある複雑な因果メカニズムを時間軸に沿って詳細に解明するため、定性研究を基盤とする「単一事例研究（プロセス・要因分析）」を採用している。公刊された産業・企業レベルの定量データ（二次データ）や主要競合（パナソニック、LG、BYD など）との比較データに加え、現地工場調査や関係者へのインタビュー調査結果を補完的に用いることで、分析の妥当性を高めている。理論面では、キャッチアップ理論、能力構築論、サプライチェーン・マネジメント（SCM）論、マス・カスタマイゼーション（MC）論をレビューし、後発企業が外部機会をいかにして内部能力へ転換するのかという視点から分析枠組みを構築した。第3章で提示する分析枠組みでは、CATLの成長要因

に対して主に3つの視点からアプローチし、統合的な観点からキャッチアッププロセスと成長要因の分析を行う。具体的には、CATLの企業行動に焦点を当て、①生産能力の拡張（タイミング、生産性向上のためのデジタル技術活用、国際展開）、②SCMによる供給安定化・リスク管理・価格交渉力（特に原材料・部品調達能力）、③MCによる多様な顧客への対応能力と受注獲得能力、という各側面から分析を試みる。

本論文は全7章で構成されている。第1章では研究目的と背景を述べ、第2章では先行研究のレビューとその限界を指摘した上で、本研究の目的と意義を明示する。第3章では研究方法、分析枠組み、分析対象、および使用する定量・定性データについて概観する。

続く分析編（第4章～第6章）の概要は以下の通りである。第4章では、自動車産業のEV化がもたらした産業構造の変化と、CATL台頭に至るマクロ・ミクロの背景について論じる。車載電池が車両価格と性能を左右し、完成車メーカーの戦略に強い影響を与える部品であることや、コア部材（正極材、負極材、セパレーター、電解液）および原材料の特徴について述べる。中国政府による新エネルギー車（NEV）補助金政策や、外資を事実上排除する「ホワイトリスト制度」の実施は、幼稚産業保護のように国内に車載電池の実験場を創出した。これにより多くの中国企業が参入したが、その中でCATLは短期間で中国市場および世界市場の双方においてトップの地位を確立した。

第5章では、CATLがいかにして「後発性の不利」を克服したのかについて、実証的なプロセス分析を行う。成長の決定的な端緒となった2014年のBMWとの供給契約を指摘した上で、以下の3つの組織能力における動態的プロセスを詳述する。

① **生産能力拡張**：将来需要を先取りした大規模な投資決定により、生産能力を70GWh未満から700GWhを超える水準へと適時に拡張した。規模の拡大はスケールメリットを強化し、低価格と安定供給能力の確立につながった。立地戦略としては、中国国内において沿海市場型、資源・グリーン電力型、顧客近接型などの戦略的拠点展開（寧徳、溧陽、宜賓、上海臨港等）を行い、海外（ドイツ、ハンガリー）へも進出した。顧客との距離を縮めることで短納期を実現し、市場需要の変動に俊敏に対応できる体制を整えている。この多拠点拡張を支えたのが、高い自動化率と「量産再現性」を誇る先進的な生産技術である。具体的には、製造プロセスのデジタルツイン化や、MES（製造実行システム）・ERPの統合といったスマート製造システムを積極的に導入した。現場の工程改善データを迅速にR&Dへフィードバックする知識循環の仕組みにより、属人性に頼らない「組織学習スピード」を飛躍的に加速させた。

② **SCM力の強化**：部材調達において主要な二次・三次サプライヤーを傘下に入れるなど、川上を中心とした垂直統合型の分業体制を構築した。具体的には完全子会社の設立や資本提携などの形態をとっている。一方で取引システムにおいては、調達先を複数確保するマルチサプライヤー制（分散・複数調達）を徹底し、特定企業への依存リスクを抑制して価格交渉力を維持した。これが持続的な競争優位の確保につながっている。さらに、子会社（邦普循環）を通じた「リサイクル事業」を補完的仕組みとして組み込むことで、資源制約や環境規制（ESG）への柔軟な対応力を高めている。

③ **MC（マス・カスタマイゼーション）戦略**：外資系・民族系を問わず広範な完成車メーカーを開拓し、セダン、SUV、MPVといった多様な車種に対応していることをデータで実証する。顧客および車両モデルの多様化に対しては、セル自体の「標準化・共通化」を進めつつ、モジュール・パック組立段階やCTP（Cell to Pack）技術を活用することで、車両サイズ・形状・出力などのカスタマイズ要望に個別に差別化対応している。これにより、大量生産の効率性と個別対応の柔軟性を両立させている。また製品技術面では、三元系ニッケルイオン電池（正極材にNMC/NCAを採用）のみならず、LFP（リン酸鉄リチウムイオン電池）の設計・生産も手掛けている。加えて、複数の構造・機能的ソリューション（麒麟、神行、天行、M3P、逍遙など）のバリエーションをあらかじめ備えることで、顧客固有の要求へ効率的に対応する技術力を備えている。

第6章では、上記3つの領域（生産能力拡張・SCM・MC）における要素間の相互作用とパスを分

析し、これら 3 つの組織能力が相互に補完し合う重層的な結合関係（システム）にあることを論じる。

第 7 章では、結論とインプリケーションを述べる。CATL の成長において、政策支援や国内市場拡大といった外部要因の影響は限定的であったといえる。同社の真の競争優位の源泉は、「迅速かつ適切な生産能力拡張と安定供給能力」「川上中心の垂直統合（SCM）」「MC による顧客獲得」という 3 つの組織能力を内部で構築し、これらを相互補完的に連動させたメカニズムにある。川下（完成車メーカー）に対しては中立的な電池供給プラットフォームとして MC 能力の向上と関係深化を図って需要を安定させ、川上（調達）に対しては分散化と垂直統合によって供給リスクとコストを徹底制御するという「非対称なガバナンス」が、安定的な規模の経済と高収益性の両立を可能にした。この戦略的スタンスは、競合である BYD とは鮮明に異なる点である。本研究の学術的意義は、従来の後発企業キャッチアップ論で重視されてきた「技術学習中心の説明」を補完し、B to B の中核部品産業における「生産供給能力、供給網統治（SCM）、顧客別対応（MC）の同時構築と連動プロセス」という統合的視角を提示した点にある。抽象度の高かった能力構築論を、具体的な産業・企業データを用いて動態的モデルとして具現化した意義は大きい。また実務的意義として、以下の 3 点が提示している。①産業転換期において、後発企業がいかにして外部の市場機会を内部の自律的な組織能力へと転換すべきかという戦略的示唆、②完成車メーカー等に対し、産業エコシステムの再編期における新興の中核部品サプライヤーとの共進化的な関係構築（取引システム設計）のあり方、③ 政策立案者に対し、単なる需要創出だけでなく、企業が自律的に供給網や技術プラットフォームを形成できるような産業環境整備の重要性、についてである。

論文審査結果の要旨

外部審査委員を含めて 4 名（主査：具承桓教授、副査：中野幹久教授と久保亮一教授、外部審査委員：富田純一教授（東洋大学）によって、李博文氏の博士論文『技術転換における後発企業のキャッチアップ・プロセスと成長要因—CATL の組織能力構築を中心に—』の審査と最終試験が、2026 年 8 月 27 日（木）15:00 から 16:45 まで第 4 研究室棟地下 1 階の 06 室にて実施された。李氏の博士論文の要旨と内容についてプレゼンテーション、口頭試問（予備審査の時に指摘内容の改善有無、論文の意義、概念構成、定性・定量データの収集の精緻さ、データの解釈とロジック、リサーチクエストと結論の整合性、先行研究との関係、インプリケーションと今後の課題など）後、李氏の博士論文と最終試験としての口頭試問についての審議を行った。結論を先取りすれば、李博文氏の博士論文『技術転換における後発企業のキャッチアップ・プロセスと成長要因—CATL の組織能力構築を中心に—』は、『本研究科博士後期課程の博士論文』のレベルに達していることと、口頭試問に対する受け答えが適切かつ明確、明瞭であったことから、審査委員全員の一致した意見として最終試験は「合格」と判断し、本論文は「博士号」授与に当たると判断する。なお、本論文は学会誌査読論文を含む 3 編の論文が基盤となっている。

本論文は、内燃機関車から EV へ移行する技術転換期において、2011 年に設立された中国の後発企業が短期間でパナソニックや LG 化学、三星 SDI などの日韓の有力車載バッテリー企業をキャッチアップし、世界トップの地位を獲得し、持続的な成長を果たしている現状に着目し、CATL（寧徳時代新能源科技）の成長プロセスとその要因を明らかにするものである。同社のキャッチアップの成功要因は、単なるコスト優位性や政府支援策によるものではなく、市場形成と拡大期に対応する形で、適時な生産能力の拡充、川上中心の垂直統合（原材料とコア部品の焦点をおく）に

よるサプライチェーン・マネジメント（SCM）能力、多様な顧客および車両モデルへの対応できるマス・カスタマイゼーション（MS）能力（顧客獲得力）といった3つの組織能力が重層的に結合にしていることであると主張する。

では、本論文の研究背景とリサーチクエスチョンについて見てみよう。中国企業のキャッチアップ要因について、従来の多くの論者は政府の支援策や国内市場の大きさ、安価な労働力などの外部要因に焦点を当てるが多かった。しかし、政府の補助金政策や市場規模による量産効果の恩恵だけで、自動車産業における長期的な取引を獲得・維持することは困難である。特に、EVの機能と商品性を左右する車載バッテリーメーカーは、自動車メーカーが求める高い水準の品質・コスト・納期の条件を満たせる組織能力がなければ、その成長は不可能と言っても過言ではない。

また、外部要因だけでは中国企業間における競争優劣の発生を説明することもできない。CATLは中国系自動車メーカーのみならず、テスラやBMWをはじめとする欧米のグローバル自動車メーカーとの取引関係を構築・拡大しており、トヨタをはじめとする日系メーカーとの取引も増えつつある。車載バッテリー事業においては、車両ごとに異なる形状や仕様等を開発・設計・製造できる能力を有していなければ、取引への参入すら困難である。そこで本論文は、後発企業の成長要因を外部環境要因のみならず、企業内部の「組織能力」に焦点を当てて統合的に分析し、その成長要因を明らかにしようとしている。このようなアプローチと着眼点は高く評価できる。特に、近年地政学リスクへの関心が高まる中、車載バッテリー市場の構造変化や企業間競争・競争優位性に関して、デジタル・ICT産業を中心に中国企業の強みを分析する研究は散見されるものの、伝統的な製造業を分析対象として正面から企業競争力の向上や組織能力に重点を置いた研究は少ないことを考慮すると、価値ある研究と評価できよう。

次に、関連研究のサーベイおよびリサーチデザインにおいては、後発企業のキャッチアップ理論、能力構築論、SCM論、MC論を網羅的にレビュー・検討している。そこから「後発企業が外部機会をどのように内部能力へ転換するのか」という視点に基づき、リサーチデザインと分析枠組みの構築を行っている。これは、単に現象を追うというよりも、EV化という技術転換期における「イノベーターのジレンマ」「生産性のジレンマ」「技術進歩曲線の交代期」など、既存研究で指摘されてきた課題や現状を捉えた上で、複数の要因から後発企業のキャッチアップ要因の探求に活用しており、丁寧な研究モデル構築および論理構造の構築につながっている。

続いて、分析対象選定の妥当性と分析方法、データの収集・分析などの研究方法について見てみよう。CATLは元々モバイル通信用バッテリーメーカーであったが、参入すら困難と言われる車載バッテリー産業に参入し、短期間で既存企業をキャッチアップして2017年以降は世界トップの座を維持している企業であるため、分析対象としてのサンプル選定の適切さおよび分析方法の妥当性は確保されていると判断する。また、数量的指標で成長の事実を確認しつつ、その背後にある複雑な因果メカニズムを時間軸に沿って詳細に解き明かすため、定性研究を基盤とする「単一事例研究」を採用している。公刊された産業・企業レベルの定量データや主要競合との比較データに加え、現地工場調査や関係者へのインタビュー調査を補完的に用いている。守秘義務等によりすべてのデータを公開できなかったため、限定された定性データの活用にとどまり、より精緻かつ具体的な分析までに至らなかった点は指摘されるものの、論文全体の構成や論調、主張に大きな影響を与えるものではないと判断する。この点は今後の残された課題・検討余地として位置

付けられる。

分析内容とその整合性、結論の厳密さと妥当性について見ると、本格的な分析は第4・5・6章で行われている。まず第4章では、車載電池産業の発展過程と競争構造、EV市場の拡大と車載電池需要の増加、そして日韓企業から中国企業への競争構造の変化について考察している。その上で、CATLを取り巻くマクロ経済環境と中国政府のNEV政策がEV業界に与えた影響、主要プレイヤーの位置付けの変化等について、データを綿密に突き合わせながら分析している。第5章では事例分析を行っている。具体的には第3章の分析枠組みに基づき、①「生産能力（迅速かつ適切な生産能力拡張と拡張タイミング、市場志向の工場立地）」②「サプライチェーン構築とマネジメント（原材料と中核構成部品の内製を含む川上・川下の垂直統合、安定供給可能なサプライチェーンの構築と原材料志向の工場立地）」③「顧客および市場対応能力としてのマス・カスタマイゼーション戦略（製品設計および生産面における取り組みと、製品・技術対応力の範囲など）」という3つの領域における組織能力の形成がCATLの成長要因であると提示している。データからの読み取りと時系列的な動きを丁寧かつ精緻に、そして複眼的に分析し、CATLの成長要因とプロセスを明確に描いている。次に第6章では、これら3つの領域における組織能力間の相互作用について丹念に分析し、それらが相互補完関係にあり重層的に結合されているという結論を導き出している。最後に第7章の結論として、CATLの急成長の要因は以下の3点であり、これらの要因間における重層的な結合が組織能力向上の基盤になっていると主張する。①生産能力の迅速かつ適時性のある拡充：これは単なる設備投資や工場建設ではなく、完成車メーカーの量産計画に対応できる供給能力、品質管理能力、量産立ち上げ能力を含む組織能力の拡大と向上と言える。②川上中心の垂直統合型SCM体制の構築：特に川下では主要顧客との関係を深め、川上では調達先を分散・制御することで、需要の安定性と供給の柔軟性を同時に確保した。③MC能力の構築：多様なメーカーの異なる要求に対応できる製品戦略と生産プロセスの構築、デジタル技術の活用が能力向上に寄与した。大量生産の効率性を維持しながら、顧客・車種・市場セグメントごとの異なる要求に対応したことが、顧客基盤の拡大と市場シェアの上昇を可能にした。

以上のように本研究は、CATLのキャッチアップ・プロセスを単一の要因や側面からではなく、重層的な能力形成の過程として把握する点に特徴がある。つまり、単なるコスト優位や技術優位ではなく、複数の能力が重層的に結合して再構成された「組織能力」として解釈している。総合的に評価すると、本論文はリサーチクエスションと導き出された結論の整合性、丁寧かつ精緻な分析方法とデータ収集、複数領域にまたがる分析、丹念なディスカッションがなされており、学術的・実践的に一定の貢献が認められる論文である。よって、「博士号」の授与に当たるものと判断する。

氏 名（本 籍）	坂部 健太 サカベ ケンタ（大阪府）
学 位 の 種 類	博士（物理学）
学 位 記 番 号	甲理 第18号
学位授与年月日	令和8年9月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論 文 題 目	Development of Compact Refractive Adaptive Optics System、CRAO
論文審査委員	主 査 河北 秀世 教授
	副 査 佐川 英夫 教授
	〃 伊藤 豊 教授
	〃 大屋 真 准教授（国立天文台）

論文内容の要旨

本申請論文は、現代の天文学において天体からの光をより効率良く、かつ高空間分解能で観測するために不可欠な補償光学技術の技術開発に主に焦点を当てた学術論文です。とくに本申請論文で取り扱われているような小型補償光学装置の恩恵は、天文学分野にとどまりません。学位申請者は大型化しがちな補償光学装置を小型化し、必ずしも大気条件の良くない立地であっても、また比較的小規模な望遠鏡においても利用可能な可視光線波長域で動作する補償光学装置の開発に成功しています。

論文の第1章では、研究の背景を概説しています。補償光学（Adaptive Optics: AO）は、大気による天体光の波面の乱れをリアルタイムで補正し、光学系が本来もっている解像度に近づけることで鮮明な画像を得る技術です。大型望遠鏡（口径8メートル以上）では標準的に装備される技術となっていますが、口径1~2m級の小型望遠鏡への導入は、装置が大型・高価であることなどから極めて限定的です。これら小口径望遠鏡は機動性が高く、サーベイ観測や時間領域天文学で有用であり、こうした小口径望遠鏡への補償光学装置の普及には「小型軽量化」と「シーイング条件の厳しい立地での補正能力」が課題となります。本研究の目的は、京都産業大学 神山天文台の口径1.3m望遠鏡のため、屈折光学系を用いて小型化を実現した可視光波長域で動作する補償光学装置「CRAO」を開発し、京都市内という立地における典型的な悪シーイング（約3秒角）を改善する現実的な解決策を実現することです。また、これとあわせて、補償光学設計の最適化に不可欠な、シーイング条件の厳しい立地における風速を推定する手法を提案し、実データで評価す

ることを目的としています。

論文の第2章は、CRAO の設計について述べています。まず、神山天文台の典型的な大気条件（フリード長： $r_0 = 3\text{cm}$ 、風速： $V = 20\text{m/s}$ ）を仮定し、これらに基づき補償光学装置シミュレーション・ソフト（COMPASS）を用いて、仕様を最適化しています。この最適化は、要求仕様に対してトレードオフとなるシステムのループ周波数や波面センサ、可変形鏡の素子数などを最適化するためのものです。その結果、 12×12 のシャック・ハルトマン型波面センサ（SH-type Wave Front Sensor; SHWFS）、40 素子の可変形鏡（Deformable Mirror; DM）、371Hz のループ周波数という構成を採用しています。また、機器全体を小型化するための光学設計として、レンズを用いた屈折光学系を採用し、DM への瞳生成とリレー光学系を兼用する「ダブルパスレンズ（Double-Path Lens; DPL）」方式の光学系を独自に開発・設計しています。これにより、 $390\text{mm} \times 270\text{mm} \times 200\text{mm}$ という小型サイズで補償光学装置を実現しました。制御システムとしては、DM の制御アルゴリズムとして DGC 法（直接勾配制御）と ZMC 法（モーダル制御）の2種類を実装し、Python と C++ の連携により目標の高速リアルタイム制御を達成しました。

論文の第3章では、CRAO の室内における補正性能試験について報告しています。実験室内で光源（He-Ne レーザー）と、回転する大気位相板（ $r_0 = 3.7\text{cm}$ 相当）を用い、風速 $1 \sim 25 \text{ m/s}$ に相当する模擬大気揺らぎを生成しています。ループ周波数 326 Hz で補償光学装置 CRAO を駆動させ、測定した波面から直接、DM の各素子を制御する電圧信号を生成する DGC 法と、Zernike 多項式で展開してから DM を制御する ZMC 法で補正性能（最終的に得られる Full Width of Half Maximum; FWHM）を比較しました。その結果、低風速（ 1m/s ）時では DGC 法と ZMC 法（項数=36）が最も良い性能（FWHM = $0.5 \sim 0.55$ 秒角）を示しました。風速が増加するといずれのアルゴリズムでも性能が低下し、 $V = 25 \text{ m/s}$ では FWHM=約 1.4 秒角に収束しました。この結果から、低い風速では DM のフィッティング誤差などが、高速域では制御の遅れによる時間誤差が性能を律速していると考えられます。

第4章では、京都産業大学 神山天文台の口径 1.3 m 荒木望遠鏡に CRAO を搭載して行った on-sky 試験観測の結果を報告しています。実際に天体（恒星）について計 14 夜の観測を実施しており、 $1 \sim 4$ 秒角の広範なシーイング条件下で補償光学が有効に動作することを確認しました。観測された星像の FWHM の改善係数（補正前/補正後の FWHM の比）は、全データの中央値で、約 1.5 倍を達成しました。波面誤差（Wave Front Error: WFE）の解析から、CRAO において波面誤差を約 56～60%改善できることが分かりました。また、CRAO は広い波長域の光を用いて補償光学を実現しているため、屈折光学系に見られる色収差の影響で性能が悪化していないかを評価するため、4 種のカラーフィルタ（R、G、B、White）を用いて性能を比較しています。その結果、波長による顕著な性能差は見られず、屈折光学系による色収差の影響は無視できると結論付けられます。観測された改善係数のシーイング依存性が、風速 20 m/s を仮定したシミュレーション結果とよく一致しており、CRAO が設計通り動作していることが示されました。

第5章は得られた結果についての議論を行っています。On-sky 試験観測で得られたナチュラル・シーイングと改善係数との関係性について、設計時に用いたシミュレーション結果との比較から、シミュレーションで想定していた DM のパターンとの違いについて検討し、この違いについては大きな影響がないと結論づけています。また、CRAO の設計において仮定していた風速条件（ V

= 20 m/s) について、実際に CRAO を動作させるために得られている SHWFS のデータをもとに風速を推定しています。大気層が一定速度で移動するとの仮説(テイラーの凍結流れ)に基づき、SHWFS 画像から得られるサブアパーチャ間の「Slope (波面傾斜)」と「Scintillation (強度ゆらぎ)」の時間と空間に関する相関係数から風速を導出したところ、Slope から得られた風速は地表付近の風を測定していること、また Scintillation から得られた風速は、比較的高高度の風速の影響が大きいことが分かりました。

第6章は全体のまとめにあてられています。本研究では、小型望遠鏡に最適化された補償光学システムの実現を目指し、神山天文台 1.3 m 望遠鏡用の小型可視光 AO「CRAO」を開発しました。CRAO は「ダブルパスレンズ」の採用により小型化を実現し、実観測試験において 1~4 秒角のシーイング下で恒星像の FWHM を中央値で約 1.5 倍改善する性能を実証しました。また、屈折光学系による色収差の影響は無視できることも確認しました。また、関連して開発した風速推定手法によって観測サイトの風速についても評価しうることを示しました。本研究により、観測サイトの大気条件に左右されにくい小型補償光学装置の最適化例と、観測サイト評価手法が示されています。

論文審査結果の要旨

本申請論文は、現代の天文学において天体からの光をより効率良くかつ高空間分解能で観測するために不可欠な補償光学技術の技術開発に主に焦点を当てた学術論文です。補償光学の技術は眼底検査など医療分野だけでなく、人工衛星から地上局へのデータ通信の高速化においても必須の基盤技術として様々な応用がなされており、とくに本申請論文で取り扱われているような小型補償光学装置の恩恵は、天文学分野にとどまりません。学位申請者はともすれば大型化する補償光学装置を小型化し、かならずしも大気条件の良くない立地であっても、また比較的小規模な望遠鏡においても利用可能な可視光線波長域で動作する補償光学装置「CRAO」の開発に成功しています。こうした特徴は、天文学において様々な立地にある小口径（1メートルクラス）の天体望遠鏡を実質的に高性能化するものであり、また、前述のように人工衛星との光通信における地上局としての望遠鏡にとっても重要です。従来の補償光学装置は大型望遠鏡かつ大気条件の良い観測サイトで使われることが前提になっており、本申請論文で議論するような小型化かつ比較的シーイング条件の悪い観測サイトでの応用については、十分に研究が行われてきませんでした。そうした視点から、本申請論文の内容は、学術的にも社会的にも影響力のある成果を含んでいると判断しています。また、本調査委員会は、博士学位論文の主要部分が、既に査読付き学術誌に学術論文として受理されていることを確認しています。

令和8年8月26日（水）に開催した博士学位論文公聴会および審査会において、学位申請者は、研究の背景および目的ならびに結果について詳しく解説し、審査委員の質問に対して的確に回答しました。これらの結果から総合的に判断して、本調査委員会は、本論文が博士学位論文に値するものと判定します。

氏 名（本 籍）	山田 将太郎 ヤマダ ショウタロウ（愛知県）
学 位 の 種 類	博士（先端情報学）
学 位 記 番 号	甲先 第8号
学位授与年月日	令和8年9月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論 文 題 目	Spatio-temporal feature analysis of visual positional information on the mouse cortex using machine learning models 機械学習モデルを用いたマウス大脳皮質上に現れる視覚位置情報の時空間特徴量解析
論文審査委員	主 査 伊 藤 浩 之 教授
	副 査 赤 崎 孝 文 教授
	〃 田 中 宏 喜 教授

論文内容の要旨

ブレインマシンインターフェース（BMI）とは、専用のデバイスを使用して、神経活動に由来する身体能力の回復や補助、拡張、神経生理メカニズムの解明などを狙う技術の総称である。BMIの主な処理の流れは、以下の通り（a~e）である：[a] 対象の神経活動を専用の記録機器で計測する。[b] 取得したデータに対する特徴量解析を行う。[c] 被験者へのフィードバック（モニターやアームなどのデバイスに反映するなど）を実施する。[d] フィードバックの影響から、被験者の神経活動が変化する。[e] 変化後の神経活動パターンに対して、a~cを繰り返し実施する。BMI分野は、電極の性質向上や統計解析の進歩などにより飛躍的に発展した。神経活動の電気生理的な性質を記録する場合、大きく分けて「侵襲度の高い電極」と「侵襲度の低い電極」の2種類を用途や環境に合わせ使い分ける。侵襲度の高い電極は時空間分解能が高い利点があるが、脳への物理的なダメージが大きいため、長期間の使用が困難である。一方で、侵襲度の低い電極は、時間分解能か空間分解能のどちらか、あるいは両方が低いという欠点があるが、脳への物理的なダメージが少ないため、長期間にわたる使用が容易である。本研究では、将来的な人工視覚デバイスの開発を念頭に、他の記録用電極に比べて侵襲度が低く、長期間の利用が可能と考えられる「ECoG(Electro Corticogram)電極」を自作して神経活動記録を行った。マウスの視覚皮質硬膜上に ECoG を埋め込み、麻酔下のマウスに異なる視覚刺激を提示し、複数電極点で局所脳波活動(Local Field Potential、LFP)を記録した。LFPの時空間活動データに対して、深層学習(CNN、

Convolutional Neural Network) を活用して、記録された低次元神経データ（少数の電極の記録による空間情報の低いデータ）から視覚情報量の抽出（視覚刺激位置の空間情報の特定）を行った。

実験手順は、以下の通りである。生体適合性の高い材料で作製した ECoG 電極（チャンネル数：6、2×3 レイアウト）を視覚皮質（右半球）の硬膜上に埋め込んだマウスを 5 匹用意する。頭部固定したイソフルレン麻酔下のマウスに対して片眼（左目）に 4 種類の視覚刺激（ディスプレイ上部の水平長方形、中央の水平長方形、下部の水平長方形、無刺激）を提示し、刺激で誘発される LFP を 6 点の電極で記録した。記録した LFP データに対して試行に渡る加算平均を行って得られる視覚誘発電位 (Visual Evoked Potential、VEP) は刺激提示後 1 秒以内に生じていることを確認した。そこで、刺激提示後 1 秒間のみの LFP データを用いて刺激識別を行った。各マウスに対して、記録された全データ（4 種類の各刺激について 1 日 500 試行、10 日間）の 80% を学習データに用いて CNN による刺激識別モデルを構築し、残りの 20% をテストデータに用いて交差検証によりモデルによる識別正答率を評価した。今回実験に用いた 5 匹すべてのマウスにおいて、CNN が示した正答率は約 45～70% と、チャンスレベル（25%）を大幅に上回っていた。これらの結果から、少数の記録電極点による空間分解能の低い神経活動データからでも、刺激位置の情報を抽出できることを確認した。

次に、刺激情報が LFP 信号（時空間活動データ）のどの特徴に含まれているかを調査した。LFP の時空間活動データが持つ特徴を部分的に欠損させたサロゲートデータを作成し、このデータを用いて CNN の学習を行い、交差検証での正答率の低下を調べた。サロゲートデータとしては、特徴シャッフリングと特徴ドロップリングの 2 つのケースを解析した。まず、特徴シャッフリングでは記録チャンネルをランダムに並べ替える空間シャッフリング、時間方向にデータをランダムに並べ替える時間シャッフリング、および空間と時間の双方に渡りデータをランダムに並べ替える時空間シャッフリングの 3 種類を行った。解析の結果、時間シャッフリングは空間シャッフリングに比べてより大きな正答率の減少が生じることが確認された。これは、マウスの視覚皮質上では空間位置情報がそれほど限局して表現されていないことおよび LFP が空間的に広がった神経活動の総和であることから、6 個の電極は類似した信号を記録しており、冗長性が高いことを反映しているためと考える。このため LFP の時空間データでは、刺激位置の情報は主として時間変動に含まれており、この微細な特徴を CNN が学習したと考える。次のステップとして、刺激位置情報が LFP の時空間データにおいて広がって表現されているのか、特定の時空間点に局在して表現されているのかを調べるために、特徴ドロップリングを行ったデータを用いて正答率の減少を調査した。この解析においても特定の電極チャンネルのデータを全時間区間に渡って 0 とした空間ドロップリングデータでは正答率の大きな減少は見られなかった。一方、時空間活動データにおいて 0.1 秒分の区間のデータを全チャンネルに渡って 0 とした時間ドロップリングデータでは、刺激提示後 0.25 秒および 0.75 秒付近の情報欠損により正答率は有意に大きく低下した。これらの時間領域は視覚誘発電位での正および負のピーク位置に対応しており、刺激位置の違いはこれらのピークの特徴に含まれていると考えられる。これらの時間区間が刺激位置判別において重要である

理由に関して、各電極チャンネルで記録される LFP の試行平均である VEP の 4 刺激に渡る分散を各時間で計算した。分散は上記の 2 つの時間域で大きく、CNN はこの分散を基に刺激位置判別を行っていると考ええる。また、4 刺激に渡る分散の時間変動プロファイルのチャンネル間での類似性を相関係数により解析を行った。5 匹のマウスはどのチャンネルをドロップしても正答率の減少が少ないケースと特定のチャンネルをドロップすると大きく正答率が減少するケースとに分類される。前者のケースでは、4 刺激に渡る VEP の分散の時間変動プロファイルのチャンネル間相関係数が 1 に近く、全チャンネルに渡って冗長に刺激位置情報が含まれていることが分かった。

一方、後者のケースでは、不均一な相関構造が存在し、刺激位置情報の量にチャンネル間で違いがあり、これが特定のチャンネルのドロッピングが有意な正答率の減少を生じる原因と考えた。

刺激提示後 0.25 秒付近の正のポテンシャルは刺激提示による ON 反応であると考えるが、0.75 秒付近の負のポテンシャルの生理学的な要因は今後の実験で解明する必要がある。刺激提示時間は 1 秒間であることから、刺激の OFF による反応ではないことは明らかである。視覚皮質内での rebound 抑制、視覚皮質―視床での活動ループ、高次皮質からの feedback 投射などの可能性が候補として考えられる。

最後に、今回の ECoG 電極で記録される LFP 信号の品質の持続性を確認するため、8 週間に渡る記録データを用いて、時間経過に伴う識別精度の変化を検討した。2 つの方法を比較した：(1) 第 1 週の 4 日間のデータセットで学習した識別モデルを固定し、その後毎週 1 日分のデータセットでモデルの正答率を評価する方法。(2) 毎週 1 日分のデータセットで学習し、各週の変化を反映したモデルで毎週のデータセットの正答率を評価する方法。前者では約 1 か月後に正答率が大幅に低下したが、後者では約 2 か月間に渡り、ある程度高い正答率が維持された。この結果からは BMI システムを用いた神経活動の復号化の性能を維持することは、神経活動の長期的変化に応じて学習条件とデータセットをアップデートすることで対処できる可能性を示唆していると考ええる。

論文審査結果の要旨

論文調査の手続きと調査結果に関して

学位申請者の山田将太郎（以下、学位申請者とする）から提出のあった博士後期課程学位論文の調査を以下の内容で実施した。

1. 主査 伊藤、副査 赤崎孝文、田中宏喜の合計 3 名の審査員より学位論文の査読を行い、研究目的の明確さ、研究方法の妥当性、研究結果の信頼性、考察の妥当性を審査した。
2. 令和 8 年 8 月 6 日に審査員 3 名の参加の下に公聴会を開催し、最終審査を行った。学位申請者自身により 30 分程度の学位論文の内容のプレゼンテーションを行い、その後 1 時間弱に渡り、口頭試問を 3 名の審査員および秋山教授をはじめ出席した博士後期課程指導教授が行った。
3. 主査の伊藤を中心として、審査員全員で学位論文の科学的妥当性、当該分野への貢献性などを審議した。伊藤から学位申請者が外部に公表した研究業績の説明が行われた。最後に、審査員全員の審査結果を合わせて、以下の最終判断を行った。

審査員全員の合意として、本論文は以下に述べる理由により、博士後期課程学位に十分に値する

と判断する。学位申請者が外部に公表した研究業績もすでに高く評価されており、最終審査において合格と判定する。

学位申請者の研究成果の外部への公表実績

学位申請者が博士学位論文の内容をまとめた学術論文は査読付英文雑誌 (Neuroscience Research) での掲載が受理されており、オープンジャーナルオンライン版で公開されている。また、博士学位論文の研究内容は国内外の学会および研究会で発表を行っている：北米神経科学会 (Neuroscience2025)、日本神経科学会 (Neuro2023、Neuro2024、Neuro2025)、生理学研究所研究会 (2023、2024)。特に 2023 年開催の日本神経科学会 (Neuro2023) において、プログラム委員会の審査の結果、口頭発表として選出されている。これらの雑誌および学会での論文発表の受理は、学位申請者の研究成果が学外においても高く評価されていることを証明している。

学位論文の内容に対する評価

申請論文は、視覚的な神経補綴技術の開発のための基本的な要素技術となる、神経活動データからの視覚情報復号化の機械学習モデルの構築と評価を実施している。将来的な実装の可能性を考慮して、これまであまり試みられていないマウス硬膜上皮質脳波 (ECoG) の時空間データを用いた視覚刺激位置情報弁別の畳み込み深層学習 (CNN) の性能評価と特徴分析を行った。結果として、刺激の空間位置の弁別を行うための情報が、脳波計測の電極位置の空間次元ではなく、脳波波形の時間次元の中に特徴づけられているという興味深い結果を得ている。

申請論文では、計測電極の作成から実験システムの構築、実験動物の準備と脳波電位データの取得、深層学習モデルの設計とデータセット構築・学習・評価までを独自かつ精密に実施した内容が適切にまとめられている。また、独自の解析として、データの空間構造や時間構造を操作した場合の弁別性能変化を網羅的に調査し、どのような時空間特徴に復号のための情報が含まれているかを明らかにしている。実験は注意深く実施され、十分な量の計測データを得るとともに、深層学習のパラメータ調整も含めた系統的なモデル解析がなされている。学習データで構築した深層学習モデルの長期的な持続性に関する解析も重要な結果と思われる。

上記の通り、実験実施とオリジナルの解析、新奇な知見の提示において一定のレベルに達しており、博士学位論文として十分な学術的内容を満たしていると判断する。

最終審査としての公聴会でのプレゼンテーションは明快であり、論文の主旨はよく伝わった。審査員からの口頭試問への対応も適切であり、学位申請者が自身の研究の内容を確実に理解していることが理解できた。これまでに国際学会を含む对外発表を精力的に行ってきており、専門分野のコミュニティでの議論が十分なされていることが窺われる。

学位申請者の研究に関する特記事項

学位申請者は博士学位申請までに3年間を超える期間（3年半）を要している点に関しては研究分野の特殊性が反映しているため、今回の学位審査において、この事情を特記しておく必要があると考える。神経科学の分野では、複数個体の実験動物からの神経活動の記録・データ収取およびデータ解析に多くの時間を要する。また、学位申請論文の研究では大量のデータを用いた機械学習を行っているため、GPU サーバーのよる多くの計算時間が必要である。また、神経科学の学術雑誌への論文投稿においては査読およびレビューアからのコメントに対応した Revise 作業などが長期に渡る傾向がある。これらの事情を考慮すると3年半で博士学位取得できることは学位申請者の努力を示していると考ええる。

氏 名（本 籍）	家平 和輝 イエヒラ カズキ（大阪府）
学 位 の 種 類	博士（先端情報学）
学 位 記 番 号	甲先 第9号
学位授与年月日	令和8年9月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論 文 題 目	Software-Defined Vehicle 実現に向けた 車載ネットワーク上のなりすまし攻撃とその検知・防御に関する研究
論文審査委員	主 査 井 上 博 之 教授
	副 査 秋 山 豊 和 教授
	〃 林 原 尚 浩 教授

論文内容の要旨

本研究は、自動車における Software-Defined Vehicle (SDV) の実現に向けて重要性が高まる車載ネットワークのセキュリティ課題に着目し、なりすまし攻撃およびサービス妨害攻撃の成立条件を明らかにするとともに、既存の車載資産を活用した実用的な検知・防御方式を提案するものである。近年、自動車は AD/ADAS の高度化、OTA (Over The Air) による継続的な機能更新、クラウドサービスとの連携、車載 OS の導入などにより、ソフトウェアを中心に価値を高める方向へ移行している。2024 年 5 月に策定されたモビリティ DX 戦略においても、SDV はソフトウェア起点の車両開発として位置付けられており、車両の開発効率化、販売後の機能拡張、多様なサービス連携を実現する基盤として期待されている。一方で、既存車両では Controller Area Network (CAN) が広く利用されており、Electronic Control Unit (ECU) の互換性、開発資産、コスト、リアルタイム性の制約から、すべての通信を短期間で Ethernet へ置き換えることは困難である。したがって、SDV への移行期には CAN、車載 Ethernet、SOME/IP、10BASE-T1S などが混在し、さらに Domain-oriented Architecture や Zone-oriented Architecture に代表される新しい構成と既存 ECU が併存すると考えられる。このような環境では、外部接続機器や OTA 経路から侵入した攻撃者が、Central Gateway、Domain Controller、Zone Gateway、HPC 等を経由して CAN や Ethernet 上の制御通信へ到達する攻撃パスを想定する必要がある。

本論文では、まず車載ネットワークにおけるなりすまし攻撃を、正規通信と攻撃通信が同時に観測される Normal and Anomaly (Attack)、正規通信が停止または阻害され攻撃通信のみが観測

される Anomaly (Attack) Only、通信経路上で改ざんが行われる Man-In-The-Middle に分類し、従来の侵入検知システム (IDS) が前提としてきた脅威モデルの限界を整理する。認証・暗号化、SecOC、IPSec、TLS 等の対策は有効である一方、車載システムでは通信遅延、計算資源、導入コスト、既存 ECU との互換性が制約となる。また、すべての ECU に Hardware Security Module (HSM) や Hardware Root of Trust を搭載することも現実的ではない。そのため、暗号化や完全な送信元認証を全面的な前提とせず、通信プロトコルの状態遷移、通信周期、物理層タイミング、既存スイッチ上の監視機能を用いて、攻撃の成立条件を分析し、軽量に検知・緩和する方法を検討する。

CAN に対しては、送信元アドレスを持たず CAN ID によりメッセージ種別を識別するという特性に着目し、特定 CAN メッセージを送信する正規 ECU をバスオフ状態へ遷移させとうえて、攻撃端末が同一 CAN ID のメッセージを周期的に送信するなりすまし攻撃を示す。この攻撃では、正規メッセージと攻撃メッセージが混在せず、攻撃者のメッセージのみが所定周期で観測されるため、通信周期の乱れや重複を検知する従来 IDS では発見が困難となる。また、攻撃はビットエラーやエラーフレームの注入により対象 ECU の送信エラーカウンタを増加させることで成立し、正規 ECU だけを通信から離脱させ、他の端末の通信を継続させ得る点に特徴がある。模擬環境および実車環境での評価により、この攻撃が Anomaly (Attack) Only 型の脅威として成立し、既存の周期監視や自己検知を回避し得ることを示す。

SOME/IP-SD に対しては、サービス探索および提供に関する状態遷移モデルを分析し、FIND SERVICE、OFFER SERVICE、STOP OFFER SERVICE 等の制御メッセージを悪用したサービス無効化攻撃の成立条件を明らかにする。AUTOSAR SD 仕様および vsomeip 実装を用いた評価により、仕様に準拠した実装では成立しにくい攻撃であっても、Timer 処理、TTL 値の扱い、実装差異、仕様外の動作によって成立可能性が変化することを示す。さらに、SOME/IP のサービス探索フェーズにおけるサーバなりすまし攻撃に対し、パケットスイッチ上で動作する軽量な検知・緩和方式を提案する。提案方式は、サービス利用開始前に OFFER SERVICE 等の制御メッセージ、端末リスト、内部状態を監視し、異常状態では通信許可リストを更新しない、またはなりすましメッセージを破棄することで、攻撃者のみがサービスを提供している状況でクライアントがサービス利用を開始することを防ぐ。36 通りの攻撃パターンを用いた評価では、多くの攻撃をサービス開始前に検知・緩和でき、正常通信の継続性、低遅延性、および ROM/RAM 使用量の観点から車載システムに適用可能な軽量性を確認している。

10BASE-T1S に対しては、Physical Layer Collision Avoidance (PLCA) による送信機会制御に着目し、受信時刻、フレームサイズ、PLCA パラメータから送信元 Node ID を推定するなりすまし検知方式を提案する。10BASE-T1S は MAC 層との互換性を持ち、Zone-oriented Architecture 等における末端ネットワークとして期待される一方、送信元 MAC アドレス等の論理的識別情報は偽装され得る。提案方式は、論理的な送信元情報と物理層タイミングから推定した実際の送信機会との不整合を検出することで、Node ID 偽装やフレーム送信機会の悪用を検知する。実機評価では、PC および STM32F4Discovery を用いた環境において、期待される Node ID 範囲に近い推定結果を得ており、測定時刻の精度や PLCA 設定が誤差要因となることを明らかにした。これにより、内容認証だけに依存せず、物理層の性質を利用して送信元偽装を検出する低コストな防御の可能性を示す。

加えて、SDV に不可欠となる OTA 機能に関連して、車載機器と IoT 機器に共通するファームウェア更新の安全性を検討している。低コストな IoT デバイスでは HSM や Hardware Root of Trust を搭載できない場合が多く、鍵を安全領域に隔離する一般的な前提が成り立たない。そこで、ファームウェアの真正性と完全性を署名検証により確認し、必要な機密性を処理負荷の小さい共通鍵暗号で保護する役割分担に基づき、HSM 非搭載環境向けの鍵管理方式を提案する。共通鍵はファームウェア本文の効率的な暗号化に用い、公開鍵は署名検証に用いることで、大容量の更新データを低コスト MCU でも扱いやすくする。一方で、本方式は物理的なメモリ読み出しに対して無制限の保護を与えるものではなく、ネットワーク経由の不正更新、改ざん、鍵漏洩時の影響拡大を抑制することを主な目的とする。複数の攻撃シナリオに対する検討を通じて、専用セキュリティハードウェアを持たない機器でも、更新データの真正性、完全性、必要に応じた機密性を一定水準で維持できることを示す。

以上により、本論文は、SDV 移行期の車載ネットワークにおいて、CAN、SOME/IP-SD、SOME/IP、10BASE-T1S、および OTA 更新基盤にまたがる攻撃面を横断的に整理し、攻撃の成立条件と検知困難性を具体的に示した。そのうえで、既存 ECU や既存通信方式を直ちに置き換えるのではなく、プロトコル状態、通信タイミング、スイッチ上の監視、鍵管理の工夫を組み合わせることで、実装負荷と導入コストを抑えながら安全性を高める設計指針を提示している。本研究の成果は、Domain-oriented Architecture および Zone-oriented Architecture へ移行する車両において、既存資産を活用しつつ多層的な防御を構築するための基盤となり、SDV 時代の安全な車載通信基盤およびファームウェア更新基盤の実現と車載ネットワークセキュリティの高度化に貢献している。

論文審査結果の要旨

本博士学位論文は、自動車における Software-Defined Vehicle (SDV) の実現に向けた車載ネットワークのセキュリティ課題に着目し、なりすまし攻撃の成立条件を明らかにするとともに、既存資産を活用した検知・防御技術を確立することを目的としている。まず車載ネットワークにおけるなりすまし攻撃を、正規通信と攻撃通信が同時に観測される Normal and Anomaly (Attack)、正規通信が停止または阻害され攻撃通信のみが観測される Anomaly (Attack) Only、通信経路上で改ざんが行われる Man-In-The-Middle に分類し、従来の侵入検知システム (IDS) が前提としてきた脅威モデルの限界を整理している。SDV への移行期には CAN、車載 Ethernet、SOME/IP、10BASE-T1S などが混在し、さらに Domain-oriented Architecture や Zone-oriented Architecture に代表される新しい構成と既存 ECU が併存すると考えられるため、外部接続機器や OTA 経路から侵入した攻撃者が、Central Gateway、Domain Controller、Zone Gateway、HPC 等を経由して CAN や Ethernet 上の制御通信へ到達する攻撃パスを想定している。

CAN に対しては、特定 CAN メッセージを送信する正規 ECU をバスオフ状態へ遷移させたうえで、攻撃端末が同一 CAN ID のメッセージを周期的に送信するなりすまし攻撃を用いることで、Anomaly (Attack) Only 型の脅威として成立し、既存の周期監視や自己検知を回避し得ることを示している。SOME/IP-SD に対しては、サービス探索および提供に関する状態遷移モデルを分析し、FIND SERVICE、OFFER SERVICE、STOP OFFER SERVICE 等の制御メッセージを悪用したサービス無効化攻

撃の成立条件を明らかにしている。サービス利用開始前に OFFER SERVICE 等の制御メッセージを監視し、異常を検知した場合になりすましメッセージを破棄することで、暗号化や完全な認証を前提とせずに攻撃を緩和している。10BASE-T1S に対しては、Physical Layer Collision Avoidance (PLCA) による送信機会制御に着目し、論理的な送信元情報と物理層タイミングから推定した実際の送信機会との不整合を検出することで、送信元 MAC アドレス等の論理的識別情報が偽装された場合でも、実際の送信機会との不整合に基づくなりすまし攻撃の検知を可能としている。また、SDV に不可欠な OTA 機能については、すべての ECU に Hardware Security Module (HSM) や Hardware Root of Trust を搭載することも現実的ではないため、暗号化や完全な送信元認証を全面的な前提とせず、通信プロトコルの状態遷移、通信周期、物理層タイミング、既存スイッチ上の監視機能を用いて、攻撃の成立条件を分析し、軽量に検知・緩和する方法を検討している。

本論文は、SDV 移行期の車載ネットワークにおいて、CAN、SOME/IP-SD、SOME/IP、10BASE-T1S に対するなりすまし攻撃、サービス妨害攻撃、および送信元偽装攻撃の脅威を明らかにし、既存資産を活用した実用的な検知・防御方式を提示している。さらに、OTA 更新機能の安全性確保に向けた鍵管理方式を示すことで、SDV 時代における安全な車載通信基盤および更新基盤の設計指針を与え、車載ネットワークセキュリティの高度化に貢献している。

本博士学位論文にもとづき副査の秋山教授と林原教授による予備調査を実施し、そこで頂いた複数の指摘事項に基づき博士学位論文を修正し、2026 年 8 月 6 日(木)4 限に 14 号館 14102 教室で先端情報学研究科博士学位論文公聴会を実施した。公聴会の参加者からの提案手法および評価結果に対する活発な質疑応答を通して、先端情報学分野における当該研究の新規性および有用性がより明確になり、今後の研究の発展性も検討できた。また、審査として提出された学術成果より、本研究の主な学術成果としては、Advances in Science、Technology and Engineering Systems Journal および情報処理学会論文誌での計 2 本のジャーナル論文採択、また IEEE APCC2024、COMPSAC2024(ワークショップ)、CCNC2018 の各国際会議およびワークショップにおける計 3 本の論文採択・発表であり、専門分野の査読者における国際的な客観的評価がなされており学術成果は十分といえる。

なお、研究科が定める学位審査基準「本審査を開始するまでに、学術雑誌、又は国際会議で査読付き研究論文を 2 報以上発表（ただし、少なくとも 1 報は、本研究科後期課程在学中の研究業績であること）」を満たしている。

以上、先端情報学研究科博士学位論文公聴会および学外専門分野研究者の査読による学術成果を踏まえ、博士学位論文として十分な内容を有すると判断し、審査委員全員の一致で本博士学位論文調査結果は合格と判定する。

氏 名（本 籍）	和田 匠太 ワダ ショウタ（大阪府）
学 位 の 種 類	博士（生命科学）
学 位 記 番 号	甲生 第 15 号
学位授与年月日	令和 8 年 9 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
論 文 題 目	レドックス制御を介した小胞体ストレスセンサー ATF6 α の制御機構の解明
論文審査委員	主 査 潮 田 亮 教授
	副 査 板 野 直 樹 教授
	〃 若 林 憲 一 教授

論文内容の要旨

本研究は、小胞体（ER）ストレス応答を制御するセンサータンパク質である ATF6 α の活性化過程における分子メカニズムを明らかにしたものである。小胞体は、細胞内で分泌・膜タンパク質の正確なフォールディングと品質管理を行う重要な役割を果たしている。しかし、環境変化や遺伝的変異によって不良タンパク質が蓄積すると、小胞体ストレスが生じ、細胞死を引き起こすことがある。この結果、神経変性疾患、糖尿病、心疾患などの病気の原因となる可能性がある。真核細胞には小胞体ストレスを軽減するための「小胞体ストレス応答（UPR: Unfolded Protein Response）」と呼ばれる防御機構が備わっており、その中心的役割を果たすのが ATF6 α である。

ATF6 α は、通常、小胞体内腔側で分子シャペロン BiP と結合しているが、小胞体ストレス時には BiP から解離し、ジスルフィド結合を介した二量体を形成する。この二量体は、小胞体からゴルジ体へ輸送され、ゴルジ体で特定のプロテアーゼにより切断される。この過程で生成された転写因子ドメイン（N-ドメイン）が核に移行し、小胞体恒常性を維持するための遺伝子の発現を誘導する。これまで、ATF6 α の活性化過程の詳細な分子メカニズムについては多くが不明であった。本研究では、還元酵素 ERdj5 が ATF6 α の C467 二量体形成に関与していることを明らかにした。ERdj5 は従来、主に還元酵素として知られていたが、酸化酵素としても機能することが判明した。ERdj5 は、ATF6 α の別のジスルフィド結合である C618 二量体を還元し、C467 二量体形成を補助する機能も持つ。C618 二量体は小胞体ストレス下で一時的に形成されるが、この結合は ATF6 α の輸送を阻害する。一方で、C467 二量体はゴルジ体への輸送を促進し、ATF6 α の活性化に重要な役割を果たしている。また、ERdj5 と ERp18 という別の還元酵素が ATF6 α の制御において拮抗的に働い

ていることが分かった。ERdj5 は C467 二量体の形成を促進するが、ERp18 はこれを抑制することで C467 二量体の量を調節している。また、ERdj5 は ATF6 α との間でジスルフィド結合を介して複合体を形成し、この結合が C467 二量体形成を直接補助していることが示唆された。ERdj5 の還元ドメインである Trx2 および Trx3 がこれらの機能に重要である。さらに、ATF6 α の活性化には ER 関連分解経路 (ERAD) も関与していることを示した。ERAD は、不良タンパク質を小胞体外へ排出して分解する仕組みである。本研究では、ATF6 α が ERAD 経路に対して耐性を示すことで、その機能が維持される形態をとることが明らかになった。加えて、色覚異常を引き起こす ATF6 α の変異体 (Y567N) が C467 二量体形成を抑制し、ゴルジ体への輸送を阻害することも明らかになった。

この発見は、ATF6 α の異常が疾患発症にどのように関与しているかを示すものである。本研究は、小胞体ストレス応答と ATF6 α 活性化の詳細なメカニズムを解明することで、細胞内恒常性維持の分子メカニズムの理解を深めたものである。また、還元酵素 ERdj5 が酸化酵素としても機能するという新たな知見は、小胞体ストレス応答における調節機構を再考するきっかけを提供する。

本研究の成果は、小胞体ストレスに関連する疾患の治療法開発に向けた重要な基盤となる。

論文審査結果の要旨

本学位論文は、小胞体ストレス応答を制御するセンサータンパク質 ATF6 α の活性化機構について、小胞体内の酸化還元酵素によるレドックス制御の観点から明らかにしたものである。ATF6 α は小胞体ストレスに応答して小胞体からゴルジ体へ輸送され、切断を受けることで転写因子として活性化されるが、その輸送を制御する分子機構には不明な点が多く残されていた。

本研究では、ATF6 α の異なるシステイン残基を介したジスルフィド結合が、そのゴルジ体への輸送を異なる方向に制御することを明らかにした。特に、小胞体酸化還元酵素 ERdj5 が ATF6 α の C618 二量体を還元するとともに、C467 二量体の形成を促進することで ATF6 α の輸送を制御することを示した。また、ERp18 が C467 二量体形成を抑制することから、複数の酸化還元酵素が協調的に ATF6 α の活性化を制御することを明らかにした。さらに、色覚異常に関連する ATF6 α の Y567N 変異が C467 二量体形成を抑制し、ゴルジ体への輸送を阻害することを示し、ATF6 α のレドックス制御と疾患との関連についても新たな知見を得た。

本研究の意義は、ATF6 α の活性化が複数の酸化還元酵素による部位特異的なジスルフィド結合制御によって調節されることを明らかにし、小胞体ストレス応答における新たなレドックス制御機構を提示した点にある。特に、従来還元酵素として知られてきた ERdj5 が、ATF6 α の特定のジスルフィド結合形成を促進するという知見は、小胞体内の酸化還元制御機構の理解を深める重要な成果である。

本研究に関する内容は、国際学術誌「*iScience*」に掲載されている。主査および副査から構成される博士論文調査委員による論文審査の結果、研究課題に新規性が認められること、作業仮説や実験方法に妥当性があること、結果の解釈や考察が適切に導かれていることから、本論文は博士学位論文としてふさわしいものであると認められた。また、令和 8 年 8 月 24 日に開催された公聴会では、発表内容は論理的かつ明瞭にまとめられており、質疑応答に対して的確に回答され

ていた。よって、申請者は当該分野に関する学力において、博士の学位に相応しい資格を有していることが確認できた。

以上、本論文は博士（生命科学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

氏 名（本 籍）	小西 雄大 コニシ ユウタ（京都府）
学 位 の 種 類	博士（生命科学）
学 位 記 番 号	甲生 第 16 号
学位授与年月日	令和 8 年 9 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
論 文 題 目	出芽酵母アルデヒドデヒドロゲナーゼ Hfd1 の細胞内局在の分子機構 とその生理的意義の解明
論 文 審 査 委 員	主 査 遠 藤 斗 志 也 教授
	副 査 中 村 暢 宏 教授
	〃 津 下 英 明 教授

論 文 内 容 の 要 旨

真核細胞では、膜で囲まれた区画であるオルガネラが形成され、各オルガネラが固有の機能を担うことで、細胞に課せられた多様で複雑な機能が分担されている。各オルガネラの機能は、そこに局在する固有のタンパク質群によって支えられており、タンパク質の正確な細胞内局在は、オルガネラおよび細胞の正常な機能に不可欠である。タンパク質の局在は、タンパク質自身に備わる局在化シグナルと、それを読み取る細胞内輸送システムによって決定される。一方、近年、複数のオルガネラに局在するタンパク質が多数存在することが明らかになり、多重局在の仕組みとその調節、さらに複数の細胞内局在とタンパク質機能との関係が注目されている。申請者は、出芽酵母のアルデヒドデヒドロゲナーゼ Hfd1 をモデルとして、複数のオルガネラへの局在化シグナルを同定するとともに、Hfd1 が品質管理因子と連携し、活性酸素の除去および TOM 複合体との相互作用を介して、ミトコンドリアタンパク質の正常な輸送と細胞機能の維持に寄与することを明らかにした。

Hfd1 は、ミトコンドリア、ER（小胞体）、脂肪滴（LD）という複数の細胞内区画に局在し、ミトコンドリアのコエンザイム Q（CoQ）生合成経路およびスフィンゴ脂質分解経路に関与することが報告されている。しかし、Hfd1 の局在化シグナルや、これら二つの代謝経路と複数の細胞内局在との関係については、十分に明らかになっていなかった。まず、AlphaFold2 による構造予測から Hfd1 が C 末端に膜貫通配列を持つことを予測し、N 末端側に蛍光タンパク質を融合した Hfd1 を用いて、蛍光顕微鏡観察により細胞内局在を解析した。その結果、Hfd1 は C 末端の膜貫通配列を介して膜に局在するテールアンカー型膜タンパク質（TA タンパク質）であることを示した。

さらに、Hfd1 の C 末端局在化シグナルを除去する、あるいはミトコンドリア外膜 TA タンパク質 Fis1 または ER の TA タンパク質 Ubc6 の C 末端局在化シグナルと置換することにより、サイトゾル、ミトコンドリア外膜、ER 膜のいずれか一つの区画のみに局在する 単一局在型 Hfd1 誘導体の作製に成功した。これらの誘導体を用いて、CoQ 生合成経路およびスフィンゴ脂質分解経路における Hfd1 の機能と局在の関係を解析した結果、Hfd1 はいずれの局在においてもこれらの代謝経路で機能できる一方、スフィンゴ脂質分解においては膜結合が必要であることを明らかにした。さらに、異なる単一局在を示すヒト Hfd1 ホモログ 3 種についても、同様の局在と機能に関する結果が得られた。

続いて、Hfd1 がミトコンドリアタンパク質輸送装置である TOM 複合体と相互作用することに着目して解析を進め、Hfd1 が、ER とミトコンドリアに二重局在し、TOM 複合体を介した輸送が阻害された基質の除去に関わる Ubx2 と共局在することを見出した。また、Hfd1 欠損株では、スフィンゴ脂質分解産物であり Hfd1 の基質でもあるヘキサデカノールの蓄積に伴い、活性酸素種の増加、細胞増殖の阻害、および TOM 複合体を介したミトコンドリアタンパク質の輸送の部分的な阻害が生じることを見いだした。さらに、活性酸素種を除去すると細胞の増殖阻害は抑制されミトコンドリアタンパク質前駆体の除去に Ubx2 が関与することを示し、Hfd1 と Ubx2 の機能的連携に基づく新たな品質管理経路を見出した。

論文審査結果の要旨

本学位論文は、酵母アルデヒドデヒドロゲナーゼ Hfd1 について、多重局在の仕組みと調節機構を解明するとともに、単一局在型 Hfd1 を作製することで、細胞内局在と生理機能の関係を解析し、品質管理因子と代謝酵素の機能的連携に関わる新たな経路を発見したものである。

Hfd1 については、これまでに異なる細胞内局在が報告されており、その局在については統一した理解は得られていなかった。本研究では、Hfd1 が TA タンパク質であり、C 末端側の膜貫通配列を含む領域に複数の局在化シグナルが存在することを実験的に明らかにした。さらに、多重局在を示す Hfd1 の各局在部位における機能を個別に解析するためのツールとして、サイトゾル、ミトコンドリア、ER のいずれか一つの区画のみに局在する単一局在型 Hfd1 の作製に成功した。当初、ミトコンドリアに局在する Hfd1 は CoQ 生合成経路に、ER に局在する Hfd1 はスフィンゴ脂質分解経路にそれぞれ機能すると考えられていた。しかし、単一局在型 Hfd1 を使った増殖実験により、Hfd1 はサイトゾル、ミトコンドリア、ER のいずれに局在した場合にも CoQ 生合成経路で機能できること、スフィンゴ脂質分解経路においてもミトコンドリア型、ER 型のいずれも機能できることが明らかになった。さらに、もともと異なる細胞内区画に単一局在するヒト Hfd1 ホモログ 3 種についても、同様の結果が得られた。これらの結果は、Hfd1 の生理機能と細胞内局在との関係についての理解を深めるとともに、多重局在タンパク質の局在部位ごとの機能を解明するための一般的な方法論を提示するものとして高く評価できる。

次に評価される点は、Hfd1 がミトコンドリアタンパク質輸送に関わる TOM 複合体、ならびにミトコンドリアおよび ER におけるタンパク質品質管理に関わる Ubx2 と機能的に連携して働くこと

を示した点である。まず Hfd1 がミトコンドリアにおいて TOM 複合体と、ER およびミトコンドリアにおいて Ubx2 と相互作用することを明らかにした。続いて、スフィンゴ脂質分解産物であり Hfd1 の基質でもあるヘキサデカナールが、Hfd1 欠損細胞で蓄積し、活性酸素種 (ROS) の産生が誘導されること、ROS を除去することで Hfd1 欠損細胞の増殖阻害が軽減されることを明らかにした。さらに、Hfd1 と Ubx2 の二重欠損細胞では、ヘキサデカナールの蓄積に伴い、TOM 複合体を介して輸送されるミトコンドリアタンパク質前駆体が部分的に蓄積することを見いだした。これらの結果から、Hfd1 は、ヘキサデカナールなどの脂肪族アルデヒドを除去することにより、その蓄積に伴う ROS 産生を抑制し、細胞増殖能の維持に寄与するとともに、TOM 複合体の機能を維持する役割を担うことが示唆された。一方、Ubx2 は、輸送が阻害されて蓄積したミトコンドリアタンパク質前駆体の除去に寄与することが示唆された。

以上のように、本研究は、多重局在タンパク質 Hfd1 の複数のオルガネラへの局在機構と、その局在に依存しない生理機能を明らかにするとともに、Hfd1 と Ubx2 の機能的連携に基づく新たな品質管理経路を提示したものである。これは、ミトコンドリアタンパク質輸送の品質管理と脂質代謝の連携という新しい視点を提示するものであり、ミトコンドリア機能の維持機構に関する理解を発展させるものと評価できる。

また、令和 8 年 8 月 24 日に開催された公聴会では、申請者は本研究の成果を論理的かつ明瞭に発表し、質疑応答にも適切に対応していた。

よって、本論文は、申請者が博士 (生命科学) の学位を授与されるに値するものと認められる。