

博士学位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

第57号

2026年3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7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

論文博士

1.	<small>モウ</small> 孟 <small>ケイレン</small> 慶廉 [博士 (法律学)]	1
2.	<small>シュウ</small> 周 <small>シヤク</small> 鑠 [博士 (先端情報学)]	7
3.	<small>ジイバザル</small> DWIFAJAR <small>シヂク</small> SIDHIQ [博士 (生命科学)]	10
4.	<small>ツジムラ</small> 辻村 <small>マイ</small> 真衣 [博士 (生命科学)]	13

氏名（本籍）	孟 慶廉 モウ ケイレン（中国）
学位の種類	博士（法律学）
学位記番号	甲法 第10号
学位授与年月日	令和8年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論文題目	未成年者の行為能力に関する一考察 —中国法と日本法の比較を通して—
論文審査委員	主 査 高 篤 英 弘 教授 副 査 坂 東 俊 矢 教授 " 山 本 宣 之 教授 " 高 畠 淳 子 教授

論文内容の要旨

審査対象たる論文「未成年者の行為能力に関する一考察 —中国法と日本法の比較を通して—」（以下、本論文とする）の要旨は以下の通りである。

本論文は、未成年者が締結した契約の効力が、中華人民共和国民法典（以下、中国民法典）及び日本民法典においてどのように定められ、どのように実際の裁判例で適用されているのかを詳細に比較検討したうえ、日本における未成年者の行為能力制度の特徴を明らかにし、今後の日本民法における解釈論的視座を提示するものである。本論文の社会的背景として、日本においては、2022年4月1日に成年年齢を18歳に引き下げる改正民法が施行されている。また、中国では、2021年1月1日に施行された中華人民共和国民法典において、それまでの法制度と裁判実務を踏まえ、未成年者の行為能力に関連する制度が法典化されている。このような社会的動向の変化の中で、従来の未成年者をめぐる裁判例と学説を詳細に分析し、今後の未成年者の行為能力あり方を整理することが、本論文の主題である。

本論文はまず、「はじめに」と題する導入部分において、日本法における成年年齢引き下げの目的が、「若年者に早期から社会的責任を担わせ、その自立を促進する」ことにあることを指摘したうえ、今後、この目的に即して若年者の自立を制度的に支えるために比較法的視座を含めた検討が必要であるとする。そのうえで、比較法的視点として、中国民法典第19条の定める「年齢、知

力に適応する行為」か否かという枠組みが参考になりうることを示唆する。

このような問題意識に基づき、続く第 2 章では、まず、中国民法典の制定前から現行法に至るまでの未成年者保護制度が経時的に整理されている。そのうえで、現行の中国民法典については、満 8 歳に満たない未成年者が単独で行った法律行為は絶対無効であること、満 8 歳から 18 歳未満の未成年者が法定代理人の関与無く行った法律行為の効力は原則として不確定的無効であること、以下の①～⑤のいずれかの要件を満たす場合にのみ未成年者が自ら行った法律行為が有効と評価されること、を明らかにしている。未成年者が自ら行った法律行為が有効とされる場合は、①法定代理人の同意を得て未成年者本人が法律行為を行った場合、②未成年者が法定代理人の同意なく行った法律行為であって、その内容が単に利益を得る場合、③未成年者が法定代理人の同意なく行った法律行為であって、当該行為の内容が当該未成年者の年齢、知力に適応する場合、④法定代理人の追認があった場合、⑤16 歳以上の未成年者であり、かつ自己の労働収入を主要な生活の糧としている者が法律行為を行った場合、である。

このような現行中国民法典の規制をどのように評価するかについては、申請者は、現行中国民法典は同法典制定前における法制度の基本構造を維持しつつも、年齢区分の再構成等を通じて、未成年者の発達段階や認知能力の差異に応じた、より柔軟な制度運用を可能としているとの評価を加えている。とりわけ、未成年者が単独で行った法律行為につき、法定代理人がどのように関与できるかについては、現行中国民法典と日本民法には構造的な差異があり、③と⑤の制度により、日本民法よりも未成年者が法律行為につき自律的に決定しうる範囲が広いことになる点が指摘されている。

そして申請者は、とくに③の制度が中国の裁判実務において問題になっていることに着目し、続く第 2 章第 3 節において、中国における満 8 歳から 18 歳未満の未成年者が法定代理人の関与無く行った法律行為を対象として、当該法律行為が「年齢、知力に適応する法律行為」か否かが争われた裁判例 17 件を詳細に分析する。当該分析に際しては、17 件の裁判例を、契約の一部だけが無効と評価された裁判例 4 件、契約全体が無効と評価された裁判例 9 件、契約が有効と認定された裁判例 4 件に分類したうえで、未成年者の法律行為がその年齢、知力に適応するか否かの判断が、契約の内容や取引の性質、その他の具体的事情を考慮した多様な要素に基づき、実質的かつ柔軟に行われていると結論づける。そのうえで、これらの裁判例で扱われている具体的な要素として、契約目的物ないしサービス等の金額、契約目的物ないしサービス等の性質、契約内容の客観的合理性、契約条項の複雑性や権利義務の平等性、未成年者自身の認識や状況、の 5 点を抽出し、中国における裁判実務においては、これら 5 点の要素が総合的に考慮され、「年齢、知力に適応する」か否かを判断するという枠組みが広く用いられていることを指摘する。ただし、第 2 章第 4 節では、中国の学説においては、このような総合的判断枠組みを肯定する見解が通説である一方で、かかる総合的判断枠組みは法的安定性を害するとの批判説も存在していることも指摘されている。

このような中国の裁判例と学説に対し、申請者は私見として、複雑化している現代社会の取引の実態を考慮すれば、年齢、知力に適応するか否かは、通説の見解よりさらに柔軟に解釈する必

要があり、「日常生活に必要な」法律行為だけでなく、「生活に必要な」法律行為を含みうるように解釈すべきであるとして、その例として、交通の不便な地域で生活する未成年者が、オンライン取引のためのパソコン購入や電機自転車ないしバイクを購入するという場合を挙げている。

以上の中国法の裁判例と学説の分析の後、第3章において、日本法における未成年者保護制度の概要が示されるとともに、日本における裁判例と学説が整理され、次の3点が指摘されている。第1に、日本においては未成年者による法律行為の効力が争点とされた裁判例が極めて少ないことであり、その原因のひとつは、日本法には先述した中国法のような「年齢、知力に適應する」という柔軟な判断基準が存在していない点に求められるのではないかと推測されている。第2に、日本における近時の裁判例2件は、いずれもオンライン取引に関連する事例を対象としており、これらの裁判例において用いられている、法定代理人の「包括的同意」などの概念を用いた解釈は、必ずしもオンライン取引の特性を考慮しておらず、未成年者保護制度の趣旨に反する恐れがあると指摘されている点である。第3に、日本の学説上は、未成年者が単独で行った法律行為についても、日常品の購入ないし日常生活に関する行為については、民法第9条ただし書の類推適用ないし立法措置により、確定的に有効と評価すべきだとの学説が提唱されている点である。

そして第4章第1節においては、第3章において明らかにされた日本法の問題点を踏まえたうえ、今後の課題として、現行制度のもとでは、未成年者の保護と自立という制度趣旨が充分に果たされていないという問題点があることが強調されている。すなわち、日本の現行の未成年者保護制度は、法定代理人による代理行為、および未成年者本人が行った一定の法律行為に対する取消権の付与によって構成されているところ、未成年者本人が取消権の行使を望まず、法定代理人のみが取消しを望む場合には、法定代理人が単独で取消し権を行使できる結果、最終的には当該法律行為は取り消されることになる。他方、未成年者自身が法律行為の効力を望まない場合であっても、法定代理人が未成年者を代理して当該法律行為を行う場合には、未成年者はこれを取り消すことができない。その結果、現行制度のもとでは、未成年者の意思がまったく考慮されない場合が生じてしまい、このことは、未成年者の自己決定の尊重と自立の支援という制度趣旨からみて不適切であり、とりわけ、親権が濫用された場合に未成年者の利益を保護することが困難である点が強調されている。そしてその例として、法定代理人がエホバの証人の信者であり、その子どもに必要な治療を受けさせないという場合が挙げられている。あわせて、日本の裁判例における「包括的同意」や「処分を許された財産」等の判断枠組みもまた、未成年者の保護及び自立の確保の両面において適切に機能していないことが裁判例の分析を通して指摘されている。

そして第4章第2節では、これらの日本法における制度的課題に対して、中国法における制度と裁判実務の解釈論が参考になりうることが示されている。すなわちここでは、中国法の制度及び裁判実務と日本法の制度及び裁判実務が詳細に比較対照されたうえ、中国法の制度および実務における解釈論の利点として、口頭でなされた同意の存在を立証することが困難な場合でも一定の合理的解決を導けること、裁判所が包括的同意などの規範的解釈によって未成年者保護の理念と乖離した判断を下すリスクを抑制できること、未成年者の行為能力に関する判断を年齢と知力への適応性という客観的基準に基づき行うことで未成年者の意思を尊重しつつその利益を保護で

きること、という3点が挙げられている。

これらの比較検討を踏まえたうえ、つづく第4章第3節においては、日本法における上記課題に対する解釈論として、民法第9条ただし書の類推適用が提唱されたうえ、同ただし書の制度趣旨を踏まえつつ、その適切さと類推適用に当たっての留意事項が詳細に検討されている。すなわち、同ただし書の趣旨は、本人に一定の取引について自己決定能力がある限りはこれを尊重すべきであるという点、取引の相手方も取消権の行使を懸念する必要がなくなることで取引の安全が確保される点、本人自身が日常生活における取引を自ら行えないという不便を回避できる点に求められており、これらの点は未成年者にも妥当する。さらに未成年者については、事理弁識能力を欠く常況にある成年被後見人とは異なり、成長とともに事理弁識能力を高め、自己決定の可能性を拡大していく存在であるため、日用品の購入や日常生活に関する行為を頻繁に行う必要がより高く、むしろ取引経験を積むことで自立を促進することが必要である。このように、同ただし書の制度趣旨に照らせば、その類推適用の必要性は、むしろ本来の適用事例よりも高いことが指摘されている。そのうえで、具体的な「日用品」および「日常生活に関する行為」の解釈に当たっては、中国の裁判例で用いられている判断枠組みである「目的物ないしサービス等の価額」、「目的物ないしサービス等の性質」、「契約の客観的必要性と合理性」、「契約内容の複雑性と権利義務の平等性」、「行為時における未成年者の状態」がその際の総合的判断枠組みとして適切に機能しうるとする。

第5章では、申請論文のまとめとして、中国民法典第19条の解釈から得られた視座を今後どのように日本法の解釈に適合させていくかが課題として重要であること、未成年者取消権が行使された場合の未成年者の損害賠償義務や原状回復義務の内容についても中国法と日本法の詳細な比較検討作業が必要であること、今後ますます重要性を増すであろうオンライン取引についても未成年者の行為能力との関係で検討が必要であることが指摘され、今後の研究課題として位置づけられている。

論文審査結果の要旨

(以下では、申請論文の概要、従来の申請者の研究姿勢及び申請論文の学術的意義、口述試験の概要と結果、そしてこれらを踏まえた法律学専攻博士後期課程における学位授与のディプロマ・ポリシーとの適合性の順で報告させていただきます。)

本審査報告書は、京都産業大学大学院法学研究科博士後期課程に在籍するモウ・ケイレン氏(以下、学位申請者)から、博士学位論文審査のために提出された「未成年者の行為能力に関する一考察 ―中国法と日本法の比較を通して―」(以下、申請論文)と題する論文の内容とその研究姿勢が、博士(法律学)の学位授与の基準を満たしているかについて行った調査の結果を報告するものである。本審査は、2026年1月14日の法学研究科会議で任命された4名の調査委員(主査 高嶋英弘、副査 高嶋淳子、副査 坂東俊矢、副査 山本宣之)によって行われた。

学位申請者は、2021年3月に、「信託保護法理についての一考察 ―本人が名義使用を許諾している場合と、虚偽外観の発生や維持につき本人の帰責性がある場合の総合的検討―」と題する論文で、京都産業大学大学院法学研究科博士前期課程を修了し、修士（法律学）を取得した。同年4月には、京都産業大学大学院法学研究科博士後期課程に入学し、その後、未成年者の法的地位に関連する法制度と実務を継続的に研究してきた。そのおもな成果は以下の通りである。

2023年4月には、研究ノート「中国法における未成年者の法的地位」を産大法学57巻1号69-89頁に公表している。引き続き2025年1月には、研究ノート「中国における未成年者による法律行為の効力に関する裁判例の考察」を産大法学58巻4号479-573頁に、2025年4月には、論説「個人情報の保護と被害者救済 ―中国における個人情報を保護するための法的規制と実務経験を素材に一」を産大法学59巻1号45-98頁に、2025年7月には、研究ノート「中国の未成年者保護の法体系に関する一考察 ―中国の未成年者保護法の改正を中心に―」を産大法学59巻2号87-168頁に、2026年1月には論説「未成年者の行為能力に関する一考察 ―中国の労働成年擬制制度を素材として―」を産大法学59巻3・4合併号に、それぞれ公表済みである。そして、これらの業績は、いずれも日本法の今後の実務及び解釈論に重要な意義を有するものである。また、研究会、学会報告も精力的に行っており、2024年5月には京都産業大学法政研究会において、「中国民法典における未成年者保護制度」を報告するとともに、2024年6月には、日本法政学会第140回総会において、「中国法における未成年者の法的地位」を報告し、その成果は法政論叢61巻1号75頁-87頁に「中国の裁判例における制限民事行為能力者たる未成年者の行為能力に関する一考察」として公表済みである。あわせて、2022年4月から2024年3月まで、「令和4年度次世代研究者挑戦的研究プログラム」（W2208 共・加藤啓子・国立研究開発法人科学技術振興機構（JST-次世代））の博士育成支援制度により採用され、受託研究を行った。そのほか、2023年9月から12月には、南京師範大学法学院において在外研究を行うとともに、山東大学威海キャンパスにおいて「日本法概論」のオンライン解説も実施している。

このように、豊富な研究業績および学会等における報告成果に照らせば、学位申請者は、研究者としての能力、その国際性、先進性において、非常に優れていると評価できる。

次に、申請論文の学術的意義については、以下の4点に認められる。

まず、申請論文は、従来、日本にほとんど紹介されていなかった中国民法典における未成年者保護制度を、正確かつ詳細に日本に紹介している点である。中国民法典における未成年者保護制度の関連条文およびその学術的位置づけについては、従来のがわが国においても概略的な紹介がみられるが、中国民法典の編纂と施行に至る歴史的経緯を踏まえた総合的な解説は、本論文が初めてである。とりわけ、第2章第3節において詳細に検討が加えられた17の裁判例は、従来、日本では明らかにされてこなかった中国民法における未成年者取引の実務とそこにおける解釈論を明らかにするうえで、貴重な価値を有している。

第2に、中国民法における裁判例を詳細に分析したうえで、そこにおける実質的判断要素を抽出し、整理した点である。未成年者が保護者の関与無く行った取引の効力については、日本法における裁判例が必ずしも多くないことから、日本における従来解釈論においては、この場合の取

引の有効、全部無効、一部無効を判断する際の実質的要素は必ずしも十分に整理されてきたとはいえない。申請論文は、中国法における豊富な裁判例を素材として、その際の多様な判断要素を明らかにしている点で、貴重な先駆的業績であると評価できる。

第3に、すでに明らかにしたように、申請論文は中国法における未成年者保護制度と日本法における未成年者保護制度を総合的に比較し、それぞれの特徴を分析している。そしてその作業の成果として、日本の現行法は未成年者の行う取引について常に法定代理人の介入が可能な制度になっており、成年年齢の引き下げにおいて示された目的である「若年者に早期から社会的責任を担わせ、その自立を促進する」という点が、制度上、必ずしも保障されていないことを明らかにしている。この点は従来の学説においても示唆されていたが、中国法との比較作業を通して、より一層明らかにされている点で、日本の未成年者保護制度に対する貴重な業績として位置づけられる。

第4に、申請論文は、上記の作業を通して、日本における未成年者の行為能力についても、日本民法第9条ただし書「ただし、日用品の購入その他日常生活に関する行為については、この限りでない。」の類推適用を提唱している点である。従来の日本法においても、この場合に第9条ただし書の類推適用を説く学説は存在していたが、必ずしもその根拠となる比較法的視座が示されていたわけではなかった。このような状況の下で、申請論文は、民法第9条ただし書の類推適用論に比較法的かつ実質的な根拠付けを行っている点で、今後の日本の実務にも参考となる学術的価値を有している。

これらの活動経歴と業績をもとに、調査委員は、申請論文が京都産業大学大学院の規定する法律学専攻博士後期課程の学位授与のディプロマ・ポリシーたる、①知識（法律学についての極めて高度で体系的な専門知識）、②汎用性技能（問題に対する学術性の高い分析と高度に説得力のある議論を展開する能力）、③態度・志向性（高い公共意識をもって、法律学に関する領域の多様な問題に積極的に取り組む能力）の各側面において、極めて優れた能力を有する者に対して与える、という条件に該当するかを慎重に検討した。

その結果、調査委員は、申請論文が、①法律学の極めて高度で体系的な専門知識をもって執筆されていること、②問題に対する学術性の高い比較法的分析と、裁判例の詳細な分析に基づいて高度に説得力のある議論を展開していること、③成年年齢引き下げに伴う未成年者の自立という社会的に重要な問題に高い公共意識をもって積極的に取り組んでいることを確認し、もって法律学専攻博士後期課程のディプロマ・ポリシーの基準を十分に満たしていると評価した。

以上の調査に照らし、調査委員4名は、全員一致で、学位申請者モウ・ケイレン氏が、博士（法律学）の学位を授与されるに十分な資格を有するものであると判断した。

氏名（本籍）	周 鑠 シュウ シャク（中国）
学位の種類	博士（先端情報学）
学位記番号	甲先 第7号
学位授与年月日	令和8年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論文題目	筋肉電気刺激（EMS）を用いたインタラクティブシステムにおける人間能力の拡張に関する研究 Augmenting Human Ability through Electrical Muscle Stimulation in Interactive Systems - Exploring the Applications and Potentials of EMS in Embodied Interaction -
論文審査委員	主 査 瀬 川 典 久 教授 副 査 水 口 充 教授 " 棟 方 渚 教授

論文内容の要旨

本論文は、筋肉電気刺激（Electrical Muscle Stimulation, EMS）を用いたインタラクティブシステムにおける人間能力の拡張について、体系的かつ多面的に検討したものである。

従来の Human-Computer Interaction (HCI) は、主として操作性、情報提示、効率性の最適化に焦点を当て、人間を「操作者 (operator)」として位置づけてきた。しかし近年、テクノロジーが人間の感覚・運動・認知・情動といった能力そのものを直接的に拡張する方向へと発展しつつあり、この潮流は「Augmented HCI」と呼ばれている。本研究では、この新たなパラダイムに基づき、非侵襲的かつ即時性を有する EMS 技術を中核に据え、人間の感覚-運動機能、協調機能、さらには生理・情動調節機能を拡張するための理論的基盤および実践的手法の確立を目的とした。

まず、EMS の生理学的原理と信号制御特性を整理し、低電流パルス波による安全な筋収縮誘発機構を踏まえて刺激効率を数理的にモデル化した。さらに、ハードウェア構成、電極配置、刺激パラメータ制御、セーフティ機構などを統合した EMS システムアーキテクチャを設計し、インタラクティブ環境下における応答性・汎用性・再現性を確保した。

これにより、EMS を用いた人間能力拡張研究のための基盤技術を構築した。その上で、本研

究は三つの主要な実験系列を通じて、EMS の有効性を実証した。第一に、感覚-運動能力の拡張に関する実験では、反応速度および指先運動の精度を指標として、短期間の EMS 訓練が動作速度および精密制御力を向上させることを示した。さらに、訓練効果が数日後にも保持されることから、EMS が学習促進および記憶定着を支援する可能性が示唆された。第二に、協調能力の拡張に関する実験では、両手動作および手眼協調課題を設定し、ゲーム環境やリズム課題を通じて EMS が注意配分および動作同期を支援することを確認した。特に、手眼協調課題および楽器演奏において EMS 刺激を併用することで、動作タイミングの一貫性が高まり、複雑な技能獲得の初期段階を加速できることを明らかにした。第三に、生理・情動調節能力の拡張に関する実験では、心拍および呼吸信号を用いたリアルタイム EMS 制御を実施し、ストレス環境下における情動安定化効果を検証した。呼吸筋への微弱刺激によって呼吸リズムが自動的に整えられ、心拍変動が安定することを確認し、EMS がストレス緩和および集中維持に寄与する新たな生理的介入手段となりうることを示した。

これらの実験結果を総合すると、EMS は技能学習を加速し、協調動作の効率と正確性を向上させるとともに、生理的安定性を高める多面的な効果を有することが明らかになった。

これらの効果は短期的なパフォーマンス向上にとどまらず、一定期間後も持続することが確認され、神経可塑性および運動学習理論との関連が示唆された。また、ユーザ調査の結果から、EMS は適切な刺激設定および導入デザインにより、快適性と主体性を損なうことなく受容されることが確認され、将来的な社会実装に向けた基礎的知見が得られた。最終的に、本論文は「EMS-based Augmented HCI」という概念的枠組みを位置づけ、従来の情報中心的インタラクションから身体中心的インタラクションへの拡張を理論的・実証的に検討した。この視点により、EMS を出力・フィードバック手段にとどまらず、人間能力を形成・拡張する媒介技術として捉え直した。

本研究は、教育、リハビリテーション、スポーツ訓練、エンタテインメント、さらには情動制御など、多様な分野における応用可能性を提示し、身体性を基盤とした人間-技術共進化に向けた新たな方向性を示すものである。

論文審査結果の要旨

本博士論文は、ヒューマンコンピュータインタラクション (Human-Computer Interaction, HCI) 分野における人間拡張 (Human Augmentation) の新たな手法として、電氣的筋刺激 (Electrical Muscle Stimulation, EMS) を用いた拡張インタラクション技術の体系的研究を行ったものである。本研究では、EMS を用いて人間の運動能力、協調能力、生理・情動状態を直接制御・支援する EMS 駆動型拡張インタラクションフレームワークを構築し、その理論的基盤、システム設計、実装、および実験的検証を通じて、その有効性および実現可能

性を実証している。

第2章では、Augmented HCI および Human Augmentation に関する既存研究を体系的に整理し、EMS の医療リハビリテーション、技能訓練、インタラクション分野への応用を概観するとともに、本研究の学術的意義および位置づけを明確化している。第3章では、本研究の目的および方法論的枠組みを提示し、EMS を用いた拡張インタラクションの統合的研究フレームワークを提案している。第4章では、EMS の生理学的原理およびシステムアーキテクチャを詳細に説明し、刺激パラメータ制御および刺激効率モデリングを含む技術基盤を確立している。

第5章から第7章では、本研究の中核となる実験的検証を行っている。第5章では、知覚運動拡張に焦点を当て、EMS を用いたタイミング制御訓練および指運動制御訓練を実装し、反応時間の改善、運動精度の向上を実験的に示している。さらに、ゲーム環境における指制御能力評価およびユーザ調査を通じて、実用環境における EMS 訓練の有効性を実証している。第6章では、協調性拡張に関する研究として、手眼協調能力の向上および楽器演奏技能習得への応用を検証し、複雑な運動技能の学習促進に EMS が有効であることを示している。第7章では、生理・情動状態拡張に関する研究として、心拍センサと EMS を統合したストレス制御システムおよび呼吸リズム制御システムを実装し、生理状態調節への EMS の応用可能性を実験的に示している。

さらに本論文では、これらの実験システムの実装詳細を Appendix として提示しており、指運動訓練システム、手眼協調訓練システム、楽器演奏支援システム、および呼吸制御システムのソースコードおよび信号処理手法を含めて公開することで、本研究の再現性および技術的妥当性を示している。

水口 充、棟方 渚両教授に副査の依頼を行い、瀬川、水口、棟方3名の審査体で、博士論文審査を行った。また、2026年1月29日に、公聴会を開催した。

予備審査で指摘された点の修正は、行われており、また、英文の修正も行われていた。また、周君が考える Human Augmentation の定義が明らかになったことで、本論文が主張する EMS を活用した Human Augmentation の主張が強化され、本論文の有効性が明らかになった。

本研究の結論として、EMS を用いることで人間の運動能力、協調能力、生理状態を直接支援・制御可能であり、従来の知覚・認知中心の HCI を超えた「EMS-based Augmented HCI」という新たなインタラクションパラダイムを提案している。本研究は、技能訓練、リハビリテーション、エンタテインメント、生理状態制御など幅広い分野への応用可能性を示し、Augmented HCI 分野における理論的および実践的基盤を確立したものであり、学術的価値は極めて高い。

よって、本博士論文を合格と認定する。

氏名（本籍）	DWIFAJAR SIDHIQ ツイパザル シヂク（インドネシア）
学位の種類	博士（生命科学）
学位記番号	甲生 第14号
学位授与年月日	令和8年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論文題目	Submergence-induce epidermal cell chloroplasts differentiation in <i>Rorippa aquatica</i>
論文審査委員	主 査 木村 成介 教授
	副 査 若林 憲一 教授
	〃 河邊 昭 教授

論文内容の要旨

陸上で生育する多くの種子植物では、葉の葉肉細胞に多数の葉緑体が分化する一方、表皮細胞には光合成能を持つ葉緑体はほとんど形成されない。しかし、水中で生活する水草類の多くでは表皮細胞に葉緑体が分化することが知られており、水中環境では葉肉組織を介したガス交換が制限されるため、表皮における葉緑体形成は二酸化炭素の効率的な取り込みと光合成効率の向上に寄与すると考えられている。水陸両生植物は、陸上と水中の双方の環境で生育できる植物群である。*Rorippa aquatica* は代表的な水陸両生植物の一つで、水没条件では葉形を大きく変化させ、さらには気孔形成が強く抑制される。興味深いことに、本研究では *R. aquatica* が水没に応答して表皮細胞に葉緑体を分化させるという、これまで報告のない独自の反応を示すことを見出した。本研究では、この現象を「水没応答性表皮葉緑体分化（Submergence-induced epidermal cell chloroplast differentiation: ECD）」と命名し、その発生学的背景、制御因子、分子基盤等を解析した。

まず、詳細な形態観察を行い、ECD の誘導動態を定量的に評価した。その結果、水没後きわめて短時間で葉の表裏両面において ECD が開始し、しかも葉の発生段階に依存せず、若い葉から成熟葉に至るまで広く生じることが明らかとなった。また、水没期間が長くなるほど表皮細胞中の分化した葉緑体数は増加し、ECD が時間依存的かつ持続的に進行する現象であることが示された。また、系統的に離れた他の水陸両生植物を比較したところ、水中環境で表皮葉緑体が形成される例が複数確認され、ECD が *R. aquatica* に固有の特殊現象ではなく、水中環境への適応において一定程度普遍性をもつ可能性が示された。

次に、生理学的解析により、エチレンが ECD を制御する中心的シグナルであることを示した。また、病原体刺激、機械的傷害、サリチル酸処理といった防御応答を伴うストレスでも ECD が誘導され、ECD が単なる水没応答にとどまらず、植物の防御・ストレス応答とも密接に関連する可能性が示された。さらに、ECD の誘導には光が不可欠であることが明らかとなった。暗黒条件下では長期間水没させても完全な ECD は誘導されず、光受容が表皮葉緑体の分化・成熟段階に必須であることが示された。

ECD の分子的な基盤を明らかにするために行ったトランスクリプトーム解析では、エチレン応答性転写因子や葉緑体形成関連遺伝子の発現が顕著に変動する一方、低酸素応答や防御応答に関わる遺伝子群も変動していることが判明した。これは、水没に伴う多様な環境ストレスシグナルが統合され、ECD を制御していることを示唆している。

総じて、本研究は水没に対する植物の新規応答反応として ECD を提唱し、その誘導因子・分子基盤・進化的普遍性を包括的に明らかにした点に大きな意義がある。特に、水没、エチレン、光の三者が複合的に統合されて表皮葉緑体分化を制御することを明らかに、水陸両生植物の環境適応研究に重要な知見をもたらしたといえる。

論文審査結果の要旨

本論文は、水陸両生植物 *Rorippa aquatica* に新たに見出された「水没応答性表皮葉緑体分化」を対象とした研究である。一般に種子植物では、光合成は葉肉細胞の葉緑体で行われ、表皮細胞では葉緑体の分化はほとんど起こらない。本研究は、*R. aquatica* が水没に反応して表皮細胞に葉緑体を分化させる未報告の形質変化を明らかにし、これを「水没応答性表皮葉緑体分化 (ECD)」と命名した。

著者は形態学的観察、生理学的実験、遺伝子発現解析を組み合わせ、ECD の誘導にエチレンおよび低酸素条件が関与することを示した。また、水中光環境下での光合成効率向上に寄与する可能性を実験的に検証し、表皮細胞における葉緑体分化が環境適応に果たす役割を具体的に提示した。さらに、複数の水陸両生植物との比較から、ECD が本種特有の現象ではなく、水中生活に適応した植物に広く見られる応答である可能性を示唆した。

これらの成果は、水陸両生植物の環境応答機構と表現型可塑性の理解を大きく前進させるものであり、特に非光合成細胞とされてきた表皮における葉緑体の可塑的分化を分子・定量的に捉えた点は高く評価できる。また、本研究は、植物の細胞分化制御や環境応答の新たな研究領域を切り開く意義を有し、今後の比進生物学的研究への波及効果も期待される。さらに、水中環境への適応戦略の理解に資する基盤的知見として、関連分野への貢献も大きいと考えられる。

主査および副査による論文調査では、本研究は、これまで知られていなかった新現象について、発生学的解析から遺伝子発現解析まで幅広いアプローチにより、そのメカニズムの一端を明らかにしたという点において学術的な意義があることが認められた。また、研究課題の新規性、作業仮説の設定の仕方、実験方法の妥当性、結果の解釈や考察などについて問題はないと判断された。

予備調査で指摘されていた論文の趣旨が不明瞭な記述や記載ミスについてはすべて訂正されていることを確認した。得られた知見は豊富な実験に基づくものであり、信頼性が高く、植物科学の発展に大きく寄与するものであると認められた。

令和8年2月10日に開催された公聴会において、論文内容およびこれに関連する事項についての発表および質疑応答があり、提出者が本論文の内容や関連分野について十分な知識を持ち、また、研究成果について考察を深められていることを確認できた。また、本論文に記載されている成果は、令和7年12月22日国際学術誌「New Phytologist」への掲載が決定しており、博士の学位取得の条件を満たしていることも確認できた。

結論として、本論文は博士学位論文としてふさわしいものであり、本審査に合格と判定する。

氏名（本籍）	辻村 真衣 ツジムラ マイ（岡山県）
学位の種類	博士（生命科学）
学位記番号	乙生 第4号
学位授与年月日	令和8年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
論文題目	ナス(<i>Solanum melongena</i>)およびタマネギ(<i>Allium cepa</i>)におけるミトコンドリアゲノムの解読と CMS 原因遺伝子の探索
論文審査委員	主 査 寺 地 徹 教授
	副 査 本 橋 健 教授
	〃 金 子 貴 一 教授

論文内容の要旨

高等植物のミトコンドリアゲノムは、動物に比べてはるかに複雑な構造をもつ。哺乳類ではゲノムサイズが約 16.5kb で、種間でほとんど違いが見られないのに対し、高等植物のミトコンドリアゲノムのサイズはヤドリギ (*Viscum scurruloideum*) の 66kb からシラタマソウ (*Silene conica*) の 11Mb まで、きわめて大きな変異がある。さらに、ゲノム上に散在する多数の反復配列を介して組換えが頻発することが特徴であり、その結果、ゲノムは複数の分子からなるマルチパート構造をとると考えられている。進化的な観点では、こうした組換えによりゲノムの配列が再構成され、新たな遺伝子、たとえば細胞質雄性不稔 (CMS) の原因遺伝子が生じることが示唆されている。CMS はこれまでに 150 種以上の植物で報告されており、種により塩基配列は全く異なるものの、ミトコンドリアの遺伝子によって引き起こされるという共通点がある。CMS は農業的にも重要な形質であり、ナタネ、トウモロコシ、イネなど多くの作物で、F₁雑種種子の生産体系に広く利用されている。

このような背景のもと、本論文では、ナス (*Solanum melongena*) とタマネギ (*Allium cepa*) という 2 つの作物を材料に、ミトコンドリアゲノムの全配列を解読し、それに基づく 2 つの研究成果を得ている。

本論文では、第 1 章（序論）において高等植物のミトコンドリアゲノムならびに CMS 研究の歴史を概観した後、次の第 2 章では、ナスの花粉形成不全型 (PN 型) CMS の原因遺伝子の特定を試みている。そのため、mitoTALEN 法および mitoTALECD 法を用いたミトコンドリアゲノム編集により、候補遺伝子とされる *orf218* のノックアウトを行った。mitoTALEN 法では、*orf218* のすぐ下流に存在する *atp1* 遺伝子の欠失のため、目的とするノックアウト個体は得られなかったが、

mitoTALECD 法では、塩基置換によって *orf218* の開始コドン消失させた個体を得ることに成功している。この個体を特定網室で栽培し開花させたところ、予測どおり花粉の形成が認められた。この結果はナスで初めて、ミトコンドリア遺伝子のゲノム編集に成功した例である。ゲノム編集個体に形成された花粉は正常に機能し、この個体が自殖可能であったことから、本論文では、*orf218* が PN 型 CMS の原因遺伝子であると結論づけており、この研究は作物の CMS 遺伝子を実験により特定した数少ない例の 1 つとなっている。一方、このゲノム編集個体では、花粉形成による稔性は回復したものの、CMS 系統に特有な葯先端の形態異常は改善されなかった。このことは、PN 型 CMS ナスでは *orf218* 以外にも雄ずいの正常な発達を阻害する因子が存在する可能性を示唆している。

第 3 章では、タマネギ品種 ‘もみじ 3 号’ のミトコンドリアゲノムを解析し、その特徴的な構造を明らかにしている。まず NGS によるシーケンス解析により仮想的な 2 個のマスターサークルを構築している。次いで反復配列を介した組換えにより、主に 3 つの環状構造が形成されていることを予測した後、パルスフィールドゲル電気泳動 (PFGE) により、それらの存在を初めて証明している。高等植物の場合、ミトコンドリアゲノムの構造を可視化した例は極めて限定されており、‘もみじ 3 号’ はその複雑なゲノム構造を解明するうえで貴重な材料であったことを示している。さらに ‘もみじ 3 号’ の転写データをミトコンドリアゲノムにマッピングすることで、635 ヶ所の RNA 編集部位を同定し、各翻訳産物の正確なアミノ酸配列を推定するとともに ‘もみじ 3 号’ が CMS-S 型細胞質を持つことも明らかにしている。しかし CMS を示さない正常細胞質 (Normal 型) と比較して、CMS の原因候補遺伝子である *cox1* (*orf725*)、*cox3*、*nad6* の翻訳産物に有意な差異は認められなかったことから、本実験では CMS の原因遺伝子の特定には至らなかった。本研究で得られたミトコンドリアゲノム情報は、今後のナスおよびタマネギの分子育種における基盤となる。また、本研究で明らかになった知見は、高等植物における CMS のメカニズムの解明およびミトコンドリアゲノムの可塑性の理解を深化させるうえで重要な手がかりを提供する。

論文審査結果の要旨

本論文は重要な作物であるナスとタマネギのミトコンドリアゲノムを分子生物学の手法を用いて解析したものである。いずれの作物も現在は F₁ 品種が主流であり、その F₁ 品種育成の鍵となる細胞質雄性不稔 (以下 CMS) との関連で、両作物のミトコンドリアのゲノムおよび CMS の原因となるミトコンドリアの候補遺伝子が深く解析されている。CMS とは、植物の生育は正常であるにもかかわらず、機能を持った花粉が形成されない性質で、細胞質遺伝するものを言う。CMS はイネ、コムギ、トウモロコシなどの 3 大穀物をはじめ、ナタネ、ブロッコリー、ダイコンなどのアブラナ科野菜、ヒマワリ、テンサイに至るまで、非常に多くの作物で発見・利用されており、*Silene* 属植物など野生植物も含め 150 以上の種で観察されている。CMS の原因遺伝子は古くから探索されていて、例外なくミトコンドリアゲノムに座乗していることが知られている。しかし各植物に共通するのは、ミトコンドリアの遺伝子ということだけであり、原因遺伝子 (あるいは原因候補

遺伝子)の塩基配列は種や種内の細胞質型に特異的である。したがって、CMSの原因遺伝子の実体を分子的に解明するためには、それぞれの種について研究を行わなければならない。

本論文の前半では、ナスのCMSに関する各種実験が行われている。NGSによるミトコンドリアのゲノム構造の解析ならびにRNAseqなどでCMSの原因候補遺伝子(*orf218*)を絞り込んだ後、mitoTALEN法およびmitoTALECD法という最新の手法を用いてこの遺伝子の不活化を試みている。

特にmitoTALECD法によるゲノム編集では、標的とする*orf218*の不活化に成功し、花粉形成能力が復活することを初めて証明した。このことはCMSの原因遺伝子を特定したというすばらしい研究成果であり、大いに評価できる(なお、この研究の内容は、評価の高い国際誌にすでに掲載されている)。一方、申請者自身が述べるように、ゲノム編集個体は葯の先端の形態異常を示し、そのために完全な稔性回復には至らなかった。このことは、正常な葯の形成に*orf218*以外の他の因子が関与することを示唆しており、今後の研究の方向性が明確に示されている。

本論文の後半では、タマネギのミトコンドリアゲノムの解析を深く行っている。NGSによるゲノム配列の完全解読にとどまらず、パルスフィールドゲル電気泳動(PFGE)による巨大DNA分子の分離技術を利用して、タマネギのミトコンドリアゲノムが3つの環状DNA分子に分かれて存在することを初めて証明した。一般に植物のミトコンドリアゲノムは、すべての遺伝情報を含む仮想的な環状DNA分子(いわゆるマスターサークル=MC)として記述されることが多いが、実際はMC上に散在する大小のリピート配列間の組換えにより、小型の環状DNA分子(サブサークル=SC)の集合として存在することが予測されている。本論文は、鱗茎を出発材料とすることで、ミトコンドリアDNAを多量に調製しやすいタマネギの特徴を活かし、制限酵素とPFGEを組合せてタマネギのミトコンドリアゲノムが3つの環状DNA分子から構成されていることを初めて証明したところに大きな意義がある(この研究内容もすでに国際誌に公表済みである)。

以上、まとめると、本論文はゲノム編集によるCMS原因遺伝子の特定(ナス)ならびにPFGEによるゲノム構成の解明(タマネギ)という、高等植物のミトコンドリアゲノム研究の進展に寄与するところが大きく、京都産業大学生命科学部の博士学位論文として十分な内容を含んでいると判断する。

なお、予備調査で副査から指摘された論文中の誤植(タイポ)は改められており、統計パラメータの記載や図表の見やすさへの工夫なども対応済みであることを申し添える。