

2025（令和7）年度 秋学期

博士（工学） 学位論文  
博士（理学）

論文の内容の要旨および論文審査の結果の要旨

慶應義塾大学工学部

## 目次

末吉 耕大	免疫応答関連ニトロ化不飽和脂肪酸を含有する糖脂質の合成と機能解析	1
大谷 豪	学習データに着目した画像超解像モデルの性能向上	3
Zhang, Zijiang (張 子京)	Emergent Magneto-Inductance Effect in Ferromagnetic Thin Films at Room Temperature (室温における強磁性薄膜の創発磁気インダクタンス効果)	5
高山 和輝	分子ドーブされた高分子半導体薄膜の熱輸送特性とトラジスタ応用	7
松坂 美月	機能性分子を利用した有機スピンバルブに関する研究	9
丸山 めく	ゲスト・ホスト両側の選択性を活用した分離技術のためのクラスレートハイドレートの結晶成長と特性評価	11
山下 舞佳	疎水性小分子の水中分散を実現するタンパク質ナノケージ材料の開発と応用展開	13
花井 奏太	Chiral-Transport-Induced Collective Modes in Strong Magnetic Fields and Their Implications for Neutron Star Phenomenology (強磁場中のカイラル輸送に誘起された集団モードと中性子星現象論への示唆)	15
東 伸彦	銅の格子欠陥を有する複合アニオン層状化合物多結晶 $\text{LaCu}_{1-\delta}\text{S}_{1-x}\text{Se}_x\text{O}$ ( $x = 0.5 - 0.99$ )の光学バンドギャップ内構造および熱輸送特性	17
藤田 優人	高空間分解能探針増強ラマン分光における局在偏光場が誘起するカーボンナノ材料の応答	19
小暮 悠暉	A Study on the Morphogenetic Mechanisms of Ascidian Embryos During Organogenesis (器官形成期におけるホヤ胚形態形成機構に関する研究)	21
戸塚 望	Mechanisms of Metamorphosis Initiation in <i>Ciona</i> Revealed by Live-imaging and Optogenetics (ライブイメージングおよびオプトジェネティクスによるホヤ変態開始機構の解明)	23
和田 凱渡	Quantum-enhanced Estimation of Physical Properties (量子性を活用した物理特性の高精度推定)	25
石川 晴也	Auxiliary Supervision from Existing Resources for Urban Scene Understanding: Multi-Task Learning for Semantic and BEV Segmentation (補助的教師信号による効率的な都市シーン理解: セマンティック・BEVセグメンテーションへの応用)	27
Yin, Yuantian (尹 源甜)	Polymer Waveguide Based Optical Tactile Sensor Fabricated by the Mosquito Method (モスキート法により作製されたポリマー光導波路型触覚センサ)	29
岸本 卓大	A Pitot-type Waterflow Sensor System for Biologging of Marine Animals (海中動物のバイオリギングのためのピトー管型流速センサシステム)	31
南 かのん	廃シリコン粉末へのレーザー照射によるシリコンカーバイド系ナノ構造体の生成	33
Ilunga, Jessica Kumwimba (イルンガ, ジェシカ クンウィンバ)	Large-scale Urban Redevelopment in Tokyo's Neighborhoods: Socio-economic Change and Public Contestation in Musashi-Koyama, Tsukishima, and Shimokitazawa (東京の住居地域における大規模再開発に関する研究: 武蔵小山、月島、下北沢の社会経済的变化と周辺住民による反対意見に着目して)	35
Li, Zhaojie (李 兆傑)	Edge Intelligence for Aerial Communication Systems: Single HAPS 3D-Aware Beamforming and Collective UAV Federated Learning (空中通信システムにおけるエッジインテリジェンス: 単一HAPSの三次元環境認識ビームフォーミングおよびUAV群の連合学習)	37
Xing, Zelin (ケイ 澤林)	Contactless Cardiac Biometrics: Open-set Radar Identification and Radar-to-ECG Reconstruction (非接触心臓バイオメトリクス: オープンセット・レーダ識別とレーダからのECGへの再構成)	41

車 裕輝	Novel Particle Measurement Techniques for Characterization of Environmental Particulate Contaminants (環境中粒子状汚染物質の粒子特性評価に資する新規粒子計測法の開発)	44
磯崎 友花	Late-stageホウ素媒介アグリコン転移反応を用いた肺非結核性抗酸菌症に対する新規治療リードの創製	46
林 克哉	水素負イオン源におけるプラズマメネスカスおよび電位構造に関する研究	48
比企 佑介	ネムリユスリカ幼虫の乾燥刺激に応答する遺伝子制御ネットワークの解析および基盤技術の開発	50
寺田 大介	Theoretical Studies on the Reaction Mechanism and Selectivity of C-Glycosylation Catalyzed by the Glycosyltransferase GgCGT (糖転移酵素GgCGTによるC-配糖化の反応機構および選択性に関する理論的研究)	52
岩本 青空	ラクタムを基盤としたキラル環状ニトロ合成法の開発とCalyciphylline B類の全合成	54
小野 圭吾	層状構造を有する新規熱電材料群143-Zintl相化合物の開発	56
河内 優太	Ultrafast Detection of Single-photon Level Femtosecond Photon Echoes From Coherently Controlled Quantum Dots (コヒーレント制御された量子ドットにおける単一光子レベルフェムト秒フォトンエコーの超高速検出)	58
瀧井 優臣	Chemical Modification Effect and Tailoring Spin Alignment in Quinoline-Based Nitroxyl Radical Crystals (キノリンを基盤とするニトロキシルラジカル結晶における化学修飾の効果とスピン整列制御)	60
安井 蒼一郎	ロバタミド類の全合成およびアミド基を基盤としたセコスリキンドのポリプロピオネート側鎖の迅速合成	62
和知 秀忠	On Decomposition Theorem of the Coboundary Forms for Hydrodynamic Limit and Classification of Interactions (流体力学極限に関する余境界形式の分解定理と相互作用の分類について)	64
Meshram, Tushar Vijaykumar (メッシュラム, トゥシャール ウィ ジェクマール)	Laser-Induced Periodic Surface Structures on Hard Brittle Materials (硬脆材料へのレーザ誘起周期的表面構造の形成)	66
Gattu, Sai Dutta (ガットウ, サイダッタ)	AI-based Instability Monitoring and Process Optimization for Electrical Discharge Machining (AIを活用した放電加工不安定性のモニタリングおよびプロセス最適化)	68
大村 拓也	Granular Scaling Laws for Low-Gravity Terramechanics: Applications to Rover Mobility and Excavation (低重力環境におけるテラメカニクスのための粉粒体相似則: ロボ走行および掘削現象への応用)	70
加藤 直樹	大規模視覚言語モデルの少数データ適応〜学習効率と性能の両立を目指して〜	72
中島 利八郎	レーザドーピングを利用したMEMSピエゾ抵抗型多軸力センサ	74
藤田 晃成	二次元フォトニック結晶ナノ共振器に基づくハイブリッド集積単一光子源に関する研究	76
Liu, Yunxiang (劉 雲翔)	Exploration of Fluorescent Carbon Dot-Based Films for Luminescent Solar Concentrators (発光型太陽光集光器用カーボンドット蛍光膜の研究)	78
Hu, Haowen (胡 昊文)	Human Activity Analysis from Exocentric Multi-camera Surveillance to Egocentric Vision: Tracking, Gaze Recognition, and Anomaly Detection (三人称多視点カメラから一人称視点カメラまでを活用した人間活動解析: トラッキング・視線認識・および異常検知)	80
安形 憲一	A Fast and Portable TCP/IP Stack (高速かつポータブルなTCP/IPスタック)	83
堀 涼介	Learning-based Pose Estimation with Multimodal Sensing and Physics-based Modeling for Practical Human Motion Capture (学習ベースの姿勢推定を基盤としたマルチモーダルセンシングおよび物理ベースモデリングによる実用的な人間動作計測)	85

安田 一希	Molecular Dynamics Simulations of Biomolecular Interactions toward Multilayered Mechanisms of Transcriptional Regulation (転写制御における多階層的機構の理解に向けた分子動力学法による生体分子相互作用解析)	87
濱口 直	粉体および界面活性剤配合系における混合物特性の機械学習予測と処方設計	89
松永 知樹	多層周波数・周期性結合表現に基づくマルチトラック自動採番	91
Masud, Abdullah Al (マスド, アブドウラ アル)	Graph-Based Modeling for Human Pose Estimation from Multi-Modal Sensor Data (マルチモーダルセンサデータからの人体姿勢推定のためのグラフベースモデリング)	93
山田 大介	Study on Quantification of Human Factors Related to Automotive Comfort (自動車の快適性に関わる人間特性の定量化に関する研究)	96
May Hlaing Win Khin (メイラインウインキン)	Numerical Study on Fluid Flow Induced by an Elastic Plate with Different Trailing Edge Shapes in Heaving Motion (異なる後縁形状を有する弾性板のヒービング運動による推進に関する数値解析)	98

## 論文の要旨および審査結果の要旨

本報は、学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号)第8条による公表を目的として、本大学において2025(令和7)年度秋学期に博士の学位を授与した者の論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨である。収録したものは次のとおり。

慶應義塾大学理工学部

学位の種類	学位記号・番号	授与年月日	氏名
博士(理学)	甲第6515号	令和7年10月1日	末吉 耕大
博士(工学)	甲第6519号	令和7年11月26日	大谷 豪
博士(工学)	甲第6526号	令和8年1月7日	Zhang, Zijng (張子京)
博士(工学)	甲第6527号	令和8年1月7日	高山 和輝
博士(工学)	甲第6528号	令和8年1月7日	松坂 美月
博士(工学)	甲第6529号	令和8年1月7日	丸山 めく
博士(理学)	甲第6548号	令和8年2月5日	山下 舞佳
博士(理学)	甲第6549号	令和8年2月5日	花井 奏太
博士(工学)	甲第6550号	令和8年2月5日	東 伸彦
博士(工学)	甲第6551号	令和8年2月5日	藤田 優人
博士(理学)	甲第6552号	令和8年2月5日	小暮 悠暉
博士(理学)	甲第6553号	令和8年2月5日	戸塚 望
博士(理学)	甲第6554号	令和8年2月5日	和田 凱渡
博士(工学)	甲第6555号	令和8年2月5日	石川 晴也
博士(工学)	甲第6556号	令和8年2月5日	Yin, Yuantian (尹源甜)
博士(工学)	甲第6557号	令和8年2月5日	岸本 卓大
博士(工学)	甲第6558号	令和8年2月5日	南 かのん
博士(工学)	甲第6559号	令和8年2月5日	Ilunga, Jessica Kunwimba (イルンガ, ジェシカ クンウィンバ)
博士(工学)	甲第6560号	令和8年2月5日	Li, Zhaojie (李兆傑)
博士(工学)	甲第6561号	令和8年2月5日	Xing, Zelin (ケイ 澤林)
博士(工学)	甲第6562号	令和8年2月5日	車 裕輝
博士(工学)	甲第6657号	令和8年3月4日	磯崎 友花
博士(工学)	甲第6658号	令和8年3月4日	林 克哉
博士(理学)	甲第6659号	令和8年3月4日	比企 佑介
博士(理学)	甲第6660号	令和8年3月4日	寺田 大介

学位の種類	学位記号・番号	授与年月日	氏名
博士(理学)	甲第 6661 号	令和 8 年 3 月 4 日	岩本 青空
博士(工学)	甲第 6662 号	令和 8 年 3 月 4 日	小野 圭吾
博士(理学)	甲第 6663 号	令和 8 年 3 月 4 日	河内 優太
博士(工学)	甲第 6664 号	令和 8 年 3 月 4 日	瀧井 優臣
博士(理学)	甲第 6665 号	令和 8 年 3 月 4 日	安井 蒼一郎
博士(理学)	甲第 6666 号	令和 8 年 3 月 4 日	和知 秀忠
博士(工学)	甲第 6667 号	令和 8 年 3 月 4 日	Meshram, Tushar Vijaykumar (メシュラム, トウシヤール ウィジェクマール)
博士(工学)	甲第 6668 号	令和 8 年 3 月 4 日	Gattu, Sai Dutta (ガットウ, サイダッタ)
博士(工学)	甲第 6669 号	令和 8 年 3 月 4 日	大村 拓也
博士(工学)	甲第 6670 号	令和 8 年 3 月 4 日	加藤 直樹
博士(工学)	甲第 6671 号	令和 8 年 3 月 4 日	中島 利八郎
博士(工学)	甲第 6672 号	令和 8 年 3 月 4 日	藤田 晃成
博士(工学)	甲第 6673 号	令和 8 年 3 月 4 日	Liu, Yunxiang (劉 雲翔)
博士(工学)	甲第 6674 号	令和 8 年 3 月 4 日	Hu, Haowen (胡 昊文)
博士(工学)	甲第 6675 号	令和 8 年 3 月 4 日	安形 憲一
博士(工学)	甲第 6676 号	令和 8 年 3 月 4 日	堀 涼介
博士(工学)	甲第 6677 号	令和 8 年 3 月 4 日	安田 一希
博士(工学)	甲第 6678 号	令和 8 年 3 月 4 日	濱口 直
博士(工学)	甲第 6679 号	令和 8 年 3 月 4 日	松永 知樹
博士(工学)	甲第 6680 号	令和 8 年 3 月 4 日	Masud, Abdullah Al (マスド, アブドウラアル)
博士(工学)	乙第 5438 号	令和 8 年 2 月 5 日	山田 大介
博士(工学)	乙第 5454 号	令和 8 年 3 月 4 日	May Hlaing Win Khin (メイライン ウィン キン)

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6515 号	氏 名	末吉 耕大
主論文題名： 免疫応答関連ニトロ化不飽和脂肪酸を含有する糖脂質の合成と機能解析			
<p>免疫機構は生体防御の基盤であり、様々な外因性あるいは内因性の分子が自然免疫受容体リガンドあるいは抗原として作用し免疫応答を誘導する。特に、複合脂質は、脂質抗原として免疫機構調節に重要な役割を果たすとともに、自然免疫受容体の機能調節に関わる構造が知られている。一方、細胞内の複合脂質については、生体内でシグナル伝達分子として働く一酸化窒素（NO）の反応によってニトロ化が起これることによって生成する脂肪酸が炎症反応の抑制等に関与することが知られていたが、ニトロ化脂肪酸含有複合脂質についての機能は未解明であった。本研究では、ニトロ化脂肪酸を部分構造として含む糖脂質を網羅的に合成するとともに機能解析を行い、新たな免疫調節機能を見出した。</p> <p>第一章では、序論として自然免疫応答における脂質抗原の機能や関連する自然免疫受容体の概要について述べるとともに、ニトロ化脂肪酸およびニトロ化脂肪酸含有複合脂質の生体内における生成と既知の役割について概要を述べた。</p> <p>第二章では、ニトロ化脂肪酸およびニトロ化脂肪酸含有型糖脂質誘導体の合成について述べた。特にニトロ化不飽和脂肪酸骨格合成の新規手法開発により効率的かつ選択的なニトロ化不飽和脂肪酸合成を行い、糖脂質合成に展開した。</p> <p>第三章では、ニトロ化不飽和脂肪酸含有型の糖脂質誘導体について、脂質抗原提示分子である CD1d に依存した活性評価および結合部位の解析を行った。特に、各糖脂質リガンドの CD1d に対する結合親和性と CD1d-NKT 細胞系を介した免疫応答についての解析により、ニトロ化修飾により結合親和性の大きな向上と、糖構造依存的に選択的なサイトカイン誘導を介した免疫応答を誘導することを明らかとした。また、自然免疫活性化の解析により見出した特徴的な免疫応答誘導について述べた。</p> <p>第四章では、分子動力学解析等の計算的手法により、CD1d 抗原認識ポケットにおける特定の残基との間の水素結合および共有結合生成の可能性を示す結果を得るとともに、特異な免疫応答と分子間相互作用の相関について解析した。</p> <p>第五章では、以上に述べた、新規ニトロ化脂肪酸含有型糖脂質誘導体の合成と自然免疫調節機構解明の分子基盤についての成果を総括した。</p> <p>以上、本研究により、新規ニトロ化脂肪酸含有型糖脂質誘導体およびニトロ化脂肪酸の新規合成法の開発に成功し、関連するニトロ化複合脂質へ展開可能な手法を確立した。また、自然免疫における複合脂質のニトロ化修飾の役割や機能について重要な知見を得ることにより、免疫調節機構の更なる理解の基盤となる成果を得た。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6515 号	氏 名	末吉 耕大
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（理学）	藤本 ゆかり
	副査	慶應義塾大学教授 工学博士	戸嶋 一敦
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	末永 聖武
		慶應義塾大学准教授 博士（理学）	犀川 陽子

学士（理学）、修士（理学）末吉耕大君の学位請求論文は、「免疫応答関連ニトロ化不飽和脂肪酸を含有する糖脂質の合成と機能解析」と題し、序論、本論 3 章、および結論で構成されている。免疫機構は生体防御の基盤であり、様々な外因性あるいは内因性の分子が自然免疫受容体リガンドあるいは抗原として作用し免疫応答を誘導する。特に、複合脂質は、脂質抗原として免疫機構調節に重要な役割を果たすとともに、自然免疫受容体の機能調節に関わる構造が知られている。一方、細胞内の複合脂質については、生体内でシグナル伝達分子として働く一酸化窒素（NO）の反応によってニトロ化が起こることで生成する脂肪酸が炎症反応の抑制等に関与することが知られていたが、ニトロ化脂肪酸含有複合脂質についての機能は未解明であった。本研究では、ニトロ化脂肪酸を部分構造として含む糖脂質を網羅的に合成するとともに機能解析を行い、新たな免疫調節機能を見出した。

第一章では、序論として自然免疫応答における脂質抗原の機能や関連する自然免疫受容体の概要について述べるとともに、ニトロ化脂肪酸およびニトロ化脂肪酸含有複合脂質の生体内における生成と既知の役割について概要を述べた。

第二章では、ニトロ化脂肪酸およびニトロ化脂肪酸含有型糖脂質誘導体の合成について述べた。特にニトロ化不飽和脂肪酸骨格合成のため、ニトロアルドール反応を用いた新規手法開発により、効率的かつ選択的なニトロ化不飽和脂肪酸合成を行い、多様なニトロ基置換位置をもつ脂肪酸を含有した糖脂質合成に展開した。

第三章では、ニトロ化不飽和脂肪酸含有型の糖脂質誘導体について、脂質抗原提示分子である CD1d に依存した活性評価および結合部位の解析を行った。特に、各糖脂質抗原の CD1d に対する結合親和性と CD1d-NKT 細胞系を介した免疫応答についての解析により、ニトロ化修飾による結合親和性の大きな向上と、糖構造依存的に選択的なサイトカイン誘導を介した免疫応答を誘導することを明らかとした。本研究により、高い選択性で Th2 型サイトカインを誘導する新規の糖脂質化合物を見出し抗炎症作用等への展開の可能性を見出すとともに、生体内で生じるニトロ化脂質が抑制的な免疫応答に関与することを示唆する結果を得た。

第四章では、分子動力学解析等の計算的手法により、CD1d 抗原認識ポケットにおける特定の残基と脂質抗原ニトロ化アルケン部位との水素結合および NO<sub>2</sub>-π 相互作用を介した結合親和性増強の可能性を示す結果を得た。また、特異な免疫応答と分子間相互作用の相関について解析した。

第五章では、以上に述べた、新規ニトロ化脂肪酸含有型糖脂質誘導体の合成と自然免疫調節機構解明の分子基盤についての成果を総括した。

以上、本論文の著者は、本研究により、新規ニトロ化脂肪酸含有型糖脂質誘導体の新規合成法開発に成功し、関連するニトロ化複合脂質へ展開可能な手法を確立した。また、自然免疫における複合脂質のニトロ化修飾の役割や機能について重要な知見を得ることにより、免疫調節機構の更なる理解の基盤となる成果を得た。これらの成果は、今後の複合糖質科学および有機化学の進展に貢献するとともに生命科学や免疫学等関連分野の発展に寄与することが期待され、学術的に意義深い。よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6519 号	氏 名	大谷 豪
主論文題名：  学習データに着目した画像超解像モデルの性能向上			
<p>画像超解像 (SR) は、単一の低解像度画像から対応する高解像度画像を復元するタスクであり、医療や衛星画像など多様な分野で広く利用されている。深層学習の導入以降、特に CNN ベースのアーキテクチャが性能向上を牽引し、SR 分野における研究の中心は、モデル構造の設計に置かれてきた。</p> <p>一方で、SR はピクセル単位での精緻な再構成が求められるため、従来から学習データの質が性能に大きく影響することも認識されていた。実際、多くの CNN ベース手法では、比較的良質な小規模データセットを用いることで、十分な性能を実現していた。</p> <p>しかし近年では、Transformer を基盤とする高表現力モデルが登場し、その能力を十分に引き出すためには、従来以上に大規模かつ高品質な学習データが求められている。このように、モデルの高性能化に伴い、学習データの質と多様性の両立が新たな研究課題として顕在化している。そこで本研究では、学習データの質と多様性に着目したアプローチとして、損失関数とデータ構築の両面から SR 学習を再考し、学習データを中心とした新たな SR 学習の枠組みを提案する。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景と目的を述べる。</p> <p>第 2 章では、画像超解像の基礎知識、評価指標、モデルアーキテクチャ、ならびに従来用いられてきたデータセットについて概説し、研究の立ち位置を明確にする。</p> <p>第 3 章では、Perceptual loss に用いる事前学習モデルに着目し、大規模データによる事前学習が知覚品質の向上に与える影響を検証する。これにより、損失関数の構造とその背後にある学習データの特性との関係を明らかにする。</p> <p>第 4 章では、損失関数による改善には限界があることを踏まえ、学習データの質と多様性に注目したアプローチとして、Web 画像からの自動選別によって高品質なサブセットを構築する手法を提案する。</p> <p>第 5 章では、従来、品質の観点から SR モデルの学習には利用が難しいとされていた JPEG 圧縮画像を、未知の劣化に対応可能な SR モデルで補正し学習に使用することで、質と多様性を両立する手法を提案する。</p> <p>第 6 章では、本研究全体を総括し、損失関数とデータ構築の両面から得られた知見を整理するとともに、今後の展望について述べる。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6519 号	氏 名	大谷 豪
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	青木 義満
	副査	慶應義塾大学教授 工学博士	池原 雅章
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	斎藤 英雄
		慶應義塾大学准教授 博士（工学）	五十川 麻理子
<p>学士（工学）、修士（工学）大谷豪君提出の学位請求論文は「学習データに着目した画像超解像モデルの性能向上」と題し、6章から構成されている。</p> <p>画像超解像 (Super Resolution, SR) は、単一の低解像度画像から対応する高解像度画像を推定的に復元するタスクであり、医療診断、衛星・リモートセンシング、監視映像、映像配信など多様な分野に応用される基盤技術である。深層学習の導入以降、特に CNN ベースのネットワーク設計が性能向上を牽引し、SRCNN や EDSR など数多くのモデルが提案されてきた。しかし、SR はピクセル単位での精緻な再構成を要するため、モデル構造の工夫だけでは限界があり、学習データの質や分布特性が結果に大きく影響することが広く認識されている。</p> <p>近年は Transformer を基盤とする表現力の高いモデルが登場し、その能力を十分に引き出すためには従来以上に大規模かつ高品質なデータが不可欠となった。このように、モデルの高性能化とともに「学習データの設計と活用」が新たな研究課題として浮上している。本論文は、この課題に対し、学習データの質と多様性の両立を重視し、効率的かつ高性能な超解像モデルの実現を目的としている。具体的には、Perceptual loss に用いる事前学習モデルの検討により損失関数の改善を図り、Web 画像を自動選別して高品質サブセットを構築することでデータの多様性と質を確保し、JPEG 圧縮画像をリファインして再利用する枠組みを導入することで、未知な画質劣化への適応とデータ拡張を実現している。</p> <p>第 1 章では、画像超解像の背景と課題を整理し、これまでの研究が主にモデル構造の改良に注力してきたのに対し、本論文が学習データの質と多様性に着目する新たな視点を提示することを明確にしている。</p> <p>第 2 章では、CNN から Transformer に至る代表的なアーキテクチャや評価指標、さらに DIV2K や LSDIR といった標準データセットの特徴を詳説し、本研究の立脚点と課題意識を明確化している。</p> <p>第 3 章では、Perceptual loss に利用する事前学習モデルを比較し、大規模データで学習された CLIP や ViT を導入することで、従来の VGG に基づく損失よりも知覚品質を向上できることを定量的に示している。</p> <p>第 4 章では、Web 画像を自動選別することにより構築した新規データセット DiverSeg を提案し、従来困難であった「質と多様性の両立」を達成し、既存の DF2K や LSDIR を凌駕する性能を確認している。</p> <p>第 5 章では、圧縮劣化を含む JPEG 画像を対象に、劣化成分を推定・補正して再利用する RECA パイプラインを提案し、低品質画像を有効な学習資源に転換する枠組みを構築している。これにより、未知な画質劣化への適応力とデータ拡張効果を実証している。</p> <p>第 6 章では、本研究全体を総括し、損失関数設計とデータ構築という二つの視点から得られた知見を整理し、今後の実世界応用やさらなるモデル汎化への展望を論じている。</p> <p>以上要するに、本論文は、画像超解像という基盤的課題に対し、従来のモデル中心の研究から学習データに焦点を当てることで新たな視点から性能向上を実現したものであり、画像工学分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。</p>			

# Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6526	Name	Zhang, Zijing
Thesis Title			
Emergent Magneto-Inductance Effect in Ferromagnetic Thin Films at Room Temperature			
<p>Emergent magneto-inductance (EML) is a non-classical inductive effect arising from the interplay between spin dynamics and charge transport. Unlike traditional inductance, which originates from current-carrying coils, EML is driven by spin motive force (SMF) generated through time- and space-dependent magnetization dynamics, particularly magnetic domain wall motion. Notably, this emergent inductance increases as the cross-sectional area of the magnetic thin film decreases, in contrast to traditional inductors. This inverse size dependence opens up promising opportunities for miniaturization and integration of spintronic components.</p> <p>This thesis investigates the EML effect in ferromagnetic thin films at room temperature, aiming to clarify its underlying quantum mechanism and enhance its performance for future spintronic applications. In contrast to earlier investigations that relied on complex spin textures such as skyrmions or helical spins in bulk systems, this study reveals that EML responses can be realized in simple single-layer ferromagnetic thin films with uniform magnetic configurations, without requiring specific spin textures.</p> <p>Chapter 1 describes spintronic backgrounds and the objectives of this thesis.</p> <p>Chapter 2 describes the theoretical foundation of EML, tracing its origin from classical electromotive force to SMF induced by domain wall motion, and introduces key models such as Volovik’s and Barnes-Maekawa’s theories.</p> <p>Chapter 3 describes the fabrication of ferromagnetic thin films on glass and flexible polyimide substrates, as well as characterization techniques including atomic force microscopy, transmission electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, magneto-optical Kerr effect measurements, and inductance measurements using a precision LCR meter.</p> <p>Chapter 4 describes EML in NiFeCu-based thin films on glass, demonstrating significant inductance variations dependent on film geometry and composition, with Ni<sub>82</sub>Fe<sub>16</sub>Cu<sub>2</sub> exhibiting strong responses compared to that of Ni<sub>34</sub>Fe<sub>60</sub>Cu<sub>4</sub>Mo<sub>2</sub>.</p> <p>Chapter 5 describes EML enhancement in Ni<sub>81</sub>Fe<sub>17</sub>Cu<sub>2</sub> and Ni<sub>79</sub>Fe<sub>18</sub>Cu<sub>3</sub> films on flexible ultra-smooth polyimide substrates, showing improved performance through reduced magnetic hard-axis anisotropy and domain wall pinning.</p> <p>Chapter 6 summarizes the findings and discusses future prospects of EML-based flexible magnetic devices.</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6526 号	氏 名	Zhang, Zijing
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	海住 英生
副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	栄長 泰明
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	緒明 佑哉
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	神原 陽一
<p>Bachelor of Engineering, Master of Science, ZHANG, Zijing 君提出の学位請求論文は「Emergent Magneto-Inductance Effect in Ferromagnetic Thin Films at Room Temperature」（室温における強磁性薄膜の創発磁気インダクタンス効果）と題し、6章から構成されている。</p> <p>近年、電子の電荷とスピンの2つの自由度を利用するスピントロニクスは、現代のエレクトロニクスを凌駕する次世代技術として期待されている。中でも、最近、量子力学的なインダクタである創発インダクタが観測され、注目を集めている。創発インダクタは、非共線的な磁気構造、例えば、らせん磁気構造を電流により駆動させ、発生したスピン起電力をインダクタンスとして検出した現象である。従来の古典電磁気学に基づくインダクタンスは断面積に比例することから、インダクタの微細化は難しいとされてきた。一方で、創発インダクタでは、素子の断面積を小さくするに従い、インダクタンスが増大することから、インダクタの微細化につながると期待されている。しかし、バルクでの創発磁気インダクタンスは多数報告がある一方で、薄膜系での報告例はほとんどない。そこで本研究では、超平坦基板上的磁性薄膜における創発磁気インダクタンスの観測、並びに、その性能向上を目指している。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景を概説した後、本研究の目的を示している。</p> <p>第2章では、創発磁気インダクタンスの理論について述べている。</p> <p>第3章では、ガラス基板、及び、フレキシブルな超平坦ポリイミド基板上に強磁性薄膜を作製するための成膜方法を示した後、原子間力顕微鏡、透過型電子顕微鏡、エネルギー分散型 X 線分光法による構造解析方法、及び、磁気光学カー効果測定法による磁化状態観測方法について示し、最後に、磁場中交流 4 端子法によるインダクタンス測定手法について説明している。</p> <p>第4章では、ガラス基板上的 NiFeCu 基磁性薄膜における創発磁気インダクタンスについて示している。磁性薄膜系では非共線的な磁気構造の一種である磁壁構造を効率的に作り出すことによって、創発磁気インダクタンスが生じると期待できる。本磁性薄膜において創発磁気インダクタンスを観測し、磁性薄膜の原子組成に依存して顕著なインダクタンス変化が生じることを示している。</p> <p>第5章では、フレキシブルな超平坦ポリイミド基板上の NiFeCu 磁性薄膜における創発磁気インダクタンスについて示している。本磁性薄膜において薄膜の断面積を小さくすることで創発磁気インダクタンスが向上することを明らかにしている。また、階段状外部磁場のステップ幅を大きくすることで、より効率的に磁壁を発生させ創発磁気インダクタンスが向上することも明らかにしている。さらに、理論的な検討を行った結果、計算結果と実験結果の良好な一致も示されている。</p> <p>第6章は結論であり、上記内容を統括するとともに今後の展望に関して述べている。</p> <p>以上要するに、本研究では超平坦基板上的磁性薄膜における創発磁気インダクタンス効果の観測、及び、その性能向上に成功しており、基礎物理学、応用磁気工学の分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。</p>			

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6527 号	氏 名	高山 和輝
主論文題名：			
分子ドーピングされた高分子半導体薄膜の熱輸送特性とトランジスタ応用			
<p>有機半導体における分子ドーピングは汎用的な物性制御法の一つであり、特に半導体内の電荷キャリア密度の制御、およびそれに基づく薄膜トランジスタや熱電発電機などの電子デバイスの性能向上を目的とした研究が幅広く展開されている。その一方で、分子ドーピングに伴う薄膜の構造変化については不明な点が多く、特に高分子（ポリマー）半導体に対してはポリマー薄膜自身の構造の複雑さも相まって、ドーピングの機序において未解明な点が多く残されている。また、溶媒可溶性や機械的耐久性に優れた高分子材料の応用にも注目が集まっており、高分子半導体に対する分子ドーピングを主体とした新奇デバイス開発の重要性が広く認識されている。</p> <p>そこで本研究では、高分子半導体におけるベンチマーク材料として知られるチオフェン系高分子を対象に、電子受容体（アクセプタ）であるフッ素化テトラシアノキノジメタン（F4TCNQ）分子のドーピングが薄膜構造にもたらす変化を熱伝導特性の観点から詳細に追跡し、ドーピング機構に関する議論を展開した。また、分子ドーピングを主体とした新しい薄膜トランジスタ構造に着目し、高分子スタンプによる薄膜パターン転写技術の開発とそのデバイス作製への適用を実証した。これらの取り組みにより、分子ドーピングの基礎と応用の両面に寄与する知見を得ることを目的とした研究を遂行した。</p> <p>第1章では、有機半導体材料およびデバイスにおける分子ドーピングの研究開発動向と課題点をそれぞれ概説し、本研究の目的と特徴を記した。</p> <p>第2章では、F4TCNQ がドーピングされた2種のチオフェン系高分子薄膜に対して、熱伝導率計測法の一つである <math>3\omega</math> 法を適用するための高分子2層構造を提案し、その作製条件の最適化を行った。その後、絶縁体であるポリメタクリル酸メチルとチオフェン系高分子の2層構造を採用し、F4TCNQ がドーピングされた上記のチオフェン系高分子薄膜に対し、薄膜固有の面直熱伝導率と界面熱抵抗との分離評価を実施した。その結果を基に、分子ドーピングが高分子半導体薄膜に与える構造変化と、電気伝導率、熱輸送特性との相関を詳細に追跡し、議論を行うことで、分子ドーピングの新たな評価法としての熱伝導計測の有用性を示した。</p> <p>第3章では、分子ドーピングを主体とした電子デバイス開発の一環として、F4TCNQ ドーパントにより正孔がドーピングされたポリ（3-ヘキシルチオフェン）（P3HT）層（<math>p^+</math>層）をソースとドレインに、また分子ドーピングが成されていないP3HT層を活性層（<math>i</math>層）として有する、ボトムゲート、ボトムコンタクト配置の <math>p^+i-p^+</math> 型薄膜トランジスタを、エラストマースタンプを使用したプッシュコート法による成膜と薄膜パターン転写を組み合わせた印刷プロセスによって作製した。この新規に開発した作製プロセスを採用することで、従来の溶液プロセスでは薄膜堆積が困難な疎水性のゲート絶縁膜表面にもデバイスの形成が可能であることを示すとともに、ノーマリオフ動作でかつゲートヒステリシスのない良好な薄膜トランジスタを作製するに至った。</p> <p>第4章では、結論として本論文の要約と今後の展望を記した。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6527 号	氏 名	高山 和輝
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	野田 啓
	副査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	斎木 敏治
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	緒明 佑哉
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	多田 宗弘

学士（工学）、修士（工学）高山 和輝君提出の学位請求論文は「分子ドーピングされた高分子半導体薄膜の熱輸送特性とトランジスタ応用」と題し、4章から構成されている。

有機半導体における分子ドーピングは、半導体内の電荷キャリア密度の制御、およびそれに基づく薄膜トランジスタや熱電発電機などの電子デバイスの性能向上を目的として、幅広く研究されている。その一方で、ドーピングに伴う薄膜の構造変化については不明な点が多く、特に高分子半導体に対しては薄膜自身の構造の複雑さも相まって、ドーピングの機序において未解明な点が多く残されている。また、溶媒可溶性や機械的耐久性に優れた高分子材料の応用にも注目が集まっており、高分子半導体に対する分子ドーピングを主体とした新しいデバイス開発の重要性が広く認識されている。そこで本研究では、高分子半導体におけるベンチマーク材料として知られるチオフェン系高分子を対象に、電子受容体（アクセプタ）であるフッ素化テトラシアノキノジメタン（F4TCNQ）分子のドーピングが薄膜構造にもたらす変化を熱伝導特性の観点から詳細に追跡すると共に、分子ドーピングを主体とした新しい薄膜トランジスタ構造に着目し、高分子エラストマースタンプによる薄膜パターン転写技術の開発とそのデバイス作製への適用を目的とした研究を遂行している。

第1章では、研究の背景と目的を述べ、従来の研究を概説している。

第2章では、電荷がドーピングされた薄膜に対して、熱伝導率計測法の一つである  $3\omega$  法を適用するための高分子2層構造の提案とその最適化を行っている。絶縁体であるポリメタクリル酸メチルとチオフェン系高分子の2層構造を採用し、F4TCNQがドーピングされたチオフェン系高分子薄膜に対し、薄膜固有の面直熱伝導率と界面熱抵抗との分離評価を実施している。その結果を基に、分子ドーピングが高分子半導体薄膜に与える構造変化と、電気伝導率、熱輸送特性との相関を詳細に追跡し、議論を行うことで、分子ドーピングの新たな評価法としての熱伝導計測の有用性を示している。

第3章では、F4TCNQにより正孔がドーピングされたポリ(3-ヘキシルチオフェン)(P3HT)層(p<sup>+</sup>層)をソースとドレインに、またノンドーピングP3HT層を活性層(i層)として有する、ボトムゲート、ボトムコンタクト配置のp<sup>+</sup>-i-p<sup>+</sup>型薄膜トランジスタを、プッシュコート法による成膜と薄膜パターン転写を組み合わせた印刷プロセスによって作製している。この新規プロセスにより、従来法では困難であった疎水性のゲート絶縁膜表面にもデバイスの形成が可能となり、ノーマリオフ動作でかつゲートヒステリシスのない良好な薄膜トランジスタの作製を実証している。

第4章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文全体の結論を述べている。

以上要するに、本論文では分子ドーピングされた高分子半導体薄膜の熱輸送特性評価とトランジスタ応用の実験的研究を行い、その考察を基盤として、分子ドーピングの基礎と応用の両面に寄与する多くの知見を提示しており、半導体材料およびデバイス分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。

よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6528 号	氏 名	松坂 美月
主論文題名：			
機能性分子を利用した有機スピバルブに関する研究			
<p>電子の電荷とスピンを利用したスピントロニクスと分子材料の利用を融合した分子スピントロニクス研究分野において、代表的なデバイスの 1 つに有機スピバルブ(OSV)が挙げられる。OSV では磁場により抵抗が変化する磁気抵抗(MR)効果が発現する。本研究では、機能性分子の OSV への利用に注目し、高移動度分子、核スピンレスな原子で構成される分子、そして、キラル分子を用いた OSV の作製を行う。さらに、作製した OSV において MR 効果を調べることで、分子スピントロニクスの発展に寄与することを目指した。</p> <p>第 1 章に、本研究の背景と従来の研究を概説した。</p> <p>第 2 章に、本研究におけるデバイスの作製手法とその評価方法を示した。</p> <p>第 3 章では、高移動度分子を用いたナノ接合デバイスにおける MR 効果について述べた。OSV をナノスケール化することで、MR 効果の向上が期待できると考えられている一方で、ナノスケール OSV において観測された MR 効果はすべて低温での結果であった。そこで、磁性薄膜エッジを利用した分子ナノ接合デバイスを作製し、室温 MR 効果観測を目指した。分子材料としては高移動度分子 2,7-dioctyl[1]benzothieno[3,2-<i>b</i>][1]benzothiophene (C8-BTBT)を用いることで、スピン散乱の抑制が期待できると考えた。作製した C8-BTBT を用いたナノ接合デバイスにおいて、室温 MR 効果の観測に成功した。</p> <p>第 4 章では、分子ナノ接合デバイスの作製手法の拡張を目指し、デバイスの作製と電気磁気特性評価を行った結果を示した。結果として、接合面積を微小化したデバイスを作製できた。特に、同手法で作製したデバイスにおける最小の接合面積 <math>S=7 \times 7 \text{ nm}^2</math> を有するデバイスの実現に至った。</p> <p>第 5 章では、核スピンレスな原子で構成される分子 tris-(8-hydroxyquinoline) erbium (Erq<sub>3</sub>)を用いたマイクロスケール OSV の作製と本 OSV における MR 効果について示した。核スピンの小さな原子では超微細相互作用が小さくなり、スピン散乱が抑制されると考えた。結果として、Erq<sub>3</sub>を用いた OSV において MR 効果の観測に成功した。これは Erq<sub>3</sub>を用いた OSV における初めての観測例となった。</p> <p>第 6 章では、キラル分子を用いたナノ接合デバイスにおける MR 効果について示した。近年、キラル分子においてキラル誘起スピン選択性(CISS)効果が観測され、キラル分子が室温で高いスピン選択性を示すことが報告された。そこで、CISS 効果と発展させたナノ接合デバイスの作製技術を融合することで、キラル分子 <i>N</i>-(3<i>S</i>)-3,7-dimethyloctyl[1]benzothieno[3,2-<i>b</i>]benzothiophene-2-carboxyamide を用いたナノスケール OSV を作製した。本 OSV において、CISS ベースの室温 MR 効果の観測に成功した。本成果はデバイスにおける CISS 効果のメカニズムに関して新たな知見を示したといえる。</p> <p>第 7 章に、結論として各章で得られた内容をまとめ、本研究の成果を要約した。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6528 号	氏 名	松坂 美月
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	海住 英生
	副査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	栄長 泰明
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	緒明 佑哉
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	神原 陽一

学士（工学）、修士（工学）松坂美月君提出の学位請求論文は「機能性分子を利用した有機スピバルブに関する研究」と題し、7章から構成されている。

近年、次世代のエレクトロニクスとして、電子の電荷とスピンの2つの性質を利用するスピントロニクスに分子が融合した分子スピントロニクスが注目を集めている。当該分野における代表的なデバイスの1つとして有機スピバルブ（OSV）が挙げられる。OSVでは磁場により抵抗が変化する磁気抵抗（MR）効果が発現する。しかし、そのメカニズムの全容解明には至っていない。また、分子は多様で独自の特徴を有する場合が多いにも関わらず、その潜在性が十分に発揮されていないことが現状である。そこで、本研究では、機能性分子として、高移動度分子、核スピンレスな原子で構成される分子、そして、キラル分子に注目し、これらを用いた様々なOSVにおいてMR効果を調べることで、分子スピントロニクスの発展に寄与することを目指している。

第1章は序論であり、背景と従来研究を概説した後、本研究の目的を示している。

第2章では、本研究におけるデバイスの作製手法とその評価方法を示している。

第3章では、高移動度分子である2,7-dioctyl[1]benzothieno[3,2-b][1] benzothiopheneを用いたナノ接合OSVの作製と本デバイスにおけるMR効果について示している。高移動度分子ではスピン拡散長が長いと考えられるため、スピン散乱の抑制が期待できる。本研究により、ナノ接合OSVの作製技術を確立するとともに、本デバイスにおいて、室温MR効果の観測に初めて成功したことを示している。

第4章では、ナノ接合OSVの作製手法の拡張を目指し、デバイスの作製と電気磁気特性評価についてその結果を示している。本作製手法を確立した結果、接合面積を微小化したデバイスを作製することが可能となり、特に、同手法で作製したデバイスにおいて最小の $7 \times 7 \text{ nm}^2$ の接合面積を有するデバイスの実現に至ったことを示している。

第5章では、核スピンレスな原子で構成されるtris-(8-hydroxyquinoline) erbium (Erq<sub>3</sub>)を用いたマイクロ接合OSVの作製と本デバイスにおけるMR効果について示している。核スピンの小さな原子では超微細相互作用が小さくなり、スピン散乱が抑制されることが期待される。本研究により、Erq<sub>3</sub>を用いたOSVにおいて初めてMR効果の観測に成功したことを示している。

第6章では、キラル分子を用いたナノ接合OSVにおけるMR効果について示している。キラル分子では、キラル誘起スピン選択性（CISS）効果が観測され、室温で高いスピン選択性を示すことが報告されている。このCISS効果と、発展させたナノ接合デバイスの作製技術を融合することで、ナノ接合OSVを作製した結果、本デバイスにおいて、CISSベースの室温MR効果の観測に成功したことを示している。

第7章は結論であり、上記内容を統括するとともに今後の展望に関して述べている。

以上要するに、本研究では新しいスピデバイスにおけるMR効果の観測、並びに、分子スピントロニクスの基礎物理学・応用工学的発展への貢献に成功しており、応用物理学、ナノ科学の分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6529 号	氏 名	丸山 めく
主論文題名： ゲスト・ホスト両側の選択性を活用した分離技術のためのクラスレートハイドレートの結晶成長と特性評価			
<p>本論文はクラスレートハイドレート（以下、ハイドレート）の生成と分解を利用した分離技術である混合ガス分離技術とトリチウム水分離・濃縮技術の社会実装，さらに将来的な天然水素資源の活用に向け，ハイドレート生成に関する材料化学，物理化学，並びに化学工学の観点から行った実験的な評価と探索をまとめたものである。</p> <p>第 1 章では水をホスト物質とし，多様な物質をゲスト物質として生成する結晶であるハイドレート生成の物理化学について説明した．またハイドレート結晶の特性評価法及び炭素循環社会に向けたハイドレートの工業利用の現状を説明した．こうした背景を踏まえ，本研究の目的を分離技術のためのハイドレート生成に関する結晶成長と特性評価を探索することと設定した．</p> <p>第 2 章ではハイドレートの生成と分解を活用した混合ガス分離技術に適した補助物質であるテトラヒドロピラン（THP）を用い，<math>H_2+CO_2+THP</math> ハイドレートの結晶成長挙動を明らかにした．続いて <math>CH_4+CO_2+THP</math> ハイドレートを媒体とした連続分離実験を行った．これらの実験研究により，ハイドレートの結晶学的特性を基に実機における適切な運転条件についての示唆を与え，連続分離プロセスの運転により得られたモル分率の時間的变化により実用性の評価を行った．</p> <p>第 3 章では重水をホスト物質として生成するハイドレート（以下，重水ハイドレート）とトリチウムが同時に濃縮されるトリチウム分離・濃縮技術の高度化のために，有望な補助物質であるシクロペンタン（CP）を用いた重水ハイドレートの平衡条件，結晶成長，そして結晶構造を明らかにした．これらの物性と特性が軽水から生成するハイドレートと重水ハイドレートでどのように差異があるのかを明らかにした．これにより重水ハイドレートの生成プロセスの設計に示唆を与えた．</p> <p>第 4 章では天然水素資源の探索の一環として地層中の天然メタンハイドレートと天然水素が共存し得る領域を実験的に模擬し，水素を含むガスが接触したときのメタンハイドレート及びメタン+プロパンハイドレートの分解挙動と水素の包蔵をラマン分光測定により明らかにした．これにより天然水素探索の新たな着手方法を提案した．</p> <p>第 5 章には本論文の結論を示した．上記三つの観点から研究全体を統括した．</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6529 号	氏 名	丸山 めく
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	大村 亮
	副査	慶應義塾大学教授 工学博士	今井 宏明
		慶應義塾大学教授 Ph.D.	堀田 篤
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	荒井 規允

学士(工学), 修士(工学), 丸山めく君提出の学位請求論文は「ゲスト・ホスト両側の選択性を活用した分離技術のためのクラスレートハイドレートの結晶成長と特性評価」と題し, 全5章からなる。

本論文はクラスレートハイドレート(以下,ハイドレート)の生成と分解を利用した分離技術である混合ガス分離技術とトリチウム水分離・濃縮技術の社会実装, さらに将来的な天然水素資源の活用に向け, ハイドレート生成に関する物質化学, 物理化学, 並びに化学工学の観点から行った実験研究の結果を論じたものである。

第1章では水をホスト物質とし, 多様な物質をゲスト物質として生成する結晶であるハイドレート生成の物理化学について説明している。またハイドレート結晶の特性評価法及び炭素循環社会に向けたハイドレートの工業利用の現状を説明している。こうした背景を踏まえ, 本研究の目的を分離技術のためのハイドレート生成に関する結晶成長の解明と特性評価と設定している。

第2章ではハイドレートの生成と分解を活用した混合ガス分離技術に適した補助物質であるテトラヒドロピラン(THP)を用い,  $H_2+CO_2+THP$  ハイドレートの結晶成長挙動を明らかにしている。続いて  $CH_4+CO_2+THP$  ハイドレートを生成させることによる連続分離実験を実施してハイドレート中に  $CH_4$  が濃縮され, ゲスト物質気相側において  $CO_2$  が濃縮されることを示している。ハイドレートの結晶成長の動特性を基に実機における適切な運転条件についての示唆を与え, 連続分離実験から得られたハイドレート相と気相の組成の時間的変化から実用性を評価している。

第3章では重水をホスト物質として生成するハイドレート(以下, 重水ハイドレート)を用いてトリチウム水を濃縮するトリチウム分離技術の高度化のために, 補助物質であるシクロペンタン(CP)から生成する重水ハイドレートの平衡条件, 結晶成長, および結晶構造を明らかにしている。重水ハイドレートの平衡温度は軽水ハイドレートのそれよりも  $3\text{ }^\circ\text{C}$  程度高温となるが, 実験系の結晶成長の駆動力を揃えれば結晶成長の動特性は軽水系と重水系で差異がないことを示している。これらの結果から重水ハイドレート生成プロセスの設計に示唆を与えている。

第4章では天然水素資源の探索を背景として, 地層中の天然メタンハイドレートと天然水素が共存し得る領域を実験的に模擬し, 水素を含むガスが接触したときのメタンハイドレート及びメタン+プロパンハイドレートの分解挙動と水素の包蔵をラマン分光測定により明らかにしている。これにより天然のメタンハイドレート中に水素が含まれる可能性を示し, 天然水素探索の新たな方法を提案している。

第5章では物理化学と工学の観点から研究全体を総括して結論を示している。

以上要約すると本論文はハイドレートのゲストとホスト両側の選択性を活用したガス分離技術やトリチウム水分離技術の高度化に求められるハイドレートの物性と動特性を明らかにしたものであり, 工学上寄与するものが少なくない。よって本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6548 号	氏 名	山下 舞佳
主 論 文 題 名 :			
疎水性小分子の水中分散を実現するタンパク質ナノケージ材料の開発と応用展開			
<p>色素、香料、医薬品、農薬など、多くの機能性分子は高い疎水性を示し、水中での分散性に課題がある。これを解決するため、各種分散剤が開発されてきた。中でも、タンパク質を基盤とした分散剤は、その構造の均質性の高さから有用な分散剤として注目されている。従来は扱いが容易な比較的小型のタンパク質が用いられてきたが、近年では、利用されるタンパク質も拡張されている。一例として、中空の構造を持つタンパク質ナノケージの利用が挙げられる。その構造的特徴から、内部空間に化合物を内包できるため、これを疎水性化合物の分散剤として利用する研究が徐々に始まっている。しかし、天然のタンパク質ナノケージは密なパッキングを有することで、化合物の内包効率が低い課題があった。</p> <p>本研究では、この課題を克服するため、人工タンパク質ナノケージ <b>TIP60</b> を用いた分散剤の開発を行った。<b>TIP60</b> はサッカーボール型の構造を持ち、直径 <b>2.3 nm</b> の孔を <b>20</b> 箇所にも有する多孔質構造体である。この構造により、内部空間の化学的性質を化学修飾によって改変でき、かつ、機能性分子の効率的な取り込みが可能となる。</p> <p>第一章では、緒言として、疎水性小分子の水中分散に関する背景と課題を包括的に概説している。続いて、タンパク質、とりわけナノケージを用いた分散設計の可能性を整理し、最後に、本研究で用いる <b>TIP60</b> の位置づけを明確化し、本論文の目的について述べている。</p> <p>第二章では、<b>TIP60</b> を疎水性小分子の分散剤として設計するためのモデル系構築について述べている。具体的には、内側表面を 4 種類の疎水性化合物で化学修飾した疎水性 <b>TIP60</b> 群を作成し、ナイルレッド (<b>NR</b>) の内包能を比較した結果、ピレン修飾 <b>TIP60</b> が最も高い内包効率を示すことを見いだした。蛍光測定から、内包 <b>NR</b> のオリゴマー化が抑制されていることも明らかにした。これらの知見に基づき、光増感剤亜鉛フタロシアニン (<b>ZnPC</b>) の内包と機能評価についても行った。</p> <p>第三章では、内包効率のさらなる向上を目的に、修飾ピレンの数と配置を最適化した複数の変異体設計について述べている。結果として、約 <b>90</b> 個のピレンを修飾した変異体において、<b>NR</b> の内包数が飛躍的に増加することを見出した。クライオ電子顕微鏡による構造解析では、五芒星状に配置されたピレン分子が相互作用し、<b>NR</b> の結合部位として機能していることが示唆された。このピレン間相互作用は、ナノケージ全体の耐熱性向上にも寄与していた。さらに、<b>NR</b> が環境応答的な色変化特性を持つことから着想を得て、<b>NR</b> 内包 <b>TIP60</b> がナノケージの解離・再構築に応答して色が変わる刺激応答型インク材料として機能することを実証した。</p> <p>第四章では、本研究で得られた一連の成果を総括し、その意義と今後の展望について述べている。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6548 号	氏 名	山下 舞佳
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（理学）	宮本 憲二
	副査	慶應義塾大学教授 博士（地球環境科学）	土居 信英
		慶應義塾大学教授 博士（薬学）	荒井 緑
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	加納 英明

学士（理学）、修士（理学）山下舞佳君提出の学位請求論文は、「疎水性小分子の水中分散を実現するタンパク質ナノケージ材料の開発と応用展開」と題し、全四章から構成されている。

一般的に、色素、香料、医薬品、農薬などの多くの機能性分子は、高い疎水性を示すものが多い。したがって、水中での溶解性に課題があり、これを解決するために様々な分散剤が開発されてきた。中でも、タンパク質を基盤とした分散剤は、その構造の均質性の高さから注目されている。代表的なものとして、中空の構造を持つタンパク質ナノケージの利用が挙げられる。ナノケージは内部空間に化合物を内包できるため、これを疎水性化合物の分散剤として作用することが期待される。しかし、天然のタンパク質ナノケージは密なパッキングを有するため、化合物の内包効率が低い課題があった。本論文では、この課題を克服するため、人工タンパク質ナノケージ TIP60 を用いた分散剤の開発を行っている。TIP60 はサッカーボール型の構造を持ち、直径 2.3 nm の孔を 20 箇所にも有する多孔質構造体である。本論文では、この構造的な特徴を利用して、内部空間を化学修飾することによって疎水化することを検討している。そして、疎水化したナノケージ内部への疎水性機能性分子の効率的な取り込みに成功している。

第一章は緒言であり、疎水性小分子の水中分散に関する背景と課題を包括的に概説している。続いて、タンパク質、とりわけナノケージを用いた分散剤としての可能性を整理している。最後に、本研究で用いる TIP60 の特徴を説明し、本論文の目的について述べている。

第二章では、TIP60 を疎水性小分子の分散剤として設計するためのモデル系構築と内包能の評価について述べている。具体的には、内側表面を 4 種類の疎水性化合物で化学修飾した疎水化 TIP60 を作成した。次に、それら修飾タンパク質についてナイルレッド (NR) の内包能を比較した。その結果、ピレン修飾 TIP60 が最も高い内包効率を示すことを見いだした。さらに、蛍光測定から、内包 NR のオリゴマー化が抑制されていることも明らかにした。また、これらの知見に基づき、光増感剤である亜鉛フタロシアニン (ZnPC) の内包と機能評価を行っている。分光分析の結果、添加した ZnPC は一部がモノマー状態で分散しており、光照射により一重項酸素を生成できることを確認している。

第三章では、内包効率のさらなる向上を目的に、修飾ピレンの数と配置を最適化した複数の変異型 TIP60 の設計について述べている。そして、約 90 個のピレンで内部修飾した変異体において、NR の内包数が飛躍的に増加することを見出している。クライオ電子顕微鏡による構造解析では、星形五角形に配置されたピレン分子が相互作用し、NR の結合部位として機能していることを明らかとしている。このピレン間相互作用は、ナノケージ全体の耐熱性向上にも寄与していた。さらに、NR が環境応答的な色変化特性を持つことから着想を得て、NR 内包 TIP60 がナノケージの解離・再構築に応答して色が変わる刺激応答型インク材料として機能することを実証している。

第四章では、本研究で得られた一連の成果をまとめている。また、タンパク質内部の疎水化技術を用いることで、より多様な分子機能の創出や、機能性材料への展開の可能性について論じている。

以上本論文では、人工タンパク質ナノケージ TIP60 の内部空間の化学修飾による機能化に向けた分子基盤の構築に成功しており、生命科学研究に大いに資するものである。よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6549 号	氏 名	花井 奏太
主論文題名： Chiral-Transport-Induced Collective Modes in Strong Magnetic Fields and Their Implications for Neutron Star Phenomenology (強磁場中のカイラル輸送に誘起された集団モードと中性子星現象論への示唆)			
<p>中性子星は高密度な環境と強磁場を併せ持つコンパクト天体であり、その内部構造を解明することは、素粒子物理、原子核物理、宇宙物理にまたがる重要な問題である。近年、中性子星連星合体からの重力波が検出されたことを契機に、中性子星内部を探る手段として星震学が注目されている。星震学では、星震や重力波は、その物理的な起源に応じていくつかの振動モードに分類される。一方、素粒子・原子核物理の文脈では、相対論的なフェルミオンのカイラリティに由来するカイラル輸送現象が生じることが知られている。その代表例が、磁場方向に電流が誘起されるカイラル磁気効果である。これはさらに、カイラル磁気波と呼ばれる磁場方向の密度波を引き起こす。</p> <p>本博士論文では、まず強磁場の存在する中性子星内部のクォーク物質、および回転する超新星コアのニュートリノ物質が相対論的なフェルミオン多体系であることに着目し、カイラル輸送を星震学に初めて導入した解析を行った。これにより、それぞれの場合において新たな振動モードの星震および重力波が生じることを理論的に予言した。特に、クォーク物質から放出される重力波の振動数には中性子星内部の磁場の情報が反映されるため、これまで観測的な情報が乏しい内部磁場を探る重要なプローブとなり得ることを示した。また、クォークは有限の質量を持つため、カイラル輸送を抑制するカイラリティフリップが生じる。そこで、運動論を用いてカイラリティフリップによる星震の減衰率を求め、観測可能な振動数の範囲を評価した。</p> <p>次に、磁場中の相対論的無衝突プラズマにおいて、動的な電磁場による応答を調べた。カイラルアノマリーの効果を適切に取り入れるため、弱磁場極限ではカイラル運動論を、強磁場極限においては最低 Landau 準位近似を用いて、集団モードの分散関係を導出した。その結果、従来の Landau 減衰とは異なる量子論的な動的遮蔽が生じることを明らかにした。さらに、緩和時間のパラメータ依存性が磁場強度によって異なること、および動的な磁場が部分的に遮蔽されることを示した。前者に伴い、粘性係数の温度や磁場の依存性も変化する。そして中間磁場領域では、中性子星の星震が重力波放出で不安定化する <math>r</math> モード不安定性がより生じやすくなる可能性を提示した。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6549 号	氏 名	花井 奏太
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（理学）	山本 直希
	副査	慶應義塾大学教授 博士（理学）	岡 朋治
		慶應義塾大学准教授 博士（理学）	檜垣 徹太郎
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	星野 一生

学士（理学）、修士（理学）花井奏太君提出の学位請求論文は、「Chiral-Transport-Induced Collective Modes in Strong Magnetic Fields and Their Implications for Neutron Star Phenomenology（強磁場中のカイラル輸送に誘起された集団モードと中性子星現象論への示唆）」と題し、全7章より構成されている。

中性子星内部のような原子核の標準密度を超える超高密度物質の相と性質の解明は、素粒子・原子核・宇宙物理にまたがる根源的な未解決問題の一つである。理論的には、このような高密度物質は強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) によって記述される。観測的には、近年の中性子星連星合体に伴う重力波検出を契機として、中性子星内部構造を探る有力な手段として星震学が注目されている。星震学においては、星震や重力波として観測される振動現象は、その物理的起源に応じて複数の固有振動モードに分類される。著者は本論文において、強磁場下の中性子星内部に存在しうる高密度クォーク物質を代表例として、素粒子のカイラリティに起因する量子論的効果によって、従来の星震学では考慮されてこなかった新奇な振動モード、およびそれに伴う重力波が生じうることを初めて明らかにした。

第1章は序論であり、中性子星およびその内部で実現すると考えられている超高密度物質研究の現状と、本研究の概要が述べられている。第2章では、QCDの基本的性質と相構造、特に超高密度で現れるクォークの超伝導相であるカラー超伝導について説明されている。第3章では、本研究で新たな振動モードを導出する際に重要となる量子論的な対称性の破れ（アノマリー）と、カイラリティによって誘起されるカイラル輸送現象、およびそれらを統一的に記述するカイラル運動論が説明されている。第4章では、中性子星の基本的性質と、従来の星震学における振動モードの分類について述べられている。

第5章では、強磁場下の中性子星内部におけるクォーク物質、および回転する超新星コアにおけるニュートリノ物質について、カイラリティに起因する集団的な振動モードの分散関係を導出している。特に、素粒子の有限質量によるカイラリティのフリッピング率を、場の量子論的手法と運動論的手法に基づいて評価し、これらの振動モードの典型的な振動数や振幅を見積もっている。さらに、これらの振動モードに伴って放出される重力波の角度依存性を解析している。

第6章では、外部磁場中の相対論的無衝突プラズマにおける動的な電磁場の応答を調べている。まず、弱磁場極限において、カイラル運動論を用いて集団モードの分散関係を導出し、磁場と垂直方向のモードについてはカイラルアノマリーによって従来の Landau 減衰とは異なる異常動的遮蔽が生じること、さらにプラズマ振動に量子論的な補正が加わることを示している。次に、強磁場極限では、最低 Landau 準位近似に基づく解析を行い、ギャップを持つ振動モードが現れることを明らかにしている。加えて、中性子星内部の電子物質において、異常動的遮蔽が粘性係数と関係する緩和時間などに与える現象論的示唆について論じられている。

第7章では、本論文の結果と今後の展望がまとめられている。

以上のように本研究は、強磁場下の相対論的高密度物質における重力波・電磁波の集団モードが、素粒子のカイラリティに起因する効果によって定性的かつ定量的に修正されることを体系的に示したものである。とりわけ、中性子星における星震学に原理的に新しい可能性を提示した点は重要であり、原子核物理学・宇宙物理学の関連分野に対して学術上貢献するものとして評価できる。よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6550 号	氏 名	東 伸彦
<p>主論文題名：</p> <p style="text-align: center;">銅の格子欠陥を有する複合アニオン層状化合物多結晶  <math>\text{LaCu}_{1-\delta}\text{S}_{1-x}\text{Se}_x\text{O}</math> (<math>x = 0.5 - 0.99</math>) の                  光学バンドギャップ内構造および熱輸送特性</p>			
<p>熱電変換は Seebeck 効果を利用し温度差から直接電力を生み出す技術である。熱電変換材料の性能は、電気抵抗率 <math>\rho</math>、Seebeck 係数 <math>S</math>、熱伝導率 <math>\kappa</math>、絶対温度 <math>T</math> より無次元性能指数 <math>ZT = S^2 T / \rho \kappa</math> で評価され、<math>ZT &gt; 1</math> が実用化の目安である。<math>\text{LnCuChO}</math> (<math>\text{Ln}</math>:ランタノイド, <math>\text{Ch}</math>:カルコゲン)の内 <math>\text{BiCuSeO}</math> は、<math>ZT &gt; 1</math> と Zhao らが報告し、Wang らの理論計算により <math>\text{LaCuChO}</math> は <math>\text{BiCuSeO}</math> 程度の <math>ZT</math> を有する可能性が示唆された。</p> <p>本来、<math>\text{LaCuChO}</math> は半導体だが <math>\text{LaCuChO}</math> の輸送特性の過去報告は複雑である。Ishikawa らと Yasukawa らは多結晶 <math>\text{LaCuSO}</math> と <math>\text{LaCuSeO}</math> で、温度特性が半導体的な <math>\rho</math> と金属的な <math>S</math> の共存を報告した。Goto らは <math>\text{LaCuSO}</math> の <math>p</math> 型伝導は銅欠陥由来で、1%の銅欠陥導入により電気抵抗率が 100 万分の 1 に低下すると報告した。一方、Kato らは <math>\text{LaCuSeO}</math> で銅欠陥導入を試みたが電気抵抗率は低下しなかったと報告した。<math>\text{LaCuChO}</math> の輸送特性メカニズムを検証するために、これら過去報告を Jonker plot に plot しても結果は一直線にはのらない。輸送特性メカニズムを解明するには XRD (X-ray diffraction) データが不可欠だが、過去報告では XRD データがないものがあり、輸送特性の解明を困難にしている。従って本論文では、各試料の XRD データや色の詳細を示し、輸送特性を明らかにする。</p> <p><math>\text{LaCu}_{1-\delta}\text{S}_{1-x}\text{Se}_x\text{O}</math> (<math>x = 0.5 - 0.99</math>) の多結晶バルク試料を固相反応により作製した。作製した試料の XRD パターン測定を行い、試料を同定した。試料の輸送特性評価として <math>\rho</math>、<math>S</math>、<math>\kappa</math> の測定を行った。また、反射率測定の結果から光学バンドギャップ (<math>E_g</math>) を算出した。そしてそれらの輸送特性を Jonker plot に plot した。</p> <p><math>x = 0.5</math> では、<math>\rho</math> の温度依存性は、<math>\delta = 0</math> と <math>\delta \sim 0.02</math> は半導体的、<math>\delta \sim 0.01</math> は金属的であった。<math>\delta \sim 0.01</math> では 673 K で <math>ZT</math> が最高値をとり、<math>\rho = 1.3 \times 10^{-3} \Omega \text{m}</math>、<math>\kappa = 6.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}</math>、<math>S = 87 \mu \text{VK}^{-1}</math> で <math>ZT = 6.4 \times 10^{-4}</math> であった。光学バンドギャップは、<math>\delta = 0</math> は 2.92 eV、<math>\delta \sim 0.01</math> は 2.67 eV、<math>\delta \sim 0.02</math> は 2.84 eV で、<math>\delta \sim 0.01</math> では 2.1 eV 付近に In-gap-state が生じた。</p> <p><math>x = 0.75</math> では、<math>\delta = 0</math> は 373 K で <math>ZT</math> が最高値をとり、<math>\rho = 9.5 \times 10^{-3} \Omega \text{m}</math>、<math>\kappa = 2.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}</math>、<math>S = 75 \mu \text{VK}^{-1}</math> で <math>ZT = 8.6 \times 10^{-5}</math> であった。<math>\rho</math> は昇温過程と降温過程で値が一致しない温度履歴が発現した。<math>\rho</math> の測定前後の試料表面を比較すると、測定後には試料表面に Cu が析出していた。</p> <p><math>x = 0.99</math> では、<math>\delta \sim 0.01</math> を 17 サンプル作製した。作製した試料の電気抵抗値測定結果は <math>\sim 10^1 \Omega</math> から <math>\sim 10^6 \Omega</math> のばらつきが生じた。17 サンプルで最も電気抵抗値の低い試料で輸送特性評価を行うと、673 K で <math>ZT</math> が最高値となり、<math>\rho = 7.4 \times 10^{-3} \Omega \text{m}</math>、<math>\kappa = 8.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}</math>、<math>S = 91 \mu \text{VK}^{-1}</math> で <math>ZT = 8.6 \times 10^{-5}</math> であった。</p> <p>これら結果を Jonker plot に plot した結果、輸送特性は 2 つの直線機構が存在すると明らかになった。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6550 号	氏 名	東 伸彦
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	的場 正憲
副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	神原 陽一
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	海住 英生
	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	清水 智子
<p>学士（工学）、修士（工学）伸彦君提出の学位請求論文は、「銅の格子欠陥を有する複合アニオン層状化合物多結晶 <math>\text{LaCu}_{1-x}\text{S}_{1-x}\text{Se}_x\text{O}</math> (<math>x = 0.5 - 0.99</math>) の光学バンドギャップ内構造および熱輸送特性」と題し、全 7 章から構成されている。</p> <p>熱電エネルギー変換技術は、産業・エネルギー・環境の三領域で大きなインパクトを持つ「未利用熱を直接電力化する技術」として期待されている。既存の熱電変換材料 (<math>\text{Bi}_2\text{Te}_3</math>, <math>\text{PbTe}</math>, <math>\text{SiGe}</math>) には、明確な弱点（希少元素使用、毒性、悪い加工性）があるため、安価・豊富・低毒性の元素で構成され高温安定性に優れた酸化物系材料 (<math>\text{LaCuChO}</math> : <math>\text{Ch}=\text{S}, \text{Se}</math> 等) の探索が必要不可欠である。しかしながら、<math>\text{LaCuChO}</math> の輸送特性は複雑であり、多結晶 <math>\text{LaCuSO}</math> や <math>\text{LaCuSeO}</math> において半導体的・金属的挙動の双方が報告されるなど、未解明な点が多く残されている。特に <math>\text{LaCuSO}</math> の p 型伝導は銅欠陥に由来するとされているが、<math>\text{LaCuSeO}</math> では銅欠陥の導入が困難であるとの報告もあり、過去の研究では詳細な X 線回折 (XRD) データが不足しているのが現状である。本研究では、<math>\text{LaCuChO}</math> 系材料の輸送機構を解明することを目的として、固相反応法により <math>\text{LaCu}_{1-x}\text{S}_{1-x}\text{Se}_x\text{O}</math> (<math>x = 0.5 - 0.99</math>) の多結晶バルク試料を注意深く合成し、合成した試料に対して XRD パターン測定による同定を行った後、絶対温度 <math>T</math> における輸送特性（電気抵抗率 <math>\rho</math>, Seebeck 係数 <math>S</math>, 熱伝導率 <math>\kappa</math>）および無次元性能指数 (<math>ZT = S^2 T \rho^{-1} \kappa^{-1}</math>) の評価および Jonker プロット (<math>\log(\rho) \cdot S</math>) 解析、ならびに反射率測定による光学バンドギャップ (<math>E_g</math>) の算出を行うことで、<math>\text{LaCuChO}</math> の輸送特性の本質を探究した。</p> <p>本論文の第 1 章は序論であり、本研究の背景と位置づけが述べられている。第 2 章では、実験原理が述べられ、第 3 章では、合成方法や注意深く合成した試料の評価方法が述べられている。第 4 章では、<math>\text{LaCu}_{1-x}\text{S}_{0.5}\text{Se}_{0.5}\text{O}</math> の合成と輸送特性および光学バンドギャップ内構造評価をまとめている。Cu 欠陥量の制御により、輸送特性が半導体から縮退的挙動へ劇的に変化することを見出すとともに、本研究で注意深く合成した試料と既報のデータが Jonker プロット上で一直線上に乗り、ドーピングの有無によらず同一の輸送機構が支配的であることを明らかにしている。第 5 章では、<math>\text{LaCu}_{1-x}\text{S}_{0.75}\text{Se}_{0.25}\text{O}</math> に関して、電気抵抗率に特異な温度履歴が観測され、表面への Cu 析出が見られることから相転移やイオン伝導の輸送現象への関与の存在を指摘している。そして、Jonker プロット解析により、組成比の変化が輸送メカニズムの本質的な変化を誘起した可能性を示唆している。第 6 章では、<math>\text{LaCu}_{1-x}\text{S}_{0.99}\text{Se}_{0.01}\text{O}</math> に関して、わずか 1% の S 置換で縮退的挙動が発現することを見出している。また、Jonker プロット上で、本試料群が前章までのデータと共通の直線に乗る一方で、系全体では 2 つの異なる輸送機構が存在することを明らかにしている。第 7 章では、本研究により得られた知見をまとめ、輸送特性の分類と検討を行っている。Jonker プロット解析により、多くの試料が属する結晶固有の輸送機構（機構 1）と、特定の組成で見られる界面・相転移に干渉された輸送機構（機構 2）の 2 つを特定している。熱電性能向上には機構 1 の維持とキャリア最適化が必須であり、今後は異方性の活用等による合成戦略の探求が重要であると結論付けている。</p> <p>以上、本論文は、複合アニオン層状化合物 <math>\text{LaCu}_{1-x}\text{S}_{1-x}\text{Se}_x\text{O}</math> の合成手法を確立し、組成変化に伴う輸送特性の変化や特異な温度履歴、縮退的挙動に関する新たな知見を得たものであり、組成秩序や配向、キャリア制御を軸とした新規熱電変換材料の設計指針の探求を通して、排熱利用を目指す応用物理・熱電変換工学応用への貢献が期待される。</p> <p>よって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。</p>			

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6551 号	氏 名	藤田 優人
主論文題名： 高空間分解能探針増強ラマン分光における局在偏光場が誘起するカーボンナノ材料の 応答			
<p>ラマン分光と走査型プローブ顕微鏡技術を組み合わせた探針増強ラマン分光法 (TERS) は、従来をはるかに超える高感度かつ高分解能な分光イメージングを可能にした。金属探針先端近傍に形成される強く局在した光により、ナノメートルスケール、場合によっては 1 nm 以下の空間分解能が実現される。このような高分解能領域では、従来のラマン散乱理論が破綻する。本研究では、高空間分解能 TERS における局所電場および偏光特性がラマン信号に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。具体的にはカーボンナノ材料を試料として用い、局在偏光場が物質中の電子遷移経路を変化させ、新たなラマン活性過程を誘起することを示すとともに、ナノスケールにおける光と局所構造との相互作用の理解を深化させた。得られた結果は、高空間分解能 TERS における信号生成の機構を明確化し、分析技術の発展に貢献するものである。</p> <p>本論文は全 6 章で構成される。第 1 章では序論として、ラマン分光法と TERS の発展の経緯、ならびに本研究の目的を概説する。第 2 章では、本研究の前提知識として対象試料としたカーボンナノチューブおよびグラフェンの物性、カーボンナノ材料のラマン分光、走査型トンネル顕微鏡の原理、また TERS の電磁場理論を整理する。第 3 章では金属探針の作製方法および実験装置の構成について述べる。第 4 章では、カーボンナノチューブ内の電子遷移変化について述べる。探針先端の局在偏光場により電子遷移経路が変化し、通常のラマン分光では禁制である非垂直遷移が誘起され、欠陥を伴わない領域でも D バンドが強く観測されることを明らかにする。第 5 章では、グラフェンナノ構造における非垂直遷移由来の D バンドの挙動について述べる。グラフェンナノ構造と局在偏光場の強い結合により、カーボンナノチューブと同様に非垂直遷移由来の D バンドが励起されること、さらに局所欠陥が六員環の欠失を通じてその D バンド強度を減少させる可能性を示す。第 6 章では、本研究の結論として得られた成果を集約して説明する。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6551 号	氏 名	藤田 優人
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	Ph. D. 清水 智子
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 牧 英之
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 渡邊 紳一
		理化学研究所専任研究員	博士（工学） 早澤 紀彦

学士（工学）、修士（工学）藤田優人君の学位請求論文は「高空間分解能探針増強ラマン分光における局在偏光場が誘起するカーボンナノ材料の応答」と題し、全6章より構成される。

探針増強ラマン分光法（TERS）は、ラマン分光と走査型プローブ顕微鏡技術を組み合わせた物質・材料分析技術である。金属探針先端と試料間のナノギャップに光を照射することで形成される強く局在した近接場光により、ナノメートルスケール、場合によっては1 nm以下の空間分解能が実現され、光の波長限界をはるかに超える高分解能分光イメージングが可能となる。非常に接近させた2つの金属で形成されるナノギャップに試料を挟み込む配置を取るギャップモードを利用し、且つ装置性能の向上と測定環境の安定化を実現すると、1 nm以下の分解能が実現されるとともに、基板に対して垂直方向の強い偏光特性を示す。この状態が実現されると、従来のラマン散乱理論では説明できない現象が現れることがこれまでに数件報告されているが、統一的な見解は存在しない。本研究では、この高空間分解能 TERS で特徴的な要素である局所電場および偏光特性がラマン散乱に及ぼす影響を明らかにしたものである。具体的には、多くの応用研究がなされているカーボンナノチューブとグラフェンを対象とし、局在偏光場が共鳴ラマンの電子遷移経路を変化させ、新たなラマン活性過程を誘起することを示すとともに、歪みや欠陥といったナノスケール局所構造と光の相互作用の理解を深化させた。

本論文の第1章では序論として、ラマン分光法と TERS の発展の経緯、ならびに本研究の目的を概説する。第2章では、グラフェンおよびカーボンナノチューブの物性、カーボンナノ材料のラマン分光の基礎、TERS 装置の基盤となる走査型トンネル顕微鏡の原理、そして TERS の電磁場理論を整理する。第3章では、TERS 測定に用いた金探針の作製方法および TERS 実験装置の構成について述べる。第4章では、局在偏光場によるカーボンナノチューブ内の共鳴ラマン散乱の変化について述べる。偏光場によって支配的な選択則が変化するとともに、通常ラマン分光では禁制である非垂直遷移が誘起され、欠陥を伴わない領域でも D バンドが強く観測されることを明らかにする。第5章では、グラフェンに局所歪みを施したナノバブル構造に対し、局在偏光場の相互作用によるラマン信号の変化について述べる。カーボンナノチューブと同様に非垂直遷移由来の D バンドがナノバブル上で強く観測される一方で、局所欠陥が六員環の欠失を通じてその D バンド強度を減少させる機構について提案する。第6章では、本研究の結論として、得られた成果を集約して説明する。

以上、本論文は、局在偏光場とカーボンナノ材料の相互作用が生み出すラマン効果に関する新しい知見を得たものであり、高空間分解能の分光技術に関する応用物理、工学応用に貢献するものである。

よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6552 号	氏 名	小暮 悠暉
主論文題名：  A Study on the Morphogenetic Mechanisms of Ascidian Embryos During Organogenesis (器官形成期におけるホヤ胚形態形成機構に関する研究)			
<p>脊椎動物の器官形成期は、種間で類似した形態を示し、進化的に保存された遺伝子発現が観察される。したがって、この時期に共通する形態の特徴づけと形成機構解明は脊索動物全体で保存された根源的な発生機構を理解する糸口となる。本研究では、器官形成期であるホヤの尾芽胚期において観察される胚の「腹側への湾曲」と「体軸回転」に注目した。腹側への湾曲については、先行研究において脊索が注目されており、尾芽胚初期に脊索の腹側で観察される非対称なアクトミオシンの局在による収縮が湾曲をうみだすモデルが示唆されていた。しかし、その上流調節因子やより後期の腹側湾曲の制御機構は不明であった。一方、「体軸回転」については、齧歯類・両生類・鳥類などの複数の脊椎動物の器官形成期において、ねじれや湾曲方向の変化を伴う個体全体の形態変化として報告されている。特にマウスで体軸回転の異常は致死となることが知られており、発生上の要所と考えられる。しかし、体軸回転は卵膜内で生じる現象であることから、観察が困難であり、他の内臓器官形成と同時に生じる複雑な過程であることから、その制御機構の大部分は不明であった。本研究では、これらの課題を解決するため、脊椎動物に最も近縁かつシンプルな体制をもつカタユウレイボヤをモデルとして用い、腹側への湾曲および体軸回転時のねじれを制御する機構を解析した。</p> <p>第一章は緒言である。背景として、脊椎動物における器官形成期の形態および遺伝子発現の進化的保存性、モデル生物としてのカタユウレイボヤの利点、他の動物における組織・器官レベルの湾曲やねじれといった形態形成機構の知見について述べた。続いて本研究の目的を述べた。</p> <p>第二章はホヤ中期尾芽胚の腹側への湾曲機構について述べた。<i>Admp</i> 遺伝子のノックダウン胚では腹側への湾曲が消失することを見出し、この表現型の 1 細胞レベルの詳細な解析を行った。さらに、<b>BMP/Admp</b> 経路が腹側の特定の表皮細胞形状を舟型に変化させることで、脊索伸長に対する抵抗力をうみだす新規尾部湾曲機構のモデルを提案した。</p> <p>第三章では後期尾芽胚以降の 3D 胚の観察から見出したホヤにおける体軸回転とその制御機構の解析について述べた。卵膜除去と薬剤添加実験により、体軸回転は湾曲とねじれからなり、それぞれ異なる機構で制御されることを明らかにした。この結果をうけて、3D 胚の形状データから、これら 2 成分を分離する手法を考案した。湾曲成分から独立して抽出したねじれ成分を定量解析し、ねじれの程度は発生とともに時計回りに増加し、その後減衰へと転じること、<b>TGF<math>\beta</math></b> 経路がねじれを方向を制御する可能性を示した。</p> <p>第四章は結言である。第二章、第三章を通じて明らかになったカタユウレイボヤ尾芽胚期における形態形成機構を脊椎動物の先行研究と比較し、その役割や類似点について議論した。また、今後の展望を述べた。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6552 号	氏 名	小暮 悠暉
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授 博士（理学）	堀田 耕司
	副査	慶應義塾大学教授 博士（地球環境科学）	土居 信英
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	舟橋 啓
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	加納 英明

学士(理学)、修士(理学)小暮悠暉君提出の学位請求論文は、「A Study on the Morphogenetic Mechanisms of Ascidian Embryos During Organogenesis (器官形成期におけるホヤ胚形態形成機構に関する研究)」と題し、全4章から成っている。

脊椎動物の器官形成期は、種間で類似した形態を示し、進化的に保存された遺伝子発現が観察される。この時期の形態的特徴の共通性を解析し、その形成機構を解明することは脊索動物全体で保存された根源的な発生機構を理解する糸口となる。本研究では、ホヤの器官形成期である尾芽胚期において観察される胚の「腹側への湾曲」と「体軸回転」に注目した。腹側への湾曲については、先行研究において尾芽胚初期に脊索の腹側で観察される非対称なアクトミオシンの局在による収縮が湾曲をうみだすモデルが示唆されていた。しかし、その上流調節因子や、より後期の腹側湾曲の制御機構は不明であった。一方、「体軸回転」については、ねじれや湾曲方向の変化を伴う個体全体の形態変化として、齧歯類・両生類・鳥類など複数の脊椎動物の器官形成期において観察されることが報告されている。特にマウスでは、体軸回転の異常は致死となることが知られており、発生上の要所と考えられる。しかし、体軸回転は観察が困難な胎内で生じ、また、他の内臓器官形成と同時に生じる複雑な過程であることから、その制御機構の大部分は不明であった。本論文では、これらの課題を解決するため、脊椎動物に最も近縁かつシンプルな体制をもつカタユウレイボヤをモデルとして用い、腹側への湾曲および体軸回転時のねじれを制御する機構を解析した。

第1章は緒言であり、本論文の背景として脊椎動物における器官形成期の形態および遺伝子発現の進化的保存性、モデル生物としてのカタユウレイボヤの利点、他の動物における組織・器官レベルの湾曲やねじれといった形態形成機構の知見について述べた。最後に本論文の目的を述べた。

第2章では、ホヤ中期尾芽胚の腹側への湾曲機構について述べている。*Admp* 遺伝子のノックダウン胚では腹側への湾曲が消失することを見出し、この表現型の1細胞レベルの詳細な解析を行った。さらに、*BMP/Admp* 経路が腹側の特定の表皮細胞形状を舟型に変化させることで、脊索伸長に対する抵抗力をうみだす新規尾部湾曲機構のモデルを提案した。

第3章では、後期尾芽胚以降の3D胚の観察から見出したホヤにおける体軸回転とその制御機構の解析について述べた。卵膜除去実験や薬剤処理実験により、体軸回転は湾曲とねじれからなり、それぞれ異なる機構で制御されることを明らかにした。さらに、3D胚の形状データから、これら2成分を分離する手法を考案した。湾曲成分から独立して抽出したねじれ成分を定量解析し、ねじれの程度は発生とともに時計回りに増加し、その後減衰へと転じること、*TGFβ* 経路がねじれを制御する可能性を示唆した。

第4章は結言であり、第2章、第3章を通じて明らかになったカタユウレイボヤ尾芽胚期における形態形成機構を脊椎動物の先行研究と比較し、その役割や類似点を議論し、胚の湾曲やねじれが進化的に保存された発生原理に裏付けられている可能性を示した。さらに、本研究で得られた知見に基づく今後の展望にも言及した。

以上、本論文は、ホヤ胚の器官形成期における形態の制御機構を明らかにすることで、脊索動物の発生原理の理解に大きく貢献したといえる。この成果は、脊椎動物を含む広範な生物の発生生物学研究や脊椎動物の進化発生学的理解に寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6553 号	氏 名	戸塚 望
主論文題名： Mechanisms of metamorphosis initiation in <i>Ciona</i> revealed by live-imaging and optogenetics (ライブイメージングおよびオプトジェネティクスによるホヤ変態開始機構の解明)			
<p>多くの海洋生物は遊泳型の幼生から固着型の成体へと変態によって体構造を大きく変化させることで生活様式を変えることができる。変態メカニズムの解明は、生物の発生や進化を理解する上で重要な課題である。脊索動物に属するカタユレイボヤ (<i>Ciona intestinalis</i> type A) は、単純な体構造ながら脊椎動物との共通点も多く、発生生物学におけるモデル生物として確立されている。本種は付着器への刺激により変態が誘導されると、短時間で幼生の尾の退縮と同時に成体の器官形成を開始する。ホヤの変態開始を駆動するメカニズムを明らかにするには、刻一刻と変化する細胞や細胞内シグナルの動態を連続的に記録する必要がある。本研究ではライブイメージングおよびオプトジェネティクスを用いてホヤ変態開始時の個々の細胞やセカンドメッセンジャー分子の動態を明らかにした。第1章は緒言である。背景として、自然界におけるホヤの生活環について説明し、これまでに明らかにされたホヤの変態に関与する分子やシグナル経路について述べた。続いて本研究の目的を述べた。第2章では変態開始時の間充織細胞の動態および、体外に存在する免疫関連細胞の置き換わりについて述べた。間充織細胞を蛍光タンパク質 <b>Kaede</b> でラベルすることで変態前後の間充織動態を観察した。機械刺激による変態誘導の約十分後、間充織細胞の一部は表皮層を越えて体外に移動する（溢出する）ことを見出した。溢出した細胞はその後ひのう細胞に分化し、幼生時の免疫関連細胞であるテスト細胞と置き換わる過程を明らかにした。第3章では変態開始時の付着器感覚神経 (PSN) におけるセカンドメッセンジャー <b>cyclic AMP (cAMP)</b> 動態を明らかにした。<b>cAMP</b> センサー <b>PinkFlamindo</b> を PSN に発現させることにより、PSN では機械刺激後一過的に <b>cAMP</b> 濃度レベルが減少した後ゆるやかに上昇し、その後変態が開始することを明らかにした。これにより、機械刺激開始から変態開始までの時間を、PSN によって計測している可能性が示唆された。そこで赤方偏位光駆動型陽イオンチャネル <b>ChrimsonR</b> を用いて、光刺激により PSN を人工的に興奮させる実験系を構築した。約6分間の光刺激による PSN の神経興奮のみによって変態を誘導することに成功した。第4章は結言である。本研究によって明らかになった細胞やセカンドメッセンジャー動態が変態にもたらす役割について議論し、今後の展望を述べた。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6553 号	氏 名	戸塚 望
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授 博士（理学）	堀田 耕司
	副査	慶應義塾大学教授 博士（地球環境科学）	土居 信英
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	牛場 潤一
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	加納 英明

学士（理学）、修士（理学）戸塚望君提出の学位請求論文は、「Mechanisms of metamorphosis initiation in *Ciona* revealed by live-imaging and optogenetics（ライブイメージングおよびオプトジェネティクスによるホヤ変態開始機構の解明）」と題し、全4章から成っている。

多くの海洋生物は遊泳型の幼生から固着型の成体へと変態によって体構造を大きく変化させることで2相の生活様式を持つことが知られている。変態メカニズムの解明は、生物の発生や進化を理解する上で重要な課題である。脊索動物に属するカタユレイボヤ（*Ciona intestinalis* type A）は、単純な体構造ながら脊椎動物との共通点も多く、発生生物学におけるモデル生物として確立されている。本種は幼生の前端部にある感覚器「付着器」への刺激により変態が誘導されると、短時間で幼生の尾の退縮と同時に成体の器官形成を開始する。ホヤの変態開始を駆動するメカニズムを明らかにするには、刻一刻と変化する細胞や細胞内シグナルの動態を連続的に記録する必要がある。本研究ではライブイメージングおよびオプトジェネティクスを用いてホヤ変態開始時の個々の細胞やセカンドメッセンジャー分子の動態を明らかにした。

第1章は緒言であり、本論文の背景として自然界におけるホヤの生活環について説明し、これまでに明らかにされたホヤの変態に関与する分子やシグナル経路について述べた。最後に本論文の目的を述べている。

第2章では、変態開始時の間充織細胞の動態および、体外に存在する免疫関連細胞の置き換わりについて述べた。間充織細胞を蛍光タンパク質 Kaede でラベルすることで変態前後の間充織細胞動態を観察した。機械刺激による変態誘導の約十分後、間充織細胞の一部は表皮層を越えて体外に移動する（溢出する）ことを見出した。溢出した細胞はその後ひのう細胞に分化し、幼生時の免疫関連細胞であるテスト細胞と置き換わる過程を明らかにした。

第3章では、ホヤ幼生の変態開始が「付着（刺激）時間の積分」で制御されるという仮説のもと、一次感覚神経（PSN）の役割を検証した。cAMP センサーPinkFlamindo を PSN に発現させることにより、PSN では機械刺激後一過的に cAMP 濃度レベルが減少した後にゆるやかに上昇し、その後変態が開始することを明らかにした。これにより、機械刺激開始から変態開始までの時間を、PSN によって計測している可能性が示唆された。そこで赤方偏位光駆動型陽イオンチャンネル ChrimsonR を用いて、光遺伝学により PSN を選択的に活性化させる実験系を構築した。約6分間の光刺激により、表皮の後方移動から尾部退縮に至る変態過程が誘導され、PSN 活動が変態開始の十分条件となることを示した。さらに、断続刺激でも総刺激時間が閾値に達すると変態が起こる一方、長い中断では誘導されないことから、刺激入力がある一定の時間窓で積分される性質を明らかにした。

第4章は結言であり、本研究によって明らかになった変態開始時の細胞や細胞内セカンドメッセンジャーの動態が変態にもたらす役割について議論し、さらに、本研究で明らかにされた結果およびこれまでの知見をもとに、ホヤの刺激受容から尾部退縮までに想定されるシグナル伝達経路を提案した。

以上、本論文は、ホヤ変態開始時の個々の細胞やセカンドメッセンジャー分子の動態をライブイメージングおよびオプトジェネティクスを用いて可視化・操作することに成功し、本種の変態機構に関する知見を深めたことから、生物の変態機構の発生学的理解に大きく貢献したといえる。この成果は、発生生物学研究や水産養殖上重要な海洋生物の変態機構の理解に寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6554 号	氏 名	和田 凱渡
主論文題名： <b>Quantum-enhanced estimation of physical properties</b> (量子性を活用した物理特性の高精度推定)			
<p>量子力学に従う次世代のコンピュータである量子コンピュータは、量子性を活用することで古典コンピュータを凌駕する情報処理を行えることが期待されている。実際、素因数分解・物理特性計算・機械学習などにおける様々なタスクについて、理想的な量子コンピュータは古典コンピュータに対して多項式的もしくは指数関数的な優位性を持つことが理論的に示されている。</p> <p>量子コンピュータを用いて与えられたタスクを解くためには、たいいていの場合、ある量子状態に対するなんらかの物理特性（例えば、ある物理量の期待値）を推定することが必要である。通常、対象となる量子状態は測りたい物理量の固有状態ではない。このとき、量子力学の性質から、測定によって得られる情報は不可避的なゆらぎを持つため、対応する物理特性を高精度に推定するためには膨大な回数の測定が必要となる。この測定回数を大幅に削減することは、量子コンピュータの実運用において極めて重要な課題であるだけでなく、理論的にも重要な次の疑問に繋がる。すなわち、量子力学において許される理論的な推定限界量はいかほどか。そして、それを達成する具体的な手続きは構成可能か。これまでの研究から、状態準備に関する量子リソースをコヒーレントに活用することで、この推定の効率を劇的に改善する手法が明らかになりつつある。本論文では、実際上重要な2つの状況を想定し、上記の課題解決のための量子推定アルゴリズムを提示する。以下では、与えられた量子状態に関するある物理量の期待値を推定するという問題を、物理量推定と呼ぶ。</p> <p>一つ目は、均等な量子ノイズのもとでの単一物理量推定である。近未来の量子コンピュータで支配的になると想定される均等な量子ノイズを仮定し、量子推定理論における基本的な不等式である量子クラメル・ラオの不等式を用いることで、理論的な推定精度の限界を明らかにした。この不等式の下限は推定対象の値には依存しないものの、従来用いられてきた測定は推定対象の値に依存してしまい下限を達成することはできなかった。そこで、測定を再設計することで、この量子クラメル・ラオ限界を漸近的に達成する適応的推定手法を具体的に構成した。</p> <p>二つ目は、量子ビット数制約のもとでの複数物理量推定である。ここでは、数は限られているものの、十分な回数の量子操作が実行できる量子ビット（論理量子ビット）が使用できる状況を想定する。推定精度と物理量の数がこの問題を規定する重要なパラメータであるが、推定精度に関するハイゼンベルグ限界と物理量の数に関する計算量理論的な限界を同時に（ほぼ）達成する適応的推定手法を初めて構成した。また、適応的な構造を設計することで、従来の最先端の手法と比べて1/5程度（もしくはそれ以上）まで必要な量子ビット数を削減できることも示した。</p> <p>上記の一般論では、所望の量子状態を準備する量子回路についてはブラックボックスを仮定するが、実際にはこの量子回路を可能な限り少ない量子ゲート数で構成する必要がある。このためのアプローチとして、量子回路の局所構造を活用した変分最適化法を構成し、大規模量子系への応用可能性についての解析も行った。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6554 号	氏 名	和田 凱渡
論文審査担当者：	主査 慶應義塾大学教授	博士 (情報理工学)	山本 直樹
	副査 慶應義塾大学教授	博士 (工学)	渡辺 宙志
	慶應義塾大学准教授	博士 (理学)	古川 俊輔
	慶應義塾大学教授	博士 (工学)	武岡 正裕

学士(工学)、修士(工学)和田凱渡君の学位請求論文は Quantum-enhanced estimation of physical properties (量子性を活用した物理特性の高精度推定)と題し、全6章より構成される。

量子計算機は、量子性を活用することで、古典計算機よりはるかに少ない演算回数で様々な情報処理を行えることが期待されている。そのような情報処理の多くの場合において、何らかの物理特性(例えば、ある物理量の期待値)を推定することが必要となる。通常、量子力学の性質から、測定値は不可避的なゆらぎを持つため、対応する物理特性を推定するためには多数回の測定が必要となる。この測定回数を削減することは、量子計算機の実運用において必要であるだけでなく、理論的にも重要な次の疑問に繋がる。すなわち、量子力学において許される理論的な推定限界はいかほどか。そして、それを達成する具体的なアルゴリズムは構成可能か。本論文では、実際上重要な2つの問題に対して、上記の課題解決のための量子推定理論を提示している。

第1章では、研究背景と本論文の構成が説明されている。

第2章では、量子計算と量子推定に関する基礎事項のまとめが与えられている。とくに、古典的手法でも達成できる標準量子限界と、量子力学的手法でのみ達成できるハイゼンベルグ限界と呼ばれる推定精度の限界に関するまとめが与えられている。

第3章では、本論文で用いられている量子アルゴリズムの詳細な説明が与えられている。量子計算と量子推定は別個に発展してきた経緯があり、その関係性は必ずしも明確ではなかった。とくに、量子計算全般で重要な位相推定アルゴリズムが、量子推定の文脈では標準量子限界しか達成しないことはあまり知られていないが、このことを明確化するために詳細な数値シミュレーションを与えている。本論文は量子計算の意味で推定限界の達成可否を研究するものであるため、本章で与える量子計算・量子推定の整理と、それを支える新たな解析結果は、本論文で与える結果の意義を深く理解するために重要な事項である。

第4章は1つ目の問題に関する結果をまとめたものである。問題は、ノイズを受けないという理想的な仮定のもとで複数個の任意物理量推定を行うというものである。推定精度と物理量の数がこの問題を規定する重要なパラメータである。本論文では、必要演算数について、推定精度に関するハイゼンベルグ限界と物理量の数に関する計算量理論的な限界を同時に達成する量子アルゴリズムを初めて構成している。化学問題への応用では物理量の個数は数億にもなることがあり、この計算量削減は大いに意味がある。また、この手法は適応的な構造を有しており、従来の最先端の手法と比べて1/5程度まで必要な補助量子ビット数を削減できることをベンチマーク問題において数値的に示している。

第5章は2つ目の問題に関する結果をまとめたものである。問題は、既知の量子ノイズのもとで一つの任意物理量の期待値を推定するというものである。まず、量子推定理論における中心的な成果である量子クラメル・ラオの不等式を用いることで、理論的な推定精度の限界を明らかにしている。この推定限界は、ノイズ強度が大きくなりすぎない領域で標準量子限界を超えている。一方で、この推定限界の達成可否は自明ではない。実際、従来用いられてきた測定法は推定対象の値に依存してしまい、下限を達成することはできなかった。そこで、測定法を再設計することで、この量子クラメル・ラオ限界を漸近的に達成する適応的推定手法を具体的に構成している。

第6章では、本論文のまとめと展望が述べられている。

本研究の成果は、量子計算全般で重要な2つの問題において、物理量の推定精度の限界を達成する具体的なアルゴリズムを与えている。このことは、必要な測定回数すなわち量子計算機の使用回数の削減につながり、量子コンピュータの実用化に大きく貢献することが期待される。よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6555 号	氏 名	石川 晴也
主論文題名： Auxiliary Supervision from Existing Resources for Urban Scene Understanding: Multi-Task Learning for Semantic and BEV Segmentation (補助的教師信号による効率的な都市シーン理解：セマンティック・BEV セグメンテーションへの応用)			
<p>セマンティックセグメンテーション・鳥瞰図 (Bird's-Eye-View; BEV) マッピングといった密な予測タスクによる都市シーン理解は自動運転システムの基盤である一方で、ピクセルレベルのアノテーションコストの高さ、物体境界の不正確な描出、そして厳しいデプロイ制約といった持続的な課題に直面している。本論文では、再解釈したアノテーションと事前学習モデルなどの既存の資源から得られる補助的な教師信号 (Auxiliary Supervision) が、追加のアノテーション作業や過大な計算オーバーヘッドを伴うことなくセグメンテーション性能をどのように向上し得るかを検討する。中核となる原理は、利用可能な資源から価値を引き出すことにある：(i) 既存のセグメンテーションマスクから導出されるセマンティック境界、(ii) 少ラベル設定における境界ベースの正則化、(iii) 事前学習済みパースペクティブビュー (PV) モデルに埋め込まれた知識。相補的な 3 つのフレームワークを通じて、アノテーションおよびデプロイ効率を維持しつつ、多くの場合は推論時オーバーヘッドなしで、これらのシグナルを活用する方法を示す。多様な都市シーンデータセットでの実験により一貫した性能向上を確認し、とくに半教師あり学習 (Semi-Supervised Learning; SSL) プロトコルおよび教師なしドメイン適応 (Unsupervised Domain Adaptation; UDA) に関連する設定で顕著である。</p> <p>第 1 章では、アノテーションコスト・セグメンテーション精度・現実的制約下での効率の観点から、問題設定の動機付けと研究課題の説明をする。</p> <p>第 2 章では、セマンティックセグメンテーションとセマンティック境界検出 (Semantic Boundary Detection; SBD) の背景を述べ、マルチタスク学習 (Multi-Task Learning; MTL) および高密度予測における SSL を概観し、一般的に用いられるデータセットと評価指標とともに BEV マッピングを導入する。</p> <p>第 3 章では、Semantic-Boundary-Conditioned Backbone (SBCB) を提示する。これは、既存のセグメンテーションマスクから生成した境界によってバックボーンを条件付ける手法である。軽量の境界検出ヘッドが学習中に補助的な信号を与え、推論時には取り外すことで、テスト時オーバーヘッドなしで改善を実現する。</p> <p>第 4 章では、BoundMatch を提案し、セグメンテーションと境界の双方に対する一貫性正則化を通じて境界監督を SSL へ拡張する。ノイズを含むセグメンテーションマスクから境界を導くのではなく、階層的特徴から境界を直接学習し、追加のパイプラインで精緻化する。複数データセットおよびバックボーンにわたり、少ラベル条件下で大幅な性能向上を得る。</p> <p>第 5 章では、マルチカメラ BEV セグメンテーションに対する Perspective Cue Training (PCT) を述べる。これは、事前学習済み PV モデルからの擬似ラベルを活用し、ターゲットデータに BEV アノテーションを用いずに補助的な信号を与える手法である。PCT は、ベースとなる BEV モデルの推論コストを維持したまま、SSL と UDA の双方で顕著な改善をもたらす。</p> <p>第 6 章では、三つのフレームワークを総括し、限界点を議論するとともに今後の研究課題を展望する。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6555 号	氏 名	石川 晴也
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 青木 義満
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 池原 雅章
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 五十川 麻理子
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 吉岡 健太郎

学士（工学）、修士（工学）石川晴也君提出の学位請求論文は「Auxiliary Supervision from Existing Resources for Urban Scene Understanding: Multi-Task Learning for Semantic and BEV Segmentation」（補助的教師信号による効率的な都市シーン理解：セマンティック・BEV セグメンテーションへの応用）と題し、全 6 章から構成されている。

セマンティックセグメンテーションや鳥瞰図（Bird’s-Eye-View; BEV）マッピングに代表される都市シーン理解は、自動運転システムにおける環境認識の中核技術であり、高精度かつ高信頼な予測が求められる。一方で、ピクセルレベルの詳細なアノテーションには多大なコストを要し、さらに物体境界の不正確さや、計算資源・推論時間といった実運用上の制約が、実装・展開を困難にしている。このような背景のもと、本論文は、既存のアノテーションや事前学習モデルなど、利用可能な資源から導出される補助的教師信号を活用することで、追加のアノテーションコストや推論時オーバーヘッドを伴わずに都市シーン理解性能を向上させることを目的としている。具体的には、セマンティック境界情報、半教師あり学習における一貫性正則化、および事前学習済みパースペクティブビューモデルから得られる知識を補助的教師信号として統合的に利用し、学習効率と実運用性を両立する三つのフレームワークを提案している。

第 1 章では、都市シーン理解におけるアノテーションコスト、精度、および実運用制約という観点から研究背景と課題を整理し、本研究の問題設定と動機付けを明確にしている。

第 2 章では、セマンティックセグメンテーション、セマンティック境界検出、マルチタスク学習、ならびに高密度予測における半教師あり学習（Semi-Supervised Learning; SSL）について概観するとともに、本研究の立脚点を明確化している。

第 3 章では、既存のセグメンテーションマスクから導出されるセマンティック境界を用いてバックボーンを条件付ける **Semantic-Boundary-Conditioned Backbone** を提案している。軽量の境界検出ヘッドを学習時のみ導入し、推論時には取り外す設計とすることで、テスト時オーバーヘッドを伴うことなくセグメンテーション性能を向上させる点に特徴がある。

第 4 章では、境界情報を半教師あり学習に拡張した **BoundMatch** を提案している。ノイズを含む既存マスクから境界を生成するのではなく、階層的特徴から境界を直接学習し、一貫性正則化を通じてセグメンテーションと境界の両者を同時に改善する枠組みを構築している。複数のデータセットおよびバックボーンにおいて、少ラベル条件下で顕著な性能向上を達成している。

第 5 章では、マルチカメラ BEV セグメンテーションを対象に、事前学習済みパースペクティブビューモデルから得られる知識を活用する **Perspective Cue Training** を提案している。BEV アノテーションを用いずに補助的教師信号を与えることで、SSL および教師なしドメイン適応の双方において性能向上を実証し、実運用を意識した有効な学習戦略を示している。

第 6 章では、本論文を総括し、提案手法の限界と今後の展望を述べている。

以上要するに、本論文は、都市シーン理解における高密度予測タスクに対し、補助的教師信号を活用しながらアノテーション効率と実用性の両立を図りつつ、認識性能の向上を実現した研究であり、画像工学分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

# Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6556	Name	Yin, Yuantian
Thesis Title			
Polymer Waveguide Based Optical Tactile Sensor Fabricated by the Mosquito Method			
<p>Tactile sensors are crucial for applications such as human-machine interaction, touchscreens, and biomedical applications. Conventional tactile sensing technologies primarily rely on electromagnetic signals and are prone to interference and material degradation. Optical tactile sensors, on the other hand, are inherently immune to electromagnetic interference. However, in most conventional optical sensors, the sensing element is often composed of optical fiber, such as fiber Bragg gratings. Complex fabrication and one-dimensional wiring of these sensors limit their use in distributed sensing. Furthermore, to achieve mechanical flexibility, such fiber sensors are often soft-encapsulated, which lead to delamination of fibers from the surrounding soft material during long-term use. To address these issues, this research presents a novel polymer waveguide tactile sensor that combines mechanical flexibility with a single-step fabrication technique, the Mosquito method, in which optical waveguides are directly wiring into flexible materials. This technique is advantageous for realizing distributed sensing and enhancing core-cladding adhesion. The proposed sensor provides a route to flexible optical tactile sensing systems suitable for human-machine interfaces, wearable devices, and biomedical applications.</p> <p>In Chapter 1, background and purpose of this research is outlined.</p> <p>In Chapter 2, the author outlines the basic principles and classification and fabrication methods of optical waveguides, and the basic principles of optical waveguides tactile sensors.</p> <p>In Chapter 3, it is demonstrated that the Polydimethylsiloxane (PDMS)-clad waveguides fabricated using the Mosquito method can be applied to a tactile sensor. By combining simulations and experiments, the author clarifies how key parameters such as core size, numerical aperture and core height in the cladding, affect sensor performance, then confirms that the sensor operates mainly via macro bending loss, and further explores its potential for motion recognition.</p> <p>In Chapter 4, distributed pressure sensors based on multi-channel polymer waveguides are created, including both single-layer and dual-layer structures. The single-layer one is designed by applying numerical simulations and material optimization, and their sensitivity, repeatability, and multi-channel distributed sensing performance are experimentally verified. Building on this design, a grid-structured dual-layer waveguide is fabricated to achieve pressure mapping, and its capability to identify both the magnitude and location of applied loads is evaluated.</p> <p>In Chapter 5, the author summarizes the results of polymer optical waveguide tactile sensors focused on this research, and then put forward the future development and application directions.</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6556 号	氏 名	Yin, Yuantian
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	石樽 崇明
副査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	太田 泰友
	慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学）	高橋 英俊
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	竹村 研治郎
<p>工学学士，Master of Science Yin Yuantian 君提出の学位請求論文は「Polymer Waveguide Based Optical Tactile Sensor Fabricated by the Mosquito Method」（モスキート法により作製されたポリマー光導波路型光触覚センサ）と題し，5章から構成されている。</p> <p>触覚センサは，ヒューマンマシンインタラクション，タッチスクリーン，バイオメディカルなど幅広い分野において極めて重要である．近年，電磁干渉の影響を受けにくい光触覚センサの研究が進んでいるが，従来の多くは，センシング素子としてファイバブラッググレーティングなどの光ファイバを用いるものが主流であった．この場合，配線が1次元的事となることや，機械的柔軟性を得るためにソフトマテリアルを用いた光ファイバアレイのカプセル化が必要となることなど，分散センシングへ適用するには付加的な加工技術を要するという課題があった．</p> <p>そこで本研究では，機械的柔軟性を有するポリマー材料に光導波路を直接形成可能な「モスキート法」と呼ばれる手法にて作製した，新たなポリマー導波路型光触覚センサを提案している．</p> <p>第1章では，本研究の背景と目的について概説している．</p> <p>第2章では，光導波の基本原理，光導波路の分類，ポリマー光導波路の作製方法，および光導波路型触覚センサの動作原理について述べている．</p> <p>第3章では，ポリジメチルシロキサン（PDMS）をクラッドに用い，モスキート法を応用して作製した導波路を光触覚センサとして利用した結果について述べている．数値シミュレーションと実験を組み合わせることで，導波路のコアサイズ，開口数，クラッド内でのコア高さなど，重要となるパラメータがセンサ性能に与える影響を解明している．得られた結果から，本センサが主にコアのマクロ曲げ損失によって動作していることを確認するとともに，モーション認識への適用可能性を追求している．</p> <p>第4章では，単層および二層構造の多チャネルポリマー導波路による分散圧力センサを提案している．数値シミュレーションならびにPDMS材料の配合組成の最適化を行った上で設計した単層センサにおいて，その感度，センシングの再現性，および分散センシング性能を実験的に検証している．さらに，この設計に基づき，圧力マッピングを可能にするグリッド構造の二層導波路（3次元導波路）を作製し，印加圧力の大きさと位置の両方を特定する能力を評価している．</p> <p>第5章では，本研究にて得られたポリマー導波路型光触覚センサに関する成果を総括し，将来の研究開発および応用の方向性を提示している．</p> <p>以上要するに，本論文では，光触覚センサへの応用に向けてポリマー光導波路に求められる特性を明らかにするとともに，ポリマー光導波路がとるべき最適構造を議論し，それらの実現可能性に関して理論と実験の双方からその有効性を実証しており，センサ工学および高分子科学分野において，工学上，工業上寄与するところが少なくない．</p> <p>よって，本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める．</p>			

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6557 号	氏 名	岸本 卓大
主論文題名：  A Pitot-type Waterflow Sensor System for Biologging of Marine Animals (海中動物のバイオリギングのためのピトー管型流速センサシステム)			
<p>ウミガメやペンギンなどの海中動物のバイオメカニクス研究において、海流に対する相対的な速度である対水速度は、運動や行動解析における重要な指標の一つである。海中動物は長時間の直接観察が困難であるため、センサを装着して行動を記録するバイオリギング手法が広く用いられてきた。従来はプロペラ式流速センサが主に使用されてきたが、可動部を有するため浮遊物や付着物の影響を受けやすく、長期安定計測が難しいという課題に加え、高時間分解能や多軸計測も困難であった。そこで本研究では、水流によって生じる圧力差を筐体内部の差圧センサ素子で検出して流速を算出する、ピトー管の原理を応用した新型流速センサを研究開発した。孔を膜で覆い非圧縮性流体を封入することで、外乱に対して頑健かつ高時間分解能な計測を可能にし、また複数の孔とセンサ素子により二軸計測を実現した。さらに一軸センサシステムを用いた野生ウミガメでの実験により、時間分解能の高い対水速度計測への有効性を実証した。</p> <p>第1章では、本研究の背景と目的について述べた。</p> <p>第2章では、提案する一軸ピトー型流速センサの原理、設計、製作について述べた。まず、アカウミガメの遊泳特性からセンサ要件を定め、次に流速センサの計測原理を定式化し、物理モデルを構築した。これらの原理と設計要件に基づき、センサの設計および試作を行った。</p> <p>第3章では、製作したセンサの基本特性を評価した。まず、センサに圧力差を印加し、実験結果を物理モデルの予測と比較した。次に、水温や加速度などの外乱を印加し、提案するセンサ構造がこれらの影響を効果的に低減することを検証した。最後に、回流水槽で定常流れを印加し、センサ出力を流速に換算する式を導出した。</p> <p>第4章では、二軸流速センサの原理、設計、および基本特性評価について述べた。センサの物理モデルを踏まえ、流速と流れの向きを推定するニューラルネットワーク構造を用いた回帰モデルを構築した。次に、センサを試作し、回流水槽実験により流速・流向に対するセンサ応答を取得し、得られたデータでニューラルネットワークを学習させた結果、流速と流れの向きを精度良く計測できることを示した。</p> <p>第5章では、一軸流速センサをバイオリギングシステムに統合し、実環境での検証を行った。まず、水族館でのウミガメ実験により、センサ出力と映像で捉えた遊泳行動との対応を確認した。次に、モータ駆動の釣竿にセンサと従来型プロペラロガーを装着し、両者の計測した流速を比較して精度を評価した。最後に、野生のアカウミガメにプロペラロガーと共にシステムを装着し、自然海域でのバイオリギング実験を実施した。両者の計測した流速を比較した結果、センサが野外条件下でアカウミガメの対水速度を高精度かつ高時間分解能に計測できることを実証した。</p> <p>第6章では、本研究の主な結論および今後の課題をまとめた。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6557 号	氏 名	岸本 卓大
論文審査担当者：	主査 慶應義塾大学准教授	博士 (情報理工学)	高橋 英俊
	副査 慶應義塾大学教授	博士 (情報理工学)	尾上 弘晃
	慶應義塾大学教授	博士 (工学)	石上 玄也
	東京大学大気海洋研究所教授	博士 (農学)	佐藤 克文

学士 (工学), 修士 (工学) 岸本卓大君提出の学位請求論文は「A Pitot-type Waterflow Sensor System for Biologging of Marine Animals」(海中動物のバイオリギングのためのピトー管型流速センサシステム)と題し, 6章から構成されている。

ウミガメやペンギンなどの海中動物のバイオメカニクス研究において, 海流に対する相対的な速度である対水速度は, 運動や行動解析における重要な指標の一つである。海中動物は長時間の直接観察が困難であるため, センサを装着して行動を記録するバイオリギング手法が広く用いられてきた。従来はプロペラ式流速センサが主に使用されてきたが, 可動部を有するため浮遊物や付着物の影響を受けやすく, 長期安定計測が難しいという課題に加え, 高時間分解能や多軸計測も困難であった。そこで, 本研究では, 水流によって生じる圧力差を筐体内部の差圧センサ素子で検出して流速を算出する, ピトー管の原理を応用した新規流速センサを研究開発する。そして, 従来は取得が困難であった海中動物の遊泳環境や運動状態に関する新たな知見を得ることを可能とする, バイオリギング用のセンサシステムを実現することを目的としている。

第1章は序論であり, 研究背景と目的を述べ, 従来研究を概説している。

第2章では, センサの要求仕様を示すとともに, 提案する一軸ピトー型流速センサの原理, 設計, 製作について述べている。

第3章では, 製作した一軸ピトー型流速センサの基本特性を評価している。まず, センサに圧力差を印加し, 実験結果を物理モデルの予測と比較し, 次に, 水温や加速度などの外乱を印加し, 提案するセンサ構造がこれらの影響を効果的に低減することを検証している。また回流水槽で定常流れを印加し, センサ出力を流速に換算する式を導出するとともに精度・分解能を評価している。

第4章では, 提案するセンサ構造が多軸計測へ拡張可能であることを示すため, 二軸流速センサの設計・製作および基本特性評価を行っている。センサの物理モデルを踏まえて, 流速と流れの向きを推定するニューラルネットワークを構築している。試作したセンサを用いた回流水槽実験により流速・流れの向きに対するセンサ応答を取得し, 得られたデータでニューラルネットワークを学習させた結果, 流速と流れの向きを精度良く計測できることを示している。

第5章では, センサをバイオリギングシステムに統合し, 実環境下におけるバイオリギングの実証実験を行っている。実証用センサシステムには, 製作した一軸流速センサに加え, 従来型プロペラ式流速センサ, 温度センサ, 水圧センサが搭載されており, 同センサシステムを野生のアカウミガメの背部に装着して, 遊泳中のデータ取得に成功している。実験結果より, アカウミガメの羽ばたき運動に伴って変化する対水速度を, 高精度かつ高時間分解能に計測可能であることを実証している。

第6章では, 各章で得られた成果をまとめ, 本論文全体の結論を述べている。

以上要するに, 本論文は新たな原理に基づく流速センサの設計・製作および評価を行うとともに, 製作したセンサを用いた野生のアカウミガメでのバイオリギング実験を実施し, その有用性を確認しており, センサ工学, バイオメカニクスの分野において工学上, 工業上寄与するところが少なくない。よって, 本論文の著者は博士 (工学) の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6558 号	氏 名	南 かのん
主論文題名：			
廃シリコン粉末へのレーザー照射によるシリコンカーバイド系ナノ構造体の生成			
<p>あらゆるエレクトロニクス製品の製造に不可欠な半導体チップの製造工程では、大量のシリコンのくず（廃 Si 粉末）が排出され、産業廃棄物として処理されている。これは重大な資源の損失であり、その有効活用が喫緊の課題となっている。近年、カーボンニュートラルの実現に向けた世界的な潮流のもと、リチウムイオン電池の需要が高まっており、従来の黒鉛負極と比べて約 10 倍の理論容量を持つ Si が次世代負極材料として注目されている。この高容量 Si 負極に廃 Si 粉末を応用できれば、資源循環と高性能化の両立が期待できる。</p> <p>しかしながら、Si 負極はその高容量性の一方で、充放電時の大きな体積膨張が原因でサイクル寿命が短いという重大な課題を抱えている。さらに、廃 Si 粉末には不純物が含まれており、これが実用化の妨げとなっている。これらの課題を克服し長寿命化を実現する有効な手段として、炭素 (C) との複合材料化やナノサイジングが知られており、特に C シェルを備えたコアシェルナノ構造体やシリコンカーバイド (SiC) ナノ構造体が期待されている。</p> <p>そこで本研究では、ナノ構造体の生成と不純物の昇華を単一プロセスかつ短時間で実現可能な「レーザー照射によるナノ構造体生成法」に着目した。この手法を、廃 Si 粉末と黒鉛粉末を混合した固体ターゲットに適用し、高付加価値な SiC 系ナノ構造体を一挙に生成することを目的とする。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景、目的および概要について述べた。</p> <p>第 2 章では、SiC ナノ粒子表面が黒鉛膜で覆われた (SiC@C) コアシェルナノ粒子の、レーザー照射による単一プロセス生成に成功した。各元素のレーザー誘起プラズマの形状の違いから、メカニズムを考察した。</p> <p>第 3 章では、SiC@C コアシェルナノ粒子の副産物として、照射後ターゲット表面に Si と SiC の複合構造体が発生していることを確認した。照射痕からの距離ごとに生成された構造体を調べ、熱伝導と輻射熱による構造変化のメカニズムを考察した。</p> <p>第 4 章では、レーザー照射条件を変更することで、ナノ構造体の形状を変化させた。デフォーカス位置での照射により、プラズマ速度を制御し、SiC@C コアシェルナノワイヤの生成に成功した。</p> <p>第 5 章では、2 枚のプレートによるプラズマの挟み込みを行い、閉じ込め効果によってナノワイヤのアスペクト比が向上することを明らかにした。また、電池性能評価試験により、生成された SiC ナノ構造体が、Si ナノ粒子よりも高い負極性能を持つことが示された。</p> <p>第 6 章では、本研究の主な結論および今後の課題をまとめた。</p> <p>以上より、本研究は循環型ものづくりや脱炭素社会の実現に向け、産業廃棄物からリチウムイオン電池への応用が期待される Si/C 複合ナノ構造体を生成する可能性を示した。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6558 号	氏 名	南 かのん
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	閻 紀旺
	副査	慶應義塾大学教授 工学博士	小茂鳥 潤
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	大宮 正毅
		慶應義塾大学教授 Ph.D.	堀田 篤

学士（工学）、修士（工学）南かのん君提出の学位請求論文は「廃シリコン粉末へのレーザー照射によるシリコンカーバイド系ナノ構造体の生成」と題し、6章から構成されている。

半導体基板の切断工程では大量のシリコン粉末が排出され、産業廃棄物として処理されている。これは重大な資源の損失であり、再利用先の検討が急務である。一方、近年、カーボンニュートラルが世界的に注目されており、高性能リチウムイオン電池の需要が高まっている。シリコン負極が従来の黒鉛負極の10倍近い理論容量を持つため、廃シリコン粉末の活用先の一つとして期待されている。しかし、シリコン負極は高容量である一方、充電時に体積膨張により割れやすいため寿命が短いという問題がある。長寿命の負極を製造する有効な手段として、シリコン（Si）と炭素（C）との複合やナノサイジングが挙げられる。そこで本研究では、廃シリコン粉末と黒鉛粉末を混合した固体ターゲットに対してレーザー照射を行い、単一プロセスによるシリコンカーバイド（SiC）系ナノ材料の生成を試みている。新たなレーザー照射方法と照射条件を採用することにより、Cシェルを持ったSiCナノ構造体の生成に成功している。また、レーザー照射時のプルーム形態変化のリアルタイム観察によりナノ構造体の生成メカニズムを解明している。

第1章では、廃シリコン粉末の再利用の重要性や、リチウムイオン電池負極材料としてのSi/C複合ナノ材料およびレーザー照射によるナノ構造体生成の従来研究について概説し、本研究の目的および概要を述べている。

第2章では、レーザー照射によるSiC@Cコアシェルナノ粒子の生成を試み、各元素のレーザー誘起プルームの形状の違いから生成メカニズムを考察している。

第3章では、SiC@Cコアシェルナノ粒子生成の副産物として、照射後のターゲット表面にSi-SiC複合構造体の形成を確認している。また、照射痕からの距離ごとに生成された構造体の組成変化を調査し、熱伝導と輻射熱の観点から複合構造体形成のメカニズムを議論している。

第4章では、デフォーカス状態でのレーザー照射によりプルームの成長速度を制御し、SiC@Cコアシェルナノワイヤの生成に成功している。また、レーザー誘起プルームの形状の変化からナノワイヤの生成メカニズムを説明している。

第5章では、2枚の平行プレートによるプルームの挟み込みを行い、閉じ込め効果によって高アスペクト比のSiC@Cコアシェルナノワイヤの生成に成功している。また、電池性能評価試験により、生成されたSiCナノ構造体が、シリコンナノ粒子よりも高い負極性能を持つことを示している。

第6章では、本研究の結論および今後の課題について述べている。

以上要するに、本論文は資源循環型ものづくりや脱炭素社会の実現に向け、産業廃棄物である廃シリコン粉末からリチウムイオン電池へ応用可能なシリコンカーバイド系ナノ構造体を生成する可能性を示したものであり、生産加工学および材料工学の分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6559	Name	Ilunga, Jessica Kumwimba
Thesis Title			
<p>Large-scale urban redevelopment in Tokyo’s neighborhoods: Socio-economic change and public contestation in Musashi-Koyama, Tsukishima, and Shimokitazawa</p>			
<p>Tokyo’s postwar neighborhoods were shaped by loose zoning and incremental development, resulting in a fine-grained urban fabric containing small-scale commercial amenities. This morphology, supported by local train stations, sustained a remarkably egalitarian distribution of services and employment across neighborhoods. Since the 1980s, however, deregulations of Japan’s urban planning has transformed these neighborhoods, culminating in a wave of large-scale redevelopments since the 2000s. Though often justified on the grounds of economic revitalization and disaster preparedness, these redevelopments face growing public opposition for accelerating spatial disparities, revealing key limitations in Japan’s planning process. This thesis examines the uneven effects of post-1980 urban transformation, including recent redevelopments, across three mixed-use Tokyo neighborhoods—Musashi-Koyama, Tsukishima, and Shimokitazawa.</p> <p>Chapter 1 introduces the research background, aim, and relevance, situating Tokyo’s urban redevelopment in the context of global trends and national planning reforms.</p> <p>Chapter 2 outlines key demographic and commercial trends since the 1980s in Tokyo’s 23 wards through statistical analysis of census data.</p> <p>Chapter 3 compares the three case studies through census data and historical mapping to clarify transformations since the 1980s. It shows the decline in commercial amenities, which increasingly became larger and less diverse. The extent of this decline depends on whether recent large-scale redevelopment adapts to the preexisting neighborhood structure (Musashi-Koyama), or whether it erases it (Tsukishima), or preserves it (Shimokitazawa).</p> <p>Chapter 4 compares the three case studies to examine public engagement in recent redevelopment projects, using ward assembly meeting minutes. Musashi-Koyama authorities dismissed calls for broader public input by residents, Tsukishima authorities limited input to rights-holders, while Shimokitazawa authorities shifted from top-down planning to community-led engagement.</p> <p>Chapter 5 summarizes and discusses the findings. The observed decline of small-scale commercial amenities is a broader trend in the 23 wards, with large-scale redevelopments accelerating it by concentrating amenities. Growing criticism of these redevelopments reflects public demand for more transparent, participatory planning to counterbalance the negative externalities of market-driven change and restore local authorities’ role as neutral arbiters between citizens and developers to preserve quality of life in these neighborhoods.</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6559 号	氏 名	イルンガ, ジェシカ クンウィンバ
論文審査担当者:	主査	慶應義塾大学教授	博士 (工学) アルマザン カバジェーロ, ホルヘ
	副査	慶應義塾大学専任講師	博士 (工学) 佐野 哲史
		埼玉大学教授	博士 (工学) 内田 奈芳美
		トロント大学教授	Ph D (都市計画) ソレンセン, アンドレ

修士(工学)、イルンガ、ジェシカ・クンウィンバ君提出の学位請求論文は「Large-scale urban redevelopment in Tokyo's neighborhoods: Socio-economic change and public contestation in Musashi-Koyama, Tsukishima, and Shimokitazawa (東京の住居地域における大規模再開発に関する研究：武蔵小山、月島、下北沢の社会経済的变化と周辺住民による反対意見に着目して)」と題し、5章からなっている。

東京の住居地域では、戦後の柔軟な用途地域制度と漸進的な開発により、独特な都市組織が形成された。鉄道駅を中心に小規模な商業施設が配置された、この都市形態により東京では、多くの住居地域におけるサービスや雇用機会への平等な分配が実現してきた。しかしながら、1980年代以降、日本の都市計画制度の規制緩和によって、こうした住居地域は大きく変容し、2000年代に入ると大規模再開発の波が押し寄せた。これらの再開発は、経済活性化や防災機能の強化を根拠にこれまで正当化されてきたが、実際には空間的不平等を加速させているとの批判も近年高まっており、日本の都市計画制度の改善の必要性が議論されている。本論文では、近年の大規模再開発を含む、1980年代以降の都市変容が、東京における住商混在型の3つの住居地域（武蔵小山、月島、下北沢）に及ぼした影響を明らかにすることを目的とする。

第1章では、研究の背景・目的・意義を示し、東京の都市再開発を国際的潮流および日本の都市計画制度改革との関連性から説明する。

第2章では、国勢調査データの統計分析を通して、1980年代以降の東京23区における主要な人口動態と商業動向を概説する。

第3章では、国勢調査データと過去の住宅地図を分析することで3つの事例を比較し、1980年代以降の都市変容の様子を明らかにする。商業施設の数は対象3地域の全てにおいて減少傾向にあり、それらの規模は拡大し、多様性が失われていることが明らかとなった。商業施設の減少の程度は、大規模再開発が既存の都市構造に適応したか（武蔵小山）、既存の都市構造が消滅したか（月島）、あるいは保存されたか（下北沢）によって異なっていた。

第4章では、区議会議事録を用いて、近年の再開発における住民参加の実態を3事例間で比較する。武蔵小山では周辺住民を含む幅広い意見に対して、当局による拒否的な対応が見られ、月島では地権者のみ事業に関わっていた。一方で下北沢では、地域住民主体の参加型まちづくりへの転換が見られた。

第5章では、分析結果の総括ならびに考察を行う。小規模商業施設の衰退は東京23区全体に見られる傾向であり、大規模再開発に伴う商業施設の集約化がその傾向を加速させてきた。市場主導型の大規模再開発がもたらす負の外部性を抑制し、住居地域の生活の質を維持するために、より透明性が高く参加型の計画策定を求める市民からの要望が高まっている。そのため地方自治体は、市民とデベロッパーの間に立つ中立的な仲裁者としての役割を取り戻すことが求められていることを示唆している。

# Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6560	Name	Li, Zhaojie
Thesis Title			
Edge Intelligence for Aerial Communication Systems: Single HAPS 3D-Aware Beamforming and Collective UAV Federated Learning			
<p>The evolution toward Sixth Generation (6G) networks necessitates the development of ubiquitous connectivity and distributed intelligence, particularly through the deployment of the Space Air Ground Integrated Network (SAGIN). By integrating High Altitude Platform Stations (HAPS) and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) into the network architecture, SAGIN aims to provide seamless coverage for underserved regions and support the massive connectivity demands of the Internet of Things (IoT). This architecture mandates a transition from traditional data relaying to Edge Intelligence (EI), where computation and decision-making capabilities are deployed directly at the aerial network edge. In this emerging paradigm, aerial platforms are expected to not only sustain reliable air-ground links, but also learn and optimize in a privacy-preserving and communication-efficient manner under dynamic environments.</p> <p>Nevertheless, the realization of this integrated vision faces significant technical challenges across both the physical and application layers. A critical issue in the physical domain is the inadequacy of conventional channel abstractions, which fail to capture the complex three-dimensional (3D) topology of urban environments, leading to inefficient resource allocation and severe signal blockage for ground users. Simultaneously, in the intelligence domain, the statistical heterogeneity of aerial data disrupts the convergence of distributed learning algorithms, while the scarcity of annotated data and continuous data turnover in UAV networks limit the applicability of supervised training methods. Conventional optimization and learning strategies are therefore insufficient for addressing these multi-dimensional constraints, motivating a synergistic cross-layer design that ensures both deterministic connectivity and robust distributed learning.</p> <p>Chapter 1 provides a comprehensive introduction to the research context, outlining the transition from terrestrial networks to the multi-layered SAGIN architecture and the necessity of Edge Intelligence. The chapter establishes the research motivation, summarizes the primary challenges in physical connectivity and distributed learning, and outlines the contributions of this dissertation.</p> <p>Chapter 2 presents a comprehensive review of existing literature regarding non-terrestrial</p>			

networks and distributed machine learning. The chapter highlights how prior studies have addressed beamforming control in HAPS communication systems, data heterogeneity in Federated Learning (FL), and Federated Unsupervised Learning (FUL) in UAV-IoT systems. This review establishes the technical foundation for the proposed methodologies and identifies the specific research gaps this thesis aims to bridge.

To address the physical-layer challenges, Chapter 3 proposes a 3D-aware beamforming strategy for HAPS that integrates explicit environmental priors into the control loop. Unlike traditional approaches that rely on stochastic flat-earth assumptions, this chapter constructs a high-fidelity propagation model that accounts for building layouts, shadowing effects, and heterogeneous blockage conditions. A Deep Reinforcement Learning (DRL) controller is developed to dynamically optimize antenna parameters, including azimuth and elevation tilts, under realistic 3D map-based simulations. The method further introduces a fairness-oriented reward design that prioritizes users in the throughput tail, thereby improving service quality for disadvantaged users. Extensive simulations demonstrate that the proposed approach effectively mitigates urban blockage impacts and achieves a superior balance between coverage, capacity, and fairness compared to conventional 2D methods.

Addressing the algorithmic instability in decentralized learning in UAV-enabled edge networks, Chapter 4 considers a federated learning setting where UAV/IoT clients collect data under heterogeneous sensing conditions and limited communication resources. In such scenarios, client participation can be intermittent due to mobility and link variation, and the resulting data exhibit pronounced label- and feature-skew Non-IID distributions, which amplify local drift and weight divergence. To mitigate this, Chapter 4 proposes a regularization framework based on Centered Kernel Alignment (CKA) for Non-Independent and Identically Distributed (Non-IID) data. Standard aggregation strategies often fail in aerial edge learning due to weight divergence induced by heterogeneous local datasets. To overcome this, the proposed method shifts the optimization focus from rigid parameter proximity to deep representational consistency. By aligning the internal correlation structures of feature maps between local and global models, the framework treats the global model as a structural reference that stabilizes local training. Experimental results indicate that this structural alignment reduces client drift, accelerates convergence, and improves global accuracy, thereby enhancing communication efficiency for resource-constrained aerial edge devices.

Recognizing the limitations of supervised learning in dynamic environments, Chapter 5 proposes a FUL framework for UAV scenarios with limited onboard storage and continuous data replacement. In this chapter, the instability arising from transient data streams and

First-In-First-Out (FIFO) buffering is explicitly addressed. The proposed solution combines client-side self-supervised learning for extracting informative representations from unlabeled short-term data with representation alignment and model-correlation constraints to prevent collapse under small and evolving datasets. On the server side, a divergence-aware hybrid aggregation strategy is introduced to estimate client utility and stability, and to perform robust global updates under dynamic Non-IID distributions and irregular participation. The results demonstrate that the proposed framework decouples learning from human annotation and static-data assumptions, enabling aerial agents to consistently extract generalized knowledge from transient unlabeled data streams and to achieve robust performance under stringent communication and memory constraints.

Chapter 6 concludes the thesis by summarizing the major findings, analyzing the implications of the proposed cross-layer framework, and discussing future research directions toward scalable and reliable 6G aerial edge intelligence.

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6560 号	氏 名	Li, Zhaojie
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	大槻 知明
	副査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	重野 寛
		慶應義塾大学准教授 博士（工学）	安達 宏一
		Nanjing University of Posts and Telecommunications, Ph.D. Guan Gui	
<p>Bachelor of Engineering, Master of Science in Engineering, Li Zhaojie君提出の学位請求論文は、「Edge Intelligence for Aerial Communication Systems: Single HAPS 3D-Aware Beamforming and Collective UAV Federated Learning（空中通信システムにおけるエッジインテリジェンス：単一HAPSの三次元環境認識ビームフォーミングおよびUAV群の連合学習）」と題し、全6章から構成されている。</p> <p>近年、第6世代移動通信（6G）に向けた研究開発において、衛星・高高度プラットフォーム（HAPS）・無人航空機（UAV）・地上ネットワークを統合した宇宙・空・地統合ネットワーク（SAGIN）が注目されている。SAGINは、未整備地域への通信提供や、大規模IoTを支える基盤として期待されているが、三次元的に複雑な伝搬環境における通信資源制御と、エッジにおける分散学習の両立という課題を抱えている。</p> <p>本論文は、このような背景のもと、空中通信システムにおけるエッジインテリジェンスの実現を目的とし、通信資源制御から分散学習に至る横断的な手法を提案している。特に、(i) HAPSにおける三次元環境を考慮したビームフォーミング設計、(ii) UAVにおける非独立同一分布（non-IID）データ環境下での連合学習（FL）、(iii) 動的かつ非教師ありデータを対象とした連合非教師あり学習（FUL）、という三つの課題を統一的な視点で扱っている。</p> <p>第1章では、SAGINとエッジインテリジェンスの研究背景を整理し、HAPS通信における従来の二次元伝搬モデルに基づくビーム制御の限界、UAV環境におけるデータ非IID性に起因する学習不安定性、および動的環境下での非教師あり学習の困難性を明確にした上で、本論文の研究目的と貢献を示している。</p> <p>第2章では、HAPS通信、UAVエッジコンピューティング、FLおよびFULに関する先行研究を体系的に整理し、本研究が対象とする技術的ギャップを明確にしている。</p> <p>第3章では、HAPS通信における三次元環境認識型ビームフォーミング手法を提案している。建物形状や地形を考慮した高精度な三次元伝搬モデルを構築し、深層強化学習を用いてアンテナの方位角および仰角を動的に制御することで、従来の二次元伝搬モデルに基づく手法では十分に対応できなかった非見通し（NLoS）ユーザの通信品質を改善している。実際の都市三次元マップを用いたシミュレーションにより、スループット分布の改善および公平性向上が確認されている。</p> <p>第4章では、非IIDデータ環境下におけるFLの安定化手法として、中心化カーネル整合度（CKA）に基づく表現整合正則化を提案している。従来の重み距離に基づく制約ではなく、内部特徴表現の相関構造を整合させることで、クライアント間の学習乖離を抑制し、収束性と通信効率を向上させている。画像分類タスクを用いたシミュレーションにより、既存手法と比較して収束性および通信効率の向上を実現している。</p> <p>第5章では、動的なUAV環境におけるFULフレームワークを提案している。限られたメモリ資源と時間変動するデータ分布を考慮し、自己教師あり学習、モデル表現整合、およびサーバ側における重要度考慮型集約を組み合わせることで、学習崩壊や表現退化を防止している。これにより、ラベル情報を必要としないUAV協調学習の実現可能性を示している。</p> <p>第6章では、本研究の成果を総括するとともに、6G時代における空中エッジインテリジェンスの発展に向けた今後の研究課題を示している。</p> <p>以上より、本論文は、HAPS通信とUAV分散学習を横断する新規性の高い研究成果を示しており、学術的価値および将来の実用的展開の両面において高く評価できる。よって、Li Zhaojie君は博士（工学）の学位を授与するにふさわしいと認める。</p>			

# Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6561	Name	Xing, Zelin
Thesis Title			
Contactless Cardiac Biometrics: Open-set Radar Identification and Radar-to-ECG Reconstruction			
<p>Contactless sensing of cardiac dynamics and biometric identification via physiological signals have attracted increasing attention in scenarios such as in-vehicle monitoring, privacy-aware access control, and ubiquitous health sensing. Among these, radar offers a compelling solution by capturing subtle chest-wall motion without physical contact, thus overcoming the limitations of wearable and vision-based systems in terms of user burden, lighting sensitivity, occlusion, and privacy. In contrast, the electrocardiogram (ECG) remains the gold standard for clinical cardiac assessment, offering interpretable morphology and robust diagnostic utility. Bridging radar and ECG opens up the potential for contactless systems that retain clinical relevance, but it also introduces new challenges in signal processing, representation learning, and interpretability.</p> <p>While recent methods show promising results, key challenges persist in bringing radar-based cardiac biometrics into real-world use. Radar signals are susceptible to respiratory interference, motion artifacts, and clutter, which impair both signal reconstruction and subject discrimination. Moreover, most prior work assumes a closed-set identity space and neglects out-of-distribution rejection, limiting robustness in access-control and open-world deployments. Furthermore, only a few studies have directly mapped radar to ECG, restricting interpretability and compatibility with clinical tools. This dissertation addresses these challenges through a unified framework for contactless cardiac biometrics that supports both open-set identification and direct radar-to-ECG reconstruction.</p> <p>Chapter 1 introduces the motivation and application contexts of this work, highlighting the benefits of radar-based vital-sign sensing. It outlines the core radar signal processing pipeline, including range-angle focusing, phase demodulation, and respiration suppression, and formulates the two main tasks: open-set identification and ECG reconstruction.</p> <p>Chapter 2 surveys prior work on radar cardiography, ECG biometrics, and open-set identification, as well as relevant deep learning methods for sequence modeling and metric learning. It identifies the limitations of existing systems in robustness, generalization, and lack of radar–ECG alignment.</p> <p>Chapter 3 proposes a deep learning approach for open-set person identification using radar-sensed cardiac motion. A Doppler radar front-end is followed by a signal decomposition module to extract heartbeat-resolved signals. These are fed into an embedding network trained with a Class Anchor Clustering loss and hypersphere-based open-set rejection. Additionally, ECG-like reconstructions</p>			

from ECGReconNet are used to enhance morphological alignment. Experiments show state-of-the-art accuracy in both closed-set and open-set regimes on a public dataset.

Chapter 4 shifts focus to radar-to-ECG reconstruction. A new model, GOMR-ECGNet, integrates multi-resolution wavelet decomposition, channel-gating via data-driven attention, and a neural ODE refinement head. A multi-task Kendall-weighted loss jointly optimizes waveform fidelity and R-peak heatmap alignment. Compared to previous methods, this approach improves ECG morphology recovery and supports more interpretable cardiac sensing.

Chapter 5 summarizes the thesis contributions: a full-stack pipeline for robust radar cardiac biometrics, a clinically-aligned radar-to-ECG pathway, and new benchmarks for open-set performance and interpretable signal reconstruction. Future directions include personalization, domain adaptation, and real-time deployment in edge systems.

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6561 号	氏 名	Zelin, Xing
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	大槻 知明
副査	慶應義塾大学教授	工学博士	池原 雅章
	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	五十川 麻理子
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Ph.D. Guan Gui			
<p>Bachelor of Science in Electronic Information Engineering, Master of Science in Engineering, Zelin Xing君提出の学位請求論文は、「Contactless Cardiac Biometrics: Open-set Radar Identification and Radar-to-ECG Reconstruction（非接触心臓バイオメトリクス：オープンセット・レーダ識別とレーダからECGへの再構成）」と題し、全5章から構成されている。</p> <p>近年、高齢化社会の進展や健康志向の高まりを背景として、日常生活空間や車室内などにおいて、身体への負担やプライバシー侵害を伴わずに心拍などの生体情報を取得する非接触型センシング技術への期待が高まっている。レーダを用いた心拍センシングは、非接触・非拘束で胸壁の微小変位を計測できる点で有望である一方、雑音や体動の影響を受けやすく、得られる信号の解釈性や個人識別への応用においては依然として課題が残されている。</p> <p>本論文は、レーダにより取得される心臓由来信号に深層学習を適用し、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(i) オープンセット条件下における非接触個人識別、</li> <li>(ii) レーダ信号からの ECG (Electrocardiogram) 波形再構成</li> </ul> <p>という二つの課題を統一的な枠組みで扱っている。非接触センシングの利便性と、ECG が有する生理学的解釈性を両立させる点に本研究の独創性がある。</p> <p>第 1 章では、レーダを用いた非接触心臓センシングの研究背景および社会的要請を整理し、従来研究におけるクローズドセット仮定や生理学的解釈性の不足といった課題を明確化した上で、本研究の目的と位置付けを述べている。</p> <p>第 2 章では、レーダ心拍センシング、心電図バイオメトリクス、オープンセット識別、およびレーダ - ECG 再構成に関する先行研究を体系的に整理し、既存手法の限界と本研究が解決を目指す研究課題を明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、レーダにより抽出した心拍信号を用いたオープンセット個人識別手法を提案している。具体的には、ドップラーレーダ信号から心拍優勢成分を抽出した後、深層ニューラルネットワークによる特徴埋め込み学習と、クラスアンカーに基づくクラスタリング損失および超球面分離を用いた未知人物拒否機構を導入している。公開データセットを用いた評価により、既存のクローズドセット識別手法と比較して、未知人物を適切に排除しつつ高い識別精度を維持できることを示している。</p> <p>第 4 章では、レーダ信号から ECG 波形を直接再構成する深層学習モデルを提案している。多重解像度解析、チャンネル重要度に基づくゲーティング機構、および時間発展を考慮したニューラル ODE (Ordinary Differential Equation) 構造を統合することで、従来手法と比較して心拍波形の形状再現性および拍間隔推定精度が向上することを示している。これにより、レーダ信号を単なる代理指標として用いるのではなく、臨床的解釈が可能な ECG 表現へと橋渡しする道を示している。</p> <p>第 5 章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、被験者適応や環境変動への対応、エッジデバイスへの実装など、今後の研究課題と応用展開について述べている。</p> <p>以上より、本論文は、非接触心臓センシングとバイオメトリクス認証の両分野において、学術的独創性および実用的有用性の双方に優れた成果を示している。よって、Zelin Xing 君は博士（工学）の学位を授与するにふさわしいと認める。</p>			

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6562 号	氏 名	車 裕輝
主論文題名：  <b>Novel Particle Measurement Techniques for Characterization of Environmental Particulate Contaminants</b> (環境中粒子状汚染物質の粒子特性評価に資する新規粒子計測法の開発)			
<p>本論文は、大気中微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) やマイクロプラスチック (MPs) に代表される環境中粒子状汚染物質の健康・環境リスクの実態解明を目指し、PM<sub>2.5</sub> と MPs の正確な粒子特性評価をするための新しい粒子計測技術を開発した。</p> <p>第 1 章では、研究背景として粒子が有益な側面と有害な側面の二面性を有することを述べ、有害な面の代表例として、社会課題となっている PM<sub>2.5</sub> 問題と MPs 問題を概説した。開放環境中に拡散した粒子状汚染物質が引き起こす環境問題の背景および解決すべき問題と其中で粒子計測が果たす役割を述べ、本研究の位置づけと目的を示した。</p> <p>第 2 章では、PM<sub>2.5</sub> の毒性学研究において、細胞曝露試験用の粒子懸濁液に対する信頼性の高い粒径分布測定法が不足していることにより有害性試験結果の解釈が困難になっている現状の課題を指摘し、気相粒子計測技術の一つである電気移動度法 (DMAS) と独自の前処理法を組み合わせた粒径分布測定法の有用性を示した。本研究で開発した測定手法は、細胞曝露試験用の粒子懸濁液に対する透析処理を含む。これにより従来の DMAS では困難だった、細胞曝露試験用粒子懸濁液の正確な粒径分布測定を実現した。平均粒径または粒径分布が既知の標準粒子を用いて本手法の妥当性評価を行った。次に、実環境試料を用いた実証試験を行い、これまで未知であった細胞曝露試験用粒子懸濁液の粒径分布の一端を明らかにした。</p> <p>第 3 章では、MPs の環境動態研究において、迅速かつ正確な MPs 個数濃度測定法が不足している現状と、微小 MPs の高感度検出の鍵となる蛍光染色手法の技術的課題を指摘し、液相粒子計測技術の一つであるフローサイトメトリー (FCM) と独自の前処理法を組み合わせた個数濃度測定法の有用性を示した。本研究で開発した測定手法は、ポリマーの膨潤現象を利用した高効率な蛍光染色処理を含む。これにより従来法 (顕微鏡法、顕微分光法、熱分析法) では困難だった 10 μm 以下の微小 MPs の単一粒子検出と迅速かつ正確な個数濃度測定を実現した。個数濃度を正確に値付けした標準懸濁液を用いて本手法の妥当性評価を行った。次に、模擬環境試料を用いた実証試験を行い、本手法が個数濃度の高い定量性能を有することを示した。</p> <p>第 4 章では、本研究の結言として研究全体の総括と将来展望を述べた。</p> <p>以上より本研究は、環境中粒子状汚染物質の健康・環境リスクの実態解明に貢献する、粒子特性評価のための新しい粒子計測法を提示した。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6562 号	氏 名	車 裕輝
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（農学）	奥田 知明
	副査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	鈴木 哲也
		慶應義塾大学教授 Dr. sc. nat.	チッテリオ, ダニエル
		慶應義塾大学准教授 博士（工学）	蛭田 勇樹

学士（工学）、修士（工学）車 裕輝 君 提出の学位請求論文は「Novel Particle Measurement Techniques for Characterization of Environmental Particulate Contaminants (環境中粒子状汚染物質の粒子特性評価に資する新規粒子計測法の開発)」と題し、大気中微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) やマイクロプラスチック (MPs) に代表される環境中粒子状汚染物質の健康・環境リスクの実態解明を目指し、PM<sub>2.5</sub> と MPs の正確な粒子特性評価をするための新しい粒子計測技術を開発したものであり、以下の4章から構成されている。

第1章では、研究背景として粒子が有益な側面と有害な側面の二面性を有することを述べ、有害な面の代表例として、社会課題となっている PM<sub>2.5</sub> 問題と MPs 問題を概説している。開放環境中に拡散した粒子状汚染物質が引き起こす環境問題の背景および解決すべき問題とその中で粒子計測が果たす役割を述べ、本研究の位置づけと目的を示している。

第2章では、PM<sub>2.5</sub> の毒性学研究において、細胞曝露試験用の粒子懸濁液に対する信頼性の高い粒径分布測定法が不足していることにより有害性試験結果の解釈が困難になっている現状の課題を指摘し、気相粒子計測技術の一つである電気移動度法 (DMAS) と独自の前処理法を組み合わせた粒径分布測定法の有用性を示している。本研究で開発した測定手法は、細胞曝露試験用の粒子懸濁液に対する透析処理を含む。これにより従来の DMAS では困難であった、細胞曝露試験用粒子懸濁液の正確な粒径分布測定を実現している。次いで、平均粒径または粒径分布が既知の標準粒子を用いて本手法の妥当性評価結果を示している。さらに、実環境試料を用いた実証試験を行い、これまで未知であった細胞曝露試験用粒子懸濁液の粒径分布の一端を明らかにしている。

第3章では、MPs の環境動態研究において、迅速かつ正確な MPs 個数濃度測定法が不足している現状と、微小 MPs の高感度検出の鍵となる蛍光染色手法の技術的課題を指摘し、液相粒子計測技術の一つであるフローサイトメトリー (FCM) と独自の前処理法を組み合わせた個数濃度測定法の有用性を示している。本研究で開発した測定手法は、ポリマーの膨潤現象を利用した高効率な蛍光染色処理を含む。これにより従来法 (顕微鏡法、顕微分光法、熱分析法) では困難であった 10 μm 以下の微小 MPs の単一粒子検出と迅速かつ正確な個数濃度測定を実現している。次いで、個数濃度を正確に値付けした標準懸濁液を用いて本手法の妥当性評価結果を示している。さらに、模擬環境試料を用いた実証試験を行い、本手法が個数濃度の高い定量性能を有することを示している。

第4章では、本研究の結言として研究全体の総括と将来展望を述べている。

以上要するに、本研究は、環境中粒子状汚染物質の健康・環境リスクの実態解明に貢献する、粒子特性評価のための新しい粒子計測法を提示したものであり、環境化学に加えて分析化学および微粒子工学さらには毒性学の分野において工学上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6657 号	氏 名	磯崎 友花
主論文題名： <b>Late-stage</b> ホウ素媒介アグリコン転移反応を用いた 肺非結核性抗酸菌症に対する新規治療薬リードの創製			
<p>肺非結核性抗酸菌（NTM）症は、治療に長期間を要し、再発率も高いことに加え、基礎疾患のない免疫正常者にも感染すること、さらに世界的に罹患率が上昇していることから、解決すべき喫緊の課題である。とりわけ、肺 NTM 症に対する代表的な薬剤として、マクロライド系抗菌物質アジスロマイシン（AZM）が利用されているが、近年の薬剤耐性菌の出現により、既存薬の分子修飾を基盤とした新規治療薬の開発が強く求められている。このような背景の中、当研究室では、無保護の生物活性分子に対して新たな糖分子を位置および 1,2-<i>cis</i>-立体選択的に付与する <b>late-stage</b> ホウ素媒介アグリコン転移（BMAD）反応を開発している。そこで本論文では、AZM に対する <b>late-stage</b> BMAD 反応の開発と、本反応を駆使した新規肺 NTM 症治療薬候補の創製について記述した。</p> <p>序論では、まず、肺 NTM 症の既存薬と NTM が有する薬剤耐性機構、さらにマクロライド系抗生物質の化学構造や開発の歴史について概説した。続いて、従来の生物活性分子に対する代表的な <b>late-stage</b> 修飾反応および当研究室で開発した <b>late-stage</b> BMAD 反応について概説した。最後に、本研究の目的および位置付けについて記述した。</p> <p>本論第 1 章では、<b>late-stage</b> BMAD 反応を用いた AZM 誘導体の合成、活性評価、および作用機序解析について記述した。まず、AZM と 1,2-アンヒドロ糖とのボロン酸触媒による <b>late-stage</b> BMAD 反応を検討した結果、本反応が 1,2-<i>cis</i>-立体選択的かつ C11 位選択的に進行し、望む配糖体が高収率で得られることを初めて見出した。続いて、<b>late-stage</b> BMAD 反応、脱保護反応、および Huisgen 環化付加反応の 3 工程で新規誘導体を迅速に合成する合成法の確立と AZM 誘導体ライブラリーの合成を達成した。次に、合成したライブラリーの NTM に対する抗菌活性を評価した結果、一部の AZM 誘導体が、薬剤感受性株および薬剤耐性株の双方に対して、AZM を上回る抗菌活性を発現することを見出した。さらに、無細胞タンパク質合成系を用いた翻訳阻害活性を評価した結果、本誘導体は AZM よりも高い翻訳阻害活性を示し、リボソームを標的としていることが明らかとなった。最後に、クライオ電子顕微鏡による相互作用解析を行った結果、本誘導体が、導入した置換基を介してリボソームとの新たな相互作用を形成し、高い抗菌活性を発現するリード化合物であることを見出した。</p> <p>本論第 2 章では、AZM 誘導体のさらなる構造活性相関研究および NTM 肺感染モデルマウスに対する <i>in vivo</i> 活性評価について記述した。まず、本論第 1 章で得られた知見に基づき、<b>late-stage</b> BMAD 反応を用いて新規 AZM 誘導体ライブラリーを合成後、各種 NTM 株に対する抗菌活性を評価した。その結果、本論第 1 章で見出したリード化合物が、最も高い抗菌活性を示すことを明らかにした。続いて、本誘導体の効率的合成法の確立を目的とし、AZM に対する <b>late-stage</b> BMAD 反応、Huisgen 環化付加反応、および脱保護反応を一挙に行う <b>one-pot</b> 反応を検討した。その結果、本誘導体のグラムスケールでの <b>one-pot</b> 合成に成功した。最後に、本誘導体の NTM 肺感染モデルマウスに対する抗菌活性を評価した結果、本誘導体が、動物実験レベルでも、AZM と同等の抗菌活性を発現することを実証した。以上の結果より、本研究では、薬剤耐性 NTM に対しても有効性が期待される有望な新規医薬品リード化合物の創製に成功した。</p> <p>結論では、本研究を総括し、今後の展望について記述した。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6557 号	氏 名	磯崎 友花
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授 博士（工学）	高橋 大介
	副査	慶應義塾大学教授 工学博士	戸嶋 一敦
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	藤本 ゆかり
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	末永 聖武
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	高尾 賢一

学士（工学）、修士（工学）磯崎友花君の学位請求論文は、「Late-stage ホウ素媒介アグリコン転移反応を用いた肺非結核性抗酸菌症に対する新規治療薬リードの創製」と題し、序論、本論第1章、第2章、および結論で構成されている。

肺非結核性抗酸菌（肺 NTM）症は、治療に長期間を要し、再発率も高いことに加え、基礎疾患のない免疫正常者にも感染すること、さらに世界的に罹患率が上昇していることから、解決すべき喫緊の課題である。とりわけ、肺 NTM 症に対する代表的な薬剤として、マクロライド系抗菌物質アジスロマイシン（AZM）が利用されているが、近年の薬剤耐性菌の出現により、既存薬の分子修飾を基盤とした新規治療薬の開発が強く求められている。このような背景の中、当研究室では、無保護の生物活性分子に対して新たな糖分子を位置および 1,2-*cis*-立体選択的に付与する late-stage ホウ素媒介アグリコン転移 (BMAD) 反応を開発している。そこで本論文では、AZM に対する late-stage BMAD 反応の開発と、本反応を駆使した新規肺 NTM 症治療薬候補の創製について記述している。

序論では、まず、肺 NTM 症に対する既存薬、NTM の薬剤耐性機構、およびマクロライド系抗菌物質の化学構造や開発の歴史について概説している。続いて、従来の生物活性分子に対する代表的な late-stage 修飾反応および late-stage BMAD 反応について概説している。さらに、本研究の目的および位置付けについて記述している。

本論第1章では、late-stage BMAD 反応を用いた AZM 誘導体の合成、活性評価、および作用機序解析について記述している。まず、AZM と 1,2-アンヒドロ糖とのボロン酸触媒による late-stage BMAD 反応を検討した結果、本反応が 1,2-*cis*-立体選択的かつ C11 位選択的に進行し、望む配糖体が高収率で得られることを初めて見出した。続いて、late-stage BMAD 反応、脱保護反応、および Huisgen 環化付加反応の 3 工程で新規誘導体を迅速に合成する合成法の確立と AZM 誘導体ライブラリーの合成を達成した。次に、合成したライブラリーの NTM に対する抗菌活性を評価した結果、一部の AZM 誘導体が、薬剤感受性株および薬剤耐性株の双方に対して、AZM を上回る抗菌活性を発現することを見出した。さらに、無細胞タンパク質合成系を用いた翻訳阻害活性を評価した結果、本誘導体は AZM よりも高い翻訳阻害活性を示し、リボソームを標的としていることを明らかにした。最後に、クライオ電子顕微鏡による構造解析を行った結果、本誘導体が、導入した置換基を介してリボソームとの新たな相互作用を形成し、高い抗菌活性を発現するリード化合物であることを見出した。

本論第2章では、AZM 誘導体のさらなる構造活性相関研究および NTM 肺感染モデルマウスに対する *in vivo* 活性評価について記述している。まず、本論第1章で得られた知見に基づき、late-stage BMAD 反応を用いて新規 AZM 誘導体ライブラリーを合成後、各種 NTM 株に対する抗菌活性を評価した。その結果、本論第1章で見出したリード化合物が、最も高い抗菌活性を示すことを明らかにした。続いて、本誘導体の効率的合成法の確立を目的とし、AZM に対する late-stage BMAD 反応、Huisgen 環化付加反応、および脱保護反応を one-pot で行う反応を検討した。その結果、本誘導体のグラムスケールでの one-pot 合成に成功した。最後に、本誘導体の NTM 肺感染モデルマウスに対する抗菌活性を評価した結果、本誘導体が、動物実験レベルでも、AZM と同等の抗菌活性を発現することを実証した。以上の結果より、本研究では、薬剤耐性 NTM に対しても有効性が期待される有望な新規医薬品リード化合物の創製に成功した。

結論では、本研究を総括し、今後の展開について記述している。

以上、本論文の成果は、生物活性分子に対する高位置及び立体選択的な late-stage 修飾反応において新たな効率的な反応を開発し、その有用性を AZM 誘導体ライブラリーの合成と肺 NTM 症治療薬の新規リード化合物の創出において実証しており、学術的にも工学的にも意義深い。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6658 号	氏 名	林 克哉
主論文題名：  水素負イオン源におけるプラズマメニスカスおよび電位構造に関する研究			
<p>加速器、がん治療装置、核融合プラズマ加熱などの最先端技術に用いられる水素負イオン源では、壁表面における負イオン生成（以下、表面生成）を利用した場合、引き出された負イオンビームの収束性が低下することが課題となっている。負イオン源におけるビーム収束性は、ビーム引き出し孔近傍の電位構造と、それにより形成されるビーム発生面であるプラズマメニスカス（以下、メニスカス）に強く依存する。負イオン源におけるメニスカスは、負イオンを引き出す外部電場とプラズマによるその遮蔽に加え、電子より負イオンが主要な負電荷粒子となるイオン性プラズマの物理特性に強く依存する。そのため、従来の正イオン源におけるメニスカスとは異なる特性を持つ可能性があるが、その理解は十分ではない。そこで本研究では、三次元静電粒子シミュレーションを用いて、負イオン源における電位構造の形成と、それがメニスカスに与える影響を明らかにすることを目的とする。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景ならびに本論文の目的と意義についてまとめている。</p> <p>第2章では、負イオン源内部のプラズマと電位分布を解析する三次元静電粒子モデルについて説明している。負イオン源内で生成されたプラズマをソースとして仮定し、ビーム引き出し孔近傍を解析領域として、荷電粒子の運動方程式とポアソン方程式を自己無撞着に解くことで、メニスカスを含むプラズマの挙動および電位分布を解析する。</p> <p>第3章では、ソースプラズマ密度を変化させた解析結果に基づき、電位構造およびメニスカス位置・形状のプラズマ密度依存性について議論している。負イオン源では、プラズマ密度に応じて負イオン生成量が増加し、それに伴って内部の電位構造も変化するため、正イオン源と同一の電位分布に基づく評価手法ではメニスカス位置の評価が困難であることを示した。そこで、代替手法として正イオン密度分布に着目し、これを用いてメニスカス位置を推定した結果、プラズマ密度の増加に伴いメニスカスはビーム引き出し方向へ移動し、正イオン源と同様のプラズマ密度依存性を示した。</p> <p>第4章では、プラズマ密度を固定した条件下で表面生成量を変化させた解析を行い、電子密度に対する負イオン密度の比<math>\alpha</math>をパラメータとして、メニスカスへの影響を議論している。表面生成量の増加により<math>\alpha</math>が増加すると、プラズマ電極近傍における電位構造が変化し、メニスカス位置が移動することを示した。さらに、この挙動を理解するために、正イオン源におけるメニスカスの理論モデルを負イオン源へと拡張し、理論的にも<math>\alpha</math>の変化によりメニスカス位置が移動することを示した。</p> <p>第5章では、これまでの結果を踏まえ、負イオン密度と電位構造の関係に着目して、負イオン源内部の物理特性について議論している。負イオン密度分布と電位分布の関係から、負イオン源内のプラズマを、(I)負イオン密度がボルツマン関係式に従う領域、(II)正イオン密度がボルツマン関係式に従い、かつ負イオン密度と準中性条件を満たす領域、(III)プラズマ領域から加速領域への遷移領域、(IV)加速領域、の4つの領域に分類できることを明らかにした。各領域を支配する物理機構と電位構造の関係から、領域(III)と領域(IV)との境界、もしくは領域(III)自体が負イオン源におけるメニスカスに相当する可能性を示した。</p> <p>第6章では、各章で得られた結果を総括し、本論の結論および今後の展望を述べている。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6658 号	氏 名	林 克哉
論文審査担当者：	主査 慶應義塾大学教授	博士（工学）	星野 一生
	副査 慶應義塾大学教授	博士（工学）	渡辺 宙志
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	泰岡 顕治
	核融合科学研究所准教授	博士（理学）	中野 治久

学士（工学）・修士（工学）林克哉君提出の学位請求論文は「水素負イオン源におけるプラズマメニスカスおよび電位構造に関する研究」と題し、全6章から構成されている。

加速器、がん治療装置、核融合プラズマ加熱装置などの最先端技術に用いられる水素負イオン源では、壁表面における負イオン生成（以下、表面生成）を利用した場合、引き出された負イオンビームの収束性が低下することが課題となっている。負イオン源におけるビーム収束性は、ビーム引き出し孔近傍の電位構造と、それにより形成されるビーム発生面であるプラズマメニスカス（以下、メニスカス）に強く依存する。負イオン源におけるメニスカスは、負イオンを引き出す外部電場とプラズマによるその遮蔽に加え、電子より負イオンが主要な負電荷粒子となるイオン性プラズマの物理特性に影響を受ける。そのため、従来の正イオン源におけるメニスカスとは異なる特性を持つ可能性があるが、その理解は十分ではない。そこで本研究では、三次元静電粒子シミュレーションを用いて、負イオン源における電位構造の形成と、それがメニスカスに与える影響を明らかにすることを目的とする。

第1章は序論であり、研究背景ならびに本論文の目的と意義についてまとめている。

第2章では、負イオン源内部のプラズマと電位分布を解析する三次元静電粒子モデルについて説明している。負イオン源内で生成されたプラズマをソースとして仮定し、ビーム引き出し孔近傍を解析領域として、荷電粒子の運動方程式とポアソン方程式を自己無撞着に解くことで、メニスカスを含むプラズマの挙動および電位分布を解析する。

第3章では、ソースプラズマ密度を変化させた解析結果に基づき、電位構造およびメニスカス位置・形状のプラズマ密度依存性について議論している。負イオン源では、プラズマ密度に応じて負イオン生成量が増加し、それに伴って内部の電位構造も変化するため、正イオン源と同一の電位分布に基づく評価手法ではメニスカス位置の評価が困難であることを示した。そこで、代替手法として正イオン密度分布に着目しメニスカス位置を推定した結果、プラズマ密度の増加に伴いメニスカスはビーム引き出し方向へ移動し、正イオン源と同様のプラズマ密度依存性を示した。

第4章では、プラズマ密度を固定した条件下で表面生成量を変化させた解析を行い、電子密度に対する負イオン密度の比 $\alpha$ をパラメータとして、メニスカスへの影響を議論している。表面生成量の増加により $\alpha$ が増加すると、電位構造が変化し、それに伴いメニスカス位置が移動することを示した。さらに、この挙動を理解するために、正イオン源におけるメニスカスの理論モデルを負イオン源へと拡張し、理論的にも $\alpha$ の変化によりメニスカス位置が移動することを示した。

第5章では、これまでの結果を踏まえ、負イオン密度と電位構造の関係に着目して、負イオン源内部の物理特性について議論している。負イオン密度分布と電位分布の関係から、負イオン源内のプラズマを、(I)負イオン密度がボルツマン関係式に従う領域、(II)正イオン密度がボルツマン関係式に従い、かつ負イオン密度と準中性条件を満たす領域、(III)プラズマ領域から加速領域への遷移領域、(IV)加速領域、の4つの領域に分類できることを明らかにした。各領域を支配する物理機構と電位構造の関係から、領域(III)と領域(IV)との境界、もしくは領域(III)自体が負イオン源におけるメニスカスに相当する可能性を示した。

第6章では、各章で得られた結果を総括し、本論文の結論および今後の展望を述べている。

以上要するに本論文は、水素負イオン源における電位構造およびプラズマメニスカス形成の物理機構を、三次元静電粒子シミュレーションにより明らかにしたものである。これらの成果は、負イオン源の高性能化に向けた設計指針の高度化に資するものであり、工学上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6659 号	氏 名	比企 佑介
主論文題名：  ネムリユスリカ幼虫の乾燥刺激に応答する遺伝子制御ネットワークの解析および 基盤技術の開発			
<p>昆虫の一種であるネムリユスリカの幼虫は、極度の乾燥を経ても死なず、水を与えることで元の生活環に戻ることができる乾燥耐性を持つ。これまでに、抗酸化や生体分子の保護、DNA 修復などに関与する遺伝子が乾燥耐性に必要であることが示されてきた。またそれら遺伝子群は、ネムリユスリカ胚由来の細胞株 Pv11 を用いた研究において、熱ショックストレスへの応答に係る熱ショック因子や干ばつストレス耐性に関与する <b>nuclear transcription factor Y subunit gamma-like</b> を起点とした遺伝子制御ネットワークに基づいて発現調節されることが報告された。しかしネムリユスリカの乾燥耐性に関して細胞レベルでの知見が蓄積されている一方で、個体レベルでの制御機構は未知であり、多細胞間、組織間の相互作用が含まれた対象での耐性メカニズムの理解は不十分であった。本研究では、ネムリユスリカ幼虫個体における乾燥耐性機構の解明に向けて、ネムリユスリカ幼虫の乾燥刺激に応答する遺伝子制御ネットワークの推定と解析、およびその基盤技術である遺伝子制御ネットワーク推定手法の開発を行った。</p> <p>第 1 章は緒言で、ネムリユスリカの乾燥耐性に関してこれまでに報告されてきた分子生物学的な知見について包括的に紹介した。また、乾燥耐性機構を明らかにするために有用な遺伝子制御ネットワークを推定する基盤技術を概説し、本研究の目的を述べた。</p> <p>第 2 章では、ネムリユスリカ幼虫の乾燥刺激に応答する遺伝子制御ネットワークの推定および解析に関して述べた。乾燥過程で多くの遺伝子が段階的に発現変動すること、またその段階的な発現変動が 2 つの転写因子を起点とする遺伝子制御ネットワークで説明可能であることを明らかにした。</p> <p>第 3 章では、第 2 章の結果をより正確に得るために必要な基盤技術である遺伝子制御ネットワーク推定手法の開発について述べた。<i>in vivo</i> で取得されたベンチマークデータセットを用い、開発手法は既存手法に比べて高精度な推定が可能であることを示した。</p> <p>第 4 章では、推定されたネムリユスリカ幼虫の遺伝子制御ネットワークから推測される乾燥耐性機構および開発した基盤技術についてまとめ、今後の遺伝子制御ネットワーク推定手法の改良、そしてそれを利用したネムリユスリカ乾燥耐性機構の解明に関する展望について議論した。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6659 号	氏 名	比企 佑介
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	舟橋 啓
	副査	慶應義塾大学教授 博士（地球環境科学）	土居 信英
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	加納 英明
		慶應義塾大学准教授 博士（科学）	福永 津嵩

学士（理学）、修士（理学）比企佑介君提出の学位請求論文は、「ネムリユスリカ幼虫の乾燥刺激に応答する遺伝子制御ネットワークの解析および基盤技術の開発」と題し全4章から構成されている。

昆虫の一種であるネムリユスリカの幼虫は、極度の乾燥に晒されても死なず、水を与えることで元の生活環に戻ることができる乾燥耐性を示す。これまでに、抗酸化や生体分子の保護、DNA 修復などに関与する遺伝子が乾燥耐性に必要であることが示されてきた。またそれら遺伝子群は、ネムリユスリカ胚由来の細胞株 Pv11 を用いた研究において、熱ショックストレスへの応答に係る熱ショック因子や干ばつストレス耐性に関与する転写因子 NF-YC を起点とした遺伝子制御ネットワークに基づいて発現調節されることが報告された。しかし、ネムリユスリカの乾燥耐性に関して細胞レベルでの知見が蓄積されている一方で、個体レベルでの制御機構は未知であり、多細胞間、組織間の相互作用が含まれた対象での耐性メカニズムの理解は不十分であった。本研究では、ネムリユスリカ幼虫個体における乾燥耐性機構の解明に向けて、ネムリユスリカ幼虫の乾燥刺激に応答する遺伝子制御ネットワークの推定と解析、およびその基盤技術である遺伝子制御ネットワーク推定手法の開発を行っている。

第1章は、緒言として、ネムリユスリカの乾燥耐性に関してこれまでに報告されてきた分子生物学的な知見について包括的に紹介している。続いて乾燥耐性機構を明らかにするために有用な遺伝子制御ネットワークを推定する基盤技術を概説し、本論文の目的について述べている。

第2章では、ネムリユスリカ幼虫の乾燥刺激に応答する遺伝子制御ネットワークの推定および解析について記述している。RNA-seq データに基づく発現変動遺伝子解析、クラスタリングに基づく共発現モジュールの検出および各モジュールに濃縮する遺伝子機能の予測より、乾燥過程で多くの遺伝子が段階的に発現変動すること、さらにその段階的な発現変動が2つの転写因子を起点とする遺伝子制御ネットワークで説明可能であることを明らかにしている。

第3章では、第2章の結果をより正確に得るために必要な基盤技術である遺伝子制御ネットワーク推定手法の開発について記述している。時系列データの大局的な特徴の抽出が可能なRNN の拡張である LSTM に、遺伝子制御の動的な変動を表現するための時間・遺伝子方向の注意機構を組み込むことで、*in vivo* で取得されたデータに対して遺伝子制御ネットワークを高精度に推定可能な教師なし学習手法を提案している。*in vivo* で取得されたベンチマークデータセットを用い、開発手法は既存手法に比べて高精度な推定が可能であることを示している。

第4章では、推定されたネムリユスリカ幼虫の遺伝子制御ネットワークから推測される乾燥耐性機構および開発した基盤技術についてまとめ、今後の遺伝子制御ネットワーク推定手法の改良、そしてそれを利用したネムリユスリカ乾燥耐性機構の解明に関する展望について議論している。

以上、本論文は、データ駆動的な遺伝子制御ネットワークの推定と解析を通じてネムリユスリカ幼虫の乾燥耐性機構に関する重要な知見を得るとともに、その基盤技術となるネットワーク推定手法の開発にも成功しており、今後のシステム生物学研究に大いに資するものである。よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6660 号	氏 名	寺田 大介
主論文題名： Theoretical Studies on the Reaction Mechanism and Selectivity of <i>C</i> -Glycosylation Catalyzed by the Glycosyltransferase GgCGT (糖転移酵素 GgCGT による <i>C</i> -配糖化の反応機構および選択性に関する理論的研究)			
<p>糖転移酵素 (GT) は、糖ヌクレオチドから糖部分を糖受容体へ転移する過程、すなわち配糖化反応を加速する。GT の中でも GgCGT は、ポリフェノール誘導体を選択的に <i>C</i>-配糖体に変換することが知られている。これまで酵素による <i>O</i>-配糖化反応の詳細な機構解析は進んでいたものの、<i>C</i>-配糖化反応機構の詳細は明らかにされていなかった。本論文では、ポリフェノールの一種であるフロレチンに着目し、GgCGT と糖ヌクレオチドの一種である UDP-グルコースによる選択的 <i>C</i>-配糖化の反応経路を計算化学的に解析し、その分子メカニズムを明らかにした。</p> <p>本論第一章では、<i>C</i>-配糖体の医薬・工業的有用性や、<i>C</i>-配糖化酵素の技術応用への期待を概観し、酵素による配糖化反応の既知の知見を整理した。</p> <p>本論第二章では、反応機構の解析に用いる計算手法の理論的背景を説明した。</p> <p>本論第三章では、GgCGT の活性部位を抽出したクラスターモデルに対し、密度汎関数法 (DFT) を用いてフロレチンの <i>C</i>-配糖化の反応経路を解析した。その結果、はじめにフロレチンから UDP-グルコースへのプロトン移動が起こり、その後フロレチンからグルコース部分への求核攻撃と UDP の解離が協奏的に進行する、すなわち <math>S_N2</math> 型反応が進行することを明らかにした。また、この段階で生成される非芳香族性の中間体は、酵素環境がなくとも速やかに <i>C</i>-配糖体へと変換されることも明らかになった。本反応経路をもとに、GgCGT の変異体酵素の実験結果を説明できたものの、<i>O</i>-配糖体が生成しない理由は説明できなかった。</p> <p>本論第四章では、酵素の活性部位を DFT 法、それ以外の部分を分子力学 (MM) 法で記述する QM/MM 法を用いることで、酵素全体の効果を考慮した反応機構解析を行った。その結果、クラスターモデルによる計算よりも、<i>C</i>-配糖化の活性化障壁が実験値と良い一致を示した。また、<i>O</i>-配糖化が進行しない理由を次のように説明することができた。<i>C</i>-配糖化と比べると、<i>O</i>-配糖化は活性化障壁が低く、速度論的には有利である。しかし、生成した <i>O</i>-配糖体は不安定であり、反応前の構造へ戻る逆向きの反応が速やかに進行してしまう。一方、<i>C</i>-配糖体は熱力学的に安定であり、逆向きの反応は進行しない。つまり、<i>C</i>/<i>O</i>-配糖化の選択性は熱力学的に制御されていることが分かった。そこで、配糖体を含む中間体のエネルギー差の原因を解析したところ、活性部位に位置する His27-Asp122 二残基が最も大きく寄与することが分かった。</p> <p>結論では、本研究の成果を簡潔にまとめた。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6660 号	氏 名	寺田 大介
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士 (理学)	畑中 美穂
	副査	慶應義塾大学教授 博士 (工学)	古川 良明
		慶應義塾大学教授 博士 (工学)	高尾 賢一
		慶應義塾大学教授 博士 (工学)	荒井 規允

学士(工学), 修士(工学) 寺田大介君提出の学位請求論文は「Theoretical Studies on the Reaction Mechanism and Selectivity of C-Glycosylation Catalyzed by the Glycosyltransferase GgCGT (糖転移酵素 GgCGT による C-配糖化の反応機構および選択性に関する理論的研究)」と題し, 全五章で構成されている。

糖供与体から糖部分を糖受容体へ転移する反応(配糖化)は, 糖受容体側の結合原子種  $X$  に応じて  $X$ -配糖化( $X=C, O$  等)と分類され, 対応する生成物は  $X$ -配糖体と呼ばれる。糖受容体にポリフェノール誘導体を用いる場合,  $C$ -配糖化と  $O$ -配糖化の両方が進行し得るが, 糖転移酵素 GgCGT を用いることでポリフェノールの一種であるフロレチンを高選択的に  $C$ -配糖化できることが報告されている。 $C$ -配糖体は生体内反応による分解を受けにくいいため, 医薬品や化粧品に有用であり, 望む  $C$ -配糖体のみを効率的に生成する人工酵素や触媒の設計が求められているが, その反応機構や選択性発現機構は明らかにされていない。本論文では, GgCGT と糖供与体の一種である UDP-グルコースによるフロレチンの配糖化に着目し, その反応機構と選択性発現機構について計算化学的手法を用いた詳細な解析を行っている。

第一章では,  $C$ -配糖体の医薬・工業的有用性や,  $C$ -配糖化酵素の技術応用への期待を概観し, 酵素による配糖化の既知の知見について述べている。

第二章では, 反応機構解析に用いる計算化学的手法の理論的背景を概説している。

第三章では, GgCGT の活性部位を取り出したクラスターモデルに対し, 密度汎関数(DFT)法を用いて  $C$ -配糖化の反応経路を探索している。その結果, フロレチンから UDP-グルコースへのプロトン移動が起きた後, フロレチンからグルコース部分への求核攻撃と UDP の脱離が協奏的に進行する, すなわち  $S_N2$  型反応が進行することを見出している。従来定説では, 酵素内の塩基性残基がフロレチンのプロトンを引き抜くと提案されていたが, 中性条件下においてフェノールのプロトンを引き抜けるほど強い残基が酵素内に存在するのか疑問視されていた。本論文で提案した経路では, アミノ酸残基ではなく UDP-グルコースにプロトンが移動することで, フロレチンの求核性が向上するだけでなく, UDP 部分の脱離能も向上する。すなわち, 糖受容体と糖供与体の両方を活性化することで, 二重の反応駆動力を生み出すと言える。本反応機構は, 従来説における矛盾点を完全に解決したものの,  $O$ -配糖体が生成しない理由は説明できていない。

第四章では, 第三章のクラスターモデルで説明できていない選択性の鍵が, 酵素全体が作る環境にあると考え, 酵素の活性部分を DFT 法, それ以外の部分を分子力学(MM)法で記述する QM/MM 法を用いた反応経路の解析を行っている。その結果,  $O$ -配糖化は速度論的には有利であるものの, 逆向きの反応も速やかに進行してしまうため, 最終的には熱力学的に安定な  $C$ -配糖体のみが得られる。つまり,  $C$ -/ $O$ -配糖化の選択性は熱力学的に制御されていることを明らかにしている。さらに, 従来説においてプロトンを引き抜くと考えられていたヒスチジンと, 隣接するアスパラギン酸の二残基が,  $C$ -/ $O$ -配糖体の熱力学的安定性の違いの鍵となることも見出している。

第五章は, 結論であり上記の内容を総括している。

以上より, 本論文では酵素残基が塩基となるという固定観念を排し, 糖供与体自体が塩基として機能するという, 中性条件下での反応進行を化学的に矛盾なく説明できる新しい機構を提唱すると共に, 各残基の役割を詳細に解明している。これらの成果は, 配糖化機構の理解を大きく変えるものであり, 今後, 本知見を基盤として, 配糖化を行う人工酵素や触媒の開発が加速することが期待できる。よって, 本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6661 号	氏 名	岩本 青空
主論文題名：  ラクタムを基盤としたキラル環状ニトロン合成法の開発と Calyciphylline B 類の全合成			
<p>ニトロンは、[3+2]環化付加反応など様々な反応に利用できる 1,3-双極子である。特に、キラルな環状ニトロンは、有用な生物活性をもつ多環性天然物の合成中間体として、その利用が期待されている。しかし、その開発は遅れており、実用的な合成方法の開発が望まれている。以上を背景に、本論文では、キラルなラクタムの窒素酸化反応と、生じた <i>N</i>-ヒドロキシラクタムの還元的ニトロン化、または求核的ニトロン化を組み合わせたキラル環状ニトロン合成法の開発と、calyciphylline B 類の全合成への応用について述べた。</p> <p>緒論では、これまでのキラル環状ニトロンの合成方法や、その応用例について先行研究をまとめた。また、calyciphylline B 類の単離・構造的特徴、生物活性や生合成仮説について述べ、これまでの合成例を紹介した。</p> <p>本論第一章では、ラクタムを基盤としたキラル環状ニトロン合成法の開発について述べた。汎用性の高い合成法として、入手容易なラクタムを出発原料とし、ラクタム窒素原子の酸化反応と、続く <i>N</i>-ヒドロキシラクタムに対する還元反応や求核付加反応を用いて、様々なキラル環状ニトロンを合成する手法を開発した。一般的に、ラクタムの窒素原子は電子密度が低く、酸化反応が難しい。そこで、ラクタムのカルボニル基を Meerwein 試薬によりイミデートとした。続いて、<i>m</i>CPBA で窒素原子を酸化した後、シュウ酸と <math>K_2CO_3</math> を加えると、キラルな <i>N</i>-ヒドロキシラクタムが合成できた。得られた <i>N</i>-ヒドロキシラクタムに対し、Ir 触媒による還元反応を用いると、キラル環状ニトロンが生成した。また、<i>N</i>-ヒドロキシラクタムのヒドロキシ基を SEM 基で保護した後、有機リチウム試薬とトシル酸を順次添加すると、様々な置換基を有するキラル環状ニトロンが合成できた。</p> <p>本論第二章では、calyciphylline B 類の全合成について述べた。calyciphylline B 類は、ヒトがん細胞株に対する細胞毒性を有するなど、医薬品のリード化合物として注目されている天然物群である。構造的特徴として、第四級炭素を含む 8 つの不斉炭素を含む多環性骨格が挙げられる。初めに、入手容易なキラルラクタムに対し、<math>\alpha</math> 位アルキル化による側鎖導入と、速度論的な立体化学の異性化反応を経て、シス二置換ラクタムを合成した。得られたキラルラクタムの窒素原子を酸化した後、Ir 触媒による還元的なニトロン化、続く分子内[3+2]環化付加反応により、第四級炭素を含む三環性イソオキサゾリジンの合成に成功した。各種フラグメントを導入し、calyciphylline B 類の共通中間体を構築した。共通中間体の分子内アリル化では、環化による五環性骨格の構築と同時に C6 位が異性化し、C6-C7 シス置換体を与えた。一方、共通中間体のケトンをおレフィン化した後、分子内アリル化を適用すると、C6 位が異性化せず環化反応が進行し、C6-C7 トランス置換体を与えた。得られた C6-C7 シス置換体から isodaphlongamine H の全合成を全 22 工程で達成した。また、合成した化合物群を用い、ヒトがん細胞株に対する細胞毒性を評価すると、isodaphlongamine H よりも高活性な化合物を見出した。</p> <p>結論では、本研究の成果を簡潔にまとめた。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6661 号	氏 名	岩本 青空
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授 博士（理学）	佐藤 隆章
	副査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	垣内 史敏
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	大松 亨介
		慶應義塾大学准教授 博士（工学）	高橋 大介

学士（工学）、修士（理学）岩本青空君提出の学位請求論文は、「ラクタムを基盤としたキラル環状ニトロン合成法の開発と Calyciphylline B 類の全合成」と題し、緒論、本論二章、総括および実験編より構成されている。

ニトロンは、[3+2]環化付加反応など様々な反応に利用できる 1,3-双極子である。特に、キラルな環状ニトロンは、生物活性をもつ多環性天然物の有用な合成中間体として期待されており、実用的な合成法の開発が望まれている。本論文では、キラルなラクタムの窒素酸化反応と、生じた *N*-ヒドロキシラクタムの還元的ニトロン化、または求核的ニトロン化を組み合わせたキラル環状ニトロン合成法の開発と、calyciphylline B 類の全合成への応用について述べている。

緒論では、これまでのキラル環状ニトロンの合成法や、その応用例について先行研究をまとめている。また、calyciphylline B 類の単離と構造的特徴、生物活性、生合成仮説について述べ、これまでの合成例についてまとめている。

本論第一章では、ラクタムを基盤としたキラル環状ニトロン合成法の開発について述べている。入手容易なキラルラクタムを出発原料とし、ラクタム窒素原子の酸化反応、続く *N*-ヒドロキシラクタムに対する還元反応や求核付加反応を用いて、様々なキラル環状ニトロンを合成する手法を開発している。一般的に、ラクタムの窒素原子は電子密度が低く、酸化が難しい。そこで、ラクタムのカルボニル基を Meerwein 試薬によりイミデートとし、*m*CPBA により窒素原子を酸化している。その後、シュウ酸と  $K_2CO_3$  を加え、キラルな *N*-ヒドロキシラクタムを合成している。続いて、得られた *N*-ヒドロキシラクタムに対し、Ir 触媒を用いたシランによる還元反応で、キラル環状ニトロンを合成している。また、*N*-ヒドロキシラクタムのヒドロキシ基を SEM 基で保護した後、有機リチウム試薬とトシル酸を順次添加し、様々な置換基を有するキラル環状ニトロンを合成している。

本論第二章では、calyciphylline B 類の全合成について述べている。calyciphylline B 類は、ヒトがんに細胞株に対する細胞毒性を有するなど、医薬品のリード化合物として注目されている天然有機化合物群である。構造的な特徴として、第四級炭素を含む 8 つの不斉炭素で構成された多環性骨格が挙げられる。初めに、入手容易なキラルラクタムに対し、 $\alpha$  位アルキル化による側鎖導入と、速度論的な立体化学の異性化反応を経て、シス二置換ラクタムを合成している。キラルラクタムの窒素原子を酸化した後、Ir 触媒を用いたシランによる還元的なニトロン化、続く分子内[3+2]環化付加反応により、第四級炭素を含む三環性イソオキサゾリジンの合成に成功している。各種フラグメントを導入して得られる共通中間体に対し、分子内アリル化反応を用いた五環性骨格の構築では、同時に C6 位が異性化し、C6-C7 シス置換体を得ている。一方、共通中間体のケトンをオレフィン化してから分子内アリル化反応を適用し、C6 位が異性化しない環化反応を見出し、C6-C7 トランス置換体を合成している。得られた C6-C7 シス置換体から isodaphlongamine H の全合成を全 22 工程で達成している。また、合成した化合物を用いたヒトがんに細胞株に対する細胞毒性の評価では、isodaphlongamine H より高活性な化合物を見出している。

総括では、本研究の成果がまとめられており、実験編には本論文における実験操作および反応生成物のスペクトルデータ等が記述されている。

以上、著者は本研究において、ラクタムの窒素酸化反応と、生じた *N*-ヒドロキシラクタムの還元的ニトロン化、または求核的ニトロン化を組み合わせたキラル環状ニトロン合成法の開発と応用に成功している。本手法は、isodaphlongamine H 以外の様々な生物活性天然物の全合成へ展開可能であり、本手法が創薬シーズの供給における有用な合成法であることを実証している。著者のこれらの研究成果は、有機合成化学・創薬化学の進展に貢献し、理学上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6662 号	氏 名	小野 圭吾
主論文題名： 層状構造を有する新規熱電材料群 143-Zintl 相化合物の開発			
<p>熱電変換とは温度差によって発電する技術であり、廃熱を電力に直接変換できることから注目を集めている。一方で、熱電変換の効率が低いため広く社会には普及していない。そのため、高性能な熱電材料の探索が行われている。本論文は、143-Zintl 相化合物に注目し、<math>\text{RbZn}_4\text{As}_3</math> 及び <math>\text{RbCd}_4\text{As}_3</math> の熱電特性を報告する。本論文は、143-Zintl 相化合物が高い熱電性能を示すことを明らかにする。143-Zintl 相化合物は新規の熱電材料群である。</p> <p>第 1 章では、熱電変換の熱力学としての作動原理及び Zintl 相化合物の結晶学的な概要を記述する。</p> <p>第 2 章では、評価装置の測定原理及び試料の合成手法を記述する。</p> <p>第 3 章では、<math>\text{RbZn}_4\text{As}_3</math> の開発について記述する。試料は固相反応法により合成し、単相の試料を得る。単相試料の格子熱伝導率は、<math>\kappa_L = 0.77 \text{ W/mK}</math> (<math>T = 797 \text{ K}</math>) と極めて低い値である。この低い格子熱伝導率は歪んだ <math>\text{ZnAs}_4</math> 四面体及び <math>\text{Rb}</math> の大きな振動に起因することが結晶構造解析により明らかとなった。熱電性能を最大化するため <math>\text{Zn}</math> サイトへの <math>\text{Cu}</math> ドープによりキャリア濃度の最適化を示す。最適化された組成にて、無次元性能指数 <math>ZT = 0.53</math> (<math>T = 797 \text{ K}</math>) が得られた。本成果は、電子輸送特性、熱輸送特性ともに、143-Zintl 相化合物は新規の熱電材料群といえる。</p> <p>第 4 章では、<math>\text{RbCd}_{4-x}\text{Zn}_x\text{As}_3</math> (<math>x = 0.0 - 4.0</math>) の相図を記述する。室温において、<math>x = 0.60</math> 近傍で構造相転移が生じ、それよりも <math>\text{Cd}</math> 側の組成では <math>\text{RbCd}_4\text{As}_3</math> 型、<math>\text{Zn}</math> 側の組成では <math>\text{KCu}_4\text{S}_3</math> 型の結晶構造を示す。さらに、<math>x = 0.60 - 1.3</math> は準安定相であり、その結晶構造は <math>\text{RbCd}_4\text{As}_3</math> 型である。</p> <p>第 5 章では、<math>\text{RbCd}_{4-x}\text{Zn}_x\text{As}_3</math> (<math>x = 0.0 - 0.5</math>) における n 型熱電変換材料の開発について記述する。試料は固相反応法により合成し、単相の試料が得られた。いずれの組成においても Seebeck 係数は負の値を示し、Zintl 相化合物としては珍しい n 型の材料である。格子熱伝導率は極めて低く、<math>x = 0.4</math> において <math>\kappa_L = 0.56 \text{ W/mK}</math> (<math>T = 620 \text{ K}</math>) である。Hall 移動度は室温において最大で <math>\mu_H = 2.0 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}</math> (<math>x = 0.1</math>) に達した。さらに、<math>ZT</math> は最大で <math>0.43</math> (<math>x = 0.4, T = 620 \text{ K}</math>) であり、高性能な新規 n 型材料であることを示す。また、flux 法を用いた <math>\text{RbCd}_4\text{As}_3</math> 及び類似物質 <math>\text{KCu}_4\text{S}_3</math> の純良な大型単結晶の合成方法を示す。</p> <p>第 6 章では、本研究によって得られた知見を総括する。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6662 号	氏 名	小野 圭吾
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士 (工学)	神原 陽一
副査	慶應義塾大学教授	博士 (工学)	的場 正憲
	慶應義塾大学准教授	Ph. D.	清水 智子
	慶應義塾大学教授	博士 (工学)	海住 英生
	産業技術総合研究所首席研究員	博士 (理学)	李 哲虎
<p>学士(工学)、修士(工学)、小野圭吾君の学位請求論文は、「層状構造を有する新規熱電材料群 143-Zintl 相化合物の開発」と題し、全六章から構成されている。</p> <p>廃熱を電力に変換する発電技術である熱電変換技術は、環境発電を実現する主要な技術であり、その変換効率の向上が求められている。熱電変換の効率は、電気抵抗率、Seebeck 係数、熱伝導率、絶対温度(<math>T</math>)より定まる無次元性能指数(<math>ZT</math>)により評価される。この <math>ZT</math> が 1 を超える材料は実用的である。金属間化合物の内「結晶中のカチオンがアニオンに電子を供給し、電子を受け取ったアニオンがオクテット(八隅子)則を満たす」ように共有結合、または孤立電子対を形成する金属間化合物をドイツの化学者であった Eduard Zintl の人名を引用し、Zintl 相化合物と呼ぶ。Zintl 相化合物は、その低い格子熱伝導率により、高い熱電変換性能を示す材料群として知られている。三元系の Zintl 相化合物は、その化学式で示される元素の物質質量比を名称に用いた化合物群として分類される。本論文の研究対象である Zintl 相化合物 <math>\text{RbZn}_4\text{As}_3</math>、<math>\text{RbCd}_4\text{As}_3</math> 及び この二つの化学種を母相とした固溶体、異価数イオン部分置換を施した試料は 143-Zintl 相化合物に分類される。</p> <p>本論文は、143-Zintl 相化合物を合成し、化学的な分析を行い、その電荷担体と熱の輸送現象を測定し、143-Zintl 相化合物の <math>ZT</math> が <math>T=797\text{ K}</math> において <math>ZT=0.53</math> に達することを報告する。</p> <p>第一章は、序論であり Zintl 相化合物の一種である 122-Zintl 相化合物に関する過去の文献を精査し、その熱力学的な安定性、電気伝導性を、単位胞中に存在する分子構造に対する化学結合、配位構造を考慮した、化学的な経験則に基づき説明する。開発対象である 143-Zintl 相化合物は、既存の 122-Zintl 相化合物の類似化合物として解釈された。143-Zintl 相化合物は、高い <math>ZT</math> が期待されているにも関わらず、2022 年以前の報告例において、その <math>ZT</math> は 0.1 を下回っていた。</p> <p>第二章では、結晶構造と輸送現象評価の原理、方法、及び試料の合成手法について報告する。</p> <p>第三章では、<math>\text{RbZn}_4\text{As}_3</math> の開発について報告する。試料は固相反応により合成し、単相の試料を得た。<math>\text{RbZn}_4\text{As}_3</math> の格子熱伝導率(<math>\kappa_L</math>)を測定し、<math>\kappa_L = 0.77\text{ W/mK}</math> (<math>T = 797\text{ K}</math>) と極めて低い値を得た。この低い <math>\kappa_L</math> は歪んだ <math>\text{ZnAs}_4</math> 四面体及び層間の Rb の大きな振動に起因することを結晶構造解析により明らかにする。<math>ZT</math> を最大化するため、Zn サイトへの Cu 部分置換によりキャリア濃度の最適化を試みる。その結果、<math>ZT = 0.53</math> (<math>T = 797\text{ K}</math>)を示す化学組成を明らかにした。この報告は 143-Zintl 相化合物を実用的な熱電材料候補群であると、世界で初めて示した。</p> <p>第四章では、<math>\text{RbCd}_x\text{Zn}_x\text{As}_3</math> の相図を報告する。室温において、<math>x = 0.60</math> 近傍で構造相転移が生じる。<math>x &lt; 0.60</math> の Cd 側の組成では <math>\text{RbCd}_4\text{As}_3</math> 型(空間群: R3-m)、<math>x &gt; 0.60</math> の Zn 側の組成では <math>\text{KCu}_4\text{S}_3</math> 型(空間群: P4/mmm)の結晶構造を有することが示された。さらに、<math>x = 0.60</math>-1.3 の組成では、700 K よりも高温側に <math>\text{RbCd}_4\text{As}_3</math> 型の結晶相の存在が示された。<math>x = 0.60</math>-1.3 の組成の結晶は、徐冷後は熱力学的安定相として <math>\text{KCu}_4\text{S}_3</math> 型を示し、急冷後は準安定相として <math>\text{RbCd}_4\text{As}_3</math> 型を示す。</p> <p>第五章では、<math>\text{RbCd}_4\text{As}_3</math> 及び <math>\text{KCd}_4\text{As}_3</math> の単結晶合成に関して報告する。新規な自己 Flux 法を用いることで純良な大型単結晶を得た。</p> <p>第六章は、総合討論であり 143-Zintl 相化合物は 122-Zintl 相化合物と同じく、熱電変換材料として有望であると結論する。143-Zintl 相化合物は、Zintl 相化合物としては珍しい <math>n</math> 型の極性を示す組成を得ることができる。また、<math>2,000\text{ cm}^2/\text{Vs}</math> に達する比較的高い移動度を示す。この二つの機能性を併せ持つ実用的な熱電変換材料候補は新しい。</p> <p>以上、本論文は、熱電変換材料候補である 143-Zintl 相化合物の作製と評価という観点のみならず、既存の仮説の検証を物性物理と計測の双方の視点により示すものであり、工学上寄与するところが少なくない。よって、審査担当者は、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。</p>			

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6663 号	氏 名	河内 優太
主論文題名： Ultrafast detection of single-photon level femtosecond photon echoes from coherently controlled quantum dots (コヒーレント制御された量子ドットにおける単一光子レベルフェムト秒フォトンエコーの超高速検出)			
<p>秘匿性の高い通信や分散量子コンピューティングの実現に向けて、光を用いた量子通信技術の研究開発が急速に進展している。量子通信においては、量子ビットとして機能する単一光子源、量子中継に不可欠な量子メモリ、ならびに量子状態を最終的に評価する単一光子検出器の三要素が中核技術である。将来的な量子情報伝送密度の向上には、量子ビットを担う光パルスのさらなる短パルス化が不可欠であり、フェムト秒時間領域で動作する量子通信プラットフォームの構築が強く求められている。通信波長帯におけるフェムト秒単一光子源は既の実証されている一方で、THz 帯域の広いスペクトル幅を有するフェムト秒光パルスを保存可能な量子メモリはこれまで実現されていなかった。また、従来の単一光子検出器の時間分解能はピコ秒域に制限されており、フェムト秒領域の量子信号を直接評価することは困難であった。本研究では、THz 域の不均一幅を有する歪補償自己形成 InAs 量子ドット集合体とフォトンエコー法を組み合わせることで、フェムト秒量子信号の保存が可能な量子メモリを開発した。さらに、周波数上方変換を用いた単一光子検出器を開発し、フェムト秒時間分解能での量子状態測定を可能とした。これらの手法を統合することで、既存の量子通信プラットフォームをフェムト秒時間領域へと拡張するための基盤技術を確立した。</p> <p>本論文は全 9 章から構成される。第 1 章では、量子メモリおよび単一光子検出器の研究背景と本研究の目的を述べる。第 2 章では光の量子性および Time-bin 量子ビットに関する基礎事項を整理する。第 3 章では二準位系と光の相互作用、フォトンエコー法の原理および量子メモリへの応用について述べる。第 4 章では、本研究で用いた歪補償 InAs 量子ドット集合体の構造・物性、ならびにフォトンエコー生成における課題と、それを克服するための Adiabatic Rapid Passage (ARP) の原理を説明する。第 5 章では、量子ドット集合体におけるフォトンエコー生成実験およびシミュレーション結果を示し、ARP によるロバストな量子制御により THz 不均一集合体においても希土類イオン系に匹敵するフォトンエコー信号増強が可能であることを明らかにする。第 6 章では、フェムト秒フォトンエコー信号検出のための周波数上方変換単一光子検出器の原理と性能指標について述べる。第 7 章では同検出器の検出性能を定量的に評価し、時間分解検出における設計指針を示すとともに、フェムト秒 Time-bin 量子ビット評価のデモンストレーションを行う。第 8 章では前章までの技術を統合し、量子ドット集合体に保存した Time-bin 信号を周波数上方変換単一光子検出器によって測定、保存前の Time-bin 信号に付与された位相情報が保持されていることを示す。第 9 章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の研究展望について述べる。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6663 号	氏 名	河内 優太
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 早瀬 潤子
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 渡邊 紳一
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 太田 泰友
		物質・材料研究機構主幹研究員	博士（工学） 栗村 直
<p>学士（工学）、修士（工学）河内優太君の学位請求論文は「Ultrafast detection of single-photon level femtosecond photon echoes from coherently controlled quantum dots（コヒーレント制御された量子ドットにおける単一光子レベルフェムト秒フォトンエコーの超高速検出）」と題し、全 9 章より構成される。</p> <p>秘匿性の高い通信や分散量子コンピューティングの実現に向けて、光を用いた量子通信技術の研究開発が急速に進展している。量子通信においては、量子ビットとして機能する単一光子源、量子中継に不可欠な量子メモリ、ならびに量子状態を最終的に評価する単一光子検出器の三要素が中核技術である。将来的な量子情報伝送密度の向上には、量子ビットを担う光パルスのさらなる短パルス化が不可欠であり、フェムト秒時間領域で動作する量子通信プラットフォームの構築が強く求められている。通信波長帯におけるフェムト秒単一光子源は既の実証されている一方で、テラヘルツ（THz）帯域の広いスペクトル幅を有するフェムト秒光パルスを保存可能な量子メモリはこれまで実現されていなかった。また、従来の単一光子検出器の時間分解能はピコ秒域に制限されており、フェムト秒領域の量子信号を直接評価することは困難であった。本研究では、THz 域の不均一幅を有する歪補償自己形成 InAs 量子ドット集合体とフォトンエコー法を組み合わせることで、フェムト秒量子信号の保存が可能な量子メモリを開発している。さらに、周波数上方変換を用いた単一光子検出器を開発し、フェムト秒時間分解能での量子状態測定を実現している。これらの手法を統合することで、既存の量子通信プラットフォームをフェムト秒時間領域へと拡張するための基盤技術を確立している。</p> <p>本論文の第 1 章では序論として、量子メモリおよび単一光子検出器の研究背景と本研究の目的を述べている。第 2 章では光の量子性および Time-bin 量子ビットに関する基礎事項を整理している。第 3 章では二準位系と光の相互作用、フォトンエコー法の原理および量子メモリへの応用について述べている。第 4 章では、本研究で用いた歪補償 InAs 量子ドット集合体の構造・物性、ならびにフォトンエコー生成における課題と、それを克服するためのチャープパルスによる Adiabatic Rapid Passage (ARP) の原理を説明している。第 5 章では、量子ドット集合体におけるフォトンエコー生成実験およびシミュレーション結果を示し、ARP によるロバストな量子制御により THz 不均一集合体においても希土類イオン系に匹敵するフォトンエコー信号増強が可能であることを明らかにしている。第 6 章では、フェムト秒フォトンエコー信号検出のための周波数上方変換単一光子検出器の原理と性能指標について述べている。第 7 章では同検出器の検出性能を定量的に評価し、時間分解検出における設計指針を示すとともに、フェムト秒 Time-bin 量子ビット評価のデモンストレーションを行なっている。第 8 章では前章までの技術を統合し、量子ドット集合体に保存した Time-bin 信号を周波数上方変換単一光子検出器によって測定、保存前の Time-bin 信号に付与された位相情報が高い忠実度で保持されていることを示している。第 9 章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の研究展望について述べている。</p> <p>以上、本論文は、フェムト秒領域における量子ドットの超高速コヒーレント制御と量子メモリ応用、ならびに単一光子の超高速検出に関する新たな知見を示しており、量子光学・量子技術分野への貢献が認められる。</p> <p>よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。</p>			

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6664 号	氏 名	瀧井 優臣
主 論 文 題 名： Chemical Modification Effect and Tailoring Spin Alignment in Quinoline-Based Nitroxyl Radical Crystals (キノリンを基盤とするニトロキシラジカル結晶における 化学修飾の効果とスピン整列制御)			
<p>安定有機ラジカルなど分子中に不対電子を持つ開殻分子は、基礎科学分野のみならず機能物質として材料化学分野においても盛んに研究されている。中でも不対電子が持つ磁気モーメントを活用した分子磁性研究においては、分子レベルでの設計と分子間相互作用を活用した結晶設計を階層的に行うことで、多様な磁性発現が期待される。磁性材料として有用な強磁性的スピン整列を有機結晶中で実現するためには、結晶構造と不対電子間の相互作用メカニズムの関連性を紐解き、新たな不対電子の整列様式を確立することが必要となる。本研究では、キノリンを基盤とした有機ラジカル分子に嵩高い置換基と分子間相互作用を誘起する置換基を導入することで、これらが分子集積形態に与える影響と磁氣的相互作用の相関を議論した。</p> <p>第一章では、分子磁性体の構築に用いる基礎理論と安定有機ラジカルの物性について述べている。</p> <p>第二章では、5位にメトキシ基を導入したキノリン <i>N</i>-オキシラジカルを合成し、電子構造および固体磁気特性に与える置換基効果を議論した。キノリン環は、フェニル環に比べ合成化学的に修飾可能な置換部位が多いため多様な化学修飾が期待される。また、骨格内へのスピン源の導入およびラジカル骨格の周辺への置換によって、キノリン環上に半占軌道 (SOMO) およびスピン密度が分布するため、分子間の磁氣的相互作用を伝達する可能性が期待される。EPR 測定から得られるスピン密度分布および単結晶 X 線構造解析から得られる集積形態と SQUID 磁気測定による磁気特性との相関を明らかにした。計算化学的手法により磁氣的相互作用の経路を特定し、スピン整列様式について考察した。結晶中では <math>\pi</math>スタッキングした二量体を形成しており、この二分子間に強磁性的相互作用がはたらいっていることが示唆された。この強磁性的相互作用はメトキシ基導入により <math>\pi</math>スタッキング様式が変化したためであると考察した。</p> <p>第三章では、5位にエチニル基を導入した誘導体において、エチニル基末端の水素原子とニトロキシド酸素原子間に水素結合が観測された。エチニル基を介した相互作用は、計算化学的手法では強磁性的であったが、隣接分子との接近により実験的には反強磁性的な相互作用が確認された。一方、5位にトリメチルシリルエチニル基を導入した誘導体では、トリメチルシリル基とニトロキシド酸素原子間に接近が見られたが、隣接する分子接近により弱いながら強磁性的相互作用が見られた。</p> <p>第四章では、5位または7位にヨウ素を導入したキノリン <i>N</i>-オキシラジカルを合成し、その構造-磁性相関について議論した。単結晶構造解析、SQUID 磁気測定ならびに計算化学的手法により磁気相互作用経路を特定した。また、5位にヨウ素を導入した誘導体ではヨウ素とニトロキシド酸素原子間にハロゲン結合が観測された。7位にヨウ素を導入した誘導体では、<math>\pi</math>スタッキングによるカラム構造が認められ、これに基づき磁氣的には反強磁性連鎖の形成が確認された。</p> <p>第五章では、ニトロニトロキシドを置換した 2-フェニルキノリン <i>N</i>-オキシラジカルを対象に結晶構造と磁性の相関を議論した。2-フェニルキノリン <i>N</i>-オキシラジカルでは、二分子独立の結晶構造が得られ、同一結晶内に磁氣的相互作用の大きさが異なる分子対が共存していた。</p> <p>以上より、本論文ではキノリン骨格を用いた <i>N</i>-オキシラジカルおよびニトロニトロキシドを置換した 2-フェニルキノリン <i>N</i>-オキシラジカル誘導体群を系統的に合成し、それらの構造-磁性相関を詳細に議論し、水素結合、ハロゲン結合の導入によりこれらキノリン骨格が分子磁性体の構築に有用な基本骨格となり得ることを明らかにした。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6664 号	氏 名	瀧井 優臣
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 工学博士	吉岡 直樹
	副査	慶應義塾大学教授 博士（理学）	近藤 寛
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	羽曾部 卓
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	畑中 美穂

学士（工学）、修士（工学）瀧井 優臣 君提出の学位請求論文は「Chemical Modification Effect and Tailoring Spin Alignment in Quinoline-Based Nitroxyl Radical Crystals（キノリンを基盤とするニトロキシラジカル結晶における化学修飾の効果とスピン整列制御）」と題し、全七章で構成されている。

安定有機ラジカルなど分子中に不対電子を持つ開殻分子は、基礎科学分野のみならず機能物質として材料化学分野においても盛んに研究されている。スピン整列を有機結晶中で実現するためには、結晶構造と不対電子間の相互作用メカニズムの関連性を紐解き、新たな不対電子の整列様式を確立することが必要である。本論文では、キノリンを基盤とした有機ラジカル分子に嵩高い置換基と分子間相互作用を誘起する置換基を導入し、これらが分子集積形態に与える影響と磁氣的相互作用の相関について詳細に議論している。

第一章では、分子磁性体の構築に用いる理論と安定有機ラジカルの物性について述べている。

第二章では、5位にメトキシ基を導入したキノリン *N*-オキシラジカルを合成し、電子構造および固体磁気特性に与える置換基効果を議論している。キノリン環は、フェニル環に比べ合成化学的に修飾可能な置換部位が多いため多様な化学修飾が期待される。また、骨格内へのスピン源の導入およびラジカル骨格の周辺への置換によって、キノリン環上に半占軌道（SOMO）およびスピン密度が分布するため、分子間の磁氣的相互作用を伝達する可能性が期待される。EPR 測定から得たスピン密度分布および X 線構造解析から明らかにされた集積形態と SQUID 測定による磁気特性の相関を議論している。メトキシ基の導入により  $\pi$ スタッキング様式が変化し、強磁性的な相互作用を有する二量体が結晶中に形成していることを明らかにしている。

第三章では、5位にエチニル基を導入した誘導体について議論している。エチニル基末端の水素原子とニトロキシド酸素原子の間に水素結合の形成を観測している。エチニル基を介した相互作用は、計算化学的手法では強磁性的であったが、実験的には隣接分子との接近により反強磁性的な相互作用を観測している。一方、トリメチルシリルエチニル基を導入した誘導体では、隣接する分子接近により弱いながら強磁性的な相互作用を確認している。

第四章では、5位または7位にヨウ素を導入したキノリン *N*-オキシラジカルを合成し、その構造-磁性相関について議論している。単結晶構造解析、SQUID 測定ならびに計算化学的手法により磁気相互作用の経路を特定している。また、5位にヨウ素を導入した誘導体ではヨウ素とニトロキシド酸素原子間にハロゲン結合を観測している。7位にヨウ素を導入した誘導体では、 $\pi$ スタッキングによるカラム構造が構築され、磁氣的には反強磁性的な連鎖形成を見出している。

第五章では、ニトロニルニトロキシドを置換した 2-フェニルキノリン *N*-オキシラジカルを対象に結晶構造と磁性の相関を議論している。この誘導体では、二分子独立の結晶構造が観測され、磁氣的相互作用の大きさが異なる分子対が同一結晶内に共存していることを明らかにしている。

第六章は、結論であり上記の内容を総括している。第七章には、試料の合成方法が詳細に記載されている。

以上より、本論文ではキノリン骨格を用いた *N*-オキシラジカルおよびニトロニルニトロキシドを置換した 2-フェニルキノリン *N*-オキシラジカルを系統的に合成・評価し、これらキノリン骨格が分子磁性体の構築に有用な基本骨格となり得ることを明らかにしている。これらの成果は、分子磁性研究のみならず、機能材料研究の発展に対し寄与するところが少なくない。

よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6665 号	氏 名	安井 蒼一郎
主 論 文 題 名 :			
ロバタミド類の全合成および アミド基を基盤としたセコスリキシドのポリプロピオネート側鎖の迅速合成			
<p>ポリケチド類は、低分子医薬品の約 20%を占める重要な天然物群である。供給面の制限により、多くのポリケチド類が医薬品候補として眠っており、完全化学合成の確立が望まれている。しかし、炭素骨格上には、多数の二重結合やヒドロキシ基が、多様な立体化学で含まれており、化学合成による実践的供給を妨げている。本論文では、ポリケチド類の効率的な全合成を指向し、合成終盤のエナミド側鎖導入に基づくロバタミド類の全合成と、イリジウム触媒とモルホリンアミド基を利用したセコスリキシドのポリプロピオネート側鎖の合成について述べた。</p> <p>緒論では、ベンゾラクトン系エナミド天然物の構造や生物活性を述べ、これまでの全合成例をまとめた。続いて、ポリケチド類に広くみられるポリプロピオネート構造について、<math>\beta</math>-ケトアミドを利用した合成法をまとめた。また、ポリプロピオネート構造を有する天然物として、セコスリキシドの単離、構造的特徴、生物活性、および全合成例を紹介した。</p> <p>本論第一章では、ロバタミド類の全合成について述べた。初めに、Z 体の三置換オレフィンを含むアリルアリアル構造を、1,1-二置換アレンに対するヒドロホウ素化と右田-小杉-Stille カップリングの組み合わせにより構築した。ヒドロホウ素化では、ホウ素上の置換基をかき高くすると、速度論的に反応が進行し、Z 体の三置換オレフィンが得られた。また、右田-小杉-Stille カップリングでは、三置換オレフィンの異性化が問題となったが、銅塩の添加により抑制でき、Z 体のアリルアリアル構造の構築に成功した。15 員環マクロビスラク톤は、その原料・生成物ともに不安定な構造であり、共存できる穏和な反応条件の精査が重要であった。例えば、15 員環マクロビスラク톤の原料は、塩基性条件に不安定であったため、酸性の反応条件を選択し、マクロラクトン化に成功した。共通中間体の 15 員環マクロビスラク톤に対し、ヒドロジルコニウム化と銅塩を用いるカップリング反応にて、2 種類のエナミド側鎖を導入した。こうして、合成終盤における穏和なエナミド側鎖の構築法を開発し、ロバタミド A および C の全合成を達成した。</p> <p>本論第二章では、セコスリキシドの合成研究について述べた。セコスリキシドは、14 員環マクロラク톤にポリプロピオネート側鎖を有するポリケチド天然物である。過去に一例のみ全合成例があるが、工程数の点で改善の余地があった。ポリプロピオネート構造を迅速に構築するため、モルホリンアミド基を用いたアルドール反応と、イリジウム触媒によるアミド基の還元反応を逐次的に利用する合成法を確立した。こうして、セコスリキシドの C11-C21 ポリプロピオネート部位を、市販の原料よりわずか 8 工程にて合成できるようになった。</p> <p>総括では、本研究の成果を簡潔にまとめた。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6665 号	氏 名	安井 蒼一郎
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授 博士（理学）	佐藤 隆章
	副査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	高尾 賢一
		慶應義塾大学教授 博士（理学）	末永 聖武
		慶應義塾大学准教授 Ph. D.	河内 卓彌
<p>学士（工学）、修士（理学）安井蒼一郎君提出の学位請求論文は、「ロバタミド類の全合成およびアミド基を基盤としたセコスリキシドのポリプロピオネート側鎖の迅速合成」と題し、緒論、本論二章、総括および実験編より構成されている。</p> <p>ポリケチド類は、低分子医薬品の約 20%を占める重要な天然物群である。供給面の制限により、多くのポリケチド類が医薬品候補のまま未開発であり、完全化学合成の確立が望まれている。しかし、炭素骨格上には、多様な二重結合や、ヒドロキシ基を含む多数の不斉点をもつため、化学合成による実践的供給が妨げられている。本論文では、ポリケチド類の効率的な全合成を指向し、合成終盤のエナミド側鎖導入を基本戦略としたロバタミド類の全合成と、イリジウム触媒とモルホリンアミド基を利用したセコスリキシドのポリプロピオネート側鎖の合成について述べている。</p> <p>緒論では、ベンゾラクトン系エナミド天然物の構造や生物活性について述べ、これまでの全合成例をまとめている。続いて、ポリケチド類に広くみられるポリプロピオネート構造について、<math>\beta</math>-ケトアミドを利用した合成法を記載している。また、ポリプロピオネート構造を有する天然物として、セコスリキシドの単離、構造的特徴、生物活性、および全合成例を紹介している。</p> <p>本論第一章では、ロバタミド類の全合成について述べている。初めに、Z 体の三置換オレフィンを含むアリルアリアル構造を、1,1-二置換アレンに対するヒドロホウ素化と右田-小杉-Stille カップリングの組み合わせにより立体選択的に構築している。ヒドロホウ素化では、ホウ素上の置換基をかさ高くした速度論的な反応条件により、Z 体の三置換オレフィンを構築している。また、右田-小杉-Stille カップリングでは、三置換オレフィンの異性化が問題となったが、銅塩の添加により異性化を抑制し、Z 体のアリルアリアル構造の構築に成功している。15 員環マクロビスラクトンは、その原料・生成物ともに不安定な構造であり、共存できる穏和な反応条件の確立が重要となる。例えば、15 員環マクロビスラクトンの出発原料は、一般的に使用される塩基性条件に不安定であるため、酸性の反応条件を選択し、マクロラクトン化に成功している。続いて、共通中間体の 15 員環マクロビスラクトンに対し、アルキンへのヒドロジルコニウム化と銅塩を用いるカップリング反応を組み合わせ、合成終盤において 2 種類のエナミド側鎖を導入し、ロバタミド A および C の全合成を達成している。</p> <p>本論第二章では、セコスリキシドの合成研究について述べている。セコスリキシドは、14 員環マクロラクトンにポリプロピオネート側鎖を有するポリケチド天然物である。過去に一例のみ全合成例が報告されているが、工程数の点で改善の余地がある。ポリプロピオネート構造を迅速に構築するため、モルホリンアミド基を用いたアルドール反応と、イリジウム触媒によるアミド基の還元反応を逐次的に利用する合成法の開発に成功している。これにより、セコスリキシドの C11-C21 ポリプロピオネート部位を、市販の原料よりわずか 8 工程にて合成している。</p> <p>総括では、本研究の成果がまとめられており、実験編には本論文における実験操作および反応生成物のスペクトルデータ等が記述されている。</p> <p>以上、著者は本研究において、多数の二重結合を含む 15 員環マクロビスラクトンの構築法や、ヒドロジルコニウム化と銅塩を組み合わせる合成終盤のエナミド構築法、モルホリンアミドを用いたポリプロピオネート構築法は、様々な生物活性ポリケチド類の全合成へ応用可能であり、本手法が創薬シーズの合成における有用な合成法であることを実証している。著者のこれらの研究成果は、有機合成化学・創薬化学の進展に貢献し、理学上寄与するところが少なくない。</p> <p>よって、本論文の著者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。</p>			

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6666 号	氏 名	和知 秀忠
主論文題名： On Decomposition Theorem of the Coboundary Forms for Hydrodynamic Limit and Classification of Interactions (流体力学極限に関する余境界形式の分解定理と相互作用の分類について)			
<p>流体力学極限とは、大規模相互作用系として記述されるミクロな確率過程から、マクロな決定論的偏微分方程式を導く数学的手法のことである。Varadhan は非勾配系に対する流体力学極限の証明戦略として、閉<math>L^2</math>形式の分解定理による手法を提案した。従来、この定理の証明は、ミクロモデルの構造に大きく依存していた。しかし近年、坂内-亀谷-佐々田や坂内-佐々田らの研究によって、Varadhan の閉<math>L^2</math>形式の分解定理のアナロジーとして、余境界<math>L^2</math>形式の分解定理を、状態空間が有限である一般のモデルに対して証明された。本論文では、この余境界<math>L^2</math>形式の分解定理の状態空間が無限であるモデルに対する一般化と、この定理が適用可能な状態空間が有限なミクロモデルの構成・分類を行うものである。</p> <p>論文の前半では、坂内-佐々田による余境界<math>L^2</math>形式の分解定理を、状態空間が無限であるようなモデルに対して一般化する。この研究では、ミクロモデルとして扱われる Markov 過程の無限小生成作用素のコアに相当する関数空間を適切に選択することで、坂内-佐々田による議論を、より一般のモデルに対して適用することを可能にした。さらに、余境界<math>L^2</math>形式の分解定理を証明するのに十分な仮定を明示した。特に、これらの仮定は、流体力学極限に関する先行研究で扱われてきたモデルについては、自然に満たしていることが確認できる。</p> <p>後半では、坂内-亀谷-佐々田に導入された「相互作用」と呼ばれる概念について、流体力学極限の証明に必要とされる条件を満たす相互作用の構成方法と分類を行う。まず、二つの相互作用から、新たな相互作用を構成する方法として、相互作用のウェッジ和とボックス積を定義し、これら操作が元の二つの相互作用の性質を保存することを示す。また、相互作用の保存量に注目した分類手法を提案し、状態空間が小さい場合の相互作用を完全に決定した。さらに、流体力学極限の証明に必要とされる相互作用のある種のエルゴード性を、与えられた相互作用が満たしているかという決定問題の判定アルゴリズムが存在することを示した。これにより、流体力学極限の証明が期待される相互作用を系統的に列挙することが可能となった。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6666 号	氏 名	和知 秀忠
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（数理科学）	坂内 健一
	副査	慶應義塾大学教授 博士（数理科学）	勝良 健史
		慶應義塾大学教授 博士（数理科学）	坂川 博宣
		慶應義塾大学准教授 博士（数理科学）	服部 広大

学士（理学）、修士（理学）の学位を有する和知秀忠君提出の学位請求論文は、「On Decomposition Theorem of the Coboundary Forms for Hydrodynamic Limit and Classification of Interactions（流体力学極限に関する余境界形式の分解定理と相互作用の分類について）」と題し、本文は全3章11節、および付録1章3節（合計4章14節）から構成されている。

流体力学極限は、ミクロな粒子の挙動を記述する「大規模相互作用系（Large Scale Interacting System）」と呼ばれる確率過程から、決定論的なマクロの偏微分方程式を数学的に厳密に導出する手法であり、統計物理学に強固な数学的基礎を与えるものである。大規模相互作用系の研究はF. Spitzerによって始まり、その後、Guo, Papanicolaou, Varadhanによって「エントロピー法」という流体力学極限を証明するための一般的指針が提示され、局所流が勾配の形で表現される「勾配型モデル」の研究が飛躍的に進展した。一方で、より一般的な「非勾配型モデル」を扱うために、Varadhanは余境界形式の分解定理に基づく手法を提唱したが、その具体的な適用にはモデル依存の高度な議論が必要であり、実際に適用された例はいまだ限定的である。近年、坂内・亀谷・佐々田らは、Varadhanの手法を汎用的に適用するための理論的枠組みの構築を進めている。本論文はこの研究の流れを継承し、ミクロモデルにおける隣接頂点間の粒子の振る舞いを記述する「相互作用」について、二つの重要な成果を挙げている。第一の成果は、保存量を用いた相互作用の体系的な分類手法の確立である。第二の成果は、流体力学極限の導出において本質的な役割を果たす「Irreducibly Quantified」と呼ばれる性質について、それが満たされるか否かをアルゴリズムにより判定可能であること（すなわち決定可能性）の証明である。

本論文の第1章では、論文の概要が述べられている。1.1節では、流体力学極限の導入としてゼロレンジ過程（zero-range process）という基本例が解説されている。1.2節では本論文の2つの主結果が述べられており、1.3節では論文全体の構成が与えられている。

第2章では主結果の重要な動機付けとなる、大規模相互作用系の調和理論の概説が与えられている。2.1節では相互作用や付随する保存量などの定義が与えられ、2.2節では大規模相互作用系の幾何を反映した「一様コホモロジー」の理論が展開されている。2.3節では期待値0の局所関数が導入され、2.4節ではこれを用いた調和形式の理論が展開され、対応するマクロな偏微分方程式の拡散行列を与える調和周期行列を構成している。従来坂内・亀谷・佐々田の理論では局所状態が有限であることが仮定されていたが、本論文では理論を連続の場合に拡張している。

第3章では本論文の主結果が述べられている。3.1節では局所状態空間が有限の場合に、相互作用の定義と諸性質が述べられ、特に irreducibly quantified の定義が与えられている。3.2節では wedge sum や box product など、既存の相互作用から新しい相互作用を作る方法が与えられている。3.3節では相互作用の同値性の概念が定義され、本論文の最初の主結果である相互作用の分類方法が与えられている。特に局所状態の位数が3と4の場合に完全な分類を与えている。3.4節では、相互作用が irreducibly quantified であることが決定可能であることを証明している。付録のA.1節では局所状態の位数が5の場合に irreducibly quantified な相互作用の分類を与えている。A.2節では irreducibly quantified でない相互作用の例を与えている。A.3節では、一般の有限な局所状態に対して、unital な相互作用の例を与えている。

本論文において著者は、流体力学極限における相互作用の分類という新しい課題を見出し、一貫した体系化を行い、具体的な分類と判定アルゴリズムの構築という顕著な成果を挙げた。これは当該分野の発展に寄与する重要な貢献である。以上の理由により、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与されるに十分な資格を有するものと認められる。

# Thesis Abstract

Registration Number	"KOU" No.6667	Name	Meshram, Tushar Vijaykumar
Thesis Title			
Laser-Induced Periodic Surface Structures on Hard Brittle Materials			
<p>Hard-brittle materials such as silicon carbide (SiC), gallium nitride (GaN), and diamond are appealing for functional micro/nanostructured surfaces, yet their extreme hardness and chemical inertness severely limit the use of conventional surface-processing methods. This study uses femtosecond laser irradiation to form laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on reaction-bonded SiC, 4H- and 6H-SiC, GaN, and single-crystal diamond, and nanosecond pulsed laser irradiation to generate microcone structures on reaction-bonded SiC. The formation conditions of low- and high-spatial-frequency LIPSS (LSFL, HSFL), especially hybrid structures where HSFL form on LSFL via excitation of surface electromagnetic waves are clarified, and material-dependent trends across SiC, GaN, and diamond are explored and a unified formation mechanism is proposed.</p> <p>Chapter 1 provides a brief introduction to the materials and presents a literature review of surface structuring on SiC, GaN, and diamond. It identifies knowledge gaps and discusses the significance and objectives of this research.</p> <p>Chapter 2 presents the generation of microcones on reaction-bonded silicon carbide (rb-SiC) by nanosecond pulsed laser irradiation. The evolution of cone morphology with pulse fluence and the resulting superhydrophilic surface characteristics are described.</p> <p>Chapter 3 presents LIPSS formation on rb-SiC (SiC+Si composite). The relationship between laser parameters and development of different LIPSS on Si matrix and SiC grains is investigated. A preliminary mechanism for LSFL-HSFL hybrid LIPSS formations is discussed.</p> <p>Chapter 4 examines hybrid LIPSS formation on single-crystal 4H and 6H-SiC to validate and improve the proposed formation mechanism in Chapter 4. The influence of initial surface roughness and effect of bandgap on the LIPSS threshold are clarified, and a parameter map was constructed.</p> <p>Chapter 5 studies the influence of bandgap and optical properties on hybrid LIPSS formation on GaN, which is a wide bandgap, non-melting semiconductor. A process parameter map is constructed, and additional phenomena such as self-focusing, beam collapse leading to crack generation are analyzed.</p> <p>Chapter 6 presents an extension of the hybrid LIPSS study on single crystal diamond as an ultrawide bandgap material. Hybrid LIPSS formation conditions are identified and mapped. Laser-induced phase transformation of diamond into a thin amorphous/graphitic carbon layer is discussed in relation to the hybrid LIPSS formation mechanism.</p> <p>Chapter 7 presents the overall conclusions, and possible directions for future work are suggested.</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6667 号	氏 名	Meshram, Tushar Vijaykumar
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	閻 紀旺
副査	慶應義塾大学教授	博士（情報理工学）	尾上 弘晃
	慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学）	高橋 英俊
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	寺川 光洋
<p><b>Bachelor of Technology, 修士（工学） MESHARAM, Tushar Vijaykumar</b> 君提出の学位請求論文は「<b>Laser-Induced Periodic Surface Structures on Hard Brittle Materials（硬脆材料へのレーザ誘起周期的表面構造の形成）</b>」と題し、7章から構成されている。</p> <p>炭化ケイ素（SiC）、窒化ガリウム（GaN）、およびダイヤモンドに代表される硬脆材料は、半導体基板や光学部品として有望であるが、高い硬度と化学的不活性のため、従来の加工法によるマイクロ・ナノ表面構造の形成が困難である。本研究では、レーザ照射により硬脆材料表面へマイクロ・ナノ構造の形成を試みている。まず反応焼結 SiC に対してナノ秒パルスレーザ照射を行い、マイクロコーン表面構造を形成している。そして単結晶 SiC、GaN およびダイヤモンドに対してフェムト秒パルスレーザ照射を行い、レーザ誘起周期的表面構造（LIPSS）の形成を行っている。さらに、低空間周波数 LIPSS、高空間周波数 LIPSS および両者の複合構造であるハイブリッド LIPSS の形成条件を明らかにし、形成メカニズムにおける材料依存性について議論している。</p> <p>第1章では、本研究の対象材料である SiC、GaN、およびダイヤモンドの材料特性を示すとともに、表面構造形成に関する先行研究を概説し、本研究の意義および目的を明確化している。</p> <p>第2章では、ナノ秒パルスレーザ照射による反応焼結 SiC へのマイクロコーン構造の形成について述べている。レーザフルエンスに伴うコーン形態の変化およびそれにより発現する超親水性表面特性を明らかにしている。</p> <p>第3章では、フェムト秒パルスレーザ照射による反応焼結 SiC への LIPSS 形成を試みている。Si マトリクスおよび SiC 粒子上に形成される各種 LIPSS とレーザ照射条件との関係を解析し、形成メカニズムを議論している。</p> <p>第4章では、フェムト秒パルスレーザ照射による単結晶 SiC への LIPSS 形成を行っている。初期表面粗さの影響およびバンドギャップが LIPSS 形成閾値に与える影響を明らかにするとともに、プロセスパラメータマップを構築している。</p> <p>第5章では、単結晶 GaN を対象としてフェムト秒パルスレーザ照射を行い、バンドギャップおよび光学特性がハイブリッド LIPSS 形成に及ぼす影響を検討している。プロセスパラメータマップを構築するとともに、自己集束やビーム崩壊に起因するクラック発生などの付随現象について考察している。</p> <p>第6章では、超ワイドバンドギャップ材料である単結晶ダイヤモンドへのハイブリッド LIPSS の形成を試みている。レーザ照射により表層ダイヤモンドがアモルファス状あるいはグラファイト状へと相転位する現象を観察し、ハイブリッド LIPSS 形成メカニズムとの関連について考察している。</p> <p>第7章では、本研究の結論および今後の課題について述べている。</p> <p>以上要するに、本論文は、高い硬度と化学的不活性を有する各種硬脆材料に対して異なる条件下でのレーザ照射を行い、マイクロ・ナノスケールの表面構造を形成させることにより様々な表面機能の創成を可能にしたものであり、生産加工学およびマイクロ・ナノ工学の分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。</p>			

# Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6668	Name	Gattu, Sai Dutta
Thesis Title			
AI-based Instability Monitoring and Process Optimization for Electrical Discharge Machining			
<p>Electrical discharge machining (EDM) is a non-contact manufacturing process that enables the fabrication of complex geometries in electrically conductive materials independent of their mechanical hardness. This makes EDM particularly suitable for machining hard and brittle materials such as cobalt-bonded tungsten carbide (WC-Co), which are widely used in micro-parts, precision molds, and high-performance tooling. However, EDM performance, especially in micro-scale and deep-hole machining, is strongly constrained by discharge instability caused by debris accumulation within the inter-electrode gap. Inadequate debris removal leads to frequent tool retraction, unstable discharge conditions, reduced material removal rate, and increased surface defects. Addressing these challenges requires an understanding of discharge dynamics that cannot be fully captured through conventional static optimization alone.</p> <p>Chapter 1 presents the motivation and objectives of this research.</p> <p>Chapter 2 reviews EDM fundamentals, the machining characteristics of WC-Co, powder-mixed and rotary EDM, and recent advancements in sensing and machine learning assisted manufacturing.</p> <p>Chapter 3 experimentally investigates the effects of adding conductive, semiconductive, and insulating powders to the dielectric during micro-EDM of WC-Co. Although powder addition enhances short-hole machining performance, severe debris accumulation and instability occur during deep micro-hole machining. The roles of tool rotation and statistical optimization are also examined, but these approaches are insufficient to capture the dynamic evolution of instability.</p> <p>Chapter 4 analyzes electrical discharge waveforms using artificial intelligence (AI)-based methods to identify discharge characteristics associated with instability. Heuristic detection and classification, together with Random Forest and XGBoost models, are employed to extract key features. Subsequently, a low-latency one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN) is developed for direct waveform-based discharge classification.</p> <p>Chapter 5 investigates the dynamic nature of instability through phase-segmented and temporal analysis to evaluate the influence of tool rotation rate. A temporal convolutional network (TCN) is developed for early instability forecasting, and machine-learning-based models are proposed to predict the evolution of machined profiles from waveform features. A control system framework is proposed, and its offline validation is performed.</p> <p>Chapter 6 presents the overall conclusions of this research. This study demonstrates that integrating waveform-level monitoring with an auxiliary, adaptive tool-rotation strategy enables a robust, generalizable framework for improving machining stability.</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6668 号	氏 名	Gattu, Sai Dutta
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	閻 紀旺
	副査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	大宮 正毅
		慶應義塾大学准教授 博士（情報理工学）	高橋 英俊
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	竹村 研治郎

Bachelor of Technology, 修士（工学） GATTU, Sai Dutta 君提出の学位請求論文は「AI-based Instability Monitoring and Process Optimization for Electrical Discharge Machining（AI を活用した放電加工不安定性のモニタリングおよびプロセス最適化）」と題し、6章から構成されている。

放電加工（EDM）は、電気伝導性材料に対して非接触で加工を行う製造プロセスであり、材料の硬さに依存することなく複雑形状の加工が可能である。この特性により、EDM は特に精密金型や高性能工具などに広く用いられるコバルト結合炭化タングステン（WC-Co）のような硬質材料の加工に適している。しかしながら、EDM の加工性能は、マイクロスケール加工において電極間ギャップ内に蓄積するデブリに起因する放電不安定性によって大きく制約される。デブリの除去が不十分な場合、工具の頻繁な後退動作が必要となり、その結果、放電状態の不安定化、材料除去率の低下ならびに表面欠陥を引き起こす。そこで本研究では、これらの課題に対処するために、人工知能（AI）の活用として機械学習を用いた WC-Co の穴あけ放電加工状態のモニタリングならびに放電加工プロセスの最適化を行っている。加工パラメータ間の相互作用および加工特性への影響を解明するとともに、物理法則に基づくモニタリングとデータ駆動型モニタリングの統合を試みている。

第1章では、本研究の背景、目的および本論文の構成を述べている。

第2章では、EDM の基礎理論、WC-Co の EDM 加工特性、粉末混入誘電液による EDM、工具運動補助型 EDM、EDM のセンシング技術、AI 支援型加工技術などに関する近年の研究動向について概説している。

第3章では、導電性、半導電性、絶縁性の各種粉末を誘電液に添加し、WC-Co のマイクロ EDM 加工特性の変化を調査している。その結果、導電性を有するカーボンナノファイバを添加することにより放電の安定性が向上することを見出している。

第4章では、放電不安定性の影響を詳細に検討するため、電気波形データに対して AI を用いた解析を行っている。波形から抽出した特徴量に基づき、ランダムフォレストによる解析を通じて、不安定加工状態に関連する主要特徴を同定している。これらの知見を基に、生波形データを直接入力とする次元畳み込みニューラルネットワークを構築し、放電状態を高精度かつ低遅延で識別できることを示している。

第5章では、放電加工プロセスの動的挙動を把握するため、位相分割および時間的モニタリングを行い、工具回転速度の影響を評価している。これらの結果に基づき、重要な時間窓内における不安定性の早期予測を可能とする時間畳み込みネットワークを開発し、その効果を検証している。

第6章では、本研究の結論および今後の課題について述べている。

以上要するに、本論文は、不安定性予測と動的工具回転制御を統合することで放電加工プロセスの安定性および最終的な加工形状とを結び付ける AI 駆動型モニタリングフレームワークを提案し、適応的加工戦略の理論的基盤を提供するものであり、生産加工学および精密工学の分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6669 号	氏 名	大村 拓也
主論文題名： Granular Scaling Laws for Low-Gravity Terramechanics: Applications to Rover Mobility and Excavation (低重力環境におけるテラメカニクスのための粉粒体相似則： ローバ走行および掘削現象への応用)			
<p>月・惑星探査の持続的発展に向けて、低重力環境における探査ローバの移動性能を理解することは、ミッション成功と探査能力の拡大を実現する上で極めて重要である。しかし、低重力環境を直接的に再現した実験検証は、費用が高く運用上の制約も大きい。一方、数値シミュレーションは計算コストの制約により、広範な検証データの取得に限界がある。これらに対し、相似則は地上重力下での試験結果を低重力環境下での性能予測に変換する有望な手法である。しかし、多様な走行条件下での性能予測に対して、高い信頼性を提供する有用な相似則が未解明であり、徹底的に検証された相似則を確立することは、極限環境で活動する探査ローバの開発において不可欠である。</p> <p>そこで本研究では、離散要素法を用いて探査ローバ車輪を対象とした広範な走行条件下での比較を行い、低重力環境におけるテラメカニクスのための粉粒体相似則 (Granular Scaling Laws, GSL) の有効性を検証した。まず、離散要素法におけるパラメータキャリブレーション手法を構築し、国際宇宙ステーションにおける粉粒体挙動の実験データとの比較により低重力環境に対しても同手法の妥当性を確認した。次に、従来相似則との比較および慣性数を用いた粉粒体の流動解析により、GSL の優位性を実証した。さらに、広範な車輪回転速度での斜面走行性能やサイズスケーリングによる影響、掘削作業への適用可能性を通じて、GSL の適用範囲と制約を明らかにした。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景、動機、目的について述べ、低重力環境におけるテラメカニクスのための相似則に焦点を当てた。また、月・惑星探査における移動性能予測の重要性について説明し、既存手法の課題、本研究で取り組む研究課題を明確化した。</p> <p>第 2 章では、離散要素法のパラメータキャリブレーション手法を構築し、国際宇宙ステーションにおける実験データとの比較を通じて、離散要素法の低重力環境に対する妥当性を確認した。</p> <p>第 3 章では、広範な車輪回転速度条件での GSL の優位性を実証するとともに、慣性数を用いた流動解析を通じて、従来相似則の適用範囲を明確化した。</p> <p>第 4 章では、車輪の斜面登坂・降坂性能の予測に関する GSL の有効性を確認する一方、サイズスケーリングによる車輪沈下量の予測精度の低下についても明らかにした。</p> <p>第 5 章では、GSL をバケットドラムの掘削現象に応用し、車輪走行以外への適用可能性を検証した。回転移動および掘削をともなう複雑なテラメカニクス現象においても GSL は正確に予測できることを実証し、GSL の有効性を確認した。</p> <p>第 6 章では、本研究を総括し主要な結果と貢献について要約するとともに、今後の展望について言及した。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6669 号	氏 名	大村 拓也
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 石上 玄也
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 杉浦 壽彦
		慶應義塾大学専任講師	博士（理学） 佐野 友彦
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 小池 綾

学士（工学）、修士（工学）、大村拓也君提出の学位請求論文は、「Granular Scaling Laws for Low-Gravity Terramechanics: Applications to Rover Mobility and Excavation」（低重力環境におけるテラメカニクスのための粉粒体相似則：ローバ走行および掘削現象への応用）と題し、6章から構成されている。

月面や火星表面などの低重力環境における探査ローバの走行性能を解析することは、ミッションの立案および運用を適切に行う上で極めて重要であり、これまで、機械と土質の相互力学を扱うテラメカニクスに基づいた実験および数値計算が広く実施されてきた。しかしながら、地上重力環境において低重力条件を実験的に再現する方法は設備費用や実験可能時間の制約が大きく、また、高度かつ精緻な数値解析手法は、その計算コストの増大に伴って、多様な条件に対する十分な検証データの取得が困難である。これらの課題に対し、地上重力環境において得られた試験結果を低重力環境下での現象予測に活用できる相似則は、有望なアプローチとして注目されている。その一方で、広範な走行条件に対して高い信頼性を有する相似則は十分に解明されておらず、体系的に検証された相似則の確立が不可欠である。

そこで本論文では、探査ローバ車輪を対象として、低重力環境におけるテラメカニクスのための粉粒体相似則（Granular Scaling Laws, GSL）の有効性を検証している。従来の相似則との比較および慣性数を用いた粉粒体の流動解析により、GSLの優位性を実証している。さらに、広範な走行条件やサイズスケーリングによる影響、掘削作業へのGSLの適用可能性を議論し、その有用性を明らかにしている。

第1章では、本研究の背景、動機、目的について述べ、ローバの走行性能予測の重要性について説明するとともに、低重力環境におけるテラメカニクスのための相似則、既存手法の課題、本研究で取り組む課題を明確にしている。

第2章では、離散要素法のパラメータ校正手法を構築し、国際宇宙ステーションにおける粉粒体実験との比較を通じて、離散要素法が低重力環境においても定量的に妥当であることを確認している。

第3章では、広範な車輪回転速度条件での従来相似則とGSLとの比較を行い、慣性数を用いた流動解析を通じて、GSLの優位性を実証している。

第4章では、斜面における車輪の走行性能予測に対するGSLの有効性を確認する一方、サイズスケーリングによる沈下量の予測精度の低下についても明らかにしている。

第5章では、GSLをバケットドラムの掘削現象に応用し、車輪走行以外への複雑な現象においてもGSLによる予測の正確性ならびに有効性を確認している。

第6章では、本研究を総括し主要な結果と貢献について要約するとともに、今後の展望について言及している。

以上要するに、本論文は低重力環境における粉粒体相似則を提案するものであり、機械工学分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6670 号	氏 名	加藤 直樹
主論文題名：  大規模視覚言語モデルの少数データ適応 ～学習効率と性能の両立を目指して～			
<p>深層学習では大規模な訓練データセットを用いてモデルを学習することで高精度な認識が可能であると知られている。例えば、画像認識分野においては ImageNet のような数百万枚の画像データセットを用いることで、従来手法を大幅に上回る性能を達成している。しかし、大量データへのアノテーションは多大な労力を要し、専門知識を持つアノテーターの確保や品質管理などのコストが問題となっている。さらに、医用画像解析や希少動物の識別といった専門的なタスクによってはデータ自体の収集も困難であり、プライバシーや倫理的制約により大規模データセットの構築が現実的でない場合も多い。したがって、少数のラベル付きデータで高精度な認識を実現する手法が強く求められている。</p> <p>近年、CLIP に代表される大規模視覚言語モデルが広く注目を集めている。これらのモデルは、インターネット上の膨大な画像とテキストのペアデータから学習することで、豊富な視覚的、言語的表現を獲得し、優れた汎化性能を示すことから、データの限られるタスクへの適用においても高い有効性が期待される。本論文では、このような大規模データで事前学習された視覚言語モデルを限られたデータを用いて下流タスクへ効率的に適応させることで少数データ画像認識を実現する手法について検討する。その際、事前学習モデルが獲得した汎用的な知識と下流タスクのドメイン知識を適切に組み合わせることで、多様な下流タスクにおける認識性能の改善を図る。また、計算効率性と実用性を兼ね備えた手法を開発することにより、リソース制約のある実応用シーンに適した少数データ学習の実現を目指す。</p> <p>第 1 章では、既存の少数データ画像認識手法の問題を提起し、本研究の研究目的と貢献を示す。</p> <p>第 2 章では、少数データ画像認識の研究動向について評論し、その流れの中での本研究の位置付けを明らかにする。</p> <p>第 3 章では、学習データにおけるクラス毎のプロトタイプ表現に基づきアダプターを構築する Proto-Adapter を提案する。事前学習モデルのパラメータを変更することなく、学習不要かつ高速に適用可能な枠組みで高性能な少数データ画像認識を実現できることを示す。さらに、アダプターを距離学習の枠組みを用いてファインチューニングすることで、認識性能をさらに改善できることを実証する。</p> <p>第 4 章では、大規模視覚言語モデルを少数データに適応させる簡潔で効率的なベースライン手法として、線形識別器の残差学習に基づく適応手法を提案する。事前学習モデルとアダプターの推論結果に対する適切な重み付けが下流タスクによって異なることを明らかにし、この重み付けを適切に調整することにより、多様な下流タスクに対する平均性能がより複雑な既存手法を上回ることを実証する。</p> <p>第 5 章では、本論文の成果を総括し、今後の研究の展望について論じる。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6670 号	氏 名	加藤 直樹
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（工学）	青木 義満
	副査	慶應義塾大学教授 工学博士	池原 雅章
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	杉本 麻樹
		慶應義塾大学准教授 博士（工学）	村田 真悟

  

学士（工学）、修士（工学）加藤直樹君提出の学位請求論文は「大規模視覚言語モデルの少数データ適応 ～学習効率と性能の両立を目指して～」と題し、全5章から構成されている。

深層学習に基づく画像認識は、大規模データセットを用いた学習によって高い性能を達成してきたが、大量のアノテーションに要する人的・時間的コストや、医用画像解析などに代表されるデータ収集・利用上の制約が大きな課題となっている。このような背景のもと、少数のラベル付きデータから高精度な認識を実現する少数データ学習は、実応用において重要な研究課題である。

近年、CLIP に代表される大規模視覚言語モデルが広く注目を集めている。これらのモデルは、インターネット上の膨大な画像とテキストのペアデータから学習することで、豊富な視覚的、言語的表現を獲得し、優れた汎化性能を示すことから、データの限られるタスクへの適用においても高い有効性が期待される。本論文では、このような大規模データで事前学習された視覚言語モデルを限られたデータを用いて下流タスクへ効率的に適応させることで、少数データ画像認識を実現する手法を提案している。具体的には、事前学習モデルが獲得した汎用的な知識と下流タスクのドメイン知識を適切に組み合わせることで、多様な下流タスクにおける認識性能の改善を図っている。また、計算効率性と実用性を兼ね備えた手法を開発することにより、リソース制約のある実応用シーンに適した少数データ学習を実現している。

第1章では、少数データ画像認識における既存手法の課題を整理し、本研究の目的と貢献を明確にしている。

第2章では、少数データ画像認識および大規模視覚言語モデルに関する関連研究を概観し、本研究の位置付けを示している。

第3章では、学習データにおけるクラスごとのプロトタイプ表現に基づいてアダプターを構築する Proto-Adapter を提案している。本手法は、事前学習モデルのパラメータを変更することなく、学習不要かつ高速に適用可能でありながら、高い少数データ認識性能を達成できる点に特徴がある。さらに、距離学習の枠組みを用いたファインチューニングにより、認識性能が一層向上することを実験的に示している。

第4章では、大規模視覚言語モデルを少数データに適応させる簡潔かつ効率的なベースライン手法として、線形識別器の残差学習に基づく適応手法を提案している。事前学習モデルとアダプターの推論結果に対する重み付けが下流タスクごとに異なることを明らかにし、適切な重み調整により、多様なタスクにおいて既存の複雑な手法を上回る平均性能を達成している。

第5章では、本論文の成果を総括するとともに、今後の研究展望について述べている。

以上要するに、本論文は、大規模視覚言語モデルの汎用的知識を活用しつつ、少数データ環境下における学習効率と認識性能の両立を実現する実用的な手法を提案したものであり、画像工学分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6671 号	氏 名	中島 利八郎
主 論 文 題 名 :			
レーザードーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサ			
<p>Microelectromechanical systems (MEMS)を用いた多軸力センサは、生物学分野やロボティクスをはじめとする多様な分野で重要な役割を担っている。その中でも、 piezo 抵抗効果を利用した piezo 抵抗型力センサは構造が比較的単純であることから数多く開発されている。これらのセンサにおいては多軸力を独立して検出するためには、デバイス側面への piezo 抵抗形成が有効である。しかし、従来の MEMS プロセスは主に基板表面上での二次元的な積層加工であるため、三次元領域に対して任意形状の piezo 抵抗層を形成することは困難であった。その結果、工程の複雑化、製作難易度の増大、およびデバイス設計自由度の制限といった問題が生じていた。</p> <p>そこで本研究では、レーザードーピングを利用した MEMS piezo 抵抗型多軸力センサの製作プロセスを提案する。提案する手法は、2.5 次元的なセンサ構造の形成と、その構造の表面および側面への piezo 抵抗層の直接パターンニングをレーザー加工のみで実施する手法である。計測対象軸の力に応じて変形する複数のセンサ構造と、その変形を検知するセンサ素子からなる対を、表面と側面に三次元的な位置関係で配置することで、多軸力を高い独立性で計測できる。本研究では、提案するプロセスを用いて piezo 抵抗型の三軸センサを製作し、性能を評価することで提案プロセスの有用性を明らかにした。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景と目的について述べた。</p> <p>第 2 章では、提案する piezo 抵抗型カンチレバーおよび、レーザードーピングに関する基礎的な原理について述べた。</p> <p>第 3 章では、レーザードーピングを用いた多軸力センサ製作の第一段階として、デバイス表面への piezo 抵抗形成手法および、製作した piezo 抵抗型カンチレバーの基礎特性評価について述べた。結果から、提案する表面ドーピング手法が、高精度な piezo 抵抗型カンチレバー製作に有用であることを示した。</p> <p>第 4 章では、レーザードーピングを用いた多軸力センサ製作の第二段階として、デバイス側面への piezo 抵抗形成手法および、製作した piezo 抵抗型カンチレバーの基礎特性評価について述べた。結果から、提案する液浸側面ドーピングが、面内力計測のための側面 piezo 抵抗層形成手法として有用であることを示した。</p> <p>第 5 章では、レーザードーピングを用いた多軸力センサ製作の最終段階として、デバイス表面とデバイス側面の両方へ piezo 抵抗を形成した piezo 抵抗型の三軸力センサを製作し、その性能評価について述べた。結果から、本論文で提案する手法が多軸力を独立性良く計測することができる MEMS piezo 抵抗型多軸センサのプロセスとして、有用であることを示した。</p> <p>第 6 章では、本研究の主な結論および今後の課題をまとめた。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6671 号	氏 名	中島 利八郎
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授 博士（情報理工学）	高橋 英俊
	副査	慶應義塾大学教授 博士（情報理工学）	尾上 弘晃
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	閻 紀旺
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	竹村 研治郎

学士（工学）、修士（工学）中島利八郎君提出の学位請求論文は「レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサ」と題し、6 章から構成されている。

Microelectromechanical systems (MEMS)を用いた多軸力センサは、生物学分野やロボティクス分野をはじめとする多様な分野で重要な役割を担っている。その中でも、ピエゾ抵抗型力センサは構造が比較的単純であることから数多く研究開発されている。これらのセンサにおいて多軸力を独立して検出するためには、デバイス側面へのピエゾ抵抗形成が有効である。しかし、従来の MEMS プロセスは主に基板表面上での二次元的な積層加工であるため、三次元領域に対して任意形状のピエゾ抵抗層を形成することは困難であった。そこで本研究では、レーザドーピングを利用した MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサの製作プロセスを提案している。提案する手法では、2.5 次元的なセンサ構造の形成と、その構造の表面および側面へのピエゾ抵抗層の直接パターンニングをレーザ加工のみで実施している。本研究では、提案するプロセスを用いてピエゾ抵抗型の三軸力センサを製作し、その性能を評価することで本プロセスの有用性を示している。

第 1 章は序論であり、研究背景と目的を述べている。

第 2 章では、提案するピエゾ抵抗型力センサおよびレーザドーピングに関する基礎的な原理について述べている。

第 3 章では、レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の第一段階として、シリコンウェハ上に製作したデバイス表面へのピエゾ抵抗形成手法および製作したピエゾ抵抗型カンチレバーの基礎特性評価について述べている。さらに、提案する表面ドーピング手法が、高精度なピエゾ抵抗型カンチレバー製作に有用であることを示している。

第 4 章では、レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の第二段階として、シリコンウェハ上に製作したデバイス側面へのピエゾ抵抗形成手法および製作したピエゾ抵抗型カンチレバーの基礎特性評価について述べている。実験結果から、提案する液浸側面ドーピングが、面内力計測のための側面ピエゾ抵抗層形成手法として有用であることを明らかにしている。

第 5 章では、レーザドーピングを用いた多軸力センサ製作の最終段階として、シリコンウェハ上に製作したデバイス表面とデバイス側面の両方へピエゾ抵抗を形成したピエゾ抵抗型の三軸力センサを製作し、その性能評価について述べている。実験結果から、本論文で提案する手法が多軸力を独立性よく計測することができる MEMS ピエゾ抵抗型多軸力センサのプロセスとして、有用であることを実証している。

第 6 章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文全体の結論を述べている。

以上要するに、本論文はレーザ加工と MEMS プロセスを融合したピエゾ抵抗型力センサの新たな製作プロセスを構築し、その有用性を確認しており、センサ工学、MEMS の分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6672 号	氏 名	藤田 晃成
------	------------	-----	-------

主 論 文 題 名 :

二次元フォトニック結晶ナノ共振器に基づくハイブリッド集積単一光子源に関する研究

シリコン (Si) フォトニクス集積回路は、スケーラブルな光量子情報処理に向けた有力なプラットフォームである。しかし、光回路の母材料である Si から量子情報の媒体となる単一光子を直接かつ決定論的に生成することは難しい。そこで、異種材料からなる単一光子源の Si 上ハイブリッド集積が注目を集めている。中でも、明るさ・コヒーレンス・純度に優れた単一光子源として、InAs/GaAs 半導体量子ドット(QD)の集積が求められている。また、QD 単一光子源の性能を最大限引き出す上で、フォトニック結晶(PhC)ナノ共振器の活用が期待されている。しかし、PhC ナノ共振器に基づく QD 単一光子源を高効率に Si 光回路へ接続する光学構造や、設計構造を高精度に作製する技術は明らかではなかった。そこで本研究では、スケーラブルなシリコン量子フォトニクスの開拓を目指し、二次元フォトニック結晶ナノ共振器に基づく QD 単一光子源の Si 光回路上ハイブリッド集積について検討を行った。

第 1 章では、本研究の背景、研究目的および本論文の構成について概説した。

第 2 章では、本研究の基礎となる量子ドット単一光子源およびフォトニック結晶ナノ共振器などの物理的背景について述べるとともに、有限差分時間領域法などの数値計算手法に関して論じた。

第 3 章では、本研究で用いた微細加工技術について述べた。電子線リソグラフィとドライおよびウェットエッチングを組み合わせた PhC ナノ共振器およびガラス薄膜クラッドの作製方法について論じ、プロセス上の課題と解決策を提示した。また、PhC ナノ共振器をハイブリッド集積する上で転写プリント法の活用を議論し、転写集積時の課題と解決策を提示した。

第 4 章では、二次元フォトニック結晶ナノ共振器に基づく QD 単一光子源の Si 導波路上ハイブリッド集積について述べた。共振器モードと Si 導波路の高効率な光学結合について設計を行うとともに、設計構造を微細加工技術により作製し光学評価を行った。その結果、二次元フォトニック結晶に基づく導波路結合型単一光子源の動作を実証した。

第 5 章では、より低損失な窒化シリコン(SiN)光回路への QD 単一光子源の集積を目指し、二次元 PhC ナノ共振器と結合交差導波路構造を導入したハイブリッド集積構造を提案した。提案構造により、高効率に SiN 光導波路へ単一光子結合できることを数値計算により明らかにした。また、設計構造を作製し光学評価することで、SiN 上ハイブリッド集積 QD 単一光子源を実証した。

第 6 章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の展望について述べた。

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6672 号	氏 名	藤田 晃成
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	太田 泰友
副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	石樽 崇明
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	田邊 孝純
	慶應義塾大学教授	博士（理学）	渡邊 紳一
<p>学士（工学）、修士（工学）藤田晃成君提出の学位請求論文は「二次元フォトニック結晶ナノ共振器に基づくハイブリッド集積単一光子源に関する研究」と題し、6章から構成されている。</p> <p>シリコン (Si) フォトニクス集積回路は、スケーラブルな光量子情報処理に向けた有力なプラットフォームとされる。しかし、光回路の母材料である Si から量子情報の媒体となる単一光子を直接かつ決定論的に生成することは容易でない。そこで、異種材料からなる単一光子源の Si 上ハイブリッド集積が注目を集めている。中でも、明るさ・コヒーレンス・純度に優れた単一光子源として、InAs/GaAs 半導体量子ドット(QD)の集積が求められている。また、QD 単一光子源の性能を最大限引き出す上で、フォトニック結晶(PhC)ナノ共振器の活用が期待されている。しかし、PhC ナノ共振器に基づく QD 単一光子源を高効率に Si 光回路へ接続する光学構造や、設計構造を高精度に作製する技術は明らかではなかった。そこで本研究では、二次元 PhC ナノ共振器に基づく QD 単一光子源の Si 光回路上ハイブリッド集積について設計・実験の両面から取り組んでいる。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景、研究目的および本論文の構成について概説している。</p> <p>第 2 章では、本研究の基礎となる QD 単一光子源および PhC ナノ共振器などの学術的背景について論じている。</p> <p>第 3 章では、本研究で用いた微細加工技術について詳細が述べられている。電子線リソグラフィ、ドライおよびウェットエッチングを組み合わせた PhC ナノ共振器およびガラス薄膜クラッドの作製方法について論じ、プロセス上の課題と解決策を提示している。また、PhC ナノ共振器をハイブリッド集積する上で転写プリント法の活用を議論し、転写集積時の課題と解決策を提示している。</p> <p>第 4 章では、二次元 PhC ナノ共振器に基づく QD 単一光子源の Si 導波路上ハイブリッド集積について述べられている。共振器モードと Si 導波路の高効率な光学結合について電磁界数値計算に基づき設計を行うとともに、設計構造を微細加工により作製し光学評価を行った結果を論じている。評価の結果、二次元 PhC に基づく導波路結合型 QD 単一光子源の動作実証に成功している。</p> <p>第 5 章では、より低損失な窒化シリコン(SiN)光回路への QD 単一光子源の集積を目指し、二次元 PhC ナノ共振器と結合交差導波路構造を導入したハイブリッド集積構造を論じている。その中で、検討構造が高効率に SiN 光導波路へ単一光子結合できることを数値計算により明らかにしている。また、設計構造を作製し光学評価を行うことで、設計した SiN 上ハイブリッド集積 QD 単一光子源の動作実証を行っている。</p> <p>第 6 章では、本研究で得られた成果を総括し今後の展望について述べている。</p> <p>以上要するに、本研究では二次元フォトニック結晶ナノ共振器に基づくハイブリッド集積型量子ドット単一光子源について高効率設計を明らかにするとともに実験実証を行っており、集積フォトニクス分野において工学上、工業上寄与するところが少なくない。</p> <p>よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。</p>			

# Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6673	Name	Liu, Yunxiang
Thesis Title			
Exploration of Fluorescent Carbon Dot-Based Films for Luminescent Solar Concentrators			
<p>The continuous increase in global energy demand has led to extensive fossil fuel consumption and excessive carbon dioxide emissions, thereby accelerating the development of renewable energy technologies. Among them, solar energy is a clean and sustainable option, however, conventional photovoltaic systems suffer from spectral mismatch and optical losses. Luminescent solar concentrators (LSCs) offer an effective way to enhance the light-harvesting efficiency of solar cells. Due to simple synthesis and environmental compatibility, carbon dots (CDs) are promising fluorescent materials for LSCs. This study explores various CD-based luminescent films for LSC applications and provides useful insights for future research.</p> <p>Chapter 1 describes the purpose and background of this research.</p> <p>Chapter 2 describes the experimental methods used throughout this study.</p> <p>Chapter 3 describes the simple atmospheric synthesis of greenish yellow-emitting CDs from <i>p</i>-phenylenediamine. The purified CDs exhibited a photoluminescence quantum yield (PLQY) of 56%. When embedded into ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymer, the resulting CDs@EVA film showed strong emission at 540 nm and achieved optimal LSC performance at 0.05 wt% CD concentration and 408 <math>\mu\text{m}</math> film thickness, mainly due to reduced self-absorption and efficient photon collection. Compared with the device without film, the power conversion efficiency (<math>\eta</math>) increased by a factor of 1.19 due to CD emission and light scattering.</p> <p>Chapter 4 describes the tyramine-modified CDs (Tyr-CDs) to improve luminescent properties and LSC performance. The modification increased PLQY from 56% to 68% by suppressing <math>\pi</math>-<math>\pi</math> stacking through steric hindrance. The resulting Tyr-CDs@EVA film exhibited stronger emission and increased the <math>\eta</math> value by a factor of 1.33 in the LSC device, compared with the device without film.</p> <p>Chapter 5 describes optical enhancement in LSC devices by incorporating <math>\text{TiO}_2</math> nanoparticles into Tyr-CDs@EVA films. The <math>\text{TiO}_2</math>-induced scattering effect promoted photon reabsorption and emission within the LSC, leading to higher <math>\eta</math>. By changing the <math>\text{TiO}_2</math> concentration and film configuration, the combined system achieved effective photon management and further improved optical performance. The light scattering by <math>\text{TiO}_2</math> increased the <math>\eta</math> value in the LSC device by a factor of 3.27 at maximum, compared with the device without film.</p> <p>Chapter 6 summarizes the results of this thesis and presents conclusions with future works.</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6673 号	氏 名	Liu, Yunxiang
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 磯部 徹彦
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 高尾 賢一
		慶應義塾大学准教授	工学博士 二瓶 栄輔
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 福井 有香
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学） 磯 由樹

学士（理学）、修士（理学）LIU, Yunxiang 君提出の学位請求論文は「Exploration of Fluorescent Carbon Dot-Based Films for Luminescent Solar Concentrators（発光型太陽光集光器用カーボンドット蛍光膜の研究）」と題し、6章から構成されている。

世界的なエネルギー需要の増加は、化石燃料の大量消費とCO<sub>2</sub>の排出増加を招いている。このため、クリーンで持続可能な太陽エネルギーの有効利用が検討されている。しかし、従来の太陽電池の分光感度は太陽光スペクトルとミスマッチがあり、光損失がある。太陽電池の光捕集効率を高める有効な手段として蛍光膜、導光板と太陽電池を組み合わせた発光型太陽光集光器（LSC）が注目されている。そこで本研究では、このLSC用途の有望な蛍光材料として、合成が容易で環境適合性に優れたカーボンドット（CDs）を検討している。さらに、CDs 蛍光膜を用いた LSC の電力変換効率 ( $\eta$ ) を向上させる方策を検討している。

第1章では、本研究の背景を概説し、本研究の目的を述べている。

第2章では、本研究で用いた実験方法を述べている。

第3章では、*p*-フェニレンジアミンから緑黄色発光 CDs を大気中で簡便に合成する方法を述べている。合成した CDs は 56%の蛍光量子収率 (PLQY) を示し、この CDs をエチレン酢酸ビニル (EVA) 共重合体に分散して CDs@EVA 蛍光膜を作製している。この蛍光膜を用いた LSC の  $\eta$  値は、0.05 wt%の CDs 濃度および 408  $\mu\text{m}$  の膜厚で最大となり、膜非搭載 LSC の  $\eta$  値の 1.19 倍であることを明らかにしている。

第4章では、発光特性と LSC 性能を改善するためにチラミン修飾 CDs (Tyr-CDs) を検討している。この表面修飾により、立体障害による  $\pi$ - $\pi$  スタッキングが抑制され、PLQY が 56%から 68%に向上すること、Tyr-CDs を EVA に分散した Tyr-CDs@EVA 膜を用いた LSC の  $\eta$  値は、膜非搭載 LSC の  $\eta$  値よりも 1.33 倍増加することを明らかにしている。

第5章では、TiO<sub>2</sub> ナノ粒子を Tyr-CDs@EVA 膜に導入することで、LSC デバイスにおける膜の光学特性を向上させることを検討している。すなわち、TiO<sub>2</sub> ナノ粒子による光散乱効果によって励起光の吸収を促進し、蛍光強度を増大させ、LSC の  $\eta$  値を向上させることをねらいとしている。TiO<sub>2</sub> ナノ粒子濃度と膜の配置を変更することで、効率的な光の利用と光学特性の向上を検討した結果、TiO<sub>2</sub> ナノ粒子と Tyr-CDs を EVA に分散した膜を搭載した LSC の  $\eta$  値は、膜非搭載 LSC の  $\eta$  値よりも 3.27 倍増加することを明らかにしている。

第6章では、本研究の結果をまとめ、結論と今後の研究課題を示している。

以上要するに、本論文は、CDs の表面修飾が蛍光特性向上に有効であることを示すとともに、CDs をポリマーに分散した膜を LSC に搭載することで発電効率を向上できること、さらに蛍光膜に光散乱ナノ粒子を導入することが LSC 性能向上に効果的であることを実証し、CDs 蛍光膜を用いた LSC の設計指針を示しており、蛍光体材料科学分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

# Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6674	Name	Hu, Haowen
Thesis Title			
Human Activity Analysis from Exocentric Multi-camera Surveillance to Egocentric Vision: Tracking, Gaze Recognition, and Anomaly Detection			
<p>Video-based human activity analysis aims to utilize techniques of computer vision, artificial intelligence, and pattern recognition to understand and analyze activities performed by individuals or crowds of people. For example, some researchers focus on the recognition of different kinds of actions or the prediction of future behaviors based on videos or video clips. In this thesis, human activities are investigated from the perspective of the view-type, discussing third-person and first-person videos and tasks. In response to the following research questions: 1) How to research video-based human activity analysis, interpreting human activities across both exocentric and egocentric video perspectives, handling challenges like occlusions, viewpoint changes, and social interaction complexity so that machines can interpret human behavior as flexibly and contextually as humans do, and 2) Bridging diverse tasks: How to address the challenge of bridging third-person and first-person vision to unify diverse human activity analysis tasks under a single research paradigm, the contributions of this whole thesis are: 1) Perspective-aware modeling of human activities: from external third-person views to subjective first-person views, this thesis progressively deepens the understanding of human behavior in varied settings, 2) Comprehensive use of various camera systems: monocular, multi-camera, and wearable-camera systems are leveraged to record human activities, 3) Diverse task coverage under a common theme: by tackling tracking, ReID, social interaction analysis, and anomaly detection, the thesis demonstrates how video-based systems can analyze human activities at different semantic levels, and 4) Multi-modal and temporal reasoning: across chapters, models incorporate multi-modal inputs and time-aware architectures (trajectory memory, temporal network architecture, ...), emphasizing the importance of spatiotemporal representation.</p> <p>This thesis first analyzes human activities with third-person videos, investigating monocular pedestrian tracking and inter-camera multi-person re-identification (ReID). Most existing methods cannot handle problems like pedestrian occlusions and low distinguishability between individuals, and they treat monocular tracking and</p>			

inter-camera ReID as two separate tasks. In this thesis, a method based on pose estimation and trajectory clustering is proposed, conducting both tracking and ReID within one framework.

This thesis then utilizes first-person videos in a third-person task, investigating abnormal behavior detection in social interactions. In research regarding social interactions, first-person video data is considerably popular due to its advantages in providing an immersive and subjective view of participants. Therefore, a temporal network is designed to detect abnormal human gazes, taking first-person video clips as input. Different from most related works that focus on the gaze of the camera-wearer, it is the communicative acts directed toward the camera-wearer that are investigated in this thesis. In addition, this thesis also introduces optical flow data as a parallel input, discussing different mechanics of cross-modality fusion. This method achieved competitive results in the Ego4D “looking-at-me” Challenge and was awarded Second Place in this challenge at the 2nd International Ego4D Workshop (ECCV 2022).

This thesis ends with self-activity analysis with first-person videos, detecting abnormal activities of the camera-wearers themselves. To address the problem that it is expensive and time-consuming to collect and annotate first-person video recordings of different kinds of human activities, and the imbalance of sample numbers, which is considerably common in abnormal activity detection, an unsupervised neural network along with a KL-divergence-based regularization method is proposed, taking continuous first-person frames as input.

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6674 号	氏 名	Hu, Haowen
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 斎藤 英雄
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 杉本 麻樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 五十川 麻理子
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 青木 義満

学士(工学)、修士(工学)Hu, Haowen 君提出の学位請求論文は、「Human Activity Analysis from Exocentric Multi-camera Surveillance to Egocentric Vision: Tracking, Gaze Recognition, and Anomaly Detection (三人称多視点カメラから一人称視点カメラまでを活用した人間活動解析：トラッキング・視線認識・および異常検知)」と題し、6章で構成されている。

ビデオベースの人間活動解析では、監視カメラ等の三人称視点 (Exocentric) とウェアラブルカメラ等の一人称視点 (Egocentric) の両面から、遮蔽や視点変化といった課題を克服し、柔軟かつ文脈に応じた行動理解を行うことが求められている。本論文は、これらの視点の違いを横断的に扱うための新しい研究パラダイムを提案し、具体的なタスクとして追跡、視線認識、および異常検知に提案手法を適用し、その有効性を検証した成果についてまとめたものである。

第1章では、本論文で注目した人間活動解析の問題点とその解決のための基本的コンセプトについて述べ、三人称映像と一人称映像を統合的に扱う視点対応型モデリングの重要性と、本論文の関連研究に対する位置づけを示している。

第2章では、マルチカメラによる人物追跡、一人称視点での視線行動認識、および異常活動検知に関するサーベイが示されている。

第3章では、三人称視点において人物追跡とカメラ間人物再識別 (ReID) を統合し、マルチカメラ撮影による姿勢推定と軌跡クラスタリングに基づく手法を提案している。そして、その実装の詳細を示し、手術室という遮蔽の多い困難なシナリオを用いた性能評価実験について述べている。この実験により、提案手法がマルチカメラの幾何学的制約を明示的に活用することによって従来よりも追跡一貫性の高い ReID の性能を実現できることを示している。

第4章では、一人称視点映像を用いて、装着者に対する周囲の人物の視線 (Looking-at-me) を認識するために、RGB とオプティカルフローを並列入力とするデュアルチャネル融合モデルを提案している。一人称視点映像の大規模データセット Ego4D を用いた実験結果により、提案手法が国際的なベンチマークにおいて極めて高い精度を達成 (ECCV 2022 Ego4D Challenge Looking-at-me 部門第2位を獲得) した成果について示している。

第5章では、装着者自身の活動解析として、教師なしニューラルネットワークに KL ダイバージェンスに基づく正則化手法を導入した異常検知手法を提案している。性能評価実験の結果により、アノテーションコストを抑えつつ、サンプル不均衡が顕著な一人称視点映像においても、従来の検知手法に比べて高い精度を実現できることを示している。

最後に第6章では本論文で得られた成果と結論をまとめ、多様な視点で撮影された画像を活用して柔軟に人間活動の解析を可能にするシステムの実現に向けた今後の課題について議論している。

以上要するに本研究は、三人称から一人称に至る多様な視点の映像情報を統合的に扱うための新たな方法を提案し、提案手法の原理を利用した人間活動解析のための新しい手法を示し、従来の解析法に比べて人物追跡、視覚的意図理解、および異常検知といった人間活動解析のための要素技術の性能を向上できることを示したものであり、工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文の著者は博士 (工学) の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6675 号	氏 名	安形 憲一
主論文題名：  A fast and portable TCP/IP stack (高速かつポータブルな TCP/IP スタック)			
<p>本論文は、高速かつポータブルな TCP/IP スタックの実現に向けた、三つの階層化された研究について述べる。</p> <p>一つ目の研究は中層に該当する TCP/IP スタックの設計とプロトタイプ実装である iip について述べる。TCP/IP スタック実装と開発者の実装が提供すべき機能の境界の見直しを行い、iip が他のシステムと容易に統合が可能であるとともに高い性能を発揮することを可能にする API を提案する。</p> <p>二つ目の研究は下層に該当するパケット I/O 機構に着目する。特定のパケット I/O 機構の実装に起因する制約を回避し理想的な性能を達成できる可能性を高めるために、複数のパケット I/O 機構の利用をサポートする方法について議論するとともに、iip での実装の詳細に加えパケット I/O 機構ごとの API の差異を隠蔽する抽象化モデルについて述べる。</p> <p>三つ目の研究は上層に該当するアプリケーションや特定の用途のための実装に焦点を当てる。具体的には、上層に位置する拡張機能として、ユーザー空間において iip を実行するような用途へ向け、メモリ安全性の向上を目標としたメモリアクセス制限機構を <b>Memory Protection Keys (MPK)</b> と呼ばれるハードウェア機能を用いて開発するとともに、性能面での負荷を抑える仕組みを提案する。</p> <p>これら三つの研究を通して、TCP/IP 通信に関与するソフトウェアを層に分割するとともにパケットデータのためのメモリコピーが必要となる層を限定するという設計哲学を示す。この設計哲学により、中層および下層においてはパケット処理をゼロコピーで行うことが可能な設計が採用され、結果として、上層に位置するメモリアクセス制限機構においてメモリコピーを削減するための仕組みを導入することが可能となった。この設計哲学は、機能の階層化がポータビリティの実現において中心的な役割を果たすとともに、メモリコピーの削減が性能の向上に寄与するという点から、高速かつポータブルな TCP/IP スタックと親和性の高いものである。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6675 号	氏 名	安形 憲一
論文審査担当者：	主査 慶應義塾大学教授	博士（理学）	河野 健二
	副査 慶應義塾大学教授	博士（工学）	西 宏章
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	松谷 宏紀
	エディンバラ大学准教授	博士（政策・メディア）	本多 倫夫

  

学士（環境情報学）、修士（政策・メディア）安形憲一君の学位請求論文は、「A fast and portable TCP/IP stack（高速かつポータブルな TCP/IP スタック）」と題し、全 5 章で構成されている。

本論文は、多様な環境や用途において高い通信性能を達成できる TCP/IP スタックの実現を目標に、上層・中層・下層の 3 つに階層化した TCP/IP スタックのそれぞれの階層についての研究成果をまとめている。まず、TCP/IP スタックを 1) TCP/IP 処理を担当する中層、2) 実行環境に依存したパケット I/O 機構である下層、3) アプリケーションや特定用途のための機能拡張などの上層に分割する。高い通信性能を達成するために、通信性能に制限を課すことなくそれぞれの階層を統合する必要がある。このような統合を可能とする方式はこれまでに十分に検討されてこなかった。本論文ではこの点に着目し、通信性能に制限を課すことなく統合を可能とする。

第 1 章では、多様な環境や用途において高い性能を達成することができる TCP/IP スタックの実現には、階層化された機能の統合方法が重要でありながら十分に検討されていないという点を明らかにする。さらに、本論文は上層・中層・下層の各層に焦点を当てた三つの研究成果から構成されており、パケットデータについてのメモリコピーが必要となる層を限定することで、性能低下を引き起こすことなく各層の統合を可能にすることを、本論文全体の構成と併せて述べている。

第 2 章では、三層のうちの中層として TCP/IP 処理を担当する TCP/IP スタックへ焦点を当て、TCP/IP スタック実装が提供すべき機能と別の層に位置する実装により提供されるべき機能の境界の見直しと、高い性能の発揮に必要な要因についての分析を基本として、TCP/IP スタックがポータブルであり、別の層との統合が容易でありながら、かつ高い性能を達成することを可能にする API 設計を行うとともに、プロトタイプ実装である iip と呼ばれる TCP/IP スタックについて述べている。また、iip の実装を用いた実験において、API 設計中の性能への配慮が反映された性能計測の結果が観測されたことを報告している。

第 3 章では、三層のうち下層に位置するパケット I/O 機構に着目し、TCP/IP スタック実装が複数のパケット I/O 機構の利用をサポートすることにより、特定のパケット I/O 機構により課される制限を回避するとともに、様々な環境や用途において理想的な性能を発揮できる可能性を向上させることを、iip における実装を元に議論している。

第 4 章では、三層のうち上層に該当するアプリケーションや用途に固有の実装に焦点を当てている。具体的にはユーザー空間で iip を実行する場合を対象に、メモリ安全性を向上するメモリアクセス制限機能を拡張機能として実装する方法を述べている。さらに、その機能を iip や iip を利用するアプリケーションを含む既存の実装に対して透過的に適用する方法および、その機能に起因する性能の低下を抑える仕組みを示している。

第 5 章では、三つの層それぞれについての研究成果の要点および、メモリコピーが必要となる層を限定するという設計方針に則り、本論文のプロトタイプでは中下層でメモリコピーが不要となる実装を行った結果、上層において更なるメモリコピー量削減のための仕組みを導入する機会が得られたという利点を述べるとともに、研究の今後の方向性について議論している。

以上、本論文は TCP/IP スタックに関する重要な知見を提供するものであり、その貢献は工学上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6676 号	氏 名	堀 涼介
主 論 文 題 名 :			
Learning-based Pose Estimation with Multimodal Sensing and Physics-based Modeling for Practical Human Motion Capture (学習ベースの姿勢推定を基盤としたマルチモーダルセンシングおよび物理ベースモデリングによる実用的な人間動作計測)			
<p>人間の動作をデジタル化するモーションキャプチャ (MoCap) 技術は、スポーツ科学、リハビリテーション、ロボティクスなど多様な分野における基盤技術として重要性を増している。しかし、従来の MoCap システムは多数のカメラを必要とし、設備コストや設置環境に大きな制約があるため、日常生活空間で広く活用することは依然として困難である。本研究は、日常環境において高精度かつ信頼性の高い人間動作計測を実現することを目的とし、多様なセンサモダリティを活用した 4 つのアプローチを体系的に示す。</p> <p>第一のアプローチでは、固定カメラの撮影範囲の制約や遮蔽の問題に対応するため、手首装着型の全天球カメラを用いる MoCap 手法を構築する。人物シルエット画像を活用する機械学習モデルにより、日常環境においても頑健な全身 3 次元姿勢推定を可能にする。第二のアプローチでは、悪照明条件に対する頑健性向上のための、輝度変化を非同期に取得するイベントカメラを利用した手法を示す。低照度環境や高速動作といった従来の RGB カメラが不向きな状況下においても、姿勢および形状を高精度に推定でき、イベントデータの有効性を明らかにする。第三のアプローチでは、日常生活での歩行動作の簡便な取得を目的とし、靴内部に内蔵された少数の慣性センサ (IMU) 情報から全身歩行姿勢を推定する枠組みを示す。最小限の個数のセンサー構成と、長時間計測における誤差蓄積を回避する仕組みにより、日常的な歩行解析や長期的モニタリングへの実用性を高める。第四のアプローチでは、少数のウェアラブルセンサ計測を物理シミュレーションと統合し、物理的整合性を備えた MoCap を行うためのフレームワークを構築する。スマートウォッチやスマートインソールから得られる運動学的・力学的情報をもとに、関節トルク駆動の人体モデルが物理シミュレーター内で動作を再現する。</p> <p>これらのアプローチは、視野制限、照明条件、装着負荷、物理的妥当性といった多面的な技術課題に対してそれぞれ独立して有効性を示す一方で、センサ構成やモダリティ、推定原理が相互補完的に機能する。将来的には、状況に応じてこれらを組み合わせて利用することで、日常環境における MoCap に求められる「精度と利便性の両立」をより高い水準で実現し得る。それにより、産業・医療・介護などの現場で求められるモニタリングや機能評価を支える基盤技術としての役割を果たすとともに、さらにその先のヒューマンデジタルツインや次世代ロボティクスの実現へと発展する可能性を持つ。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6676 号	氏 名	堀 涼介
論文審査担当者：	主査 慶應義塾大学教授	博士（工学）	斎藤 英雄
	副査 慶應義塾大学教授	博士（情報学）	杉浦 孔明
	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	五十川 麻理子
	産業技術総合研究所	博士（工学）	多田 充徳

学士（工学）、修士（工学）堀 涼介君提出の学位請求論文は、「**Learning-based Pose Estimation with Multimodal Sensing and Physics-based Modeling for Practical Human Motion Capture** (学習ベースの姿勢推定を基盤としたマルチモーダルセンシングおよび物理ベースモデリングによる実用的な人間動作計測)」と題し、7章で構成されている。

人間の動きをデジタル化するモーションキャプチャ (MoCap) 技術は、スポーツ科学やリハビリテーション、ロボティクスなどの基盤技術として重要性を増しているが、従来のシステムは設置環境やコスト、装着の負担といった実用上の制約が課題となっている。本論文は、これらの課題を解決するために、多様なセンサモダリティの活用と物理ベースのモデリングを導入した新しい姿勢推定法を提案し、正確で信頼性の高い運動計測の有効性を検証した成果をまとめたものである。

第1章では、本論文で注目した学習ベースの姿勢推定における問題点とその解決のための基本的コンセプトについて述べ、関連研究に対する位置づけを示している。

第2章では、視覚センサおよび非視覚センサを用いた姿勢推定技術と、物理学に基づく運動モデリングに関する広範なサーベイが示されている。

第3章では、固定カメラの遮蔽問題を解決するため、手首装着型全方位カメラを用いた姿勢推定手法を提案している。背景差分によるシルエット画像を活用した機械学習モデルと、ドメインギャップを埋めるための疑似シルエット生成アルゴリズムを導入することで、日常生活環境における背景変化に影響されない頑健な全身3次元姿勢推定が可能であることを示している。

第4章では、従来のRGBカメラでは対応が困難であった低照度環境や高速動作時における推定精度を向上させるため、輝度変化を非同期に捉えるイベントカメラを用いた手法を提案している。新たに構築した **EventPointMesh Dataset (EPMD)** を用いた評価により、イベント情報の高い時間解像度を活かした提案手法が正確な身体姿勢・形状の推定が可能であることを実証している。

第5章では、日常的な歩行計測の利便性を高めるため、靴に埋め込んだ少数の慣性計測ユニット (IMU) のみを用いた歩行姿勢推定フレームワークを提案している。損失関数の最適化により、長時間の計測においても誤差の累積を抑制し、センサ配置や履物の違いによる影響を軽減することで、日常的なモニタリングに資する実用的な解析手法を示している。

第6章では、推定結果の物理的な整合性を確保するため、ウェアラブルセンサと物理シミュレーションを統合した手法を提案している。スマートウォッチやスマートインソールから得られる運動情報を用い、物理シミュレータ内の人間モデルをトルク駆動させることで、物理法則に矛盾しない妥当な運動再構成を実現できることを示している。

最後に第7章では本論文で得られた成果と結論をまとめ、本論文で提案したマルチモーダルなアプローチが、人間デジタルツインやロボティクスへ寄与する可能性と、今後の課題を議論している。

以上要するに本研究は、人間運動計測における環境制約やセンサの侵襲性、物理的整合性の欠如といった諸課題を解決するための新たな方法を提案し、提案手法の原理を利用した多様なセンサ活用による高度な解析手法を示し、提案手法が日常生活環境においても高い精度と利便性を両立できる可能性を有することを示したものであり、工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6677 号	氏 名	安田 一希
主論文題名： Molecular Dynamics Simulations of Biomolecular Interactions toward Multilayered Mechanisms of Transcriptional Regulation (転写制御における多階層的機構の理解に向けた分子動力学法による生体分子相互作用解析)			
<p>転写は、DNA に記録された遺伝情報から RNA を合成する過程であり、遺伝子発現において中核をなすとともに、がんを含む疾患に関与するとされている。DNA 全長のうち、どの領域を、いつ転写するかは、多階層的な制御機構により緻密に制御されている。生体分子の相互作用は細胞内現象の根源であり、転写制御に関しては、生体分子の構造を介した特異的な分子認識と、非特異的な相互作用を介した自己集合現象という二つの現象が、重要な物理化学的基盤である。分子シミュレーションは、こうした生体分子の相互作用を原子・分子レベルで解析する手法であるが、転写の多階層的な制御機構を包括的に理解するための一般的なシミュレーション方法および解析指針は確立されていない。本研究では、転写制御における多階層的機構の理解に向け、分子動力学法により生体分子相互作用を解析する方法論の確立を目的とする。</p> <p>第 1 章では、生化学的および物理化学的な研究背景と研究目的を述べた。</p> <p>第 2 章では、分子動力学法の基本的な理論的を述べた。</p> <p>第 3 章では、特異的な分子認識において、生体分子と小分子の正確な結合性予測が困難であるという課題に対して、結合親和性を正確かつ簡便に予測する新規手法を提案した。転写調節因子である <b>Bromodomain-containing protein 4</b> の系および、10 種類の阻害剤を結合させた複合体の系に対して全原子分子動力学計算を実施した。深層学習モデルを用いた次元削減法により、タンパク質の結合ポケット付近の構造ゆらぎの違いを抽出することで、抽出した特徴量が結合親和性と強く相関することを示した。</p> <p>第 4 章では、自己集合現象により形成される転写凝縮体が、既存の粗視化タンパク質モデルのみでは再現されないという課題に対して、新規 RNA モデルを開発した。結合長をはじめとするミクロな物性値をボトムアップ方式、非結合性の相互作用をトップダウン方式により、モデルパラメータを調整した。このモデルは RNA 同士の相互作用と、タンパク質との相分離を準定量的に再現できることを示した。さらに、介在因子 <b>Mediator 1</b> と RNA を混合した分子動力学計算では転写凝縮体が形成されたとともに、転写凝縮体によるタンパク質分配特性が RNA 濃度に応じて変化することを示した。</p> <p>第 5 章では、転写凝縮体をもつ分子認識機能の解明に取り組んだ。2 種類の凝縮体 (<b>Mediator 1</b> の C 末端変性領域および <b>Fused in Sarcoma</b> の N 末端変性領域) に、6 種類の転写因子変性領域を混合した系で粗視化分子動力学計算を実施した。凝縮体と転写因子の相互作用を解析し、転写因子の分配が特定の配列モチーフを介した相互作用エネルギーによって駆動されることを明らかにした。さらに、その分配傾向をアミノ酸配列から予測する手法を開発し、細胞実験で検証されているタンパク質配列セットの分配傾向を定性的に予測できることを示した。</p> <p>第 6 章では、本研究によって得られた成果を結論としてまとめ、今後の展望を述べた。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6677 号	氏 名	安田 一希
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 泰岡 顕治
	副査	慶應義塾大学専任講師	Ph. D. ダット, チャル
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 山本 詠士
		慶應義塾大学専任講師	博士（理学） 荳口 友隆

学士（工学）、修士（工学）安田一希君の学位請求論文は「Molecular Dynamics Simulations of Biomolecular Interactions toward Multilayered Mechanisms of Transcriptional Regulation (転写制御における多階層的機構の理解に向けた分子動力学法による生体分子相互作用解析)」と題し、6 章から構成されている。

転写は、DNA に記録された遺伝情報から RNA を合成する過程であり、遺伝子発現において中核をなすとともに、がんを含む疾患に関与するとされている。DNA 全長のうちどの領域をいつ転写するかは、多階層的な制御機構により緻密に制御されている。生体分子の相互作用は細胞内現象の根源であり、転写制御に関しては生体分子の構造を介した特異的な分子認識と、非特異的な相互作用を介した自己集合現象という二つの現象が、重要な物理化学的基盤である。分子シミュレーションは、こうした生体分子の相互作用を原子・分子レベルで解析する手法であるが、転写の多階層的な制御機構を包括的に理解するための一般的なシミュレーション方法および解析指針は確立されていない。本論文では、転写制御における多階層的機構の理解に向け、分子動力学法により生体分子相互作用を解析する方法を提案している。

第 1 章では生化学的および物理化学的な研究背景と研究目的を、第 2 章では分子動力学法の基本的な理論的を述べている。

第 3 章では、特異的な分子認識において、生体分子と小分子の正確な結合性予測が困難であるという課題に対して、結合親和性を正確かつ簡便に予測する新規手法を提案している。転写調節因子である Bromodomain-containing protein 4 の系および、10 種類の阻害剤を結合させた複合体の系に対して全原子分子動力学計算を実施している。深層学習モデルを用いた次元削減法により、タンパク質の結合ポケット付近の構造ゆらぎの違いを抽出することで、抽出した特徴量が結合親和性と強く相関することを示している。

第 4 章では、自己集合現象により形成される転写凝縮体が、既存の粗視化タンパク質モデルのみでは再現されないという課題に対して、新規 RNA モデルを開発している。結合長をはじめとするミクロな物性値をボトムアップ方式、非結合性の相互作用をトップダウン方式により、モデルパラメータを調整している。このモデルは RNA 同士の相互作用と、タンパク質との相分離を準定量的に再現できることを示している。さらに、介在因子 Mediator 1 と RNA を混合した分子動力学計算では転写凝縮体が形成されたとともに、転写凝縮体によるタンパク質分配特性が RNA 濃度に応じて変化することを示している。

第 5 章では、転写凝縮体をもつ分子認識機能の解明に取り組んでいる。2 種類の凝縮体に、6 種類の転写因子変性領域を混合した系で粗視化分子動力学計算を実施している。凝縮体と転写因子の相互作用を解析し、転写因子の分配が特定の配列モチーフを介した相互作用エネルギーによって駆動されることを明らかにしている。さらに、その分配傾向をアミノ酸配列から予測する手法を開発し、細胞実験で検証されているタンパク質配列セットの分配傾向を定性的に予測できることを示している。

最後に第 6 章で、研究全体に関する結論を述べている。

以上要するに、本論文の著者は、転写制御における多階層的機構の理解に向けた分子動力学シミュレーションにより、生体分子相互作用を解析する方法を提案した。その成果は、転写制御における生体分子の構造を介した特異的な分子認識と、非特異的な相互作用を介した自己集合現象の解析方法を提案するだけでなく、様々な生体分子の相互作用研究に貢献し得るものである。よって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6678 号	氏 名	濱口 直
------	------------	-----	------

主論文題名：

粉体および界面活性剤配合系における混合物特性の機械学習予測と処方設計

本論文は、機械学習と記述子活用、さらに粗視化分子シミュレーション (DPD) を統合し、多成分配合における特性予測による処方設計の実用フレームワークを構築・検証したものである。第 1 章では、研究背景として錠剤設計の基礎とクレンジング剤の機能・種類を概説し、本研究の位置づけと目的を示した。

第 2 章では、製品開発における AI 手法の動向を整理し、マテリアルインフォマティクス/ケモインフォマティクス/プロセスインフォマティクス、QSAR/QSPR と記述子の概念、および混合物予測の課題を論じた。

第 3 章では、錠剤開発における複数特性値 (硬度・崩壊時間・流動性指標・凝集性・厚み) を処方情報 (原料添加率・プロセス情報) から予測する系を対象とした。このとき、処方情報に加え、各原料の物性値や粒度分布を加味した記述子を作成した。この記述子を活用して多様な学習モデルを構成した結果、記述子追加による精度向上を確認した。また、硬度・崩壊時間に対しては外挿予測を行った。結果、記述子は硬度に対する精度向上に寄与した。

第 4 章では、界面活性剤混合型の洗顔フォーム (水性クレンジング剤) 開発における重要な特性値である洗浄率予測を対象とした。本章では各原料の分子記述子とハンセン溶解度パラメータ (HSP) を活用した機械学習モデルが最高性能を示すことを明らかにした。さらに、どの原料、および、原料の組み合わせが特性値に影響するか可視化することを目的として逆解析を実施した。手法として、原料カテゴリーに設計上の制約を与えた上で、 $10^5$  処方生成し、予測値を各利用原料、および組み合わせで層別して予測値分布を比較することで、原料による特性値に対する影響を整理した。結果、非イオン性界面活性剤の導入と多価アルコールの併用が洗浄率向上に寄与する傾向を整理した。

第 5 章では、第 4 章を発展させ、DPD により自己組織化・界面挙動を粗視化モデリングし、シミュレーション由来記述子を学習に統合して汎化性能を検証した。また、本章では開発側要求を考慮し、新規原料組み合わせ時の推論精度評価、および、新規原料使用時の推論精度評価を追加した。その結果、記述子の追加によりいずれの精度評価においても精度が改善した。また、DPD 由来の記述子は新規原料使用時の精度評価において最も精度向上に寄与し、シミュレーションによる外挿予測に対する効果を確認した。

第 6 章では本研究の結言として、研究全体の総括を行った。

以上より、本研究は、多成分混合系に対する特性値の予測を用いた設計を一体化した実務適用可能な基盤技術を示し、実験スクリーニングの効率化と設計知の形式知化に資することを示した。

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6678 号	氏 名	濱口 直
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士(工学)	荒井 規允
	副査	慶應義塾大学教授 博士(工学)	泰岡 顕治
		慶應義塾大学教授 博士(工学), TeknD	深潟 康二
		慶應義塾大学教授 博士(理学)	畑中 美穂

濱口君提出の学位請求論文は「粉体および界面活性剤配合系における混合物特性の機械学習予測と処方設計」と題し、全6章より構成されている。

多成分配合を前提とする製品開発においては、複数の要求特性を満たす処方探索が実験回数に強く制約され、開発期間・コストの増大が長年の大きな課題となっている。とりわけ混合物は、配合比に加えて成分間相互作用や相挙動が特性を支配し、単純な経験則や線形混合則が成立しにくいことから、一般に予測が難しい対象である。このためデータ駆動手法による高度化が期待される一方、混合物に適した記述子設計や、新規成分・新規組み合わせへの外挿性確保など、実務適用に向けた方法論は発展途上にある。

このような背景のもと、本論文では、混合物予測の代表的課題を有する系として「粉体（錠剤処方）」および「界面活性剤配合系（クレンジング剤）」を研究対象に設定し、機械学習と記述子活用、さらに粗視化分子シミュレーションの一種である DPD 法を由来の記述子を統合した実用フレームワークを構築して、特性予測と処方設計を一体的に検証した。

第1章では、錠剤設計の基礎ならびにクレンジング剤の機能・種類を概説し、多成分配合における処方設計課題を整理した上で、本研究の位置づけと目的が示されている。

第2章では、製品開発における AI 手法の動向を俯瞰し、マテリアルインフォマティクス／ケモインフォマティクス／プロセスインフォマティクスの枠組み、QSAR/QSPR と記述子の概念を整理するとともに、混合物予測の要点が論じられている。

第3章では、粉体を扱う錠剤開発を対象として、処方情報（原料添加率・プロセス情報）から複数特性値（硬度・崩壊時間・流動性指標・凝集性・厚み）を予測する系が検討されている。処方情報に加え、各原料の物性値や粒度分布を反映した記述子を作成し学習に導入した結果、全特性値で予測精度が向上し、実務データに対する記述子設計の有効性が示されている。

第4章では、界面活性剤混合型の水性クレンジング剤における洗浄率予測を扱い、各原料の分子記述子とハンセン溶解度パラメータ（HSP）を活用した機械学習モデルが高性能を示すことを明らかにしている。さらに逆解析として、原料カテゴリーの添加条件に制約を与えつつ  $10^5$  処方をコンピュータ上で生成し、得られた洗浄率予測値分布を利用原料で層別と比較することにより洗浄率に影響する原料を整理した。その結果、非イオン性界面活性剤の導入と疎水性多価アルコールの併用が洗浄率向上に寄与する傾向が示されている。

第5章では、DPDにより自己組織化・界面挙動を粗視化モデリングし、モデリングおよびシミュレーション由来記述子を学習へ統合して汎化性能を検証している。加えて、新規原料組み合わせ時および新規原料使用時の推論精度評価を導入し、外挿的状況への適用性を検討した。結果、記述子追加によりいずれも精度が改善し、特に DPD 由来記述子が新規原料使用時の精度向上に寄与することが示されている。

第6章では、本研究全体の結果を総括し、統合フレームワークの意義と今後の展望が述べられている。

以上、本研究は、一般に困難な混合物物性予測を対象として、粉体系と界面活性剤配合系の双方で、特性予測と処方設計を統合した実務適用可能な基盤技術を提示したものである。実験スクリーニングの効率化と設計知の形式知化に資する点で、工学的・産業的な波及効果も期待される。

よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 6679 号	氏 名	松永 知樹
主論文題名：  多層周波数・周期性結合表現に基づくマルチトラック自動採譜			
<p>マルチトラック自動採譜は、音楽録音を各楽器に割り当てられた記号的な音楽表現に変換する課題である。この課題は、個々の楽器における音符のオンセット事象およびオフセット事象を同時に採譜する必要がある。しかし、多声音楽の信号は異なる信号成分の干渉により複雑なスペクトルパターンを持つ。特に、マルチトラック自動採譜用の多くのデータセットの資源は限られているため、採譜は困難である。これらの問題が原因となり、最先端の採譜システムでも高い精度が求められる用途には不十分である。</p> <p>高精度なマルチトラック自動採譜を実現するために、本研究ではまず音楽信号の特徴表現について検討する。周波数・周期性結合表現 (CFP) は、周波数領域のスペクトルとケフレンシー領域のケプストラムを結びつけることで効果的な音高追跡を可能にする特徴表現である。しかし、CFP は高調波が積み重なっている場合には十分な合理性を欠いている。そこで本論文では、ケプストラムを適切にリフタリングすることで抽出される部分ケプストラムを用いて CFP を拡張することにより、重なった高調波から効果的に音高を検出する特徴表現を提案する。周波数領域およびケフレンシー領域の特徴は部分ケプストラムによって多層化されるため、提案法は多層 CFP (ML-CFP) として構築される。実験では、ML-CFP に基づく多重音推定法が教師なし手法の中で最も優れた総合性能を提供すると示される。</p> <p>次に、マルチトラック自動採譜向けの深層学習アーキテクチャの構築について検討する。深層学習に基づく採譜システムは、フレーム単位の音高事象だけでなく音符のオンセット事象にも着目することで性能が向上しうる。また、入力データ表現は音楽録音から音符の属性を学習する際の重要な要素となる。本論文では、U-Net に基づく深層学習アーキテクチャおよび Transformer の派生である Perceiver に基づく深層学習アーキテクチャを統合することで、複数の楽器に対するオンセットおよびフレームを共同で採譜するフレームワークを提案する。提案されたフレームワークは ML-CFP を入力データ表現として採用することで、異なる楽器の音高を効果的に検出する。実験では、提案されたマルチトラック自動採譜システムが低リソースのデータセットを含む五つの採譜データセットにおいて既存のシステムより優れていると実証される。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6679 号	氏 名	松永 知樹
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 斎藤 博昭
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 斎藤 英雄
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 内山 孝憲
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 高道 慎之介

  

学士（工学）、修士（工学）松永知樹君提出の学位請求論文は「多層周波数・周期性結合表現に基づくマルチトラック自動採譜」と題し、全5章から構成されている。

音楽録音を記号的な音楽表現に変換することを目的とする自動採譜は、音楽教育や音楽制作、音楽検索など幅広い用途への応用が期待されており、多重音推定やオンセット（開始音）検出、楽器認識といった音楽信号を扱う上で重要となる複数の要素問題から構成されているため、音楽信号処理の分野で根本的な問題である。特に、マルチトラック自動採譜は音高やオンセット、オフセット（消滅音）といった音符の属性を推定して楽器ごとにグループ化することを目標としており、自動採譜の中心的な課題となっている。

本論文は、音楽信号の重なった高調波を高い信頼性で識別する特徴表現を入力データ表現として採用した深層学習モデルに基づくマルチトラック自動採譜システムを提案し、その性能を評価した結果をまとめたものである。

第1章では、研究背景としてマルチトラック自動採譜の重要性および難易度を示し、本論文の目的および構成を述べている。

第2章では、自動採譜の要素問題の一つである多重音推定および自動採譜についての関連研究を調査し、本論文の位置づけを述べている。

第3章では、重なった調波構造を持つ音楽信号に対して効果的に周波数、周期性および調和性情報を捉える特徴表現である、多層周波数・周期性結合表現（ML-CFP）を提案している。ML-CFPでは、ケプストラムを適切に処理することで得られる部分ケプストラムに基づいて音楽信号の音域を分割することで、各音域に対応する周波数領域およびケフレンシー領域の特徴を形成している。また、ML-CFPに対して信号処理に基づく音高選択手順を適用することで、任意の楽器に適用可能な教師なしの多重音推定法を構築しており、実験では従来の多重音推定法を上回る性能を達成することを報告している。さらに、同時発音数や持続時間尺度、楽器の種類に関する汎化性の検証実験を通じて、ML-CFPが深層学習モデルの入力データ表現として有効であることを示している。

第4章では、複数の楽器を含む音楽録音から効果的に楽器クラスを認識し、各楽器クラスに対するフレーム単位の音高および音符のオンセットを共同で予測するマルチトラック自動採譜システムを提案している。このシステムは、入力データ表現から渡された時間周波数情報を洗練させる残差U-Net（ResUnet）および音符の属性情報を抽出する階層的Perceiverを統合した深層学習モデルに基づくものである。また、音符の属性の高精度な予測に向けて、深層学習モデルではML-CFPを入力データ表現として採用している。実験では、従来のマルチトラック自動採譜システムを上回る性能を実現し、ResUnet、階層的Perceiver、およびML-CFPが性能向上に寄与することを明らかにしている。さらに、楽器ごとおよび楽器属ごとの評価を通じて、データ数の多い楽器クラスに対して高品質の採譜結果が得られることや、楽器ラベルの粒度に頑健であることを示している。

第5章では、本論文を総括するとともに今後の展望について述べている。

以上、本論文は多層化された周波数領域およびケフレンシー領域の特徴を持つ多チャンネル特徴表現およびそれに基づくマルチトラック自動採譜システムを提案し、実験を通じてその有効性を示したものであり、工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

# Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.6680	Name	Masud, Abdullah Al
Thesis Title			
Graph-Based Modeling for Human Pose Estimation from Multi-Modal Sensor Data			
<p>Human pose estimation using device-free sensing has emerged as a privacy-preserving alternative to vision-based approaches, offering robustness under adverse lighting and occlusion conditions. However, accurate pose estimation from radio-frequency (RF) and depth sensing modalities remains challenging due to sparse measurements, multi-path propagation, sensor noise, and strong sensitivity to environmental variations. This dissertation investigates graph-based learning frameworks for human pose estimation using heterogeneous non-visual sensing modalities, with a primary focus on millimeter-wave (mmWave) radar, LiDAR, and Wi-Fi Channel State Information (CSI). The central objective is to exploit modality-specific inductive biases and relational structures through graph representations, while enabling effective fusion across modalities.</p> <p>Pose estimation from mmWave radar forms a foundational component of this thesis. A graph-based pose estimation framework is proposed in which mmWave radar point clouds are represented as graphs with geometrically grounded node and edge features. A graph attention network (GAT)-based architecture, termed mmGAT, is introduced to model spatial dependencies within radar point clouds. Extensive evaluations on public benchmarks demonstrate that the proposed approach significantly outperforms existing methods, achieving up to 34% error reduction on human pose estimation over the state-of-the-art approaches. Building upon this framework, a generalized point cloud feature extraction method, PCFEx, is developed to jointly capture node-level and frame-level representations using a set of statistical operators referred to as StatBox. The PCFEx framework achieves consistent improvements across multiple datasets, with pose estimation error reductions of up to 43%, and is further extended to support temporal modeling for activity recognition, achieving an accuracy of 98.8% on a benchmark dataset.</p> <p>For LiDAR-based pose estimation, this thesis introduces an enhanced version of PCFEx, referred to as Modified-PCFEx, which adapts the graph-based framework to the structural characteristics of LiDAR point clouds. Two complementary settings are explored: a cross-modal approach that leverages mmWave radar measurements as spatial priors, and a LiDAR-only approach without auxiliary sensing. By integrating StatBox-based feature extraction with graph attention networks, along with preprocessing techniques such as ground-plane removal and density-based clustering, the proposed methods achieve significant performance gains. The mmWave-guided approach yields up to 62% error reduction, while the LiDAR-only model consistently outperforms existing benchmarks under diverse evaluation protocols.</p>			

For Wi-Fi CSI-based pose estimation, a novel Dual-graph representation is proposed to disentangle spatial-temporal and spatial-frequency structures of CSI measurements. A space-time graph (ST-graph) and a space-frequency graph (SF-graph) are constructed, where ST-graph node features encode spectral characteristics across subcarriers and SF-graph node features encode temporal dynamics over rolling windows. Two parallel graph neural networks process these graphs, their outputs are fused with frame-level features to produce a unified pose representation. Experimental results on public datasets demonstrate improved accuracy over state-of-the-art CSI-based methods, with error reductions of up to 20%.

Finally, this thesis introduces a unified Modality Graph framework for multi-modal human pose estimation, in which each sensing modality is treated as a node in a fully connected directed graph. Modality-specific feature extractors, including PCFEx-based models for point clouds and the Dual-graph CSI model, are integrated through graph attention-based fusion to exploit cross-modal complementarities. The resulting multi-modal framework achieves improved robustness and accuracy, yielding significant error reduction compared to single-modality baselines and other multi-modal approaches.

Overall, this dissertation demonstrates that graph-based modeling provides a principled and scalable foundation for device-free human pose estimation. By systematically progressing from single-modality graphs to multi-modal modality graphs, the proposed methods establish strong benchmarks across diverse sensing modalities and highlight the potential of unified graph representations for robust, privacy-preserving human-centered sensing.

## 審査の要旨

報告番号	甲 第 6680 号	氏 名	Abdullah Al Masud
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	大槻 知明
副査	慶應義塾大学教授	工学博士	池原 雅章
	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	五十川 麻理子
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Ph.D. Guan Gui			
<p>Bachelor of Science in Electrical and Electronic Engineering, Abdullah Al Masud 君提出の学位請求論文は、「Graph-Based Modeling for Human Pose Estimation from Multi-Modal Sensor Data (マルチモーダルセンサデータからの人体姿勢推定のためのグラフベースモデリング)」と題し、全6章から構成されている。</p> <p>近年、人体姿勢推定 (HPE : Human Pose Estimation) は医療・介護支援, スマート環境, ヒューマンコンピュータインタラクションなど幅広い分野への応用が期待されている。しかしながら、従来主流である視覚ベース手法は、プライバシー保護の観点に加え、遮蔽や照明条件への依存性とといった制約を有する。これに対し、ミリ波レーダ, LiDAR, Wi-Fi CSI (Channel State Information) などの非視覚センシングは、プライバシーを侵害せず、暗所や部分遮蔽下でも動作可能であるという利点を有する一方で、疎雑音を含む間接的観測から人体の三次元構造を推定するという本質的困難を伴う。特に、観測データが順序を持たない点群や高次元テンソルとして与えられることから、従来の画像ベース深層学習手法をそのまま適用することは理論的にも実践的にも限界がある。</p> <p>本論文は、これらの課題に対し、グラフ構造に基づく学習理論を中核とした統一フレームワークを構築し、単一モダリティからマルチモーダル融合へと体系的に発展させたものである。</p> <p>第1章では、点群データの順列不変性およびセンサ観測の関係構造性に着目し、GNN (Graph Neural Network) が理論的に適合する理由を整理している。対称集約関数による不変性保証、k-NN グラフによる疎結合構造、明示的エッジ特徴による幾何関係表現を数理的観点から示し、CNN (Convolutional Neural Network) や MLP (Multi Layer Perception) との比較を通して、グラフベースモデリングの妥当性と優位性を明確にしている。この理論的整理は、本研究全体を支える重要な基盤を与えている。</p> <p>第2章では、ミリ波レーダ点群をグラフとして表現し、Graph Attention Network を用いた mmGAT を提案している。さらに、統計演算子群 StatBox を導入した PCFEx (Point Cloud Feature Extraction) を開発し、ノードおよびフレームレベル特徴を統合的に抽出する枠組みを構築している。これにより、従来の CNN ベース手法と比較して大幅な誤差削減を達成し、非視覚点群データに対する有効性を実証している。</p> <p>第3章では、PCFEx を LiDAR へ拡張した Modified-PCFEx を提案し、床除去やクラスタリングによる前処理に加え、新たに設計した Pose Reference Loss を導入している。本損失関数は、人体位置推定と姿勢推定を分離しつつ統合的に最適化する構造を有しており、従来の MPJPE に基づく単純な損失設計に比べて理論的にも実用的にも改良が加えられている。さらに、ミリ波情報を補助的に利用するクロスモーダル手法を示し、環境分割条件下においても顕著な性能向上を実証している。</p> <p>第4章では、Wi-Fi CSI の時間・周波数構造を分離して表現する Dual-Graph モデルを提案している。Space-Time グラフおよび Space-Frequency グラフを構築し、並列 GNN による特徴抽出と統合を行うことで、従来の CSI ベース手法が抱えていた構造表現の曖昧性を解消し、精度向上を達成している。この枠組みは、点群以外の構造化センサデータに対するグラフ学習の適用可能性を拡張するものである。</p> <p>第5章では、各モダリティをノードとする Modality Graph を提案し、グラフ注意機構によるモダリティ間融合を実現している。これにより、各センサの補完関係を動的に学習し、単一モダリティ手法および既存マルチモーダル手法と比較して、精度およびロバスト性の両面で優れた結果を示している。単一モダリティから統一融合モデルへと段階的に発展させた構成は、本論文の体系性を示す重要な点である。</p> <p>以上より、本論文は非視覚人体姿勢推定に対する理論的基盤を確立するとともに、複数モダリティに対する体系的手法を構築し、統一的多モーダル融合へと発展させた点において高い独創性と学術的価値を有すると評価できる。</p> <p>よって、Abdullah Al Masud 君は博士（工学）の学位を授与するにふさわしいと認める。</p>			

## 内容の要旨

報告番号	乙 第 5438 号	氏 名	山田 大介
主 論 文 題 名 :			
<b>Study on Quantification of Human Factors Related to Automotive Comfort</b> (自動車の快適性に関わる人間特性の定量化に関する研究)			
<p>本論文は、自動車の快適性に関わる人間特性を定量的に解析する手法の提案を目的とする。自動車の快適性における 3 つの要素、乗り心地、ブレーキフィール、ステアリングフィールを対象に、手法を検討した。</p> <p>まず乗り心地に関しては、医療用超音波イメージング技術と光学トラッキング技術を組み合わせ、座位全身振動下における内臓動態を高精度に測定する実験手法を提案した。サブミリメートル精度の分解能を実現し、胃を中心とした軟部組織の周波数応答特性を定量化できることを示した。この成果は、乗り心地を予測する人体モデルの妥当性検証や、乗り心地制御システムの最適化に有用な基盤データを提供する。</p> <p>ブレーキフィールの研究では、下肢の筋収縮力を推定するための逆解析手法を提案した。筋の柔軟性や形状の影響を数理的に簡便に表現するため、関節トルク方向に応じて筋力の作用方向を変化させる手法を導入することで、様々な姿勢において生理学的整合性の高い筋力推定を実現した。この手法は、ペダル操作時の筋活動を正確に定量化できることから、キャビンレイアウト設計や操作性評価に応用することができる。</p> <p>ステアリングフィールの研究では、実際の操舵系ハードウェアを組み込まずとも、操舵系の慣性・減衰・剛性・摩擦要素が操舵反力に及ぼす影響を制御によって再現できる、ドライビングシミュレータを提案した。本手法を用いた仮想環境下での走行実験によって、摩擦特性が操舵安定性や操縦性の知覚に大きく寄与することを明らかにするとともに、実機を用いずとも仮想環境下でステアリングフィール設計が行えることを示した。</p> <p>これらの研究を総合すると、人間の力学的・生理的・知覚的応答を車両力学と統合的に扱う定量化手法を提案したといえる。本論文の成果は、人間中心のモビリティ開発に向けた科学的基盤を提供するものである。</p>			

## 審査の要旨

報告番号	乙 第 5438 号	氏 名	山田 大介
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 竹村 研治郎
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 高野 直樹
		東京大学教授	博士（工学） 荻原 直道
		Korea University 教授	Ph. D. Shinsuk Park

学士(工学), 修士(工学), 山田大介君提出の学位請求論文は「Study on Quantification of Human Factors Related to Automotive Comfort (自動車の快適性に関わる人間特性の定量化に関する研究)」と題し, 本論 5 章により構成されている。

自動車の性能は環境性, 耐久性, 操作性, 安全性の 4 つに大別される。環境性と耐久性が機械固有の性能であるのに対して, 操作性と安全性は操作者である人間を含めたヒューマン-マシンシステムとしての性能であると言える。しかし, 自動車工学において人間特性を定量的に扱える手法はこれまで限定的であり, ヒューマン-マシンシステムとしての操作性や安全性を工学的に取り扱う基盤が整備されていないという課題があった。このため, 本研究では乗り心地, ブレーキペダル操作性, ステアリングフィールという運転者が深く関わる快適性に関連して, 人間特性の定量化手法を確立することを目的としている。

第 1 章は序論であり, 研究の背景および関連研究の動向をまとめ, 本研究の目的を述べている。

第 2 章では, 医療用超音波イメージング技術と光学トラッキング技術を組み合わせることによって, 自動車に乗車する際の姿勢である座位における全身振動のもと, 内臓動態を高精度に測定する手法を提案している。高精度の分解能で内臓の動きを測定する手法を実現し, 胃を中心とした軟部組織の周波数応答特性を定量化できることを示した。これにより, 自動車の乗り心地を予測する人体モデルの妥当性の検証や乗り心地制御システムの最適化に有用な基礎データを取得する基盤が確立された。

第 3 章では, 自動車におけるブレーキ動作に着目し, 下肢の筋収縮力を推定するための逆解析手法を論じている。筋の柔軟性や形状の影響を表現する簡便な数理モデルとして, 関節トルクの方向に応じて筋力の作用方向を変化させる新たな手法を提案し, 姿勢が変化した場合でも生理学的に整合性の高い筋力推定ができることを示している。これにより, ブレーキペダル操作時の筋活動を正確に定量化できるようになり, キャビンレイアウトの設計や操作性の評価の基盤が確立された。

第 4 章では, ステアリングフィールに関して, 実際にステアリング系ハードウェアを組み込むことなく, 慣性, 減衰, 剛性, 摩擦要素が操舵反力に及ぼす影響をドライビングシミュレータの制御に導入する手法を提案している。本手法を用いた仮想空間での走行実験によって, 摩擦特性が操舵安定性や操縦性の知覚に寄与することを明らかにした。すなわち, ステアリング系の実機を用いることなく, 仮想空間でステアリングフィールの設計が行える基盤が確立された。

第 5 章は結論であり, 本論文の結果の総括と今後の展望を述べている。

以上のように, 本論文で論じられた座位振動における内臓動態の測定手法, 下肢筋収縮力の推定手法, およびドライビングシミュレータの仮想空間でのステアリングフィールの再現手法は, 自動車の快適性に関わる人間特性の定量化を包括的に取り扱い, 今後, 人間の力学的, 生理的, 知覚的応答と車両力学を統合的に扱う基盤になり得る成果であり, 自動車工学および人間工学分野に寄与するところが少なくない。また, こうした成果は著者が研究者として自立して研究活動を行うために必要な高度な研究能力および豊かな学識を有することを証したものである。

よって, 本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。

## Thesis Abstract

Registration Number	“OTSU” No.5454	Name	May Hlaing Win Khin
Thesis Title			
<p><b>Numerical Study on Fluid Flow Induced by an Elastic Plate with Different Trailing Edge Shapes in Heaving Motion</b></p>			
<p>Flying and swimming animals utilize flapping motion as a basic mechanism to generate the forces required for their propulsion and maneuvering. Since the real-life flappers are not rigid, a certain degree of flexibility of the flapper can have a significant influence on its aerodynamic or hydrodynamic performance. In addition, the performance characteristics of the real-life flappers are closely related to its kinematic condition such as flapping frequency and to its morphology such as shape of wings or caudal fins. The current study provides a contribution to the experimental work for achieving better understanding on the relation between caudal-fin shape and the frequency characteristics of hydrodynamic performance. Since hydrodynamic performance results from the interaction of the forces induced by the deformable body and those induced by the surrounding fluid, the interaction between the fluid’s motion and the flexible caudal fin is key to understanding the mechanisms of hydrodynamic performance. In this case, it is desirable to solve this problem as a coupled problem through the interface of the fluid and the solid plate.</p> <p>In the first part, we first perform a three-dimensional fluid-structure coupled simulation as a preliminary study following the corresponding experimental studies using a simple geometry of rectangle-shaped and square-shaped elastic plates. The objectives of the preliminary study are to get insights into the role of resonance flapping frequency in the hydrodynamic performance of a flexible flapping plate, and to ascertain the reliability and accuracy of the current methodology in three-dimensional fluid structure interaction analysis of a flexible flapping plate.</p> <p>In the second part, we present a three-dimensional fluid-structure coupled simulation of a flexible caudal fin with different trailing edge shapes. The influences of caudal fin shape on hydrodynamic performances are investigated by comparing the results of a simplified model of square caudal fin with the forked and deeply forked caudal fins under a wider range of non-dimensional flapping frequency, <math>0.6 &lt; f^* &lt; 1.5</math>, where <math>f^*</math> is the ratio of flapping frequency to the natural frequency of each caudal fin, i.e., <math>f^* = f / f_n</math>. Numerical results show that the amount of forking in the geometry of caudal fin has significant effect on the hydrodynamic performances. The deeply forked caudal fin has greater thrust coefficients and higher propulsive efficiency in the frequency range higher than the natural frequency of each caudal fin. These results may shed some light on understanding the hydrodynamic performances of various caudal fin shapes and provide a suitable choice of caudal fin shape for the robotic underwater vehicles.</p>			

## 審査の要旨

報告番号	乙 第 5454 号	氏 名	May Hlaing Win Khin
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	Dr.-Ing. 小尾 晋之介
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 高野 直樹
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 竹村 研治郎
		慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学） 高橋 英俊

May Hlaing Win Khin（メイ ライン ウィン キン）君提出の学位論文は、Numerical Study on Fluid Flow Induced by an Elastic Plate with Different Trailing Edge Shapes in Heaving Motion（異なる後縁形状を有する弾性板のヒービング運動による推進に関する数値解析）と題し、本編 6 章により構成されている。

水中を遊泳する動物は、推進や操縦に必要な力を生み出す基本的な仕組みとして、ヒービング運動を利用している。その際、ひれなどの器官は剛体ではなく柔軟であるため、ヒービングを駆動する器官の柔軟性が推進性能に大きな影響を及ぼす可能性がある。さらに、実在する器官の性能は、ヒービングの周期や振幅といった運動学的条件や、尾びれの形状などの形態学的特性と密接に関係している。本論文は、魚類の尾びれ形状と、その流体力学的性能を特徴づける周波数特性との関係を明らかにすることを目的とした。具体的には、これまでに行われてきた実験的研究を補完する形で数値解析を実施し、弾性体の振動と推進機構を包括的な力学現象として理解するための知見の深化に貢献することを目指した。

第 1 章では、魚類の推進メカニズムに関する基礎的な理解と、尾びれの形状によって生じる運動学的・力学的な違いについて、これまでに行われてきた実験的・理論的・数値解析的研究を広く概観している。続いて、本研究の目的について述べている。

第 2 章では、尾びれの運動と、それによって駆動される流体運動の支配方程式を紹介している。さらに、尾びれの弾性体としての運動と周囲流体の運動を強連成問題として扱う際の、両者を結びつけるカップリングの基礎事項について述べている。

第 3 章では、数値解析に用いたオープンソース CFD コードである OpenFOAM のライブラリを利用するにあたり、必要となる具体的な手続きや設定について、細部にわたって説明している。

第 4 章では、水中で長方形の弾性体を一定振幅で振動させた際に誘起される周囲流体の運動について、弾性体と流体の相互作用に着目し、基礎事項の検証を目的とした数値解析を紹介している。具体的には、これまでで報告されている 2 つの実験結果を取り上げ、第 2 章および第 3 章で述べた手順に基づいて解析を行い、水中で振動する弾性板の共振現象を十分な精度で再現できることを示した。特に、共振点近傍の周波数領域で振動振幅がどのように変化するか、また加振点と先端部との位相差がどのように変化するかといった特徴的な挙動を捉えることができた。これらの結果は、対応する実験結果との比較により、十分な精度で再現されていることが確認された。

第 5 章では、尾びれの形状変化が推進特性に及ぼす影響に着目し、既存の実験結果を再現することを目的として、切り欠きの深さが異なる 2 種類の弾性板を対象に数値解析を行った。各条件について振動特性の詳細を検討した結果、切り欠きが深い場合には、共振点よりも高い周波数で最大の推進力が発生するという実験的知見を、十分な精度で再現することができた。さらに、板周辺に生成されるはく離渦の運動が、板の両面の圧力差と密接に関係していることを示した。

第 6 章は結論であり、研究で得た知見とともに当該分野における研究課題の将来の方向性について考察が記されている。

以上の研究成果は、生物の推進や羽ばたきのメカニズムに関する研究分野において、これまで十分に整理されてこなかった現象に新たな知見をもたらすものであり、学術的に大きな意義を有している。さらに、将来的な導入が期待される水中推進機構の設計に対して新たな指針を示した点において、社会的な貢献も認められる。

よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。

2026（令和8）年3月までの新制博士学位授与者数は次のとおり。

[ ]内は内数。当該年度学期（2025年度秋学期）授与者数。

学位の種類	課程修了によるもの (課程博士・・・甲)	論文提出によるもの (論文博士・・・乙)	計
工学博士	451	389	840
博士（工学）	1,769 [33]	321 [2]	2,090 [35]
理学博士	26	8	34
博士（理学）	471 [12]	50 [0]	521 [12]
学術博士	0	1	1
博士（学術）	1 [0]	1 [0]	2 [0]
計	2,718 [45]	770 [2]	3,488 [47]

本書に記載した論文審査担当者の所属および職位は2025（令和7）年度秋学期のものである。

2026（令和8）年6月1日 発行

発行者 理工学研究科委員長 泰岡 顕治

編集 慶應義塾大学理工学部学生課学事担当

〒223-8522  
神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1