

2017（平成29）年度 秋 学 期

博 士 （工 学）
博 士 （理 学） 学 位 論 文

論文の内容の要旨および論文審査の結果の要旨

慶應義塾大学理工学部

目 次

(スルタナ, シャルミン) Sultana, Sharmin	Preparation of Platinum Nanoparticles by Electrochemical Reduction of Bis(acetylacetonato)platinum(II) in Amide-Type Ionic Liquids (アミド系イオン液体中におけるビス(アセチルアセトナト)白金(II)の電気化学的還元による白金ナノ粒子の作製)	1
河野 隆太	A Scalable Routing Methodology for Low-Latency Interconnection Networks (低遅延相互結合網のためのスケーラブルなルーティング手法)	3
(ジャヤクマル, ワサンタン) Jayakumar, Vasanthan	Computational pipelines for assembly, analysis, and evaluation of genome sequences (ゲノム配列のアセンブリ, 解析および評価のための計算パイプラインの開発)	5
(ファンヴェイク ピーター) van Wyk, Pieter	Thermodynamic Properties of a Strongly Interacting Ultracold Fermi Gas and Application to Neutron Star Equation of State (強く相互作用する極低温フェルミ気体の熱力学的性質と中性子星状態方程式への応用)	7
松本 杜青	可変な引力相互作用を有する2次元極低温フェルミ原子気体における対形成揺らぎの効果	9
横倉 諒	四つの超電荷を持つ四次元共形超重力理論の統一的定式化	11
橋本 和宗	Aperiodic Model Predictive Control for Networked Control Systems (ネットワーク化制御システムのための不等間隔モデル予測制御)	13
鈴木 孝彰	固定砥粒ダイヤモンドワイヤによるSi系半導体結晶の高効率切断	15
(ヘイダリ, メフディ) Heidari, Mehdi	Material Removal Mechanism and Surface Integrity in Ultraprecision Cutting of Porous Materials (多孔質材料の超精密切削における材料除去機構と表面品位)	17
水本 由達	Investigation on Surface Integrity in Ultra-precision Cutting of Single Crystalline Optical Materials for Microcavity (微小光共振器のための単結晶光学材料の超精密切削における表面品位に関する研究)	19
長島 大典	氷点下温度域におけるクラスレートハイドレートの相平衡条件および保存性	21
原 孝介	車両の自動運転に向けた走行レーン地図と車載カメラ画像の照合による自己位置推定に関する研究	23
鈴木 李夏	Correlation analysis of subcellular ATP dynamics and changes in cellular morphology (細胞内ATP動態と細胞形態変化の相関解析)	25
佐藤 英祐	ピセリングピアサイド類の合成と生物活性	27
竹川 俊也	銀河系中心領域における高速度分子雲	29
西岡 宗	Study of formation mechanism of ion-ion plasma layer and negative ion beam optics in negative hydrogen ion sources (水素負イオン源におけるイオン性プラズマ層の形成機構と負イオンビーム収束性に関する研究)	31
矢本 昌平	Numerical Simulation of Impurity Transport in Tokamak Edge Plasmas (トカマク周辺プラズマにおける不純物輸送の数値シミュレーション)	33

小口 研一	電気光学結晶を用いた楕円偏光テラヘルツ電場ベクトル波形の測定とその解釈	35
小林 周	XFELコヒーレント回折イメージング実験手法の開発と細胞イメージングへの応用	37
西田 健治朗	Numerical Modeling of Hydrogen Ion Sources with the Radio Frequency Inductively Coupled Plasma (高周波誘導性結合プラズマを用いた水素イオン源の数値モデリング)	39
須貝 智也	β -ヒドロキシ- α , α -二置換アミノ酸構造の新規構築法の開発と(-)-カイトセファリン合成への応用	41
高橋 佑典	Study on the Magnetic Properties of Stable Organic Radicals Carrying Hydrazyl and Nitroxide-Based Spin Centers and the Spin-Spin Interactions Through Non-Conjugated Framework (ヒドラジルおよびニトロキンドをスピン中心とする安定有機ラジカル磁気特性と非共役骨格を介したスピン間相互作用に関する研究)	43
寄立 麻琴	Two-step Synthesis of Multi-substituted Amines and Unified Total Synthesis of Stemoamide-type Alkaloids (多置換アミンの二段階合成およびステモアミド系アルカロイドの網羅的全合成)	45
鐵本 智大	Tailoring optical resonances in photonic crystals with an optical nanofiber (ナノ光ファイバを用いたフォトニック結晶内の光共振の調整)	47
神田 昂亮	伝播モード直交性と多重尺度法を用いたガイド波の理論解析	49
東 和彦	微細加工技術を用いたバクテリアセルロースの成形と生産	51
斉藤 佑貴	Encoderless Angle Estimation Methods for Rotary Electric Actuator (回転電動機のエンコーダレス角度推定法)	53
深田 健太	Organic-inorganic composite films with optimized structure and wettability for application to microdroplet analysis (有機無機複合膜の構造ならびに濡れ性の最適化による微小液滴分析への応用)	55
小川 健司	Safety Surgery and Quantitative Pathological Evaluation Based on Haptic Technology (ハプティクス技術に基づく安全な手術と定量的な病理評価)	57
平尾 章成	多空間デザインモデルに基づく座り心地知識体系の構築	59
廣部 紗也子	乾燥亀裂のパターン形成に関する数値モデルと数値解析手法の開発	61
(シャリアル, エリアルディ Bin) Syahrial, Bin Erialdi	The Impact of Serviceability on Service Operations Performance, Service Cost and Customer Satisfaction (保守サービス性がサービスオペレーションズパフォーマンス、サービスコストおよび顧客満足に及ぼす影響について)	63
友部 勝文	Interactions between water molecules and biological materials: a molecular dynamics study (分子動力学シミュレーションを用いた水分子と生体物質の相互作用の解明)	65
横尾 望	自動車用火花点火エンジンにおけるノッキング指標に関する研究	67
森島 信	構造型ストレージ向け複数GPU間分散キャッシュの研究	69

加茂野 有徳	脳卒中片麻痺者における歩行再獲得過程の生体力学的解析	71
森野 佐芳梨	慣性センサを用いた妊娠期腰背部痛改善のための動作および筋活動の評価法	73
湯原 大輔	分子動力学シミュレーションを用いたメタンハイドレートのコレ生成、結晶成長、相平衡の解析	75
小西 隆介	Research on Optimal Facility Investment in Electric Power Systems Considering Uncertainties (電力システムにおける不確実性を考慮した最適設備投資に関する研究)	77

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2017（平成29）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(工学)	甲 第 4766 号	平成 29 年 10 月 4 日	(スルタナ, シャルミン) Sultana, Sharmin
博士(工学)	甲 第 4770 号	平成 30 年 3 月 23 日	河野 隆太
博士(理学)	甲 第 4783 号	平成 30 年 3 月 23 日	(ジャヤクマル, ワサンタン) Jayakumar, Vasanthan
博士(理学)	甲 第 4794 号	平成 30 年 3 月 23 日	(ファンヴェイク ピーター) van Wyk, Pieter
博士(理学)	甲 第 4795 号	平成 30 年 3 月 23 日	松本 杜青
博士(理学)	甲 第 4796 号	平成 30 年 3 月 23 日	横倉 諒
博士(工学)	甲 第 4797 号	平成 30 年 3 月 23 日	橋本 和宗
博士(工学)	甲 第 4798 号	平成 30 年 3 月 23 日	鈴木 孝彰
博士(工学)	甲 第 4799 号	平成 30 年 3 月 23 日	(ヘイダリ, メフディ) Heidari, Mehdi
博士(工学)	甲 第 4800 号	平成 30 年 3 月 23 日	水本 由達
博士(工学)	甲 第 4801 号	平成 30 年 3 月 23 日	長島 大典
博士(工学)	甲 第 4802 号	平成 30 年 3 月 23 日	原 孝介
博士(理学)	甲 第 4855 号	平成 30 年 3 月 23 日	鈴木 李夏
博士(理学)	甲 第 4856 号	平成 30 年 3 月 23 日	佐藤 英祐
博士(理学)	甲 第 4857 号	平成 30 年 3 月 23 日	竹川 俊也
博士(工学)	甲 第 4858 号	平成 30 年 3 月 23 日	西岡 宗
博士(工学)	甲 第 4859 号	平成 30 年 3 月 23 日	矢本 昌平
博士(理学)	甲 第 4860 号	平成 30 年 3 月 23 日	小口 研一
博士(理学)	甲 第 4861 号	平成 30 年 3 月 23 日	小林 周
博士(工学)	甲 第 4862 号	平成 30 年 3 月 23 日	西田 健治朗

博士(理学)	甲 第	4863	号	平成 30 年 3 月 23 日	須貝 智也
博士(理学)	甲 第	4864	号	平成 30 年 3 月 23 日	高橋 佑典
博士(理学)	甲 第	4865	号	平成 30 年 3 月 23 日	寄立 麻琴
博士(工学)	甲 第	4866	号	平成 30 年 3 月 23 日	鐵本 智大
博士(工学)	甲 第	4867	号	平成 30 年 3 月 23 日	神田 昂亮
博士(工学)	甲 第	4868	号	平成 30 年 3 月 23 日	東 和彦
博士(工学)	甲 第	4869	号	平成 30 年 3 月 23 日	斉藤 佑貴
博士(工学)	甲 第	4870	号	平成 30 年 3 月 23 日	深田 健太
博士(工学)	甲 第	4871	号	平成 30 年 3 月 23 日	小川 健司
博士(工学)	甲 第	4872	号	平成 30 年 3 月 23 日	平尾 章成
博士(工学)	甲 第	4873	号	平成 30 年 3 月 23 日	廣部 紗也子
博士(工学)	甲 第	4874	号	平成 30 年 3 月 23 日	(シャリアル, エリアルディ ビン) Syahrial, Bin Erialdi
博士(工学)	甲 第	4875	号	平成 30 年 3 月 23 日	友部 勝文
博士(工学)	甲 第	4876	号	平成 30 年 3 月 23 日	横尾 望
博士(工学)	甲 第	4877	号	平成 30 年 3 月 23 日	森島 信
博士(工学)	甲 第	4878	号	平成 30 年 3 月 23 日	加茂野 有徳
博士(工学)	甲 第	4879	号	平成 30 年 3 月 23 日	森野 佐芳梨
博士(工学)	甲 第	4880	号	平成 30 年 3 月 23 日	湯原 大輔
博士(工学)	甲 第	4881	号	平成 30 年 3 月 23 日	小西 隆介

Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.4766	Name	Sultana, Sharmin
Thesis Title Preparation of Platinum Nanoparticles by Electrochemical Reduction of Bis(acetylacetonato)platinum(II) in Amide-Type Ionic Liquids			
Platinum (Pt) and Pt nanoparticles are of great interest due to their high catalytic activity in a number of chemical and electrochemical reactions. In recent years, aprotic ionic liquids have gained much attention as an attractive alternative media for electrodeposition of various metals and metal nanoparticles owing to their several excellent physicochemical and electrochemical properties. Bis(acetylacetonato)platinum(II) ($\text{Pt}(\text{acac})_2$) is a well known precursor for preparation of Pt nanoparticle. However, electrochemical reduction of $\text{Pt}(\text{acac})_2$ has not been studied in depth in ionic liquids yet. In the present study, preparation of Pt nanoparticles by electrochemical reduction of $\text{Pt}(\text{acac})_2$ has been attempted in aprotic bis(trifluoromethylsulfonyl)amide (TFSA^-)-based ionic liquids composed of trimethylhexylammonium (TMHA^+), and pyrrolidinium cations with different alkyl chain length, 1-butyl-1-methylpyrrolidinium (BMP^+), 1-hexyl-1-methylpyrrolidinium (HMP^+) and 1-decyl-1-methylpyrrolidinium (DMP^+). The aim of the present study is to understand the formation mechanism of Pt nanoparticles from $\text{Pt}(\text{acac})_2$ and have an insight on controlling the size of the nanoparticles. Chapter 1 presents a brief description about the metal nanoparticles, ionic liquids and possibility of preparation of metal nanoparticles in ionic liquids. Chapter 2 describes the general experimental techniques used in the present study. In chapter 3, electrochemical reduction of $\text{Pt}(\text{acac})_2$ has been investigated in TFSA^--based ionic liquids using various electrochemical techniques. $\text{Pt}(\text{acac})_2$ was found to exist as a square planer complex in each ionic liquid. $\text{Pt}(\text{acac})_2$ was suggested to be reduced to metallic Pt via a two-electron transfer process at a glassy carbon (GC) electrode. Deposition of Pt on a stationary GC electrode was possible by electrochemical reduction of $\text{Pt}(\text{acac})_2$ in TMHATFSA and BMPTFSA. In addition, Pt nanoparticles were obtained after cathodic reduction of $\text{Pt}(\text{acac})_2$, probably due to the hindrance of the surface process related to electrodeposition by the accumulation of cations of the ionic liquid on the electrode surface. Chapter 4 is concerned with the investigation of the effect of electrochemical parameters on controlling the size of the Pt nanoparticles prepared by electrochemical reduction of $\text{Pt}(\text{acac})_2$ in BMPTFSA, HMPTFSA and DMPTFSA. The average size of Pt nanoparticles prepared by using a glassy carbon rotating disk electrode was found to be independent of the electrode potential, rotation rate or current density. The average size of Pt nanoparticles increased slightly with increasing the alkyl chain length of cations of the ionic liquid, probably related to the stabilization of the Pt nuclei by the ions of the ionic liquids. Chapter 5 summarizes the present work and describes the perspectives on the control of the size of the metal nanoparticles by careful choice of electrochemical parameters and the ionic liquids.			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4766 号	氏 名	Sultana, Sharmin
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 片山 靖
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 藤原 忍
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 緒明 佑哉
		慶應義塾大学教授	工学博士 吉岡 直樹
		ミラノ工科大学准教授	Ph. D マガニン, ルカ
学士（理学）、修士（理学） SULTANA, Sharmin（スルタナ、シャルミン）君提出の学位請求論文は「Preparation of Platinum Nanoparticles by Electrochemical Reduction of Bis(acetylacetonato)platinum(II) in Amide-Type Ionic Liquids」（アミド系イオン液体中におけるビス（アセチルアセトナト）白金（II）の電気化学的還元による白金ナノ粒子の作製）と題し、5章から構成されている。 非プロトン性イオン液体は優れた電気化学的特性を示すことから、金属の析出媒体として注目を集めている。また、イオン液体中には様々なナノ粒子が安定に分散することが知られている。これらのことから、イオン液体中において金属化学種を電気化学的に還元することによって金属ナノ粒子の作製が試みられている。金属の中でも白金（Pt）は水素の酸化還元反応に対して高い触媒活性を示すことから、燃料電池や水電解などの触媒として重要である。ビス（アセチルアセトナト）白金（II）（Pt(acac)₂）は Pt ナノ粒子作製における前駆体として知られているが、イオン液体中における Pt(acac)₂の電気化学的還元反応について検討された例はない。本論文では、いくつかの異なるカチオンからなるアミド系イオン液体中における Pt(acac)₂の電極反応について検討し、Pt(acac)₂の電気化学的還元による Pt ナノ粒子の生成機構および粒径制御の可能性について検討している。 第1章は序論であり、イオン液体、金属電析およびイオン液体中における金属ナノ粒子生成技術について述べている。 第2章では、本研究で用いた一般的な実験方法について述べている。 第3章では、イオン液体中における Pt(acac)₂の電極反応について検討している。静止電極を用いたサイクリックボルタンメトリーおよび定電位陰極還元から、イオン液体中において Pt(acac)₂を Pt 金属に電気化学的に還元できることを見出している。回転電極を用いた反応解析から Pt(acac)₂の還元は二電子移動反応であることを明らかにすると同時に、Pt(acac)₂の拡散係数を決定している。さらに、静止電極上において負の電位を印加することによって Pt ナノ粒子が生成し、イオン液体中に分散することを透過型電子顕微鏡観察および電子線回折などによって明らかにし、負の電位域においてイオン液体のカチオンが電極上に集積することで形成される特異的な電気二重層構造によって電極上への析出が抑制され、ナノ粒子が分散するという生成機構を提案している。 第4章では、炭素数の異なるアルキル鎖をもつカチオンからなるイオン液体中において生成する Pt ナノ粒子の平均粒径について回転電極法を用いて検討している。Pt(acac)₂の電気化学的還元によって生成する Pt ナノ粒子の平均粒径は、電極電位および電流密度には依存せず、イオン液体のカチオンのアルキル鎖長にわずかに依存することを見出している。ナノ粒子は電極反応が進行している電極・電解液界面付近で成長すると考えられ、アルキル鎖長の変化に伴うイオン液体の物性変化によって粒成長が起こる領域におけるナノ粒子の滞留時間が変化することが、ナノ粒子の平均粒径に影響を及ぼしている可能性を指摘している。 第5章は結論であり、本研究を総括し、今後の展望について述べている。 以上、要するに本論文は、イオン液体中における金属アセチルアセトナト錯体の電気化学的還元による金属電析および金属ナノ粒子の生成、電極反応機構ならびにナノ粒子の粒径制御について新たな知見を与えており、イオン液体の電気化学およびその応用分野において、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4770号	氏名	河野 隆太
主論文題名： A Scalable Routing Methodology for Low-Latency Interconnection Networks (低遅延相互結合網のためのスケーラブルなルーティング手法)			
ネットワークのエンドノード間通信遅延は、高性能計算機上で実行される並列アプリケーションにおける重要な課題となっている。次世代の HPC システム上で実行される大規模並列アプリケーションの場合、MPI 通信遅延は 1 マイクロ秒未満であることが必要とされている。スイッチ経由による遅延は InfiniBand QDR では約 100 ナノ秒と、シリアル／パラレルコンバータを含む配線遅延・フリット注入遅延よりも通常大きい。このため、スイッチ間トポロジは、直径や平均最短距離が小さいことが求められている。 この要求に対処するため、近年の研究により、スイッチ間ネットワークに適用可能なランダムトポロジが開発された。従来の Torus や Fat-tree といったネットワークトポロジと比較して、これらのトポロジはホップ数を大幅に削減し、HPC システムやデータセンター、及びメニーコアシステムに効率的に適用できることが示されている。 こうしたランダムトポロジの実用化に向けては、スケーラビリティの面で課題が存在している。第 1 に、ランダムトポロジはキャビネット間の総配線延長を増加させる傾向があり、コスト増加につながってしまう。第 2 に、各スイッチが保持するテーブルエントリの数が増加する。第 3 に、デッドロックフリーを保証するために、仮想チャネル (Virtual Channels; VCs) をルーティング経路に割り当てるための時間計算量が増加する。 これらのスケーラビリティに関する問題を解消するため、本論文では、配線長制限を課したランダムリンクを用いたトポロジに着目する。このネットワークは、完全にランダムなネットワークとほぼ同等のホップ数を達成しながら、そう配線延長を大幅に削減可能である。 本論文の目的は、先述の配線長制限ランダムトポロジに適用可能なスケーラブルなルーティング手法の探求であり、低遅延な相互結合網の実用化に向けた取り組みである。まず、配線長制限ランダムトポロジ向けのスケーラブルなルーティング手法である LOREN (Layout-Oriented Routing with Entries for Neighbors) を提案する。この方法は、配線長制限ランダムトポロジの持つ不規則性と局所性を利用し、ノード間のホップ数を少なくしつつ、必要なルーティングテーブルサイズを削減可能である。 第 2 に、仮想チャネルの割り当て方法である ACRO (Assignment of Channels in Reverse Order) を提案する。この手法は、従来の VC 割り当て方法と比較して、同程度の VC 数を必要としつつ、時間計算量を大幅に削減可能である。 本論文で提案されるルーティング手法は、通信遅延と必要テーブルエントリ数とのより良いトレードオフを達成する。提案ルーティング手法である LOREN に提案 VC 割り当て手法である ACRO を適用し、デッドロックフリーを保証した上で、サイクル・アキュレートなネットワークシミュレータを用いて性能評価を行った。その結果、提案手法は従来のコンパクトルーティング方法と比較して、ネットワークスループットを最大 67.9% 向上させた。さらに、必要なルーティングテーブルエントリ数が最大 91% 削減され、実装上のスケーラビリティと柔軟性が向上した。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4770 号	氏 名	河野 隆太
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 天野 英晴
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 山中 直明
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 矢向 高弘
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 松谷 宏紀
学士（工学）、修士（工学）河野隆太君の学位請求論文は「A Scalable Routing Methodology for Low-Latency Interconnection Networks（低遅延相互結合網のためのスケーラブルなルーティング手法）」と題し7章から成る。 高性能コンピュータの規模は年々増大し、トップクラスのスーパーコンピュータでは既に一千万を越えるノードを持つシステムが登場しており、ノード間を接続する低遅延ネットワーク研究の重要性が大きくなっている。この中で、スモールワールド性を利用したランダムネットワークは、少ない回数で平均転送遅延を大きく削減できる点が優れており、実現性を考慮した配線長制限付きランダムネットワークが特に注目を集めている。しかし、ランダムネットワークではパケットをデッドロックなしに目的地ノードに到達させるためのルーティング手法が問題となっている。具体的には、規模の増大に対して、テーブルサイズの巨大化、仮想チャネル数の増大、経路計算量の増大を招き、このことが実用化を妨げる原因の一つになっていた。河野君の博士論文では、この問題の解決に取り組み、配線長に制限のあることを利用し、従来の手法と逆の方向からアプローチする新しいスケーラブルなルーティング手法および仮想チャネルの割り当て手法を提案している。 第1章では研究の背景と論文の構成を示し、第2章ではランダムネットワークを含めた低遅延ネットワークトポロジ、第3章ではルーティングに関して既存の手法と問題点をまとめている。 第4章では、まずテーブルサイズの問題に取り組み、配線長制限付きランダムトポロジの持つ不規則性と局所性を利用し、ノード間のホップ数を少なくしつつ、必要なルーティングテーブルサイズを削減するルーティング手法を提案している。 次に第5章では、デッドロックを防ぐための仮想チャネルの割り当て方式に取り組み、仮想チャネル間の乗り換えを許すと共に、目的地ノードから逆方向に経路を探索することにより、必要仮想チャネル数と時間計算量の双方の削減を可能にする割り当て手法を提案している。 さらに、第6章では第4章、第5章で提案した手法を組み合わせた場合について評価を行い、従来提案された手法に比べて、平均通信遅延を5.8%削減、ネットワークスループットを最大62%向上、必要なルーティングテーブルエントリ数を最大91%削減したことを示している。 第7章では、全体の結論をまとめ、提案手法により大規模システムにおいて配線長制限付きランダムネットワークの実装上のスケーラビリティと柔軟性が向上した点について述べている。 以上、要するに、河野君の博士論文は、配線長制限付きランダムネットワークにおけるルーティング上の重要な問題点のいくつかを解決し、実用化に貢献した点で、工業上、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.4783	Name	Jayakumar, Vasanthan
Thesis Title Computational pipelines for assembly, analysis, and evaluation of genome sequences			
DNA sequencing has enabled the determination of genome sequences of a plenty of organisms. From Sanger of the first-generation sequencing, through second-generation sequencing, DNA sequencing has come a long way foraging more recently into third-generation, single molecule sequencing. Although, second-generation sequencing helped resolve the genomes of a numerous organisms, the assembled genomes were mostly fragmented with long unresolved bases termed as gaps. A major caveat of the second-generation sequencers is the short read length, which is incapable of resolving repetitive genomic sequences, leading to fragmented genome assemblies. In general, if a repeat sequence is longer than that of the sequenced read, it would be impossible to assemble the genomic region enclosing such repetitive regions. The biggest advantage offered by third-generation sequencing is the exponential increase in average read lengths, which are generally longer than most genomic repeats. With the third-generation sequencing on the rise, the development of a number of long-read based <i>de novo</i> assembly tools also came into the scene. In this dissertation, several computational methods and pipelines for genome assembly of third-generation sequencing data were developed, along with the annotation of genomic features such as genes and repeats, and the evaluation of the quality of assembled genomes using third-generation sequencing. In the first study, the design and development of computational pipelines using third-generation sequencing data was applied to assemble the genome of <i>Ipomoea nil</i>, a popular flowering plant from Japan, producing various mutational patterns. Several parameters were needed to be adjusted to obtain the desirable assembly. Hence in the second study, the focus was on tuning parameters in the pipeline and applying the same to the genome assembly of a variety of organisms, and in the process evaluating all the available long-read assemblers. As no such evaluation study was attempted using third-generation sequencing reads, the study was designed in such a way to guide researchers on which assembler to choose for their respective assembly projects. Chapter 1 introduces the concepts of sequencing and <i>de novo</i> assembly. Chapter 2 discusses the pipeline constructed in this thesis for long-read assemblers. Chapter 3 reports the assembly of a pseudo-chromosomal level draft genome of <i>I. nil</i>. The draft genome has a scaffold N50 of 2.8 Mb, and a contig N50 of 1.8 Mb, and hence the quality of the assembly is comparable to those achieved using Sanger sequencing reads. The draft genome has enabled the identification and the cataloguing of the <i>Tpn1</i> family transposons, known as the major mutagen of <i>I. nil</i>, and analysing the dwarf gene, <i>CONTRACTED</i>, located on the genetic map published in 1956. Comparative genomics analysis has suggested that a whole genome duplication in <i>I. nil</i>'s Convolvulaceae family, distinct from the most recent Solanaceae event, has occurred after the divergence of the two sister families. Chapter 4 reports the evaluation of ten long-read assemblers using a variety of metrics on PacBio datasets from different taxonomic categories, with considerable differences in genome sizes. The evaluation also serves as a guide on efficiently tuning parameters for a genome assembly. The results helped narrow down the list to a few assemblers that can be effectively applied to eukaryotic assembly projects. Moreover, it is demonstrated how best to use limited genomic resources for evaluating the genome assemblies of non-model organisms. Chapter 5 presents an overall summary of the thesis. Also, future research projects stemming from this research are discussed.			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4783 号	氏 名	Jayakumar, Vasanthan
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 梶原 康文
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 岡 浩太郎
		慶應義塾大学教授	博士（地球環境科学） 土居 信英
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 舟橋 啓
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 櫻井 彰人
Dr. G. R. Damodharan college of science (India) 修士課程(Bioinformatics) 修了の Vasanthan Jayakumar 君提出の学位請求論文は「Computational pipelines for assembly, analysis, and evaluation of genome sequences (ゲノム配列のアセンブリ, 解析および評価のための計算パイプラインの開発)」と題し、4 章から構成されている。 ゲノムとは、生物の全遺伝情報が書かれた生物の設計図である。DNA シークエンサー（配列読取り装置）は、さまざまな生物のゲノム配列の解読を可能にした。DNA シークエンサーで読まれた短い配列はリードと呼ばれ、大量に読まれたリードから元のゲノム配列を組み立てる情報処理をアセンブリと言う。サンガー法に代表される第一世代シークエンサーに続く第二世代シークエンサーは多くの生物のゲノム配列を解読するのに役立ったが、その欠点は短いリード長であり、断片化されたゲノムアセンブリにつながった。最近開発された第三世代シークエンサーが提供する最大の利点は、リード長が指数関数的に増加したことである。その長いリードはロングリードと呼ばれ、リード長は反復（リピート）配列よりも長くなる。 本研究は、第三世代シークエンサーのロングリードを用いたゲノムアセンブリ、遺伝子コード領域やリピート配列などのアノテーション作業、そしてアセンブリされたゲノムの品質評価のための計算パイプラインを開発した。最初の研究では、開発した計算パイプラインを応用して、日本の有名な開花植物であるアサガオ（学術名 <i>Ipomoea nil</i>）のゲノムを組み立て、多様な突然変異パターンを作り出す因子を同定した。そのアセンブリの過程で高品質なアセンブリを得るためにさまざまなパラメータを調整する必要があった。そこで第二の研究では、パイプラインのパラメータをチューニングし、それを様々な生物のゲノムアセンブリに適用すること、およびロングリード用のアセンブリプログラムを評価する方法に焦点を当てた。 本論文の第 1 章では、ゲノムシークエンスとアセンブリ手法の重要性について述べるとともに、本研究で扱う二つの課題について概説した。 第 2 章では、疑似染色体レベルまで復元したアサガオゲノムのアセンブリについて報告した。完成したゲノム配列は、アセンブリ精度の尺度の一つであるコンティグ N50 の値が 1.8Mb にまで到達し、最新のゲノム解読プロジェクトの中でもトップクラスの高精度である。ゲノム解読により、<i>I. nil</i> の主要な突然変異原として知られている <i>Tpn1</i> トランスポゾンの網羅的同定とカタログ化を完成した。トマトやジャガイモなどの近縁種との比較ゲノム解析により、全ゲノムが二倍に増える全ゲノム重複のイベントが起こった時期を正確に同定した。 第 3 章では、バクテリアから植物までゲノムサイズの異なる代表的な 4 つの生物種のロングリードデータセットを用いて、ロングリード用アセンブリプログラムの評価をさまざまな基準に基づいて報告した。この評価結果は、ゲノムアセンブリを行うためのパラメータを効率的に調整するガイドとして役立つ。 第 4 章では、本研究を総括するとともに、開発したゲノムアセンブリパイプラインについて今後の応用可能性を議論した。 以上結論として、アサガオの高精度なゲノム配列を決定することにより植物学や遺伝学分野の発展に資するとともに、ロングリードを用いた効果的なアセンブリのパラメータ調整について示した。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。			

Thesis Abstract

Registration Number	“KOU” No.4794	Name	van Wyk, Pieter
Thesis Title Thermodynamic Properties of a Strongly Interacting Ultracold Fermi Gas and Application to Neutron Star Equation of State			
In this thesis, I theoretically investigate thermodynamic properties of an ultracold Fermi gas. Including pairing fluctuations within the framework of the theory developed by Nozières and Schmitt-Rink (NSR), I examine strong-coupling corrections to the internal energy, as well as the specific heat at constant volume C_V, over the entire BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer)-BEC (Bose-Einstein condensation) crossover region. Using the similarity between a superfluid Fermi gas in the unitary regime and the crust regime of a neutron star interior, I also show an application of the former atomic system as a quantum simulator for the study of the latter. In the normal state of an ultracold Fermi gas, C_V is found to be sensitive to pairing fluctuations. From the detailed temperature dependence of C_V, I identify the region where pairing fluctuations dominate over the system, as well as the region where most atoms form bound molecules, in the phase diagram with respect to the strength of a pairing interaction and the temperature. Although properties of the crust regime of a neutron star is expected to be similar to a superfluid Fermi gas in the unitary regime far below T_c, one cannot immediately use results obtained in the latter for the study of the former, because the magnitude of the effective range r_{eff} is very different between the two. That is, while r_{eff} is negligibly small in ultracold Fermi gases, one cannot ignore $r_{\text{eff}} = 2.7$ fm in the neutron star case. In this thesis, I theoretically make up for this difference, to examine the neutron star equation of state (EOS). For this purpose, I first show that the NSR internal energy agrees well with the recent experiment on a superfluid ^6Li Fermi gas far below T_c. I then extend this theory, to include the non-vanishing effective range $r_{\text{eff}} = 2.7$ fm. The calculated EOS by this extended NSR scheme is found to well reproduce previous results in the low-density regime, obtained in nuclear physics. This agreement indicates the validity of a superfluid Fermi gas as a quantum simulator for the study of the low-density crust regime of a neutron star interior.			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4794 号	氏 名	van Wyk, Pieter
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 大橋 洋士
	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	博士（理学） 山内 淳
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 渡邊 紳一

学士（理学）、修士（理学） van Wyk, Pieter 君の学位請求論文は、「Thermodynamic Properties of a Strongly Interacting Ultracold Fermi Gas and Application to Neutron Star Equation of State」と題し、全5章より構成されている。

冷却フェルミ原子ガスでは、原子間にはたらく引力相互作用の強さを自在に制御することができ、この特徴を利用することで、引力相互作用が強くなるにつれ、自由フェルミ気体が、対形成揺らぎが系の性質を支配する中間結合領域を経て、どのようにして、強く結合した分子ボソンの気体とみなせる強結合領域へと移行するか、が解明できると期待されている。しかし、自由フェルミ気体から中間結合領域への移行は擬ギャップ現象等の研究で議論されてきたものの、中間結合領域から強結合領域への移行を調べる手段は不明であった。この問題に対し、本研究は、観測可能量である比熱の温度変化が有効であることを理論的に明らかにするという重要な成果を挙げている。また、近年、太陽質量の2倍程度の質量を有する重い中性子星の存在が確認されたことをきっかけに、この天体の内部構造が注目を集めているが、この問題に対し、フェルミ原子ガス超流動とそれを定量的に記述できる強結合理論を併用、中性子星内部の低密度領域における状態方程式を得るという新しい方法を提案、具体的計算によりその有効性を示すという成果も挙げている。

第1章は序論である。冷却フェルミ原子気体と中性子星についての説明、および、両者の類似性と違いについて述べた後、本研究の目的が述べられている。

第2章では、本研究で用いる理論的枠組みが説明されている。Nozières と Schmitt-Rink により開発された強結合理論（NSR 理論）を用い、フェルミ原子気体の任意の相互作用強度における内部エネルギーや比熱を計算する方法、および、この理論を中性子星内部の低密度領域に適用できるよう、有効距離と呼ばれる量がゼロでない場合に拡張する方法が詳述されている。

第3章では、第2章で説明した理論を用い、フェルミ原子気体における比熱の温度依存性を幅広い相互作用領域で明らかにしている。その結果から、(1)理想フェルミ気体に近い性質を有する領域、(2)対形成揺らぎが系の性質を支配する領域、および、(3)強く結合した分子のボース気体とみなせる領域、を温度-相互作用相図上で特定している。これまで、状態密度やスピン帯磁率の研究から(1)と(2)を特定することは行われていたが、これらの物理量では(3)を特定することはできなかった。したがって、(3)の領域の特定に初めて成功した本研究の成果は非常に重要である。

第4章では、中性子星内部の低密度領域における状態方程式を研究している。まず、 ${}^6\text{Li}$ フェルミ原子ガス超流動の弱結合領域からユニタリ極限にかけて観測された内部エネルギーが平均場近似では説明できず、(有効距離がゼロの場合の) NSR 理論で定量的に説明できることを示し、この相互作用領域における NSR 理論の有効性を確認している。次に、有効距離がゼロではない場合の NSR 理論を用い、この相互作用領域に対応する中性子星低密度領域の状態方程式を計算、散乱実験データから作られた中性子間相互作用を用いたシミュレーションと良く一致する結果を得ている。本研究で得られた状態方程式は、2体、3体相互作用部分のみが実験的にサポートされている従来のものとは異なり、有効距離の効果以外、量子多体効果の取り込みについて ${}^6\text{Li}$ フェルミ原子ガス超流動での実験結果との比較により検証済みであるという利点がある。

第5章では、結論として、本研究の成果がまとめられている。

本研究により、冷却フェルミ原子気体の温度-相互作用相図上で分子ボース気体とみなせる領域が特定されたことは、この系の強結合物性の解明に大いに貢献するものであり、重要な成果である。また、この系で行われた実験結果と強結合理論を組み合わせることで、中性子星低密度領域の状態方程式に関する知見が得られることを具体的計算により示した本研究の成果は、中性子星研究への貢献はもちろん、冷却フェルミ原子気体が他の量子多体系の研究にも有用であることを示すものとして高く評価できる。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 4795 号	氏 名	松本 杜青
主論文題名：			
可変な引力相互作用を有する 2 次元極低温フェルミ原子気体における対形成揺らぎの効果			
本論文では、2 次元極低温フェルミ原子気体における強結合効果を理論的に研究する。フェッシュバハ共鳴で制御された可変な引力相互作用を考慮した強結合理論を用い、近年当該研究分野で実験的にも理論的にも注目を集めている Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移温度近傍で対形成揺らぎが系の性質にどのような影響を与えるかを、弱結合領域から強結合領域に至る幅広い相互作用領域で明らかにする。 本論文の前半では、近年、2 次元 ^6Li フェルミ原子気体で BKT 転移を観測したとする実験を理論的に検証する。この実験が BKT 転移を観測したとする根拠は次の 2 点である：(1) 重心運動量 0 のクーパー対の数がある温度以下で急増することを観測、これは BKT 転移に伴うクーパー対の凝縮によるものと解釈できる。(2) ある温度 (BKT 転移温度) 以下で、この BKT 転移に特徴的なクーパー対の 1 次相関関数の冪的振る舞いが観測された。この主張に対し、本論文では、これらの実験結果は、BKT 転移を仮定しなくとも、対形成揺らぎの効果を考慮するだけで全て理論的に説明できることを示す。この結果から、現在の観測結果だけでは BKT 転移の実験的証拠としては不十分であることを指摘する。 本論文の後半では、この系における擬ギャップ現象 (対形成揺らぎにより、正常相における 1 粒子状態密度に擬ギャップと呼ばれる窪み構造が現れる現象) を研究する。自己無撞着 T 行列近似 (SCTMA) を用い、擬ギャップが現れ始める温度を幅広い相互作用領域で決定する。その結果から、擬ギャップが現れる領域 (擬ギャップ領域) を 2 次元フェルミ原子気体の温度と引力相互作用強度に関する相図中で特定する。また、別の理論で独立に予想されている BKT 転移温度 T_{BKT} が全相互作用領域で擬ギャップ領域内にあることを明らかにする。この BKT 転移温度を与える理論が対形成揺らぎのうち秩序パラメータの位相揺らぎのみを考慮し振幅揺らぎを無視しているのに対し、両者の効果を取り入れられている SCTMA で計算された擬ギャップ構造は弱結合領域において、T_{BKT} でも「完全なギャップ構造」とはなっておらず、この結果から、少なくとも弱結合領域では、位相揺らぎに加え振幅揺らぎも BKT 転移温度を理論的に評価する際に考慮すべきであることを指摘する。更に、ここで用いた SCTMA の妥当性を検証するため、近年この系で観測可能となった熱力学量をこの強結合理論の枠組みで計算、フィッティングパラメータなしで実験結果を定量的レベルで説明できることを示す。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4795 号	氏 名	松本 杜青
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（理学）	大橋 洋士
	副査	慶應義塾大学教授 博士（理学）・医学博士	藤谷 洋平
		慶應義塾大学准教授 博士（工学）	神原 陽一
		慶應義塾大学専任講師 博士（理学）	関口 康爾
学士（理学）、修士（理学）松本杜青君の学位請求論文は、「可変な引力相互作用を有する 2 次元極低温フェルミ原子気体における対形成揺らぎの効果」と題し、全 4 章より構成されている。 冷却フェルミ原子気体の研究分野では、2004 年に ^6Li や ^{40}K の 3 次元気体で超流動状態が実現して以降、Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移と呼ばれる 2 次元超流動の実現が、次なる大きな目標の 1 つとなっている。これは、長距離秩序を有する 3 次元超流動とは異なり、準長距離秩序で特徴付けられる超流動状態であり、冷却フェルミ原子気体で実現できれば、この系の特長の 1 つである可変な引力相互作用を利用することで、2 次元超流動の強結合物性を、幅広い相互作用強度にわたり系統的に研究することが可能になると期待されている。 近年、2 次元 ^6Li フェルミ原子気体で BKT 転移を観測したとする実験が報告され、注目を集めている。これに対し、本研究は、この実験がその根拠としている現象が BKT 転移特有のものではないことを理論的に指摘するという、重要な成果を挙げている。また、2 次元フェルミ原子気体に対する現在の BKT 理論は、超流動秩序パラメータの振幅揺らぎと位相揺らぎで特徴付けられる対形成揺らぎのうち後者のみを考慮しているが、本研究は、BKT 転移温度近傍ではそれだけでは不十分であり振幅揺らぎも重要となることを擬ギャップの分析から明らかにする、という成果も挙げている。 第 1 章は序論である。2 次元冷却フェルミ原子気体の研究の現状と、BKT 転移や擬ギャップ現象についての説明の後、本研究の目的が述べられている。 第 2 章では、2 次元 ^6Li フェルミ原子気体で BKT 転移を観測したとする実験がその根拠としている 2 つの現象を理論的に研究している。対形成揺らぎを T 行列近似（TMA）の枠組みで取り入れた強結合理論を用い重心運動量ゼロのクーパー対の数を計算し、1 つ目の実験的根拠であるこの物理量の低温での急増が、BKT 転移を仮定しなくても定量的に説明できることを示している。もう一つの根拠であるクーパー対の相関関数の冪的振る舞いについても、BKT 転移を仮定することなく観測された冪指数の値を TMA の枠組みで得ることに成功している。以上から、2 次元フェルミ原子気体で BKT 転移を観測したとする実験が根拠としている 2 つの現象は、いずれも BKT 転移特有のものではなく、BKT 転移であることを立証するには、更なる実験的裏付けが必要であることを指摘している。 第 3 章では、対形成揺らぎに起因する擬ギャップ現象を研究している。この問題に対し、第 2 章で用いた TMA ではなく自己無撞着 T 行列近似（SCTMA）を用いる理由が説明された後、SCTMA の枠組みで 1 粒子状態密度を計算、位相揺らぎのみを考慮した従来の BKT 理論が予言する BKT 転移温度近傍では、状態密度中に現れる擬ギャップは弱結合領域において完全なギャップ構造ではなく、窪み構造となることを見出している。BKT 転移温度近傍において、もし、超流動秩序パラメータの振幅揺らぎがなければ 1 粒子状態密度には完全なギャップ構造が生じることから、本研究のこの結果は、振幅揺らぎの重要性を示すものとして重要である。また、擬ギャップが現れる領域（擬ギャップ領域）を 2 次元フェルミ原子気体の温度-相互作用相図中で特定することにも成功している。加えて、近年、この系の弱結合領域で観測された熱力学量を SCTMA の枠組みで計算、実験結果を定量的に説明できることを示すことで、この領域における SCTMA の妥当性を確認している。 第 4 章では、結論として本研究の成果がまとめられている。 本研究は、2 次元フェルミ原子気体における BKT 転移という、当該研究分野の重要課題に取り組んだものである。近年報告された実験結果が BKT 転移を観測したものとは断定できないことを明らかにした本研究の成果は、2 次元フェルミ原子気体の超流動実現に向けた今後の実験研究にとって非常に重要であり、高く評価できる。また、本研究で指摘された弱結合領域における BKT 転移温度近傍での超流動秩序パラメータの振幅揺らぎの重要性は、今後、この系の BKT 理論を構築する際の指針となるだけでなく、広く 2 次元超流動の理論研究の発展に貢献するものである。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 4796 号	氏 名	横倉 諒
主論文題名：			
四つの超電荷を持つ四次元共形超重力理論の統一的定式化			
超重力理論は、超対称性と呼ばれるボソンとフェルミオンの入れ替え対称性を持った一般相対性理論である。この理論は暗黒物質の性質や量子重力理論の基本的自由度など、自然界の基本法則を探る素粒子論の抱える未解決問題を説明する有望な候補である。 一方で、超重力理論は多数の超対称なボソンとフェルミオンの組を重力場中で扱うため、作用の構成が複雑である。これを解決する手法は大別して2つある。1つは超対称な組を統一して扱う「超空間」を用いる手法である。もう1つは共形超重力理論における「テンソル算法」で、スケール対称性を加えた超共形対称性で重力の自由度を拘束する。これらは等価であるが、両者の対称性が一見異なるため、その対応は複雑である。 近年、2つの手法を統一した「共形超空間」が考案された。共形超空間は従来の超空間との対応は知られている一方、共形超空間にのみに作用する特別な制限があるという議論より、テンソル算法との具体的関係は未知のままであった。 本論文では、共形超空間とテンソル算法が等価な定式化であることを示した。まず、先行研究で議論された共形超空間にのみ作用する特別な制限を、超共形対称性の観点から注意深く調べた結果、その制限は存在しないことが分かった。次に、両定式化における物理的な力学変数である重力場、物質場、ゲージ場の対応を具体的に構成することで、物理的自由度を等価に扱えることを示した。そして、超重力理論の作用を構成するために用いられるカイラル射影と超共形不変な積分公式の両手法間の関係を具体的に示した。 物理的自由度などの対応を示したのち、共形超空間からテンソル算法を得られることを、共形超空間上の非物理的自由度をゲージ固定することで示した。ここで非物理的自由度とは、超対称なボソンとフェルミオンの組を統一的に扱うために、共形超空間上に導入された余分な自由度のことである。一方で、この自由度は超空間を用いていないテンソル算法には現れていない。この余分な自由度は共形超空間上のゲージ自由度を用いて固定できることをあらわに示した。 最後に共形超空間から超重力理論の作用を得るためのゲージ固定について議論した。このゲージ固定には、テンソル算法を経由するゲージ固定と、従来の超空間形式を経由するゲージ固定の2つがある。これらのゲージ固定の等価性を、具体的なゲージ固定条件の対応を提示することで示した。 本論文で得られた結果から、超重力理論の作用の構成において、共形超空間とテンソル算法を統一的に扱うことが可能になった。この共形超空間とテンソル算法の間の具体的な対応とゲージ固定による関係を用いることで、従来の定式化では技術的に困難だった新たな相互作用の構成や、散乱振幅のような観測量の計算を、簡潔に遂行できることが期待される。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4796 号	氏 名	横倉 諒
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学専任講師	博士（理学） 檜垣 徹太郎
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士 白濱 圭也
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 山本 直希
		慶應義塾大学専任講師	博士（数理科学） 服部 広大
		京都大学准教授	博士（理学） 吉岡 興一
学士(理学)、修士(理学)横倉諒君提出の学位請求論文は「四つの超電荷を持つ四次元共形超重力理論の統一的定式化」と題し、全 9 章より構成されている。 素粒子標準模型と一般相対論は、様々な素粒子実験や宇宙観測の結果を精度良く説明できることが知られている。一方で、暗黒物質など従来の枠組みでは説明が難しい存在や、ブラックホールと思しき天体が発見されているが、その内部や量子論的な理解には至っておらず、理論的にも複雑で取り扱いが難しい。そのため、標準模型や相対論を超えた新たな物理の原理を探る事は重要である。本論文では 1 つの可能性として知られている、超対称性を標準模型と一般相対論に取り込んだ「超重力理論」の構築法を研究している。特に、近年開発された最も対称性が高く単純な「共形超空間」形式が、過去に構成された他の形式と無矛盾か確かめるため、それらの間の具体的な等価性に着目している。 第 1 章では、本論文の背景、動機、目的と結果の概略を述べている。第 2 章では、一般相対論と、共形変換に対して不変な共形重力理論の説明と、それらの関係を述べている。第 3 章では、超対称性の説明を行い、超対称変換に対して不変な超対称ゲージ理論の構築法について説明している。さらに超空間の説明と、超空間上における超対称ゲージ理論の構築法も同様に述べている。第 4 章では、前章の共形重力理論に超対称性を取り込んだ、共形超重力理論とその形式の多様性を説明している。テンソル算法と呼ばれる形式では、重力子、光子などのゲージ粒子、物質粒子を取り扱っており、その理論構築法について述べている。さらに前述した超空間の概念を取り入れた共形超空間形式についても述べている。こちらは先行研究として、重力子と物質粒子のみを取り扱った例を紹介している。 第 5 章では、重力子と物質粒子に対して、共形超空間とテンソル算法の両形式における等価性を研究している。両形式に対し、超共形対称性に対する変換則やゲージ固定条件の対応に注目し、等価性を明らかにしている。同時に、先行研究に存在したフェルミオン（グラスマン数）微分に関して制限が無い事も示され、等価性に関する長年の疑問が解決された。 第 6 章では、前述の先行研究では成されなかった、重力子、物質粒子に加えてゲージ粒子も同様に共形超空間形式で記述する研究を行っている。全ての代数関係が重力の無い単純な場合と同様な事を通じて、ゲージ粒子を含んだ現実的な理論を構築する事が可能なことを示している。 第 7 章では、共形超空間とテンソル算法の両形式が、相互作用を含めた等価性を研究している。前者には後者に存在しない余分な粒子が一見存在するが、超共形対称性のゲージ固定により、その余剰分は消去されるか、テンソル算法に存在する粒子で書けることを明らかにし、等価性を示した。 第 8 章では、共形超重力理論から、超共形対称性に関連した負の存在確率を持つ非物理的な粒子を完全に消去し、従来型の超重力理論との等価性を研究している。共形超空間形式を出発点として、超共形対称性に対する 2 通りのゲージ固定からそれらを消去し、どちら場合も従来型の超重力理論と等価な理論が得られることを明らかにしている。第 9 章では、本論文の結論と展望がまとめられている。 本研究では、超対称性を自然界に仮定し、未完成であった共形超重力理論の共形超空間形式を代数的に調べる事で完成させた。これは世界で初めての事であり、様々な研究対象に、高い対称性を用いた比較的容易なアプローチが期待できる。これらの研究成果は、今後の標準模型や一般相対論を超える新たな模型構築において、重要になる成果であると言える。 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 4797 号	氏 名	橋本 和宗
主論文題名： Aperiodic Model Predictive Control for Networked Control Systems (ネットワーク化制御システムのための不等間隔モデル予測制御)			
情報通信技術の発展に伴い、ロボットや交通システムなどさまざまな制御システムのネットワーク化が進んでいる。ネットワーク化された制御システムでは制御対象とコントローラとが通信のやり取りを行う。したがって、制御対象に搭載されるバッテリーをできるだけ長持ちさせるためにも、この通信の頻度をできるだけ低減できることが望ましい。一方、制御システムにはアクチュエータの飽和といったハード制約も存在することから、ハード制約を陽に考慮した制御系を設計することも重要である。そこで本論文では、ネットワークの通信頻度を低減化する設計法である「不等間隔制御」と、ハード制約を考慮する制御方策である「モデル予測制御」を組み合わせることで、通信の低減化と制約の考慮を同時に達成する「不等間隔モデル予測制御」を提案する。 第 1 章では不等間隔制御とモデル予測制御の概要を述べる。本論文の目的は、ネットワークを介した通信の頻度を低減化し、かつハード制約を陽に考慮する制御系を設計することである。 第 2 章では、既存研究で考案された不等間隔制御の概要とモデル予測制御のシステムの安定性、最適制御問題の可解性に関する理論背景を述べる。 第 3 章では、制御対象のダイナミクスが線形システムである場合に対し、不等間隔モデル予測制御を提案する。特にモデル予測制御におけるシステムの安定性を解析することで、システムの安定性を保証しつつ通信頻度を低減化する制御系設計を提案する。さらに数値例を通じ、システムの安定化と制約の考慮、通信負荷の低減化を達成できることを示す。 第 4 章では、制御対象のダイナミクスが非線形入力アフィンシステムである場合に対し、不等間隔モデル予測制御を提案する。通信の決定法はモデル予測制御におけるリアプノフの安定性を非線形システムに対し解析することで導出する。数値例では線形、非線形システムの両方に対し提案法を適用し、システムの安定化と制約の考慮、通信負荷の低減化を達成できることを示す。 第 5 章では、制御対象のダイナミクスが入力アフィンを含むより一般的な非線形システムである場合に対し、不等間隔モデル予測制御を提案する。本章ではシステムの安定性に加え最適制御問題の可解性を保証する条件も導出することで、システムの安定化と最適制御問題が可解であることを理論的に示す。さらに数値例では線形、非線形システムの両方に対し提案法を適用し、システムの安定化と可解性の保証、制約の考慮、通信負荷の低減化を達成できることを示す。 第 6 章では各章で得られた内容をまとめ、本論文の成果と今後の課題を述べる。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4797 号	氏 名	橋本 和宗
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 足立 修一
	副査	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(情報理工学) 山本 直樹
		慶應義塾大学教授	博士(工学) 滑川 徹
学士（工学）、修士（工学）橋本和宗君提出の学位請求論文は、“Aperiodic Model Predictive Control for Networked Control Systems”（ネットワーク化制御システムのための不等間隔モデル予測制御）と題し全 6 章から構成されている。 この論文は、制御対象とコントローラとが通信のやり取りを行うネットワーク化された制御系を対象としている。この制御系では、制御対象に搭載されたエネルギー源を有効活用するために、通信頻度をできるだけ抑えることが望まれている。一方、制御系にはアクチュエータの飽和といったハードウェアの制約が存在することから、この制約を陽に考慮した制御系を設計することも重要である。そこで本論文では、ネットワークの通信頻度を低減化する設計法である「不等間隔制御」と、制約を考慮できる制御方策である「モデル予測制御」を組み合わせることで、通信の低減化と制約の考慮を同時に達成する「不等間隔モデル予測制御」を提案している。 第 1 章では、ネットワークを介した通信の頻度を低減化し、かつハードウェアの制約を陽に考慮する制御系を設計することを、本論文の研究の目的として述べている。 第 2 章では、本論文のもとになる制御理論の基礎を述べている。 第 3 章では、線形システムである制御対象に対する不等間隔モデル予測制御を提案している。特に、システムの安定性を保証しつつ、通信頻度を低減化する制御系設計を提案している。数値例を用いてシステムの安定化と制約の考慮、通信負荷の低減化が達成できることを示している。 第 4 章では、非線形入力アフィンシステムである制御対象に対する不等間隔モデル予測制御を提案している。リアプノフの安定性を非線形システムに対して解析することで、通信則を決定している。数値例では線形、非線形システムの両方に対して提案法を適用し、システムの安定化と制約の考慮、通信負荷の低減化を達成できることを示している。 第 5 章では、制御対象のダイナミクスが入力アフィンを含む、より広いクラスの非線形システムに対する不等間隔モデル予測制御を提案している。特に、システムの安定性に加えて最適制御問題の可解性を保証する条件も導出することで、システムの安定化と最適制御問題が可解であることを理論的に示している。数値例では線形、非線形システムの両方に対して、提案法を適用し、システムの安定化と可解性の保証、制約の考慮、通信負荷の低減化を達成できることを示している。 第 6 章は本論文のまとめである。 以上要するに、本研究の成果は、ハードウェアの制約の考慮と通信の低減化を同時に達成できる不等間隔モデル予測制御を提案し、その特性を解析したことである。この研究は、今後ますます重要性が増すネットワーク制御系への理論的な貢献が大であると同時に、実システムへの応用に展開できる可能性を十分に秘めている。 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 4798 号	氏 名	鈴木 孝彰
主論文題名： 固定砥粒ダイヤモンドワイヤによる Si 系半導体結晶の高能率切断			
半導体結晶材料の精密切断加工においては、切断幅を狭くして材料損失を低減し、高能率・高品質切断かつ材料歩留り向上など付加価値の高い加工が求められている。これまでに固定砥粒ダイヤモンドワイヤ切断に関する研究事例が報告されているものの、ワイヤ走行高速域での被削材に対する加工精度への影響および加工ダメージ形成メカニズムや、芯線が極細線で極細粒を固着した固定砥粒ダイヤモンドワイヤの精密切断メカニズムについては明らかとなっていないのが現状である。そこで本研究では、新規開発した高速切断可能なワイヤソー装置を用いて固定砥粒ダイヤモンドワイヤによる単結晶シリコンや単結晶シリコンカーバイドの切断加工を実施し、被削材への加工ダメージの低減効果および高速切断加工のメカニズムを明らかにすることを研究目的とした。 第 1 章に、本研究の背景と従来の研究を概説した。 第 2 章では、高速切断加工を行うダイシングワイヤソー装置の開発について述べた。主要要素技術として、高速切断に対応する張力制御システム、ワイヤガイドプーリ、加工物幅方向の調整機構などの開発を行った。 第 3 章では、第 2 章で述べたダイシングワイヤソー装置を用いて脆性材料である単結晶シリコンの高線速条件での切断加工を行い、切断抵抗、表面粗さ、切断前後のワイヤ表面の観察から切断加工特性を明らかにした。高線速ではワイヤ走行方向に見かけの張力が加わり、切断抵抗が低減することと、被削材の表面粗さが向上し、微小くぼみ深さが低減することを明らかにした。 第 4 章では、砥粒径を変化させた固定砥粒ダイヤモンドワイヤにより単結晶シリコンの切断加工を行い、加工ダメージの形成メカニズムに関して述べた。砥粒径が小さくなると砥粒切込み深さが小さくなり、脆性材料の単結晶シリコンでも延性モード切断加工が実現できることを明らかにした。表面ダメージ層がアモルファス領域、転位領域、マイクロクラック領域からなることを示した。ワイヤ線速が遅い場合、シリコンの著しいアモルファス化や多結晶化が生じることを見出した。 第 5 章では、高硬度脆性材料である単結晶シリコンカーバイドを極細線の固定砥粒ダイヤモンドワイヤを用いて高線速での切断加工を行い、従来の切断加工方法である外周刃によるブレード切断と比較した加工特性について述べた。固定砥粒ダイヤモンドワイヤ切断加工では被削材の下面側チッピングがブレード切断と比較して少なくなることを明らかにした。 第 6 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。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4798 号	氏 名	鈴木 孝彰	
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
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	青山 英樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	柿沼 康弘
学士（工学）鈴木孝彰君提出の学位請求論文は「固定砥粒ダイヤモンドワイヤによる Si 系半導体結晶の高能率切断」と題し、6 章から構成されている。 半導体結晶材料の切断加工においては、切断幅を狭くして材料損失を低減し、高能率・高品質切断かつ材料歩留り向上など付加価値の高い加工が求められている。これまでに固定砥粒ダイヤモンドワイヤ切断に関する研究事例が報告されているものの、ワイヤ走行高速域での被削材に対する加工精度への影響および加工ダメージ形成メカニズムや、芯線が極細線で極細粒を固着した固定砥粒ダイヤモンドワイヤの精密切断メカニズムについては明らかになっていないのが現状である。そこで本論文では、高速切断可能なワイヤソー装置を新たに開発し、それを用いて固定砥粒ダイヤモンドワイヤによる単結晶シリコンや単結晶シリコンカーバイドの切断加工を実施することにより、被削材への加工ダメージの低減効果および高速切断加工のメカニズムを明らかにしている。 第 1 章は緒論であり、本研究の背景と従来の研究について述べている。 第 2 章では、高速切断加工を行うダイシングワイヤソー装置の開発について説明している。主要要素技術として、高速切断に対応する張力制御システム、ワイヤガイドプーリ、加工物幅方向の調整機構などの開発を行っている。 第 3 章では、第 2 章で述べたダイシングワイヤソー装置を用いて脆性材料である単結晶シリコンの高線速条件での切断加工を行い、切断抵抗、表面粗さ、切断前後のワイヤ表面の観察から切断加工特性を明らかにしている。高線速ではワイヤ走行方向に見かけの張力が加わり、切断抵抗が低減すること、ならびに被削材の表面粗さが向上し、微小くぼみ深さが低減することを明らかにしている。 第 4 章では、砥粒径を変化させた固定砥粒ダイヤモンドワイヤにより単結晶シリコンの切断加工を行い、加工ダメージの形成メカニズムに関して述べている。砥粒径が小さくなると砥粒切込み深さが小さくなり、脆性材料の単結晶シリコンでも延性モード切断加工が実現できることを明らかにしている。また、表面ダメージ層がアモルファス領域、転位領域、マイクロクラック領域からなることを示し、特にワイヤ線速が遅い場合、シリコンの著しいアモルファス化や多結晶化が生じることを見出している。 第 5 章では、高硬度脆性材料である単結晶シリコンカーバイドを極細線の固定砥粒ダイヤモンドワイヤを用いて高線速での切断加工を行い、従来の切断加工方法である外周刃によるブレード切断と比較した加工特性について述べている。さらに、固定砥粒ダイヤモンドワイヤ切断加工では被削材の下面側チッピングがブレード切断と比較して少なくなることを明らかにしている。 第 6 章は結論であり、各章で得られた内容をまとめ、本研究の成果を要約している。 以上要するに、本論文は Si 系半導体結晶の固定砥粒ダイヤモンドワイヤによる高精度切断技術を開発するとともに、被削材への加工ダメージの低減および切断加工の能率向上の両面から評価を行うことにより、開発技術の有効性を明らかにしたものであり、生産加工学および工作機械技術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.4799	Name	Heidari, Mehdi
Thesis Title Material Removal Mechanism and Surface Integrity in Ultraprecision Cutting of Porous Materials			
Porous materials have received great interest not only in medical science but also in a variety of industrial applications due to the special properties of porous materials, such as high surface area, reduced volumetric density, and increased permeability. These materials are generally manufactured by powder metallurgy or chemical etching, however, to achieve the high performance of porous materials, precision processing of complex three-dimensional shapes is a necessary. During the machining of porous parts, surface integrity, mechanical properties, and porosity are significantly changed by the cutting process, which may influence their applications. Nevertheless, the researches carried out on the mechanical machining of porous materials are few especially in nanometer scale, thus, the machining mechanism has not been revealed. In this research, ultraprecision cutting in micrometer and nanometer scales for three types of porous materials, porous carbon, porous single crystal silicon, and porous titanium is performed with single crystal diamond tools. Microscopic material removal mechanism is investigated and machining conditions to improve surface integrity is discussed. Chapter 1 provides the introduction and overview of the issues regarding research. The research significance and also the research objectives were included in this chapter. Chapter 2 provides an introduction to ultraprecision cutting technology and an overview of the mechanism of cutting of hard brittle materials like ceramic and ductile materials like metallic materials, as well as past research works on the machining of porous materials. Chapter 3 presents the results of the investigation on the fundamental mechanism of surface formation in the ultraprecision diamond turning of porous carbon. Influence on surface roughness by observed deformation, fracture, and rotation of carbon grains on a tool tip is revealed. Chapter 4 contains the discussion of the fundamental mechanisms of material removal in the ultraprecision diamond turning of porous silicon. Influence of anisotropy and cutting stress field near the edge of a pore is investigated and cutting condition to accomplish flatness in nanometer scale is presented. Chapter 5 presents the discussion of the fundamental mechanisms of material removal and surface integrity in ultraprecision cutting of porous titanium in comparison with pure titanium which has no pore. The transition of cutting chip shape, shear angle and machined surface hardness caused by the presence of pores are identified and evaluated. Chapter 6 presents the general modeling for machining of the porous materials based on their material and mechanical characteristics which provides a guideline to decide cutting parameters. Chapter 7 consists of the overall conclusion of the research. The future of this research area is also included.			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4799 号	氏 名	ヘイダリ, メフディ	
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
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	青山 英樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	柿沼 康弘
学士(工学), 修士(工学) HEIDARI, Mehdi (ヘイダリ, メフディ) 君提出の学位請求論文は「Material Removal Mechanism and Surface Integrity in Ultraprecision Cutting of Porous Materials」(多孔質材料の超精密切削における材料除去機構と表面品位)と題し, 7章から構成されている。 多孔質材料は高表面積率, 低容量密度および高浸透性といった特有な性質をもつため, 医療だけでなく様々な工業分野において注目されてきている。多孔質材料は一般に粉末冶金や化学エッチングなどの方法によって製造されているが, 高機能化のためには複雑な三次元形状に精密加工を行う必要がある。加工する段階で工具による切削作用で加工面平坦度, 機械的特性および気孔率などが大きく変化し, 最終製品の機能に影響を与える可能性がある。しかしながら, これまでに多孔質材料の機械加工, とりわけナノメートルスケールの超精密切削に関する研究はほとんど行われておらず, 加工メカニズムが解明されていないのが現状である。本研究では, 代表的な多孔質材料としてポーラスカーボン, ポーラスシリコンおよびポーラスチタンを被削材として使用し, 単結晶ダイヤモンド工具を用いたマイクロメートルからナノメートルスケールの超精密切削加工実験を行っている。そして微視的な材料除去機構を解明するとともに, 表面品位を向上させるための加工条件を見出している。 第1章は序論であり, 研究背景を述べ, 本研究の重要性と目的をまとめている。 第2章では, 超精密切削の原理について説明したうえで, セラミックなどの硬脆材料および金属などの延性材料のそれぞれの加工メカニズムを総括し, 多孔質材料加工に関する先行研究について述べている。 第3章では, ポーラスカーボンの超精密切削実験を行い, 表面形成のメカニズムについて述べている。工具刃先による炭素粒子の変形, 破壊, 回転および脱落などの現象を観察し, 表面粗さへの影響を明らかにしている。 第4章では, ポーラスシリコンの超精密切削実験を行い, 材料除去メカニズムについて検討を行っている。空孔近傍の除去メカニズムにおける異方性および切削応力場の影響などについて調査を行い, ナノメートルレベルの平坦度を達成する加工条件を見出している。 第5章では, ポーラスチタンの超精密切削実験を行い, 空孔をもたない純チタンと比較しながら材料除去および表面形成のメカニズムについて検討を行っている。また, 空孔の存在による切りくず形態やせん断角および加工表面の硬さの変化などを解明している。 第6章では, 材料物性と機械的特性から多孔質材料切削の一般モデルを提案し, 切削パラメータを設定するためのプロセス指針を明らかにしている。 第7章は結論であり, 本研究で得られた成果をまとめるとともに, 今後の展望について述べている。 以上要するに, 本論文では多孔質材料の超精密切削に対して微視的な材料除去機構を解明し, 表面品位を向上させるための加工条件を見出すとともに, 材料物性と機械的特性から多孔質材料切削の一般モデルならびに切削パラメータ設定指針を提案し, その有効性を明らかにしたものであり, 生産工学および精密加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 4800 号	氏 名	水本 由達
主論文題名： Investigation on Surface Integrity in Ultra-precision Cutting of Single Crystalline Optical Materials for Microcavity (微小光共振器のための単結晶光学材料の超精密切削における表面品位に関する研究)			
光を小さな空間に閉じ込めることができる微小光共振器は、光カーコムや全光信号処理回路のような次世代光デバイスにとって必要不可欠である。高 Q 値微小光共振器には、光学特性の観点からフッ化カルシウム(CaF₂)やサファイアなど単結晶光学材料を用いることが理想とされ、その製造には超精密機械加工が主として用いられている。しかし、単結晶光学材料は脆性と結晶異方性を有するため、その切削性能に課題を残している。本研究では、単結晶 CaF₂とサファイアの超精密切削における表面品位を詳細に解析し、その結果に基づき、超精密切削加工による微小光共振器の作製に成功している。 第 1 章では、本研究の緒論を述べている。 第 2 章では、微小光共振器と単結晶光学材料の超精密機械加工に関する背景を示し、本研究の目的を述べている。 第 3 章では、超精密切削において表面品位に影響を与える材料破壊系を説明している。材料破壊挙動の解析モデルとして分解応力モデルを用い、すべり、へき開、双晶の活動しやすさを解析するために、重み付きシュミット因子とへき開破壊パラメータを提案している。 第 4 章では、引っかかり試験、外周旋削試験における CaF₂の切削性能の評価結果を示している。切削する結晶面と方向に依存して表面品位は異なり、表面形態、表面粗さ、臨界切り込み深さが結晶構造に応じて変化することを明らかにしている。臨界切り込み深さの変化が提案した重みづけシュミット因子と一致する傾向を示し、{100}<011>すべり系、{111}へき開と部分的に{110}へき開が異方的破壊挙動に寄与することを実験的に明らかにしている。 第 5 章では、(0001)面サファイアの引っかかり試験の評価結果を示している。CaF₂と同様、表面品位が切削方向に依存することを示し、臨界切り込み深さの変化が重みづけシュミット因子とへき開破壊パラメータの両方とよく一致する傾向を示している。分解応力の計算結果に基づき、ロムボヘドラル双晶、ロムボヘドラルへき開、プリズマティックへき開が異方的破壊挙動において支配的であることを実験的に明らかにしている。 第 6 章では、超精密切削加工による微小光共振器の製造に関して、表面品位と共振器形状が共振性能に与える影響を調べることで、その有効性を示している。本研究における最高 Q 値として 4.6×10^6 の Q 値をもつ微小光共振器が得られ、また異常分散を有する台形微小光共振器の作製にも成功している。更に、熱光学振動抑制のために、CaF₂-真鍮ハイブリッド共振器を設計・製作し、評価した結果について述べている。従来の単一材料の微小光共振器に比べ、製作したハイブリッド共振器は高い熱的安定性を有することを示している。 第 7 章では、今後の展望を含め、本研究を総括し、結論付けている。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4800 号	氏 名	水本 由達
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士(工学) 柿沼 康弘
	副査	慶應義塾大学教授	博士(工学) 青山 英樹
		慶應義塾大学教授	博士(工学) 閻 紀旺
		慶應義塾大学准教授	博士(工学) 田邊 孝純
学士(工学), 修士(工学)水本由達君提出の学位請求論文は「Investigation on Surface Integrity in Ultra-precision Cutting of Single Crystalline Optical Materials for Microcavity」(微小光共振器のための単結晶光学材料の超精密切削における表面品位に関する研究)と題し, 7章から構成されている。 光を小さな空間に閉じ込めることができる微小光共振器は, 光カーコムや全光信号処理回路のような次世代光デバイスにとって必要不可欠である。高 Q 値微小光共振器には, 光学特性の観点からフッ化カルシウム (CaF₂) やサファイアなど単結晶光学材料を用いることが理想とされ, その製造には超精密機械加工が主として用いられている。しかし, 単結晶光学材料は脆性と結晶異方性を有するため, その被削性に課題を残している。本論文の著者は, 単結晶 CaF₂とサファイアの超精密切削における表面品位を詳細に解析し, その結果に基づき, 超精密切削加工による微小光共振器の作製に成功している。 第 1 章は序論であり, 本論文の概要について述べている。 第 2 章では, 本研究の位置づけと, 微小光共振器と単結晶光学材料の超精密機械加工に関する背景について示し, 本研究の目的を述べている。 第 3 章では, 超精密切削において表面品位に影響を与える材料破壊系を説明している。材料破壊挙動の解析モデルとして分解応力モデルを用い, すべり, へき開, 双晶の起きやすさを解析するために, 重み付きシュミット因子とへき開破壊パラメータを提案している。 第 4 章では, 引っかかり試験, 外周旋削試験における単結晶 CaF₂の切削性能の評価結果を示している。切削する結晶面と方向に依存して表面品位は異なり, 表面形態, 表面粗さ, 臨界切り込み深さが結晶構造に応じて変化することを明らかにしている。臨界切り込み深さの変化が提案した重みづけシュミット因子と一致する傾向を示し, {100}<011>すべり系, {111}へき開と部分的に{110}へき開が異方的破壊挙動に寄与することを実験的に明らかにしている。 第 5 章では, (0001)面サファイアの引っかかり試験の評価結果を示している。CaF₂と同様, 表面品位が切削方向に依存することを示し, 臨界切り込み深さの変化が重みづけシュミット因子とへき開破壊パラメータの両方とよく一致する傾向を示している。分解応力の計算結果に基づき, ロムボヘドラル双晶, ロムボヘドラルへき開, プリズマティックへき開が異方的破壊挙動において支配的であることを実験的に明らかにしている。 第 6 章では, 超精密切削加工による微小光共振器の作製に関して, 表面品位と共振器形状が共振性能に与える影響を調べることで, その有効性を示している。本研究における最高 Q 値として 4.6×10^6 の Q 値をもつ微小光共振器が得られ, また異常分散を有する台形微小光共振器の作製にも成功している。更に, 熱光学振動抑制のために, CaF₂-真鍮ハイブリッド共振器を設計及び製作し, 評価した結果について述べている。従来の単一材料の微小光共振器に比べ, 製作したハイブリッド共振器は高い熱的安定性を有することを実験的に示している。 第 7 章は結論であり, 得られた成果を総括し, 今後の展望について述べている。 以上要するに, 本論文は, 単結晶光学材料の超精密切削が表面品位に与える影響を明らかにし, 微小光共振器の製造に応用したものであり, 生産加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4801号	氏 名	長島 大典
主論文題名：			
氷点下温度域におけるクラスレートハイドレートの相平衡条件および保存性			
本論文は「氷点下温度域におけるクラスレートハイドレートの相平衡条件および保存性」と題し、氷点下温度域においてクラスレートハイドレート生成系の相平衡条件および糖類と共存する二酸化炭素ハイドレートの保存性を測定し、クラスレートハイドレートの熱物性および生成分解の動特性について論じている。 クラスレートハイドレート(以下ハイドレート)は水分子が水素結合により作る立体籠状構造の内部に他の分子が取り込まれてできる氷状の包接化合物である。ハイドレートは高いガス包蔵性、大きい生成分解熱を持ち、自己保存と呼ばれる氷点下温度域では熱力学的に不安定な温度圧力においても分解が抑制される現象があるためハイドレートをを用いたエネルギー技術や食品が提案されている。ハイドレートは地球や火星などの天体においても自然に存在し天体の大気および水の存在形態の一つとなっていて高いガス包蔵性により気候変動に影響している可能性が指摘されている。ハイドレートの相平衡条件や生成分解の動特性はハイドレートがかかわる技術開発および天体環境理解の基盤となる。本論文ではハイドレートエネルギー技術の利用温度と想定されかつ天体温度に相当する氷点下温度域におけるハイドレートの相平衡条件および保存性測定を行った。 1章ではハイドレートの特性と関連技術について概説し、本論文の目的と構成、研究の意義について述べている。 2章ではハイドレートのヒートポンプ作動媒体、消火剤としての利用や火星・タイタンにおける水・大気存在形態の理解のために、二酸化炭素ハイドレートおよびメタンハイドレート生成系の相平衡条件をそれぞれ 199.1 K-247.1 K および 197.3 K-238.7 K において測定した。測定した相平衡条件の信頼性は内部一貫性および文献値との一致から支持された。ハイドレート生成系の生成分解エンタルピーを Clausius-Clapeyron 式を測定した相平衡条件に適用することで算出した。 3章では固形炭酸食品としてのハイドレートの利用のために糖類と共存する二酸化炭素ハイドレートの保存性を測定し、糖類がハイドレートの自己保存に与える影響を考察した。保存温度、糖類の種類によって変わるハイドレートサンプル中の糖類水溶液、過冷却水の存在の有無および糖類水溶液の粘度がハイドレートの保存性に影響する要因の一つであることが示された。 4章では本論文の総括を行い、結論を述べている。 以上要約すると本論文はハイドレートをを用いたエネルギー技術および食品の開発や惑星・衛星の大気循環の理解に向け、相平衡条件および保存性測定を行い氷点下温度域における熱物性および特異な分解の動特性を明らかにした。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4801 号	氏 名	長島 大典
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	Ph. D.	堀田 篤
	慶應義塾大学教授	博士(理学)	近藤 寛
	慶應義塾大学准教授	博士(農学)	奥田 知明
学士(工学), 修士(工学), 長島大典君提出の学位請求論文は「氷点下温度域におけるクラスレートハイドレートの相平衡条件および保存性」と題し, 全 4 章からなる. クラスレートハイドレート(以下ハイドレート)は水分子が水素結合により作る立体籠状構造の内部に他の分子が取り込まれてできる氷状の包接化合物である. ハイドレートは高いガス包蔵性, 大きい生成分解熱を持ち, 自己保存と呼ばれる氷点下温度域では熱力学的に不安定な温度圧力においても分解が抑制される現象があるためハイドレートをを用いたエネルギー技術や食品が提案されている. ハイドレートは地球や火星などの天体においても自然に存在し天体の大気および水の存在形態の一つとなっていて高いガス包蔵性により気候変動に影響している可能性が指摘されている. ハイドレートの相平衡条件や生成分解の動特性はハイドレートがかかわる技術開発および天体環境理解の基盤となる. 本論文ではハイドレートエネルギー技術の利用温度と想定されかつ天体温度に相当する氷点下温度域におけるハイドレートの相平衡条件および保存性測定を行っている. 1 章ではハイドレートの特性と関連技術について概説し, 本論文の目的と構成, 研究の意義について述べている. 2 章ではハイドレートのヒートポンプ作動媒体・消火剤としての利用や火星・タイタンにおける水・大気存在形態の理解のために, 二酸化炭素ハイドレートおよびメタンハイドレート生成系の相平衡条件をそれぞれ 199.1 K-247.1 K および 197.3 K-238.7 K において測定し報告している. 測定した相平衡条件は内部一貫性があり文献値とも一致していることから, その信頼性が支持されている. ハイドレート生成系の生成分解エンタルピーを Clausius-Clapeyron 式を測定した相平衡条件に適用することで算出している. 3 章では固形炭酸食品としてのハイドレートの利用のために糖類と共存する二酸化炭素ハイドレートの保存性を測定し, 糖類がハイドレートの自己保存に与える影響を考察している. 保存温度, 糖類の種類によって変わるハイドレートサンプル中の糖類水溶液, 過冷却水の存在の有無および糖類水溶液の粘度がハイドレートの保存性に影響する要因の一つであることを示している. 4 章では本論文の総括を行い, 結論を述べている. 以上要約すると本論文はハイドレートをを用いたエネルギー技術および食品の開発や惑星・衛星の大気循環の理解に向け, 相平衡条件測定および保存性測定を行いそれらの基盤となる氷点下温度域における熱物性および特異な分解の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 4802 号	氏 名	原 孝介
主 論 文 題 名 : 車両の自動運転に向けた走行レーン地図と車載カメラ画像の照合による 自己位置推定に関する研究			
自動車の自動運転や高度安全システムの実現のため、自車が走行するレーンを高い精度で認識する必要がある。しかしながら複雑な交差点や合流分岐を含む市街地や都市高速では認識の難しいシーンがある。このため、レーン形状が細かく記載された走行レーン地図を準備し、画像と地図を照合することで地図上での自己位置を推定してレーン形状を参照する方法が有力である。 本研究では低コストで高精度なレーン認識の実現を目的として、自己位置推定の方法と地図の自動生成法を提案する。 まず自己位置推定の方法として、車載された複数のカメラ画像から検出した線分特徴と地図を照合することで、自己位置を高精度に推定する方法を提案する。自己位置推定の手がかりとなる路面上の白線、黄線、道路標示、縁石など異なる特徴を、2次元路面上の線分特徴として統一的に表現する。さらに線分特徴は車両座標系に鳥瞰変換することで、カメラの構成に依存せず自己位置の推定に用いることができる。 次にレーザ計測された三次元点群から勾配画像を利用して地図を自動生成する方法を提案する。自動運転で使われる走行レーン地図の作成プロセスはモバイルマッピングシステムによるレーザ計測と、人手による図化の二つのステップから構成される。本研究ではコストの大部分を占める人手による図化を自動化するため、レーザ計測された三次元点群を勾配画像に変換し、線分検出器を適用することで高精度な地図を生成する。 本手法の評価として自動抽出された地図と人手による地図を比較したところ、91.9%の精度で83.9%の地図を復元できた。これは人手のコストの約70%を削減したことに相当する。さらに自己位置推定システムは非線形二次計画問題として設計し、リアルタイムに推定が可能である。複雑な都市高速や市街地における走行評価によって自己位置の精度を測定したところ、自動運転の要求よりも高精度な自己位置が得られた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4802 号	氏 名	原 孝介
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	理学博士 藤代 一成
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 杉本 麻樹
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 青木 義満
学士（工学）、修士（工学）原孝介君提出の学位請求論文は、「車両の自動運転に向けた走行レーン地図と車載カメラ画像の照合による自己位置推定に関する研究」と題し、9章で構成されている。 自動車の自動運転や高度安全システムの実現のために、車載カメラの画像から車両が走行可能なレーンを正確に認識可能な技術が求められている。しかしレーン形状が複雑で何度も合流分岐するような市街地や都市高速では、十分な正確さでレーン認識を実現することは困難である。これを解決するためには、レーン形状が細かく記載された走行レーン地図を準備し、画像と地図を照合することで、地図上での自己位置を推定してレーン形状を参照する方法が有力であると考えられる。本論文は、このために必要な自己位置推定の方法と地図の自動生成法を新たに提案し、提案手法の有効性や効果を実験により示した成果についてまとめたものである。 第1章では、自動運転技術に対する現状の取り組みについて紹介し、本論文が新たに提案する市街地や都市高速における走行レーン地図による自己位置推定手法の基本原理と構成を示している。 第2章では、関連研究を自己位置推定に用いるセンサと地図の違いによって整理し、それらに対する本研究の位置づけを明確にしている。 第3章では、自己位置推定の基礎となる車両の運動モデルについて基本的な定式化を行い、地図上での自己位置の表現を定義し、拡張カルマンフィルタ、非線形最小二乗問題による自己位置の補正方法を示している。 第4章と第5章では本論文で提案する自己位置推定方法を示している。まず第4章ではマルチカメラ画像から抽出した線分を使って、自己位置を補正する方法を提案している。次に第5章では人手で作られた記載の少ない地図に対応するため、地図の曖昧さを確率でモデル化し、モデルを使った自己位置推定法を示している。 第6章では第4章と第5章で使った自動運転のための走行レーン地図作成のコストの大部分を占める人手による図化を自動化するため、レーザ計測された三次元点群を勾配画像に変換し、線分検出器を適用することで地図を自動生成する手法を提案している。そして、第7章では自動生成した地図の評価のために自動抽出された地図と人手による地図を比較することにより、91.9%の精度で83.9%の地図が復元できることを確認し、それが人手のコストの約70%を削減したことに相当することを示している。 第8章では本論文で提案した自己位置推定法の評価を示し、自動運転の目標とした横方向の誤差が0.2[m]以下であること、およびリアルタイム性を達成できることを実証している。さらに自動で生成した地図でも人手と同等の自己位置推定精度が出せることを確認し、本論文で提案する自己位置推定の方法と地図の自動生成法が有効であることを示している。 最後に第9章では本論文で得られた成果と結論をまとめ、本論文で提案した手法により実現可能な自動運転の将来展望について議論している。 以上要するに本研究は、市街地や都市高速で車両の自動運転を実現することを目指して、走行レーン地図と車載カメラ画像の照合による自己位置推定手法と、そのための走行レーン地図の自動作成手法を新たに提案し、本手法により自動運転に向けたレーン認識をより安定に低コストで実現できる可能性を示唆したものであり、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 4855 号	氏 名	鈴木 李夏
主 論 文 題 名 : Correlation analysis of subcellular ATP dynamics and changes in cellular morphology (細胞内 ATP 動態と細胞形態変化の相関解析)			
細胞はその機能に応じた形態をとる。形態は状況に応じて変化するが、この過程には細胞内エネルギー物質アデノシン三リン酸 (ATP) の関与が示唆されている。しかしこれらの知見の大部分は阻害剤等を用いたエネルギー産生抑制の結果に基づくため、生理的条件下での両者の関係は明らかではない。また形態変化の活発さは細胞内で一様ではないため、ATP も高空間分解能で分析することが求められるが、これまで細胞内の局所で ATP を解析した例は多くなかった。本論文では画像処理や相関解析などの手法の有用性に着目し、ATP と形態の同時観察にこれら解析手法を組み合わせることで、生理的条件下における細胞局所形態と ATP レベルとの相関を示した。 第一章では、まず、細胞形態に着目する意義を細胞機能との関連から述べた。次に、これら細胞形態の変化・形成における ATP の関与について、既知の知見に触れたのち、未解決な課題として i) 生理的条件下、ii) 細胞局所における ATP 測定、を挙げた。次いで種々の ATP 測定手法を踏まえた上で、近年開発された蛍光タンパク質型 ATP センサーについて、前述 i), ii) を達成しうる手法として解説した。最後に、前述 i), ii) のようなシグナルの解析において、画像処理や相関解析が強力な手段となることを示した先行研究を紹介し、ATP センサーと画像処理・相関解析を組み合わせることで、生理的条件下で細胞局所における ATP - 細胞形態相関に迫るという本論文の方針を述べた。 第二章では、代表的な実験細胞である HeLa 細胞を生理的条件下で観察した結果を述べた。細胞端という局所において、ATP 変動、形態変化とその分子基盤である細胞骨格分子動態の 3 者について相関を調べた。細胞端は 2 層構造をとり、そのうち内側領域の微小な形態変化は微小管の流入後に起り、これは ATP 上昇を伴った。更にこの ATP 変動と外側領域の形態変化の時間変遷を、生理的条件時と骨格分子動態阻害時とで比較することで、細胞骨格分子アクチンと微小管は各々細胞内 ATP の変動に関わることを示した。 第三章では、形態と機能との関係が密接な例として神経細胞を取り上げ、神経突起局所での ATP 産生器官ミトコンドリアの動態と突起伸長との関連を調べた。生理的条件下において、突起先端の構造である成長円錐に着目すると、突起部分と比較して成長円錐におけるミトコンドリア密度及び総ミトコンドリア ATP レベルは高かった。この総 ATP レベルは突起の伸長距離と正の相関があり、成長円錐内ミトコンドリアの ATP が神経伸展において重要であることがわかった。 第四章では、画像処理と相関解析を用いて生理的条件下における局所 ATP - 形態相関の可視化を実現したという本論文の成果と、二章、三章で明らかにした結果の生物学的意味について述べた。また今回明らかになった「生理的状态」とこれまでよく調べられてきた「ダメージを受けた状態」の間にあると考えられる、ダメージが引き起こす細胞の「変性プロセス」の解明可能性等について、本論文の結果を踏まえて言及した。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4855 号	氏 名	鈴木 李夏
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 工学博士	岡 浩太郎
	副査	慶應義塾大学教授 農学博士	井本 正哉
		慶應義塾大学教授 博士（地球環境科学）	土居 信英
		慶應義塾大学准教授 博士（工学）	舟橋 啓
学士（理学）、修士（理学）鈴木李夏君提出の学位請求論文は Correlation analysis of subcellular ATP dynamics and changes in cellular morphology（細胞内 ATP 動態と細胞形態変化の相関解析）と題し、全四章で構成されている。 細胞はその機能に応じた形態をとる。形態は状況に応じて変化するが、この過程には細胞内エネルギー物質アデノシン三リン酸（ATP）が関与する。しかしこれらの知見の多くは阻害剤等を用いたエネルギー産生抑制下での結果に基づくため、生理的条件下での両者の関係は明らかではない。また形態変化の活発さは細胞内で一様ではないため、ATP 濃度も高空間分解能で分析することが求められるが、これまで細胞局所で ATP を解析した例は多くなかった。著者は画像処理や相関解析などの手法の有用性に着目し、ATP と形態の同時観察にこれら解析手法を組み合わせることで、生理的条件下における細胞局所形態と ATP レベルとの相関を示すことを提案している。 第一章では、まず細胞形態に着目する意義を細胞機能との関連について述べた。次に、これら細胞形態の変化・形成における ATP の関与について、先行研究を紹介した後、未解決な課題として i) 生理的条件下、ii) 細胞局所における ATP 測定、を挙げている。次いで従来の ATP 測定手法を踏まえ、近年開発された蛍光タンパク質型 ATP センサーについて、i), ii) を達成可能な手法として解説している。最後に、i), ii) のようなシグナルの解析において、画像処理や相関解析が有望な手段となることを先行研究と関連づけて説明した。ATP センサーと画像処理・相関解析を組み合わせることで、生理的条件下・細胞局所での ATP - 細胞形態相関に迫る研究方針を述べている。 第二章では、代表的な実験細胞である HeLa 細胞を生理的条件下で観察した結果を述べている。細胞端という局所において、ATP 変動、形態変化とその分子基盤である細胞骨格分子動態の 3 者について相関を調べた。細胞端は 2 層構造をとり、そのうち内側領域の微小な形態変化は微小管の流入後に起り、これは ATP 上昇を伴った。更にこの ATP 変動と外側領域の形態変化の時間変遷を、生理的条件時と骨格分子動態阻害時とで比較することで、細胞骨格分子アクチンと微小管は各々細胞内 ATP の変動に関わることを示した。 第三章では、形態と機能との関係が密接な例として神経細胞を取り上げ、神経突起局所での ATP 産生器官ミトコンドリアの動態と突起伸長との関連について述べている。生理的条件下において突起先端へ向かうミトコンドリアの ATP レベルは高いことを示した。また突起先端の構造である成長円錐に着目すると、突起部分と比較して成長円錐におけるミトコンドリア密度及び総ミトコンドリア ATP レベルは高かった。この総 ATP レベルは突起の伸長距離と正の相関があり、成長円錐内ミトコンドリアの ATP が神経伸展において重要であることを示した。 第四章では、画像処理と相関解析を用いて生理的条件下における局所 ATP - 形態相関の可視化を実現したという本論文の成果と、二章、三章で明らかにした結果の生物学的意味について述べている。また今回明らかになった「生理的狀態」とこれまでよく調べられてきた「ダメージを受けた状態」の間にあると考えられることから、ダメージが引き起こす細胞の「変性プロセス」を解明できる可能性について、本論文の結果を踏まえて言及している。 以上本論文は蛍光イメージングと相関解析を用いることにより、生理条件下での細胞形態とエネルギー代謝との関係を明らかにすることに成功しており、細胞生物学・生物物理分野に大いに貢献するものである。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4856号	氏名	佐藤 英祐
主論文題名：			
ビセリングビアサイド類の合成と生物活性			
海洋生物から単離される天然有機化合物は、独特な構造と生物活性から多くの有機化学者や生物化学者の興味を引いてきた。しかしながら、多くの海洋天然物有機化合物は自然界からの供給量が少なく、詳細な生物活性についての研究が十分にされていない。そのような問題を解決する手段の一つとして、全合成研究を挙げることができる。 筆者は、2009年に沖縄県産のシアノバクテリア <i>Lyngbya</i> sp.より単離された18員環マクロリド配糖体ビセリングビアサイド(BLS)に着目した。BLS類は、ヒト子宮頸がん細胞 HeLa に対して細胞増殖阻害活性を示した。2015年にはBLS類の生物活性発現には(筋)小胞体膜上の Ca^{2+}ポンプである SERCA を阻害することで生物活性を発現することが明らかとなった。さらに、BLSとSERCAの共結晶X線構造解析によって結合様式も解明できた。筆者は、BLS類の全合成による量的供給を行い、さらに結晶構造に基づき人工類縁体を設計・合成しそれらの生物活性の評価を行なった。 第1章では、ビセリングビオライド B (BLLB)の全合成について述べた。まず、市販の光学活性グリシドール誘導体よりスタンナンセグメントを合成した。スタンナンセグメントにある側鎖部分は、Horner-Wadsworth-Emmons 反応によって導入できた。また、ヨウ化ビニルセグメントは、既知の光学活性物質より誘導されるアルデヒドに対してオキサゾリジノンとホスホネートを順次連結することで合成した。得られた二つのセグメントを、椎名試薬を用いたエステル化によって連結したのちに、分子内で Stille カップリングを行うことで18員環を構築し、BLLBを得ることができた。 第2章では、BLSの全合成について述べた。アグリコンである BLLB を用いて直接糖を導入することはできなかった。そこで、合成の中盤でグリコシル化反応を行なった。また、その後のスタンナンの連結においては、アグリコンの時とは異なり縮合反応を適用することはできなかったため、光延反応によって両セグメントを連結した。その後の分子内 Stille カップリングと脱保護を経て BLS を得ることができた。 第3章では、人工類縁体を用いた構造活性相関研究について述べた。まず、確立した全合成ルートを用いることで、マラリア原虫の Ca^{2+}ポンプへの親和性向上を目的として側鎖に親水性置換基を導入した BLLB の人工類縁体を合成した。それらの人工類縁体について生物活性試験を行なったところ、ヒトの細胞に対する細胞毒性を大幅に減少させることができた。一方、それらの類縁体の抗マラリア活性は、天然物より弱くなるという結果を得た。 本研究で確立した BLS 類の全合成ルートは人工類縁体の創製にも有用であることが示された。このような知見は、さらなる誘導体の合成と生物活性評価による新たな医薬品シードの開発に役立つものと考えられる。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4856 号	氏 名	佐藤 英祐	
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学）	末永 聖武
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士	千田 憲孝
		慶應義塾大学教授	博士（理学）	藤本 ゆかり
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	高橋 大介
学士（理学）、修士（理学）佐藤英祐君提出の学位請求論文は「ビセリングピアサイド類の合成と生物活性」と題し、序論、本論、総括および実験項より構成されている。 海洋生物から単離される天然有機化合物は、独特な構造と生物活性から多くの有機化学者や生物化学者の興味を引いてきた。しかしながら、多くの海洋天然物有機化合物は自然界からの供給量が少なく、詳細な生物活性についての研究が十分にされていない。そのような問題を解決する手段の一つとして、全合成研究を挙げることができる。本論文の著者は、2009年に沖縄県産のシアノバクテリア <i>Lyngbya</i> sp.より単離された18員環マクロリド配糖体ビセリングピアサイド（BLS）の生物活性に着目し、BLS類の全合成を達成した。さらに、人工類縁体を設計・合成し、抗マラリア薬を指向した生物活性評価を行った。 第一章は序論であり、天然物全合成を基盤とした創薬やBLS類の化学構造と生物活性に関する研究について述べている。BLS類の生物活性の標的分子は（筋）小胞体膜上のCa²⁺ポンプであるSERCAであり、共結晶X線構造解析によって解明されたBLSとSERCAの結合様式が述べられている。また、他のグループによるBLS類の合成研究も紹介されている。 第二章では、BLSの糖部分をもたない天然類縁体、ビセリングピオライドB（BLLB）の全合成について述べている。まず、市販の光学活性グリシドール誘導体より有機スズセグメントを合成した。その側鎖部分は、Horner-Wadsworth-Emmons反応によって導入することができた。また、ヨウ化ビニルセグメントは、既知の光学活性物質より誘導されるアルデヒドに対してオキサゾリジノンとホスホネートを順次連結することで合成した。得られた二つのセグメントを、椎名試薬を用いたエステル化によって連結したのちに、分子内でStilleカップリング反応を行うことで18員環を構築し、BLLBの全合成を達成した。 第三章では、BLSの全合成について述べている。アグリコンであるBLLBに直接糖を導入することはできなかったため、合成の中盤で糖部分を導入した。また、その後の二つのセグメントの連結においては、BLLB全合成とは異なり縮合反応が全く進行しなかったため、光延反応によって両セグメントを連結した。さらに、分子内Stilleカップリング反応と脱保護を経てBLSの全合成を達成した。 第四章では、人工類縁体の設計・合成と構造活性相関研究について述べている。マラリア原虫のCa²⁺ポンプへの親和性向上を目的として、側鎖に親水性置換基を導入した人工類縁体を設計し、確立した全合成ルートに基づき合成した。合成した人工類縁体について生物活性（細胞毒性、抗マラリア活性）を評価したところ、ヒトの細胞に対する毒性を大幅に減少させることができた。一方、それらの類縁体の抗マラリア活性を向上させることはできなかった。抗マラリア活性にはマクロラクトン部や糖部分などの変換・修飾も必要であることが分かった。 以上、本研究で確立したBLS類の全合成ルートは種々の人工類縁体の創製にも有用であることが示された。このような知見は、さらなる誘導体の合成と生物活性評価による新たな医薬品シードの開発に役立つものと考えられ、本研究成果は天然物化学のみならず関連分野の創薬化学・生命科学にも貢献するものである。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 4857 号	氏 名	竹川 俊也
主 論 文 題 名 :			
銀河系中心領域における高速度分子雲			
この宇宙に存在するほとんどの銀河には、その中心に 10^6–10^{10} 太陽質量の超大質量ブラックホール (supermassive black hole; SMBH) が潜んでいると考えられている。これらの SMBH へ物質が降着するとき、その重力エネルギーを解放することで銀河中心核は明るく輝く。中にはエディントン限界 (重力と輻射圧が拮抗する限界光度) を上回る強烈な放射を伴う中心核もある。私たちの住む「天の川銀河 (銀河系)」の中心核もまた、4×10^6 太陽質量の SMBH を有するが、その光度はエディントン限界の 10^{-8} 倍以下である。この 8 桁以上にわたる中心核活動の多様性は、質量降着率の違いに起因するものと推測されるが、それを支配する物理過程は未解明である。加えて、中心核 SMBH の起源自体も未解明である。一説によれば、中間質量ブラックホール (intermediate-mass black hole; IMBH) が合体を繰り返すことで SMBH が形成されられている。しかしながら、IMBH の存在を示す決定的な証拠は未だ得られていない。 銀河中心核への質量供給過程や SMBH の起源を探る上で、最も詳細な観測が可能な銀河系の中心部は非常に重要な研究対象である。銀河系中心核「いて座 A*」は核周円盤 (circumnuclear disk; CND) と呼ばれる半径 2 パーセクの高速回転するリング構造に取り囲まれており、これは中心核への質量供給源と考えられている。また、中心から 300 パーセク以内の領域では、高速度コンパクト雲 (high-velocity compact cloud; HVCC) と呼ばれる異常な速度幅を有する分子雲群が発見されている。私は、中心核への質量供給過程と SMBH の起源を解明することを目的に、CND と HVCC に代表される高速度分子雲の観測的研究を行った。 本研究ではまず、CND およびその周囲に対して、野辺山 45 m 望遠鏡を使用した複数の分子スペクトル線による高分解イメージング観測を行った。その結果、CND とそれに隣接する巨大分子雲 M–0.13–0.08 の物理的接触を示す “bridge” 構造を発見した。これは、M–0.13–0.08 が中心核近傍に落下してきたことを示すものであり、このような接触によって運動エネルギーの散逸と角運動量の損失が起こり、質量供給が促進される可能性を示すものである。これは銀河系中心核への質量供給の一端を捉えた重要な成果である。 さらに本研究では、ハワイの James Clerk Maxwell Telescope を使用して、分子スペクトル線観測の領域を中心から 20 パーセクの領域にまで拡大した。その結果において、「いて座 A*」から約 10 パーセクの位置に直径 1 パーセク程度の小型 HVCC を 2 つ発見した。それらの形状・運動と運動エネルギー、そして他波長対応天体を伴わないこと等から、恒星質量ブラックホールが高速で分子雲に突入したことで形成されたものと解釈される。これにより、銀河系中心核近傍を複数のブラックホールが飛び交っている状況が初めて観測的に示唆された。理論的には、銀河系内に 10^8–10^9 個ものブラックホールが存在すると予測されており、その大部分は暗く孤立していると考えられている。このような孤立ブラックホールは、HVCC のような高速度分子雲として検出できる可能性が示された。 それに加えて「いて座 A*」から約 45 パーセクの位置に、特異な運動を示す HVCC、CO–0.31+0.11 を新たに発見した。CO–0.31+0.11 の速度幅は HVCC の中でも際立って大きく、膨大な運動エネルギーを有する。そしてその運動は、2×10^5 太陽質量の質点周りのケプラー運動でうまく説明できることがわかった。このモデルに従えば、0.1 パーセクよりも小さい領域に 2×10^5 太陽質量もの質量が集中していることになる。重力源候補としては、高密度な大質量星団か重い IMBH が挙げられるが、同方向には他波長対応天体が確認できない。つまり、CO–0.31+0.11 内部には 2×10^5 太陽質量 IMBH が潜んでいる可能性がある。これが確認されれば、CO–0.40–0.22* に次いで銀河系内で発見された 2 番目の IMBH 候補天体となる。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4857 号	氏 名	竹川 俊也
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 岡 朋治
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士 中迫 雅由
		慶應義塾大学専任講師	博士（理学） 檜垣 徹太郎
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 松尾 亜紀子
学士（理学）、修士（理学）竹川俊也君提出の学位請求論文は、「銀河系中心領域における高速度分子雲」と題し、本論 6 章より構成されている。銀河系とは我々の住む太陽系が属する天の川銀河のことであり、分子雲とは恒星間に広がる希薄なガスが濃密に凝集した領域のことである。一部の銀河が極端に明るい中心核を有することは 1940 年代から知られていたが、1963 年のクエーサーの発見と 1970 年代に提案された降着円盤モデルの成功により、それらが超巨大ブラックホール (supermassive black hole; SMBH) への質量降着に伴う重力エネルギー解放に起因する現象であることが一般に受け入れられるようになった。現在の理解では、ほとんど全ての銀河の中心には数百万から数百億太陽質量の SMBH があると考えられており、10 桁以上に渡る中心核光度の多様性は質量降着率の違いによるものと解釈されている。一方で、その質量降着率の決定要因と中心核 SMBH の形成過程については、それぞれ複数の説が提唱されているものの、いずれも十分な共通理解には至っていないのが現状である。このような状況下において、著者は国内外にある複数のミリ波サブミリ波帯望遠鏡を駆使して銀河系の中心核周辺環境の詳細な分子スペクトル線観測を展開し、前述の問題解決を目指した研究を推進している。 本論文の第一章では、一般の銀河中心核の活動性と降着円盤モデルについて概説し、我々の銀河系の中心核とその周辺環境、分子ガス分布・運動のプロープとして使用する分子回転スペクトル線の放射過程について解説したのち、本研究の目的について述べている。第二章では、電波望遠鏡の基本構成とそれぞれのコンポーネントについて概説し、具体的な観測方法と強度較正法、データ処理の流れについて述べている。 第三章では、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45 m 望遠鏡によって取得した銀河系中心核近傍のミリ波帯分子スペクトル線データに基づき、中心核を高速で周回する分子ガス円盤と外側の巨大分子雲 M-0.13-0.08 の物理的接触の証拠を発見したことを報告している。この接触点において両者には 120 km/s 以上の速度差があり、接触は角運動量の散逸を引き起こし、中心への質量供給を促すものと考えられる。 第四章では、ハワイ・マウナケア山頂の James Clerk Maxwell Telescope によって取得した、サブミリ波帯分子スペクトル線データに基づき、二つの小型高速度分子雲の発見を報告している。それらの膨大な運動エネルギーと電磁波対応天体の不在から、これらは高速で運動する恒星質量 BH が分子雲に突入したことで生じた構造と解釈した。このことは、銀河系中心核のごく近傍に多数の恒星質量 BH が飛び交っていることを意味している。さらに第五章では、同領域において明瞭な Kepler 運動のパターンを示す一つのコンパクトな高速分子雲の発見を報告している。中心天体の質量は 20 万太陽質量と推測され、これも電磁波対応天体が不在であることから、恒星質量と銀河中心核の中間にある「中間質量」BH であることが推測された。これらの結果は、BH 合体による中心核 SMBH が形成・成長シナリオを支持するものである。最後に第六章において、本研究を統括し、将来の展望を述べている。 以上、本論文の内容をまとめると、著者は分子ガス分布・運動の詳細な解析に基づいて、銀河中心核環境への質量降着誘引過程の証拠とともに中心核 SMBH の成長に寄与しうる複数の BH 候補天体を発見した。これらの発見は、銀河中心核活動性の決定要因および中心核 SMBH の形成過程の解明に非常に重要な貢献をなすものであり、関連分野研究者から高く評価されている。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 4858 号	氏 名	西岡 宗
主 論 文 題 名 : Study of formation mechanism of ion-ion plasma layer and negative ion beam optics in negative hydrogen ion sources (水素負イオン源におけるイオン性プラズマ層の形成機構と負イオンビーム収束性に関する研究)			
現在、水素負イオン源は核融合プラズマ加熱装置、高エネルギー物理学用加速器、医療用加速器などで幅広く応用されている。これらの応用における共通の開発課題として、引き出し負イオンビームの電流密度および収束性の向上が挙げられる。近年、電流密度向上を目指し、イオン源ビーム引き出し孔近傍（引き出し領域）で水素負イオンを生成し、ビームとして引き出す、いわゆる表面生成型水素負イオン源の開発が進められてきた。このような水素負イオン源では、引き出し領域において水素正イオンと水素負イオンからなるイオン性プラズマ層が観測されている。しかしながら、イオン性プラズマ層の形成機構は未解明である。さらに、イオン性プラズマ層から引き出される水素負イオンビームの収束性は、イオン性プラズマの空間電位構造に大きく依存する。したがって、イオン性プラズマ層形成機構の解明とその電位構造の制御は、負イオンビーム収束性の向上に対して必須の課題である。以上の背景を踏まえ、本研究では水素負イオン源引き出し領域を対象とした数値計算モデルを構築し、イオン性プラズマ層形成機構の解明と、イオン性プラズマ層が負イオンビーム収束性へ与える影響を明らかにすることを目的とする。 第 1 章では、本研究の目的と意義を述べた。 第 2 章では、本研究で開発した運動論的 3 次元プラズマ粒子シミュレーションモデル (3D Particle in Cell model : 3D PIC モデル) について述べた。本モデルを用いることで、引き出し領域中の 3 次元電位構造、磁場配位を考慮した上で、電子、水素正イオン、水素負イオンの運動を自己矛盾なく解析可能である。また、開発したモデルを大型核融合プラズマ閉じ込め装置 (JT-60U) 用水素負イオン源引き出し領域の解析に適用し、モデルの妥当性について検討した。 第 3 章では、開発した 3D PIC モデルを用いて、イオン性プラズマ層の形成機構について議論した。従来の 3D PIC モデルで考慮されてこなかった電子温度制御用のフィルター磁場に沿った大域的な電子損失過程を、磁力線平行方向と垂直方向それぞれの電子閉じ込め時間を考慮することにより数値的にモデル化した。これにより、従来の 3D PIC モデルでは困難であったイオン性プラズマ層の再現に、3D PIC モデルとして初めて成功した。このことから、イオン性プラズマ層の形成機構に対してフィルター磁場に沿った電子損失過程が重要な物理機構であることを示した。 第 4 章では、イオン性プラズマ層がビーム収束性へ与える影響を明らかにするため、第 3 章で構築された 3D PIC モデルを用いて引き出し孔近傍の空間電位構造を詳細に解析した。解析結果から、イオン性プラズマ層が形成されることで負イオン放出面（電場が 0 となる面）の曲率が増大し、その結果、引き出し負イオンビームが過収束されることでビーム収束性が悪化することが示された。 第 5 章では、水素負イオンの引き出し過程とそのビーム収束性に対する影響を詳細に議論している。実験では、負イオンビームは主にイオン源内部から引き出される表面生成水素負イオンによって構成されることが示されていた。しかし、従来の 3D PIC モデルによる解析結果は上記実験結果と矛盾しており、負イオンビームの主成分は、イオン源内部への輸送を経ることなく表面から直接引き出される水素負イオンによって構成されていた。本研究では、表面生成水素負イオンと水素正イオン間のクーロン衝突を考慮することで、イオン源内部からの負イオン引き出しを再現することに成功した。さらに、内部から引き出された負イオンは、過収束することなく高い収束性を持つことが示され、実験におけるビーム収束性を定量的に比較することが可能となった。そのため、ビーム収束性向上にむけた負イオン源設計に応用可能な、実験再現性を有する数値計算モデルの開発に貢献した。 第 6 章では、本論文の成果についてまとめた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4858 号	氏 名	西岡 宗
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 畑山 明聖
	副査	慶應義塾大学准教授	工学博士 横井 康平
		慶應義塾大学准教授	博士(工学) 中野 誠彦
		慶應義塾大学教授	博士(工学) 泰岡 顕治
学士(工学)、修士(工学) 西岡宗君提出の博士学位請求論文は「Study of formation mechanism of ion-ion plasma layer and negative ion beam optics in negative hydrogen ion sources (水素負イオン源におけるイオン性プラズマ層の形成機構と負イオンビーム収束性に関する研究)」と題し、全 6 章から構成されている。 現在、水素負イオン源は核融合プラズマ加熱装置、高エネルギー物理学用加速器、医療用加速器などで幅広く応用されている。これらの応用における共通の開発課題として、引き出し負イオンビームの電流密度および収束性の向上が挙げられる。近年、電流密度向上を目指し、イオン源ビーム引き出し孔近傍(引き出し領域)で水素負イオンを生成し、ビームとして引き出す、いわゆる表面生成型水素負イオン源の開発が進められてきた。このような水素負イオン源では、引き出し領域において水素正イオンと水素負イオンからなるイオン性プラズマ層が観測されている。しかしながら、イオン性プラズマ層の形成機構は未解明である。さらに、イオン性プラズマ層から引き出される水素負イオンビームの収束性は、イオン性プラズマの空間電位構造に大きく依存する。したがって、イオン性プラズマ層形成機構の解明とその電位構造の制御は負イオンビーム収束性の向上に対して必須の課題である。以上の背景を踏まえ、本論文では水素負イオン源引き出し領域を対象とした数値計算モデルを構築し、イオン性プラズマ層形成機構の解明と、イオン性プラズマ層が負イオンビーム収束性へ与える影響を明らかにすることを目的としている。 第 1 章は、序論であり本研究の目的と意義が述べられている。 第 2 章では、本論文の著者が新たに開発した 3 次元プラズマ超粒子シミュレーションモデル(以下 3D PIC モデルと呼ぶ)について説明されている。本モデルを用いることにより、負イオン引き出し領域中の 3 次元電位構造、磁場配位を考慮した上で、電子、正イオン、負イオンの運動を自己矛盾なく解析することが可能である。 第 3 章では、開発した 3D PIC モデルを用いて、イオン性プラズマ層の形成機構について議論している。従来の 3D PIC モデルで考慮されてこなかった電子温度制御用のフィルター磁場に沿った大域的な電子損失過程を、磁力線平行方向と垂直方向それぞれの電子閉じ込め時間を考慮することにより、数値的にモデル化したことを特徴とする。これにより、従来の 3D PIC モデルでは困難であったイオン性プラズマ層の再現に初めて成功している。 第 4 章では、イオン性プラズマ層がビーム収束性へ与える影響を明らかにするため、第 3 章で構築された 3D PIC モデルを用いて引き出し孔近傍の空間電位構造を詳細に解析している。解析結果から、イオン性プラズマ層が形成されることで負イオン放出面(メニスカス)の曲率が増大し、その結果、引き出し負イオンビームが過収束し、ビーム収束性が悪化することを明らかにしている。 第 5 章では、水素負イオンの負イオン源からの引き出し機構とそのビーム収束性に対する影響を詳細に論じている。プラズマ電極表面で生成された水素負イオンは、表面近傍のいわゆるシーツ電位効果により引き出し方向とは逆方向、すなわちイオン源内部に向かって加速される。このような水素負イオンが、何故、引き出し方向の速度成分を持ちイオン源内部から引き出されるのかは未解明であった。本論文の著者は、上述の 3D PIC モデルに表面生成水素負イオンと水素正イオンとのクーロン衝突を考慮することで、イオン源内部からの負イオン引き出しを再現することに成功している。さらに、イオン源内部から引き出された負イオンは、主として比較的曲率の小さいメニスカス中央部を通過する。したがって、水素負イオンビームは過収束することは少なく、ビームハロ成分も減少する。以上の計算結果は、実験におけるビーム電流密度の大きさはもちろん、ビームコア成分に対する発散成分(ビームハロ成分)の割合などのビーム収束性の指標も実験と定量的によい一致を示している。 第 6 章は、本論文の結論であり、得られた成果および今後の展望を述べている。 以上、要するに本論文は、水素負イオン源内部に生成されるイオン性プラズマ層形成機構と負イオンビーム引き出し、およびそのビーム収束性への影響を論じたものであり、収束性に優れた水素負イオン源の設計・開発に寄与することが少なくない。 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4859号	氏 名	矢本 昌平
主論文題名： Numerical Simulation of Impurity Transport in Tokamak Edge Plasmas (トカマク周辺プラズマにおける不純物輸送の数値シミュレーション)			
現在、核融合発電実現に向けて、世界7極の協力の下、国際熱核融合実験炉 ITER がフランスで建設中である。ITER およびそれに続く原型炉では、タングステン(W)がダイバータ板および第一壁候補材になっている。炉心プラズマの性能は、炉壁から発生する不純物によって大きく影響を受ける。W の炉心プラズマ侵入は、放射冷却による炉心温度低下や燃料希釈を招き、核融合炉の連続運転を妨げる。ITER の運転においては、運転中に許容できる W のコア侵入量は炉心プラズマ密度比 1.0×10^{-5} 以下とごく少量である。したがって、核融合発電の実現のためには、プラズマ中の W 不純物輸送過程の理解、および輸送制御手法の確立が必要不可欠である。そこで、本研究では、核融合炉設計に使用できる信頼性の高い不純物輸送コード開発を目的とし、モンテカルロ重金属不純物輸送コード IMPGYRO の開発・モデル高度化を行った。さらに、高度化された IMPGYRO を用い、ITER の周辺プラズマにおける W 輸送過程の予測計算を行った。 第1章は序論であり、研究対象であるトカマク型核融合炉、W 不純物のコア侵入のプラズマ性能への影響およびその輸送過程について説明し、研究目的を明確にしている。 第2章は、本研究にて使用した多粒子種プラズマ輸送コード SOLPS-ITER と、W 不純物輸送コード IMPGYRO の物理モデルについて述べている。 第3章は、磁力線平行方向の W 不純物輸送過程における、熱力・摩擦力の効果について検討している。ダイバータ板から発生した W 不純物は、熱力・摩擦力のバランスにより輸送方向が決定され、周辺プラズマ領域上部に滞留し、コアへと侵入する場合があることを明らかにした。 第4章では、第3章にて確認されていたコアプラズマへの W 侵入過程について詳細な解析を行った。検証にあたり、IMPGYRO コードに SOL/ダイバータの運動論的シミュレーションでは世界で初めて磁力線垂直方向の新古典モデルを導入し、コードの高度化を行った。以上のモデル高度化を行った IMPGYRO と、従来用いられてきた異常拡散のみで径方向輸送を扱ってきたモデルとを比較し、IMPGYRO コードでは大きなコア向きの W 流束が確認され、新古典輸送によるコアへの W 侵入の可能性を初めて示唆した。 第5章では、ITER 運転における W 不純物輸送の予測計算を行った。SOLPS-ITER にて計算した外側ダイバータ板にて高リサイクリング状態、部分デタッチの2つのプラズマパラメータを基に、IMPGYRO による不純物輸送計算を実施した。いずれの場合でも、ダイバータ板外縁部からの W 発生が確認されたが、ダイバータ板へと押し戻され、コアへの侵入には寄与しないことが分かった。一方、高リサイクリング状態の場合は、ストライク点近傍から発生した W 不純物が、コアに向かい輸送される結果が得られた。本結果より、ITER 運転時における W 不純物輸送に関する重要な知見を得ることができた。 第6章は結論であり、本研究の成果をまとめている。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4859 号	氏 名	矢本 昌平
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 畑山 明聖
	副査	慶應義塾大学准教授	工学博士 横井 康平
		慶應義塾大学准教授	博士(工学) 中野 誠彦
		慶應義塾大学教授	工学博士 岡野 邦彦
学士（工学）、修士（工学） 矢本昌平君提出の博士学位請求論文は「Numerical Simulation of Impurity Transport in Tokamak Edge Plasmas（トカマク周辺プラズマにおける不純物輸送の数値シミュレーション）」と題し、全 6 章から構成されている。 次世代エネルギー源の一つとして期待される制御熱核融合発電の実現には、高温・高密度プラズマを生成し、長時間磁場中に閉じ込め、維持することが必要となる。しかしながら、プラズマ閉じ込め容器壁で発生した不純物粒子が比較的低温の周辺プラズマ層を介して高温コアプラズマに混入すると、コアプラズマ温度は低下し、核融合反応の維持が困難となる。このため、現在、日本、EU など世界 7 極の国際プロジェクトとして建設中のトカマク型国際熱核融合実験炉(ITER)では、コアプラズマへの不純物混入量の割合をプラズマ密度全体に対して $10^{-3}\%$ 以下に抑える必要がある。周辺プラズマにおける不純物輸送のモデル化とコアプラズマへの混入量の予測シミュレーションは、ITER など将来炉における不純物制御と運転指針の確立のための最重要課題の一つとなっている。以上の背景を踏まえ、本論文はトカマク周辺プラズマを対象として、1)不純物輸送モデルの高度化、2)コアプラズマへの不純物混入量評価に関する信頼性の高い輸送シミュレーションの実現、さらには、3)上記、1)、2)に基づく ITER など将来炉における不純物制御に関する新たな知見と運転指針を得ることを目的としている。 第 1 章は序論であり、本論文の目的・意義を述べている。 第 2 章では、本研究の基盤となる不純物輸送シミュレーションコード（以下、IMPGYRO と呼ぶ）を構成する物理モデルと計算の流れについて、その詳細を述べている。IMPGYRO はトカマク磁場配位における粒子軌道を直接追跡するいわゆる運動論的粒子モデルに基づいている。ITER などにおいてプラズマ対抗壁の有力候補材であるタングステン(W)不純物粒子を対象として、トカマク実磁場配位中の 3 次元粒子軌道を追跡する。さらに、最大 74 価にも及ぶ W 粒子の多価電離・再結合過程、W 不純物粒子とプラズマ対向壁との相互作用などをモデル化している。しかしながら、IMPGYRO を含む従来の不純物輸送コードの多くは、背景燃料プラズマとのクーロン衝突により不純物イオンに作用する熱力および摩擦力については、簡易的に流体モデルにより模擬してきた。本論文の著者は、背景燃料プラズマの速度分布関数の非平衡性を考慮に入れ、モンテカルロ 2 体衝突モデルを用いてクーロン衝突を模擬し、運動論的に熱力および摩擦力をモデル化することにより、IMPGYRO の高度化に成功した。 第 3 章では、著者は上述の高度化された IMPGYRO を量子科学技術研究開発機構のトカマク型プラズマ試験装置 (JT-60U) に適用し、主に磁力線方向の熱力と摩擦力が不純物輸送に及ぼす影響を議論している。その結果、従来の流体モデルでは急峻な温度勾配が存在する領域でコアへ向かう熱力が過大評価されることを明らかにしている。 第 4 章では、第 3 章と同様に JT-60U を対象として磁力線に垂直方向の不純物輸送について議論している。磁力線に垂直方向の熱力および摩擦力を運動論的に扱うことが可能な周辺プラズマ不純物輸送コードは IMPGYRO 以外に世界的にも他に例をみない。その結果、周辺プラズマにおいてもいわゆる新古典輸送効果により、磁力線を横切る大きな不純物流束が発生することを初めて明らかにしている。 第 5 章では、ITER 実体系に IMPGYRO を適用し、不純物輸送予測シミュレーションを行っている。ITER の典型的な運転モードの一つである部分デタッチモードでは、プラズマ対抗壁で発生した W 不純物粒子は、主として摩擦力とラーマ旋回の効果により対抗壁前面の領域に局在化し、上流側に輸送されにくいことを明らかにするなど、ITER の運転指針に関して多くの新しい知見を得ている。 第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果と今後の展望をまとめている。 以上、要するに本論文は、高温・高密度トカマクプラズマの生成・維持、ひいては将来の制御熱核融合の達成に重要となる周辺プラズマ不純物輸送予測シミュレーションの基礎を確立したものであり、工学上寄与することが少なくない。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 4860 号	氏 名	小口 研一
主 論 文 題 目 : 電気光学結晶を用いた楕円偏光テラヘルツ電場ベクトル波形の測定とその解釈			
テラヘルツ周波数帯では、テラヘルツ時間領域分光法(Terahertz time-domain spectroscopy ; 以下、THz-TDS)を用いた光電場の時間波形計測が盛んに行われている。同分光法を用いると、試料を透過したテラヘルツ光電場の時間波形をフーリエ変換し、試料がないときの参照信号と比較することで、クラマース・クロニッヒ変換を用いることなく試料の複素屈折率を測定することができる。そのため様々な物性計測への応用が期待され、行われてきた。また近年では、THz-TDS の手法を拡張し、偏光情報も含めた電場ベクトル波形計測を行うことによって、試料の複素屈折率の異方性を調べる取り組みも行われている。 THz-TDS における代表的な光電場強度検出法として、電気光学(electro-optic : EO)サンプリング法が知られている。この手法は、EO 結晶内での非線形光学効果を通じて、検出が難しいテラヘルツ周波数帯の情報を、検出が容易な近赤外光周波数帯の情報へと転写することで、テラヘルツ光電場を計測する手法である。最近では、同手法を用いることで、テラヘルツ光電場の大きさだけでなく、その向き(偏光情報)も含めた電場ベクトル波形を計測できることが示され、様々な分光応用が進められている。 しかし、EO サンプリング法では、周波数の異なるテラヘルツ光と近赤外プローブ光が EO 結晶内部を異なる速度で進む為、EO 結晶内部でプローブ光と相互作用するテラヘルツ電場ベクトルの大きさと向きが時々刻々と変化してしまうという、いわゆる「位相不整合」の問題がある。この位相不整合が起こるために、一般に、計測された波形は空气中を伝搬してきたテラヘルツ電場ベクトル波形を正確に再現しない。この問題は EO サンプリング法の開発当初から認識されており、先行研究では位相不整合による影響を除去することで、測定した時間波形から正確なテラヘルツ光電場波形を復元した。一方で、より位相不整合の影響が複雑に関与するベクトル時間波形については、正確な光電場ベクトル波形を復元する手法は確立していなかった。 そこで本論文では、EO サンプリング法で計測されるベクトル時間波形を解釈することで、電場ベクトル時間波形を正確に復元する方法の確立を目指して、理論構築・実験検証を行った。その結果、測定したベクトル時間波形を周波数解析すれば、テラヘルツ光の各周波数成分の正確な偏光状態が復元できることが分かった(第3章)。また、EO 結晶の屈折率などの情報を考慮することで、正確なテラヘルツ光電場ベクトル時間波形の復元に成功した (第4章)。さらに、以上の手法について、結晶対称性の異なる様々な EO 結晶を用いても、同様に偏光計測できることを示した(第5章)。 本論文で提案する方法論は、電磁波の伝搬を記述する普遍的な Maxwell 方程式を基本としたものであるから、テラヘルツ周波数領域の光電場ベクトル時間波形の検出だけではなく、中赤外光や近赤外光などの様々な周波数帯での光電場ベクトル時間波形計測へと応用することが可能な重要な成果である。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4860 号	氏 名	小口 研一
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士(理学) 渡邊 紳一
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士 中迫 雅由
	副査	慶應義塾大学教授	博士(理学) 大橋 洋士
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 神成 文彦
学士(理学)、修士(理学) 小口研一君の学位請求論文は、「電気光学結晶を用いた楕円偏光テラヘルツ電場ベクトル波形の測定とその解釈」と題し、6つの章より構成されている。 近年の超高速分光技術の発展に伴い、テラヘルツ周波数領域を中心として、振幅・位相・偏光状態が制御されたコヒーレントパルス光源の発生技術が進歩している。高度に制御されたパルス光源を用いることによって、物質中のスピン制御や非線形光学現象の制御を行うなどの研究が世界的に活発に進められるようになっており、光の振幅・位相・偏光状態を正しく計測する技術の確立が希求されているところである。テラヘルツ周波数領域では、光の振幅と位相については、電気光学サンプリング法などの確立した高精度計測手法が存在する一方で、その偏光状態については、幅広い周波数領域で使用できる良質な偏光子がないため、高精度計測が難しいという課題があった。小口君は、電気光学サンプリング法を改良することで、偏光子を用いることなく、幅広い周波数領域で高精度に偏光計測可能な計測手法の原理構築を行い、併せて実験検証を通してその有効性を示した。特に、空气中を伝播する楕円偏光状態のテラヘルツ光電場ベクトル波形を復元することに初めて成功した。 小口君の博士論文は、以下の章立てで構成されている。第1章は序論である。テラヘルツ周波数領域の光の振幅と位相を計測する手法であるテラヘルツ時間領域分光法の開発の歴史を紹介したあとに、本論文の目的と構成を述べている。 第2章では、テラヘルツ時間領域分光法における代表的な光電場波形検出法である電気光学サンプリング法を紹介している。同手法は、電気光学結晶内での非線形光学現象を利用して、検出が難しいテラヘルツ光の情報を、検出が容易な近赤外光の情報へと転写し、その情報をもとに前者を計測する手法である。さらに、電気光学結晶を回転させることでテラヘルツ光の偏光状態を計測できる。本章の後半では、上記非線形光学現象の位相整合条件が満たされないときは、計測波形が本来のテラヘルツ光電場波形とは異なることを指摘し、その復元を試みる先行研究を紹介している。さらに、これを偏光状態計測に応用する際には、先行研究のやり方では、テラヘルツ光電場ベクトル波形を正確に復元できないことを指摘している。 第3章では、上記の問題を解決するために、電気光学結晶の非線形光学テンソルの対称性を考慮した電気光学サンプリング法の定式化を行っている。その結果、非線形光学現象の位相整合条件が満たされない場合でも、フーリエ解析した各周波数における偏光状態については、補正することなく正しく計測できるという重要な結論を、実験検証結果とともに示している。 第4章では、電気光学結晶の具体的な物性パラメータを用いて、計測波形の振幅と位相について位相不整合を考慮した補正を行うことで、空气中を伝播する楕円偏光状態のテラヘルツ光の電場ベクトル波形を復元する方法論を提示している。さらに実験検証によって、提示した方法論の妥当性を示している。 第5章では、様々な非線形光学テンソルの対称性を有する電気光学結晶を用いても同様に偏光計測が可能であることを示し、本論文で提示した方法論の一般性を証明している。 第6章では、本研究のまとめと展望について述べている。 本研究は、偏光状態も含めた光の電場ベクトル波形について、その正確な計測手段を提供するものである。本研究の成果はテラヘルツ光だけではなく、中赤外光や近赤外光など幅広い周波数スペクトル領域の光の電場ベクトル波形計測に応用することが可能であり、光科学分野において広範囲に重要な寄与を与えるものとして高く評価できる。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 4861 号	氏 名	小林 周
主 論 文 題 名 :			
XFEL コヒーレント回折イメージング実験手法の開発と細胞イメージングへの応用			
生物の最も基本的な単位である細胞は、細胞核や葉緑体といった細胞小器官をもっており、さらにその内外には膨大な水分子と共にタンパク質や核酸、脂質など生体分子を含んでいる。これらは μm から nm の複雑な空間階層構造を有しており、その機能構造を真に理解するためには、細胞丸ごとを空間階層に隔たりなく可視化する必要がある。コヒーレント X 線回折イメージング(Coherent X-ray diffraction Imaging: CXDI)は、μm サイズの非結晶試料を数十 nm 分解能で解析することが可能で、これまで電子顕微鏡と光学顕微鏡による解析が困難であった空間階層領域の橋渡しをする構造解析手法として期待されている。 CXDI 実験では、試料に空間コヒーレンスの高い X 線を入射して得られる回折パターンに位相回復法を適用し、X 線入射方向に対する投影電子密度像を回復する。X 線自由電子レーザー(X-ray free electron laser: XFEL)は、超高輝度かつ超短パルス光源であるため、CXDI 実験の入射光源として理想的であり、パルス 1 ショットで、放射線損傷のない構造を回折パターンとして記録できる。しかし、照射後に試料はクーロン爆発を起こして破壊されるので、同一試料から複数の回折パターンを取得することは不可能であり、トモグラフィによって三次元電子密度分布を可視化することはできない。近年、計算機実験において、同一の試料であるが異なる個体の投影電子密度像から三次元構造を回復できることが示された[Kodama & Nakasako., <i>Phys. Rev. E</i> 84, 021902 (2011)]。しかしながら、この手法を適用するためには膨大量の回折パターンを計測する必要があった。 研究室では、真空環境下で多数の試料粒子を散布した薄膜を XFEL パルス毎に並進させ、新鮮な試料を照射野に連続的に提供する実験方式を採用しているため、並進速度及び試料の交換効率が回折パターン取得効率を左右する。加えて真空中で、水和環境が必須である細胞試料の機能構造を維持しなければならない。また、XFEL を用いた CXDI 実験では、ビームストッパーや検出器の飽和により回折パターンの極小角領域にデータ欠損が生じる。極小角領域は、試料概形に関する情報を含むため、像回復効率が低下することがしばしばであった。 回折パターン計測効率を向上させるために高速並進ステージが実装されたクライオ試料固定照射装置の利用において、同装置の制御ソフトウェアの開発と細胞試料を凍結水和状態とする試料調整手法を確立することで、およそ 80 時間で 90~160 万枚の回折パターンを取得できるようになった。質の高い回折パターンからは、シアノバクテリアや酵母の細胞核の投影電子密度像が ~100 nm の分解能で得られた。また、回折パターンの中心対称性を考慮した新規暗視野位相回復法を開発することにより、極小角領域を大きく欠損した回折パターンにおいても像回復が可能となることを示した。これらの計測・解析技術を用いて細胞や細胞小器官の投影電子密度像が大量に得られるようになった。本研究ではこれらをシアノバクテリアの三次元構造解析に適用した。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4861 号	氏 名	小林 周
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 中迫 雅由
	副査	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(理学) 能崎 幸雄
	副査	慶應義塾大学准教授	博士(理学) 渡邊 紳一
学士（理学）、修士（理学）小林 周君提出の学位請求論文は、「XFEL コヒーレント回折イメージング実験手法の開発と細胞イメージングへの応用」と題し、本論九つの章より構成されている。前世紀末に提案されたコヒーレント回折イメージングによる非結晶粒子のX線構造解析は、近年、高輝度X線光源であるX線自由電子レーザー（XFEL）の実用化によって、サブマイクロメートル空間階層での新たなイメージング手法として利用できる可能性が高まってきた。このような背景の下で、著者は、我が国のXFEL施設SACLAにおいて30 Hzで供給されるXFELパルスを効率的に回折イメージング実験で利用するために、回折装置制御や試料作製方法を考案し、世界でも類を見ないデータ収集効率を実現した。また、回折パターンから試料粒子の投影電子密度図を得る反復的位相回復法を発展させる理論を提案し、実験データ解析での実用化に成功した。これらにより、生体非結晶粒子の新しいX線構造解析の展開を目指した研究基盤の確立に大きく貢献した。 第一章では、細胞内の空間階層構造と、既存のイメージング手法の概要をまとめながら、生体非結晶試料イメージングにおけるXFEL コヒーレント回折イメージングの役割、現状と問題点について述べている。第二章では、X線回折の基礎理論に基づいたコヒーレント回折イメージングにおける構造解析及び反復的位相回復法の原理について記述している。第三章では、通常のレーザーとは異なるXFELの発振原理やSACLAにおける低温コヒーレント回折イメージング実験の概要について記し、利用した集光光学系、検出器を紹介している。 第四章では、低温試料固定照射装置について紹介し、同装置を用いての高速データ収集の必要性を論じた後、30 Hzで供給されるXFELパルスを高効率で利用するために開発した、試料装填－交換－露光のための回折装置の制御方法について記している。同制御手法はSACLA加速器からのトリガー信号利用に踏み込むとともに、優れた操作性等を実現している。第五章では、高効率データ収集のためには、回折装置の制御だけでは達成が困難であることを論じた後、効率的データ収集を実現するための試料作製方法の開発と実用化について述べている。試料粒子を散布する薄膜の調整から散布方法、急速凍結の方法が示されている。第六章では、開発した装置制御手法及び試料調整方法によって可能となった効率的XFEL コヒーレント回折イメージング実験の結果を示している。また、試料作製での環境制御が回折パターンにもたらす影響を実験で得た回折パターンから論じている。さらに、細胞や細胞内小器官の水和凍結試料に対する適用例を具体的に示すとともに、その生物学的意義を論述している。第七章では、回折パターンに中心対称性を有するマスクを施し、反復的位相回復によって投影電子密度図を回復する新たな像再生方法を提案している。その理論の概要、シミュレーション、実際に得られた金属材料試料及び細胞内小器官の回折パターンに対する適用例を示している。 第八章では、本研究がもたらす将来展望として、多数の投影電子密度図から生体粒子の平均構造を三次元再構成できる可能性について論じながら、助走的研究の例として、サブマイクロメートルサイズのシアノバクテリアについて内部分布イメージングの展開例を示している。最後に、第九章において本研究を総括している。 以上、著者は、XFELを用いたコヒーレント回折イメージング実験における高効率なデータ収集を実現する技術開発や像回復理論を考案・実用化して、非結晶生体粒子の構造解析でその有効性を示し、XFEL コヒーレント回折イメージングを細胞生物学における新たなイメージング法として発展させることができたと評価できる。本論文の骨子である第四～七章の内容は、三報の学術論文として公表されており、研究内容は、広く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 4862 号	氏 名	西田 健治朗
主 論 文 題 名 : Numerical Modeling of Hydrogen Ion Sources with the Radio Frequency Inductively Coupled Plasma (高周波誘導性結合プラズマを用いた水素イオン源の数値モデリング)			
高周波誘導性結合プラズマ (Radio Frequency Inductively Coupled Plasma: RF-ICP) を用いた水素イオン源は、LSI加工などの産業応用、高エネルギー物理学用加速器、医療用加速器における陽子生成など幅広い応用分野を有している。これらRF-ICPを用いた水素イオン源では、高密度プラズマの生成が求められており、これを達成するには高周波伝送系から放電容器内RF-ICPへの効率的な電力供給が必須の課題となる。しかしながら、RF-ICPは高周波電磁場に対して複雑な応答を示すため、供給電力の最適化を図るのは容易でない。特に、低密度から高密度へ至る過程において、RF放電モードの遷移 (Eモード, Hモード間の遷移) が観測されてきたが、その遷移過程に関する解析は、未だ充分になされていない。以上を踏まえ、本研究では、次の二つのアプローチから、上記課題の解決に取り組む。(1) 巨視的アプローチ: RF-ICPを負荷に含む高周波伝送系における、0次元RF-ICP等価回路モデルを用いたインピーダンス整合の検討。(2) 微視的アプローチ: 電磁超粒子モデルによるRF放電モード遷移の運動論的解析。これら二つアプローチから、RF-ICP放電に関する知見を得、高密度RF-ICPを用いた水素イオン源の設計及び研究開発に寄与する。以上の取り組みに関して、本論文を以下の構成でまとめた。 第一章は、序論であり、本論文の目的と意義についてまとめた。放電過程に係る基礎的な物理過程、及びRF-ICPの用途とその課題についてまとめた後、本研究の目的について述べている。 第二章では、インピーダンス整合解析に用いる等価回路モデルについて説明する。本モデルは、外部コイルを含むインピーダンス整合回路系、及びRF水素イオン源内のRF-ICPで構成される。等価回路素子は、全て集中定数系で扱ういわゆる0次元モデルである。これを基に、主として高密度プラズマに対する電力供給の最大化を、インピーダンス整合の観点から解析する。 第三章では、第二章で説明した0次元等価回路モデルを、欧州原子核研究機構 (CERN) で開発されている線形加速器 (LINAC4) 用水素負イオン源に適用し、高周波回路設計・運転条件の解析を行った。これまで経験的に行っていた、駆動周波数操作による供給電力制御の有用性が、本モデルの解析結果から定性的に確認された。 第四章では、電磁超粒子モデルを用いた水素RF-ICP放電の運動論的解析について記した。本モデルは、Maxwell方程式系と荷電粒子の運動方程式を基礎方程式とする。従来の流体モデルに比べ、本モデルは大規模粒子モデルを基にしているため、運動論的観点から放電過程を詳細に解析することが可能である。このような運動論的なモデルによるRF-ICPのシミュレーションは現在までほとんどなされていない。 第五章では、第四章でまとめた数値モデルを用いたRF放電の解析結果についてまとめている。本モデルはE-H放電モード遷移を再現することが、解析結果から確認された。さらに、電子、水素イオンのそれぞれについて、放電モード遷移中のエネルギー分布関数 (EDF) を運動論的に解析した。解析の結果、荷電粒子のEDFは、熱平衡状態にあるMaxwell分布から逸脱することが確認され、運動論的視点の重要性が示唆された。本モデルによって、荷電粒子EDFの非平衡性などを考慮した上で、プラズマインピーダンスの計算が可能となり、より微視的な観点からプラズマと高周波回路のインピーダンス整合を検討する上での基盤となる。 第六章では、第一章から第五章それぞれの内容を要約し、本論の結論を述べた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4862 号	氏 名	西田 健治朗
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 畑山 明聖
	副査	慶應義塾大学准教授	工学博士 横井 康平
		慶應義塾大学准教授	博士(工学) 中野 誠彦
		慶應義塾大学教授	博士(工学) 泰岡 顕治
学士(工学)、修士(工学) 西田健治朗君提出の博士学位請求論文は「Numerical Modeling of Hydrogen Ion Sources with the Radio Frequency Inductively Coupled Plasma (高周波誘導性結合プラズマを用いた水素イオン源の数値モデリング)」と題し、全6章から構成されている。 高周波誘導性結合プラズマ(Radio Frequency Inductively Coupled Plasma: RF-ICP)を用いた水素イオン源は、LSI加工などの産業応用、高エネルギー物理学用加速器、医療用加速器における陽子生成など幅広い応用分野を有している。これらを用いた水素イオン源には、高密度プラズマの生成が求められており、これを達成するには高周波伝送系から放電容器内RF-ICPへの効率的な電力供給が必須の課題となる。しかしながら、RF-ICPは高周波電磁場に対して複雑な応答を示すため、供給電力の最適化を図るのは容易ではない。特に、低密度から高密度へ至る過程において、放電モードが容量性結合モード(Eモード)から誘導性結合モード(Hモード)へと遷移することが観測されてきた。しかし、その遷移過程に関する解析は、未だ充分とは言えない。以上を踏まえ、本研究では、(1)巨視的手法：RF-ICPを負荷に含む高周波伝送系に対する0次元RF-ICP等価回路モデルを用いたインピーダンス整合の検討、(2)微視的手法：電磁超粒子(EM-PIC)モデルを用いたRF放電モード遷移の運動論的解析、これら二つの手法を用いて、RF-ICP放電に関する知見を得、よって高密度RF-ICPを用いた水素イオン源の設計及び研究開発に寄与することを目的とする。 第1章は、序論であり、本論文の目的と意義について述べている。 第2章では、インピーダンス整合解析に用いる等価回路モデルについて説明している。本論文のモデルは、外部コイル系を含むインピーダンス整合回路系、及びRF水素イオン源内のRF-ICPで構成される。等価回路素子は、全て集中定数系で扱ういわゆる0次元モデルである。これを基に、以下第3章では主として高密度プラズマに対する電力供給の最大化を、インピーダンス整合の観点から解析している。 第3章では、上述の0次元等価回路モデルを欧州原子核研究機構(CERN)で開発されている線形加速器(LINAC4)用水素負イオン源に適用し、高周波回路設計・運転条件の解析を行っている。これまで実験では経験的に行われてきた駆動周波数操作による供給電力制御について、本論文の著者は、自身が開発した0次元等価回路モデルにより解析を行い、その有用性の理論的根拠を与えることに成功している。 第4章では、EM-PICモデルを用いた水素RF-ICP放電の運動論的解析について述べられている。本モデルは、Maxwell方程式系と荷電粒子の運動方程式を基礎方程式とする。このため、従来の流体モデルでは不可能であったRF-ICPを構成するプラズマ粒子のエネルギー分布関数に関する知見を得ることが可能になる。 第5章では、第4章でまとめた数値計算モデルを用い、RF放電時間発展の解析を行っている。その結果、運動論的超粒子モデルとしては初めて、水素RF-ICPのEモード、Hモード間遷移を自己無撞着に模擬することに成功している。さらに、電子、水素イオンのそれぞれについて、放電モード遷移中のエネルギー分布関数(EDF)を解析し、荷電粒子のEDFはMaxwell分布から逸脱することが確認され、運動論的視点の重要性が示唆されている。本モデルによって、荷電粒子EDFの非平衡性を考慮した上で、プラズマインピーダンスの計算が可能となる。これにより微視的な観点から、プラズマと高周波回路のインピーダンス整合を検討する上での基盤が新たに構築されたと考えられる。 第6章は、本論文の結論であり、本論文の成果と今後の課題についてまとめられている。 以上、要するに本論文は、RF-ICP放電を巨視的および微視的な観点から詳細に論じたものであり、高密度RF-ICPを用いた水素イオン源の設計及び研究開発に対して少なからず寄与しているものと判断される。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4863号	氏 名	須貝 智也
主論文題名： β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造の新規構築法の開発と (-)-カイトセファリン合成への応用			
本論文は β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造の新規構築法の開発とグルタミン酸受容体アンタゴニスト活性を示す(-)-カイトセファリンの形式合成について述べたものである。 緒論第一章では現在までに開発された α,α-二置換アミノ酸の合成法と、β-ヒドロキシ-α-アミノ酸構造の構築法について述べた。第二章では、Overman 転位について述べた。第三章では、カイトセファリンの単離・構造決定・生物活性研究について述べた後、これまでの合成研究および全合成について紹介した。 本論第一章では β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造の新規合成法の開発について述べた。第一節では不飽和エステル Overman 転位を用いた α,α-二置換アミノ酸の実用的かつ直接的な合成法の開発について述べた。不飽和エステルの Overman 転位は競争するアザマイケル反応によって進行しないと報告されていた。しかし、不飽和エステルの Overman 転位が実現できれば α,α-二置換アミノ酸の実用的合成法となる。そこで、温度効果、誘起効果および置換基効果について詳細に検討したところ、高温条件下、三置換オレフィンを持つ不飽和エステルを基質とすれば、Overman 転位が高収率で進行することを見出した。これより、バイオマス由来の原料から複雑な構造を持つ α,α-二置換アミノ酸を合成する手法を開発した。第二節では、不飽和エステルの Overman 転位を、当研究室で開発したオルトアミド型 Overman 転位へと応用した。さらに得られた α,α-二置換アミノ酸を用いた立体分岐型 SN2'反応にて、β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造の立体選択的に作り分けを達成した。 第三章では、開発した β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造の新規合成法を用いてカイトセファリンの形式合成について述べた。L-アラビノースから誘導した不飽和エステルの Overman 転位、続く立体選択的 SN2'反応にて、β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造構築した。その後、アラニンの付加と市川転位を経て、カイトセファリンのすべての官能基を導入し、Garner らの中間体を合成し、形式合成を達成した。 総括では本研究の成果を簡潔にまとめた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4863 号	氏 名	須貝 智也
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 千田 憲孝
	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（工学） 高尾 賢一
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 犀川 陽子
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 佐藤 隆章
学士（工学）、修士（理学）須貝智也君提出の学位請求論文は、「β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造の新規構築法の開発と (-)-カイトセファリン合成への応用」と題し、緒論、本論二章、総括および実験編より成っている。 有用な生物活性を示す天然有機化合物の効率的合成法の開発は、有機合成化学領域の重要な課題である。β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造を有する天然物には顕著な生物活性を示すものが多い。しかしその効率的かつ立体選択的な合成法はいまだ確立されていない。著者は本論文において、入手容易な化合物を原料とした β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造の効率的な新規構築法の開発と、β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造を有し、顕著なグルタミン酸受容体アンタゴニスト活性を示す海産天然物、(-)-カイトセファリンの本構築法を利用した合成研究について述べている。 緒論には、本研究の意義と目的、現在までに報告されている α,α-二置換アミノ酸の合成法、本研究で用いられる Overman 転位に関するこれまでの知見、ならびに標的化合物である(-)-カイトセファリンの単離・構造および生物活性などが述べられている。また現在までに報告されているカイトセファリンの合成例が記されている。 本論第一章、第一～第二節には、α,β-不飽和エステル Overman 転位を用いた α,α-二置換アミノ酸の実用的かつ直接的な合成法の開発が述べられている。これまで α,β-不飽和エステルの Overman 転位は競争するアザ-Michael 反応によって進行しないと報告されていたが、反応温度および置換基効果などについて詳細に検討し、高温条件下、三置換オレフィンを含む不飽和エステルを基質とすれば、Overman 転位が高収率で進行することを見出し、入手容易な原料から α,α-二置換アミノ酸構造を短工程で合成する効率的な手法を開発した。反応機構に関する議論も詳細に記されている。 第三節では、β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造の新規合成法の開発について述べている。前節で開発した反応は、水酸基の保護を必要としないオルトアミド型 Overman 転位にも適用できることを示し、アリル-1,2-ジオールからアリルアルコール構造を有する α,α-二置換アミノ酸化合物を合成した。これに分子内 S_N2' 反応を行ったところ、トリフルオロメタンスルホン酸エステルを経由する場合は <i>anti</i> 型、また光延反応を用いた場合は <i>syn</i> 型のオキサゾリンがそれぞれ高選択的に生成することを見出した。これにより、β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造を立体選択的に作り分ける手法を確立した。 第二章では、第一章で開発した反応を利用したカイトセファリンの形式合成について述べている。L-アラビノースから誘導した不飽和エステルの Overman 転位、続く立体選択的分子内 S_N2' 反応にて、β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造を立体選択的に構築した。その後、γ-ラクタムの形成とラクタムカルボニルのイリジウム触媒による選択的還元、ニトロンを經由するアラニン部位の付加などにより基本骨格を形成した。市川転位による窒素官能基の導入、脱保護反応により既知の中間体へ誘導し、(-)-カイトセファリンの合成を達成した。本合成は全工程を通してジアステレオマーの分離をほとんど必要としない、きわめて立体選択的なものである。 総括に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の解析等が詳細に記述されている。 以上、著者は本研究において、これまで進行しないとされていた α,β-不飽和エステルの Overman 転位が、適切な反応条件、基質を用いれば高収率で進行することを見出し、また引き続く分子内 S_N2' 反応により β-ヒドロキシ-α,α-二置換アミノ酸構造を高立体選択的に作り分ける手法を確立した。さらに (-)-カイトセファリンの立体選択的な合成を達成し、本手法の有用性を実証した。この研究で開発された新規反応と複雑な構造を有する天然物の合成は、生物活性天然物の合成における新規かつ有用な新規方法論を提示している。著者のこれらの研究成果は、有機合成化学の進展に貢献し、理學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 4864 号	氏 名	高橋 佑典
主 論 文 題 名 : Study on the Magnetic Properties of Stable Organic Radicals Carrying Hydrazyl and Nitroxide-Based Spin Centers and the Spin-Spin Interactions Through Non-Conjugated Framework (ヒドラジルおよびニトロキシドをスピン中心とする安定有機ラジカルの磁気特性と非共役骨格を介したスピン間相互作用に関する研究)			
分子磁性体のスピン中心として安定有機ラジカルが広く利用されている。磁性を担うのはスピン中心の不对電子の磁気モーメントであり、磁気モーメント間の分子内および分子間の相互作用の様式に依存して多様な磁気特性を発現する。分子は固体中で非共有結合性の分子間力により集積しており、分子配列様式が変化するとその物性、機能は大きく変化する。したがって、分子磁性体を構築するためには、化学的に安定なスピン中心を導入した有機固体の構造―磁性相関を明らかにし、分子内および分子間の磁氣的相互作用を制御するための方法論を確立することは極めて重要である。本研究では、スピン中心としてベンゾトリアジニルおよびピロリン <i>N</i>-オキシル骨格に着目し、分子配列が磁気特性に与える影響および非共役骨格を介した分子内相互作用について議論した。 ベンゾトリアジニル骨格は、π 共役系に不对電子が非局在化した環状ヒドラジルの一種であり、共役系を介した磁気相互作用が期待できる。第二章では、7 または 6 位に電子求引置換基を導入した 3-<i>tert</i>-ブチルベンゾトリアジニル誘導体を合成し、化学修飾が固体状態における磁気特性に及ぼす影響について議論した。X 線単結晶構造解析により分子構造および集積形態を明らかにし、SQUID 磁気測定により磁気特性に関する知見を整理した。さらに、計算化学的手法により、両者の相関関係について考察した。7 位にトリフルオロメチル基を導入した誘導体では、一次元カラム構造を形成し、カラム方向に強磁性的相互作用がはたらいていた。また、6 位にシアノ基を導入した誘導体では、室温付近においてスピン転移が生じることを見出し、この現象が分子の回転による構造相転移に起因することを明らかにした。 複数のスピン中心を含む有機分子の基底スピン状態は、交互炭化水素など π 共役系を対象としたスピン整列則で規定され、既存のビラジカル誘導体の多くはその整列則に従って分子設計が行われてきた。第三章、四章では、ピロリン <i>N</i>-オキシルをスピン中心の基本骨格としたヘテロビラジカル誘導体の合成を行い、非共役骨格を介した分子内磁気相互作用について議論した。基底スピン状態を ESR 測定で評価し、X 線単結晶構造解析、SQUID 磁気測定、計算化学的手法によりその分子内相互作用について議論した。ベンゾトリアジニルヘテロビラジカル誘導体では、分子内で強い反強磁性的相互作用が観測されたのに対し、ニトロニルニトロキシドおよび 6-オキソフェルダジルを置換したヘテロビラジカル誘導体では、分子内で強磁性的な相互作用がはたらいていた。ESR 測定より前者は基底一重項状態、後者は基底三重項状態であることを明らかにし、その分子内相互作用はピロリン環のサイズに起因するスピン間相互作用が主に寄与していることを見出した。これより、ピロリン <i>N</i>-オキシル骨格を有するビラジカル誘導体を対象として非共役骨格を介した磁氣的相互作用のメカニズムを明らかにした。 第五章では、合成したヘテロビラジカルの電子構造ならびに分子内の磁氣的相互作用について計算化学的手法を用いて評価した。さらに、得られた知見を活用し基底三重項分子の設計指針について記述した。 以上より、ベンゾトリアジニル誘導体およびヘテロビラジカル誘導体を系統的に合成・評価し、興味深い磁気特性を見出すとともに、非共役骨格を有する分子磁性体を構築する上で有用な設計指針を明らかにした。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4864 号	氏 名	高橋 佑典	
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	工学博士	藪下 聡
		慶應義塾大学教授	博士(理学)	近藤 寛
		慶應義塾大学准教授	博士(工学)	緒明 佑哉
学士(工学), 修士(工学) 高橋 佑典 君提出の学位請求論文は「Study on the Magnetic Properties of Stable Organic Radicals Carrying Hydrazyl and Nitroxide-Based Spin Centers and the Spin-Spin Interactions Through Non-Conjugated Framework (ヒドラジルおよびニトロキシドをスピン中心とする安定有機ラジカルの磁気特性と非共役骨格を介したスピン間相互作用に関する研究)」と題し, 全七章で構成されている。 分子磁性体のスピン源は, それに含まれるラジカル骨格の不対電子であり, 有機固体の磁気特性は, 分子内および分子間における不対電子間の相互作用によって変化する。したがって, 分子磁性体を構築するには, スピン中心を導入した有機固体の構造と磁性の相関を明らかにし, 分子内および分子間の磁氣的相互作用を制御するための方法論を確立する必要がある。本論文では, スピン中心としてベンゾトリアジニルおよびピロリン N-オキシル骨格に着目し, 分子配列が磁気特性に与える影響および非共役骨格を介した分子内の磁氣的な相互作用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, ベンゾトリアジニルの 7 または 6 位に電子求引性置換基を導入した 3-<i>tert</i>-ブチルベンゾトリアジニル誘導体の固体状態における磁気特性について議論している。単結晶構造解析より分子構造および集積形態を明らかにした上で, SQUID 磁気測定により磁気特性に関する知見を整理している。さらに, 計算化学的手法を活用して構造-磁性相関について考察している。7 位にトリフルオロメチル基を導入した誘導体は, 結晶中で一次元カラム構造を形成しカラム方向に強磁性的相互作用がはたらいっていることを明らかにしている。また, 6 位にシアノ基を導入した誘導体は, 室温付近において結晶構造の変化に伴うスピン転移挙動を示すことを見出している。 第三章では, ベンゾトリアジニルにピロリン N-オキシルを縮環したヘテロビラジカル誘導体を合成し, 構造-磁性相関を明らかにしている。基底スピン状態を低温 ESR 測定で評価し, 単結晶構造解析, SQUID 磁気測定および分子軌道計算に基づいて分子内および分子間の相互作用を評価し, 非共役骨格を介した不対電子間の磁氣的相互作用について議論している。 第四章では, ピロリン N-オキシルのビニル基にニトロニルニトロキシドまたはフェルダジルを導入したヘテロビラジカル誘導体を対象に構造-磁性相関を考察している。特に, フェルダジルを置換したヘテロビラジカル誘導体では, 分子内の強磁性的相互作用を磁気測定から観測することに成功している。さらに, ピロリン N-オキシル骨格を有するビラジカル誘導体を対象として非共役骨格を介した不対電子間の磁氣的相互作用のメカニズムを明らかにしている。 第五章では, 合成したヘテロビラジカルの電子構造ならびに分子内の磁氣的相互作用について計算化学的手法を用いて評価している。さらに, 得られた知見を活用し基底三重項分子の設計指針について記述している。 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, 本論文ではベンゾトリアジニルおよびヘテロビラジカルの誘導体を系統的に合成・評価し, 興味深い磁気特性を見出すとともに非共役骨格を有する分子磁性体を構築する上で有用な設計指針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, 有機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(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 4865 号	氏 名	寄立 麻琴
主 論 文 題 名 :			
多置換アミンの二段階合成およびステモアミド系アルカロイドの網羅的全合成			
Part 1. 多置換アミンの二段階合成法 Chapter 1 では <i>N</i>-メトキシアミノ基を有する化合物の特徴的な反応性をまとめ、これまでに盛んに研究されてきたアミド基に対する求核付加反応について紹介した。 Chapter 2 では多置換 <i>N</i>-メトキシピペリジンの二段階合成法について述べた。1 段階目の反応は二級 <i>N</i>-メトキシアミドとアルデヒドの分子間縮合、続くアシルイミニウムイオンに対する分子内細見・櫻井アリル化である。2 段階目は得られた <i>N</i>-メトキシラクタムに対する連続的求核付加反応であり、わずか二工程にて 2,3,6-多置換 <i>N</i>-メトキシピペリジンの合成に成功した。Chapter 3 では、開発した二段階合成法を利用した、koumidine が有する四環性骨格の構築について述べた。また、<i>N</i>-メトキシアミドとアルデヒドの二成分反応であった 1 段階目の反応を、三成分カップリング反応へと応用し、より一般性の高い反応を実現した。Chapter 4 では「多置換アミンの二段階合成」の結論を述べた。 Part 2. ステモアミド系アルカロイドの網羅的全合成 Chapter 5 ではステモナルカロイド類の生物活性、構造的分類、およびステモアミド、ステモニン、クルーミンの合成例を紹介した。ステモアミドの合成例は 20 例以上もの報告があるため、代表的な不斉全合成例のみを記載した。Chapter 6 では一つ目のブロック連結反応であるビニログスマイケル反応を鍵とした、ステモアミドのグラムスケール合成について述べた。開発した合成経路は、最長工程数 7 工程、1 サイクルで最大 1.07 グラムのステモアミドと合成できた。Chapter 7 では二つ目のブロック連結反応であるステモアミドに対する γ-ラクトンおよび γ-ラクタム選択的な求核付加反応を用いた、サキシラムアミド、イソサキシラムアミドおよびステモニンの網羅的全合成について述べた。γ-ラクトン選択的な求核付加反応により、サキシラムアミドアミドおよびイソサキシラムアミドの初の全合成を達成した。一方、γ-ラクタム選択的な求核付加反応により、ステモニンを共通中間体であるステモアミドよりわずか 2 工程で合成できた。Chapter 8 では「ステモアミド系アルカロイドの網羅的全合成」の総括を述べた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4865 号	氏 名	寄立 麻琴
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士 千田 憲孝
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 中田 雅也
		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	博士（理学） 佐藤 隆章
		慶應義塾大学准教授	Ph. D. 河内 卓彌
学士（工学）、修士（理学）寄立麻琴君提出の学位請求論文は、「Two-step Synthesis of Multi-substituted Amines and Unified Total Synthesis of Stemoamide-type Alkaloids（多置換アミンの二段階合成およびステモアミド系アルカロイドの網羅的全合成）」と題し、全八章および実験編からなり、第一章から第四章は第一部、第五章から第八章は第二部の二部構成となっている。 有用な生物活性を示す含窒素有機化合物の新規効率的合成法の開発は、有機合成化学ならびに創薬化学における重要な課題である。特に医薬品によく見られる構造モチーフである多置換アミン、また生物活性を示す多環性アルカロイドの効率的な合成法の開発が強く望まれている。著者は本論文において、第一部では合成が容易な <i>N</i>-メトキシアミド類を 2 工程で多置換 <i>N</i>-メトキシピペリジンや多置換アミンへ変換する新規合成法の開発について、第二部では多環性構造を有するステモアミド系アルカロイドの「官能基選択的ブロック連結法」という新規コンセプトに基づいた網羅的な全合成研究について述べている。 第一章では、多置換アミンの二段階合成法において筆者が基質として用いる <i>N</i>-メトキシアミド基の特徴的な反応性と、これまでに報告されている反応例を紹介している。 第二章では多置換 <i>N</i>-メトキシピペリジンの二段階合成法について述べている。アリルシランを有する第二級 <i>N</i>-メトキシアミドとアルデヒドを酸存在下反応させると、分子間縮合、アシルイミニウムイオンに対する分子内アリル化が連続的に進行し、<i>N</i>-メトキシ-δ-ラクタムが生成した。得られたラクタムに対して有機金属試薬を用いる連続的求核付加反応を行うと 2,3,6-多置換 <i>N</i>-メトキシピペリジンが 2 工程の反応により高収率で合成できることを見出した。 第三章には開発した二段階合成法の応用が述べられている。アルカロイド、コーミジンの四環性骨格が、本法により 2 工程の反応で構築された。また、アリルシランを有する <i>N</i>-メトキシアミドとアルデヒドの二成分反応であった本反応を、<i>N</i>-メトキシアミド、アルデヒド等価体、ビニル金属の三成分カップリング反応へ展開し、より一般性の高い多置換アミンの二段階合成法を開発した。 第四章は第一部の成果のまとめである。 第五章では、第二部での標的化合物であるステモアミド系アルカロイド類の構造的分類、生物活性、およびこれまでの合成研究例、ならびに本合成で重要な工程となるアミド基選択的な求核付加反応の研究例が紹介されている。 第六章ではまず本合成研究の特徴である五員環化合物の官能基選択的ブロック連結法のコンセプトを解説している。次に本合成研究の共通中間体となるステモアミドの官能基選択的ブロック連結法による短段階（7 工程）による大量合成法を述べている。 第七章にはサキシラムアミドおよびイソサキシラムアミドの初の全合成についての詳細が記されている。すなわち合成したステモアミドに対して、二回目の官能基選択的ブロック連結反応としてリチオフラン誘導体の γ-ラクトン選択的な求核付加により新たな γ-ラクトンを導入し、フラン部の酸化還元反応によりサキシラムアミドおよびイソサキシラムアミドをステモアミドから 11 工程で合成した。一方、ステモアミドに対するイリジウム錯体を用いた γ-ラクタム選択的な求核付加反応により、ラクタム部に γ-ラクトンを導入し、ステモニンをステモアミドから 9 工程の反応で全合成した。 第八章は第二部の総括である。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の解析等が詳細に記述されている。 以上、著者は本研究において <i>N</i>-メトキシアミドの反応性を巧みに利用した多置換 <i>N</i>-メトキシピペリジンならびに多置換アミンの二段階合成法を開発した。また「官能基選択的ブロック連結法」という新規かつ合理的なコンセプトに基づき、ステモアミドを共通中間体として、ラクトン選択的求核付加反応によりサキシラムアミドとイソサキシラムアミドを、ラクタム選択的求核付加反応によりステモニンをそれぞれ短工程で効率的に全合成した。著者のこれら多くの新知見を含んだ研究成果は有機合成化学の進展に貢献し、理學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4866号	氏 名	鐵本 智大
主論文題名： Tailoring optical resonances in photonic crystals with an optical nanofiber (ナノ光ファイバを用いたフォトニック結晶内の光共振の調整)			
ナノ加工技術の進展は、光を微小な空間に強く閉じ込めることができる微小光共振器の素子化を可能にした。微小光共振器内では高い光子密度が得られるので、この素子は非線形光学や量子光学の分野で広く利用されるようになった。その中でもフォトニック結晶共振器は、高 Q 値な共振モードが得られ、小型であるのでチップへの高密度な集積が可能であるといった特徴を有することから、非線形光学効果及び光の量子性を活用した信号処理の応用に適している。その一方で、量子情報通信に向けた共振器量子電磁力学応用では、従来のフォトニック結晶共振器を用いたのでは、共振器から光ファイバへの光の結合効率が低いことに加え、素子作製時に所望の波長や Q 値を有する共振モードを得ることや、偏波無依存化が難しいという課題があった。 本研究では、ナノ光ファイバを用いることで、これらの課題を同時に解決できることを示した。ナノ光ファイバ結合型フォトニック結晶共振器及びシリカナノビーム共振器の、二つのフォトニック結晶共振器についての提案をした。前者の共振器を用いると、光ファイバへの光の高い結合効率の達成に加えて、共振モードの波長と Q 値のチューニングができ、後者の共振器を用いると、それらに加えて偏波無依存化が可能だと示した。 第1章では、本研究の背景を概説し、目的を述べた。 第2章では、本研究で必要とされる理論を整理し、フォトニックバンドギャップやフォトニック結晶共振器の形成原理や研究に利用した計算手法の原理を記載した。 第3章では、ナノ光ファイバ結合型フォトニック結晶共振器の形成手法を示した。また、その光学性能を評価し、ナノ光ファイバの直径やフォトニック結晶との接触長さを調整することで、最大で 99.6% の結合効率が達成でき、さらには共振モードの波長や Q 値のチューニングも可能であることを示した。 第4章では、ナノ光ファイバ結合型フォトニック結晶共振器を用いた結合共振モードの形成実験を示した。共振モードの波長が制御できることを利用し、二つの共振モードの波長を一致するように操作することで、スペクトル領域での反交差を観測した。 第5章では、シリカナノビーム共振器の設計、作製、性能評価について述べた。TE 及び TM モードのいずれでも 10^4 を超える Q 値を有することを示し、これらの二つのモードが直交性を有することを確認した。また、光の入出力に用いるナノ光ファイバの直径やシリカナノビーム共振器との間の距離を調整することで、最大で 96% の結合効率を達成し、さらには共振モードの波長や Q 値のチューニングが可能であることを示した。 第6章では、スペクトル領域で重なりを持つ二つの直交した共振モードを有するシリカナノビーム共振器の設計を示した。円偏光の局在が可能であることを数値解析により明らかとし、偏波無依存化が可能であることを示した。 第7章では、各章で得られた知見をまとめ、本研究の総括を行った。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4866 号		氏 名	鐵本 智大
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	田邊 孝純
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	津田 裕之
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	木下 岳司
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	石樽 崇明
		慶應義塾大学特別招聘教授（国際）Ph.D. フィンリー, ジョナサン		
学士（工学）、修士（工学）鐵本智大君提出の学位論文は「Tailoring optical resonances in photonic crystals with an optical nanofiber」（ナノ光ファイバを用いたフォトニック結晶内の光共振の調整）と題し、7章から構成されている。 ナノ加工技術の進展は、光を微小な空間に強く閉じ込めることができる微小光共振器の素子化を可能にした。微小光共振器内では高い光子密度が得られるので、この素子は非線形光学や量子光学の分野で広く利用されるようになった。その中でもフォトニック結晶共振器は、高 Q 値な共振モードが得られ、小型であるのでチップへの高密度な集積が可能であるといった特徴をもつことから、非線形光学効果及び光の量子性を活用した信号処理の応用に適している。その一方で、量子情報通信に向けた共振器量子電磁力学応用では、従来のフォトニック結晶共振器を用いたのでは、共振器から光ファイバへの光の結合効率が低いことに加え、素子作製時に所望の波長や Q 値を有する共振モードを得ることや、偏波無依存化が難しいという課題があった。 本研究では、ナノ光ファイバを用いることで、これらの課題を同時に解決できることが示されている。ナノ光ファイバ結合型フォトニック結晶共振器及びシリカナノビーム共振器の、二つのフォトニック結晶共振器についての提案がなされている。前者の共振器を用いると、光ファイバへの光の高い結合効率の達成に加えて、共振モードの波長と Q 値のチューニングができ、後者の共振器を用いると、それらに加えて偏波無依存化が可能であることが示されている。 第1章では、本研究の背景が概説され、目的が述べられている。 第2章では、本研究で必要とされる理論が整理されており、フォトニックバンドギャップやフォトニック結晶共振器の形成原理、並びに、研究に利用した計算手法の原理が記載されている。 第3章では、ナノ光ファイバ結合型フォトニック結晶共振器の形成手法が示されている。また、その光学性能が評価され、ナノ光ファイバの直径やフォトニック結晶との接触長さを調整することで、最大で 99.6% の結合効率が達成でき、さらには共振モードの波長や Q 値のチューニングも可能であることが示されている。 第4章では、ナノ光ファイバ結合型フォトニック結晶共振器を用いた結合共振モードの形成実験が示されている。共振モードの波長が制御できることを利用し、二つの共振モードの波長を一致するように操作することで、スペクトル領域での反交差を観測している。 第5章では、シリカナノビーム共振器の設計、作製、性能評価について述べられている。TE 及び TM モードのいずれでも 10^4 を超える Q 値をもつことが示され、これらの二つのモードが直交性をもつことが確認されている。また、光の入出力に用いるナノ光ファイバの直径やシリカナノビーム共振器との間の距離を調整することで、最大で 96% の結合効率を達成し、さらには共振モードの波長や Q 値のチューニングが可能であることが示されている。 第6章では、スペクトル領域で重なりを持つ二つの直交した共振モードをもつシリカナノビーム共振器の設計が示されている。円偏光の局在が可能であることを数値解析により明らかとし、偏波無依存化が可能であることが示されている。 第7章では、各章で得られた知見がまとめられ、本研究の総括が行われている。 以上要するに、本研究はナノ光ファイバを用いた微小光共振器と光ファイバとの高効率な光結合と、微小光共振器の特性のチューニングを同時に達成する新たな手法を示したものであり、光エレクトロ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。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 4867 号	氏 名	神田 昂亮
主 論 文 題 名 :			
伝播モード直交性と多重尺度法を用いたガイド波の理論解析			
非破壊検査や構造物ヘルスマモニタリングとは、検査対象を破壊することなく、保守・点検を行う重要な技術である。その一手法としての超音波探傷法において、長大・大型構造物に対する検査時間の短縮とコスト削減を実現しうる高効率な非破壊検査技術として、長距離伝播性を有するガイド波の利用が期待されている。ガイド波は、通常バルク波とは異なり、速度分散性を有し、単一の周波数に対し複数の伝播モードをもつ。また、初期段階の疲労き裂や微小なき裂を検出する高精度な非破壊検査法として、非線形超音波を利用した探傷法も期待されている。近年、ガイド波法と非線形超音波法の両メリットを有した非破壊検査法として、累積的高調波と呼ばれる非線形ガイド波による検査法が注目されている。しかし、ガイド波の特徴である長距離伝播を考慮した非線形ガイド波の挙動解明に関する研究はなされていない。本研究では、累積的高調波を含む非線形ガイド波に着目し、伝播モードの直交性と多重尺度法を用いた理論解析により、ガイド波が長距離を伝播する際の動力学的な挙動を明らかにすることを目的とした。 第 1 章では、本研究の背景および目的を示した。 第 2 章では、最も単純なガイド波の一種である Lamb 波について、支配方程式と境界条件より伝播モードの直交性を示し、さらに微分作用素の自己随伴性を用いて非同次問題の可解条件を導出した。 第 3 章では、構造減衰を導入し、伝播モード直交性と多重尺度法を用いて、分散曲線と減衰曲線の導出を行った。得られた結果を、半解析的有限要素法を用いて検証し、本手法の妥当性を示し、本手法の利点を述べた。 第 4 章では、累積的高調波と呼ばれる内部共振的ガイド波について、非線形連成の効果と減衰の効果を考慮したうえで、その伝播挙動を、伝播モード直交性と多重尺度法を用いて明らかにした。さらに、内部共振的ガイド波を非破壊検査へ応用する際に生じる問題点を指摘した。 第 5 章では、第 4 章で指摘した問題点を解決する新しい非線形ガイド波法を提案した。この手法は、オートパラメトリック励振的現象を利用すれば、非線形ガイド波の振幅が伝播距離に対して定常に至ることに基づいて、非線形材料定数の変化を測定するというものである。定常振幅解の存在を伝播モード直交性と多重尺度法を用いて解析的に明らかにした。さらに、伝播距離に対する定常振幅の安定性を調べ、実用性のある現象であることを示した。 第 6 章では、各章で得られた内容を総括し、本研究の成果を要約した。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4867 号	氏 名	神田 昂亮
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 杉浦 壽彦
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 澤田 達男
		筑波大学教授	工学博士 藪野 浩司
		東京工業大学教授	工学博士 廣瀬 壮一
学士（工学）、修士（工学）神田昂亮君提出の学位請求論文は「伝播モード直交性と多重尺度法を用いたガイド波の理論解析」と題し、6 章から構成されている。 非破壊検査や構造物ヘルスマモニタリングとは、検査対象を破壊することなく、保守・点検を行う重要な技術である。その一手法としての超音波探傷法において、長大・大型構造物に対する検査時間の短縮とコスト削減を実現しうる高効率な非破壊検査技術として、長距離伝播性を有するガイド波の利用が期待されている。ガイド波は、通常バルク波とは異なり、速度分散性を有し、単一の周波数に対し複数の伝播モードをもつ。また、初期段階の疲労き裂や微小なき裂を検出する高精度な非破壊検査法として、非線形超音波を利用した探傷法も期待されている。近年、ガイド波法と非線形超音波法の両メリットを有した非破壊検査法として、累積的高調波と呼ばれる非線形ガイド波による検査法が注目されている。しかし、ガイド波の特徴である長距離伝播を考慮した非線形ガイド波の挙動解明に関する研究は十分なされていない。本研究では、累積的高調波を含む非線形ガイド波に着目し、伝播モードの直交性と多重尺度法を用いた理論解析により、ガイド波が長距離を伝播する際の動力学的な挙動を明らかにすることを目的としている。 第 1 章は緒言であり、本研究の背景および目的について述べている。 第 2 章では、最も単純なガイド波の一種である Lamb 波について、支配方程式と境界条件より伝播モードの直交性を示し、さらに微分作用素の自己随伴性を用いて非同次問題の可解条件を導出している。 第 3 章では、構造減衰を導入し、伝播モード直交性と多重尺度法を用いて、分散曲線と減衰曲線の導出を行っている。得られた結果を、半解析的有限要素法を用いて検証し、本手法の妥当性を示している。 第 4 章では、累積的高調波と呼ばれる内部共振的ガイド波について、非線形連成の効果と減衰の効果を考慮したうえで、その伝播挙動を、伝播モード直交性と多重尺度法を用いて明らかにしている。さらに、内部共振的ガイド波を非破壊検査へ応用する際に生じる問題点を指摘している。 第 5 章では、第 4 章で指摘した問題点を解決する新しい非線形ガイド波法を提案している。この手法は、オートパラメトリック励振的現象を利用すれば、非線形ガイド波の振幅が伝播距離に対して定常に至ることに基づいて、非線形材料定数の変化を同定するというものである。定常振幅解の存在を伝播モード直交性と多重尺度法を用いて解析的に明らかにしている。さらに、伝播距離に対する定常振幅の安定性を調べ、実用性のある現象であることを示している。 第 6 章は結言であり、各章で得られた内容を総括し、本研究の成果を要約している。 以上要するに、本研究は、累積的高調波を含む非線形ガイド波に着目し、伝播モードの直交性と多重尺度法を用いた理論解析により、ガイド波が長距離を伝播する際の動力学的な挙動を明らかにしたうえで、その特徴を活用した新しい非破壊検査手法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 4868 号	氏 名	東 和彦
主論文題名：			
微細加工技術を用いたバクテリアセルロースの成形と生産			
バクテリアセルロース(BC: Bacterial Cellulose)は細菌が産生するセルロースで、その特異な性質から様々な応用技術が研究されてきた。特に、生体適合性の高さと細胞外マトリックス類似のナノファイバ構造からバイオ・医療面での応用が期待されている。しかし、BC は生産コストが高いことから、産業利用は限られた用途にとどまっている。そこで、本論文では BC の付加価値を高めるための BC 成形プロセスと、生産コストを低減するための屋外培養プロセスを開発することにより、BC の産業利用を推し進めることを目指した。 まず、BC の膜上に微細構造を付与するプロセスを開発した。微細加工技術により製作した微細構造を表面に有するシリコン膜を、鋳型として用いることで、この微細構造を反転した構造を BC 膜に転写する。次に、BC 微小球の製作プロセスを開発した。乳化法もしくはマイクロ流体法を用いてゼラチン微小球を製作し、これを犠牲構造としてハイドロゲル内に BC 微小球産生用の空隙を形成した。これらの成形プロセスは BC の有用性を大いに高めるものである。 さらに、BC 産生菌を屋外培養するための新規な培養方法を提案した。本手法は、マイクロ流体デバイスを用い、BC 産生菌をハイドロゲルチューブ内部に包括して培養を行う。競合微生物による生物汚染を防ぐことができるため、BC 産生菌を高効率に屋外培養することが可能となる。BC 生産コストの低減につながり、BC の産業利用に大きく資するものである。 第 1 章では、本論文の研究背景と関連する従来研究、本論文の社会的な意義と目的を示し、本論文全体に関する概要を述べた。 第 2 章では、微生物に関する基礎的な知識と培養の理論について述べ、それに基づき、本論文全体を通して必要となる BC 産生細菌の培養実験の結果について議論した。 第 3 章では、微細構造を有する BC 薄膜の製作プロセスについて述べた。接着性細胞の足場材料として BC を用いる場合、BC のマイクロメートルオーダーの幾何構造が細胞機能の発現に大きな影響を及ぼす。そこで、微細加工技術により製作した微細構造を表面に有するシリコン膜を鋳型とし、これに沿って BC 産生菌に BC 膜を産生させることで、シリコン膜と反転した幾何構造を BC 膜に転写した。本章では、幾何構造の製作限界および BC 膜の膜厚に影響を及ぼす因子について実験的に評価を行った。従来用いられてきたエレクトロスピンニング法と比較し、このプロセスは極めて簡便で有用性が高い。 第 4 章では、マイクロメートルオーダーの直径を有する BC 微小球の製作プロセスを新たに提案し、その評価を行った。本プロセスでは、微小な球状の空隙をハイドロゲル内部に形成し、その内部に BC 産生菌を封入、培養することで BC 微小球を製作する。微小球状空隙形成には、ゼラチンの温度可逆的なゾルゲル転移を利用し、乳化法またはマイクロ流体法を用いて製作したゼラチン微小球を犠牲構造として用いた。従来研究では、特殊な構造をもったモノマを重合し製作したナノファイバ微小球が報告されているが、材料選択肢が限られている。セルロースは多数の水酸基を有することから誘導体作製や表面処理が容易であるため、BC 微小球はナノファイバ微小球として使える材料の選択肢を大きく拡張する。 第 5 章では、BC 産生菌をハイドロゲルチューブ内部に包括して培養を行うことで、競合微生物による生物汚染を防ぎ、BC 産生菌を高効率に屋外培養することが可能な培養プロセスを開発した。本章では、ハイドロゲルチューブのマイクロ流体デバイスを用いた生成条件、ならびに培養に最適なチューブ膜厚の評価、モデル競合微生物を用いた実証実験を行った。さらに、チューブの高強度化を目的としてダブルネットワークゲルの適用を検討し、その性能評価を行った。 第 6 章に本研究の結論をまとめた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4868 号	氏 名	東 和彦
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 三木 則尚
	副査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） 宮田 昌悟
		慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学） 尾上 弘晃
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 藤本 啓二
学士（工学）、修士（工学）東和彦君提出の学位請求論文は、「微細加工技術を用いたバクテリアセルロースの成形と生産」と題し、6 章から構成されている。 バクテリアセルロース(BC: Bacterial Cellulose)は細菌が産生するセルロースで、その特異な性質から様々な応用技術が研究されている。特に、生体適合性の高さと細胞外マトリックス類似のナノファイバ構造からバイオ・医療面での応用が期待されている。しかし、BC は生産コストが高いことから、産業利用は限られた用途にとどまっている。本論文の著者は、BC の産業利用を推し進めるために、BC の付加価値を高めるための微細加工技術を駆使した成形プロセスと、生産コストを低減するためのハイドロゲルチューブを用いた屋外培養プロセスを新たに提案し、そのプロセス条件を実験的に明らかにしている。 第 1 章は序論であり、本論文の研究背景と関連する先行研究に触れるとともに、本論文の社会的な意義と目的を示し、本論文全体に関する概要を述べている。 第 2 章では、微生物に関する基礎的な知識と培養の理論について述べ、それに基づき、本論文全体を通して必要となる BC 産生細菌の培養実験の結果について議論している。 第 3 章では、微細構造を有する BC 膜の製作プロセスについて述べている。接着性細胞の足場材料として BC を用いる場合、BC のマイクロメートルオーダーの幾何構造が細胞機能の発現に大きな影響を及ぼす。そこで、微細加工技術により製作した微細構造を表面に有するシリコン膜を鋳型とし、これに沿って BC 産生菌に BC 膜を産生させることで、シリコン膜と反転した幾何構造を BC 膜に転写する。本章では、幾何構造の製作限界および BC 膜の膜厚に影響を及ぼす因子を実験的に明らかにしている。 第 4 章では、マイクロメートルオーダーの直径を有する BC 微小球の製作プロセスを新たに提案し、その評価を行っている。本プロセスでは、微小な球状の空隙をハイドロゲル内部に形成し、BC 産生菌を封入、培養することで BC 微小球を製作する。乳化法またはマイクロ流体法により製作したゼラチン微小球を犠牲構造として使い、ゼラチンの温度可逆的なゾル-ゲル転移を利用することで、ハイドロゲル内部に微小球状空隙を形成できる。特に、マイクロ流体法により単分散なゼラチン微小球を形成することで、単分散な BC 微小球の製作に成功している。セルロースは多数の水酸基を有することから誘導体作製や表面処理が容易であるため、BC 微小球はナノファイバ微小球として使える材料の選択肢を大きく拡張する。 第 5 章では、BC 産生菌をハイドロゲルチューブ内部に包括して培養を行うことで、競合微生物による生物汚染を防ぎ、BC 産生菌を高効率に屋外培養することが可能な培養プロセスを提案している。本章では、ハイドロゲルチューブのマイクロ流体デバイスを用いた生成条件、ならびに培養に最適なチューブ膜厚の評価、モデル競合微生物を用いた実証実験を行い、その有効性を明らかにしている。さらに、チューブの高強度化を目的としてダブルネットワークゲルの適用を検討し、その性能評価を行っている。 第 6 章は結論であり、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。 以上要するに、本論文は微細加工技術を用いた高精度な BC 成形プロセス、ならびに高効率な BC 生産プロセスを新たに提案し、その有効性を示したものであり、生物化学工学ならびにマイクロ・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。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 4869 号	氏 名	斉藤 佑貴
主論文題名： Encoderless Angle Estimation Methods for Rotary Electric Actuator (回転電動機のエンコーダレス角度推定法)			
近年、産業界を始め、医療や介護分野といった生活環境に至るまで、多くの分野におけるロボットの需要が増加している。これらロボットの運動制御にはアクチュエータの位置や速度を高精度に制御する必要がある。従来、位置や速度の制御達成のためには、エンコーダやタコメータといった機械的センサを可動部に直接取り付けすることで制御対象のセンシングをおこなってきた。しかしながら、機械的センサにはシステム全体の巨大化、ロボットの価格高騰、接続箇所の増加、故障率の上昇、これらに伴うメンテナンスコストの増加といった欠点が存在する。そのため、センサを最小限に電圧や電流情報を用いてアクチュエータの位置や速度を推定する手法が求められている。 本研究の目的は、今後のロボット業界の発展を目指し、低分解能なセンサのみを用いたシステムおよびセンサを用いないシステムにおける正確な位置の推定および運動制御の実現である。 第 1 章では、背景および先行研究について概説し、本研究の目的および提案手法の概要を述べた。 第 2 章では、本研究の基礎技術である加速度規範型運動制御について述べ、ロバストな制御系実現の 1 つの方法として外乱オブザーバを紹介した。その後、環境反力を推定する反作用トルク推定オブザーバについて説明し、加速度制御に基づく角度制御およびトルク制御を紹介した。さらに省スペース性が求められる応用例としてヒューマノイドに導入が検討されている二関節筋機構を備えた 2 リンクマニピュレータの運動制御を概説した。 第 3 章では、ブラシレス DC モータに着目し、デジタルホールセンサと逆起電力オブザーバを用いた角度推定アルゴリズムを提案した。提案手法ではホールセンサの信号を検出することで正確な角度を一定角度毎に取得し、低分解能なエンコーダとして機能させる。さらに、逆起電力情報により上記の検出角度間の補間を行っている。本提案手法により、正確かつ滑らかな角度情報を得ることができ、高性能な運動制御が可能となる。本章では、シミュレーションと実験により提案手法の有用性を検証した。 第 4 章では、ブラシ付き DC モータにおけるインピーダンス変動を用いたセンサレス角度推定アルゴリズムを提案した。提案手法ではブラシ付き DC モータの機構的な特徴であるブラシと整流子の接点切り替わり時に生じるパルス状のインピーダンス変動に着目し、パルス観測時に角度情報を更新することで角度を推定する。また、インピーダンス変動は高周波交流信号重畳後、離散フーリエ変換を行うことにより検出する。本提案手法は、角度依存性の要素を用いるため、角度を直接的に推定できるという利点がある。さらに、モデル化もモータの仕組みに基づくため単純であり、低速度時の変速運動への対応も可能である。本章では、実験により提案手法の有用性を確認した。 第 5 章にて、本研究の成果を要約した。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4869 号	氏 名	齊藤 佑貴
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 大西 公平
	副査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） 矢向 高弘
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 久保 亮吾
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 西 宏章
学士（工学）、修士（工学） 齊藤 佑貴 君提出の学位請求論文は「Encoderless Angle Estimation Methods for Rotary Electric Actuator」（回転電動機のエンコーダレス角度推定法）と題され、5 章から構成されている。 回転機は産業用や民生用として広く用いられているアクチュエータである。これを高温や高圧といった悪環境下でも精密な動作に使用する要求が高まっている。このため、力検出器のみならず位置あるいは速度検出器を用いずに精密な動作を可能にするエンコーダレス制御が注目されている。本論文はこのような背景の下で、産業用途に多く用いられているブラシレス DC モータと精密な位置決めに多用されるブラシ付きの DC モータを対象にエンコーダレス制御を考案し、実験によりその有効性を確認したものである。 第 1 章では、研究の背景と目的を述べ、先行研究を中心に研究動向を概説している。 第 2 章では、モータのロバストなモーションコントロールが加速度制御系になっており、外乱トルクと接触対象からの反力トルクを区別することで、運動の双対変数であるトルクと回転速度が自由に制御でき、その結果高いロバスト性が獲得できることを示している。ロボットなど、狭隘な空間で多くの自由度を制御する場合に高いロバスト性が有効であり、これを、二関節筋機構を備えた 2 リンクマニピュレータで実験的に実証している。 第 3 章では、ブラシレス DC モータのエンコーダレス制御を取り上げている。横軸検出に装着されているホール素子からの信号を低精度エンコーダ信号として扱い、その間は逆起電力による補正を行うという現実的な方法を提案している。具体的には、ブラシレス DC モータの磁気回路による解析から回転角度を推定するアルゴリズムを提案し、実機による実験によりその検証を行っている。 第 4 章では、ブラシ付き DC モータのエンコーダレス制御を取り上げている。具体的には整流による電機子回路のパルス状のインピーダンス変動を検出し、これを角度情報とし、電機子回路に重畳した高周波電流によるインピーダンス推定により補正を加えることで正確な角度を得るもので比較的簡単なハードウェア構成で角度推定が可能であり実用的な方法と言える。実機による実験でも良好な結果を得ている。 第 5 章では、本研究の成果を要約し産業への応用に関する展望を述べている。 以上要するに、本論文では産業で多く用いられているブラシレス DC モータとブラシ付き DC モータを対象にして、エンコーダレスで回転角度および回転速度を推定する実用的な方法を開発し、実機によりその有用性を示したもので、電気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 4870 号	氏 名	深田 健太
主 論 文 題 目 : Organic-inorganic composite films with optimized structure and wettability for application to microdroplet analysis (有機無機複合膜の構造ならびに濡れ性の最適化による微小液滴分析への応用)			
近年、血液や唾液などの微小液滴を分析する技術への注目が高まっており、疾患の早期発見に役立てるなど広がりを見せている。微小な液体を効率的に分析するためには、微小空間において液体の混合、分離、反応などを制御するための技術が求められる。そのため、液体と接する基板表面に機能性薄膜を付与することで、液滴を制御する研究が数多くなされてきた。薄膜作製技術としては、ドライプロセスが現在主流となっているが、チャンバーサイズによる製膜サイズの限界や連続製膜が難しいなど課題がある。そこで、常温常圧下で基板の制約なく製膜をすることができるウェットプロセスへの期待が高まっている。ウェットプロセスを用いれば、他の材料との混合も容易となり、その中でも有機無機複合膜は、柔軟性と強度をあわせ持ち表面に機能を付与することができる薄膜として注目されている。このため、本研究における目的は、ウェットプロセスにより微小領域に対して有機無機複合膜を製膜する新規方法を提案し、その濡れ性を制御することであり、高分子フィルムや水晶振動子マイクロバンス (Quartz crystal microbalance : QCM) などに製膜することで、微小液滴の濃度や粘度を測定する手法の開発へ応用することをめざした。 第1章では、微小液滴分析の背景を概説して、本研究の目的について述べた。 第2章では、超撥水膜上での液滴乾燥技術を活用した新規の超撥水・親水パターンフィルムの作製方法について検討した。親水性シリカと、ポリビニルアルコールの混合比率を変化させた水溶液を超撥水膜上で乾燥させることで、コーヒーリングや、バルーン、スポット型などの親水領域が生じるが、その中でも、混合比率が 1:1 のときに、親水領域が微小なスポット型の構造となることに注目して、液体濃縮場としての利用を検討した。基板には可搬性の点で優位性がある高分子フィルムを用いており、さらに超撥水性繊維による液体輸送と組み合わせることで、安全に利用することができるポータブル液体濃縮場を開発した。 第3章では、交互積層法において、アニオンである親水性シリカとカチオンであるポリエチレンイミンの静電吸着力を用いることで、親水性の薄膜を微小領域に対して作製した。積層の順序を変えることで、深さ方向における無機微粒子の分布を制御し、単層構造や傾斜構造などの多層構造を開発し、拡張濡れの性能や、摩擦耐久性、曲げ耐久性への影響について述べた。また、粘弾性を測定することができる水晶振動子エネルギー散逸測定 (Quartz crystal microbalance with dissipation monitoring : QCM-D) に最適な膜構造を検討した。 第4章では、超撥水・親水パターンフィルムによる液体濃縮技術により、高分子フィルム上で、微量カフェインの濃度を測定することができる測定手法を開発した。濃縮されたカフェインの呈色反応 (ムレキシンド反応) を利用することで、カフェイン濃度が 100 µg/ml の水溶液 10 µl においても、白色から赤色への変化を観察することができ、この変化から濃度を推定できることについて述べた。 第5章では、微小領域における親水性薄膜を用い、液滴の粘度や、薄膜の粘弾性を測定することができる簡易な QCM-D 測定システムを開発した。液滴が QCM 表面を被覆する割合と、減衰時間に相関があることを見出したことから、親水膜の拡張濡れを利用して、5 µl の微小量の液体で QCM 表面を完全に被覆させた。これにより微小量の液体においても粘度を測定できる方法を確立し、さらに装置系を簡略化することで、ポータブル粘度測定システムを開発した。 第6章では本研究を総括し、濡れ性制御による微小液滴分析手法の今後の展望について述べた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4870 号	氏 名	深田 健太
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	白鳥 世明
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	Dr. sc. nat.	チッテリオ, ダニエル
	慶應義塾大学教授	博士（工学）	松本 佳宣
学士（工学），修士（工学） 深田健太君提出の学位請求論文は「Organic-inorganic composite films with optimized structure and wettability for application to microdroplet analysis」（有機無機複合膜の構造ならびに濡れ性の最適化による微小液滴分析への応用）と題し、6 章から構成されている。 近年、血液や唾液などの微小液滴を分析する技術への注目が高まっており、疾患の早期発見に役立てるなど広がりを見せている。微小な液体を効率的に分析するためには、微小空間において液体の混合、分離、反応などを制御する技術が求められる。そのため、液体と接する基板表面に機能性薄膜を付与することで、液滴を制御する研究が数多くなされている。薄膜作製技術としては、ドライプロセスが現在主流となっているが、チャンバーサイズによる製膜サイズの限界や連続製膜が難しいなど課題がある。そこで、常温常圧下で、様々な基板へ製膜できるウェットプロセスへの期待が高まっている。よって、本研究は、ウェットプロセスを用いて、構造や濡れ性が最適化された微小な有機無機複合膜を製膜する新規方法を提案し、その膜の特徴を活かした微小液滴分析手法を開発することを目的としている。 第 1 章では、本研究の背景と目的について記述している。 第 2 章では、超撥水膜上での液滴乾燥技術を活用した新規の超撥水・親水パターンフィルムの作製方法について述べている。親水性シリカと、ポリビニルアルコールの混合比率を変化させた水溶液を超撥水膜上で乾燥させることで、コーヒーリングや、バルーン型の親水領域が生じる。なかでも、混合比率が 1:1 のとき、微小なスポット型の親水領域となることを見出した。これを用いて、超撥水膜上で液滴を吸着し、かつスポットに対し液滴を濃縮できる場としての利用を検討している。 第 3 章では、水晶振動子マイクロバランス（Quartz crystal microbalance : QCM）の減衰挙動を利用した粘度測定法である水晶振動子エネルギー散逸測定（Quartz crystal microbalance with dissipation monitoring : QCM-D）において、電極の全面を液体で被覆することが重要であることを見出している。そして、滴下する液量を削減するために、QCM 上での最適な親水膜について検討している。特に、これまで未検討であった親水膜の深さ方向の物質分布の影響を調査するために、交互積層法により製膜した単一膜、二層膜および新規の傾斜膜を比較することで、膜が均一であるほど減衰挙動に与える影響が少ないことについて述べている。 第 4 章では、超撥水・親水パターンフィルム上での液滴濃縮技術を活用し、微量カフェインの濃度を測定できる新規の測定手法を開発している。濃縮されたカフェインの呈色反応（ムレキシド反応）を利用することで、カフェイン濃度が 100 µg/ml の水溶液 10 µl においても、白色から赤色への色変化を観察することができ、この変化から濃度を推定できることを述べている。 第 5 章では、均一組成の親水膜を活用し、微小液滴の粘度を測定するための簡易な QCM-D 測定システムを開発している。親水膜の拡張濡れを利用することで、5 µl の微小量の液体で QCM 表面を完全に被覆させている。これにより微小量の液体においても粘度を測定できる方法を確認し、さらに装置系を簡略化することで、ポータブル粘度測定システムを開発している。 第 6 章は結論であり、濡れ性制御による微小液滴分析手法の今後の展望を述べている。 以上要するに、本論文は有機無機複合膜の構造や濡れ性を最適化し、その膜の特徴を活用した微小液滴分析手法への応用を提案している。これらの技術と知見は、微小液滴分析の技術革新につながり、実用的に利用可能な分析化学手法として位置づけることができる。したがって、分析化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4871号	氏 名	小川 健司
主論文題目： Safety Surgery and Quantitative Pathological Evaluation Based on Haptic Technology (ハプティクス技術に基づく安全な手術と定量的な病理評価)			
医療および産業技術における人間とロボットの協調作業は世界中で注目されている研究課題である。特に、医療ロボットは人間が達成できないような複雑かつ正確な動作をおこなうことが期待できるため、医療ロボットの協調系に関する研究は必須の課題である。しかし、これまでの医療ロボットでは、医師は医療ロボットの動作を視覚情報のみでしか知ることができないため、術技に支障をきたすだけでなく、過度の力により患者の体を傷つける恐れがある。これらの問題を解決するために、本論文では力覚を用いた医療機器の開発について述べている。 第1章では、本研究の背景と目的、さらに従来研究の問題点について説明している。 第2章では、モーションコントロールについて説明している。モーションコントロールはメカトロニクス系を制御するための基本的な制御理論である。 第3章では、加速度制御に基づく4チャンネルバイラテラル制御および斜交座標を用いたバイラテラル制御について述べている。 第4章では、電気流体統合系に基づく力覚を備えた柔軟な1自由度医療器具について説明している。本研究では、2種類の医療器具について開発をおこなった。提案する機構の特徴は、流体エネルギーを用いて位置と力の情報を終端部に伝達する点である。実験結果より、従来のリリース機構に比べ位置と力の伝達性能がワイヤの曲率および屈曲角度に依存せず向上することを確認した。さらに、斜交座標によるバイラテラル制御を実装し、数種類の環境を用いた実験をおこない、その有用性を確認した。 第5章では、力覚を用いた非閉塞性無精子症(Non-Obstructive Azoospermia : NOA)のための定量的な評価指標の開発について説明している。NOAは男性不妊症のひとつであり、顕微鏡下精巣内精子回収術(MD-TESE)はNOAの治療法として最も普及されている治療法であるが、MD-TESEによる精子回収率が低いことが問題視されている。本研究では、精子回収率向上に向けた基礎研究として、精巣および精細管の硬さに着目し、剛性による定量的な評価についておこなった。実験より、剛性によるNOAの識別が可能であることを確認した。 第6章では、本研究の成果についてまとめている。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4870 号	氏 名	小川 健司
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 工学博士 大西 公平			
副査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 村上 俊之			
慶應義塾大学准教授 博士（工学） 柿沼 康弘			
慶應義塾大学准教授 医学博士 松本 緑			
学士（工学）、修士（工学）、修士（医学）小川 健司 君提出の学位請求論文は「Safety Surgery and Quantitative Pathological Evaluation Based on Haptic Technology」（ハプティクス技術に基づく安全な手術と定量的な病理評価）と題され、6 章から構成されている。 外科手術におけるロボットによる支援は安全性の確保や術者の負担軽減という利点があるが、施術に当たって定量的なデータを得ることができるという点にも注目が集まっている。本論文は大きく二つの点から構成されており、前半では安全性の高いロボット手先効果器の開発に焦点を当てており、後半では非閉塞性無精子症を例に取り、剛性という簡単な評価で症状の定量的評価が可能になることを示している。いずれの結果も手先効果器からマスタ側への力覚フィードバック信号を用いたハプティクス技術を巧妙に取り入れており、実験的にも興味深い結果を得ている。 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、モーションコントロールの基本原理を適用したロボットが加速度制御系になっていることをふまえ、適用する作業座標系の導入を行っている。 第 3 章では、多自由度機構で重要な役割を果たす斜交座標系の導入とそのリアルハプティクスへの展開を導出しており、力触覚伝送の制御構造と実現方法を示している。 第 4 章では、精度の高い力覚フィードバックにより柔らかい臓器などを的確に把持するため、リニアモータと油圧シリンダを組み合わせた新しいアクチュエータを提案している。電子油圧シリンダは径を細くし曲げがあっても本来摩擦力が小さいため、高精度な直動力を伝送することができる。実際にリニアモータと油圧シリンダを用いた実験によりその有効性を確認している。 第 5 章では、男性不妊に多く見られる非閉塞性無精子症を例に取り、精巣の剛性を調べることで精子回収率を上げることが可能であることを示したものである。実際に精巣の剛性を簡単に計測するハプティクス能力のある触診装置を新たに考案し、ハムスターによる <i>in-vivo</i> 実験を行い、精巣および精細管の双方の剛性を測定することで非閉塞性無精子症の識別が可能であることを定量的に示している。 第 6 章では、本研究の成果を要約し、今後の展望を述べている。 以上要するに、本論文では力触覚のある医用ロボットを開発し、安全な治療動作と定量的な評価による診断が可能であることを示したもので、ロボット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4872号	氏 名	平尾 章成
主論文題名：			
多空間デザインモデルに基づく座り心地知識体系の構築			
近年、輸送機械の性能向上やPCの普及などにより、ヒトは1日の大半を座位姿勢で過ごしている。そのため、シートに関する快適性である座り心地が着目され、多くの研究により研究知識が蓄積されている。しかし、これらの研究知識は、様々な要素により構成され、要素間の関係が複雑なため、設計者がシートを設計する際に的確に知識を活用することが困難である。そのため、座り心地の研究知識を体系的に整理し、実際の設計に適用可能な状態にすることが必要である。本研究では、設計行為を座り心地評価の心理要素と生理状態や力学状態などの物理要素に分けて、包括的に扱うことのできる多空間デザインモデルに基づき、座り心地の知識体系を構築することを目的とした。 第1章では、座り心地研究の現状と課題を述べ、研究の目的、方法および論文構成について述べた。 第2章では、多空間デザインモデルの枠組みを用いて、504編の研究論文から座り心地に関する知識を構成する要素および要素間の関係を抽出し、心理要素と物理要素の関係を明示した座り心地知識体系を構築した。その結果、長時間における座り心地評価に関与している知識として、力学的な人体メカニズムに関する知識が不十分であることが判明した。 第3章では、多空間デザインモデルにおける状態空間の要素がヒトの状態、シートとヒトの界面の状態、シートの状態にあることに着目し、これら3つの状態間の人体メカニズムを解明するための知識として、座位姿勢における生体内負荷推定手法を開発した。これにより、座位姿勢において、筋張力や腹腔内圧などの生体内の状態量を求めることができるようになった。 第4章では、第3章で開発した生体内状態量を用いて、自然にとった座位姿勢と強制的にとらせた座位姿勢における身体負荷を比較し、座位姿勢の生体力学に基づく姿勢決定要因を解明した。これにより、座り心地に関する生体内の力学状態を示す指標として、接触負荷や筋骨格負荷が有効であることを示した。 第5章では、第4章で抽出した生体力学に基づく姿勢決定要因を用いて、座り心地を向上するための肉体疲労低減運転姿勢とそれを実現するシート属性を、自動車運転に必要な場の拘束条件下で求め、試作シートを用いた実験により肉体疲労低減効果を検証した。これにより、長時間着座時の座り心地向上のための身体支持に関する設計知識を構築した。 第6章では、求めた肉体疲労低減運転姿勢およびシート属性を、実車相当の場の拘束条件下に適用し、試作シートで実験的に検証した。これにより、実車適用可能なシート座り心地向上に関する設計知識を構築した。 第7章では、第2章で構築した座り心地知識体系に、第3章から第6章で得た座り心地に関する人体メカニズムの設計知識を組み込み、心理要素と物理要素の関係を明示した座り心地知識体系を再構築した。さらに、設計者が知識体系を容易に活用できる座り心地知識ベースとして構築し、その有用性を検証した。 第8章では、各章で得られた本研究の成果を総括し、さらに今後の展望を述べた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4872 号	氏 名	平尾 章成
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士(工学) 松岡 由幸
	副査	慶應義塾大学准教授	博士(工学) 石上 玄也
		慶應義塾大学専任講師	博士(工学) 加藤 健郎
		慶應義塾大学教授	博士(工学) 荻原 直道
学士(工学), 修士(工学)平尾章成君の学位請求論文は「多空間デザインモデルに基づく座り心地知識体系の構築」と題し, 8 章から構成されている。 近年, 輸送機械の性能向上や PC の普及などにより, ヒトは 1 日の大半を座位姿勢で過ごしている。そのため, シートに関する快適性である座り心地が着目され, 多くの研究により研究知識が蓄積されている。しかし, これらの研究知識は, 様々な要素により構成され, 要素間の関係が複雑なため, 設計者がシートを設計する際に的確に知識を活用することが困難である。そのため, 座り心地の研究知識を体系的に整理し, 実際の設計に適用可能な状態にすることが必要である。本研究では, 設計行為を座り心地評価の心理要素と生理状態や力学状態などの物理要素に分けて, 包括的に取り扱うことのできる多空間デザインモデルに基づき, 座り心地の知識体系を構築することを目的としている。 第 1 章では, 座り心地研究の現状と課題に触れ, 研究の目的, 方法および論文構成について述べている。 第 2 章では, 多空間デザインモデルの枠組みを用いて, 504 編の研究論文から座り心地に関する知識を構成する要素および要素間の関係を抽出し, 心理要素と物理要素の関係を明示した座り心地知識体系を構築している。その結果, 長時間における座り心地評価に関与している知識として, 力学的な人体メカニズムに関する知識が不十分であることを指摘している。 第 3 章では, 多空間デザインモデルにおける状態空間の要素がヒトの状態, シートとヒトの界面の状態, シートの状態にあることに着目し, これら 3 つの状態間の人体メカニズムを解明するための知識として, 座位姿勢における生体内負荷推定手法を開発している。これにより, 座位姿勢において, 筋張力や腹腔内圧などの生体内の状態量を求めることができるようにしている。 第 4 章では, 第 3 章で開発した生体内状態量を用いて, 自然にとった座位姿勢と強制的にとらせた座位姿勢における身体負荷を比較し, 座位姿勢の生体力学に基づく姿勢決定要因を解明している。これにより, 座り心地に関する生体内の力学状態を示す指標として, 接触負荷や筋骨格負荷が有効であることを示している。 第 5 章では, 第 4 章で抽出した生体力学に基づく姿勢決定要因を用いて, 座り心地を向上するための肉体疲労低減運転姿勢とそれを実現するシート属性を, 自動車運転に必要な場の拘束条件下で求め, 試作シートを用いた実験により肉体疲労低減効果を検証している。これにより, 長時間着座時の座り心地向上のための身体支持に関する設計知識を構築している。 第 6 章では, 求めた肉体疲労低減運転姿勢およびシート属性を, 実車相当の場の拘束条件下に適用し, 試作シートで実験的に検証している。これにより, 実車適用可能なシート座り心地向上に関する設計知識を構築している。 第 7 章では, 第 2 章で構築した座り心地知識体系に, 第 3 章から第 6 章で得た座り心地に関する人体メカニズムの設計知識を組み込み, 心理要素と物理要素の関係を明示した座り心地知識体系を再構築している。さらに, 設計者が知識体系を容易に活用できる座り心地知識ベースとして構築し, その有用性を検証している。 第 8 章では, 各章で得られた本研究の成果を総括し, さらに今後の展望について述べている。 以上要するに, 本論文は多空間デザインモデルに基づく座り心地知識体系を構築し, シート設計における知識活用を支援するものであり, 設計学分野において, 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4873号	氏 名	廣部 紗也子
主論文題名：			
乾燥亀裂のパターン形成に関する数理モデルと数値解析手法の開発			
乾燥破壊現象は、乾燥に伴う材料の不均一な体積収縮によって応力が発生し、亀裂が形成される現象である。乾燥亀裂は網目状構造をもち、材料表面を特徴的な長さスケールをもった多角形セルに分割する。乾燥亀裂のセルのサイズや形状は材料や条件によって大きく異なるが、「階層的に形成される網目状の亀裂パターン構造が、特徴的な長さスケールをもった多角形セルを自発的に形成する」という基本的性質は保たれている。本論文の主な目的は、乾燥破壊現象をモデル化し、数値解析によって亀裂パターンの特徴的な長さスケールとその形成過程を再現し、乾燥破壊現象における亀裂パターン形成の支配法則を明らかにすることである。本論文は7章から構成される。 第1章では、本研究の背景と目的について述べた。現在までの実験的研究および数値解析的研究における問題点を明らかにし、「乾燥亀裂パターンの特徴的な長さスケールは、複数の物理現象の連成によって決定される」という本研究の仮説を提示した。 第2章では、乾燥破壊現象の数理モデルを提案した。乾燥破壊現象を3つの物理現象（水分拡散・材料の変形・破壊）の連成によってモデル化し、拡散に関する初期境界値問題と変形に関する境界値問題の連成による解析的な定式化を行った。また、粒子離散化有限要素法（PDS-FEM）の、乾燥収縮による非弾性ひずみを伴う場への拡張を行い、離散的な定式化を行った。 第3章では、第2章で提案した乾燥破壊現象の連成モデルの構造を分析し、その分析に基づいて、拡散の有限要素解析と変形/破壊の PDS-FEM 解析を弱連成させた数値解析手法を提案した。 第4章では、一次元的な平行亀裂パターンとその形成過程を再現した数値解析について述べた。 第5章では、二次元的な網目状亀裂パターンとその形成過程を再現した数値解析について述べた。また、炭酸カルシウム懸濁液を用いた乾燥破壊実験の結果を示し、実験結果と数値解析結果を比較・検証することで、解析結果の妥当性を示した。 第6章では、亀裂パターン形成のメカニズムに関する考察を示した。水分拡散と材料の変形との連成にのみ着目した数値解析結果の分析により、乾燥に伴う応力発現のメカニズムとセルの分割に伴う応力減少のメカニズムを明らかにした。さらに、第5章の二次元的な網目状亀裂パターンとその形成過程を再現する数値解析における、亀裂面からの水分蒸発の影響を詳細に分析することにより、セル分割の際に見られる、セルの周縁部から中心部に向かっての亀裂成長の理由を明らかにした。 第7章では本論文全体をまとめ、結論を述べた。本論文で提案した仮説の妥当性が、その長さスケールが創発する過程も含めて示されたことを踏まえ、「スケール不変性をもつ支配方程式の相互作用によって均質な場から特徴的な長さスケールを決定できる」という結論とともに、本論文で行なった PDS-FEM の乾燥収縮を伴う場への拡張の意義について述べた。また、乾燥破壊現象における亀裂パターン形成の支配法則を、他のマルチフィジックスおよびパターン形成の問題にも適用できる一般的な方法論へと拡張することを、今後の課題としてあげた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4873 号	氏 名	廣部 紗也子
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	Ph. D. 小國 健二
	副査	慶應義塾大学教授	博士(情報学) 小檜山 雅之
		慶應義塾大学准教授	博士(工学) 高橋 正樹
		慶應義塾大学准教授	博士(工学) 柿沼 康弘
学士（工学）、修士（工学）廣部紗也子君の学位請求論文は「乾燥亀裂のパターン形成に関する数値モデルと数値解析手法の開発」と題し、全7章から構成される。 乾燥破壊現象は、乾燥に伴う材料の不均一な体積収縮によって応力が発生し、亀裂が形成される現象である。乾燥亀裂は網目状構造をもち、材料表面を特徴的な長さスケールをもった多角形セルに分割する。乾燥亀裂のセルのサイズや形状は材料や条件によって大きく異なるが、「階層的に形成される網目状の亀裂パターン構造が、特徴的な長さスケールをもった多角形セルを自発的に形成する」という基本的性質は保たれている。この現象はありふれた現象であり、実験、理論、数値解析など様々なアプローチによる研究が行われてきているが、乾燥亀裂のセルのサイズがどのように決まるのかを説明することもセルの形成過程を再現することもできていない、未解明の問題である。この問題に対して、廣部君の博士論文では、乾燥破壊現象の数値モデルを提案し、数値解析によって亀裂パターンの特徴的な長さスケールとその形成過程を再現することに成功している。 第1章では研究の背景と目的を述べている。現在までの実験的研究および数値解析的研究における問題点を明らかにした上で、「乾燥亀裂パターンの特徴的な長さスケールは、複数の物理現象の連成によって決定される」という仮説を提示している。 第2章では、水分拡散・材料の変形・破壊の3つの物理過程の連成からなる乾燥破壊現象の数値モデルを提案し、拡散に関する初期値境界値問題と変形に関する境界値問題の連成による解析的な定式化を示している。さらに粒子離散化有限要素法（PDS-FEM: Particle Discretization Scheme Finite Element Method）の乾燥収縮による非弾性ひずみを伴う場への拡張と、水分拡散の場と材料の変形の場合、それぞれにおける亀裂面モデルの導入を行い、乾燥破壊現象の数値モデルの離散的な定式化を示している。 第3章では、第2章で提案された乾燥破壊現象の連成モデルの構造を分析し、その分析に基づいて、「拡散と変形」および「拡散と破壊」の弱連成解析と、「変形と破壊」の強連成解析を組み合わせた数値解析手法を提案し、その詳細を述べている。 第4章では、数値解析による一次元的な平行亀裂パターンとその形成過程を再現する数値解析について述べている。 第5章では、二次元的な網目状亀裂パターンとその形成過程を再現する数値解析について述べている。この章では、炭酸カルシウム懸濁液を用いた乾燥破壊実験についても述べられており、この実験結果と数値解析結果との比較に基づき、数値解析結果の妥当性の検証が行われている。 第6章では、水分拡散と材料の変形との連成にのみ着目した数値解析結果の分析により、乾燥に伴う応力発現のメカニズムとセルの分割に伴う応力減少のメカニズムを明らかにしている。さらに、第5章の二次元的な網目状亀裂パターンとその形成過程を再現する数値解析における、亀裂面からの水分蒸発の影響を詳細に分析することにより、セル分割の際に見られる、セルの周縁部から中心部に向かっての亀裂成長の理由を明らかにしている。 第7章では、本論文全体をまとめ、乾燥亀裂のパターン形成においては「スケール不変性をもつ支配方程式の相互作用によって、均質な場から特徴的な長さスケールが創発する」という結論とともに、本論文で行なった PDS-FEM の乾燥収縮を伴う場への拡張の意義と、乾燥亀裂以外のマルチフィジックスにおけるパターン形成の問題への提案手法の適用の可能性について言及している。 以上、要するに、廣部君の博士論文は、乾燥亀裂のパターン形成に対する有効な数値モデルとともにその数値解析手法を提示したものであり、当該分野への貢献は少なくない。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.4874	Name	Syahrial, Bin Erialdi
Thesis Title The Impact of Serviceability on Service Operations Performance, Service Cost and Customer Satisfaction			
In this thesis, three empirical studies on serviceability were performed in Japan toward investigating the effect of serviceability in manufacturing industries, exploring the important of service cost (after-sales service cost and ownership cost), and identifying the serviceability impact on customer satisfaction during experiencing serviceability-oriented products in after-sales service. The first research empirically examines the importance of designing products for serviceability and derives a framework that links management practices, design for serviceability practices, and operational performance in after-sales service. The developed structural model was tested with structural equation modelling (SEM) and the results show strong empirical evidence for most hypothesized relationships. This first research demonstrates the strategic value of designing products for serviceability and guides top management in adopting the necessary management and design practices to support product service operational performance goals. The second research investigates the customer's perspective on product serviceability, including its impact on after-sales service cost and satisfaction/loyalty when experiencing service or repair on two products (automobiles and air-conditioners). Based on SEM results, this second research identified four serviceability-oriented dimensions: tangibles dimension of serviceability, assurance dimension of serviceability, responsiveness dimension of serviceability and after-sales service cost. Hypotheses were tested for both products and were found to be supported. As contributions to the product serviceability literature, after-sales service cost was found to act as a mediating variable by which customers viewed the product. Thus, these results provide insight to scholars and practitioners for strategizing after-sales service requirements during new product development and for offering customer-friendly practices in after-sales service. The third research investigates the influence of ownership cost on automobiles customers' perspective through maintenance, service and repair. SEM was also employed for examining the relationships between various constructs, including six different dimensions of product quality, ownership cost, customer satisfaction, and customer loyalty. Most of the hypotheses were supported, and the ownership cost factor was revealed as playing a significant role in enhancing customer loyalty. Thus, serviceability contributes in producing service-friendly products and also supports in achieving less after-sales service cost as well as low ownership cost for customers.			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4874 号	氏 名	Syahrial, Bin Erialdi
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 鈴木 秀男
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 松川 弘明
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 山田 秀
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 伊香賀 俊治
		Weber State University	Presidential Distinguished Professor Ph.D. in Engineering Shane J. Schvaneveldt
Bachelor of Engineering, Master of Science, Erialdi Bin Syahrial 君の学位請求論文は「The Impact of Serviceability on Service Operations Performance, Service Cost and Customer Satisfaction（保守サービス性がサービスオペレーションズパフォーマンス、サービスコストおよび顧客満足に及ぼす影響について）」と題し、全5章からなる。 製造企業は、提供する製品に対して、性能（performance）や機能（feature）だけでなく、使いやすさ、保守サービス性（serviceability、製品の交換・分解・修理のしやすさ）、環境に優しいこと（environmental-friendly）などの様々な要素に関する品質保証をすることが求められている。製品の差別化が難しい近年の状況において、保守サービス性は顧客満足/ロイヤルティ（継続購入など）を向上させる重要な要素であると期待されている。 本論文では、保守サービス性に焦点を当て、製造企業側の視点から保守サービス性実践のオペレーションズパフォーマンスに対する影響、顧客の視点から保守サービス性のサービスコスト（アフターサービスコストおよび所有コスト（ownership cost））への影響、さらに顧客満足/ロイヤルティへの影響を検証することを目的とし、日本企業・製品の保守サービス性に関する3つの実証研究を行っている。本論文は以下のように構成されている。 第1章は序論であり、本研究の背景および課題を明らかにし、論文の概要を説明している。 第2章は保守サービス性のための製品設計の重要性を検証するために企業を対象とした調査を行っている。マネジメント実践、保守サービス性のための製品設計実践およびオペレーションズパフォーマンスの関係性の仮説モデルが示されている。仮説モデルは構造方程式モデリング（SEM）により検証され、ほとんどの仮説が強く支持され、保守サービス性を考慮した製品設計に対する戦略的価値を示唆している。 第3章は、2つの製品（自動車およびエアコン）を対象にして、顧客の立場から、製品の保守サービス性の評価、アフターサービスコストおよび顧客満足/ロイヤルティへの影響を検証している。探索的因子分析により、保守サービス性の次元（有形性、確実性、反応性）およびアフターサービスコストの次元を抽出している。2つの製品において、SEMの結果に基づき、次元間の関係性の仮説モデルが検証され、支持されている。特に、アフターサービスコストは、保守サービス性と顧客満足/ロイヤルティの関係性に対して、媒介変数として機能することが示されている。 第4章は、自動車を対象に、顧客の立場から、保守サービス性を含む Garvin の品質次元（Garvin's Dimensions of Quality）が所有コスト、顧客満足および顧客ロイヤルティに及ぼす影響を検証している。SEMにより、ほとんどの関係性の仮説が支持された。その結果、保守サービス性の評価の向上が所有コストの減少に寄与し、さらに、所有者コストの減少が顧客ロイヤルティの向上に重要な役割を果たすことが示されている。 第5章は、本論文のまとめと今後の課題と展望について述べている。 以上要するに、本論文では、保守サービス性がサービスオペレーションズパフォーマンス、サービスコストおよび顧客満足/ロイヤルティに及ぼす影響について仮説モデルを構築し、日本企業・製品を対象に調査を行い、統計的アプローチにより検証を行った。保守サービス性に関する体系的な実証研究はまだ少なく、本論文の成果は保守サービス性に関する考え方の普及と発展に寄与するものと考えられる。 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。			

内容の要旨

報告番号	甲 第4875号	氏 名	友部 勝文
主論文題名： Interactions between water molecules and biological materials: a molecular dynamics study (分子動力学シミュレーションを用いた水分子と生体物質の相互作用の解明)			
本研究は、分子動力学（MD）シミュレーションを用いて水分子と生体物質の間に生じる多様な相互作用について包括的に調べた。人間の体の約7割は水で構成されていることから、ほとんど全ての生体物質は、水分子と相互作用を行いながらその機能を発現する。故に、水分子と生体物質の相互作用は、生体物質の安定性、機能発現、振る舞いを理解する上で極めて重要である。本研究は、多様な生体物質の中でも特に重要な物質であるタンパク質と糖に関して4つの研究を行った。一つ目は、プリオン病の原因タンパク質であるプリオンタンパク質に関する研究である。プリオン病は、変質したプリオンタンパク質が脳細胞表面に蓄積することで発症するとされており、変質過程を理解することは病理解明に重要である。私は、MDシミュレーションによって病理に関連する突然変異 T188R が構造水を不安定化させ、変質を促進する可能性があることを示した。二つ目は、網膜に存在し光受容体として機能するロドプシンを対象とする研究である。ロドプシン内部の構造水は、構造安定やレチナールとアミノ酸をつなぐシッフ結合切断時の加水分解など多くの機能に関わる。本研究は、活性・不活性状態のロドプシンの MDシミュレーションを行うことで、実験で示唆されていた細胞質側バルクと内部をつなぐ水経路を特定した。また、通過する水分子の軌跡を解析することで、経路構造を詳細に報告した。三つ目は、全ての糖関連物質の基礎構成要素である単糖に関する研究である。単糖は、ヒドロキシ基がエクソトリアルかアキシシャルかによって、多様な異性体を取ることが知られている。しかし、これら異性体変化が単糖の水和構造にどのように影響を与えるかはわかっていなかった。私は、6種類の異性体の単糖に関する MDシミュレーションを行い、異性体変化が水和構造に与える影響について調べた。また、単糖周りの特異な水和構造は異性体の変化に大きく影響を受けないこと、温度上昇あるいは濃度増加に伴ってこの構造が不安定になることを見出した。四つ目は、第一原理 MDシミュレーションを用いて、単糖周りの水和殻中に存在する水分子のスペクトル解析を行った。私は、単糖水溶液の第一原理 MDシミュレーションを行い、単糖水和殻中の水分子の振動スペクトルが高周波数側にシフト（ブルーシフト）していることを見つけた。また、詳細な構造解析を行うことで、ブルーシフトを発する水分子は、第一水和殻の外側に分布していることを見出した。以上の結果は、水分子と生体物質の相互作用についてまとめたものであり、これらの結果は物理化学、生物学の発展に貢献したといえる。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4875 号	氏 名	友部 勝文
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	慶應義塾大学教授	博士(工学)・TeknD 深淵 康二
		慶應義塾大学専任講師	Ph. D. 安藤 景太
		慶應義塾大学専任講師	博士(理学) 光武 亜代理
学士(工学)、修士(工学) 友部勝文君の学位請求論文は「Interactions between water molecules and biological materials: a molecular dynamics study (分子動力学シミュレーションを用いた水分子と生体物質の相互作用の解明)」と題し、7章から構成されている。 人間の体の約7割は水で構成されていることから、ほとんど全ての生体物質は、水分子と相互作用を行いながらその機能を発現している。よって、水分子と生体物質の相互作用は、生体物質の安定性、機能発現、振る舞いを理解する上で極めて重要である。本論文は、多様な生体物質の中でも特に重要な物質であるタンパク質と糖に関して水分子との相互作用に関する研究を行っている。 第1章では本論文の背景および目的、構成を、第2章では分子動力学(MD)シミュレーションの基礎理論を説明している。第3章から第6章に結果を示している。 第3章では、プリオン病の原因タンパク質であるプリオンタンパク質分子と水分子の相互作用について研究している。プリオン病は、変質したプリオンタンパク質が脳細胞表面に蓄積することで発症すると言われており、変質過程を理解することは病理解明に重要である。本章では、MDシミュレーションによって病理に関連する突然変異 T188R が構造水を不安定化させ、変質を促進する可能性があることを示している。 第4章では、網膜に存在し光受容体として機能するロドプシンと水分子の相互作用について研究を行っている。ロドプシン内部の構造水は、構造安定やレチナールとアミノ酸をつなぐシッフ結合切断時の加水分解など多くの機能に関わっている。本章では、活性・不活性状態のロドプシンのMDシミュレーションを行うことで、実験で示唆されていた細胞質側バルクと内部をつなぐ水経路を特定している。また、通過する水分子の軌跡を解析することで、詳細な経路構造を明らかにしている。 第5章では、全ての糖関連物質の基礎構成要素である単糖と水分子の相互作用について研究を行っている。単糖は、ヒドロキシ基がエクソトリカルかアキシシャルかによって、多様な異性体を取ることが知られている。しかし、これら異性体変化が単糖の水和構造にどのように影響を与えるかは明らかでなかった。本章では、6種類の異性体の単糖に関するMDシミュレーションを行い、異性体変化が水和構造に与える影響について調べている。また、単糖周りの特異的な水和構造は異性体の変化に大きく影響を受けないこと、温度上昇あるいは濃度増加に伴ってこの構造が不安定になることを見いだしている。 第6章では、第一原理MDシミュレーションを用いて、単糖周りの水和殻中に存在する水分子のスペクトル解析を行っている。従来の古典的なMDシミュレーションでは、水分子内の振動を扱う方法はほとんど用いられていなかった。本章では、水分子内の振動を適切に表現することができる電子状態を含む計算を行うことで単糖水溶液のシミュレーションを行い、単糖水和殻中の水分子の振動スペクトルを求め、それが高周波数側にシフト(ブルーシフト)していることを見いだしている。また、詳細な構造解析を行うことで、ブルーシフトを発する水分子は、第一水和殻の外側に分布していることを明らかにしている。さらに、ラマン散乱実験をおこない、水分子の振動スペクトルがブルーシフトすることを確認している。 最後に第7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、分子動力学シミュレーションを用いて水分子と生体物質の相互作用について解析を行った。その成果は、生体物質と水分子の関係明らかにするだけでなく、生体系における水分子を介したセンシング技術の発展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(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 4876 号	氏 名	横尾 望
主 論 文 題 名 :			
自動車用火花点火エンジンにおけるノッキング指標に関する研究			
地球温暖化に対応するために、自動車の燃費は大幅な低減が求められており、エンジンの熱効率向上が重要である。エンジンの熱効率に影響するノッキングは、燃料の着火特性によって発生時期が決まる。そこでノッキングの発生時期を予測する為には、エンジン諸元や運転条件から燃焼室内の圧力や未燃ガス温度の時間変化を明らかにしておくことや、燃料の化学反応を理解することが重要である。 そこで本研究では、実験と数値シミュレーションによる検討から、燃料の化学反応とノッキングの指標、及びエンジン運転時のノッキングの関係を明らかにして、エンジン運転条件毎に重みのこととなるノッキングの指標を化学反応から明確にすることを目的としている。 第 1 章は序論であり、エンジンと市販ガソリンの変遷、燃料組成とノッキング指標、ノッキング指標とエンジンの異常燃焼に関する既往の研究についてのまとめを行った上で、本研究の目的と構成について述べている。 第 2 章では、高圧縮比エンジンを用いてノッキング特性について実験を行い、エンジン圧縮比、エンジン回転速度、及び市販ガソリンのノッキング指標である RON の違いが、エンジン燃焼室筒内の圧力と未燃ガス温度の時間変化に対して与える影響を明確にし、ノッキングの発生時期への影響を考察している。 第 3 章では、第 2 章で行なったエンジン実験により得られたエンジン燃焼室内の圧力と未燃ガス温度の時間変化、及び、燃料の RON の違いによるノッキング発生時期の変化について、0 次元の詳細反応計算を用いて解析し、それぞれの因子が混合気の化学反応に与える影響を明らかにしている。また、詳細反応計算から初期温度を推定することでノッキングの発生時期付近の反応特性について検討を加えている。 第 4 章では、市販ガソリンのサロゲート燃料と PRF の詳細反応計算の比較から、RON と MON の計測条件で生じている化学反応の違いを考察している。またエンジン実験結果についても同様の計算を行うことで、過給ダウンサイズエンジンのノッキングが同じ RON であれば MON は低いほうが良いという事象に対しても、化学反応での説明を可能にしている。さらに市販ガソリンのサロゲート燃料と PRF の着火遅れ時間の p-T マップを作成して比較をすることで、ノッキングに対する RON 以外の指標が影響する p-T 領域を簡易的に推定している。この p-T マップを用いることで詳細反応計算の結果をエンジン開発者が活用しやすいツールに変換することが可能となると考える。 第 5 章では、エンジン開発においてノッキングの発生時期の予測に多用される Livengood-Wu 積分を用いる際の課題について、燃焼室筒内の圧力と未燃ガス温度の時間変化、及び着火遅れ時間の特性に着目して検討を行っている。その結果として、Livengood-Wu 積分を用いたノッキング発生時期の予測には、温度の正確な推定と着火遅れ時間の適切な推定が重要であることを明らかにしている。 第 6 章では、全体を総括し、本論文の結論を述べている。 以上の成果は、エンジンのノッキングと燃料の化学反応を結び付けており、将来の燃料の方向性を検討する際に重要な知見と考える。成果の活用により、燃料を活用した高効率エンジンの開発が進み、将来のモビリティ社会がより便利で豊かなものとなることが期待されている。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4876 号	氏 名	横尾 望
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士 植田 利久
	副査	慶應義塾大学教授	博士(工学) 横森 剛
		慶應義塾大学特任教授	工学博士 飯田 訓正
		東京工業大学教授	工学博士 小酒 英範
学士(工学), 修士(工学), 横尾望君提出の学位請求論文は「自動車用火花点火エンジンにおけるノッキング指標に関する研究」と題し, 6章からなる. 交通システムは現代社会を構築する重要な社会インフラのひとつとなっている. そのなかで, 自動車は個々の移動から長距離の物流まで, 幅広く重要な役割を演じている. その動力源としてもっとも広く用いられているものが内燃機関である. 近年, 動力源として, 蓄電池, 燃料電池などの開発が急速な勢いで進められており, 動力源の多様化が進んでいる. 電力インフラが整備されている都市部などでは蓄電池が普及すると思われるが, 郊外, 都市間などにおいては, 自立的に動力を供給することのできる内燃機関の果たす役割は大きく, その性能向上は重要である. 本研究は, 内燃機関の性能に重要な役割を演じるノッキングについて, 将来の燃料の多様化を視野に, 実験, 数値シミュレーション手法を用いて検討を加え, 燃料の多様性に対応できるノッキングに関する指標を構築するための基礎学理について検討を加えたものである. 第1章は序論であり, 本研究が対象とするガソリンエンジンの変遷, その熱効率に対するノッキングの影響, ガソリン燃料の組成がノッキングに与える影響, ノッキング指標である RON や MON に関する既往の研究についてまとめ, 本研究の目的と構成について述べている. 第2章では, 高圧縮比エンジンにおけるノッキング特性について実験を行い, エンジン圧縮比, エンジン回転速度, 及び, 市販ガソリンのノッキング指標であるRONの違いが, エンジン燃焼室筒内の圧力と未燃ガス温度の時間変化に対して与える影響を明確にし, ノッキングの発生時期への影響を考察している. 第3章では, 第2章で行なったエンジン実験により得られたエンジン燃焼室筒内の圧力と未燃ガス温度の時間変化, 及び, 燃料のRONの違いによるノッキング発生時期の変化について, 0次元の詳細反応計算を用いて解析し, それぞれの因子が混合気の化学反応に与える影響を明らかにしている. また, 詳細反応計算から初期温度を推定することでノッキングの発生時期付近の反応特性について検討を加えている. 第4章では, RONの計測における標準燃料 (PRF) と市販ガソリンを模擬したサロゲートガソリンについて, 着火遅れ時間のp-Tマップを作成, 比較をすることで, 混合気の自己着火特性に対するRON以外の指標が影響するp-T領域を簡易的に推定している. この推定手法を用いることで, 過給ダウンサイズエンジンのノッキングや, 高速プレイグなど, RON以外の指標が影響すると考えられてきた条件においても, 詳細反応計算の結果が同様の傾向を示すことを確認している. 第5章では, ガソリンエンジン開発の中でノッキングの発生時期の予測に多用されるLivengood-Wu積分を用いる際の課題について, 混合気の温度と圧力の時間変化と着火遅れ時間の特性に着目して検討を行っている. その結果, Livengood-Wu積分を用いたノッキング発生時期の予測には温度の正確な推定と着火遅れ時間の適切な推定が重要であることを明らかにしている. 第6章では, 全体を総括し, 本論文の結論を述べている. 以上要するに, 本研究はガソリンエンジンを対象に, エンジン性能に大きな影響を及ぼすノッキングを定量的に評価, 予測することを目指して, ノッキングの特性を実験的, 数値シミュレーションにより検討を加え, 詳細化学反応計算を活用し燃料の違いや混合気の化学反応の違いを考慮した, 燃料の多様性に対応できる指標を構築するための基礎学理を明らかにしたものであり, 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4877号	氏 名	森島 信
主論文題名：			
構造型ストレージ向け複数GPU間分散キャッシュの研究			
近年の情報通信技術やセンシング技術の発展によって生成されるようになった多様な情報を効率的に保存、管理するためのシステムとして、特定用途に特化しており、高い拡張性とスループットを持つ構造型ストレージが広く用いられている。構造型ストレージは取り扱うデータの種類や用途に合わせて様々な実装が提案されているが、データ構造によって、KVS(Key-Value Store)型、ドキュメント指向型、グラフ型の3つに分類できる。構造型ストレージでは、ドキュメント指向型の正規表現探索やグラフ型のグラフ探索といった特に計算量の大きいクエリを中心にボトルネックとなる。これらの処理は並列化可能であり、近年並列処理性能の向上が著しいGPUを用いることで高速化できる。しかし、構造型ストレージは、データ構造がGPUで処理することを考慮されておらず、そのままGPUを用いて高速化するのは困難である。そこで本論文では、ドキュメント指向型、グラフ型それぞれの構造型ストレージに対して、メモリ利用効率が良く、GPU処理に適したデータ構造のキャッシュを提案する。このキャッシュに対して正規表現探索やグラフ探索処理を行うことで、各システムの枠組みを維持しつつ、ドキュメント指向型、グラフ型ストアの高速化を達成した。GPUを用いたキャッシュ手法の問題点として、GPUのデバイスメモリによる制約があげられる。GPUのメモリ容量は、ホストメモリよりも小さく、GPUのメモリ容量を超える量のデータを扱う場合には、複数回に分けてGPUへ転送、計算を繰り返さなければならず、高速化率が大幅に減少する。この問題点を解決するために、本論文では、提案するキャッシュ機構を10GbEで遠隔接続された複数のGPUへ拡張し、より多くのGPUによる分散キャッシュとすることで、GPUのメモリ容量を超える量のデータにも対応可能にする。この際、グラフの非同期更新とドキュメントのハッシュを用いた分散によって転送と計算の重複実行をすることを提案し、転送遅延による性能低下を抑えつつ、遠隔GPUへの分散キャッシュの拡張を可能にする。 評価では、各種構造型ストレージと本提案手法の3台の遠隔GPUによるキャッシュとの性能比較を行った。ドキュメント指向型の評価では、文字列の正規表現探索をドキュメント1件あたり128文字、1千万件のドキュメントに対して実行し、提案手法はドキュメント指向型ストアに対して75.0倍のスループットを達成した。また、グラフ型の評価では、単一起点最短経路問題を頂点数320万、次数100のグラフに対して実行した際、提案手法はグラフ型ストアに対して383.2倍のスループットを達成し、本提案手法により構造型ストレージを大幅に高速化できることを示した。これらの評価では、正規表現探索に関してはクエリ実行中のGPU間同期が発生しないため、GPU数の増加による並列度の増加に伴ってスループットが向上した。グラフ探索では、クエリ中に同期が発生するため、単純にGPU数を増やしただけでは性能向上を見込めないが、本論文では、同期オーバーヘッドを削減する手法を提案することで、GPUを複数用いた場合のスループットの向上を達成した。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4877 号	氏 名	森島 信
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士(工学) 松谷 宏紀
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 天野 英晴
		慶應義塾大学准教授	博士(工学) 遠山 元道
		筑波大学大学院准教授	博士(工学) 川島 英之
		日本電気株式会社主幹研究員	博士(工学) 吉川 隆士
学士(工学)、修士(工学) 森島信君提出の学位請求論文は、「構造型ストレージ向け複数 GPU 間分散キャッシュの研究」と題し、7 章で構成されている。 情報通信技術やセンシング技術の発展によって、日々大量のデータが生成され、利活用されるようになった。このような大規模データの利活用を促進するには、大規模データを効率的に保存、管理、検索できるようにする必要がある。このために本論文では次の 2 点に着目している。1 点目は取り扱うデータの種類や用途に合ったデータストア（構造型ストレージ）を使うこと、2 点目は計算の高効率化のために取り扱うクエリに適した計算機アクセラレータを使用することである。実際、取り扱うデータの種類や用途毎に様々な構造型ストレージの実装が存在し、そのデータ構造によって KVS（Key-Value Store）型、ドキュメント指向型、グラフ型に分類される。とくにドキュメント指向型の正規表現探索やグラフ型のグラフ探索といった計算量の大きいクエリを中心に性能のボトルネックとなる。これらの処理は並列化可能であるため、アクセラレータとして近年並列処理性能の向上が著しい GPU（Graphics Processing Unit）を用いることで高速化できる。しかし、構造型ストレージのデータ構造は GPU で処理することを考慮されておらず、そのまま GPU を用いて高速化することは難しい。さらに、GPU のデバイスメモリ容量の制約もある。GPU のメモリ容量は、ホストメモリよりも小さく、GPU のメモリ容量を超える量のデータを扱う場合には、複数回に分けて GPU へ転送、計算を繰り返さなければならず、高速化率が大幅に減少する。これらの問題を解決するために、本論文では、ドキュメント指向型、グラフ型それぞれの構造型ストレージに対して、メモリ利用効率が良く、GPU 処理に適したデータ構造のキャッシュを提案している。そのうえで提案するキャッシュ機構を 10GbE（10Gbit Ethernet）で遠隔接続された複数個の GPU へ拡張し、より多くの GPU による分散キャッシュとすることで、単一 GPU のメモリ容量を超える量のデータにも対応可能にしている。本論文はこれらの提案手法の設計と実装、および、評価結果をまとめたものである。 具体的には 1 章では本論文の背景や研究目的を述べ、2 章では関連研究として各種構造型ストレージ、GPU、遠隔 GPU 接続について調査している。3 章と 4 章は上記の提案手法を述べている。このうち 3 章ではドキュメント指向型ストアを対象とし、提案キャッシュを用いて正規表現探索を行うことでそのクエリ性能を改善している。また、複数 GPU 環境向けにはドキュメントのハッシュを用いた分散手法を提案している。4 章ではグラフ型ストアを対象とし、提案キャッシュを用いてグラフ探索処理を行うことでそのクエリ性能を改善している。複数 GPU 環境向けにはグラフの非同期更新、および、データ転送と計算の重複実行方式を提案し、転送遅延による性能低下を抑えつつ、遠隔 GPU への分散キャッシュの拡張を可能にしている。5 章では提案手法を KVS 型に応用している。ここまでは提案手法を単体の構造型ストレージに適用する方法を述べてきたが、6 章では複数種類の構造型ストレージが混在した環境に提案手法を適用するための方策を提示している。最後に 7 章では本論文によって得られた成果と結論をまとめている。 以上、要約すると、森島君の博士論文は、いくつかの種類の構造型ストレージを複数個の GPU を用いて高速化するうえで重要となるいくつかの問題を解決し、その実用化に貢献した点で、工業上、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 4878 号	氏 名	加茂野 有徳
主 論 文 題 名 :			
脳卒中片麻痺者における歩行再獲得過程の生体力学的解析			
脳卒中による後遺症の代表的な症状として、一側性にみられる上下肢の運動麻痺による歩行障害がある。こうした脳卒中片麻痺者（以下、片麻痺者）の自立歩行能力を、効果的なリハビリテーションにより再獲得させることは、患者の QOL（生活の質）向上させる上で極めて重要な問題である。 片麻痺者の歩行再獲得を効果的に支援する歩行リハビリテーションを実現するためには、片麻痺者の運動能力と二足歩行戦略が、回復過程においてどのように変化することで、歩行能力の向上が計られているかを詳細に明らかにする必要がある。しかし、片麻痺者の歩行運動の回復過程を追跡することは、症例の多様性や計測の制約から非常に困難であり、いままで必ずしも十分明らかにされてこなかった。そこで本研究では、回復期リハビリテーション病棟入院中の片麻痺者を対象として、歩行の再獲得過程を生体力学的に分析し、片麻痺者の運動能力と二足歩行戦略が、回復過程においてどのように変化することで、歩行能力の向上が達成されているのかを明らかにすることを目的とした。特に本研究では、片麻痺者における歩行能力の向上は、麻痺側への体重移動能力の向上と、非麻痺側における適切な代償動作の獲得が重要であると考え、生体力学的歩行分析に基づく検証を行った。 まず、回復期リハビリテーション病棟入院中の片麻痺者の歩行を、モーションキャプチャシステムと床反力計を用いて縦断的に計測・分析し、回復過程における歩行能力と麻痺側への体重移動能力の変化を分析した。その結果、静止立位時における麻痺側への体重移動能力が、歩行速度と有意に相関することを示した。また麻痺側への体重移動能力の向上を、片麻痺者は体幹の側屈運動により実現していることを明らかにした。 次に、片麻痺者の二足歩行の生体力学的分析に必要不可欠な、計測杖の開発と評価を行った。具体的には、3 軸力覚センサを先端に固定した計測杖を製作し、杖に作用する床反力とその力の作用点を計測することで、合力として計測される非麻痺側と杖に作用する反力を分離する手法を提案し、その精度検証を行った。その結果、杖歩行の力学解析に十分な精度を有し、提案した解析システムの有効性を示した。 上述の計測杖を用いて、片麻痺者の歩行運動の 3 次元計測と逆動力学的解析を行い、回復過程の前後における歩行中の下肢関節モーメントの変化を調べた。その結果、リハビリテーションにおける歩行速度の増大に伴い、麻痺側の股関節および膝関節のモーメントと、非麻痺側の股関節外旋モーメントが大きくなることを明らかにし、非麻痺側の適切な代償動作の獲得が、歩行能力の向上に重要であることが示唆された。 本結果を踏まえて、片麻痺者の歩行再獲得を促進する効果的なリハビリテーションに向けた方法論を提案した。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4878 号	氏 名	加茂野 有徳
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士(工学) 荻原 直道
	副査	慶應義塾大学准教授	博士(工学) 竹村 研治郎
		慶應義塾大学教授	博士(工学) 杉浦 壽彦
		慶應義塾大学特任准教授	博士(医学) 名倉 武雄
学士（工学，理学療法学），修士（工学），加茂野有徳君提出の学位請求論文は「脳卒中片麻痺者における歩行再獲得過程の生体力学的解析」と題し，本論 6 章により構成されている。 脳卒中による後遺症の代表的な症状として，一側性にみられる上下肢の運動麻痺による歩行障害がある．こうした脳卒中片麻痺者の自立歩行能力を，効果的なリハビリテーションにより再獲得させることは，QOL（生活の質）を向上させる上で極めて重要な問題である． 片麻痺者の歩行再獲得を，効果的に支援する歩行リハビリテーションを実現するためには，片麻痺者の運動能力と二足歩行戦略が，回復過程においてどのように変化することで，歩行能力の向上が計られているかを詳細に明らかにする必要がある．しかし，片麻痺者の歩行運動の回復過程を追跡することは，症例の多様性や計測の制約から非常に困難であり，片麻痺者の回復過程における二足歩行メカニズムの変化は，いままで必ずしも十分明らかにされてこなかった．このため本論文は，回復期リハビリテーション病棟入院中の片麻痺者を対象として，歩行の再獲得過程を生体力学的に分析し，片麻痺者の運動能力と二足歩行戦略が，回復過程においてどのように変化することで，歩行能力の向上が達成されているのかを明らかにすることを目的としている．各章の内容は以下の通りである． 第 1 章は序論であり，研究の背景，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，回復期リハビリテーション病棟入院中の片麻痺者の歩行を，モーションキャプチャシステムと床反力計を用いて縦断的に計測・分析し，回復過程における歩行能力と麻痺側への体重移動能力の変化を分析している．その結果，立位での麻痺側への体重移動能力が，歩行速度と有意に相関することを明らかにした．また，麻痺側への体重移動能力の向上を，片麻痺者は，体幹の側屈運動により実現していることを示した． 第 3 章では，片麻痺者の二足歩行の生体力学的分析に必要な不可欠な，3 軸力覚センサを先端に固定した計測杖を製作している．また，杖に作用する床反力とその力の作用点を計測することで，合力として計測される健側と杖に作用する反力を分離する手法を提案し，杖歩行の動力学解析に十分な精度を有していることを確認し，提案した解析システムの有効性を示している． 第 4 章では，上述の計測杖を用いて，片麻痺者の歩行運動の 3 次元計測と逆動力学的解析を行い，回復過程の前後における歩行中の下肢関節モーメントの変化を明らかにしている．具体的には，リハビリテーションによる歩行速度の増大に伴い，麻痺側の股関節および膝関節モーメントと，健側の股関節外旋モーメントが大きくなることを明らかにし，健側の適切な代償動作の獲得が，歩行能力の向上に重要であることを示している． 第 5 章は総合考察であり，各章で得られた知見を整理し，脳卒中片麻痺者における歩行再獲得過程の生体力学的メカニズムを考察している．また，本結果を踏まえて，片麻痺者の歩行再獲得を促進する効果的なリハビリテーションに向けた方法論を検討している．さらに，今後の課題と展望を述べている． 第 6 章は結論であり，本論文の結果の総括を述べている． 以上のように，本論文は脳卒中片麻痺者における歩行再獲得過程の生体力学的機序を明らかにしたものであり，歩行のリハビリテーションに関わる医工学分野において，工学上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．			

内容の要旨

報告番号	甲 第 4879 号	氏 名	森野 佐芳梨
主論文題名：			
慣性センサを用いた妊娠期腰背部痛改善のための動作および筋活動の評価法			
現在本邦において周産期の安寧保証への取り組みがなされる中、妊娠期腰背部痛が問題視されている．特に妊娠期は胎児への影響が危惧され、動作様式の変更による身体負荷軽減といった非侵襲的な疼痛改善アプローチが求められる．しかし、現状の臨床現場では、限られた施術環境でセラピストが目視で動作を評価するため結果の信頼性が疑問視される．また、疼痛改善には筋負荷評価も必要だが、手技の煩雑さから直接的な評価が難しい．特に妊娠期は、姿勢と関節の安定性低下により関節安定化機構である拮抗筋の同時収縮が体幹部にて生じ、腰背部筋負荷が増加する可能性を考慮する必要がある． 本論文では、臨床応用を視野に入れ、妊娠期腰背部痛の因子となりうる動作を明らかにした上で、使用環境制限が少ない慣性センサ (IMU: Inertial measurement unit) を用いて腰背部痛有訴妊婦特有の動作を調査する．さらに、筋骨格モデルの限界とされていた拮抗筋の同時収縮を考慮した筋活動推定手法を提案し、腰背部痛有訴妊婦特有の動作における筋活動評価を行う．これにより、筋電計を用いず IMU のみでの動作計測と筋活動の両者の評価法を提案する． 第 1 章では、本論文の背景と目的について述べた． 第 2 章では、妊婦 275 名を対象とし、縦断的に行う前向きコホート研究により、自由記述式質問で誘導的質問バイアスを抑えた統計解析手法を用いて、妊娠中の腰背部痛誘発動作を調査した．これにより、妊娠期腰背部痛には身体負荷の大きい動作よりもむしろ日常生活動作、特に椅子からの立ち上がりが影響することが示唆された． 第 3 章では、妊婦の体幹部に装着した IMU から得られた角速度データを用いて、椅子からの立ち上がりにおける動作特性を示す指標を提案した．同時に、妊娠期の特徴である体型変化を反映した指標も提案し、妊婦を対象とした運動計測実験により、立ち上がり時のピッチ角の体幹屈曲伸展動作および妊娠期の体重増加量を反映した指標により腰背部痛有訴妊婦の動作特徴を同定できることを確認した． 第 4 章では、妊婦の動作時の筋活動を推定するため、妊娠期の体重増加と体重心位置変化を表現した妊婦筋骨格モデルを構成した．さらに、腰背部痛の原因となる脊柱起立筋とその拮抗筋にあたる腹直筋に着目し、筋トルク推定モデルのパラメータを Genetic Algorithm (GA) にて決定する、拮抗筋の同時収縮を考慮した筋トルク推定手法を提案した． 第 5 章では、第 3 章で示した腰背部痛有訴妊婦の動作特徴における、腰背部の筋活動状況を第 4 章で提案したモデルを用いて推定した．これにより、提案した評価指標のうち体幹ピッチ角の前後傾斜の大きさと筋活動の大きさ、筋活動の大きさと腰背部痛の程度のそれぞれに正の相関関係を認めた．これより、IMU を用いることで、腰背部痛誘発の可能性のある体幹の動作特性および腰背部の筋活動も評価できることを確認した． 最後に第 6 章では、本論文の結論を述べた．			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4879 号	氏 名	森野 佐芳梨
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授 博士(工学)	高橋 正樹
	副査	慶應義塾大学教授 博士(情報学)	小檜山 雅之
		慶應義塾大学教授 博士(工学)	荻原 直道
		京都大学准教授 医学博士	青山 朋樹
学士（保健学）・修士（人間健康科学）森野佐芳梨君提出の学位論文は「慣性センサを用いた妊娠期腰背部痛改善のための動作および筋活動の評価法」と題し、全6章から構成される。 現在本邦において周産期の安寧保証への取り組みがなされる中、妊娠期腰背部痛が問題視されている。特に妊娠期は胎児への影響が危惧され、動作様式の変更による身体負荷軽減といった非侵襲的な疼痛改善アプローチが求められている。しかし、現状の臨床現場では、限られた施術環境でセラピストが目視で動作を評価するため結果の信頼性が疑問視されている。また、疼痛改善には筋負荷評価も必要であるが、手技の煩雑さから直接的な評価が難しい。特に妊娠期は、姿勢と関節の安定性低下により関節安定化機構である拮抗筋の同時収縮が体幹部にて生じ、腰背部筋負荷が増加する可能性を考慮する必要がある。 本論文では、臨床応用を視野に入れ、妊娠期腰背部痛の因子となりうる動作を明らかにした上で、使用環境制限が少ない慣性センサ (IMU: Inertial measurement unit) を用いて腰背部痛有訴妊婦特有の動作を調査している。さらに、筋骨格モデルの限界とされていた拮抗筋の同時収縮を考慮した筋活動推定手法を提案し、腰背部痛有訴妊婦特有の動作における筋活動を評価している。これにより、筋電計を用いず IMU のみでの動作計測と筋負荷の両者の評価法を提案している。 第1章では、本論文の背景と目的について述べている。 第2章では、妊婦 274 名を対象とし、縦断的に行う前向きコホート研究により、自由記述式質問で誘導的質問バイアスを抑えた統計解析手法を用いて、妊娠中の腰背部痛誘発動作を調査している。これにより、妊娠期腰背部痛には身体負荷の大きい動作よりもむしろ日常生活動作、特に椅子からの立ち上がりが影響することを示唆している。 第3章では、妊婦の体幹部に装着した IMU から得られた角速度データを用いて、椅子からの立ち上がりにおける動作特徴を示す指標を提案している。同時に、妊娠期の特徴である体型変化を反映した指標も提案し、妊婦を対象とした運動計測実験により、立ち上がり時のピッチ方向の体幹屈曲伸展動作および妊娠期の体重増加量を反映した指標により腰背部痛有訴妊婦の動作特徴を同定できることを確認している。 第4章では、妊婦の動作時の筋活動を推定するため、妊娠期の体重増加と体重心位置変化を表現した妊婦筋骨格モデルを構成している。さらに、腰背部痛の原因となる脊柱起立筋とその拮抗筋にあたる腹直筋に着目し、筋トルク推定モデルのパラメータを Genetic Algorithm (GA)にて決定する、拮抗筋の同時収縮を考慮した筋トルク推定手法を提案している。 第5章では、第3章で示した腰背部痛有訴妊婦の動作特徴における、腰背部の筋活動状況を第4章で提案したモデルを用いて推定している。これにより、提案した評価指標のうち体幹ピッチ方向の前後傾斜の大きさと筋活動の大きさ、筋活動の大きさと腰背部痛の程度のそれぞれに正の相関関係を確認している。これより、IMU を用いることで、腰背部痛誘発の可能性のある体幹の動作特性および腰背部の筋活動も評価できることを確認している。 第6章では、以上の内容をまとめ、本論文の結論を述べ、最後に今後必要な検討課題について挙げている。 以上のように、本論文は、慣性センサを用いた妊娠期腰背部痛改善のための動作および筋活動の評価法を提案している。その成果は医療・福祉、リハビリテーション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4880号	氏 名	湯原 大輔
主論文題名：			
分子動力学シミュレーションを用いたメタンハイドレートの 核生成，結晶成長，相平衡の解析			
クラスレート水和物とは，水分子が水素結合により作るかご状の構造の中に，メタンなどの分子が閉じ込められることで形成される結晶状の固体である．クラスレート水和物は，新たなエネルギー・環境問題の解決に可能性を秘めた物質であり，様々な応用が期待されている．本研究ではメタンハイドレートに注目し，核生成過程，結晶成長過程，相平衡状態について分子動力学(MD)シミュレーションを用いて解析した． 最初に，200回の核生成シミュレーションを行い，核生成速度と臨界核サイズを求めた．解析にはmean first-passage time(MFPT)法及びsurvival probability(SP)法を用いた．両手法から得られた核生成速度は共に良く一致し，先行研究とも良く一致した．一方，MFPT法により求めた臨界核サイズについては先行研究よりも大きな値が得られた．これは本モデルに用いられている近似に起因すると考えられるが，おおよその臨界核サイズを概算するには十分な精度であると考えられる．本解析により，上記手法がメタンハイドレートのような複雑な構造の核生成過程の解析に有用であることがわかった． 次に，水/メタン界面付近でのメタンハイドレートの結晶成長シミュレーションを行い，成長メカニズムの解析を行った．メタン分子がハイドレートのケージに取り込まれるとその挙動が制限されることに注目し，そこから結晶成長過程を解析した．その結果，結晶成長過程はメタン分子が結晶核上に吸着し，その周りにケージ構造が形成されることで進行することがわかった．また，界面付近の結晶成長速度が他の場所に比べて速いことを明らかにし，界面に沿う方向へ成長が進行していくという実験的事実に分子論的な解釈を与えることに成功した． 最後に，水/メタン/メタンハイドレート共存系において温度・体積一定(NVT)シミュレーションを行い，三相平衡条件を求めた．ハイドレートの崩壊あるいは成長に伴う系内の圧力及びポテンシャルエネルギーの変化を観測し，ある温度での平衡圧力を求めることに成功した．本研究で得られた平衡圧力は，先行研究で温度・圧力一定(NPT)シミュレーションで求められたものよりも高い値となった．この結果の違いは，本研究では先行研究と比較して長い計算時間，大きな計算系を用いたこと，界面張力の効果を考慮した圧力計算を行ったことに起因していると考えられる．特に，NPTシミュレーションでは界面張力の効果を無視して圧力制御を行っていることより，圧力計算方法の違いが最も影響したのではないかと考えられる．本研究で用いたNVTシミュレーションは，系内の圧力が計算中に自動的に変化するため，NPTシミュレーションよりも少ない計算量で平衡条件を見つけることが可能となる．また，界面張力を考慮しながら圧力を計算できるため，様々な多相共存系において相平衡条件を求める際に有用であると考えられる．			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4880 号	氏 名	湯原 大輔
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. 安藤 景太
		慶應義塾大学教授	博士(工学) 大村 亮
		慶應義塾大学教授	理学博士 高野 宏
学士(工学), 修士(工学) 湯原大輔君の学位請求論文は「分子動力学シミュレーションを用いたメタンハイドレート核生成, 結晶成長, 相平衡の解析」と題し, 6 章から構成されている。 クラスレート水和物とは, 水分子が水素結合により作るかご状の構造の中に, メタンなどの分子が閉じ込められることで形成される結晶状の固体である。クラスレート水和物は, 新たなエネルギー・環境問題の解決に可能性を秘めた物質であり, 様々な応用が期待されている。本論文ではメタンハイドレートに注目し, 核生成過程, 結晶成長過程, 相平衡状態について分子動力学シミュレーションを用いて解析している。 第 1 章では本論文の背景および目的, 構成を, 第 2 章では分子動力学シミュレーションの基礎理論を説明している。第 3 章から第 5 章に結果を示している。 第 3 章では, 非平衡分子動力学シミュレーションの結果を解析し, 核生成速度と臨界核サイズを求めている。解析には, これまで気相からの液滴核生成等のシミュレーションの解析に用いられてきた mean first-passage time (MFPT) 法及び液相からの気泡核生成等のシミュレーションの解析に用いられてきた survival probability (SP) 法を用いている。両手法から得られた核生成速度は良く一致し, クラスターの自由エネルギーを別に膨大な計算からも求めた先行研究とも良く一致している。一方, MFPT 法により求めた臨界核サイズについては, 先行研究よりも少し大きな値が得られている。これは MFPT 法で使用したモデルに用いられている近似に起因すると考えており, おおよその臨界核サイズを概算するには十分な精度であると結論付けている。本解析により, 分子動力学シミュレーションで得られるデータを直接解析する上記手法が, メタンハイドレートのような複雑な構造の核生成過程の解析に有用であることを示している。 第 4 章では, 水/メタン界面付近でのメタンハイドレートの結晶成長シミュレーションを行い, 成長メカニズムの解析を行っている。メタン分子がハイドレートのケージに取り込まれるとその挙動が制限されることに注目し, 結晶成長過程を解析している。その結果, 結晶成長過程はメタン分子が結晶核上に吸着し, その周りにケージ構造が形成することで結晶成長が進行することを得ている。また, 界面付近の結晶成長速度が他の場所に比べて速いことを明らかにし, 界面に沿う方向へ成長が進行していくという実験的事実に分子論的な解釈を与えている。 第 5 章では, 水/メタン/メタンハイドレート共存系において温度・体積一定 (NVT) シミュレーションを行い, 三相平衡条件を求めている。ハイドレートの崩壊あるいは成長に伴う系内の圧力及びポテンシャルエネルギーの変化を観測し, 285 K~300 K の 4 種類の温度で平衡圧力を求めることに成功している。本論文で得られた平衡圧力は, 先行研究で温度・圧力一定 (NPT) シミュレーションで求められた結果よりも高い値となっている。この結果の違いは, 本論文では先行研究と比較して長い計算時間, 大きな計算系を用いていること, 界面張力の効果を考慮した圧力計算を行ったことに起因していると考えている。特に, NPT シミュレーションでは界面張力の効果を無視した圧力制御を行っており, 圧力計算方法による影響が大きいと結論付けている。本論文で用いた NVT シミュレーションは, 系内の圧力が計算中に自動的に変化するため, NPT シミュレーションよりも少ない計算量で平衡条件を計算することが可能であり, 界面張力を考慮して計算できることから様々な多相共存系において相平衡条件を求める方法として有用であることを見いだしている。 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, 分子動力学シミュレーションを用いてメタンハイドレート核生成, 結晶成長, 相平衡について解析を行った。その成果は, クラスレート水和物の基礎的な理解を進めるだけでなく, 工学分野において重要な相平衡, 相変化現象の理解に寄与するところが少ない。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4881号	氏 名	小西 隆介
主論文題名： Research on Optimal Facility Investment in Electric Power Systems Considering Uncertainties (電力システムにおける不確実性を考慮した最適設備投資に関する研究)			
近年の電力系統や電力市場では、再生可能エネルギー (Renewable Energy, RE) の導入や、需要家側への系統安定化行動を促進する枠組であるデマンドレスポンス (Demand Response, DR) 等の導入により不確実性が増大しつつあり、それにより需要に対する供給不足・過剰の双方を意味するインバランスの発生とそれによる電力システムへの悪影響が懸念されている。 そこで本論文では、インバランス解消の手段として蓄電池等のエネルギー貯蔵装置 (Energy Storage System, ESS) を扱い、不確実性下での ESS 等の設備投資を最適化する研究を行う。これを達成するために、電力システムでの不確実性下での設備投資問題を定式化し解くための一般理論である、Slow/Fast ESS 理論 (Slow/Fast ESS Theory, SFET) を提案した。具体的には、確率論的評価指標とその低減項を用いて、絶対供給量の不足・過剰によるインバランスと、不確実性成分による急峻な変動によって発生するインバランスを区別した。さらに、前者を削減する ESS を Slow ESS、後者を削減する ESS を Fast ESS と定義し、2つの ESS の異なる特性を利用することで諸問題に適用可能であることを示した。 第1章では本論文の背景と関連研究、目的について述べた。 第2章では、SFET の適用先である電力系統における設備配置問題と電力市場における電力調達問題の定式化と、確率的評価指標の定式化を行った。さらに SFET およびその応用可能性について述べた。 第3章では系統における送電線故障による絶対供給量の不足・過剰と、RE 出力の変動による急峻なインバランスの双方を SFET によって考慮しつつ、最適な設備配置を求めた。その結果、送電線故障によって系統から断絶される場所に Slow ESS が多く導入されるという特徴が見られ、SFET の有用性を確認した。 第4章では DR の導入による絶対供給量の不足・過剰の解消と急峻な変動成分の増大というトレードオフの問題を SFET によって定式化し、ESS 導入量を含む設備投資費が最小となる DR の最適導入率を求めた。また、得られた DR 導入率のもとで Slow, Fast ESS の合計導入量が最小となったことを確認した。 第5章では電力小売事業者の電力調達コスト最小化問題において SFET を適用した。具体的には、1日前市場内 (Day-ahead Market, DAM) での裁定取引とリアルタイム市場 (Real-time Market) における取引量の低減という ESS の2つの活用方法を SFET によって定式化し、それぞれに対して最適な ESS 導入量を求めた。実際に、DAM 価格が高い場合には Slow ESS が、RTM 価格が高い場合には Fast ESS がそれぞれ導入され、適切に充放電を行うことで調達コストを最小化していることを確認した。 第6章では本論文の結論を述べた。			

論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4881 号	氏 名	小西 隆介
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授 博士(工学)	高橋 正樹
	副査	慶應義塾大学教授 博士(工学)	大森 浩充
		慶應義塾大学教授 Ph. D.	小國 健二
		The university of Tennessee Professor Ph.D.	Li Fangxing
学士(工学)・修士(工学) 小西隆介君提出の学位論文は「Research on Optimal Facility Investment in Electric Power Systems Considering Uncertainties (電力システムにおける不確実性を考慮した最適設備投資に関する研究)」と題し、全 6 章から構成される。 近年の電力系統や電力市場では、再生可能エネルギー (Renewable Energy, RE) の導入や、需要家側への系統安定化行動を促進する枠組であるデマンドレスポンス (Demand Response, DR) 等の導入により不確実性が増大しつつあり、それにより需要に対する供給不足・過剰の双方を意味するインバランスが発生することが懸念されている。 本論文ではインバランス解消の手段として蓄電池等のエネルギー貯蔵装置 (Energy Storage System, ESS) を扱い、不確実性下での ESS 等の設備投資を最適化する研究を行っている。これを達成するために、電力システムでの不確実性下での設備投資問題を定式化し解くための一般理論である、Slow/Fast ESS 理論 (Slow/Fast ESS Theory, SFET) を提案している。具体的には、確率論的評価指標とその低減項を用いて、絶対供給量の不足・過剰によるインバランスと、不確実性成分による急峻な変動によって発生するインバランスを区別している。さらに、前者を削減する ESS を Slow ESS、後者を削減する ESS を Fast ESS と定義し、2 つの ESS の異なる特性を利用することで諸問題に適用可能であることを示している。 第 1 章では本論文の背景と関連研究、目的について述べている。 第 2 章では、SFET の適用先である電力システムにおける設備配置問題と電力市場における電力調達問題の定式化と、確率的評価指標の定式化を行っている。さらに SFET およびその応用可能性について述べている。 第 3 章では系統における送電線故障による絶対供給量の不足・過剰と、RE 出力の変動による急峻なインバランスの双方を SFET によって考慮しつつ、最適な設備配置を求めている。その結果、送電線故障によって系統から断絶される場所に Slow ESS が多く導入されるという特徴が見られ、SFET の有用性を確認している。 第 4 章では DR の導入による絶対供給量の不足・過剰の解消と急峻な変動成分の増大というトレードオフの問題を SFET によって定式化し、ESS 導入量を含む設備投資費が最小となる DR の最適導入率を求めている。また、得られた DR 導入率のもとで Slow, Fast ESS の合計導入量が最小となったことを確認している。 第 5 章では電力小売事業者の電力調達コスト最小化問題において SFET を適用している。具体的には、1 日前市場内 (Day-ahead Market, DAM) での裁定取引とリアルタイム市場 (Real-time Market) における取引量の低減という ESS の 2 つの活用方法を SFET によって定式化し、それぞれに対して最適な ESS 導入量を求めている。実際に、DAM 価格が高い場合には Slow ESS が、RTM 価格が高い場合には Fast ESS がそれぞれ導入され、適切に充放電を行うことで調達コストを最小化していることを確認している。 第 6 章では、以上の内容をまとめ、本論文の結論を述べ、最後に今後必要な検討課題について挙げている。 以上のように、本論文は、電力システムにおける不確実性を考慮した最適設備投資に関して研究したものである。その成果は電力システム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。			

2018（平成30）年3月までの新制博士学位授与者数は次のとおり。

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）	1,343	314	1,657
理学博士	26	8	34
博士（理学）	376	49	425
学術博士	0	1	1
博士（学術）	1	1	2
計	2,197	762	2,959

本書に記載した論文審査担当者の所属および職位は2017（平成29）年度秋学期のものである。

2018(平成30)年6月1日 発行

発行者 理工学部長 伊藤 公平

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