

Title	内容の要旨；審査の要旨
Sub Title	
Author	
Publisher	慶應義塾大学理工学部
Publication year	2024
Jtitle	慶應義塾大学理工学部研究報告別冊 No.97 (2024.) ,p.1- 37
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO50002003-20240001-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

内容の要旨

報告番号	甲 第 6253 号	氏 名	武藤 一馬
主論文題名：			
パラジウム錯体のチェーンウォーキングを活用した 遠隔位置換型アリール化反応と反応機構に関する研究			
本研究は、パラジウム触媒を用いた β-アセトキシ脱離を経るアルケンの遠隔位置換型アリール化反応の開発とアルケン部位へのアリール化導入位置の制御およびパラジウムのチェーンウォーキング過程における生成物の選択性と中間体の安定性に関する重要因子を解明することを目的としている。 均一系遷移金属触媒によるチェーンウォーキングを利用した遠隔官能基化反応は、離れた位置に複数の官能基を連続的に導入する反応や、反応開始点から離れた位置の C-H 結合を官能基化する手法として有用である。そのため、チェーンウォーキングを利用した新しい反応を開拓し、従来法では達成が困難な分子変換を達成できると期待される。当研究室においてアルケン部位を起点とするパラジウム触媒を用いた環化異性化反応が開発されたが、チェーンウォーキングの収束手法の課題点とさらなる反応の展開に必要な反応機構に関する知見が得られていなかった。そこで、本研究ではアルケンの遠隔位置換型アリール化反応の開発とチェーンウォーキングの過程の理論化学計算と実験に基づいた詳細な解析を行った。 第 1 章では、離れた位置にアセトキシ基を持つ末端アルケンに対する、アルケンの末端炭素選択的にアリール基を導入する遠隔位置換型アリール化反応の開発について述べた。配位子を中心とした条件検討により、ピリジンイソキサゾール配位子を用いることで位置選択性が向上することを見出した。基質の適用範囲の検討によって、導入されるアリール基の位置選択性に対する置換基効果について明らかにした。また遠隔位置換型アリール化反応を利用して天然有機化合物である MPAQ の合成を達成した。反応機構研究として、アルキル鎖上に不斉点を有する基質を用いた反応で、生成物の立体化学が保持されていた結果から、チェーンウォーキング過程と競争するアルケン交換過程が不利であることを明らかにした。また、β-アセトキシ脱離過程の立体化学に関して検討を行い、アセトキシ基とパラジウムがシン配座で β-アセトキシ脱離過程が進行していることも見出した。さらに、アリール基導入位置を配位子により制御するため、DFT 計算を用いた触媒の構造について検討を行い、直鎖型アリール化生成物の選択性の向上を達成した。 第 2 章では、β-アゴスティック相互作用を有するカチオン性フェナントロリンアルキルパラジウム触媒の安定性の解析について述べた。アルキル鎖上を移動するパラジウムの位置異性体の安定性を比較し、級数の大きい炭素とパラジウムが結合した錯体がより安定であることを明らかにした。また、β-アゴスティック相互作用している炭素が第二級と第三級の場合、第一級炭素より安定化されることを明らかにした。加えて、これら異性体の構造や電子的パラメータを比較し、安定化に対する立体的効果と電子的効果も明らかにした。 第 3 章では、カチオン性フェナントロリンパラジウム触媒のチェーンウォーキングの反応機構について述べた。DFT 計算により、アルケン回転過程がチェーンウォーキングに重要であることが示唆された。この回転過程の TS における不安定化の主要因が、アルケンの置換基とパラジウム上の他の配位子との間の立体反発であることを明らかにした。また、理論化学計算により、チェーンウォーキング過程と競争するアルケン交換は不利な過程であることが明らかとなった。さらに、内部アルケンを経由するチェーンウォーキング過程では、熱力学的に安定なトランスアルケンよりもシスアルケンを経由して進行することが有利であることが理論化学計算重水素標識実験により示された。これらの計算化学および実験結果は、チェーンウォーキングにおいてアルケンの幾何異性が重要であることを示した初めての例である。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6253 号	氏 名	武藤 一馬
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 垣内 史敏
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 高尾 賢一
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 畑中 美穂
		慶應義塾大学名誉教授	理学博士 山田 徹
		東京農工大学教授	博士（工学） 平野 雅文
学士（理学）、修士（理学）武藤一馬君提出の学位請求論文は、「パラジウム錯体のチェーンウォーキングを活用した遠隔位置換型アリール化反応と反応機構に関する研究」と題し、序論、本論 3 章、結論および実験項より構成されている。 有機合成化学は、様々な官能基変換を利用して目的化合物を選択的に合成することが求められる。従来法のほとんどでは、予め導入した官能基や配向基近隣の位置で新たな官能基を導入する手法が用いられる。官能基や配向基から離れた位置の炭素上で官能基導入することは従来法では困難である。この課題の解決方法の一つに、遷移金属錯体触媒が炭素鎖上を移動するチェーンウォーキング（以下 C-W と略記）を用いる方法が開発され、触媒的遠隔官能基化反応を達成する方法として重要となっている。本著者は、脱離基を持つアルケンを経由して、アルケン部位でのアリール基導入と遠隔位の脱離基での置換反応により C-W を収束させるアルケン部位の導入とを組み合わせた反応の開発と、C-W の過程の理論化学計算と実験に基づいた詳細な解析を行っている。 序論では、これまでに報告されている遠隔官能基化反応について、それら反応の特徴とその重要性について述べている。特に、C-W 過程を収束させる既存法における課題を解析し、新概念に基づく収束方法の開発が必要であることを示している。また、C-W 過程で生じるアルキルパラジウム錯体やパラジウムアルケン錯体が C-W 過程におよぼす影響に関して理解することが、C-W を含む反応を効率的かつ選択的に進行させるために重要であることを述べている。 第 1 章では、離れた位置にアセトキシ基を持つ末端アルケンに対する、アルケンの末端炭素選択的にアリール基を導入する遠隔位置換型アリール化反応の開発について述べている。配位子としてピリジンイソオキサゾールを用いることで位置選択性を向上できることを見出している。基質適用範囲の検討では、導入するアリール基上の置換基が位置選択性におよぼす影響について明らかにしている。また、アリール基導入位置を配位子により制御するため、DFT 計算を用いた触媒の構造について検討を行い、直鎖型アリール化生成物の選択性の向上を達成している。 開発した遠隔位置換型アリール化反応を利用し、天然有機化合物である MPAQ の合成を達成している。さらに反応機構研究により、アルキル鎖上に不斉点を有する基質を用いた検討により、C-W 過程と競争するアルケン交換過程が不利であることを明らかにしている。加えて、パラジウムによる β-アセトキシ脱離過程が、シン配座で進行していることも明らかにしている。 第 2 章では、β-アゴスティック相互作用を有するカチオン性フェナントロリンアルキルパラジウム錯体の安定性の理論化学的手法による解析について述べている。アルキル鎖上を移動するパラジウムの位置異性体の安定性を比較し、級数の大きい炭素とパラジウムが結合した錯体がより安定であることを明らかにするとともに、β-アゴスティック相互作用している炭素が第二級と第三級の場合、第一級炭素より安定化されることを明らかにしている。加えて、これら異性体の構造や電子的パラメータを比較し、安定化に対する立体的効果と電子的効果も明らかにしている。 第 3 章では、カチオン性フェナントロリンパラジウム触媒の C-W の反応機構について述べている。理論化学計算により、アルケン回転過程が C-W 過程で重要であることを見出し、この回転過程の遷移状態における不安定化の主要因が、アルケンの置換基とパラジウム上の他の配位子との間の立体反発であることを明らかにしている。また、C-W 過程と競争するアルケン交換は不利な過程であることが明らかとしている。さらに、内部アルケンを経由する C-W 過程では、熱力学的に安定なトランスアルケンよりもシスアルケンを経由して進行することが有利であることを、理論化学計算と重水素標識実験を併用することで明らかにしている。これらの結果は、C-W 過程においてアルケンの幾何異性が重要であることを示した初めての例である。 このように上記の研究成果は、有機化学分野および有機金属化学分野の発展に貢献し、理学上寄与するところが少なくない。 よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6254 号	氏 名	那須 英里圭
主論文題名：			
人工タンパク質ナノ粒子を素材とした刺激応答性材料の開発			
近年、タンパク質分子は人工的に新たな構造を設計することが可能になっており、従来の用途を超えてその利用が拡大することが期待されている。先行研究で構築された人工タンパク質ナノ粒子 TIP60 は、60 分子のタンパク質が自発的に会合することで形成される切頂二十面体型の超分子である。この分子の内部は中空で、表面に 20 箇所の孔を有するという特徴がある。本研究では、この TIP60 の構造的特徴と化学修飾を組み合わせることで刺激応答性材料の開発を行った。 第一章では、本研究の背景と目的、人工タンパク質ナノ粒子 TIP60 について述べた。第二章では、TIP60 の表面孔の分子ふるい効果を利用した化学修飾による、酸化還元応答性ナノカプセルとしての機能化を検討した。そして、内側表面にシステインを導入した TIP60 変異体の化学修飾実験により、TIP60 表面の孔が分子量 10,000 以上のポリエチレングリコールマレイミド (PEG-Mal) を通さないことを明らかにした。また、この性質を利用し、化学修飾による TIP60 内外表面のヘテロな機能化を行った。具体的には、TIP60 内外両面にシステイン残基を導入した変異体を用いて、TIP60 の外側を孔よりも大きな PEG-Mal で修飾した後、内側にジスルフィド結合を介して小分子化合物を修飾した。ここで内側に修飾した小分子は還元剤の添加によって放出させることが可能であり、TIP60 を刺激応答性カプセルとして機能化できることを示した。第三章では、TIP60 が 60 分子で構築される超分子であることを利用した、刺激に応答してゾルゲル転移するゲルの構築について検討した。本研究では、両端にマレイミド基を有する PEG で TIP60 粒子間を架橋することでゲルを構築した。このゲルは TIP60 が PEG ネットワークの架橋点となることから、TIP60 の 60 量体構造を解離させる刺激によってゾルゲル転移が起こると期待できる。TIP60 の 60 量体構造は 61 度以上で解離することが知られていた。そこで、ゲルの温度応答性を検証し、加熱・冷却サイクルによって可逆的なゾルゲル転移が起こることを明らかにした。また、小角 X 線散乱による加熱・冷却中の TIP60 の構造解析により、想定通りに 60 量体の解離と再会合が生じていることを示した。第四章は結論であり、本研究で得られた知見について述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6254 号	氏 名	那須 英里圭
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 博士（理学）	宮本 憲二
	副査	慶應義塾大学教授 博士（地球環境科学）	土居 信英
		慶應義塾大学教授 博士（薬学）	荒井 緑
		慶應義塾大学准教授 博士（工学）	松原 輝彦
学士（理学）、修士（理学）那須英里圭君提出の学位請求論文は「人工タンパク質ナノ粒子を素材とした刺激応答性材料の開発」と題し、全4章で構成されている。 近年、タンパク質分子は人工的に新たな構造を設計することが可能になっており、従来にはない新しい利用用途が期待されている。先行研究で構築された人工タンパク質ナノ粒子 TIP60 は、60 分子のタンパク質が自発的に会合することで形成される切頂二十面体型の超分子であり、均質性が非常に高い特徴がある。さらに、この分子の内部は中空であり、表面に 20 箇所の孔を有するという特徴がある。本研究では、これら TIP60 の構造的特徴を巧みに利用して、変異導入したシステイン残基を化学修飾することで新規な刺激応答性材料の開発を行っている。 第1章は緒言であり、本研究の背景と目的、人工タンパク質ナノ粒子 TIP60 について述べている。また、本研究の目的について述べている。 第2章では、TIP60 の表面孔の分子ふるい効果を利用した化学修飾による、酸化還元応答性ナノカプセルとしての機能化を検討している。最初に、TIP60 の内側表面にシステインを導入した TIP60 変異体を作成し、次に分子量の異なるポリエチレングリコールマレイミド（PEG-Mal）を用いてシステイン残基の化学修飾を検討している。その結果、TIP60 表面の孔が分子量 10,000 以上の PEG-Mal を通さないことを明らかにしている。次に、この性質を利用し、化学修飾による TIP60 内外表面のヘテロな機能化を検討している。最初に、TIP60 内外両面にシステイン残基を導入した変異体に対して、TIP60 の外側を孔よりも大きな PEG-Mal でタンパク質表面のシステイン残基を選択的に修飾している。次に、修飾されなかったタンパク質内側のシステイン残基を、孔を通過できる小分子化合物によってジスルフィド結合を介した修飾を検討している。その結果、TIP60 内外のヘテロ修飾に成功している。さらに、内側に修飾した小分子は、還元剤の添加によってジスルフィド結合を切断して放出させることが可能であり、TIP60 を刺激応答性カプセルとして機能化できることを示している。 第3章では、TIP60 が 60 分子で構築される超分子であることを利用した、温度に応答してゾルゲル転移するゲルの構築について検討している。最初に、両端にマレイミド基を有する PEG でタンパク質表面にシステイン残基を有する TIP60 粒子間を架橋することでゲルを構築することに成功している。このゲルは TIP60 が PEG ネットワークの架橋点となるように設計されているので、TIP60 の 60 量体構造を解離させる刺激によってゾルゲル転移が起こるのではないかと期待できる。そこで、TIP60 の 60 量体構造は 61 度以上で解離することが知られていたもので、加熱と冷却によるゲルの温度応答性を検証している。その結果、期待通り加熱・冷却サイクルによって可逆的なゾルゲル転移が起こることを明らかにしている。また、小角 X 線散乱によって加熱・冷却中の TIP60 の構造解析を行い、想定通りに 60 量体の解離と再会合が生じていることを示している。また、ゲルの作成実験には大量の TIP60 が必要であったため、TIP60 の等電点を利用した簡便で大量調製可能な精製法についても検討し、高純度の精製法を確立している。 第4章は結論であり、本研究で得られた知見について述べている。 以上、本論文は人工タンパク質ナノ粒子 TIP60 を化学修飾することで構築した刺激応答性材料の特異的な性質を明らかとすることに成功しており、生命科学研究に大いに資するものである。よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6255 号	氏 名	大原 直也
主論文題名：			
人工タンパク質ナノケージの再設計を通じた会合制御と機能化に向けた分子基盤の構築			
タンパク質ケージは、複数のタンパク質が自発的に会合して形成されるナノ粒子である。その中空の構造を利用して様々な機能が検討されてきた。しかし、タンパク質の会合状態を制御するような仕組みを利用する機能化は、難易度の高さからほとんど行われていない。著者の所属する研究室では、人工的に設計したタンパク質が 60 分子会合することでできるナノケージ TIP60 を構築することに成功した。本論文では、その解離と会合の制御手法を中心に、機能化に向けた基盤技術の開発を行った。 第一章では、本研究の内容と目的をまとめた。 第二章では、金属イオンの添加に応答して会合解離する変異体 mTIP60 の構築を行った。ここではまず、会合に重要な残基に対する変異導入により、60 量体を形成できない変異体 (K67E) を構築した。ここで、K67E の側鎖を含め複数の酸素原子がサブユニット界面に集中していたことに着目し、それらと相互作用しやすいアルカリ土類金属イオンによりサブユニット間を再度架橋する事ができると考えた。実際、変異体に Ca や Ba イオンを添加すると高い効率で 60 量体が形成された。さらに、金属による会合解離を利用し、ssDNA 分子の内包と放出についても実証した。 第三章では、TIP60 ケージの内部表面に、機能化に利用しやすい N 末端や C 末端を配置することを目的として、鋳型のサブユニットを分割する split protein system を適用した。得られたフラグメントを大腸菌で共発現させた場合、フラグメントを個別に精製して試験管内で混合した場合の両方で TIP60 と同様の構造が形成されることを突き止めた。さらに、K67E 変異体を鋳型にして同様の分割を行うと、フラグメントは自動的に会合することはなく、TIP60 と同様の構造を形成するのにアルカリ土類金属イオンが必要であることも明らかになった。 第四章では、一連の研究で明らかになった点をまとめた他、将来展望として、金属イオン依存的な会合の仕組みとフラグメント化により導入された新たな末端を修飾する技術を組み合わせることで、様々な機能性ペプチドやタンパク質の効率的な内包ができる可能性を論じた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6255 号	氏 名	大原 直也
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 宮本 憲二
	副査	慶應義塾大学教授	博士（地球環境科学） 土居 信英
		慶應義塾大学教授	博士（薬学） 荒井 緑
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 松原 輝彦
学士（理学）、修士（理学）大原直也君提出の学位請求論文は「人工タンパク質ナノケージの再設計を通じた会合制御と機能化に向けた分子基盤の構築」と題し、全4章で構成されている。 タンパク質ケージは、複数のタンパク質が自発的に会合して形成されるナノ粒子である。これらの粒子が中空の構造を有していることを利用して、様々な機能化や様々な分子の内包が検討されている。しかし、タンパク質の会合状態を精密に制御するような研究は、その難易度の高さからほとんど行われていない。一方で、先行研究で構築されたタンパク質ナノ粒子 TIP60 は、人工的に設計された 60 分子のサブユニットが自発的に会合することでできる超分子である。本論文では、TIP60 を利用してタンパク質ケージの解離と会合の制御手法と、ナノ粒子内部の機能化に向けた基盤技術の開発を行っている。 第1章は緒言であり、本研究の背景と目的、人工タンパク質ナノ粒子 TIP60 やタンパク質多量体の会合制御方法などについて述べている。また、本研究の目的について述べている。 第2章では、金属イオンの添加に応答して会合・解離するナノケージの構築を行っている。最初に、TIP60 の立体構造を参考にしてサブユニット境界で会合に重要と考えられる残基を推定している。そして、それら残基に対して変異導入を行い、60 量体を形成できない変異体（K67E）を構築している。ここで、サブユニット界面において K67E の側鎖を含め複数のアミノ酸残基の酸素原子が集中していることに着目し、それら酸素原子と相互作用しやすいアルカリ土類金属イオンを添加することで、サブユニット間を架橋することを検討している。実際、各種アルカリ土類金属イオンをスクリーニングしたところ、変異体に Ca^{2+} や Ba^{2+} イオンを添加すると高い効率で 60 量体を再構築できることを見いだしている。そして、再構築したナノ粒子を mTIP60 と命名して、この構造を X 線小角散乱（SAXS）およびクライオ電子顕微鏡（cryo-EM）により確かめている。また、Ba^{2+} イオン添加後の経時的な変化を解析して、金属イオンに応答した会合のダイナミクスを明らかにしている。さらに、金属による会合解離を利用し、mTIP60 に ssDNA 分子の内包と、金属キレート剤である EDTA を添加することで DNA の放出にも成功している。 第3章では、TIP60 ケージの内部表面に、機能化に利用しやすい N 末端や C 末端を配置することを目的として、鋳型のサブユニットを分割することを検討している。最初に split protein system により TIP60 のサブユニットを分割する設計を行っている。そして、得られた分割フラグメントを大腸菌で共発現させた場合と、別々に発現・精製して試験管内で混合した場合の両方で TIP60 と同様のナノ粒子構造が形成されることを見いだしている。さらに、60 量体を形成できない K67E 変異体を鋳型にして同様の分割を行ったところ、分割したフラグメントは自動的に会合することではなく、アルカリ土類金属イオンを添加することで TIP60 と同様のナノケージ構造を形成することを明らかにしている。得られた複合体（mTIP120-Ba）が、SAXS と cryo-EM により設計通りの構造であることを確かめている。 第4章では、本研究で明らかになった知見をまとめている。また、金属イオン依存的な会合とフラグメント化により導入された新たな末端を修飾する技術を組み合わせることで、将来的に様々な機能性ペプチドやタンパク質の効率的な内包ができる可能性を論じている。 以上、本論文は人工タンパク質ナノ粒子 TIP60 の会合制御と機能化に向けた分子基盤の構築に成功しており、生命科学研究に大いに資するものである。よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6256 号	氏 名	宮本 恵里花
主論文題名：			
ガングリオシドに誘起されるアミロイド β 集合体形成の 阻害剤としての環状ペプチドの開発			
アルツハイマー病 (AD) は、認知症の主な原因となる進行性の神経変性疾患であり、その発症および進行にはアミロイド β タンパク質 ($A\beta$) の脳内での凝集や蓄積が関与する。$A\beta$ は細胞膜上のガングリオシドクラスターに結合すると、凝集核として働く $GA\beta$ 複合体を形成し、高い細胞毒性をもつ凝集を促進する。そのため、ガングリオシドクラスターは AD 治療薬開発のための新規標的となる可能性がある。そこで本研究では、ガングリオシド GM1 に結合する環状ペプチドを開発し、GM1 クラスターに誘起される $A\beta$ 凝集に対する阻害能について評価した。 第 1 章では、アルツハイマー病における $A\beta$ 凝集と生体膜のガングリオシドクラスターについての背景を説明し、本研究の意義と目的を述べた。 第 2 章では、ファージ提示法により同定された GM1 結合性ペプチド p3 の 2 つのアミノ酸を Cys に置換し、ジスルフィド結合により環化した環状ペプチドを得た。GM1 クラスターを模倣した 10%GM1 含有脂質膜を作製してペプチドの親和性と阻害活性を評価した。環状ペプチド cy5A は p3 と同程度の GM1 に対する高い結合能を有することを明らかにした。原子間力顕微鏡 (AFM) 観察の結果、cy5A は GM1 に誘起される $A\beta$ 線維化に対する阻害能を有し、環化によって 10,000 倍の阻害能向上を見出した。また、速度論的解析と細胞毒性実験の結果、cy5A は凝集核となる $GA\beta$ 複合体形成を抑制し、毒性凝集体の形成を阻害することを明らかにした。 第 3 章では、患者脳内の環境を模倣するため、$A\beta$ 蓄積好発部位であるヒト脳楔前部 (PC) もしくは $A\beta$ 蓄積回避部位である鳥距溝 (CC) 由来の脂質を用いた再構成膜を作製し、$A\beta$ 凝集を評価した。AFM 観察や速度論的解析の結果、PC 由来膜上では、CC 由来膜上と比較して、$GA\beta$ が関与する $A\beta$ の凝集が促進されることを示した。さらに、cy5A が PC 由来膜上で起こる $A\beta$ の凝集を阻害できることを明らかにし、AD 治療薬開発において、$GA\beta$ 形成の阻害により $A\beta$ 凝集を阻害するという戦略の有用性を示した。 第 4 章では、本研究で得られた知見を総括し、本研究の成果が当該分野の研究に与える影響と今後の展望について述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6256 号	氏 名	宮本 恵里花
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学） 松原 輝彦
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 宮本 憲二
		慶應義塾大学教授	博士（地球環境科学） 土居 信英
		慶應義塾大学教授	博士（薬学） 荒井 緑
		慶應義塾大学名誉教授	工学博士 佐藤 智典
学士（工学）・修士（工学）宮本 恵里花君提出の学位請求論文は「ガングリオシドに誘起されるアミロイドβ集合体形成の阻害剤としての環状ペプチドの開発」と題して、4章で構成されている。アルツハイマー病（AD）は、認知症の主な原因となる進行性の神経変性疾患であり、その発症および進行にはアミロイドβタンパク質（Aβ）の脳内での凝集や蓄積が関与することが知られている。Aβが細胞膜上のガングリオシドクラスターに結合してガングリオシド-Aβ(GAβ)複合体が形成されることで、繊維化などのAβ集合体の形成が促進されると考えられている。そのため、ガングリオシドクラスターにより誘起されるAβ集合体はAD治療薬開発のための新規標的として注目されている。そこで、本論文の著者は、GM1クラスターに誘起されるAβ集合体形成に対して阻害能を有するガングリオシドGM1結合性の環状ペプチドを開発し、その機能評価を行っている。 第1章では、アルツハイマー病におけるAβ凝集および生体膜のガングリオシドクラスターについての背景が説明されており、本研究の意義と目的が述べられている。 第2章では、ファージ提示法により得られたGM1結合性ペプチドp3の機能向上を目指して、アミノ酸残基2箇所をシステインに置換してジスルフィド結合を形成させることで環状ペプチドを合成している。GM1含有脂質膜に対する環状ペプチドの親和性評価が行われ、GM1クラスターに対して高い結合能を有した環状ペプチドcy5Aが得られている。GM1に誘起されたAβ線維化は原子間力顕微鏡（AFM）観察により確認しており、そのAβ線維化がcy5A存在下で阻害されることを見出している。その阻害効果は、環化によって10,000倍向上しているとして述べている。さらに、cy5Aの機能として、速度論的解析により凝集核となるGAβ複合体形成を抑制すること、細胞毒性実験により毒性の集合体の形成を阻害することが示されている。 第3章では、Aβ蓄積好発部位であるヒト脳楔前部（PC）およびAβ蓄積回避部位である鳥距溝（CC）由来の脂質を用いた再構成膜が作製され、患者脳組織を模倣した生体膜モデルを用いたAβ集合体の形成挙動の評価が行われている。AFM観察や速度論的解析を行うことで、PC由来膜上ではCC由来膜上と比較してGAβが関与するAβの繊維化が促進されることを明らかにしている。さらに、p3やcy5AがPC由来膜上で誘起されるAβ繊維化を阻害することを見出している。 第4章では、本研究で得られた知見が総括され、本研究の成果が当該分野の研究に与える影響と今後の展望について述べている。 本論文では、生体膜モデルを用いたガングリオシドに誘起されるアミロイドβ集合体の形成挙動の解明に加えて、Aβ集合体形成を阻害する環状ペプチドを見出すことに成功している。これらの成果は、理工学の基礎的な分野だけではなく、医薬品開発にも寄与することが期待される。よって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6257 号	氏 名	飯塚 健介
主論文題名： A Power Estimation Model and a Framework to Reduce Power Consumption of FPGA Clusters (FPGA クラスタの電力推定モデルと消費電力削減のためのフレームワーク)			
IoT デバイスで収集したデータ処理や人工知能のための計算基盤の需要が高まっている。従来のクラウドによる処理だけでなく、第 5 世代通信(5G)技術の発展に伴い、IoT デバイスの計算処理を 5G 無線基地局に設置した計算基盤が担う Multi-access Edge Computing (MEC)というコンピューティング技術が注目され、MEC のための計算基盤は限られた供給電力で、低遅延で様々なタスクを実行する要求がある。この要求を実現する計算基盤として Field Programmable Gate Array (FPGA)を直接網により接続した FPGA クラスタは、計算負荷が高い処理を並列化することや複数のタスクを同時に実行するマルチテナント環境を実現できると期待されている。 しかし、実際に FPGA クラスタがどの程度の電力を必要とするのかが実行時までわからないという問題がある。この問題を解決すべく、私は FPGA クラスタへ電力測定モジュールを導入し、いくつかのアプリケーションを FPGA クラスタ上で実行するときの消費電力を測定、分析し、その結果を用いて電力推定モデルを提案する。いくつかのアプリケーションの消費電力の実測値と比較した結果、この推定モデルは最大誤差 15%程度で FPGA クラスタのシステム全体の消費電力を設計段階で見積もることが可能となった。また、測定結果から FPGA 同士の接続部分である I/O の消費電力が全体の多くを占めていて、通信性能と消費電力にはトレードオフの関係があることが明らかになった。 この研究成果から、通信性能を抑制することで供給電力が限られた環境に合わせて FPGA クラスタを利用できることが示された。我々の FPGA クラスタでは通信性能は利用するトランシーバの数によって決定されるが、必要なトランシーバ数の決定や物理的な配置を考慮した設計は煩雑である。この煩雑なフローを簡略化し、FPGA クラスタの利便性を改善するため、消費電力の削減と設計を自動化するフレームワークを提案する。 このフレームワークはまず、先行研究で提案された割り当てアルゴリズムを利用して、通信遅延が最小になるようにボードの割り当てが実行される。割り当てるボードが決定したら、システム全体の消費電力が、供給電力の制限を超えないかを前述の電力推定モデルによって見積もる。このとき供給電力が許す限り、利用するトランシーバの数を増やし通信性能を向上させることや消費電力を最小に抑えることが可能なように設計空間探索を行う。			

利用するトランシーバ数が決定したらそれを元に **FPGA** の構成ファイルと **FPGA** 同士の通信ファイルが自動生成される。高速フーリエ変換と共役勾配法のアクセラレータをこのフレームワークで設計し評価した結果、4 枚の **FPGA** での実装で最適化前の従来の実装と比較して最大で 52%の消費電力の削減を達成した。

FPGA クラスタの消費電力の分析と電力推定モデルの提案、消費電力の削減と設計自動化を行うフレームワークの提案の 2 つを通じて、**FPGA** クラスタの **MEC** サーバとしての利便性を高めながら消費電力の削減も可能となった。

審査の要旨

報告番号	甲 第 6257 号	氏 名	飯塚 健介
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 松谷 宏紀
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 西 宏章
		慶應義塾大学名誉教授	工学博士 天野 英晴
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 矢向 高弘
修士（工学）、飯塚健介君の学位請求論文は、「A Power Estimation Model and a Framework to Reduce Power Consumption of FPGA Clusters（FPGA クラスタの電力推定モデルと消費電力削減のフレームワーク）」と題し 6 章からなる。 複数の FPGA(Field Programmable Gate Array)を接続した FPGA クラスタは、データセンター内のアクセラレータとして利用が進んでいる一方、そのエネルギー効率の良さから、MEC(Multi-access Edge Computing)などエッジにおける計算資源としても期待されている。FPGA は単体チップのエネルギーの見積もりは、製造元のツールを用いて行われるが、FPGA 間のネットワークを含めたクラスタ全体の電力モデルについてはほとんど研究が行われていない。 本研究は、サーバーなどのホストを必要としない、スタンドアロン型の FPGA クラスタを対象として、実際に利用されているクラスタに基づいて電力モデルを構築し、このモデルに基づき電力推定を行うと共に、FPGA クラスタのエネルギーを削減する設計フレームワークを提案するものである。 本論文の構成は以下の通りである。まず、1 章で最近の FPGA の発達と、書き換え可能なハードウェアから計算用のアクセラレータとしての利用が進んでいる現状と、複数の FPGA を接続するクラスタ構成の利点を述べている。次に 2 章では各種 FPGA クラスタを調査し、現状で、エネルギーモデルが提案されていない点を指摘している。3 章では、MEC 用の計算資源として様々なアプリケーションが開発されている FiC(Flow-in Cloud)と、これを CPU-FPGA 一体型のチップを用いて商用化した M-KUBOS クラスタの構成を述べている。双方ともに、大規模なホストを持たないスタンドアロン型のクラスタであり、FPGA ボード間を高速シリアルポートである GTH を用いて安価なケーブルを用いて接続している。また、ハードウェアが少量で、転送遅延が予測可能な STDM(Static Time Division Multiplexing)スイッチを用いており、ネットワークや外部メモリの接続に用いるシェル部と、ユーザが自分のアプリケーションを搭載するユース部に分かれたアーキテクチャを持っている。 4 章以降が本論文の主題である。4 章では、FiC と M-KUBOS の両方について、アプリケーション実行時において、各部でどの程度の電力が消費されるかをボード上に装備した計測装置を用いて測定し、この結果に基づき、電力モデルを構築している。FPGA のシリアルリンクは転送電力の制御機能を持たないため、ほぼリンク数に線形に電力を消費し、サーバーに比べては小型のホスト CPU もかなりの電力を消費することが明らかになった。提案モデルを用いるとアプリケーションと FPGA クラスタ構成が決まれば、最大 15%の誤差で電力を推定可能であることを示している。 さらに 5 章では、提案した電力モデルと、FPGA クラスタ上へのアプリケーションのマッピングツールを組み合わせ、与えられた電力内で並列アプリケーションを実行するためのリンク構成と経路設定テーブルを生成するフレームワークを提案し、これを用いて実アプリケーションで最大 52%電力を削減したことを示している。 以上、本研究は、FPGA クラスタにおける電力モデルと電力推定手法を示し、これを用いた設計フレームワークを構築した点で、その貢献は工学上少なくない。 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 6266 号	氏 名	上原 美夏
主論文題名：			
Decoding host-microbiome interactions through metatranscriptomic analysis (メタトランスクリプトーム解析による腸内細菌叢と宿主間相互作用の解明)			
腸内細菌叢と宿主の相互作用は、複雑な生物学的プロセスを構成しており、その関係は両者の生存と健康に不可欠である。消化管は部位によって機能が異なり、物理化学的環境にも違いがあるが、その環境の変化に伴う細菌叢の反応や、腸内細菌叢と宿主との相互作用の変化の詳細は明らかになっていない。本論文では、消化管に沿った腸内細菌叢と宿主の相互作用を解明するために、消化管の複数部位におけるメタトランスクリプトーム解析手法と、宿主と細菌叢の遺伝子共発現ネットワーク解析手法を開発し、これらの手法を霊長類コモンマーモセットの消化管に適用した。 本論文の第1章では、腸内細菌叢と宿主の相互作用の定義と、これらを解明するための解析手法の役割について述べるとともに、本論文で焦点を当てた二つの課題について概説した。 第2章では、消化管に沿った細菌叢の機能変化を理解するために実施した、メタトランスクリプトーム解析手法の開発、および、開発した手法を霊長類コモンマーモセットの消化管へ応用した結果について説明した。この手法は、複数の消化管部位にわたるリファレンスメタゲノム配列を再構築することで、従来のデータベースに依存した手法に付随する未知細菌遺伝子を見落とす問題を克服した。さらに、空間的関連性を取り入れた共変動解析により未知遺伝子の機能の予測に成功した。 第3章では、消化管に沿った宿主と細菌叢の相互作用を解明するために、霊長類コモンマーモセットの消化管における宿主と細菌叢の遺伝子共発現ネットワーク解析を実施した。遺伝子共発現ネットワークを理解しやすい単位に分割し、緊密に相互作用する遺伝子モジュールを抽出することは、複雑な宿主と細菌叢の相互作用を解釈するためのアプローチとして有用である。そこで、生物間の相互作用の理解に適したグラフ理論に基づく遺伝子モジュール抽出アルゴリズムを提案し、膨大な共発現ネットワークから宿主と細菌叢の双方を含む 27 の遺伝子モジュールを同定した。これらの遺伝子モジュールは、宿主と細菌叢の関係に関する先行研究と一致する結果が得られただけでなく、宿主と細菌叢の相互作用において潜在的な媒介因子として働く細菌叢遺伝子についての新たな知見も得られた。 第4章では、本論文を総括するとともに、本研究で提案した解析手法の応用可能性と、本研究で得られた知見から考えられる今後の展望について議論した。 まとめると、本論文では、未知細菌遺伝子を考慮したメタトランスクリプトーム解析手法と、細菌叢と宿主の遺伝子共発現ネットワーク解析手法の開発および応用を通じて、消化管に沿った腸内細菌叢と宿主の相互作用についての新たな洞察を得た。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6266 号	氏 名	上原 美夏
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 榊原 康文
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 舟橋 啓
		慶應義塾大学教授	博士（薬学） 荒井 緑
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 清水 史郎
		慶應義塾大学名誉教授	工学博士 岡 浩太郎
学士（理学）、修士（理学）上原美夏君提出の学位請求論文は、「Decoding host-microbiome interactions through metatranscriptomic analysis（メタトランスクリプトーム解析による腸内細菌叢と宿主間相互作用の解明）」と題し、4章から構成されている。 腸内細菌叢と宿主の相互作用は、複雑な生物学的プロセスを構成しており、その関係は両者の生存と健康に不可欠である。消化管は部位によって機能が異なり、物理化学的環境にも違いがあるが、その環境の変化に伴う細菌叢の反応や、腸内細菌叢と宿主との相互作用の変化の詳細は明らかになっていない。本論文では、消化管に沿った腸内細菌叢と宿主の相互作用を解明するために、消化管の複数部位におけるメタトランスクリプトーム解析手法と、宿主と細菌叢の遺伝子共発現ネットワーク解析手法を開発し、これらの手法を霊長類コモンマーマセットの消化管に適用した。 本論文の第1章では、腸内細菌叢と宿主の相互作用の定義と、これらを解明するための解析手法の役割について述べるとともに、本論文で焦点を当てた二つの課題について概説した。 第2章では、消化管に沿った細菌叢の機能変化を解明するために実施したメタトランスクリプトーム解析とそのデータ解析手法の開発、および、開発した手法を霊長類コモンマーマセットの消化管へ応用した結果について説明した。この手法は、複数の消化管部位にわたるリファレンスメタゲノム配列を再構築することで、従来のデータベースに依存した手法の欠点である未知細菌遺伝子を見落とす問題を克服した。そして、遺伝子の発現変動は環境の変化に対してよりダイナミックで敏感であることを明らかにした。さらに、空間的関連性を取り入れた発現共変動解析により未知遺伝子の機能の予測に成功した。 第3章では、消化管に沿った宿主と細菌叢の相互作用を解明するために、霊長類コモンマーマセットの消化管における宿主と細菌叢の遺伝子共発現ネットワーク解析を実施した。遺伝子共発現ネットワークを理解しやすい単位に分割し、緊密に相互作用する遺伝子モジュールを抽出することは、複雑な宿主と細菌叢の相互作用を解釈するためのアプローチとして有用である。そこで、生物間の相互作用の理解に適したグラフ理論に基づく遺伝子モジュール抽出アルゴリズムを提案し、膨大な共発現ネットワークから宿主と細菌叢の双方を含む27の遺伝子モジュールを同定した。これらの遺伝子モジュールは、宿主と細菌叢の関係に関する先行研究と一致する結果が得られただけでなく、宿主と細菌叢の相互作用において潜在的な媒介因子として働く細菌叢遺伝子についての新たな知見も得られた。 第4章では、本論文を総括するとともに、本研究で提案した解析手法の応用可能性と、本研究で得られた知見から考えられる今後の展望について議論した。 以上結論として、本研究では、未知細菌遺伝子を考慮したメタトランスクリプトーム解析手法と、細菌叢と宿主の遺伝子共発現ネットワーク解析手法の開発を行い、霊長類コモンマーマセットの消化管への応用を通じて、消化管に沿った腸内細菌叢と宿主の相互作用についての新たな洞察を得た。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。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6267 号	氏 名	勝野 晃弘
主論文題名： Thermal Topology Optimization Based on Equivalent Thermal Conductivity in Electric Motor (電動機における等価熱伝導率に基づく熱的トポロジー最適化)			
電動機は様々な産業システムにおいて幅広く利用されている。しかしながら、高トルク密度を実現するための電磁界解析、熱解析による構造最適設計は未だ達成できていない。電動機の高トルク密度化を実現するために、巻線のピーク温度を下げる冷却設計が不可欠である。特に、冷却性能と製造性の観点から、スロット内に伝熱媒体を挿入する構造は有力な冷却方法の一つである。そこで本研究では、巻線のピーク温度を最小化するような熱伝導体のトポロジー最適化を目的とした。また、トポロジー最適化に用いる巻線の均質化モデルを検証し、均質化モデルにおけるピーク温度の補正手法を提案した。 第 1 章では、本研究の背景と従来技術の問題点と課題、研究の目的について説明した。 第 2 章では、密度法に基づくトポロジー最適化の基礎を概説した。 第 3 章では、2 つの材料に関する均質化理論の基礎を示した。巻線の均質化モデルは、トポロジー最適化において離散的なコイル配置を表現するために不可欠である。 第 4 章では、内部発熱を伴う任意形状の集中定数熱回路 (LPTN: Lumped Parameter Thermal Network) を提案した。さらに拡張として、円柱と三角柱の径方向 LPTN を導出した。重要な発見は、これらの非中空形状の最高温度が各 LPTN の節点電圧で表されることである。また、コイルを囲む絶縁体の形状を模してシミュレーションを行い、開発した LPTN が従来の LPTN による近似よりも高精度であることが示された。 第 5 章では、第 3 章で示した均質化モデルのピーク温度を巻線のピーク温度に補正する方法を提案した。等価熱伝導率を用いて計算される最高温度は、均質化された巻線の温度である。したがって、コイルの最高温度は均質化モデルの温度から補正して求める必要がある。補正モデルは、第 4 章で開発した LPTN に基づいて構築される。さらに、均質化モデルの応用として電動機ステータを簡易的な LPTN でモデル化し、電気抵抗の温度依存性を反映した、巻線ピーク温度の解析式を導出し、その有用性をシミュレーションにより示した。 第 6 章では、モータスロットのトポロジー最適化手法を提案した。最適化問題を数学的に記述し、SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) 法と均質化法に基づいて、占有率に依存する巻線の発熱率と熱伝導率を定式化した。コイルとワニスおよび熱伝導体という複雑な 3 材料最適化問題は、均質化理論を導入することにより単純な 2 材料最適化問題に帰着する。シミュレーションの結果、発熱率と放熱性のトレードオフの下で、体積制限を設けることなく熱伝導体の最適解が得られた。最適化された形状により、ピーク温度は従来のシンプルなアルミ板と比較して 8.84% 低減された。 第 7 章で、本研究全体の成果をまとめた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6267 号	氏 名	勝野 晃弘
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 村上 俊之
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 大森 浩充
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 嘉副 裕
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 飯盛 浩司

学士（工学）、修士（工学）勝野 晃弘 君提出の学位請求論文は「Thermal Topology Optimization Based on Equivalent Thermal Conductivity in Electric Motor」（電動機における等価熱伝導率に基づく熱的トポロジー最適化）と題し、7章から構成されている。産業システムにおいて必要不可欠となっている電動機の高度化設計は、産業発展のために、より重要な位置付けにある。しかしながら、高トルク密度を実現するための電磁界解析、熱解析による構造最適設計は未だ達成できていない。そこで、本研究では電動機スロット内の巻線ピーク温度低減を目的として、任意のスロット形状に適用可能な集中定数熱回路（LPTN: Lumped Parameter Thermal Network）に基づいた新たなモデル化手法を提案している。さらに、熱伝導体のトポロジー最適化のためのLPTNに基づく巻線の均質化モデルへの展開をはかりつつ、均質化モデルにおけるピーク温度の補正手法を提案し、シミュレーションによりその有用性を検証している。

第1章では、本研究の目的を述べ、電動機の技術動向を含めた本研究の位置付けおよび先行研究をまとめている。

第2章では、密度法に基づくトポロジー最適化手法を示し、そのためのFEM（Finite Element Method）およびSIMP（Solid Isotropic Material with Penalization）法の基礎を概説している。

第3章では、提案手法で用いている2つの材料に対する均質化モデルの基礎理論を示している。

第4章では、矩形と中空円柱のLPTNの関係式に基づき、内部発熱を伴う任意形状のLPTNに関して新規的なモデルを提案している。さらに、非中空円柱および三角柱への展開がはかられ、その重要な特徴として、3つの熱抵抗で表されるLPTNノードがピーク温度を表す結果になることを明確化している。また、コイルを囲む絶縁体形状を仮定したシミュレーションを行い、提案するLPTNにおいて従来のLPTNよりも温度解析の精度が高くなることが示されている。

第5章では、コイルとコイルをコーティングするワニスの均質化モデルをLPTNによって表現し、同時に均質材料の等価熱伝導率を用いて計算されるピーク温度を巻線温度に換算するための補正モデルをLPTNに基づいて提案している。また、電動機における単純な均質化ステータをLPTNでモデル化し、電気抵抗の局所温度依存性を含むコイルのピーク温度の解析式も導出している。提案モデルにおいて、FEMよりもはるかに計算コストが低く、従来のモデルよりも正確な解析結果が得られることをシミュレーション評価により示している。

第6章では、電動機スロットのトポロジー最適化手法を提案している。トポロジー最適化問題を数学的に記述し、SIMP法と均質化法に基づいて熱伝導率と巻線占積率に依存する発熱率を定式化している。提案手法では、複雑な3材料（コイル、ワニス、熱伝導体）のトポロジー最適化のため、均質化による巻線モデルを導入することにより2材料のトポロジー最適化に単純化されている。提案モデルにおいて、放熱性と巻線占有率のトレードオフの下で、体積制約のない熱伝導体の最適解が得られることがシミュレーション評価により示されている。また、この最適化されたヒートパスにより、ピーク温度が従来の単純なアルミ板に比べ8.8%低減できることを明確化している。

第7章では、結論を述べ、得られた成果の重要な貢献と今後の展望について総括している。

以上要するに、本研究はLPTNに基づいた電動機スロット内の新たな熱回路モデルを提案し、熱伝導体のトポロジー最適化において、巻線の均質化モデルに基づいたLPTNへの展開をはかり、シミュレーション評価により提案した最適化手法の有用性を実証したものである。これらの研究は電動機設計解析および電気機器分野において、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 6272 号	氏 名	廣澤 聖士
主論文題名： Computer Vision-based Action Quality Assessment Incorporating Human Expert's Knowledge: Focusing on the Figure Skating Jump (人間の専門知識を適用したコンピュータービジョン手法に基づく 身体動作の質の評価—フィギュアスケートのジャンプを対象に)			
コンピュータービジョン分野における Action Quality Assessment (AQA) タスクは、映像中の人間の動作の品質を評価するものであり、特にスポーツパフォーマンスの評価への応用が期待されている。これまでの AQA 研究では、フィギュアスケートのプログラム全体の映像から最終得点を予測する取り組みが見られたが、個々のジャンプスコアを予測した先行研究はない。ジャンプの得点は、質を示す GOE (Grade of Execution) と難易度に基づく基礎値の合計によって決まるため、高い GOE を獲得する質の高いジャンプは競技で勝利するために不可欠である。しかし、GOE の基準は解釈の余地があり、審判による主観的な評価である。ジャンプの質に関わる特徴を明らかにし、精度の高い予測モデルを開発することは、競技関係者にとって有益だろう。本研究では、トラッキングシステムから得られる運動学的特徴量に加えて、映像特徴量の入力時に競技の専門家である審判と選手の視線情報を活用して冗長な情報を削減し、精度を向上させるモデルを提案することを目的とした。具体的には以下の 3 つの検討事項に取り組んだ。最初に 2 次元 Direct Linear Transformation 法を用いたハンドクラフトベースの運動学的特徴量に基づく機械学習モデルの開発を行った。次に出来栄評価を行う際の専門家(選手・審判)の視覚行動の違いを明らかにした。最後に運動学的特徴量に加えて、専門家の視線を学習することで情報削減を行ったディープラーニングベースのモデルを提案した。 第 1 章では、本研究の背景について概説した。 第 2 章では、3 つの検討事項に基づく関連研究について概説した。 第 3 章では、ハンドクラフトベースの運動学的特徴量に基づき、機械学習モデルを用いて GOE に影響を与える運動学的特徴を明らかにした。具体的には、2019 年世界選手権女子ショートプログラムにおけるダブルアクセルジャンプの水平飛距離、最大跳躍高、着水後の滑走速度を取得し、GOE に影響する 3 つの変数の対比を明らかにするために主成分回帰分析を行った。その結果、水平距離と着水後速度が跳躍高に比べて大きいこと、および着水速度に比べて水平飛距離が大きいことの 2 つの主成分が有意であり、高い GOE に寄与することが明らかとなった。一方で、第 3 章のアプローチでは解釈しやすい特徴量とモデルを使用しているものの、得られた特徴量が大きく関与するのは 6 つの評価基準のうち 2 つであり、残りの評価基準については人間が特徴量を作成することが困難であると考えられる。そこで、放送映像の特徴量を入力特徴量に加えることで、より包括的な評価基準を考慮できるモデルを提案する。放映映像には評価に不要な情報が含まれているにもかかわらず、人間の専門家がジャンプを評価する際には、視覚的に情報を絞り込んで削減することが可能であり、模倣した機構を取り入れることで精度向上が期待できる。 第 4 章では、審判と選手がジャンプを評価する際の視線配置の特徴を明らかにし、視線位置を利用して映像から得られる特徴量を削減する機構を取り入れた予測モデルを提案した。前提となる専門家の視線配置について、選手群と審判群は GOE 評価の判定精度に有意差はないが、視線配置には有意差があり、両者とも上半身に最も視線を配置しつつも、選手は顔に、審判は下肢により注目することが明らかになった。これらの視線位置をモデルに適用したところ、両群の専門家の視線位置を利用した場合に人間の専門家の予測精度とベースラインモデルの精度を上回っており、人間の専門家の知識と数理モデルの能力を組み合わせることで、より高い精度が得られることを実証した。 第 5 章には、結論として各検討事項で得られた内容をまとめ、研究の成果を要約した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6272 号	氏 名	廣澤 聖士
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	青木 義満
副査	慶應義塾大学教授	工学博士	田中 敏幸
	中部大学教授	博士（工学）	山下 隆義
	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	村田 真悟
学士（環境情報学）、修士（健康マネジメント学）廣澤聖士君提出の学位請求論文は「Computer Vision-based Action Quality Assessment Incorporating Human Expert's Knowledge: Focusing on the Figure Skating Jump（人間の専門知識を適用したコンピュータービジョン手法に基づく身体動作の質の評価—フィギュアスケートのジャンプを対象に）」と題し、5章から構成されている。 コンピュータービジョン分野における Action Quality Assessment（AQA）タスクは、映像中の人間の動作の品質を評価するものであり、特にスポーツパフォーマンスの評価への応用が期待されている。これまでの AQA 研究では、フィギュアスケートのプログラム全体の映像から最終得点を予測する取り組みが見られたが、個々のジャンプスコアを予測した先行研究はない。ジャンプの得点は、質を示す GOE（Grade of Execution）と難易度に基づく基礎値の合計によって決まるため、高い GOE を獲得する質の高いジャンプは競技で勝利するために不可欠である。ジャンプの質に関わる特徴を明らかにし、精度の高い予測モデルを開発することは、競技関係者にとって有益である。 本研究では、トラッキングシステムから得られる運動学的特徴量に加えて、映像特徴量の入力時に競技の専門家である審判と選手の視線情報を活用して冗長な情報を削減し、採点予測精度を向上させる機械学習モデルを提案している。2次元 Direct Linear Transformation 法を用いたハンドクラフトベースの運動学的特徴量に基づく機械学習モデルの開発を行った上で、出来栄評価を行う際の専門家（選手・審判）の視覚行動の違いを明らかにしている。更に専門家の視線を学習することで情報削減を行う深層学習モデルを提案している。 第1章では、本研究の背景について概説している。 第2章では、3つの検討事項に基づく関連研究について概説している。 第3章では、ハンドクラフトベースの運動学的特徴量に基づき、機械学習モデルを用いて GOE に影響を与える運動学的特徴を明らかにしている。具体的には、2019 年世界選手権女子ショートプログラムにおけるダブルアクセルジャンプの水平飛距離、最大跳躍高、着氷後の滑走速度を取得し、GOE に影響する 3 つの変数の対比を明らかにするために主成分回帰分析を行っている。また、放送映像の特徴量を入力特徴量に加えることで、より包括的な評価基準を考慮できるモデルを提案している。放映映像には評価に不要な情報が含まれているにもかかわらず、人間の専門家がジャンプを評価する際には、視覚的に情報を絞り込んで削減することが可能であり、模倣した機構を取り入れることで精度向上を実現している。 第4章では、審判と選手がジャンプを評価する際の視線配置の特徴を明らかにし、視線位置を利用して映像から得られる特徴量を削減する機構を取り入れた予測モデルを提案している。選手群と審判群は GOE 評価の判定精度に有意差はないが、視線配置には有意差があり、両者とも上半身に最も視線を配置しつつも、選手は顔に、審判は下肢により注目することを明らかにした。これらの視線位置をモデルに適用し、両群の専門家の視線位置を利用した場合に人間の専門家とベースラインモデルを上回る予測精度を実現している。これにより、人間の専門家の知識と数理モデルの能力を組み合わせることで、より高い予測精度が得られることを実証している。 第5章では、本論文のまとめを述べた後、今後の展望について議論している。 以上要するに、本論文では、フィギュアスケートのジャンプを対象とし、運動学的特徴量及び人間の専門知識を活用することで、動作の質の評価精度を向上させることが可能であることを示しており、画像工学分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6273 号	氏 名	篠原 巧
主論文題名： Secure State Estimation under Sensor Attacks (センサ攻撃下でのセキュア状態推定)			
近年の制御システムの多くは IT インフラに依存しており、物理空間とサイバー空間との相互作用を促進している。一方で、その緊密な連結性ゆえに、悪意あるサイバー攻撃が物理空間に悪影響を及ぼすおそれがある。したがって、制御システムにおいてセキュリティとレジリエンスを確保することは、スマート社会の構築に向けた喫緊の課題である。本研究では、サイバー脅威に対してセキュアかつレジリエントな制御システムを設計・運用することを目的とした。本論文では、特にセンサ観測値に対する悪意あるサイバー攻撃が存在する場合の状態推定問題である「セキュア状態推定問題」を扱い、この問題に対する様々なアプローチを提案した。 本論文の構成は以下のとおりである。 第 1 章では、本研究の背景、関連研究、目的及び概要を述べた。 第 2 章では、セキュア状態推定問題の基本的な概念を示した。本章では、この問題に関して、スパース可観測性インデックスが重要な役割を果たし、この指標が、悪意ある攻撃に対するシステムのレジリエンスの度合いを示すことを説明した。 第 3 章では、システムの状態に関する事前情報を考慮したセキュア状態推定問題を考えた。スパース情報等の三つの事前情報を仮定し、それぞれの事前情報について、セキュア状態推定のための必要十分条件を導出した。これらの条件より、事前情報を考慮することで、攻撃に対するシステムのレジリエンスが増加することが示された。さらに、事前情報を考慮することで、観測ノイズによる推定誤差が低減することを示した。 第 4 章では、攻撃者が任意のセンサ集合を侵害した場合でも攻撃による推定誤差を最小にする最適推定器を提案した。具体的には、システムの状態の可到達集合を考慮することで、最悪推定誤差を最小化する最適推定器を設計した。また、計算量を削減するために、状態可到達集合の区間包近似を用いた推定器も提案した。 第 5 章では、典型的なグラフ構造を持つ無向マルチエージェントシステムについて、システムのサイズとスパース可観測性インデックスとの関係性を解析した。詳細はエージェントのネットワーク構造に依存するが、エージェント数に関する特定の数値が素数の場合にシステムのレジリエンスが向上することを明らかにした。 第 6 章では、サイバーセキュリティの経済的側面を考慮し、セキュア状態推定に向けた二つの問題を分析した。一つ目は、セキュア状態推定を達成しつつ、最小のコストで最適なセンサ配置を決定することを目的とした最適レジリエントセンサ配置問題 (ORSPP) である。もう一つは、最適セキュリティ投資問題 (OSIP) であり、対策の費用対効果を最大化する最適なセキュリティ投資を達成することを目的とした。本章では、どちらの問題も coNP 困難であることを示した。一方で、肯定的な結果として、両問題が多項式時間で解けるための十分条件も導出した。 第 7 章では、本論文の結論と今後の課題を述べた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6273 号	氏 名	篠原 巧
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 滑川 徹
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士 大森 浩充
		慶應義塾大学教授	理学博士 田村 明久
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 井上 正樹
学士(工学), 修士(工学) 篠原巧君提出の学位請求論文は「Secure State Estimation under Sensor Attacks (センサ攻撃下でのセキュア状態推定)」と題し, 7 章から構成されている. 制御システムの多くは IT インフラに依存しており, 物理空間とサイバー空間との相互作用を促進している. その緊密な連結性ゆえに, 悪意あるサイバー攻撃が物理空間に悪影響を及ぼすおそれがある. 制御システムにおいてセキュリティとレジリエンスを確保することは, スマート社会の構築に向けた喫緊の課題である. 本論文は, サイバー脅威に対してセキュアかつレジリエントな制御システムを設計・運用することを目的とし, センサ観測値に対する悪意あるサイバー攻撃が存在する場合の状態推定問題である「セキュア状態推定問題」を制御理論の観点から解析し, 数学的性質を明らかにしている. 第 1 章では, 本研究の背景, 関連研究, 目的及び概要を述べている. 第 2 章では, セキュア状態推定問題の基本的な概念を示している. この問題に関して, スパース可観測性インデックスが重要な役割を果たし, この指標が, 悪意ある攻撃に対するシステムのレジリエンスの度合いを示すことを説明している. 第 3 章では, システムの状態に関する事前情報を考慮したセキュア状態推定問題を解析している. スパース情報等の三つの事前情報を仮定し, それぞれの事前情報について, セキュア状態推定のための必要十分条件を導出している. これらの条件を基に, 事前情報を考慮することで, 攻撃に対するシステムのレジリエンスが向上すると共に, 観測ノイズによる推定誤差が低減することを示している. 第 4 章では, 有界ノイズが存在するシステムを対象に, 攻撃者が任意のセンサ集合を侵害した場合でも攻撃による推定誤差を最小にする最適推定器を提案している. 具体的には, システムの状態の可到達集合を考慮することで, 最悪推定誤差を最小化する最適推定器を設計し, 計算量を削減するために, 状態可到達集合の区間包近似を用いた推定器を提案している. 第 5 章では, 典型的なグラフ構造を持つ無向マルチエージェントシステムについて, システムのサイズとスパース可観測性インデックスとの関係を解析し, エージェント数に関する特定の数値が素数の場合にシステムのレジリエンスが向上することを明らかにしている. 第 6 章では, サイバーセキュリティの経済的側面を考慮した二つの問題を分析している. 一つは, セキュア状態推定を達成しつつ, 最小のコストで最適なセンサ配置決定を目的とした最適レジリエントセンサ配置問題である. もう一つは, 最適セキュリティ投資問題であり, 対策の費用対効果を最大化する最適なセキュリティ投資を目的としている. どちらの問題も coNP 困難であることを数学的に示し, 更に, 両問題が多項式時間で解けるための十分条件をそれぞれ導出している. 第 7 章では, 本論文の結論と今後の課題を述べている. 以上要するに, 本論文はセンサ攻撃下でのセキュア状態推定問題の制御理論的な性質を明らかにするとともに, 効果的なセキュア状態推定・システム設計理論に資する多くの有益な知見を得ており, システム制御分野において, 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 6283 号	氏 名	鈴木 京平
主論文題名：			
A Study of Robust Debiasing Methods for Sparse Modeling: Moreau Enhancement and Beyond (スパースモデリングのための頑健バイアス低減法の研究 — モロー強化とその発展)			
近年、情報技術の多様化に伴い、観測値に外れ値が混在している状況下でも高精度にスパース信号を推定できる手法が切望されている。既存の頑健推定法は、外れ値への頑健性と大域的最適性の間に深刻なトレードオフを抱えている。また、スパース信号推定法には、一般に、互いに相関のある特徴量の一部を取り逃してしまうリスクがある。本研究では、信号処理分野で研究されてきたモロー強化の効果的な利用法を検討するとともに、それを発展させた新しい作用素を定義することにより、これらの問題点を解決する手法の構築を目的としている。 第 1 章では、本研究の背景と動機を述べている。 第 2 章では、主要結果を述べるための準備（凸解析など）を説明している。 第 3 章では、上述したトレードオフ問題の抜本的解決のため、Minimax Concave (MC) 関数（ℓ_1 ノルムに対するモロー強化）に基づく頑健スパース信号推定法を提案している。MC 誤差関数は、大きな絶対誤差に対して一定値を出力するため、外れ値の影響を大幅に低減できる。さらに、MC 関数は「弱凸性」を持つため、チコノフ正則化との併用によりコスト関数全体の凸性を担保できることが、トレードオフ問題解決の鍵となっている。実応用を含む幅広い数値例により、提案法の顕著な頑健性を実証している。 第 4 章では、MC 関数の導関数が原点付近で 0 に漸近しないことに着目し、高雑音環境下でも高性能な推定を達成すべく、雑音をモデル化した補助ベクトルを導入し、雑音と外れ値の統計的性質を考慮した頑健スパース信号推定法を提案している。さらに、MC 関数とチコノフ正則化の併用は、凸性の担保だけでなく、高い相関のある特徴量を取り逃がさない働き（グルーピング効果）をもたらす。統計分野で知られているエラスティックネットと対照的に、外れ値の大きさに関わらず、一定のグルーピング効果が提案法により得られることを明らかにしている。数値例により、提案法が高雑音環境下でも頑健なスパース信号推定を達成することを実証している。 第 5 章では、モロー強化の考え方を発展させた「外分作用素」を新たに定義し、互いに相関のある特徴量を全て高精度に抽出可能な手法を提案している。エラスティックネットよりも優れた性能を持つ Octagonal Shrinkage and Clustering Algorithm for Regression (OSCAR) 法は、信号を過小推定する傾向があり、推定精度の向上が求められていた。本研究で提案する外分作用素は、「MC 関数の（広義の意味での）近接作用素」が「ℓ_1 ノルムの近接作用素の外分」として表現できるという事実に基づいている。OSCAR 法で用いられる正則化項に対する外分作用素が、同正則化項に対するモロー強化の一般化となっていることを明らかにするとともに、推定バイアスが大幅に低減され、推定精度が飛躍的に向上することを数値例により実証している。 第 6 章では、各章の内容を総括し、今後の研究に関する展望を述べている。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6283 号	氏 名	鈴木 京平
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 湯川 正裕			
副査 慶應義塾大学教授 工学博士 池原 雅章			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 滑川 徹			
慶應義塾大学専任講師 博士（工学） 北原 大地			
学士（工学）、修士（工学）鈴木京平君提出の学位論文は「A Study of Robust Debiasing Methods for Sparse Modeling: Moreau Enhancement and Beyond」（スパースモデリングのための頑健バイアス低減法の研究 — モロー強化とその発展）と題し、6 章から構成されている。 近年、情報技術の多様化に伴い、観測値に外れ値が混在している状況下でも高精度にスパース信号を推定できる手法が切望されている。既存の頑健推定法は、外れ値への頑健性と大域的最適性の間に深刻なトレードオフを抱えている。また、スパース信号推定法には、一般に、互いに相関のある特徴量の一部を取り逃してしまうリスクがある。本研究では、信号処理分野で研究されてきたモロー強化の効果的な利用法を検討するとともに、それを発展させた新しい作用素を定義することにより、これらの問題点を解決する手法の構築を目的としている。 第 1 章では、本研究の背景と動機を述べるとともに、主たる貢献について概説している。 第 2 章では、主要結果を述べるための準備として、数学的な基礎事項をまとめている。 第 3 章では、上述したトレードオフ問題の抜本的解決のため、Minimax Concave (MC) 関数（ℓ_1 ノルムに対するモロー強化）に基づく頑健スパース信号推定法を提案している。MC 誤差関数は、大きな絶対誤差に対して一定値を出力するため、外れ値の影響を大幅に低減できる。さらに、MC 関数は「弱凸性」を持つため、チコノフ正則化との併用によりコスト関数全体の凸性を担保できることが、トレードオフ問題解決の鍵となっている。実応用を含む幅広い数値例により、提案法の顕著な頑健性を実証している。 第 4 章では、MC 関数の導関数が原点付近で 0 に漸近しないことに着目することによって、雑音をモデル化した補助ベクトルを導入し、雑音と外れ値の統計的性質を考慮した頑健スパース信号推定法を提案している。MC 関数とチコノフ正則化の併用は、凸性の担保だけでなく、高い相関のある特徴量をまとめて抽出する働き（グルーピング効果）をもたらす。統計分野で知られるエラスティックネットとは対照的に、提案法が、外れ値の大きさに依らず、一定のグルーピング効果を与えることを理論的に証明している。数値例により、提案法が高雑音環境下でも頑健なスパース信号推定を達成することを実証している。 第 5 章では、モロー強化の考え方を発展させた「外分作用素」を新たに定義し、互いに相関のある特徴量を全て高精度に抽出可能な手法を提案している。エラスティックネットよりも優れた性能を持つ Octagonal Shrinkage and Clustering Algorithm for Regression (OSCAR) 法は、信号を過小推定する傾向があり、推定精度の向上が求められていた。本研究で提案する外分作用素は、「MC 関数の（広義の意味での）近接作用素」が「ℓ_1 ノルムの近接作用素の外分」として表現できるという事実に基づいている。OSCAR 法で用いられる正則化項に対する外分作用素が、同正則化項に対するモロー強化の一般化となっていることを明らかにするとともに、推定バイアスが大幅に低減され、推定精度が飛躍的に向上することを数値例により実証している。 第 6 章では、各章の内容を総括し、今後の研究に関する展望を述べている。 以上要するに、本論文では、スパースモデリングの頑健性と推定精度を大きく向上させる手法に加えて、様々な作用素の正則化効果を強化し得る数学的な道具立て（外分作用素）を新しく提案しており、信号処理工学分野において、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 6284 号	氏 名	松井 拓郎
主論文題名：			
撮影環境起因で劣化した画像の特徴を考慮した深層学習による画像復元			
画像を撮影・閲覧・利用する機会は個人や法人を問わず増えている．個人では，SNS の流行により写真撮影が身近になり，より美しい景色や人物が精細に写っている写真が求められている．法人では，画像認識や物体検出など画像から何らかの情報を抽出し業務やサービスの効率化や高度化を図ることが多い．しかし，撮影された画像には様々な要因によって劣化が生じる．画像劣化の要因を取り除き，画像の視認性を向上させ，画像に含まれる有用な情報を抽出しやすく強調することは，画像処理の最も重要な役割の一つである． 画像劣化の要因は「撮影環境によるもの」と「情報処理時に起きるもの」に大別できる．本論文では，前者の撮影場所の環境によって劣化した画像の復元について取り扱う．具体的には，雨すじの除去，フェンス除去，低照度画像強調を取り扱う．また，一般的に高精度とされる深層学習を用いた手法に焦点を当てる．深層学習の精度を高めるには，劣化画像の特徴を考慮したネットワーク構造，前処理や後処理，データセット，損失関数の設定が重要となる． 第 1 章では，研究背景と研究目的について述べた． 第 2 章では，画像劣化の種類について説明し，空間フィルタリング，画質品質評価手法，深層学習の基礎理論について概説した． 第 3 章では，雨すじ除去をテーマに，複数の雨合成モデルを考慮した敵対的生成ネットワークを用いた手法を提案した．従来法では，画像の低周波部分の情報を考慮しないことによる不自然な色彩や，十分な雨画像モデルを想定できていないことによる性能の依存性の問題があった．提案法では，敵対的生成ネットワークをベースに入力である雨画像と推定雨ノイズである残差画像の間の関係を学習させた．さらに，様々な雨モデルを含む合成雨画像データセットを作成することで自然画像でも高い精度を実現できた． 第 4 章では，フェンス除去をテーマに，フェンスの構造的特徴を考慮した深層学習を用いた手法を提案した．従来法では，画像内の情報が少ないため，フェンスの検出が十分でないことやそのロバストさが問題となっていた．提案法では，検出と除去それぞれに適したネットワーク構造とデータセットを考案した．さらに，前処理として空間フィルタリングを組み込むことで検出と補間の性能が向上した． 第 5 章では，低照度画像強調をテーマに，低照度画像の特徴を考慮した敵対的生成ネットワークをベースにした手法を提案した．従来法では，複数の複雑なサブネットワークで構成されており精度は高いが処理時間が長かった．提案法ではネットワーク構造をシンプルにする代わりに適切な前処理や学習モジュールの導入を行うことで処理時間と精度のトレードオフを解消することができた． 第 6 章では，本研究によって得られた成果を結論としてまとめ，今後の展望を述べた．			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6284 号	氏 名	松井 拓郎
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 工学博士 池原 雅章			
副査 慶應義塾大学教授 工学博士 萩原 将文			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 青木 義満			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 久保 亮吾			
学士(工学), 修士(工学) 松井拓郎君提出の学位請求論文は「撮影環境起因で劣化した画像の特徴を考慮した深層学習による画像復元」と題し, 6 章から構成されている。 画像を撮影・閲覧・利用する機会は個人や法人を問わず増えている。個人では, SNS の流行により写真撮影が身近になり, より美しい景色や人物が精細に写っている写真が求められている。法人では, 画像認識や物体検出など画像から何らかの情報を抽出し業務やサービスの効率化や高度化を図ることが多い。しかし, 撮影された画像には様々な要因によって劣化が生じる。画像劣化の要因を取り除き, 画像の視認性を向上させ, 画像に含まれる有用な情報を抽出しやすく強調することは, 画像処理の最も重要な役割の一つである。 本研究では撮影場所の環境によって劣化した画像の復元について取り扱う。具体的には, 雨すじの除去, フェンス除去, 低照度画像強調を取り扱う。また, 一般的に高精度とされる深層学習を用いた手法に焦点を当てる。深層学習の精度を高めるために, 劣化画像の特徴を考慮したネットワーク構造, 前処理や後処理, データセット, 損失関数の設定が重要であり, 従来法に比べ高い復元精度と高速化が実現できている。 第 1 章では, 研究背景と研究目的について述べている。 第 2 章では, 画像劣化の種類について説明し, 空間フィルタリング, 画質品質評価手法, 深層学習の基礎理論について概説している。 第 3 章では, 雨すじ除去を目的に, 複数の雨合成モデルを考慮した敵対的生成ネットワークを用いた手法を提案している。従来法では, 画像の低周波部分の情報を考慮しないことによる不自然な色彩や, 十分な雨画像モデルを想定できていないことによる性能の依存性の問題があった。提案法では, 敵対的生成ネットワークをベースに入力である雨画像と推定雨ノイズである残差画像の間の関係を学習している。さらに, 様々な雨モデルを含む合成雨画像データセットを作成することで, 自然画像でも高い復元精度を実現できている。 第 4 章では, フェンス除去をテーマに, フェンスの構造的特徴を考慮した深層学習を用いた手法を提案している。従来法では, 画像内の情報が少ないため, フェンスの検出が十分でないことやそのロバスト性が問題となっていた。提案法では, 検出と除去それぞれに適したネットワーク構造とデータセットを考案した。さらに, 前処理として空間フィルタリングを組み込むことで検出と補間の性能が向上することを示している。 第 5 章では, 低照度画像強調をテーマに, 低照度画像の特徴を考慮した敵対的生成ネットワークをベースにした手法を提案している。従来法は, 複数の複雑なサブネットワークで構成されており精度は高いが処理時間が長いという問題があった。提案法ではネットワーク構造をシンプルにする代わりに適切な前処理や学習モジュールの導入を行うことで処理時間と精度のトレードオフを解消することができた。 第 6 章では, 本研究によって得られた成果を結論としてまとめ, 今後の展望を述べている。 以上要するに, 本研究は深層学習による撮影環境起因で劣化した画像の復元方法を提案したものであり, 従来法に比べ高品質な画像の復元を実現しており, 画像工学分野において工学上, 工業上寄与するところが少なくない。 よって, 本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6295 号	氏 名	富田 拓希
主論文題名： On analytic properties and canonical constructions of absolute zeta functions (絶対ゼータ関数の解析的性質および標準的構成について)			
絶対ゼータ関数は、$\mathbf{F}_1$ スキームという幾何的対象に付随するゼータ関数として導入された関数である。$\mathbf{F}_1$ スキームは整数論で重要な未解決問題の一つである Riemann 予想に対して強力なアプローチを与えると期待されている。本論文では、絶対ゼータ関数の解析的性質および幾何的対象からの標準的な構成に関する以下の 3 つの結果を示す。 1 つ目の結果では、Connes-Consani による振れなしネーター $\mathbf{F}_1$ スキームに対する絶対ゼータ関数の絶対 Euler 積と呼ばれる無限積表示の各因子の指数を明示的に与える。さらに、その絶対収束領域を $\mathbf{F}_1$ スキームの $\mathbf{Z}$ リフトの相対次元で記述する。これらは、一般のスキームに対する絶対ゼータ関数が絶対 Euler 積を持つという黒川の示唆(2016)を部分的に肯定的に解決したものである。 2 つ目の結果では、ある条件を満たす $[1, \infty)$ 上の解析関数からなる可換 $\mathbf{C}$ 代数 A を定義し、その元 f に対する絶対ゼータ関数の 3 つの解析的性質を示す。まず、絶対ゼータ関数の対数が f の反復 Euler 微分値の母関数と一致することを示す。次に、絶対ゼータ関数の対数微分が Connes-Consani の結果に現れるある特定の積分と一致することを示す。最後に、前述の 1 つ目の結果の解析的な一般化として、絶対ゼータ関数が絶対 Euler 積表示を持つことを示す。 3 つ目の結果では、スキームの有理点の個数からなる数列を部分的に補間する天井／床 Puiseux 多項式を導入し、スキームから絶対ゼータ関数を構成する新たな方法を与える。この手法では、有理点の個数からなる数列を全て補間する先行研究と違い、対応する $\mathbf{F}_1$ スキームが分からないような一般の $\mathbf{Q}$ 上分離的有限型スキームから絶対ゼータ関数を構成することができる。特に、この手法により、$\mathbf{Q}$ 上の楕円曲線に対して絶対ゼータ関数のペアを構成でき、それらがその同種類に依らないことが分かる。 なお、2 つ目と 3 つ目の結果は平川義之輔氏との共同研究に基づいている。2 つ目の結果について、申請者は A の定義および解析的性質の証明や計算などに貢献した。3 つ目の結果について、申請者は天井／床 Puiseux 多項式のアイデアの提起および天井／床 Puiseux 多項式の計算などに貢献した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6295 号	氏 名	富田 拓希
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（数理科学） 坂内 健一
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 栗原 将人
		慶應義塾大学教授	博士（理学） 田中 孝明
		慶應義塾大学教授	博士（数理科学） 勝良 健史
学士(理学)、修士(理学) 富田拓希君提出の学位請求論文は、「On analytic properties and canonical constructions of absolute zeta functions（絶対ゼータ関数の解析的性質および標準的構成について）」と題し、本文は全7章 18 節（その内、付録 2 章 3 節）からなる。 整数論において、素数の分布など重要な数論的量を内包する各種ゼータ関数を定義して解析的性質を調べることは重要な課題である。ゼータ関数の中心的な予想である Riemann 予想を解決する枠組みとして、従来の代数多様体を拡張した「F₁ スキーム」による幾何学が、予想として提唱されている。この予想的枠組みを仮定すると、有理数体上定義された代数多様体が与えられたとき、還元として F₁ スキームが構成される。Soulé は、各素数 p で法 p 冪有理点の個数を補完する多項式(補完多項式)が存在する場合に、この多項式を用いて「絶対ゼータ関数」を定義した。これは、還元として得られる F₁ スキームのゼータ関数と解釈できる。この構成は、Connes-Consani や Deitmer-小山-黒川など、多くの研究者により拡張された。本論文で著者は、上記絶対ゼータ関数の理論を包括的に発展させ、3つの側面で重要な成果を得た。最初の成果は、Connes-Consani の絶対ゼータ関数の絶対 Euler 積表示の証明である。2つ目の成果は絶対ゼータ関数の、補完多項式とは限らないより一般の実解析関数に対する定義の拡張と、絶対 Euler 積表示など各種解析的性質の証明である。3つ目の成果は Puiseux 多項式を用いた補完多項式の一般化の導入により、絶対ゼータ関数の定義を、有理数体上定義された一般の代数多様体に拡張したことである。 本論文の第 1 章は序論であり、論文の概要が述べられている。1.1 節では研究の背景が述べられており、Soulé、Connes-Consani、Deitmer-小山-黒川などによる絶対ゼータ関数の定義と、黒川が存在を示唆した絶対 Euler 積表示などが述べられている。1.2 節では本論文の 3 つの主結果が述べられている。第 2 章では F₁ スキームの概要が述べられ、2.1 節で F₁ スキームの哲学、2.2 節と 2.3 節で、モノイドスキームの一般論と、振れネーター F₁ スキームという Connes-Consani によって実際に特殊な場合に定義された F₁ スキームの理論が述べられている。第 3 章では最初の主結果が述べられている。3.1 節で Connes-Consani によって定義された振れネーター F₁ スキームに対する絶対ゼータ関数の定義と、最初の主結果である絶対 Euler 積表示の形が述べられている。3.2 節で絶対 Euler 積表示が証明され、3.3 節ではこの表示を用いて幾つかの例について、他の絶対ゼータ関数との比較が述べられている。第 4 章では 2 つ目の主結果が述べられている。4.1 節では、良い実解析関数のクラスと、対応する絶対ゼータ関数の定義が述べられている。4.2 節では絶対ゼータ関数の母関数としての解釈、4.3 節では対数部分の積分表示、4.4 節ではこの場合の絶対 Euler 積表示が証明されている。第 5 章では 3 つ目の主結果が述べられている。5.1 節で天井/床多項式の一般論を述べた後、5.2 節で Puiseux 多項式と有理数体上の一般の代数多様体に対する絶対ゼータ関数の構成、楕円曲線の場合の具体例の計算が述べられている。付録 A では楕円曲線の絶対ゼータ関数のさらなる具体例、付録 B では 4 章の成果の別証が与えられている。 本論文で著者は、従来特殊な場合にしか研究されてこなかった絶対ゼータ関数の定義を、より一般的な状況まで拡張し、絶対 Euler 積表示など精密な解析的性質を証明することに成功した。また幾何学的な観点においては、楕円曲線など、一般の代数多様体を扱える枠組みを構築した。これらの成果により、この分野の学術的発展に大きく貢献している。以上の理由により、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られる。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6296 号	氏 名	佐藤 岳
主論文題名：			
試験管内再構成による解糖系とタンパク質合成系の生化学システム間相互作用の解明			
細胞は、解糖系やタンパク質合成系のような生化学システムが協同して働くことで、恒常性を維持し、自己複製している。精製タンパク質を用いた試験管内再構成により、各生化学システムがどのように機能しているかの理解は進んできたが、複数のシステムが共役した場合の性質は実験的にはほぼ検証されていなかった。本論文では、解糖系とタンパク質合成系との共役系を試験管内再構成し、両者の相互作用を解析した。 第 1 章では、多くの生命に保存された重要な生化学システムを中心に試験管内再構成例や細胞内における他の生化学システムとの関わりを俯瞰し、解糖系とタンパク質合成系の共役系を再構成することの重要性を述べた。 第 2 章では、解糖系やタンパク質合成系を固定した濃度条件で用いることで、試験管内で両者の相互作用を調べた。解糖系が ADP とリン酸から ATP を合成し、タンパク質合成系は ATP を ADP とリン酸に変換するため、両者は化学量論比的につり合い容易に共役すると想定されていた。実験と生化学反応シミュレーションの組み合わせ解析により、実際には解糖系上流の ATP 消費とタンパク質合成系の ATP 消費とが競合することで、速度論的に共役が阻害される代謝綱引き現象が生じることを明らかにした。 第 3 章では、解糖系上流の 2 回の ATP 消費反応同士の競合に着目した。先行する理論研究で指摘されていたように、より上流の ATP 消費反応を抑えることで共役は促進された。また、解糖系の中間産物の効果に着目したところ、解糖系下流基質をグルコースと共添加することによってタンパク質合成系との共役が円滑化することを示した。また、ここまでの結果から解糖系とタンパク質合成系の共役メカニズムを提唱し、代謝綱引きの帰結とその生命における汎用的な性質について考察した。 第 4 章では、本研究を総括し、今後の展望を述べた。 まとめると、本論文では、解糖系とタンパク質合成系の共役系を試験管内再構成し、理論モデルと組み合わせることでシステム間に存在する代謝綱引き現象を明らかにした。本研究は、細胞の構成的な理解に貢献するとともに、細胞そのものの試験管内再構成にむけた重要な材料を開発するものである。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6296 号	氏 名	佐藤 岳
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（生命科学） 藤原 慶
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 宮本 憲二
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 舟橋 啓
		慶應義塾大学教授	博士（地球環境科学） 土居 信英
		慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学） 堀 豊
学士（理学）修士（理学）佐藤岳君提出の学位請求論文は、「試験管内再構成による解糖系とタンパク質合成系の生化学システム間相互作用の解明」と題し、全4章から成っている。 生命科学技術の発展と知識の蓄積に伴い、生命の基本である細胞そのものを生体分子から再構成する研究を通し、生命の理解や拡張可能性を追求しようとするボトムアップ合成生物学に注目が集まってきている。これまでのボトムアップ合成生物学では、細胞内にある解糖系やタンパク質合成系といった部分的な生化学システムに着目した研究が行われてきたが、複数のシステムが共役した場合の性質は実験的にはほぼ検証されていなかった。また、理論解析が行われてはいたものの、実験データとの対応による検証は不十分であった。本学位論文では、生命の基盤的な生化学システムである解糖系とタンパク質合成系を題材に、両者の共役系を試験管内再構成し、その相互作用の解析実験と生化学反応シミュレーションの結果を対応させることで、生化学システム間の共役によって生じる相互作用の解明を行った。 第1章では、解糖系とタンパク質合成系の特徴と研究史を中心に、試験管内再構成例や細胞内における他の生化学システムとの関わりを俯瞰し、解糖系とタンパク質合成系の共役系を再構成すること、並びにその相互作用を理解することの重要性を述べている。 第2章では、解糖系やタンパク質合成系を固定した濃度条件で用いることで、試験管内で両者の相互作用を調べた。解糖系がADPとリン酸からATPを合成し、タンパク質合成系はATPをADPとリン酸に変換するため、両者は化学量論比的につり合い容易に共役すると想定されていた。しかし、実験と生化学反応シミュレーションの組み合わせ解析により、実際には解糖系上流のATP消費とタンパク質合成系のATP消費とが競合することで、速度論的に共役が阻害される代謝綱引き現象が生じることを明らかにした。 第3章では、解糖系上流の2回のATP消費反応同士の競合に着目した。先行する理論研究で示唆されていた結果を裏付けるように、最上流のATP消費反応を抑えることで共役が促進されることを実験的に示した。また、解糖系の中間産物の効果に着目し、解糖系下流基質をグルコースと共添加することによってタンパク質合成系との共役が円滑化することを示した。また、本研究で確立された糖から得たエネルギーでタンパク質を合成する精製要素系が、系の部分的な要素群を合成可能なことを示した。さらに、代謝綱引きの帰結とその生命における汎用的な性質について考察するとともに、解糖系とタンパク質合成系の共役メカニズムを提唱した。 第4章では、本研究の総括と今後の展望を述べている。特に、生体分子から細胞を再構成しようとする研究における本研究の位置づけ、今後解決すべき課題、そして代謝綱引き現象の一般性に基づいて生命現象が理解される可能性について述べている。 以上、本論文の成果は、解糖系とタンパク質合成系の共役系の試験管内再構成を達成し、その成果による実験系と計算機による理論解析を組み合わせることで、生化学システム間に存在する相互作用の一端を明らかにしたものである。本論文は、細胞の構成的な理解に貢献するとともに、細胞そのものの試験管内再構成にむけた重要な材料を開発するものであり、ボトムアップ合成生物学の発展に寄与するものであるといえる。 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 6297 号	氏 名	グオン スンイール
主論文題名： Fabrication of Optically Functional Organic-Inorganic Hybrid Thin Films for Controlling Solar Radiation through Glass Windows (ガラス窓を通る太陽放射の制御に向けた光機能性有機-無機ハイブリッド薄膜の作製)			
建物のなかで窓ガラスは光・熱エネルギーの出入りが最も多い構成要素である。建物内で消費されるエネルギーのうち窓ガラスによる損失分は約 10%にも上る。窓ガラスを通して建物内に取り込まれる太陽放射は幅広い波長帯をもつ電磁波であり、可視光線は室内照明に必要なエネルギーを低減させる一方、赤外線は熱として取り込まれ空調に必要なエネルギーを増加させる。そこで建物用の窓ガラスに光機能性薄膜をコートすると、室外からの太陽放射と室内からの熱放射の双方を制御できエネルギー損失を抑えることが可能となる。本研究では、有機-無機ハイブリッド材料を用いて反射防止機能とサーモクロミック機能を設計し、それぞれの合成プロセスに工夫を凝らして、可視光線および赤外線透過率の制御性に優れた薄膜を実現することを目指した。 第 1 章では、本研究の背景、反射防止機能およびサーモクロミック機能の発現機構、これらの機能を有する薄膜の作製方法ならびに応用分野などを説明した。 第 2 章では、本研究で使用した各種原料試薬に関する情報、薄膜の作製に用いた装置、さらに薄膜の評価に用いた各種分析装置の測定原理と使用機器の情報について述べた。 第 3 章では、三種類のコーティング技術にそれぞれ交互積層法を組み合わせ、二酸化ケイ素 (SiO_2) と有機ポリマー (ポリ塩化ジアリルジメチルアンモニウム, PDDA) からなる反射防止ハイブリッド薄膜を作製した。とくに超音波スプレー技術と組み合わせた場合、SiO_2 層における微粒子の凝集抑制と層表面の均一化に顕著な効果が現れた。その結果、膜厚 120 nm, 表面粗さ 6.9 nm の PDDA/SiO_2 ハイブリッド薄膜が得られ、可視光領域で 99%の最大透過率を示した。 第 4 章では、単斜晶型二酸化バナジウム ($\text{VO}_2(\text{M})$) の 68 °Cにおける絶縁体-金属相転移を利用したサーモクロミック薄膜の作製について述べた。水熱合成、ポストアニリング、ボールミル粉砕を経て得られた $\text{VO}_2(\text{M})$ ナノ粒子と別の有機ポリマー (ポリビニルピロリドン, PVP) をエタノールに分散させコート液を調製した。基板には透明電極付きガラスを採用し、スピン法でコート液を塗布して $\text{VO}_2(\text{M})/\text{PVP}$ ハイブリッド薄膜を得た。電極に電圧を印加して温度制御しながら薄膜の透過率を測定し、波長 1650 nm の赤外線に対して 19.3%の優れた変調効率を示すことを明らかにした。 第 5 章では、前章で得られた薄膜のさらなる機能向上を目指し、タングステンをドーピングした $\text{VO}_2(\text{M})$ ナノ粒子を合成して相転移温度を 45 °Cまで低下させた。可視光透過率を改善するために屈折率の低い SiO_2 微粒子を混ぜて PVP に分散させ、柔軟な透明電極付きプラスチック基板上に成膜し、その性能を評価した。 第 6 章では、各章で述べた内容を要約し、本研究の総括的な結果をまとめた。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6297 号	氏 名	グオン スンイール
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 藤原 忍
	副査	慶應義塾大学准教授	工学博士 二瓶 栄輔
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 緒明 佑哉
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 伴野 太祐
学士（工学）、修士（工学）グオン スンイール君提出の学位請求論文は「Fabrication of Optically Functional Organic-Inorganic Hybrid Thin Films for Controlling Solar Radiation through Glass Windows」（ガラス窓を通る太陽放射の制御に向けた光機能性有機-無機ハイブリッド薄膜の作製）と題し、6 章から構成されている。 窓ガラスは建物の構成要素のなかで最も光・熱エネルギーの出入りが多く、建物内で消費されるエネルギーのうち約 10%を損失させてしまう。窓ガラスを通過する太陽放射は幅広い波長帯をもつ電磁波であり、可視光線は室内照明に必要なエネルギーを低減させるが、赤外線は熱として取り込まれ空調に必要なエネルギーを増加させる。そこで窓ガラスに光機能性薄膜をコートすると、室外からの太陽放射と室内からの熱放射の双方を制御できエネルギー損失を抑えることができる。本研究では、有機-無機ハイブリッド材料を用いて反射防止機能とサーモクロミック機能を設計・合成し、可視光線および赤外線透過率の制御性に優れた薄膜を実現することを目指している。 第 1 章では、本研究の背景、反射防止機能およびサーモクロミック機能の発現機構、これらの機能を有する薄膜の作製方法ならびに応用分野などを説明している。 第 2 章では、原料試薬、薄膜作製装置、各種分析装置の詳細について述べている。 第 3 章では、シリカ (SiO_2) と有機ポリマー（ポリ塩化ジアリルジメチルアンモニウム, PDDA）からなる反射防止ハイブリッド薄膜およびそのコーティング技術を開発している。とくに、超音波スプレー法と交互積層法を組み合わせた作製技術では、SiO_2 微粒子の凝集抑制と SiO_2 層の平滑化に成功しており、結果として可視光領域で 99%の最大透過率を示す PDDA/SiO_2 ハイブリッド薄膜が得られている。 第 4 章では、水熱由来の前駆粉体に後処理を施して得られた単斜晶酸化バナジウム ($\text{VO}_2(\text{M})$) ナノ粒子と有機ポリマー（ポリビニルピロリドン, PVP）をエタノールに分散させ、透明電極付きガラス基板にスピコートすることで $\text{VO}_2(\text{M})/\text{PVP}$ ハイブリッド薄膜を作製している。温度を制御しながら測定した透過率スペクトルでは、68 °C以上で $\text{VO}_2(\text{M})$ の絶縁体-金属相転移に起因する赤外線透過率の低下を観測し、波長 1650 nm において変調効率 19.3%の優れたサーモクロミック性能を引き出している。 第 5 章では、前章で得られた薄膜の性能向上を目指し、タングステンをドーブした $\text{VO}_2(\text{M})$ ナノ粒子を合成して相転移温度を 45 °Cまで低下させている。また、可視光透過率を改善するために屈折率の低い SiO_2 微粒子を混ぜて PVP に分散させ、柔軟な透明電極付きプラスチック基板上に製膜し、その性能を評価している。 第 6 章では、各章で得られた成果をまとめ、本論文全体の総括を述べている。 以上要するに、本論文では窓ガラスにおける太陽放射の透過を制御する光学薄膜として反射防止薄膜とサーモクロミック薄膜を開発するとともに、使用素材の組み合わせと適切な製膜プロセスの採用によりそれらの性能が高められることを明らかにしており、無機材料工学分野において、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 6298 号	氏 名	大津留 豪
主論文題名： Resource Allocation in Terrestrial and Non-terrestrial Networks for Sixth Generation Mobile Communications (第 6 世代移動通信システムにおける地上系・非地上系ネットワークの リソース割り当て)			
地上ネットワーク(TN)と非地上ネットワーク(NTN)の発展に伴い、次世代移動通信システムへの統合の機運が高まっている。ひっ迫した周波数資源を有効利用し、bit あたりの単価を低減するためにシステムスループットを向上させることが重要である。そこで本研究では地上ネットワークおよび非地上ネットワークにおける無線リソース割り当て方式を提案し、そのスループット特性や収容ユーザ数特性を評価している。 第 1 章では、TN や NTN で利用されている多重接続方式について紹介した後に、TN におけるスケジューリング方式および NTN におけるリソース割当方式について概説し、最後に研究の動機を述べた。 第 2 章では、分散アンテナ伝送(DAT)におけるスケジューリング手法について述べた。DAT におけるスケジューリング方式では、多数の分散アンテナに由来する計算量の増大が問題となる。本章では、低計算量のラウンドロビン(RR)スケジューリングに基づいたスケジューリング方式を提案した。提案 RR スケジューリングでは、各マクロセルに対して割当シーケンスの初期位相を順次選択することでマクロセル間の干渉を緩和した。また、割当シーケンスにおけるユーザ組合せに関して、マクロセル内で互いに干渉するユーザ組合せを、推定スループットから計算される Q 値に基づいて除去することで、マクロセル内における干渉低減についても実現した。計算機シミュレーションにより、従来の移動通信システムに利用されているプロポーショナルフェア(PF)スケジューリングと比較して、提案 RR スケジューリングが、計算の複雑さ、ユーザ間の公平性、およびシステムスループットの点に関して、一定の条件下で優れていることを明らかにした。 第 3 章では、次世代高スループット衛星(HTS)のためのリソース割当について述べた。次世代 HTS では、デジタルチャネライザと呼ばれる衛星搭載機器により、隣接ビームとの間での周波数帯域を共有し、柔軟なリソース割当を行うことができる。そのため、現在のビームに対する割当帯域幅は、前のビームに対する割当帯域幅の影響を受ける。本章では、周波数資源割当問題を、ビームインデックスに対する有限マルコフ決定過程としてモデル化し、その後、Q 学習アルゴリズムを用いた周波数リソース割当方式を提案した。提案した割当方式では、十分な事前学習により、計算量を低減することが可能である。また、最適化の目的関数として、システムスループットに対する関数、割当ユーザ数に対する関数、および同時最適化目的とした結合評価関数を導入した。計算機シミュレーションにより、提案した Q 学習を用いた周波数リソース割当方式が準最適解を達成することを明らかにした。 第 4 章では、各章の結論を整理し、本研究の成果を要約した。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6298 号	氏 名	大津留 豪
論文審査担当者： 主査 慶應義塾大学教授 博士（工学） 眞田 幸俊			
副査 慶應義塾大学教授 工学博士 池原 雅章			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 大槻 知明			
慶應義塾大学教授 博士（工学） 久保 亮吾			
学士（工学）、修士（工学）大津留豪君提出の学位請求論文は「Resource Allocation in Terrestrial and Non-terrestrial Networks for Sixth Generation Mobile Communications」（第6世代移動通信システムにおける地上系・非地上系ネットワークの資源割り当て）と題し、4章から構成されている。 非地上系ネットワーク（NTN）の発展に伴い、次世代移動通信システムへの NTN の統合の機運が高まっている。第6世代移動通信では低軌道衛星などに携帯基地局が搭載され、地上系ネットワーク（TN）と NTN の融合が行われると予想される。そして、移動通信のカバーエリアを拡大するとともにビットあたりのコストを低減することが期待されている。本研究ではこの課題を解決するために、TN および NTN における無線リソース割り当て方式を提案し、その特性を評価している。 第1章では、多元接続技術ならびに TN および NTN におけるリソース割り当て方式についてその概要を説明するとともに、本研究の背景と研究の位置づけを概説しその目的を述べている。 第2章では、分散アンテナシステムにおけるリソース割り当て方式について検討している。分散アンテナにおけるリソース割り当ては、多数の分散アンテナに由来する計算量の大きさが課題となる。提案する方式はラウンドロビン（RR）方式を元にしており、計算量を低減することができる。そこで各マクロセルにおける RR 方式の割り当て系列の初期位相を調節することによりシステムスループット特性を改善する方式を提案し、その改善度を明らかにしている。またマクロセル間で大きな干渉が発生するユーザ割り当てを除外し、マクロセル内における干渉を低減する方式も提案している。そしてシステムスループット特性の改善度とユーザ間の公平性のトレードオフの関係を明らかにしている。 第3章では次世代高スループット衛星（HTS）のためのリソース割り当て方式を提案している。次世代 HTS では、デジタルチャネライザと呼ばれる衛星搭載機器により、隣接ビームとの間で周波数帯域を共有し柔軟なリソース割り当てを行うことができる。そしてあるビームに対する割り当て帯域幅は、直前に割り当てが行われたビームの帯域幅の影響を受ける。本研究では周波数資源割り当て問題を、ビームインデックスに対する有限マルコフ決定過程としてモデル化し、Q学習アルゴリズムを用いた周波数リソース割り当てを行う方式を提案している。また、最適化の目的関数として、システムスループットに対する評価関数と割り当てユーザ数に対する評価関数を同時最適化する結合評価関数を導入している。そして、提案したQ学習を用いた周波数リソース割り当て方式が準最適解を達成することを明らかにしている。 第4章では、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するとともに、移動通信システムのリソース割り当て方式の展望について言及している。 以上要するに、本論文では第6世代移動通信システムにおける TN・NTN のリソース割り当てについて検討しており、無線通信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 6299 号	氏 名	柴田 洋平
主論文題名： Cell Optimization Methods for HAPS Mobile Communications (HAPS モバイル通信におけるセル最適化)			
超広域のカバーエリア、災害に強いネットワークを実現する新たな移動通信プラットフォームとして成層圏プラットフォーム (HAPS: High-Altitude Platform Station) への期待が高まっている。高度 20km の成層圏を飛行する気球、飛行機、飛行船などの機体に無線機を搭載することで、地上ネットワークで用いられているスマートフォンを用いて通信を行うことができる。HAPS モバイル通信において、広範囲のサービスエリアを HAPS によりカバーし、十分な通信容量を確保するためにはマルチセル構成が必要である。HAPS では機体の性能に応じて許容可能な無線機の重量や消費電力が異なるため、様々なセル数が想定される。一方、これまでの研究で搭載可能なセル数に応じてどのようなセル構成を実現すべきかについての検討は十分に行われていない。また、広域なカバレッジ内において実際にはユーザ分布に偏りや、災害時には被災エリアにおいて平時とは異なるトラフィック需要が発生することも想定される。ユーザ分布等に応じて各セルを個別に制御することで、より高度な通信サービスを提供することができるが、最適化すべきアンテナパラメータ数の増加が課題である。さらに、HAPS が地上ネットワークと同一の周波数を用いる場合、端末はそのまま HAPS に接続できるが、HAPS から地上ネットワークに与える干渉が問題となる。本論文では、これらの課題に対応するための、マルチセル構成における HAPS セル最適化手法を提案した。 1 章は序論であり、研究背景および目的について説明し、本論文の構成を紹介する。 2 章では、HAPS モバイル通信におけるエリア設計に関する既存研究を紹介する。 3 章では、遺伝的アルゴリズムを用いた任意のセル数に適用可能なセル構成の最適化手法を提案し、セル数に応じた最適化セル構成を明らかにした。また、送信電力の影響についても検討し、カバーエリアおよびスループット特性との関係を明らかにした。 4 章では、様々なユーザ分布に対応するため、共進化アルゴリズムを用いた、探索範囲削減ステップと最適化ステップから成る 2 段階動的セル制御アルゴリズムを提案した。 5 章では、地上ネットワークとの周波数共存シナリオにおける、地上ネットワークへの干渉を考慮した HAPS のセル最適化アルゴリズムを提案した。 6 章は結論であり、本研究の統括を述べている。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6299 号	氏 名	柴田 洋平
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 大槻 知明
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 重野 寛
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 眞田 幸俊
	Nanjing University of Posts and Telecommunications, Ph.D. Guan Gui		
学士（工学）、修士（工学）、柴田洋平君提出の学位請求論文は、「Cell Optimization Methods for HAPS Mobile Communications（HAPS モバイル通信におけるセル最適化）」と題し、全 6 章から構成されている。 高度約 20 km の成層圏を飛行する気球、飛行機、飛行船などの機体に無線機を搭載することで、地上ネットワークで用いられているスマートフォンを用いて通信できる HAPS（High-Altitude Platform Station）は、超広域のカバーエリア、災害に強いネットワークを実現する新たな移動通信プラットフォームとしての期待が高まっている。広範囲のサービスエリアを HAPS によりカバーし、十分な通信容量を確保するためには、複数のセルを用いるマルチセル構成が有効である。しかし、マルチセル構成では多くのアンテナパラメータを決定する必要があるため、サービスエリア設計が困難になる課題がある。本論文では、この問題を解決するため、遺伝的アルゴリズムを用いたセル設計手法を提案している。 第 1 章は序論であり、研究背景として HAPS モバイル通信について紹介した後、本研究の位置付けについて述べている。 第 2 章では、HAPS のみによるエリア設計および地上システムとの共存シナリオについて、従来法を紹介し、HAPS のエリア設計における課題について述べている。 第 3 章では、搭載可能なペイロード装置の重量や許容消費電力などの機体の性能により搭載できるセル数は機体により異なるため、HAPS スタンドアロンシナリオを前提として、遺伝的アルゴリズムを用いた任意のセル数に適用可能なセル構成の最適化手法を提案している。シミュレーションにより、従来の最適化を伴わないパラメータ決定手法と比べて周波数利用効率が改善することを示した。また、セル数に応じた最適セル構成を明らかにし、カバー範囲が広がるほど多くのセル数が必要であることを示した。さらに、送信電力の影響についても検討し、カバーエリアおよびスループット特性との関係を明らかにした。 第 4 章では、様々なユーザ分布を考慮して各セルを独立に制御することで、よりエリア全体としての通信品質を改善する方法について検討している。各セルを独立に制御することによるパラメータ組み合わせの増大に対応するために、共進化アルゴリズムに基づくセル最適化アルゴリズムを提案している。この手法では、複数のセルをいくつかのサブエリアに分割し、各サブエリアを順番に繰り返し最適化することで、パラメータを削減しつつ、エリア全体の最適化を実現する。さらに効率的に探索するために、事前探索による各パラメータの探索範囲削減アルゴリズムを提案している。提案手法を用いることで、適用しない場合よりも組み合わせ数を削減しつつ、通信品質が改善されることを示している。 第 5 章では、HAPS—地上システム間の周波数共存シナリオにおける、地上システムへの HAPS からの干渉を考慮した HAPS セル最適化手法を提案している。提案法では、各セルのビーム幅およびビーム方向を制御することで、ビーム方向制御のみを行う従来法と比べて低い干渉制約違反率および高いカバー率を実現できることを示している。 第 6 章は、結論であり、本研究の総括を述べている。 以上、本論文の著者は、HAPS モバイル通信における遺伝的アルゴリズムを用いたセル最適化手法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認しており、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。			

内容の要旨

報告番号	甲 第 6300 号	氏 名	杉浦 圭祐
主論文題名： Design-Space Exploration of Cost-Efficient Point Cloud Processing on Embedded FPGAs (組み込み FPGA におけるコスト効率の良い点群処理の設計空間探索)			
低コストな点群取得センサ (LiDAR など) の登場により、点群は様々なビジョン・ロボットタスクで使われる、標準的なデータ形式となった。点群ベースタスクは通常、移動ロボット上で動作するが、これらのロボットに搭載されるようなエッジデバイスの計算資源は、最新の手法をリアルタイム動作させるには不十分である。本論文は、エッジデバイス側の限られた処理能力と、点群ベースタスク (LiDAR SLAM、経路計画、レジストレーション) の高い計算要求とのギャップを埋めることを目的とする。 LiDAR SLAM に関しては、GEM (Greedy Endpoint Matching) と CSM (Correlative Scan Matching) とよばれる 2 つのスキュンマッチング手法を対象に、リソース効率のよい専用アクセラレータ (GEMCore、CSMCore) を提案する。これらは、小型 FPGA ボードの一つである Pynq-Z2 上に実装され、様々な SLAM システム (パーティクルフィルタ、グラフベース、スキュンマッチングベース SLAM) に統合される。IP コアによって、最新手法とも比肩する精度と、リアルタイム性能の双方を実現する。CSMCore は、スキュンマッチングおよびループ検出処理を最大 14.84 倍、18.92 倍高速化し、全体の性能を最大 4.67 倍改善している。 2D/3D 経路計画については、軽量の深層学習ベースの手法 P3Net (PointNet-based Path Planning Networks) と、組み込み FPGA (Xilinx ZCU104) を対象とした専用 IP コア P3NetCore を提案する。P3Net は、最近提案された MPNet アルゴリズムの改良版である。2D データセットにおいて、P3NetCore は、Nvidia Jetson と比べて最大 143.62 倍高速に動作する。消費電力は僅か 0.255W であり、GPU 搭載のワークステーションに対して最大 1278.14 倍の電力効率を実現している。P3Net は、MPNet に比べてニューラルネットのパラメータ数を 32.32 倍削減しつつ、経路計画の成功率を最大 28.2%改善し、最適に近い経路を出力できる。これらの性能改善は、IP コアの性能およびリソース消費の正確なモデル化と、徹底した設計空間探索によって達成されている。 点群レジストレーションに対しては、高速・高精度・ロバストなレジストレーションパイプラインを、組み込み FPGA (Xilinx ZCU104) 上に実現する。PointNet 特徴量に基づく Correspondence-free な (対応関係に依存しない) 手法、特に PointNetLK と ReAgent の 2 つに着目し、専用アクセラレータ (PointLKCore、ReAgentCore) を開発する。これらのアクセラレータは、Nvidia GeForce GPU と比較して最大 213.58 倍のエネルギー効率を達成している。古典手法よりも、点群間の大きなずれやノイズに対して頑健であるうえ、15ms 未満でほぼ最適な解に収束し、リアルタイム性能を実証している。			

審査の要旨

報告番号	甲 第 6300 号	氏 名	杉浦 圭祐
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 松谷 宏紀
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 斎藤 英雄
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 近藤 正章
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学） 吉岡 健太郎
学士（工学）、修士（工学）杉浦圭祐君の学位請求論文は、「Design-Space Exploration of Cost-Efficient Point Cloud Processing on Embedded FPGAs（組込み FPGA におけるコスト効率の良い点群処理の設計空間探索）」と題し、7 章から構成されている。 点群とは 2 次元もしくは 3 次元空間における点の集合であり、周囲の物体の位置や形状を表現できる。LiDAR（Light Detection and Ranging）センサの進歩と普及によって、ドローンや台車ロボットのような小型移動ロボットに LiDAR センサを搭載できるようになり、LiDAR センサから得られる点群を対象とした情報処理が広く研究されている。小型移動ロボットにおいては、コストやバッテリー容量の制約が厳しいため、計算機のコスト効率やエネルギー効率が重視される。そのため、点群処理の専用回路化が望まれるが、その一方でこのような分野においては技術革新の速度が速く、次々に新しい手法が登場するため、本論文では書き換え可能なハードウェアである FPGA（Field-Programmable Gate Array）の利用に着目している。そのうえで、移動ロボットにおいて生じる点群処理として、SLAM（自己位置推定と環境地図作成の同時実行）、経路計画、レジストレーション（位置合わせ）に着目し、コスト効率に優れる小規模 FPGA を用いてこれらの点群処理を高効率化している。小規模 FPGA においては計算資源が限られ、従来アルゴリズムをそのまま実現することは難しいため、本論文では小規模 FPGA に適したアルゴリズムもしくはモデルの提案を行ったうえで、小規模 FPGA に適した専用アーキテクチャをそれぞれ提案している。このような専用アーキテクチャにおいては様々な設計パラメータが存在し、高効率な回路を得るには設計パラメータの最適化が必要であるため、本論文ではそのためのモデル化も行っている。 本論文は上記の研究成果をまとめたものである。具体的には、1 章で本論文の背景、貢献、構成について述べている。2 章では LiDAR SLAM、経路計画、点群レジストレーションに関する関連研究を調査している。3 章では、LiDAR SLAM において生じるスキャンマッチングを加速するための専用回路を提案している。そのうえで、3 種類の SLAM アルゴリズムを対象に TUL Pynq-Z2 と呼ばれる小規模 FPGA ボード上で提案する専用回路の有効性を評価している。4 章では、点群を対象とした深層学習モデルである PointNet を基に、2 次元および 3 次元空間における経路計画を解くためのモデルを提案している。そのうえで、提案モデルを加速するための専用回路を提案し、AMD ZCU104 と呼ばれる FPGA ボード上で提案モデルおよび提案回路の有効性を評価している。5 章では、3 次元点群レジストレーションのための特徴抽出器として上述の PointNet の派生モデルを 2 つ提示したうえで、これらのモデルを加速するための専用回路を提案し、ZCU104 上で提案回路の有効性を評価している。6 章では、3～5 章で提案した専用回路について、性能およびコスト（FPGA 上の計算資源の消費量）のモデル式を構築している。このようなモデル化は、与えられた計算資源の範囲内で各種専用回路の性能を最大化するために重要である。最後に 7 章では本論文で提案した各種技術とその貢献についてまとめている。 以上、要約すると、杉浦君の博士論文は、自動運転やロボティクス分野で生じるいくつかの点群処理を計算資源の限られた FPGA 上で実現するための技術を提案および実証することで、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	乙 第 5349 号	氏 名	伊藤 真紀
主論文題名：			
冬季の住宅内温熱環境が居住者の身体活動・座位行動に及ぼす影響			
身体活動の促進および座位行動の減少には様々な健康上の効果がある。しかし、経済的な発展に伴う移動手段の変化や生活様式の変化などにより、身体活動不足と座位行動が増加している。そのため、身体活動の促進と座位行動の減少に向けては、個人への介入に加えて、多くの人に長期的に影響を与える環境整備が重要である。 介入方法を検討する際は、身体活動が行われる領域に分類して考えることが有用である。しかし、先行研究の多くは、余暇、移動、仕事領域を対象とした地域環境や職場環境に関するものであり、家庭領域を対象とした住宅環境に関する研究は限定的である。冬季は外出時間の減少に伴い身体活動も減少すること、日本は低い断熱性能と間欠暖房習慣から冬季に低室温な住宅が多いことから、冬季の住宅内温熱環境が身体活動と座位行動に及ぼす影響について検証することを本研究の目的とした。 本論文は、以下に示す全 7 章から構成される。 第 1 章では、序論として身体活動・座位行動の現状と施策をまとめるとともに、身体活動・座位行動に関する環境要因および住宅の寒さと健康に関する先行研究を整理し、本研究の意義および目的を示した。 第 2 章では、2 つの郊外住宅地を対象とした実測調査による分析結果を示した。身体活動・座位行動の季節変動の実態と要因、および、季節毎の住宅内温熱環境と身体活動・座位行動の関連を断面分析にて検討した。 第 3 章では、第 4 章以降の分析で用いた日本全国を対象とした住宅の断熱改修前後調査の概要を示した。研究デザイン、介入内容、データ収集項目などを記し、調査対象者数および居住地域分布について整理した。 第 4 章では、断熱改修前のベースライン調査による断面分析の結果を示した。住宅内温熱環境として暖房使用に着目し、住宅内の身体活動・座位行動との関連を検証した。 第 5 章では、断熱改修前後の調査データを用いて介入効果を検証した。断熱改修有無および改修前後の室温改善により、住宅内の座位時間および身体活動に変化はあるかを分析し、住宅内温熱環境の改善が身体活動・座位行動に及ぼす影響を検証した。 第 6 章では、身体活動による健康効果の 1 つである高齢者の転倒予防との関連を検討した。対象者を床近傍室温に基づき 3 群に分類し、温暖な住宅は転倒予防に寄与するかを断熱改修前のベースライン調査による断面分析にて検討した。 第 7 章では、本研究の成果を総括し、今後の展望を述べた。			

審査の要旨

報告番号	乙 第 5349 号	氏 名	伊藤 真紀
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学） 高橋 正樹
	副査	慶應義塾大学名誉教授	博士（工学） 伊香賀 俊治
		慶應義塾大学教授	博士（工学） 岸本 達也
		慶應義塾大学教授	博士（医学） 小熊 祐子

学士（生活科学）、修士（工学）、伊藤真紀君提出の学位請求論文は「冬季の住宅内温熱環境が居住者の身体活動・座位行動に及ぼす影響」と題し、7章からなっている。

身体活動の促進および座位行動の減少には様々な健康上の効果がある。しかし、経済的な発展に伴う移動手段の変化や生活様式の変化などにより、身体活動不足と座位行動が増加している。そのため、身体活動の促進と座位行動の減少に向けては、個人への介入に加えて、多くの人に長期的に影響を与える環境整備が重要である。

介入方法を検討する際は、身体活動が行われる領域に分類して考えることが有用である。しかし、先行研究の多くは、余暇、移動、仕事領域を対象とした地域環境や職場環境に関するものであり、家庭領域を対象とした住宅環境に関する研究は限定的である。冬季に外出時間の減少に伴い身体活動も減少すること、日本は低い断熱性能と間欠暖房習慣から冬季の低室温な住宅が多いことから、冬季の住宅内温熱環境が身体活動と座位行動に及ぼす影響について検証することを本研究の目的としている。

第1章では、序論として身体活動・座位行動の現状と施策をまとめるとともに、身体活動・座位行動に関する環境要因および住宅の寒さと健康に関する先行研究を整理し、本研究の意義および目的を示している。

第2章では、2つの郊外住宅地を対象とした実測調査による分析結果を示している。身体活動・座位行動の季節変動の実態と要因、および、季節毎の住宅内温熱環境と身体活動・座位行動の関連を断面分析にて検討している。

第3章では、第4章以降の分析で用いた日本全国を対象とした住宅の断熱改修前後調査の概要を示している。研究デザイン、介入内容、データ収集項目などを記し、調査対象者数および居住地域分布について整理している。

第4章では、断熱改修前のベースライン調査による断面分析の結果を示している。住宅内温熱環境として暖房使用に着目し、住宅内の身体活動・座位行動との関連を検証している。

第5章では、断熱改修前後の調査データを用いて介入効果を検証している。断熱改修有無および改修前後の室温改善により、住宅内の座位時間および身体活動に変化はあるかを分析し、住宅内温熱環境の改善が身体活動・座位行動に及ぼす影響を検証している。

第6章では、身体活動による健康効果の1つである高齢者の転倒予防との関連を検討している。対象者を床近傍室温に基づき3群に分類し、温暖な住宅は転倒予防に寄与するかを断熱改修前のベースライン調査による断面分析にて検討している。

最後に第7章では、本研究の成果を総括し、今後の展望を述べている。

以上のように、本論文は、日本における冬季の住宅内温熱環境が身体活動と座位行動に及ぼす影響を明らかにしたものであり、その成果は建築の環境設備設計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。