慶應義塾大学理工学部研究報告別冊第７６号

２０１３（平成２５）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

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2013（平成25）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 3969 号	平成 26 年 3 月 23 日	小原 豪
博士（工学）	甲第 3977 号	平成 26 年 3 月 23 日	（モハマド ファイザル ビン ハサン） MOHD FAIZAL BIN HASAN
博士（工学）	甲第 3978 号	平成 26 年 3 月 23 日	（モハマド ロツジミン ビン アブドロ ラフマン） MOHD ROSDZIMIN BIN ABDUL RAHMAN
博士（工学）	甲第 3979 号	平成 26 年 1 月 8 日	松田 豊
博士（工学）	甲第 3984 号	平成 26 年 3 月 23 日	大畠 一人
博士（理学）	甲第 3985 号	平成 26 年 3 月 23 日	井本 智明
博士（工学）	甲第 3986 号	平成 26 年 3 月 23 日	金井 由悟
博士（工学）	甲第 3987 号	平成 26 年 3 月 23 日	安達 智史
博士（工学）	甲第 3988 号	平成 26 年 3 月 23 日	糟谷 正樹
博士（工学）	甲第 3989 号	平成 26 年 2 月 3 日	皆川 卓也
博士（工学）	甲第 3990 号	平成 26 年 3 月 23 日	玉川 奨
博士（工学）	甲第 3991 号	平成 26 年 3 月 23 日	手塚 伸
博士（理学）	甲第 3992 号	平成 26 年 3 月 23 日	白兼 研史
博士（工学）	甲第 3993 号	平成 26 年 3 月 23 日	野崎 貴裕
博士（工学）	乙第 4659 号	平成 26 年 2 月 3 日	土方 孝敏
博士（理学）	甲第 4034 号	平成 26 年 3 月 3 日	中村 允
博士（工学）	甲第 4035 号	平成 26 年 3 月 23 日	伊豆 裕一
博士（理学）	甲第 4036 号	平成 26 年 3 月 23 日	坂田 幸大郎
博士（工学）	甲第 4037 号	平成 26 年 3 月 3 日	（フン ティミン チュ） HUYNH THI MINH THU
博士（理学）	甲第 4038 号	平成 26 年 3 月 23 日	河 皓平
博士（理学）	甲第 4039 号	平成 26 年 3 月 23 日	野口 健太
博士（理学）	甲第 4040 号	平成 26 年 3 月 23 日	荻原 陽平
博士（理学）	甲第 4041 号	平成 26 年 3 月 23 日	辻 享志

学位の種類	学位記号・番号	授与年月日	氏　　名
博士(工学)	甲第 4042 号	平成 26 年 3 月 23 日	坂井 秀男
博士(理学)	甲第 4043 号	平成 26 年 3 月 23 日	喜多 奈々緒
博士(理学)	甲第 4044 号	平成 26 年 3 月 23 日	今田 充洋
博士(工学)	甲第 4045 号	平成 26 年 3 月 3 日	村田 雄一郎
博士(理学)	甲第 4046 号	平成 26 年 3 月 23 日	松岡 貴英
博士(工学)	甲第 4047 号	平成 26 年 3 月 23 日	馬場 厚志
博士(工学)	甲第 4048 号	平成 26 年 3 月 23 日	片岡 裕雄
博士(工学)	甲第 4049 号	平成 26 年 3 月 23 日	三浦 奈々子
博士(工学)	甲第 4050 号	平成 26 年 3 月 23 日	佐々木 雄希
博士(工学)	甲第 4051 号	平成 26 年 3 月 23 日	新谷 俊通
博士(工学)	甲第 4052 号	平成 26 年 3 月 23 日	齊藤 美都子
博士(工学)	甲第 4053 号	平成 26 年 3 月 23 日	(張 浩) ZHANG, HAO
博士(工学)	甲第 4054 号	平成 26 年 3 月 23 日	安藤 真太朗
博士(工学)	甲第 4055 号	平成 26 年 3 月 23 日	菊田 洸
博士(理学)	甲第 4056 号	平成 26 年 3 月 23 日	野村 次郎
博士(工学)	甲第 4057 号	平成 26 年 3 月 23 日	柴田 崇統
博士(工学)	甲第 4058 号	平成 26 年 3 月 23 日	本間 裕貴
博士(理学)	甲第 4059 号	平成 26 年 3 月 23 日	茅根 文子
博士(工学)	乙第 4674 号	平成 26 年 3 月 3 日	岩崎 雅二郎

内容の要旨

報告番号	甲　第3969号	氏　名	小原　豪

主 論 文 題 目 ：

フェムト秒レーザ誘起コヒーレント散乱場によるナノプロセシング

ナノプロセシング技術は電子・光デバイス等の高集積化・高機能化とともに近年発展してきた。その中で、ナノスケールの周期構造を施した表面は従来にない新規な特性を示すので、光学分野、医療分野、機械分野等への応用が期待されている。現在では　サブ波長構造を大面積に作製するナノプロセシング技術の革新が希求されており、フェムト秒(fs)レーザを使った新しいナノプロセシング技術が注目されている。fs レーザを用いた周期構造作製技術は大気中でのドライ・アブレーション加工であり、電子デバイス用のナノプロセシング技術と比較して、簡単に周期構造を多種類の基板上に作製できる特徴を備えている。本論文では fs レーザ誘起散乱近接場を用いたナノホールアレー作製手法、並びに散乱遠方場を用いたレーザ誘起表面微細周期構造作製の 2 つの手法を研究した。

単一金ナノ微粒子周囲に発生する近接場光は照射光の回折限界以下の領域に局在する。2 次元配列した金微粒子系では、隣接微粒子間で近接場の結合が生じ、金微粒子配列をテンプレートとした 2 次元ナノホールアレーを作製することが困難であった。そこで、本論文の著者は加工基板背面から光照射する新しい方式を提案し、2 次元配列微粒子下部に高い光強度を維持し 2 次元ナノホール加工を可能にする光強度分布が得られることを理論的に示した。

一方、散乱遠方場由来のリップル構造作製プロセスも最近注目されている。fs レーザ誘起リップル構造(Laser Induced Periodic Surface Structure)は単一ビームを基板表面に多パルス照射するだけで自発的に作製できる周期構造である。レーザフルエンスに依存してリップル構造が異なる。その中で、照射波長程度の周期を持つ Low Spatial Frequency LIPSS (LSFL)は、表面のランダムな粗さに起因する散乱光で自発的に作製されるため、リップル構造に歪みがあり、表面光素子に応用することが困難であった。そこで、入射光に近共鳴するナノ散乱体をレーザ照射前に配置することで散乱遠方場パターンを制御し、所望の周期構造がデザインできることを示した。さらにレーザ波長の概ね 1/4 以下の周期構造(High Spatial Frequency LIPSS, HSFL)の作製メカニズムは解明されていなかった。そこで本研究では、HSFL 作製実験と、Finite-Difference Time-Domain (FDTD)法により散乱構造体が存在する系の光強度分布を計算し、HSFL の作製メカニズムを明らかにした。本論文は 6 章からなる。

第 1 章は序論で、ナノテクノロジーの歴史的背景を先ず述べ、ナノ周期構造の新しい機能とその産業応用について述べている。最後に本研究の目的と意義を述べている。

第 2 章は、fs レーザ誘起散乱場ナノアブレーションプロセシングの物理について詳述している。近接場と遠方場散乱について Mie 散乱理論を用いて説明した。更に FDTD 法を用いて Maxwell の方程式を解くことで光強度分布を求める過程について概説した。

第 3 章は、金微粒子の 2 次元アレー配置を用いた近接場ナノ加工技術について述べる。従来の上方からのレーザ照射ではなく、加工基板後方からレーザ照射することで、隣接微粒子との表面プラズモン結合を抑制し、ナノホールアレーが作製できる光強度分布が得られることを示した。

第 4 章は、人工ナノ散乱体を基板表面に照射前に設置することで散乱遠方場を制御し、fs レーザ誘起表面周期構造を設計・制御する技術について述べている。金ナノ構造や誘電体ナノ構造を配置すると、散乱遠方場を制御でき、ナノアブレーションパターニングに使える任意の光強度分布パターンを生成できることを示した。

第 5 章は、HSFL の作製メカニズムについて述べている。fs レーザ光損傷閾値以下のフルエンス照射後、HSFL は照射レーザスポット内にランダムに点在した。FDTD 法による光強度分布解析により、Mie 散乱由来の散乱遠方場と照射レーザとの干渉場で HSFL が成長することを明らかにした。

第 6 章は本研究の結論である。本研究によ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。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3969 号	氏　名	小原　豪

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学専任講師	博士（工学）	寺川　光洋
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	荒井　恒憲
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	津田　裕之
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	斎木　敏治
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	木下　岳司

学士（工学）、修士（工学）小原 豪 君提出の学位請求論文は「フェムト秒レーザ誘起コヒーレント散乱場によるナノプロセシング」と題し、6 章から構成されている。

レーザナノプロセシングの中でもフェムト秒レーザ誘起散乱場を用いたナノ周期構造作製技術は、容易に多種類の基板上に当該構造を作製できる潜在性を備えている。そこで本論文の著者は、コヒーレント散乱場の視点から、散乱近接場を用いたプロセシングによる一様なナノホールアレー作製手法を提案し、さらに、散乱遠方場を用いたナノ周期構造作製に関し、その作製メカニズムを解明し当該構造作製の制御手法を提案した。フェムト秒レーザ誘起リップル構造(Laser-Induced Periodic Surface Structure, LIPSS)は、基板に多パルスを照射すると自己組織化的に作製できる。照射波長程度の周期の Low Spatial Frequency LIPSS (LSFL)は、基板表面のランダムな粗さに起因する散乱光由来により形成されるため、これまでは周期構造作製の制御ができなかった。そこでナノ散乱体を配置することで散乱遠方場分布を制御し、所望の周期構造が作製できることを示した。レーザ波長の概ね 1/4 以下の周期の High Spatial Frequency LIPSS (HSFL)については、作製実験および散乱構造体が存在する系の光強度分布の三次元 Finite-Difference Time-Domain (FDTD)法を用いた理論的計算により、作製メカニズムを明らかにした。

第 1 章は序論である。散乱近接場光によるナノプロセシングと散乱遠方場光によるナノ周期構造作製研究の歴史的背景を概説し、最後に本研究の目的と意義を述べている。

第 2 章では、フェムト秒レーザ誘起散乱場ナノアブレーションプロセシングの基礎物理について詳述し、本研究の理論的基礎を与えている。すなわち、高強度フェムト秒レーザと材料との相互作用の基礎物理過程を説明している。Mie 散乱理論を用いて近接場と遠方場について説明し、表面プラズモンについても述べている。

第 3 章では、新しい増強近接場ナノプロセシング技術を提案した。従来の上方レーザ照射ではなく、加工基板後方からレーザ照射することで、二次元配列した隣接金微粒子間の表面プラズモン結合を抑制し、二次元ナノホールアレーが作製できる光強度分布が得られることを示した。

第 4 章では、基板表面に人工ナノ散乱体を設置することで、当該構造由来の散乱遠方場と照射フェムト秒レーザとの干渉場により LSFL が作製できることを初めて実験的に直接観察した。その知見を基に、ナノ散乱体を加工基板に配置することで、フェムト秒レーザ誘起表面周期構造を理論的に設計および制御できることを明らかにした。金属または誘電体ナノ構造を事前配置すると、その構造由来のナノアブレーション構造を誘起する光強度分布が生成できた。

第 5 章では、SiC 結晶基板を用いて HSFL の作製メカニズムを明らかにした。低強度照射条件下では Mie 散乱由来の散乱遠方場と照射レーザとの干渉場で HSFL が成長することを実験的および理論的に明らかにした。一方、高強度照射条件下では LSFL が成長することを明らかにした。

第 6 章は本研究の結論であり、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、本論文はフェムト秒レーザ誘起コヒーレント散乱場を空間的に制御し、散乱近接場および散乱遠方場によるナノプロセシング技術を開発したもので、レーザプロセシング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.3977	Name	Mohd Faizal Bin Hasan

Thesis Title:

Hydrogen Permeation with Flat Sheet Pd/Ag Membrane for Compact Methanol Steam Reformer

The performance of a compact methanol steam reformer with a Palladium/Argentum (Pd/Ag) membrane was investigated experimentally. The experiments have been done by changing S/C ratio from 0.8 to 1.6, reference catalyst zone temperature from 589K to 689K and upstream pressure from 0.20MPa to 0.50MPa. The results show that the higher hydrogen permeation rate is obtained when the S/C ratio is around 1 at higher reference temperature and higher pressure. In addition, it is shown that the compact methanol steam reformer with a Pd/Ag membrane is able to produce high purity hydrogen with very low CO contamination, which fulfills the Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC) requirement (<10ppm). It was found that the experimentally obtained H_2 permeation rate is much lower than the prediction by Sieverts' equation.

The H_2 permeation for flat sheet Pd/Ag membrane was investigated experimentally to make clear the difference between the experimental result and predicted result by Sieverts' equation. H_2:N_2 mixture was used to neglect the surface adsorption effect of non-H_2 species. The results demonstrated that when the feed flow rate is decreased, the H_2 permeation rate decreases, which cannot be predicted by the Sieverts' equation. When the H_2 permeation through the membrane is taken into account for the Sieverts' equation, the variation in the H_2 permeation mole flux as a function of the feed flow rate can be predicted quantitatively. The effect of H_2 permeation is more significant when the feed flow rate is decreased.

The numerical results demonstrate the decrease in H_2 mole fraction towards the membrane surface, that is the concentration polarization occurs, which induces the diffusion of H_2 towards the membrane. It was found that the diffusive effect is more significant when the upstream pressure is increased or binary mixture with higher diffusivity is used.

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3977 号	氏　名	Mohd Faizal Bin Hasan

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	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	小川　邦康
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	横森　剛
		慶應義塾大学教授	工学博士	菱田　公一

Master of Mechanical Engineering, Mohd Faizal Bin Hasan 君提出の学位請求論文は，「Hydrogen Permeation with Flat Sheet Pd/Ag Membrane for Compact Methanol Steam Reformer （小型メタノール改質器に用いる平板 Pd/Ag 膜の水素分離特性）」と題し，全 6 章より構成されている．

本論文は，水素高純度化のために Pd/Ag 薄膜を用いた小型メタノール改質器の基本特性について，実験，理論，数値シミュレーションにより検討を加えたものであり，6 章からなる．

第 1 章には，本研究の意義，目的が述べられている．本研究は，改質部と水素高純度化部が一体となった小型改質器に関するものであり，第 1 章では，その意義を示し，先行研究などを整理し，本研究の目的を述べている．

第 2 章には，本研究で用いた小型改質器の基本特性が述べられている．改質には，銅亜鉛系触媒による，吸熱反応である水蒸気改質反応を用いており，実験により得られた改質ガス組成は，どの実験条件においても水素濃度が 75 mol%，二酸化炭素濃度が 23 mol %，一酸化炭素濃度が 2 mol%程度であった．この量は，水蒸気改質の総括反応から求められる水素濃度（75 mol%）とほぼ同様な値であり，十分に改質が生じていることを示している．また，燃料電池の電極を被毒する一酸化炭素については，改質後，Pd/Ag 分離膜を用いることにより 10 ppm 以下としている．また，同時に，Pd/Ag 分離膜の水素透過量が，従来の評価式（ジーベルツの式）による評価量を大きく下回ることを明らかにしている．

第 3 章では，水素透過量がジーベルツの式による評価量を大きく下回る原因を明らかにするために，分離膜の特性を検討するための実験装置を製作し，分離膜の特性について詳細な検討を行っている．その結果，本研究が対象とする小型改質器では，燃料流量が少ないため，分離膜を透過することにより分離膜近傍の水素濃度が低下し，その結果ジーベルツの式による予測と異なる水素透過量となったことを明らかにしている．

第 4 章では，水素透過量による分離膜近傍の水素濃度低下を考慮したジーベルツの式に対する修正を理論的に提案している．修正されたジーベルツの式により予測された水素透過量は，第 3 章で得られた実験結果と定量的に良い一致を示し，その有用性を明らかにしている．

第 5 章では，分離膜近傍の熱流体的構造（流れ場および濃度場）を明らかにするために，第 3 章の実験装置に対応した数値シミュレーションを行い，第 4 章で提案したジーベルツの式への修正が妥当であることを検証している．

第 6 章では，本研究の成果を，結論としてまとめている．

上記のように，本論文の成果は，改質部と水素高純度化部が一体となった小型改質器により高純度の水素を得る過程とその装置について新たな知見を与え，その実用化に貢献するとともに，分離膜の水素透過性能に及ぼす輸送現象の重要性を明らかにしたものであり，輸送現象論の学術基盤に新たな知見を与えるものである．その成果は，工学上のみならず，工業上寄与するところが大きい．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.3978	Name	Mohd Rosdzimin Bin Abdul Rahman

Thesis Title:

Dynamics of Laminar Premixed Flame under Equivalence Ratio Oscillations

Dynamics of laminar-premixed flames of CH_4/air mixture under equivalence ratio oscillations were experimentally and numerically investigated for stagnation flame and conical flame by focusing on the oscillation wavelength is larger than the nominal flame thickness. In an experimental work, lean region is focused because flame moves monotonically in equivalence ratio variations. It was observed that the flame moves periodically following the variation of the equivalence ratio. This movement is primarily due to the equivalence ratio oscillations, since the velocity perturbation is significantly suppressed. Furthermore, it was observed that the flame dynamics is influenced by the characteristic of the piston type oscillator at the quasi-steady regime (St < 1.0) by an increase in amplitude of the flame motion with an increase in the frequency of the equivalence ratio variation. On the other hand, an increase in the oscillation frequency of the equivalence ratio variation decreases the flame motion amplitude as it was influenced by the oscillation frequency at the unsteady regime (St > 1.0). The numerical work for the stagnation flame was focused at St > 1.0 in the lean, rich and lean rich crossover cases and the results are agreed with the experimental works. Moreover, numerical work demonstrated that, the back support effect influences the dynamic response of the flame movement, in that, the direction of the cycles of the dynamic response in the lean and the rich conditions are different. In addition, hysteresis of the flame movement is seen in the numerical and experimental works. An explanation of this hysteresis was done by introduces concept of the non-uniform scalar value profile and was clarified by development of simplified qualitative mathematical model. For conical flame, the quasi-steady manner of the flame tip movement was observed at St < 1.0. At St > 1.0, we found that the attenuation of the flame tip motion is affected by the wrinkling of the flame surface in addition to the attenuation of the equivalence ratio oscillation amplitude. Overall, a ratio between the characteristics time of the flow and the characteristics time of the oscillation called *Strouhal* number is an important parameter to categories the dynamics of the laminar premixed flame in quasi-steady (St < 1.0) or unsteady (St > 1.0) manner either the stagnation or conical flame configurations.

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3978 号	氏　名	Mohd Rosdzimin Bin Abdul Rahman

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	工学博士	飯田　訓正
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	横森　剛
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	松尾　亜紀子

Master of Mechanical Engineering, Mohd Rosdzimin Bin Abdul Rahman 君提出の学位請求論文は，「Dynamics of Laminar Premixed Flame under Equivalence Ratio Oscillations（当量比変動を伴う層流予混合火炎の動特性）」と題し，全 6 章より構成されている．

本論文は，当量比変動，すなわち燃料濃度変動，を受ける層流予混合火炎の動特性について，実験，数値シミュレーション，および解析的手法により検討を加えたものであり，6 章からなる．

第 1 章では，本研究の意義，目的が述べられている．本研究は，燃料消費および排気ガス特性の改善に有効な予混合希薄燃焼を行う際に生じる燃焼不安定に着目し，供給予混合気の当量比変動が火炎の変動挙動に及ぼす影響を解明したものであり，第 1 章では，その意義を示し，先行研究などを整理し，本研究の目的を述べている．

第 2 章では，実験的研究について述べている．よどみ流中に形成されるメタン空気希薄予混合火炎に当量比変動を与えた場合の火炎挙動を高速度ビデオカメラで撮影し，解析した結果を示している．当量比変動に伴って火炎位置が変動し，その変動の振幅は周波数に依存することを明らかにしている．そして，その結果は流れの非定常性を評価する無次元数であるストローハル数で整理できることを明らかにしている．

第 3 章では，その機構に詳細な検討を加えるために，第 2 章の実験系と同様な系に対して数値シミュレーションを行っている．数値シミュレーションは，当量比が希薄領域を変動する場合，過濃領域を変動する場合，そして当量比 1 を跨いで希薄領域と過濃領域をクロスオーバーする場合について，火炎位置変動だけでなく，燃焼速度の変化についても検討を行っている．当量比変動がある場合，火炎位置，燃焼速度の変化は，定常時の変化からずれ，そのずれの程度は周波数が大きくなると顕著になることを示している．

第 4 章では，実験結果，数値シミュレーション結果をもとに，火炎帯への熱および燃料の輸送量の時間変化の影響に着目し，輸送現象論的な視点から当量比変動が火炎に与える影響について，単純な 1 次元的モデルを構築している．その結果は，実験結果，数値シミュレーションの結果と定性的に一致するものであり，火炎の変動挙動が，火炎帯への熱および燃料の時間変化によるものであることを明らかにしている．

第 5 章では，円管バーナ上に形成されるブンゼン火炎を対象に，当量比変動の影響について，数値シミュレーションにより系統的に検討を加えている．その結果，火炎挙動は，よどみ流の場合と同様，ストローハル数により整理できることを明らかにしている．

第 6 章では，本研究の成果を，結論としてまとめている．

上記の本研究の成果は，当量比変動が予混合火炎に及ぼす影響を明らかにし，燃焼科学に対して新たな知見を与えるだけでなく，省エネルギー性が高く，環境負荷が少ない燃焼機器の開発に資する有用な知見を提供しており，工学上のみならず，工業上寄与するところが大きい．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3979号	氏　名	松田　豊

主 論 文 題 目 ：

海洋天然物ポリマキセノライドの合成研究

本研究は海洋天然物ポリマキセノライドの合成研究に関するものである。ポリマキセノライド（**1**）は、軟体珊瑚のハイブリッド種のみから単離され、2つの異なるテルペノイドが連結しているという大変興味深い化学構造を有したハイブリッド型海洋天然物である。

その全合成を目指し、両テルペノイドの連結部位であるに相当するジヒドロピラン環の構築を、Slattery らによって報告された生合成仮説に基づき、エポキシドの開環反応と脱水を伴う環化反応によって行うことにした。そこで、モデルエポキシド (±)-4-(benzyloxymethyl)-1-oxaspiro[2.4]heptane (**14**)に対し、様々な求核剤の付加を検討したところ、アセチリドを用いた際に最も収率よくエポキシド開環体を与えた。次に、上記アセチリドによるエポキシドの開環反応、PCC を用いた脱水を伴った酸化反応を鍵反応として、モデル化合物に相当する (±)-methyl-(1*S*,5*R*,9*S*)-7-(3-benzyloxypropyl)-1-hexyl-9-vinyl-6-oxaspiro[4.5]dec-7-ene-8-carboxylate (**23**)を合成した。

この知見を踏まえて、ポリマキセノライドの合成研究に着手した。まず、ポリマキセノライドのセスキテルペノイドユニットに相当し、天然物であると報告されていたアフリセンオキシド（**2**）を、三成分連結反応と閉環メタセシスを鍵反応として無保護合成した。また、**2**の構造確認のため、他のアフリカン型セスキテルペノイドの合成も行った。その結果、**2**は天然物ではないことが明らかになった。また、モデル実験の知見を活かして、**2**をポリマキセノライドの上部セグメント設定した(±)-methyl (1a*S*,5*R*,7b*R*)-3,3,7b-trimethyl-5-(triethylsilyloxy)decahydro-1*H*-cyclopropa[e]azulen-5-yl)-methyl)pent-4-enoate (**126**)へと導いた。

続いて、ヨードアレノレート付加反応、鈴木－宮浦カップリングを経て、下部セグメントに相当する(*R*)-3-((*Z*)-2-((4*R*,5*S*)-4-(*tert*-butyldimethylsilyloxy)-5-((*S*)-2-hydroxy-2-methylbut-3-en-1-yl)-2-oxodihydrofuran-3(2*H*)-ylidene)ethyl)-4-methylpent-4-enal (**41**)の合成を達成した。

次に、ポリマキセノライド（**1**）の全合成に向けて、上部セグメント **126** と下部セグメント **41** とのアルドール反応による連結を試みた。しかし、**126** をアニオン化することが困難であり、望むカップリング体は得ることができなかった。そこで、上下セグメント連結方法を変更することにした。

新たなジヒドロピラン環の構築方法として、アルキニルアルコールに対する Pd 触媒を用いた環化とメトキシカルボニル化を選択し、そのモデル実験を行った。アフリセンオキシド（**2**）より(±)-(1*R*,2*R*,4*S*,8*S*,9*R*)-9-(((19*S*,20*R*)-19-hydroxy-(17*E*)-dec-17-en-21-yn-20-yl)methyl)-2,6,6-trimethyl-decahydro-1*H*-cyclopropa[e]azulen-9-ol (**216**)を合成し、Pd 触媒を用いた環化反応を行ったところ、ポリマキセノライド（**1**）と同じ相対立体配置のアフリカン－ジヒドロピラン縮環系を有する(±)-methyl (1*R*,2*R*,4*S*,8*S*,9*R*)-4'-((15*S*,16*E*)-1-(*tert*-butyldimethylsilyloxy)but-16-en-15-yl)-2,6,6-trimethyl-6'-propyl-1,2,3,3',4,4',5,6,7,8,10,11-dodecahydrospiro[cyclopropa[e]azulene-9,2'-pyran]-5'-carboxylate (**218**)を合成することに成功した。また、この知見を本基質に応用することを計画し、上部セグメント (±)-(17*R*)-(((1*R*,2*R*,4*S*,8*S*,9*R*)-2,6,6-trimethyl-9-(triethylsilyloxy)decahydro-1*H*-cyclopropa[e]azulen-9-yl)methyl) pent-18-ynal (**229**) と、上部セグメントの連結の足掛かりを有する下部セグメント(4*R*,5*S*,3*Z*)-4-(*tert*-butyldimethylsilyloxy)-5-(2-((*tert*-butyldiphenylsilyloxy)methyl)allyl)-3-((3*R*)-3-(prop-1-en-2-yl) hept-5-yn-1-ylidene)dihydrofuran-2(3*H*)-one (**248**)の合成に成功した。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3979 号	氏　名	松田　豊

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	中田　雅也
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	戸嶋　一敦
		慶應義塾大学准教授	博士(理学)	末永　聖武
		慶應義塾大学准教授	博士(工学)	高尾　賢一

学士（工学)、修士（工学）松田豊君提出の学位請求論文は、「海洋天然物ポリマキセノライドの合成研究」と題し、序論、本論６章、総括、および実験項より構成されている。

天然に存在するハイブリッド種（雑種）は、新しい化学構造や生物活性をもった天然物を産出する資源として有用である。ポリマキセノライドは、軟体サンゴのハイブリッド種から単離された天然物であり、セスキテルペンに属するアフリカンユニット(上部)と、ジテルペンに属するセンブランユニット(下部)が、ジヒドロピラン環を介して連結している興味深い化学構造をもつハイブリッド型海洋天然物である。本論文の著者は、このようなユニークな化学構造と生合成機構を併せもつポリマキセノライドに興味をもち、その合成研究を展開した。

本論第一章では、ポリマキセノライドの概要と提唱されている生合成機構について述べている。

第二章では、ポリマキセノライドの上下セグメントの連結のための基礎研究について述べている。まず、1,1-ジ置換エポキシド骨格をもった上部モデルユニットを用いたエポキシドの開環反応について検討した。次に、この反応を利用し、さらに Johnson－Claisen 転位反応とアルドール反応を経て得た上部モデルセグメントに対するジヒドロピラン環の構築を検討したところ、水酸基の酸化、シリルエーテルの脱保護、６員環環化、脱水反応が一挙に起こり、目的のジヒドロピラン環が合成できることを見いだした。

第三章では、ポリマキセノライドのセスキテルペンユニットの合成と、その上部セグメントへの誘導について述べている。セスキテルペンユニットに相当し、天然から単離されたと報告されていたアフリセンオキシドを、三成分連結反応と閉環メタセシスを鍵反応として、保護基を用いない効率的短経路で合成した。また、合成したアフリセンオキシドの構造確認のため、天然物である４種類のアフリカン型セスキテルペノイドも合成した。その結果、天然物として報告された化合物はアフリセンオキシドではないことを明らかにした。さらに、第二章の結果を利用して、上部ユニットであるアフリセンオキシドを、ポリマキセノライドの上部セグメントへと誘導した。

第四章では、ポリマキセノライドの下部セグメントの合成について述べている。ヨードアレノレートのアルデヒドへの付加反応を鍵反応として、*Z*-二重結合をもつ５員環ラクトンを合成した。次に、これと、別途合成したヨードアルカンとの鈴木－宮浦カップリングを経て、下部セグメントを合成した。

第五章では、ポリマキセノライドの上下セグメントの連結について述べている。第三章と第四章で合成した上下セグメントの連結を、種々の条件下で詳細に検討した結果、これら上下セグメント間のアルドール反応は、連結に適さないことを見いだした。

第六章では、ポリマキセノライドのアフリカン－ジヒドロピラン縮環系の構築について述べている。ジヒドロピラン環の新しい構築法として、内部アルキンに対する分子内オキシパラデーションとそれに続くメトキシカルボニル化を考案した。アフリカン部分をもつ内部アルキンモデル化合物に対する上記反応により、これまでに報告例がない 6-endo-dig 型環化－メトキシカルボニル化が進行し、目的のアフリカン－ジヒドロピラン縮環系が構築できることを見いだした。最後に、本反応を利用するために適した上部セグメントと下部セグメントそれぞれの合成に成功した。

以上、著者の研究は、ポリマキセノライドの全合成を指向し、そのユニークな化学構造と生合成機構に着目して、独創的な合成経路を立案し実行したものであり、天然物化学および有機合成化学の発展に大いに貢献し、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3984号	氏　名	大畠　一人

主 論 文 題 目 ：

動線分析機器開発と動線データによる作業分析に関する研究

日本の製造業は、製造現場を主体とした全員参画による改善活動で、品質面を主として世界一位になった。その改善活動は、ボトルネックになっている作業に着目して分析を行い、改善を繰り返し積み上げていく、ボトムアップのQCD向上活動であった。一方、諸外国の製造業ではトップダウンによる目標設定とその追求という経営スタイルのもと、網羅的にQCD向上を追求して、現在では日本との立場が逆転している。トップダウンの問題解決は、コンサルタントなど改善のプロフェショナルが取り組んでいるが、ケーススタディ中心でアプローチや手法が共有されにくい。このトップダウンの手法を一般化できれば、誰でも網羅的に課題を抽出することが可能となる。

本論文では、網羅的に課題を抽出する手法として動線分析に着目し、長時間・複数人で行われる作業を対象として、作業するエリア間を作業者が移動するデータを簡便に収集できる機器を開発した。収集したデータを用いて以下に示す移動パターンと作業パターンを分析・抽出して、それらのパターンから定期性と定常性の観点で作業の問題点を抽出した。

移動パターン：作業者の連続した移動ルートの出現頻度から移動の規則性と移動頻度を評価
作業パターン：作業エリアへの移動回数と時間間隔のバラツキから移動間隔と移動頻度を評価

これら２つのパターンによる問題点抽出の検証を通じて、収集された移動データから、移動パターンと作業パターンを短時間で効率的に分析して、定常的な主体作業および、非定常で突発的な付帯・付随作業の問題点を分析するアプローチを提案することが本論文の目的である。

第１章では、日本と諸外国の問題解決のアプローチを比較し、本論文の目的を述べている。

第２章では、従来の分析手法と関連研究を参照して、それらから得られる知見と本論文との関係について述べている。

第３章では、長時間・複数対象作業の動線データ収集を可能にする機器開発と、その機器によって収集された動線データの分析を可能にするシステム開発に関して述べている。

第４章では、作業者の移動ルートの出現頻度に着目して、規則的な移動ルートに含まれる作業エリアの比率と移動回数から４通りの移動パターンに分類する手順を提案している。

第５章では、作業者の各作業エリアへの移動回数と時間間隔から移動累積グラフを作成し、グラフのフレ幅と移動回数から４通りの作業パターンに分類する手順を提案している。

第６章では、移動パターンと作業パターンの分析結果から改善ポイントの抽出を行い、４章と５章のパターン分析手法の妥当性を検証している。

第７章では、本論文の結論と今後の課題について述べている。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3984 号	氏　名	大畠　一人

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	金沢　孝
	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)	岡田　有策
		青山学院大学教授	博士(工学)	松本　俊之

大畠一人君による博士号請求論文は、「動線分析機器開発と動線データによる作業分析に関する研究」と題し、全 7 章から構成されている。

日本の製造業は、製造現場を主体とした全員参画による改善活動で、品質面を主として世界一位になった。その改善活動は、ボトルネックになっている作業に着目して分析を行い、改善を繰り返し積み上げていく、ボトムアップの QCD 向上活動であった。一方、諸外国の製造業ではトップダウンによる目標設定とその追求という経営スタイルのもと、網羅的に QCD 向上を追求して、現在では日本との立場が逆転している。トップダウンの問題解決は、コンサルタントなど改善のプロフェショナルが取り組んでいるが、ケーススタディ中心でアプローチや手法が共有されにくい。このトップダウンの手法を一般化できれば、誰でも網羅的に課題を抽出することが可能となる。

本論文では、網羅的に課題を抽出する手法として動線分析に着目し、長時間・複数人で行われる作業を対象として、作業するエリア間を作業者が移動するデータを簡便に収集できる機器を開発した。収集したデータを用いて以下に示す移動パターンと作業パターンを分析・抽出して、それらのパターンから定期性と定常性の観点で作業の問題点を抽出した。

移動パターン：作業者の連続した移動ルートの出現頻度から移動の規則性と移動頻度を評価

作業パターン：作業エリアへの移動回数と時間間隔のバラツキから移動間隔と移動頻度を評価

これら２つのパターンによる問題点抽出の検証を通じて、収集された移動データから、移動パターンと作業パターンを短時間で効率的に分析して、定常的な主体作業および、非定常で突発的な付帯・付随作業の問題点を分析するアプローチを提案することが本論文の目的である。

1 章では、日本と諸外国の問題解決のアプローチを比較し、本論文の目的を述べている。

2 章では、従来の分析手法と関連研究を参照して、それらから得られる知見と本論文との関係について述べている。

3 章では、長時間・複数対象作業の動線データ収集を可能にする機器開発と、その機器によって収集された動線データの分析を可能にするシステム開発に関して述べている。

4 章では、作業者の移動ルートの出現頻度に着目して、規則的な移動ルートに含まれる作業エリアの比率と移動回数から 4 通りの移動パターンに分類する手順を提案している。

5 章では、作業者の各作業エリアへの移動回数と時間間隔から移動累積グラフを作成し、グラフのフレ幅と移動回数から 4 通りの作業パターンに分類する手順を提案している。

6 章では、移動パターンと作業パターンの分析結果から改善ポイントの抽出を行い、4 章と 5 章のパターン分析手法の妥当性を検証している。

7 章では、本論文の結論と今後の課題について述べている。

以上要するに、本研究は、諸外国の製造業でトップダウン主導で行われている網羅的なQCD改善が、日本ではコンサルタントなど改善のプロフェショナルのケーススタディ中心の知見になっていることに着目して、動線分析機器を用いた動線データによる動的にかつ簡便的な作業分析・改善を実現化することによって、誰でも網羅的にQCDの課題を抽出することが可能となることを示したもので、インダストリアル・エンジニアリングの分野において、工学上、工業上寄与するところが少なくない。また、これらの成果は、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と言える。

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3985号	氏　名	井本　智明

主 論 文 題 目 ：

Extensions of Binomial and Negative Binomial Distributions

（二項分布と負の二項分布の拡張）

本論文では二項分布と負の二項分布を含む分布について考える。古くから個数データ等の解析に用いられてきた二項分布や負の二項分布は、その応用性を広げるために様々な一般化が考えられてきた。例えば、非心ガンマ分布による混合ポアソン分布として定義される非心負の二項分布がある。この分布は負の二項分布よりも大きな散布度をとることができ、そのため、大きな観測値を取るようなデータにも適応できるものとなっている。また二項分布の一般化として、二項分布とポアソン分布の畳み込みから作られるシャリエ級数分布も考えられてきた。しかし、二項分布とシャリエ級数分布は過小分散のものにしか適応できず、また負の二項分布と非心負の二項分布は過大分散のものにしか適応できないことが知られている。ここで考える分布の一つはラグランジュ分布族に含まれる分布であり、シャリエ級数分布と非心負の二項分布を拡張したものとなっている。この分布は先行研究でなされてきたラグランジュ分布族に含まれる重要な分布をいくつか含むため、それらをサブモデルとして許容する一般的なモデルとして使うことができるという利点を有している。その次に、二項分布と負の二項分布の畳込みから作られる分布についても考える。そこから生成される分布は過小分散型と過大分散型との間を連続的に行き来することができ、極限としてシャリエ級数分布や非心負の二項分布となることができる。また、様々な確率過程からも生じることができ、本論文では３次元ランダムウォークからの生成、移民を含んだ出生死滅過程からの生成、間引き過程からの生成について述べる。最後に主張する分布もまた過小分散型と過大分散型との間を連続的に行き来できる分布である。また、ゼロでの値の頻度に対しても柔軟に対応できる分布となっており、そのためゼロ拡張操作を必要とせず、観測値ゼロの多いデータに対しても直接使用することができるという利点を有している。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3985 号	氏　名	井本　智明

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士	清水　邦夫
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士	柴田　里程
		慶應義塾大学教授	Ph.D.	南　美穂子
		慶應義塾大学教授	理学博士	下村　俊

学士（工学)、修士（理学）井本智明君提出の学位請求論文は「Extensions of Binomial and Negative Binomial Distributions（二項分布と負の二項分布の拡張)」と題し、全六章より構成されている。本論文の著者は、離散確率分布の中でよく知られている二項分布と負の二項分布のいくつかの拡張を与え、注目すべき新しい結果を得た。

本論文の第一章は序論であり、二項分布、負の二項分布およびそれらに密接に関連する分布の Poisson 分布と Poisson 過程を紹介すると共に、本論文において重要な用語の分散指数について紹介している。Poisson 分布の分散指数は 1 であり、二項分布の分散指数は 1 より小（過小分散)、負の二項分布の分散指数は 1 より大（過大分散）である。

第二章では、Lagrange 展開の説明から始めて、第一種および第二種の Lagrange 分布の定義と性質の紹介へと進み、二つの二項分布の組合せと二つの負の二項分布の組合せの両方から第一種 Lagrange 分布としての Jain-Consul の一般化負の二項分布を生成できること、また同様の組合せから第二種 Lagrange 分布としての Charalambides の線形関数負の二項分布が生成できることを先行研究として例示した。これらの例は、本論文の著者による一般定理の特別な場合となっている。実際、著者は、いくつもの異なる確率母関数の組合せによって第一種および第二種 Lagrange 分布が生成されることを示した。これは画期的な結果として評価できる。論文では、本結果のタンデム型待ち行列における解釈も与えている。

Lagrange 分布に関する第二章の定理は第三章において新しい分布の生成に使用されている。著者は第三章において、非心負の二項分布と Jain-Consul の一般化負の二項分布を拡張した分布である Lagrange 非心負の二項分布を提案した。また、提案分布について、確率関数のいくつかの表現や一般化（複合）分布としての表現の仕方などを調べた。本分布はパラメータの値により過小分散にも過大分散にもなり得る柔軟性をもつ分布である。

第四章は $GIT_{3,1}$ 分布の拡張を与えている。$GIT_{3,1}$ 分布は平面上のランダムウォークから生成されるが、著者はそれとは異なる方法を取り、二項分布と負の二項分布の畳み込みから出発して $GIT_{3,1}$ 分布の拡張に成功した。提案分布の確率関数は Meixner 多項式によって表現されるので、確率関数の漸化式や下降階乗モーメントの漸化式を容易に導くことができる。本分布の出生死滅過程と間引き過程からの導出も示されている。

第五章では、Conway-Maxwell-Poisson 分布の拡張形を与え、モーメント、モードなどの諸性質を述べると共に、パラメータの推定法と実データによる分布の適合を議論した。提案分布はパラメータの値により過小分散にも過大分散にもなり得るし、ゼロにおける修正分布を用いることなしにゼロの値の頻度が多いデータにも柔軟に対応できるという利点をもつ。第六章は本論文の結論を簡潔に述べている。

以上要するに、本論文の著者は離散確率分布の中の第一種および第二種の Lagrange 分布について深く研究し、確率母関数の特別な組合せでしか表現されていなかった分布が実は異なる確率母関数のいくつもの組合せによって表現できることを示した。さらに、よく知られた二項分布と負の二項分布を、パラメータの値の選び方により過小分散と過大分散の両方を表現できるような柔軟性をもつ分布へと拡張することに成功した。研究成果は離散確率分布論の進展に著しく貢献しており、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3986号	氏　名	金井　由悟

主 論 文 題 目 ：

気泡塔を用いた吸収剤懸濁溶融塩による高温二酸化炭素回収

地球温暖化対策のため、大気中へのCO_2放出量削減に寄与する二酸化炭素回収貯留技術(CCS)の開発が進んでいる。しかし技術の実用化にはCCS全コストの大半を占めるCO_2分離回収コストの低減が不可欠である。現状、高温燃焼排ガスからのCO_2回収は熱回収されたのち常温付近で操作されているので、高温を維持したまま高純度CO_2を直接回収できれば、高効率な燃焼前回収システムとの併用が期待できるだけでなく、高温により高活性なCO_2はポリマー原料や化学原料として用途が期待でき、廃棄物貯留ではなくCO_2再資源化も期待できる。

そこで、高温ガス中から直接回収を行えるリチウムシリケート(Li_4SiO_4)微粒子懸濁溶融塩スラリー気泡塔による高温CO_2回収システムを提案した。気泡塔の重要な設計パラメータであるガスホールドアップε_Gや物質移動容量係数k_Laを予測する方法は既に確立されているが、既往の研究の殆どすべては空気–水道水系で行われており、高温溶融塩系での知見はほぼ存在しない。従って、本研究の実験成果は今後高温での気液接触装置として応用が期待できる高温溶融塩気泡塔の設計データとしても重要である。

本論文では、Li_4SiO_4懸濁溶融塩スラリー気泡塔を提案し、CO_2ガス吸収反応過程のメカニズムの解明と最適操作条件の探索を行った。また、気泡塔の設計に不可欠な物質移動挙動に関する知見を得るため、CO_2の高温炭酸塩中への溶解度及び物質移動係数を測定し、以下の成果を得た。

Li_4SiO_4溶融塩スラリーへのガス吸収実験により、連続的なCO_2脱吸収が温度スイングにより可能であることを確認した。また本研究対象の総括反応吸収プロセスは、気泡内ガス中のCO_2分子が液相中へ溶解および物理的輸送される物質移動過程と、Li_4SiO_4微粒子表層での化学反応によって消費される反応過程からなり、物質移動過程が律速となっていると推測した。また固相である吸収剤Li_4SiO_4粒子の存在の影響を明らかにし、最適操作条件を明らかにするため、ガス空塔速度U_Gおよびスラリー濃度C_{LS}の影響を検討した。ガス空塔速度の増加にともない塔内の物質移動が促進され、CO_2ガス吸収速度が増加した。一方、スラリー濃度C_{LS}<15 wt%では、C_{LS}の増加とともに吸収量は増加したが、C_{LS}= 5 wt%付近で吸収量は飽和し、C_{LS}> 15 wt%で減少に転じた。また、スラリー液高の増加に伴いガス滞留時間が増加し、CO_2回収率が上昇した。

また、ほとんど研究が進んでいない高温溶融系でのCO_2のk_Laを600 Kから1200 Kの広い温度域で測定し、k_Laに及ぼす温度の影響を明確化した。すなわちCO_2のk_Laは温度の上昇と共に減少し、ガス空塔速度の増加と供に上昇した。

以上に示した気泡塔を用いた吸収剤懸濁溶融塩による高温CO_2回収システムの基礎研究により、CCS技術における分離回収コストの低減と回収後の新たなCO_2再利用が期待できる。また、高温液相である溶融塩を用いた気泡塔内での物質移動挙動について解明したことで、高温下での高速気液系反応などへの応用が期待される高温溶融塩気泡塔の設計や実用化が期待できる。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3986 号	氏　名	金井　由悟

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	寺坂宏一
	副査	慶應義塾大学准教授	博士(工学)	横森　剛
		慶應義塾大学准教授	博士(工学)	片山　靖
		慶應義塾大学専任講師	博士(農学)	奥田知明

学士(工学)、修士(工学)金井由悟君の学位請求論文は「気泡塔を用いた吸収剤懸濁溶融塩による高温二酸化炭素回収」と題し、全 5 章からなる。

本論文は、高温下での二酸化炭素回収技術としての適用を見据えた高温溶融塩スラリー気泡塔システムを開発するために、二酸化炭素ガスの吸収速度に及ぼす操作条件の影響とガス吸収プロセスで生じている現象の解析と理論構築を行い、操作条件の最適化および装置設計指針を示唆するものである。とくに高温液相中でのガス溶解に関わる物質移動の解明に取り組み、これまでにほとんど知見が無かった物質移動係数に関する幅広い温度依存性を明らかにした。

第 1 章では、本論文が研究対象とした気泡塔を用いたリチウムシリケート懸濁溶融塩による高温二酸化炭素回収技術の概要と目的について述べ、関連する既往の研究を概観し問題提起している。

第 2 章では、本論文での議論の基礎となる気泡塔やスラリー気泡塔型反応装置の設計理論および塔内で生じるガス吸収理論について概説している。

第 3 章では、二酸化炭素を高温下で回収する新しいプロセスシステムを提案している。このシステムで起こる吸収剤懸濁スラリーが二酸化炭素を高温下で吸収するメカニズムは物質移動および化学反応プロセスからなると実験的および理論的に明らかにしている。高温溶融塩液相中に懸濁した吸収剤であるリチウムシリケート固体粒子の存在状態や、スラリー気泡塔の各操作条件が液相での気液間物質移動プロセスに及ぼす影響を実験的に調べ、高温溶融塩スラリー気泡塔の基礎的な設計指針を提案している。

第 4 章では、高温で操作される気液反応装置の設計において不可欠であるにもかかわらず、これまで十分な研究成果やデータが得られていなかった高温液相中での溶解ガス成分の物質移動メカニズムの解明に取り組み、物質移動容量係数の実測ならびにそれに及ぼすガス空塔速度の影響、操作温度の影響を明らかにすることに成功している。

第 5 章は、本論文の結論であり、全体の総括を与えている。

以上要約すると、高温操作条件下において気液２相系あるいは固気液３相系など連続液相中に分散相が存在する不均一系反応装置内の総括反応速度に及ぼす各相の物性や挙動、ガス空塔速度や反応温度など操作条件の影響を明らかにし、その推定を可能とする内容である。さらに本論文中に示された基礎的知見は、二酸化炭素回収プロセスへの適用だけでなく、燃焼プロセスや高温気液反応プロセスなど、高温液相を反応操作場として用いる工業プロセスにおいても有益である。

これらの成果は工学上寄与するところが極めて大きく、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3987号	氏　名	安達　智史

主 論 文 題 目 ：

抗生物質ラクトナマイシン類の全合成

本研究は抗生物質ラクトナマイシン類の全合成に関するものである。ラクトナマイシンは、メチシリン耐性黄色ブドウ球菌やバンコマイシン耐性腸球菌に対する強力な抗菌活性、および各種腫瘍細胞に対して細胞毒性を示す。またその構造は、A～F の特異な 6 環性アグリコン部分の第 3 級水酸基に L–ロジノースが結合しており、非常にユニークな化合物である。一方、ラクトナマイシン Z はジギトキソースが結合した糖類縁体であり、ラクトナマイシンに比べると微弱な抗菌活性しか示さないことが報告されている。

ラクトナマイシン類の合成に先立ち、まず最も複雑で高度に酸素官能基化された EF 縮環部分の効率的な構築法の確立をめざし、ラセミ体のモデル BCDEF アグリコンの合成を行った。数工程で合成した(±)-3-ethynyl-2,3-dihydro-2,3,5-trihydroxy-2-(hydroxymethyl)-1,4-anthraquinone から、オキシパラデーションに続くメトキシカルボニル化にて E 環を構築した後、立体選択的なメタノールの付加とラクトン化で F 環の構築を行うことで、モデル BCDEF アグリコンを合成することができた。なお、メタノールの付加は不可逆的であり、EF 環は強酸性条件において安定であることが分かった。さらにモデル BCDEF アグリコンを、(2*R*,5*S*,6*S*)-5-((*tert*-butyldimethylsilyl)oxy)-6-methyl-tetrahydro-2*H*-pyran-2-yl acetate を用いて配糖化し、最後に保護基を除去することで、ラクトナマイシンモデル化合物へ誘導することができた。

一般にイソインドリノンを含む化合物は、非常に空気酸化を受けやすいことと、溶解性が著しく低いことが知られていたため、ラクトナマイシン類に含まれるイソインドリノン部分の 5 員環ラクタム(A 環)構築を合成終盤に行う経路での全合成を目指すことにした。そこで合成終盤でも用いることができる A 環の構築法として、Bischler–Napieralski 反応を 5 員環ラクタム合成に初めて応用した。この反応は、カルバメートのアルコキシ基をメチル基からイソプロピル基へと変更することで、温和な条件下、高収率でイソインドリノンを合成できることが分かった。また、本反応機構について詳細に調査し、カルバモイルカチオンが中間体であることを明らかにした。

これらの知見を踏まえてラクトナマイシンの全合成に着手した。まず A 環構築のための足掛かりを有する 8-(*N*-isopropoxycarbonyl-*N*-methyl)aminomethyl-5-methoxyhomophthalic anhydride を数工程にて合成し、これより発生させたジエンと、*tert*-butyldiphenylsilyl 基でアルキン末端を保護した 3-((*tert*-butyldiphenylsilyl)ethynyl)-5-chloro-2-((methoxymethoxy)methyl)-1,4-benzoquinone との環化付加、続くジヒドロキシ化とパラジウム触媒を用いたオキシパラデーションなどにより 5 環性化合物を合成した。このイソプロピルカルバメートに対して Bischler–Napieralski 型環化反応を行ったところ、高収率で A 環を構築することができ、ラセミ体でラクトナマイシノンを合成することができた。得られたラクトナマイシノンに対して(2*R*,5*S*,6*S*)-6-methyl-5-((triethylsilyl)oxy)tetrahydro-2*H*-pyran-2-yl acetate を反応させることで配糖体を得ることができ、最後に全ての保護基を除去して、ラクトナマイシンの全合成を達成した。一方、ラクトナマイシン Z の全合成に向けて、一旦立体障害の小さい(6*S*)-6-methyl-3,6-dihydro-2*H*-pyran-2-yl 2-methoxyacetate を配糖化した後、この二重結合部分をジヒドロキシ化することでラクトナマイシン Z の全合成を達成することができた。またラクトナマイシン類を加水分解して、それぞれのアグリコンを比較することによって、不明であったラクトナマイシン Z の絶対立体配置を決定することができた。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3987 号	氏　名	安達　智史

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	中田　雅也
	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	工学博士	戸嶋　一敦
		慶應義塾大学准教授	博士(工学)	高尾　賢一

学士（工学）、修士（工学）安達智史君提出の学位請求論文は、「抗生物質ラクトナマイシン類の全合成」と題し、序論、本論５章、総括、および実験項より構成されている。

ラクトナマイシンは、メチシリン耐性黄色ブドウ球菌やバンコマイシン耐性腸球菌に対する強力な抗菌活性、および各種腫瘍細胞に対する細胞毒性を示す抗生物質である。その化学構造は、A～F 環からなる特異な６環性アグリコン部分(ラクトナマイシノン)の第３級水酸基に L-ロジノースが結合しており、極めてユニークである。一方、ラクトナマイシン Z は、ラクトナマイシンの糖類縁体であり、ジギトキソースが結合しているが、ラクトナマイシンに比べると弱い抗菌活性しか示さない。本論文の著者は、このようなユニークな化学構造と強い生物活性をもつラクトナマイシン類に興味をもち、その全合成研究を展開した。

序論では、ラクトナマイシン類の概要と、他のグループによる合成研究について述べている。

本論第一章では、最も複雑で高度に酸素官能基化された EF 縮環部分の効率的な構築法の確立をめざし、モデル BCDEF アグリコンのラセミ体での合成を行ったことについて述べている。鍵反応は、E 環構築のためのオキシパラジウム化－メトキシカルボニル化であり、続く立体選択的なメタノールの付加とラクトン化で F 環を構築し、モデル BCDEF アグリコンを合成した。なお、メタノールの付加は不可逆であり、EF 環は強酸性条件において安定であることを見いだした。さらに、このモデル BCDEF アグリコンを、L-ロジノース誘導体を用いて配糖化し、ラクトナマイシンモデル化合物へ誘導することができた。この配糖化の成功により、ラクトナマイシン類の全合成において、最終段階で配糖化するという道筋を見いだすことができた。

第二章では、ラクトナマイシン類に含まれるイソインドリノン骨格構築法の開発について述べている。６員環ラクタム合成に用いられていたBischler-Napieralski型反応を、イソインドリノン骨格の５員環ラクタム(A環)部分の合成に初めて応用し成功した。また、カルバメート部分のアルコキシ基をメチル基からイソプロピル基へと変更することで、温和な条件下、高収率でイソインドリノン骨格を構築できることを明らかにした。さらに、反応機構について詳細に検討し、カルバモイルカチオンが反応中間体であることも明らかにした。

第三章では、第一、二章の知見を踏まえて、ラクトナマイシン類の６環性アグリコン部分であるラクトナマイシノンを合成したことについて述べている。位置選択的な Diels-Alder 反応、ジヒドロキシ化、オキシパラジウム化－メトキシカルボニル化などを鍵反応として５環(BCDEF 環)性化合物を合成した。そのイソプロピルカルバメート部位に対して Bischler-Napieralski 型環化反応を応用したところ、高収率で A 環を構築することができ、ラクトナマイシノンの高効率的なラセミ体での合成に成功した。

第四章では、ラクトナマイシン類の全合成について述べている。第三章で得られたラクトナマイシノンに対して L-ロジノース誘導体を反応させることで配糖化し、最後に全ての保護基を除去して光学活性なラクトナマイシンの全合成を達成した。また、配糖化ののちにジヒドロキシ化する方法により、ラクトナマイシン Z の全合成も達成した。さらに、天然及び合成ラクトナマイシン類を加水分解して、それぞれのアグリコンをキラル HPLC で比較することにより、不明であったラクトナマイシン Z の絶対立体配置を決定した。

第五章では、合成した各種ラクトナマイシン類の生物活性評価について述べている。

以上、著者の研究は、極めてユニークな化学構造をもつラクトナマイシン類を、新規で独創的な合成経路で全合成したものであり、天然物化学および有機合成化学の発展に大いに貢献し、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3988号	氏　名	糟谷　正樹

主 論 文 題 目 ：

マルウェアの特徴的振る舞いの誘発によるマルウェア対策手法に関する研究

マルウェア対策はコンピュータセキュリティ上の重要な課題である．コンピュータがマルウェアに感染するとログインアカウントやパスワードなどの個人情報が盗まれたり，詐欺被害に遭うなど様々な被害を受ける．セキュリティベンダの報告によると，2012年に新たに報告されたマルウェアは4,000万件以上に上る．そのため，防御側は増え続けるマルウェアに対して適切に対策を行う必要がある．

マルウェア作成の技術は向上し続けているため，精巧に作られたマルウェアに対処することは困難である．マルウェア作成者はpolymorphismやmetamorphismを利用してアンチウイルスソフトを回避する．アンチウイルスソフトが利用するシグネチャマッチングと呼ばれる方法は，既知のマルウェアを解析して得たシグネチャと検査対象のプログラムのバイナリ列が一致するかを調べる．そのため，僅かにバイナリを変更することによりマルウェアは容易にシグネチャマッチングを回避できる．一方，振る舞い検出による対策はマルウェア間に共通する振る舞いが検査対象のプログラムに含まれるかを検査する．ここでいう振る舞いとはシステムコールやAPI (Application Programmers Interface) の呼び出し列のことであり，静的解析や動的解析を利用して振る舞いを抽出する．しかし，マルウェアの多くは難読化を利用して，プログラムの振る舞いを正しく抽出することを困難にしている．動的解析は難読化の影響を受けないもののステルス性の高いマルウェアに対処できていない．ステルス性の高いマルウェアは頻繁な動作を避けて振る舞いを抽出することを困難にしたり，得られた振る舞いから悪意ある振る舞いを含むかどうかの判別を困難にするためである．

本論文では，マルウェアの特徴的な振る舞いを誘発するための作為的な環境を用意して，ステルス性の高いマルウェアに対処する方法を提案する．本手法はマルウェアの種類に応じた入力を作為的に与える環境を用意することにより，マルウェアが実行せざるを得ない状況を作り出す．その結果，頻繁な動作を避けるマルウェアを活性化させたり，得られた振る舞いが悪意ある動作を含むかどうかの判別を困難にするマルウェアに作為的に特徴的な動作を誘発させることを可能とする．本論文では，提案手法の具体例としてアドウェア・スパイウェアと偽アンチウイルスソフトの2種類に対処する．これらは現在においても多くの影響を与えているマルウェアのためである．

アドウェアとスパイウェアは頻繁な動作を避けて自身の悪意ある振る舞いを隠す．そのため，効率良く詳細な解析を行うためには，アドウェア・スパイウェアを活性化させる刺激を外部から与えて，強制的に動作させる環境を用意することが好ましい．これを実現するために，本研究ではBlayzardを提案する．BlayzardはInternet Explorer (IE) のアドオンであるBrowser Helper Objectとして実現されており，偽装した大量のIEイベントを作り出し，アドウェアやスパイウェアに挿入するシステムである．偽のイベントに騙されたアドウェアやスパイウェアはその挙動を活性化させるため，頻繁な動作を避けるアドウェア・スパイウェアであっても解析を行うことができるBlayzardの有用性を確認するために，32個のアドウェア・スパイウェアと10個の無害なBHOを利用した結果，Blayzardは全ての検体の挙動を活性化させて，その振る舞いを解析することができた．

偽アンチウイルスソフトは正規のアンチウイルスソフトの挙動を考慮して動作するため，得られた振る舞いが悪意ある動作を含むかどうかを判別することは難しい．この問題を解決するために，正規のアンチウイルスソフトと偽アンチウイルスソフトの違いを誘発する方法と，両者の判別を行う指標を発見することは重要である．本論文では，マルウェアを利用して振る舞いの違いを誘発する．マルウェアのあり・なしの環境を用意して，両方のアンチウイルスソフトを動作させる．その後，環境の違いで振る舞いに差が生じるかどうかを調べ，正規か偽アンチウイルスソフトであるか判別する．実験的な調査から，振る舞いの違いを判別する際にメモリ使用量が最も精度よく判別できることを示す．その違いを機械的に判別するために，統計手法であるリーベン検定を利用する．提案手法の有効性を示すために39個の偽アンチウイルスソフトと8個の正規のアンチウイルスソフトを用いた結果，各々を正しく分類することができた．正規のアンチウイルスソフトはマルウェアが存在する環境でのみメモリを著しく使用したのに対して，偽アンチウイルスソフトは環境の違いに関わらず，メモリ使用量が変わることはなかった．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3988 号	氏　名	糟谷　正樹

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士(理学)	河野 健二
	副査	慶應義塾大学教授	博士(工学)	重野 寛
		慶應義塾大学准教授	博士(工学)	高田 眞吾
		慶應義塾大学准教授	博士(工学)	西 宏章

学士 (工学)，修士 (工学) 糟谷正樹君提出の学位請求論文は，「マルウェアの特徴的振る舞いの誘発によるマルウェア対策手法に関する研究」と題し，全 6 章から構成されている．

マルウェア対策はコンピュータセキュリティ上の重要な課題である．マルウェアは悪意あるソフトウェアの総称であり，マルウェアを利用した個人情報の流出や詐欺行為などの犯罪が増加している．マルウェア作成技術は向上し続けており，洗練されたマルウェアに対処するためには，同様に対策技術を向上する必要がある．しかし，現在のマルウェア対策はステルス性が高いマルウェアに十分に対処できていない．ステルス性の高いマルウェアは 1) 頻繁な動作を避ける，2) 害のない振る舞いを模倣することにより，既存のマルウェア対策を回避する．本論文では，マルウェアの特徴的な振る舞いを誘発するアプローチによりステルス性の高いマルウェアに対処する 2 つの手法を提案し，現在においても猛威を振るっているアドウェア，スパイウェア及び偽アンチウイルスソフトに対して提案手法を適用している．

第 1 章は本論文の序論である．本研究の背景，目的，及び論文の構成について述べている．

第 2 章の関連研究では，既存のマルウェア対策手法について述べている．本論文では既存のマルウェア対策手法をシグネチャマッチング，静的解析を利用する方法，動的解析を利用する方法の 3 つに分類して，各手法が対処できる有効範囲を明らかにするとともに，それぞれ単体ではステルス性の高いマルウェアに対処できないことに言及している．

第 3 章は本論文の核となる考え方である，マルウェアの特徴的な振る舞いを誘発するアプローチについて述べている．ステルス性の高いマルウェアに対処するために，本アプローチはマルウェアが実行せざるを得ない作為的な環境を用意して意図的にマルウェアの振る舞いを誘発している．

第 4 章はアドウェア，スパイウェアの解析を行うシステムである Blayzard を提案している．頻繁な動作を避けるステルス性の高いアドウェア，スパイウェアの解析を行うために Blayzard は特徴的な振る舞いを誘発させる大量のイベントを注入している．実験の結果，Blayzard は実在する 32 個のアドウェアとスパイウェアの振る舞いを正しく解析している．また，大量のイベントを注入することによりステルス性の高い振る舞いを活性化させることができている．

第 5 章は偽アンチウイルスソフトを判別する方法を提案している．偽アンチウイルスソフトは正規のアンチウイルスソフトの振る舞いを模倣するステルス性の高いマルウェアであり，偽アンチウイルスソフトはマルウェアの検出を行わない．本論文はこの点に着目して，マルウェアのあり，なしにより得られる振る舞いの違いを比較することにより正規のアンチウイルスソフトと偽アンチウイルスソフトの判別を行う．本論文では，検査対象のアンチウイルスソフトをマルウェアのあり，なしの環境で動作させ，両環境から得られるメモリ使用量に違いが出るかどうかを統計的に判別することにより，正規のアンチウイルスソフトか偽アンチウイルスソフトかの判別を行っている．実験では，提案手法により実在する 39 個の偽アンチウイルスソフトを偽物と判別し，8 個の正規のアンチウイルスソフトを本物として判別している．

第 6 章は本論文の結論であり，論文を総括すると共に今後の展望について述べている．

以上，本論文は，マルウェアの特徴的な振る舞いを誘発するアプローチにより，実在するステルス性の高いマルウェアに対処できることを示しており，その貢献は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3989号	氏　名	皆川　卓也

主 論 文 題 目 ：

Speed-up of Biologically Inspired Image Categorization for Information Retrieval and Object Localization

（生物学的知見に基づいた画像分類手法を情報検索と物体位置検出に応用するための高速化）

撮影された画像中に「何」が写っているのかを判断することは、人間にとっては比較的易しいタスクであっても機械にとってはまだまだ難しい課題である。霊長類が物体を「何」であるか認識する場合、特に物体提示後100ミリ秒から130ミリ秒で行われる「瞬間的な認識」に関しては、視覚皮質の腹側経路におけるフィードフォワードパスで行われていることがわかっている。この腹側経路におけるフィードフォワードパスを計算アルゴリズムとして近似したものとしてHMAXモデルが知られているが、脳とコンピュータのアーキテクチャが大きく異なるため、このHMAXをアプリケーション向けに使用しようとした時、その処理速度が大きな問題となる。

そこで本論文では、HMAX特徴を実用的なアプリケーション構築のために高速化することを目指す。

HMAXはもともと物体カテゴリ認識向けに構築されたモデルのため、まずは同タスク向けに高速化を行い、その応用例として情報検索サーバーを構築する。高速化にあたり、そのボトルネックであるS2層の処理負荷を軽減することを中心に、特徴量の簡略化、処理領域の削減、計算する特徴数の削減などを組み合わせることで、計算時間の削減を行う。

更にHMAX特徴を物体検出という、より高度なタスクへ適用する。この場合画像上の各位置でカテゴリ認識を行うことになり、更に計算の負荷が大きくなる。そこで、HMAXが形状との類似度を算出する特徴であることに着目し、画像中に存在する物体の持つ形状との類似度を手がかりにCoarse-to-Fineに物体の候補領域を絞り込む手法を提案する。これにより、Sliding Windowを用いてHMAXを使用した際に発生する冗長性を大幅に削減することができる。

提案手法の有効性を示すため、カテゴリ認識ではCaltech101や屋外シーン画像データに対して、物体検出ではUIUC CarデータセットやFDDBデータセットに対し、その処理速度及び認識精度を定量的に検証した。それにより認識率の低減はわずかに抑えながら、カテゴリ認識ではおよそ37倍、検出では250倍以上の大幅な処理速度の改善を行うことができたことを確認した。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3989 号	氏　名	皆川　卓也

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	工学博士	萩原　将文
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学）	杉本　麻樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	青木　義満

学士（工学）、修士（工学）皆川 卓也君提出の学位請求論文は、「Speed-up of Biologically Inspired Image Categorization for Information Retrieval and Object Localization（生物学的知見に基づいた画像分類手法を情報検索と物体位置検出に応用するための高速化）」と題し、６章より構成されている。

カメラにより撮影された画像の内容をコンピュータにより理解する技術は、Computer Vision 分野で古くから研究され、近年はオンライン情報検索等にも実用化され始めている。この画像理解のためのアプローチの一つに、生物の視覚や脳で行われている情報処理の仕組みを表わす生物学的モデルに基づく方法があり、これまでに、ニューラルネットワークや、ネオコグニトロン、HMAX 等が提案されている。

本論文は、この生物学的モデルに基づく画像理解手法である HMAX を高速化する手法を新たに提案し、従来はその計算量の多さから実用が困難だった HMAX が情報検索や物体検出といった実用的な問題に適用可能であることを示したものである。

第１章では、コンピュータによる画像理解の意義について論じ、本研究の目的と論文の構成について述べている。

第２章では、生物のうち霊長類の視覚系の視覚皮質の構造と機能を示し、この構造に基づいた画像の学習・認識手法である HMAX の構成を説明し、その応用や拡張例について示している。

第３章では、本論文で取り上げている HMAX の関連手法について述べている。特に、物体認識のための特徴量記述手法と、物体認識の高速化のための関連手法について解説することにより、HMAX の高速化の意義を明確にしている。

第４章では、HMAX を用いて物体カテゴリ認識を行う際に生じる処理コストのボトルネックとなっている計算を近似し、結果として処理を高速化するための手法を提案している。そして物体カテゴリ認識に広く使われている標準画像データベースを用いて提案手法の性能を評価している。その結果、高速化を行わない場合に比べて、認識精度の低下を 1%未満に抑えつつ、計算時間を約 30 分の１に短縮できた。さらに、提案手法に基づいた検索アプリケーションを実装している。検索時間は 0.8 秒程度であり、提案手法が実用に耐えうる高速な処理速度を HMAX で実現できることを実証している。

第５章では、HMAX を用い、Sliding Window という手法で物体検出を行う際に生じる処理の重複等の冗長性を削減することで、検出を高速化する方法を提案している。そして、提案手法の物体検出性能を落とすことなく、その計算量を Sliding Window を用いた標準的な物体検出手法に対して約 0.3%程度まで短縮できることを、標準的な画像データベースを用いた実験により示している。

第６章は結論であり、本論文で得られた成果をまとめており、さらに本研究成果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、生物の視覚処理機構をモデル化した手法の一つである HMAX の計算時間の問題を解決する手法を提案し、実験により有効性を実証したものである。これらの成果は、コンピュータによる画像理解・認識の研究やそれを応用した様々な情報サービス産業への貢献が期待でき、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3990号	氏　名	玉川　奨

主 論 文 題 目 ：

日本語 Wikipedia オントロジーの自動構築と評価

大規模オントロジーは，データ統合などの情報基盤として期待されているが，オントロジーの手動構築には，コストと保守に大きな課題を抱えている．その課題を解決するために，フリーテキストからのオントロジー自動構築が試みられてきたが，自然言語理解に限界があり，実用レベルに到達しないことから，近年，半構造情報を有する情報資源からオントロジーを自動的に構築する方法が注目されてきた．以上の背景から，本論文では，Web 上のオンライン百科事典である日本語版 Wikipedia の有する半構造情報から，インスタンスの抽出，概念抽出，概念間の上位下位関係，インスタンス間の意味的関係（プロパティ），プロパティの定義域と値域，プロパティタイプなど，オントロジーとして重要な情報を抽出する方法を検討し，大規模汎用オントロジー（日本語 Wikipedia オントロジーと呼ぶ）を自動構築し，日本語 Wikipedia オントロジーの領域オントロジー構築支援可能性と Linked Open Data のハブの観点から，その有用性を評価する．

以下に本論文の構成を示す．

はじめに，第 1 章において，本研究の背景，問題，目的について述べる．

第 2 章では，本研究の関連技術として，オントロジーの定義および具体例，オントロジー構築方法論，Wikipedia，Linked Open Data について述べると共に，それらの関連研究についても述べる．

第 3 章では，日本語版 Wikipedia から概念および概念間の関係（is-a 関係，クラスーインスタンス関係，プロパティ定義域，プロパティ値域，プロパティ上位下位関係，インスタンス間関係，その他の関係）を抽出することで，日本語 Wikipedia オントロジーを自動構築する手法の提案と各手法の評価について述べる．

第 4 章では，日本語 Wikipedia オントロジーの領域オントロジー構築支援としての評価について述べる．また，Linked Open Data としての設計と公開，Linked Open Vocabularies との連携による日本語語彙構築手法の提案と評価，検索支援ツール WiLD の設計と評価により，Linked Open Data のハブとしての評価について述べる．これらの評価から日本語 Wikipedia オントロジーの有用性を示す．

最後に第 5 章では，本論文のまとめと今後の課題および展望について述べる．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3990 号	氏　名	玉川　奨

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	山口　高平
	副査	慶應義塾大学教授	博士(工学)	櫻井　彰人
		慶應義塾大学教授	博士(工学)	鈴木　秀男
		慶應義塾大学教授	工学博士	萩原　将文

工学士，修士（工学）の玉川奨君提出の学位請求論文は「日本語 Wikipedia オントロジーの自動構築と評価」と題し，5 章より構成されている．

大規模オントロジーは，データ統合などの情報基盤として期待されているが，オントロジーの手動構築には，多大なコストを要しているのが現状である．そのコストを低減するために，フリーテキストからのオントロジー自動構築が試みられてきたが，自然言語理解技術の限界により実用レベルに到達しないことから，近年，半構造情報資源からのオントロジー自動構築に関心が高くなってきた．以上の背景から，本論文では，Web 上のオンライン百科事典である日本語 Wikipedia の有する半構造情報から，クラス，プロパティ，インスタンスなどのオントロジー構成要素を抽出する手法を検討した後，大規模な日本語 Wikipedia オントロジーを自動構築し，様々な観点から，その有用性を確認している．

第 1 章は，本研究の序論であり，研究の背景と問題意識，目的について述べている．

第 2 章では，本研究の関連技術として，オントロジーの定義および具体例，オントロジー構築方法論，日本語 Wikipedia，Linked Open Data について述べるとともに，それらの関連研究についても言及している．

第 3 章では，日本語版 Wikipedia から概念(クラス)，クラス上位下位関係，クラスーインスタンス関係，プロパティ定義域，プロパティ値域，プロパティ上位下位関係，インスタンス間関係，などを自動抽出する手法群を設計し，クラス数が約 16 万，インスタンス数が約 187 万，プロパティ数が約 2 万 5 千，トリプル数が 1300 万を超える大規模な日本語 Wikipedia オントロジーを構築している．

第 4 章では，発電所オントロジー構築支援可能性，日本語 DBpedia との双方向リンクからの日本語 Linked Open Data のハブとしての有用性，Linked Open Vocabularies との連携による日本語語彙構築可能性，企業会計情報である XBRL Linked Open Data への適用可能性などの様々な観点から，日本語 Wikipedia オントロジーの有用性を確認している．また，すでに日本語 Wikipedia オントロジーは Web 上で公開され，多数のユーザが利用しており，社会的にも大きく貢献している。

最後に第 5 章では，本論文のまとめと今後の課題および展望について述べている．

以上要するに本論文では，オントロジー構成要素抽出手法を実装して，半構造情報資源である日本語 Wikipedia から大規模なオントロジーを自動構築し，様々な観点からその有用性を確認しており，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3991号	氏　名	手塚　伸

主 論 文 題 目 ：

クラウドストレージにおける電子文書の削除と完全性の保証に関する研究

近年，e-文書法の施行により，保存義務期間が定められた電子カルテや国税関連の書類など，プライバシーや機密情報を多分に含む書類が電子的に扱われている．他方，クラウドコンピューティングが注目を集めており，電子文書をクラウド上で管理する試みがなされている．しかし，クラウドにはセキュリティに関連する問題も多いのが現状である．

そこで本研究では，クラウドストレージにおける「削除保証」と「完全性の保証」という問題に着目した．削除保証とは，保存されたデータが完全に削除され，それ以後は何人であってもデータを復元できないことを保証することである．しかし，高いレベルで抽象化されたクラウドストレージでは，物理デバイスをユーザが直接操作できないため，これを実現する手法が必要とされている．また，e-文書法ではファイルの変更記録とアクセスログについても完全性が保証される形で保全することが求められている．

既存研究にも，削除保証を目的としたものがある．しかし，追記型のファイルに対して保存義務期間を超過した版のみの削除ができない点や，共有ファイルに対して柔軟な削除条件の指定ができないなどの課題があった．また，それらはファイルの完全性や変更記録の順序性については留意していない．

そこで，本研究では２つの手法を提案した． 第一の手法は，ハッシュ関数による連鎖鍵と(k, n)閾値秘密分散法により，削除条件を制御する暗号鍵を生成する手法である．これにより，アクセスログなどの追記型ファイルに対して，保存義務期間を超過した版の削除保証を可能にする．また，AND/OR 演算を含む複数ポリシに基づいた削除保証が可能となり，複数のユーザやグループにファイルが共有されるような場合でも，適切な削除条件の設定が実現される．

第二に，本研究ではヒステリシス署名を応用した手法を提案した．これは，各ファイルの変更記録に対するヒステリシス署名を Merkle Hash Tree で集約し，組織内のクライアントへ分散保存するものである．これにより，署名履歴のロールバックアタックを防止し，ファイルに対する変更記録の完全性と順序性が保証される．

実装面では，クラウドストレージをバックエンドとする仮想ファイルシステムを開発し，上記の２つの手法を具現化させた． また，この仮想ファイルシステムでは，通常のファイルシステムと透過的なインターフェースが提供される．そのため，組織は既存のアプリケーション資産を活かしながら，クラウドへの移行を実施できる．また，評価実験の結果より，提案手法がパフォーマンスに与えるオーバーヘッドは小さく，有用であることを検証した．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3991 号	氏　名	手塚　伸

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学	教授	工学博士	岡田　謙一
	副査	慶應義塾大学	教授	工学博士	笹瀬　巌
		慶應義塾大学	教授	博士(工学)	重野　寛
		慶應義塾大学	准教授	博士(理学)	河野　健二

学士（工学），修士（工学）手塚伸君提出の博士学位請求論文は「クラウドストレージにおける電子文書の削除と完全性の保証に関する研究」と題し，全 7 章より構成されている．

近年，インターネットの普及や e-文書法の施行により，多くの文書が電子的に扱われており，これらをクラウドストレージ上で管理する試みがなされている．なかでも，医療や国税関係の書類は，定められた一定の期間は機密性，完全性が担保される形で保全される必要がある．他方，その期間が経過した後は，プライバシーや機密保持の観点から確実な削除が求められる．しかし，高度に抽象化されたクラウドストレージでは，記憶デバイスを直接操作できないため，ユーザがこれを実施したり確認したりすることができないという，削除保証の問題があった．削除保証を実現するために，暗号化を用いた関連研究もあるが，削除実施の条件となるポリシーを論理演算で複数指定することや，保存義務期間を超過した版のみの削除といった複雑な操作を行うことができなかった．また，これらはファイルの変更記録の完全性を保証する点については留意していなかった．

そこで手塚君は，ファイルの削除を保証するために用いる暗号鍵の生成方法に着目し，ハッシュ関数と(n, k)閾値秘密分散法を用いた手法を提案している．これにより，保存義務期間の長さや，複数ユーザによる共有の有無といった文書の性格に応じて，完全な削除を実施する条件を論理演算で指定し，柔軟に制御することが可能となった．さらに，ファイルの変更記録に対してヒステリシス署名を適用することで，変更記録の順序性を含めて完全性が保証される．また，本研究で開発されたファイルシステムは削除と完全性の保証に関する手法の適用に加えて，他のファイルシステムと透過的なインターフェースを提供している．これにより，利便性の向上や既存のソフトウェア資産の有効活用が可能となった．

本論文の構成を以下に示す．本論文は全 7 章から構成され， 1 章では本研究の背景と位置づけ，学術的貢献について述べている．

2 章では，クラウドストレージで文書を管理する上での一般的な問題を法律，運用，セキュリティの観点から整理し，本研究が着目した削除と完全性の保証に関する関連研究の技術的な課題について詳述している．

3 章では，削除保証と完全性の保証に対して，本研究の中核となる 2 つの手法について述べている．まず，ハッシュ関数で連鎖された暗号鍵を導入することで，ファイルの一部の変更記録に対する削除保証を実現する手法について記している．そして削除を実施するための条件を AND/OR の論理演算で指定できるように，(k, n)閾値秘密分散法を導入した手法について述べている．次に，第三者機関に頼らずに，保存されたファイルの各版の完全性を保証するため，ヒステリシス署名と Merkle Hash Tree により生成された電子署名を複数のクライアントへ分散保存させる手法について述べている．

4 章では，クラウドストレージに対して定期的にファイルを増分バックアップする環境を対象に，削除保証の手法を適用したクラウド型ファイルバックアップシステムについて述べ，5 章では，削除保証に加えて，ファイルの完全性を保証するための手法を適用した仮想ファイルシステムについて述べている．

また，6 章では提案手法およびシステムの安全性や今後の課題について考察し，7 章で本研究の結論を述べている．

以上のとおり，本研究により，クラウドストレージ上の電子文書に対して，機密性，完全性が保たれた状態で，より柔軟な管理と確実な削除を実現する手法が示された．これらの研究成果は，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3992号	氏　名	白兼　研史

主 論 文 題 目 ：

アミド基選択的な求核付加反応の開発とゲフィロトキシンの全合成

本論文は、アミド基選択的な求核付加反応の開発と、本反応を用いたゲフィロトキシンの全合成について述べたものである。

緒論第一章では、これまでに報告されているアミド基に対する求核付加反応を紹介した。第二章では、ゲフィロトキシンの構造、生物活性、そしてこれまでに報告された全合成および形式合成例を紹介した。

本論第一章では、アミド基選択的な求核付加反応の開発について述べた。まず、DIBAL を用いてアミド基に対する直接的な求核付加反応を検討した。*N*-メトキシアミドを–78℃で DIBAL 還元し、$Sc(OTf)_3$ を添加するとオキシイミニウムイオンが生じた。続いて、アリルトリブチルスズを添加して室温に昇温すると還元的アリル化が進行することを見出した。本反応は、脂肪族アミドや芳香族アミドなど幅広い基質一般性を有している。さらに、中間体が容易に分解しやすい大環状ラクタムにも適用できた。続いて、Schwartz 試薬（Cp_2ZrHCl）を用いて官能基選択的な求核付加反応を検討した。エステル基が共存した *N*-メトキシアミドを Schwartz 試薬で還元し、アリルトリブチルスズと触媒量の $Sc(OTf)_3$ を添加した。反応は完全な官能基選択性で進行し、望みの化合物を収率良く与えた。本反応は、ニトロ基、ハロゲン、カルバメート基、スルホンアミド基、アセタール基、そしてオレフィンなど様々な官能基が共存する基質にも適用可能である。

本論第二章では、*N*-メトキシ基を反応性制御素子に用いたゲフィロトキシンの全合成について述べた。一つ目の鍵反応は、*N*-メトキシアミドとアルデヒドとのカップリングである。市販の 4-ペンテン酸から誘導される *N*-メトキシアミドをアルデヒド存在下、$BF_3 \cdot OEt_2$ で処理すると、分子内アリル化により完全な *cis* 選択性でピリドンが得られた。このピリドンの末端オレフィンを増炭して *Z* 体の不飽和エステルを構築した後、ラジカル環化により二環性ラクタムを構築した。二つ目の鍵反応は、二環性ラクタムに対する官能基選択的な還元的アリル化である。この二環性ラクタムは *N*-メトキシアミドより求電子性の高いエステル基が共存しているが、開発した反応を用いると完全な官能基選択性で反応が進行し、望みの立体化学を有したデカヒドロキノリンを得た。得られたデカヒドロキノリンの側鎖を増炭し不飽和エステルを構築した後、メトキシ基を除去すると aza-Michael 反応も進行しピロリジン環を構築できた。最後にエンイン側鎖を構築し、ゲフィロトキシンの全合成を達成した。

総括では本研究の成果を簡単にまとめた。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3992 号	氏　名	白兼　研史

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
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	高尾　賢一
		慶應義塾大学教授	工学博士	戸嶋　一敦

学士（工学）、修士（理学）白兼研史君提出の学位請求論文は、「アミド基選択的な求核付加反応の開発とゲフィロトキシンの全合成」と題し、緒論、本論 2 章、総括および実験編より成っている。

薬理作用など有用な生物活性を示す天然有機化合物の多くは窒素原子を含んでいる。これら含窒素化合物を効率よく化学合成する手法の開発は、有機化学分野のみならず、現代科学の重要な課題である。著者は本論文において、これまでその化学的安定性から困難とされていた、アミド基選択的な求核付加反応の開発と、同反応を利用したゲフィロトキシンの全合成研究について述べている。

緒論には、アミド基に対する求核付加反応のこれまでの研究例が述べられている。また本研究の標的化合物としたゲフィロトキシンの生物活性、過去の合成研究などが記されている。

本論第 1 章では、著者により展開された、アミド基選択的な求核付加反応についての詳細が述べられている。すなわち、アミド基の窒素原子にメトキシ基を導入した *N*-メトキシアミドを水素化ジイソブチルアルミニウムと処理し、ついでルイス酸存在下アリルスズ試薬を反応させると、オキシイミニウムイオンを経由した還元的アリル化反応が進行するという新規反応の開発に成功した。ついで水素化ジイソブチルアルミニウムに代わり、シュワルツ試薬（Cp_2ZrHCl）をヒドリド源として用いると、同様の還元的アリル化が進行し、かつ本反応はエステル基、カルバメート基、ニトロ基など、通常のアミド基よりも反応性の高い官能基が存在しても、アミド基選択的に求核付加反応が進行することを見出した。また、炭素求核剤としてアレニルスズ、シアノ基、シリルエノールエーテル、*N*-メチルインドールなども使用できる条件を開発し、*N*-メトキシアミドを基質として用いる本反応が、種々のタイプの含窒素化合物の官能基選択的な合成に有用であることを示した。

本論第 2 章には第 1 章で開発したアミド基選択的な求核付加反応を用いたゲフィロトキシンの全合成の詳細が記載されている。ゲフィロトキシンはコロンビア産の矢毒カエルから単離されたムスカリン拮抗作用を示す三環性化合物であり、天然からの供給量が少ないため、効率的な化学合成法の開発が望まれている。入手容易な 4-ペンテン酸からアリルシラン部位を有する *N*-メトキシアミドを合成し、これをアルデヒドと酸触媒存在下反応させると、分子内アリル化が進行し立体選択的に *cis*-ピリドン誘導体が得られた。通常のアミドでは本反応は進行しないことを確認し、*N*-メトキシ基がアミド窒素原子の反応性を制御する素子として有用であることを示した。このピリドン誘導体のラジカル環化反応によりエステル基を有する二環性ラクタムを合成した。ラクタムに対し、第 1 章で開発したアミド基選択的なアリル化を行ったところ、エステル基を損なうことなくアリル基を導入することに成功した。得られた化合物を増炭し、*N*-メトキシ基の還元的な除去とアザマイケル反応を同時に進行させ、三環性化合物を合成した。最後にエンイン側鎖を構築し、ゲフィロトキシンの全合成を達成した。官能基選択的な反応を用いることにより、本合成（14 工程、総収率 9.4%）はこれまで報告されている中で、工程数が最も短く、総収率も最も高い、効率的なものである。

総括では、本合成研究の成果がまとめられている。

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、*N*-メトキシアミドを活用したアミド基選択的な求核付加反応の開発に成功した。また、本反応を利用して、ゲフィロトキシンの効率的な全合成を達成した。この研究で示されたアミド基選択的な求核付加反応は、含窒素生物活性化合物の合成の新規方法論として、今後広く用いられることが期待される。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3993号	氏　名	野崎　貴裕

主 論 文 題 目 ：

Realization of Human Manipulation Based on Haptics

（触覚学に基づく人間の操作の実現）

ロボットは産業界を中心に飛躍的発展を遂げ、大量生産による生活水準の向上や物質的な豊かさを我々にもたらしてきた。一方で、少子高齢化や労働力不足を背景に、生活の質的豊かさの充足が希求されており、今後ロボットは生産工程のみならず人間の動作そのものを支援することが期待されている。したがって、人間の動作を分解・解析し理解することは今後の人間支援において極めて重要であり、また、これにより得られる知見は、ロボットが人間同様の動作を実現するための鍵技術となりうる。

本研究の目的は、触覚情報を取り扱う学問分野である触覚学（ハプティクス）の考えに基づき、人間の手の動作を人工的に実現することである。

第1章では、本研究の背景および目的を述べるとともに、先行研究について概説している。

第2章では、運動制御の基礎技術について述べている。

第3章では、本論文の基礎となる実世界ハプティクス技術の進展について概説し、位置および力の双対性に言及している。その後、モード空間外乱オブザーバによる位置制御系と力制御系との非干渉化手法を提案し、その性能および安定性について論じている。また、多自由度マニピュレータを用いた実験により本手法の有用性を検証している。

第4章では、腱駆動11自由度マスタ・スレーブ型ロボットハンドを開発するとともに、腱駆動機構を考慮したバイラテラル制御系を提案し、本システムにより触覚情報の抽出が可能であることを実験により確認している。さらに、腱伸張に起因する関節角度誤差の補償法を提案し、実験により有効性を検証している。また、より直感的な操作実現のため、主成分分析によって抽出される人間動作の特徴量を、道具上に設けられた座標系に写像する異構造バイラテラル制御手法を提案し、装着型ロボットハンドと鉗子型ロボットを用いた実験により有用性を確認している。

第5章では、動的計画法を用いた動作認識手法を提案し、5自由度マスタ・スレーブ型ロボットハンドを用いた実験により提案手法の有効性を検証している。さらに、本認識手法をモード空間へと拡張し、実時間における把持動作支援システムを実現している。

第6章では、触覚情報のスケーリングを伴うバイラテラル制御技術を応用した剛性推定手法を提案し、触覚伝達機能付き鉗子型ロボットを用いた擬似生体の摘出実験により提案手法の有効性を検証している。また、運動制御の原理に基づく人間動作の要素分解手法を提案し、シミュレーションおよび実験により提案手法の有効性を検証している。

第7章では、時間スケーリング技術を用い、接触対象物の位置の差異への適応を目的とした動作の再構成法を提案し、実験によりその有用性を確認している。また、力制御に基づく動作の再構成法を提案し、ナットの締緩動作を対象とした実験をおこなっている。実験ではナットの形状や大きさに関わらず締緩動作が達成されることを示し、提案手法の有用性を確認している。

第8章では、本研究の成果を要約するとともに、提案手法の今後の発展について言及している。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 3993 号	氏　名	野崎　貴裕

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)	滑川　徹
		慶應義塾大学教授	博士(工学)	斎藤　英雄

学士（工学），修士(工学）野崎　貴裕　君提出の学位請求論文は「Realization of Human Manipulation Based on Haptics」（触覚学に基づく人間の操作の実現）と題され，8 章から構成されている．

人間の動作を分析し，これをロボット等に適用することは人間支援の基礎となるばかりでなく，将来の生産工程やリハビリテーションなどに対する重要な貢献となる．既に，速度と力がこのような動作の基本であり，双対性に基いたシステム設計が必要であることは認識されていたが，これまで具体化するための方法論がなかった．本論文は，触覚学（ハプティクス）技術を積極的に利用することで人間動作を分解し，解析し，更にこれを人工的に再現する基本方法を示したものである．

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，加速度に基く統一的な運動制御系の重要性を述べ，その基礎事項を概説している．

第 3 章では，本論文の基礎となる実世界ハプティクス技術を概説するとともに，本論文の重要な提案の一つである，運動の機能をモード座標で表現することと，さらにモード外乱観測器を構成することで非干渉化が可能になることを明らかにしている．

第 4 章では，上記の結果を受けて，与えられた機能を実現する人間動作がモード空間の組み合わせで表現できることを示すと共に，行列表示した場合の単位ベクトルがそれぞれ速度制御系か，力制御系かで環境の順応性と機能の能動的実現性を表すことを明らかにしている．これを実際の人間動作に適用し，主成分分析を行い動作のモードが抽出できることを実験的にも示している．

第 5 章では，第 4 章で得られた結果をコサイン類似度と動的計画法を用いて検証したものである．この実験的検証を，オフラインによるモード抽出とオンラインによるモード抽出の双方に適用し，共に有効であることが示されており，実用的な手法であることを明らかにしている．

第 6 章では，触覚情報のスケーリング機能を伴うバイラテラル制御技術による剛性推定手法を提案し，これを援用した人間動作の人工的な再現手法を提案している．そのためには，モード変換行列とコンプライアンス選択行列，およびその背景にある速度制御系と力制御系を用いれば可能であり，機能を表すモードが決まれば，動作の人工実現のための制御系が設計可能であることを明らかにしている．

第 7 章では，第 6 章の結果を単指によるねじの緩和機能の動作実現実験で検証したものである．径の異なるねじに対しても緩和動作が可能になっており，第 6 章における設計法が有効であることを明らかにしている．

第 8 章では，本論文全体の結論を述べている．

以上要するに，本論文では人間の運動機能を人工的に実現するためのモード空間の抽出方法とそれに基づく運動制御の設計法を提案し，理論と実験の双方からその有効性を実証したもので，ロボティクス分野において，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	乙　第4659号	氏　名	土方　孝敏

主 論 文 題 目 ：

核燃料再処理における化学的・電気化学的物質変換過程、物質分離過程
およびそれらのプロセス化

使用済み原子炉核燃料からウラン（U）とプルトニウム（Pu）を採取し再利用することは、燃料資源の有効利用につながる。また、長半減期のマイナーアクチノイド（MA、ネプツニウムなど）も回収して原子炉内で核種変換すれば、廃棄物の環境負荷低減につながる。本研究では、このような核燃料再処理過程で不可欠な化学的・電気化学的な物質変換過程、物質分離過程を検討するとともに、関係する高温融体（LiCl–KCl 系溶融塩、液体カドミウム（Cd）など）の最適輸送法を確立し、連続プロセスの構築につなげることを目的とした。

第 1 章では、本研究の背景と目的として、酸化物燃料や金属燃料の再処理に関わる課題のうち、とくに物質変換と分離の過程、さらにそれらのプロセス化で要求される事項を整理して述べた。

まず第 2 章では、高レベル廃液から導かれる MA 酸化物から MA 塩化物への転換を、反応装置の腐食抑制が期待できる、より低温で行う可能性を検討した。この結果、$C + Cl_2$ を用いる従来法に比べ 200 K 以上低い温度域でも、実用的な速度で塩化物転換が可能な、五塩化モリブデン（$MoCl_5$）法を新たに提案できた。また ZrO_2 あるいは Nd_2O_3 を模擬酸化物として、Mo 副生物を目的塩化物から揮発分離する可能性なども示した。

第 3 章では、 アクチノイド金属（AN : U、Pu および少量の MA）種に対する一連の物質変換（酸化物→塩化物→金属）過程に随伴する、希土類金属（中性子を吸収する燃料毒）の除去を目的として、塩化物→金属の還元過程における分別を検討した。塩化物溶融塩｜液体 Cd–Li 合金の二相界面における酸化還元反応を利用して、希土類よりも選択的に AN を Cd–Li 合金相側へ抽出できた。また、このような還元・抽出操作に対する NaCl（AN 塩化物のさらなる随伴物）の影響も検討し、LiCl–KCl 系溶融塩に混入する NaCl の影響は小さいことを示した。

第 4 章では、U と Pu 金属の同時回収にあてる一連の電解精製・蒸留精製プロセスを検証した。ここでは UO_2 や PuO_2 を出発物質として、U や Pu を金属として回収でき、酸化物のリチウム還元→電解精製→蒸留精製の 3 ステップを連続プロセスとして成立させた。

第 5 章では、まず高温融体（溶融塩、液体 Cd、さらに陽極からの脱落粉体が混入する溶融塩スラリー）の輸送に関する詳細な検討を行った。それらの知見に基づいて、ガドリニウム金属を使用済金属燃料の模擬陽極とし、電解で液体 Cd 陰極内へ移動させたのち、Cd を揮発除去する工学規模（想定実機の約 1/8 スケール）の連続プロセス装置を設計・構築した。さらに、これを最適化条件で運転し、迅速かつ高収率な金属燃料再処理の可能性を示した。

第 6 章には、本研究のまとめと今後の課題を述べた。

論文審査の要旨

報告番号	乙　第 4659 号	氏　名	土方　孝敏

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	美浦　　隆
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	磯部　徹彦
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	片山　　靖
		慶應義塾大学教授	工学博士	畑山　明聖

工学士，工学修士土方孝敏君提出の学位論文は「核燃料再処理における化学的・電気化学的物質変換過程，物質分離過程およびそれらのプロセス化」と題し，全 6 章からなる．

使用済み原子炉核燃料からウラン（U）とプルトニウム（Pu）を採取し再利用することは，燃料資源の有効利用につながる．また，長半減期のマイナーアクチノイド（MA：ネプツニウムなど）も回収して原子炉内で核種変換すれば，廃棄物の環境負荷低減につながる．本研究では，このような核燃料再処理過程で不可欠な化学的・電気化学的な物質変換過程，物質分離過程を検討するとともに，関係する高温融体（LiCl–KCl 系溶融塩，液体カドミウム（Cd）など）の最適輸送法を確立し，連続プロセスの構築につなげ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として，酸化物燃料や金属燃料の再処理に関わる課題のうち，とくに物質変換と分離の過程，さらにそれらのプロセス化で要求される事項を整理し，詳述している．

第 2 章では，高レベル廃液から導かれる MA 酸化物から MA 塩化物への転換を，反応装置の腐食抑制が期待できる，より低温で行う可能性を検討している．この結果，炭素と Cl_2 を用いる従来法に比べ 200 K 以上低い温度域でも，実用的な速度で塩化物転換が可能な，五塩化モリブデン法を新たに提案している．さらに ZrO_2 あるいは Nd_2O_3 を模擬酸化物として，反応副生物を目的塩化物から揮発分離する可能性なども示している．

第 3 章では， アクチノイド金属（AN : U，Pu および少量の MA）種に対する一連の物質変換（酸化物→塩化物→金属）過程に随伴する，希土類金属（中性子を吸収する燃料毒）の除去を目的として，塩化物→金属の還元過程における分別を検討している．塩化物溶融塩｜液体 Cd–Li 合金の二液相界面における酸化還元反応を利用して，希土類よりも選択的に AN を Cd–Li 合金相側へ抽出することに成功している．また，このような還元・抽出操作に対する NaCl（AN 塩化物のさらなる随伴物）の影響も検討し，LiCl–KCl 系溶融塩に混入する NaCl の影響は小さいことを明らかにしている．

第 4 章では，U と Pu 金属の同時回収にあてる一連の電解精製・蒸留精製プロセスを検証している．ここでは UO_2 や PuO_2 を出発物質として，U や Pu を金属として回収し，酸化物のリチウム還元→電解精製→蒸留精製の 3 ステップを連続プロセスとして実証している．

第 5 章では，まず高温融体（溶融塩，液体 Cd，さらに陽極からの脱落粉体が混入する溶融塩スラリー）の輸送法を詳細に検討している．それらの知見に基づいて，ガドリニウム金属を使用済金属燃料の模擬陽極とし，電解で液体 Cd 陰極内へ移動させたのち，Cd を揮発除去する連続プロセス装置を工学規模（想定実機の約 1/8 スケール）で設計・構築している．さらに，これを最適化条件で運転し，迅速かつ高収率な金属燃料再処理の可能性を示している．

第 6 章では，本研究のまとめと今後の課題を述べている．

以上要するに，本論文は使用済み核燃料の再処理における化学的・電気化学的物質変換過程，物質分離過程およびそれらのプロセス化に取り組んだものであり，これらの成果は工学上，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4034号	氏　名	中村　允

主 論 文 題 目 ：

3 次元尾芽胚モデルの構築とラマン顕微分光法によるホヤ胚形態形成過程の解析

尾索動物ホヤの尾芽胚は脊索動物固有の体制を備えている．従って，ホヤ尾芽胚の形態形成メカニズムの理解は，脊索動物に固有の体制がどのように形成されるかを解明する手掛かりになる．ホヤ胚は細胞数が少なく，構造は単純であるため，全構成細胞の数・形態・配列といった解剖学的情報，および分化状態の情報の取得は比較的容易である．しかしながら，これまで尾芽胚の 1 細胞レベルでの解剖学的情報を取得した報告はなかった．また分化状態の識別に用いる既存手法には，同定に用いる分子の発現時期や領域に依存すること，また同時に識別できる組織数が限られること等の問題点があった．一方，形態形成メカニズムを分子レベルで理解する上では胚内の分子組成や分布の情報が重要である．特に小分子化合物は標識が困難なため，胚内の分布を標識しないで可視化する手法が求められる．以上のような背景から，本論文ではホヤ胚の形態形成過程を解析する上で有用な，尾芽胚の解剖学的情報と，各発生段階にある胚の分化状態，そして胚内の分子組成・分布に関する情報をイメージング手法により取得・可視化することを目的とした．

第1章では，形態形成過程を研究する上でのホヤ胚の利点と従来研究をまとめ，3次元胚の構築およびラマン顕微分光法の知見について記し，最後に本論文の目的と構成を説明した．

第2章では，共焦点顕微鏡画像からカタユウレイボヤ尾芽胚の3次元的な形態を反映した3D virtual mid-tailbud embryo（3DVMTE）を構築し，ホヤ尾芽胚に関する解剖学的情報を網羅的に取得・解析したことを報告した．これにより野生型ホヤ尾芽胚各組織の細胞数が初めて判明した．また胚の3次元的な解剖学的特徴が1細胞レベルで明らかになり，カタユウレイボヤでは従来報告のなかった細胞群を，体幹側および尾部側に1群ずつ見出した．加えて細胞系譜情報と解剖学的情報を対応付けるために3D PDF形式の3DVMTEを構築し，胚を構成する約1500細胞全てに対してこれらの情報を記載した．

第3章では，ラマン顕微分光法を用いた細胞分化状態の可視化と胚内の分子組成・分布の検出について報告した．ホヤ胚から取得したラマンスペクトルの解析から，分子組成が組織間で異なる様子を明らかにした．さらにスペクトルの違いから，1002 cm^{-1}と1526 cm^{-1}のそれぞれのラマンバンドに注目することで，尾芽胚期までの筋肉および内胚葉それぞれの位置と形を非標識で可視化することに成功した．これらの組織の識別に寄与した要素（細胞小器官や分子種）を推定し，カロテノイドおよびレチノイドの胚内分布をラマン顕微分光法により可視化できることを示唆した．また細胞分化過程において，未分化細胞から分裂した2つの娘細胞の内，筋肉または内胚葉へ分化した娘細胞を，もう一方の別の分化運命をたどる娘細胞から識別することに成功した．

第4章は総括で，本研究成果である3次元胚モデルの構築およびラマン顕微分光法による，尾芽胚の形作りを含むホヤ胚の発生メカニズムについてまとめ，将来どのような解析が可能であるか議論した．さらにこれらの手法の課題と改善点について考察した．

第 5 章では本論文の結言を述べた．

以上

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4034 号	氏　名	中村　允

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
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	舟橋　啓
		慶應義塾大学准教授	医学博士	松本　緑

学士（理学）、修士（理学）中村允君提出の博士学位論文は、「3 次元尾芽胚モデルの構築とラマン顕微分光法によるホヤ胚形態形成過程の解析」と題し、５章より成っている。

尾索動物ホヤの尾芽胚は脊索動物固有の体制を備えており、脊索動物に固有の体制がどのように形成されるかを解明する手掛かりになる。ホヤ胚は細胞数が少なく、構造は単純であるため、全構成細胞の数・形態・配列といった解剖学的情報、および分化状態の情報の取得は比較的容易である。しかしながら、これまで尾芽胚の１細胞レベルでの解剖学的情報を取得した報告はなかった。また分化状態の識別に用いる既存手法には、同定に用いる分子の発現時期や領域に依存すること、また同時に識別できる組織数が限られること等の問題点があった。一方、形態形成メカニズムを分子レベルで理解する上では胚内の分子組成や分布の情報が重要である。特に小分子化合物は標識が困難なため、胚内の分布を標識しないで可視化する手法が求められる。以上のような背景から、ホヤ胚の形態形成過程を解析する上で有用な、尾芽胚の解剖学的情報と、各発生段階にある胚の分化状態、そして胚内の分子組成・分布に関する情報をイメージング手法により取得・可視化することを本論文の目的としている。

第1章では、形態形成過程を研究する上でのホヤ胚の利点と従来研究をまとめ、3次元胚の構築およびラマン顕微分光法の知見について記し、最後に本論文の目的と構成を説明している。

第2章では、共焦点顕微鏡画像からカタユウレイボヤ尾芽胚の3次元的な形態を反映した3D virtual mid-tailbud embryo（3DVMTE）を構築し、ホヤ尾芽胚に関する解剖学的情報を網羅的に取得・解析したことを報告している。これにより野生型ホヤ尾芽胚各組織の細胞数が初めて判明した。また胚の3次元的な解剖学的特徴が1細胞レベルで明らかになり、カタユウレイボヤでは従来報告のなかった細胞群を、体幹側および尾部側に1群ずつ見出している。加えて細胞系譜情報と解剖学的情報を対応付けるために3D PDF形式の3DVMTEを構築し、胚を構成する約1500細胞全てに対してこれらの情報を記載している。

第3章では、ラマン顕微分光法を用いた細胞分化状態の可視化と胚内の分子組成・分布の検出について報告している。ホヤ胚から取得したラマンスペクトルの解析から、分子組成が組織間で異なる様子を明らかにした。さらにスペクトルの違いから、1002 cm^{-1}と1526 cm^{-1}のそれぞれのラマンバンドに注目することで、尾芽胚期までの筋肉および内胚葉それぞれの位置と形を非標識で可視化することに成功した。これらの組織の識別に寄与した要素（細胞小器官や分子種）を推定し、カロテノイドおよびレチノイドの胚内分布をラマン顕微分光法により可視化できることを示唆した。また細胞分化過程において、未分化細胞から分裂した2つの娘細胞の内、筋肉または内胚葉へ分化した娘細胞を、もう一方の別の分化運命をたどる娘細胞から識別することに成功した。

第4章は総括で、本研究成果である3次元胚モデルの構築およびラマン顕微分光法による、尾芽胚の形作りを含むホヤ胚の発生メカニズムについてまとめ、将来どのような解析が可能であるか議論している。さらにこれらの手法の課題と改善点について考察している。

第 5 章では本論文の結言を述べている。

以上本論文はホヤ尾芽胚を材料として、その細胞構築を詳細に記載する３次元モデルとラマンイメージング手法を併用し、発生生物学研究に資する新たな知見を得ることに成功している。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4035号	氏　名	伊豆　裕一

主 論 文 題 目 ：

プロダクトデザインにおけるスケッチスキルの構造モデル

プロダクトデザインにおいて，スケッチには，新たなデザイン解の導出を促す効果のあることが多く指摘されている．しかし，それらはスケッチ全体に関するものであり，その際に用いられる透視図法の表現や形状・構造の展開などに関するスケッチスキルの効果は明らかになっていない．そのため，スケッチを用いたデザインの創造過程の解明や，効果的なデザイン教育への応用には至っていない．本研究では，スケッチスキルを抽出・階層化し，分類・構造化することでスケッチスキル構造モデルを提案している．さらに，スケッチスキルが，ラフスケッチやアイディアスケッチのようなスケッチの種類，およびキーワードの抽出におよぼす効果を分析し，明らかにすることで本モデルの有効性を示し，本モデルの構築を図ることとしている．

第１章では，スケッチスキル構造モデルを提案する本研究の必要性を述べている．

第２章では，まず，学生が描いたアイディアスケッチの評価データをもとに，ISM法による階層化，数量化Ⅲ類およびクラスター分析による分類・構造化を行っている．その結果，形状の的確な表現に影響する表現スキル４項目と，デザイン解候補の展開に影響する展開スキル４項目からなるスケッチスキル構造モデルを提案している．つぎに，本モデルをデザイナーのスケッチ分析に適用することで，デザイナーのスケッチにおいても本モデルが有効であることを示している．

第３章では，第２章で得られた本モデルを用いて，デザインにおいてイメージの創出を狙いとしたラフスケッチと，形状，構造，および仕様の導出を狙いとしたアイディアスケッチの両スケッチに影響するスケッチスキルを分析している．その結果，ラフスケッチには輪郭線の強弱を含むイメージ表現スキル，アイディアスケッチには透視図法表現スキルなどがそれぞれに影響大のスケッチスキルであることを明らかにするとともに，両スケッチにおいても本モデルが有効であることを示している．

第４章では，本モデルを用いて，スケッチとともにデザイン展開に多用されるキーワード抽出において，影響大のスケッチスキルの分析を行っている．その際，デザイン思考の枠組みを内包する多空間デザインモデルを用いることでキーワードを分類し，分析を進めている．その結果，構造や形状の展開スキルは価値や意味に分類されるキーワードの抽出に影響し，要素の展開スキルは状態や属性に分類されるキーワードの抽出に影響することを明らかにしている．以上により，ラフスケッチとアイディアスケッチの分析に加えて，キーワード抽出の分析においても本モデルが有効であることを示し，本モデルを構築している．

第５章では，構築した本モデルの，今後のデザイン研究と教育への応用の可能性を示している．具体的には，研究面では，過去のすぐれたデザインにおいて描かれたスケッチの分析への適用方法，教育面では，新たなイメージの創出を目的としたスケッチ教育への応用方法をそれぞれ例示することで，研究・教育の両面における本モデルの応用の可能性を示している．

第６章では，各章で得られた成果を総括し，本研究の結論と将来の展望を述べている．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4035 号	氏　名	伊豆　裕一

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	慶應義塾大学教授	博士(工学)	青山　英樹
		慶應義塾大学教授	工学博士	萩原　将文
		慶應義塾大学准教授	工学博士	中澤　和夫
		千葉大学名誉教授・放送大学客員教授	工学博士	青木　弘行

学士（工学）伊豆裕一君の学位請求論文は「プロダクトデザインにおけるスケッチスキルの構造モデル」と題し、６章から構成されている。

プロダクトデザインにおいて、スケッチには、新たなデザイン解の導出を促す効果のあることが多く指摘されている。しかし、それらはスケッチ全体に関するものであり、その際に用いられる透視図法の表現や形状・構造の展開などに関するスケッチスキルの効果は明らかになっていない。そのため、スケッチを用いたデザインの創造過程の解明や、効果的なデザイン教育への応用には至っていない。以上の背景から、本研究では、スケッチスキルを抽出・階層化し、分類・構造化することでスケッチスキル構造モデルを提案している。さらに、スケッチスキルが、ラフスケッチやアイディアスケッチのようなスケッチの種類、およびキーワードの抽出におよぼす効果を分析し、明らかにすることで本モデルの有効性を示し、本モデルを構築している。

第１章では、スケッチスキル構造モデルを提案する本研究の必要性を述べている。

第２章では、まず、学生が描いたアイディアスケッチの評価データをもとに、ISM 法による階層化、数量化Ⅲ類およびクラスター分析による分類・構造化を行っている。その結果、形状の的確な表現に影響する表現スキル４項目と、デザイン解候補の展開に影響する展開スキル４項目からなるスケッチスキル構造モデルを提案している。つぎに、本モデルをデザイナーのスケッチ分析に適用することで、デザイナーのスケッチにおいても本モデルが有効であることを示している。

第３章では、第２章で得られた本モデルを用いて、デザインにおいてイメージの創出を狙いとしたラフスケッチと、形状、構造、および仕様の導出を狙いとしたアイディアスケッチの両スケッチに影響するスケッチスキルを分析している。その結果、ラフスケッチには輪郭線の強弱を含むイメージ表現スキル、アイディアスケッチには透視図法表現スキルなどがそれぞれに影響大のスケッチスキルであることを明らかにするとともに、両スケッチにおいても本モデルが有効であることを示している。

第４章では、本モデルを用いて、スケッチとともにデザイン展開に多用されるキーワード抽出において、影響大のスケッチスキルの分析を行っている。その際、デザイン思考の枠組みを内包する多空間デザインモデルを用いることでキーワードを分類し、分析を進めている。その結果、構造や形状の展開スキルは価値や意味に分類されるキーワードの抽出に影響し、要素の展開スキルは状態や属性に分類されるキーワードの抽出に影響することを明らかにしている。以上により、ラフスケッチとアイディアスケッチの分析に加えて、キーワード抽出の分析においても本モデルが有効であることを示し、本モデルを構築している。

第５章では、構築した本モデルの、今後のデザイン研究と教育への応用の可能性を示している。具体的には、研究面では、過去のすぐれたデザインにおいて描かれたスケッチの分析への適用方法、教育面では、新たなイメージの創出を目的としたスケッチ教育への応用方法をそれぞれ例示することで、研究・教育の両面における本モデルの応用の可能性を示している。

第６章では、各章で得られた成果を総括し、本研究の結論と将来の展望を述べている。

以上要するに、本論文は、プロダクトデザインにおいて多用される、スケッチスキルの効果と関係性を明らかにすることで、デザインの創造過程の解明に向けた基礎のモデルとしての構造モデルを構築したものであり、デザイン方法論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4036号	氏　名	坂田　幸大郎

主 論 文 題 目 ：

New Insights in Molecular Mechanism under Progression of Liver Fibrosis

（肝線維症進展の新しい分子機構解明）

肝線維症は、コラーゲンをはじめとする細胞外基質の過剰な蓄積により引き起こされ、肝硬変や肝癌へと進展する病態である。C型肝炎ウイルス（HCV）の感染や血管新生は肝線維症を促進することが知られているが、その分子機構については不明な点が残されている。そこで本研究では、線維化誘導サイトカインであるTGF-βに着目し、肝線維症進展の新しい分子機構について解析を行った。

(1) HCV NS3プロテアーゼのTGF-βⅠ型受容体結合・活性化を介した肝線維化促進機構

近年、ウイルスが宿主タンパク質を模倣し、細胞機能をハイジャックする現象が報告されている。本研究では、HCVの非構造タンパク質の一つであるNS3プロテアーゼがTGF-β2の抗原性ならびに生物活性を有していることの発見に端を発し、NS3のTGF-β疑似活性が肝線維化を促進しているのではないかという作業仮説を立て、検証を行った。TGF-β応答性ルシフェラーゼ発現細胞において、組換えNS3タンパク質はTGF-βⅠ型受容体を介してTGF-β疑似活性を発現した。またC型肝炎患者において高い血中濃度を示す腫瘍壊死因子（TNF-α）がTGF-βⅠ型受容体の発現を亢進することにより、肝細胞におけるNS3感受性が誘導された。続いてHCV感染肝癌細胞株において、ウイルス由来のNS3が細胞表面においてTGF-βⅠ型受容体と相互作用することを示した。さらに、NS3とTGF-βⅠ型受容体のドッキングシミュレーションを行い、予測結合サイトに対する抗NS3抗体を作製し、同抗体がHCV感染ヒト肝細胞移植キメラマウスにおける肝線維化進展を抑制することを示した。これらの結果より、HCV NS3プロテアーゼはTGF-βを模倣し、そのⅠ型受容体と結合して下流のシグナルを活性化させ、肝線維症の進展に寄与していることが示唆された。

(2) 新生血管由来潜在型TGF-βを介した肝線維化促進機構

肝疾患の進展過程においては線維化と血管新生が並行して起こる。マウスにVEGFを投与し血管新生を誘発させたところ、内皮細胞の指標であるCD31の発現亢進に加えてコラーゲンを多量に産生する活性型肝星細胞の指標であるα-SMAの発現亢進、コラーゲンを構成する特徴的アミノ酸であるヒドロキシプロリン含量が増加した。活性化していない初代培養肝星細胞（HSCs）にVEGFを処理してもα-SMAは亢進しなかったが、初代培養肝類洞内皮細胞（LSECs）の培養上清をHSCsに処理すると、α-SMAの発現が亢進し、その効果はTGF-β1中和抗体により抑制された。さらにLSECsの培養上清中には潜在型のTGF-βが多量に含まれており、それらがHSCsの細胞表面において活性化され多量の活性型TGF-βを生じることを見出した。これらの結果より、新生血管は潜在型TGF-βを供給することにより、肝線維症促進に寄与していることが示唆された。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4036 号	氏　名	坂田　幸大郎

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	農学博士	井本　正哉
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	岡　浩太郎
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	土居　信英
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	清水　史郎
		独立行政法人理化学研究所ライフサイエンス技術基盤研究センター特別ユニットリーダー	理学博士	小嶋　聡一

学士（農学）、修士（農学）坂田幸大郎君提出の学位請求論文は、「New Insights in Molecular Mechanism under Progression of Liver Fibrosis（肝線維症進展の新しい分子機構解明）」と題し、４章から成っている。

肝線維症は、コラーゲンをはじめとする細胞外基質の過剰な蓄積により引き起こされ、肝硬変や肝癌へと進展する病態である。著者は、線維化誘導サイトカインである TGF-β に着目し、これまで不明であった C 型肝炎ウイルス（HCV）の感染ならびに血管新生が肝線維症を進展させる分子機構を新たに解明した。

第１章は序論であり、肝線維症の病態進展機構ならびにその主要因子である TGF-β について、従来研究をまとめている。さらに肝線維症の主たる発症要因である HCV、および線維化と並行して起こることが昨今注目されている血管新生について概説している。

第２章では、HCV の NS3 プロテアーゼによる肝線維化促進の分子機構を解析している。著者は、NS3 プロテアーゼが TGF-β2 の抗原性ならびに生物活性（TGF-β 疑似活性）を有していることを見出し、その TGF-β 疑似活性が肝線維化を促進しているのではないかと作業仮説を立て、検証を行った。TGF-β 応答性ルシフェラーゼ発現細胞において、リコンビナント NS3 タンパク質は TGF-β I 型受容体依存的、プロテアーゼ活性非依存的に TGF-β 疑似活性を発現することを示した。また、C 型肝炎患者において高い血中濃度を示す炎症性サイトカイン TNF-α が、TGF-β I 型受容体の発現を亢進することにより正常肝細胞における NS3 感受性を誘導することを見出した。続いて HCV 感染肝癌細胞株を用い、ウイルス由来の NS3 が細胞表面において TGF-β□ I 型受容体と相互作用することを示した。さらに、NS3 と TGF-β I 型受容体のドッキングシミュレーションにより予測結合サイトに対する抗 NS3 抗体を作製し、同抗体が HCV 感染ヒト肝細胞移植キメラマウスにおける肝線維化進展を抑制することを示した。以上より、HCV NS3 プロテアーゼは TGF-β を模倣し、その I 型受容体と結合して下流のシグナルを活性化させ、肝線維症の進展に寄与していることが示唆された。

第３章では、血管新生による肝線維化促進の分子機構について述べている。VEGF 投与による血管新生モデルマウスにおいて、内皮細胞の指標である CD31 の発現亢進に加えてコラーゲンを多量に産生する活性型肝星細胞の指標である α-SMA の発現亢進、コラーゲンを構成する特徴的アミノ酸であるヒドロキシプロリン含量の増加が観察された。活性化していない初代培養肝星細胞（HSCs）に VEGF を処理しても α-SMA は亢進しなかったが、初代培養肝類洞内皮細胞（LSECs）の培養上清を HSCs に処理した結果 α-SMA の発現が亢進し、その効果は TGF-β1 中和抗体により抑制された。さらに LSECs の培養上清中には潜在型の TGF-β が多量に含まれており、それらが HSCs の細胞表面において活性型へと変換されることを見出した。これらの結果より、新生血管は潜在型 TGF-β を供給することにより、肝線維症促進に寄与していることが示唆された。

第４章では、本研究で得られた結果から HCV と血管新生との関連について線維症を主とした肝疾患研究の展望を議論し総括としている。

本論文では、HCV 感染ならびに血管新生による肝線維症進展の分子機構を見出したことに限らず、新規治療法の可能性を示したことにまで及ぶ。本研究成果は、今後の肝線維症における病態学研究、ウイルス学研究、血管生物学研究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.

Thesis Abstract

Registration Number	"KOU" No. 4037	Name	HUYNH THI MINH THU

Thesis Title

A Study on an Eco-friendly and High-performance Cooling System using Evapo-transpiration

According to International Energy Agency, buildings contribute nearly about 40 % total world energy consumption. Most of the consumption is used during their operational phase, especially for air conditioning, which causes peak-load in electricity demand in summer. Urban heat island recently has become a big issue for human's lives. Tokyo temperature has increased about 3.5 °C in the past one hundred years, while global temperature increases about 0.7 °C.

Recognizing that heat released from outdoor unit of the air conditioning is one of the causes of heat island in the city, the objective of the study is to create a cooling system that does not exhaust heat to the environment. From the thermodynamic viewpoint, temperature is free from energy conservation. As the leaves of trees, they can keep the temperature or even make the air cooler while absorbing solar insolation, by evapo-transpiration. Learning from that phenomenon, an air-conditioning system that not only cools the indoor space but also can create comfortable space outdoor by using evapo-transpiration is proposed in this study. With the fact that latent heat of water vaporization gives high potential of cooling capacity, e.g., 1 g water evaporation in 1 second can absorb about 2.43 kW heat at a temperature of 30 °C, it is expected that exhaust air from outdoor unit can reach to wet-bulb temperature, which is lower than that of ambient or dry-bulb temperature by 7 °C at dry-bulb temperature of 30 °C and the relative humidity of 50 %.

Evapo-transpiration is applied to the condenser in the outdoor unit of the air conditioning system. Proposed condenser is copper-tubing covered by porous ceramics with tiny open holes, which can automatically spread water by the capillary phenomenon. The heat transfer coefficient is higher than that of the conventional air-cooled condenser from 3.5 up to 10 times. In addition, it also helps to reduce the condensing temperature; in consequence, reduce the work for compressor and energy consumption for air conditioning.

Experiments of an existing air conditioning system using air-cooled condenser, an air conditioning system with water-cooled condenser, and an air conditioning system with the proposed evapo-transpiration condenser have been done. Existing system is used as a baseline; while air conditioning system with water-cooled condenser is used to test the ability to reduce condenser temperature; and finally, the proposed system is to confirm the possibility of apply evapo-transpiration principle to air-conditioning system.

The result confirms that condenser temperature is reduced to ambient air from the water-cooled condenser. From simulation result, it is expected that any system, which has condenser temperature near to outdoor temperature, can increase its Coefficient of Performance (COP) up to

30 %.

For the prototype air conditioning system with evapo-transpiration condenser, it shows that the air outlet from the outdoor unit has almost the same temperature as that of the outdoor air. Since there is no spray of water in the system and the air just passes the wet surface of ceramics, the relative humidity of the outlet air is just slightly higher than that of the ambient, at an average of 5%. Therefore, the proposed outdoor unit does not release any heat to the environment. Hence, the problem of heat island can be reduced.

In addition, for the energy consumption at the specific case of experiment, the proposed system was confirmed to reduce the energy consumption up to 30%. Last but not least, water condensed indoor can be utilized to cool the condenser outdoor.

In conclusion, the study has figured out the originality to create an air-conditioning system which can cool a space without release higher heat to the environment. The proposed system can help to reduce urban heat island problem by using the evapo-transpiration phenomenon. Moreover, it is also confirmed the possibility to save energy consumption using the proposed system compared to conventional air conditioning system.

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4037 号	氏　名	HUYNH THI MINH THU

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	佐藤　春樹
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	植田　利久
		慶應義塾大学教授	工学博士	田中　茂
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	伊香賀　俊治

学士（工学）、修士（工学）、フン ティ ミン チュ君提出の学位請求論文は「A Study on an Eco-friendly and High-performance Cooling System using Evapo-transpiration（蒸散を用いた環境に優しい高効率冷房システムに関する研究）」と題し、6 章からなっている。

現在の建築物はその建設時よりも寧ろ運用で使われるエネルギー消費が大きい。国際エネルギー機関が世界のエネルギー消費の 40%近くが民生用であると報告している。また、世界の二酸化炭素排出量の 25%以上は民生用エネルギー消費であり、2010 年に欧米ではエネルギー消費の約 41%が建築物のエネルギー消費であったという報告もある。また、ベトナムなどの発展途上国においても、民生用エネルギー消費が急激に増大している。一方で、都市人口の増大も著しく都市のヒートアイランド化の問題も大きくなってきている。このような背景から、本論文は冷房システムの室外機において蒸散排熱することで大気への廃熱を最小化し、都市において植物等からの蒸散が減少している現状を少しでも解消し、さらに低温排熱を可能とすることで効率を改善することによって、消費電力を大幅に削減し、二酸化炭素排出量削減に貢献できる新たな冷房システムの開発可能性を明らかにすることを目的としたものである。

第 1 章で、上記の背景と研究目的を示し、

第 2 章で、冷房システムの凝縮器に蒸散機能を加えるシステムの原理を解説し、また、その改善によりどれ程の省エネルギー効果が期待できるかを計算するために必要な基礎事項を説明している。同時に、過去に行われた関連研究に関する紹介とレビューを記している。

第 3 章では、研究に用いた 3 通りの装置について紹介している。ひとつは、蒸散を用いる熱交換器の伝熱性能を実験的に確認するための装置である。熱交換器の銅配管の周囲を細孔径が 20 および 90μm の多孔質セラミックスで覆い、水の浸透性が高く、風を当てることで最も多く蒸散が行われ低温となり、総合熱伝達係数が大きくなるセラミックスの選択とその配置を明らかにする装置である。次に、2 重管をもつ凝縮器の片方の銅管に冷水を流し、もう一方に冷媒を流すことで凝縮温度と冷房システムの性能との関係を調べる装置である。最後に、提案システムの性能実証を行う目的から実際に多孔質セラミックスを室外機に装着した空調システム装置について紹介している。

第 4 章では、上記の装置から得られたデータに基づき、新たな蒸散を用いた冷房システムの性能予測を冷媒の熱物性値を用いて計算するための方法を記している。

第 5 章において、3 種の装置から得られたデータに基づき、蒸散を用いた熱交換器の総合熱伝達係数を推定し､2 重管をもつ装置による実験結果から､凝縮器温度と冷房システムの成績係数（COP）の関係から外気温度 35℃までの範囲で約 30%の消費電力を減少できる可能性を明らかにし、最終的に、本論文で提案する冷房システムの COP が約 30%の消費電力を減少できることを実証した。

そして、第 6 章において本論文の成果を結論としてまとめている。

以上要するに、本論文は蒸散を用いた室外機の実用的な設計を可能とし、実機によって、外気温度とほぼ同じ温度で排熱することが可能であり、廃熱のない冷房システムの開発可能性を実証し、その省エネルギー性を定量的に明らかにしている。地球温暖化および都市のヒートアイランド対策として、本論文の成果に大いに期待することができ、工学的に寄与するところが大きい。

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4038号	氏　名	河　皓平

主 論 文 題 目 ：

ベンジルグリコシド誘導体を活用した電気化学的グリコシル化反応の開発

近年、糖鎖化合物の有する生理的意義の解明に注目が集まっている。特に、天然の生理活性物質には糖鎖を有する化合物が多く存在しており、糖鎖部の構造変換による高活性物質の探索や糖鎖の修飾による新機能の付与など、様々な試みが行われてきた。すなわち、現在の糖鎖は分子生物学における「第三の鎖」としての地位を確固たるものとしており、その生理的意義や疾病との関わりの解明は、新規疾病治療法の開発に繋がるものと期待されている。

生体内で重要な働きを有するヌクレオチド鎖やペプチド鎖の研究に比較して、糖鎖の研究の発展は遅れてきた。その大きな原因の一つが、糖鎖が有する構造の多様性である。この事実は、糖鎖が多くの潜在的な生物学的情報を有しているとも言いかえることが出来るが、同時に合成の困難なことなどから糖鎖研究発展の大きな歯止めとなっているのは周知のことである。さらに、糖鎖合成においては特異なピラン環構造から誘起されるアノマー効果等の興味深い反応性や、立体保持を意識した合成の際にしばしば障害となるヘミアセタール構造の安定性等を考慮しなければならない。すなわち、糖鎖研究の発展には多様かつ簡便な糖鎖合成技術の確立が必要不可欠であると言える。

一方で、新規合成手法の開発に際して近年注目を集めているのがグリーンケミストリーの構築である。安価かつ大量に入手可能な糖質は生体機能物質としてのみならず、機能材料への応用をも期待される物質群である。すなわち、糖質の環境低負荷な合成手法の確立は非常に意義の大きいものであると言える。筆者は、糖質の環境低負荷型合成手法構築の一環として電気化学的手法に着目し、新たな環境低負荷型新規グリコシル化反応の開発を行った。

筆者は、先行研究にて得られていたベンジルエーテルの陽極酸化反応に着目し、新規 glycosyl donor としてベンジルグリコシド誘導体を考案した。種々のベンジルグリコシドに対して陽極酸化反応を試みた結果、安定に単離可能なオルソエステル糖誘導体のみが選択的に望む配糖体を与えることを見出した。さらに、詳細な反応機構の解析を行った結果、電解系内にて恒常的に発生する酸（EGA）が反応の進行に大きく寄与していることを見出し、高収率かつ高い立体選択性を以て、二糖の合成に成功した。さらに、開発した反応をオリゴ糖合成へと応用するため、化学的に安定なオルソエステル糖誘導体を新たに開発し、EGA を用いた連続グリコシル化反応による糖鎖合成の方法論を提案することができた。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4038 号	氏　名	河　皓平

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	西山　繁
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	戸嶋　一敦
		慶應義塾大学准教授	博士（理学）	末永　聖武
		慶應義塾大学薬学部教授	農学博士	須貝　威

学士（理学），修士（理学）河　皓平君提出の論文は，「ベンジルグリコシド誘導体を活用した電気化学的グリコシル化反応の開発」と題し，序論，本論，および実験編より構成されている．

生命科学分野の研究の発展と相俟って生体系における糖鎖の重要性は，近年増大の一途を辿っている．特に，感染，免疫，癌転移など糖鎖の構造が緊密に関わる生命現象に対する研究において多様性に富んだ糖鎖骨格の活用が必須となり，ここに糖鎖合成の意義が発生することになる．糖鎖合成は，基本的には糖のアノメリック位の活性化につづくアグリコンとの結合形成を行うグリコシル化反応であり，その歴史は一世紀以上におよぶ．本反応は，如何に温和な条件で効率良くオキソカルベニウムイオンを発生させるかが，第一の課題であり長期間にわたり活用されてきた Königs-Knorr 反応をはじめとして多くの方法論が開発されてきた．このような流れの中で，電気化学的に酸化-還元反応を制御する有機電気化学を活用して，アノメリック位に結合させたヘテロ原子を選択的に酸化して，目的とするオキソカルベニウムイオンを発生させる手法が新しい環境低負荷型反応として注目されてきた．本研究は，このような状況において独自に見出したオルソエステル誘導体と電解反応により調製した電解酸によるグリコシル化反応の有用性について述べたものである．

第１章序論において，糖鎖の作用機序に関わる重要性と従来より報告されてきた糖鎖構築のためのグリコシル化反応を概説している．さらに，有機電気化学を用いる有機合成反応における電極の材質，反応溶媒，反応槽の形状など反応の方向性を決定する諸条件について概説し，実例を提示している．

第２章本論において，ベンジルエーテル誘導体からベンズアルデヒドへの変換反応を基盤として，新規グリコシル供与体としての安定なオルソエステルの合成について述べている．さらに，本化合物のグリコシル化反応が直接的陽極酸化によって進行するのではなく，反応系に生成する電解酸によって制御されていることを証明するため，様々な検討を加え，電解酸の活性本体が無水過塩素酸であるとする結論に至った経緯を述べている．本オルソエステルを糖鎖合成に活用するため，Ｃ６位に選択的に除去可能な保護基を導入した誘導体を合成しその安定性を確認した後，グリコシル化と脱保護を連続的に行い，三糖誘導体の合成を行っている．

上記の研究を総括した後，実験編において本研究の結果に至る実験内容を詳細に述べている．

以上，著者の研究は糖鎖の合成に向けて安定性の高いオルソエステル誘導体を合成し，これを用いて電解酸を活用化剤として三糖誘導体の合成を行い，その有用性を示したもので，高く評価できる結果と言える．

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4039号	氏　名	野口　健太

主 論 文 題 目 ：

A Study on Even Embeddings of Graphs

（偶角形分割グラフの研究）

グラフの頂点彩色に関する研究はグラフ理論の中心的話題である。グラフの各頂点に、隣接した頂点対には異なる色を割り当てるという規則のもと色を割り当てるとき、必要な色数の最小数をグラフの染色数という。長い間未解決であったことで有名な「四色問題」は、任意の平面グラフの染色数は4以下であるかという問題である。四色問題は1976年に肯定的に解決されたが、多くの問題と研究の流れを生み出した。その主なものに「種数の高い閉曲面上のグラフの染色数」や、「染色数を抑えるためのグラフへの制限」、「特殊な条件を付加した彩色問題」などがある。本論文では偶角形分割となるグラフに焦点をあて、これらの問題を考える。

グラフを辺の交差なく閉曲面に描くことを、グラフの閉曲面への埋め込みという。閉曲面上のグラフの染色数の上限を決定するには、計算上求まる上界の値だけ色数を必要とするグラフがその閉曲面に埋め込めるかどうかが重要である。それには完全グラフの三角形分割や四角形分割埋め込みといった特徴的な埋め込みが存在することを示すことが鍵となっている。それらのグラフの埋め込みを構成する手法の一つに、current graph を用いるものがある。これはグラフの埋め込みと一対一に対応する rotation system を別のグラフから与える方法である。

本論文での主題である偶角形分割埋め込みとは、全ての面が偶角形となるようなグラフの閉曲面への埋め込みのことである。平面上の偶角形分割埋め込みは2部グラフの平面埋め込みと同値であるが、一般閉曲面上のグラフには非可縮なサイクルが存在するため、偶角形分割埋め込みに対して cycle parity という代数的不変量が定義される。本論文では、どのような current graph が偶角形分割グラフに対応し、また current graph のどのような性質が対応する偶角形分割の埋め込みに反映されるのかについて明らかにする。その結果として偶角形分割における帝国問題の染色数の上限を達成する例と、完全グラフの四角形分割埋め込みについて cycle parity のタイプ別の存在を示す。ここで帝国問題とは、飛び地を含む地図に対応するグラフの頂点彩色問題である。特に current graph から非可縮なサイクルの長さをコントロールするという手法は既存の定理にはない新しい手法である。

代表的な偶角形分割である四角形分割に関しては、上述の研究のほかに、多色彩色問題や、特別な彩色的性質をもつ三角形分割への拡張についても議論する。特に、一般閉曲面におけるそれらの彩色問題においては cycle parity やそれに類似する代数的不変量との関係を明らかにする。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4039 号	氏　名	野口　健太

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士	太田　克弘
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士	田村　明久
		慶應義塾大学教授	工学博士	足立　修一
		慶應義塾大学准教授	博士(理学)	小田　芳彰

学士（理学），修士（理学）野口健太君の学位請求論文は，「A Study on Even Embeddings of Graphs（偶角形分割グラフの研究）」と題し，全７章よりなる。閉曲面上に辺を交差させずに描かれたグラフで，各面が偶角形となっているものを偶角形分割グラフと呼ぶ。本論文では，偶角形分割グラフの彩色問題とそれに付随するグラフの埋め込み問題を，様々な角度から研究している。

グラフの各頂点に色を塗り，隣接した頂点には異なる色が塗られるようにするとき，必要な色数の最小値をそのグラフの染色数という。彩色問題とは，与えられたグラフの染色数を決定する，あるいはグラフの族に対し染色数の上限を決定する問題である。平面グラフの染色数についての四色定理は長年未解決であった末に解決されたが，それに先んじて，平面以外の閉曲面上のグラフの染色数については解決済みであった。その上界は Heawood 数として古くから知られており，最善性については Ringel らにより解決された。一方偶角形分割グラフは，平面上においては染色数が２であることと等価であり，他の閉曲面上においても，局所２染色的グラフとも呼ぶべきものである。閉曲面上の偶角形分割グラフについても，染色数の最善な上界が知られている。Ringel らの定理とともに，完全グラフを種数の低い閉曲面に埋め込むことがその証明の本質になる。

第１章で本論文の研究成果とその背景となる既存の研究について概説したのち，第２章では以後の議論で必要となる用語・記号の定義を行っている。また第３章では，種数の高い閉曲面への埋め込みを表現する方法であるローテーションシステムの概念と，Ringel らの証明でも用いられた，対称性の高いローテーションシステムを得るための補助的なグラフであるカレントグラフの概念を導入している。とくに，完全グラフの埋め込みを与えるようなカレントグラフについて詳細に構成法が述べられている。

第４章では，閉曲面上の偶角形分割に付随する代数的不変量であるサイクルパリティに着目する。サイクルパリティは，閉曲面の基本群の生成元に対して，対応する閉路の長さの偶奇性を与えるものである。向き付け不可能な閉曲面においては，４種類の非同値なサイクルパリティが存在することが知られている。本章では，カレントグラフによって生成される偶角形分割のサイクルパリティが，カレントグラフのどのような性質によって既定されるかの特徴づけを与えている。またそれを用いて，完全グラフを四角形分割として埋め込むことのできる向き付け不可能閉曲面に対して，すべての非自明なサイクルパリティを実現する埋め込みが存在することを証明している。

閉曲面上のグラフの彩色問題において，いくつかの頂点を同じ色で塗らなければいけないという制約のついた彩色問題は，帝国問題と呼ばれる。第５章では，帝国問題に対する既存の結果について概説し，第６章では，閉曲面上の偶角形分割となるグラフの帝国問題について，その染色数の一般的上界を与え，それが無数の閉曲面において最善であることを示した。この最善性の証明には，カレントグラフを高度に利用し埋め込みを構成する手法が用いられている。

第７章では，特徴的な偶角形分割である四角形分割について，巡回的彩色問題や，辺を加えて局所３染色的三角形分割を得る問題について述べている。いずれの問題においても，サイクルパリティやそれに類似する代数的不変量が深く関係していることを明らかにしている。

以上，本論文は，閉曲面上のグラフの彩色問題に動機づけられたグラフの埋め込み問題について，偶角形分割に着目することにより新たな理論を構築しており，位相幾何学的グラフ理論に貢献するところが少なくない。これは，著者が自立して研究活動を行うために必要な高度な研究能力と学識を十分に兼ね備えていることを示したと言える。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 4040 号	氏　名	荻原　陽平

主 論 文 題 目 ：

遷移金属触媒を用いた多様な形式の不活性炭素–酸素結合切断を経る
炭素–炭素結合生成反応の開発と反応機構に関する研究

本研究はルテニウム触媒を用いた不活性炭素–酸素結合切断を経る様々な炭素–炭素結合生成反応に関する新手法の開発、および反応機構の解明を目的としている。

遷移金属錯体触媒を用いた分子変換反応は、他の方法では困難または多段階を要する合成プロセスを高効率的に実現することが可能なため、有機合成化学において非常に重要な役割を担っている。中でも不活性結合を遷移金属錯体触媒によって直接的かつ選択的に炭素–炭素結合へと変換する手法は、有機合成における強力な合成手法となることが期待できる。

著者は、有機分子中に広く見られ、かつ直接的な切断が困難であるエステルやエーテルの炭素–酸素結合に着目し、これらの結合を遷移金属触媒によって有用な他の結合に変換可能となれば、有機合成に利用可能な多くの方法論の創出につながると考えた。また、これらの反応機構を明らかにすれば、そこに含まれる素過程を利用した新規触媒反応の開発へと展開できると考えた。そこで、本研究では様々な炭素–酸素結合の切断を利用した触媒反応の開発および機構解明を行った。

まず、我々の研究グループでこれまでに報告していたルテニウム触媒によるアルケニルエステルのアルケニル炭素–酸素結合と芳香族化合物の炭素–水素結合とのカップリング反応に関して、その詳細な機構解明を行った。その結果、この反応における炭素–酸素結合、および炭素–水素結合は、それぞれβ-アセトキシ脱離、酸化的付加を経て切断されていることを見出した。これらの知見に基づき、アルケニルエーテルやアルケニル炭酸エステルの炭素–酸素結合も同様にβ-酸素脱離によって切断できると考え、これらをアルケニル化試薬として用いた芳香族化合物との反応を行った。推定通りカップリング反応は進行し、高い収率で対応するアルケニル化生成物が得られることを見出した。従来のアルケニルエステルを用いた反応では、副生成物としてカルボン酸が生成するため、塩基性の比較的高いオキサゾリンなどを有する基質の場合には塩基の添加が必要であった。しかしながら、本反応では副生成物がアルコールであるため、添加剤を用いる事無くアルケニル化反応を進行させることが可能となった。

また、アルキルエーテルの sp^3 炭素–酸素結合も不活性炭素–酸素結合のひとつとして挙げられる。しかし、この炭素–酸素結合を触媒的に炭素–炭素結合生成へと利用する反応は比較的活性な基質に限られていた。著者は、適切な位置に配位性官能基を有する基質を用いれば、触媒金属中心による炭素–酸素結合の切断が達成できると考え検討を行った。その結果、ルテニウム触媒系においてピリジル基を持つアルキルエーテルと有機ホウ素試薬との反応が進行し、アルキルエーテルの sp^3 炭素–酸素結合を炭素–炭素結合へと変換できることが分かった。

さらに、単純な安息香酸エステル類のアシル炭素–酸素結合を遷移金属触媒によって切断し、直接ベンゾフェノン類へと変換する反応は、困難でありこれまでに報告例がほとんど無かった。著者は、$RuH_2(CO)(PPh_3)_3$ がこの結合を切断可能であることに着目し、ホスフィン配位子の異なる様々なルテニウム錯体 $RuH_2(CO)(PAr_3)_3$ とその前駆体 $RuHCl(CO)(PAr_3)_3$ の簡便かつ一般的な合成法を確立し、これらを触媒として用いた安息香酸メチル誘導体と有機ホウ素試薬との反応を検討した。その結果、$RuHCl(CO)\{P(3\text{-}MeC_6H_4)_3\}_3$ とフッ化セシウムを用いた系で対応するベンゾフェノン誘導体が得られることを見出した。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4040 号	氏　名	荻原　陽平

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	理学博士	山田　徹
		慶應義塾大学教授	工学博士	吉岡　直樹
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	羽曾部　卓
		東京農工大学准教授	博士（学術）	平野　雅文

学士（理学）、修士（理学）荻原陽平君提出の学位請求論文は、「遷移金属触媒を用いた多様な形式の不活性炭素−酸素結合切断を経る炭素−炭素結合生成反応の開発と反応機構に関する研究」と題し、序論、本論４章、結論、および実験項より構成されている。

遷移金属錯体触媒を用いた分子変換反応は、有機合成化学において不可欠な方法論であり広く研究が行われている。中でも化学的に不活性な炭素−水素結合や炭素−酸素結合の切断を経る触媒的炭素−炭素結合生成反応は、従来法では困難である様式の結合を一段階で形成できるため有用性が高い変換法である。このため近年国内外において活発に関連研究が行われている。著者は、様々な様式の炭素−酸素結合切断を経る触媒的炭素−炭素結合生成反応に関する研究に取り組んでいる。本研究において、酢酸アルケニルの炭素−酸素結合切断を利用した芳香族炭素−水素結合のアルケニル化反応について研究を行い、触媒反応における重要中間体の特徴と性質の解明や反応速度論解析等により炭素−酸素結合切断を利用した炭素−水素結合のアルケニル化の詳細な反応機構を解明している。また、反応機構研究により得た知見を基にして、新しい形式のアルケニル化反応の開発にも成功している。さらに、先例がほとんど無い脂肪族エーテルの炭素−酸素結合切断を経る芳香族ボロン酸誘導体とのカップリング反応ならびに芳香族エステルのアシル炭素−酸素結合切断を利用した反応によるベンゾフェノン誘導体の合成法の開発について述べている。

序論では、不活性炭素−酸素結合切断を利用した触媒反応の例を示し、関連する触媒反応の有機合成反応における有用性について述べている。また、それらの触媒反応に関する研究はほとんど報告例が無く、詳細な反応機構に関する知見が必要とされていることについて述べている。

本論第１章では、ルテニウム触媒を用いたアリールピリジン類と酢酸アルケニルとの反応による炭素−水素結合のアルケニル化反応の反応機構の解明について述べている。この反応では、酢酸アルケニルの炭素−酸素結合と芳香族炭素−水素結合が切断されて進行するが、その反応機構の詳細は不明であった。著者は、不活性炭素−水素結合および炭素−酸素結合切断という通常困難と考えられる二つの過程を含む本反応の機構の解明を、中間体の単離・構造解析・触媒活性の検討や反応速度解析を行うことにより達成している。これらの検討により、炭素−酸素結合はβ-アセトキシ脱離を経て切断されることや重要鍵中間体の単離・同定、さらに反応の律速段階についての重要な知見を得ている。

本論第２章では、前章で得た知見を基に新規触媒反応を設計し、アルキル(アルケニル)炭酸エステルをアルケニル化剤に用いることにより、アルコールと二酸化炭素の副生を伴う炭素－炭素結合生成反応の開発を行っている。副生成物の酸性度が低いことから、酸性条件で不安定な化合物との反応にも適用できることも述べている。

本論第３章では、アルキルエーテルの sp^3 炭素−酸素結合を触媒的に炭素−炭素結合に変換する反応の開発について述べている。著者は、適切な位置にピリジル基をもつアルキルエーテルと芳香族ホウ素反応剤との反応がルテニウム触媒存在下進行し、アルキルエーテルの sp^3 炭素−酸素結合を炭素−炭素結合へと変換できることを明らかにしている。

本論第４章では、これまで報告例が無い単純な安息香酸メチル類のアシル炭素−酸素結合切断を経るケトンへの触媒的変換反応の開発について述べている。著者は、様々な $RuHCl(CO)(PAr_3)_3$ 錯体と $RuH_2(CO)(PAr_3)_3$ 錯体の合成法を確立した。次いで、これらを触媒にした安息香酸メチル誘導体とアリールボロン酸エステルとの反応を検討し、$RuHCl(CO)\{P(3\text{-}MeC_6H_4)_3\}_3$ とフッ化セシウムを用いた触媒系を用いると、対応するベンゾフェノン誘導体が得られることを明らかにしている。

以上、本研究における研究成果は、遷移金属錯体による不活性炭素−酸素結合切断反応の反応機構ならびに炭素−酸素結合切断を経る新規触媒反応の開発を行うために重要となる新しい知見を提供した。上記の研究成果は、有機金属化学分野のみならず有機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4041号	氏　名	辻　享志

主 論 文 題 目 ：

有機ユウロピウムサンドイッチ錯体の液相合成とその物性

二価ユウロピウム（Eu）を有機分子と複合化させた有機ユウロピウム金属錯体は，Eu^{2+}の 4f-5d 遷移に由来する光遷移特性や 4f 電子スピンに由来する磁気応答性を有機配位子の化学修飾で制御できるだけでなく，規則的に配列した Eu^{2+}イオン間に磁気的・電子的な相互作用の発現が期待できる。

気相中で Eu 原子と 1,3,5,7-シクロオクタテトラエン（COT）分子とを混合すると，Eu^{2+}と COT^{2-}とが交互に積層した有機ユウロピウム多層サンドイッチ錯体が生成することが見い出され，この多層サンドイッチ錯体は Eu から COT への電荷移動によるイオン結合の形成（銛打機構）が逐次的に起こることによって生成することが明らかとなっている。一方，液相中では Eu と COT とを液体アンモニア中で混合すると，Eu と COT とが 1:1 の組成比で構成される二価ユウロピウム錯体 Eu-COT が生成することが知られている。反応機構の類推から，液相合成による 1:1 組成の Eu-COT 錯体は，気相実験で見出された錯体と同じく多層サンドイッチ構造が形成されていると考えられるものの，溶解性が乏しく，また空気との反応性が高いといった取り扱いの難しさから，構造評価や物性評価は困難とされていた。

そこで本論文では，Eu–COT に対する液相合成の条件を検討し，生成物の各種構造評価を嫌気条件で行うための方法論を開発しつつ，液相合成された Eu–COT が多層サンドイッチ構造を有することを明らかにした。さらに、2 つのトリメチルシリル(TMS)基が COT 配位子に導入された Eu–COT 誘導体（Eu–COT”）の合成も達成し，各種構造評価を行うとともに，磁気特性および光学特性を Eu–COT と比較することで，有機配位子の置換基効果を検証した。TMS 基が有機ユウロピウムサンドイッチ錯体の蛍光特性に大きな違いを生じることを明らかにし，量子化学計算との比較からその光学特性の変化の起源を考察した。

第１章では，本研究の背景と各章の内容を概説し，第２章では，各錯体の液相合成方法，幾何構造と電子状態の分析方法，および磁気特性と蛍光特性の評価方法について詳述した。

第３章では，液相合成した Eu–COT および Eu–COT”について，嫌気下における粉末Ｘ線回折と赤外吸収分光分析，ラマン分光分析による構造評価から，これらの錯体が多層サンドイッチ構造を有することを見出した。また Eu–COT”では，Eu–COT と比較して蛍光強度が 11 倍ほど増大し，蛍光波長がブルーシフトすることを明らかにした。Eu–COT と Eu–COT”の磁気測定から Eu^{2+}イオンに基づく有効磁気モーメントを有することを明らかにしつつ，Eu^{2+}イオ間の磁気的相互作用が生じないことを見出した。

第 4 章では，単核サンドイッチ錯体 Li_2EuCOT_2 と $Li_2EuCOT”_2$ を合成し，紫外可視吸収分光分析および蛍光分析から，置換基によって蛍光特性が変化するメカニズムを考察した。単核錯体においては，TMS 基の導入によって蛍光量子収率が９倍増大することを見出し，これが電子基底状態と電子励起状態の間の構造変化の減少で説明できることを明らかにした。

第５章では，各章の結論を述べ，本研究の成果をまとめた。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4041 号	氏　名	辻　享志

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士	中嶋　敦
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	磯部　徹彦
		慶應義塾大学教授	工学博士	藪下　聡
		慶應義塾大学教授	工学博士	吉岡　直樹

学士(理学)，修士(理学) 辻享志君提出の学位請求論文は「有機ユウロピウムサンドイッチ錯体の液相合成とその物性」と題し，5 章から構成されている。

二価ユウロピウム(Eu)を有機分子と複合化させた有機ユウロピウム金属錯体は，Eu^{2+}の 4f-5d 遷移に由来する光遷移特性や 4f 電子スピンに由来する磁気応答性を有機配位子の化学修飾で制御できるだけでなく，規則配列した Eu^{2+}イオン間に磁気的・電子的な相互作用の発現が期待される。気相中で Eu 原子と 1,3,5,7-シクロオクタテトラエン(COT)分子を混合すると，Eu から COT への電荷移動が逐次的に起こり，Eu^{2+}と COT^{2-}が交互に積層した有機ユウロピウム多層サンドイッチ錯体が生成する。一方，液相中では Eu と COT を液体アンモニア中で混合すると，Eu と COT が 1:1 の組成比で構成される二価ユウロピウム錯体(Eu-COT)が生成する。反応機構の類推から，液相合成による 1:1 組成の Eu-COT 錯体は，気相中の錯体と同じ多層サンドイッチ構造を有すると考えられるものの，溶解性が乏しく，酸素との反応性が高いといった取り扱いの難しさから，この Eu-COT 錯体の構造や物性の評価は困難とされていた。

そこで本研究では，Eu-COT に対する液相合成の条件を検討し，生成物の各種構造評価を嫌気条件で行うための方法論を開発しつつ，液相合成された Eu-COT が多層サンドイッチ構造を有することを明らかにした。さらに，2 つのトリメチルシリル(TMS)基が COT 配位子に導入された Eu-COT 誘導体(Eu-COT'')の合成も達成し，構造評価を行うとともに，磁気特性および光学特性を Eu-COT と比較することで，有機配位子の置換基効果を検証した。TMS 基が有機ユウロピウム錯体の蛍光量子収率を大きく向上させることを明らかにし，量子化学計算との比較からその光学特性の起源を考察した。

第 1 章では，本研究の背景と各章の内容を概説するとともに，本論文の目的と意義を述べている。

第 2 章では，各錯体の液相合成方法，幾何構造と電子状態の分析方法，および磁気特性と蛍光特性の評価方法について詳述している。

第 3 章では，液相合成した Eu-COT および Eu-COT''について，嫌気下における粉末 X 線回折と赤外吸収分光分析，ラマン分光分析による構造評価から，これらの錯体が多層サンドイッチ構造を有することを見出した。また Eu-COT''では，Eu-COT と比較して蛍光強度が 11 倍ほど増大し，蛍光波長がブルーシフトすることを明らかにした。Eu-COT と Eu-COT''の磁気測定から Eu^{2+}イオンに基づく有効磁気モーメントを有することを明らかにしつつ，Eu^{2+}イオン間の磁気的相互作用が生じないことを見出している。

第 4 章では，単核サンドイッチ錯体 Li_2EuCOT_2 と $Li_2EuCOT''_2$ を合成し，紫外可視吸収分光分析および蛍光分析から，置換基によって蛍光特性が変化するメカニズムを考察した。単核錯体においては，TMS 基の導入によって蛍光量子収率が 9 倍増大することを見出し，これが電子基底状態と電子励起状態の間の構造変化の減少で説明できることを明らかにしている。

第 5 章では，各章の結論を述べ本研究の成果をまとめている。

以上要するに，本論文は二価ユウロピウムを有機分子と複合化させた有機ユウロピウム金属錯体を合成することにより，その錯体の構造や磁気特性と蛍光特性の評価を行い，有機配位子の置換基効果を関連づけてその物性を明らかにしている。置換基によって蛍光特性が変化するメカニズムの解明は，有機ユウロピウム金属錯体の蛍光特性と有機配位子の電子状態との相関を明らかにしたもので，これらの知見は有機配位子の化学修飾による蛍光特性解明の重要な基礎をなすものであり，物理化学，そして錯体化学の発展への寄与が少なくない。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4042号	氏　名	坂井　秀男

主 論 文 題 目 ：

FinFET の高周波回路用の素子特性評価と E 級電力増幅器設計への応用

近年、一般的に電子回路に使用されている MOSFET の高速化や微細化、省電力化に限界が生じ、20 nm 世代以降では新しいチャネル構造を持つトランジスタが必要とされている。中でも 3 次元チャネル構造を持つ FinFET は、高速動作、高集積化、漏れ電流対策に適しているとされ、実際の製品に組み込まれ始めている。しかし、FinFET で設計された回路はロジックやメモリが主であり、アナログ回路に対する FinFET の適用例はまだ少数である。数年後にはデジタル回路だけでなく、無線通信部等のアナログ回路も FinFET で設計される可能性が高く、FinFET を高周波アナログ回路へ応用する研究は急務と言える。

FinFET を使用したアナログ回路設計には、直流特性に加え、デバイスモデルの様々なパラメータの精度を上げることが必須となる。特に高周波特性や雑音特性、デバイス寿命のモデリングが重要となる。

本研究は、まだ報告例の少ない、FinFET を使用したアナログ回路の設計を行い、FinFET のデバイス構造が回路性能に与える影響を評価し、回路に対して最適な FinFET の使用方法を提案することを目的としている。本研究において、まず、単体素子の特性を評価できる FinFET を試作した。アナログ回路シミュレーションを行う上で重要なパラメータとなる FinFET の高周波特性、低周波域のフリッカ雑音、デバイス寿命を決めるホットキャリア特性を実測し、高精度デバイスモデルを構築した。構築したデバイスモデルを用いて、特に無線通信用送受信機で重要な回路ブロックである E 級パワーアンプ(PA)を設計し、高周波シミュレーションによりその性能評価を行った。

第 1 章は序論であり、これまで電子回路に使用されてきたトランジスタ構造の変遷や、プレーナ型トランジスタの改善技術を紹介している。また、プレーナ型トランジスタが抱える問題点を指摘した上で、3 次元構造を持つ FinFET が、これからの電子回路設計に必要とされている背景を述べている。

第 2 章では、FinFET の基本的な特性が説明されている。プレーナ型 MOSFET やダブルゲートトランジスタとの特徴の違いが比較され、本研究で試作した FinFET の製作プロセスについて述べられている。

第 3 章はアナログ回路設計で必須となる FinFET の特性パラメータとして、高周波特性、フリッカ雑音特性、ホットキャリア特性の実測結果を提示し考察している。高周波特性評価では、3 次元構造を持つ FinFET の精度の高い周波数特性を抽出するために、新規の校正パターンを考案して測定に用いた。新規パターンの開発によって FinFET のフィン部分の特性抽出を可能とした。フリッカ雑音特性の評価では、通常の FinFET 構造である Common-double-gate- (CDG-)FinFET の評価に加え、過去に報告例の無い Independent-double-gate- (IDG-) FinFET のフリッカ雑音評価を行った。独立したゲート端子を 2 つ所有する IDG-FinFET は、通常の FinFET では難しい閾値電圧の調整が可能であり、様々な新規回路への適用が期待できる。しかし、片方のゲートだけに電圧を印加するため、通常の FinFET のフィン内部とは異なる垂直電界が発生する。実測により垂直電界の違いがフリッカ雑音に影響を与えないことを明らかにした。ホットキャリア特性評価では、ストレス印加時間による閾値電圧の変動に関して、特にアナログ回路で重要となるものの、これまでに報告例のない FinFET の Finger 数の依存性に着目して測定した。総チャネル幅が 20 μm 程度以上あれば閾値電圧変動の素子間バラツキがほぼ無視できるという実測結果を得た。

第 4 章は、3 章で得られた FinFET の基礎特性を基に、アナログ回路設計と高周波シミュレーションによる回路性能の評価を行っている。ギガヘルツ帯域で使用できる無線通信用の低電圧、高効率 E 級 PA を、3 章で構築した高精度デバイスモデルを用いて設計した。送信機で最も消費電力が大きく、トランジスタに加わる電圧ストレスも大きい E 級 PA の信頼性を検証するため、ホットキャリア特性の結果を用いて、回路寿命に関する議論を行っている。

第 5 章にて本研究を総括している。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4042 号	氏　名	坂井　秀男

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	石黒 仁揮
	副査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	黒田 忠広
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	内田 建
		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）	松本 佳宣

学士（工学）、修士（工学）坂井秀男君提出の学位請求論文は「FinFET の高周波回路用の素子特性評価と E 級電力増幅器設計への応用」と題し、5 章から構成されている。

近年、大規模集積回路に使用される Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor (MOSFET)の高速化や微細化、低電力動作に限界が生じ、20 nm 世代以降では新しいチャネル構造を持つトランジスタが必要とされている。3 次元チャネル構造を持つ Fin 型 FET (FinFET)は、高速動作、高集積化、漏れ電流対策に適しているとされ、商用のプロセッサに適用され始めている。しかし、FinFET で設計された回路はロジックやメモリが主であり、アナログ回路に対する適用例はまだ少数である。将来、デジタル回路だけでなく、無線通信部等のアナログ回路も FinFET で設計される可能性は高く、高周波アナログ回路へ FinFET を応用する研究の重要性が増している。

本研究は、FinFET を使用したアナログ回路設計を通して、デバイス構造が回路性能に与える影響を評価し、FinFET の適した使用方法を提案することを目的としている。そのために、単体素子の特性を評価できる FinFET を試作し、アナログ回路設計で重要なパラメータとなる高周波特性、フリッカ雑音、デバイス寿命を決めるホットキャリア特性の測定を行っている。さらに、得られた素子特性に基づき、無線通信用送受信機で重要な回路ブロックである E 級電力増幅器の設計および高周波シミュレーションによる性能評価を行っている。

第 1 章は序論であり、従来の集積回路で使われてきたプレーナ形 MOSFET が抱える問題点を指摘した上で、3 次元チャネル構造を持つ FinFET の近年の研究動向を述べている。

第 2 章では、FinFET の特徴およびデバイスモデルが説明され、高精度特性評価のために本研究で実際に試作した FinFET の製造プロセスについて述べられている。

第 3 章では、アナログ回路設計で必須となる FinFET の特性パラメータとして、高周波特性、フリッカ雑音特性、ホットキャリア特性の実測結果を提示し考察している。高周波特性評価では、新規に考案した校正パターンにより、3 次元構造を持つ FinFET の高精度な周波数特性の抽出を可能とした。フリッカ雑音特性に関しては、通常の Common-double-gate- (CDG-)FinFET の評価に加え、新規構造の Independent-double-gate- (IDG-) FinFET の評価を行い、両者の回路設計に与える影響を考察している。ホットキャリア特性評価では、ストレス印加時間による閾値電圧のシフトに関して、特にアナログ回路で重要となる FinFET の Fin 数依存性に着目して実測を行っている。総チャネル幅と閾値電圧シフト量の素子間バラツキの関係を明らかにし、第 4 章における電力増幅器の設計につなげている。

第 4 章では、3 章で構築した高精度デバイスモデルを用いて、ギガヘルツ帯域で使用できる無線通信用の低電圧・高効率 E 級電力増幅器が設計されている。寄生容量および寄生抵抗が増幅器の性能に与える影響が論じられ、素子構造の最適化に関する議論がなされている。また、送信回路の中で最も消費電力が大きく、トランジスタに加わる電圧ストレスも大きい E 級電力増幅器の信頼性を検証するため、ホットキャリア特性の結果を用いた回路寿命に関する議論がなされている。

第 5 章にて本研究を総括している。

以上要するに、本研究は FinFET を用いたアナログ回路設計において必要となる、高精度素子特性評価およびその回路設計への応用を可能とするもので、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4043号	氏　名	喜多　奈々緒

主 論 文 題 目 ：

Canonical Decompositions Describing Structures of Matchings in Graphs

（グラフのマッチング構造を記述する標準分解）

グラフとは道路網などネットワーク構造の数学的抽象化に相当する基本的な離散構造である．マッチングとはグラフの部分構造の一種であり，互いに素な枝の集合として定義される．マッチングは離散数学の最も代表的な研究対象の一つであり，長年に渡り関心を集めてきた．マッチングに関する研究の蓄積はマッチング理論と呼ばれるグラフ理論の一大分野を成している．本論文はマッチング理論の基盤に対し，標準分解・双対性に基づく構造解明・完全マッチングの数え上げ問題の三つの方向から貢献するものである．

従来マッチングの構造を把握する強力なツールとして，総称して標準分解と呼ばれるいくつかの分解型構造定理が重要な役割を果たしてきた．しかしこれらはそれぞれ特殊なクラスのグラフのみを実質的な適用対象としており，互いの相互関係やこれらをまとめ上げ統一して理解する方法は不明であった．これに対し本論文では任意のグラフを適用対象とし，かつ既存の標準分解をまとめ上げる新しい標準分解を提案する．これは既存の標準分解の洗練された記述も含んでおり，完全マッチングを持つ一般のグラフに対しても非自明な構造を明らかにするものである．

バリアもまたグラフの部分構造の一種であるが，これは最大マッチング問題の双対最適解の組合せ的解釈に相当しており，すなわちマッチングと対をなす概念である．双対性は組合せ最適化の理論体系の軸となる概念であり，事実バリアもマッチングの研究において重要な役割を果たす．しかしバリアについて知られていることは少なく，特に重要である極大バリアについてすらも解明は進んでいなかった．これに対し本論文では，一般のグラフに対し極大バリアの構造を明らかにする定理を与える．これは1972 年にLovász によって与えられたcanonical partition の一般化に相当する．

グラフがもつ完全マッチングの総数を調べることは数え上げ組合せ論の代表的な問題の一つであり，様々な側面からの研究がなされている．カテドラル定理は飽和グラフの特徴づけを与えており，次数などグラフの構造に関するパラメタと完全マッチングの総数との関係を調べる際に有用である．カテドラル定理は1972 年にLovász によって与えられたのち，2001 年にSzigeti によって別証明が与えられている．本論文では，飽和グラフの性質を新しい標準分解を用いて精査することによってカテドラル定理のさらなる別証明を与える．この新しい証明では，カテドラル定理の背後にある構造を明らかにすることでより洗練された事実を副産物として与えつつ，非常に自然な形での別証明を与えている．

また，本論文で提案された新しい標準分解を計算する多項式時間アルゴリズムをいくつか提案する．これはカテドラル定理によって明らかにされる構造を計算するものにも対応する．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4043 号	氏　名	喜多　奈々緒

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士	田村　明久
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士	前田　吉昭
		慶應義塾大学教授	工学博士	野寺　　隆
		慶應義塾大学准教授	博士(理学)	小田　芳彰

学士（工学）修士（情報理工学）喜多奈々緒君提出の学位申請論文は「Canonical Decompositions Describing Structures of Matchings in Graphs（グラフのマッチング構造を記述する標準分解）」と題し、全６章より構成されている。

マッチング理論は、グラフ理論および組合せ最適化において中核をなす研究分野である。行列の分解や資源配分問題などに利用され、実用面からも重要な研究分野でもある。本論文の著者はマッチング全体の構造を記述する新しい標準分解を提案し、これを利用することでバリアの構造の解析や既存の定理に対する自然な別証も与えている。

本論文の第１章は序章である。グラフのマッチングの定義、グラフの最大マッチングの大きさに関する最大最小定理である Berge の公式、バリアの定義など本論文で扱うグラフ理論における概念を紹介している。またグラフのマッチング構造に関連する Gallai-Edmonds 分解、２部グラフに対する Dulmage-Mendelsohn 分解、ひとつの因子連結成分から成るグラフの標準分割（以下単に標準分割とよぶ）という既存の分解を紹介し、これらと提案する分解の関係やその有用性などを述べている。

第２章では、完全マッチングをもつグラフに対する新たな分解（本論文では一般化カテドラル分解とよぶ）を提案している。まず因子連結成分間の２項関係を与え、この２項関係が半順序関係となることを示している。また各因子連結成分の頂点集合上に第２の２項関係を与え、これが同値関係となること、および同値類による頂点集合の分割（本論文では一般化標準分割とよぶ）が各因子連結成分に対する標準分割の細分を与えることを示している。さらに上記の半順序関係においてカバー関係にある２つの因子連結成分について、上位の因子連結成分の近傍と下位の因子連結成分の共通部分が一般化標準分割の１つの同値類に包含されることなども証明している。半順序関係と一般化標準分割の相互関連を示すことで、一般化カテドラル分解を提案している。

バリアとは Berge の公式において最小値を達成する頂点集合である。第３章では、一般化カテドラル分解を通してある種の意味で極大となるバリアの構造を解析している。一般のグラフの極大バリアは、Gallai-Edmonds 分解が定める完全マッチングをもつ部分グラフの極大バリアから構成できるという既存の結果を踏まえ以下の結果を示している。完全マッチングをもつグラフの極大バリアが一般化標準分割の幾つかの同値類の直和となること、および極大バリアが誘導する奇連結成分全体の構造を一般化カテドラル分解の半順序関係を用いて特徴付けている。

第４章では、飽和グラフ、すなわち完全マッチングをもちかつ完全マッチング全体の集合を変えることなく新たな辺を追加できないグラフの構成的特徴付けであるカテドラル定理に対する別証を与えている。この定理に対する既存の証明はすべて Gallai-Edmonds の構造定理を用いているが、本章での証明は Gallai-Edmonds の構造定理やバリアを用いないという特徴がある。以下のような一連の結果を示すことで、カテドラル定理に対する自然な証明を与えている。飽和グラフの一般化カテドラル分解では半順序関係の意味で極小な因子連結成分が一意に定まる。極小因子連結成分内では標準分割と一般化標準分割が一致する。極小因子連結成分内の各同値類について半順序関係に関して上位の部分が飽和部分グラフを成す。

第５章では一般化カテドラル分解を求める多項式時間アルゴリズムについて議論をし、第６章では本論文の内容を総括している。

以上、著者はマッチング構造を記述する新たな標準分解を構築することに成功し、マッチング理論に新たな知見を与えており、グラフ理論において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4044号	氏　名	今田　充洋

主 論 文 題 目 ：

Constructions of contact manifolds via reduction

(リダクション法による接触多様体の構成)

正規性をもつ実接触多様体である佐々木ーアインシュタイン多様体は、近年、理論物理学、特に超弦理論の研究の中で重要な対象として扱われ、佐々木ーアインシュタイン構造を持った多様体の存在が数多く示されているが、その構造を具体的に表した研究結果は少ない。また実接触多様体の概念を複素多様体へと拡張した複素接触多様体も重要な対象と考えられているが、この具体的構成例は自明なものを除いてほとんど知られていないのが現状である。本論文ではリダクション法を用いて、実および複素接触多様体の具体的を新たに構成した。

本論文の第一の結果は、佐々木-アインシュタイン計量の非自明な構成である。Boyer と Galicki によって、4 次元複素ユークリッド空間上のモーメント写像とそれに付随する群作用のリダクションによって与えられる商多様体の上には佐々木ーアインシュタイン構造が可算無限個存在することが示されている。本論文ではこれらの佐々木-アインシュタイン計量のうちの一つを、4 次元複素ユークリッド空間上の標準計量を商空間に誘導することで、具体的に与えた。

第二の結果は複素接触多様体の構成である。佐々木ーアインシュタイン多様体は幾何学的構造の可積分条件にあたる正規性をもつ実接触多様体である。複素接触多様体の場合についても正規性の条件を満たすものについて議論されているが、その具体例は奇数次元の複素射影空間以外には知られていない。本論文では、超ケーラー多様体に正則な群作用が存在するとき、その群による商空間上に正規性をもった複素概接触計量構造が誘導されることを示した。この結果から複素射影空間と非同相な空間上に、正規性をもった複素概接触計量構造を具体的に与えた。

更に(4p+3)次元、(4q+3)次元の球面の直積空間上に複素概接触計量構造を具体的に構成した。この構成には各々の球面上の 3-Sasakian 構造が用いられている。この構成によって得られた複素概接触計量構造は正規性を持たないことも示した。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4044 号	氏　名	今田　充洋

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	理学博士	前田　吉昭
	副査	慶應義塾大学教授	博士（理学）	井関　裕靖
		慶應義塾大学准教授	博士（理学）	亀谷　幸生
		慶應義塾大学客員教授	PhD	森吉　仁志

学士（理学）、修士（理学）今田充洋君提出の学位論文は「Constructions of contact manifolds via reduction (リダクション法による接触多様体の構成)」と題し、６章からなる。正規性をもつ実接触多様体である佐々木－アインシュタイン多様体は、近年、理論物理学、特に超弦理論の研究の中で重要な対象として扱われ、佐々木－アインシュタイン構造を持った多様体の存在が数多く示されているが、その構造を具体的に表した研究結果は少ない。また実接触多様体の概念を複素多様体へと拡張した複素接触多様体も重要な対象と考えられているが、この具体的構成例は自明なものを除いてほとんど知られていないのが現状である。本論文ではリダクション法を用いて、実および複素接触多様体の構成法を提案し、それにより、佐々木－アインシュタイン多様体の幾何学的構造の決定と複素接触多様体の具体的な実例を与えている。

第１章は序論であり、問題の背景、本論文の構成および主結果について論じてある。

第２章は準備であり、本論文で用いる基本的な幾何学的概念およびその性質等について論じている。

第３章は、概接触構造、概接触計量構造、ケーラー構造、超ケーラー構造等、特に本論文で論じる様々な幾何学構造に関する基本的概念と性質についてについて論じている。

第４章は、接触多様体の正規性と佐々木多様体について論じ、ケーラー多様体からのリダクション法を用いた佐々木-アインシュタイン計量の非自明な構成を行っている。Boyer と Galicki によって、4 次元複素ユークリッド空間上のモーメント写像とパラメーターp,q をもつ群作用のリダクションによって与えられる商多様体の上には佐々木－アインシュタイン構造が可算無限個存在することが知られている。これらの佐々木-アインシュタイン計量のうち、p＝１、q＝0 の場合について、４次元複素ユークリッド空間上の標準計量を商空間に誘導することで、その計量を具体的に与えた。これが本論文の骨子となる第一の結果である。

第５章は、複素接触多様体の構成について論じている。佐々木－アインシュタイン多様体は幾何学的構造の可積分条件にあたる正規性をもつ実接触多様体である。複素接触多様体の場合についても正規性の条件についての議論はあるが、その具体例は奇数次元の複素射影空間以外には知られていない。本論文の骨子となる第二の結果として、超ケーラー多様体にある条件を満たす群作用が存在するとき、その群による商空間上に正規性をもった複素概接触計量構造が誘導されることを示した。この結果から複素射影空間と非同相な空間上に、正規性をもった複素概接触計量構造を具体的に与えた。また、本論文の骨子となる第三の結果として、(4p+3)次元、(4q+3)次元の球面の直積空間上に複素概接触計量構造を各々の球面上の 3-Sasakian 構造を用いて、具体的に構成した。この構成によって得られた複素概接触計量構造は正規性を持たないことも示している。

第６章では本論文の総括と今後の課題として実および複素接触多様体の構成についてのアプローチの提案について述べている。

以上要するに、本論文は、リダクション法による接触多様体の構成を提案し、佐々木－アインシュタイン多様体の計量を具体的に決定したこと、および新しい複素接触多様体の構成を実現したものであり、微分幾何学の研究分野に寄与するところが少なくない。本研究の推進により、自立した研究者であることも十分認められる。

よって，本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める.

内容の要旨

報告番号	甲　第4045号	氏　名	村田　雄一郎

主 論 文 題 目 ：

Nd:YAG レーザによる TIG アーク挙動の制御及びレーザウィービング溶接への適用

タングステンイナートガス（TIG）アーク溶接法は，熱源である溶接アークが安定しており，その制御が比較的容易であることから，各種鋼板，アルミニウムなどの非鉄金属板など比較的薄い金属板の溶接に広く用いられている．しかし，溶接現場では円錐状に研磨されている非消耗式タングステン電極の先端がアーク熱による溶融，大気の巻き込みによる酸化等により消耗して変形するという問題が生ずることが多い．この場合消耗した電極先端におけるアークの陰極点の移動が容易となり，その指向性が失われて不安定な状態となり，これが蛇行ビードの形成，溶け込み不足，溶接金属の溶け落ち等の溶接欠陥発生の原因となる．

一方，ネオジウム・イットリウム・アルミニウム・ガーネット（Nd:YAG）レーザ溶接は熱源としてレーザ光を用いているためにその指向性およびエネルギ密度が高く，アーク溶接にレーザ溶接を組み合わせたハイブリッド溶接法が様々な目的で開発され実用されている．そこで，レーザによるアークの安定化とその制御性に着目し，アークが不安定になりやすい電極の消耗状態におけるアークの安定化，さらにレーザによるアークの誘導および制御の可能性について実験的に検討している．また，ハイブリッド溶接における溶接アーク近傍の温度分布を有限要素法（FEM）により解析し，レーザ照射によるアークの誘導現象について解明している．以上の結果を参考に，レーザの振動によるアークの左右方向への振動を誘起・制御するレーザウィービング溶接法を提案し，これを用いたハイブリッド溶接によるオーステナイト系ステンレス鋼板の突合せ溶接を行い，その有効性を実験的に確認している．

第1章は序論であり，本研究の背景，目的，本論文の構成などについて述べている．

第2章は，各種溶接に関する原理と現象について述べている．

第3章では，TIG アーク溶接装置，Nd:YAG レーザ溶接装置および制御システムなど，本研究で用いたシステムの概要について述べている．

第4章では，Nd:YAG レーザと TIG アークを併用したハイブリッド溶接法を SUS304 ステンレス薄鋼板の溶接に適用し，その溶接性に関する実験的な検討を行っている．その結果，TIG アークにより形成された溶融池に対する Nd:YAG レーザの照射位置が，良好な溶接結果を得るための重要なパラメータの一つであることを示している．さらに，TIG アークの安定化及び誘導に対する Nd:YAG レーザ照射の効果について実験的な検討を行っている．

第5章では，ステンレス薄鋼板のハイブリッド溶接における溶融池およびその近傍の温度分布を有限要素法により解析し，レーザ照射によるアークの誘導現象について検討している．その結果，適正な溶接条件を選定すれば，100 W 級の比較的低出力レーザであっても，レーザ照射点の母材が加熱沸騰し，金属蒸気が発生してアークを誘導できる可能性を示している．

第6章では，本手法を用いて板厚2 mm のステンレス鋼板の突合せ溶接実験を行い，本研究で提案したレーザウィービング溶接法を用いればTIG 溶接電極先端が消耗するなどのアーク不安定条件下においても安定したアークの制御とともに突合せ溶接が可能であることを確認している．

第7章は結論であり，各章で得られた内容をまとめ，本研究の成果を総括している．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4045 号	氏　名	村田　雄一郎

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	慶應義塾大学名誉教授	工学博士	菅　泰雄
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	三木則尚
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	大宮正毅
		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）村田雄一郎君提出の学位請求論文は「Nd:YAG レーザによる TIG アーク挙動の制御及びレーザウィービング溶接への適用」と題し，7 章から構成されている．

タングステンイナートガス（TIG）アーク溶接法は，各種鋼板，アルミニウムなどの非鉄金属板など比較的薄い金属板の溶接に広く用いられている．しかし，タングステン電極の先端がアーク熱による溶融，大気の巻き込みによる酸化等により消耗して変形するという問題が生ずることが多い．この場合消耗した電極先端におけるアークの陰極点の移動が容易となり，その指向性が失われて不安定な状態となり，これが蛇行ビードの形成，溶け込み不足，溶接金属の溶け落ち等の溶接欠陥発生の原因となる．本論文の著者は，レーザによるアークの安定化とその制御性に着目し，アークが不安定になりやすい電極の消耗状態におけるアークの安定化，さらにレーザによるアークの誘導および制御の可能性について実験的に検討している．また，ハイブリッド溶接における溶接アーク近傍の温度分布を有限要素法により解析し，レーザ照射によるアークの誘導現象について解明している．以上の結果に基づいて，レーザの振動によるアークの左右方向への振動を誘起・制御するレーザウィービング溶接法を提案し，これを用いたハイブリッド溶接によるオーステナイト系ステンレス鋼板の突合せ溶接を行い，その有効性を実験的に確認している．

第 1 章は序論であり，本研究の背景，目的，本論文の構成などについて述べている．

第 2 章は，各種溶接に関する原理と現象について述べている．

第 3 章では，TIG アーク溶接装置，Nd:YAG レーザ溶接装置および制御システムなど，本研究で用いたシステムの概要について述べている．

第 4 章では，Nd:YAG レーザと TIG アークを併用したハイブリッド溶接法を SUS304 ステンレス薄鋼板の溶接に適用し，その溶接性に関する実験的な検討を行っている．その結果，TIG アークにより形成された溶融池に対する Nd:YAG レーザの照射位置が，良好な溶接結果を得るための重要なパラメータの一つであることを示している．さらに，TIG アークの安定化及び誘導に対する Nd:YAG レーザ照射の効果について実験的な検討を行っている．

第 5 章では，ステンレス薄鋼板のハイブリッド溶接における溶融池およびその近傍の温度分布を有限要素法により解析し，レーザ照射によるアークの誘導現象について検討している．その結果，適正な溶接条件を選定すれば，100 W 級の比較的低出力レーザであっても，レーザ照射点の母材が加熱沸騰し，金属蒸気が発生してアークを誘導できる可能性を示している．

第 6 章では，本手法をレーザウィービング溶接へ適用し，板厚 2 mm のステンレス鋼板の突合せ溶接実験を行っている．その結果，TIG 溶接電極先端が消耗するなどのアーク不安定条件下においても，安定したアークの制御とともに突合せ溶接が可能であることを確認している．

第 7 章は結論であり，各章で得られた内容をまとめ，本研究の成果を総括している．

以上要するに，本論文では Nd:YAG レーザによる溶接アークの安定化とその制御性について基礎実験を行い，重要な基礎資料を取得している．そして，レーザによるアークの誘導の可能性について実験的に検討し，レーザウィービング溶接法を提案している．さらに，これを用いたハイブリッド溶接によるオーステナイト系ステンレス鋼板の突合せ溶接を行い，その有効性を明らかにしている．これらの知見は，溶接工学の分野において工業上，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4046号	氏　名	松岡　貴英

主 論 文 題 目 ：

Theoretical study on the photodissociation process of ICl molecule

(ICl 分子の光解離過程に関する理論的研究)

量子論的効果が顕著な系にあって，その化学反応を定量的に予測することはいまでも困難である．特に，非断熱相互作用が重要になるとき，量子効果がその結果に顕著に現われる．筆者は，低励起状態において多くの非断熱相互作用の存在が分かっている ICl 分子に焦点を当て，その光解離過程において量子論的効果が及ぼす影響の詳細を理論的に解析した．

第一章では，非断熱相互作用に関する基礎事項とそれが光解離過程に及ぼす影響ついて説明した．また，非断熱遷移の理論計算の現状および問題をまとめ，本論文の目的と背景を述べた．

第二章では，ICl 分子の低励起状態，遷移双極子モーメントの計算に用いた線形応答理論，光解離生成物の角運動量分極が内包する量子論的情報，非断熱遷移の半古典論的取り扱い，のそれぞれについて説明した．

第三章では，遷移双極子モーメントの定量性を検討するため，ICl 分子よりもスピン軌道相互作用の弱い Cl_2 分子について，電子相関を異なるレベルで取り入れた計算方法を用いて length-form の遷移双極子モーメントと線形応答理論による遷移双極子モーメントの比較と検討を行った．遷移双極子モーメントが，計算に用いる一電子軌道に顕著に依存することを明らかにした．また，length-form の遷移双極子モーメントの有効性について述べた．

第四章では，ICl 分子の第１吸収帯の光解離過程について議論した．解離生成物の角運動量分極，解離方向異方性，生成物分岐比を，波束伝搬法を用いて計算し，実験結果との比較検討を行った．短波長領域においては 1(II)状態への光励起が支配的になるため，解離方向の異方性には垂直成分が強くなることを明らかにした．X(0^+)状態と 0^+(II)状態間の非断熱遷移が，顕わな回避交差を持たない状態間の非断熱遷移であることを明らかにした．非断熱遷移確率を計算するためにはポテンシャルエネルギーの情報だけでは不十分であることを指摘した．

第五章では，ICl 分子の第２吸収帯の光解離過程について議論した．解離方向異方性と生成物分岐比について，波束伝搬法，半古典論，古典軌跡法の３種類の方法で計算し，実験結果との比較検討を行った．0^+(III)状態と 0^+(IV)状態の間の量子干渉効果によって， I+Cl チャネルの平行成分が弱められることを明らかにした．基底状態 X(0^+)からの２電子励起配置を主配置とする 0^+(IV)状態が，0^+(III)状態と同程度の光吸収強度を持つ機構について議論した．以上を踏まえて，同程度の吸収強度と励起エネルギーを持つ状態間で非断熱遷移が起きる場合において量子干渉効果が無視できないことを明らかにし，量子干渉効果を計算するためには電子状態の位相の情報を保持することの重要性について指摘した．ポテンシャルエネルギー曲線の形状から，この量子干渉効果の特徴を考察した．また，種々の動力学計算方法について，それぞれの問題点について議論した．

第六章では，本論文の統括を行い，量子干渉効果が影響しうる場合について議論した．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4046 号	氏　名	松岡　貴英

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	藪下　聡
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	吉岡　直樹
		慶應義塾大学教授	博士（理学）	近藤　寛
		慶應義塾大学教授	理学博士	江藤　幹雄

学士（理学），修士（理学）松岡貴英君提出の学位請求論文は，「Theoretical study on the photodissociation process of ICl molecule　(ICl 分子の光解離過程に関する理論的研究) 」と題し，全６章からなっている．

量子効果が顕著な系の化学反応を定量的に，かつ生成物の微細構造準位分布を含めて予測することは今でも困難な問題である．特に，スピン軌道相互作用や非断熱相互作用が重要なときには，量子効果がその結果に顕著に現われる．松岡君は，低励起状態において多くの非断熱相互作用の存在が知られている ICl 分子に焦点を当て，その光解離過程における量子的干渉効果が及ぼす影響を理論的に解析した．

第一章では，非断熱相互作用に関する基礎事項とそれが光解離過程に及ぼす影響について説明し，非断熱遷移の理論計算をまとめ，本論文の目的と背景を述べている．

第二章では，ICl 分子の低励起状態，遷移双極子モーメントの計算に用いた線形応答理論，光解離生成物の角運動量分極が含む量子論的情報，非断熱遷移の半古典論のそれぞれを説明している．

第三章では，遷移双極子モーメントの計算値の定量性を検討するため，関連する Cl_2 分子について，異なるレベルの理論手法を用いて計算し比較検討を行っている．計算結果が一電子軌道に顕著に依存することを明らかにし，length-form の遷移双極子モーメントの有効性を示している．

第四章では，ICl 分子の第１吸収帯の光解離過程について議論している．解離生成物の角運動量分極，解離方向異方性，生成物分岐比を，波束伝搬法を用いて計算し，最近の実験結果と比較検討している．短波長領域においては 1(II)状態への光励起が支配的になるため，解離方向の異方性には垂直成分が強くなること，X(0^+)状態と 0^+(II)状態間の非断熱遷移が，あらわな回避交差を持たない状態間の非断熱遷移であること，そこでの非断熱遷移確率を計算するにはポテンシャルエネルギーの情報だけでは不十分であることなどを明らかにしている．

第五章では，ICl 分子の第２吸収帯の光解離過程について議論している．解離方向異方性と生成物分岐比について，波束伝搬法，半古典論，古典軌跡法の３種類の方法で計算し，最近の実験結果と比較検討している．0^+(III)状態と 0^+(IV)状態の間の量子干渉効果によって，I+Cl チャネルの平行成分が弱められることを見出し過去の実験・理論の間の矛盾を解決している．基底状態 X(0^+)からの２電子励起配置を主配置とする 0^+(IV)状態が，0^+(III)状態と同程度の光吸収強度を持つ機構について議論している．以上を踏まえ，一般的に同程度の吸収強度と励起エネルギーを持つ状態間で非断熱遷移が起きる場合には，量子干渉効果が無視できなくなることを明らかにし，その評価のためには電子波動関数の位相の情報を保持することの重要性を指摘している．

第六章では，本論文の総括を行い，量子干渉効果が影響しうる場合について議論している．

以上要するに，本論文の著者は，スピン軌道相互作用や非断熱遷移を含むために理論的な評価が困難である２原子分子の電子状態計算と動力学計算を第一原理的に行い，最近の ICl 分子に関する実験結果の詳細を明らかにしている．さらに，従来あまり考察されて来なかった，原子核の並進運動を表現するド・ブロイ波の間の量子干渉の重要性を明確にしている．本論文の対象は ICl という特定の２原子分子に限定されているが，その研究成果や著者が開発した解析手法は一般の分子系にも広く適用可能な概念を含み，今後この分野の研究に対して,重要な指針を与えるものとして，分子科学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(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4047号	氏　名	馬場　厚志

主 論 文 題 目 ：

モデルに基づくリチウムイオン二次電池の充電率推定に関する研究

本論文では，リチウムイオン二次電池を安全かつ高効率に使用するための，リチウムイオンの拡散現象を考慮したリチウムイオン二次電池モデルと UKF（Unscented Kalman Filter）を用いた電池の充電率（State Of Charge，SOC）と対数化したパラメータの同時推定法（対数化 UKF による SOC とパラメータの同時推定法）について述べる．

第 1 章では，本論文の目的について述べる．第 1 の目的はリチウムイオン二次電池の SOC をモデルに基づいて推定するためのリチウムイオンの拡散現象を考慮した電池モデルの提案である．第 2 の目的はリチウムイオン二次電池を安全かつ高効率に使用するための SOC や内部インピーダンスを非線形カルマンフィルタを用いて同時推定する手法の提案である．

第 2 章では，関連用語の定義と従来研究のサーベイを行い，本論文で提案する拡散現象を考慮したリチウムイオン二次電池モデルと対数化 UKF による SOC とパラメータの同時推定法の新規性を確認する．

第 3 章では，提案法の準備として，線形等価回路モデルと 2 段階の線形カルマンフィルタを用いたシリーズカルマンフィルタ法による SOC 推定について述べる．

第 4 章では，SOC の推定に用いる電池の等価回路モデルについて述べる．本論文で提案する拡散現象を考慮したリチウムイオンイオン電池モデルは，リチウムイオンの拡散現象を表すワールブルグインピーダンスを近似していることに特徴がある．この電池モデルは，物理的な意味付けがしやすく，推定すべき未知パラメータの数が少ないという利点がある．パラメータ感度解析を通じて，拡散現象を考慮したリチウムイオン二次電池モデルの有用性を示す．

第 5 章では，SOC と内部インピーダンスの同時推定法について述べる．本論文で提案する対数化 UKF による SOC とパラメータの同時推定法は，UKF を用いた状態とパラメータの同時推定問題において，未知パラメータを対数化して推定する点に特徴がある．この方法には，UKF の計算における数値的安定性が高まり，パラメータ推定値が必ず正になるという利点がある．また，実際の電池のパラメータ（内部抵抗）の分布に近くなるという効果もある．電気自動車を使った走行実験のデータを用いた様々なシミュレーションによって，対数化 UKF による SOC とパラメータの同時推定法の有用性が示された．

第 6 章では，本論文をまとめる．提案法を用いればリチウムイオン二次電池以外の電池にも適用可能であると考えられる．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4047 号	氏　名	馬場　厚志

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	工学博士	相吉　英太郎
		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）	滑川　徹

学士（工学），修士（工学）　馬場厚志君提出の学位請求論文は，「モデルに基づくリチウムイオン二次電池の充電率推定に関する研究」と題し全 6 章より構成されている。

この論文は，リチウムイオン二次電池を安全かつ高効率に使用することを目的とし，リチウムイオンの拡散現象などの物理化学法則を考慮した，測定データに基づくリチウム二次電池のモデリングと，非線形カルマンフィルタを用いた電池の充電率（State Of Charge: SOC）と電池の等価回路の回路パラメータの同時推定について述べたものである。本論文では，電気自動車用のリチウムイオン二次電池を主な研究対象としているが，この論文で提案する方法は，他の用途の二次電池に対しても適用することができる一般的なものである。

第 1 章では，リチウムイオン二次電池の充電率推定における本研究の立場を明確にし，本研究の目的である，提案するリチウムイオン二次電池のモデリングと，充電率と電池パラメータの同時推定法を示している。

第 2 章では，従来研究の詳細なサーベイを行っている。

第 3 章では，線形等価回路モデルと 2 段階の線形カルマンフィルタを用いたシリーズカルマンフィルタ法による充電率推定を提案している。

第 4 章では，充電率の推定に用いるリチウムイオン二次電池の等価回路モデルについて詳細に検討している。特に，本論文の特徴は，リチウムイオンの拡散現象を記述するワールブルグインピーダンスを近似している点にある。このようにして得られた等価回路モデルは，物理化学的な知見に基づいており，しかもモデルを構成するパラメータが少数個であるという特徴を持つ。本論文の成果の一つは，システム制御理論的に価値のあるリチウムイオン二次電池の等価回路を導いた点にある。このことにより，モデルの複雑さと取り扱いの容易さのトレードオフを図った高精度なモデルを得ることができた。

第 5 章では，充電率と等価回路のパラメータを，非線形カルマンフィルタを用いて同時に推定する方法を提案している。このとき利用できるものは，第 4 章で導出した等価回路モデルと，電気自動車が走行中のリチウムイオン二次電池の電流と電圧の測定値である。モデルに基づく状態推定法であるカルマンフィルタが成功するかどうかは，利用するモデルの品質に大きく依存する。本論文では，前章で取り扱いが比較的容易でかつ高精度なモデルを導出できたため，非線形カルマンフィルタの適用が実現できた。状態推定において，回路パラメータの特性の考慮と，フィルタ演算の数値的安定性を向上するため，対数化 UKF（Unscented Kalman Filter）を提案している。電気自動車を使った走行実験データにこの提案法を適用し，さまざまなシミュレーションによって有効性を示している。

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，物理化学的法則を考慮した比較的簡易なリチウム二次電池の等価回路モデルを提案したことと，このモデルに基づいて電池の充電率と回路モデルのパラメータを対数化 UKF 法という非線形カルマンフィルタによって推定する方法を提案したことである，この方法によって，リチウムイオン二次電池の充電池を高精度に推定することができ，今後，二次電池を用いるさまざまな分野における貢献が期待できる。

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4048号	氏　名	片岡　裕雄

主 論 文 題 目 ：

画像局所特徴量の性能改善と次元圧縮による人物検出とその応用

コンピュータビジョン分野において，物体を高精度に検出する局所特徴量は重要なテーマの一つとして挙げられる．現在，局所特徴量は主に人物や車両，顔等を検出するために用いられ，セキュリティカメラや車載映像解析などの分野における人物検出に適用されている．物体を検出する方法としては機械学習により識別器を生成する方法が適用されている.あらかじめ準備した対称物体の画像(正解画像)と背景画像(非正解画像)により識別器を生成して，物体を検出する．局所特徴量は，エッジやテクスチャなど画像中の局所的な情報に基づいて定義される特徴量で，統計的学習から特徴的な部位を捉える事が可能であるという性質を持ち，様々な局所特徴量が提案されてきた．その中でも代表的な手法として挙げられるのがエッジベースのHOG (Histograms of Oriented Gradients)であり，人物検出の研究が飛躍するきっかけとなった．その後もエッジベースの局所特徴量は改良を繰り返され，現在高精度な手法として知られるのが CoHOG(Co-occurrence HOG)である．CoHOG は 2 つの画素から取得するエッジの共起性を考慮することで過検出を減らし，精度を挙げている．しかしその一方で次元数が膨大になる等改善の余地が残っていると言える．本論文では，高精度な局所特徴量 CoHOG の改良方法を提案し，歩行者検出に役立てる方法について議論する．局所特徴量の蓄積方法については強度のペアをヒストグラムに累積し，主成分分析により次元圧縮を施す．実験では局所特徴量の設定について考察するだけでなく，関連手法との比較も行う．

第１章ではまず，コンピュータビジョン分野における人物検出の現状や問題点を挙げる．次に人物検出におけるサーベイ結果を記載し，最新の局所特徴量についても言及する．さらには本研究の位置付けを明確にし，研究目的とアプローチについて述べる．

第２章では, 主に改良型特徴量 ECoHOG(Extended CoHOG)を用いた人物検出について, 関連する局所特徴量である HOG や CoHOG からの改善について詳解する．

第３章では，局所特徴量を適用した人物検出に関しての実験を行う．改良した局所特徴量の有用性を検証するために一般的に配布されているデータセットだけでなく，実環境で撮影した映像データを用いた実験を行う．

第４章では，提案した局所特徴量の応用について述べる．サッカー映像解析や歩行者予防安全における人物検出だけでなく，人物行動理解においても改良した局所特徴量を適用し，精度向上を試みる．

第５章は，以上の研究成果をまとめるとともに，今後の研究課題や将来展望を述べる．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4048 号	氏　名	片岡　裕雄

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	青木　義満
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	池原　雅章
		慶應義塾大学教授	工学博士	岡田　英史
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	斎藤　英雄
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	満倉　靖恵

学士（工学），修士（工学）片岡裕雄君提出の学位請求論文は，「画像局所特徴量の性能改善と次元圧縮による人物検出とその応用」と題し，５章から構成されている．

画像認識分野において，セキュリティカメラや車載カメラにより取得された映像中から，人物を高精度に検出する技術開発は重要な課題であり，人物検出に有効な画像特徴量や識別器についての研究が盛んに行われている．人物検出に有効な画像特徴量としては，輪郭形状をエッジ特徴として捉える局所特徴量が主に用いられている．特に，人物検出のための代表的な局所特徴量であるCo-occurrence Histgrams of Oriented Gradients（CoHOG）は，エッジ方向の共起性を考慮することで高い検出性能を誇り，車載カメラによる歩行者検出などへと応用されている．しかし，背景や他の物体を過検出することが多く，特徴次元数も膨大になるため，更なる特徴記述能力の改善と効率的な特徴表現が必要とされている．本論文は，画像局所特徴量における特徴記述方法の改善と，次元圧縮による効率的な特徴表現の導入により，様々な場面においてロバストに画像中の人物検出を実現する手法を提案し，検証実験によりその有効性を示している．

第１章では，研究背景として，人物検出技術の現状と課題について述べている．特に，人物検出に有効な局所特徴量について，従来の研究動向を整理した上で，特徴量改善の必要性を述べ，本研究の位置付けと目的を明確に示している．

第２章では，提案手法について詳細に述べている．共起性を考慮した局所特徴量であるCoHOGでは，特徴取得窓内の中心画素と，ペアを作るための対象画素から取得するエッジ方向ペアのカウントにより，形状特徴を表現していた．一方，提案手法 Extended CoHOG（ECoHOG）では，エッジ方向に加え，エッジ強度をペアとして累積し，ヒストグラムを正規化することで，より人物らしい形状特徴を表現している．更に，得られた特徴量に対し，主成分分析を適用することにより，識別に有効な特徴を保持しながら次元圧縮する手法を提案している．

第３章では，提案手法の有効性を検証するため，実験を実施し，考察，評価を行っている．２つの一般的な歩行者映像データセットを対象に，提案手法であるECoHOGによる人物検出性能と次元圧縮の効果を検証している．その結果，CoHOGなどの従来手法と比較して，提案手法が最も高い検出性能を持つことを示している．また，実験を通して，適切なエッジ強度の累積方法や圧縮次元数の設定方法についても明らかにしている．

第４章では，提案手法を，様々なシーンにおける人物検出事例へと適用することで，その実用性を検証している．車載カメラ映像からの歩行者検出，スポーツ映像における選手検出，生活行動認識のための人物検出，といった異なるシーンにおける人物検出課題において提案手法を適用し，高精度な人物検出が実現可能であることを示している．

第５章では，論文全体の結論を述べるとともに，今後の課題と展望を示している．

以上要するに，本論文は，画像局所特徴量の性能改善と特徴次元の圧縮により，多様な映像中からの人物検出の高精度化，効率化が可能となることを理論的，実験的に示したもので，画像情報工学分野において工業上，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4049号	氏　名	三浦　奈々子

主 論 文 題 目 ：

物機能維持を目的とした地震応答制御の評価関数設計法

1995年の兵庫県南部地震以降，建物の免震化や制振装置の導入が進み，その効果による建物構造の被害低減について報告がなされている．しかし，建物構造の損傷を免れたとしても，主要な設備機器や非構造部材が損傷した場合，事業継続・生活継続の大きな支障となり，これらの耐震性能の評価・改善が極めて重要となる．

本論では地震を対象とした建物のアクティブ振動制御について，設備機器や非構造部材を含めた建物機能維持の観点からの評価関数設計法を提案することを目的とした．建物機能維持に関する評価項目として「被害低減・早期復旧・継続稼働」を設定し，これらの評価を「建物の機能維持率・振動応答の収束速度・単位エネルギーあたりの最大応答の低減率」により行った．これらの評価項目の達成度を向上させる評価関数の設計方法を提案し，制御性能を数値解析により検証した．

第1章では，本論文に関わる背景と目的を述べた．

第2章では，建物構造だけでなく主要設備機器等を含めた被害低減を行うために，まず，建物機能の構成要素を建物構造と主要設備機器等と考え，それぞれの被害発生確率とその影響度から計算される機能維持率を導入した．そして，建物構造と主要設備機器等の双方を考慮した見通しの良い制御設計を行うために，最適レギュレータにおける評価関数の複数の制御量項の構成法を提案した．制御量項における次元の取り扱いにより，次元の異なる複数の制御量が存在する場合においても応答低減の重要度を制御に反映させることを容易とした．数値解析により，機能維持率の向上を確認した．なお，ここで提案した制御量項の構成法を第3章，第4章でも用いた．

第3章では，振動によって停止した設備機器の早期復旧（例えばエレベータの地震時管制運転からの再稼働）のために振動応答の収束速度の向上を考え，後揺れ時に有効に装置能力を使用する手法として，制御目的をスケジューリングし，さらに制御力の推定から，最適レギュレータの制御ゲインを更新する可変ゲインフィードバック制御を提案した．制御力については，モーダルアナリシスを参考に，到達した地動加速度の区分波形を用いた推定式を立式した．数値解析により振動応答の収束性が向上することを確認した．

第4章では，制御システムにおいてエネルギーが不足することなく，継続的に制御を行うことができるように，単位エネルギーあたりの最大応答の低減効果の高いエネルギー最適制御を，建築分野の振動制御へ適用する場合，評価関数の構成要素として制御対象の散逸エネルギー，制御量および制御に必要なエネルギーを設定すればよいことを提示した．そしてエネルギー最適制御に基づく手法と同様に，最適レギュレータでエネルギーを評価関数内で陽に考慮した場合と消費エネルギーや応答低減効果に関する比較を行った．

第5章では，以上の内容をまとめ，本論文の結論を述べた．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4049 号	氏　名	三浦　奈々子

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	工学博士	大森　浩充
		慶應義塾大学教授	Ph.D.	三田　彰
		慶應義塾大学准教授	Ph.D.	小國　健二

学士（工学）・修士（工学）三浦　奈々子君提出の学位論文は「建物機能維持を目的とした地震応答制御の評価関数設計法」と題し、全 5 章から構成される。本論文は、地震を対象とした建物のアクティブ振動制御について、設備機器や非構造部材を含めた建物機能維持の観点からの評価関数設計法を提案することを目的としている。建物機能維持に関する評価項目として「被害低減・早期復旧・継続稼働」を設定し、これらの評価を「建物の機能維持率・振動応答の収束速度・単位エネルギーあたりの最大応答の低減率」により行っている。これらの評価項目の達成度を向上させる評価関数の設計方法を提案し、制御性能を数値解析により検証している。

第 1 章では、本論文に関わる背景と目的を述べている。

第 2 章では、建物構造だけでなく主要設備機器等を含めた被害低減を行うために、まず、建物機能の構成要素を建物構造と主要設備機器等と考え、それぞれの被害発生確率とその影響度から計算される機能維持率を導入している。そして、建物構造と主要設備機器等の双方を考慮した見通しの良い制御設計を行うために、最適レギュレータにおける評価関数の複数の制御量項の構成法を提案している。制御量項における次元の取り扱いにより、次元の異なる複数の制御量が存在する場合においても応答低減の重要度を制御に反映させることを容易としている。数値解析により、機能維持率の向上を確認している。なお、ここで提案した制御量項の構成法を第 3 章、第 4 章でも用いている。

第 3 章では、振動によって停止した設備機器の早期復旧（例えばエレベータの地震時管制運転からの再稼働）のために振動応答の収束速度の向上を考え、後揺れ時に有効に装置能力を使用する手法として、制御目的をスケジューリングし、さらに制御力の推定から、最適レギュレータの制御ゲインを更新する可変ゲインフィードバック制御を提案している。制御力については、モーダルアナリシスを参考に、到達した地動加速度の区分波形を用いた推定式を立式している。数値解析により振動応答の収束性が向上することを確認している。

第 4 章では、制御システムにおいて制振装置を駆動するためのエネルギーが不足することなく、継続的に制御を行うことができるように、単位エネルギーあたりの最大応答の低減効果の高いエネルギー最適制御を、建築分野の振動制御へ適用する方法を提示している。エネルギーの低減効果は、余震や継続時間の長い長周期地震動を受ける場合等、使用できるエネルギー量が限定される状況下で特に重要となる。数値シミュレーションにより制御に必要なエネルギーを評価関数内で陽に考慮することによるエネルギー効率の向上を確認している。エネルギーの時刻歴の評価より、エネルギー最適制御を用いることで初期駆動用のバッテリさえあれば、エネルギーを回生させることにより、セルフパワードで継続的にアクティブ制御を行えることを示している。そして、エネルギー最適制御に基づく手法と同様に、最適レギュレータでエネルギーを評価関数内で陽に考慮した場合について、制約を考慮した設計変数の調整が必要になることを示し、消費エネルギーや応答低減効果に関する比較を行っている。

第 5 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述べられている。

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4050号	氏　名	佐々木　雄希

主 論 文 題 目 ：

街頭犯罪および犯罪不安の地域環境要因に関する基礎的研究

2000年に警察庁が『安全・安心まちづくり推進要綱』を策定したことを契機に、わが国でも防犯が都市計画・建築計画上の解決すべき重要な課題のひとつと位置づけられ、防犯環境設計が推進されている。同要綱策定から10年以上が経過した現在、防犯まちづくりは着実に浸透してきている。しかし、わが国の防犯まちづくりは、海外諸国の防犯理論に依存して発展してきたことから憶測に基づく計画指針が多く、科学的根拠に基づく計画指針は少ないのが現状である。

そこで本研究は、郊外の市街地を対象とした街頭犯罪の犯罪分布と環境的要因の関係、および犯罪不安と環境的要因との関係を分析した。具体的には、まず、GISを用いた空間分析によって、過去5か年の間に認知された街頭犯罪発生箇所のホットスポットの時間的な変動があること、そして学校、駅などの施設からの距離と犯罪発生の関係について明らかにした。次に、街頭犯罪のなかでも防犯環境設計についての知見の少ない不審者事案に着目し、不審者事案発生箇所と未発生箇所、さらにそれらの場所の街路環境の調査を行い、数量化Ⅱ類分析によって、不審者事案は自販機のある場所や見通しが非常に悪い場所で発生しやすいなどの環境要因を明らかにした。また、犯罪の発生量を基準とした分析だけでなく、犯罪被害に遭うリスクに着目した分析を行った。街頭の通行量調査を実施し、Space Syntax による統合性や媒介性が高い街路では、ひったくりに遭うリスクが相対的に低い事を明らかにした。さらに、住民の犯罪不安と環境的要因との関係を明らかにするため、草加市の住民を対象としたアンケートによる意識調査を実施した。居住者の地域環境特性を組み合わせた共分散構造分析により、犯罪不安の程度や犯罪不安を喚起する要因は住環境によって異なることを明らかにした。さらに、地域防犯のために設置されている防犯看板の意義について考察した。既成市街地に設置されている防犯看板について住民にアンケート調査を実施し、防犯看板に肯定的な意見は、日常生活における地域防犯への関心によって形成されていることを明らかにした。それと同時に、印象に残りやすい防犯看板の特徴や設置方法を明らかにすることで、より良い防犯看板の在り方について考察した。

以上のように、本研究は、街頭犯罪の犯罪分布と環境的要因の関係について基礎的な分析を行った。街頭犯罪の犯罪分布と環境的要因の関係を明らかにするとともに、住民アンケートによる犯罪不安の地域環境要因の分析を通じて、犯罪抑止と不安軽減のための計画上の課題を明らかした。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4050 号	氏　名	佐々木　雄希

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	岸本 達也
	副査	慶應義塾大学教授	Ph.D.	三田　彰
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	伊香賀俊治
		建築研究所主任研究員・筑波大学准教授	博士（工学）	樋野 公宏

学士（工学）、修士（工学）佐々木雄希君提出の学位請求論文は、「街頭犯罪および犯罪不安の地域環境要因に関する基礎的研究」と題し、七章より構成される。

埼玉県草加市の郊外の市街地を対象とした街頭犯罪の犯罪分布の特徴、街路網、街路の形態、街路周辺の設置物などの地域環境的要因と犯罪発生の関係、犯罪不安と環境的要因との関係を分析し、犯罪抑止と不安軽減のための計画上の課題を明らかにしている。どのような街路環境で犯罪が発生しやすいか、不安を感じやすいか、詳細な調査と調査データの分析を通して、防犯に寄与する街路空間のデザイン、防犯対策の課題について提言をしている。

第一章では、研究の目的、背景を述べている。

第二章では、街頭犯罪の犯罪分布と環境的要因の関係について基礎的な分析を行っている。草加市の安全安心マップに記載されている犯罪発生分布も用いた GIS を用いた空間分析によって、街頭犯罪発生箇所のホットスポットの時間的な変動、学校、駅などの施設からの距離と犯罪発生の関係、道路ネットワークとの関係について明らかにしている。

第三章では、不審者事案に着目し、不審者事案発生箇所と未発生箇所、さらにそれらの場所の街路環境の調査を行っている。数量化Ⅱ類分析によって、不審者事案は自販機のある場所や見通しが非常に悪い場所で発生しやすいなどの環境要因を明らかにしている。

第四章では、犯罪被害に遭うリスクに着目した分析を行っている。街頭の通行量調査を実施し、通行量を考慮した犯罪にあいやすさのリスクを定量的に示すとともに、それと地域環境要因との関係を分析している。ひったくりに遭うリスクは、駅から少し離れた場所で相対的にリスクが高く、Space Syntax による統合性（Integration）や媒介性(Choice)が高い街路では相対的に低い事を明らかにしている。

第五章では、草加市の住民を対象としたアンケートによる意識調査を実施している。居住者の地域環境特性による分類と犯罪不安に関する共分散構造分析により、住環境による犯罪不安に影響を与える要因を分析している。犯罪不安は個人の健康状態や幸福感などの個人的要素よりも地域の犯罪発生情報や防犯活動への意欲が犯罪不安の増加に影響していること、犯罪不安の程度や犯罪不安を喚起する要因は住環境によって異なることを明らかにしている。

第六章では、地域防犯のために設置されている防犯看板の意義について考察している。既成市街地に設置されている防犯看板について住民にアンケート調査を実施し、防犯看板に肯定的な意見は、日常生活における地域防犯への関心によって形成されていることを明らかにした。それと同時に、印象に残りやすい防犯看板の特徴や設置方法を明らかにすることで、より良い防犯看板の在り方について考察している。

第七章は、本論文の結論であり、各章で得られた知見をまとめ、今後の防犯まちづくりに有益となり得る包括的な枠組みを提言している

以上、要するに、本論文は、街頭犯罪および犯罪不安に影響する地域環境要因を明らかにし、犯罪発生の抑制、不安の軽減、防犯対策の在り方について、詳細な地域分析を通してその課題を明確化にしたものであり、建築計画および都市計画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4051号	氏　名	新谷　俊通

主 論 文 題 目 ：

相変化材料を用いた多層超解像光ディスクと超格子相変化メモリの研究

情報大爆発時代である現代において、使用されるデジタルデータ量は年々、指数関数的に増大している。それに伴い、ストレージデバイスの格納データの大容量化、データ転送速度の高速化、及び低消費電力化の必要性が高まっている。

光ディスク技術では、書換型相変化光ディスク技術が確立され、DVD、ブルーレイディスクといった製品が出荷されたが、民生用途としての技術開発が一段落し、アーカイブシステム向けの技術確立の動きがある。しかしながら、光ディスクは他のストレージデバイスに比較して、記録容量と転送速度が不足している。

また、現在の不揮発性半導体メモリの主流であるフラッシュメモリは、他のデバイスに比べて圧倒的に消費電力が低いが、記録データの大容量化や書換回数などの信頼性が危ぶまれている。その状況下で、次世代新メモリ技術として相変化メモリが注目されているが、消費電力が高いことから、大容量化に対しての懸念がある。

本論文では、上記のような背景を受け、相変化光ディスクと相変化メモリのそれぞれについて検討した結果について議論する。光ディスク技術としては、大容量化と高速化の両方を解決することが期待できる。相変化材料を用いた多層超解像光ディスク方式を提案し、そのフィージビリティ検討結果について述べる。相変化メモリ技術としては、低消費電力を実現する超格子相変化材料の特性評価と低電力動作メカニズムについて検討した結果について述べる。

第 1 章では、相変化記録技術の基礎、特に相変化材料の物理と共に、本研究の背景と目的を述べる。

第 2 章では、光ディスク技術の基礎、及び本研究の位置付けについて述べる。

第 3 章では、超解像技術について記述する。最初に、従来の単層ディスク向けの超解像技術として、酸化コバルトを超解像材料として用いた場合の光学分解能向上効果について述べる。更に、この超解像技術を大容量化するための多層ディスクへの展開として、相変化ピットを用いた多層超解像方式を提案する。ここでは、相変化材料の結晶のみをエッチングできる相変化エッチング法と、その技術を用いた多層超解像技術の概念と設計指針について述べる。2 層ディスクにおいて超解像効果が得られることを実験的に示し、原理的には 700GB 以上の記録容量が可能であることを議論する。更に、この多層超解像方式により、従来の多層ディスクの課題が解決される可能性について議論する。

第 4 章では、相変化メモリの基礎について述べる。また、従来材料を用いた相変化メモリを定量的に解析し、大容量化の阻害要因となる熱ディスターバンスの問題について議論する。

第 5 章では、第 4 章で述べた問題を解決する超格子相変化材料について記述する。この材料の概念、及びその成膜方法、低電力動作の実証実験について述べる。更に、超格子相変化材料の動作メカニズムを解明するための電気及び光学実験を示し、その実験結果から導き出した、膜面に平行な電場が相転移を誘発する仮説について議論する。これらの結果から、超格子材料を用いた相変化メモリの今後の展望について議論する。

第 6 章では、本研究を総括し、相変化技術に関する今後の展望について議論する。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4051 号	氏　名	新谷　俊通

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	斎木 敏治
	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）	田口 良広
		慶應義塾大学准教授	博士（理学）	渡邉 紳一

学士（理学）、修士（工学）新谷俊通君提出の学位請求論文は「相変化材料を用いた多層超解像光ディスクと超格子相変化メモリの研究」と題し、6章から構成されている。

世界全体で生成されるデジタルデータ量は年々指数関数的に増大し、それにともない、ストレージデバイスの大容量化、高転送速度化、低消費電力化が強く求められている。光ディスクにおいては、相変化材料を媒体とした書き換え型ディスク技術が民生用途として確立しているが、ハードディスクなどのストレージデバイスと比較して、記録容量と転送速度が不足している。また、不揮発性メモリとしては、消費電力がきわめて低いフラッシュメモリが現在の主流であるが、大容量化や書き換え回数などの点で物理的限界を迎えつつある。その一方で、潜在的に大容量化が期待できる相変化メモリが注目されているが、大きな消費電力が大容量化の障害となることが指摘されている。

このような背景のもと、本論文は、相変化ストレージデバイスの大容量化を目指し、光ディスクに対しては、相変化材料の物性を活かした超解像記録とその多層化、不揮発性メモリに対しては、低電力化をもたらす超格子相変化メモリの特性評価と低電力動作メカニズムの解明を目的としている。

第1章は序論であり、相変化記録技術の基礎、特に相変化材料の物理について詳述しながら本研究の背景を説明し、最後に本論文の目的を述べている。

第2章では、本論文に関連する光ディスク技術について詳述している。

第3章では、光ディスクの多層超解像技術の提案、実証について述べている。最初に、従来の単層ディスクへの実装として、酸化コバルトを超解像材料として用いた場合の光学分解能向上について述べている。続いて、この超解像技術の多層化への展開として、相変化ピットを用いた多層超解像方式を提案している。ここでは、相変化材料の結晶部のみをエッチングする手法と、その技術を用いた多層超解像技術の概念と設計指針について述べている。2 層ディスクにおいて超解像効果が得られることを実験的に示し、さらなる多層化により原理的には 700GB 以上の記録容量が達成可能であることを示している。

第4章では、相変化メモリの基礎について述べている。また、従来材料を用いた相変化メモリに対して数値解析を行い、大容量化の阻害要因となる熱ディスターバンスの問題について議論している。

第5章では、不揮発性メモリの低電力化を目的とした超格子相変化メモリに対する、電気的・光学的特性評価と低電力動作のメカニズム解明について述べている。系統的な電気的特性評価により、低電力動作はジュール熱によるものではなく、電界に起因することをつきとめた。更に、超短光パルスによる光学測定を行い、電界と熱の効果を切り分けた議論を試みている。重要な知見として、膜面に平行な電界が、相変化を誘発する主たる要因であることを示唆する結果を得ている。

第6章は結論であり、本研究の成果を総括し、今後の展望について述べている。

以上要するに、本論文は相変化ストレージデバイスの大容量化に向け、新しい光ディスク記録機構の提案と実証、ならびに新しい記録材料を導入した相変化メモリの低電力特性評価とそのメカニズムの解明を行ったものであり、半導体工学、情報記録デバイス工学分野において工業上、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4052号	氏　名	齊藤　美都子

主 論 文 題 目 ：

多段積層メモリチップ間誘導結合インタフェース

近年の電子機器の発展に伴い、小型・大容量・低消費電力なソリッドステートドライブ（Solid State Drive、SSD）が求められている。従来、SSD は半導体メモリの微細化により、小型・大容量化を実現していた。しかし、微細化には限界があり、SSD の小型・大容量化のためには、集積された半導体メモリチップ数を増加しなければならないものの、その枚数は制限されている。従来技術では、メモリアクセスには有線であるボンディングワイヤを利用しており、メモリチップ数に比例してワイヤ数も増加する。配線できるワイヤ数には限界があるため、ワイヤ数を削減する技術が求められている。そこで本研究では、小型・大容量・低消費電力な SSD の開発を目指し、誘導結合通信を応用した無線方式のインタフェースの開発、電力削減技術の開発、面積削減技術の開発、以上の開発された技術を用いて、128 段メモリチップ積層用誘導結合インタフェースの開発を目的とした。

第 1 章では、本研究の背景と従来の研究を述べた。

第 2 章では、まず誘導結合インタフェースの基本となる誘導結合リピータを提案した。次にリピータを応用し、チップを中継しながらデータを伝送するリレー伝送について説明した。チップ積層時に垂直方向の送信器からのクロストークを削減するために、意図しない送受信器間にシールドを配置する方式と距離をあける 2 種類の方式を提案した。提案技術は 0.18 μm CMOS プロセスを用いた試作チップによる実測で動作を実証し、性能を評価した。

第 3 章では、電力削減技術である非同期パルス送受信器を提案した。送信データをパルス型に変換し、定常送信電流を削減した。提案技術は 0.18 μm CMOS プロセスを用いた試作チップで性能評価を行った。従来の送信器と比較すると、送信電力を転送速度 1.6 Gbps で 1/4 に、0.1 Mbps で 1/60 に削減した。

第 4 章では、面積削減のため、コイル配置技術を 2 つ提案した。1 つ目は、デジタル領域内でコイルを配線内に埋没させる方法、2 つ目はメモリコア上にコイルを配置する方法である。それぞれのデザインを説明した。0.18 μm CMOS で試作したテストチップによりそれらのデザインの正当性を実証した。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章で述べた技術を応用し、128 段積層用誘導結合インタフェースを提案した。まずメモリチップを 128 枚積層した時に課題となる消費電力の大きさについて説明した。次にその消費電力を削減する技術を 2 つ提案した。1 つ目は、通信距離を削減し、送信電力を削減する螺旋階段積層を提案した。2 つ目は、リレー伝送の回数を削減し、メモリアクセスに使用するリピータ数を削減することを提案した。提案技術は 0.18 μm CMOS プロセスを用いた試作チップで性能評価を行った。螺旋階段積層とリレー回数削減により消費電力を 1/6 に削減した。

第 6 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した。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4052 号	氏　名	齊藤　美都子

論文審査担当者：				
	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	黒田　忠広
	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）	石黒　仁揮
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	中野　誠彦

学士（工学），修士（工学）齊藤美都子君提出の学位請求論文は「多段積層メモリチップ間誘導結合インタフェース」と題し，6 章から構成されている．

ソリッド・ステート・ドライブ(SSD)は，半導体記憶装置を用いたデータ・ストレージである．従来の SSD では，8 個のメモリパッケージのそれぞれに 16 枚のフラッシュメモリチップが積層され，ボンディングワイヤで接続されていた．パッケージに実装できるメモリチップの枚数を増やすことができれば，SSD を更に小型化，低消費電力化できる．しかし，パッケージ内の限られた空間で配線出来るボンディングワイヤの本数には上限があり，16 枚以上のメモリチップを実装することは極めて困難であった．本論文は，チップのデータ転送に誘導結合通信を用いて 128 枚のメモリチップを 1 つのパッケージに積層実装するための基本技術を示したものであり，携帯情報端末の小型化，低消費電力化に大きく貢献するものである．

第 1 章は序論であり，本研究の背景と目的について概説している．

第 2 章では，送信元チップから送信先チップまでデータをリピート転送するインタフェース技術を提案している．誘導結合の磁場はコイルの上下に対称に発生するので，同一チップを積層したときにデータ転送の方向を定めることができない．この課題を，3 組のコイルを用いて転送チャネルが上下に隣接しないように配置することにより，解決している．試作したチップの評価により，1.6 Gb/s の転送速度において，ビット誤り率が 10^{-12} 以下の高い信頼性を確認している．

第 3 章では，転送速度が遅いフラッシュメモリ用に通信電力を低減するためのパルス通信技術を提案している．磁界を駆動する送信電流をパルスにすることで直流電流が流れない工夫をしている．提案する送受信器を試作し，転送速度 1.5 Gb/s において通信電力を従来の 1/4 に低減でき，転送速度 0.1 Mb/s においては通信電力を 1/60 に低減できることを実証している．

第 4 章では，コイルによるチップ面積の増大を抑える 2 つの工夫を提案している．第一は，コイルをデジタル回路の配線と同様に多層配線で巻くことにより，デジタル配線の中に埋め込む方法である．デジタル配線から受けるノイズの影響を詳細に評価し，ノイズ耐性を高める工夫を考案している．第二は，コイルをメモリのセル領域上に配置する方法である．離れたところにある送受信器と接続するための接続線が通信にどのような影響を与えるかを調べ，所望の通信品質を得るための設計基準を導いている．いずれの方法もチップを試作して検証している．

第 5 章では，第 2 章から第 4 章で述べた技術を用いて 128 枚のメモリチップを積層したときの設計を論じている．コイルを大きくすれば通信距離が長くなりリピート転送回数が減るが，1 回の転送に必要な電力は増大する．コイルの大きさとリピート転送回数を最適にして通信電力を最小にする設計手法をまとめている．さらに試作したチップを 128 枚積層して通信実験に成功している．開発した技術を用いた場合，SSD の容積を従来の 1/80 に低減でき，データ転送速度 2.0 Gb/s における消費電力を従来の 1/6 に低減でき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，本研究によって得られた成果を要約している．

以上要するに，本研究は，誘導結合通信を用いて SSD を小型化，低消費電力化する技術を提案し，実証したものであり，集積回路工学分野において工業上，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.4053	Name	Zhang, Hao

Thesis Title

A Study on Power Saving and Latency Reduction Methods for Wireless 3D Network on Chips

By the development of semiconductor technology, we can combine various IP cores such as processors, caches, and I/O modules on a chip. To connect a large number of cores, Network-on-Chip (NoC) that introduces a packet switched network has been widely studied. NoCs have been utilized in cost-effective embedded devices. Such applications often demand very tight design constraints in terms of cost and performance; thus the silicon budget available for their on-chip network should be modest.

Due to the increasing design cost of custom System-on-Chips (SoCs) in recent process technologies, System-in-Packages (SiPs) or 3D ICs that can select and stack necessary known-good-dies in response to given application requirements have become one of hopeful design choices. The three-dimensional Network-on-Chip (3D NoC) also becomes an emerging research topic. The 3D NoC architecture has been extensively studied in terms of its network topology, router architecture, and routing strategy.

We pay more attention to inductive coupling among variety 3D interconnection technology, because we believe it provides the flexibility to build the target 3D ICs by adding, removing, and swapping chips in a package after the chips have been fabricated, like building blocks.

However, two issues emerge: considerable huge power consumption and routing scheme for topology-agnostic characteristic. Only a few inductors can be embedded on the chip, because the total power consumption will be unacceptable. This issue effects the scale of wireless 3D NoC. For the routing scheme, the previous works never involve this issue for inductive coupling based wireless 3D NoC. The above problems must be solved, otherwise the inductive coupling based wireless 3D NoC will not be competitive.

For the above aim, this thesis explores an effective low power technology for ring and irregular based networks, respectively. The vertical links can be dynamically shut down according to the run-time vertical link utilization. Two suitable routing schemes for topology-agnostic wireless 3D NoC are also proposed that enable the chip could be replaced or removed after fabrication. The first one collects topology information at the chip boot stage. The topology will be considered as irregular topology. The Up*/Down* routing is used for transferring packets; Then second one identifies mesh topology from the whole network which is considered as irregular topology by the first routing scheme, automatically. It uses dimension ordered routing in the extracted mesh structure as far as possible. Other parts of the network is treated as an irregular network and Up*/Down* routing is applied. These above technologies can enhance the competence of inductive coupling based wireless 3D NoC.

Finally, we summarize our proposed methods, utilizing the on/off vertical link technique for saving power and employing improved Up*/Down* routing and mixed routing as routing scheme. Based on the above, we discuss how the current work could be explored further in order to develop power efficient wireless 3D NoC.

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4053 号	氏　名	Zhang, Hao

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
		慶應義塾大学教授	博士(工学)	黒田忠広
		慶應義塾大学専任講師	博士(工学)	松谷宏紀

学士(工学)、修士（工学)、Zang, Hao（張 浩）君の学位請求論文は「A Study on Power Saving and Latency Reduction Methods for Wireless 3D Network on Chips（ワイヤレス３Ｄネットワークオンチップのための省電力、低遅延転送手法の研究）と題し、七章から成る。

誘導結合を用いたワイヤレス三次元 NoC(Network-on-Chip)は、様々な種類のチップを柔軟に接続する手法として近年注目されている。しかし、この手法は、チップ間接続リンクの消費電力が、TSV(Through Silicon Via)など他の三次元接続手法に比べて大きくなり易い点が問題となっていた。本論文では、ランタイムにリンクの ON/OFF を制御する手法の導入と、ルーティング手法の改良により、三次元 NoC の電力効率を改善を試みる。

まず第一章で、背景と論文の目的を述べ、続く第二章では NoC と従来の消費電力削減手法をサーベイする。第三章では、ワイヤレス三次元 NoC を紹介し、消費電力の増大が問題である点を指摘している。

第四章以降が本論文の主題である。まずチップ間接続リンクのドライバとレシーバをランタイムに ON/OFF する手法を提案し、部分的に OFF する方法、全てのリンクを OFF する方法およびその組み合わせをリング状の NoC に適用し、アプリケーション動作時に約 25%の消費電力を削減した。リング状のネットワークは、単純だが性能が低く、接続可能なチップ数も限定される。そこで第五章では、任意の形状の NoC に対するリンクの ON/OFF 手法を提案している。任意形状のネットワークは、通常リングネットワークに比べてリンク数が多いため、積極的に使っていないリンクを OFF し、迂回経路によりウェイクアップする手法を用いている。この結果、アプリケーション実行時にわずか 1.4%の性能低下で約 50%の消費電力の削減に成功している。

次に第六章では、任意形状の三次元 NoC 上で、パケット転送の経路決定手法（ルーチング）を工夫することにより、転送性能と消費電力を削減する方法を提案している。複数チップを接続する場合、全体の NoC は接続されるチップによって任意の形状になり得るが、実際には多くのチップはメッシュなどの規則的な接続方法を使っている。そこで、チップが接続された後に、メッシュ構造を抽出して、その部分にのみ規則性を生かしたルーチングを適用する手法を提案した。この提案手法により、全体を任意形状と考えた場合に対して約 12%の性能向上、約 13%の消費電力の削減を実現した。第七章には結論と今後の課題をまとめている。

以上、本論文は、ランタイムにリンクを ON/OFF する手法とルーチングを改良する手法により、ワイヤレス三次元 NoC の電力効率の改善を達成した点で、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4054号	氏　名	安藤　真太朗

主 論 文 題 目 ：

住まい・コミュニティにおける健康決定要因の因果構造分析

国民の健康長寿の実現のためには、個々人の健康に対する努力すなわちヘルスプロモーション（一次予防）を支援すると共に、参加活動意欲を促進する環境づくり（ゼロ次予防）が解決策として求められる。そこで、本研究では居住環境を包括的に評価し、因果推論に則った上での住まい・コミュニティの健康決定要因を明らかにし、適切な評価指針や提言に資することを目的とする。

第1章では、序論として本研究の背景と目的について記した。

第2章では、住まい・コミュニティにおける健康決定要因を探るにあたり、居住環境と健康に纏わる既往研究についてまとめる。住まいとコミュニティが健康に及ぼす影響とその機序の知見について述べ、これから明らかにしようとする因果関係の整合性について整理した。

第3章では、因果推論について触れ、公衆衛生的理論に基いて住まいとコミュニティにおける健康決定要因を明らかにするための方法論について述べた。

第4章では、有識者との協議やエキスパートジャッジを経て体系化した調査票を用いて、福岡県北九州市において断面調査を実施し、住まいとコミュニティ、そして居住者の実態を把握した。その結果を基に共分散構造分析を実施し、住まいとコミュニティと健康の3要素の複層的な関係性を“住宅・地域環境の健康形成要因構造モデル”を明示した。このモデルによって、住まい・コミュニティと健康の間の階層構造と健康への寄与率が22%であることを明らかにし、因果条件の「整合性」「妥当性」を確認した。

第5章では、第4章で明らかとなった健康形成要因モデルが、他の母集団においても一貫して認められるか分析を行い、因果推論における「因果の普遍性」について検証した。北九州市の他、高知県梼原町と長野県小布施町のデータを用いて、健康形成要因モデルを構築し、その同意性や異質性について考察を行った。

第6章では、第4章の回答者に対して実施した追跡調査に基づいて、因果推論における「因果の時間的先行性」について検証した。住環境と健康状態のそれぞれについて、どちらが原因でどちらが結果であるかを因果効果モデルによって推論を行い、「社会支援環境」が「精神的健康」に因果効果を及ぼすことが示唆された。

続いて、第7章では、WEB調査とフィールド調査の双方の活用によって、関係性に客観性を有するかを検証した。日本全国の回答や数多くの要素を考慮した上でも、住まい・コミュニティの質の向上に応じて、居住者の健康状態が良化に向かうことが示唆された。尚、この結果についてはWEB調査だけでなく、活動量計の測定データを活用したフィールド調査においても確認され、因果条件における「非介在性」「強固性」が明らかとなった。

以上によって、住まい・コミュニティにおける健康決定要因の因果構造に関する成果をまとめた。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4054 号	氏　名	安藤　真太朗

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	伊香賀俊治
	副査	慶應義塾大学教授	学術博士	栗田　治
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	岸本　達也
		首都大学東京大学院教授	医学博士	星　旦二
		北九州市立大学教授	博士（工学）	白石靖幸

学士(工学)、修士(工学)、安藤真太朗君提出の学位請求論文は「住まい・コミュニティにおける健康決定要因の因果構造分析」と題し、8 章からなっている。

国民の健康長寿の実現のためには、個々人の健康に対する努力すなわちヘルスプロモーション（一次予防）を支援すると共に、参加活動意欲を促進する環境づくり（ゼロ次予防）が解決策として求められる。そのような背景から、本研究は、居住環境を包括的に評価し、因果推論に則った上での住まい・コミュニティの健康決定要因を明らかにし、適切な評価指針や提言に資することを目的としたものである。

第 1 章では、序論として本研究の背景と目的について記している。

第 2 章では、住まい・コミュニティにおける健康決定要因を探るにあたり、居住環境と健康に纏わる既往研究についてまとめる。住まいとコミュニティが健康に及ぼす影響とその機序の知見について述べ、これから明らかにしようとする因果関係の整合性について整理している。

第 3 章では、因果推論について触れ、公衆衛生的理論に基いて住まいとコミュニティにおける健康決定要因を明らかにするための方法論について述べている。

第 4 章では、有識者との協議やエキスパートジャッジを経て体系化した調査票を用いて、福岡県北九州市において断面調査を実施し、住まいとコミュニティ、そして居住者の実態を把握した。その結果を基に共分散構造分析を実施し、住まいとコミュニティと健康の 3 要素の複層的な関係性を“住宅・地域環境の健康形成要因構造モデル”を明示している。このモデルによって、住まい・コミュニティと健康の間の階層構造と健康への寄与率が 22%であることを明らかにし、因果条件の「整合性」「妥当性」を確認している。

第 5 章では、第 4 章で明らかとなった健康形成要因モデルが、他の母集団においても一貫して認められるか分析を行い、因果推論における「因果の普遍性」について検証している。北九州市の他、高知県梼原町と長野県小布施町のデータを用いて、健康形成要因モデルを構築し、その同意性や異質性について考察を行っている。

第 6 章では、第 4 章の回答者に対して実施した追跡調査に基づいて、因果推論における「因果の時間的先行性」について検証している。住環境と健康状態のそれぞれについて、どちらが原因でどちらが結果であるかを因果効果モデルによって推論を行い、「社会支援環境」が「精神的健康」に因果効果を及ぼすことを示唆している。

続いて、第 7 章では、WEB 調査とフィールド調査の双方の活用によって、関係性に客観性を有するかを検証している。日本全国の回答や数多くの要素を考慮した上でも、住まい・コミュニティの質の向上に応じて、居住者の健康状態が良化に向かうことを示唆している。尚、この結果については WEB 調査だけでなく、活動量計の測定データを活用したフィールド調査においても確認し、因果条件における「非介在性」「強固性」を明らかにしている。

最後の第 8 章では、各章の結論を総括し、住まい・コミュニティにおける健康決定要因の因果構造に関する成果をまとめるとともに今後の課題を明らかにしたものであり、工学的に寄与するところが大きい。

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4055号	氏　名	菊田　洸

主 論 文 題 目 ：

インターネットにおける規模拡張性に優れた
ネットワークトラヒック制御技術に関する研究

インターネットを始めとするコンピュータネットワーク技術は飛躍的に成長し，光アクセス網をはじめとするアクセスネットワーク技術の発達により，各ユーザーとネットワークは高速な通信回線で接続された．しかしコアネットワークにおけるトラヒック制御技術は不十分であり，ベストエフォートと呼ばれる通信方式のもと，トラヒックの輻輳による不規則な遅延，予測不可能なパケット損失などの通信効率の劣化が発生する．これらの通信品質を改善し，効率的な通信を実現するための技術として，トラヒックの経路を自由に制御するトラヒックエンジニアリングが求められている．しかしながら，インターネットのような大規模ネットワーク上でトラヒックエンジニアリングを行うには，ネットワークの規模やサービスに対する規模拡張性において課題を抱える．本論文ではこれらの課題に対して提案を行い，次世代ネットワーク技術へと貢献する．

第１章ではインターネットにおける特徴や問題点，そしてトラヒックエンジニアリングの必要性について述べる．第２章ではこのトラヒックエンジニアリングの実現に関係する既存の通信技術と課題を明確化し，それらの課題に対する関連研究と，第３章から第６章までに展開される各研究との位置づけについて説明を行う．第３章ではIPネットワークにおける経路最適化の規模拡張性における課題として，リンク距離の最適化計算を扱う．この最適化計算はネットワークサイズと共に莫大な計算量を要することが知られている．提案方式では並列プロセッサーによりその問題を解決すべく，データ依存性に起因する並列処理のボトルネックを解消し計算の高速化を実現する．第４章では，次世代のネットワーク制御技術であるGMPLS(Generalized Multi-Protocol Label Switching)の制御システムの規模拡張性における課題として，トラヒック制御の要素となる遅延や消費電力といったメトリック情報の多様化について扱う．様々なメトリックのサポートは頻繁なメトリック更新による多量の制御メッセージを発生させ，ネットワークリソースを逼迫する．そこで，提案方式ではメトリック情報を交換する代わりに，フラッディングに基づくシグナリングにより最短経路を選択しながらパスを確立する．これによりメトリックの更新頻度に対しメッセージ数の増加を防ぐことが可能となる事を示す．第５章では下位レイヤー技術に関連した識別子空間の規模拡張性における課題を扱う．LAN技術であるイーサネットを用いた広域ネットワークは現在注目を浴びているが，大規模ネットワークを実現するための複数ドメイン間での識別子の衝突が課題である．そこで提案方式ではGMPLSにより識別子を入れ換える方式を提案し，実際のプロトタイプネットワークを構築し動作を検証する．第６章ではこのイーサネットによる広域ネットワークにおいて，多点間を接続する通信の規模拡張性について扱う．提案方式では，GMPLSにおいて多点間を接続するパスを確立するための２つの制御モデルを想定し，プロトタイプネットワークを構築して動作を検証する．最後に，第７章にて本論文の結論を述べる．

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4055 号	氏　名	菊田　洸

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	工学博士	山中 直明
	副査	慶應義塾大学教授	工学博士	笹瀬 巌
		慶應義塾大学教授	工学博士	天野 英晴
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	津田 裕之

学士(工学), 修士（工学）菊田洸君の学位請求論文は,「インターネットにおける規模拡張性に優れたネットワークトラヒック制御技術に関する研究」と題し，全７章から構成される．

インターネットの成熟と発展に伴い，トラヒックの輻輳によるパケットロスの発生のみではなく，新しい数々のサービスの出現と異なる品質への要求，ネットワークの消費電力の拡大等が大きな問題となっており，効率よくネットワークを使用するトラヒックの制御技術（トラヒックエンジニアリング）が極めて重要な技術課題となっている．これらの要求を満たすためには，最適経路計算の導出に必要な複数で複雑な品質メトリックの高速計算，またそのメトリックのルータ間で相互にやりとりする情報交換トラヒックの削減の必要性，大規模ネットワーク実現のために、複数のドメインに分割し，ドメイン間に跨ったトラヒック制御を可能とする識別子の拡張，及びマルチキャスト通信時での一斉配信トラヒックの削減等の課題解決が必要である．

まず，第１章は序論であり，本研究の目的，概要，位置づけを端的に説明している．

第２章では，ネットワークのトラヒック制御を実現する上での課題を明確化し，その課題に対する関連研究と，本研究との位置づけについて説明している．

第３章から第６章にかけて，具体的な研究内容について述べており，第３章では，OSPF(Open Shortest Path First)で最適経路計算に使用する。遅延や電力量と言った複数存在するメトリックの高速計算法について，マルチコア CPU に適したデータ配置を含む並列計算アルゴリズムを提案し，提案アルゴリズムによりメトリック計算時間が大幅に短縮でき，サービスに対するスケーラビリティを確保できることを示している．

第４章では，ルータ間で相互にやりとりするメトリック情報交換により発生するトラヒックのネットワークへの影響の極小化に向け，ルーチングプロトコルによるメトリックの交換，更新の代わりに，経路の導出とパス確立を同時に実現するシグナリング信号のフラッディングに基づいた経路確立手法 FB-RSVP-TE(Flooding Based - Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering)を提案し，提案方式によりメトリック情報交換のトラヒック量の削減が図れ，ネットワークサイズの規模拡張が実現できることを示している．

第５章では，大規模ネットワークではドメインを複数に分け，ドメイン間に跨ったトラヒック制御を実現するための信号の識別子の適用範囲拡大が必要であり，ドメイン境界ノードで識別子のスワップをするシグナリング機能の拡張法について提案し，ドメイン間での識別子空間の独立化が実現できることを示している．

第６章では，経済的にも優れる広域イーサネットにおける効率的なマルチキャストサービスを実現するために，RSVP-TE プロトコルを拡張し，プロトタイプシステムを構築して実装評価し，ドメインを超えたマルチキャスト一斉配信の規模拡張が実現できることを示している．

第７章は，結論であり，本研究で得られた結果を総括している．

以上要するに本論文は，将来のインターネットにおけるスケーラビリティに優れたトラヒック制御技術の確立のために，最適経路高速計算法，大規模パス確立を可能とした経路確立手法，ドメイン間に跨ったトラヒック制御技術，ドメインを超えたマルチキャスト一斉配信の規模拡張法について提示しており，次世代のインターネットを実現する上で，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4056号	氏　名	野村　次郎

主 論 文 題 目 ：

Arithmetic of non-abelian Galois extensions

(非アーベルガロワ拡大の数論)

整数論における最も重要な研究テーマの１つは、代数的対象と L-関数の特殊値との関係の研究である。　このテーマに関連して、Brumer 予想と Brumer-Stark 予想が長年にわたり研究されてきた。代数体の有限次アーベル拡大に対して「Stickelberger 元」をそのガロワ群上の群環の中に定義することができる。この２つの予想はその Stickelberger 元がイデアル類群を消すということを予想している。 Stickelberger 元は代数体の拡大に付随する Artin L-関数の特殊値を用いて定義されているので、これらの予想は、イデアル類群のガロワ加群としての構造と L- 関数の特殊値との関係を予想している。 つい最近、Andreas Nickel によって非可換拡大に対する２つの予想の一般化が定式化された。　Nickel 本人によっていくつかの結果も得られている。

本論文の１つ目の目的は、Nickel の予想とアーベル拡大に対する予想との関係を調べることである。主結果の一つとして、非可換拡大に対する「弱い形」の Nickel の予想がそのアーベル拡大に対する予想に帰着できることを証明する。その結果の応用として、ガロワ群が位数 $4p$ (p は奇素数) の二面体群の場合、位数 2^{n+2} (n は自然数) の一般四元数群の場合そして四次交代群と位数２の巡回群との直積である場合に、Nickel の予想が正しいことを証明する。また、Nickel の予想の数値計算例も与える。この数値計算例は Nickel の予想を理解するのに非常に有用なものである。

代数体上定義されたアーベル多様体とそれに付随する Hasse-Weil L-関数に対して、Nickel の予想の類似の問題を考える。すると、 Nickel の予想と同様に、非可換拡大に対する問いをアーベル拡大の問に帰着することができる。結果として、ガロワ群が位数 $4p$ (p は奇素数) の二面体群の場合に、Birch and Swinnerton-Dyer 予想 (と技術的な仮定) のもと、この問が肯定的に解けることを証明する。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4056 号	氏　名	野村　次郎

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学）	栗原　将人
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士	前田　吉昭
		慶應義塾大学准教授	博士（理学）	坂内　健一
		慶應義塾大学専任講師	博士（理学）	田中　孝明

学士(理学)、修士(理学) 野村次郎君提出の学位請求論文は、「Arithmetic of non-abelian Galois extensions (非可換ガロワ拡大の数論)」と題し、全 5 章からなる。

Gauss, Kummer, Stickelberger らにより 19 世紀に作られた円分体の整数論における重要な成果の一つとして Stickelberger の定理というものがある。これは、Stickelberger 元がイデアル類群を消す、というもので、この Stickelberger 元はゼータ関数から作られる元であることが今ではわかっている。この定理を総実代数体上の CM 拡大に一般化する試みが今までいろいろとなされてきたが、考える対象は常に Abel 拡大であった。しかし数年ほど前から、非 Abel な拡大、すなわち非可換な Galois 群を持つ拡大に対しても、この現象を一般化する理論が作られ始めてきている。特に、非可換拡大に対しても、Stickelberger 元を修正したものがイデアル類群を消す、という予想が作られている。野村次郎君による本論文は、いくつかの場合にこの予想を証明したものである。

第 1 章は序論であり、19 世紀の Dirichlet の類数公式以来、ゼータ値と数論的対象物についてどのような関係が知られているかを述べ、最近のドイツの A. Nickel による非可換理論、特に非可換 Brumer 予想、非可換 Brumer-Stark 予想について説明している。第 2 章で非可換な群環についての準備をした後、第 3 章では、イデアル類群、Selmer 群のような数論的対象物を非可換な Galois 群が作用する加群と考えたとき、どのような群環の元がそのような数論的対象物を消すことができるか、についての一般論を述べている。第 4 章では非可換 Galois 群が作用するイデアル類群についての Nickel の予想と、その中間の拡大体の通常の Brumer-Stark 予想との間の関係を調べている。このことを使って、Galois 群が 2 面体群のとき、4 元数群のとき、4 次交代群と 2 次巡回群の直積のときに Nickel の予想を解決している。第 5 章では、Abel 多様体の Selmer 群に対して、Birch Swinnerton-Dyer 予想を始めとするいくつかの予想を仮定した上で、Galois 群が 2 面体群のときに、L 関数の値から作られる群環の元が Selmer 群を消す、ということを証明している。

非可換拡大に対する Nickel の予想は、今まで非可換岩澤主予想を経由する方法でしか証明されていなかった。したがって、岩澤理論がうまくいく仮定である $\mu=0$、および素数 p に対する p 成分を考えるときに p が奇素数であるなどの仮定が必要であった。しかし、本論文における野村君の結果は、岩澤理論は使わず、したがって無限次拡大は用いず、類数公式を中心とする有限次拡大の議論のみを用いるものである。このことにより、Nickel の予想を p=2 の場合もこめて初めて証明することに成功した。また、$\mu=0$ などの岩澤理論的仮定が必要ない定理が得られた。さらに、予想に現れる素点の有限集合 S は分岐素数を必ず含むと Nickel は仮定しているのだが、本論文の結果は、必ずしもこの条件がなくてもイデアル類群を消すという性質が得られることを示している。また具体的に、位数 12 の 2 面体群を Galois 群に持つ代数体の拡大のイデアル類群の Galois 加群の様子をたくさんの具体例に対して調べ、イデアル類群を消す、というこの現象をわかりやすく説明している。以上の結果は、非常に興味深いものであり、国際的に注目されている。特に、この非可換理論の創始者である A. Nickel は本論文の結果を高く評価している。

以上のように、本論文において著者は、今まで知られていなかったいくつもの場合に、A. Nickel による非可換 Brumer-Stark 予想が成立することを、今までとは全く違う方法で証明し、国際的に注目される結果を得ている。これらの結果は、この新しい非可換理論の発展に大きく寄与する結果であると言える。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る。

内容の要旨

報告番号	甲　第4057号	氏　名	柴田　崇統

主 論 文 題 目 ：

水素負イオン源におけるプラズマの輸送過程と空間的非一様性に関する研究

核融合プラズマ加熱など広い応用範囲を有する大型水素負イオン源では，負イオンビームの空間的非一様性が問題となっている．しかし，非一様性の改善に向けた従来の数値モデリングでは，定量的な実験再現性を有する解析結果は得られておらず，ビームの非一様性は十分に理解されていない．この原因として，従来の研究では負イオン源プラズマ中の高速電子のエネルギー緩和過程，及びその影響を負イオンの親粒子である水素原子の輸送過程に考慮していなかった点が挙げられる．そこで，本研究では，（1）これらの効果を模した新しい負イオン源内のプラズマ解析モデルを構築し，負イオン源内における非一様性発現機構を解明する．また（2）解析結果と実験結果との比較を行い，負イオン源設計に応用可能な，実験再現性を有するプラズマ解析モデルの構築を目指す．

第1章では，本研究の目的と意義を述べた．

第2章では，本研究で用いた運動論的な3次元電子輸送解析モデルについて述べた．本モデルでは，負イオン源内の3次元実磁場配位中における電子輸送過程及び詳細な衝突過程を考慮している．これにより，高速電子の実空間における輸送過程及びエネルギー緩和過程を正確に計算することに成功した．解析結果は，日本原子力研究開発機構の10アンペア負イオン源（以下，10A負イオン源）におけるプローブ計測結果と良く一致した．アーク放電用フィラメントから生成され，シース電場によって加速された高速電子は磁気ドリフトによりチャンバー上部へと輸送される．その後，電子・電子間クーロン衝突，及び電子・原子・分子間の非弾性衝突による高速電子のエネルギー緩和が起こる．その結果，負イオン源上部領域におけるEEDFは，熱化された低エネルギー電子（熱電子）成分と高速電子によるテール成分の2成分を持つことが明らかになった．一方，下部領域では磁気ドリフトの影響が比較的小さい熱電子成分のみが形成される．

第3章では，第2章で得られたEEDFの熱電子・高速電子成分が，水素分子の解離による原子（H^0）生成レートに及ぼす影響について議論した．EEDFの各成分によるH^0生成レートは同程度の値を持つ．しかし，高速電子成分は負イオン源上部にのみ存在する．このため，負イオンの親粒子である原子が，負イオン源内で強い非一様性を示すことを明らかにした．さらに，10A負イオン源実機において分光計測から得られたH_α線発光強度分布と，解析によるH^0生成分布との比較から，原子生成レートの空間分布に対しEEDFの高速電子成分が強く影響することが示された．

第4章では，空間的非一様性を示す原子生成過程に加え，輸送過程・消滅過程による一様化の影響をも考慮した原子輸送解析モデルを構築した．このモデルでは，分子解離による原子生成，輸送による原子輸送による壁損失，さらに電離による消滅過程を同時に計算する．また，分光計測から得られるH_α線強度分布と比較するため，輸送解析結果から励起原子密度を計算することができる衝突輻射モデルを構築した．輸送解析結果から，原子の輸送と消滅過程による一様化の効果は小さく，H^0生成分布の強い空間的非一様性により，H^0密度分布にも非一様性が現れることが示された．さらに，負イオン源内のH_α線発光強度分布に関する解析結果は分光計測結果と良い一致を示した．このことから，本研究で構築した解析モデルが定量的な実験再現性を有することが示された．

第5章は，本論文の成果についてまとめた．　以上

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4057 号	氏　名	柴田　崇統

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
		慶應義塾大学教授	理学博士	佐々田　博之
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	中野　誠彦

学士（理学）、修士（工学）柴田崇統君提出の博士学位請求論文は「水素負イオン源におけるプラズマの輸送過程と空間的非一様性に関する研究」と題し、全 5 章から構成されている。

水素負イオン源は、核融合プラズマ加熱、陽子加速器、微細加工などにおける負イオンビーム源として、現在、幅広く用いられている。しかしながら、最近、その大型化に伴い、イオン源から引き出される負イオンビームの空間的非一様性が問題となっている。このため、非一様性の理解・改善に向けた数値モデリングが現在まで精力的に行われてきた。しかし、現状では実験結果を十分に再現する解析結果を得ることは困難であり、ビーム非一様性発現機構の完全な理解には至っていない。その理由として、従来のモデリングでは、負イオン源プラズマ中の高速電子のエネルギー緩和過程及び負イオンの親粒子である水素原子の生成過程及び輸送過程への高速電子の影響が考慮されていなかったことが挙げられる。以上を踏まえ、本研究では、これらの過程を考慮した新しい負イオン源プラズマ輸送解析モデルを提案し、実験との比較により上述の非一様性発現機構の解明を行うことを目的としている。

第 1 章では、本研究の目的と意義を述べている。

第 2 章では、本研究で用いた電子輸送解析モデルとその解析結果について述べている。本モデルでは、負イオン源内マルチカスプ磁場配位中の 3 次元電子軌道を運動方程式により追跡する。衝突過程は、モンテカルロ法により模擬している。電子衝突による分子解離過程などの非弾性衝突過程に加えて、電子-電子間のクーロン衝突過程を考慮している点が大きな特徴になっている。本モデルを日本原子力研究開発機構の大型アーク放電型負イオン源の解析に適用している。その結果、アーク放電用フィラメントから生成され、シース電場によって加速された高速電子は磁気ドリフトによりイオン源上部へと輸送され、その後、非弾性衝突及び電子-電子衝突によるエネルギー緩和が起こることを初めて明らかにしている。このため、負イオン源上部領域における電子エネルギー分布関数（EEDF）は、熱化された低エネルギー電子（熱電子）成分と高速電子によるテール成分の 2 成分を持つ。この結果から計算された熱電子成分に対する電子温度及びその空間分布は、実験におけるラングミュアプローブ計測結果と良く一致している。以上の結果は、本モデルが負イオン源内の電子輸送及びそのエネルギー緩和過程を十分正確に模擬するものであり、プラズマ非一様性解析に有用であることを示している。

第 3 章では、第 2 章で得られた EEDF の熱電子及び高速電子成分が分子解離による中性原子（H^0）生成に及ぼす影響について議論している。特に、前章の結果より高速電子成分は負イオン源上部に局在化し、このためイオン源上部で分子解離による原子生成が促進されること、すなわち、原子生成レートの空間分布に非一様性が現れることを明らかにしている。

第 4 章では、前章で議論された原子生成レートの空間的非一様性に対して、生成された原子の輸送過程・消滅過程による一様化の影響を議論するため、原子輸送解析モデルを構築している。このモデルでは、分子解離による原子生成、輸送による壁損失、さらに電離による消滅過程を同時に計算する。加えて、分光計測から得られる H_α 線強度分布を調べている。これと計算結果とを直接比較するため、原子輸送解析結果から H_α 線発光強度分布を計算することができる衝突輻射モデルを構築している。これら原子輸送及び衝突輻射モデルから計算された負イオン源内の H_α 線発光強度分布は、実験結果と良い一致を示している。以上から原子の輸送過程と消滅過程による一様化の効果は小さく、H^0 生成分布の強い空間的非一様性により、H^0 数密度分布にも非一様性が現れることを明らかにしている。

第 5 章は結論であり、本論文の成果と今後の展望がまとめられている。

以上、要するに本論文は、大型負イオン源設計に応用可能な水素負イオン源プラズマの新しい輸送解析モデルの開発と非一様性発現機構の解明に関するものであり、その成果は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4058号	氏　名	本間　裕貴

主 論 文 題 目 ：

Numerical modeling of the thermal force for impurity transport in fusion plasmas

(核融合プラズマ中の不純物輸送に関する熱力の数値モデリング)

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である。しかし、プラズマ閉じ込め容器壁で発生した不純物粒子が高温のコアプラズマに混入すると、プラズマ温度は低下し、核融合反応の維持が困難となる。従って、境界層プラズマ中の不純物輸送現象のモデル化とコアプラズマへの混入量の予測は必要不可欠であり、従来から世界各国で様々な不純物輸送シミュレーションコードの開発が行われてきた。しかしながら、急峻な温度勾配が存在する境界層プラズマにおいて、不純物粒子とプラズマイオンとのクーロン相互作用が原因となり生じる熱力と、この熱力に起因する不純物輸送に関する数値シミュレーションモデルは、十分正確とは言い難かった。特に、閉じ込め磁場に垂直な方向の熱力による境界層プラズマ中の不純物輸送は、従来の運動論的数値シミュレーションにおいては全く考慮されていなかった。以上を踏まえ、本研究では、境界層プラズマ中の熱力による不純物輸送に関する新たな数値シミュレーションモデルを開発し、プラズマ中への不純物混入量に関する信頼性の高い予測シミュレーション実現に寄与することを目的とした。

第１章では、本研究の背景と目的・意義を述べた。

第２章では、本研究の基礎となるプラズマ中のテスト荷電粒子の運動論モデルについてまとめた。このモデルでは、テスト不純物粒子と背景プラズマ粒子群とのクーロン衝突による運動量変化を速度空間における速度ベクトルの酔歩過程として定式化した。解析的な扱いが可能な、密度が一定、かつ、線形な温度勾配を持つ背景プラズマの場合について運動量変化の期待値を求め、熱力の理論式を導き、典型的な核融合プラズマ中での熱力の大きさを計算し、まとめた。

第３章では、第２章の酔歩モデルおよび多体問題を二体問題に帰着させる、いわゆる「二体衝突モデル」に基づき、本研究で新たに開発した熱力の数値シミュレーションモデルについて説明した。本章では、特に磁力線に平行な方向の熱力に関して、モデルの詳細を述べた。その特徴は、１）背景プラズマの速度分布関数に温度勾配を有する変形マクスウェル分布を用いたこと、さらに、２）この速度分布関数から背景粒子速度のランダムサンプリングを高速かつ正確に行う手法を提案したことにある。

第４章では、第３章のモデルをさらに拡張し、磁力線と垂直方向の温度勾配を有する変形マクスウェル分布を用いることにより、従来の運動論的シミュレーションでは全く考慮されていなかった磁力線垂直方向の熱力に関する数値シミュレーションモデルを新たに提案した。このモデルを用いてシミュレーションを行い、第２章の理論値と比較することにより、モデル妥当性を検証した。これにより、磁場垂直方向にテスト不純物粒子に働く熱力を、運動論的に計算することを初めて可能とした。また、熱力とローレンツ力により不純物粒子が磁場垂直方向に旋回中心ドリフトによって輸送されることを、運動論的数値シミュレーションにより初めて示すとともに、その効果が境界層プラズマ中の不純物輸送過程において無視できないことを示した。二体衝突法を用いた本モデルは、不純物による背景プラズマの自己無撞着な動的変化をも考慮する背景プラズマー不純物統合輸送計算にも容易に応用可能である。

第５章では、第３、４章の二体衝突モデルをもとに、フォッカープランク近似による熱力計算モデルを提案し、その妥当性を第４章の結果と比較・確認した。本近似はいわゆる微量不純物仮定の下で有効で、高精度かつ高速計算を可能にする。

第６章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめた。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4058 号	氏　名	本間　裕貴

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
		慶應義塾大学教授	理学博士	田村　要造
		慶應義塾大学准教授	博士（工学）	中野　誠彦

修士（工学）、Ingénieur de l'Ecole Centrale de Paris 本間裕貴君提出の博士学位請求論文は「Numerical modeling of the thermal force for impurity transport in fusion plasmas (核融合プラズマ中の不純物輸送に関する熱力の数値モデリング)」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、プラズマ閉じ込め容器壁で発生した不純物粒子が高温コアプラズマに混入すると、プラズマ温度は低下し、核融合反応の維持が困難となる。従って、コアと壁との境界に位置する境界層プラズマ中の不純物輸送現象のモデル化とコアプラズマへの混入量の予測は必要不可欠であり、従来から世界各国で様々な不純物輸送シミュレーションモデルの開発が行われてきた。しかしながら、急峻な温度勾配が存在する境界層プラズマにおいて、不純物イオンと背景プラズマとのクーロン相互作用により発生する熱力と、この熱力に起因する不純物輸送に関するモデル化は、未だ十分とはいえない。特に、閉じ込め磁場に垂直な方向の熱力による境界層プラズマ中の不純物輸送は、従来の運動論的数値シミュレーションにおいては全く考慮されていなかった。以上を踏まえ、本研究では、境界層プラズマ中の熱力による不純物輸送に関する新たな数値シミュレーションモデルを開発し、プラズマ中への不純物混入量に関する信頼性の高い輸送シミュレーション実現に寄与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・意義を述べている。

第 2 章では、本研究の基礎となるプラズマ中のテスト荷電粒子の運動論モデルについてまとめている。このモデルでは、テスト不純物粒子と背景プラズマ粒子群とのクーロン衝突による運動量変化を速度空間における速度ベクトルの酔歩過程として定式化する。本章では、このモデルに基づき、解析的な扱いが可能な、密度が一定、かつ、線形な温度勾配を持つ背景プラズマについて、テスト粒子の運動量変化の期待値を求め、熱力の理論式を導いている。さらに、典型的な核融合プラズマ中での熱力の大きさを計算している。

第 3 章では、第 2 章の酔歩モデルおよび多体問題を二体問題に帰着させる、いわゆる「二体衝突モデル」に基づき、本研究で新たに開発した熱力の数値シミュレーションモデルについて述べている。特に、本章ではモデルの基本となる磁力線に平行な方向の熱力に関して、その詳細を述べている。その特徴は、1）背景プラズマの速度分布関数に、ボルツマン輸送方程式の解から得られる温度勾配を有する変形マクスウェル分布を用いること、さらに、2）この速度分布関数から背景粒子速度のランダムサンプリングを高速かつ正確に行う手法を提案していることにある。

第 4 章では、第 3 章のモデルをさらに拡張し、磁力線と垂直方向の温度勾配を有する変形マクスウェル分布を用いることにより、従来の運動論的シミュレーションでは全く考慮されていなかった磁力線垂直方向の熱力に関する数値シミュレーションモデルを新たに提案している。さらに、このモデルを用いた数値計算結果と第 2 章の理論値とを比較することにより、モデルの妥当性を検証している。また、熱力とローレンツ力により不純物粒子が磁場垂直方向に旋回中心ドリフトによって輸送されることを、運動論的数値シミュレーションにより初めて示すとともに、その効果が境界層プラズマ中の不純物輸送過程において無視できないことを示している。

第 5 章では、第 3、4 章で開発したモデルをもとに、さらに、その計算高速化をはかるため、フォッカープランク近似による簡易熱力計算モデルをも提案している。この簡易モデルによる計算結果を第 4 章の結果と比較することにより、その妥当性を検討している。背景プラズマと不純物との自己無撞着な輸送計算には、この簡易計算モデルは適さないものの、不純物量が少ない、いわゆる”trace impurity limit”では、この簡易モデルを用いて高精度・高速な計算が有効なことを確認している。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

以上、要するに本論文は、高温・高密度核融合プラズマの生成・維持、ひいては将来の制御熱核融合の達成に重要となる熱力による不純物輸送過程に関して、信頼性の高い輸送モデルを構築したものであり、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4059号	氏　名	茅根　文子

主 論 文 題 目 ：

3倍体プラナリアの生殖戦略

ゲノムの倍数化は多くの植物と一部の動物でよく見られる現象であり、種分化と進化を促進する要因の一つと考えられているが、しばしば生殖における障害をもたらす。特に3倍体は、減数分裂時に染色体の対合と分離を正確に成すことが難しく異数体配偶子を形成し易いため、多くが不稔である。したがって、一般に3倍体生物は無性生殖しか行わないと考えられている。しかしながら、扁形動物門に属するプラナリアでは、3倍体の個体が減数分裂を経て配偶子を形成し、有性生殖を行うことが示唆されている。本研究では、3倍体プラナリアにおける特異な有性生殖のメカニズムについて明らかにすることを目指した。

第1章では、本研究の背景となる倍数体に関する知見、およびプラナリアにおける先行研究についてまとめた。プラナリアでは同種内に異なる生殖戦略（無性生殖、有性生殖、および両者の季節転換）をもつ集団が共存し、倍数体や異数体が多く見られる。3倍体のプラナリアには生殖器官を持たず無性生殖を行う個体と、生殖器官を持ち産卵する個体が存在する。さらに、生殖器官を持たない個体も有性個体の投餌により有性化し、交接と産卵を行うようになる。

第2章では、まず3倍体プラナリアの有性生殖を確かめるため、マイクロサテライトマーカーを用いて親子間でのゲノムの遺伝を解析した。有性化した3倍体プラナリア同士の交配によって得られたF_1世代は、全ての個体が両親由来のゲノムを併せ持っており、有性生殖の特徴であるゲノムの混合が生じていることが示された。

第3章では、3倍体プラナリアにおける配偶子形成機構を解明するため、減数分裂時の染色体挙動を調べた。減数第一分裂前期の染色体像の観察から、雄性生殖系列では減数分裂前に染色体が削減されて2倍体となっているのに対し、雌性生殖系列では減数第一分裂中期まで3倍体が維持されていることが示唆された。多くの卵母細胞では3つの相同染色体のうち2つずつが対合して七組の二価染色体を形成し、残りの7本は1価染色体として観察された。また、2倍体卵の形成にこの1価染色体が関わることが示唆された。

第4章では、減数第一分裂前期の染色体挙動をさらに詳細に調べるため、相同染色体間の組換えに関与する遺伝子 *rad51* に着目した。*rad51* ホモログは無性個体のネオブラストおよび有性化個体の卵巣・精巣の生殖細胞で発現が確認された。さらに有性化の過程でRNAiにより *rad51* をノックダウンすると生殖器官の形成に異常が生じた。RNAi個体の卵母細胞では相同染色体の対合は見られたがキアズマ形成はほとんど見られず、プラナリアの減数分裂においては相同染色体間の組換えが対合の開始に必要でないことが示唆された。

以上の研究を総括し、第5章で結論を述べた。

論文審査の要旨

報告番号	甲　第 4059 号	氏　名	茅根　文子

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	医学博士	松本　緑
	副査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	清水　史郎
		慶應義塾大学准教授	博士（地球環境科学）	土居　信英
		慶應義塾大学専任講師	博士（理学）	堀田　耕司

学士（理学）、修士（理学）茅根文子君提出の博士学位論文は、「3 倍体プラナリアの生殖戦略」と題し、5 章より成っている。

ゲノムの倍数化は多くの植物と一部の動物で見られる現象であり、種分化と進化を促進する要因の一つと考えられているが、しばしば生殖における障害をもたらす。特に 3 倍体は、減数分裂時に染色体の対合と分離を正確に成すことが難しく異数体配偶子を形成し易いため、多くが不稔である。したがって、一般に 3 倍体生物は無性生殖しか行わないと考えられている。しかしながら、扁形動物門に属するプラナリアでは、3 倍体の個体が減数分裂を経て配偶子を形成し、有性生殖を行うことが示唆されている。本論文では、3 倍体プラナリアにおける特異な有性生殖のメカニズムについて明らかにすることを目指している。

第 1 章では、研究の背景となる倍数体に関する知見、およびプラナリアにおける先行研究についてまとめている。プラナリアでは同種内に異なる生殖戦略（無性生殖、有性生殖、および両者の季節転換）をもつ集団が共存し、倍数体や異数体が多く見られること、3 倍体のプラナリアには生殖器官を持たず無性生殖を行う個体と、生殖器官を持ち産卵する個体が存在すること、さらに、生殖器官を持たない個体も有性個体の投餌により有性化し、交接と産卵を行うようになることについて記述し、最後に本論文の目的と構成について説明している。

第 2 章では、3 倍体プラナリアの有性生殖を確かめるため、マイクロサテライトマーカーを用いて親子間でのゲノムの遺伝を解析したことを報告している。有性化した 3 倍体プラナリア同士の交配によって得られた F_1 世代において、全ての個体が両親由来のゲノムを併せ持っていたことを示し、ゲノムの混合を伴う有性生殖が行われていることを証明した。

第 3 章では、3 倍体プラナリアにおける配偶子形成機構を解明する目的で、減数分裂時の染色体挙動について解析している。減数第一分裂前期の染色体像の観察から、雄性生殖系列では減数分裂前に染色体が削減されて 2 倍体となっているのに対し、雌性生殖系列では減数第一分裂中期まで 3 倍体が維持されていることを示唆した。多くの卵母細胞では 3 つの相同染色体のうち 2 つずつが対合して 7 組の二価染色体を形成し、残りの 7 本は 1 価染色体として観察されたことを報告し、さらに 2 倍体卵の形成にこの 1 価染色体が関わることを示唆している。

第 4 章では、減数第一分裂前期の染色体挙動をさらに詳細に調べるため、相同染色体間の組換えに関与する遺伝子 rad51 に着目して発現および機能解析を行っている。リュウキュウナミウズムシの 3 つの rad51 ホモログを見出し、それらが無性個体のネオブラストおよび有性化個体の卵巣・精巣の生殖細胞で発現していることを明らかにした。さらに、有性化の過程で RNAi により rad51 オーソログをノックダウンすると生殖器官の形成に異常が生じたことを報告し、RNAi 個体の卵母細胞では相同染色体の対合は見られたがキアズマ形成はほとんど見られなかったことから、プラナリアの減数分裂においては相同染色体間の組換えが対合の開始に必要でないことを示唆している。

第 5 章では上記の研究を総括し結論を述べている。

以上、本論文は 3 倍体プラナリアが常識に反して有性生殖を行うことを証明し、その減数分裂が新奇な機構に依ることを示唆している。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	乙　第4674号	氏　名	岩崎　雅二郎

主 論 文 題 目 ：

高次元データ空間における大規模近傍検索のための
近似 k 最近傍グラフに関する研究

スマートフォンの普及に伴いインターネット上にはマルチメディアデータを含む多様な情報が急激に蓄積されるようになり，情報検索技術への要求が急増している．マルチメディアデータを検索する場合にはデータの内容を表す特徴量を抽出し，元データの代わりに，その特徴量のデータを検索する．検索精度を高めるためには高次元データが必要となるので，高次元データを高速に検索することが可能な距離基準空間インデックスが不可欠である．k 最近傍グラフをインデックスとして用いた手法は他の従来手法よりも検索時の計算量を削減できる．k 最近傍グラフは各ノードがエッジによって k 個の近傍ノードへ接続されており，任意のノードから指定された検索点に向かって，より近いノードを順次たどることで，近傍ノードを検索することができる．しかし，この検索手法には2つの課題がある．第1に，少ない計算量で検索が可能である反面，k 最近傍グラフの生成時に膨大な計算量が必要となる．第2に，グラフが分離する場合には候補ノードに到達することができず検索精度（再現率）が抑制される．

本論文では木構造型インデックスを組み合わせた近似 k 最近傍グラフインデックスを提案する．k 最近傍グラフの生成時には各ノードの近傍ノードを特定しなければならず，この処理に多大な計算量が必要となる．提案手法ではノードをグラフに逐次追加し，追加対象のグラフを用いて追加ノードの近傍ノードを検索することで，グラフ生成時の計算量を大幅に減らすことができる．また，逐次ノードをグラフに接続することによりグラフが分離することがなく検索精度の抑制が解消される．さらに，検索時のグラフの探索では任意のノードではなく，木構造型インデックスにより近傍ノードを特定した上で，そのノードからグラフの探索を開始することにより，検索時の計算量の削減が可能となる．一方，提案手法ではエッジが過剰に付与されるノードが生成される傾向があるので，エッジを削減する必要がある．この際，グラフの連結性を維持するために，エッジの削除によりグラフが分離するか否かを判定した上で分離しない場合には過剰なエッジを削除し，分離する場合にはエッジを削除せずに過剰ノードから遠方のノードへ削除対象エッジを移動する手法を提案する．

10万オブジェクトの50次元一様分布データにおいて k 最近傍グラフに対して提案手法では生成時に96.7%の計算量が削減された．10万オブジェクトの画像特徴量（1,228次元）およびエッジ数 k が16において検索精度95%を得る場合に k 最近傍グラフに対して提案手法では約73%の計算量が削減された．さらに，百万オブジェクトの画像特徴量に対してエッジ削減の手法によりエッジ数が最大34.2%削減された．以上より，提案手法によって計算量とエッジ数を削減できることを確認した．最後に，提案手法を実際の商品画像検索に適用する事例を紹介する．

論文審査の要旨

報告番号	乙　第 4674 号	氏　名	岩崎　雅二郎

論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学准教授	博士（工学）	遠山　元道
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士	藤代　一成
		慶應義塾大学教授	博士（工学）	斎藤　英雄
		慶應義塾大学専任講師	博士（工学）	松谷　宏紀
		NTT ｺﾐｭﾆｹｰｼｮﾝ科学基礎研究所研究主任	博士（工学）	小杉　尚子

工学士、工学修士、岩崎雅二郎君提出の学位請求論文は「高次元データ空間における大規模近傍検索のための近似 k 最近傍グラフに関する研究」と題し、全８章からなる。本論文は、多量のマルチメディアデータから特徴量に基づいて近傍検索を高速に実行するためのデータ構造とアルゴリズムの提案と、実験による検証について述べたものである。

第１章は序論であり、本論文の背景と目的を述べている。

第２章では、近傍検索の定義について述べた後、各種インデックスに関する研究、および、提案するインデックスの応用を想定した属性データと特徴量の AND 検索に関する研究について述べている。

第３章では、追加登録ができない従来のインデックス vp-tree を改良した更新可能な木構造型インデックスである dvp-tree を提案している。しかしながら、これらのインデックスは数十次元までは効果的だが、数百次元といった高次元データではその効果が抑制される。

第４章では、検索漏れを許容することで検索時の計算量を削減できる近似検索インデックスに着目し、グラフ構造型インデックスを提案している。グラフ構造型インデックスは数百次元の高次元データにおいてもインデックスの生成時及び検索時の計算量の削減に効果的である。

第５章では、前章で導入したグラフ構造型インデックスの前段階に第３章で述べた dvp-tree を用いることで検索時の計算量をさらに削減する提案を行い、その性能を評価している。

第６章では、近似グラフ構造型インデックスにおいて初期登録ノードや特定のノードにエッジが大量に付与される傾向に着目し、このような過剰なエッジを削減するアルゴリズムを提案している。

第７章では、これらの提案手法を実際の商品画像検索に適用した事例を示している。実際の商品画像検索に適用する上では商品分類を考慮した AND 検索が必須となるので、その AND 検索の方法も同時に提案している。

第８章では本研究で得られた内容を総括し結論するとともに、今後の展望を述べている。

本研究では主としてマルチメディアデータを対象とした近傍検索を高速化するためのデータ構造とアルゴリズムを提案し、その性能を評価した。その結果、50 次元の 10 万件の一様分布データにおいてグラフ構築時における距離計算回数を従来手法より約 97%削減された。また、1,228 次元の画像データオブジェクト10万件を対象とする近傍検索において、検索時の距離計算回数が約73%削減された。提案されたアルゴリズムはマルチメディアデータに限らず、任意の多次元データの近傍検索に適用可能である。また実際に商用のショッピングサイトにおいて、商品の写真に基づいて類似商品の推薦を行うシステムに本研究の成果を応用した事例からも、本研究の成果が幅広い応用分野において工学上寄与するところが少なくないことが示されている。これらの成果は著者が自立して研究活動を行うために必要な高度な研究能力、並びにその基礎となる豊かな学識を有することを示したといえる。

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。

2014（平成26）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）	1,139	313	1,452
理学博士	26	8	34
博士（理学）	304	48	352
学術博士	0	1	1
博士（学術）	1	1	2
計	1,921	760	2,681

本書に記載した論文審査担当者の所属および職位は2013（平成25）年度秋学期のものである。

2014(平成26)年6月15日　発行

発行者　　理工学部長　青山　藤詞郎

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