

博士学位授与論文の内容の要旨および審査の結果の要旨

成 蹊 大 学

学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨を次のとおり掲載する。学位記番号に付した甲は本学学位規則第3条第3項によるものである。

氏名（本籍）	四倉 達夫（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第46号
学位授与年月日	平成15年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条1項該当者
学位論文題目	リアルな表情表出のための顔モデリング手法に関する研究
論文審査委員	主査 森島 繁生 委員 桐澤 潔・青木 正喜

〔論文内容の要旨〕

コンピュータグラフィックス（CG）の技術革新は飛躍的な発展を続けるコンピュータハードウェアとともに多くの研究者らによって日々進歩し続けており、現在生活でのテレビ、映画などのエンターテインメント分野で広く用いられて、市場の成長は拡大の一途を辿っている。その中でCGを用いた顔合成手法も1970年代、CG創世の頃から活発に研究が進められている。近年では映画産業にて全てのカットにCGを用いた手法がいくつかの作品で見かけるようになり、CGで制作した顔表情が実写と遜色ないクオリティの作品も存在する。しかし、現在一般的な顔合成手法は熟練したクリエイターが手作業で顔のモデル化、表情アニメーションを構築しているため、多くの費用と労力を必要としている。

このような現状を踏まえ、本論文では次に示す4点の実現に主眼を置きCGによる顔のモデリング手法を提案する。

1. 短時間かつ容易な顔モデル生成のためのツール実現
2. 実時間性を考慮した表情アニメーション実現方法の確立

3. 顔形状モデルに依存しない表情合成方法の確立
4. 応用アプリケーションへ柔軟に対応可能な顔合成システムの構築

まず、顔モデルの生成に対し、あらかじめ用意した標準的な顔モデルと正面顔画像を整合させ容易に顔モデルの作成を可能にするグラフィカルユーザインタフェースを開発した。さらに顔モデルを実際の顔形状や印象に近づけるため、3次元レンジスキャナを用いて顔の測定を行い、この結果を顔モデルに反映させ、さらに目、口の内部、歯などのモデルを構築した。

次に、顔モデルの表情アニメーションを実現するため、心理学で提唱されているFACSの基本表情を定量的に3次元の幾何形状変形ルールとして規則化させ、これらをキーフレームとして自然な表情変形法を実現した。アニメーションの実現のためのキーフレーム補間方法は高速度カメラを用いて顔表情の動的変化を実測し、計測データから滑らかで自然な補間方法を実現した。

さらに、標準顔モデルの表情変形ルールを形状及びポリゴン数の異なるユーザ定義モデルへ適応させる場合を考慮して、表情変化時の頂点の移動ベクトルを表情移動量分布図として表現し、ユーザが作成したモデルと分布

図をラジアルベシスファンクションを用いて適応化させることで変形ルールをマッピングする方法を提案した。このモデルの頂点に分布図内の対応する移動ベクトルを対応させ、ユーザ定義の顔モデルに表情変化ルールをマッピングし、モデルに依存しない表情変形を実現した。

これら4つの項目から構成される顔モデリング手法の検証を実際に行った結果、その有効性および拡張性が証明された。

上記の4点を反映した新しい顔モデリングツールを実現した研究は極めて独創的であり、他に類を見ない研究成果である。また同分野の研究者に与える影響は大きく、開発されたツールは広く利用され、次世代の顔モデリング法として期待される手法であると考えられる。この研究成果の一部を発表した論文は、日本芸術界の最優秀論文賞を受賞している。また電子情報通信学会の学術奨励賞も授賞しており、外部からの高い評価を受けている。さらに今回開発された顔表情合成システムはオープンソ

ースソフトウェアとしてウェブ上で公開され、多くの関連分野の研究者に大きな寄与をもたらすものとして期待されている。

よって、この研究は、博士論文に十分値するものとして評価できる。

〔論文審査の結果の要旨〕

本論文は、コンピュータグラフィックスによって顔のモデリングを行うための全く新しい手法を提案し、かつこの方式を実装して、多くの研究者に寄与するソフトウェアとして集大成したものである。論文審査に当たっては各審査委員がそれぞれの専門の立場から本学位申請者に対し筆記試験と口頭試問を行った。その結果、本学位申請者の学位論文の内容と関連分野に関する知識と学力は博士(工学)の学位を受けるに十分な基準を満たしていると認定した。

博士学位授与論文の内容の要旨および審査の結果の要旨

成 蹊 大 学

学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨を次のとおり掲載する。学位記番号に付した甲は本学学位規則第3条第3項によるものである。

氏名（本籍）	尹 富玉（韓国）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第47号
学位授与年月日	平成15年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条1項該当者
学位論文題目	Analysis and Removal of Endocrine Disruptors in Environments
論文審査委員	主査 樋口 亜紺 委員 加藤 明良・戸谷 洋一郎 仲川 勤（明治大学理工学部工業化学科教授）

〔論文内容の要旨〕

野生生物の間に個体数の減少、メス化並びに生殖機能の変調等の異常現象が内分泌攪乱物質（環境ホルモン）により引き起こされていることが明らかとなってきた。母乳中には全国平均で15pg/g-脂肪の濃度のダイオキシンが含まれており、授乳期の乳児は毎日平均50pg（耐容1日摂取量は4pg）すなわち許容摂取量の約12倍のダイオキシンを母乳から摂取している状況であり、母乳から摂取される内分泌攪乱物質による乳児の健康への悪影響が懸念されている。

本論文は、疎水性ポリジメチルシロキサン（PDMS）膜を用いた浸透気化法による水溶液中からの内分泌攪乱物質の濃縮・除去（第2章及び第3章）、並びに吸着法による母乳、牛乳並びに水溶液中からの内分泌攪乱物質の除去（第4章）を目的としている。浸透気化法においては、最適な状態で内分泌攪乱物質を水溶液系から除去するために、疎水性高分子膜の膜厚設定、供給液温度、並びに真空ライン温度の設定等のパラメーターの最適化を検討することを目的としている。さらに、Dibenzo-*p*-dioxin, diethylphthalate (DEP)、及び

co-planar PCB(3,3',4,4'-tetra chlorobiphenyl, TCB)等の内分泌攪乱物質の水溶液から浸透気化法による内分泌攪乱物質の分離について検討することを目的としている。内分泌攪乱物質の分離係数と物理パラメーター（蒸気圧とオクタノール-水分配係数(log*P*_{ow})）との間の関係についても議論している。

本論文は全6章からなっている。

第1章は諸論であり、内分泌攪乱物質の人体及び環境への影響、その内分泌攪乱物質の分析方法及び従来の除去方法が記載されている。

第2章は疎水性ポリジメチルシロキサン(PDMS)膜を用いた浸透気化法（パーバレーション）による水溶液中からの内分泌攪乱物質の分離について記載されている。内分泌攪乱物質中最も有害と言われているダイオキシン量は、pptレベルで測定されなければならない、超微量のためガス-質量分析計で直接分析することは現在のところ不可能である状況である。現手法では、前処理段階としてジクロロメタンを用いた抽出濃縮法が用いられている。しかしながら、操作が複雑であるため半自動的な内分泌攪乱物質濃縮法の出現が望まれていた。本論文で提示された方法を用いることにより、疎水性高分子膜を用

いた浸透気化法により、疎水性である内分泌攪乱物質を水溶液試料中より濃縮して、直接ガス質量分析計で分析するシステムを開発することが可能であることを明らかとしている。

浸透気化法を用いて最適な状態で内分泌攪乱物質を水溶液系から除去するために、浸透気化法におけるパラメーターの最適化を本論文では検討している。浸透気化法におけるパラメーターには、(a)疎水性高分子膜の選択、(b)供給液温度、真空ライン温度の設定、(c)疎水性高分子膜の膜厚設定、(d)内分泌攪乱物質の選択、が考えられる。(a)疎水性高分子膜の選択として、ポリジメチルシロキサン膜とポリトリメチルシリルプロピン (PTMSP) 膜300 μm を用いて透過挙動の相違について本論文では検討している。この透過実験は供給液として10ppmジブチルフタレート水溶液を用いて行っている。その結果、ポリジメチルシロキサン膜を用いた透過実験では供給液中のジブチルフタレートは選択的に透過しており、分離係数は時間とともに増加していくのに対して、PTMSP膜を用いた透過実験では供給液中のジブチルフタレートの濃度減少は観察されたにもかかわらず、ジブチルフタレートは透過されないことを観測している。これはPTMSP膜が高い吸着性をもっているために、ジブチルフタレートが選択的に膜に吸着され、膜拡散性に乏しいためであると考察している。本論文では、疎水性高分子膜の選択として、ポリジメチルシロキサン膜を以後の実験において用いている。

室温における浸透気化実験では、1,2-ジブromo-3-クロロプロパン (DBCP) 水溶液を濃縮・除去することが困難であったために、透過側真空ラインの温度、供給液温度を昇温させてDBCP水溶液の浸透気化を検討している。透過側真空ラインを100 $^{\circ}\text{C}$ に昇温させた所、供給液濃度は透過時間の経過とともに減少することを観察している。さらに、透過側真空ライン温度を150 $^{\circ}\text{C}$ 、供給液を43 $^{\circ}\text{C}$ に昇温させた所、より顕著な供給液中のDBCP濃度の減少を発見している。これは、高温下では、沸点の高いDBCPもポリジメチルシロキサン膜を透過した後も蒸気の状態におり、効率良く冷却トラップ内に捕集されたこと、さらに膜内並びに供給側のDBCPの駆動力が温度の上昇と共に増加したためであると考察している。透過側真空ライン温度を150 $^{\circ}\text{C}$ に固定して、供給液の温度を30 $^{\circ}\text{C}$ から50 $^{\circ}\text{C}$ 、70 $^{\circ}\text{C}$ 及び90 $^{\circ}\text{C}$ に変化させて蒸気圧が極度に低い0.000125 mmHg (25 $^{\circ}\text{C}$) の 2-*sec*-butylphenyl methylcarbamate (BPMC, 農薬)水溶液の浸透気化測定を行っている。分離係数はDBCPの場合と異なり、供給液の温度50 $^{\circ}\text{C}$ 以下ではBPMCが透過せず、さらに温度を上昇させることにより分離性の向上を見いだしている。この結果より、極度に低

い蒸気圧を有する不揮発性の有機物質でも供給液を高温にすることにより分離が可能であることを本論文で明らかとしている。

第3章はポリジメチルシロキサン膜を用いた浸透気化法を行い、内分泌攪乱物質の分離係数と物理パラメーター (蒸気圧とオクタノール-水分配係数 ($\log P_{ow}$)) との間の関係について議論している。

有機物質選択性である疎水性高分子膜を用いた浸透気化は、これまで、分子量が比較的 low、揮発性な有機化学物質の水溶液からの除去が検討されてきた。例えば、メタノール、エタノール等アルコール類、フェノール、ピリジン、クロロホルム、テトラクロロエチレン等である。テトラクロロエチレンの分子量は166であるが、蒸気圧は20mmHgと本論文で用いた内分泌攪乱物質に比べて極端に高い蒸気圧を有しているため、テトラクロロエチレンの分離係数は905と高い値が報告されている。本論文においては、蒸気圧0.58 mmHg (25 $^{\circ}\text{C}$) の1,2-ジブromo-3-クロロプロパン (DBCP, 分子量236) から蒸気圧が極度に低い0.000125 mmHg (25 $^{\circ}\text{C}$) の2-*sec*-butylphenyl methylcarbamate (BPMC, 0.0000345 mmHg (25 $^{\circ}\text{C}$)) の2,2-dimethyl-1,3-benzodioxol-4-methylcarbamate (Bendiocarb), また蒸気圧0.0021 mmHg (25 $^{\circ}\text{C}$) のdiethyl phthalate (DEP) など様々な内分泌攪乱物質を用いて透過実験を検討している。ポリジメチルシロキサン膜により浸透気化法を用いて得られた様々な内分泌攪乱物質の分離係数とその蒸気圧とオクタノール-水分配係数 ($\log P_{ow}$) との積の関係を検討した所、分子量に関係なく、駆動力である蒸気圧が高くなるにつれて分離性が向上していくことを初めて本論文で明らかとしている。また、ダイオキシン、ジベンゾ-*p*-ダイオキシンさらにはピフェニル (PCBsのモデル物質) に関しても、浸透気化法を用いることにより分離することが可能であることを明らかとしている。さらに、コプラナーPCBに関しても326という高い分離係数を得ることが可能であることを明らかとしている。

物理パラメーター (蒸気圧とオクタノール-水分配係数 ($\log P_{ow}$)) と分離係数との間の理論的關係を本論文では導いている。すなわち、

- (a) 透過量は溶解拡散理論に基づくフィックの第一法則により表わされる。
- (b) 浸透気化法において透過側における溶質の蒸気圧はゼロであると仮定して、膜を透過する溶質の駆動力はラウールの法則で表わされる。
- (c) 希薄内分泌攪乱物質水溶液において、ポリジメチルシロキサン膜中の内分泌攪乱物質の溶解度はオクタノール/水分配係数と相関性があると仮定する。

(d) ポリジメチルシロキサン膜中の内分泌攪乱物質の拡散係数が内分泌攪乱物質中で一定であると仮定する(なぜなら本研究における内分泌攪乱物質の分子量は134-282 Daと類似しているため)。

以上の仮定より、内分泌攪乱物質の分離係数は、蒸気圧とオクタノール-水分配係数($\log P_{ow}$)との積に比例することを本論文において証明している。

$$\alpha \propto \log P_{ow} \cdot p_{vap} \text{ (ED)} \quad (1)$$

以上の理論式より、今後新規の内分泌攪乱物質を用いて浸透気化法により透過実験を行う際には、その物質の持つ蒸気圧とオクタノール-水分配係数($\log P_{ow}$)が判明していれば、分離性を予想することが可能であることを明かにしている。

第4章は疎水性ポリジメチルシロキサン膜を用いた吸着法により牛乳、母乳中の成分を分解及び変性することなく牛乳、母乳中から内分泌攪乱物質を除去する方法について議論している。

浸透気化法は、その供給液の上昇温度が制限されているので、DDT, polychlorinated dioxin等蒸気圧が非常に低い内分泌攪乱物質の除去には不適切であり、また、浸透気化法の工程を行う際に高価の複雑な装置が必要であるため、浸透気化法は母乳中の内分泌攪乱物質を家庭で手軽に除去し難い。そこで、ポリジメチルシロキサン膜を用いて吸着法により様々な内分泌攪乱物質の水溶液系からの除去を検討している。

様々な材質の疎水性膜並びに管を用いて、1,2-ジブromo-3-クロロプロパン(DBCP, 農薬)の水溶液中からの除去率を測定して最適な内分泌攪乱物質除去剤を検討した所、ポリジメチルシロキサン膜を吸着剤として用いた時、最も内分泌攪乱物質の除去率は高く、さらに吸着法と脱着法で求めた除去率は一致していることを明らかにしている。すなわち、疎水性である内分泌攪乱物質は可逆的に疎水性高分子膜中に選択的に溶解・拡散して、水溶液中から内分泌攪乱物質を除去することが可能であることを明らかにしている。様々な内分泌攪乱物質水溶液中におけるポリジメチルシロキサン膜を吸着剤として用いたときの除去率を検討している。これらの内分泌攪乱物質に対する除去率を、内分泌攪乱物質の物性値であるオクタノール-水分配係数($\log P_{ow}$)との相関性を検討した結果、疎水性が強い物質ほど($\log P_{ow}$ 値が高い)ポリジメチルシロキサン膜による除去率は高いことを明らかにしている。

水溶液並びに母乳に対して吸着剤であるポリジメチルシロキサン膜の量を増加させると、内分泌攪乱物質の除去率は上昇することを明らかにしている。水溶液中のヘキサクロロシクロヘキサンは少量のポリジメチルシロキ

サン膜を用いることにより、90-95%の除去は可能であったが、母乳中のヘキサクロロシクロヘキサンの除去は、水溶液系と比較すると多量のポリジメチルシロキサン膜が必要であることを見いだしている。この原因は、母乳中の内分泌攪乱物質は、脂質ミセル、フリー状態、ポリジメチルシロキサン膜の3者間で平衡関係にあるためと考察している。しかしながら、脂質(体内)中に溶解された内分泌攪乱物質は、疎水性膜中に可逆的に移行すること(内分泌攪乱物質を除去可能)が本研究により明らかとなったのは大変有用な結果である。

実際の母乳(33才、東京在住)よりポリジメチルシロキサン膜に吸着された化学物質を脱着法を用いて質量分析計により分析した所、ヘキサクロロシクロヘキサンとヘキサクロロベンゼンが観察されることを明らかにしている。ヘキサクロロシクロヘキサンの除去率(2回吸着除去を行なった場合、除去率は84%)より、母乳中には20ppb(570ng/g-脂肪)のヘキサクロロシクロヘキサンが含有していることを明らかとしている。この値は、全国平均(個人差並びに地域差が大きい)と比べてやや高めのリーズナブルな値と考察している。

第5章は活性炭を用いた吸着法による内分泌攪乱物質の除去に関するものである。活性炭による内分泌攪乱物質の除去性をポリジメチルシロキサン膜による除去性と比較検討している。また、市販のミネラルウォーター中の可塑性ジオクチルフタレート(DOP)の除去にこの活性炭を用いた吸着法を適用した結果と考察を記載している。

活性炭を用いた場合、ポリジメチルシロキサン膜より1桁から2桁ほど高い内分泌攪乱物質の除去性を示すことを明らかにしている。また、活性炭を用いた内分泌攪乱物質水溶液からの除去率は、用いた内分泌攪乱物質の物性値であるオクタノール-水分配係数($\log P_{ow}$)と比例関係を示すことを明らかにしている。 $\log P_{ow}$ が3.5以上である物質の場合、0.05gの活性炭を用いて水溶液からの内分泌攪乱物質の除去率はほぼ85%以上を示すことを見いだしている。

本論文の目的の一つは、飲料水、牛乳及び母乳を含んだ水溶液中からの内分泌攪乱物質を選択的に吸着除去することである。このために、牛乳、母乳中の内分泌攪乱物質除去を標的にすると、吸着法により内分泌攪乱物質を母乳中から除去できても、栄養成分も一緒に除去されては本研究の意味をなさない。そこで、様々な栄養分がポリジメチルシロキサン膜並びに活性炭に吸着する(除去される)のかどうかを本論文では検討している。栄養分として、免疫タンパク質である γ -グロブリンと母乳中の主タンパク質であるカゼイン、さらに水溶性ビタミン類

(ニコチン酸, ビタミンB₂, ビタミンB₁₂)を選択した所, 免疫タンパク質並びにカゼインはポリジメチルシロキサン膜並びに活性炭には吸着されないことを見いだしている。これは, タンパク質の形状が大きいことに起因すると考察している。活性炭は水溶性ビタミンに対して高い除去性を示すために, 母乳中からの内分泌攪乱物質除去は, ポリジメチルシロキサン膜を用いた方が有効であることを明らかとしている。

市販されている様々なミネラルウォーターを用いて質量分析計による内分泌攪乱物質分析を行っている。市販されている輸入品のEvian, Volvicからは0.45ppb以上の高いジオクチルフタレート(可塑剤)が含有することを明らかとしている。

ジオクチルフタレート(DOP)は, ジエチルヘキシルフタレート(DEHP)を意味しており, 塩ビ(PVC)に柔軟性を与える添加剤として使われている。DEHPで可塑化された塩ビ(PVC)は, 血液と血漿の輸血用品用途で, 欧州薬局方により承認されている唯一の軟質材料として広範囲に用いられている。このDEHPは環境庁により内分泌攪乱物質の疑いがある物質に分類されているが, 日本ではまだ規制はされていない。欧州連合(EU)は体重50Kgで耐用1日摂取量(TDI=生涯食べ続けても影響がない量)1850mgと決められている。

本論文では市販のミネラルウォーター(商品名:南アルプスの天然水)を用いて活性炭及びポリジメチルシロキサン膜によりミネラルウォーターからのDOPの除去について検討している。ミネラルウォーターからDOPの除去性を本吸着法により確認するために, 活性炭並びにポリジメチルシロキサン膜0.7gをミネラルウォーター25mlに入れて吸着実験を行っている。質量分析計のSIM法による定量分析の結果, ミネラルウォーター中の初期DOP濃度が0.51ppbと観察している。活性炭及びポリジメチルシロキサン膜を用いた吸着法により, ミネラルウォーター中のDOP濃度はそれぞれ, 0.05ppbと0.33ppbに減少していることを見いだしている。このことから, 活性炭によるDOP除去率は89%, ポリジメチルシロキサン膜による除去率は36%と求めている。以上より, 活性炭並びにポリジメチルシロキサン膜を用いた吸着法により, ペットボトル中のミネラルウォーターから可塑剤であるDOPを除去することが可能であることを明らかとしている。

DOP含量が高かった市販のEvian(ペットボトル)を用いて, 浸透気化法によるDOPの濃縮分離の可能性についても検討を行っている。Evian中の初期DOP濃度は希薄でEI法では検出されなかったが, 膜透過させることにより濃縮されたDOPのピークが検出されることを明らかとしている。EvianからのDOP透過による分離係数は105と算出し

ている。

以上より, ポリジメチルシロキサン膜を用いた浸透気化法により, ペットボトル中のミネラルウォーターから可塑剤であるDOPを濃縮分離することが可能であることを明らかとしている。

第6章は本研究から得られた成果を簡潔に記述している。

以上をまとめると, 本論文は疎水性ポリジメチルシロキサン膜を用いた浸透気化法並びに吸着法による水溶液中からの内分泌攪乱物質の分離除去について検討を行っている。浸透気化法においては, 透過側の真空ライン温度を150℃に昇温させることにより, 極めて希薄な水溶液からの内分泌攪乱物質の分離がポリジメチルシロキサン膜を用いて可能であることを明らかとしている。本研究により, Dibenzop-dioxin, diethylphthalate(DEP), 及びco-planar PCB等の内分泌攪乱物質を水溶液系から浸透気化法により分離・濃縮が可能であることを初めて明らかとした。内分泌攪乱物質の分離係数と物理パラメーター(蒸気圧とオクタノール-水分配係数(log*P_{ow}*))との間に相関関係があることを明らかとしている。

活性炭を用いた吸着法により水溶液から様々な内分泌攪乱物質の除去についての基礎的な研究を行い, その活性炭による内分泌攪乱物質の除去性をポリジメチルシロキサン膜による除去性と比較検討している。活性炭を用いた場合, ポリジメチルシロキサン膜より1桁から2桁ほど高い内分泌攪乱物質の除去性を示すことを明らかとしている。活性炭並びにポリジメチルシロキサン膜を用いた内分泌攪乱物質水溶液からの除去率は, 用いた内分泌攪乱物質の物性値であるオクタノール-水分配係数(log*P_{ow}*)と比例関係を示すことを明らかとしている。

牛乳, 母乳中の内分泌攪乱物質除去を標的にすると, 活性炭は水溶性ビタミン類等の栄養成分も一緒に除去されてしまうために, 母乳中からの内分泌攪乱物質除去は, ポリジメチルシロキサン膜を用いた方が有効であることを明らかとしている。

活性炭並びにポリジメチルシロキサン膜を用いた吸着法により, ペットボトル中のミネラルウォーターから可塑剤であるジオクチルフタレート(DOP)を除去することが可能であることを明らかとしている。さらに, ポリジメチルシロキサン膜を用いた浸透気化法により, ペットボトル中のミネラルウォーターから可塑剤であるDOPを濃縮分離することが可能であることを明らかとしている。

以上の成果は工学的に極めて有効であると判断する。また, 過去に似たような研究例は無く, 研究の獨創性についても高く評価できるものである。この証拠に, 本研究の成果は, 審査付英語論文を4報(米国化学会1報,

質量分析化学会1報, エルゼヴィア社雑誌2報)並びに国際学会に4件発表されており, さらに2002年度ゴールドンコンフェランスにおいてスチューデントアワードを受賞(学会参加費, 滞在費, 食費等すべて学会が支給)していることから明らかであり, 博士(工学)の学位論文に値する内容のものであると認める。

〔論文審査の結果の要旨〕

本論文は, 疎水性ポリジメチルシロキサン膜を用いた浸透気化法による水溶液中からの内分泌攪乱物質の分析

と濃縮・除去法並びにポリジメチルシロキサン膜と活性炭を用いた吸着法による水溶液並びに母乳中からの内分泌攪乱物質の濃縮・除去法を提案したものである。論文審査にあたっては, 平成15年1月31日に, 加藤, 戸谷, 仲川(明治大学理工学部), 樋口の各審査委員がそれぞれの専門の立場から, 本学位申請者に対して口頭試問を行った。その結果, 本学位申請者の学位論文の内容および関連分野に関する知識と学力は博士(工学)の学位を受けるのに十分な基準を満たしているものと認定した。

博士学位授与論文の内容の要旨および審査の結果の要旨

成 蹊 大 学

学位規則（昭和28年4月1日文科省令第9号）第8条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨を次のとおり掲載する。学位記番号に付した乙は本学学位規則第3条第4項によるものである。

氏名（本籍）	上條 弘貴（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	乙第53号
学位授与年月日	平成15年3月5日
学位授与の要件	学位規則第4条2項該当者
学位論文題目	高温超電導体の浮上式鉄道への応用に関する研究
論文審査委員	主査 石郷岡 猛 委員 瓜生 芳久・齋藤 洋司 大崎 博之（東京大学大学院新領域創成科学研究科助教授）

〔論文内容の要旨〕

1911年のカメリンオンネスにより発見された超電導現象は、電気抵抗がゼロで、完全反磁性効果を持つと言った特徴から、電力機器をはじめ各種機器への応用が期待されてきた。しかし、発見から長年の間、超電導応用の主役であった金属系超電導体は臨界温度が低く、超電導状態を維持するために、高価な液体ヘリウムおよび断熱特性の高い真空容器が必要になることや、冷却に大きなエネルギーを消費することなどから、一部の特別な機器への応用に限られていた。しかし、1987年に液体窒素温度以上で超電導状態になる酸化物系高温超電導体の発見がなされ、比較的安価な液体窒素による冷却でも超電導状態を得ることができるようになり、応用への可能性が広がった。

超電導体には、電気抵抗がゼロと言うよく知られた特性の他に、磁界に対する特性として磁束を排除するマイスナー効果（反磁性効果）と一旦捕捉した磁束を保つピン止め効果と言う特性がある。また、臨界温度が高い高温超電導体を液体窒素温度で使用すると、比熱が大きく安定なため、金属系超電導体のように線材にして利用する

他に、バルクでの応用可能性も考えられる。そこで、高温超電導体では、抵抗がゼロと言う超電導体の特性を生かして線材としてコイルなどに応用する他に、高温超電導バルク体を用いて、反磁性効果とピン止め効果を利用した磁気シールド、ピン止め効果を利用した磁束を捕捉し擬似的な永久磁石として使用する「バルクマグネット」などの応用が考えられている。特に、「バルクマグネット」は高温超電導バルク体固有の応用であり、コイルや永久磁石に変わる新しい磁束源として、疑似永久磁石、アクチュエーター、磁気分離用磁石などへの応用など、従来の金属系超電導体ではなかった新しい応用分野も考えられている。

超電導の鉄道分野への応用では、超電導磁気浮上式鉄道がその代表として挙げられる。超電導磁気浮上式鉄道では、リニアモーター推進方式が採用され、車両に搭載した超電導磁石と地上コイルとの電磁気的な相互作用により、全く非接触で速度500km/h以上の高速走行を可能とする新しい鉄道システムである。そのキーテクノロジーとして、車両には強力な磁界を発生する超電導磁石が搭載され、車輪に代わる推進、浮上、案内の機能を果たしている。現在使用されている超電導磁石は、金属系のNbTi

超電導線を巻回した超電導コイルを液体ヘリウム冷却し、永久電流モードで運転している。今後の研究、開発の一環として、液体窒素冷却が可能な高温超電導体を超電導磁石へ導入することにより安定性の向上、冷却システムの簡素化、コスト低減など性能向上が期待されている。また、超電導磁石以外の新しい機器への高温超電導体の応用も期待されている。

本論文は、このような背景の中で、高温超電導体を超電導磁気浮上式鉄道へ応用する可能性を広く探るため、第1章 序論に続き、第2章において高温超電導体の「磁気遮蔽効果を利用した応用」として反磁性効果とピン止め効果を利用した磁気シールドへの応用、第3章において「ピン止め効果を利用した応用」として高温超電導バルク体を着磁したバルクマグネットの超電導磁石への応用に分けて、基本特性の把握、応用に必要な技術要素、そして最終的な応用形態についてまとめたものである。

第2章では、高温超電導体の磁気遮蔽効果を利用して、浮上式鉄道車両の磁気シールドへの応用を念頭に、比較的強磁界で、大面積を対象にした磁気シールドに関する検討を行った。現在の浮上式鉄道車両では、客室や貫通路部分への超電導磁石から発生する磁界を遮蔽するため、工業用純鉄などの強磁性体を配置しているが、十分な磁気遮蔽効果を持たせつつ、さらなる軽量化の要求があり、高温超電導体の応用の可能性がある。

2.2節では、比較的高磁界を対象にした高温超電導体の磁気シールド特性を評価する試験方法とその代表的な結果の例を紹介し、2.3節以降の検討、検証に必要となるデータを示し、その評価方法について明らかにしている。

2.3節では、超電導体が磁界をシールドする際に内部を流れるシールド電流の分布や大きさについて検討した。シールド電流は、超電導体の形状に沿って対称な閉ループ状に流れており、流れる領域は印加磁界が小さく磁界の侵入がほとんどなく完全反磁性状態に近い場合には外周部に集中し、印加磁界が大きくなり磁界の侵入がある混合状態になると内周部のシールド電流が増加して全体に流れることを実証し、そのシールド電流の磁界—臨界電流密度特性が、磁化法により測定される値と等しくなることを明らかにした。

2.4節では、等価電流法に基づいた解析方法において、高温超電導体の特性を考慮した磁気シールド解析方法について検討した。対称性のある円盤状高温超電導体および対称性のない矩形平板超電導体において、シールド電流を磁化法により測定された磁界—臨界電流密度特性で制限して解析した結果、試験結果と良く一致した解析結果が得られることを確認した。

2.5節では、高温超電導体をリング状にした場合、接合

を模擬した場合、粒界やクラックなど常電導部分がある場合など、均質でない高温超電導体の磁気シールド特性を調べ、欠陥、加工、印加磁界の大きさが、磁気シールド特性に与える影響を検討した。磁気シールドの対象、用途および磁界の大きさなどの条件により、リング状や接合などで臨界電流密度の低下した部分がある均質でない高温超電導体でも、磁気シールド特性への影響が少なく有効に利用できる可能性を示し、目的にあった超電導体の製法や加工を行うことにより、軽量の磁気シールド構成や、製作コストの削減につながることを明らかにした。

2.6節では、高温超電導体を浮上式鉄道車両の磁気シールドとして用いた場合の磁界解析を行い、高温超電導体の配置、磁気シールドの効果、超電導体に流れるシールド電流の大きさ、必要とされる超電導体の厚さや重量などについて検討した。高温超電導体の配置として、従来の強磁性体磁気シールドと同様に貫通路、客室に沿って超電導体を配置すれば、車内磁界を目標値の2mT以下に抑えられ、十分な磁気シールド効果が得られることを明らかにした。超電導体を用いた磁気シールドでも、シールドする空間を囲うように配置する方が、磁気シールドの効果として有効であることが判明した。また、超電導体が大いほど、シールド電流の電流密度、超電導体の厚さ、重量が減少し、磁気シールドを構成する上で有利になることや、超電導磁石に近いほどシールドする磁界が大きいため、シールド電流が大きくなることなども明らかにした。

実際の応用には、高温超電導体を冷却するための真空容器が必要なこと、コストやメンテナンスがかかるなど、クリアしなければならない問題が多く今後解決が必要になるが、本章で得られた知見は、高温超電導体を大型の磁気シールドに適用する場合に限らず、磁気シールドへの応用時に高温超電導体に要求される性能を示唆しており、今後の材料開発の指針にもなると考えられる。

第3章では、高温超電導体のピン止め効果を利用して、高温超電導バルク体を着磁したバルクマグネットを磁気浮上式鉄道用の超電導磁石への応用を念頭に、強磁界が発生できる大型の高温超電導バルクマグネットを実現するため、高温超電導体の着磁方法、大型化の方法、その他問題点の抽出など、各種の検討を行っている。

3.2節では、高温超電導バルク体の新しい着磁法として提案している「高温超電導体の温度制御を伴う繰り返し着磁法」について、高温超電導体単体の着磁特性を検討した。「温度制御を伴う繰り返しフィールドクーリング着磁法」では、繰り返し着磁による磁界の増加はなく、有効な方法でないことが判明した。一方、「温度制御を伴う繰

り返しパルス着磁法」では、高温超電導バルク体の温度を臨界温度から徐々に下げながらパルス磁界を繰り返し印加して着磁することにより磁界の増加が見られ、比較的小さい印加磁界でも、大きな磁界を着磁できることを明らかにした。また、温度の下げる幅を変えることで、最終的に得られる磁界の最大値や分布が変わり、下げる幅を小さくすると中心部分から磁束を連続的に捕捉でき、全体を効率的に着磁できることを明らかにした。

3.3節では、大型化を実現するため複数の高温超電導バルク体を並べたバルクマグネットに関して、励磁コイルの配置方法と着磁特性への高温超電導バルク体相互の影響について検討した。複数の高温超電導バルク体を並べると、相互の影響により単体の場合に比べると発生磁界が減少することや、浮上式鉄道用バルクマグネットのような大型で、高磁界のバルクマグネットの着磁には、励磁コイルの配置として集中励磁コイル配置の方が、高温超電導バルク体を密に並べることができ、大きな磁界が印加できること、励磁コイルが分離しやすく制約が少ないなど実用上有利であることを明らかにした。

3.4節では、着磁に伴い高温超電導バルク体内部に発生する応力に関する解析を行い、形状や着磁する領域を変えた場合の応力や発生磁界への影響について検討した。高温超電導バルク体の形状や着磁する領域により、発生する応力の大きさや分布が変わり、機械的な強度から許容される発生磁界の大きさもその影響を受ける。円柱形高温超電導バルク体では、全体を着磁するよりも外周から一定範囲のみを着磁した方が発生磁界を大きくできることや、円筒形では、リングの幅を変えることで着磁範囲を変えても発生磁界がほとんど変化しないことから、軽量化の観点からはリング幅の小さい方が有効であることなどを明らかにした。

3.5節では、浮上式鉄道用の超電導磁石への応用を想定したバルクマグネットの概念設計を行い、浮上式鉄道用バルクマグネットを実現するために要求される性能や、従来のNbTi系超電導コイルによる超電導磁石との特性比較などについて検討した。バルクマグネットでも、構造、発生磁界、重量などは従来の超電導磁石とほぼ同様に見える可能性があることを明らかにした。しかし、超電導バルク体には、均質で大きなものが必要であり、必要な

電流密度や経験磁界も大きく、さらなる特性向上が不可欠である。また、強磁界で大型な励磁用コイルが必要な着磁方法を含めて、課題の多いことについても述べている。

3.6節では、3.5節で論じた浮上式鉄道用バルクマグネットの1極を1/5に縮小した複数個の高温超電導バルク体による小型バルクマグネットを試作した。液体窒素を用いたフィールドクールによる着磁で低温容器表面の室温空間に0.14T以上の磁界を発生し、擬似的な永久磁石として機能することを確認した。現状では、発生磁界、大きさとも、最終目標とする浮上式鉄道用超電導磁石に対しては必ずしも十分なレベルにあるとは言えないが、これまでにはない大きさ200×100mm角のモデルを試作したことで、その実現可能性を示した。

実際の応用には、高温超電導バルク体の性能向上として、高磁界中での臨界電流密度の向上、機械的特性の向上とともに、大型化が不可欠である。また、強磁界が発生できる大型バルクマグネットの着磁方法を確立する必要がある。本章で得られた知見は、強磁界で大型の高温超電導バルクマグネットを実現するために必要となる技術課題を明らかにしているとともに、新しい着磁法の可能性を示しており、今後の研究、開発において、有効なデータになると考えられる。

最後に第4章は結論として、本論文の研究成果を総括したものである。

【論文審査の結果の要旨】

本論文は将来の超高速鉄道として期待される超電導磁気浮上式鉄道へのバルク高温超電導体の応用を目的としたものであり、バルク高温超電導体の磁気シールドとしての応用ならびに強力な永久磁石としての応用について、実験と理論により検討・解明したもので、浮上式鉄道分野への貢献のみならず、バルク高温超電導体の産業応用分野への応用に広い寄与が期待できる論文といえる。

論文審査に当たっては各審査委員がそれぞれの専門の立場から本学位申請者に対し筆記試験と口頭試問を行った。その結果、本学位申請者の学位論文の内容と関連分野に関する知識と学力は博士(工学)の学位を受けるに十分な基準を満たしていると認定した。