

博士學位論文審査要旨

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審査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	松井 邦浩
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	乙第 72 号
学位授与年月日	2009 年 3 月 11 日
学位授与の用件	学位規則第 4 条第 2 項該当者
学 位 論 文 題 目	ケーブル・イン・コンジット超伝導導体における燃線の機械的挙動と電気磁気特性に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 石郷岡 猛 委員 瓜生 芳久・齋藤 洋司 高尾 智明（上智大学教授）

〔論文内容の要旨〕

近年、開発途上国の経済成長に伴い世界規模でエネルギー需要が増加し、エネルギー源の確保が重要な課題となってきた。特に、我が国はエネルギーの自給率が低く、エネルギー源を安定に確保することが重要な課題である。また、地球温暖化を抑制するために温室効果ガスの排出を低く抑えたエネルギー源の活用が重要である。このような状況から、期待される新たなエネルギー源として有力なものが核融合発電であり、現在、国際協力により ITER(国際熱核融合実験炉)の開発が進められている。

核融合発電装置のコイルに銅を用いた場合、核融合反応により得られる電力よりも銅のジュール発熱による電力消費の方が大きくなり、発電装置として成立しない。このため、ITER では、電気抵抗がゼロである超伝導導体を使用する事が不可欠である。

核融合装置の超伝導コイルの殆どには強制冷却型の超伝導導体を使用され、多数本の超伝導素線を撚り合わせ

て金属管に挿入したケーブル・イン・コンジット(CIC, Cable-in-Conduit) 導体として使用される。この CIC 導体及びそれを用いた超伝導コイルには、幾つかの技術的課題が発生している。

本論文は、これらの技術的課題について詳細に検討し解決法を明らかにしたものである。すなわち、本論文は、序論と結論を含めて 6 章から構成されている。以下、各章について簡潔に述べる。

第 1 章は序論であり、世界のエネルギー需給の現状と課題について触れ、新しいクリーンエネルギー源としての核融合発電の必要性について述べたものである。

第 2 章は、超伝導技術を用いた ITER(国際熱核融合実験炉)計画について述べ、その技術的課題について概説したものであり、ITER の技術的目標、構成機器として不可欠な構成要素である超伝導コイルおよびその導体についての技術的課題について述べている。特に、超伝導コイルについては、トロイダル磁場コイル(TF コイル)、セ

ンターソレノイドモデルコイル(CS モデルコイル)、等の主要なコイルについて、その開発の現状と技術的課題について詳述している。

第3章は、撚線の機械的特性が超伝導体の交流損失に及ぼす影響について述べたものである。

著者は、CIC(ケーブル・イン・コンジット)導体内の撚線の機械的特性が超伝導体の交流損失に及ぼす影響を明らかにするため、熱的方法として、冷媒である超臨界圧ヘリウムの入り口温度・圧力と出口温度・圧力からエンタルピー上昇分を求め、これに冷媒流量を乗じて超伝導体の交流損失を評価した。また、電気的方法として超伝導体の磁化を用いた方法を採用し、各種の波形の外部磁場を超伝導コイルおよび短尺導体に印加し、導体表面に設置したピックアップコイルを用いて磁化曲線を測定し交流損を評価した。

その結果、CIC 導体内の超伝導素線間に流れる遮蔽電流により発生する交流損(結合損)には、通常考えられるより遙かに長い時定数の損失モードがあることを明らかにした。そして、その発生原因が素線の撚り乱れから発生する事を示した。また、実験結果に基づき、超伝導体の交流損失について理論解析を行っている。さらに著者は、電磁力印加時の結合損失の変化に着目し、コイルへの電流通電に伴い電磁力が発生して CIC 導体内に於いて超伝導撚線の各素線がコンジット(管路)壁面に押しつけられることにより、素線間の電氣的接触抵抗が低下して遮蔽電流が増加し、交流損が増加することを確認した。

一方、撚線の電磁力の経験が累積すると、導体製作時に生じた素線表面のクロムメッキ部の焼結部が剥離することにより、交流損失が低減する現象も確認し、その定量的解析も行っている。

第4章は、撚線の機械的特性が臨界電流に及ぼす影響について述べたものである。

従来、超伝導体に縦方向の引張り応力や圧縮応力が印加すると臨界電流が低下することが一般に認識されていたが、導体の横方向の応力の影響については研究が見られなかった。著者はこの点に着目し、TF コイル及びCS インサート・コイル用の Nb3Sn 素線について、臨界電流測定結果から得た歪に対する臨界電流特性を実験的に解明し、その評価式を提案した。また、この評価式とCS インサート・コイルの臨界電流測定結果から、電磁力によって素線の横方向に印加される歪に対する臨界電流特性について理論的に解析している。

CS インサートコイル用超伝導素線の臨界電流特性測定の試験では、磁場を 10~15T、温度を 4.2~10K、歪を-1.2~0.2%に変化させて、歪に対する臨界電流を測定した。また、CS インサート・コイルと同等の電磁力を経験した CIC 導体を解体して素線表面の観察を行った結果、素線表面に圧痕があることを確認し、これからコイル運転時の電磁力により素線に横方向の歪が加わり臨界電流が低下したことを明らかにした。

次に、TF コイル用超伝導素線の臨界電流特性の試験の結果、ブロンズ法 Nb3Sn 素線は、比較的に歪による臨界電流の低下の度合は小さく、内部拡散法 Nb3Sn 素線は臨界電流値のピーク値は高いものの歪に対する感度が高く歪による臨界電流の低下度合が大きいことが判った。また、TF コイル用 CIC 導体の臨界電流を測定するため、実規模導体サンプルを用いて、これに外部磁場 10.8T、通電電流 11.8T までの磁場・電流を経験させ、応力下における臨界電流特性の変化を実測した。その結果、TF コイル運転時には-0.75%の歪が素線に印加されることが判明した。

第5章は、CIC 導体の機械的特性を踏まえた超伝導コイル製作について述べたものである。

TF コイルの大きさは、TF モデル・コイルの約4倍となることから、コイルの大型化に伴う新たな製作上の技術的課題が発生している。特に、コイル製作では高い精度の巻線が要求されるため、巻線機による巻線精度の向上のみならず、CIC 導体とコイル構造物の熱膨張等を考慮したコイル製作手法が必要となる。また、超伝導体間及びコイル間を電氣的に繋ぐ接続部についても CIC 導体の機械的特性を考慮した構造が必要で、加えて、接続部にはコイル運転時のジュール発熱を抑えるために低い接続抵抗と、さらに、コイル製作をより容易にするために製作性に優れた構造が求められている。

TF コイル用にはNb3Sn 素線が用いられるが、一般にNb3Sn 素線は、製造の最終段階でNbとSnを反応させNb3Sn相を作るため焼成過程を必要とし、650℃までの熱処理が施される。このため、熱処理に伴う熱膨張および冷却時の熱収縮に伴い大きな歪みが発生する。

著者は、サンプル導体を用いた実験により、この伸縮量および歪みを実測した。そして、熱処理中の導体伸縮の影響を受けにくい櫛型熱処理治具を用いた熱処理方法を提案した。それにより、導体の伸縮量が0.036%以内であれば熱処理後の巻線導体の形状を修正することなくラジアルプレート(RP)に納めることが可能となること、評価した導体の伸縮量はブロンズ法導体で0.01%の伸び、

内部拡散法導体で 0.02% の縮みで、このことから、熱処理を終えた巻線導体の変形量は、RP の溝と導体間の隙間の許容値内であることを明らかにした。

次に、著者は、CIC 導体の熱応力を考慮した箱型接続部の開発について述べている。ITER 用の超伝導導体の接続部には、接続部でのジュール発熱を低減するために接続抵抗を可能な限り小さくすること、さらに、熱処理によって導体内に発生する熱応力を拘束出来る構造であること、製作性や施工性に優れていることが求められている。

著者はこの問題に対して、接続部ボックスに CIC 導体のジャケットと同じ材料を用い、熱処理前に接続部ボックスと CIC 導体のジャケットを溶接接続した新たな構造の箱形接続部を提案した。それについて実験を行い、本方式が導体内に発生する熱応力を拘束できること、また、接続抵抗も十分小さく、ITER の仕様値を十分に満足するものであることを確認した。

第 6 章は、本論文の結論を述べたものである。

すなわち、本論文は、ITER(国際熱核融合実験炉)に用いられる超伝導コイルおよびその導体について、実験的・理論的に詳細な検討を加え、その実現のための貴重な知見を明らかにしたものである。

以上、要するに本論文は将来のエネルギー問題のキーテクノロジーとして期待される核融合発電の実現に不可欠な超伝導コイルおよびその導体について、実験と理論により、詳細に検討・解明したものであり、核融合用大型超伝導コイル技術分野への貢献が顕著であると言える。従って、本論文は博士(工学)の学位論文に充分値するものと認められる。

博士學位論文審査要旨

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審査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	國澤 香織里
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	甲第 70 号
学位授与年月日	2009 年 3 月 31 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学 位 論 文 題 目	油脂からの輸送用燃料製造に関する基礎的検討
論 文 審 査 委 員	主査 小島 紀徳 委員 加藤 明良・原 節子・里川 重夫 加藤 茂（特別研究招聘教授）

〔論文内容の要旨〕

本論文は、未利用バイオマスである油脂系廃棄物や利用度の低いバージン油の有効利用のために、それぞれの油脂の性状に合わせた新規資源化法を提案し、そのプロセスを構築するために必要な様々な検討を行ったものである。

本論文は 4 部で構成されており、第 1 部「序論」、第 2 部「油滓のメチルエステル化」、第 3 部「油脂のオゾン分解による低分子化」、第 4 部「結論」となっている。

第 1 部「序論」は、第 1 章「バイオディーゼル燃料と油脂系廃棄物・未利用資源」よりなる。第 1 章では、バイオディーゼル燃料の歴史的背景、エネルギー問題や地球温暖化問題をはじめとする様々な環境問題との関連について述べ、バイオディーゼル燃料の重要性について言及している。また、国内の油脂資源の現状についてまとめ、油脂系廃棄物や食用として利用度の低い油脂の有効利用のための資源化プロセスを構築する必要性について述べ

ている。さらに、これらの油脂系資源の転換プロセスに関する技術開発の状況とこれまでの研究例について概説している。

第 2 部「油滓のメチルエステル化による輸送用燃料製造」は、第 2 章「油滓のメチルエステル化による輸送用燃料製造のための諸条件の検討」よりなる。第 2 章では、油脂系廃棄物・未利用資源として国内食用油製造プロセスからの副生物である油滓を取り上げ、油滓の性質を利用したメチルエステル化法の適用を提案し、さらに、収率向上のための諸条件の検討結果について述べている。油滓のメチルエステル化の際には油滓中に含まれている強アルカリ成分が触媒の役割を担うため、新たなアルカリ触媒の添加が不要となる。しかしながら、油滓中の水分やセッケン分は反応に寄与しないばかりではなく、エマルジョンを形成することにより反応阻害をもたらすため、収率が非常に低い。そこで、収率を向上させるために、以下の 2 プロセスを提案した。反応後の未反応分であるセッケン分を酸処理により脂肪酸として回収し、原料として再利用するプロセス、および、油滓のセッケン

分を予め酸処理により脂肪酸に転換後、油分と脂肪酸のみをメチルエステル化するプロセスである。それぞれについて検討したところ、いずれも収率を向上させることができ、油脂系廃棄物である油滓をその性状に合わせて有効活用する方向性を見出している。

第3部「動植物油脂のオゾン分解による輸送用燃料製造」は以下の3つの章で構成されており、輸送用燃料製造法としては新規な手法でありこれまでにほとんど学術的知見が見られない、オゾン分解による油脂の低分子化について詳述している。

第3章「魚廃油のオゾン分解による輸送用燃料としての評価」では、テストプラントを用いて固体触媒存在下で魚廃油をオゾン分解した際の生成物の分析評価を行うことにより、油脂のオゾン分解によって炭化水素等の低沸点成分が生成することを明らかにしている。得られた低沸点成分により着火性向上が期待でき、輸送用燃料としての有効性を見出している。オゾン分解によって得られた燃料は軽油ほど大きな分子の炭化水素類を含まないことから燃焼時の黒煙排出の抑制も期待されている。また、オゾンの脱色、脱臭、殺菌等の作用により、燃料や排ガスの臭気問題についても回避できることも示唆している。

第4章「固体触媒を用いた植物油のオゾン分解プロセスの検討」では、飽和脂肪酸のみで構成されたトリステアリンをモデル物質として用いたオゾン分解実験について述べている。第3章で扱った魚油は不飽和脂肪酸を多く含有し、すなわち炭素-炭素間結合としては、単結合に加えて反応性に優れた二重結合を多く有している。このような不飽和結合とオゾンとの高い反応性は一般的に認められているものであるが、本論文では飽和結合の切断にも効果があるとの結果が、新たな知見として述べられている。いずれも、油脂のオゾン分解にかかわる諸因子には未知の部分が多く、特に反応経路についての知見はほとんどない。そのための最適条件を探索することは非常に困難であった。このような理由から、本章では、不飽和部分を有しない比較的単純な単一の飽和脂肪酸を用いたと述べている。まず反応条件の検討として、「気-液-固」の3相よりなる反応場で有ることから、操作条件として触媒の種類や添加量、反応温度の影響を検証し、反応器設計のための指針を与えている。特に、オゾン分解は原料濃度には依存せず、オゾン供給律速であることを明らかにしている。これらの検討に基づき、常温では

固体のトリステアリンを常圧下で完全にオゾン分解させ、常温で液状の物性を有する生成物が得られることを実証している。さらに、反応途中の中間生成物を同定することにより、次章の検討につなげている。

第5章「トリステアリンのオゾン分解反応経路の解明」では、前章で同定されたトリステアリンのオゾン分解による様々な中間生成物を純物質として用意し、これらを出発原料として用い、オゾン分解により得られた分解生成物を同定している。このような結果からトリステアリンのオゾン分解反応経路を推察している。また、固体触媒は、加水分解による脂肪酸の生成および脱炭酸反応による炭化水素および含酸素化合物の生成に寄与することが実験的に示され、反応における触媒作用についての知見も得ている。これらの結果、輸送用燃料として優れた生成物を得るための炭化水素選択性を向上させる触媒設計およびオゾンと油脂の接触効率を向上させるためのプロセス設計への指標を得ている。また、油脂のオゾン分解については触媒の性能を検討した例は無く、オゾン分解に対する触媒効果/機構の解明により、今後の触媒設計への新たな指針が生み出される可能性がある。

第4部「結論」は第6章「総括」よりなり、本研究で得られた成果をまとめている。

以上を要約するに、本論文では、これまで廃棄されてきた油滓に関しては、その含有成分を活用することで、メチルエステル化による輸送用燃料製造が可能であることを示している。一方、油脂のオゾン分解に関しては、飽和脂肪酸であっても、低沸点成分への転換が可能であることを実証し、かつ気-液-固三相反応系での律速因子を特定し、反応経路を特定するとともに、優れた選択性を発現させるための触媒選択に関する知見をも得ており、反応系におけるさらに有効な触媒探索・設計、三相反応場に対する反応器設計といった、実用化への道を切り開く糸口を提供している。以上、本論文では、対象となる油脂系廃棄物や利用度の低い油脂の性状の違いに応じた転換法を提案し、諸条件を検討することで、最適な資源化プロセスの構築とそれによる有効利用の可能性を実証するとともに、新たなバイオマス利用技術の確立に向けた今後の研究、技術開発の様々な展開の可能性を示しており、その工学的意義はきわめて大きいものである。

よって本論文は博士(工学)の学位論文に十分値するものである。

博士學位論文審査要旨

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審査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	Tarek Abd El-Shafy Gad Allah Ahmed
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 71 号
学位授与年月日	2009 年 3 月 31 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学位論文題目	Treatment of Dyes Wastewater Using Reusable Magnetically Separable Photocatalyst under UV Light: Preparation, characterization, and application of the photocatalyst
論文審査委員	主査 小島 紀徳 委員 加藤 明良・原 節子・里川 重夫 加藤 茂（特別研究招聘教授）

〔論文内容の要旨〕

本論文は光触媒を用いた染料廃水の処理プロセスを実用化する際に必要となる使用した光触媒の回収再利用のための磁性物質を核に有する回収可能な光触媒の開発、さらにその機能改善、最適化のための多面的試みと設計のための定量式の提案を行ったものである。

本論文は 6 章から構成されており、第 1 章は“General introduction”，第 2 章は“Effect of Carbon Coating of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ Particles on Their Photocatalytic Activity”，第 3 章は“Role of core diameter and silica content in photocatalytic activity of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ composite”，第 4 章は“Effect of carbon coating and calcination temperature on photocatalytic activity of $(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4)$ ”，第 5 章は“Treatment of synthetic dyes wastewater utilizing magnetically separable photocatalyst ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$): Parametric and kinetic studies”，第 6 章は“Summary”となっている。

第 1 章は“General introduction”，「緒言」である。この章では環境汚染問題を概観し、廃水汚染の問題に言及している。特に汚染物質がもたらす健康被害と、その効率的な処理プロセス開発の重要性を述べている。ついで本研究の対象である染料工場ではその使用する染料の内の 1 割もが廃水中に流出していること、その化学的安定性故に処理が困難であること、そのような物質の処理法として OH ラジカルの強い酸化力を用いた様々な AOPs（Advanced Oxidation Process）が開発されてきたことが述べられている。光触媒分解法はエネルギー源として太陽光を用いる常温プロセスであり、人体にも無害なチタニア（ TiO_2 ）を用いる点で注目されるとしている。本章ではこの光触媒の反応機構、応用例および利用における課題についてレビューしている。特に回収について、光触媒は細かいほど触媒活性が高いが回収が困難となること、一方ガラス基板などに担持すると反応面積の低下をもたらすことから、本論文では、粒子に磁性を持たせることで回収を可能にする方法を提案している。

第2章は“Effect of Carbon Coating of $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ Particles on Their Photocatalytic Activity”「 $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 粒子の光触媒活性に及ぼす炭素コーティングの影響」である。処理排水から回収可能な粒子として、磁性を有する Fe_3O_4 (マグネタイト) 粒子の周りに、TTIP (titanium tetraisopropoxide)を用いてゾルゲル法によりチタニアを析出させ、目的とする粒子を合成している。合成された $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 触媒の光触媒活性(メチルオレンジ分解速度測定による。以下では含有チタニア量一定の条件下で比較する。)は、チタニア単体に比べ一桁小さいとの結果を得た。これは、表面に出たマグネタイトが、チタニア表面で光により生じた正孔と電子との再結合を加速させるためではないかと考察している。得られた粒子中の元素組成、結晶構造、表面積の測定結果から、TTIP/ Fe_3O_4 比を上げると比表面積は増大するが、光活性の高いアナターゼからルチルへの遷移温度は低下するとの結果も得ている。さらに、この表面に炭素を析出させることにより有機物の吸着性を向上させ、ひいては触媒活性を増加させるという方法が提案された。炭素源として PVA (poly vinyl alcohol)を用い、これを合成した $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 粒子と混合、450℃で加熱することで、炭素被覆と焼成とを同時に行っているが、炭素のコーティングは PVA の不完全な炭化によるためと思われる比表面積の低下をもたらし、光触媒活性の大幅な向上はもたらすことができなかった。

第3章は“Role of core diameter and silica content in photocatalytic activity of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ composite”, 「 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ (TSF) 複合粒子の光触媒活性発現における核粒子径とシリカ量の役割」である。本章では、前章で見られたマグネタイトの活性低下効果を抑制するための手法として、チタニア-マグネタイト間に 12-14% 程度の SiO_2 (シリカ) 層を挿入し、その効果を検証するとともに、複合粒子の径の影響をも検討している。製法はまずシリカを TEOS (tetraethyl orthosilicate) の加水分解によりマグネタイト粒子状にコーティングし、その上にさらにチタニアを同様にコーティングするというものである。このようにして製造した粒子の光触媒活性は、チタニアのみの場合は粒子径とともに低下するのに対し、25-45 μm で最も高い活性を示し、また数十-百 μm の粒子はチタニアのみの粒子より高い活性を示した。マグネタイトの結晶は表面に現れておらず、一方チタニアだけの場合に比して粒子径が大きくまた表面にチタニアが広がったために上記の結果をもたらしたと考察してい

る。

4章は“Effect of carbon coating and calcination temperature on photocatalytic activity of ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$)”, 「 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 複合粒子の光触媒活性に及ぼす炭素コーティングと焼成温度の影響」である。本章では第3章で得た最適な $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 比の粒子を用い、再度活性に対する炭素被覆 (CTS) の影響を、その焼成温度の影響とともに検討している。特に第2章で検討したときには、炭化が不十分であったことが活性向上をもたらさなかった原因であると考えられたため、本章では 450℃以上の比較的高温での検討も行っている。炭素被覆の有無にかかわらず焼成温度が 450℃を超えるとルチル相への転換が促進され 750℃で完全に転換した。これに併せて比表面積の低下がみられた。光触媒活性は、TSF 粒子では 450℃で極大が見られ、温度とともに低下した。CTS 粒子については、550℃の焼成でも TSF の数分の一の活性しか示さなかった。以上のことから当初期待された分解対象物質の吸着促進効果は見られず、負の遮光効果のみが見られると結論している。

第5章は“Treatment of synthetic dyes wastewater utilizing magnetically separable photocatalyst ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$): Parametric and kinetic studies”, 「磁気を用いて回収可能な $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 複合粒子を用いた合成染料廃水の処理：パラメータおよび速度論的検討」である。4章までの検討から最も高い光触媒活性を示した 25-45 μm の TSF 粒子による、工業的に用いられる染料のモデル物質として黄・赤・青をすべて含む remazole golden yellow G, reactive orange 16, remazole brilliant blue R の3染料混合物の分解特性を、pH, 触媒濃度, 染料濃度を変えて測定し、触媒濃度とともに分解速度は上昇したが 2500 ppm 以上で分解速度は若干低下したとしている。これは、光の透過が妨げられ反応が局所的になるため反応物質の供給が律速になる、触媒が凝集する、あるいは染料の触媒への吸着量が増大するなどのためと考察された。pH が上昇するとともに反応速度は低下した。これは用いた染料が通常負の電荷を有するのに対し、アルカリ条件ではチタニアが負に帯電すること、また pH3-7 での染料濃度に対する依存性は吸着を考慮した Langmuir-Hindshelwood 速度式で表現できたことから、吸着が速度に影響していることが示唆されたとしている。しかし、さらに染料濃度を上げると、反応速度は急激に低下するとの傾向が見られ、これはあ

る染料の分解に必要な波長の光が、他の染料によって吸収されているためではないかと考察している。このような効果をそれぞれの染料に対して Beer-Lambert law を用いて定式化し、最終的な分解速度式を提出している。以上、最適な触媒、条件の下では 45 分で完全に分解脱色された。さらに、触媒を回収の上活性を評価する実験も行っており、水溶液中で染料が完全に分解した後も 10 分間程度 UV 照射を継続することで光触媒活性が回復し、繰り返し使用が可能となることも報告している。

第 6 章は“Summary”，「まとめ」であり，以上をまとめるとともに結論を述べている。

以上を要約するに，本論文では，これまで報告されてこなかった磁氣的に回収可能な新規な複合光触媒を提案し，この活性向上のための試みを複数行い，キャラクターゼーション手法を駆使して活性向上の指針を示し，最終的に最適な触媒製造法を提案している。さらにこれを実際の廃水に近い複合系に適用し，複雑な現象を定性定量的に説明し，最終的には設計のための基礎となる速度式を提案している。以上，本論文では，新たな機能を有する複合材料の製造からその利用の際に必須となる速度式の提案までを，論理的な考察に基づいて行ったものであり，さらに本手法は現在鋭意開発中で今後利用拡大が期待される可視光応答型光触媒にも適用可能なものであることから，今後の廃水処理における新たな光触媒の利用技術の確立に向けた今後の研究，技術開発の様々な展開の可能性を示しており，その工学的意義はきわめて大きいものである。

よって本論文は博士(工学)の学位論文に十分値するものである。

博士學位論文審査要旨

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審査の要旨を次のとおり登載する。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	土肥 哲也
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	乙第 73 号
学位授与年月日	2009 年 3 月 11 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当者
学位論文題目	高速列車近傍圧力場の特性と低減対策に関する研究
論文審査委員	主査 小川 隆申 委員 田中 俊光・弓削 康平 飯田 明由（豊橋技術科学大学機械システム工学系教授）

〔論文内容の要旨〕

移動する物体まわりには、よどみ点を中心とした圧力の高い領域と流れの加速による圧力の低い領域が形成される。伝播する圧力変動である音波と異なり、この圧力場は物体に付随して移動するため音場と区別して近傍圧力場と呼ばれる。走行する列車によって作られる近傍圧力場は、沿線では正負の圧力時間変動として観測されるため、家屋の窓ガラスをがたつかせるといった低周波音問題に似た環境問題を引き起こすことになる。この問題は近年の列車高速化によって顕在化してきており、世界的に進められている鉄道の更なる高速化にむけ、近傍圧力場の特性を明らかにして低減対策方法を確認することは重要かつ緊急の課題である。

本論文では、列車まわりの近傍圧力場を理論的に解明し、その特性を把握するとともに低減対策方法を確認している。論文は以下の 6 章から構成されている。

第 1 章では、この研究の背景、目的などについて述べている。

第 2 章では、近傍圧力場を予測、検証する手法として開発した列車まわり流れの数値解析プログラムと縮尺模型実験装置を説明している。数値シミュレーションでは、列車まわりの流れをポテンシャル流れで近似し、ラプラス方程式を基本方程式とするパネル法と呼ばれる境界要素法で圧力場を求める方法が開発された。パネル法の計算結果を実測結果で検証した結果、両者はよい一致を示し、圧縮性や粘性の影響を無視したポテンシャル流れで近傍圧力場を良く近似できることが明らかになった。一方、模型実験では約 30 分の 1 の縮尺列車模型を、最高速度 650 km/h で走行させることのできる実験装置も開発された。この実験装置では実際の列車形状を忠実に再現した列車模型を射出することができると、回転対称形の列車模型しか扱えない実験装置と比べてより実際に近い状況で実験が行えるようになった。この実験装置の中核となる列車模型の射出装置には圧縮空気を用いた方式を採用し、その射出装置の設計では圧縮空気の流れを理論的にモデル化し、エアータンクの容量などの最適な設計パラメータを評価した。装置の製作後にこの理論モ

デルを検証した結果、加速管内の圧力波形がよく一致することと、列車速度がほぼ設計通りになっていることが確認された。また、製作した実験装置を用いて列車近傍圧力場についての検証実験を行い、新幹線の実測結果とよく一致することを確認した。この実験装置は列車近傍圧力場だけでなくトンネル突入時の現象も精度良く再現することが可能であり、汎用性の高い実験装置であることが示されている。

第3章では、ポテンシャル流れ理論に基づいて明らかにした近傍圧力場の特性について述べられている。回転対称形の列車を一様流中に置かれた湧き出し分布によって再現し、その分布関数をフーリエ級数展開することで、各次数の湧き出し分布による圧力変動の距離減衰を求めることが可能となっている。その結果、列車速度と列車最大断面積で決まる0次の湧き出しによる圧力変動が距離の2乗で減衰するのに対して、先頭形状の改良に相当する1次以上の湧き出しによる圧力変動は距離の3乗以上で減衰することが明らかになった。このことは、列車から離れると、列車先頭形状の近傍圧力場に対する影響が急速に弱まり、結果的に圧力変動が列車速度と列車断面積で決まる1点湧き出しで近似できることを示している。この結果は3次元パネル法で検証し、実際の列車形状にも適用できることが確認されている。したがって、家屋が存在する領域での圧力変動は列車先頭形状を工夫しても十分な低減効果が期待できないことが理論的に明らかとなった。

第4章では、近傍圧力場が切取・盛土・高架などの軌道構造や、斜面などの地形の起伏により受ける影響を数値的に検討した結果について説明されている。その結果、家屋が存在する位置における圧力変動は軌道構造により異なり、高架の場合が一番小さく、最も大きい盛土と比べて3~4割異なることがわかった。このことから沿線における近傍圧力場の予測をする上で、軌道構造による影響は無視できないことが明らかになっている。更に、切取や盛土などに見られる上り斜面と下り斜面が圧力変動に与える影響について調べた結果、上り斜面の場合は圧力変動が増加し、逆に下り斜面の場合は低減するが、その斜面が途中で終わり平地に変わると圧力変動への影響も弱まりそれより遠くでは平地の場合の圧力変動とほぼ同じになることが示されている。

第5章では、近傍圧力場に対する遮蔽壁の低減効果について、ポテンシャル流れ理論とパネル法の両面から検

討した結果を示している。まず、圧力変動が遮蔽壁により低減するメカニズムを明らかにするため、列車を1点湧き出し、遮蔽壁を2重湧き出しとする理論モデルを構築することで遮蔽壁を含む列車まわりの流れを表現している。その結果、遮蔽壁による低減効果は、列車が誘起した流速を、遮蔽壁が誘起した逆向きの流速成分が弱めるためであることが明らかになった。また、このモデルを用いて遮蔽壁による低減効果と観測点までの距離の関係を調べた結果、遮蔽壁による圧力変動の低減量は壁からの距離の3乗で減衰し、2乗で減衰する列車の圧力変動より先に弱まることが示された。この結果はパネル法により検証され、遮蔽壁による低減効果は壁から離れるほど弱くなることが明らかになっている。

次に、遮蔽壁の高さや設置位置が低減効果に与える影響についてパネル法で検討されている。その結果、遮蔽壁による低減効果は壁の設置位置とは関係なく、遮蔽壁を列車近くに設置しても逆に家屋側に近づけても効果は変わらないことが明らかにされた。さらに、計算結果から遮蔽壁の低減効果は壁の高さと、観測点までの距離の比だけで表せることが見出されている。この関係を用いることで遮蔽壁による圧力変動の低減効果や、遮蔽壁がある場合の圧力変動の絶対値を予測することが可能となり、例えば圧力変動幅の低減目標値から、それに必要な遮蔽壁高さを求めることができるようになった。風切り音に対する遮蔽壁の低減効果を求める方法は既に明らかにされており、今回近傍圧力場に対する遮蔽壁の低減効果を予測する方法が示されたことで、風切り音と近傍圧力場の両面から高速鉄道の遮蔽壁を設計することができるようになった。

遮蔽壁が列車の両側に設置されている場合や遮蔽壁の形状を変化させた場合の影響についても検討されている。その結果、片側だけに遮蔽壁を設置すると、遮蔽される側では圧力変動が低減するものの、反対側では悪化することがわかり、沿線に圧力変動が悪化する場所を作らないという観点では両側に遮蔽壁を設置すべきであることが明らかになった。遮蔽壁の形状については、遮蔽壁の理論モデルを用いた設計指針から直壁よりも列車側に折れ曲がった壁の方が同じ高さの直壁よりも低減効果が高いことが示され、その効果がパネル法で確認されている。以上のことから、遮蔽壁を用いた近傍圧力場の低減対策では列車側に折れ曲がった形状の遮蔽壁を列車の両側に設置することが最も効果的であることが明らかにされた。

最後に、本研究により得られた結果が第6章でまとめられている。

以上のように、本研究では列車近傍圧力場の特性と対策方法について学術面ばかりでなく実用面でも重要な多くの注目すべき成果を得ている。特に近傍圧力場の理論モデルを構築してその特性を明らかにしたこと、また、近傍圧力場の支配的パラメータを見出すことで近傍圧力場の低減対策方法を理論的に確立したことは評価できる。これらの成果は、高速鉄道の更なる高速化で顕在化する近傍圧力場の問題を把握、対策する上で非常に有益な知見であり、学術的および工学的に意義が極めて高いものであると考えられる。