

# 博士学位論文

論文の内容の要旨

および

論文審査の結果の要旨

甲第 148 号

甲第 149 号

甲第 150 号

甲第 152 号

甲第 153 号

甲第 154 号

平成30年度

**東京都市大学**

## 序

本編は学位規則（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、平成30年度内に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収録したものである。

氏名(本籍)	野口 俊介(福岡県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第148号
学位授与の日付	平成31年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文主題	PMSMをボールねじと一体とした アクチュエータ駆動システムの高精度位置決めに関する研究
論文審査委員	(主査) 百目鬼 英雄 中川 聡子 和多田 雅哉 鈴木 憲吏

## 論文内容の要旨

打ち上げロケットの軌道を制御する方法として、姿勢制御のためエンジンの向きをアクチュエータで変える方法が広く用いられている。特に2段・3段ロケット用のアクチュエータとして電動モータとボールねじを用いた機構が実用化されているものの、より大出力を必要とする1段ロケット用としては未だ実用には至っていない。

検討するアクチュエータシステムでは、ボールねじとモータ回転子を一体とした構造を考える。ボールねじ駆動システムでは、機械効率が極めて高く、リードピッチの取り方により高い減速比を得ることが可能であるものの、ボールの転がり摩擦や粘性摩擦をはじめとする非線形摩擦要素を持つことから、制御性の低下をもたらし、高速化、高精度化への妨げとなっている。またボールねじシステムでは、非線形摩擦による外乱のみならず、機構の外側から加わる外乱を常に受けて駆動することになるため、特にごく低速領域における速度精度や位置決め機構における目標位置近傍での位置精度に与える影響が大きく、外乱に対するロバスト性を持った機構を構築することが求められている。

これらボールねじ駆動システムに悪影響を及ぼす外乱を補償するために、制御系に外乱オブザーバを組み込み外乱推定を行うことで外乱トルクを補償する手法が小容量の精密サーボシステムでは提案されている。システムのモデル化の過程において、非線形摩擦に関する研究は古くから行われており、様々な形の摩擦モデルが提唱されている。2慣性系モデルを用いた外乱オブザーバを構成し制御系に組み込み補償を行うことで、シミュレーション及び実機において外乱の影響を抑制し速度追従性を向上させることが可能となり、速度変動の収束時間を低減させることが可能であることが分かっている。またボールねじの制御には位置センサとしてエンコーダを利用することが一般的であるが、エンコーダの分解能により駆動可能な精度の上限が定まる上に、オブザーバによる推定の精度にも影響を及ぼす。しかしながら提案するような大出力システムではまだ検討がなされていない。

そこで本論文では、小型の打ち上げロケット用のサーボ機構(TVC機構)に着目をし、その上で大出力用途におけるボールねじ精密位置決めアクチュエータシステムの構築をすることを目的とする。提案するアクチュエータシステムの応用用途は、着目している小型打ち上げロケット用のTVC機構の他、大型車用の電動パワーステアリング(EPS)といった大推力を必要とするアクチュエータとなる。提案するアクチュエータシステムの要求仕様は、推力が30kN、電動機出力にして10kW相当で、かつ位置決め制御帯域が4Hzである。

この要求を満たすアクチュエータシステムとして、電動機回転子とねじ軸を一体とした軸構造のボールねじシステムを提案し、この機構においてサーボモータの駆動法および制御系に着目した。駆動法においては、ブラシレスモータの通電角を延長することで高効率化・低振動化を図る手法、モータ結線によって特性を改善する手法、並びに二重巻線を持つモータで冗長性を持つ運転方法について検討を行った。また制御系については、外乱オブザーバを組み込み外乱推定を行うことで外乱トルクを補償する手法、及び 23bit の高分解能エンコーダを用いて位置及び推定の精度を向上させる手法、並びに可変ゲインを適用した制御系を用いる手法によって、ロバスト性を持った精密位置決めが可能なボールねじサーボが構成できることを提案した。

本論文は 5 章で全体を構成する。

第 1 章では、大推力のリニアアクチュエータの応用先として打ち上げロケットの推力偏向制御(TVC)の概要とその諸元、構成について述べ、ボールねじを使用したアクチュエータにおける課題点を示した。その上で研究目的を述べ、検討する内容と提案するアクチュエータの概要、及び論文の構成を示した。

第 2 章では、サーボ用途に供する電動機の駆動方法について検討を行った章である。ブラシレス DC モータと PMSM の違いについて述べたのちに、通電波形による効率・損失・トルク・騒音特性の検証、結線の違いによる特性の検証、二重巻線モータによる冗長性の確保について、それぞれ実験を行い検討した。

第 3 章では、ボールねじ位置決め機構の高精度化と題し、主としてボールねじ機構の機械特性の同定及びモデリング、並びに位置センサの高分解能化に関する検討を行う章である。ボールねじの機械特性を同定するために剛性及び非線形摩擦の特性を測定し、2 慣性系モデル並びにクーロン粘性摩擦モデルを用いてモデリング出来ることを示す。また位置決め機構の制御システム構成と機器構成を示したのちに、超高分解能エンコーダを用いた際の位置及び速度制御精度を理論および実機において検証し、超高分解能エンコーダを用いることの妥当性並びに高精度化の効果について検討した。

第 4 章では、ロバスト性を持った位置決めシステムの構築を主題とし、外乱オブザーバによる外乱抑圧システムの構築と位置・速度制御系の改良について検討を行う章である。外乱オブザーバを第 3 章で構築したモデルを基に構築し、外乱オブザーバによる効果を検証した。また制御系の改良については位置及び速度それぞれの改良手法を一つずつ検証した上で両者の制御手法を併用した際に改善効果が得られるか検証を行った。

第 5 章では、第 1 章で示した目的及び検討内容に対して 2 章から 4 章で得られた成果について述べた上で、今後の展望として残されている課題点について述べる。

上記の研究結果は、理論的に、及び縮小モデルにおける実機による検証で実現可能であることが確認された。同時に展望として提案システムと同等の大容量の実機における検証が必要であることが挙げられる。

## 論文審査結果の要旨

ロケットの軌道制御用アクチュエータは従来油圧機器が使用されているが、制御性の良い電動化が視慣れている。実現のためには、回転運動を併進運動に変換するボールねじとの組み合わせが一般的であるが機械的な締結はカップリングにより行われており装置の大型化がネックとなっていた。ボールねじをモータロータと一体にする楮を提案しそのドライブシステムを構築することを目的とした研究をおこなった。ボールねじ駆動システムでは、機械効率が極めて高く、リードピッチの取り方により高い減速比を得ることが可能であるものの、ボールの転がり摩擦や粘性摩擦をはじめとする非線形摩擦要素を持つことから、制御性の低下をもたらし、高速化、高精度化への妨げとなっている。またボールねじシステムでは、非線形摩擦による外乱のみならず、機構の外側から加わる外乱を常に受けて駆動することになるため、特にごく低速領域における速度精度や位置決め機構における目標位置近傍での位置精度に与える影響が大きく、外乱に対するロバスト性を持った機構を構築することが求められている。

本論文では、小型の打ち上げロケット用のサーボ機構(TVC機構)に着目をし、その上で大出力用途におけるボールねじ精密位置決めアクチュエータシステムの構築をすることを目的とする。提案するアクチュエータシステムの応用用途は、着目している小型打ち上げロケット用のTVC機構の他、大型車用の電動パワーステアリング(EPS)といった大推力を必要とするアクチュエータとなる。提案するアクチュエータシステムの要求仕様は、推力が30kN、電動機出力にして10kW相当で、かつ位置決め制御帯域が4Hzである。

この要求を満たすアクチュエータシステムとして、電動機回転子とねじ軸を一体とした軸構造のボールねじシステムを提案し、この機構においてサーボモータの駆動法および制御系に着目した。駆動法においては、ブラシレスモータの通電角を延長することで高効率化・低振動化を図る手法、モータ結線によって特性を改善する手法、並びに二重巻線を持つモータで冗長性を持つ運転方法について検討を行った。また制御系については、外乱オブザーバを組み込み外乱推定を行うことで外乱トルクを補償する手法、及び23bitの高分解能エンコーダを用いて位置及び推定の精度を向上させる手法、並びに可変ゲインを適用した制御系を用いる手法によって、ロバスト性を持った精密位置決めが可能なボールねじサーボが構成できることを提案した。

本論文は5章で全体を構成する。

第1章では、大推力のリニアアクチュエータの応用先として打ち上げロケットの推力偏向制御(TVC)の概要とその諸元、構成について述べ、ボールねじを使用したアクチュエータにおける課題点を示した。その上で研究目的を述べ、検討する内容と提案するアクチュエータの概要、及び論文の構成を示した。

第2章では、サーボ用途に供する電動機の駆動方法について検討を行った章である。ブラシレスDCモータ

とPMSMの違いについて述べたのちに、通電波形による効率・損失・トルク・騒音特性の検証、結線の違いによる特性の検証、二重巻線モータによる冗長性の確保について、それぞれ実験を行い検討した。

第3章では、ボールねじ位置決め機構の高精度化と題し、主としてボールねじ機構の機械特性の同定及びモデリング、並びに位置センサの高分解能化に関する検討を行う章である。ボールねじの機械特性を同定するために剛性及び非線形摩擦の特性を測定し、2慣性系モデル並びにクーロン粘性摩擦モデルを用いてモデリング出来ることを示す。また位置決め機構の制御システム構成と機器構成を示したのちに、超高分解能エンコーダを用いた際の位置及び速度制御

精度を理論および実機において検証し、超高分解能エンコーダを用いることの妥当性並びに高精度化の効果について検討した。

第4章では、ロバスト性を持った位置決めシステムの構築を主題とし、外乱オブザーバによる外乱抑圧システムの構築と位置・速度制御系の改良について検討を行う章である。外乱オブザーバを第3章で構築したモデルを基に構築し、外乱オブザーバによる効果を検証した。また制御系の改良については位置及び速度それぞれの改良手法を一つずつ検証した上で両者の制御手法を併用した際に改善効果が得られるか検証を行った。

第5章は結言であって、本研究によって得られた成果がまとめられている。

本研究で得られた成果は、以下にまとめられる。

- (1) 矩形波駆動ブラシレス DC モータドライブとして、最適な通電角 150 度通電であることを明らかにし、巻線方式によっても性能が異なることを明らかにした。
- (2) 信頼性向上のために、固定子巻線を 2 分割し 2 つのインバータで駆動する方法を提案し、1 つの制御素子で個別に駆動することで、より自由度の高い駆動が行えることを明らかにした。
- (3) ボールねじの高精度位置決めを行うため、摩擦などその機械的特性を同定する手法を提案し、高分解能位置検出器を使用した場合の制御性能を明らかにした。さらなる制御性能の改善のため外乱オブザーバを適用した可変ゲインの制御系を提案した。

本研究で得られた成果は、航空・宇宙用エンジンの姿勢制御用アクチュエータシステムとして、従来技術と比較し格段に小形軽量化したシステムとすることが可能となり、今後のこの種の装置に格段の技術革新をもたらすことが期待できる。よって博士(工学)の学位を取得するに値するものと判断する。

氏名(本籍)	宮下 皓高(長野県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第149号
学位授与の日付	平成31年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文主題	ホール型電気集塵装置における再飛散抑制と高効率化に関する研究
論文審査委員	(主査) 江原 由泰 岩尾 徹 鳥居 肅 瑞慶覧 章朝(神奈川工科大学 大学院工学研究科 電気電子工学専攻 教授)

## 論文内容の要旨

現在、大気汚染物質による環境問題の深刻化や人体への悪影響が懸念されている。大気汚染の原因物質は硫黄酸化物、窒素酸化物及び粒子状物質(PM: Particulate Matter)などが存在する。これら有害物質は呼吸器系の各部位へ付着し、喘息や肺がんなどの疾患を引き起こすことが指摘されている。有害物質の発生源は火力発電所や自動車、船舶などが挙げられ、その中でも船舶用ディーゼル機関は硫黄分が多い重油を燃料としており、高濃度のPMを排出することが問題視されている。そのため、国際海事機関(IMO)が中心となって海洋汚染の防止について取り組んでいる。これら微粒子の除去には、電気集塵装置(ESP)が着目されている。ESPはコロナ放電を用いて微粒子を捕集する装置であり、他の排ガス浄化装置に比べて構造がシンプルで圧力損失が小さく、高濃度粒子の集塵率が高いことが利点である。しかし、船舶用ディーゼル機関から排出されるPMは高濃度かつ低抵抗粒子であるため、従来の針対平板構造ESP(従来型ESP)では、一度捕集した粒子が飛散してしまう再飛散現象が生じてしまう。そこで、再飛散現象を抑制するホール型ESPを開発した。ホール型ESPは、接地されている捕集ケース内部に粒子を誘導することで、粒子にかかる剥離力を低減させ、再飛散現象を抑制することができる。本研究では、ホール型ESPにおける再飛散現象の抑制効果の確認および集塵効率の高効率化を目的とした。

第1章では、序論として研究背景およびESPの原理、再飛散現象について述べた。また、再飛散現象を抑制する装置としてホール型ESPを示し、ホール型ESPの必要性、課題、ESP内のシミュレーション・粒子可視化技術の研究現状、粒子の捕集モデルについて述べた。捕集モデルでは、帯電した粒子が直接ホールに流入するモデルと、再飛散粒子が再帯電してホールに流入するモデルを示し、本論文で着目した帯電粒子に働く力について述べた。

第2章では、ホール型ESPにおける集塵現象のシミュレーションを目的とし、電界解析、流体解析、粒子挙動解析を行った。電界解析では、従来型ESPとホール型ESPの電界強度を比較し、ホール型ESPのエッジ効果による電界強度の増加について述べた。また、イオン風によって流体がホール内に流れ込む様子を示した。粒子挙動解析では、流体と粒子挙動の支配方程式を連成させ、イオン風にクーロン力の力が加わり、粒子がホール内に流入する挙動を確認した。最後に、粒径によるホール流入率の変化について述べた。

第3章では、ホール型ESP内部の粒子挙動解析を目的とし、粒子可視化システムを用いてホール型ESP内部の粒子挙動を可視化した。ここでは、ホールに粒子が流入する様子の確認を

し、主流体速度及び放電電流値の増加による粒子挙動の変化について述べた。また、粒子画像流速測定法(PIV)解析によって粒子の移動速度、移動角度を導出し、粒子挙動に寄与する要因について述べた。最後に、ホールに流入する粒子の量を定量的に解析し、ホール流入率が向上する条件について検討を行った。

第4章では、ホール型ESPの実用化を目的として、ディーゼルエンジンの排ガスを対象として集塵実験を行った。ここでは、従来型ESPと集塵率の比較をし、再飛散現象の抑制効果について述べた。また、ホール型ESPは再飛散現象の抑制と同時に、集塵率の高効率化が求められている。そこで、集塵率に対する放電電流値および排ガス温度による影響について述べ、集塵に最適な実験条件を求めた。最後に、放電の局在化を考慮した理論集塵率の修正式を提案し、実験値との比較を行った。

第5章では、帯電粒子に働く力としてクーロン力、イオン風、主流体の合成ベクトルを算出し、捕集モデルにおけるホール流入率を算出した。そして、シミュレーション、PIVの解析結果と比較検討を行うことで、ホール型ESPの捕集モデルの妥当性を明らかにした。次に、捕集モデル、シミュレーション、PIV解析から、ホールに粒子が流入する最適な電極構造を針一對モデルにおいて提案した。また、針一對モデルにおけるホールに粒子が流入する最適な電極構造のホール流入率について検討を行い、ホール型ESPに電極構造を反映した。最後に、ホール型ESPにおける集塵に最適な電極構造について述べた。

第6章では、以上の各章を総括し、船舶用ディーゼル機関から発生する排ガスに適応したホール型ESPのスケールについて検討を行った。最後に、本論文の結論を纏めた。



## 論文審査結果の要旨

本論文審査では、宮下氏により提出された論文を審査するために、予備発表会および最終発表会を行い、宮下氏の研究が博士学位のレベルに達しているかを判定するとともに、審査員から指摘された内容が論文中で適切に反映されているかを確認した。

宮下氏の研究では、船舶用ディーゼル機関から排出される粒子状物質を除去するため、再飛散現象を抑制するホール型電気集塵装置(ESP)を開発した。ホール型ESPは、接地されている捕集ケース内部に粒子を誘導することで、再飛散現象を抑制することができる。論文では、ホール型ESPにおける再飛散現象の抑制および集塵効率の高効率化を検討しており、以下に、各章の概要を記載する。

第1章では、序論として研究背景およびESPの原理、再飛散現象について述べた。

第2章では、シミュレーションを用いたホール型ESPの性能評価を目的とし、ホール型ESPのモデルにおける電界解析、流体解析、粒子挙動解析を行った。電界解析では、従来型ESPとホール型ESPの電界強度を比較し、ホール型ESPのエッジ効果による電界強度の増加について述べた。

第3章では、ホール型ESP内部の粒子挙動解析を目的とし、粒子可視化システムを用いてホール型ESP内部の粒子挙動を可視化した。また、粒子画像流速測定法(PIV)解析によってホールに粒子が流入する様子の確認と、粒子の移動速度、粒子の移動角度、ホールに粒子が流入する割合の向上に適した放電電流値や主流体速度について述べた。

第4章では、ホール型ESPの実用化を目的として、ディーゼルエンジンの排ガスを対象として実証実験を行った。ここでは、従来型ESPと集塵率の比較をし、再飛散現象の抑制効果について述べた。また、ホール型ESPは再飛散現象の抑制と同時に、集塵率の高効率化が求められている。そこで、集塵率に対する放電電流値および排ガス温度による影響について述べた。

第5章では、シミュレーション解析、PIV解析、ホール型ESPにおける実証実験の結果から、ホールに粒子が流入する最適な電極構造を提案した。また、最適な電極構造を用いて実証実験を行い、ホール流入率および集塵率に対する電極構造の影響について述べた。

第6章では、以上の各章を総括し、本論文の結論を纏めた。

宮下氏の研究により、従来型ESPで問題視されていた再飛散現象を抑制するホール型ESPの再飛散抑制効果の検証、および高効率化が図られた。また、シミュレーション解析、PIV解析、実証試験と3つの研究から検討を行ったことで、ホール型ESPの課題でもある高風速下における運転も明らかとなり、流体分布や粒子挙動解析から新たな電極構成を提案することができた。

予備発表会および最終発表会を行い、各審査員からの助言やコメントについて、最終的に十分な検討がなされ、的確に学位論文に反映されたことを確認した。

以上のことより、宮下氏によるホール型ESPに関する成果は、船舶用ディーゼル機関から排出される粒子状物質を除去技術に貢献する、有益な研究であると評価できた。したがって、本論文は、環境保全技術に対する価値の高い内容であり、博士(工学)の学位を取得するに値するものと判断した。

氏名(本籍)	潘 春暉 (中華人民共和国)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第150号
学位授与の日付	平成31年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文主題	Study on Design Technique of High Resolution ADC Using Dynamic Analog Components (ダイナミック・アナログ回路を用いる高精度 AD 変換器の設計技術に関する研究)
論文審査委員	(主査) 傘 昊 柴田 随道 佐和橋 衛 澤野 憲太郎 兵庫 明 (東京理科大学 大学院理工学研究科 電気工学専攻 教授)

## 論文内容の要旨

デジタル信号処理システムはコンピュータシステムと通信システムに幅広く使用されている。デジタル回路はロバスト特性を持ち、非常に小さな構造によって非常に複雑な高速信号処理システムを実現することができる。時が経つにつれて、デジタル集積回路の速度および密度が増加しており、通信システムおよび消費者製品のほとんどすべての分野におけるデジタルシステムの優位性がますます明らかになっている。しかし、人間はアナログ信号の物理的な世界に生活しているので、アナログ・デジタル変換器(ADC: Analog-to-Digital Converter)はデジタル信号処理(DSP: Digital Signal Process)システムのインターフェースをとして必要不可欠な回路である。DSPシステムの速度と機能の向上に伴い、DSPに関連するADCの速度と分解能も向上する必要がある、これが前例のない課題をもたらした。低電源電圧で動作でき、高信号対雑音及び歪み比(SNDR: Signal-to-Noise and Distortion Ratio)を持つAD変換器(ADC)は、無線センサー・ネットワーク、民生機器および産業用アプリケーションの分野においてミックスド・シグナル・システムオンチップ(SoC)において広く使用されている。近年、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)デバイスの微細化に伴い、トランジスタのしきい電圧と回路素子のミスマッチが増大し、トランジスタ真性利得が低下する問題が起り、集積回路の性能に影響を及ぼしている。さらに、アナログ信号のダイナミック・レンジは低電源電圧によって制限されている。アナログ回路の線形性が劣化するため、高利得オペアンプ及び高分解能ADCの実現は困難となっている。

本研究では、高分解能且つ高電力効率を持つADCの実現を目標として、集積回路素子であるCMOS微細化に伴う耐圧性と相対精度低下の影響によるアナログ回路精度劣化及び高精度アナログ・デジタル変換器実現困難の技術課題を解決するために、ナノ微細CMOSに適した低電源電圧低・高精度ADCの新しい構成手法と実現回路を提案した。無線通信や車載センサー等に用いられる混載信号処理集積システムでは、アナログ世界とデジタル領域のインターフェースの役割を果たすADC回路が幅広く利用される。半導体製造プロセス微細化に伴い、CMOS ADC電源電圧低下が余儀なくされ、信号ダイナミック・レンジが制限される。製造バラツキによる素

子精度劣化に加え、電源電圧変動や回路動作環境温度変動による回路素子性能劣化がより顕著となり、高精度 ADC の実現は益々困難となる。本研究では、オーバーサンプリング技術とノイズシェーピング手法で高精度 AD 変換を実現する  $\Delta\Sigma$  AD 変調方式を採用する。高精度アナログ要素回路を必要としないので、微細 CMOS を用いる高精度 ADC の実現に適している。スイッチド・キャパシタ回路を用いる離散時間  $\Delta\Sigma$  AD 変調器内部では、増幅器回路を用いる積分器が必須であり、AD 変調の精度は増幅器回路の性能に大きく依存している。低電源電圧で高利得、低歪み特性をもつ増幅器回路を実現するには、消費電力増加と回路規模増大する技術課題がある。本研究では、微細 CMOS に適している  $\Delta\Sigma$  AD 変調器回路を実現するために、従来方式の増幅器回路ではなく、定常電流が必要としない、高線形性を持ち、低電源電圧で動作可能なダイナミック・アナログ回路を用いた積分器回路及び高精度  $\Delta\Sigma$  ADC の構成手法を提案した。ダイナミック・アナログ回路設計技術の完成度を上げるために、ダイナミック・アンプとダイナミック・コンパレータを用いる  $\Delta\Sigma$  ADC 回路システム安定性の理論解析手法を確立した。また、ノイズ解析モデルの構築とその解析手法を確立した。さらなる  $\Delta\Sigma$  ADC 精度向上を実現するために、電荷再配分型逐次比較 ADC の特徴を活用し、残差電荷を利用するノイズ・カップリングの実現手法を提案した。ダイナミック・アナログ回路を用いた  $\Delta\Sigma$  ADC 回路の詳細設計を行い、計算機シミュレーションで提案回路の実現可能性を確認した後、LSI チップ試作と測定評価結果による実験検証で提案回路実現手法の有効性と実現可能性を実証できた。また、デジタル信号処理技術とダイナミック・アナログ回路技術を融合した低電圧・高精度 CMOS ADC 設計技術を確立し、複素信号処理用高精度 AD 変換器への応用範囲拡大を行った。

## 論文審査結果の要旨

IoT センサシステムや AI チップの実現に欠かせない自然界と計算機を中心とする制御システムのインタフェースである、アナログ・デジタル変換器(ADC)回路の高精度化と低電力化の相反する技術課題を解決するために、学術的に高いポテンシャルが要求されるナノ微細 CMOS を用いた独創性の高いアナログ回路技術と特色のある先端的なデジタル信号処理手法を採用し、アナログとデジタルが混載する集積回路の新しい開発手法を構築した。

提案する高精度・低電力(ADC)回路実現手法の有効性を確認するために、理論解析、数値計算、また、計算機によるシミュレーションだけでなく、提案集積回路の詳細設計を行い、複数回の LSI チップ試作による実験検証で提案手法の実現可能性と有効性を実証した。

博士論文では、研究の背景と目的を述べた後、技術課題解決するための手法を詳細に論述し、理論解析結果で提案方式の理論根拠を示している。また、計算機シミュレーション手法で提案回路方式の実現可能性を示した後、実験検証を行い、試作した LSI 回路の測定結果で提案手法の有効性を明確に示した。本論文で提案した方式は次世代混載集積回路設計手法の要素技術につながる可能性も含んでおり、貴重な工学的意義をもつ。

論文では理論解析結果、設計・実験データと結果に基づいて展開しているため、理論根拠は明確である。また、先行研究の結果と比較で提案手法の有効性を論じたため、正当性の裏付けであると判断でき、完成度の高さは認められる。

以上により、提出した博士論文に対し、合格と判定した。

氏名(本籍)	上村 健太郎 (神奈川県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第 152 号
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 19 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文主題	混合微粒子注入材の浸透注入による地盤改良技術に関する研究
論文審査委員	(主査) 末政 直晃 吉田 郁政 栗原 哲彦 伊藤 和也 高橋 章浩 (東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・ 環境工学系 教授)

## 論文内容の要旨

近年の既存宅地における液状化の被害から、既設構造物直下地盤においても適用可能な液状化対策工法の開発が求められている。既設構造物直下地盤における地盤改良では、地上構造物への影響を少なくすることが求められるが、このような工法の 1 つとして、地盤改良材の浸透注入による改良工法が挙げられる。浸透注入を目的とした改良工事では、地盤に対する浸透性の問題から、溶液型注入材が使用される。しかし、近年では粉碎技術の発達に伴って、様々な材料を微粒子化することが比較的容易になってきており、土木分野では微粒子の浸透注入による地盤改良技術が注目されている。そこで、本研究は微粒子を地盤に浸透注入させることで、液状化の発生を抑止できる地盤改良方法を提案することを目的とする。この目的の達成のために、1) 周辺環境に与える影響が少なく、液状化抑止に求められる改良強度が得られる材料を選定し、2) 改良対象である地盤へ浸透させるために必要な微粒子の粒子径を把握し、3) 必要な粒子径まで微粒子を粉碎できる方法を提案することが必要である。さらに、4) 微粒子の浸透注入によって改良した地盤の液状化抵抗を確認する方法を提示することが求められる。本論文では、上記の課題を解決するために実施してきた種々の実験および解析の結果を整理し、微粒子の浸透注入による地盤改良の可能性とそれによる改良効果についての知見を取りまとめた。

本論文の内容と構成は以下に示すとおりである。

第 1 章は序論である。近年、発生した液状化被害を概観するとともに、既往の研究で用いられた微粒子の種類やその改良材の改良効果をまとめるとともに、浸透固化処理土の改良効果に関する研究を整理した。さらに、微粒子の浸透可否評価法の課題について述べるとともに、本研究の目的および検討範囲について説明した。

第 2 章では、注入材として使用する微粒子を選定するとともに、その基礎物性を評価した。

既往の研究で提案されている微粒子について、レーザー回折式粒径分析装置および走査型電子顕微鏡を用いて、その粒径や形状を分析した。また、渦崩壊を用いた微粒子の粉碎技術を提案するとともに、微粒子の粉碎特性について調べた。微粒子の粉碎実験の結果、微粒子の粒径を半分程度まで細粒化できたことを確認した。

第 3 章では、地盤に浸透可能な微粒子の粒径を明らかにするために、新しい浸透可否評価法について検討した。

まず、現在、主流となっている粒径のみを用いた微粒子の浸透可否評価法の課題についての考察と実験的検討によって、粒径のみを用いた方法では土の間隙を明確に評価できない場合があることを示した。

次に、微粒子の地盤に対する新しい浸透可否評価法として、土の透水係数から Kozeny-Carman 式を用いて土の代表的な間隙を表す間隙指標を算出する方法を提案した。ここで提案した間隙指標は、薬液注入工法の事前調査から得られる地盤の透水係数、間隙率、注入材の粘性から求めることができる指標である。さらに、間隙指標によって、微粒子の浸透可否がより明確に評価できることを一次元注入実験の結果から確認した。

第4章では、2種類の微粒子を混合することによる地盤改良材について検討し、その強度特性を確認した。

まず、注入材として使用する微粒子を選定するために、既往の研究において提案された微粒子の固化可能性について調べた。その結果、シリカと水酸化カルシウムを混合した注入材が最も強度発現が顕著であることを示すとともに、固化に伴う注入材の粘性や微粒子の粒径変化についても確認した。

次に、シリカと水酸化カルシウムを混合した注入材の配合や養生条件、浸透距離に伴う強度変化を一軸圧縮試験により確認した。その結果、養生1年以内での強度低下や養生温度に伴う強度変化が少ないことを確認した。さらに、注入材の浸透注入過程で浸透速度を保持できれば、100cmの供試体においても比較的均一な改良が可能であることを確認した。

第5章では、改良土に対して非排水繰返し三軸圧縮試験を行い、液状化強度や靱性について検討した。

改良土の繰返し非排水三軸試験によって、改良土が液状化対策として求められる強度を満たしていることや繰返し载荷に対して粘り強い材料であることを確認した。さらに、累積損失エネルギーと軸ひずみが発達した後の体積ひずみの関係が注入材の濃度によって整理できることを示した。

第6章では、遠心模型実験を行い改良土の液状化抑制効果について検討した。

未改良地盤と改良地盤を模擬した模型上に小規模構造物を設置し、遠心加速度 50G 場において加振し、未改良地盤と改良地盤における構造物の挙動を比較した。構造物直下の改良によって、構造物の加速度応答が増加するものの、沈下量を 1/8 以下に抑えられることを確認した。さらに、改良体内部に設置した加速度計の計測結果から、改良土の剛性の低下が少ないことを確認した。

第7章では、解析コード LIQCA を使用した有効応力解析によって、遠心模型実験の再現解析を行なった。5章で行なった繰返し非排水三軸圧縮試験の結果から、未改良地盤および改良地盤の地盤パラメータを決定した。これを使用した再現解析によって、構造物の沈下量や間隙水圧の挙動を概ね再現することができた。さらに、設定したパラメータを使用して、改良体の寸法に伴う構造物の加速度応答や沈下量、傾斜をパラメトリックに考察した。

8章は結論である。8章では、本論文において行なった実験的、解析的検討をまとめるとともに本論文を総括した。

## 論文審査結果の要旨

東日本大震災における東京湾沿岸地域や茨城県、千葉県などでは、大規模な液状化が発生し、宅地を中心に甚大な被害が発生した。これを受けて、現在、既設住宅に対しての液状化対策が求められている。そのような観点から、本研究は簡易で安価な液状化対策方法を開発することを目的としたものであることが確認された。

既設構造物があるとき、その構造物に変状を生じさせずに地盤を改良するための方法に、地盤改良材の浸透注入による改良工法が挙げられる。このための材料として、これまでは溶液型注入材が使用されてきたが、高コストという問題があった。そこで、本研究では、様々な材料を微粒子化することが比較的容易になったことから、微粒子を地盤中に浸透注入させることを試みた。これまで、岩盤の亀裂に対して微粒子を注入することはなされてきたが、液状化対策としての微粒子利用は世界的に見ても初めての試みであり、評価に値すると考えられた。ただ、同時にいくつかの課題が想定された。本論文では、液状化対策としての微粒子注入工法の課題を適切に掲げるとともに、これらの課題について解消できる方法を実験的に示し、評価方法を提案した。

微粒子の地盤注入において想定される課題は、1)対象地盤に注入できる微粒子径の把握、2)注入により固化できる微粒子の種類、3)比較的低コストでそのような微粒子を作製できる可能性、と考えられる。それに対して、本論文では次のように課題解決を試みた。まず、1)の浸透可能な微粒子の把握については、密度や粒度分布の様々な砂地盤中に微粒子を注入する形で系統的な実験を実施して、所定の地盤に対して浸透可能な微粒子径があることを明らかにした。さらに、既往の浸透可否の評価式が不十分であることを指摘するとともに、新しい浸透可否の評価式を提案した。また、2)の浸透固化の課題については、まず既往の研究より固化可能性のあるいくつかの微粒子を選定し、これらについて実験を行うことにより固化可能性を探った。その結果、2つ以上の微粒子を混合するという新しい発想により、浸透固化が可能であることを示すとともに、液状化対策として十分な強度を有することを確認した。最後に3)については既存の微細化技術によっても対象粒子を微細化する方法があることを実験的に確認した。これらに加えて、改良地盤に関する遠心模型実験や改良地盤のFEMによるシミュレーション解析を行い、微粒子による改良地盤の妥当性を検証した。

本論文では、課題設定は時機を得ており、その目的に対して新規性が高い方法を提案している。そして、提案方法に対しては、論理的に課題を抽出して、その解決方法を適切に設定するとともに、実験や解析を通して提案の妥当性を検証している。これらのことから、本論文は博士(工学)の学位論文として十分であることが認められた。

氏名(本籍)	越 健太郎(東京都)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第153号
学位授与の日付	平成31年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文主題	アスファルト混合物の持続安定的な供給に関する研究
論文審査委員	(主査) 今井 龍一 皆川 勝 丸山 收 五艘 隆志 高津 淑人

## 論文内容の要旨

日本の道路舗装は高度経済成長期の頃から現在にかけて着々と整備され、現在日本の舗装総延長は約100万kmに達している。しかし、1980年から1990年代にかけて舗装新設費や維持修繕費は減少に転じている。道路舗装整備費減少の影響により、日本国内のアスファルト混合物製造数量は年々減少しており、現在の総製造数量は1990年代の製造数量の5割程度となっている。これに伴いアスファルト混合物製造工場の数も減少している。一方、近年アスファルト混合物の再生化が進み、再生率が上昇しており、近い将来アスファルト混合物の品質低下が懸念されている。

少資源国の日本においては繰り返し再生可能な舗装材料は国家の財産であり、今後これまで整備してきた膨大な道路ストックが老朽化していく中で、舗装材料の品質を保ちながら持続的に道路を維持していかなければならない。しかし、このまま維持修繕費が減少し、舗装材料の生産数量や製造拠点の減少が進むと、将来的に舗装材料の品質低下や供給が滞る問題が顕在化する可能性がある。

本研究の目的は、維持管理の根幹を担う舗装材料の品質と施工性を高める開発と開発した材料を活かした供給体制をマネジメントしていく手法の提案とした。

- ・ 先ず、舗装材料の品質向上技術として、持続的に繰り返し再生可能で施工性を高めたアスファルト混合物(合材)を開発した。この研究は、これまで高温で製造されていたアスファルト混合物の製造温度を約30℃下げる中温化技術を低コストで実用化し、一般に広く普及させることにより、アスファルトの劣化を抑制させ、かつ施工性を高める、すなわちより長い時間使用できるアスファルト混合物を開発することである。
- ・ 次に、マネジメント手法として、将来に渡り持続安定的な供給方策を研究した。現在、アスファルト混合物の供給状況に関して正確に把握されておらず、供給圏域を分析した既往研究も見当たらない。このため、現在の供給圏域を正確に把握する手法を考案し、将来の安定供給の維持に対しての方策の提案を試みた。

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- ・ アスファルト混合物の開発に関しては、日本の高再生率のアスファルト混合物ではこれまで実用化されていない中温化技術である、フォームドアスファルト技術に着目し研究した。高再生率アスファルト混合物に適用するために効果の向上方法を考え、フォームドアスファルトの微発泡化を考案した。これにより、締固め性能の向上に成功した。さら



に、効果を向上させるために、再生用添加剤の発泡を考案した。これにより、効果は上乘せされ、再生率 70%の高再生率アスファルト混合物にも適用可能となった。室内試験の結果を踏まえて、工場のプラントで実証実験を行うために、日本のバッチ式アスファルトプラントに適した、フォームド発生装置を開発し、稼働工場で効果を確認し実用化した。これにより、従来と比して低コストで製造温度を低下させて製造が可能となり、製品の品質および可使用時間を改善することができた。

- ・持続安定的な供給体制の構築に関しては、円を描いて供給範囲を把握している現状の手法では道路別の供給可否までは把握することができない。そこで、道路ネットワークデータを用いた詳細な供給圏域算出手法を考案した。これにより、特定の工場から設定時間の到達範囲を正確に把握することができ、将来の合材工場の減少による空白エリアを推定することにより、供給対策の対応が可能となった。また、最短経路探索および県境のリンクをすることにより広範囲で緻密な実態を把握することができた。さらに、この算出手法を用いて冗長性を算出し、可視化することにより、供給圏域の把握だけではわからない脆弱な供給地域を把握することができた。これらの成果により、将来舗装材料が供給できなくなる可能性の高い地域の推定をすることが可能となった。
- ・本研究で得られた成果、「フォームドアスファルト技術による再生アスファルト混合物の開発」と「アスファルト混合物の供給圏域の算出と安定供給に関する分析」から、将来に渡り、持続的にアスファルト混合物を供給する一方策を提案した。通常のアスファルト混合物の運搬可能時間は2時間程度である。2時間程度の運搬時間であると将来的に供給ができない地域が顕在化する可能性が高い。しかし、運搬時間を3時間まで延長することができれば、その可能性は大幅に軽減する。そこで、フォームドアスファルト技術を用いたアスファルト混合物を日常的に運用することにより、合材工場の供給範囲を拡大する。また、サテライトサイロを活用することにより、民間運営されている合材工場のこれまでの拠点を最大限生かし、供給範囲を維持していく方策を提案した。

本研究により、近い将来の道路整備の維持修繕時代に向けて現状を把握し、現時点から対策を講じることで、より安定的な維持管理を将来に渡り持続的に行うことができる。

以上

## 論文審査結果の要旨

本論文では研究の背景として、道路舗装の現状を次のとおり分析して論じている。

日本の道路舗装は高度経済成長期の頃から現在にかけて着々と整備され、現在日本の舗装総延長は約 100 万 km に達している。しかし、1980 年から 1990 年代にかけて舗装新設費や維持修繕費は減少に転じている。道路舗装整備費減少の影響により、日本国内のアスファルト混合物製造数量は年々減少しており、現在の総製造数量は 1990 年代の製造数量の 5 割程度となっている。これに伴いアスファルト混合物製造工場の数も減少している。一方、近年アスファルト混合物の再生化が進み、再生率が上昇しており、近い将来アスファルト混合物の品質低下が懸念されている。

少資源国の日本においては繰り返し再生可能な舗装材料は国家の財産であり、今後これまで整備してきた膨大な道路ストックが老朽化していく中で、舗装材料の品質を保ちながら持続的に道路を維持していかなければならない。しかし、このまま維持修繕費が減少し、舗装材料の生産数量や製造拠点の減少が進むと、将来的に舗装材料の品質低下や供給が滞る問題が顕在化する可能性がある。

そこで現状の課題を踏まえた本研究の目的を維持管理の根幹を担う舗装材料の品質と施工性を高める開発と開発した材料を活かした供給体制をマネジメントしていく手法の提案としている。研究内容としては、まず、舗装材料の品質向上技術として、持続的に繰り返し再生可能で施工性を高めたアスファルト混合物（合材）を開発した。この研究は、これまで高温で製造されていたアスファルト混合物の製造温度を約 30℃下げる中温化技術を低コストで実用化し、一般に広く普及させることにより、アスファルトの劣化を抑制させ、かつ施工性を高める、すなわちより長い時間使用できるアスファルト混合物を開発している。

次に、マネジメント手法として、将来に渡り持続安定的な供給方策を研究している。現在、アスファルト混合物の供給状況に関して正確に把握されておらず、供給圏域を分析した既往研究も見当たらない。このため、現在の供給圏域を正確に把握する手法を考案し、将来の安定供給の維持に対しての方策を提案している。

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- ・ アスファルト混合物の開発に関しては、日本の高再生率のアスファルト混合物ではこれまで実用化されていない中温化技術であるフォームドアスファルト技術に着目して研究している。高再生率アスファルト混合物に適用するために効果の向上方法として、フォームドアスファルトの微発泡化を考案し、締固め性能の向上を成功している。さらに、効果を向上させるために、再生用添加剤の発泡を考案している。これにより、効果は上乘せされ、再生率 70% の高再生率アスファルト混合物にも適用可能となった。室内試験の結果を踏まえて、工場のプラントで実証実験を行うために、日本のバッチ式アスファルトプラントに適したフォームド発生装置を開発し、稼働工場で効果を確認したうえで実用化まで図っている。これにより、従来と比して低コストで製造温度を低下させて製造が可能となり、製品の品質および可使時間を改善することを実現している。
- ・ 持続安定的な供給体制の構築に関しては、合材工場を中心にした円を描いて供給範囲を把握している現状の手法では道路別の供給可否までは把握することができない。そこで、道路ネットワークデータを用いた詳細な供給圏域算出手法を考案している。これにより、特定の工場から設定時間の到達範囲を正確な把握が可能となり、将来の合材工場の減少による空白エリアを推定することにより、供給対策の対応が可能となった。また、県境を考慮した最短経路探索により現実的かつ広範囲で緻密な供給範囲の実態の把握を実

現している。さらに、この算出手法を用いて冗長性を算出し、可視化することにより、供給圏域の把握だけではわからない脆弱な供給地域の把握を実現している。これらの成果により、将来舗装材料が供給できなくなる可能性の高い地域を推定することを可能としている。

- ・ 本研究で得られた成果、「フォームドアスファルト技術による再生アスファルト混合物の開発」と「アスファルト混合物の供給圏域の算出と安定供給に関する分析」から、将来に渡り、持続的にアスファルト混合物を供給する一方策を提案した。通常のアスファルト混合物の運搬可能時間は2時間程度である。2時間程度の運搬時間であると将来的に供給ができない地域が顕在化する可能性が高い。しかし、運搬時間を3時間まで延長することができれば、その可能性は大幅に軽減する。そこで、フォームドアスファルト技術を用いたアスファルト混合物を日常的に運用することにより、合材工場の供給範囲を拡大する。また、サテライトサイロを活用することにより、民間運営されている合材工場のこれまでの拠点を最大限生かし、供給範囲を維持していく方策を提案している。

本研究により、減少していく合材工場の現状を踏まえ、近い将来の道路整備の維持修繕時代に向けて現状を把握し、現時点からできうる限りの対策を講ずることで、より安定的な維持管理を将来に渡り持続的に行うことができる。そのため、本研究で提案した舗装材料と供給マネジメント双方の利点を生かした方策は、今後の道路舗装整備のあり方に必ず役立つものであると考えられる。

以上のことから、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値があるものと認められる。

氏名(本籍)	千歳 敬子 (千葉県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第154号
学位授与の日付	平成31年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文主題	炉心崩壊事故時の再臨界を回避する高速スペクトル炉心概念に関する研究 Study on fast spectrum reactor core concept to prevent recriticality during CDA
論文審査委員	(主査) 高木 直行 山路 哲史 鈴木 徹 佐藤 勇

## 論文内容の要旨

高速スペクトル炉は、軽水炉の炉心とは異なり、最大反応度配置ではないため、炉心崩壊を伴うシビアアクシデント時に、反応度が添加されて再臨界に至る懸念がある。そのため各国研究機関は、燃料溶融時に炉心から燃料を排出するメカニズムを検討し、再臨界を回避できる原子炉を模索している。本研究では、JAEAで検討された標準的な円柱型の大型高速炉(JSFR : Japan Sodium-cooled Fast Reactor)をレファランス炉心とし、炉心形状の工夫で、炉心本来の特性によって再臨界を回避できる、固有の安全性を備えた炉心概念を開発した。

シビアアクシデント時に炉心内部の冷却材が喪失し、炉心が溶融して炉心下部にコンパクションし溶融炉心プールを形成した際の反応度( $\Delta \rho_{\text{comp}}$ : コンパクション反応度)を指標とし、この値が最小(負の大きな値)となる炉心仕様を、①健全時炉心形状の工夫、②溶融後のプール形状・組成の工夫という2つのアプローチで検討した。

第1のアプローチ、健全時の炉心形状の検討では、幾何学的バックリングに着目し、中性子漏洩が少なく楕円球に近い形状である凸型炉心を採用し、 $\Delta \rho_{\text{comp}}$ を評価した。即ち、JSFRと同体積で形状を凸型とした炉心を対象に、 $\Delta \rho_{\text{comp}}$ と炉心形状の関係を整理し、内側炉心高さ約1.5m、外側炉心高さ約0.5mの凸型炉心を選定した。この時、断面積ライブラリとしてJFS-3(JENDL-3.3)、実効断面積作成にはSLAROM、拡散計算は中性子拡散コードCITATION-FBRを用いて、エネルギー70群で2次元体系の計算を行った。さらに、内側炉心の炉心長がJSFRや既存の高速炉の2倍程度という長い炉心であるため、熱流動解析コードRELAP5-3Dを用いて、基本的な熱流動特性を確認した。代表的な流量減少型事象を対象に、炉心部の燃料・被覆管・冷却材の温度挙動を評価した結果、もんじゅ、JSFRの事故時挙動とほぼ同様の傾向を示し、凸型炉心概念における熱的成立性が見通せた。

凸型炉心の最適仕様を確定するために、内側炉心と外側炉心の体積比、Pu富化度分布、燃料ピン径を評価パラメータとした解析を実施した。形状を上下凸型炉心とすることで、負の

大きな  $\Delta \rho_c$  の見通しが得られたが、均一 Pu 富化度の場合、健全状態の炉心の線出力密度分布が内側炉心側に大きく偏る結果となった。そこで、内側炉心、外側炉心をそれぞれ 2 領域に分割し、4 領域の Pu 富化度を調整することで出力分布平坦化を試みたが、この調整によっては負の  $\Delta \rho_{comp}$  となる炉心は得られなかった。そこで出力分布平坦化のため、インポートランスの高い内側炉心のインベントリを低減させる方法として、BREST 炉のような、領域毎にピン径を変更した炉心体系の採用を試みた。中心に細径ピン、外側炉心に太径ピンを採用し、Pu 富化度を均一としたピン径調整型上下凸型炉心について、様々なピン径の組み合わせを検討し、各炉心仕様の出力分布、 $\Delta \rho_{comp}$  等の主要性能をまとめた。熔融後のプール堆積高さの低減で負の  $\Delta \rho_{comp}$  を達成する方法でのみ、解を得られる見通しを得た。一方で、インポートランスの大きい領域のインベントリを相当量削減したため、安全性は高まったが、燃焼反応度が大きく、サイクル長が極端に短くなり、炉心性能に対しては大きなインパクトを与える結果となった。

第 2 のアプローチとして、JSFR と同型の円柱型炉心で、コンパクション後のプールの形状や組成を工夫し、負の  $\Delta \rho_{comp}$  を達成する方法を検討した。コンパクション後の形状の幾何学的バックリングを増大させるため、径方向ブランケットの下部を削除し、熔融燃料が堆積する部分の表面積を大きくする方策を検討した。径方向ブランケット炉心の 2 層分について、下部を約 30cm 削除したケースで、プールが炉心層の外周にまで拡大した場合にはプールの実効増倍率が小さくなり、大きな負の  $\Delta \rho_{comp}$  を達成できることを確認した。さらに、熔融炉心プールが想定通りに最外周まで広がらない場合についても検討を加えた。部分熔融炉心として、内側炉心のみを想定する。内側炉心領域の集合体下部の軸方向ブランケット部に SUS による反射体と  $B_4C$  吸収体を配置し、健全時には反射効果で炉心の臨界性を保ちつつ、熔融時には熔融炉心プールと混合し、中性子吸収が期待できるように工夫し、その際の反応度効果を解析した。40cm ある炉心下部軸ブランケット領域を、上部 20cm を反射体に、下部 20cm を中性子吸収体としたケースについて解析を実施した。内側炉心による熔融炉心プールに、下部領域の反射体、吸収体が均質混合するとの想定で解析した結果、熔融炉心プールは未臨界となり、大きな負の  $\Delta \rho_{comp}$  を達成できることも確認できた。

これらを踏まえ、大型の高速スペクトル炉心として、炉心形状の工夫のみで再臨界が回避できる、炉心概念の提案をまとめた。

## 論文審査結果の要旨

本研究は、炉心崩壊事故時の再臨界を回避する高速スペクトル炉心について、健全時炉心形状の工夫や、溶融後のプール形状・組成の工夫という二つのアプローチで検討している。高速炉は本来の特性として最大反応度体系になく、炉心崩壊・燃料凝集時に正の反応度が投入される性質を有するが、本研究では、崩壊に伴うバックリング変化着目し、その反応度効果を有効に設計に取り入れた高速炉炉心概念を提案しており、独創性のある研究と認められる。

従来研究が前提としていた炉心領域外への燃料排出を行うことなく、崩壊に伴う炉心形状の変化による中性子漏れの増大効果で炉心崩壊時の臨界性を低下させるアイデアは革新的で工学的意義がある。能動的機構に因らない、炉心固有の特性で安全性を追求した研究である。最終的には、「健全時炉心形状」を工夫して幾何学バックリング $B_{g2}$ を小さくした方策（上下凸型炉心）よりも、「溶融後のプール形状・組成」を工夫しプールの幾何学バックリング $B_{g2}$ を大きく、もしくは材料バックリング $B_{M2}$ を大きくする方策（径方向ブランケット下部削除+炉心下部中性子吸収体設置炉心）の効果が大きいことが示されたが、異なる二つのアプローチを持ち、各々の効果を定量的に評価した本研究は、高速炉の炉物理的考察を深め、今後の実用化を目指す高速炉の工学的対策の多様性を広げる工学的意義がある。

炉心崩壊の進展は短い時間の中に、様々な原理に基づく多数の現象が進行するためその評価は複雑である。崩壊後の炉心には上部ブランケットが落下し一時的に正の反応度を与えることも考えられるが、本研究ではそうした知見を踏まえ、保守的な条件の下で検討が行われている。健全時やULOF時の除熱についてはRELAPを用いた解析が行われているが、崩壊後炉心の崩壊熱除去も重要な視点であり、その冷却性を考えることも重要である。

炉心崩壊時の挙動を把握する上では、炉心を構成する燃料・材料の物性や状態変化のメカニズムを把握する必要があり、提案された炉心概念の工学的成立性を確認する上では、燃料材料、プラント設計や安全解析といった各分野の視点の評価が必要となる。商業炉の炉心燃料として、構成要素の種類を増やしたり、構成を複雑にすることは極力避けるべきだが、提案された炉心概念は原理や構成が従来概念に比べて単純である。

「健全時炉心形状」の工夫よりも、「溶融後のプール形状・組成」の工夫が有効との結果が得られ、これは国内外の研究機関が進める高速炉開発の方向性と一致した結果となっているが、本研究では溶融燃料を炉心外へ排除することなく未臨界を達しうることを示した点に独創性がある。材料バックリング $B_{M2}$ を大きくする方策（炉心下部中性子吸収体設置炉心）はその対象領域を内側炉心のみに限定しなければさらに異なる炉心概念にもつながる発展性がある。