

# 博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

第 6 号

平成22年度

香川大学大学院工学研究科

## は し が き

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、本学工学研究科において博士の学位を授与した者の「論文内容の要旨及び論文審査結果の要旨」を収録したものである。

学位記番号に付した「甲」は学位規則第4条第1項によるもの、「乙」は同規則第4条第2項によるものであることを示す。

## 目 次

学位記番号	氏 名	論 文 題 目	頁
博甲第61号	林 宏年	地域の災害特性を反映したコミュニティ防災マップの方法に関する研究	1
博甲第62号	三宅 信一郎	多目的近似最適化手法を用いた医療用足裏サポートの開発	5
博甲第63号	武田 勝徳	進行中の時系列データにおける構造変化早期検出に関する研究	9
博甲第64号	磯打 千雅子	地域継続力向上を目指した建設業の事業継続計画(BCP)策定支援システムの開発と実践	12
博甲第65号	山口 和範	鋼橋の維持管理の合理化のための構造システム信頼性評価手法の開発に関する研究	16
博甲第66号	高 宝豊	Development of the Motion Control and Particle Swarm Optimization of the ICPF Actuated Underwater Microrobot System	20
博甲第67号	肖 楠	Study on a Micro-operating System for Biomedical Applications	26
博甲第68号	趙 子鑫	Study on the Acoustic Communication Network for Multiple Underwater Vehicles	32
博甲第69号	堀井 泰聡	灯火制御による直接視界支援システムと人間との相互作用に関する研究	38
博甲第70号	竹村 明洋	Cu含有鋼の表面赤熱脆性抑制に関する研究	43
博甲第71号	八木下 和宏	ジアルキルリン酸亜鉛系化合物を活用したエンジン油の耐久性および省燃費性向上に関する研究	47

氏名(本籍)	林 宏年(香川県)
専攻	安全システム建設工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第61号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成22年9月30日
学位論文題目	地域の災害特性を反映したコミュニティ防災マップの作成方法に関する研究
論文審査委員	(主査) 長谷川 修一 (副査) 白木 渡 (副査) 山中 稔 (副査) 野々村 敦子

## 論文内容の要旨

近年、日本国内の降雨状況が今までと異なってきており、1時間に100mmを越す豪雨が多発している。台風や大雨に慣れているはずの南九州でも大規模の土砂災害が発生し、本州の各地でも洪水災害が多発している。今後雨次第では全国で同様な災害が発生してもおかしくない状況になってきている。

また、わが国では、急速な少子高齢化と過疎化が地域防災力の低下を加速しているなかで、豪雨災害から人命や財産を守ることが大きな課題の一つになっている。

豪雨災害を防止あるいは軽減するため、構造物によるハード対策や警戒避難体制の整備やハザードマップの整備などのソフト対策が進められている。しかしながら、行政から提出されたハザードマップは必ずしも災害時の住民の安全な避難にうまく利用されていない。一方、住民が主体となって作成したコミュニティ防災マップは専門家が関与していないため、避難等に必要で重要な防災情報が十分ではない。

本研究では、高松市を研究対象として、沿岸地域、中流地域および中山間地域の各地域における災害ごとのコミュニティ防災マップ作成を通じて、住民が安心して避難するために必要な防災情報と社会条件について明らかにした。

本論文は、大別すると以下の4つから構成される。

### 1. 沿岸市街地における地震時避難経路危険度マップ

地震ハザードマップは、地震災害や津波災害を対象とした被害想定に関する研究は数多く存在するが、連動して発生する両災害を考慮して検討・評価した事例は少ない。本研究は、地震発生から津波襲来までの状況を表現するため、建物倒壊による道路占有規模の避難経路危険度評価マップを津波浸水想定区域図上に統合する方法で、住民の災害イメージ化を図り、地震による建物とブロック塀の倒壊および津波浸水予測図を地理情報システム

(GIS)により統合した地震時避難経路危険度評価マップの有効性を、高松市中心部の住宅密集地におけるワークショップにより検証するとともに、以下の事項を明らかにした。

- ・ 避難経路危険度評価には道幅が大きく影響し道幅が狭いほど危険度が高い
- ・ 避難経路危険度評価マップを用いることにより、地震災害のイメージが明確となり、家族で避難経路を決めるなどの行動につながる

## 2. 中流域の平野部における洪水避難マップ

行政から提出されたハザードマップの洪水浸水予想図に加えて過去の災害履歴と旧河道を表示し、住民の避難に役立つ洪水ハザードマップとその作成方法を提示し住民と専門家が協働で防災マップを作成する際に住民が関わる程度が住民の防災意識にどのように現れるかを、住民参加のプロセスを異にする防災マップ作成段階のアンケート調査によって比較・分析し、以下の事項を明らかにした。

- ・ 住民参加による現地調査プロセスの有無が防災意識を変化させる
- ・ 局地的な災害に対応するため、行政作成の防災マップの情報に専門家による微地形分類を加えることが有効であるが、その表示に関する合意形成が不可欠である

## 3. 上流域の中山間地における土砂災害一時避難場所マップ

土砂災害ハザードマップは、近年整備が進展し、住民の土砂災害危険個所の所在に関する認識は従来に比べて進んでいると考えられるが、マップの認知度は一向に上がらず活用されていない実態がある。また、中山間地の住民には、土砂災害などによる危険が迫っても避難しない傾向がある。その理由として、「広域的に土砂災害危険箇所が指定され、避難するより現在の住家のほうが安全、避難所までが遠い、避難経路が危険」などがあげられる。利用者としての住民の視点からみたハザードマップ作成へとステップアップしていくために、住民が安全に避難するために必要な情報が何かを明らかにしていく必要がある。本研究では、避難が困難な集落の住民を対象に、豪雨災害時に比較的容易に逃げる事が可能な集落内における一時避難場所の選定手法を提案した。また、アンケート調査から、リスクマネジメント上特に優先的に避難すべき住民の抽出方法について提案し、コミュニティ防災マップに「安全な土地にある一時避難場所」を表示した土砂災害一時避難マップを作成した。

## 4. 地域の災害特性を反映したコミュニティ防災マップの作成方法に関する研究成果のとりまとめ

三地域の防災マップ作成事例から、地域の災害特性を反映し、住民のリスクコミュニケーションに有効なコミュニティ防災マップの作成方法として以下の視点が重要であることを明らかにした。

- ① 地域防災リーダーと専門家の協働による計画立案
- ② 住民による現地調査とワークショップの有効性
- ③ 行政のハザードマップの有効活用
- ④ 専門家による災害に係る微地形、住宅環境等の抽出と表現方法の支援

## 審査結果の要旨

本論文は、行政が住民に提供するハザードマップの有効性と限界を把握したうえで、行政のハザードマップの情報を活用し、さらに地域コミュニティレベルの災害特性を明確にしたコミュニティ防災マップの作成方法に関する研究成果を取りまとめたものである。著者の林宏年氏は、その研究成果を博士後期課程在学中に学術雑誌論文3編および国際会議論文集に1編公表している（そのうち筆頭著者は3編）。本論文は、これら一連の研究を学位請求論文としてとりまとめたものであり、学術的に高く評価できるとともに、地域防災を推進するうえでも有益であると判断される。以上のことから、審査委員全員一致して、博士論文に値するものと判定した。

本論文は、以下の7章から構成される。

### 第1章 序論

ハザードマップに関する研究をレビューし、行政の提供するハザードマップの有効性と限界および住民が主体となって作成したコミュニティ防災マップも問題点を検討し、コミュニティ防災マップ作成方法に関する研究の必要性を明らかにした。

### 第2章 研究対象地域と研究方法

高松市を研究対象として、沿岸地域、中流地域および中山間地域の各地域において、現地調査やワークショップによる地域住民と協働した実践的な防災マップ作成方法を提案した。

### 第3章 中流域の住民と専門家が協働した洪水ハザードマップの反応と課題

本地域では行政から提出された洪水ハザードマップに過去の災害履歴と旧河道を表示し、住民の避難に役立つ洪水ハザードマップとその作成方法を提示した。またコミュニティ防災マップと同時期に配布された高松市防災マップについてアンケート調査を行い、コミュニティ防災マップの有効性を検証した。さらに、住民が現地調査に関わる程度が住民の防災意識に与える影響を検証した。

### 第4章 沿岸地域の住宅密集地における地震・津波災害時の避難経路危険度マップの作成

本地域では、建物倒壊による道路占有規模に基づく避難経路危険評価マップと津波浸水想定区域を統合した地震時避難経路危険度評価マップの有効性を、ワークショップとアンケートにより検証した。

### 第5章 中山間地における土砂災害に対して安全な一時避難場所選定のための意識調査と選定方法の検討

本地域では、住民のアンケート調査結果によって豪雨時に住民が避難しない理由を確認したうえで、避難が困難な集落の住民を対象に、豪雨災害時の身近な一時避難場所の選定

手法を提案した。また、今回提案した手法による住宅の土砂災害リスクとアンケート調査による住民の土砂災害リスクの認識をモデル地区において比較して、優先的に避難すべき住民の抽出方法について検討した。

#### 第6章 地域の災害特性を反映したコミュニティ防災マップの作成方法

3地域の防災マップ作成事例から、住民のリスクコミュニケーションに有効なコミュニティ防災マップの作成には、地域の災害特性を反映するとともに、以下の観点が重要であることを評価・検証した。

- ① 地域防災リーダーと専門家の協働による計画立案
- ② 住民による現地調査とワークショップの有効性
- ③ 行政のハザードマップの有効活用
- ④ 専門家による災害に係る微地形、住宅環境等の抽出と表現方法の支援

#### 第7章 結論

本研究成果をまとめ、今後の課題を提示した。

## 最終試験結果の要旨

平成22年7月26日(月)13:00~14:30、工学部2209演習室において公聴会を開催した。研究発表60分間、口頭試問を兼ねて質疑応答を約30分間行った。また、公聴会后、最終試験を行った。最終試験の概要は以下のとおりである。

質問：住民による防災マップの作成は単なるマップ作成の方法論だけでは不十分で、行政を巻き込む必要があるではないか？

回答：本研究では、防災の専門家が住民と協働して実施する防災マップの作成方法を提案している。次のステップとして、専門家が住民と行政の橋渡しとなることが重要であると考えており、今後は専門家と行政の橋渡しの方法を検討して行きたい。また、専門家は建設コンサルタントや大学の研究者だけでなく、NPO法人の活用も両者の溝を埋める方法だと考えている。

質問：防災マップの作成は、場合によっては責任問題が発生するかもしれない。このためにも行政に関わってもらった方がいいのではないか？

回答：その通りである。住宅販売会社からクレームが来た旧河道の表示は、行政の洪水ハザードマップ作成マニュアルには入っていない。行政が提供するハザードマップに旧河道などの浸水リスクのある微地形を表示できれば住民は助かる。

質問：ハザードマップも被害予測は大きいと住民はあきらめて、逆効果にならないのか？

回答：これまでの土砂災害ハザードマップでは、中山間地の居住地がすべて土砂災害危険箇所になって、おっしやるとおりになっている。本研究では、比較的安全と考えられる住宅を選定する方法を提案したものである。

質問：高松市を対象とした理由は？

回答：沿岸部の地震津波災害、中流域の洪水、中山間地の土砂災害と地域別に代表的なハザードを検討できるためである。また高松市のハザードマップ作成に関わったため、高松市のハザードマップの有効性と限界も感じていた。

質問：防災マップに活用する地図は何がいいのか？

回答：これまでは民間の住宅地図を活用して防災マップを作成してきたが、国土地理院から精密な数値標高データや航空写真オルソ画像が提供されるようになってきているので、今後は地域や目的に応じて国が提供する地図情報も活用したい。

申請者は、この他の質問に対しても的確に答えたので、最終試験は合格と判断した。

氏名(本籍)	三宅 信一郎 (香川県)
専攻	信頼性情報システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第62号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成23年3月24日
学位論文題目	多目的近似最適化手法を用いた医療用足裏サポートの開発
論文審査委員	(主査) 荒川 雅生 (副査) 白木 渡 (副査) 井面 仁志

## 論文内容の要旨

ヒトの足は長時間の荷重に耐え、平坦で滑りやすい地、あるいは、不安定な道でも緩急自在な歩行を可能にしている。そのためには安定性(強固さ)と同時に、荷重を吸収・分散させる柔軟性を兼ね備えた足が必要である。足部は足趾を除いて12の骨から構成され、解剖学的、機能的に後足部・中足部・前足部に分けられ縦のアーチを構成し歩行時の負担を吸収している。この足裏の正常な縦アーチが何らかの原因によって失われてしまう足裏の障害を扁平足という。後天的にも外傷、スポーツ障害等さまざまな原因で発症する。扁平足の主な症状は、「歩行障害」「足裏の痛み」「足の関節障害」「膝や股関節の関節障害」などがあり、症状が進むとさまざまな生活の障害を生じる。スポーツ領域においても足の障害は頻度が高いとされるが、重傷度が比較的低いものが多く放置されるケースが多い。障害の要因としては練習量や内容、扁平足のような足の構造、それに伴うシューズの土踏まず部の支えが不十分なことが問題になっている場合も少なくない。この扁平足の治療法として足底アーチの構造の蘇生・回復をさせ、正常な状態に



サポートしながら歩行時の衝撃吸収を行うアーチサポートの使用が効果あることは報告されている。

最近ではスポーツ用品、健康用品でさまざまなアーチサポートを購入することができるが使用者の症状を把握して製作、装着されておらず、足のサイズしか選択できず、このようなアーチサポートはその患者一人一人の症状に本当に合っているとは言いがたい。筆者らの研究において市販のアーチサポートを装着した場合の扁平足の改善効果は個人個人の扁平足の程度により異なるという結果を筋電図計測による実証実験から確認している。

扁平足の程度は個人によっても異なり、適正な形状の基準や方法はなく、扁平足判定法としてH-ライン法、面積法、横倉係数などが比較報告されているが、本研究においては足部を外側直角からレントゲン撮影し、その投影図より足部を立体的構造的に把握しようと考えられた横倉法を基準とし、それにこの横倉測定点を通じて足格構造の立体的把握を水野式の基準に合わせることにした。水野式基準では足の骨の位置をベースにその基準値と許容するずれを示したものである。水野式による静力学的扁平足の測定方法では足の骨の位置を表現するために、以下のような点を採用。Oは踵骨隆起端、Yは内側種子骨の下縁、Lは楔状骨と中足骨の関節の midpoint 位置、Nは親指の内側楔状骨と中間楔状骨の関節の中心、Cは距骨と舟状骨の関節の中心、mは第5中足骨下端、mは立方骨の最下点、fは踵骨立方関節前下端の点である。

本研究では各点はレントゲン写真においてプロットし、その結果を画像解析することで各値を自動的に算出するようにした。なお、水野式基準において高さとは、各点からの垂線と線分OYとの交点との距離を線分OYの長さを100としたときの各線分の長さとして表し、%mmという単位で表している。レントゲン写真から足のアーチ形を計測し、アーチサポートの形状を決定するパラメータを変数として、水野式基準からの差異の最小化を目的とした多目的最適化を用いることにより、この症状を治療できるような医療用のアーチサポートを開発することを目的とした。

本研究では、レントゲン写真から水野式基準値を、必要な点を画像上でプロットすることで自動的に取得できる画像解析システムを開発した。実際に個人個人に対応した力学的モデルを構築することは不可能であったので、荒川らが検討を進めていたRBFネットワークを利用した近似手法を用いることにした。最初に内側において必要な高さを得るために2次元モデルに適用し、その有効性の検討を行った。次に3次元モデルに拡張することでより正確に個人に応じた結果を得ることに成功した。この2次元モデル、3次元モデルの双方に対して、最適化結果の実証のために、筋電図のデータを最適なものとそれ以外のアーチサポートで比較すること、扁平足の患者と正常な被験者での違いを比較することにより開発した手法の有効性の検討を行った。

本論文では扁平足の治療の現状を簡単にまとめ、横倉法の実施のために開発した画像解析システムをまとめる。母趾側の2次元サポートを主目的とし、近似最適化手法に基づいて形状最適化を行った。ここでの目的は、近似最適化として形状を2次元とすることで設計変数を抑え込むことで、近似すべき個人の扁平足の修正状況といういかなる方法をもって正確に関数化すること、解析することが困難な問題に対して上記の手法が適用可能であるかを実証することに主眼を置いた。適用事例を示しその検証結果をまとめる。6章では5章で基本的な検討を終え、本研究で指向した方法でのサポートの開発が可能であることがわかったので、3次元モデルを作り、より正確に必要な高さに各部位が保てるような足裏サポートの開発を行い、開発した足裏サポートの有効性の検証を行ったのでその結果をまとめる。

## 審査結果の要旨

本論文は、3編の主論文を基に、7章から構成されている。

第1章では、偏平足の治療を目的とした足裏サポートの現状について論じている。市販の足裏サポートの場合、歩行時の疲労軽減を目的としており、偏平足の解消を目標としたものではない。医療用の足裏サポートは、理学療法士と患者が相談して装着するが、患者個人への適性を本当の意味で考慮しているものではなく、場合によっては装着が事態を悪化させていることなどを述べ、個人個人に対応した適切な足裏サポートの必要性を論じている。第2章では、偏平足の治療の現状を紹介している。偏平足とは、足の骨の方向に沿った縦アーチや、それを横断する横アーチが何らかの理由により十分な高さを有しない場合であり、歩行時に骨や、筋肉に余分な負荷がかかるために発生する様々な障害をさす。足の骨の位置を適正な高さに保つことが重要となるが、足の骨の高さの計測方法として、レントゲン画像から判断する横倉法の説明、および、その位置の基準値となる水野式基準値について説明している。第3章では、横倉法で、骨の位置を計測するためのシステム開発について論じている。水野式基準に合わせるためには、踵の骨の下端と親趾の付け根の骨の下端を結ぶ線を基準とするが、これを自動的に水平にするための画像処理の自動化と各ポイントをクリックすることで自動的に算出するシステムを開発した。また、力学モデルの構築を目的として荷重を付加した場合と無負荷の場合の差を合成することで見やすくする機能を持たせた。負荷状況からばねモデルを構成することを目指したが、筋肉の非線形性から、同定すべきパラメータが多く、正確な力学モデルの構築が困難であることが分かった。この結果から、足裏サポートを装着した時の骨の位置を関数として考え、このブラックボックス関数に対する最適化ととらえて開発を行うこととした。第4章ではブラックボックス関数に対してデータ数が少なくても実施が可能なRBFを用いた多目的近似最適化手法の説明を行っている。第5章では親趾側の断面の足裏サポート形状の多目的近似最適化を行った。サポートの形状を2次元のスプライン曲線と考え、水野式基準の計測ポイントの高さを2か所変数と考え形状を表現した。骨の高さを可変させるために石膏を用意し、21個のパターンの計測結果から、水野式基準との差の最小化を目的とし、許容値を希求水準とする多目的最適化を行った。得られた形状で計測した結果、ほぼ目標値に達していた。検証として、筋電位図から筋肉使用料で比較した。その結果、偏平足の患者に対しては最適化した足裏サポートを装着した場合が、装着しない場合、市販の足裏サポートを装着した場合、不適切な高さのサポートを装着した場合のなかで最も少ない量であることが分かり、提示した手法の有効性を示すことができた。この結果を受けて、縦アーチばかりではなく、横アーチも考慮するために3次元スプライン関数を用いて足裏サポートを表現した。(6変数) 27個のデータから始めて、1回の最適化で10データ追加する形で最適

化を開始した。3回の追加でほぼ希求水準を満足する結果を得たので、ここで最適化を終了した。やはり筋電位図から検証した結果、適正なサポートが最も筋肉使用料が小さいことが分かり、提示した手法の有効性を示した。第7章では本論文の結言を論じている。本論文では、足裏サポートの形状を決定する変数に対する、骨の高さを関数としたブラックボックス関数を少ないサンプル数から近似し、多目的最適化を通じて医療用の足裏サポートを開発する手法を提案したものである。また、開発された足裏サポートを実施に装着し、筋電位図より筋肉負荷量の低減を確認し、開発された医療用足裏サポートの効果の検証を図り、提示した手法の有効性を示している。

## 最終試験結果の要旨

本論文は扁平足の治療のために個人個人に対応した足裏サポートの開発を目的とした論文である。3つの主論文から、7章で構成されている。扁平足の治療のためには個人個人に対応した足裏サポートの装着が必要であるが、現状では、理学療法士の経験と勘、および、患者の感性から試行錯誤的に作成している。その結果、足裏に必要なアーチが治療として必ずしも十分な高さを保てない場合もある。その場合、かえって患者に負担になることも考えられた。本論文では、足裏サポートの形状に対する、骨の位置という関数をブラックボックス関数と考え、RBF ネットワークを利用した多目的近似最適化を用いた手法の提案を行っている。足の骨の位置の計測には、横倉法を用い、その基準として水野式基準を用いた。水野式基準からの差異の最小化とみる多目的最適化問題を構成した。足の骨のレントゲン撮影の結果から水野式で必要な計測点をクリックすることで自動的に算出するシステムの開発をし、最適化のためのデータを収集できるようにした。2次元問題に対しては2変数でサポート形状を表現し、21個の計測データから個人に対応した足裏サポートの開発に成功し、筋電位図による計測から結果の検証を行っている。この結果を受けて3次元問題に拡張し、6変数でサポート形状を表現した。ランダムに生成した27個の形状に関する計測から始めて、10個ずつ、3回データを追加することで、ほぼ希求水準を満足する結果を得た。その結果をはやり、筋電位図による計測から結果の検証を行っている。以上をまとめると、本論文で提案した手法を用いて開発された医療用足裏サポートは水野式基準を満足し、かつ、筋肉使用料を低減させる効果があることも分かり、提示した手法の有効性を確認することができた。本論文で論じている手法は、医療用の足裏サポートの開発に供するシステムの開発であり、工学的に意味深いものであり、最終試験として合格であると判断した。

氏名(本籍)	武田 勝徳 (徳島県)
専攻	信頼性情報システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第63号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成23年3月24日
学位論文題目	進行中の時系列データにおける構造変化早期検出に関する研究
論文審査委員	(主査) 服部 哲郎 (副査) 堀川 洋 (副査) 北島 博之 (副査) 山崎 敏範

## 論文内容の要旨

現在進行中の時系列予測は、予測モデルの構築、構築モデルに基づく予測をしつつ、観測された実データと予測モデルとの乖離検出(構造変化発生検出)を行う段階、そして、構造変化検出後、以降の時系列データに対する予測モデルの再構築、という3段階から成る。

このような現在進行中の時系列予測は、種々の分野で使われており、在庫管理、設備管理における意思決定局面への適用などがある。例えば、設備管理では、時間とともに劣化する資本設備を取替える適切な更新時期を見出すことが必要となる。

構造変化検出法、或は、変化点検出方式は、従来から研究されており、大別すると、データを蓄積してから過去に生じた変化点を検出する一括的手法と、新規データを観測する毎に変化が発生していたか否かを判断する逐次的手法に分類できる。すなわち、現在進行中の時系列データに対する構造変化検出は、逐次的手法となる。前者の一括的手法の代表的な方式は、経済学や品質管理分野では標準的手法となっている **Chow Test** である。**Chow Test** は回帰モデルに基づいており、時刻  $t$  で変化が生じたという仮説を設定して統計的検定を行う手法である。この一括的手法としての **Chow Test** を、現在進行中の時系列データに対して、その時点までの蓄積データに対してその都度適用すれば、逐次的手法として用いることができる。

本論文では、時系列モデルが実データと乖離する時刻(時系列モデルの更新時期)を推定する2つの有用な検出方法を提案している。すなわち、逐次確率比検定(**SPRT: Sequential Probability Ratio Test**)による変化点検出方式と、コストを考慮した時系列モデル更新時期決定を最適停止問題(**Optimal Stopping Problem**)として定式化する方式である。最適停止問題としての定式化では、アクション(処置)コストと、そのアクションを起すまでの累

積コストとの総和の期待値を与え、この期待値を最小化する動的計画法(DP: Dynamic Programming) に基づいている。

本論文では、これら2つの構造変化検出方式を詳述するとともに、意義のある早期検出性と正確性について、実験による調査分析を行い、有効性を論じた。これら2つの手法は、本来、時系列の予測モデルに依存しない手法ではあるが、実用的には一般に回帰モデルが用いられているので、特に回帰モデルに基づく標準的構造変化検出法としての Chow Test と比較実験をし、その実験結果についての考察を述べた。

## 審査結果の要旨

現在進行中の時系列予測は、予測モデルの構築、構築モデルに基づく予測をしつつ、観測された実データと予測モデルとの乖離検出(構造変化発生の検出)を行う段階、そして、構造変化検出後、以降の時系列データに対する予測モデルの再構築、という3段階から成る。このような現在進行中の時系列予測は、種々の分野で使われており、在庫管理、設備管理における意思決定局面への適用などがある。

本学位論文では、時系列モデルが実データと乖離する時刻(時系列モデルの更新時期)を推定する2種類の有用な検出方法を提案している。すなわち、逐次確率比検定(SPRT: Sequential Probability Ratio Test)による変化点検出方式とその拡張、及び、コストを考慮した時系列モデル更新時期決定を最適停止問題(Optimal Stopping Problem)として定式化した方式である。最適停止問題としての定式化では、アクション(処置)コストと、そのアクションを起すまでの累積コストとの総和の期待値を与え、この期待値を最小化する動的計画法(DP: Dynamic Programming)を活用している。

本論文では、これら2種類の構造変化検出方式を提案し詳述するとともに、意義のある早期検出性と正確性について、実験による調査分析を行い、その有効性を論じている。すなわち、これら2種類の手法は、具体的な時系列予測モデルに依存しない手法ではあるが、実用的には回帰モデルが多用されているので、回帰モデルに基づく標準的な構造変化検出法としての Chow Test と比較実験して有用性を論じている。

以上の内容は、次の様な学会論文誌等(ジャーナル誌3本、国際会議論文2本)に掲載された主要論文に基づいて書かれており、その内容の新規性と有用性から、博士論文として相応しいものと判定する。

[1] 武田勝徳, 服部哲郎, 川野弘道: "重回帰モデルにおける時系列構造編み検出のための逐次確率比検定——有用性の実験的評価——", 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門), IEEJ Trans. EIS, Vol.131, No.2, pp.442-450, 2011.

[2] Katsunori Takeda, Tetsuo Hattori, Tetsuya Izumi, Hiromichi Kawano and Shinichi Masuda: "Application of SPRT to Image Data Sequence for Remote Monitoring

System", International Journal of Artificial Life and Robotics, Springer, ISSN: 1433-5298, Vol.15, No.4, pp.421-424, 2010.

- [3] Hiromichi Kawano, Tetsuo Hattori, Katsunori Takeda, Tetsuya Izumi: "Early Structural Change Detection as an Optimal Stopping Problem --- Solution Theorem and its Proof Using Reduction to Absurdity ---", International Journal of Artificial Life and Robotics, Springer, ISSN: 1433-5298, Vol.15, No.4, pp.425-430, 2010.
- [4] Tetsuo Hattori, Katsunori Takeda, Hiromichi Kawano: "Structural Change Detection as Optimal Stopping Using DP --- Experimentations in Real Data ---", Proceedings of the International Conference on Humanized Systems (ICHS 2010), ICHS, SICE, pp.138-142, ISBN 978-4-9905392-0-7, Sep.17-19, 2010.
- [5] Hiromichi Kawano, Tetsuo Hattori, Katsunori Takeda: "Three Structural Change Detection Methods for Time Series and Experimental Comparison, Proceedings of the International Conference on Humanized Systems (ICHS 2010), ICHS, SICE, pp.149-156, ISBN 978-4-9905392-0-7, Sep.17-19, 2010.

## 最終試験結果の要旨

2011年2月21日に2時間の公聴会后、1時間30分程の最終試験を行った。最終試験では、比較評価実験に用いた CHOW TEST は勿論のこと、提案内容の2種類の方式である、SPRT とその拡張方式、及び DP による手法への具体的内容に関する質問があった。

すなわち、SPRT の計算方法や提案内容にある SPRT の拡張方式における統計量の実際的計算方法、更には、DP を用いるコストを考慮した構造変化検出法における定式化の意味や計算方法、マルコフ連鎖モデルとの関係、評価対象となった回帰モデルに基づく標準的構造変化検出方式である CHOW TEST の意味内容に至るまでの詳細な質問と討議が続いた。

これらの研究内容とそれに関連する質問に対しては、審査申請者からの詳細かつ丁寧な説明があった。

この質疑応答の中で、どんな時系列データでも SPRT 等の方が良いというのは考えにくい、CHOW TEST のほうが良いというデータもあるのでは、という審査委員からの見解も述べられた。また CHOW TEST の改良版は提案されていないのか、更には、構造変化検出と時系列予測モデルとの関係には、より追究すべき問題があるのではないかと語った趣旨も、将来の研究テーマになり得ると思われる内容に至る質疑も行われた。

一方、SPRT の応用例として、監視カメラから送られて来る、画像の JPG ファイル容量の時系列のみから、差分等の画像処理をしなくとも、画像内の動きや異常を検知するような構造変化検出が可能という、視覚的にも分かり易い実例が述べられたことが審査委員達の関心を惹き起こし、活発な質疑があった。

以上の様な質問や討議においては、一層の追究を要し、今後の課題でもある難しい内容も含まれているが、現時点での研究成果に基づく的確な質疑応答が行われたと考える。ま

た関連事項についても適切な応答がなされ、最終試験は合格と判定する。

氏名(本籍)	磯打 千雅子(神奈川県)
専攻	信頼性情報システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第64号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成23年3月24日
学位論文題目	地域継続力向上を目指した建設業の事業継続計画(BCP) 策定支援システムの開発と実践
論文審査委員	(主査) 白木 渡 (副査) 長谷川 修一 (副査) 井面 仁志

## 論文内容の要旨

大規模な災害が発生した場合において、地域が継続するためには、地域に所在する行政や企業等の地域組織の事業継続が第一義であり、そのための備えとして事業継続計画(Business Continuity Plan: BCP)の策定が行政機関や各種業界団体において推進されている。しかし、我が国におけるBCPの策定率は大企業で18.9%、中堅企業で12.4%と低く、普及啓発には多くの課題がある。

四国地方においては、南海地震が今後30年以内に60%の確率で発生すると予測されており、大規模災害発生の切迫性が指摘されている。香川県は、四国地方における行政機能の中核であり、全国規模の企業の重要拠点ともなっていることから、防災対策の整備は急務であることはもちろんのこと、個別組織の事業継続対策の推進が必要である。

災害発生直後の災害復旧対応においては、地域に所在する建設業の担う役割は大きい。地域のライフラインや道路・鉄道等社会インフラの早期復旧は、地域の生活者や地域経済の復興の大前提であり、大規模災害時において、地域の実情に精通した建設業の活躍が期待されている。従って、建設業の事業継続が地域の継続力向上に大きく寄与すると考えられる。

一方、香川大学危機管理研究センターが2008年に香川県内企業を対象に行った防災対策及びBCPに関するアンケート調査では、BCPを策定済みの企業は16%であり、その内訳は資本金10億円以上の企業が72%を占めており、中小企業にいたっては6%と、BCPの策定率は低いことがわかっている。

建設業においては、BCP 策定率は 41%と全業種の 16%に比較して高いものであったが、その内訳は資本金 10 億円以上の企業が多くを占めていた。また、アンケート結果からは、BCP 策定率が向上しない課題として、策定に必要なノウハウ・スキルの不足や、BCP に関する社内の意識啓発の必要性があげられ、これら課題を解決し、建設業の BCP 策定を支援することが、地域継続力の向上に繋がると考えられる。

本研究では、地域継続力向上を目指した建設業の事業継続計画（BCP）策定支援システムの開発を行うとともに、香川県内建設業の事業継続力向上を図る取り組みを行った。具体的には、まず BCP 策定・意識啓発を支援する勉強会を開催し、同じ地域に所在する企業同士が BCP 策定段階から連携が図れるよう、グループ討議形式によるワークショップを行った。勉強会後の参加企業へのアンケート結果では、自社の事業継続力向上はもちろんのこと、BCP 策定段階から地域の建設業同士や地域との連携の重要性が認識され、この取り組みが地域継続力向上に繋がる足がかりとなった。また、BCP 策定に関する費用や人的労力削減を目的に、BCP 文書の作成や文書の保持などを支援するシステムを開発し試行した。さらに、このような一連の取り組みの成果をもとに、BCP 策定支援システムの標準化を図り、今後香川県内他業種及び他地域への展開することを検討した。

本論文は、5つの章から構成される。各章の概要を以下に示す。

第1章は、本論文の序章である。本研究の着想に至った経緯、本研究の目的、研究全体の流れ、既往の研究を整理、論文の構成について述べる。

第2章は、大規模災害に対する地域継続力の現状と課題について、香川県の災害環境や防災課題、BCPに関する行政機関や団体の取り組みの現状、香川県内企業のBCPに関する取り組みの現状から、建設業のBCP策定支援の必要性について言及する。

第3章は、地域継続力向上を目指した建設業のBCP導入支援の取り組みについて検討し、実践した内容について述べる。

第4章は、BCP文書の作成や文書の保持などを支援するシステムの開発結果を述べ、さらにBCPを効果的に運用するためのマニュアルのアクティブ化の実践結果について述べる。

第5章は、地域継続力向上に向けた課題と解決策を述べる。

第6章は、本論文の結論として、本研究を通して得られた知見や分析結果を総括する。

## 審査結果の要旨

### （1）論文内容の審査

本論文は、香川県内の建設業の事業継続計画（BCP）策定支援を通して、香川県の地域継続力向上を目指した実践的な研究を取りまとめたものである。まず、BCP 策定・意識啓発を支援する勉強会を開催し、同じ地域に所在する企業同士が BCP 策定段階から連携が図れるよう、グループ討議形式によるワークショップを行っている。また、BCP 策定に関する費用や人的労力削減を目的に、BCP 文書の作成や文書の保持などを支援するシステムを開発し試



行している。さらに、この一連の取り組みの成果をもとに、BCP 策定支援システムの標準化を図り、今後香川県内他業種及び他地域への展開することを検討している。

本論文は、5章から構成される。各章の概要を以下に示す。

第1章では、本論文の序章として、研究の着想に至った経緯、研究の目的、研究全体の流れ、既往の研究を整理、論文の構成について述べている。

第2章では、大規模災害に対する地域継続力の現状と課題について、香川県の災害環境や防災課題、BCPに関する行政機関や企業の取り組みの現状から、建設業のBCP策定支援の必要性について述べている。

第3章では、地域継続力向上を目指した建設業のBCP導入支援の取り組みについて検討し、実践した内容について述べている。

第4章では、BCP文書の作成や文書の保持等を支援するシステム開発を行い、さらにBCPを効果的に運用するためのマニュアルのアクティブ化の実践結果について述べている。

第5章では、地域継続力向上に向けた課題について示し、その解決策を提案している。

第6章では、本論文の結論として、得られた知見や分析結果を総括している。

四国では、南海地震の発生が60%を超える高い確率で予測されており、災害発生後の効果的な対応が求められている。大規模災害発生直後にまずなすべきことは、被災地の住民の救命、財産の保守、生活の安定化である。そのためには、道路、鉄道、橋梁、港湾、上下水道等の社会基盤施設・設備の復旧が不可欠である。建設業の事業継続計画（BCP）策定支援を行うことは、災害時の社会基盤施設の早期に貢献するもの期待されており、時宜を得た研究テーマである。

この論文では、個々の建設業のBCP策定支援という観点だけでなく、地域継続力向上という観点から香川県内建設業を4グループ（高松、東讃、中讃、西讃）に分けて、建設業の地域連携を意図したBCP策定並びに意識啓発を支援する勉強会を開催し、企業同士がBCP策定段階から連携が図れるように工夫している点は、従来にない研究視点を有した新規性かつ実践性を有する研究である。

また、経費や人的労力がかからず容易にBCPの策定が可能なBCP策定支援システムを開発しており、過去のBCP策定支援研究に見られない取り組みで評価できる。地方の建設企業の企業体力が低下している中、効果的な支援となることが期待される有用な研究である。

さらに、この研究で開発したBCP策定支援システムを標準化する提案を行っており、今後香川県内他業種及び他地域への展開が期待できる発展性のある研究である。

以上、本論文はその新規性、有用性、発展性が高く評価され、博士（工学）論文として、十分価値を有するものと認められる。

## **（2）在学期間中の論文審査**

博士後期課程在学期間中の研究成果として、学術論文を5編掲載されている。5編中4編は、本人が筆頭著者である。

1) 磯打千雅子，白木渡：参加型事業継続計画策定手法とその効果について，（社）土木学

- 会, 安全問題研究論文集, Vol. 3, pp. 65-70, 2008 年 11 月.
- 2) 磯打千雅子, 有友春樹, 白木渡, 井面仁志: 実践的事業継続計画策定のための危機管理マニュアルのアクティブ化に関する研究, (社)土木学会, 土木情報利用技術論文集, Vol. 18, pp. 145-152, 2009 年 10 月.
  - 3) 磯打千雅子, 白木渡, 井面仁志: 実践的事業継続計画 (BCP) 策定支援を目的とした既存防災ストックの有効活用方策の提案, (社)土木学会, 安全問題研究論文集, Vol. 4, pp. 143-148, 2009 年 11 月.
  - 4) 井面仁志, 今井慈郎, 堀幸雄, 磯打千雅子, 白木渡, 石田香織: 防災教育を目的とした危機管理マニュアルのマルチメディア化と効果, (社)土木学会, 安全問題研究論文集, Vol. 4, pp. 89-94, 2009 年 11 月.
  - 5) 磯打千雅子, 有友春樹, 白木渡, 井面仁志: 減災対策・災害復旧における地域マネジメントの導入に向けた建設業の事業継続計画 (BCP) 策定の提案と実践, (社)土木学会, 安全問題研究論文集, Vol.5, pp.13-18, 2010 年 11 月.

## 最終試験結果の要旨

最終試験では、学位論文の内容に関わる審査委員の質疑に的確に回答することを求め、さらに学位論文に関連した分野での専門知識の確認を口述試験として実施した。その結果、博士（工学）として十分な学力を有するものと認められた。

なお、口述試験の内容と回答の概要を、以下に示す。

### (1) 開発システムの妥当性について

回答：本論文では、1)BCP 普及啓発活動（勉強会を含む）のノウハウの開発、2)BCP の策定支援システムの2つのシステム開発を考えている。1)については、勉強会終了時点で実施したアンケート結果で妥当性を確認している。2)については、BCP を策定した建設業 10 数社を対象としてシステムを使用した演習を実施し、その有効性を確認している。

### (2) BCP及び危機管理マニュアルの常時利用性について

回答：ご指摘の通り、BCP や危機管理マニュアルは緊急時しか活用されないもので、利用すべき時に使えないといった課題が指摘されてきた。本研究では、システム開発のコンセプトとして、単にBCP のドキュメント作成支援だけでなく、WEB を活用したシステム開発を挙げており、通常の業務でも利用可能な環境整備を整えている。このように、常時の業務でも利用できるようにすることで、緊急時の利用しやすさを工夫している。

### (3) 地域継続力向上における行政の関わり方について

回答：ご指摘の通り建設業が BCP を策定するだけでは地域継続力が向上することが期待できない。当然、地域の行政機関との連携が必要である。四国における建設業 BCP 策定支援事業は、四国地方整備局、四国 4 県庁、四国 5 大学、四国 4 県の建設業協会が協力

して実施しており、各県に研究部会を設置して支援を実施している。本研究は、香川県部会の事業の一部として香川大学危機管理研究センターが中心に実施した地域貢献研究の成果である。

#### (4) 今後の方向性について

回答：この論文で開発したシステムの今後の展開としては、建設業の BCP 策定支援に限定してきたシステムを、他業種（例えば、情報通信、電気、ガス供給企業等のライフライン企業）への展開することを考えている。また、単に地域の組織単位の BCP の策定支援だけでなく、各組織の BCP 策定が地域全体の継続に繋げるために必要な仕組みが必要であると考えている。そのために、本研究では、地域継続マネジメント協議会の設立を提案している。この実現に向けて今後とも研究を継続していきたいと考えている。

氏名（本籍）	山口 和範（鳥取県）
専攻	信頼性情報システム工学専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 65 号
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学位授与の年月日	平成 23 年 3 月 24 日
学位論文題目	鋼橋の維持管理の合理化のための構造システム信頼性評価手法の開発に関する研究
論文審査委員	(主査) 白木 渡 (副査) 松島 学 (副査) 井面 仁志

### 論文内容の要旨

我が国の道路橋の多くは高度経済成長期に建設されており、2020 年頃には全橋に占める割合が 25%になり、2030 年頃には 50%になると予測されている。このように、急激に道路橋の老齢化が進行しており、橋梁の維持管理が重要な課題となっている。また、近年、鋼橋の様々な損傷事故が報告されており、例えば、2007 年には米国ミネソタ州ミネアポリスにおいて供用中の橋の落橋事故が発生している。また、我が国においても、三重県の本曾川大橋や秋田県の本荘大橋でトラス部材破断事故が発生しており、既設鋼橋の安全性の再検討が求められている。

構造物への信頼性理論の応用については、外力の確率特性が明確な場合や構造のモデル化がシンプルな場合で、しかも構造物を構成する部材レベルについては適用が進んでいる。一方、構造物の全体システムとしての信頼性評価は、構造物が高次の自由度を有する不静

定構造物であることから、適用が難しいのが現状である。

また、鋼構造物の強度への経年的影響の重要な要因として鋼材の腐食や疲労亀裂が挙げられるが、個々の構造物でその発生傾向は異なっており統計的な整理が困難である。しかし、維持管理の観点からは腐食の進行がどの程度まで許容され、また補修を行うことによりどの程度構造物の信頼度が向上したかを把握するのは重要である。また、活荷重の確率特性も経時的に変化する可能性があり、このような変動要因に対して柔軟に対応できる構造システムの信頼性評価手法の開発が望まれている。

このような観点から、本論文では、高次の不静定構造物への対応、腐食や疲労の限界状態の時系列評価が可能な「拡張型効率化モンテカルロ法」の考え方を提案し、構造システム信頼性評価手法の開発を行った。

本論文は7章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。第1章は、本研究の着想に至った経緯、本研究の目的、既往の研究を整理、論文の構成について述べる。第2章では、構造システム信頼性評価の現況の課題を述べ、これに対応した拡張型効率化モンテカルロ法の提案を行った。第3章では、第2章で提案した拡張型効率化モンテカルロ法を鋼橋の信頼性評価に応用するためのシステムの開発について概説する。第4章と第5章は開発した信頼性評価システムの適用事例で、第4章では、吊橋ケーブルバンドの滑り安全性の信頼性評価の事例を、第5章では、鋼製橋脚およびトラス橋の信頼性評価の事例を示す。第6章では、示した事例を基に鋼橋の維持管理の合理化に向けての提案を行った。第7章では、本論文の結論として本研究を通して得られた知見や分析結果を総括するとともに今後の課題について整理している。

## 審査結果の要旨

### (1) 論文内容の審査

我が国の道路橋の多くは高度経済成長期に建設されており、2020年頃には全橋に占める割合が25%になり、2030年頃には50%になると予測されている。このように、急激に道路橋の老齢化が進行しており、橋梁の維持管理が重要な課題となっている。この論文では、高次の不静定構造物への対応、腐食や疲労の限界状態の時系列評価が可能な「拡張型効率化モンテカルロ法」の考え方を提案し、現場で得られた点検データをその場で解析できる構造システム信頼性評価手法の開発を行っている。また、開発した手法の有効性を、実橋をもとにした橋梁モデルに適用してその有効性を確認している。

本論文は、本論文は7章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。第1章は、研究の着想に至った経緯、研究の目的、既往の研究を整理、論文の構成について述べている。

第2章では、構造システム信頼性評価の現況の課題を述べ、これに対応した拡張型効率化モンテカルロ法の提案を行っている。

第3章では、第2章で提案した拡張型効率化モンテカルロ法を鋼橋の信頼性評価に応用するためのシステムの開発について概説している。

第4章では、吊橋ケーブルバンドの滑りの信頼性評価の事例について述べている。

第5章では、鋼製橋脚およびトラス橋の信頼性評価の事例について述べている。

第6章では、5章及び6章で示した事例をもとに、鋼橋の維持管理の合理化に向けての提案を行っている。

第7章では、本研究を通して得られた知見や分析結果を総括するとともに今後の課題について整理している。

我が国の道路橋の多くは高度経済成長期に建設されており、2030年頃には50%になると予測されている。既に、三重県の本庄川大橋や秋田県の本荘大橋でトラス部材破断事故が発生しており、既設鋼橋の安全性の再検討が求められている。しかし、短期間で少ない作業で効果的な維持管理を実施するためには、膨大な数の橋梁群の中から補修・補強を優先的に行う橋梁を評価することは困難であった。しかし、本研究で提案されている信頼性評価手法を活用すれば、橋梁構造物の全体システムとしての信頼性評価が現場レベルで可能になり、時宜を得た有用性のある研究である。

また、提案されている手法は、時系列に変化に対応可能な拡張型効率化モンテカルロ法を用いているため腐食の進行がどの程度まで許容され、また補修を行うことによりどの程度構造物の信頼度が向上したかを把握することが可能である手法である。さらに、自動車荷重の経時的な確率特性の変化も考慮可能で、効果的な補修・補強対策が実施可能で、従来にない新規性のある手法であり、学術的価値が高く発展性が期待できる。

以上、本論文はその新規性、有用性、発展性が高く評価され、博士（工学）論文として、十分価値を有するものと認められる。

## （2）在学期間中の論文審査

博士後期課程在学期間中の研究成果として、学術論文を4編掲載されている。4編中3編は、本人が筆頭著者である。

- 1) Kazunori Yamaguchi, Yoshitaka Yoshida, Satoshi Iseda : ANALYSIS OF INFLUENCE OF BREAKING MEMBERS OF STEEL THROUGH TRUSS BRIDGES, 24<sup>th</sup> US-Japan Bridge Engineering Workshop, pp.337-348, September 2008.
- 2) 山口和範, 白木渡, 井面仁志 : モンテカルロ法を用いた「鋼橋管理シミュレーターシステム」の構築, (社)土木学会, 土木情報利用技術論文集, Vol.17, pp.57-62, 2008年11月.

- 3) Motoi Okuda, Ikuo Yamada, Kazunori Yamaguchi : Reasonable Maintenance for CableBand Bolts on Suspension Bridges, The 7<sup>th</sup> International Cable Supported Bridge Operations' Conference(ICSBOC2010), pp.85-93, May, 2010.
- 4) 山口和範, 白木渡, 井面仁志 : 確率変数変動型の効率化モンテカルロ法による構造物の経時的信頼性評価, (社)土木学会, 土木情報利用技術論文集, Vol. 19, pp. 277-284, 2010年10月.

## 最終試験結果の要旨

最終試験では、学位論文の内容に関わる審査委員の質疑に的確に回答することを求め、さらに学位論文に関連した分野での専門知識の確認を口述試験として実施した。その結果、博士（工学）として十分な学力を有するものと認められた。

なお、口述試験の内容と回答の概要を、以下に示す。

### (1) 開発手法の新規性について

回答：本論文の新規性は、拡張型効率化モンテカルロ法を用いることによって、従来困難であった高次の不静定構造物の橋梁構造物に対して、腐食など経時的な劣化現象の影響も考慮できる信頼性評価手法の開発にある。

### (2) 開発した手法の妥当性について

回答：開発した信頼性評価手法の妥当性の研究については、実橋をもとにした橋梁モデルに適用し、その妥当性を検証している。まだ簡易化したモデル橋梁への適用での検証であるので、今後は実橋梁を対象として有用性を検証したいと考えている。

### (3) 危機管理への適用性について

回答：本提案手法では、構造物のFCM (Fracture Critical Member) 解析を組み入れており、どの構造部材が破断すると構造全体の崩壊につながるかを解析して信頼性評価が可能である。従って、ご指摘の通り、構造物の維持管理を超えて危機管理的な活用方法が可能である。今後は、疲労損傷等を受けている構造物が地震の影響を受けた場合の信頼性の評価を行い、地震発生時の被害軽減対策に活用可能な取り組みをしたい。

### (4) 今後の方向性について

回答：今後の方向性としては、まず開発した手法により得られた評価結果を、構造物の維持管理や危機管理に有効活用するための提案を行っていきたい。具体的には、コストを考慮した補修・補強戦略の提案を考えている。また、様々なタイプの橋梁形式に対応できる汎用性のある鋼橋管理シミュレータの開発に取り組みたいと考えている。

氏名(本籍)	高宝豊(中国)
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第66号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成23年3月24日
学位論文題目	Development of the Motion Control and Particle Swarm Optimization of the ICPF Actuated Underwater Microrobot System
論文審査委員	(主査) 郭書祥 (副査) 平田英之 (副査) 能見公博

## 論文内容の要旨

### 1. Outline of the research

With the development of micro techniques and smart materials, coupled with the increasing demands of industry in the field of ocean exploration, a centimetre-scale micro-robot system with novel materials, such as ionic conducting polymer films (ICPF), has many potential applications. Micro-robots using ICPF actuators have several advantages over micro-robots using shape-memory alloys (SMA), giant magneto-restrictive alloys (GMA), and piezoelectric transducers (PZT). The invention of underwater micro-robots is expected to lead to their increasingly widespread uses in industrial, medical, and military applications. For example, maritime countries are investigating new techniques of developing novel materials such as ICPF, and these materials are being investigated as possible materials for artificial muscles and MEMS actuators to drive micro-robots.

ICPF are electro-active polymers and have, in recent years, been investigated as materials for artificial muscles and MEMS actuators. ICPF technology is one of the most exciting research areas in Bio-MEMS and is paving the way to a great variety of bio-mimetic approaches for underwater micro-robot design. The low actuating voltage and quick bending responses of ICPF are very attractive for the construction of various types of actuators and sensors.

The development of the micro-robot can be broken up into three sub-topics, summarised as follows.

- (1) Characteristic Analysis and Application of ICPF Actuators in Underwater Micro-robot Systems
- (2) Development of a Novel Wireless-controlled ICPF-actuated Fishlike Underwater Micro-robot System
- (3) Motion Control and Swarm Optimization of the Underwater Micro-robot System

## 2. The research results

### *(1) Characteristic Analysis and Application of ICPF Actuators in Underwater Micro-robot Systems*

The ICPF actuators are low-power devices and so are suitable for micro-robot applications because of the favorable battery power requirements. The underwater micro-robot should be designed to facilitate various motions, including walking and swimming motions, and the ability to control depth below the surface of the water.

The ICPF actuator can drive the micro-robot to move forward or turn around, and the speed of the micro-robot can be controlled by varying the voltage of the input signal when the frequency of the input signal is fixed at 1 Hz. The ICPF can produce bubbles when the frequency of input voltage signal is lower than 0.3 Hz. According to the characteristics of ICPF, we input a low-frequency voltage signal to make the material produce bubbles and make the micro-robot float upward slowly.

### *(2) Development of a Novel Wireless-controlled ICPF-actuated Fishlike Underwater Micro-robot System*

We propose a new kind of underwater micro-robot system consisting of a mother submarine and several ICPF-actuated underwater micro-robots. The mother submarine needs to have enough space to carry the micro-robots, and either remote-operated vehicles (ROVs) or autonomous underwater vehicles (AUVs) could be used as the submarine. When they receive control signals, the micro-robots can be released from the body of the mother submarine. The micro-robots should have communication devices and be able to share information with one another, and exploiting some multi-robot control method, should cooperate to accomplish a given task.

The ICPF-actuated underwater micro-robot should be controlled wirelessly, and in our system, the underwater micro-robots employ Atmel AVR minimum microcontrollers, Infrared Ray Data Association (IRDA) infrared communication systems, and ICPF actuators. ATmega16 was used for the control centre of the micro-robot, and the IRDA



communications system operated at 940 nm and was used to receive and return the signal to the AVR. A square-wave control signal sent from the AVR to the electric relay G6S-2 was used to adjust the voltage at the ICPF actuator to control the motion of the micro-robot.

Control of the trajectory of individual micro-robots was demonstrated experimentally, illustrating the effectiveness of the wireless-control method.

### ***(3) Motion Control and Swarm Optimization of the Underwater Micro-robot System***

To develop the global path-planning methods for the robot system, it was necessary to set up an environmental model that includes information such as the position of micro-robot and the shape of obstacles. We also used search algorithms to determine the path-planning fit for the needs of people. Several fundamental modeling methods have been proposed, such as the Framework Space Approach (including the Visibility Graph, the Voronoi Graph, and the Tangent Graph), the Free-Space Method, and the Grid Method.

We used MATLAB to simulate path planning and optimization according to the particle-swarm-optimization (PSO) algorithm when the micro-robot meets obstacles underwater. Obstacles were simplified and treated as solid spheres, and the robot was considered to be a point particle. The three-dimensional underwater space was separated into several parts. Drawing upon the concept of the grid method, a spiral particle pathway searching approach was developed to search for particles in the pathway in a given plane. Simulation results demonstrated that the method of global path planning in three-dimensional space was both feasible and efficient.

### **3. Conclusions and future works**

We have demonstrated a system of bio-mimetic fish-like underwater micro-robots that can be controlled from a larger mother submarine. Each micro-robot consists of an AVR minimum-control unit, an infrared communication system, and ICPF actuators. Two control signals are used, and the infrared device in the mother submarine communicates with the AVR control system to control the movement of the individual fish-like micro-robots.

We demonstrated wireless control over the trajectory of individual micro-robots. Furthermore, we were able to coordinate a group of three micro-robots to move in formation. Simulation results show that path planning using particle swarm optimization can be used to automatically navigate underwater obstacles, which will make the system more robust as the micro-robots find the best path to a given

destination. Future work will focus on developing the motion control to realize this multi-robot operation.

## 審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「ICPF アクチュエータを用いた水中マイクロロボットシステムの動作制御と粒子群最適化に関する研究」(**Development of the Motion Control and Particle Swarm Optimization of the ICPF Actuated Underwater Microrobot System**)について、本審査委員会にて審査を行った結果、本論文は、ICPF アクチュエータの作成と特性評価などの基礎研究をベースにして、生体機構を解析し、生体機構を模擬した新しいマイクロ水中ロボットのバイオメティックスを提案しており、さらに新しい生物型マイクロ水中ロボットの考案とその動作制御手法に関する研究として高く評価できると考えられる。

以下に本論文の成果を要約する。

- 1) 生物学の発達をもとに、生体の動き、例えばバイオメティックな蟹水中歩行ロボット、魚ロボットの泳ぎあるいはクロールなどの動きの解析が可能となり、開発した水中マイクロロボットはたいへん有効な応用展開が期待される。すなわち、高いエネルギー消費や複雑な構造あるいは高電磁場を持つ従来のモーターに変わり、圧電素子、イオン導電高分子膜 (ICFP)、流体素子および形状記憶合金のようなスマートアクチュエータを人工筋肉として駆使してマイクロロボットの数多くの応用を手がけた。
- 2) 多くのバイオメティックマイクロロボットにおいては、昆虫などの生体を模倣する多自由度のジョイントからなる脚により動きを創生するので、小さな構造としなやかな動きの両立が大きな課題となっている。ここでは、これらを克服するため、小型化が可能で、低電圧駆動ができ、応答性に優れ柔軟な ICPF 高分子アクチュエータを用いた多自由度脚による生態的な動きを開発した。そしていくつかのマイクロ水中ロボットを試作し、実験的にその動きを再現して動きを検証した。
- 3) ここでは、技術の構築は以下のように実施した。まず、バイオメティックな動きの設計とマイクロロボットのプロトタイプ製作からはじまり、柔軟な動きのあるロボットの設計、歩き・浮遊・泳ぐ機能を持つハイブリッドマイクロロボットの提案・試作及びそれらのしなやかな動きを実現した。3次元空間において、マイクロロボット群は位置と速度を持つ粒子群でモデル化され、作業経路を位置の適応度関数で最適化する。群れのメンバーは最適な位置情報を交換し、それに基づく自身の位置と速度を制御するようなアルゴリズムを提案し、シミュレーション結果で検証した。
- 4) 水中マイクロロボットシステムを提案、試作した。赤外線などのワイヤレス通信方法

による制御アルゴリズムと方法を提案し、実験により、複数ロボットの協調作業の動作を実現し、その有効性を実証した。

本論文の特徴的な成果とこの分野の技術進化に対する貢献は以下のようにまとめられる。

- 1) 小型化が可能で、低電圧駆動ができ、応答性に優れ柔軟な ICPF 高分子アクチュエータの試作、特性評価モデル提案、バイオミメティックな水中歩行ロボットの足構造の最適設計、ロコモーション座標の設計法を確立したこと。
- 2) 水中において、歩き、浮遊そして泳ぐ動作をハイブリッドして移動を実現する機構、また、ワイヤレス通信方法による複数ロボットの協調作業動作の制御方法の提案を試したこと。
- 3) 上記を総合的に試作構築し、ワイヤレス制御によるフレキシブルなロコモーションを実現するハイブリッド水中マイクロロボットシステムを完成したこと。

以上により、本論文はその新規性、発展性が高く評価され、本審査委員会は審査申請者が香川大学大学院から博士（工学）の学位授与に値するものであると判定した。

本学位論文に関する内容として、学会誌に英文 2 編を含む複数の学術論文を発表している。研究成果はいずれも独自に完成したものである。

- [1] **Baofeng Gao**, Shuxiang Guo, “An Infrared Ray Controlled Fish-like Underwater Microrobot”, *INFORMATION: An International Interdisciplinary Journal*, Vol.13, No.6, pp.1973-1984, 2010.
- [2] Xiufen Ye, **Baofeng Gao**, Shuxiang Guo and Liquan Wang, “Development of ICPF Actuated Underwater Microrobots”, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 3, No. 4, pp. 382-391, 2006.
- [3] Shuxiang Guo and **Baofeng Gao**, “Path-planning Optimization of Underwater Microrobots in 3-D Space by PSO Approach”, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.1615-1620, December, 2009.
- [4] **Baofeng Gao** and Shuxiang Guo, “Development of an Infrared Ray Controlled Fish-like Underwater Microrobot”, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp.150-155, August, 2010.
- [5] **Baofeng Gao** and Shuxiang Guo, “Development of an Infrared Sensor-based Wireless Intelligent Fish-like Underwater Microrobot”, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp.1314-1318, June, 2010.

## 最終試験結果の要旨

本学位審査委員会において、口頭にて最終試験を行った。

審査申請者は、学位論文の内容に関する発表を約50分間行い、ICPF アクチュエータの作成方法、特性評価の基礎研究成果、新型水中蟹型歩行ロボット、歩き、浮遊そして泳ぐモーションをハイブリッドマイクロロボットの設計、試作、制御方法及び通信方法について、その開発経緯、設計概念と理論モデル、及び評価結果を簡潔かつ明瞭に説明した。

その後、学位論文及び発表内容に対する質疑応答に移り、聴講者から出た以下の質問に対して、審査申請者はすべて適切に回答した。

- 水中マイクロロボットシステムの新規性は何か。

(回答) 本研究では、提案した水中マイクロロボットシステムは、バイオミメティックなマイクロシステムで、母機、潜水器と複数の水中マイクロロボットにより、構成される。小型化が可能で、低電圧駆動ができ、応答性に優れる生物型システムなので、バイオミメティックな新規性がある。

- 具体的な応用は何か。

(回答) ロボット水族館や水中科学調査及び鑑賞などの応用が期待される。

- ICPFアクチュエータの実験特性はどうか。

(回答) ICPF アクチュエータはほぼ2Vの低電圧で駆動でき、120Hzまで追従できる実験特性がある。従って、バイオミメティックな水中歩行ロボットの足を駆動することが適応できる。

- 水中のロボットのスピードは他の方式の水中ロボットと比較して優れているか。

(回答) 高い駆動電圧が必要なピエゾアクチュエータ及びモーターを用いる水中ロボットに比べて、ICPF アクチュエータを用いた水中ロボットは、駆動力が低い、しかし、本方式は軽量で、低電力である点に特長があり、もし同じ質量、低電力で比較出来れば、優れていると考えられる。

- 無線の通信方法は新しいか。

(回答) 無線の通信方法は新しくない。しかし、本研究では、赤外線通信方法を工夫して、ロボット群に具体的に適用して、実験結果により、その有効性を実証した実際応用の新規性がある。

- ロボット群のパスの計画方法は何か。

(回答) ロボット群のパスの計画において、螺旋線にスキャン (SPSS) 方法を使って、開始のパスを探し、粒子群最適化 (PSO) 方法を使って、最適化のパスを探求する方法である。

本審査委員会において、審査内容は学位論文の内容、研究方法論に関することを確認し

ようとするものである。

本審査委員会は、提出された博士学位請求論文が博士（工学）の学位に値するものであり、かつ審査申請者は専門領域に関する十分な学識と研究能力を有するものと判断した。以上より、本最終試験の評価を合格とする。

氏名（本籍）	肖楠（中国）
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第67号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成23年3月24日
学位論文題目	Study on a Micro-operating System for Biomedical Applications
論文審査委員	(主査) 郭書祥 (副査) 平田英之 (副査) 能見公博

## 論文内容の要旨

### 1. Outline of the research

Recently, great progress has been made in biology through advances in biotechnology, including genetic engineering, cellular engineering and developmental engineering. Such research requires micro- and nano- manipulation and mass production as well as repetitive, high-throughput, and high-precision processing. Consequently, human-scale nano tele-operating systems have been developed in situations where conventional robotics. The principle problem is the size of the objects to be manipulated when the object is extremely small, such as a cell or embryo. A complex fine-motion control system is required. Physical phenomena in the micro-world differ from those in the macro-world. A manipulation system must be designed very carefully and new approaches must be developed to address the challenge of high-speed micromanipulation.

During the past years, significant research effects have been done in the development of technology for minimally invasive surgery (MIS), such as laparoscopy, has grown as a very suitable domain for robotic system. Intracavity intervention is expected to become

increasingly popular in the medical practice, both for diagnosis and for surgery. A lot of diagnosis and medical surgery with an endoscope or a catheter are performed for minimum invasive surgery recently. There are a lot of advantages as earliness etc. However, it requires a lot of skills for the operation so that this may do the operation in the inside of the body that cannot be watched directly.

This research results mainly include the three parts as the following.

- (1) Kinematic analysis of a 6-DOF parallel mechanism for human-scale tele-operating system.
- (2) Modeling of the micro-operating system for human-scale tele-operating system.
- (3) Control of the mciro-operating system for human-scale-operating system.
- (4) Development of a novel type of catheter operating system with force monitoring.

## **2. The research results**

- (1) Kinematic analysis of a 6-DOF parallel mechanism for human-scale tele-operating system.

Kinematic characters of the 6 DOF parallel mechanisms were proposed. We build the equations to forward analyze the position of the endplate. Based on the displacement range of the piezoelectric actuator we have made a simulation program. Then we got the distribution surface of the end platform center. From the experimental results, we can see that the calculation curve is matched with the measure curve.

- (2) Modeling of the micro-operating system for human-scale tele-operating system.

In the micro manipulator there are six piezoelectric actuators. To improve the precision of the micro manipulator, we built the model for this micro operator with a Bouc-Wen hysteretic model. By using a genetic algorithm the parameters in the micro operators' model were identified. From the experimental results, we can see the identified data fits the actual data well. In six groups, the max fitness rate gets to 99.5%, but the minimum fitness is only 95.7%. In order to get a higher fitness rate, it had better to run the genetic algorithm with much more generations or to improve the fitness function. However, the model of the micro operator could be used in the human scale tele-operation system.

- (3) Control of the micro-operating system for human-scale tele-operating system.

A micro-operating mechanism for a human scale tele-operating system was proposed. A model of the micro-operating mechanism was built with six piezoelectric actuators based on the Bouc-Wen model. The parameters of the model were identified using a genetic algorithm. An MRAC system was designed to improve the performance of the micro operating system. The results of both the numerical simulation and the tracking experiment implied that the use of MRAC improved the performance of the micro-operating system and the noise and hysteresis in the piezoelectric actuators were

eliminated.

(4) Development of a novel type of catheter operating system with force monitoring.

A novel type of catheter operating system with monitor and micro force sensors has been developed. We developed a highly precise remote catheter operating system to help doctor with intravascular neurosurgery. We also carried out the operating simulation experiments “in Vitro” to evaluate the operability of the developed catheter operating system. The experimental results indicated that the developed micro force sensors of catheter operating system work well and can measure the contact force between the catheter and the blood vessel, also the force feedback can effectively improve operability. With the help of the micro force sensors and developed algorithm, doctors can feel the force on catheter and avoid putting strongly on blood vessel wall. It also can efficiently help doctor to do the operation.

### **3. Conclusions and future works**

A human scale tele-operation system was introduced. A micro operator was designed. In the micro manipulator there are six piezoelectric actuators. To improve the precision of the micro manipulator, we built the model for this micro operator with a Bouc-Wen hysteretic model. By using a genetic algorithm the parameters in the micro operators’ model were identified. From the experimental results, we can see the identified data fits the actual data well. In six groups, the max fitness rate gets to 99.5%, but the minimum fitness is only 95.7%. In order to get a higher fitness rate, it had better to run the genetic algorithm with much more generations or to improve the fitness function. However, the model of the micro operator could be used in the human scale tele-operation system.

A model of the micro-operating mechanism was built with six piezoelectric actuators based on the Bouc-Wen model. The parameters of the model were identified using a genetic algorithm. Experimental results showed that the identified results very closed to the true values. An MRAC system was designed to improve the performance of the micro operating system. The results of both the numerical simulation and the tracking experiment implied that the use of MRAC improved the performance of the micro-operating system and the noise and hysteresis in the piezoelectric actuators were eliminated. In the future, other algorithms will be adopted and the MRAC will be improved to make the micro-operating system get higher precision.

A robotic catheter system was proposed and developed. Force monitoring system was developed. In order to ensure the safety of operation, the force monitoring system and danger avoiding system were applied in the robotic catheter system. Both developed

rubber force sensors and an optical fiber sensor were installed in the catheter, force information were monitored in real-time during the operation. At the same time the force information was sent to the haptic device. So one can feel the force from the catheter during a remote operation. If the force on the catheter goes beyond the safety range, the doctor will get warning information from both monitors and controller. The experimental results imply that the force sensors and the controller with haptic feedback work very well.

In the future, we will improve the genetic algorithm to identify parameters with higher accuracy. Then with the model we will design control methods for the micro operator to improve the performance.

## 審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「生体医用の応用を目指すマイクロ操作システムに関する研究」(Study on a Micro-operating System for Biomedical Applications)について、審査委員会にて審査を行った結果、本論文は、特に生体医用の応用に絞り、新型マイクロオペレーションシステムを提案・試作し、また、触覚フィードバックによりカテーテルの操作を安全に行うための支援システムの構築とその制御法に関する研究として高く評価できると考えられる。

以下に本論文の特徴的な成果を要約する。

1. 微小物を操作する手法について検討し、微細作業用汎用なマイクロオペレーションシステムを提案・構築した。そして、特性評価実験により、その有効性を実証した。
2. 多様な作業に対応できる汎用6自由度パラレル微動機構を設計し、試作した。また、 piezoアクチュエータにより駆動され、ベースプレートに固定されるジョイントの位置とリンクの長さの調整より、動作範囲と分解能の調整が可能であることを検証した。
3. 6自由度パラレル微動機構のコントロールモデルを提案し、Bouc-Wenモデルを用いて、圧電アクチュエータのヒステリシスを示し、遺伝的アルゴリズムを用いて、モデルのパラメータを同定した。
4. 6自由度パラレル微動機構のためのモデル参照適応制御システムを提案し、試作した。それを用いて、圧電アクチュエータのヒステリシスによる誤差を除去し、多自由度微動機構のダイナミック性能を向上させた。
5. カテーテルの操作を安全に行うための支援システムの試作を行い、操作特性評価実験を行った。新型圧力センサーを開発し、先端とサイドの力情報をモニターリングし、血管モデルでの挿入実験結果より、触覚フィードバックにより開発されたシステムの操作性と安全性を高めることを実証した。



以上の実験結果とその考察により、提案したシステムの操作性と有効性を確認した。

本論文の生物医学分野への応用についての技術進化への貢献は以下のようにまとめられる。

1. 本研究では、微粗動複合機構と高精度、高分解能、6自由度汎用微動機構の開発により、数mmから数 $\mu\text{m}$ の対象物を扱う微細作業用マイクロオペレーションシステムを構築した。また、視覚と力覚フィードバックの原理の適用により、多自由度微動機構の遠隔操作精度の向上が期待されることを明らかにした。
2. カテーテル操作支援システムに積極的に触覚フォースフィードバックデバイスを用いてその制御法を検討し、操作の複合制御実験により、開発したシステムの有効性を検証した。さらに、熟練した医者 の操作スキルを抽出するため、新型マスタースレーブカテーテルのシステムを提案、試作し、さらにその有効性を検証した。これらの研究成果は、脳神経外科における高度専門医の育成、次世代のセンサー統合マイクロ能動カテーテルによる低侵襲脳外科手術の支援システムの確立にも貢献できる。

以上により本審査委員会は、審査申請者が香川大学大学院から博士（工学）の学位授与に値するものであると判定した。

本学位論文に関する内容として、以下の学術学会論文誌掲載 **3** 編、および権威がある国際会議論文 **2** 編があり、研究成果はいずれも独自に完成したものである。

- [1] **Nan Xiao** and Shuxiang Guo, Modeling and Control of a Micro-operating mechanism for a Human-scale Tele-operation system, *International Journal of Robotics and Automation*. (2010, 12, accepted, in press)
- [2] **Nan Xiao**, Jian Guo, Shuxiang Guo and Takashi Tamiya, A Robotic Catheter System with Real-time Force Feedback and Monitor, *Journal of Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine*. (2010, 9, accepted, in press)
- [3] Jian Guo, **Nan Xiao**, Shuxiang Guo and Takashi Tamiya, Development of a Force Information Monitoring Method for a Novel Catheter Operating System, *INFORMATION: An International Interdisciplinary Journal*, Vol.13, No.6, pp.1999-2010, 2010.
- [4] **Nan Xiao** and Shuxiang Guo, Control Modeling of a Micro-Manipulator for Human Scale Tele-operation Systems, Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 6125-6130, 2010.
- [5] **Nan Xiao** Shuxiang Guo Jian Wang, The Simulation and the Design of a 6-DOF Parallel Micromechanism, Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on

## 最終試験結果の要旨

本審査委員会において、口頭にて最終試験を行った。審査申請者は、学位論文の内容に関する発表を約 50 分間行い、生体医用の応用を目指すマイクロ操作システムに関する研究について、その開発経緯、理論モデルと制御アルゴリズム、及び評価結果を簡潔かつ明瞭に説明した。

その後、学位論文及び発表内容に対する質疑応答に移り、聴講者から出た以下の質問に対して、審査申請者はすべて適切に回答した。

- このマイクロ操作システムと大阪大学のシステムの違いは何か。

(回答) まず、二つのシステムに使われるアクチュエータが異なる。次に、構造の上で、大阪大学のシステムに、3 自由度動く 2 本指があり、それと比べて、本研究は、一つの指が動けるが、この指は 6 自由度がある。また、大阪大学のシステムにワークスペースや分解能が固定されて、変更ができない。本研究に開発したシステムはベースプレートに固定されるジョイントの位置とリンクの長さの調整より、ワークスペースと分解能の調整が可能であるため、多目的な作業に対応できる。

- カテーテル操作支援システムを開発する目的は何か。

(回答) 現段階では、医学部の 4 年生 - 5 年生の脳神経外科におけるカテーテル実習のために、カテーテル操作支援システムを開発したが、熟練者の操作スキルを抽出し、脳神経外科における高度専門医の育成、および臨床応用を目指す。

- 本研究について、以前に開発されたカテーテル操作支援システムの役割は何か。

(回答) 以前のシステムと比べて、開発したシステムに同じ構造があるマスタシステム (コントローラー) とスレーブシステム (カテーテルオペレーター) を導入した。以前の研究に開発したセンサー、制御アルゴリズムなどはそのまま応用できる。

- このカテーテル操作支援システムは他の研究や製品に比べて何の長所があるか。

(回答) 今までの研究と製品は力のフィードバックがない。そのため、本場の操作スキルを抽出できない。本研究では、構造の改善を通じて、力のフィードバック提供という難題を解決した。実際のカテーテルを握るとの同じ感覚で、医者はカテーテルを操作することを可能にした。熟練者の操作スキルを抽出し、脳神経外科における高度専門医の育成効果が期待される。

本審査委員会における審査内容は、学位論文の内容、研究方法論に関することを確認し

ようとするものである。

本審査委員会は、提出された博士学位請求論文が博士（工学）の学位に値するものであり、かつ審査申請者は専門領域に関する十分な学識と研究能力を有するものと判断した。

以上より、本最終試験の評価を合格とする。

氏名（本籍）	趙子鑫（中国）
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第68号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成23年3月24日
学位論文題目	Study on the Acoustic Communication Network for Multiple Underwater Vehicles
論文審査委員	(主査) 郭書祥 (副査) 平田英之 (副査) 岡本研正

## 論文内容の要旨

### 1. Outline of the research

As more and more attention is paid to the ocean, there are growing interests in exploring and exploiting the ocean these days. As we all know, the visibility is very low and the environment is rather bad in the ocean. In such condition, it is difficult for people themselves to carry out some tasks such as the exploration and the exploitation of energy sources, the installation and the servicing of the equipments, the photography and the monitoring of the objects. In order to accomplish these tasks, the underwater vehicle becomes a very important instrument, which makes it necessary to set up an underwater communication network to ensure the vehicles to work under control normally.

Wireless underwater communication can be established by transmission of acoustic waves, it is called underwater acoustic communication. Underwater acoustic communication is a rapidly growing field of research and engineering as the applications, which once were exclusively military, are extending into commercial field. Aiming at this pop research field, this thesis concentrates on proposing underwater

acoustic communication systems for multiple underwater vehicles.

The research mainly includes four parts as follows:

- (1) Design of an acoustic communication system based on CDMA for multiple underwater vehicles;
- (2) Design of an acoustic communication system based on FHMA for multiple underwater vehicles;
- (3) Development of an acoustic communication system for multiuser based on hardware platform;
- (4) Underwater acoustic communication network

## **2. Research results**

### ***(1) Design of an acoustic communication system based on CDMA for multiple underwater vehicles***

A kind of underwater acoustic communication system based on QPSK-CDMA for multiple underwater vehicles was proposed to implement communication simultaneously between multiple underwater vehicles in deep water. Some key techniques such as spread spectrum and channel coding were adopted in order to ensure the communication reliability. Besides, Rake Receiver was also an important part in the system to reduce the influence caused by multipath effect, which could greatly reduce the BER. The simulation results indicated that this system could enable multiple vehicles to communicate simultaneously successfully. The data rate in the system was 540b/s, which fulfilled the requirement of the text data transmission and the BER was  $7.82 \times 10^{-4}$  when the SNR was -10dB, which was acceptable in practice.

### ***(2) Design of an acoustic communication system based on FHMA for multiple underwater vehicles***

A kind of underwater acoustic communication system based on FHMA combined with tamed spread spectrum for multiple underwater vehicles was proposed to solve the contradiction between the high data rate and the limitation of frequency bandwidth in underwater acoustic channel. Meanwhile, waiting-type self-synchronization method was improved to implement the synchronization of FH part and Rake Receiver was improved to receive multipath signals. The data rate in the system was 650b/s, which fulfilled the requirement of the voice data transmission and the BER was  $8.56 \times 10^{-4}$  when the SNR was -14dB, which indicated that the transmission rate was raised and the communication reliability still kept good. The effect of user number on BER was also discussed and the simulation results indicated that the interference was very low due to the good correlation of PN code.

### ***(3) Development of an acoustic communication system for multiuser based on hardware platform***

An acoustic communication system for multiuser based on hardware platform was developed. Because the experiments were rather difficult to implement in the ocean, the sound card in the computer with sound box and microphone was used as the energy transduction to implement acoustic communication in the air instead of the acoustic transducer and the hydrophone in the ocean, which had referenced value to make the experiments convenient and reduce the cost in the field of underwater acoustic communication. For the hardware part, DS18B20 was taken for example as the data source to generate the original signals and MAX232 chip was adopted to connect the MCU to the RS-232 in the computer. For the software part, MATLAB was used to implement reading and writing of the serial port data and MMVARI was adopted to drive the sound card to form the acoustic signals from the digital data to implement the acoustic communication. In the experiments, the signals transmitted from the transmitting part could be received very well in the receiving part which indicated good quality of the acoustic communication system and verified that the CDMA and the FHMA acoustic communication systems proposed in the foregoing parts were applicable in reality. Although the BERs in this hardware platform system were not as good as that in the simulation systems, taking the experiment condition and the transmission rate into account, they were acceptable.

### ***(4) Underwater acoustic communication network***

In order to form a complete underwater acoustic communication network, according to the features of the system that we proposed, we pointed out that it typically needed to be ad hoc network. Aiming at the characteristics of ad hoc network, some key techniques in the data link layer and the network layer were discussed, including ARQ, media access protocols and routing. Three schemes of Selective Repeat ARQ, MACAW and AODV were analyzed in detail to show that they were appropriate to our underwater acoustic communication network.

## **3. Conclusions and future work**

In order to accomplish communication between multiple underwater vehicles, we proposed two kinds of acoustic communication system based on CDMA and FHMA. The simulation results indicated that the communication reliability was good and it was feasible to use the systems to accomplish underwater communication successfully. Besides, an acoustic communication system for multiuser based on hardware platform was developed and the communication quality was also good which verified that the CDMA and the FHMA acoustic communication systems proposed in the foregoing parts were applicable in reality. Finally, some key techniques for forming a complete underwater acoustic communication network were discussed. In the future, we want to accomplish transmission of video signal. In this condition, the transmission rate should

be further raised to about 10kb/s.

## 審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「複数台の水中ビークル用音響通信ネットワークに関する研究」(Study on the Acoustic Communication Network for Multiple Underwater Vehicles) について、本審査委員会にて審査を行った結果、本論文は、複数台の水中ビークルが協調作業を行うための通信技術開発を目指して、基本的な通信技術に基づく二種類の水中音響通信システムを提案し、その有効性を提案したシミュレーション及び試作したシステムのハードウェア実験で実証し、さらに水中音響通信ネットワークの構築に関する研究として高く評価できると考えられる。

以下に本論文の成果を要約する。

1) 深い海洋環境などにおける複数台の水中ビークルが同時に通信を実現するために、CDMA (符号分割多元接続) に基づく複数台の水中ビークル用音響通信システムを提案した。この通信システムは、チャンネルエンコーディング、スプレッドスペクトラム、Rake 受信機などの技術を利用するため、通信の信頼度を保証できた。また、シミュレーションの結果は、符号エラー率が低いため、高い信頼度の複数台の水中ビークル用音響通信システムを実現できた。

2) 伝搬速度と周波数帯域の制限の問題を解決するために、FHMA (周波数ホッピング多元接続) に基づく複数台の水中ビークル用音響通信システムを提案した。この通信システムは、軟式スプレッドスペクトラム及び FHMA の組み合わせ技術を取り入れ、同期モジュールと Rake 受信機を改善した。シミュレーションの結果は、伝搬速度は速くなくても通信の品質は高い状態を保てることを検証した。

3) 以上の二種類の水中音響通信システムは実際に応用できるかどうかを検証するために、システムのハードウェアプラットフォームを提案・試作した。それに基づき、複数のユーザー用音響通信システムを開発した。提案した通信システムは、トランスデューサーとマイクロフォンに代わり、パソコンのサウンドカード及びサウンドボックス、マイクロフォンを利用して、便利で有効な音響通信の実験を行うことができた。実験の結果により、本研究に提案した CDMA と FHMA 音響通信システムは優れる通信機能があり、実際に応

用できる有効性を実証した。

4) 信頼性が高い水中音響通信ネットワークを構築するために、ad hoc ネットワークの特性に基づいて、自動再送要求、媒体アクセス協議、ルーティングを含むネットワーク設計の重要な技術を検討し、この音響通信ネットワークに対して、Go Back N ARQ、MACAW 及び AODV は最も適合した方案であることを立証した。

本論文の特徴的な成果とこの分野の技術進化に対する貢献は以下のようにまとめられる。

1) 深い海洋環境の中における高い信頼度の水中音響通信システムを構築し、複数台の水中ビークルが協調して海洋作業を可能にした通信技術を開発したこと。

2) 軟式スプレッドスペクトラム及び FHMA の組み合わせ技術を提案し、伝搬速度は速くなり、声音文書の伝搬をも実現できたこと。

3) 提案した通信システムの適用性を実験で検証した。さらに、パソコンのサウンドカード及びサウンドボックス、マイクロフォンを利用して、便利で有効な音響通信の実験を行うことができ、実験コストの削減を可能にしたこと。

4) 信頼性が高い水中音響通信ネットワークを構築する指針を確立したこと。

以上により、本論文はその新規性、発展性が高く評価され、本審査委員会は審査申請者が香川大学大学院から博士（工学）の学位授与に値するものであると判定した。

本学位論文に関する内容として、以下の学術学会論文誌掲載 2 編、および権威がある国際会議論文 4 編があり、研究成果はいずれも独自に完成したものである。

- [1] **Zixin Zhao**, Shuxiang Guo, “A QPSK-CDMA Based Acoustic Communication System for Multiple Underwater Vehicles”, INFORMATION: An International Interdisciplinary Journal, Vol. 13, No. 3(A), pp. 719-729, 2010.
- [2] **Zixin Zhao**, Shuxiang Guo, “Design of an Acoustic Communication System Based on FHMA for Multiple Underwater Vehicles”, Wireless Engineering and Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 27-35, 2010.
- [3] **Zixin Zhao**, Xiaodong Yang, Shuxiang Guo, “A Coupling Loss Algorithm of Leaky Coaxial Cable in the Blind Zone”, Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 919-923, 2008.
- [4] Shuxiang Guo, **Zixin Zhao**, Qinxue Pan, “A CDMA Acoustic Communication System for Multiple Underwater Robots”, Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1522-1526, 2009.
- [5] **Zixin Zhao**, Shuxiang Guo, “A QPSK-CDMA Based Acoustic Communication System

for Multiple Underwater Vehicles”, Proceedings of the Fifth International Conference on Information, pp. 124-127, 2009.

- [6] **Zixin Zhao**, Shuxiang Guo, “An FHMA Acoustic Communication System for Multiple Underwater Robots”, Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, pp. 1223-1228, 2010.

## 最終試験結果の要旨

本学位審査委員会において、口頭にて最終試験を行った。審査申請者は、学位論文の内容に関する発表を約 50 分間行い、複数台の水中ビークル応用を目指す水中音響通信システムの設計と構築について、その開発経緯、設計概念と理論モデル、及び評価結果を簡潔かつ明瞭に説明した。

その後、学位論文及び発表内容に対する質疑応答に移り、聴講者から出た以下の質問に対して、審査申請者はすべて適切に回答した。

- シミュレーションとハードウェア実験の関係は何か。

(回答) シミュレーションは、ハードウェア実験における制御パソコン (MATLAB) にて同一条件のもとで、行われたものである。

- 提案した音響通信システムの長所は何か、実現した方法は何か。

(回答) 本研究が提案した音響通信システムは、他のシステムより、伝搬距離が長い、伝搬速度が速い、複数台の水中ビークルが同時に通信を実現できるなどの長所がある。実現したのは、スプレッドスペクトラム、チャンネルエンコーディング、Rake 受信機などの技術を利用するためである。

- 提案した音響通信システムの容量はどうか、通信距離はどうか。

(回答) シミュレーションの中で、ユーザーの数は 6 であった。実際は、スプレッドスペクトラム用疑似雑音コードによって、ユーザーの数量を増加できると考えられる。通信距離は 1000m ぐらいである。

- 複数のユーザーの区別方法は何か。

(回答) スプレッドスペクトラム用疑似雑音コードは、ユーザーによって異なるため、複数のユーザーを区別できることになる。

- 水中ビークルの機能は何か、水族館への応用状況はどうか。本研究に着手するきっかけ及び今後課題は何か。

(回答) 海面上のコントロールセンターの指令によって、このシステムの水中ビークルは



上下、前後方向に移動することができる。また、ビークルはカメラとソナーを実装しており、写真撮影や監視作業などを行うことができる。水族館の応用状況は分からないが、水族館への応用の可能性は極めて高いと考えられる。本研究に着手するきっかけは本研究室で実施されている複数の球型水中ロボットの制御と通信技術に関する研究であり、その関連研究として始めた。今後課題としては、複数の球型水中ロボットに搭載して、ロボット間の制御と通信技術を利用して、協調作業を行うことが挙げられる。

本審査委員会において、審査内容は学位論文の内容、研究方法論に関することを確認しようとするものである。

本審査委員会は、提出された博士学位請求論文が博士（工学）の学位に値するものであり、かつ審査申請者は専門領域に関する十分な学識と研究能力を有するものと判断した。

以上より、本最終試験の評価を合格とする。

氏名（本籍）	堀井 泰聡（愛知県）
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 69 号
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学位授与の年月日	平成 23 年 3 月 24 日
学位論文題目	灯火制御による直接視界支援システムと人間との相互作用に関する研究
論文審査委員	（主査） 土居 俊一 （副査） 和田 隆広 （副査） 鈴木 桂輔

## 論文内容の要旨

交通事故全体に占める夜間死亡事故の割合は昼間の 3 倍近い値となっており、その要因のひとつに視覚による運転情報量の低下が挙げられる。夜間走行においてドライバが利用できる視覚情報の大部分は自動車の前照灯で照らされるエリアであり、ドライバは前照灯によって照らされる視覚情報を頼りに運転を強いられる。つまり車両の前照灯はドライバの視認性を確保するために重要な役割を担っている。そこで、夜間走行時の視認性向上を目的として、近年、配光可変型前照灯（Adaptive Front-lighting System, AFS と略記）な

どの灯火による直接視界支援システムが導入されている。一方、近年の車両・システム開発や設計においてドライバの運転のし易さ・乗り易さ・受け入れ易さといった車両応答に対応して操作するドライバの運転操作挙動を考慮することが求められており、灯火制御システムにおいても人間-自動車系での解析が必須となっている。

本論文は、夜間の視環境を改善しドライバの運転行動を支援するシステムとして期待されている灯火制御システムに関して、ドライバの認知・判断・操作特性を考慮した評価を行うことによってその有効性を示し、人間-自動車系を考慮した灯火制御システム評価・設計の手法を提案することを目的としている。

本論文は、全7章で構成されており各章の概要は以下のとおりである。

第1章「序論」では、本研究の背景について述べ、従来研究及び製品化状況を概観し、それらの課題を挙げた上で研究目的を設定した。また、研究全体の流れを表す論文構成を示した。

第2章「灯火による視界支援の現状と課題」では、まず自動車前照灯技術の変遷について述べた。自動車のヘッドランプの性能は国内外の保安基準や法規制を満足する必要がある。しかし、走行中の道路環境は、直線道路やカーブ、交差点、上り坂や下り坂など常に変化しているため、法規以外に多くの場面を考慮した配光設計が要求され、また、より高い視認性を提供できるようにさまざまな光源や制御技術の開発が行われてきた。ここでは灯火技術に対する従来の評価方法とその課題について述べた。(第1主論文)

第3章「配光可変型前照灯 (AFS) の有効性評価法の検討」では、曲線路走行においてAFSがドライバの認知・判断・操作行動に与える影響の調査およびその定量化を目的として、定置式のドライビングシミュレータを用いた評価方法を提案した。まず初めにAFSの制御と車両運動の関係に注目し、車両運動に着目したAFSの評価方法を提言した。次に、ドライバ特性を考慮し人間の操舵特性をモデル化し、前方注視モデルによる灯火制御時のドライバの運転行動を模擬可能な人間-自動車系モデルを提案した。(第2,3主論文)

第4章「配光可変型前照灯 (AFS) がドライバの運転行動に与える影響の検討」では、実車およびドライビングシミュレータでの試験結果から、第3章で提案した評価方法に基づきAFSの定量評価を試みた。そして、その有効性をナビ協調制御など灯火制御の違いによる影響を含めて検証した。その結果、カーブ走行時にドライバは道路区画線を注視することで道路線形を認知しており、また、曲路走行状態に応じて注視時間を変化させていることや、灯火制御方式によりその注視時間推移に変化が見られ、視程距離の変化に応じて注視時間が変化することが示唆された。更に、操舵行動・車両挙動の解析により、灯火制御がドライバの操縦性安定性に影響を与えることを定量的に検証した。(第2主論文)

第5章「人間-自動車系シミュレーションによる配光可変型前照灯 (AFS) の効果検証」では、第4章で得られた知見をもとに、「予見時間可変モデル」を用いてAFS使用時のドライバの運転行動のモデル化を行い、人間-自動車系シミュレーションによる理論解析とドライビングシミュレータによる実験結果の比較を行うことによってAFSの効果の明確化を

図り、灯火制御設計においてドライバ特性を考慮することの重要性を示した。また、提案するモデルを利用した灯火制御設計法に関するモデルベースドアプローチの可能性について考察した。(第3主論文)

第6章「配光の違いがドライバの運転行動に与える影響の検討」では、AFSの評価を通して得られた知見をもとに、夜間事故の約35%を占める歩行者の横断事故に対して、灯火の配光の違いによる認知の差とその後の運転行動への影響を検討した。その結果、配光の違いから生じるドライバの予見時間の減少がその後の回避行動に大きく影響することを明確にすると共に、新システムである配光可変型走行ビームADB(Adaptive Driving Beam)に関してその有効性を検証した。(第4主論文)

第7章「結論」では、本研究を通して得られた知見を総括し、今後の課題及び展望について述べた。

## 審査結果の要旨

本研究は、夜間の自動車運転における視覚情報支援、いわゆる前照灯配光を対象としており、特にその性能を格段に向上するための配光制御系の設計技術に関連している。ここでは、夜間の視環境を改善しドライバの運転行動を支援するシステムとして期待されている灯火制御システムに関して、ドライバの認知・判断・操作特性を考慮した評価を行うことによってその有効性を示し、人間-自動車系を考慮した灯火制御システム設計の手法を提案することを目的としている。すなわち、第一の命題として配光可変型前照灯(Adaptive Front-lighting System, AFSと略記)などの灯火による直接視界支援システムにおけるドライバと運転操作との関係を明確にしたうえで、新しい構成や制御方法を提案し、実験検証を行いその設計方法を確立することをめざしている。ついで、灯火制御による視界支援とドライバとの相互作用を明確にして、それらに関わる車両運動特性、すなわち環境認知や車両操縦安定性に係わる支援システムとして前方注視特性を予見時間可変モデルとして取り上げ、その特性を考慮した設計手法構築および性能検証を行った。

本論文は、全7章で構成されており各章の概要は以下のとおりである。

第1章「序論」では、本研究の背景について述べ従来研究及び製品化状況を概観し、それらの課題を挙げた上で研究目的を設定し、研究全体の流れを表す論文構成を示している。

第2章「灯火による視界支援の現状と課題」では、まず自動車前照灯技術の変遷について述べている。自動車のヘッドランプの性能は国内外の保安基準や法規制を満足する必要があるが、走行中の道路環境は常に変化しているため、法規以外に多くの場面を考慮した配光設計が要求され、より高い視認性を提供できるようにさまざまな光源や制御技術の開発が行われてきており、ここでは灯火技術に対する従来の評価方法とその課題について述べている。

第3章「配光可変型前照灯（AFS）の有効性評価法の検討」では、曲線路走行においてAFSがドライバの認知・判断・操作行動に与える影響の定量化を目的として、定置式のドライビングシミュレータを用いた評価方法を提案している。まず初めにAFSの制御と車両運動の関係に注目し、操縦安定性に着目したAFSの評価方法を提言し、次にドライバ特性を考慮し人間の操舵特性をモデル化し、灯火制御時のドライバの前方認知・操作行動を模擬可能な人間-自動車系モデルによる評価方法を提案している。

第4章「配光可変型前照灯（AFS）がドライバの運転行動に与える影響の検討」では、実車およびドライビングシミュレータでの試験結果から、第3章で提案した評価方法に基づきAFSの効果の定量評価を試みている。そして、その有効性をナビ協調制御など灯火制御の違いによる影響を含めて検証し、カーブ走行時にドライバは道路区画線を注視することで道路線形を認知しており、また、曲路走行状態に応じて注視時間を変化させていることや、灯火制御方式によりその注視時間推移に変化が見られ、視程距離の変化に応じて注視時間が増加することが示唆され、これらの操舵行動・車両挙動の解析により、灯火制御がドライバの操縦性安定性に影響を与えることを定量的に検証している。

第5章「人間-自動車系シミュレーションによる配光可変型前照灯（AFS）の効果検証」では、第4章で得られた知見をもとに、「予見時間可変モデル」を用いてAFS使用時のドライバの運転行動のモデル化を行い、人間-自動車系シミュレーションによる理論解析とドライビングシミュレータによる実験結果の比較を行うことによりAFSの効果の明確化を図り、灯火制御設計においてドライバ特性を考慮することの重要性を示している。また、提案するモデルを利用した灯火制御設計法に関するモデルベースドアプローチの可能性について考察している。

第6章「配光の違いがドライバの運転行動に与える影響の検討」では、AFSの評価を通して得られた知見をもとに、夜間事故の多くを占める歩行者の横断事故に対して、灯火の配光の違いによる認知の差とその後の運転行動への影響を検討しており、配光の違いから生じるドライバの予見時間の減少がその後の回避行動に大きく影響することを明確にすると共に、新システムである配光可変型走行ビームADB(Adaptive Driving Beam)に関してその有効性を検証している。

第7章「結論」では、本研究を通して得られた知見を総括し、今後の課題及び展望について述べている。

本研究により、自動車の「認知・判断・操作」の各段階の中で人間の最も敏感な認知すなわち視覚情報支援に対応する前照灯配光可変システムについて、人間との相互作用を考慮した設計法を新たに提案した。そして、それらのシステムを模擬的に搭載したドライビングシミュレータ実験により、支援制御の設計方針の妥当性を検証した。

これらの成果は、新しい前照灯配光制御支援システムを実現するために寄与するものであり、夜間走行における車両の安全性を格段に向上するとともに社会的貢献度が高い。ま

た、本論文はその新規性、発展性が高く評価され、博士（工学）論文として十分価値を有するものと認められる。

本学位論文は主論文4編より構成され、以下の学会論文誌掲載2編および査読付き国際会議論文2編の発表がある。いずれも本人が筆頭著者であり、そのうち3編は博士後期課程在籍中の掲載である。

[1] Yasutoshi Horii : Development of Discharge Headlamp Ballast by Applying Hybrid IC Technology, SAE(American Society of Automotive Engineers) Technical Paper (2001-01-0856, pp.1-7) , 2001.

[2] 堀井泰聡, 土居俊一, 和田隆広, 森川慶祐: 可変配光前照灯(AFS)の有効性評価に関する研究, 自動車技術会論文集、Vol.40, No.6, pp. 1593-1598, 2009.

[3] 堀井泰聡, 森川慶祐, 和田隆広, 土居俊一: 予見時間可変モデルを用いた可変配光前照灯(AFS)制御時の運転行動解析, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.5, pp.987-992, 2010.

[4] Yasutoshi Horii, Satoshi. Fujiyoshi, Takayuki. MIKAMI ,Takahiro Wada, Shun'ichi Doi : Effective Assessment of Pedestrian Visibility in the Nighttime by using Driving Simulator, Proceedings of International Conference on V.I.S.I.O.N ( Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving) , SIA(French Society of Automotive Engineers), Vol.4, pp.192-199, 2010.

## 最終試験結果の要旨

最終試験では学位論文の内容に関する審査委員の質疑に対する的確に回答することを課し、さらに関連する分野における専門知識の確認を口述試験として実施した。その結果、本審査申請者は博士（工学）として十分な学力を有するものと認められた。

口述試験の内容と回答の概要は以下のとおりである。

### 1) 開発した設計法の新規性と有用性について

(回答) 本論文では、人間の操作と最も密接に関わる視覚認知系について、運転主体はドライバであるという運転支援の原則から、常に人間との相互作用を考えた設計が必要であるという観点に立っている。そして、工学的応用研究ではコストも考慮することが必要という認識に立ち既存の構成要素を出来る限り利用し、それらの情報を最大限に活用してシステムに必要な情報を推定することにより新たな付加要素を追加しない様な構成を中心としている。具体的には、車両前照灯の配光可変型やナビ協調型などの配光制御システムにおいて、従来手法を利用してその制御システムを最適化した。このように実際の車載制御機器システムとして展開し現実の車両に搭載されて交通予防安全に寄与している。以上のように、目標性能を立案しシステム開発・要素設計に繋げる開発ステップを実証し提案す

ることができた。

### 2) 本設計法の有効性の検証について

(回答) 本研究においては、車両前照灯の配光制御により夜間走行時の車両の安全性向上に関して人間・自動車系からの運転支援システム構築に必要なドライバ特性に関する知見を明らかにするとともに、配光制御による車両の操縦安定性に対する有効性を示した。また、夜間を想定した曲線路走行時の人間行動特性の実験的研究によりその制御目標設計に関する妥当性を確認した。以上のように、人間-自動車系から目標性能を立案しシステム開発・要素設計に繋げる開発ステップを実証し提案することができた。このような新たな設計指針はこのほかの車載機器設計にも活かされ、さらに実用分野が広がるものと思われる。

### 3) 本技術に関する将来的課題について

(回答) 本研究を通じて、視覚認知系運転支援システムの目標性能の評価条件を提示し各種支援システムの性能要件と制御ロジックを開発・提案することができた。さらに、既存の構成要素の活用を図り省エネルギーな構成を達成した。今後はさらに効率を上げ、例えばセンサの共通化やシステムの省エネ化を進める技術開発が必要になると考える。そして、さらに詳細な機能評価手法は大変興味深く今後の課題としたい。

氏名(本籍)	竹村 明洋(岡山県)
専攻	材料創造工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第70号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成23年3月24日
学位論文題目	Cu含有鋼の表面赤熱脆性抑制に関する研究
論文審査委員	(主査) 田中 康弘 (副査) 品川 一成 (副査) 上路 林太郎

## 論文内容の要旨

安価で多様な性質を有する鉄鋼材料は、種々の構造物に使用されている。近年、環境問題の観点から CO<sub>2</sub> 排出量が少ない鉄スクラップを用いた製鋼を積極的に推進する必要がある。スクラップ中に含まれる Cu や Sn は精錬で除去しにくい元素であり、スクラップ再利用時に循環濃縮する。Fe より貴な Cu は熱間圧延時に液相になり結晶粒界中へ浸潤し、高温液体脆性の原因となる。これを表面赤熱脆性と呼ぶ。高価な Ni の添加や、スラブ加熱温

度を 1200°C以上にする抑制方法が報告されている。しかし、Ni 添加は原価上昇の問題がある。さらに、高温域のみで製鋼することは不可能である。また、ハイブリッド車や電気自動車等の普及により自動車に使用される Cu 量は増加傾向にある。スクラップ中に循環濃縮する Cu の量が急増することが考えられる。

そこで本研究は、新規表面赤熱脆性抑制方法の開拓及び高 Cu-Sn 含有鋼における表面赤熱脆性対策法を明らかにすることを目的とした。

第 1 章では、熱間圧延時の表面赤熱脆性発生機構と従来までの研究概要に基づき本研究の目的について述べる。

第 2 章では、ショットピーニング(以下、ショットと略称)による表面赤熱脆性抑制効果について調査を行った。ショットで生成する表面加工層における Mechano-Chemical 反応の効果を評価した。試験片半面にショットを行った 0.4 %Cu 含有鋼に対して水蒸気含有雰囲気中 1100°Cで酸化処理を行った。その後、ひずみ量 50 %の高温圧縮で発生した割れ深さを測定した。

その結果、60 min 酸化処理を行った場合、表面赤熱脆性による表面割れ深さがショット面で約 1/3 に低減した。さらに、スケール中の  $Fe_2O_3/Fe_3O_4$  界面は凹凸化し、 $Fe_3O_4/FeO$  界面は確認できなくなった。また、スケール中のボイドの量が増加していた。ショットによる“マクロ均一、ミクロ不均一”な機械加工で導入された転位により酸化形態が変化し、表面赤熱脆性抑制効果が得られたと考えられる。

第 3 章では、高濃度の Cu と表面赤熱脆性を助長する Sn を多量に含有した鋼における表面赤熱脆性抑制に必要な Ni 量を調査した。各試験片を水蒸気含有雰囲気中 1100°Cにて 60 min 酸化処理した。また、ひずみ量 50 %の高温圧縮で発生した割れ深さを測定した。0.5 %Cu-0.15 %Sn 含有鋼では 0.5 %Ni、1.0 %Cu-0.15 %Sn 含有鋼では 1.5 %Ni、1.0 %Cu-0.30 %Sn 含有鋼では 2.0 %Ni 添加で表面赤熱脆性が抑制された。従来までに報告された表面赤熱脆性抑制に必要な Ni/Cu=1/2 の量比よりも多量の Ni 添加が必要になることを明らかにした。

第 4 章では、CSP プロセスにおいて熱履歴を変化させることによる結晶粒微細化を利用した表面赤熱脆性抑制方法の調査を行った。CSP プロセスとは電気炉を用いた一貫製鉄プロセスであり、CO<sub>2</sub> 排出量が少ない利点がある。しかし、電炉法による精錬ではスクラップを原料とするため表面赤熱脆性が発生する。現行のスクラップと同量の 0.3 %Cu 含有鋼に対して、オーステナイト安定温度～室温の温度範囲で種々に熱履歴を変化させる熱処理を施した。続いて、スラブ加熱用トンネル炉に対応する大気中 1100°C、30 min の酸化処理後、熱間圧延を模擬したひずみ量 50 %の高温圧縮で発生した表面割れ深さを測定した。その結果、650°C以下の冷却停止温度で表面割れは小さくなった。旧オーステナイト粒径を測定した結果、冷却停止温度が 500°C以下で結晶粒径は微細化していた。Ar<sub>3</sub> さらに Ar<sub>1</sub> 以下まで冷却を行ったことで結晶粒が微細化し、表面赤熱脆性抑制効果が得られたと考えられる。

第 5 章では、第 2 章と第 3 章の結果を踏まえ、表面赤熱脆性抑制効果を持つショットの酸化機構への影響を解明する目的で酸化初期段階の微細組織観察を行った。EBSP 解析の結果、ショットによって試験片表層部から深さ方向数 $\mu\text{m}$  の範囲で結晶粒が数百 nm まで微細化し、微細化していない結晶粒内にもひずみが確認された。100~500 $^{\circ}\text{C}$ の温度で酸化を停止した試験片の EDX 分析の結果、ショットを行った試験片で局所的に深さ方向の酸化反応が促進されていることが確認できた。ショットによる加工で格子欠陥の粒界や転位が増加し、この格子欠陥を起点として酸化が進行したことが考えられる。さらに、加工による結晶粒微細化によって粒界面積が増加し、再結晶によって  $\text{O}^{2-}$  の拡散が促進されることも影響すると考えられる。低温酸化による  $\text{O}^{2-}$  の内方酸化によってスケール/地鉄界面が凹凸化し、この凹凸化が高温酸化によって  $\text{Fe}^{2+}$  の外方酸化によって保持されることで 60 min 時間酸化後まで表面赤熱脆性抑制効果が持続したと考えられる。

第 6 章では、本論文で得られた研究成果を要約し、結論とした。

## 審査結果の要旨

鉄スクラップを原料とする製鋼は  $\text{CO}_2$  排出量を大幅に削減する。しかしスクラップ中に含まれる Cu や Sn は精錬で除去しにくく、Fe より貴な Cu は熱間圧延時に液相になり結晶粒界中へ浸潤し、表面赤熱脆性と呼ばれる歩留まり低下の原因となる。Ni 添加や、スラブ加熱温度を 1200 $^{\circ}\text{C}$ 以上にする方法が対策として報告されているが、コスト増大につながり、安価なスクラップ鋼を原料とする価値が低減する。電気自動車の普及などが原因で今後スクラップ中に循環濃縮する Cu の量が急増することも考えられる。

本学位論文は、新規表面赤熱脆性抑制方法の開発とその機構解明、高 Cu-Sn 含有鋼における問題点および表面赤熱脆性対策法の解明を目的とし、以下のように構成される。

第 1 章では、熱間圧延時の表面赤熱脆性発生機構と従来までの研究概要に基づき本研究の目的について述べている。

第 2 章では、ショットピーニングによる表面赤熱脆性抑制効果を検討し、水蒸気含有雰囲気中 1100 $^{\circ}\text{C}$ で 60 min 酸化処理を行った場合、表面赤熱脆性による表面割れ深さがショットピーニング処理後、約 1/3 に低減することを見いだした。スケール中の  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$  界面凹凸化、 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$  の明瞭な界面の消失、スケール中のボイド量増加などの現象を見いだした。ショットピーニングは“マクロ均一、ミクロ不均一”な加工組織と転位分布を生み出し、スケール/地鉄界面凹凸化が表面赤熱脆性抑制効果を導くと考察している。

第 3 章では、高濃度の Cu と表面赤熱脆性を助長する Sn を多量に含有した鋼における表面赤熱脆性抑制に必要な Ni 量を調査し、これまで報告されている表面赤熱脆性抑制に必要な Ni/Cu=1/2 の量比よりも多量の Ni/Cu=1~2 の Ni 添加が必要になることを明らかにした。

第 4 章では、電気炉を用いた一貫製鉄プロセスである CSP(Compact Strip Production)



プロセスを模擬したプロセス中の熱履歴を変化させて結晶粒微細化を図り、表面赤熱脆性抑制効果への影響を調査した。オーステナイト安定温度～室温の温度範囲で種々に熱履歴を変化させた後、スラブ加熱用トンネル炉に対応する大気中 1100℃で 30 min の酸化処理、高温圧縮で発生する表面割れ深さを測定した。フェライト初析温度  $A_3$  さらに共析温度  $A_1$  より低温の 650℃以下の冷却停止温度で表面割れは低減した。結晶粒微細化が表面赤熱脆性抑制に寄与することを明らかにしている。

第 5 章では、第 2 章と第 3 章の結果を踏まえて、表面赤熱脆性抑制効果を持つショットピーニングの酸化機構への影響を微視的観点から解明するため、酸化初期段階の微細組織観察を行った。ショットピーニング処理によって表層部から深さ方向 5  $\mu\text{m}$  の範囲は結晶粒が数百 nm まで微細化し、地鉄内部の結晶粒にも顕著なひずみが確認された。100～500℃の温度で酸化を停止した試験片の EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)分析を行い、被ショット試験片で局所的に深さ方向の酸化反応が促進されることを見いだした。ショットピーニング加工による粒界や転位の増加、これらの格子欠陥を起点とした酸化の進行、結晶粒の超微細化による粒界面積の増加、低温酸化時の  $\text{O}^{2-}$ イオン内方拡散促進によるスケール/地鉄界面の凹凸化機構を提案し、ショットピーニングによる表面赤熱脆性抑制効果機構を検討している。

第 6 章では、本論文で得られた研究成果を要約し結論とした。

申請者はショットピーニング法という新規表面赤熱脆性抑制法を見いだした。電炉でのスクラップ鋼利用時の歩留まり向上に貢献し、製鉄産業における  $\text{CO}_2$  排出削減を実現する極めて重要な成果である。表面赤熱脆性の割れ深さを従来の研究者は引張試験で評価していたが、より確実に評価する方法として圧縮試験を利用した測定法を提案した。さらに走査型電子顕微鏡の加速電圧を変えながら EDX で酸素分布を測定し、酸化の深さ方向情報を取得する新規分析法を考案するなど、研究内容の高いオリジナル性と発展性が評価される。

本学位論文の第 2 章と第 4 章は筆頭著者として「鉄と鋼」、「熱処理」の学術誌に発表され、不純物の影響を制御し、資源節減・循環型社会へ向けた素材設計・創製プロセス開発を目指す国内外の研究者から注目されている。よって本学位論文は博士（工学）論文として十分価値を有するものと認められる。

## 最終試験結果の要旨

平成 23 年 2 月 1 日に本学位論文の公聴会を開催し、口述試験を行った。申請者は最初におよそ 1 時間論文内容を説明し、その後 1 時間 20 分ほど質疑応答を行った。

公聴会においては「研究成果の実プロセスへの展開に向けた展望」「フェライト/オーステナイト相変態の影響」「表面赤熱脆性に対する酸化雰囲気の影響の可能性」「地鉄スケール界面の凹凸化と濃化 Cu 相のスケール中への排斥メカニズムの関係」「結晶粒成長速度と

酸化皮膜成長速度の界面平坦化への影響の相違」「ショットピーニングのスケール成長促進作用と赤熱脆性抑制の結果に矛盾がないか」「地鉄スケール界面に対して内方拡散が凹凸化に寄与する一方、外方拡散が界面凹凸化に寄与しないという違いの理由」「凹凸化した界面が平坦化する機構」「ショットピーニングの条件と赤熱脆性抑制効果の関係」「ショットピーニング条件と内部転位分布の関連」「ショットピーニング強さと赤熱脆性抑制作用時間の関係」など多岐にわたる質問がなされたが、審査申請者は適切に回答した。

公聴会后、最終試験を行った。審査委員の口頭試問に対して審査申請者は適切に答えた。以上、学位論文及び公聴会での研究内容の説明と質疑応答、審査委員会の最終試験から審査申請者が提出した博士学位論文は博士（工学）の学位に値するものであり、かつ審査申請者は幅広い学識と十分な研究能力を有すると本学位審査委員会は判断し、最終試験の評価を合格とする。

氏名（本籍）	八木下 和宏（神奈川県）
専攻	材料創造工学専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第71号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成23年3月24日
学位論文題目	ジアルキルリン酸亜鉛系化合物を活用したエンジン油の 耐久性および省燃費性向上に関する研究
論文審査委員	(主査) 若林 利明 (副査) 掛川 寿夫 (副査) 馮 旗 (副査) 土居 俊一

## 論文内容の要旨

近年、地球環境問題への対応という立場から、エンジン油への要求もエンジン内部を潤滑・保護するといった基本的なことに加え、環境への負荷低減が重要となっている。具体的には①廃棄物を低減させるための長寿命化（耐久性）、②二酸化炭素の排出を減少させる省燃費性の向上、③排出ガス後処理装置への影響低減である。

エンジン油には、必須の添加剤として半世紀にわたってジアルキルジチオリン酸亜鉛（ZDDP）が使用されている。ZDDPは、酸化防止剤・摩耗防止剤として機能する反面、熱などで分解し亜硫酸ガスや硫酸を生成し、エンジン油の耐久性を担う金属系清浄剤（DET）

と反応し機能低下させるなどの欠点も併せ持つ。さらに、ZDDP の硫黄は触媒被毒性や、金属表面に摩擦係数が高い硫化被膜を生成し、エンジン油の省燃費性能を悪化させている。つまり、ZDDP と同等の酸化防止性および摩耗防止性を持ちながら、硫黄の悪影響を除いた添加剤を設計できれば、環境性能に優れた新たなエンジン油を開発できる。本研究では、ZDDP の分解機構を明らかにするとともに、硫黄を酸素に置換したジアルキルモノリン酸亜鉛(ZDMP)とジアルキルリン酸亜鉛(ZDP)に注目し、ZDDP 代替添加剤の可能性を検討した。本論文の構成と内容は以下のとおりである。

まず第1章では、緒論として本研究の背景およびZDDP 代替添加剤の設計思想と解明すべき課題を述べた。

第2章ではZDDP の定量法の確立と、ZDDP の加水分解反応の解明について示した。従来、エンジン油中でのZDDP の量を正確に把握できる手法がなかったが、誘導体化法と液体クロマトグラフィーを組み合わせた新たな定量法を確立し、使用油中のZDDP の分解挙動の観測に初めて成功した。ZDDP の消耗速度は走行条件の違いで大きく異なり、低油水温時に加速する特徴があった。低油水温時のZDDP の分解には、水の関与が疑われる。そこで、ZDDP の加水分解機構を調べ、硫化水素の脱離による分解が主体であることを明らかにした。

第3章ではZDDP、ZDMP およびMo 化合物と潤滑油の酸化反応の主要な活性種である過酸化化物との反応機構について述べた。ZDDP の過酸化化物分解作用は、反応の活性種がZDDP だけでなく反応中にZDDP が変化して生じた様々な化合物であった。それらの濃度変化から反応を速度論的にも解析した。ZDMP の過酸化化物分解作用についてもZDDP と同様に、反応中に生じた中間活性種の同定、またそれらの濃度変化から反応を速度論的に解明した。一方、Mo 化合物の酸化防止能であるが、ZDDP、ZDMP より優れた過酸化化物分解作用を有することを見出した。Mo 化合物は、自身が酸化防止作用を持たないZDP を使用する際の有効な過酸化化物分解剤として利用が期待できる。

第4章では、ZDDP、ZDMP およびZDP の摩擦・摩耗特性をブロックオンリング試験で検討した。基油にZDMP およびZDP のみ添加したものの摩擦係数は、ZDDP のそれに比べ低く、摩耗防止性にも優れることを明らかにした。また、エンジン油の必須な添加剤であるDET との併用系での摩擦係数は、ZDMP、ZDP<<ZDDP の順でやはりZDMP、ZDP 系が優れた。併用系の摩擦係数は、ZDMP やZDP 単独系の摩擦係数に比べて0.2~0.3程度低く、DETに近いものであった。一方、ZDDP の場合、低減効果は0.1程度に留まり阻害作用が大きかった。潤滑膜の分析から、ZDMP あるいはZDP との併用系の摩擦係数が低い理由は、摩擦係数が低いDET が形成する潤滑膜を主体するためであった。

第5章ではZDDP をZDMP あるいはZDP に置き換えたエンジン油を設計し、各種エンジン試験でその性能を調べた。まず、ZDMP 配合油の性能であるが、エンジン耐久性の指標される酸化防止性、摩耗防止性、塩基価維持性、清浄性は、ZDDP と同等であった。注目される性能としては、摩擦低減性であり、ZDDP より極めて優れることが確認された。続

いて、ZDP 配合油の性能であるが、エンジン耐久性の指標される塩基価維持性、清浄性は、ZDDP や ZDMP より極めて優れ、摩耗防止性については ZDDP や ZDMP とほぼ同等であることが確認された。さらに Mo 化合物を併用すると、大幅な酸化防止性の向上が確認された。一方、摩擦低減性は ZDMP と同様に ZDDP より極めて優れることも確認された。これらの結果から、ZDMP および ZDP 配合したエンジン油は、従来のエンジン油と比べ基本性能的には遜色ないことと、環境性能に優れることを実証した。

第 6 章では以上の検討結果を結論としてまとめた。これらの研究成果は、既存技術では到達できないレベルまで高めることができる次世代エンジン油の基礎技術であり、新たなエンジン油開発に大きく貢献するものと思われる。

## 審査結果の要旨

本学位論文は、エンジン内部の潤滑および保護といった基本性能を有することはもちろん、廃棄物削減のための長寿命化、二酸化炭素排出量抑制のための省燃費性向上、排出ガス後処理装置の触媒被毒という悪影響の回避等、環境負荷の低減にも貢献するエンジン油を、新しい着想にもとづく添加剤技術によって開発し、その添加剤が機能を発揮する作用メカニズムを解明するとともに、開発したエンジン油の実用性能を明確にしたものである。

エンジン油には従来、ジアルキルジチオリン酸亜鉛 (ZDDP) が必須の添加剤として使用されてきた。しかし ZDDP は、酸化防止剤、摩耗防止剤として働く反面、熱などで分解し亜硫酸ガスや硫酸を生成し、エンジン油の耐久性を担う金属系清浄剤と反応し、機能低下を引き起こすという欠点ももつ。さらに、ZDDP の硫黄は、触媒被毒性を有し、金属表面に摩擦係数の高い硫化被膜を生成し、エンジン油の省燃費性能を悪化させる。そこで、ZDDP と同等の酸化防止性と摩耗防止性を持ち、硫黄の悪影響を除いた添加剤を設計できれば、環境性能に優れたエンジン油を開発できるとの着想の下、ZDDP の分解機構を明らかにするとともに、硫黄を酸素に置換したジアルキルモノリン酸亜鉛 (ZDMP) とジアルキルリン酸亜鉛 (ZDP) に注目し、ZDDP 代替添加剤の可能性を検討した。この結果、本学位論文では以下の研究成果が得られている。

(1) 従来、エンジン油中での ZDDP の量を正確に把握できる手法がなかったが、誘導体化法と液体クロマトグラフィーを組み合わせた新たな定量法を確立し、使用油中の ZDDP の分解挙動の観測に初めて成功した。ZDDP の消耗速度は走行条件の違いで大きく異なり、低油水温時に加速する特徴があった。そこで、ZDDP の加水分解機構を調べ、水の関与を究明して、硫化水素の脱離が分解の主體的な機構であることを明らかにした。

(2) ZDDP、ZDMP および摩擦調整剤として働く Mo 化合物と潤滑油の酸化反応の主要な活

性種である過酸化物の反応機構を詳細に検討した。すなわち、ZDDP の過酸化物分解作用は、反応の活性種が ZDDP だけでなく反応中に ZDDP が変化して生じた様々な化合物であった。それらの濃度変化から反応を速度論的にも解析した。ZDMP の過酸化物分解作用についても ZDDP と同様に、反応中に生じた中間活性種の同定、またそれらの濃度変化から反応を速度論的に解明した。一方、Mo 化合物の酸化防止能であるが、ZDDP、ZDMP より優れた過酸化物分解作用を有することを見出した。Mo 化合物は、自身が酸化防止作用を持たない ZDP を使用する際の有効な過酸化物分解剤として利用が期待できる。

- (3) ZDDP、ZDMP および ZDP の摩擦・摩耗特性を検討し、基油に ZDMP および ZDP のみ添加したものの摩擦係数は、ZDDP のそれに比べ低く、摩耗防止性にも優れることを明らかにした。また、エンジン油の必須な添加剤である金属系清浄剤との併用系での摩擦係数は、ZDMP、ZDP<<ZDDP の順でやはり ZDMP、ZDP 系が優れていた。併用系の摩擦係数は、ZDMP や ZDP 単独系の摩擦係数に比べて 0.2~0.3 程度低く、金属系清浄剤に近いものであった。一方、ZDDP の場合、低減効果は 0.1 程度に留まり阻害作用が大きかった。これらの潤滑膜の分析から、ZDMP あるいは ZDP との併用系の摩擦低減に優れる理由が、金属系清浄剤が摩擦係数の低い潤滑膜を形成するためであることを究明した。
- (4) ZDDP を ZDMP あるいは ZDP に置き換えたエンジン油を設計し、各種エンジン試験で実用性能を調べた。ZDMP 配合油の性能は、エンジン耐久性の指標される酸化防止性、摩耗防止性、塩基価維持性、清浄性で ZDDP と同等であり、摩擦低減性は ZDDP より極めて優れることを実証した。ZDP 配合油の性能は、塩基価維持性、清浄性が ZDDP や ZDMP より極めて優れ、摩耗防止性については ZDDP や ZDMP とほぼ同等であることを実証した。さらに Mo 化合物を併用すると、大幅な酸化防止性の向上を図ることができ、摩擦低減性は ZDMP と同様に ZDDP より極めて優れることを検証した。これらの結果から、ZDMP および ZDP 配合したエンジン油は、従来のエンジン油と比べ基本性能的には遜色ないことと、環境性能に優れることを明確にした。

これらの研究成果は、既存技術では実現が難しい次世代エンジン油開発に不可欠な基盤技術の一翼を担い、新たなエンジン油開発に大きく貢献するものと思われる。また、本論文の総括の中で、そのような技術革新に必要な今後の課題、指針を与えている点も高く評価できる。

以上の結果、当該審査に関わる本学位論文は、香川大学大学院工学研究科博士後期課程修了の学位に相応しい内容と判断する。

## 最終試験結果の要旨

審査申請者は、公聴会において、学位論文の内容に関する約1時間の発表を行い、エンジン油に必須の添加剤として使用されてきたZDDPの悪影響が分子中の硫黄に起因することを究明した反応解析結果を紹介した上で、ZDDPの代替新規添加剤として分子中の硫黄を酸素に置換したZDMPおよびZDPに着目した経緯と、これら添加剤がもたらす潤滑膜構造の特定と摩擦低減メカニズムの解明を行った検討結果、ならびにZDMPおよびZDPを活用したエンジン油によって、その耐久性と省燃費性の向上が実現できることを検証した実用性能評価結果について、簡潔かつ明瞭に説明した。

その後、学位論文および発表内容に対する質疑応答に移り、聴講者から出た以下の質問や指摘に対し、審査申請者はすべて適切に回答した。

- 塩基性ZDDP (b-ZDDP) と表記される化合物は、その構造から考えて、塩基性と言ってよいかが疑問である。
- Mo-DTCによる摩擦低減の作用機構を説明してほしい。
- ZDDPの潤滑膜構造中の酸素は、どこから入ったものか。
- エンジン油粘度の温度に対する適正值はいくつか。また、それは何で決まるのか。基油の分子構造、たとえば直鎖と分岐の炭化水素の存在比と粘度の関係はどうか。
- ZDDPが油の酸化促進と酸化防止の両方の働きをもつ点について、それぞれのメカニズムの違いは何か。
- ZnやMoがなぜ使われるのか。それ以外の金属元素の性能はどうか。
- NMR分析の核種は何か。また、硫酸の同定法は何か。
- リンPを使わないという技術も、将来的にはあるのではないか。
- エンジン内にはさまざまな接触形態および摩擦状態があるが、今回の技術は、ほかの機械要素にも応用することが可能か。
- 今後に残された技術課題は何か。

また、公聴会の後に行った最終試験においても、審査委員の口頭試問に対して審査申請者は的確に答えた。以上の結果、当該申請者は、香川大学大学院工学研究科博士後期課程を修了し、博士(工学)の学位を授与するに十分な学識と研究能力を有すると判断し、本最終試験の評価を合格とする。