

第37号

平成29年4月1日

# 博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

(平成28年度 後学期授与分)

金沢工業大学



## 目 次

### ◇博士

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文題目)
博甲 第 108 号	博士(工学)	諸谷 徹郎	AMC 技術を用いた小形アンテナに関する研究・・・・・・・・・・1
博甲 第 109 号	博士(工学)	若林 昌子	試験問題公開と試験システム的设计に関する研究・・・・・・・・・・6
博甲 第 110 号	博士(理工学)	坊垣 隆之	エチル- $\alpha$ -D-グルコシド発酵生産法の開発と新規保湿機能 および線維芽細胞に与える影響に関する研究・・・・・・・・12
博甲 第 111 号	博士(工学)	岩田 雅光	シーラカンス遊泳の生物学的・工学的解析による動物運動制御原理の解明・・・・17

## は し が き

本誌は、学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

氏名	もろや てつお 諸谷 徹郎	
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	博甲 第108号	
学位授与の日付	平成29年3月13日	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当	
学位論文の題目	AMC技術を用いた小形アンテナに関する研究	
論文審査委員	(主査) 教授 牧野 滋	教授 金丸 保典
	教授 前田 正彦	
	東京農工大学	三菱電機株式会社
	教授 宇野 亨	深沢 徹

## 論文内容の要旨

近年、我々の生活は情報通信技術のめざましい発展により、非常に便利で快適なものになっている。これは光やケーブルテレビといった有線サービス、無線 LAN や LTE といった無線サービスが次々と展開され、ブロードバンド環境の構築が容易になっていることに他ならない。平成16年度に総務省がまとめた通信白書では、ユビキタスネットワーク社会について触れている。ユビキタスネットワーク社会とは「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」ネットワークにつながることで、我々の生活が豊かになるよう様々なサービスが提供される社会のことである。平成23年度では、前述したインフラ整備が加速し、現実化に向けて大きく前進していることが報告されている。さらに平成27年度には、ユビキタスネットワークはモノのインターネット（以下、IoT: Internet of Things）として表現が変化している。世界における IoT の市場規模は、2014年時点で約6,500億ドルであったが、2020年には1兆7,000億ドルになると予想されている。また、ICT関連のCisco社の予測によると、IoTの次世代として、人、データ、プロセス、モノがつながりを持ったIoE (Internet of Everything) が2013年から2022年にかけて14兆4,000億ドルの価値を生み出そうとしている。このようにIoT関連の市場規模拡大への期待が伺える。

今後、IoTの発展にはスマートフォンやタブレットなどに代表されるICT端末の普及に続き、眼鏡や腕時計といった私生活で身につける物品に通信機能を設けたウェアラブル端末の開発が欠かせないと考えられる。さらにIoTが普及するためには、ウェアラブル端末のみならず、テレビやエアコンといった家具製品などあらゆる分野の無線化対応が必要と

される。

無線化に伴い各製品に搭載されるアンテナは、薄形かつ小形であることに加え、周囲の金属の有無に関わらずどこにでも設置できる金属対応とする必要がある。

誘電体基板上に二次元的に周期配列した FSR (Frequency Selective Reflector、周波数選択鏡面) は、入射した電磁波を周波数によって反射したり透過したりできる空間フィルタとして用いられている。また、FSR に誘電体よりなるスペーサーを介して金属板を装荷した金属板装荷 FSR は、PMC 特性をもつことが可能となる。PMC 特性とは磁界に対して接線方向の成分が零となる境界条件が成立する特性である。すなわち垂直に入射する平面に対して反射位相が零となる特徴を持つ。これを利用することでアンテナの小形化、薄形化が期待される。AMC とは人工的な構造でこの PMC 特性を実現するものであり、パッチを周期的に配列したものや犬の骨を模した形状やリング形状など様々な報告例がある。また PMC 特性を持つ面に対して平面波が垂直入射した際、その反射係数は 1 となる。これに対して完全導体 (PEC : Perfect Electric Conductor) は完全反射となるため、反射係数は -1 となる。一般的に金属板とアンテナ素子とを積層する際には、その感覚を  $1/4$  波長程度離す必要がある。これはアンテナからの入射波の位相が反射波により逆相となり打ち消され、結果的に外部への放射が抑制されることを防ぐためである。PMC 特性をもつ AMC 面が反射板に装荷されることで、反射位相の制御により近接させることが可能となりアンテナの小形化、薄形化 (低姿勢化) が可能となる。金属板装荷 FSR によって実現できる PMC 基盤の厚さや周波数帯域に関する研究がなされているが、その多くは市販のシミュレータを用いたパラメトリックスタディにより設計パラメータを決定しているため、FSR や誘電体の設計パラメータと PMC 特性の関係が必ずしも明確ではなかった。本論文ではまず、等価回路を用いることにより金属板装荷 FSR の反射位相を表わす簡易式を導出し、PMC 特性を実現するための条件を明らかにする。また、これより PMC 基盤を薄形化するための条件を明確にし、L-C 共振回路として表わされる FSR に替えて、静電容量  $C$  のみで表わすことが可能な AMC 基盤として金属板装荷キャパシタンスグリッドを提案する。またこの AMC 基盤とダイポールアンテナを一体化した新しいアンテナ構造をもとに、更なる小形化をねらった MACKEY (Meta-surface inspired Antenna Chip developed by KIT EOE laboratory) を考案、このアンテナに関するインピーダンス特性、VSWR 特性、電流分布、放射パターンを明らかにすることを目的とする。

第 2 章では、金属板装荷 FSR の構造を示し、その等価回路から反射位相の簡易式並びに導出過程を示す。さらに簡易式の妥当性を評価した上でモーメント法を用いた解析例を示

し、実測結果と合わせ比較結果を示す。

第3章では、第2章で示した金属板装荷 FSR の解析を利用し、構造の簡易化が図れる金属板装荷キャパシタンスグリッドについて説明する。金属板装荷キャパシタンスグリッドの等価回路から計算式および応用範囲を示す。

第4章では、無限サイズおよび有限サイズの AMC 基盤に半波長ダイポールを組み合わせたモデルについて、そのインピーダンス特性と放射パターンについて、数値計算及び実測の結果を示す。

第5章では、第4章で取り上げたモデルの小形化について検討した結果を示す。

第6章では、MACKEY の広帯域化に関する検討結果を示す。

第7章では、本研究の結論を示す。

## 論文審査の結果の要旨

近年、モノのインターネット(以下、IoT: Internet of Things) が注目を集めている。IoT がさらに発展するためには、スマートフォンやタブレットなどに代表される ICT 端末の普及に続き、眼鏡や腕時計といった私生活で身に付ける物品に通信機能を設けたウェアラブル端末、さらには、テレビやエアコンといった家電製品の無線化に対応していく必要がある。これらの製品に搭載されるアンテナは、小形かつ薄形であることに加え、周囲の金属(筐体や電子回路を搭載する金属基板など)の有無に関わらずどこにでも設置できる必要がある。無指向性のアンテナ(あらゆる方向に均一に電波を放射するアンテナ)を金属に近接して配置した場合、金属による電磁波の反射係数が-1(反射位相が $180^\circ$ )であるため、アンテナから直接放射される電磁波と金属から反射される電磁波とが互いに干渉し、電磁波が放射されなくなることが最大の課題であった。従来は、自動車に搭載される地上波デジタルテレビ用アンテナを車体から離して配置しているように、アンテナを金属からある程度(1/4 波長程度)離すことによってこの問題を解決していたため、アンテナの薄形化という課題とは両立できていなかった。これを両立させるための方法のひとつが、金属とアンテナとの間に反射係数1(反射位相が $0^\circ$ )の薄い基板を挿入するというものである。反射位相が $0^\circ$ となる特性をPMC(Perfect Magnetic Conductor)特性と呼ぶが、PMC特性を有する物質は自然界に存在しないため、これを特定の周波数において人工的に実現する構造(以下、AMC: Artificial Magnetic Conductor)の研究が注目を浴びている。AMC基板(Meta-surfaceとも呼ばれる)は、波長に比べて小さな金属素子(素子形状は様々)を二次元周期的に配置した構造に誘電体板を介して金属板を装荷したものであるが、金属素子の設計パラメータと誘電体の設計パラメータとが多いため、所望の周波数においてPMC特性を有するAMC基板を設計するためには、電磁界シミュレータを駆使したパラメトリックスタディに頼らざるを得ない状況であった。

本研究では、AMC基板がPMC特性を有する条件を明確化することにより、その薄形化の条件を見出し、これを用いて新規のAMC基板構造を考案した。また、本来は無限の大きさを必要とするAMC基板をどこまで小形化できるかを明確にした上で、アンテナとAMC基板とを一体化した新規のアンテナ形式であるMACKEY(Meta-surface inspired Antenna Chip developed by KIT EOE laboratory)を考案した。詳細は次のとおりである。

(1) AMC基板の構造を等価回路で表すことにより、PMC特性となるための条件を簡易な式で表すことに成功した。この式において、左辺は金属素子の設計パラメータ、右辺は誘電体基板の設計パラメータであるため、一方を設計すれば他方はこの式より決定でき、AMC



基板の設計が見通しの良いものになった。また、この式より、AMC 基板の薄形化（すなわち、誘電体の薄形化）の条件を見出した。

(2) 従来は二次元周期構造で構成していた AMC 基板と同等の性能を、構造が簡単な一次元周期構造によっても実現できることを見出し、新たな構造の AMC 基板を考案した。また、AMC 基板の厚さと周波数帯域幅との関係を定式化し、その結果、両者が比例関係にあり、AMC 基板の薄形化と広帯域化とは相反する要求条件であることを明らかにした。

(3) AMC 基板は無限周期構造であるが、実用化の際には有限の大きさで使用するようになるため、PMC 特性を維持した状態で AMC 基板をどこまで小形化できるかについて検討し、3 波長×3 波長以上の大きさが必要であることを明らかにした。

(4) 3 波長×3 波長の大きさの AMC 基板とアンテナとの組み合わせでは小形化できたとはみなせないため、アンテナと AMC 基板とを一体化したアンテナ形式である MACKEY を考案、その設計法を明らかにした。試作した 0.45 波長×0.25 波長×0.03 波長の小形薄形アンテナにおいて、インピーダンス特性および放射特性が、自由空間と金属上とでほとんど変化しないことを確認した。このアンテナは、AMC 基板とアンテナとの組み合わせから発想したものであるが、その電流分布を解析することにより、全く異なる原理で動作する新型形式のアンテナであることも確認した。

本論文はこれらの成果を纏めたものであり、査読付き論文 2 編（いずれも筆頭著者、他 2 編を投稿中）、および、国外発表 9 件と国内発表 15 件（研究会 5 件、全国大会 10 件）で報告され、学協会でも高く評価されている。氏に取り組んだ AMC 技術を用いた小形アンテナに関する研究の成果、とりわけ、周囲の金属の有無に関わらず動作する小形薄形アンテナである MACKEY は、今後の IoT のさらなる発展、実用化に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。

氏名	わかばやし まさこ 若林 昌子				
学位の種類	博士（工学）				
学位記番号	博甲 第109号				
学位授与の日付	平成29年3月13日				
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当				
学位論文の題目	試験問題公開と試験システムの設計に関する研究				
論文審査委員	(主査) 教授	杉光 一成	教授	加藤 浩一郎	
		教授	神宮 英夫	教授	田中 吉史
		東北大学			
		教授	柴山 直		

## 論文内容の要旨

今日の社会において、試験（テスト）は幅広い場面で活用されている。大学入試など進学のための選抜や、医師国家試験など特定の職業に就くための資格取得など、試験の結果が社会の決定事項に強い影響力を持つ場合、試験は社会のシステムの一部として機能すると考えられる。このような場合、試験の設計にミスがあるとシステムに不具合が生じてしまうため、試験システムとしても適切な設計ができるよう配慮をしなければならない。ここで試験システムとは、試験問題の内容を作成するという点のみならず、試験を実施、採点し、結果を活用する等、運用面まで含めた仕組みを意味し、試験システムの適切な設計とは、試験には実施する目的があるため、試験を実施する目的に合わせて試験システムを設計することを意味する。

本論文では試験システムを設計する際の1つの視点として、試験実施後に使用した試験問題を広く一般に公開するか公開しないか（試験問題公開）、例えば、誰でも見られるようウェブサイトに掲載するかどうか、に着目した。わが国では試験問題公開は実務上当然であると認識されることが多く、特に近年においては「説明責任」や「透明性担保」の観点から、より公開が求められる傾向にある。試験問題公開は、単純な決定のように思える一方で、教育評価や心理測定の研究者からは、試験システムの設計の根幹に関わるとして判断の難しさが指摘されている。なぜならば、試験問題は厳重な管理のもとで様々なリソースを投入して得た重要な「知的資産」であり、試験問題を一般に公開することは、その資産としての価値や測定ツールとしての精度に大きな影響を与えるからである。例えば、

公開された試験問題と同じ問題を出した場合、試験問題の正解を暗記するなどして、本質的な内容の理解がなくても解答できてしまうことになり、適切な評価ができなくなる懸念が生じる。このような懸念があるにもかかわらず、わが国では、試験システムの設計の際に試験問題公開について検討されることは少なかった。理由の1つには、わが国では試験問題公開が当たり前と認識されているが故、先行研究としても懸念が指摘されるにとどまり、実態の調査や統計データが少ないということが挙げられる。このようなわが国の状況は、例えばアメリカと比較して、「Global Standard = 日本的テスト文化のさかさま」（前川眞一，2007）とも表現されている。

本論文の目的は、試験を実施する目的に合わせて試験システムを設計すること（試験システムの適切な設計）を目指し、わが国における社会の要請を考慮し、かつ、試験システムの設計への影響を見極めた上で試験実施後に使用した試験問題を公開するか公開しないか（試験問題公開）を適切に決定するための判断モデルを提示することである。具体的には、まず試験問題公開が試験システムの設計と複雑に関わっていることについて教育評価や心理測定の研究者以外にはあまり知られていない現状に鑑み、試験問題公開に影響する要因となり得るものを明らかにすることとした。次に試験問題公開の状況について網羅的な調査を行い、得られた実証データに基づいて分析を行い、試験問題公開と、試験問題公開に影響する要因の関係性について明らかにすることとした（試験問題公開に影響する要因の構造化）。

本論文は4章で構成されており、各章の主な研究内容及び研究成果は以下のとおりである。

第1章では、研究の背景として、社会において試験が果たす役割や試験システムの適切な設計の重要性を示した。そして本論文において試験問題公開に着目する意義と先行研究及びその課題を示し、本論文の意義と目的を明確にした。

第2章では、まず教育評価や心理測定の研究者が指摘する試験システム設計と試験問題公開に関する問題点や内閣府の閣議決定など国が掲げている方針について系統立てて整理し、試験問題公開に関する懸案や社会の要請を明確にした。その上で、わが国の公的制度の1つである情報公開制度を具体的事例として、「情報公開・個人情報保護関係 答申・判決データベース」の答申11,183件のうち試験問題を対象とする全ての事例15件について、試験問題公開の決定に至る検討経緯等を俯瞰し、前述の問題点や社会の要請をふまえて分析を行うことにより、「試験問題公開による透明性確保の必要度」、「試験問題の再利用度」、「試験問題を活用した試験対策の許容度」、「試験問題開発の労力増加の受容

度」、「試験問題の情報管理度」の5要因が、試験問題公開に影響する要因になることを示した。

第3章では、まず具体的事例として、わが国で社会的影響力の大きい試験といえる国家試験、すなわち「国が法令等に基づき設けている資格制度」313制度のうち、試験を実施しているもの158制度について網羅的に調査し、結果、最終的に57制度94試験中19試験については、試験問題を非公開にしていることを示した。また試験問題公開に影響する要因の代理指標として、年間実施回数や受験資格のように、試験システムの基本に関わると考えられる設計仕様6因子について、試験問題公開と試験の設計仕様との関係について分析した。次に、本実証データに基づいて、ロジスティック回帰モデルを適用して分析することにより、尤度比検定の結果、P値が0.05以下で有意となったモデルのうち、特に試験システムの設計仕様として「合格最低基準点公表の時期」と「受験手数料」の2因子のみを説明変数としたモデルについては、寄与率は最大(85%)、誤判別率は最少(2%)、AICも最小(17.2)となり、最もあてはまりがよいことを示した。さらにこの結果に基づいて、試験問題公開に影響する要因の構造を推定し、第2章で示した5要因のうち、特に「試験問題の再利用度」及び「試験問題開発の労力増加の受容度」が影響していることを示した。

第4章では、第2章及び第3章の結果から得られた試験システム設計上の試験問題公開に影響する要因について総括した。最終的に本論文の研究成果として、わが国の公的試験における試験問題公開について、「試験問題の再利用度」及び「試験問題開発の労力増加の受容度」を優先項目とする5要因を判断基準とする、試験問題公開を決定するための判断モデルを提示した。

本論文の研究成果として得られた判断モデルは、試験システム設計の指針である「テスト・スタンダード」を補完し得るものであり、本判断モデルを提示することにより、例えば新しく試験システムを構築する際に、社会の理解と試験システムの設計への影響の双方を考慮して試験問題公開を決定することができるようになるなど、試験システムの適切な設計に貢献すると考える。

## 論文審査の結果の要旨

わが国では、試験実施後に使用した試験問題を広く一般に公開することは、特に近年においては「説明責任」や「透明性担保」の観点から、当たり前と考えられている。しかし、教育評価や心理測定の研究者からは、試験問題公開に関する懸念や判断の難しさが指摘されている。なぜならば、試験問題は厳重な管理のもとで様々なりソースを投入して得た重要な「知的資産」であり、試験問題を一般に公開することは、その資産としての価値や測定ツールとしての精度に大きな影響を与えるからである。つまり、試験問題公開の決定が適切でない場合、試験を実施する目的が正しく遂行できない可能性も考えられるからである。このような懸念があるにもかかわらず、わが国では、試験システムの設計の際に、試験問題公開について検討されることは少なかった。理由の1つには、わが国では試験問題公開が当たり前と認識されているが故、先行研究としても懸念が指摘されるにとどまっておらず、実態の調査や統計データが少なく、実証が難しいということも挙げられる。

本論文は、試験を、試験問題の内容を作成するという点のみならず、試験を実施、採点し、結果を活用する等、運用面まで含めた仕組みをシステムとしてとらえ、試験を実施する目的に合わせて試験システムを設計することを目指し、試験問題公開が、試験システム設計と複雑に関わっていることについて教育評価や心理測定の研究者以外にはあまり知られていない現状に鑑み、わが国の試験問題公開の状況について実証データを用いた工学的アプローチをとることにより、試験問題公開に関して一般化した知見を与えるものである。本論文は、査読付き論文3編と海外1件を含む口頭発表5件（いずれも申請者が筆頭著者である）を主要な内容としたものである。

本論文の目的は、試験問題公開の状況について網羅的な調査を行い、調査によって得られた実証データに基づいて、ロジスティック回帰モデルを適用し、試験問題公開に影響する要因の関係性について明示すること（試験問題公開に影響する要因の構造化）により、わが国における社会の要請を考慮し、かつ、試験システムの設計との関わりを見極めた上で試験問題公開を決定する際の判断モデルを提示することである。

本論文は4章で構成されており、各章の研究内容及び主な研究成果は以下のとおりである。

第1章では、まず研究の背景として、社会において試験が果たす役割や試験システムの適切な設計の重要性を示している。そして本論文において試験問題公開に着目する意義と先行研究及びその課題を示し、本論文の意義と目的を明確にしている。

第2章では、まず試験システムの設計の研究者が指摘する試験システム設計と試験問題

公開に関する問題点や内閣府の閣議決定など国が掲げている方針について系統立てて整理し、試験問題公開に関する懸案を明確にしている。その上で、わが国の公的制度の1つである情報公開制度を具体的事例として、「情報公開・個人情報保護関係 答申・判決データベース」の答申 11, 183 件のうち試験問題に関する全ての事例 15 件について、試験問題公開の決定に至る検討経緯等を俯瞰して調査し、前述の懸案をふまえて分析を行うことにより、「試験問題公開による透明性確保の必要度」、「試験問題の再利用度」、「試験問題を活用した試験対策の許容度」、「試験問題開発の労力増加の受容度」、「試験問題の情報管理度」の5要因が、試験問題公開に影響する要因になり得ることを示している。

第3章では、まず具体的事例として、わが国で社会的影響力の大きい試験といえる国家試験、すなわち「国が法令等に基づき設けている資格制度」313 制度のうち、試験を実施しているもの 158 制度について網羅的に調査し、結果、最終的に 57 制度 94 試験中 19 試験については、試験問題を非公開にしていることを示している。また試験問題公開に影響する要因の代理指標として、年間実施回数や受験資格のように、試験システムの基本に関わると考えられる設計仕様 6 因子について、試験問題公開の状況の割合を示している。次に、本実証データに基づいて、ロジスティック回帰モデルを適用して分析することにより、尤度比検定の結果、P 値が 0.05 以下で有意となったモデルのうち、特に試験システムの設計仕様として「合格最低基準点公表の時期」と「受験手数料」の2因子のみを説明変数としたモデルについては、寄与率は最大 (85%)、誤判別率は最少 (2%)、AIC も最小 (17.2) となり、最もあてはまりがよいことを示した。さらにこの結果に基づいて、試験問題公開に影響する要因の構造を推定し、第2章で示した5要因のうち、「試験問題の再利用度」及び「試験問題開発の労力増加の受容度」が特に影響していることを示している。

第4章では、第2章及び第3章の結果から得られた試験システム設計上の試験問題公開に影響する要因について総括している。最終的に本論文の研究成果として、「試験問題の再利用度」及び「試験問題開発の労力増加の受容度」を優先項目とする5要因を有する、試験問題公開を決定する際の判断モデルを提示している。

本論文の研究成果として得られた判断モデルは、試験システム設計の指針である「テスト・スタンダード」を補完し得るものであり、まさに今「新しい時代にふさわしい高大接続の実現に向けた高等学校教育、大学教育、大学入学者選抜の一体的改革について」についての具体的方策として『高大接続システム改革会議「最終報告」』（高大接続システム改革会議, 2016）が公表されるなど、試験システムも含めた教育制度全般の改革に関する政策の検討が進んでいる最中においては、政策検討においても、わが国の試験のあり方に

ついて有益な知見を与えると期待される。

本論文については、先に示した査読付き論文 3 編のうち 1 編については年間 1 編のみに授与される 2016 年度日本テスト学会論文賞を受賞、口頭発表 5 件のうち 1 件について日本テスト学会大会発表賞（2012 年）を受賞しており、その学術的社会的貢献は専門学会においても極めて高く評価されている。

よって、本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。

氏名	ぼうがき たかいゆき 坊垣 隆之
学位の種類	博士（理工学）
学位記番号	博甲 第110号
学位授与の日付	平成29年3月13日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当
学位論文の題目	エチル- $\alpha$ -D-グルコシド発酵生産法の開発と新規保湿機能 および線維芽細胞に与える影響に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 尾関 健二                      教授 小田 忍 教授 袴田 佳宏                      教授 大箸 信一 金沢大学 准教授 坂本 敏夫

## 論文内容の要旨

清酒に0.2%～0.7%含有されているエチル- $\alpha$ -D-グルコシド（以下、 $\alpha$ -EG）は、清酒の呈味に関与するだけでなく、表皮角質細胞に対するUV-Bによる荒肌改善効果等を有することが知られており、化粧品素材として利用されている。しかし、清酒中の $\alpha$ -EG濃度は低く高価であり、コストの低減に課題がある。本論文は第一に、酵素剤を用いた醸造法、焼酎醸造法、さらに醸造副産物である酒粕と白ヌカを利用した醸造法を検討し、発酵法によって $\alpha$ -EGを安価に生産する技術を開発することを目的としている。第二に、ヒト肌試験で $\alpha$ -EG試薬の新規保湿機能を見出し、真皮の線維芽細胞に与える影響について検討することを目的としている。第三に、 $\alpha$ -EGを添加した培地で線維芽細胞を培養し、その遺伝子発現解析によって遺伝子レベルで $\alpha$ -EGが皮膚の保湿機能に与える影響を解明することを目的としている。

以下に本研究で得られた成果を記す。

### 発酵法による $\alpha$ -EGの生産

麹菌6株、酵母3株を用いて清酒を醸造することで生産性評価を行い麹菌および酵母それぞれ1株を選定した。決定した配合で製造した $\alpha$ -EG高含有酒は3%程度の $\alpha$ -EGを含有していた。次に $\alpha$ -EG高含有焼酎蒸留残渣を供する焼酎醸造法を初めて開発した。米又は麦を原料とした仕込み方法を検討し、米の場合は通常の場合の4分の1、麦の場合は通常の場合の12分の1に麹量を減量し、酵素剤を添加した仕込みでもろみの $\alpha$ -EG濃度が2%となった。この



もろみを蒸留して製造した焼酎の品質は通常と同等の品質であった。さらに、 $\alpha$ -EG 高含有酒粕再発酵酒の製造法を開発した。液化白ヌカと酒粕を原料として醸造した場合もろみの  $\alpha$ -EG 濃度は 2.4 % であった。 $\alpha$ -EG 濃度 2.5 %、エタノール濃度 15 % に調製した酒粕再発酵酒を用いた肌の保湿試験でその有効性が確認された。これまでの清酒を原料とした  $\alpha$ -EG 製造法と比較して、酒粕再発酵酒は、約 7 分の 2、焼酎蒸留残渣抽出液は約 20 分の 1 の原料コストであった。以上の研究によって産業廃棄物である焼酎蒸留残渣から  $\alpha$ -EG を抽出する製造方法、醸造副産物である、酒粕と白ヌカを利用した  $\alpha$ -EG 高含有酒粕再発酵酒の製造法の低コスト化に初めて成功した。

#### $\alpha$ -EG のパッチ試験による新規保湿機能の検討

水、0.1 % エタノールを基材として種々の濃度の試薬  $\alpha$ -EG を肌に塗布した結果、水、または 0.1 % エタノールを基材とした場合  $\alpha$ -EG 濃度 0.1 % で最も保湿効果が高かった。また、 $\alpha$ -EG の保湿効果は塗布後 270 分まで効果が持続した。シャンプーに酒粕再発酵の焼酎蒸留残渣からの  $\alpha$ -EG を添加した保湿試験では、無添加の対象と比較して  $\alpha$ -EG 濃度 0.15 % のとき最も保湿効果が高く、0.01 % 添加区でも有意に効果が認められた。浴用剤として利用されている炭酸水を基材とした場合、0.001 % で効果が確認された。本研究で開発した方法で製造した  $\alpha$ -EG 高含有発酵液は浴槽にコップ半杯程度加えれば効果があり実装可能なレベルである。

#### $\alpha$ -EG が線維芽細胞に与える影響

培養細胞に  $\alpha$ -EG 試薬を添加して培養した結果、 $\alpha$ -EG は添加量 1 % までは生育に影響がなかった。 $\alpha$ -EG を培地に添加した増殖試験では  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5}$  % (0.48  $\mu$ M) の低濃度で約 20 % の細胞増殖賦活化作用が認められた。同様の添加試験で培地中に生産される I 型コラーゲンを定量した結果、 $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5}$  % でコントロールと比較して約 120 % のコラーゲン濃度であった。培養細胞から総 mRNA を抽出し、定量 PCR を行った。細胞増殖因子遺伝子 *FGF1* は、 $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-4}$  % および  $1 \times 10^{-5}$  % の時コントロールと比較して 120 % に増加した。*FGF7* 遺伝子は  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5}$  % の時、120 % に増加した。この結果から、遺伝子レベルで細胞増殖が賦活化されている可能性が示された。I 型コラーゲンの構造タンパク質遺伝子 *COL1A1* は  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5}$  % の時コントロールと比較して約 160 % に増加した。また、*COL1A2* 遺伝子は  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5}$  % の時、約 140 % に増加した。III 型コラーゲンの遺伝子 *COL3A1* は  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5}$  % の時、135 % に増加した。これらの結果から、遺伝子レベルでコラーゲン生産が賦活化されている可能性が示された。本研究によって初めて  $\alpha$ -EG が線維芽細胞の遺伝子発現に影響を与える事を実証した。

醸造副産物を利用することで低コストな発酵法による $\alpha$ -EG 高含有発酵物である焼酎蒸留残渣抽出液および酒粕再発酵酒の製造法を開発した。 $\alpha$ -EG には塗布するだけで4時間以上保湿効果が持続する効果があった。 $\alpha$ -EG には細胞増殖賦活化作用およびコラーゲン生成賦活化作用が認められた。細胞増殖とコラーゲン生成に関連する5種類の遺伝子のmRNAを定量した結果いずれも $\alpha$ -EG濃度が $1 \times 10^{-5}\%$ のときコントロールと比較して有意に増加していた。

本研究では日本の伝統的な発酵法を物質生産に応用し $\alpha$ -EGの製造法を開発した。またその有効性と応用可能性を示し、遺伝子レベルでの作用を確認した。この成果は社会実装可能な技術であり、醸造産業の発展に資する成果である。

本論文は査読論文4編（英文1編と和文3編）と査読中の論文（英文）1編から成る。

## 論文審査の結果の要旨

清酒に 0.5 % 程度含有されているエチル- $\alpha$ -D-グルコシド（以下、 $\alpha$ -EG）は、清酒の呈味に関与するだけでなく、表皮角質細胞に対する UV-B による荒肌改善効果などを有することが知られており、化粧品素材として利用されている。しかし、清酒中の  $\alpha$ -EG 濃度は低く、高価であり、コストの低減に課題がある。本論文は第一に、酵素剤を用いた清酒醸造法、焼酎醸造法、さらに醸造副産物である酒粕と白ヌカを利用した醸造法を検討し、発酵法によって  $\alpha$ -EG を安価に生産する技術を開発することを目的としている。第二に、ヒト肌試験で  $\alpha$ -EG 試薬の新規保湿機能を見出し、真皮の線維芽細胞に与える影響について検討することを目的としている。第三に、 $\alpha$ -EG を添加した培地で線維芽細胞を培養し、その遺伝子発現解析によって遺伝子レベルで  $\alpha$ -EG が皮膚の保湿機能に与える影響を解明することを目的としている。以下に主要な成果を記す。

### 発酵法による $\alpha$ -EG の生産

$\alpha$ -EG 生産に有効な麹菌および酵母それぞれ 1 株を選定した。決定した仕込み配合で製造した  $\alpha$ -EG 清酒は 3 %程度の  $\alpha$ -EG を含有していた。次に  $\alpha$ -EG 高含有焼酎蒸留残渣を供する焼酎醸造法を初めて開発した。米または麦を原料とした仕込み方法を検討し、米では通常 4 分の 1、麦では通常 12 分の 1 に麹を減量し、酵素剤を添加した仕込みでもろみの  $\alpha$ -EG 濃度がそれぞれ 2 %となった。このもろみを蒸留して製造した焼酎の品質は通常と同等の品質であった。さらに、 $\alpha$ -EG 高含有酒粕再発酵酒の製造法を開発した。酒粕と白ヌカを原料として醸造した場合、もろみの  $\alpha$ -EG 濃度は 2.4 %であった。 $\alpha$ -EG 濃度 2.5 %、エタノール濃度 15 %に調整した 2 倍希釈系列の酒粕再発酵酒を用いた肌の保湿試験でその有効性が確認された。これまでの清酒を原料とした  $\alpha$ -EG 製造法と比較して、酒粕再発酵酒は、約 7 分の 2、焼酎蒸留残渣抽出液は約 20 分の 1 の原料コストであった。以上の研究によって産業廃棄物である焼酎蒸留残渣から  $\alpha$ -EG を抽出する製造方法、醸造副産物である、酒粕と白ヌカを利用した  $\alpha$ -EG 高含有酒粕再発酵酒の製造法の低コスト化に初めて成功した。

### $\alpha$ -EG のパッチ試験による新規保湿機能

水、0.1 % エタノールを基材として種々の濃度の試薬  $\alpha$ -EG を肌に塗布した結果、水、または 0.1 % エタノールを基材とした場合  $\alpha$ -EG 濃度 0.1 % で最も保湿効果が高かった。また、 $\alpha$ -EG の保湿効果は塗布後 270 分間まで効果が持続した。シャンプーに酒粕再発酵の焼酎蒸留残渣からの  $\alpha$ -EG を添加した保湿試験では、無添加と比較して  $\alpha$ -EG 濃度 0.15 % のとき最も保湿効果が高く、0.01 %添加でも有意に効果が認められた。浴用剤として利

用されている炭酸水を基材とした場合、0.001 % で効果が確認された。本研究で開発した方法で製造した  $\alpha$ -EG 高含有発酵液は浴槽にコップ半杯程度加えれば効果があり実装可能なレベルである。

#### $\alpha$ -EG が線維芽細胞に与える影響

培養細胞に  $\alpha$ -EG 試薬を添加して培養した結果、 $\alpha$ -EG は添加量 1 % までは生育に影響がなかった。 $\alpha$ -EG を培地に添加した増殖試験では  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5} \%$  ( $0.48 \mu\text{M}$ ) の低濃度で約 20 %の細胞増殖賦活化作用が認められた。同様の添加試験で培地中に生産される I 型コラーゲンを定量した結果、 $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5} \%$  でコントロールと比較して約 120 % コラーゲン濃度が増加した。培養細胞から mRNA を抽出し、定量 PCR を行った。細胞増殖因子遺伝子 *FGF1* は、 $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-4} \%$  および  $1 \times 10^{-5} \%$  の時コントロールと比較してそれぞれ 120 %に増加した。*FGF7* 遺伝子は  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5} \%$  の時、120 %に増加した。これらの結果から、遺伝子レベルで細胞増殖が賦活化されている可能性が示された。I 型コラーゲンの構造タンパク質遺伝子 *COL1A1* は  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5} \%$  の時、約 160 %に増加した。また、*COL1A2* 遺伝子は  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5} \%$  の時、約 140 %に増加した。III 型コラーゲンの遺伝子 *COL3A1* は  $\alpha$ -EG 濃度  $1 \times 10^{-5} \%$  の時、135 %に増加した。これらの結果から、遺伝子レベルでコラーゲン生産が賦活化されている可能性が示された。本研究によって初めて  $\alpha$ -EG が線維芽細胞の遺伝子発現に影響を与える事を実証した。

本論文では日本の伝統的な発酵法を物質生産に応用した  $\alpha$ -EG の製造法を開発した。またその有効性と応用可能性を示し、遺伝子レベルでの作用を確認した。この成果は社会実装可能な技術であり、醸造産業の発展に資する成果である。

本論文は査読論文 4 編（英文 1 編と和文 3 編）と査読中の論文（英文）1 編から成る。

よって、本論文は博士（理工学）の学位に十分値すると判断する。

氏名	いわた まきみつ 岩田 雅光		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲 第111号		
学位授与の日付	平成29年3月13日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当		
学位論文の題目	シーラカンス遊泳の生物学的・工学的解析による動物運動 制御原理の解明		
論文審査委員	(主査) 教授	佐藤 隆一	教授 鈴木 亮一
	教授	南戸 秀仁	
	慶應義塾大学		京都大学
	特任教授	ミヤケ ツトム	名誉教授 熊本 水頼

## 論文内容の要旨

脊椎動物は、脊索動物より進化し、現在では、水中に3万2千余種の魚類と、陸上にも約同数の陸上四足動物が繁栄している。多様な形態に分化しているが、その移動方法は二つに大別できる。魚類の基本的移動は体側の平行筋束の収縮を伝播させて体幹をS字状に波動運動させる時系列モード拮抗筋対制御システムによる。それに対し、陸上四足動物の移動は四肢によるものであり、拮抗二関節筋対と両端の関節にある2対の拮抗単関節筋対の協調した活動による位相差組合せモード拮抗筋対制御（協調制御）システムによる。陸上四足動物は原始魚類の中の原始肉鰭類から進化している。現存する肉鰭類であるシーラカンスの遊泳には移行段階である制御システムが存在するであろうと考え、遊泳原理を数学モデルによって解析した。

シーラカンスの遊泳は左右の胸鰭、左右の腹鰭、第2背鰭と第1臀鰭を揺動させて推力を発生する。各鰭は体軸に対して回転するヒービングと各鰭の基部から先端部への軸に対して回転するピッチングを行っている。内部には2層の筋肉層があり、表層の筋肉は鰭基部から先端に縦走しヒービングを発生する。深層の筋肉は鰭基部から先端部に対して斜走しており、ヒービングと同時にピッチングを発生する。深部の筋肉は二関節筋対と単関節対による拮抗筋対機構が存在し、陸上四足動物の持つ構造と同様の構成ではあったが、位相差制御ではなく時系列モードによる制御である。

自然界のビデオの観察によると各鰭の揺動は、位相を持った単一の正弦波によって制御されている。各鰭の揺動を有顔ベクトルで定義した2リンクロボットアームの数学モデルで表すことができる。この数学モデルにホルマリン標本から得られた計測値と自然界での遊泳を記録したビデオにより得られた各鰭の揺動の数値を入力により推定された推力は、ビデオより推定した推力によく一致した。

シーラカンスの前進にかかる推力は主に第2背鰭と第1臀鰭によって発生している。シーラカンスが高速で遊泳するに従い、それぞれの鰭の両振幅角は大きくなり、発生推力も大きくなっている。しかし、潮流に逆らい一定の場所に定位している際には、胸鰭で発生する推力の方が大きくなっていた。また稚魚が発生する推力は小さく、遊泳力は低いと考えられた。

第2背鰭と第1臀鰭の揺動は進行方向に対して横力も発生するが、自然界での観察では魚体が進路を不安定にさせることなく前進していることから、この横力は第1背鰭と、第3背鰭、尾鰭、第2臀鰭で構成される尾部でキャンセルしていると考えられる。しかし、第2背鰭と第1臀鰭の揺動で発生したヨーイングモーメントは運動量定理による検討ではキャンセルすることはできなかった。船舶の舵力計算法による検討では魚体全体が斜舵角を持った場合にはキャンセルされる可能性がある。

シーラカンスの胸鰭が陸上四足動物の上肢と相同であり、陸上四足動物の四肢の拮抗筋対構造と同様の構成である二関節筋対と単関節筋対による拮抗筋構造を持っていることから、ヒトの上肢・下肢の筋出力計算法をシーラカンスの胸鰭に適用して鰭先の出力を計算すると、魚体の質量を支える力を出すことも可能であった。

最初の四足動物である両生類は、3億8千万年前に肉鰭類より進化したと考えられている。化石では骨格のみが残り、内蔵や筋肉などの軟組織は消失しているが、現存するシーラカンスは原始肉鰭類との共通の形質を多く持っている。化石と現生シーラカンスの骨格が類似した構造を持つことから、筋肉構造も同様、あるいは酷似していると考えられる。そして、現生シーラカンスの筋肉構造が、陸上四足動物の四肢の筋肉構造と同様の構成を持ち、鰭の揺動が単一信号の入力による数学モデルで再現できたため、魚類から陸上四足動物を通して、単一入力信号による拮抗筋対制御システムは脊椎動物に共通する基礎的な運動制御原理であるということが示唆された。

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、バイオロボティクス領域に動物特有の運動制御特性を応用する可能性を探るため、魚類と陸上四足動物の分岐点に位置するシーラカンスを対象として、二つの手法、即ち

(1) 生物学的解析：生体調査、遊泳動作解析、解剖及び幾何学的寸法計測等

(2) 工学的解析：数学モデル構築及びその応用、ハードウェアとしてのロボット製作を用いて、二つの切り口、即ちアクチュエーターとしての筋配列の制御工学的特性およびコントローラとしての神経支配様式の特徴から動物運動制御原理の解明を試みた。シーラカンスの肉鰭の揺動制御原理は「二関節筋+単関節筋+時系列モード拮抗筋対制御システム」であり、魚類の「多関節筋時系列モード拮抗筋対制御システム」による遊泳から、陸上四足動物の「二関節筋+単関節筋+位相差組合せモード拮抗筋対制御（協調制御）システム」による歩行に至る進化の途上にある運動制御原理で、「拮抗筋対制御システム」が共通して存在することを明らかにした。

生物学的解析ではインドネシア及びタンザニアにおいてシーラカンスの形態、行動、鰭の運動を、遠隔操作型有索無人探査機にてビデオを撮影した。遊泳動作解析の結果、平常時の遊泳では、胸鰭、腹鰭、第2背鰭、第1臀鰭を、ヒービングとピッチングの合成運動により8字状に揺動させて推力を発生させる。第3背鰭、尾鰭、第2臀鰭を含む尾部は、第2背鰭と第1臀鰭が同一側面方向への揺動によるヨーイングモーメントキャンセルするよう逆方向に揺動することが明らかにされた。生態調査で得られた高速前進状態での遊泳動作解析から、3対6枚の肉鰭は同一の周期3秒で揺動していることが明らかにされた。魚体を前進させる推力は、主として第2背鰭と第1臀鰭によって生み出されており、1周期の間に最大値約7Nの2つのピークをもつことが明らかにされた。

以上から、シーラカンスの第2背鰭と第1臀鰭が、羽ばたき運動をする振動翼推進器として機能していることが明らかにされ、無人水中航走体への適用の可能性が示された。

シーラカンス胸鰭の解剖から、ヒービングは肉鰭の表層部筋肉により、ピッチングは深層部筋肉によることが明らかにされた。深層部には単関節筋と二関節筋が存在し、陸上四足動物の四肢の筋肉構造と対応づけられるとともに、コントローラとしての神経支配回路網的には魚類と同様に拮抗筋対時系列制御システムにより揺動していることが明らかにされた。以上から、単一入力信号による振動翼推進器制御の可能性が示された。

工学的解析では、標本の幾何学的寸法計測に基づき、鰭の運動を単一入力信号に位相差を加えて各鰭の揺動を表現する数学モデルを構築した。これに遊泳動作解析から得られた、

胸鰭対、腹鰭対、第 2 背鰭及び第 1 臀鰭に  $\pi$  ずつ位相をもった正弦波を入力したところ、シーラカンスの各鰭の回転運動を再現することができた。このモデルに自然界で観察された各肉鰭のヒービング、ピッチングの振幅角度、回転周期を与えて計算された推力は、1 周期に 2 つのピーク値 6.9N を持ち、遊泳映像から求めた推力 7N とよく一致し、数学モデルが妥当であることが示された。

さらにこの数学モデルにより、異なる 3 種の遊泳状態等について、鰭が発生する推力を計算した。高速前進、低速前進、水中定位状態では各肉鰭の振幅角が異なり、第 2 背鰭、第 1 臀鰭の振幅角は高速前進状態で最も大きかった。胸鰭の振幅角は、遊泳速度の上昇とともに減少した。腹鰭の振幅角の変化は遊泳速度の増減とは異なり、前進のための推力ではなく、姿勢制御に寄与していることが示唆され、複数枚の振動翼推進器における翼の機能分担に関する工学的知見が得られた。

生態調査及び数学モデルによる計算結果から、第 2 背鰭、第 1 臀鰭発生するヨーイングモーメントは、第 3 背鰭、尾鰭、第 2 臀鰭を含む尾部の運動と、航空機垂直尾翼と類似の風見安定性によりキャンセルされ、保針性確保の技術的可能性が示された。これから、振動翼推進型無人水中航走体へ応用した場合の、針路安定性確保に関する技術的知見が得られた。

胸鰭及び腹鰭と相同器官であるヒトの上肢・下肢からの筋出力計算法をシーラカンスに適用し胸鰭先端の出力を計算した。その結果、体重を支える力を出力することも可能であることが示唆され、シーラカンスの胸鰭の位相差組合せモードによる制御への移行の可能性を確認できた。

単一入力信号である 1 台のモーターの回転運動を、ギヤの組み合わせにより位相差を与えて各鰭に伝達し、内転・外転筋及び回内・回外筋の機能をスウィングドライブ機構により再現することにより、各鰭がピッチング及びヒービングの合成運動をするロボットを製作し、シーラカンスの肉鰭に存在する「二関節筋+単関節筋+時系列モード拮抗筋対制御システム」の存在をハードウェアとして立証した。このロボットの機構によれば、放射線に弱い制御基板が不要となり、原子炉格納容器内等の高放射線環境下で活動できる振動翼推進型無人水中航走体等が実現できる。

生物は、アクチュエーターとコントローラの組み合わせで運動する。アクチュエーターである筋肉が「多関節筋」あるいは「二関節筋+単関節筋」、コントローラである神経支配回路網が「時系列制御」あるいは「位相差制御」の、計 4 通りの組み合わせが考えられる。魚類が持つ「多関節筋+時系列モード拮抗筋対制御システム」、陸上四足動物が持つ



「二関節筋＋単関節筋＋位相差モード拮抗筋制御システム」、及び両者の接点に位置するシーラカンス肉鰭が持つ「二関節筋＋単関節筋＋時系列モード拮抗筋制御システム」に共通して存在する「拮抗筋対制御システム」が動物運動制御原理であることが明らかにされた。

「拮抗筋対制御システム」が動物運動制御原理であることを明らかにできた所以は、ヒトをはじめ生物は所詮進化の所産であると考え、生物進化史を生体運動の機構制御という視点から繙くというアプローチを試みたところにある。これは従来の機械機構学に基づく工学的実験検証によるアプローチとは全く異なっている。生物の機構は一つ一つの動きを高度な計算によって行われているわけではなく、洗練された機構により単純化され機能していることが明らかにされた。

本研究の内容は査読付主要論文2編（英文1編、和文1編）関連論文8編に公表されている。特に2016年 *The Anatomical Record* への公表論文は、シーラカンス胸鰭に二関節筋が存在することを世界で初めて示した歴史的業績である。本研究の成果は、振動翼推進型無人水中航走体のみならず、昨今必要性が高く認識されているバイオロボティクス領域、医療・介護・福祉機器等への応用が期待される。本論文は生物の動作解析から得られた知見を工学技術の新しい応用分野に供する独創性に富むものである。よって、本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。