

高知大学学位授与記録

本学は、次の者に博士（理学）の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）第8条の規定に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

目 次

学位記番号	氏名	学位論文の題目	ページ
甲総科博第53号	下村 磨生将	Notes on Greek letter elements and the Retract conjecture (ギリシャ文字元とレトラクト予想について)	1
甲総科博第54号	平岡 優海	On the positivity of the dimension of the global sections of generalized adjoint bundles for quasi-polarized surfaces and their classification for small dimensional cases (準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元の正値性とその次元の値が小さい場合の分類について)	4
甲総科博第55号	吹本 樹	Reconstruction of the seasonal shell growth and habitat temperature of the extinct bivalve <i>Mizuhopecten tokyoensis</i> based on shell microgrowth and oxygen isotope analyses (殻微細成長と酸素同位体分析に基づく絶滅二枚貝トウキョウホタテガイの季節的殻成長と生息水温の復元)	7
甲総科博第56号	山口 蓮	Revision of the cottid genus <i>Pseudoblennius</i> (Teleostei: Cottidae) (カジカ科アナハゼ属魚類の分類学的再検討)	10
甲総科博第57号	齊藤 瞭汰	カタユウレイボヤの心臓における遺伝子の発現と機能の研究	13
甲総科博第58号	内田 嗣人	四国地域の中央構造線における浅部脆性変形の分布と断層帯の発達史	16

論文の内容の要旨

安定ホモトピー論は、スペクトラムのなす安定ホモトピー圏の性質について研究する分野である。安定ホモトピー論の重要な問題の一つに「球面スペクトラムのホモトピー群の構造決定問題」がある。球面の安定ホモトピー群の構造を完全に把握できれば、スペクトラムのなす安定ホモトピー圏の構造をより深く理解することができる。しかし、球面スペクトラムのホモトピー群の構造を完全に決定することは、非常に困難なものである。

本論文は、素数 p で局所化されたスペクトラムのなす安定ホモトピー圏 S でのホモトピー群におけるギリシャ文字元について考察を行い、スペクトラムのなす安定ホモトピー圏の構造解析を目的とする。ギリシャ文字元は球面スペクトラム S のホモトピー群の生成元となりうるものとして定義されているが、一般には存在も、存在した場合もゼロであるかどうかも分かっていない。この問題を chromatic ホモトピー論の見地から考える。各整数 $n \geq 0$ に対し、Johnson-Wilson スペクトラム $E(n)$ とそれに関する Bousfield localization functor $L_n = L_{E(n)}: S_p \rightarrow S_p$ を考える。Hopkins-Ravenel の定理があるので、局所化された球面のホモトピー群 $\pi_*(L_n X) = [L_n S, L_n X]_*$ について考察する。

本論文の構成は以下の通りである。第1章では、研究の背景と概要を述べている。第2章では、ギリシャ文字元の積の存在について、chromatic ホモトピー論の見地から考察を行った。具体的には、余加群のコホモロジー群の計算を Smith-Toda スペクトラムのホモトピー群の決定に結びつけるため、Adams-Novikov スペクトル系列を用いた。その結果、first Smith-Toda スペクトラムのホモトピー群におけるゼロでないギリシャ文字元の積の存在を示した。第3章では、第2章の成果をもとに、局所化された球面スペクトラムのホモトピー群でのギリシャ文字元を定義するために双対写像を用いた。その結果、ある条件のもとゼロでないギリシャ文字元の存在を Johnson-Wilson スペクトラムで局所化された球面スペクトラムのホモトピー群 $\pi_*(L_n S)$ 上で示した。今回のギリシャ文字元に関する結果は、球面スペクトラムのホモトピー群 $\pi_*(L_3 S)$ を完全決定する足掛かりとなりうる結果である。第4章では、これまでのギリシャ文字元の考察を基に、Bousfield lattice の問題を考えた。Bousfield lattice をより一般の distributive complete lattice B に置き換え、 $DL = \{x \mid x \wedge x = x\}$ と置いたとき、写像 $r: B/N \rightarrow DL$ が同型となるようなイデアル N の存在問題（レトラクト予想）を考えるに至り、dichotomizer d が存在する場合について考察した。

論文審査の結果の要旨

学位申請者下村磨生将が研究を行っている「安定ホモトピー論」は、スペクトラムのなす安定ホモトピー圏の性質について研究する分野である。安定ホモトピー論の重要な問題の一つに「球面スペクトラムのホモトピー群の構造決定問題」があり、球面の安定ホモトピー群の構造が完全に把握できれば、スペクトラムのなす安定ホモトピー圏もある程度構造を把握することができる。そこで学位申請者の学位論文では、スペクトラムのなす安定ホモトピー圏の構造をより深く理解するために、球面の安定ホモトピー群の構造について解明することを目的としている。

提出された学位論文は、第1章から第4章までの構成になっており、具体的内容については以下のようになっている。第1章では、導入として学位論文全体の内容の概要を記しており、第2章以降からが本質的な内容になっている。上記研究目的のための研究手段の一つとして、第2章では球面スペクトラムのホモトピー群に現れる「ギリシャ文字元」の存在に関する問題が扱われている。しかし、その問題の考察は困難であるため、まず chromatic ホモトピー論の見地からギリシャ文字元の積の存在について考察が行われ、Adams-Novikov スペクトル系列を用いて、first Smith-Toda スペクトラムのホモトピー群におけるゼロでないギリシャ文字元の積の存在が示された。次に第2章での結果をもとにして第3章では、ある条件のもとゼロでないギリシャ文字元の存在を Johnson-Wilson スペクトラムで局所化された球面スペクトラムのホモトピー群 $\pi_*(L_n S)$ 上で示した。この結果は第2章で述べたギリシャ文字元の積の結果に基づいて、安定ホモトピー圏の構造に関する理解を深めることに役立っている。そして第4章では、これまでのギリシャ文字元の考察をもとに Bousfield lattice に関連する問題としてレトラクト予想について考察が行われている。

学位申請者の研究テーマは位相幾何学における重要な問題の一つである球面のホモトピー群の構造決定に関連する安定ホモトピー論についての研究であり、球面のホモトピー群は monochromatic コホモロジー群と関連しているが、そのシステムは非常に難解であり、かつそこでの計算はとても複雑なものであるため、研究を行うには理論の十分な理解とその理論を運用する能力、そしてその際に必要となる計算力が求められる。本論文は、3年間の研究成果としてふさわしい内容が学位論文としてまとめられており、その内容から今後の研究活動を行うための力量が備わっていると判断される。

以上の主な成果は、原著論文として、審査付の国際的学術雑誌に掲載（1編、筆頭著者相当論文）されており、本研究は球面のホモトピー群の構造決定に関連する安定ホモトピー論についての研究に関する価値ある知見の集積であると認められる。

よって学位申請者下村磨生将は博士（理学）の学位を得る資格があると認める。

<p>ふりがな</p> <p>氏名(本籍)</p> <p>学位の種類</p> <p>学位記番号</p> <p>学位授与の要件</p> <p>学位授与年月日</p> <p>学位論文題目</p>	<p>ひらおか ゆう</p> <p>平岡 優海(岡山県)</p> <p>博士(理学)</p> <p>甲総科博第54号</p> <p>学位規則第4条第1項該当</p> <p>令和8年3月23日</p> <p>On the positivity of the dimension of the global sections of generalized adjoint bundles for quasi-polarized surfaces and their classification for small dimensional cases</p> <p>(準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元の正值性とその次元の値が小さい場合の分類について)</p>												
<p>発表誌名</p>	<p>Yu Hiraoka</p> <p>On the dimension of the global sections of generalized adjoint bundles for quasi-polarized surfaces</p> <p>Nihonkai Mathematical Journal, Vol. 35, No. 1 (2025) (掲載予定)</p>												
	<p style="text-align: right;">審査委員</p> <table style="margin-left: auto; margin-right: 0;"> <tr> <td>主査</td> <td>教授</td> <td>小松</td> <td>和志</td> </tr> <tr> <td>副査</td> <td>教授</td> <td>福間</td> <td>慶明</td> </tr> <tr> <td>副査</td> <td>教授</td> <td>仲野</td> <td>英司</td> </tr> </table>	主査	教授	小松	和志	副査	教授	福間	慶明	副査	教授	仲野	英司
主査	教授	小松	和志										
副査	教授	福間	慶明										
副査	教授	仲野	英司										

論文の内容の要旨

この学位論文では、準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元について、博士課程で研究した結果とその証明を記述してある。

準偏極多様体とは、複素数体上定義された非特異な射影多様体とネフかつ巨大な Cartier 因子との組のことをいう。特に、射影多様体が 2 次元のものを準偏極曲面という。

代数幾何学における研究目的の一つとして、射影多様体自身の性質をより詳しく知ることが挙げられる。その際、射影多様体のみを考えるのではなく、射影多様体と豊富な因子との組である偏極多様体を調べることにより、射影多様体自身の性質をより詳しく調べるのが可能となる。さらに、偏極多様体よりも準偏極多様体の場合を研究することで、より一般化された結果を得ることができ、さらに汎用性も高くなるため、大学院での研究では準偏極多様体を研究してみようと考えた。

準偏極多様体の研究には様々あるが、その中でも特に、準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元について研究を行った。研究内容は、以下の 2 点である。

1. 準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元の正值性
2. 準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元が小さい値をとるときの準偏極曲面の分類

1 点目に関して、次元の値が正をとる場合、調べたい射影多様体から射影空間への有理写像を作ることが出来る。この有理写像を用いて、調べたい射影多様体の性質を調べることができる。従って、この次元の正值性を調べることはとても重要な研究である。

2 点目に関して、次元の値がある程度大きくなると、より細かな情報を得ることが出来る可能性が高まるため、次元がどの程度になるかを知ることは重要である。そこで、次元が小さい値となる準偏極曲面の分類を調べておくことにより、考察対象の準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元がどのくらい大きくなるかの考察がしやすくなるため、今回の分類結果は準偏極曲面に関する研究において有用に活用されることが期待される。

随伴束の大域切断のなす次元に関する研究では、「Ionescu の予想」や「Beltrametti-Sommese の予想」、さらに「これらの予想を一般化した予想」があり、様々な研究がなされている。

この学位論文では、上記の 3 番目の予想である「一般化した予想」について、博士課程で行った以下の 3 点の研究結果とそれらの証明を記述している：

1. 準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元の正值性
2. 準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元が 1 となる準偏極曲面の分類
3. 準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元が 0 となる準偏極曲面の分類

また、研究背景や証明の際に必要な定義・定理、場合によってはそれらの証明、今後の課題についても学位論文の中で触れている。

論文審査の結果の要旨

学位申請者平岡優海が行っている研究分野である代数幾何学において中心となる研究対象の一つとして射影多様体があげられる。射影多様体を研究するにあたり方法はいくつかあるが、その一つとして射影多様体そのものだけでなく、その上にある豊富な因子との組として考えて考察を行う方法がある。この射影多様体と豊富な因子との組を偏極多様体と呼ぶ。さらに、豊富な因子ではなく、その一般化であるネフかつ巨大な因子との組を準偏極多様体と呼ぶ。(準)偏極多様体の研究は先行研究として様々なものがあるが、非特異射影多様体の性質を研究する際には非特異(準)偏極多様体から作られる随伴束が重要な働きをすることが分かっている。特に、随伴束の大域切断のなす次元に関する研究では近年いくつかの重要な予想が提案され、その解決に向けて研究が進展してきている。さらに、汎用性を高めるため一般化された随伴束での予想があり、学位申請者が提出した学位論文では、2次元非特異準偏極多様体の場合(以下準偏極曲面とよぶ)ではあるが、その一般化された予想に関して、3年間の研究において得られた成果がまとめられている。

学位論文の構成としては、第1章で今回の研究に関する背景や先行研究等が述べられ、第2章では、本論文で必要になる定義や結果などを的確にまとめている。第3章では、本論文の主結果の一つである、準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元の正值性についての証明がなされている。第4章以降はもう一つの研究成果についてまとめられている。すなわち、第4章と第5章では、準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元が1となるときの準偏極曲面の分類について、そして、第6章では準偏極曲面の一般化された随伴束の大域切断のなす次元が0となるときの準偏極曲面の分類についての研究成果がまとめられている。第3章における証明や第4章から第6章までの分類においては細かい議論が続く内容であり、まとめること自体が大変困難な作業ではあるが、可能な限りわかりやすく記述されており、学位申請者が本研究に関して本質的な部分を十分に理解し、言語化できている様子を伺い知れた。また、研究においては、先行研究や既存の知識だけではなく、自らの新たなアイデアを取り入れ、それらをどのように組み合わせることで、研究課題となっている問題に対する解決方法を見出すことができるのかを考えることが重要となるが、本学位論文では、主結果の証明においてそれを実践していることが読み取れる。

以上の主な成果は、原著論文として、審査付の国際的学術雑誌に受理されて掲載予定(1編、単著論文)であり、本研究は偏極多様体における随伴束の大域切断の次元に関する価値ある知見の集積であると認められる。

よって学位申請者平岡優海は博士(理学)の学位を得る資格があると認める。

<p>ふりがな 氏名(本籍) 学位の種類 学位記番号 学位授与の要件 学位授与年月日 学位論文題目</p>	<p>ふきもと いつき 吹本 樹 (和歌山県) 博士(理学) 甲総科博第55号 学位規則第4条第1項該当 令和8年3月23日 Reconstruction of the seasonal shell growth and habitat temperature of the extinct bivalve <i>Mizuhopecten tokyoensis</i> based on shell microgrowth and oxygen isotope analyses (殻微細成長と酸素同位体分析に基づく絶滅二枚貝トウキョウホタテガイの季節的殻成長と生息水温の復元)</p>
<p>発表誌名</p>	<p>吹本 樹・近藤康生・中尾賢一, 2025. 鳴門海峡の更新統産 <i>Mizuhopecten tokyoensis hokurikuensis</i> (二枚貝綱:イタヤガイ科) の季節的微細殻成長とその生息環境. 化石 117, 19-31.</p> <p style="text-align: right;">審査委員 主査 教授 奈良 正和 副査 教授 近藤 康生 副査 教授 遠藤 広光 副査 教授 池原 実</p>

論文の内容の要旨

大型のイタヤガイ科二枚貝化石であるトウキョウホタテガイ *Mizuhopecten tokyoensis* は関東の更新統を中心に多産する種で、更新世の末になって絶滅したことが知られている。本種に関するこれまでの研究はほぼ記載分類であり、生活史や生息環境などの古生態に関する情報はごく限られていた。このような中、本論文は複数の保存良好な標本について殻表面に形成されるラメラの幅（日成長量）の分析と酸素同位体分析を統合することにより、本種の季節ごと、さらにはより精密な微細殻成長履歴とその水温環境を定量的に復元した。また、比較のためトウキョウホタテガイ *M. tokyoensis* とは同属で唯一の現生種であるホタテガイ *M. yessoensis* を同じ手法で分析した。

第1章ではトウキョウホタテガイに関する研究史をまとめている。続く第2章では、広くイタヤガイ科二枚貝に対象を広げ、1日ごとに形成されたと考えられるラメラに着目した微細殻成長研究史について詳しく紹介されている。

第3章では分析標本とその地質年代、分析手法について説明している。分析手法については、これまでの研究史を踏まえた上で、ラメラ幅を日成長量として計測し、日単位の微細殻成長履歴を復元した上で、酸素同位体分析に基づいて復元された水温変動と照合することによって、年、季節、さらにそれより高精度の変動を復元できることが述べられている。また、水温変動の分析に際しては、年間を低水温期、水温上昇期、高水温期、水温低下期、の4期に区分する解析法が新たに採用されている。

第4章では、トウキョウホタテガイに関する研究結果を、鳴門海峡海底下の北島層産1標本（トウキョウホタテガイの亜種とされるホクリクホタテガイ *M. tokyoensis hokurikuensis*）、北海道の馬追層産2標本、千葉県の下総層群産3標本について報告し、併せて北海道根室沖の現生ホタテガイ1標本の分析結果についても報告した。

第5章では分析結果を踏まえた考察について記述している。まず、トウキョウホタテガイの酸素同位体分析による古水温の推定結果（同位体水温；5.8-24.0℃）と、共産する現生種の分布情報から絞り込んで推定した古水温（古生態水温；4.5-26.1℃）とを比較し、同位体水温は殻形成が行われた水温帯を記録しているのに対して、古生態水温は殻形成が行われない水温範囲も含めたトウキョウホタテガイ生息地の水温の変動範囲を示しているという解釈を提示した。

また、化石標本6個体の分析の結果、トウキョウホタテガイは、春から夏にかけて高成長を示す現生ホタテガイとは異なり、冬を中心にその前後の期間にかけて殻を成長させていたと結論した。

さらに、更新世末に絶滅したトウキョウホタテガイと、現在まで生き残っているホタテガイの同位体水温の範囲がほぼ同様であったことから、トウキョウホタテガイの絶滅原因を水温環境のみに求めるのは困難であること、また、両種の高成長期の季節が異なることから、プランクトンブルームのタイミングや摂餌したプランクトンの種に違いがあった可能性について言及した。

論文審査の結果の要旨

イタヤガイ科二枚貝化石のトウキョウホタテガイ *Mizuhopecten tokyoensis* は、日本地質学会によって東京都の化石に指定されるなど、我が国の第四紀貝類を代表する絶滅種としてよく知られてきた。その一方で、分類学的研究を除くと本種に関する研究は少なく、生活史や生息環境などの古生態に関する情報もごく限られていた。このような中、本論文は複数の保存良好な標本についてラメラ幅（日成長量）の分析と酸素同位体分析を併せて実施することにより、本種の季節的な微細殻成長とその水温環境を定量的に復元した初の研究成果である。

本研究では北海道の更新統馬追層産 2 標本、千葉県の上泉層、藪層、清川層産各 1 標本、鳴門海峡下の更新統北島層産 1 標本、計 6 化石標本のほか、比較のため北海道根室沖の現生ホタテガイ *M. yessoensis* 1 標本について分析を行った。その結果、酸素同位体分析による古水温の推定結果（同位体水温；5.8-24.0°C）と、共産現生種の分布情報から絞り込んで推定した古水温（古生態水温；4.5-26.1°C）を比較し、同位体水温は殻形成が行われた水温帯を記録しているのに対して、古生態水温は殻形成が行われない水温範囲も含めたトウキョウホタテガイ生息地の水温の変動範囲を示しているという解釈を提示した。また、化石標本 6 個体の分析の結果、トウキョウホタテガイは、春から夏にかけて高成長を示す現生ホタテガイとは異なり、冬を中心にその前後の期間にかけて殻を成長させていたという結論を得た。一方、現生ホタテガイは春から夏を中心に殻を成長させることが水産情報から知られてきたが、このことを貝殻の分析からも確かめた。

本研究では、更新世末に絶滅したトウキョウホタテガイと、現在まで生き残っている同属のホタテガイを同じ手法で分析した結果、両種の同位体水温の範囲がほぼ同様であったことから、トウキョウホタテガイの絶滅原因を水温環境のみに求めるのは困難であることが示唆された。また、両種の高成長期の季節が異なることから、プランクトンブルームのタイミングや摂餌したプランクトンの種に違いがあった可能性も示唆される。トウキョウホタテガイの絶滅に関する有力な説がない現状において、本論文は絶滅原因解明に向けての重要な手掛かりを与えた点でも高く評価できる。

以上の成果は、原著論文として、審査付の学会誌（日本古生物学会和文誌「化石」）に 1 編、本学理工学部紀要に 1 編の、それぞれ筆頭著者論文を公表している。

以上より、本研究は、ラメラ分析と酸素同位体分析を併用したことにより、我が国の代表的な第四紀貝類の絶滅種であるトウキョウホタテガイの絶滅原因を理解する上で重要な手がかりを与える成果として高く評価できる。よって、学位申請者の吹本 樹は博士（理学）の学位を得る資格があると認める。

<p>ふりがな</p> <p>氏名(本籍)</p> <p>学位の種類</p> <p>学位記番号</p> <p>学位授与の要件</p> <p>学位授与年月日</p> <p>学位論文題目</p>	<p>やまぐち れん</p> <p>山口 蓮 (高知県)</p> <p>博士 (理学)</p> <p>甲総科博第56号</p> <p>学位規則第4条第1項該当</p> <p>令和8年3月23日</p> <p>Revision of the cottid genus <i>Pseudoblennius</i> (Teleostei: Cottidae) (カジカ科アナハゼ属魚類の分類学的再検討)</p>
<p>発表誌名</p>	<p>Yamaguchi, R., H. Senou, and H. Endo (2025) Rediscovery and comments on validity of <i>Pseudoblennius totomius</i> Jordan & Starks, 1904 (Teleostei: Cottidae). <i>Biogeography</i>, 28: 18–27.</p> <p style="text-align: right;">審査委員</p> <p style="text-align: right;">主査 教授 齊藤 知己</p> <p style="text-align: right;">副査 教授 遠藤 広光</p> <p style="text-align: right;">副査 教授 近藤 康生</p> <p style="text-align: right;">副査 教授 藤原 滋樹</p>

論文の内容の要旨

日本周辺に固有な海産のカジカ科アナハゼ属 *Pseudoblennius* Temminck and Schlegel, 1850 は、これまで本属 13 名義種のうち 6 種が有効とされてきた。しかし、標準和名をもつが学名未決定の 3 種や標本数が少なく特徴や変異が不明な種も含まれ、有効種の検証も必要とされた。このような現状から、本論文は本属の名義種のタイプ標本を含む、国内外の 14 研究機関に所蔵される 249 標本を精査し、本属に次の 6 有効種と 3 未記載種を認めた：アサヒアナハゼ *P. cottoides* (Richardson, 1848), アナハゼ *P. percoides* Günther, 1861, アヤアナハゼ *P. marmoratus* (Döderlein, 1884), ヤナギアナハゼ *P. argentatus* (Döderlein, 1887), ハマアナハゼ *P. totomius* Jordan and Starks, 1904, オビアナハゼ *P. zonostigma* Jordan and Starks, 1904, ハタタテアナハゼ *P. sp. 1*, キリンアナハゼ *P. sp. 2*, およびハクセンアナハゼ *P. sp. 3*.

本論文は緒言、材料と方法、本属の系統的位置の変遷と標徴、9 種の検索表、各種の記載、本属 7 種の分子系統樹、および論議で構成される。

本論文の内容のうち、ハマアナハゼ *P. totomius* は静岡県産のホロタイプ (雌) と追加の 3 標本 (雄を含む) の観察から、過去に異名関係が示唆されたアサヒアナハゼ *P. cottoides* とは、斑紋パターンや前鰓蓋骨棘の形状、臀鰭鰭条数などで識別できる有効種と判明した (出版済の 1 編)。ハタタテアナハゼ *P. sp. 1* は既知の標本数が少ないが、最も似るオビアナハゼ *P. zonostigma* とは、背鰭棘条長、上顎長、第 2 背鰭鰭条数などから、識別可能な未記載種であることが判明した。キリンアナハゼ *P. sp. 2* はアサヒアナハゼ *P. cottoides* に最も似るが、下顎下面の暗色斑や側線上の皮弁の有無などから識別できる未記載種と判明した。そして、ハクセンアナハゼ *P. sp. 3* は 3 標本のみが知られ、ハマアナハゼに最も似るが、第 2 背鰭や臀鰭鰭条数、側線孔数、体側の小黑斑の有無などで識別できる未記載種と判明した。

アナハゼ属の 6 有効種とキリンアナハゼ *P. sp. 2* の 7 種について、ミトコンドリア COI 領域 (約 600 bp) により推定した分子系統樹では、いずれの種も明瞭なクレードを示し、遺伝子的にも形態形質による差異を支持する結果となった。

さらに、アサヒアナハゼ *P. cottoides* の新参異名とされた 4 名義種のタイプ標本と原記載との詳細な比較、および多くの文献調査から、新たに *P. zonostigma* の古参異名である *Centridermichthys japonicus* Steindachner, 1870 を発見した。この学名は原記載以降使われず、国際動物命名規約第 4 版の条 23.9 により遺失名となるため、*P. zonostigma* は擁護名として有効であると判断した。

本研究は、分類学的問題を多く含むアナハゼ属 *Pseudoblennius* について、総合的に再検討を行ったものであり、今後の未記載種の命名や有効種の再記載に関する重要な知見が得られた。

論文審査の結果の要旨

カジカ科アナハゼ属 *Pseudoblennius* Temminck and Schlegel, 1850 は 13 名義種を含み、そのうち 6 種が有効とされた。しかし、本属は標準和名をもつが学名未決定の 3 種や有効種とされながらも標本数が少ないため特徴や変異が不明な種も含んでおり、長らく分類学的再検討が必要な分類群とされてきた。このような現状から、本論文は本属の名義種のタイプ標本を含む、国内外の 14 研究機関に所蔵される 249 標本を精査し、分類学的再検討に取り組んだ。本研究の結果、これまでに有効とされてきた 6 種は明瞭に識別可能であり、学名未決定の 3 種はそれぞれ名義種とは異なる未記載種であることを明らかにした。

本属 6 有効種のうち、ハマアナハゼ *P. totomius* Jordan and Starks, 1904 は、原記載以降の追加標本が得られず、種の標徴が不明確であったが、ホロタイプの調査と最近得られた 3 標本の形態的特徴から、最も類似するオビアナハゼ *P. zonostigma* Jordan and Starks, 1904 および以前に新参異名とされたアサヒアナハゼ *P. cottoides* (Richardson, 1848) とは、明瞭に異なる有効種であることが判明した。また、1984 年に標準和名が提唱されたが、その後も学名未決定であった 3 種、ハタタテアナハゼ *P. sp. 1*、キリンアナハゼ *P. sp. 2*、およびハクセンアナハゼ *P. sp. 3* について、それぞれ最も類似する有効種との形態形質を詳細に比較し、いずれも未記載種であることは判明した。そのうち、キリンアナハゼ *P. sp. 2* は、アサヒアナハゼ *P. cottoides* に最も似るが、下顎腹面の暗色斑、側線上の皮弁の有無、そして上顎長などで異なることを示した。これら詳細な形態観察による知見の蓄積は、今後これら 3 種を記載する上で十分な情報である。

本研究では、初めてミトコンドリア COI 領域 (約 600 bp) に基づく本属 7 種の分子系統樹を推定し、遺伝子レベルでも種レベルの差異があることを明瞭に示した。この成果は、今後の本属の分類や系統進化を考察する上で基礎的な知見となる。

さらに、*P. cottoides* のシントタイプの特徴から、本種の新参異名とされ 4 名義種の特徴と問題点、国際動物命名規約に従った各学名の扱いを明示した点は、本属の名義種の異名関係を理解する上で重要である。特に、これまで見過ごされてきた *P. zonostigma* の古参異名である *Centridermichthys japonicus* Steindachner, 1870 を発見し、この学名が原記載以降に 1 度も使用されていなかったことから、遺失名となることを突き止め、*P. zonostigma* を擁護名として有効と判断した。

以上の成果のうち、ハマアナハゼの再記載の内容については、筆頭著者の原著論文として、審査付きの学会誌 (*Biogeography*) に 1 編を発表した: Yamaguchi et al. (2025) Rediscovery and comments on validity of *Pseudoblennius totomius* Jordan & Starks, 1904 (Teleostei: Cottidae). *Biogeography*, 28: 18–27. 残りの成果も査読付き学会誌で公表予定である。

以上より、本研究はアナハゼ属の分類学的再検討を初めて総括的に行ったもので、有効種の再確認、既知種の再記載、そして未記載種の命名に十分な知見を得た価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の山口 蓮は博士 (理学) の学位を得る資格があると認める。

<p>ふりがな</p> <p>氏名(本籍)</p> <p>学位の種類</p> <p>学位記番号</p> <p>学位授与の要件</p> <p>学位授与年月日</p> <p>学位論文題目</p>	<p>さいとう りょうた</p> <p>齊藤 瞭汰 (茨城県)</p> <p>博士(理工学)</p> <p>甲総科博第57号</p> <p>学位規則第4条第1項該当</p> <p>令和8年3月23日</p> <p>カタユウレイボヤの心臓における遺伝子の発現と機能の研究</p>
<p>発表誌名</p>	<p>Saito R, Hyodo T, Kamakura N, Fujikake Y, Nishino JM, Sasakura Y, Nishino AS, Fujiwara S. (2025). <i>Hox3</i> is required of post-metamorphic heart development in adult <i>Ciona</i>. <i>Development, Growth & Differentiation</i>, 67, 500-515. DOI: 10.1111/dgd.70028</p>
	<p style="text-align: right;">審査委員 主査 教授 有川 幹彦 副査 教授 藤原 滋樹 副査 教授 山崎 朋人</p>

論文の内容の要旨

カタユレイボヤ (*Ciona robusta*) の心臓は1本の管状の構造をしており、血液の流れる方向が周期的に反転する。ホヤの心臓は主に心筋細胞と未分化様細胞から構成される。未分化様細胞集団のひとつである Growth zone (GZ) は心臓管の両末端にリング状に存在し、成体心臓の成長に寄与していると考えられている。カタユレイボヤの心臓形成は胚から遊泳幼生までの発生段階においては詳細に研究されており、脊椎動物と似た制御機構が明らかになっている。一方で、心臓の成長やペースメーカーの形成、拍動調節など、変態後の心臓の活動にどのような遺伝子が関わっているかはほとんど明らかになっていない。

本研究ではカタユレイボヤの成体の心臓を用いて、ペースメーカーや GZ を含む心臓管末端領域 (PH と PV) と、それらの細胞を含まない非ペースメーカー領域 (非 P) における遺伝子発現を RNA-Seq により網羅的に解析した。その結果、脊椎動物の心臓発生時に発現する転写因子やホヤの神経系で発現する転写因子を含む、17 個の転写因子が PH 領域と PV 領域で高発現していることが明らかになった。これらの転写因子のうち、PH と PV の両方で最も高い発現を示した *Hox3* に着目し、in situ ハイブリダイゼーションによる発現解析を行った。その結果、*Hox3* は GZ 細胞で強く発現していることが明らかになった。非 P 領域の心筋細胞や GZ 以外の未分化様細胞では *Hox3* は発現していなかった。そこで、ホヤ心臓における *Hox3* の役割を明らかにするため、心臓前駆細胞で特異的に発現する転写因子 *Mesp* の調節領域を用いて機能阻害用の Transcription activator-like effector nuclease (TALEN) を発現させ、心臓特異的な *Hox3* の機能阻害を行った。その結果、心臓管が不規則に膨らんだり、短くなったりした個体が観察された。これらの個体では、血球が循環する様子も見られず、心臓が血液を送り出すポンプとして機能していないことが示唆された。これらの結果は、*Hox3* が GZ 細胞の増殖や未分化性の維持、あるいは心筋細胞への分化を制御することにより心臓管の形成に関わっていることを示唆している。*Hox3* は脊椎動物の心臓流出路でも発現することが明らかになっている。心臓流出路における *Hox3* の発現は、ホヤと脊椎動物の間で保存されている可能性がある。

論文審査の結果の要旨

ホヤの心臓は単純な1本の管のような構造をしているが、脊椎動物の心臓の起源と進化を探るためにも重要な研究対象である。ホヤ心臓のペースメーカーは心臓管の両端にあり、周期的に拍動の方向が逆転するというユニークな特徴も示す。ホヤにおいては、胚発生期の心臓原基（数個の細胞からなる）の発生は詳細に研究されているが、機能する心臓が形作られ拍動を始める変態後の心臓の分化や機能の仕組みはほとんど研究されていない。学位申請者の齊藤瞭汰は、変態後の心臓における遺伝子発現を調べ、心臓管両端の未分化細胞で発現する転写調節因子 *Hox3* の機能解析を行った。本論文は、その成果をまとめたものである。

本論文は3部構成になっている。第1章では、RNA-seq解析による網羅的遺伝子発現解析データから、心臓管両端のペースメーカー領域で高発現する転写調節因子を多数発見した。第2章では変態後の個体の心臓管を試料とした *in situ* ハイブリダイゼーションの方法を確立して、心臓特異的ミオシン重鎖や、*Hox3* などの転写調節因子の mRNA の発現を調べた。変態後の心臓を試料に用いた *in situ* 解析は誰も行ったことがなく、齊藤は根気よく条件検討を行って、はじめてその手法を確立した。また、その過程で齊藤は心臓管の細胞の細胞骨格アクチンと核を染色して、心臓管の各領域の組織の配置を詳細に可視化した。第3章ではTALENを利用したゲノム編集を行い、*Hox3* 遺伝子の変異を作製した。TALENを心臓のみで発現させて、心臓特異的に *Hox3* 遺伝子の変異を作製した結果、心臓管の途中が不規則に膨らんだり、異常に小さくなったりという形態異常を認めた。そのような心臓では拍動は見られたが規則的なリズムはなく、血液の流れも見られなくなった。脊椎動物の心臓でも *Hox3* は発現しているが、あらゆる動物の中で心臓における *Hox3* の役割を解明したのは齊藤が世界初である。

上記の研究成果は、原著論文として査読付の国際的学術雑誌に1編（うち筆頭著者論文1編）の論文として発表された。上記の研究とは別の研究で、査読付国際学術雑誌に7編（うち筆頭著者論文1編）の論文を発表している。また、齊藤は上記の研究に関連する内容で国際学会において1件（第12回国際被囊類学会、2024年、米国サンタクルーズ）、国内学会において3件の発表を行った。齊藤は、2022年度に日本科学協会の笹川科学研究助成を受け、また2023～2025年度には日本学術振興会の特別研究員（DC1）に採択されて主体的に研究を遂行した。

以上のことから、本研究はホヤの心臓の形成と機能に関する重要な知見を得ただけでなく、変態後の心臓を研究するための実験手法を確立し、この分野において後続く研究者のために道を切り拓いたものであり、価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の齊藤瞭汰は、博士（理工学）の学位を得る資格があると認める。

論文の内容の要旨

中央構造線(Median Tectonic Line: MTL)は、西南日本の内帯と外帯を分ける、長期にわたって活動してきた地質境界断層である。四国において MTL は、上盤側の上部白亜系和泉層群と下盤側の三波川変成岩類を接合し、浅部脆性地殻内で繰り返し再活動した記録を保持している。しかし、断層帯内部の変形構造は、後続する変形イベントによってしばしば重複・改変されるため、断層コアのみから長期活動断層の時空間発展を復元することは困難である。本研究では、断層コアだけでなく周囲のダメージゾーンに保存された構造・物性・水理特性・応力情報を統合することにより、MTL に沿う脆性変形の空間分布、形成時期、および深度方向の発展過程を明らかにすることを目的とする。

本研究は、愛媛県西条市において MTL を貫通する掘削コアを主対象とし、四国中央市および三好市～東みよし町の露頭観察を組み合わせ実施した。掘削コアの X 線 CT 画像から開口亀裂を定量的に抽出し、開口亀裂に基づくダメージゾーン(Open Crack-based Damage Zone: OCDZ)を定義した。開口亀裂の密度および強度は断層核に向かって系統的に増加し、内部ダメージゾーンで最大値を示す。一方、微小亀裂密度はより狭い分布を示し、主に内部ダメージゾーンに限られる。岩石剛性は断層核に向かって低下し、内部ダメージゾーンで最も低くなる。また、透水性は断層核および内部ダメージゾーンで高く、外側の母岩に向かって低下する。これらの結果は、内部ダメージゾーンが、応力集中と流体移動が結合しやすい、力学的に脆弱かつ水理学的に透水性の高い領域であることを示している。

古応力場は、断層スリップインバージョンおよびモード I 亀裂脈の方位解析により復元し、現在の応力場は地震の発震機構解データから推定した。西条市では、掘削コアの上盤、ダメージゾーン、下盤を通じて、和泉期から石鎚期以降に至る複数の応力レジームが識別された。これに対し、内部ダメージゾーンには限られた応力場のみが保存されており、外部ダメージゾーンにはより多様な応力レジームが記録されている。この対比は、内部ダメージゾーンにおいて、中新世の貫入岩およびそれに伴う熱水活動が初期の変形記録を重複・改変した結果、貫入後の応力場が選択的に保存されたことを反映すると解釈される。四国中央市および三好市～東みよし町の活断層露頭では、ダメージゾーン内の応力方位が広域応力場に対して約 30° 回転しており、さらにダメージゾーン内のすべり傾向は MTL の地質境界そのものよりも高い。このことは、ダメージゾーン内で応力の再配向と断層再活動ポテンシャルの増大が生じていることを示唆する。

これらの観察結果は、MTL 浅部のダメージゾーンが、累進的な破碎の局所化、力学的弱化、水理学的透水性の増大、および応力場の再編成を通じて発達したことを示している。変形は、大規模な正断層活動に伴うより深部、約 10 km での分散的な脆性変形から、中新世～第四紀の断層活動に伴う浅部地殻でのより局所化した変形へと移行した。本研究は、ダメージゾーンの定量的特徴づけに応力・熱史制約を組み合わせることが、脆性地殻内の長期活動地質境界断層の時空間発展を復元するための有効な枠組みを提供することを示している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、「四国地域の中央構造線における浅部脆性変形の分布と断層帯の発達史」と題し、中央構造線を対象として、浅部脆性領域における断層帯構造とその発達過程を解明したものである。断層コアに加え、その周囲に発達するDamage zoneに着目し、地質学的・地球物理学的・力学的・水理学的情報を統合的に解析した点に本研究の特色がある。

第1章では、断層帯のレオロジーモデルおよび中央構造線の活動史が整理され、本研究の目的と意義が明確に示されている。長寿命断層の理解には、断層コアのみならずDamage zoneを含めた検討が不可欠であることが示されている。

第2章では、四国地域における中央構造線周辺の地質概説と調査地域の特徴が示され、愛媛県西条市の貫通ボーリングコアおよび四国中央市、徳島県三好市・東みよし町の露頭について、研究の基盤となる地質情報が整理されている。

第3章では、X線CT画像解析に基づく開口割れ目(Open crack)の定量抽出手法が提示され、Open crackに基づくDamage zoneが定義されている。割れ目密度、岩石物性および透水性の空間分布が示され、Damage zone内部が力学的に弱化し、高い透水性を有する領域であることが明らかにされている。

第4章では、小断層解析、モードI 鉱物脈解析、地震メカニズム解に基づく応力場推定を統合し、中央構造線周辺の応力状態とその変遷が復元されている。Damage zone内部では応力回転が生じ、すべりやすさが高まることが示され、断層再活動におけるDamage zoneの役割が議論されている。また、ラマン分光分析により変形形成深度との関係が検討されている。

第5章では、各章の成果を統合し、中央構造線Damage zoneの発達過程と断層帯活動環境の変遷が総合的に整理されている。深部での分散的変形から浅部での変形の局在化への進行が示され、長寿命断層の進化像が提示されている。

第3章までで示された愛媛県西条市のボーリングコアに基づくDamage zoneの定義およびその意義については、査読付き国際学術誌に論文1編(うち筆頭著者論文1編)として公表されている。また、日本地球惑星連合2022年および2025年大会の国際セッションにおいてポスター発表を行い、国内学会でも他に2回発表している。

以上より、本論文は独創性と学術的価値の高い成果を示しており、地質学・地球物理学分野への貢献は大きい。よって、学位申請者の内田嗣人は博士(理工学)の学位を得る資格があると認める。