

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51号	林 健太郎	エキゾチックカイラル凝縮相における南部-ゴールドストーンモード	1
乙総科博第8号	亀田 和成	長期的なモニタリング調査に基づく八重山諸島のアオウミガメ個体群構造の変化	4

ふりがな	はやし けんたろう
氏 名 (本籍)	林 健太郎 (高知県)
学 位 の 種 類	博士 (理学)
学 位 記 番 号	甲総科博第 51 号
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位授与年月日	令和 7 年 3 月 24 日
学位論文題目	エキゾチックカイラル凝縮相における南部-ゴールドストーンモード
発 表 誌 名	○ A possibility of existence of a pseudovector-type quark–antiquark condensate in the quark matter and Nambu–Goldstone modes on that condensate in the Nambu–Jona–Lasinio model K. Hayashi and Y. Tsue International Journal of Modern Physics E 32, No.6, (2023) 2350031 (24 pages). ○ Modified dilepton production rate from charged pion-pair annihilation in the inhomogeneous chiral condensed phase K. Hayashi and Y. Tsue Physical Review D 110, Issue 09, 1 November (2024) 094051 (11 pages).
	審査委員 主査 教授 飯田 圭 副査 教授 津江 保彦 副査 教授 加藤 治一

論文の内容の要旨

強い相互作用を支配する量子色力学 (QCD) において、温度や密度をパラメータとした QCD 相図を解明することは、QCD 物性を理解するうえで重要な課題の一つである。特に、低温度、中・高密度領域では、様々な QCD 相、例えば非一様カイラル凝縮相、クォークオニク相、種々のカラー超伝導相などの存在可能性が議論されている。しかしながら、これらの有限温度・有限密度領域では、QCD の有効な第一原理計算が確立されていないのが現状である。そのため、本論文の研究では、QCD の低エネルギー有効模型等を用いて、低温度中密度領域で様々な相の存在可能性が指摘されているエキゾチックな凝縮相について考察している。特に、エキゾチックなカイラル凝縮相が存在した場合に、低エネルギーのハドロンのダイナミクスに重要な寄与をする南部-Goldstone (NG) 粒子に着目した研究が展開されている。本論文ではエキゾチックカイラル凝縮相のうち、擬ベクトルカイラル凝縮相の研究成果並びに非一様カイラル凝縮相の研究成果がまとめられている。本論文は、前半ではエキゾチックカイラル凝縮相のうち、擬ベクトルカイラル凝縮相の研究が、また後半では非一様カイラル凝縮相の研究が展開されている。

まず、QCD の有効模型である南部-Jona-Lasinio (NJL) 模型を用いて、擬ベクトルカイラル凝縮相の存在可能性が議論された。NJL 模型の或るパラメータ領域では擬ベクトルカイラル凝縮相が存在可能であることを数値計算で示し、その相での対称性の破れと NG モードの対応を明らかにした。また、擬ベクトル凝縮相と通常のスカラー型カイラル凝縮相が共存する場合には、通常現れるメソン場が一部混合することにより NG モードが生じるという結果を得ている。

続いてエキゾチックなカイラル凝縮相として、カイラル凝縮相が変調をきたして位置座標に依存している非一様カイラル凝縮相を取り上げている。相転移の秩序変数による Ginzburg-Landau 展開を用いた有効理論を構成し、非一様カイラル凝縮相でのパイオン-シグマメソン混合による NG モードと、変調による分散関係の変化を得た。また荷電パイオンでは通常の一様カイラル凝縮相上とは異なる分散関係を示すことを明らかにした。この分散関係の変化が荷電パイオン対消滅からのレプトン対生成率の変化に導くことに注目して、通常のカイラル凝縮相での荷電パイオン対消滅からのレプトン対生成率と非一様カイラル凝縮相でのそれを比較することで、レプトン対生成率に明確な変化が見られることを明らかにした。こうして、非一様カイラル凝縮相の存在を示唆する兆候として、レプトン対生成率の変化が実験的シグナルと成り得る可能性があることを示している。

以上、擬ベクトルカイラル凝縮相の存在可能性とその相での対称性の破れと NG モードの対応を示し、また擬ベクトル凝縮相と通常のスカラー型カイラル凝縮相が共存する場合には、通常現れるメソンモードが混合することにより NG モードが生じるという結果を得た。さらには非一様カイラル凝縮相ではパイオンの混合による NG モードとその分散関係の変調、変化した分散関係による荷電パイオン対消滅からのレプトン対生成率の変化を明らかにしている。これらより、本論文の重要な成果として、エキゾチックカイラル凝縮相ではモード混合によって NG モードが現れること、レプトン対生成率の変化がエキゾチックカイラル凝縮相としての非一様カイラル凝縮相存在の実験的シグナルの可能性と成り得ることといった新たな知見が得られた。

論文審査の結果の要旨

強い相互作用が支配する量子色力学 (QCD) において、温度や密度をパラメータとした QCD 相図の構造を解明することは、重要な課題の一つとなっている。特に、低温度中高密度領域では QCD の有効な第一原理計算が確立されていないこともあり、確定的な情報が得られない状況にある。そのため、本論文の研究では、QCD の低エネルギー有効模型等を用いて、低温度中密度領域で様々な相の存在可能性が指摘されているエキゾチックな凝縮相について考察している。あわせて、エキゾチックなカイラル凝縮相が存在した場合に低エネルギーのハドロンのダイナミクスに重要な寄与をする南部-Goldstone (NG) 粒子に着目した研究が展開されている。本論文ではエキゾチックカイラル凝縮相のうち、擬ベクトルカイラル凝縮相の研究成果並びに非一様カイラル凝縮相の研究成果がまとめられている。

まず初めに、QCD の有効模型である南部-Jona-Lasinio (NJL) 模型を用いて、擬ベクトルカイラル凝縮相の存在可能性が議論されている。あるパラメータ領域では擬ベクトルカイラル凝縮相が存在可能であることを数値計算で示し、その相での対称性の破れと NG モードの対応を明らかにしている。また、擬ベクトル凝縮体と通常のスカラー型カイラル凝縮体が共存する場合には、通常現れるメソン場が一部混合することにより NG モードが生じるという結果を得ている。この相での NG モードを明確にしたことは本研究でなされた重要な進展の一つである。引き続いて、エキゾチックなカイラル凝縮相として非一様カイラル凝縮相を取り上げ、秩序変数の Ginzburg-Landau 展開を用いた有効理論を用い、この相でのパイオン-シグマメソン混合による NG モードと、分散関係の変調の結果を得た。荷電パイオンでは通常の一様カイラル凝縮相上とは異なる分散関係が得られることを示し、この分散関係の変化が荷電パイオン対消滅からのレプトン対生成率の変化に導くであろうことに注目して、通常のカイラル凝縮相での荷電パイオン対消滅からのレプトン対生成率と非一様カイラル凝縮相でのそれを比較することで、レプトン対生成率の明確な変化を明らかにした。これにより、エキゾチックなカイラル凝縮相ではモード混合によって NG モードが現れること、エキゾチックなカイラル凝縮相の候補としての非一様カイラル凝縮相存在のシグナルとしてレプトン対生成率の変化が実験的シグナルと成り得る可能性があることを提案するに至っている。この結果は本研究で見出された重要な結果である。以上の成果は、原著論文として、審査付の国際的学術雑誌に筆頭著者論文として2編にまとめられている。

本研究は、QCD 相図上、存在可能性が議論されているエキゾチックなカイラル凝縮相での NG モードについてメソン混合の可能性を指摘し、エキゾチックカイラル凝縮相での NG 粒子対消滅からのレプトン対生成率に関して研究したものであり、NG モードの現れ方やエキゾチックカイラル凝縮相存在の実験的シグナルについて重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者、林健太郎は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。

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	かめだ かずなり 亀田 和成 (群馬県) 博士 (理学) 乙総科博第8号 学位規則第4条第1項該当 令和7年3月5日 長期的なモニタリング調査に基づく八重山諸島のアオウミガメ個体群構造の 変化
発 表 誌 名	Kameda K, Wakatsuki M, Kuroyanagi K, Iwase F, Shima T, Kondo T, Asai Y, Kotera Y, Takase M, Kamezaki N. (2017). Change in population structure, growth, and mortality rate of juvenile green turtle (<i>Chelonia mydas</i>) after the decline of the sea turtle fishery in Yaeyama Islands, Ryukyu Archipelago. <i>Marine Biology</i>, 164, 143–153. DOI: 10.1007/s00227-017-3171-4 Kameda K, Suzuki K, Kuroyanagi K, Takase M, Matsuda K, Noda J. (2019). Comparison of green turtle <i>Chelonia mydas</i> sex ratios at two time-points over 20 years at a foraging ground in Yaeyama Islands, Ryukyu Archipelago, Japan. <i>Endangered Species Research</i>, 38, 127–134. DOI: 10.3354/esr00944 Kameda K, Wakatsuki M, Takase M, Nakanishi Y, Kamezaki N. (2023). Apparent survival probability and abundance of juvenile green turtles in the foraging ground at Kuroshima Island, Ryukyu Archipelago. <i>Endangered Species Research</i>, 50, 209–215. DOI: 10.3354/esr01228
	審査委員 主査 教授 斉藤 知己 副査 教授 遠藤 広光 副査 講師 中山 直英

論文の内容の要旨

生態系の種多様性維持に関わるキーストーン種として知られるウミガメは、世界的な乱獲により個体数を大きく減らし、現在では国際自然保護連合によってほとんどの種が絶滅危惧種に指定され、保全の必要性が叫ばれている。ウミガメは、成熟までに数十年を要し、その生活史の解明には長期的な調査が必要とされる。加えて海で生活し、産卵は砂浜で行う特異な生態から、その保全は砂浜と海域を結び付けて考える必要があるが、一般的には砂浜における産卵生態の調査が中心で、海域における生態的知見は不足している。本研究では、海洋生態系における大型草食動物であり、かつ南日本の主要なウミガメであるアオウミガメを対象とし、長期的なデータに基づき、砂浜および海域の両面から、本種の保全に資する生物学的情報をとりまとめた。

第1章では、日本におけるウミガメ類の生息状況について概要を記した。そして、本研究の対象であるアオウミガメについて歴史的な背景も踏まえ、現在の保全状況と知識のギャップについて解説した。第2章と3章では、八重山諸島黒島西の浜におけるウミガメの産卵状況および孵化幼体の性比を報告した。本地域では1978年から産卵調査が行われているが、アオウミガメの産卵は1980年代後半から確認され始め、その後は増加して現在では20回以上となった。さらに、ウミガメの性が胚の経験温度で決まることから、砂中温度を測定して各種の性比を調べ、温暖化によって孵化幼体の性比はメスの割合が増加し、現在では8割がメスに偏向していると推定した。

第4章、5章、6章では、八重山海域に生息するアオウミガメの個体群構造について調べ、標識放流調査に基づき、その甲長組成、成長速度、死亡率、および個体数変動を報告した。特に、本海域では2004年を境にウミガメ漁が衰退したことに注目し、その前後でデータを比較したところ、死亡率は低下し、かつ平均甲長は大きくなったことが判明した。個体数は最近11年間で200個体から400個体へと倍増していた(Kameda et al. 2017)。また、腹腔内視鏡によって未成熟個体の性比を調べ、メスに偏っていることを明らかにした(Kameda et al. 2019)。

第7章では、八重山諸島のアオウミガメの生活史を考察し、本地域は産卵地であるとともに、外洋生活を終えた幼体が沿岸へ定着して亜成体へ成長する成育場としての役割が大きいと結論付けた。また、温暖化に伴う孵化幼体のメスへの偏向は、近年の産卵回数の回復、および海域での未成熟個体の増加の一因と考えられた。さらに、近年問題となっているアオウミガメによる海草場の衰退について考察した(Kameda et al. 2023)。

以上の成果は、基礎的ではあるものの把握が非常に困難なアオウミガメの生物学的情報である甲長組成、成長速度、死亡率、性比、および個体数変動が明らかになった。これらを総合的に考察し、本種の保全には、砂浜における調査に加えて沿岸における海洋生態系の食物網を考慮する必要性を提起した。

論文審査の結果の要旨

本研究は、生体に基づくデータの収集が大変困難な海生大型爬虫類であるアオウミガメの八重山諸島黒島周辺海域の個体群を対象とし、長年にわたってその産卵生態と周辺海域での生息状況の把握に地道に取り組むとともに、採集個体の調査や標識放流に基づき、幼体・亜成体の性比、成長速度、死亡率、個体数等の推定から同個体群の資源変動について詳細に議論したものである。

本研究ではまず、黒島西の浜におけるウミガメの産卵状況、および孵化幼体の性比を報告した。本調査地では 1978 年から産卵調査が行われているが、アオウミガメの産卵は 1980 年代後半から確認され始め、その後は増加して現在では 20 回以上となり主要な産卵種に位置付けられた。また、ウミガメの性が胚の経験温度で決まることから、砂中温度を測定して各種の性比を調べ、温暖化によって孵化幼体の性比はメスの割合が増加し、現在では約 8 割がメスに偏向していると推定した。さらに、黒島周辺海域に生息するアオウミガメの個体群構造について調べ、標識放流調査に基づき甲長組成、成長速度、死亡率、および個体数変動を報告した。特に、本海域では 2004 年を境にウミガメ漁が衰退したことに注目し、その前後でデータを比較したところ、死亡率は低下し、かつ平均甲長は大型化したことが判明した。個体数は最近 12 年間で 200 個体から 400 個体へと倍増していた。さらに、腹腔内視鏡によって未成熟個体の性比を調べ、メスに偏っていることを明らかにした。

本論文ではこれら成果を基軸として、まず、日本におけるウミガメ類の生息状況について概要を記した。そして、対象種アオウミガメについて歴史的な背景も踏まえ、現在の保全状況と知識のギャップについて解説し、最終章では、八重山諸島のアオウミガメの生活史を考察し、本調査地は産卵地であるとともに、外洋生活を終えた幼体が沿岸へ定着して亜成体へ成長する成育場としての役割が大きいと結論付けた。また、温暖化に伴う孵化幼体のメスへの偏向は、近年の産卵回数の回復、および海域での未成熟個体の増加の一因と考えられた。さらに、近年問題となっているアオウミガメによる海草場の衰退について考察した。

以上の研究成果は、3 編の筆頭著者の原著論文として査読付国際学術雑誌 (Kameda et al. 2017, *Marine Biology*, 164, 143–153; Kameda et al. 2019, *Endangered Species Research*, 38, 127–134; Kameda et al. 2023, *Endangered Species Research*, 50, 209–215) にまとめられている。

類例研究は実施困難さから大変少なく、本研究は先駆的かつ貴重な取り組みと言え、その成果は、我が国のみならず、世界におけるウミガメ類、およびその生息地における生態系保全について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると考ええる。よって、学位申請者亀田和成は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。