

2018.6

特集号



(題字：櫻井克年学長)

国立大学法人 高知大学学報

高知大学学位授与記録第九十五号

総務課広報係発行

本学は、次の者に博士（理学）の学位を授与したので、高知大学学位規則第14条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。

 *
 *
 * **高知大学学報** *
 *
 *

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29号	佐藤 久晃	北西・赤道太平洋域のマンガングラストにおける金属フラックスの時空間変動と資源量評価への応用	1
甲総科博第30号	中山 健太郎	日本産ニシキウズガイ科腹足類キサゴ系統およびダンベイキサゴ系統の進化古生態学的研究	3
甲総科博第31号	矢野 大地	原生物におけるフォスファゲンキナーゼの進化と機能	6
乙総科博第7号	白崎 恭子	ボソン-フェルミオン混合多体系におけるボーズ-アインシュタイン凝縮とボーズ崩壊に対する不安定性	8

ふりがな	さとう ひさあき
氏名(国籍)	佐藤 久晃(兵庫県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第29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	平成30年3月23日
学位論文題目	北西・赤道太平洋域のマンガンクラストにおける金属フラックスの時空間変動と資源量評価への応用
発表誌名	Sato, H., Usui, A., 2017. Metal flux as an alternative parameter in evaluating the resource potential for Co-rich ferromanganese crusts. <i>Marine Georesources and Geotechnology</i> .
	審査委員 主査 教授 臼井 朗 副査 教授 村山雅史 副査 教授 近藤康生

論文の内容の要旨

鉄・マンガンクラスト(以下、クラスト)の主成分は海水からゆっくりと沈殿する鉄、マンガン酸化物であり、ほかに碎屑物や生物起源粒子を伴う化学堆積岩である。コバルトや、ニッケル、レアアース、白金が濃集し、膨大な量が広い海域に分布することから、将来の金属資源として注目されている。一般に厚いクラストは、堆積物の供給が少なく、基盤岩が長期間安定な海底環境で生成することがわかっている。その品位や資源量に地域変動はあるものの、全海洋に普遍的に産出することが明らかになりつつある(e.g., Usui et al., 1994, Hein et al., 2000)。一方で、クラストは40%に達する間隙や30%程度の碎屑物を含み、それらは層厚や組成に大きく影響を与えている。空隙の一部がリン酸塩鉱物に置き換えられている場合もある(Hein et al., 2000; Nishi et al., 2017)。鉱床としてみた場合、広域的、地域的に大きな多様性が認められ、新鉱床の探査や資源量評価に課題が残されている。

本研究では、クラストを層状の堆積鉱床とみなし、年代や微細構造に基づいた成長史を把握することを基本として、より正確で信頼性の高い資源量評価や探査の指標となる「金属フラックス」というパラメータを提案する。海水を通じて有用元素であるコバルトやニッケルがクラストとして固定される速度(これを便宜的に金属フラックスと呼ぶ)は資源量評価、および物質循環の定量的把握における重要なパラメータであるが、ここではその空間的・時間的変化とクラストの形成史を比較した。特に、碎屑物や一次生産の供給が多い海域を含む、北西太平洋域～赤道太平洋域で金属フラックスの地域的特徴、およびその時間変化の規則性・法則性をより詳細に検証することで、資源量評価だけでなく、海洋環境復元のパラメータとしての金属フラックスの意義も考察した。

フラックスの空間的変化の特徴として、Coフラックスは水深が浅くなるにつれて高くなる顕著な傾向があり、一方Mnフラックスは顕著な特徴は認められない。また、Al, Feフラックスは海域による変化が大きく、東側の遠洋域に比べて島弧に隣接する西側において高いという顕著な傾向がある。浅海域でのCoフラックスの増大は海水中の溶存酸素量など酸化還元条件と関係している可能性が高く、Fe, Alは大

陸からの碎屑物が起源になっていると考えられる。おそらく現世の酸素極小層付近で最も大量のCoフラックスが認められる。

クラストの金属フラックスの傾向は地球規模で広域的な金属元素の挙動や濃集の結果を示すと考えられる。このことから、金属フラックスというパラメータを用いることによって、新鉱床の探索の指標や広範囲でのクラスト資源量評価の基準の提言などに貢献できる可能性が高く、またクラストへの金属元素濃集メカニズムの解明にもつながると期待される。

論文審査の結果の要旨

金属鉱物資源の枯渇・不足が現実問題とされるなかで、レアメタルを含む海底マンガン鉱床が注目されている。我が国でも探査や調査が進められているが、その金属濃度や資源量の大きな地域変動、鉱石の不均質性を規制する地球科学的要因は明らかになっていない。申請者・佐藤久晃は、本研究において、探査手法の開発や迅速・高信頼性資源量予測のためのあらたな地球科学的パラメータを提案した。海底マンガクラストを層状の化学堆積鉱床とみなし、年代や成長構造に基づいた成長史を把握することを基本として、より正確で信頼性の高い指標となる「金属フラックス」というパラメータに基づいてクラストの多様性を見直した。有用元素であるコバルトやニッケルが、海水を通じて単位面積、単位時間あたりにクラストとして固定される速度 (mass accumulation rate) は資源量評価および、物質循環の定量的把握における重要なパラメータであることが分かり、ここではその空間的・時間的変化とクラストの形成史を記載した。特に、碎屑物や一次生産の高い海域を含む、北西太平洋域～赤道太平洋域で金属フラックスの地域的特徴、及びその時間変化の規則性・法則性をより詳細に検証することで、資源量評価だけでなく、海洋環境復元のパラメータとしての金属フラックスの意義も合わせて考察した。

フラックスの空間的変化の特徴として、Co フラックスは水深が浅くなるにつれて高くなる顕著な傾向があり、一方Ni, Mn フラックスには明解な特徴は認められない。また、Al, Fe フラックスは海域による変化が大きく、東側の遠洋域に比べて島弧に隣接する西側において高い顕著な傾向があることを発見した。浅海でのCo フラックスの増大は海水中の溶存酸素量など酸化還元条件と関係している可能性が高く、Fe, Al は大陸からの碎屑物が起源になっていると結論づけた。おそらく現世の酸素極小層付近で最も大量のCo フラックスが認められるなどの新知見が得られ、資源量評価における迅速性・信頼性の向上に貢献した。

本研究の成果の一部は、申請者が筆頭著者となった英文原著論文として、Taylor & Francis 社の学術誌 Marine Georesources & Geotechnology (2017年9月掲載決定、査読付き) にまとめられている。そのほか、Ore Geology Reviews 誌の研究論文(共著、同年11月、査読付き)1編の発表がある。

このことから、本研究は、金属フラックスという地球科学的パラメータを用いることによって、新鉱床の探索の指標や広範囲でのクラスト資源量評価の基準の提言などに貢献でき、同時にクラストへの金属元素濃集メカニズム解明に繋がる価値ある集積である。

以上の結果、学位申請者・佐藤久晃は博士(理学)の学位を得る資格があると認める。

ふりがな	なかやま けんたろう
氏名(本籍)	中山 健太郎(北海道)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第30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	平成30年3月23日
学位論文題目	日本産ニシキウズガイ科腹足類キサゴ系統およびダンベイキサゴ系統の進化古生態学的研究
発表誌名	中山健太郎・近藤康生, 2018. 現生種腹足類キサゴ <i>Umbonium (Suchium) costatum</i> および祖先種 <i>Umbonium (Suchium) obsoletum</i> の成長・生息場所・分布. 化石 103: 37-50. Nakayama, K., Kondo, Y., Sato, T., 2016. Shell growth of <i>Umbonium (Suchium) giganteum</i> (Gastropoda: Trochidae) in Sagami bay based on oxygen isotope profiles. <i>Venus</i> 74 (3-4): 71-78.
	審査委員 主査 教授 近藤 康生 副査 教授 奈良 正和 副査 教授 遠藤 広光

論文の内容の要旨

日本近海に生息する現生海産貝類の多くは鮮新世から更新世に生息していた化石種に直接の祖先を持つことが、近年の研究によって明らかとなっている。申請者が研究対象とするニシキウズガイ科サラサキサゴ亜科に属する腹足類キサゴ亜属 *Umbonium (Suchium)* はこの典型例として、戦前から多くの古生物学者によって研究成果が報告され、近年では、化石種と現生種の直接的な関係が明らかにされている。本研究では、中新世(約1700万年前)から現在まで連続的に系統関係を追跡できるキサゴ亜属 *Umbonium (Suchium)* における日本産キサゴ類の主要2系統、すなわち現生種キサゴ *U. (S.) costatum* に至るキサゴ系統、および現生種ダンベイキサゴ *U. (S.) giganteum* に至るダンベイキサゴ系統それぞれについて、現生種および化石種の生態情報、特に成長特性と生息場所(緯度分布・鉛直分布)に着目し、祖先種(化石種)から子孫種(現生種)への進化に伴う生態学的特性の変化を解明することを目的として研究を行った。

まず、殻の酸素同位体比分析により水温の季節変動を復元して検討した結果、化石種および現生種キサゴ類の殻表面に見られる明瞭な成長輪が年輪であることが初めて明らかとなった。この結果に基づき成長解析を行った結果、以下の結論を得た。

キサゴ系統における化石種 *U. (S.) obsoletum* の成長は、後期鮮新世において、南方の個体群(唐ノ浜層群)は、北方の個体群(中津層群)と比較して、より長寿命で、大型であった。これに対して、現生種キサゴでは、日本列島の分布域の北縁および南縁での小型化、および中緯度個体群で大型化の傾向がみられる。また、絶滅直前の *U. (S.) obsoletum* 個体群では、短寿命化・小型化の傾向が判明した。また、進化に際し、生息場所が内湾側、および北方(緯度約8°)へ拡大する傾向が見られた。一方、ダンベイ

キサゴ系統では、現生種ダンベイキサゴの祖先である *U. (S.) suchiense subsuchiense* は後期鮮新世から前期更新世にかけて長寿命化し、大型化した。さらに、現生種ダンベイキサゴは、更新世の *U. (S.) s. subsuchiense* に比べ、寿命が短くなり、やや小型化した結果、後期鮮新世の *U. (S.) s. subsuchiense* と類似した成長特性を持つ。また、ダンベイキサゴの緯度分布の北方への拡大はわずかであり、むしろ現生種への進化に伴って、下部外浜～上部内側陸棚から、より浅い上部外浜に移動したことが目立つ。

両系統の緯度分布の北方への拡大については、鮮新世末期から続く地球全体の寒冷化傾向に伴って貝類の緯度分布が南下するはずであることを考慮すると、現生種キサゴおよびダンベイキサゴは、それぞれの祖先種から進化した際に温度耐性を拡大し、冷水域に適応したと解釈できる。特に、キサゴは温度耐性を大きく拡大した結果、水温の季節変動がより大きな内湾側にも広がったと推測される。一方、ダンベイキサゴが上部外浜に進出したのは、物理的には過酷であっても餌となる植物プランクトンが豊富な場所への適応と考えられる。

論文審査の結果の要旨

本論文で扱っている軟体動物腹足類のキサゴ亜属 *Umboium (Suchium)* は、日本列島とその周辺で種分化を繰り返してきた分類群であり、戦前から多くの日本の古生物学者によって分類や進化が研究されてきた。学位申請者は、まず、これまで知られてきたキサゴ類の化石記録を、タイプ標本の検討、および最新の年代データに基づいて、時空分布の観点から整理した。また、化石層の特徴に基づいて、種ごとに生息場所を推定した。さらに、酸素同位体分析による殻形成時の古水温復元により、殻形成の季節変動を読み取ることによって、年輪を認定することに初めて成功した。これらの成果を基礎として、現生種キサゴ *U. costatum*、およびダンベイキサゴ *U. giganteum* が祖先種から種分化した際、その緯度分布、水深分布、および成長特性がどのように祖先種から変化したかを検討した。

研究成果の概要は以下の通りである。現生種キサゴは、その祖先種から種分化した際、祖先種 *U. (S.) obsoletum* に比べて、生息場所が内湾側、および北方へ拡大したこと、また、祖先種の個体群は絶滅直前に短命化・小型化の傾向を示していたことが明らかとなった。一方、ダンベイキサゴの緯度分布の北方高緯度側への拡大はキサゴの場合よりも小さく、むしろ、下部外浜～内側陸棚から、より浅い上部外浜に生息場所が移動したことが目立つ。このことは、物理的には過酷であっても、餌となる植物プランクトンが豊富な場所への適応と考えられた。この際、現生種ダンベイキサゴが、更新世の祖先 *U. (S.) s. subsuchiense* に比べて短命化し、やや小型化したことも明らかとなった。このことは、物理的により不安定な生息地に移った際に r 淘汰が生じたとして説明された。両系統の北方高緯度側への分布拡大については、鮮新世末期から続く、地球全体の寒冷化傾向に伴って、北半球では気候帯が南下することを考慮すると、現生種キサゴおよびダンベイキサゴは、それぞれの祖先種から進化した際に温度耐性を拡大し、冷水域に適応したと解釈した。以上の結果は、先行研究による系統復元に、多角的な古生態情報を加えることによって得た成果であり、進化の実態に迫った古生物学的研究として高く評価できる。

なお、本論文の内容は、原著論文として、査読付きの学術雑誌に2編（出版済みの英文1編、印刷中の和文1編、いずれも筆頭著者）、および紀要1編（筆頭著者）にまとめられている。

以上の通り、本研究は、軟体動物腹足類のキサゴ類について、現生および化石標本の検討に基づいて、

その進化系列に生活史や生息場所に関する情報を加えることに成功し、その進化史に対する理解を格段に進歩させた価値ある業績であると認める。よって、学位申請者中山健太郎は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。

ふりがな	やの だいち
氏名(本籍)	矢野 大地 (高知県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第31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	平成30年3月23日
学位論文題目	原生生物におけるフォスファゲンキナーゼの進化と機能
発表誌名	Characterization of four arginine kinases in the ciliate <i>Paramecium tetraurelia</i> : Investigation on the substrate inhibition mechanism. Int J Biol Macromol. (2017) 101:653-659.
	審査委員 主査 教授 鈴木 知彦 副査 教授 松岡 達臣 副査 教授 藤原 滋樹

論文の内容の要旨

フォスファゲンキナーゼ(PK)とはATPの γ -リン酸基をグアニジド化合物に転移し、ADPとグアニジドリン酸化合物を産生する反応を触媒する酵素である。PKは多くの動物で見いだされており細胞内のATP濃度の調節や輸送を担っていると考えられている。

原生生物であるヨツヒメゾウリムシ(*Paramecium tetraurelia*)はゲノム上でPKの一種であるアルギニンキナーゼ(AK)が4種類発見されている。このヨツヒメゾウリムシのAK3において基質であるアルギニンに対する基質阻害がみられた。基質阻害とは酵素が基質と結合後、さらに基質と結合し活性を阻害する現象である。PKにおいてこのような基質阻害は初の発見であった。

今回の研究では4種の研究目的を定め研究を行った。1つ目の目的としてAK3の基質阻害の詳細な解析を行った。AK3の反応機構を詳細に解析するため、3種類の反応機構モデルを用いて解析を行った。この結果AK3は、二つ目の基質結合がした場合でも反応が行われる特殊な反応機構であると考えられる。

2つ目にヨツヒメゾウリムシの4種類のAKの翻訳後修飾やmRNAの発現量などから、AKを介して繊毛内のATP輸送と再生を担っているアルギニンリン酸シャトル機構の生理学的検証を行った。4種類のAKの内mRNAの発現量が多い3種類のAK(AK1, AK2, AK3)のRNAiを行い、それぞれの遊泳速度を観察した。その結果、翻訳後修飾により、繊毛に存在すると考えられるAK1とAK3のRNAi時では、遊泳速度が通常時よりも低下した。また細胞質内に存在すると考えられるAK2では遊泳速度の変化は見られなかった。このことから、繊毛内に存在すると考えられる二つのAKが繊毛内のATPの輸送と再生を担っていると生理学的に示された。

3つ目にPKの多様性やその祖先型遺伝子を探るため原生生物のPKの多様性とその酵素特性の解明を行った。今回はデータベース上で発見された9種類のPKの酵素特性を決定した。その結果9種類のPKはAKとタウロシアミンキナーゼ(TK)の2種類であった。それぞれの酵素特性において、渦鞭毛藻類や襟鞭毛虫そしてクリプト藻では基質であるアルギニンやタウロシアミンに対する基質阻害が見出された。

9 種類の PK の分布としてはシオミドロを含む不等毛類やクリプト藻類には TK が存在し、卵菌や襟鞭毛虫や繊毛虫、渦鞭毛藻類には AK が存在していることが判明した。

4 つ目に PK の中で未だ詳細な研究が行われていないオフエリンキナーゼ (OK) の探索を行った。OK は環形動物のオフエリアゴカイ科の *Ophelia neglecta* おいて見出だされている。今回は同じオフエリアゴカイ科である *Ophelina* sp. と *Thoracophelia* sp. で OK の発見を目指した。その結果 *Ophelina* sp. の PK は 5 種類見出だしたが酵素特性を決定すると OK ではない可能性が高かった。一方 *Thoracophelia* sp. の PK は 5 種類見出だされた。この 5 種の内 4 種類の PK においてはアミノ酸配列や分子系統解析の結果から OK の可能性があることが判明している。

論文審査の結果の要旨

矢野大地の博士論文「原生生物におけるフォスファゲンキナーゼの進化と機能」は、次の 3 章から構成されている：第 1 章 ヨツヒメゾウリムシのアルギニンキナーゼ (AK) の基質阻害の解明、第 2 章 原生生物のフォスファゲンキナーゼ (PK) の酵素特性とその分布、第 3 章 環形動物フォスファゲンキナーゼの分布と酵素特性。

論文の中核となる第 1 章においては、ヨツヒメゾウリムシ AK3 において初めて見出された酵素特性、すなわち基質アルギニンによる明瞭な酵素阻害 (基質阻害) の機構を解明するため、まずは基質阻害機構の速度論モデルの最適化を行った。次に、基質阻害に関与しているアミノ酸残基を特定するため、基質結合領域周辺のアミノ酸を置換させた変異体の活性測定を詳細に行い、Ser79 及び Val81 が阻害を引き起こす部位として関与していることを明らかにした。最終的には、基質阻害の実態を明らかにするために、基質阻害を起こしている状態の AK3 の結晶構造の解明の準備を進めている。

第 2 章においては、原生生物で間欠的に PK が見出だされていることに注目し、PK の祖先型を探るために原生生物における PK の分布を再調査し、また、その酵素特性を調べた。データベース検索からこれまでに報告されていなかった原生生物 PK 遺伝子を 8 種類抽出し、それらの DNA を全合成した後、リコンビナント酵素を大腸菌内で発現させた。1 種については酵素が可溶化しなかったために基質特異性が判明しなかったが、新たに、クロメラ類において AK の存在、また、卵菌類、クリプト藻類、褐藻においてタウロシミンキナーゼの存在が明らかになった。加えて、これらの酵素の中の 4 種類は基質阻害を示すことも示された。最終的に、これらの知見から原生生物における PK の進化を論じている。

第 3 章においては、これまで一次構造が不明であった PK 酵素の一種、オフエリンキナーゼの遺伝子を単離すべく、オフエリア属の多毛類の RNA sequencing を行い、候補となる遺伝子を見いだした。また、環形動物の祖先型 *Myzostoma* に、典型的な AK 遺伝子が存在することも明らかにした。

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 2 編としてまとめられている。本研究は、原生生物の PK 酵素の新たな酵素特性 (基質阻害) と分布の多様性を明らかにしており、PK 酵素の機能と進化についての価値ある知見の集積である。よって、学位申請者矢野大地は、博士 (理学) の学位を得る資格があると認める。

ふりがな	しらすき きょうこ
氏名(国籍)	白崎 恭子(岡山県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	乙総科博第7号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位授与年月日	平成30年3月7日
学位論文題目	ボソン-フェルミオン混合多体系におけるボーズ-アインシュタイン凝縮とボーズ崩壊に対する不安定性
発表誌名	Bose-Einstein condensation and density collapse in a weakly coupled boson-fermion mixture PHYSICAL REVIEW A 90, 063629-1~9 (2014)
	審査委員 主査 教授 津江 保彦 副査 教授 福間 慶明 副査 准教授 仲野 英司

論文の内容の要旨

アルカリ原子気体には、外部磁場によるフェッシュバハ共鳴を用いることで原子間相互作用の大きさや符号、ボソン系・フェルミオン系・ボソン-フェルミオン混合系といった系の統計性、光格子を用いることで格子状態、トラップポテンシャルを用いることで系の次元性などを実験的に自由に設定できるという特徴がある。こうした点から、アルカリ原子気体を用いた実験的・理論的研究が活発に行われている。ボソン系、フェルミオン系については以前から様々な研究がなされているが、最近ではボソン-フェルミオン混合系についての研究も行われるようになってきている。

そうした背景から、本研究ではボソン-フェルミオン混合系を対象とすることとした。ボソンと偏極したフェルミオン1種類の混合系とし、系は有限温度で一様の場合とした。このような系において、ボソン-フェルミオン間引力相互作用がある場合のボーズ-アインシュタイン凝縮(BEC)について考えた。

ボソン-フェルミオン間引力相互作用がある場合、相互作用の弱い弱結合領域では、相互作用の影響によりBECの転移温度は理想気体の場合と比べ変化すると考えられる。一方、相互作用が強くなる強結合の極限では、ボソンとフェルミオンのペアが束縛フェルミオンを形成し、BEC成分が吸い上げられて減少すると考えられる。そこで、弱結合領域においては、希薄気体に対する精密な摂動論を用いて、BEC転移温度がボソン-フェルミオン間引力相互作用の強さに対してどのように変化するかを調べた。解析計算の結果として、ボソン-フェルミオン間引力相互作用の弱結合の極限では、転移温度はボソン-ボソン間斥力相互作用のみが有る場合のそれに収束し、そこから相互作用が大きくなるにつれて理想気体の転移温度まで下がる結果となった。それ以降は、下で述べるように不安定領域となる。ただし、本研究では、弱結合と強結合の中間領域にあたるユニタリー極限近傍については除外し、強結合領域については強結合極限近似を用いて解析的な考察を行った。

また、この系は、ボソン-フェルミオン間引力相互作用により、フェルミオン密度揺らぎを媒介とする有効ボソン-ボソン相互作用が引力となり、ボーズ崩壊に対する不安定を引き起こす可能性がある。ボソン密度揺らぎの長波長領域の振る舞いを見るためにボソン-ボソン密度相関関数を計算し、系が不安定に

なる温度を調べた。その結果、ボソン-フェルミオン間引力相互作用の弱結合領域では、ボソン-ボソン間有効相互作用が消失する温度（理想気体の BEC 転移温度）を境界としてボソン密度崩壊の不安定性が生じ、そこから相互作用が大きくなるにつれて系が不安定になる温度は上がる結果となった。また、温度とボソン-フェルミオン結合定数の空間における不安定領域では不安定温度が BEC 転移温度よりも高く、理想 BEC が生じる領域が全て不安定領域に含まれる結果となった。そこで、不安定領域がボソン-ボソン間斥力相互作用とボソン-フェルミオン間引力相互作用にどのように依存するかを包括的に調べた。ただし、本研究では排他律によりフェルミオン-フェルミオン間の相互作用は無視できるとした。数値計算の結果、ボソン-ボソン間斥力相互作用を大きくするとボーズ崩壊に対する不安定温度は下がり、BEC 転移温度は上がる結果となり、安定な BEC の領域が増加することが分かった。これらの結果は、転移温度の定式化とともに数値計算結果の図としてまとめた。

論文審査の結果の要旨

近年アルカリ金属原子を中心とした冷却原子多体系に関する実験が国内外で大きく発展している。この実験室系では、レーザー冷却と磁気トラップによって様々な原子気体の量子フェルミ縮退およびボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) を実現し、外部パラメタによって相互作用の強度と符号を自在に変えて量子状態を変化させることができる。これにより自然界に存在しない理論上の状況を実験室で作り出すことが可能になった。本研究では、この実験室系で実現可能な、統計性の異なるフェルミ原子とボーズ原子の混合気体を理論的に考察し、その量子状態の相互作用による変化を明らかにすることが目的である。

この研究では、十分低温の原子気体を想定し、低エネルギー有効ハミルトニアンをもとに研究が行われた。フェルミ原子（偏極状態）およびボーズ原子はそれぞれ一成分とし、原子間相互作用はボソン-ボソン (BB) 間は弱い斥力、ボソン-フェルミオン (BF) 間は可変な引力とし、フェルミオン-フェルミオン間はパウリ排他律により含まないとした。まず、相互作用が全くない場合を考えると、十分低温ではフェルミ原子は縮退し、ボーズ原子は BEC 状態になっている。本研究では、まず、BB 間相互作用を弱い斥力として固定し、BF 間相互作用が弱い引力の領域で変化させたときの BEC 転移温度の変化をファインマン・ダイアグラムの手法（摂動論）を使って計算した。特に転移温度近傍の臨界領域では赤外発散により摂動論が破綻するので、非摂動的手法として臨界指数による繰込まれたボソンエネルギーを採用し、自己無撞着に転移温度を決定した。更に、混合気体に特有のフェルミオン分極を介した有効 BB 相互作用を導入し、ボーズ気体における崩壊に対する条件を密度相関関数に対する乱雑位相近似を用いて計算した。これらの計算結果から温度・BF 相互作用空間における相図を作成し、どの領域において BEC が安定に存在し得るかを明らかにした。相図の概要として：1) BF 間相互作用と共に BEC 転移温度が自由気体のそれにまで低下し、それ以降はボーズ崩壊への不安定領域となる。2) 不安定領域への特性温度は BF 間相互作用と共に上昇し、フェルミ原子の密度とともに不安定領域が増す結果となった。更に、BF 間相互作用の強結合極限における相図もボソン-フェルミオン 2 体相関を考慮して解析的に算出した。これらの研究成果は、1 編の原著論文として、審査付の国際的学術雑誌に、筆頭著者としてまとめられている。

本研究と同様のボーズ・フェルミ混合気体に関する他の先行研究では、BF 間のユニタリ極限近傍に関するものが主で、ボーズ崩壊の存在は無視されていた。本研究は、弱結合領域における BEC 転移温度の変化とボーズ崩壊への不安定性を同時に考慮した最初の系統的研究であり、当該分野に重要な知見を与えると同時に、ユニタリ近傍に関しても BF 間 2 体相関以上の重要性を示した。よって、学位申請者白崎恭子は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。