

2017. 6

特集号



(題字：脇口宏学長)

国立大学法人

高知大学学報

## 高知大学学位授与記録第八十七号

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25号	西 圭介	中部・北西太平洋域の二重構造を有する海水起源マングラニットの形成年代と古海洋環境	1
甲総科博第26号	山岡 勇太	掛川動物群の成立とその変遷：上部新生界唐ノ浜層群の層序と貝化石群集に着目して	4
甲総科博第27号	舟谷 亮二	真核単細胞生物 <i>Colpoda cucullus</i> Nag-1の休眠シスト形成および脱シストに関する研究	6
甲総科博第28号	関口 昂臣	双対超伝導描像に基づくクォーク閉じ込め機構の研究	8

ふりがな	にし けいすけ
氏名(国籍)	西 圭介(岡山県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第25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29年3月23日
学位論文題目	中部・北西太平洋域の二重構造を有する海水起源マンガングラスタの形成年代と古海洋環境
発表誌名	Formation age the duel structure and environmental change recorded in hydrogenetic Ferromanganese crusts from Northwest and Central Pacific seamounts, Ore Geology Reviews, in press.
	審査委員 主査 教授 白井 朗 副査 教授 村山雅史 副査 教授 岩井雅夫 副査 教授 田部井隆雄

#### 論文の内容の要旨

海水起源マンガングラスタ(以下, グラスタ)は, 世界の全海洋で確認されており, 100万年に数mm程度の非常に遅い速度で成長している. グラスタは単一の鉄マンガングラスタ(バーナダイト)から形成されているため, 一般的に化学組成の変動は小さい. 中部・北西太平洋域に分布する5cm以上のグラスタには, もろく空隙に富む上位の鉄マンガングラスタ層(Layer 1)と緻密で硬質のリン灰石を含む下位のグラスタ層(Layer 2)から成る二重構造が広く観察できる. 両者の化学組成は大きく異なっており, 二重構造はグラスタの微細層序に見られる最も顕著な特徴である. 二重構造に注目することで, グラスタの成長構造や組成の変化と古海洋環境の変遷を対応付けできる可能性が高い. しかし, その組成や形成年代, 形成環境は未だ解明されていない点が多く, 特に, 二重構造の境界年代と生成環境を解明することが課題となっている. 本研究では, 高知大学が所蔵する中部・北西太平洋域の33海山の60以上のグラスタから二重構造を確認し, 研究に適した試料を可能な限り多く選択して分析を行った. また, 微細成長構造の記載を基にLayer 1, Layer 2のグラスタ・化学組成の特徴を明らかにし, 二重構造の境界年代の推定と形成環境の考察を行った.

本研究試料は, さらに4層の異なった副層(Layer 1-a, Layer 1-b, Layer 2-a, Layer 2-b)に分けることができる. Layer 1-aは試料の表層付近に観察でき, 黒色から黒褐色で比較的緻密な構造を呈する. Layer 1-bは試料中央にしばしば観察でき, 赤褐色から茶褐色で空隙が多く, 数mm程度のグラスタ片や微化石(主に有孔虫)を含む. Layer 2は緻密かつ硬質で光沢がある黒色を示し, 空隙は必ずリン灰石によって充填されている. Layer 2-aは黒色かつ緻密で微化石をしばしば含む. Layer 2-bは基盤岩直上に存在することが多く, 黒色かつ非常に緻密で碎屑物をほとんど含まない. Layer 2の微細成長構造は, 空隙がリン灰石によって充填されているものの, Layer 1と類似している.

<sup>10</sup>Be年代モデルは, 本研究試料中に数Maにわたる明瞭な成長の中断が存在せず, 連続的かつ一部の

試料の碎屑物に富む部分を除いて、約 2–6 mm/Myr の安定した速度で成長し続けていたことを示唆している。Layer 1 内の成長速度はすべての試料で共通して下部（おおむね Layer 1-b に対応）でやや速い傾向を示す。Layer 2 内の成長速度は  $^{10}\text{Be}$  年代測定法の測定限界に達しているため、詳細な検討を行うことができない。限られたデータによれば、Layer 2 の成長速度は Layer 1 の下部と類似した速度であり、Layer 1, Layer 2 で急激な速度の変化はないと推測できる。

赤道域に比較的近い試料は有孔虫に富む傾向があり、それらの試料に関しては有孔虫の同定を依頼した。その結果、中生代を代表する浮遊性有孔虫 *Globotruncana* 属のような特徴的な種群は全く検出されず、明らかに新生代型の浮遊性有孔虫と底生有孔虫であった。さらに古第三紀の浮遊性有孔虫、特に始新世を代表する *Morozovella* 属も見られなかった。観察できた種は、新生代でも、現生に通じる系列をもつ典型的な新第三紀の種群である。中でも *Orbulina* 属は、新第三紀中新世であることが示唆される（安田尚登による）。有孔虫年代と  $^{10}\text{Be}$  年代は、Layer 1 を通して調和的であり、観察できた有孔虫は新第三紀より新しい時代の種であったため、少なくとも前期–中期中新世から現在までクラストが成長していることを支持している。二重構造の境界年代は、中新世に集中しており、Layer 2 は後期中新世以降に形成されていない。その年代は水深によって変化することが新たに明らかとなった。浅い水深のクラスト（水深 991–1575 m）は約 10 Ma、深い水深のクラスト（水深 2262 m）は  $17.1 \pm 2.5$  Ma を示す。

Layer 1 と Layer 2 を比較した場合、Layer 2 は Al, Ti, Fe, Co に乏しく、Ca, P, Y, Ni, Cu, Zn, わずかに La, Ce に富む。Mn およびアルカリ金属 (Na, K), Ca 以外のアルカリ金属 (Mg, Sr, Ba) は Layer 1, Layer 2 でほとんど変化しない。Layer 2 での Al, Ti, Fe の減少は特に大きく、Layer 1 中の Al の平均濃度は約 0.9%, Ti は約 1.0%, Fe は約 13% であるのに対し、Layer 2 では Al は約 0.3%, Ti は約 0.4%, Fe は約 6% である。この特徴は、Layer 2 の化学組成が一般的な海水起源の鉄マンガン酸化物（バーナダイト）に比べて、Fe に乏しく、Ni, Cu, Zn に富んでいることを示唆している。また、この組成は続成起源のマンガン酸化物（プーゼライト）に類似している。

以上より、二重構造の形成プロセスを検討した。本研究では、Halbach et al. (1982, 1989) の結果を基に、Koschinsky et al. (1997) によって作成されたクラストのリン酸塩化作用モデルを引用し、二重構造の境界年代の変化を考察した。二重構造の境界年代は中新世の間に集中しており、数 Ma にわたる明瞭な成長の中断は見られない。この結果は、顕微鏡観察において、二重構造の境界の成長構造が連続的であることによっても支持される。中新世は南半球での中緯度偏西風や子午面表層の温度勾配の低下によって、全球的な熱塩循環および環流が弱かった (Herold et al., 2012)。また、13.9 Ma 以前は周極底層水および太平洋中層水（水深 1000–3000 m）の循環は弱く、南極氷床の拡大によって循環が活発化した (Holbourn et al., 2013)。西アフリカ沖では、中期中新世（約 15.5 Ma）に OMZ が拡大していたことが有孔虫化石から復元されている (Kender et al., 2008, 2009)。したがって、前期から中期中新世の海洋循環は、現在に比べてゆるやかであり、現在よりも溶存酸素量に乏しい OMZ を形成し、その範囲を拡大させていたという仮説を提唱した。この環境下では、現在のクラストとは異なる組成を示す鉄マンガン酸化物が沈殿していた可能性が高い。この仮説は Layer 2 の組成がより還元的な環境で生成するプーゼライトに類似していることとも調和的である。高 Mn/Fe 比を示す Layer 2-b は浅い水深帯のクラストのみに観察でき、これは形成当時の環境が現世より還元的であったことを示唆している。

Sorkhabi and Stump (1993) は、ヒマラヤ・チベット地域の隆起と侵食が特に 21–16 Ma と 11–7 Ma で速かったと報告している。この隆起や侵食はフロリダ卓状地でのリン酸塩化作用と関係している (Compton et al., 2000)。化学風化の増加は、リン酸などの主要栄養塩を陸域から海洋へ供給し、一次生産の促進と有機炭素の沈殿を引き起こしたと考えられる。Theyer et al. (1985) は、赤道太平洋域では前期から中期中新世の間に堆積物集積速度が増加したことを指摘しており、これらの考えは本仮説と調和的である。さらに、有機物の分解は海水中にリン酸イオンを供給し、 $\text{CO}_2$  の増加は pH の減少を引き起こ

した可能性が高い。リン酸イオンは大陸の風化、高い生物生産および堆積物の分解による海水中への供給と pH の減少による一時的な保存によって過飽和になっていたと推測できる。この水塊は高い pH かつ酸素に富む深層水と混合することによってリン灰石の沈殿を引き起こしていたかもしれない。

中新世は気候・海洋変化の主要な時期であり (Zachos et al., 2001), 後期漸新世 (26Ma) から中期中新世 (15 Ma) の気候は、その前後と比べて温暖で安定していた (Miller et al., 1987). 特に、中期中新世 (17–15 Ma) の温暖化は地球規模であり、中期中新世気候最適と呼ばれている。その後は中期中新世気候変遷期 (約 14.2–13.8 Ma) に移り、新生代の全球的な寒冷化と南極氷床の拡大といった主要な変動が起こった (e.g., Zachos et al., 2001). 二重構造の境界年代値は水深が浅い試料ほど新しい時代を示しているため、クラストのリン酸塩化作用の停止は同時代ではなく、深い水深のクラストから停止が開始し、浅い水深のクラストへ推移していったと考えられる。この変動は新第三紀の底層流の漸次的な強化に伴って引き起こされる酸素極小層の縮小に規制されたという解釈である。これらの結果は、堆積物コアから復元された古海洋環境の変遷とも類似している。今後、大西洋、インド洋に分布する二重構造クラストの境界年代を決定していくことで全球的な古海洋環境の変遷をクラストから復元できると期待できる。また、本研究結果によって、クラストを用いた古海洋環境研究の意義を再検討できた。

### 論文審査の結果の要旨

本研究は、北西太平洋域に広く分布する、含レアメタルマンガンクラスト (以下、クラスト) の多様性の実態・要因解明を目的とした地球科学的研究の一環として実施したものであり、研究成果として、クラスト中に広域的・普遍的に認められる顕著な二重構造の形成時期と形成環境について重要な知見を得たものである。筆者の西圭介は、高知大学 (臼井研究室) が所蔵する中部・北西太平洋域において 60 以上のクラスト試料の成長構造・組成を詳細に分析・観察した結果、大半の試料から明瞭な二重構造を確認し、普遍的に二つの特徴的な成長層が認められ、その境界年代が地域的に変動することに着目した。

1990 年代にドイツの地球科学者が提唱したクラストのリン酸塩化作用モデルを引用し、この二重構造の境界年代が変動する海洋環境要因を考察した。境界年代は中新世に集中していて、境界を挟み概ね連続成長していることがわかり、明瞭な中断は全く認められない。この推察は、顕微鏡観察において、二重構造の境界の成長構造が連続的であることにより支持される。本研究での大きな発見は、この境界年代が水深の増加とともに変化している事実である。前期～中期中新世は南半球の弱い中緯度偏西風や子午面表層の低い温度勾配によって、全球的な熱塩循環および環流が弱く、またその他の証拠から、深層大循環は、現在に比べてゆるやかであったと言われている。そこで、本研究では、当時は、現在よりも溶存酸素量に乏しい酸素極小層が形成されていたが、現世に向かって、強い循環と酸化的環境の範囲が拡大したと関連するという仮説を提唱した。この環境下では、中新世にはリン酸塩が沈殿する水深帯が現在よりも広くさらに現在のクラストとは異なる組成や構造を示す鉄マンガン酸化物が沈殿していた可能性があり、一方で、現世に至って、リン酸塩が生成する水深帯は縮小し消滅していったと考えた。この仮説は Layer 2 の組成がより還元的な環境で生成する鉱物に類似していることも調和的である。高 Mn/Fe 比を示す Layer 2b は浅い水深帯のクラストのみに観察でき、これは形成当時の環境が現世より還元的事実であることを示唆している。

この成果は、クラストの組成・構造が海洋環境の変化に応答していることを示す一例であることを示唆し、今後の古海洋学的研究への展望を示したものである。

以上の成果の主要な部分は、2 編 (うち筆頭著者論文 1 編) の原著論文として、審査付の国際的学術雑誌 *Ore Geology Reviews* 誌 (Elsevier) に、簡潔にまとめて公表されている。

このことから、学位申請者西圭介に博士号を授与する価値があると認める。

ふりがな	やまおか ゆうた
氏名(本籍)	山岡 勇太(愛媛県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第26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29年3月23日
学位論文題目	掛川動物群の成立とその変遷: 上部新生界唐ノ浜層群の層序と貝化石群集に着目して
発表誌名	現生ザルガイ科二枚貝 <i>Fulvia mutica</i> (トリガイ) の祖先種、鮮新統穴内層産 <i>Fulvia</i> sp. の殻形態と生息環境 化石, 98, 5-15, 2015年9月30日発行
	審査委員 主査 教授 近藤 康生 副査 教授 岩井 雅夫 副査 教授 奈良 正和 副査 准教授 三宅 尚

#### 論文の内容の要旨

掛川動物群は、静岡県掛川地域を模式産地とする暖流系の化石貝類動物群であり、その化石記録は南西諸島から関東にかけての鮮新統一更新統から報告されている。掛川動物群に関する研究の中で、鮮新世以前についての情報は少なく、掛川動物群の主要産地のひとつである高知県の鮮新統唐ノ浜層群については詳細な層序が確立されていない。そのため、当時の四国沿岸域における海産貝類の垂直分布や構成種については不明の点が多く、掛川動物群の全体像を理解する上で障害となっていた。そこで本研究では、まず唐ノ浜層群の海成層を対象に詳細な層序や年代、および堆積環境の復元を行い、それに伴う貝化石群集の変遷を明らかにすることをめざして研究を行った。さらにこれまで散点的であった四国地域の化石記録を補完するとともに、掛川動物群全体の成り立ちとその変遷の過程を特徴種の時空分布をコンパイルすることを通じて解明することを目的とした。本研究では、貝化石の多く産出する穴内、伊尾木、唐浜、大野地域の穴内層と羽根地域の登層、岩戸地域の堆積岩類を野外調査の対象とした。

石灰質ナノ化石を用い生層序学的検討の結果、穴内層の下部は3.8-3.4Ma、岩戸地域の堆積岩類は5.6-3.8Maの年代を示すことが明らかになった。また群集解析の結果、上部浅海帯から漸深海帯までの環境を示す14の群集が識別された。このうち岩戸地域からは、熱帯の上部浅海帯に特徴的な貝化石群集が産出した。また、穴内層分布域の西武に位置する穴内、伊尾木地域では、内海に近い上部浅海帯の環境が復元された一方で、唐浜、大野地域を含む東側の分布域では、開放的環境を好む上～下部浅海帯の化石群集がみられた。より東に位置する、穴内層と同時異相の登層では、唐ノ浜層群で最も深い漸深海帯の化石群集が産出した。これらの結果から、この時代の唐ノ浜層群は東へ向かうにつれ堆積場が深くなる傾向にあったことが貝化石の分布から確認された。

さらに、掛川動物群の特徴種を対象にその時空分布を追跡し、掛川動物群の時空分布の変遷、およびそれらの結果から推定される起源について考察した。その結果、特徴種の時空分布に、1) 南方起源、

2) 中緯度起源、3) 高緯度起源、4) 限定的な分布の、4つのパターンを見出した。このうち南方起源のグループは、中新世の南西諸島にて出現し、鮮新世に分布域を広げ、更新世カラブリアン期まで存続した。中緯度起源と高緯度起源のグループは、中新世メッシニアン期から鮮新世ピアセンジアン期に最古記録をもち、その後九州から関東まで分布を拡大、更新世初頭の寒冷化に伴い、分布を徐々に南に広げたと考えられる。

このように、掛川動物群は、起源とその後の進化史を異にする複数の種群から構成される、複合的な化石動物群として理解できること、また、一部の種群の進化史には気候変動が深く関わっていることが明らかになった。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、高知県の室戸半島西岸に分布する上部新生界唐ノ浜層群、特に穴内層の層位・古生物学的調査に基づき、黒潮動物群に先駆けて鮮新世から更新世かけて繁栄した掛川動物群の成立過程を検討したものである。

本論文の前半では、唐ノ浜層群分布域における綿密な地質調査により詳細な層序を確立し、石灰質ナノ化石の検討により地質年代を確定させるとともに、軟体動物化石群集の網羅的な記載を行っている。本研究による地質および層序についての記載は、1953年に甲藤らによって公表された論文以降、最も網羅的かつ詳細なものとして評価できる。特に、唐ノ浜層群が最も厚く堆積している唐浜地区において初めて全層準にわたる層序が明らかにされたこと、同地域の穴内層最下部層準の年代が3.8-3.4Maに絞り込まれたこと、および室戸地域における下部鮮新統の存在を示したことは重要な進展であると判断する。また、これまでよく知られてきた穴内層の軟体動物化石群集に、*Macoma totomiensis* 群集や *Mizuhopecten tokyoensis hokurikuensis* を含む *Glycymeris rotunda* 群集を加えるなど、多くの新知見が加えられたことは古生物学的に重要な貢献である。

後半では、上記の成果を基礎とし、慎重に選ばれた軟体動物化石23種に関する多数の文献に基づき時空分布を整理することにより、掛川動物群の成立過程が検討されている。掛川動物群は従来あたかも独立した実体を有する存在として扱われてきたが、本研究の結果、異なる起源を持つ種群の分布が次第に重複することによって成立した複合的な動物群であったことが明らかにされた。我が国の軟体動物化石動物群の研究において、その成立を本研究のように具体的な成立過程を含めて解明したのは初めてである。本論文は、今後、掛川動物群特徴種の絶滅や現生種貝類の進化に関わる研究を進めていく上で基礎となる重要な成果であると高く評価できる。

以上および関連する研究成果は、原著論文として、審査付の学術雑誌に英文論文1編（うち筆頭著者論文1編）と和文論文1編（うち筆頭著者論文1編）のほか、本学紀要6編（うち筆頭著者論文2編）にまとめられている。

以上、本研究は、鮮新統唐ノ浜層群、特に穴内層について、綿密な地質調査に基づき、層序および地質年代を明らかにするとともに、それらの成果に基づいて掛川動物群の成立に関する従来の見解を一新する、価値ある学術的貢献であると認める。

よって、学位申請者山岡勇太は、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)	ふなだに りょうじ 舟谷 亮二(高知県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第27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29年3月23日
学位論文題目	真核単細胞生物 <i>Colpoda cucullus</i> Nag-1 の休眠シスト形成および脱シストに関する研究
発表誌名	Morphological events during resting cyst formation in the ciliate <i>Colpoda cucullus</i> . 6 (3), 204~217, 2010. Emergence of the terrestrial ciliate <i>Colpoda cucullus</i> from a resting cyst: Rupture of the cyst wall by active expansion of an excystment vacuole. 28 (1), 149~152, 2013. Morphogenetic and molecular analyses of cyst wall components in the ciliated protozoan <i>Colpoda cucullus</i> Nag-1. 363 (18), fnw203, 2016.
	審査委員 主査 教授 松岡 達臣 副査 教授 鈴木 知彦 副査 准教授 三宅 尚

### 論文の内容の要旨

土壌に生息する真核単細胞生物は、乾燥耐性だけでなく高温、凍結、酸などに対する耐性を有する休眠シストを形成することにより、陸上に一時的に出現する水環境にうまく適応している。降雨により水たまりが出現すると速やかに脱休眠(脱シスト)して細胞分裂を繰り返し、水環境が消失する前に再度休眠シストになる。土壌性繊毛虫 *Colpoda cucullus* Nag-1 strain の休眠シスト壁は、最外層から、粘液層/レピドソーム層、エクトシスト層(単層)、エンドシスト層(数層)からなる。本研究では、本種のシスト形成初期過程におけるエネルギー代謝や細胞内構造の分解・再構築に関する細胞学的研究およびシスト壁を構成するタンパク質を同定することを目的とした。また、脱休眠過程の最終段階である栄養細胞のシストからの脱出機構を明らかにした。

シスト誘導後数時間で細胞内に多数のアクリジンオレンジ(AO)に染まるオートファゴソームが出現した。この結果から、シスト形成の初期過程では、休眠細胞の構築と並行して栄養細胞構造が消化されることがわかった。シスト誘導後、数時間~15時間までにミトコンドリア膜電位が消失することから、休眠シスト形成初期に細胞のエネルギー代謝が停止することが明らかになった。エクトシスト層はトルイジンブルー(TB)染色では染まらず、リン脂質検出試薬には染まることから、エクトシスト層は膜系に由来する可能性が示唆された。

シスト壁を構成するタンパク質を同定する目的で、脱シスト後のシスト壁(エクトシスト、レピドソーム、粘液層)を回収し、これに含まれるタンパク質をSDS-PAGE分析した。検出された3種の明瞭なバンド(27 kDa, 31 kDa, 45 kDa)をマスマスペクトル(LC-MS/MS)解析した結果、45 kDaの



ンパク質 (p45) がペプチド伸長因子 Tu (Elongation factor Tu; EF-Tu) であることがわかった。コルポータ EF-Tu (p45) がシスト壁のどの部分に局在するのかを明らかにするために、EF-Tu ポリクローナル抗体を用いた間接蛍光法によって解析した。この結果、コルポータ EF-Tu はレピドソームに局在することがわかった。また、レピドソームは酸性多糖類を染色するトルイジンブルーには染まらず、重積βシート構造に結合することによりアミロイド繊維を特異的に染色すること知られているコンゴレッドで鮮やかに染色された。電子顕微鏡観察では、シスト誘導後3時間までに、顆粒状または繊維様構造を含む高電子密度小胞 (顆粒小胞) 間の融合および低電子密度構造体との融合によってレピドソームが形成されることが示された。顆粒小胞の形成過程では、近傍の小胞体から出芽した小胞が顆粒小胞に融合する様子が観察された。

脱休眠過程の最終段階では、脱シスト液胞の膨張によってエクトシストが機械的に破壊されることによって栄養細胞がシスト壁から脱出する。本研究では、脱シスト液胞の膨張には、水の受動拡散だけでなく能動拡散が関与していることが示唆された。

### 論文審査の結果の要旨

土壤に生息する単細胞生物は、一時的に出現する水環境中で増殖し、水が干上がる前に乾燥耐性を有する休眠シストと呼ばれる休眠型形態につくりかえられる。休眠シスト研究は、20世紀初頭より始まったが、その分子機構は最近までほとんどわかっておらず、細胞学的な基盤すら十分に確立されていなかった。舟谷亮二君は、土壤性繊毛虫コルポータ (*Colpoda cucullus* Nag-1) の休眠シスト形成過程における栄養細胞構造の分解 (オートファジー)、シスト壁の形成プロセス、ミトコンドリアのエネルギー代謝の停止といった細胞内の劇的な形態・機能の変化を、電子顕微鏡と光学顕微鏡を用いた細胞学的手法を駆使することにより明らかにした。同君の研究成果は、本研究領域の展開のために不可欠な基盤を築いたといえる。また、シスト壁の形成過程およびシスト壁に局在するタンパク質の1つ (ペプチド伸長因子 Tu; EF-Tu) を同定した共同研究では、第1著者として論文を執筆し、微生物学分野の代表的な国際学術雑誌の1つである FEMS Microbiology Letters に掲載された。EF-Tu は、バクテリアの感染過程で宿主細胞への接着に関与する多機能タンパク質として知られおり、このタンパク質が、病原性種を含む多くの原生物のシスト壁に局在し、基質や宿主細胞への接着に関与している可能性が推察された。本研究成果は、コルポータ休眠シスト形成の形態レベルの全容を時系列に沿って理解することを可能にし、休眠シスト研究の基盤をなすという観点からも高く評価できる。本研究では、休眠シスト誘導後数時間で、ミトコンドリアのエネルギー代謝が停止することを実証した。休眠中のミトコンドリアの活性状態とその制御機構は解明すべき最も重要なテーマであるが、ミトコンドリアのエネルギー代謝が停止することは、本研究で初めて明らかになった。

休眠シストに関する同君の研究成果は、第1著者論文3報を含む計4報の査読付き国際学術雑誌に原著論文として掲載されている。よって学位申請者舟谷亮二君は、博士 (理学) の学位を得る資格があると認める。

ふりがな	せきぐち たかしげ
氏名(国籍)	関口 昂臣(茨城県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第28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29年3月23日
学位論文題目	双対超伝導描像に基づくクォーク閉じ込め機構の研究
発表誌名	International Journal of Modern Physics A Vol. 31, No. 26 1650149
	審査委員 主査 教授 飯田 圭 副査 教授 津江 保彦 副査 教授 諸澤 俊介

### 論文の内容の要旨

クォークなどに働く強い相互作用を記述する量子色力学(QCD)において低エネルギー領域では、グルーオンの自己相互作用により、高エネルギー領域では有効だった摂動計算を用いた解析が困難となる。そのため、この領域における解析には非摂動的な取り扱いをする必要がある。その非摂動的な取り扱いとしてMonte Carlo法を用いた格子シミュレーションによる数値計算が有効である。低エネルギー領域の非摂動的な現象の1つに、クォークは単独では観測されず、クォークの複合粒子であるハドロンとして観測されるクォークの閉じ込めという現象がある。このクォーク閉じ込め機構の解明は、原理的にはQCDから解決されるべき重要な問題である。クォークの閉じ込めに対し有効なシナリオのひとつとして、クォーク・反クォーク間のポテンシャルを線形ポテンシャルに形成し、その本質的な役割をmagnetic monopoleが果たしているとする双対超伝導描像が知られている。この双対超伝導描像に基づくアプローチで閉じ込めを示す重要な量は線形ポテンシャルの勾配であるstring tensionと呼ばれる量で、この量は温度上昇に伴い小さくなり相転移温度を境に0となる。これまで行われた格子シミュレーションの結果では、Maximally Abelian(MA)ゲージなどの部分的なゲージ固定をしない場合でも、string tensionに対し、Abelianからの自由度のみでnon-Abelianのstring tensionを再現できるAbelian dominanceやmonopole dominanceが確認され、双対超伝導描像を後押しするような結果が得られている。

また、相転移温度以上で非閉じ込め相とされる領域において、pseudo potentialの勾配であるspatial string tensionと呼ばれる量が0にならない量として確認されている。このspatial string tensionは、通常のstring tensionが時間方向と空間方向に広がったWilson loopを用いて測定されるのに対して、空間2方向に広がったWilson loopを用いて測定される。本研究では有限温度QCDにおけるspatial string tensionへのAbelian成分やmonopole成分からの寄与について調査した。spatial string tensionへのAbelian成分やmonopoleからの寄与については、MAゲージ固定を行った場合にAbelian dominanceやmonopole dominanceが観測されており、高温相においてもそれらの自由度が非摂動的な現象にたいして重要な役割を果たすことが分かっている。本研究では、有限温度SU(2)ゲージ理論におけるspatial string tensionへのAbelian成分やモノポールからの寄与をゲージ固定せずに測定することにより、それらがQCDの高温相においても非摂動的な効果を与えているのかどうかを調査した。測定パラメータは、

作用には、Wilson action を用い、結合定数  $\beta=2.74$ 、lattice size  $24 \times 24 \times 24 \times N_t$  ( $N_t=24, 8, 6, 4, 2$ ) を用いて Monte Carlo simulation を実行した。non-Abelian spatial string tension については、今回の測定パラメータの範囲では体積依存性や格子間隔依存性がないことは確認されている。spatial string tension に対する Abelian や monopole からの寄与についても格子間隔依存性を調べるため、reweighting 法を用いて  $\beta=2.75 \sim 2.79$  の範囲で、spatial string tension および pseudo potential の差分である force を評価した。得られた結果は、全てのパラメータ領域において、Abelian spatial string tension は Abelian dominance が成立していることが確認でき格子間隔について依存性がないことが示された。

また force の測定結果も、カラー電荷間の距離が大きいく所非Abelian force と monopole force が一致し force に対する monopole dominance を確認することが出来た。これは spatial string tension に対して、monopole からの寄与が重要な役割を果たしていることを表している。さらに、spatial string tension の温度依存性を調べることにより、non-Abelian および Abelian とともに  $T \geq T_c$  の領域で dimensional reduction による 3 次元有効理論から予想される振舞いと誤差の範囲で一致していることを確認した。これまで MA ゲージのようなゲージ固定条件を課さずに Abelian や monopole の寄与が確認できたのは初めてのことである。この結果はゲージ固定条件によらず magnetic monopole が非閉じ込め相においても非摂動効果を担っている可能性を示唆している。

### 論文審査の結果の要旨

我々を構成している物質を細かく分解していくと、原子のなかに原子核があること、原子核は核子（陽子・中性子）から成ること、さらには、核子がクォークとよばれる素粒子から成り立っていることが知られている。通常環境においては、クォークを核子から取り出すことができない。これをクォーク閉じ込め問題という。一方、クォークと、クォーク間の相互作用をつかさどるゲージ場（グルーオン）の動力学を記述する基礎理論として、量子色力学（QCD）が確立している。クォークが色（カラー）の自由度を有し、通常環境においては全体として白色化されたクォークの集合体としてしか存在できないと考えることにより、クォーク閉じ込め問題を QCD から解決できるはずだが、非アーベル性、即ちグルーオンの自己相互作用からくる非線形性により、数学的には難解な問題となる。そこで、この問題への一つのアプローチとして、時空を格子状に区切った上で大規模な数値シミュレーションを行うという手法が 40 年ほど前から頻りに用いられており、計算機の進歩とともに研究が蓄積されてきている。

関口昂臣氏は、QCD より単純だが閉じ込めの本質を捉えられると期待できる  $SU(2)$  ゲージ理論を用いて、有限温度において閉じ込めの本質を探るのに適した観測量の一つである空間的弦張力を格子上の数値シミュレーションにより測定した。空間的弦張力は、ある瞬間において互いに十分離れた重たいクォーク・反クォーク間に働く距離に比例した引力ポテンシャルを与える。空間的弦張力を測定する上でゲージ場の配位を用意する必要があるが、ここでは、双対超伝導描像に立脚し、ゲージ場の自己相互作用がない超伝導体との類推が成り立つように部分的ゲージ固定（アーベリアン射影）を行う。固定の方法は無数にあるが、特殊なゲージに固定した先行研究においては、空間的弦張力を与える配位がアーベル的な寄与どころか、カラーの磁荷を与えるモノポールからの寄与だけで十分説明できることが知られており、閉じ込めが溶ける高温の環境下においてもモノポールの凝縮が各瞬間で存在し、閉じ込めをもたらす傾向にあることが示唆されている。しかし、以上の知見を確かなものとするには部分的ゲージ固定の方法によらないことを示す必要がある。

本研究は、温度依存性、格子間隔依存性、さらには格子体積依存性に留意しながら、世界で初めて、ゲージを固定せずにモノポールが主に空間的弦張力を与えることを長時間にわたる数値シミュレーション

ンにより示したものであり、クォーク閉じ込め問題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、学位申請者関口昂臣氏は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。なお、以上の成果は、原著論文として、審査付の国際的学術雑誌1編（うち筆頭著者論文1編、共著者は高知大学情報センターの石黒克也氏）としてまとめられている。