

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40号	島田 雄斗	原生生物繊毛虫コルポータにおける温度刺激による休眠シスト形成機構	1
甲総科博第41号	岡島 宏樹	Notes on Greek letter elements in the stable homotopy groups of spheres (球面の安定ホモトピー群のギリシャ文字元について)	3
甲総科博第42号	西村 和也	冷却原子ポーラロンの基底状態	5
甲総科博第43号	畑 知宏	スピン自由度を含む量子開放系の定式化と冷却原子系への応用	7

ふりがな	しまだ ゆうと
氏名(本籍)	島田 雄斗(三重県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第40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4年3月23日
学位論文題目	原生生物繊毛虫コルポーダにおける温度刺激による休眠シスト形成機構
発表誌名	Signaling in temperature-induced resting cyst formation in the ciliated protozoan <i>Colpoda cucullus</i> . <i>European Journal of Protistology</i> . 2021; 79: 125800.
	審査委員 主査 教授 有川 幹彦 副査 教授 松岡 達臣 副査 准教授 遠藤 広光

論文の内容の要旨

原生生物繊毛虫コルポーダは、水の干上がりなどの生息環境の悪化を感知すると、乾燥や高温に耐性を持つ休眠シストを形成する(シスト化)。このシスト化を引き起こす要因として、生息環境のCa²⁺濃度の上昇、および細胞密度の上昇が知られている。しかし、それらは水が干上がり始めてから起こる現象であり、コルポーダは事前に水の干上がりを感知する必要がある。自然界において水の干上がりを引き起こす要因として日光が挙げられる。日光により及ぼされる刺激として、光刺激と温度刺激が考えられるが、光刺激によりシスト化は誘導されないことがわかっている。

そこで本研究では、コルポーダのシスト化に対する外液の温度変化の影響について調べた。その結果、コルポーダの細胞懸濁液の温度を25°Cから30°Cに上昇させるとシスト化が誘導された。また、20°Cから25°Cに上昇させた時もシスト化は誘導された。一方で、25°Cから20°Cに低下させた時はシスト化は誘導されなかった。さらに、緩やかな温度上昇(3時間程度で25°Cから30°C)ではシスト化は誘導されず、急激な温度上昇(2分程度で25°Cから30°C)によってのみシスト化が誘導された。これらのことから、細胞懸濁液の温度がある特定の温度に達することではなく、5°Cの急激な温度上昇によってシスト化が誘導されることが明らかになった。続いて、温度受容体として知られるTransient receptor potential cation channel subfamily V member 1 (TRPV1)に着目して実験を行った。コルポーダの栄養細胞にTRPV1活性化剤(capsaicin)を加えるとシスト化が誘導された。さらに、TRPV1阻害剤(capsazepine または BCTC)存在下では、温度刺激によるシスト化が抑制された。このことから、コルポーダの温度刺激によるシスト化にTRPV1が関与する可能性が示唆された。コルポーダの栄養細胞においてTRPV1の発現を調べるため抗TRPV1抗体を用いたWestern blot解析を行った結果、100 kDaと50 kDaのタンパク質が検出された。質量分析の結果、それらのタンパク質はヒトTRPV1と高い相同性を示した。コルポーダのシスト化におけるシグナル経路を明らかにすることを目的として、Fura2-AMによる細胞内Ca²⁺イメージングを行った。その結果、温度刺激により小胞内に蓄えられているCa²⁺が細胞質へ放出され、それはTRPV1阻害剤により抑制された。温度刺激によるシスト化は、リアノジン受

容体 (RyR) 阻害剤存在下でも誘導されたこと、さらには、外液を超純水に代えた状態でも誘導されたことから、Ca²⁺誘発性 Ca²⁺放出 (CICR) 機構とは別機構によるものと考えられた。免疫電子顕微鏡観察の結果、TRPV1 は栄養細胞の細胞膜上ではなく小胞膜上に局在することがわかった。細胞内 Ca²⁺濃度上昇後の細胞内シグナル伝達系としては、アデニレートシクラーゼ (cAMP 合成酵素) の阻害剤により温度刺激によるシスト化が抑制されたことから、cAMP の関与が明らかになった。同時に細胞内 Ca²⁺濃度の上昇を起点としてシスト化に向けた複数のシグナル経路が関与する可能性が示唆された。本研究により、コルポーダは、生息環境の温度が急激に上昇すると、小胞膜上の TRPV1 が開き、小胞から Ca²⁺が放出することで細胞内 Ca²⁺濃度が上昇し、cAMP を含む複数のシグナル伝達系を介してシスト化することが明らかになった。

論文審査の結果の要旨

原生生物繊毛虫コルポーダの休眠シスト形成を引き起こす刺激として、これまでは実験室において、機械刺激か Ca²⁺刺激のいずれか、または両方が用いられてきた。本研究は、自然環境下におけるシスト化を引き起こす要因として日光による刺激を想定し、コルポーダに対する温度刺激の影響について調べた。その結果、次のことを明らかにした。1) コルポーダは 5°C の急激な温度上昇によりシスト化する。2) 温度受容には温度受容体として知られる TRPV1 が関与している。3) TRPV1 は細胞内小胞膜上に局在する。4) 細胞内小胞に Ca²⁺が含まれる。5) 温度刺激により小胞内 Ca²⁺は細胞質へと放出される。6) 小胞からの Ca²⁺放出には TRPV1 が関与している。7) 温度刺激によるシスト化には cAMP を含む複数の細胞内シグナル伝達経路が関与している。以上の結果を含む研究成果は、原著論文として、査読付きの国際的学術雑誌に 3 編 (うち筆頭著者論文 1 編, *European Journal of Protistology*, 2021; 79: 125800.) としてまとめられている。このように、本研究は、原生生物繊毛虫コルポーダの休眠シスト形成過程について、温度刺激受容機構と、続く細胞内シグナル伝達経路、特に細胞内小胞からの Ca²⁺放出機構を明らかにしたものであり、原生生物における環境応答の分子機構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、学位申請者島田雄斗は、博士 (理学) の学位を得る資格があると認める。

ふりがな	おかじま ひろき
氏名(本籍)	岡島 宏樹(静岡県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第41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4年3月23日
学位論文題目	Notes on Greek letter elements in the stable homotopy groups of spheres (球面の安定ホモトピー群のギリシャ文字元について)
発表誌名	<ul style="list-style-type: none"> • A note on the products $\alpha_1\beta_2\gamma_t$ and $\beta_1^{r+1}\beta_2\gamma_t$ in the stable homotopy of spheres, <i>Hiroshima Math. J.</i> 49 (2019), 303–321. • Notes on algebraic stable homotopy category, <i>Proceedings on “Bousfield classes and Ohkawa’s theorem”</i>, Springer, <i>Mathematics & Statistics</i> 309 (2020), 103–108.
	<p style="text-align: center;">審査委員 主査 教授 下村 克己 副査 教授 小松 和志 副査 准教授 仲野 英司</p>

論文の内容の要旨

ホモトピー論は CW 複体の成す圏に関連した研究をする分野である。その一つの分野として安定ホモトピー論と呼ばれる、 CW 複体を拡張した概念であるスペクトラムの成す圏 S を研究する分野がある。スペクトラムの成す圏 S は安定ホモトピー圏となり、安定ホモトピー論の一つの最終目標として安定ホモトピー圏 S の構造決定がある。安定ホモトピー圏 S の構造決定の考察は、圏 S が球面スペクトラム S を単位対象とする閉対称モノイド圏であることを用いる方法や、圏 S を適当なスペクトラムで局所化した圏を考えることにより S の構造の見通しをよくする方法など様々な手法が試みられている。本研究ではその一つとして圏 S を各素数 p で局所化した安定ホモトピー圏 $S_{(p)}$ を考え、そこでのホモトピー群によって定義される次数付きアーベル群の圏 Ab_* への関手 $\pi_*(-): S_{(p)} \rightarrow Ab_*$ がホモロジー関手となっており、さらに忠実でもあることから、この関手により $S_{(p)}$ を考察する方法を用いる。特に圏 $S_{(p)}$ の球面スペクトラム S^0 にホモロジー関手 $\pi_*(-)$ を施したもの、つまり球面の安定ホモトピー群 $\pi_*(S^0)$ の構造決定は重要な問題である。これは圏 $S_{(p)}$ が球面スペクトラム S^0 により生成される localizing 部分圏として復元でき、 $\pi_*(S^0)$ の要素の研究で圏の情報が得られるからである。しかし球面の安定ホモトピー群の構造決定問題ははまだ解決にはほど遠いものである。

この問題へのアプローチとして、球面の安定ホモトピー群の生成元であるギリシャ文字元の研究がある。Adams-Novikov spectral sequence の E_2 項でのギリシャ文字元は H. R. Miller, D. C. Ravenel, W. S. Wilson によって定義された。その中で、Adams-Novikov spectral sequence で球面の安定ホモトピー群に生き残ったものが球面の安定ホモトピー群のギリシャ文字元である。学位論文では、主に球面のホモトピー群の生成元であるギリシャ文字元をキーワードに三つの方向から考察を行っている。

第2章では、ギリシャ文字元 β_1 の cofiber であるスペクトラム W を用いて、新たなギリシャ文字元の構成について考察し、その具体例として γ 元について研究している。添え字が二つある γ 元についてはホモトピー群での存在はまだ知られておらず、 $\gamma_{tp/p,r} \in \pi_*(S^0)$ の存在を示した。

さらに、D. C. Ravenel によるギリシャ文字元の定義は表し方が一意的ではなく、同じ名前でも異なるギリシャ文字元が存在する。第3章では、 E_2 項での元の一意性とそれらの積についても研究している。ギリシャ文字元が一意的であるための条件を示し、一意的でないときはその元の個数を調べた。ギリシャ文字元の積についても同様に、一意的になるための条件を示した。

一方で、Adams-Novikov spectral sequence の E_2 項の計算から Picard 群の考察ができる。Picard 群とは可逆なスペクトラムの同型類からなる可換群である。第4章では、スペクトラムの成す圏を Johnson-Wilson スペクトラムで、Bousfield の意味で局所化して得られる圏の Picard 群を考えた。このとき Picard 群はある不変イデアルによって特徴づけられることを示し、さらに具体的にいくつかの Picard 群の構造を調べた。しかし、その構造を見る限りは、表立ってはギリシャ文字元が現れていないため、その裏にあるギリシャ文字元との関連性を考察するのは今後の課題となった。

論文審査の結果の要旨

本論文は、安定ホモトピー論の最重要な問題である球面の安定ホモトピー群の構造決定問題を Adams-Novikov スペクトル系列を通して考察したものである。特にその安定ホモトピー群の生成元であるギリシャ文字要素のなす族をスペクトル系列を通して調べている。さらに、それらに関連して、Hopkins により導入された Picard 群についても考察を行っている。

第1章では、論文全体の概略を述べている。

第2章では、Ravenel により定義されたギリシャ文字族 β 元の一意性 $tp/p, r$ の形の γ 要素が球面の安定ホモトピー群の中に存在するとうい事実を証明している。

第3章では、Adams-Novikov スペクトル系列の E_2 項について考察している。Ravenel により定義されたギリシャ文字族では同じ添え字のものが複数あることが考えられるが、その個数を具体的に2番目のギリシャ文字族である β 族について決定した。

第4章では、Hopkins により定義された Picard 群を研究している。そのために Smith-Toda のスペクトラム $V(n-1)$ に関する Adams-Novikov スペクトル系列 E_2 項を、 $V(n-1)$ を n 番目の局所化を行った $L_n V(n-1)$ の環構造を与えることにより、決定し、その構造をもとに、 n 番目の局所化圏の Picard 群の構造を決定した。

本研究は、Adams-Novikov スペクトル系列について、その入力部である E_2 項と出力部である安定ホモトピー群を研究したものであり、安定ホモトピー論についての重要な知見を得たものとして価値ある集積と認める。以上の成果は、原著論文として、審査付きの国際的学術雑誌に3編（うち筆頭著者論文3編・投稿中）にまとめられている。加えて、既に査読付きの国際的学術雑誌2編を公表している。よって、学位申請者 岡島宏樹は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。

ふりがな	にしむら かずや
氏名(本籍)	西村 和也(京都府)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第42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4年3月23日
学位論文題目	冷却原子ポーラロンの基底状態
発表誌名	PHYSICAL REVIEW A, Vol. 103, 033324-1~033324-11, 25 March 2021
	<p style="text-align: center;">審査委員 主査 教授 飯田 圭 副査 教授 仲野 英司 副査 准教授 福間 慶明</p>

論文の内容の要旨

冷却原子とはレーザーと磁場により冷却された超低温かつ超低密度の原子気体である。冷却原子は原子間の相互作用を実験的に変化させることができ、様々な状況を作りだせることから実験・理論の双方から注目されている。

この論文ではこの冷却原子中のポーラロンについて扱った。ポーラロンとは元来イオン結晶中を電子が移動しているような系に現れる準粒子のことであり、電子をその周りの偏極(フォノン)まで含めて1つの粒子とみなしたものである。冷却原子系に不純物が含まれるような系に対しても、不純物が自身と冷却原子との相互作用により生じる素励起をまとうことでポーラロンを形成することが知られている。そして冷却原子中のポーラロンの性質は気体の種類により大きく異なる。この論文では双極子間相互作用をするフェルミガス中とボース・アインシュタイン凝縮しているボースガス(BEC)中のポーラロンの基底状態を変分法を使って調べた。

理想フェルミガスは低温では各原子が小さいエネルギー準位から順に占有しフェルミ面は球形になる。一方、双極子間相互作用をするフェルミガスは非等方的な相互作用により非等方なフェルミ面を形成する。この論文では不純物との相互作用により非等方なフェルミ面近傍に粒子-ホール対が1組だけ生成されると仮定し、ポーラロンの状態をChevy's ansatzと呼ばれるansatzを非等方なフェルミ面に対して拡張することで記述した。また、双極子間相互作用(DDI)の影響はフェルミオンの1粒子エネルギーを変更することで取り込んだ。変分法により基底状態のエネルギーを計算することによりDDIはポーラロンのエネルギーを増加させ、ポーラロンの束縛を弱めることが示された。また、双極子間相互作用の粒子-ホール対の励起への影響、有効質量、ドラッグパラメータ、不純物周りのフェルミガスの密度分布も計算した。これらの量はDDIにより非等方的になり、いずれ

も双極子と平行な方向に関してはほとんど DDI に依存しないのに対して、双極子と垂直な方向に関しては DDI に対する明確な依存性が示された。さらに、密度分布の計算から不純物が双極子間相互作用をするフェルミガスの不安定性に影響を及ぼす可能性も示唆された。

BEC 中のポーラロンの先行研究では、ポーラロンの状態をコヒーレント状態と呼ばれるフォノンが 0 個、1 個、2 個、…の状態の重ね合わせの状態に記述し、その場合のポーラロンの基底エネルギーとフォノンの運動量分布が調べられていた。しかし、先行研究ではフォノン間の相互作用を無視した場合のみを取り扱っていた。そこで、本論文ではポーラロンをコヒーレント状態に記述し、フォノン間の相互作用まで取り込んだときのポーラロンの基底エネルギーと基底状態でのフォノンの運動量分布を求めた。

論文審査の結果の要旨

冷却原子系、即ちアルカリ原子を主な構成要素とする希薄かつ極低温の物質系を作り出すことがレーザー技術の向上などにより実現できるようになって以来、この系は、量子多体問題の魅力的な対象としての地位を確立してきた。実験上の進展に伴い、ボース原子のみならずフェルミ原子も冷却可能となり、さらにはフェッシュバハ共鳴を利用して磁場により原子間の相互作用を操作することまでもが可能となっている。すると、核物質、即ち原子核を構成する物質など、密度や温度のスケールは異なるものの相互作用の性質が酷似している物質の性質を、冷却原子系の実験により間接的に調べる研究手法が実行可能となる。これは量子シミュレーションと呼ばれ、実際、低密度の中性子物質の理解にはこの手法が役立つことが知られている。一方、通常の原子核は中性子のみならず陽子も含んでおり、少量の陽子が含まれた物質状態を知ることは現在の原子核物理分野の研究の方向性ともマッチしている。このように不純物が単体の媒質に混在した状況は冷却原子系でも実現可能であり、十分低温で不純物が媒質の励起の衣を身にまとってできる量子状態は一般にポーラロンと呼ばれる。

西村和也は、既存の実験と将来の実験による実現を念頭に置き、冷却原子系におけるポーラロンの基底状態を系統的かつ理論的に解明することを試みた。具体的には、向きのそろった磁気モーメントをもつフェルミ原子からなる気体に 1 個の異種原子を混ぜた場合、及び、ボース原子が凝縮した気体に 1 個の異種原子を混ぜた場合を考えるが、これらの状況は、例えば核物質においては、強磁場中でスピンのそろった中性子物質に混入した陽子、強く結合した中性子対からなる超流体に混入した陽子にそれぞれ類似している。用いる理論手法は、前者においては、ポーラロンの状態を調べるのに役立つ 1 粒子 1 空孔対励起までを含む変分法と双極子間相互作用によるフェルミ面の異方性変形を調べるのに役立つハートリー・フォック理論を組み合わせたもの、後者においては、ポーラロンの状態を調べるのに役立つコヒーレント状態を用いた変分法に、従来取り入れられていなかった超流動フォノン間相互作用による 3 フォノン過程を新たに組み込んだものである。

本研究は、前者においては、フェルミ面の異方性が、有効質量などのポーラロンの性質に不純物の進行方向への依存性をもたらす様子を、後者においては、3 フォノン過程が、ポーラロンが身にまとう衣の運動量分布やポーラロンのエネルギーに影響を与える様子を、数値計算により初めて明確に示したものである。そして、前者の成果は実験での検証が待たれ、後者の成果は既存の実験データの解釈に道筋を与えるものである。以上のことから、本論文はポーラロン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られる。よって、学位申請者西村和也は、博士（理学）の学位を得る資格があると認められる。なお、前者における以上の成果は、原著論文として、審査付の国際的学術雑誌 1 編（うち筆頭著者論文 1 編）としてまとめられている。

ふりがな	はた ともひろ
氏名(本籍)	畑 知宏(兵庫県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	甲総科博第43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4年3月23日
学位論文題目	スピン自由度を含む量子開放系の定式化と冷却原子系への応用
発表誌名	Physical Review B, Vol. 104, 144424 (2021)
	審査委員 主査 教授 津江 保彦 副査 教授 仲野 英司 副査 准教授 諸澤 俊介

論文の内容の要旨

スピン角運動量は微視的な粒子に固有な量子数であり、粒子が電荷をもつ場合は磁気的な性質を表す。また、粒子の軌道運動に起因する軌道角運動量とは区別される。この二つの角運動量の結合効果としてスピン軌道相互作用(SOC)と呼ばれるものがあり、相対論的效果として様々な物理系にあらわれることが知られている。このSOCは一般的に他の相互作用に比べて大きさが小さいが、無視できない場合には多様な現象に関連することが知られており、ここではSOCによるスピン緩和現象に注目した。例えば、磁場中の電子スピンは孤立系であれば、磁場の方向周りの歳差運動するのみであるが、環境下であれば、環境自由度とのスピン交換相互作用などによる「スピンゆらぎ」によって磁場の方向にスピンを向けようとする力が働き、最終的にはスピンの方向を向くことが知られており、この現象をスピン緩和という。スピン方向の変化をもたらす「スピンゆらぎ」の源は、上記の量子論的スピン交換相互作用以外にも、スピンの結合する磁場の揺らぎや局所的な空間回転であってもよい。これらの効果は、現象論的記述においてはスピン方向を曲げる力、「スピントルク」として集約される。

SOCはスピンと、運動量に依存する有効磁場の結合として書き直すことができる。よって、運動量の揺らぎがあればSOCによる有効磁場の揺らぎが起き、結合しているスピンに対してスピン緩和を起こす。先行研究では他の粒子との散乱により運動量の方向が変化し、スピン緩和が起こるというメカニズムが知られている。ここでは運動量の散逸を含むモデルとしてCaldeira-Leggettモデルを採用し、Rashba型SOCを持つ場合に拡張した。この拡張されたモデルからFeynman-Vernonの経路積分によって環境の自由度を消去し、注目するRashba系の有効作用を得た。有効作用に対して注目系の軌道とスピンの揺らぎで変分してスピンと運動量に対する準古典的運動方程式を導いた。この方程式の漸近解析から、十分に時間がたつと運動量の値が、Rashba系の1粒子エネルギーの極小値に対応する値と一致することがわかった。また運動方程式の形から、自分自身のスピンの運動が運動量のダイナミクスに影響し方向を変えうると考えられ、それによってスピン緩和が起きることが期待された。実際に、この運動方程式の数値解析から、スピンと運動量のダイナミクスをシミュレートし、スピン緩和が起こることがわかった。また、SOCの大きさによって終状態の運動量の方向を調節できることがわかった。これによって有効磁場の向きも決まるので、終状態でのスピンの方向も制御できると期待され

る。この結果は新しいものであり、スピントロニクス分野で新しいスピンダイナミクスの可能性を提案できると期待される。本研究でのスピン緩和メカニズムは先行研究のものとは異なり、運動量の方向は自分自身のスピンの運動によって変化する。これはSOCによってスピンと運動量のダイナミクスが影響しあうためである。外部磁場があるときにも同様の計算を行なった。磁場が強くなるとZeeman効果がSOCの効果よりも強く表れるため、実現しうるダイナミクスも変わることがわかった。

追加の計算として、環境なしの場合の経路積分の確かめと、摂動論で扱った場合にスピン緩和が起きるかどうかも確かめた。また、冷却原子系への応用として環境を調和振動子からBECに変えて計算が可能かどうか考えた結果、高温近似が適当でないために上記の準古典運動方程式による解析はできないことがわかった。そこで、このモデルを使って、どのような解析が可能かどうかを先行研究を紹介しつつ論じた。

論文審査の結果の要旨

スピン角運動量は電子などの素粒子がもつ量子力学的に固有の角運動量であり、運動量による軌道角運動量と合わせて粒子の持つ全角運動量となる。スピン角運動量と軌道角運動量はそれぞれが独立な保存量ではなく、相対論的效果により結合している。これをスピン・軌道結合(SOC)という。SOCは通常非相対論的状況では無視できるが、例えば、半導体などのデバイス中において外部電場やバンド間相互作用を調整することで伝導電子のSOCを増大させることができる。このような系ではSOCの役割が重要となり、これを応用してスピン角運動量に情報を持たせるスピントロニクスなどの新しい分野が発展している。SOCを持つ粒子の振る舞いは、その運動量(軌道角運動量を担う)とスピン角運動量のダイナミクスによって記述されるが、実践的には粒子と環境自由度との相互作用効果を取り入れた量子力学的な定式化が必要になる。特にスピントロニクスで重要となるスピン緩和の記述には、伝導電子と環境自由度との散乱による運動量の揺らぎの効果を取り入れた定式化が採用される。

本研究では、環境として調和振動子の集まりであるCaldeira-Leggettモデルを採用し、それに新たにスピン自由度とSOCをもつ一粒子を結合させた系を研究対象とした。この系における一粒子換算密度演算子の時間発展はvon Neumann方程式によって記述される。これをスピン・コヒーレント状態を用いた経路積分表示によって定式化し、この注目する一粒子に関して、エネルギー散逸を伴う運動量とスピン角運動量を記述する準古典的運動方程式を導出した。これらの方程式を有効磁場によって書き換えるとスピン・トルク項を含む非線形微分方程式となり、これを従来の現象論的スピン緩和方程式と比較することで、エネルギー散逸に起因する新しいスピン緩和機構を含むことがわかった。更に、この方程式を数値的に解いた結果、初期条件およびSOCの大きさを調整することで、スピン角運動量の終状態をカオス的振る舞いから相当程度制御できることがわかった。また、このような一粒子のみを環境に導入した状況はフェルミ統計性をもつデバイス中の伝導電子系とは異なるが、近年発展している冷却原子多体系において実現可能であり、ここで採用した経路積分法や量子多体系における摂動論を用いることで冷却原子多体系を環境としたSOC(擬スピンによる)を伴う不純物原子のスピン・ダイナミクスを記述できることが示された。これらの結果から、本研究はエネルギー散逸とSOCを伴うスピン緩和現象の微視的記述にお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、学位申請者の畑知宏氏は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。なお、以上の研究成果は、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)としてまとめられている。