

目 次

第8号 2006年4月

研究ノート

- 人工量子系の物理：電子干渉計内におかれた人工原子のファノ効果 ……小林 研介… 3
銀の層状酸化物 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導 ……米澤 進吾…12
マシコヒゲムシ巨大ヘモグロビンの結晶構造 ……沼本 修孝, 三木 邦夫…20

サロン

- 「一家に1枚周期表」 ……寺嶋 孝仁…26

特集

- 低温物質科学研究センター 研究交流会 開催報告 ……矢持 秀起…30
—発表要旨集より — ……32

センターセミナー報告…55

センター紹介

- 京大吉田地区の液体ヘリウム供給情報管理システム ……新井 敏一, 松原 明…58
ナノ量子物性研究室 ……澤田 安樹, 福田 昭…64

運営委員会より

- 寒剤供給状況 吉田キャンパス・宇治キャンパス ……66
寒剤供給関係業務担当者, ヘリウムガス回収中継所責任者 ……68
各委員リスト, 協議員, 運営委員 ……69

投稿案内…72

編集後記…73

Low Temperature and Materials Sciences (Kyoto University)

Number 8, April 2006

Table of Contents

Research Reports

Quantum Hybrid Systems: Fano Effect through an Artificial Atom in an Electronic Interferometer	Kensuke Kobayashi... 3
Superconductivity in the Layered Silver Oxide AgSb_2O_6	Shingo Yonezawa...12
Structure of a giant hemoglobin from beard worm <i>Oligobranchia mashikoi</i>	Nobutaka Numoto and Kunio Miki...20

Salon

A Periodic Table of Elements for Every Family.....	Takahito Tarashima...26
--	-------------------------

Featuring Article

Report on LTM Center Exchange Meeting	Hideki Yamochi ...30
---	----------------------

LTM Center Seminars	55
----------------------------------	----

From the LTM Center

Information Management System for Liquid Helium Supply	Toshikazu Arai and Akira Matsubara...58
New Experimental Room of "Physics of Low Dimensional Quantum Systems" Group	Anju Sawada, Akira Fukuda and Kazuki Iwata...64

From Organizing Committee

Amounts of Cryogen Consumptions : Yoshida Campus and Uji Campus	66
Staffs contributing to Cryogen Supply and Responsible Persons for He Gas Recovery Stations	68
Member of the Committees : Steering Committee and organizing Committee	69

Call for Manuscripts	72
-----------------------------------	----

Editors' Note	73
----------------------------	----

人工量子系の物理：電子干渉計内におかれた人工原子のファノ効果

Quantum Hybrid Systems: Fano Effect through an Artificial Atom in an Electronic Interferometer

小林 研介

京都大学 化学研究所 材料機能化学研究系

Kensuke KOBAYASHI

Institute for Chemical Research, Kyoto University

1. はじめに

量子力学は、人類が原子や電子や光子を発見し、古典力学では理解できない不思議な現象を解明しようとする試みの中から生まれてきた。歴史をひもといてみると、量子力学が生まれた 19 世紀末から 20 世紀初頭の物理学はまさに霧の中を手探りで進むようなものであったことがよく分かる[1]。その当時の物語が今でも繰り返し語られるのは、量子力学誕生のドラマとそれに立ち会った科学者の道程が私たちの心をひきつけてやまないからであろう。そして、そのような悪戦苦闘の中で原子のエネルギー準位をうまく説明できたことは、産声を上げたばかりの量子力学にとって大きな成功であった。それ以降、量子力学は、核物理・原子物理・固体物理・宇宙物理などの物理学の諸分野だけではなく、化学や生物学に至るまでその適用範囲を着々と広げ、いまや自然を理解するためには無くてはならない手段となっている。

そして現在、物理の世界では新しい潮流が生まれつつある。それは、自然を理解するための手段としての量子力学というよりもむしろ、人工的に量子系を作り出し、その制御を目指す研究である[2]。代表例として量子コンピュータの研究を挙げることができる。私たちの身のまわりにある普通のコンピュータは、0 か 1 かで記述される演算単位に基づいて計算が行われる。それに対し、0 と 1 という二つの状態間の量子力学的な重ね合わせを用いて演算を行うのが量子コンピュータである。演算を量子力学的に行うことによって、ある種の問題に対しては、普通のコンピュータに比べて圧倒的に早い実行速度が得られる。量子コンピュータの概念そのものは、20 年ほど前に提案されたが、その当時はただの夢物語とされていた。「0 と 1 の量子力学的な重ね合わせ」のようなものをどのように人工的に実現するのか、そしてどのように制御すればよいのか、皆、見当もつかなかったのである。しかし、ここ数年その基本素子が色々な系で作られるようになってきた。また、別の代表例として、量子情報通信の研究がある。この技術を用いると、量子力学によって安全が保証された盗聴不可能な通信網を作ることができる。こう聞くと、本当にそんなものが実現できるのかと思われるかもしれないが、この技術はすでに実用をめざした実験段階にある。

このような人工量子系の研究が盛んになってきた背景には、近年の微細加工技術の発展がある。人工量子系の多くは、半導体や金属薄膜を微細加工して作られる数 nm ~ 数 μm のサイズの極小の電子回路である。しかし、それらはいくつかの外部パラメータによって制御できるようにデザインされており、小さな実験室と呼ぶにふさわしい系である。このような系を用いることによって、電子の電荷、

スピン、位相情報、電子間相互作用など、多彩な量子効果を人間の手によって自在に制御することが可能となってきたのである[3]。

本稿では、人工量子系の研究の一端として、人工原子（量子ドット）と電子干渉計（アハラノフ・ボームリング）を組み合わせた系を舞台として行った我々の実験を紹介したい。この実験は物質の波動・粒子二重性という量子力学の基本原則に関わるものでもある。

2. 人工原子

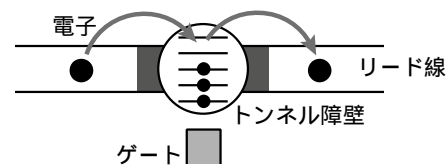
最初に、人工原子（量子ドット）について簡単に紹介したい。量子ドットとは電子が電荷 e を持つ粒子であるという粒子性に基づく系であり、その本質は単電子効果と閉じ込め効果の二つにある。なんだか難しそうに聞こえるかもしれないが、その仕組みは次に述べるように、それぞれ高校レベルあるいは大学初年度レベルの物理で理解できるものである。

単電子効果から説明する。図 1(a)のように、電子を小さな領域（以下、ドットと呼ぶ）に閉じ込めたとする。ドットはトンネル障壁を介して外部とリード線とつながっている。障壁が高すぎなければ、熱的に励起した電子がドットとリード線との間をトンネルできる。また、ドットの脇には、ゲート電極が取り付けられており、これは静電的にドットと結合している。いま、ドットに電子が N 個入っているとしよう。また、ドットとリード線やゲート電極を含む周囲との間の静電容量を C としよう。ドットはコンデンサーのようなものであり、ここに余分な電子を一個付け加えるためには e^2/C だけの静電エネルギーが必要となる。通常、マクロな系では C が大きいので、このようなエネルギーはあまりに小さすぎて問題にならない。しかし、 C が十分に小さく、ドットが十分低温にある場合、 e^2/C が系の温度を上回るような状況が生み出される。すると、ドットとリード線との間に電子のトンネルが起きず、ドット内の電子数は固定されてしまう。これをクーロン閉塞状態と呼ぶ。また、この状態でゲート電極に電圧を印加すると、ゲートや近傍のリード線を含むドット系全体の静電エネルギーが、電子が N 個の場合と $N+1$ 個の場合とで等しくなるように調整できる。この時、ドット内の電子数は N と $N+1$ の間を揺らぐことが可能となり、リード線にいた電子はこれを利用してドットを通過できるようになる。

この現象が単電子効果あるいは単電子トンネリングと呼ばれるもので、微小な金属粒などで観測されている。高校物理の言葉でいえば、コンデンサー（＝電荷を蓄える回路部品）をどんどん小さくした結果、一電子あたりの帯電エネルギー e^2/C がとてつもなく大きくなり、電子が自由に移動できなくなったものだと思えばよい。

電子密度の小さい半導体量子ドット（半導体界面に形成される二次元電子系を加工して作られたド

(a) 量子ドット



(b)

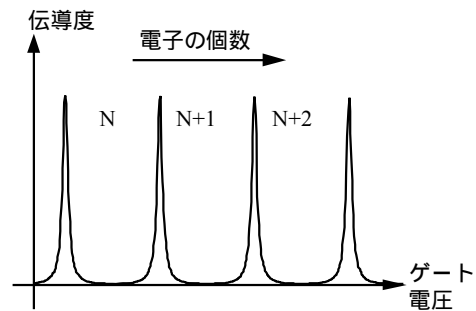


図 1(a) 量子ドット。電子を極めて小さい領域に閉じ込め、トンネル障壁（図の黒い部分）を介してリード線とつなげることで量子ドットを作ることが出来る。単電子効果と閉じ込め効果によって、ドット内の電子数は固定される。ただし、ゲート電圧によって電子数を制御することもでき、ゲート電圧の掃引によって量子ドットの伝導度は(b)のようにクーロン振動を起す。

ット)では、さらに閉じ込め効果も重要になってくる。量子力学や量子化学を少し習うと「箱型モデル」というものが出てくるが、まさにそれである。すなわち、電子を小さいドットに閉じ込めることによってドット内のエネルギー準位が離散化する。そして、その間隔が温度のエネルギーを上回るために、電子のトンネルがただ一つの離散準位を介して行われることになる。この状況は、原子に導線をつなぎ、特定の原子軌道のみを通過する伝導現象を観測することに他ならない。

以上の現象は、実験では図 1(b)のように観測される。ゲート電圧を変化させると、単電子トンネルが起こるようなゲート電圧のところでスパイク的な伝導度のピークが見られる。ピークとピークの間がクーロン閉塞状態である。ドット内の電子数は一個ずつ変化していくので、全体としてはピークがほぼ周期的に連なったような伝導度特性(クーロン振動)が得られる。半導体量子ドットの典型的な大きさは 100 nm 程度であり、クーロン振動が観測されるのは 1 K 以下である。

量子ドットは人工量子系の代表選手であり 1990 年代初頭から多くの研究が蓄積されている。例えば、量子ドットのエネルギー準位に殻構造が現れたり、電子の充填の仕方にフント則が現れたりするなど、原子物理でよく知られた現象が起こることが知られている。しかし、天然の原子とは異なり、量子ドットは数桁も大きいサイズ(数百 nm)を持つ系であるため、関与するエネルギースケールは天然原子のものよりもずっと小さくなる(典型的には meV 以下)。したがって、静電的あるいは磁氣的に原子軌道やスピン状態を変化させたり、系を非平衡状態において原子準位の励起スペクトルを測定したりすることなど、天然の原子では簡単には出来ないような制御性の高い実験を行うことができる。例えば、電子をただ一個だけ含む人工水素原子を作ったり、二つの量子ドットを組み合わせる人工分子を作ったりすることなども盛んに行われている。さらに、近年、近藤効果などの多電子間相互作用の制御を可能とする系として、あるいは高い将来性を持つ量子コンピュータの基本素子として、量子ドットはますます大きな注目を集めている[3,4]。

3. 電子干渉計

人工量子系の別の代表例に、アハラノフ・ボームリング(AB リング)という電子干渉計がある。図 2 (a)のようなリング状の伝導体を考える。リング全体に渡って電子の干渉性が保たれるとき、その電気伝導度は図 2 (b) のようにリングを貫く磁場に関して周期的に変動する。これが AB 効果であり、電子の波動性が劇的に現れる例の一つである。振動(AB 振動)が起きる理由は、電子波がリングの上側を通る場合と下側を通る場合とで、リングを貫く磁場の大きさに応じて異なる位相の変化をうけるためである。光の波動性を明らかにした実験にヤングの二重スリットの実験があるが、AB リングはその電子版である。しかし、巨視的なスケールで干渉効果が起きる光の場合とはちがひ、導体中で電子の干渉性が保たれるにはかなり厳しい条件が必要である。典型的な AB リングの直径は

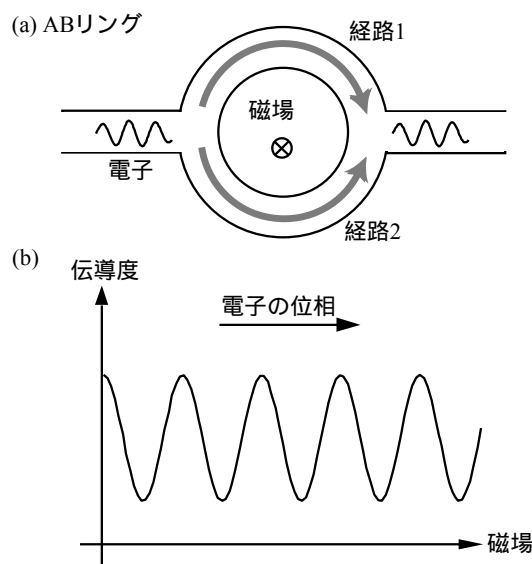


図 2 (a) AB リング。左から入射した電子は矢印の経路を通り右へ通り抜ける。このとき、それぞれの経路を通る電子は、リングを貫く磁場に応じて異なる位相を得るため伝導度は磁場の掃引に対して図(b)のように AB 振動を起こす。

1 μm , 幅は 0.1 μm , 温度は 100 mK 程度である . AB リングは 1980 年代に実現され , 人工量子系研究の先駆けとなったものであるが[5] , いまやハンバリー・ブラウン・トアイス干渉計やマッハ・ツェンダ干渉計など , 量子光学ではおなじみの干渉計の電子版が次々と実現されている[6] .

4. 二つを組み合わせると...

ここまで見てきたように , 量子ドットと AB リングは , それぞれ電子の粒子性と波動性を明瞭に示す特色ある人工量子系であることがわかる . それでは , 次にこの二つを組み合わせた AB リング・量子ドット複合系を考えてみよう . 図 3(a)のように AB リングの下側に量子ドットを埋め込んだとする . 電子は , リングの下側を通過する際には電荷 e を持った粒子として単電子トンネリングするはずである . このとき果たして電子の波としての性質は現れるのだろうか ?

実験は図 3 (b)のようなサンプルを用いて行った[7] . これは半導体ヘテロ界面 (AlGaAs/GaAs) 上の二次元電子系を電子ビームリソグラフィーと化学エッチングを用いて , リング状に削りだし , その後 , 金属電極 (白色) を蒸着したものである . 6 本の電極は図の上と下で 3 本ずつ組になっており , それぞれの箇所で量子ドットを作ることができるようになっているが , 今回ご紹介するのは図 3 (a) のように下側のみ量子ドット状態にして実験した結果である . 上側の量子ドットの無い方 (以後 , 便宜上「アーム」と呼ぶ) は , 電極 C に負の電圧 (V_C) をかけることによって , 遮断したり開いたり出来るようになっている . 下側の 3 本のうち 2 本 (R と L) は , 二次元電子系を区切ることで量子ドットを形

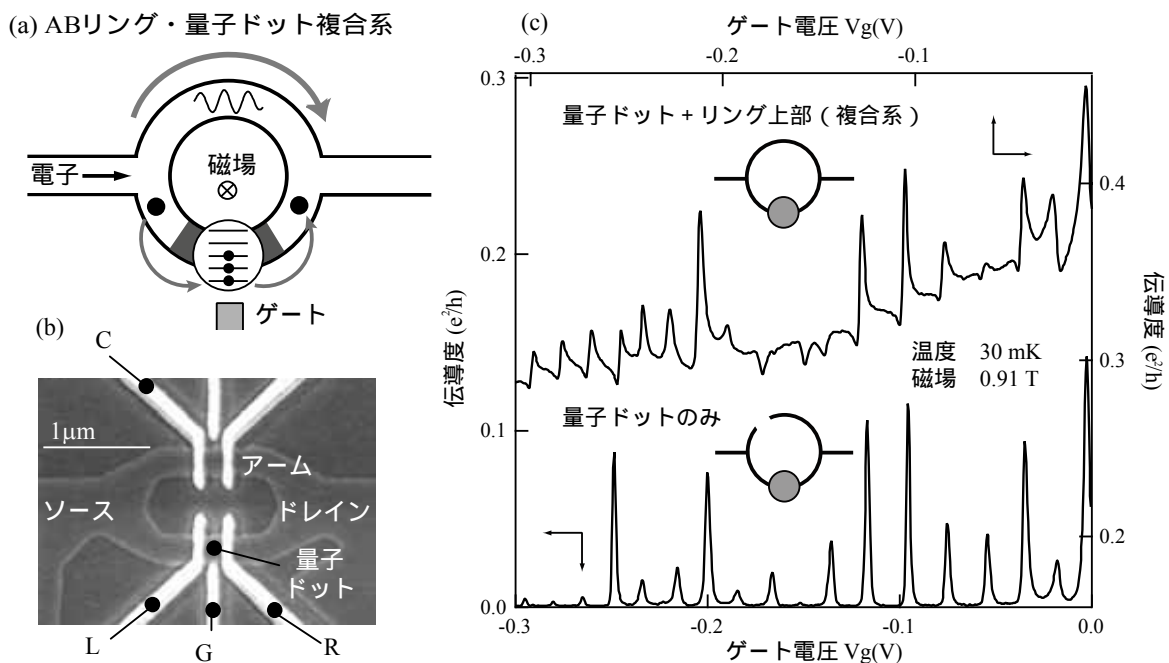


図 3 (a) AB リングと量子ドットの複合系 . 電子は量子ドットを通過する際には , 単電子トンネリングする必要がある . (b) サンプルの走査型電子顕微鏡写真 . AlGaAs/GaAs 二次元電子系上につくられている . (c) AB リング・量子ドット複合系の伝導度 (温度 30 mK , 磁場 0.91 T) . 下のデータは , リング上部の伝導を禁止し , 電子が量子ドットのみを通過するようにしたもので , 通常のクーロン振動である . ピーク間隔に若干の不規則性があるが , これはドット内離散準位の間隔の不規則性を反映している . 上のデータは量子ドットもリング上部も同時に通過できるようにした際の伝導度 . 上下の伝導度のピーク位置などはある程度対応しているが上のデータは非対称な特徴的なピーク構造を示す . この形状はファノの式で良く説明される .

成するための電極で、適当な負電圧をかけるとトンネルバリアを作ることができる。真ん中の一本(G)は量子ドットのポテンシャルを静電的に外部から制御するゲート電極である。このドットの場合、含まれる電子数は80個程度と見積もられる。測定は、30 mK から 800 mKの間で行った。

まず、電極Cに負の電圧をかけて上側の経路を遮断しておき、電子が下側の量子ドットだけを通れるような状況を考えてみよう。このときの伝導度は図3(c)の下側のデータに示すような典型的なクーロン振動になっている。ピークの間は電子数固定であり、伝導度は完全にゼロである。ピーク間隔に若干の不規則性があるが、これは単電子帯電エネルギーに量子閉じ込めのエネルギーが加算されるため、電子がドット内の一つの準位を通過していることを表している。次に、リングの上側も電子が通れるようにしてみよう(図3(c)上)。このとき複合系全体の伝導度はもちろん増加するが、それだけでなくクーロン振動のピークが非対称な形になり、一方に裾を引いた特徴的な形になる。もともとピークだったものが完全にディップになってしまう場所さえある($V_g \sim -0.16$ V付近)。それでも、クーロン振動の場所自体は上下のデータで良い一対一対応をしていることから、上側を電子が通過できるようにしたことによって量子ドット自体の性質が大きく変わったわけではないことが分かる。

5. ファノ効果

温度変化や電流電圧特性などの測定を行った結果、この特徴的なラインシェープの起源が、分光学では良く知られているファノ効果であることが分かった。ファノ効果とは、1935年に発見された原子スペクトルの非対称なピーク[8]を説明するために、1961年にファノ(U. Fano, 1912-2001)が定式化したものである[9]。発見者ポイトラー(Beutler)にちなんでポイトラー・ファノ効果と呼ばれることもある。

原子に光を照射した場合を例にとって考えてみよう。図4(a)のように、光のエネルギーを少しずつ変化させながら、原子のスペクトル(入射状態から散乱状態への遷移確率)を測定したとする。原

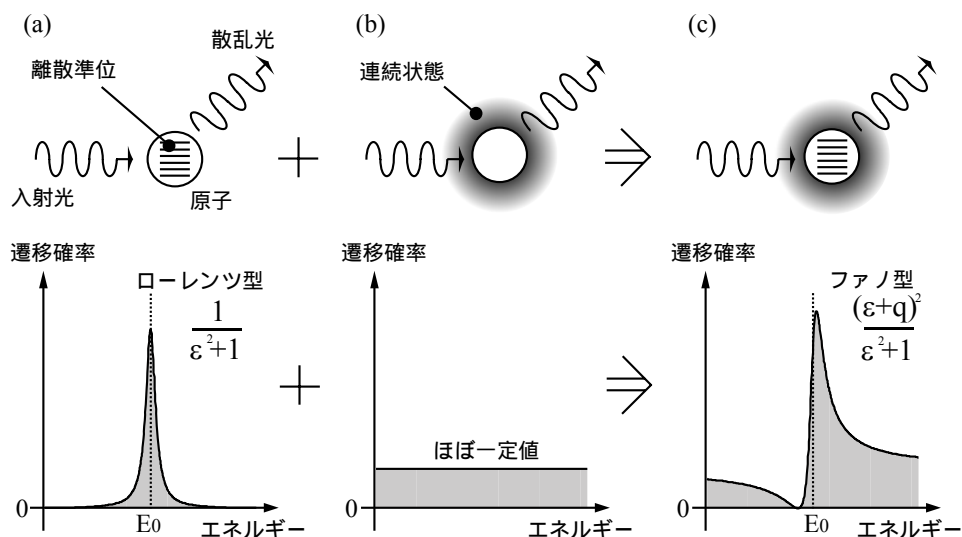


図4(a) 原子に光が入射し散乱される様子。下図のように、原子内部の離散準位の位置(エネルギー E_0)にローレンツ型のピークがスペクトルに現れる。原子には複数の離散準位があるが、ここではそのうち一つだけを考えている。(b) 光が連続状態を介して散乱される様子。下図のように、スペクトルは光のエネルギーが変わってもほとんど変化しない。(c) 離散状態と連続状態を持つ系によって光が散乱される様子。この過程は、(a)と(b)が同時に起こる場合であるが、スペクトルは下図のように E_0 付近で非対称になる。これが(a)と(b)の単純な足し算ではないことに注意。この形状はファノの式 $(\epsilon+q)^2/(\epsilon^2+1)$ で表される。

子は離散準位を持っているので、エネルギーが準位 E_0 を横切るところで遷移確率はピークとなり、その形状は図 4 (a)下のように対称なローレンツ型になる。しかし、このような離散準位を介した過程とは別に、図 4 (b)のように連続状態を通過するような別の遷移（ポテンシャル散乱など）が共存している場合もある。このとき、得られる遷移確率が(a)と(b)の単純な足し算にはならず、図 4 (c)のようになる、というのがファノ効果である。御覧のように、図 4 (c)はピーク形状が左右非対称である上に、スペクトルが E_0 近傍のある一点で 0 になってしまう、という予想外の現象が起こる。これは足し算が単なる和ではなく、「量子力学的な」足し算になっていることに起因する。つまり、図 4 (a)と(b)のような過程が両方同時に起こると、どちらの経路を通ったかは量子力学的に区別がつかない。そのため、二つの遷移過程が干渉し、遷移確率がピークの左右で強めあったり弱めあったりする。この状況は、二つの異なる配置（＝経路）の間の相互作用（＝干渉）であるから、分光学では配置間相互作用と呼ぶ。その結果、図 4 (c)のような形状となるのである。この形状を式で書くと、 $(\varepsilon+q)^2/(\varepsilon^2+1)$ となる。ここで、 ε は規格化されたエネルギーで、その中身は $\varepsilon=(E-E_0)/(\Gamma/2)$ (E はエネルギー、 E_0 は離散準位のエネルギー位置、 Γ は離散準位の幅)である。 q はファノの非対称性パラメータと呼ばれ、配置間相互作用の強さの指標となる。

余談になるが、ファノは、フェルミ (Fermi) とハイゼンベルグ (Heisenberg) の弟子である。彼はまた、原子物理で知られるラカー係数で著名なラカー (Racah) と従兄弟同士でもあった。ちなみにボイトラーは、水素の原子スペクトルで有名なパッシェン (Paschen) の弟子であった。いずれも量子力学誕生の頃に思いを馳せたくなるような名前である[10]。

6. 制御可能なファノ効果

先ほども書いたとおり、ファノ効果自体は、分光学においては極めて有名な現象である。たとえば、ラマン散乱、光電子放出、原子の光電離、光吸収、中性子散乱などで知られている。我々の結果は、もともとは原子分光で確立されたファノ効果が、人工原子系でも観測されるようになったという点にまず意義がある。しかし、このような系を人工量子系で実現することには、系が制御可能である点で、これまでにない利点がある。実際、例えば、連続状態を結合したり切り離したり出来る点（図 3 (c)）や、昇温によって系の干渉性（コヒーレンス）が減少しファノ効果が消失すること等が観測されている。

最もユニークな点は、離散準位と連続状態が空間的に分離しており両者の位相差を制御できる点にある。図 5 (a)に我々の系の電気伝導度の磁場依存性の結果（三次元プロット）を示す。高さは伝導度、一方の横軸は磁場、他方はゲート電圧である。この図は、ゲート電圧を固定して磁場を掃引すると AB 振動が現れ、逆に磁場を固定してゲート電圧を掃引するとクーロン振動が現れることを示している。ただし、クーロン振動は、ファノ効果を反映した非対称な形状となっている。AB 振動の大きさは、クーロン振動の大きさと同程度であり、電子がほとんど干渉性を失うことなく量子ドットを通過していることが分かる。磁場は電子波の位相、つまり電子の波動性を制御し、ゲート電圧は量子ドット内の電子数、つまり電子の粒子性を制御するものである。この意味で、図 5 (a)はファノ効果を仲立ちとして電子の二重性が現れたものである、と言ってよいだろう。

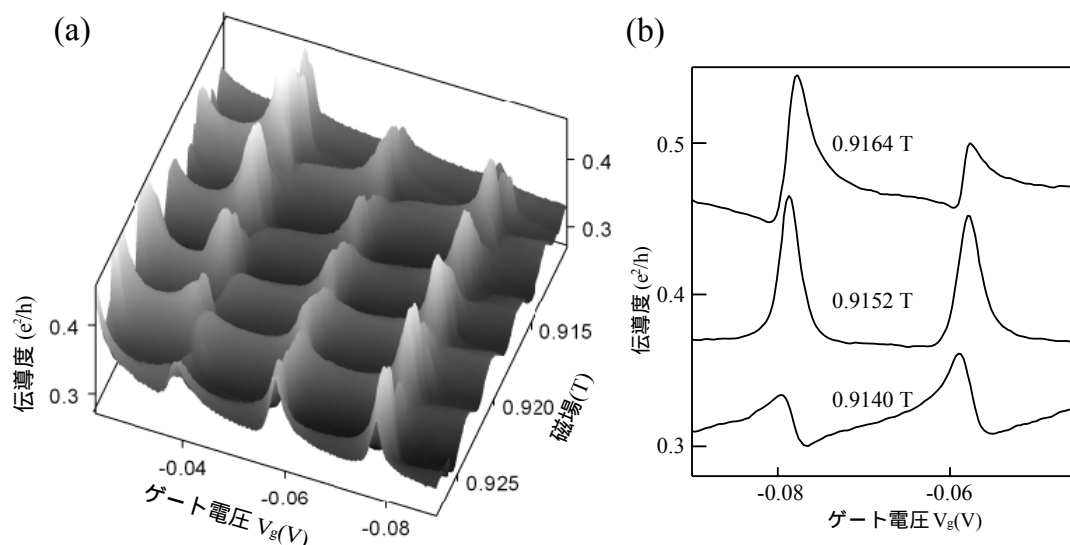


図5 (a) ゲート電圧（ドット内の電子数）と磁場（電子の位相）に対して伝導度をプロットしたもの．磁場を固定してゲート電圧を掃引すれば，非対称なクーロン振動が得られ，逆にゲート電圧を固定して磁場を掃引すれば，AB 振動が得られる．これは電子の波動・粒子二重性のあらわれである．(b) 特定の磁場に対するクーロン振動をプロットしたもの．データは見やすいように上方向にずらしてある．わずかな磁場変化で裾の向きが変わることと，中間の磁場で対称なピーク形状になっていることが分かる．

図5 (a)を見ると，クーロン振動のピーク間のクーロン閉塞領域においても，AB 振動がはっきりと見えていることが分かる．これは興味深い点である．というのも，AB 効果は電子が両方の経路を通ってはじめて生じるものであるから，この現象は，クーロン閉塞領域にある量子ドットを電子が“通過”していることを意味しているからである．ファノ効果によって，リングの上側の連続状態に助けられる形で，量子ドット内の離散準位が系全体に広がったのである．言い換えれば，量子ドット内の局在状態とアームの連続状態とがコヒーレントに重ね合わされた量子状態（ファノ状態）が実現している．これは固体物理における s - d 模型における仮想束縛状態と見ることもできる．先ほどファノ効果の原因は配置間相互作用であると言いたけれども，固体物理の観点からはこのような見方も可能である．このことは，ファノ効果の普遍性の表れであると言えるだろう．

ここまで触れなかったが，量子ドットを AB リングに埋め込む，という実験は，我々の実験が初めてではない．1995 年にヤコビ（Yacoby）らが行った実験[11]を皮切りとして現在まで何例か報告がある．ただ，それらの実験の目的はあくまでも量子ドットにあり，ドットを通過する電子の位相変化を，AB 効果をプローブとして検出する，というものであった．観測される AB 振動の大きさもファノ効果がはっきりと現れるほど大きくはなかった．それに対し，我々の実験では，電子は量子ドットを通過しても干渉性をほとんど失うことが無いため，上記のような特異な伝導特性が得られた．その点で，我々の系は，単なる AB リングでもなければ，量子ドットでもない，その両者の量子力学的な結合系として初めて理解されるような新しい人工量子複合系である（ただし，どのような状況ならば干渉性を保持するのかという問題も依然重要である[12]．）

磁場依存性の結果は，ファノ効果についての新しい知見を与えてくれる．図5 (b)に示すように，磁場が変化すると，裾の引き方が逆になるのである．しかも，その途中で全く対称なラインシェープになる．この現象の本質はAB効果にあり，離散状態を通る経路と連続状態を通る経路の間に入ってい

る磁場が両者の位相差を変化させることによる．ここでは詳細は省くけれども，この現象を統一的に理解しようとするれば，ファノの非対称性のパラメータ q は，実数ではなく，複素数に拡張しなければならないことがわかる．その偏角は磁場の関数であり，二つの経路の位相差を反映している．ファノの式も $|\varepsilon+q|^2/(\varepsilon^2+1)$ と拡張される．このことはファノの理論と矛盾するものではないが，分光学において q は長らく実数として扱われてきたことを考えると，新しい知見であり，今後，他の分光学的手法によって検証されるであろう．一般に，系に時間反転対称性が無く，波動関数を実数にとれない場合は非対称性パラメータ q を複素数として扱う必要があることを示すことが出来る．

7. その後の展開

先に述べたようにファノ効果は分光学においては何十年もの歴史がある．しかし，電気伝導現象においてその重要性が理論的に認識され始めたのは，意外なことに 1990 年代半ば以降であり[13]，我々の実験は，その効果を初めて明瞭に実現したものである．その後の我々の実験により，単一の量子ドットにおけるファノ効果[14]，量子細線 - 量子ドット複合系におけるファノ効果[15]，ファノ効果と近藤効果の共存[16]など，様々な人工量子系でファノ効果が出現することが分かった．また，半導体量子ドットに限らず，カーボンナノチューブにおけるファノ効果についても複数のグループから報告されている[17]．ファノ効果を観測することによって，人工量子系の中を伝播する電子の位相情報やコヒーレンスの度合いを定量的に知ることが出来る．理論面での進展としては，ファノ効果と量子カオスとの関係[18]や，ファノ効果から見た電子波の位相発展の問題などに注目が集まっている．このように，ファノ効果は電気伝導現象の多くの局面に顔をだす現象として，いまや広く認知されるようになった．さらに複素数としての非対称性パラメータ q についても，最近になって分光学の分野から報告があった[19]．今後の展開が楽しみである．

8. まとめ

人工量子系の研究には多くの可能性が秘められている．最もシンプルで古くから研究されてきた量子ドットと AB 干渉計を組み合わせた系でさえ，特異な伝導現象を示すことがわかった．ここでは，残念ながら我々の研究の一部しか紹介できなかったが，人工量子系の研究は現代の物理学における一大潮流となりつつあり，その裾野は基礎から応用まで大きく広がっている．その雰囲気をも本稿から少しでも感じ取っていただければ幸いである．実験家にとって何よりもわくわくさせられることは，これまで机上の空論と思われていた思考実験でも，最新の技術を用いることによって実験的に検証可能になってきた，ということである．確かにそのような実験は簡単ではない．しかし，量子力学黎明期の先人の苦闘に思いを馳せるとき，その当時は夢にも思わなかったような実験が今や可能である，という事実の重みと魅力は圧倒的でさえある．

謝辞

本研究は，私が東京大学物性研究所在職中に，勝本信吾，家泰弘（物性研教授），相川恒，佐藤政寛，佐野徹之（院生，当時）の各氏と行った共同研究である．ここに感謝したい．

参考文献

- [1] 例えば，江沢洋，量子力学 誕生から基礎の再反省まで，「20 世紀の物理学」，江沢洋編著，サイエンス社 62 -69 (1998)．

- [2] 上田正仁, 現代量子物理学 基礎と応用 (培風館, 2004) はこのような視点に立って生き生きと書かれた素晴らしい教科書である.
- [3] 解説として, 川畑有郷, メゾスコピック系の物理学 (培風館, 1997); 三浦登, 安藤恒也, 樽茶清悟, 河原林透 (編), 量子輸送現象における新展開, 「固体物理」特集号 (アグネ技術センター, 1999); メゾスコピック物理への招待, 「パリティ」特集号 (丸善, 2000).
- [4] 例えば, 藤澤利正, 林稔晶, 固体物理 **38**, 817 (2003). また, 量子ドットの可能性を論じた最新の研究として Hans-Andreas Engel and Daniel Loss, Science **309**, 586 (2005).
- [5] R. A. Webb, S. Washburn, C. Umbach, and R. Laibowitz, Phys. Rev. Lett. **54**, 2696 (1985).
- [6] W. D. Oliver, J. Kim, R. C. Liu, and Y. Yamamoto, Science **284**, 299 (1999); M. Henny, S. Oberholzer, C. Strunk, T. Heinzel, K. Ensslin, M. Holland, and C. Schönenberger, Science **284**, 296 (1999); Y. Ji, Y. Chung, D. Sprinzak, M. Heiblum, D. Mahalu, and H. Shtrikman, Nature **422**, 415 (2003).
- [7] K. Kobayashi, H. Aikawa, S. Katsumoto, and Y. Iye, Phys. Rev. Lett. **88**, 256806 (2002); Phys. Rev. B **68**, 235304 (2003); 小林研介, 相川恒, 勝本信吾, 家泰弘, 固体物理 **38**, 29 (2003).
- [8] H. Beutler, Z. Phys. **93**, 177 (1935); U. Fano, Nuovo Cimento **12**, 156 (1935).
- [9] U. Fano, Phys. Rev. **124**, 1866 (1961). ちなみにこの論文はこれまでに4500回以上も引用された物理の古典的論文の一つである.
- [10] C. W. Clark, Nature **410**, 164 (2001); 渡辺信一, 日本物理学会誌 **56**, 533 (2001); 佐々木泰三, 日本放射光学学会誌 **14**, 149 (2001).
- [11] A. Yacoby, M. Heiblum, D. Mahalu, and H. Shtrikman, Phys. Rev. Lett. **74**, 4047 (1995).
- [12] H. Aikawa, K. Kobayashi, A. Sano, S. Katsumoto, and Y. Iye, Phys. Rev. Lett. **92**, 176802 (2004); 相川恒, 小林研介, 佐野徹之, 勝本信吾, 家泰弘, 固体物理 **38**, 745 (2003).
- [13] J. U. Nöckel and A. D. Stone, Phys. Rev. B **50**, 17415 (1994).
- [14] H. Aikawa, K. Kobayashi, A. Sano, S. Katsumoto, and Y. Iye, J. Phys. Soc. Jpn. **73**, L3235 (2004); 相川恒, 小林研介, 中西毅, 日本物理学会誌 **59**, 682 (2004).
- [15] K. Kobayashi, H. Aikawa, A. Sano, S. Katsumoto, and Y. Iye, Phys. Rev. B **70**, 035319 (2004).
- [16] M. Sato, H. Aikawa, K. Kobayashi, S. Katsumoto, and Y. Iye, Phys. Rev. Lett. **95**, 066801 (2005).
- [17] 例えば, J. Kim, J.-R. Kim, J.-O. Lee, J. W. Park, H. M. So, N. Kim, K. Kang, K.-H. Yoo, and J.-J. Kim, Phys. Rev. Lett. **90**, 166403 (2003).
- [18] 例えば, V. Uski, F. Mota-Furtado, and P. F. O'Mahony, J. Phys. A: Math. Gen. **38**, 10819 (2005); U. Kuhl, H.-J. Stöckmann and R. Weaver, J. Phys. A: Math. Gen. **38**, 10433 (2005).
- [19] O. V. Misochko, M. Hase, K. Ishioka, and M. K, JETP Lett. **82**, 426 (2005).

銀の層状酸化物 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導

Superconductivity in the Layered Silver Oxide $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$

米澤進吾

京都大学大学院理学研究科

Shingo Yonezawa

Graduate School of Science, Kyoto University

1. はじめに

金属酸化物の超伝導体はこの 20 年間、非常に精力的に研究されている。このような地位を決定的にしたのは、言うまでもなく 1986 年の銅酸化物高温超伝導の発見[1]である。近年盛んに研究されている例としては、スピン 3 重項超伝導体 Sr_2RuO_4 [2]、水分子を含むコバルト酸化物 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ [3]、 β パイロクロア構造を持つオスミウム酸化物 AOs_2O_6 ($A = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$)[4]などが筆頭として挙げられるだろう。なお、ここに挙げた 3 種の酸化物の超伝導はみな日本で発見されたということを注記しておきたい。酸化物超伝導の研究は間違いなく日本が世界をリードする研究分野である。

このような日本発の酸化物超伝導体の仲間のうち、最近固体量子物性研究室で我々が発見した転移温度 $T_c = 52 \text{ mK}$ の銀鉛酸化物 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ について紹介させていただく[5,6]。

これまでに見つかっていた銀の超伝導体は 1966 年に発表された Ag_7O_8X ($X = \text{NO}_3, \text{HF}_2$, etc.; $T_c = 1 \text{ K}$ ($X = \text{NO}_3$)) [7]という一群の物質のみで、それ以外の銀酸化物の超伝導体は報告されていなかった。従って $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ は約 40 年ぶりに見つけた銀酸化物超伝導体ということになる。

銀は元素周期表で銅の真下に位置する。これは銀と銅では電子的な性質がよく似ているということの意味している。したがって、「銀の酸化物の超伝導体は銅酸化物高温超伝導体と同じように高い T_c や特異な超伝導状態を持つのではないか」という期待がされる。 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ について、研究当初は我々もそのようなモチベーションを持っていた。しかし、最近の研究結果はむしろこの物質が高温超伝導体の正反対に位置するような超伝導体であることを示唆している。ある意味では、時代遅れどころか時代の流行に完全に逆らっているような超伝導体であるが、興味深い点は数多く挙げることができる。

本稿では、 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導および常伝導状態の研究について紹介する。なお、本研究は私の卒業研究（理学部物理系・課題研究Q4）からスタートした研究である。研究室として初めて取り組む物質である上に一筋縄でいかない部分も多くあって苦労した点も多かった。そのあたりの裏話も絡めつつ、この物質の研究の面白さを伝えられればと思っている。なるべく学部生の方にもわかるように心がけて書いたつもりであるが、わかりにくい点や逆に表現が冗長な点などのご容赦いただきたい。

2. 銀酸化物 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ —構造と結晶育成—

まずは、 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ という物質について、簡単に紹介したい。この物質は他に例のない結晶構造をもっている。図 1(a)に示す結晶構造はやや複雑だが、3 つの部分構造に分けて考えると考えやすい。まず、1 つ目は Ag イオンからなるカゴメ格子の層である。カゴメ格子とはイスラエルの国旗にあるよう

な模様を並べたもので、日本語の籠目が語源である。2 目目はPbとOが八面体を組み、その八面体が蜂の巣状に並んだ層である。これら 2 つの層が交互に積み重なり、3 目目の部分構造である銀の一次元鎖が層を垂直に貫いている[8]。

このように複雑な構造を持つ酸化物であるが、合成するのは比較的簡単で、硝酸銀と硝酸鉛を混ぜ合わせて 400 程度に加熱するだけで単結晶が得られる。硝酸塩を使う方法は Abe らによって初めて報告された[9]。この方法は、簡単でしかも単結晶が得られるという点で非常に画期的だった。これ以前は酸化銀と酸化鉛を高圧・高温化で合成するという難しい方法しかなく、しかも粉末試料しか得られなかった。

硝酸塩を使うと、硝酸イオンの酸化力によって比較的容易に $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ が合成できるようなのである[9]。また、硝酸銀が 212 で融解するため反応は液相中での反応になる。このために単結晶ができやすくなっているように思われる。実際に硝酸銀の量を多くすると、結晶が成長する際に互いにくっつきにくくなるため図 1(b,c)のような形のよい単結晶が得やすくなる[5]。

3．超伝導の発見

$\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導転移温度 (T_c) はわずか 52 mK で (高温超伝導体の 1000 分の 1 以下！)、知られている酸化物超伝導体としては最も低い T_c の部類に入るだろう。そして超伝導臨界磁場 (H_c) も絶対

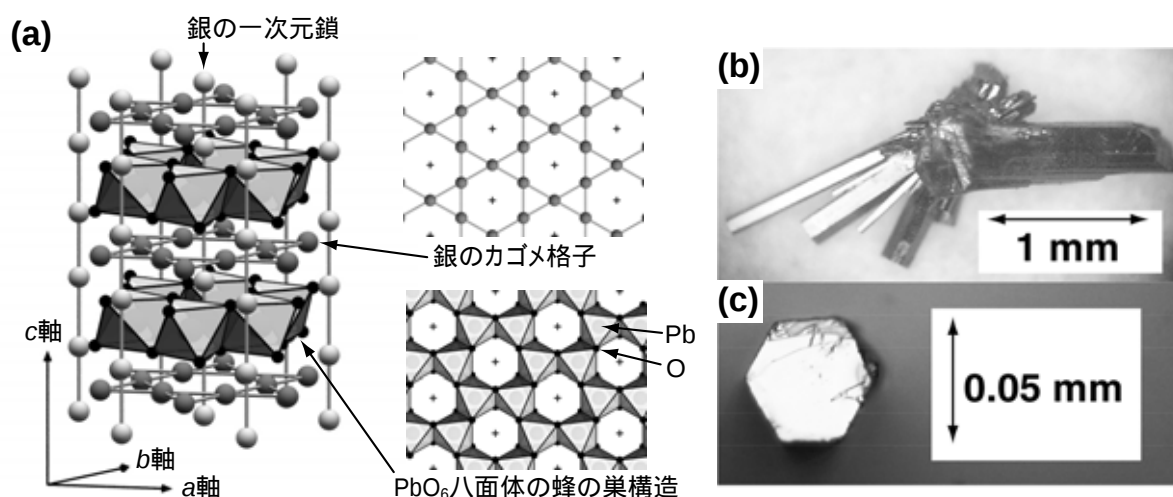


図 1(a) $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の結晶構造。結晶構造は、銀のカゴメ格子・ PbO_6 八面体の蜂の巣構造・銀の一次元鎖の 3 つの部分構造から理解できる。銀の鎖はカゴメ格子と蜂の巣構造の図の + の印の部分に垂直に貫いている。(b) $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の単結晶の集合体の光学顕微鏡写真。結晶はc軸方向に長い六角柱の形をしている。(c) c軸方向から見た断面の写真。

零度への外挿でも 2.2 Oe と非常に小さい。地磁気の大きさが約 0.5 Oeであることを考えると、その小ささがよく分かる。

このように超伝導が温度・磁場ともが非常に小さい領域のみで見られなかったため、超伝導の発見には大きな苦労を要した。初めて超伝導を示唆する交流帯磁率の変化が得られたのは、ふと思いついて、通常とは逆の方向に磁場をゆっくりかけてみたときであった。磁場を -3 Oe 程度かけたときに図 2(a)のように大きなシグナルが出ていて、初めはノイズではないかと疑っていたのを覚えている。なぜ磁場をかけないと超伝導が見えなかったのか。それは実験に使う超伝導マグネット内には最低でも数 Oe の残留磁場があり、それをキャンセルしてやらないと超伝導が壊れてしまうからであった。こ

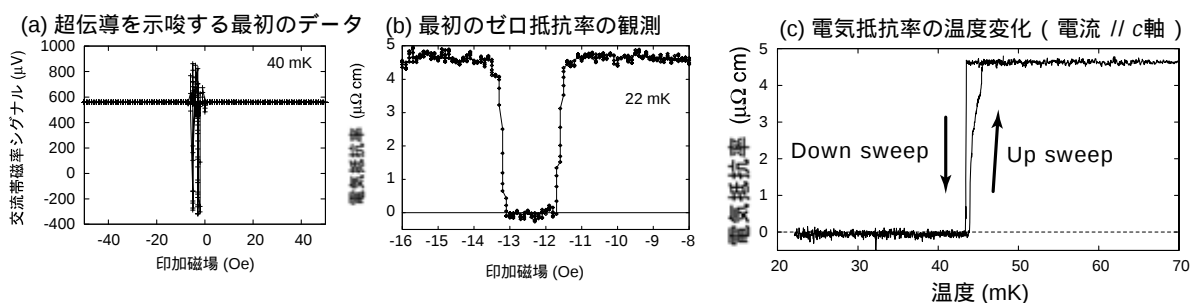


図 2: $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導を示すデータ。(a) 2004 年 2 月に得られた、超伝導を示唆する最初のデータ (交流帯磁率)。ゼロ磁場では何も変化が見えず、磁場をマイナス方向にかけたときに初めて観測できた。磁場スイープが速すぎたのと交流磁場が大きすぎたため、初めはノイズのように見えた。(b) 2004 年 8 月、初めてゼロ抵抗率の観測に成功した際のデータ。(c) できるだけ残留磁場をキャンセルしたときの電気抵抗率の温度変化。超伝導転移にヒステリシスが見られるのは、残留磁場や地磁気のために超伝導転移が一次相転移になっているからである。

いうことは、後で考えると至極当たり前のことなのだが、当時は残留磁場が超伝導を完全に壊してしまうという可能性には考えが及んでいなかった。

また、交流帯磁率のシグナルを発見した後も、ゼロ電気抵抗の観測までに大きな苦労があった。抵抗測定には端子付けが必要で、我々はよく銀の導電性ペーストを使用している。しかしこのペーストの溶剤が $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ と反応して結晶表面を絶縁体にしてしまうため、この物質には使えなかった。そのため超音波ハンダという特殊なハンダ付け法や金属ガリウムをハンダとして使う方法をとらなければならない。これらは非常に難しい方法で、数日かかって 1 つも端子付けが成功しないこともある。これでゼロ抵抗が見えなければ $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の研究はやめにしてしまうかもしれない、という背水の陣での実験で全てがうまくいき、ゼロ抵抗が観測できた。磁場をスイープしていった、抵抗が徐々に下がっていき最後に見事にゼロまで落ちた瞬間のうれしさ、人類で初めてこの物質のゼロ抵抗を見たときの感動は、言葉で言い表すことは難しい。

4. どのように超伝導を詳しく調べるか？

超伝導の発見後、その性質を詳細に調べるため、単結晶一個で交流帯磁率を測定するという実験を行った。交流帯磁率は超伝導を発見したときにも測っていたが、このときは多数の単結晶をセルに入れての測定だった。これだと全ての単結晶の帯磁率を平均化した情報しか得られない。

交流帯磁率は、試料を中に入れたコイルに弱い交流磁場を加えてコイルに生ずる誘導起電力の変化を見るが、シグナルの大きさは試料の大きさや交流磁場の大きさに比例する。 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の単結晶は典型的な大きさが $0.2 \times 0.2 \times 1 \text{ mm}^3$ 程度と非常に小さい。さらに、 H_c が非常に小さいため印加できる交流磁場の大きさにも制限がある。例えば、2 Oe で壊れてしまう超伝導を調べるのに 1 Oe の交流磁場が必要というのでは話にならない。また、コイルの大きさと結晶の大きさが極端に違うと外部ノイズも拾ってしまい S/N 比が悪くなる。したがって結晶の大きさ程度に小さくて感度の高いセルが必要だった。

そのようなセルを作るのには、ポリイミドチューブ (古河電気工業) という細くて厚みが薄い上に、強度もそれなりにあるチューブを使うことで成功した。 $\phi 0.5 \text{ mm}$ のチューブの上に $\phi 20 \sim 50 \mu\text{m}$ という髪の毛より細い銅線を数百回から千回以上巻きつけたコイルを使い、10 mOe 以下の交流磁場でも十分に超伝導転移が観測できるセルが完成した (図 3(a))。

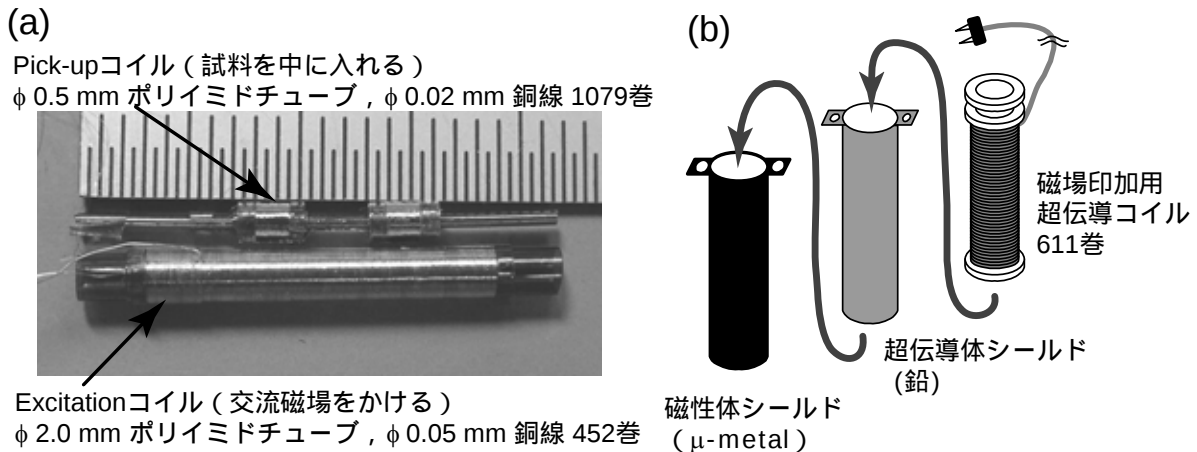


図 3: $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導の実験に用いた自作装置．(a) ポリイミドチューブを利用した交流帯磁率用の測定セル．測定の際はExcitationコイルの中にPick-upコイルを入れて使う．(b) 磁気シールドと磁場印加用のコイル．磁性体と超伝導体のシールドで地磁気や残留磁場を排除している．

また，地磁気や装置内の残留磁場があると超伝導が壊れるので，磁場を遮蔽することが必要だった．一方，超伝導の実験には磁場をかけることが不可欠である．そこで，図 3(b)のように磁気シールドの中に手巻きのコイルを配置した．このコイルには超伝導線を用いて発熱を防いでおり，16 mK において 2.5 Oe（電流にして約 25 mA）の磁場をかけても発熱の影響は全く無かった．

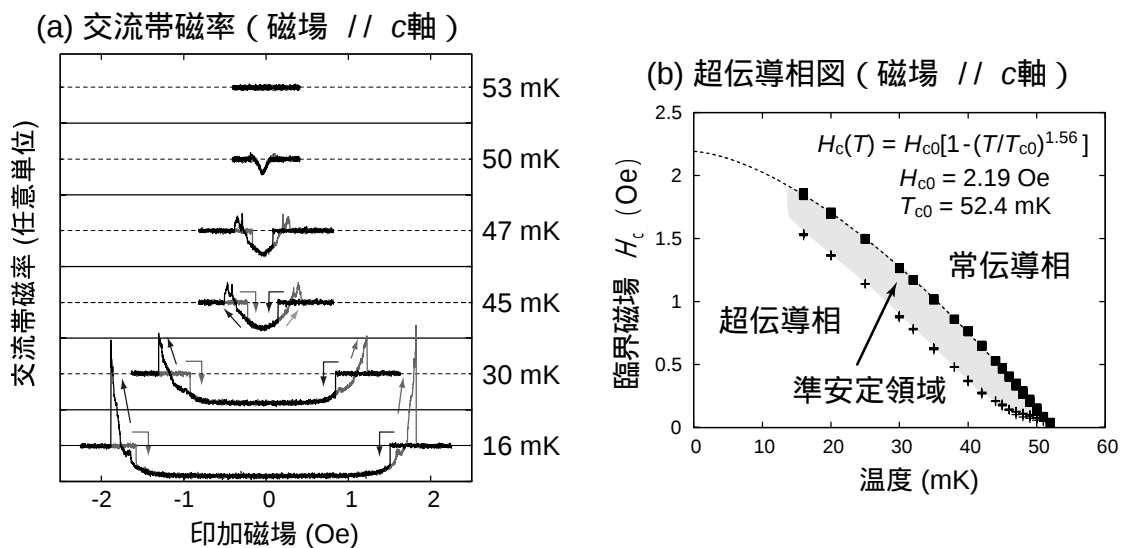


図 4: (a) $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の単結晶 1 つで測った交流帯磁率の磁場依存性．(b) 交流帯磁率測定から得られた $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導相図．■が臨界磁場 H_c （磁場を上げたときの転移磁場）を，+は磁場を下げたときの転移磁場（過冷却磁場）を示している．点線は式 $H_c(T) = H_{c0}[1 - (T/T_{c0})^\alpha]$ で H_c をフィッティングした結果．

5. $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ で発現している第 I 種超伝導

このようにして測定した交流帯磁率の結果を図 4 に示す [6]．ここで 2 つの注目すべき点がある．第 1 点は，磁場中での超伝導転移に大きなヒステリシス（履歴現象）が見られる，すなわち超伝導転移

が1次相転移になっている点である．もう1つは超伝導転移の直前に，交流帯磁率の実部が正の大きなピークを示す点である．交流帯磁率は磁化の微分 ($\partial M / \partial H$) に比例するため，このピークは転移点付近で急激に磁化が増加していることを示している．

超伝導体は磁場に対する応答の違いにより，第I種超伝導体と第II種超伝導体に分けられる．図5を見ていただきたい．第I種は熱力学的臨界磁場 H_c までは完全に磁束を内部から排除し(マイスナー状態)， H_c で1次相転移によって常伝導状態に戻る．超伝導体の形状によっては，中間状態という超伝導相と常伝導相が共存した状態を経ることがある．一方第II種超伝導体は， H_c より低い磁場 H_{c1} までは完全に磁束を排除するが，それ以上では磁束を量子化した形でわずかず超伝導体の中に入れていく．この状態を混合状態という．試料が常伝導になるのは磁場が H_c よりもはるかに高い H_{c2} に到達したときで，ここでの相転移は2次相転移になる．

以上の分類と $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の交流帯磁率を比較すると， $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ は第I種超伝導体であることがはっきりと分かる．このように言うと普通なことに思えるかもしれないが，第I種超伝導体はそのほとんどが単体の金属であり，化合物では10種程度が知られているのみである．特に，我々の知る限り酸化物で第I種超伝導体になるものは $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ が初めてである．

6. $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の常伝導状態 —異常な抵抗率—

$\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の常伝導状態にも非常に興味深い振る舞いが見られる．この物質の電気抵抗率の温度依存性を測定すると，室温から4 K以下まで T^2 の温度依存性が見られるのである[5]．通常の金属では，室温付近では電子 - 格子相互作用による電気抵抗が主で，温度に線形な変化を示す． $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の抵抗率が通常と異なる温度依存性を示すことは，通常と異なる散乱機構が電子に働いているということを示している．

抵抗率の T^2 温度依存性を生じる原因として固体物理分野の人が最初に思いつくのは，おそらく電子 - 電子散乱である．しかし，通常は電子 - 電子散乱による抵抗率 T^2 温度依存性は，せいぜい数十K以下の低温でしか観測されない．この原因のひとつは，室温付近では電子 - 格子散乱など他の原因によ

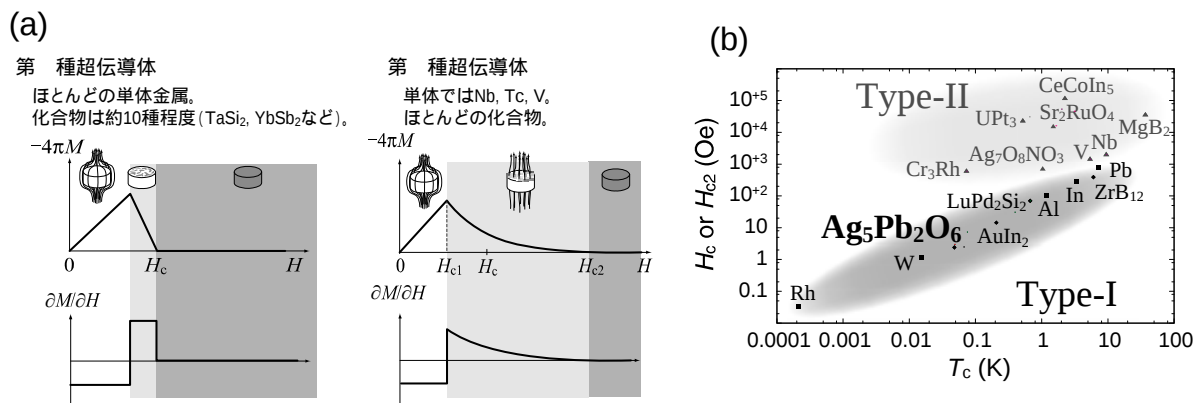


図5: (a) 第I種超伝導体と第II種超伝導体の磁場に対する応答の比較．上段は磁化に (-4π) をかけたものを示している．第I種超伝導体はマイスナー状態→中間状態(超伝導と常伝導の共存．どの磁場から中間状態になるかは試料の形状による)→常伝導状態と変化するが，第II種超伝導体はマイスナー状態→混合状態(量子化磁束の侵入)→常伝導状態という変化をする．下段には交流帯磁率に相当する $\partial M / \partial H$ を表している．第I種超伝導体の中間状態における $\partial M / \partial H$ のピークが $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ で観測された磁化率のピークに対応する．(b) 幾つかの超伝導体の T_c と H_c (H_{c2}) をプロットしたもの． $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ は単体金属などと共に第I種超伝導体に属する．

る散乱に覆い隠されてしまうためである．もしも $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の抵抗率が電子 - 電子散乱によるものであるとすると、他の散乱をはるかに上回る強さの電子 - 電子散乱が働いていることになる．一方、約 1200 Kに相当する周波数の格子振動モードがあるということを仮定すると電子 - 格子散乱でも抵抗率の T^2 温度依存性を導くことができる．

これらの仮定で $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の抵抗率を説明できるだろうか？ 前者の電子 - 電子散乱は低温での比熱に、後者の高周波数の格子振動は高温での比熱に影響を与えるが、実際の比熱を見てみるとこれらの電子 - 電子散乱や格子振動は考えにくい．また、強い電子相関を仮定すると磁化率もその影響で増大するはずであるが、この物質は磁化率も非常に小さい．このように、比熱や磁化率はきわめて「普通」な振る舞いであるがために、抵抗率の振る舞いが余計に「異常」に感じられる[5]．

7. $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ のフェルミ面 — 「ほぼ自由電子のフェルミ面」 —

つい最近Oguchiによって $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ のバンド計算[10]が、Sutherlandらによってド・ハース - ファン・アルフェン (dHvA) 効果の実験[11]が独立になされ、 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ のフェルミ面と電子状態が明らかになった． $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ のバンド計算は 1994 年にBrennanらによってなされており、円柱形を基本とするフェルミ面を提案していた[12] (図 6(c))．しかし最近の結果によると、 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ のフェルミ面は以前の計算結果とは著しく異なり、図 6(a,b)に示すようなほぼ球形のフェルミ面が連なった構造をしている．Oguchiのバンド計算とdHvA効果の結果がよく一致する点、また比熱の結果とも一致する点から、最近の結果の方が正しいフェルミ面を示していると考えられる．

$\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の電子の有効質量 m^* (固体中の電子は結晶格子や他の電子などとの相互作用を受けると質量が重くなったかのように振舞う)はdHvAの結果から $m^* = 1.1m_e \sim 1.3m_e$ (m_e は電子質量)とほとんど裸の電子と変わらないことがわかる．バンド計算の質量($m_{\text{band}}^* = 0.68m_e \sim 1.2m_e$)との比較から求められる質量増大度 $\lambda = (m^* - m_{\text{band}}^*)/m_{\text{band}}^*$ も非常に小さく 100 %にも満たない[11]．すなわち、 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の伝導電子はほとんど電子間相互作用も電子 - 格子相互作用も受けていないことになる．これとフェルミ面が球に近い形をしていることをあわせて、結局 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ のフェルミ面は「ほぼ自由電子のフェルミ面」ということができる．

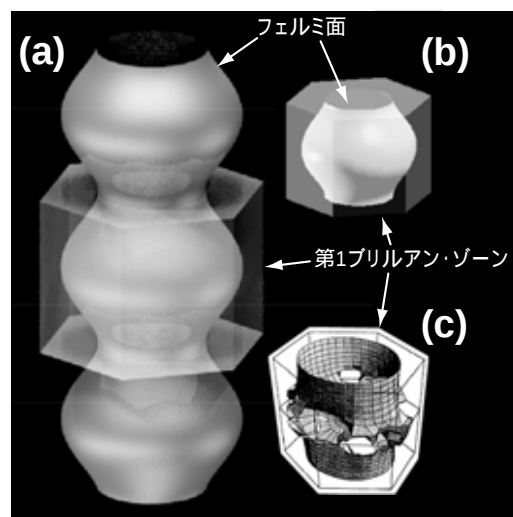


図 6: $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ のフェルミ面．元の図は Sutherland氏・Bergemann氏に提供していただいた．(a) dHvA効果の実験[11]によって求められたフェルミ面．(b) Oguchiのバンド計算[10]によるフェルミ面．(c) Brennanら[12]によるフェルミ面．

8. $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導の魅力と今後の展望

大部分の金属元素は常圧もしくは圧力下において超伝導になる．超伝導が報告されていない金属元素はNa, Kなどのアルカリ金属, Au, Ag, Cuなどの貴金属, そしてNiなどの強磁性金属などに分類できる．これらのうちアルカリ金属や貴金属は、球形に近いフェルミ面を持ち有効質量も質量増大度も小さく (例えばCuでは $m^* = 0.46m_e \sim 1.39m_e$, $\lambda = 23 \sim 26$ %である[13]), $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ と同じように、それら

の伝導電子は自由電子に近い．一般に，物質が超伝導になるには，伝導電子に何らかの相互作用が働いていてその相互作用によって電子間引力を生じることが必要である．つまり，簡単に言えばこれらの金属は伝導電子が自由電子に近すぎるために電子間引力が十分に働かず，到達可能な温度域では超伝導にならないのである．

Sutherlandらによって指摘されたように， $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ は，ほとんど自由な伝導電子を持つ物質としては，超伝導を示す非常に稀有な例である． $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ は，転移温度は非常に低いが，フェルミ面や電子に働く相互作用を考慮すると「高温超伝導」といえるのかもしれない．

超伝導を示さない金属とそっくりな電子構造を持ちながら $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ が超伝導を示す理由の1つに，電子に働く相互作用の異方性が指摘されている．フェルミ面全体で見ると $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の伝導電子に働く相互作用は非常に弱いですが，図6のフェルミ面のくびれの部分だけを見ると，質量の増大度 λ が30～90%と局所的にやや大きくなっている．つまりこの部分の電子には比較的強い相互作用が働いていて，超伝導の発現に寄与している可能性がある[11]．この異方的な相互作用と電気抵抗率の T^2 温度依存性との関連も考えられ， $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導の性質の更なる解明や常伝導状態での種々の物理量の測定，格子振動モードの計算などに興味を持たれる．

相互作用が異方的だとすると，結晶の異方性も合わせて，超伝導の異方性にも興味が出てくる．第II種超伝導体にはs波以外のいわゆる異方的な超伝導が見つかった[14]，従来の第I種超伝導体は全てs波超伝導という等方的な超伝導として理解されている．第I種で異方的な超伝導はあるのかどうか，未開拓で面白い問題である．

$\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ のフェルミ面が非常にシンプルであることから，超伝導のモデルと実験の比較がより厳密に行えるのではないかと期待もある．超伝導の基礎理論（BCS理論[15]）は球形のフェルミ面を仮定しているが，実際には超伝導になる金属のフェルミ面は複雑なフェルミ面を持つことが多い．例えば，BCS理論と非常によく一致する振る舞いを示すAlでさえも，フェルミ面は複数から構成されていて単純な球形とは言い難く，超伝導ギャップもそれぞれのフェルミ面上に存在している[16]．（それでも単純なモデルと実験値がよく一致するところがBCS理論のすごいところなのかもしれないが．） $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の研究が，そろそろ50周年を迎えるBCS理論を改めて検証するのに何か役立つことがあれば幸いである．

9．おわりに

近年の超伝導体研究の分野では「高い転移温度の超伝導体」や「強い電子相関をもつ超伝導体」がもてはやされている．ましてや第I種超伝導体となると，第II種に比べて忘れ去られている感がある．そういった意味で $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ は時代の流れとは逆行した超伝導体かもしれない．しかし少し見方を変えれば，興味深い点をもっている超伝導体である．時代の流れに沿った物質を研究していくのももちろん大事だが，世界の誰もやっていないことを明らかにしていくのもまた楽しいものである．超伝導転移温度が低いので実験には苦労するが，いろいろな工夫でその難しさを克服するのも研究の楽しさのひとつでもある．まだまだニッチな研究であるが，この3年間のがんばりが実を結び徐々に共同研究の輪も広がってきている．これからの研究の進展が非常に楽しみである．

本研究を進めるに当たり，前野悦輝教授をはじめとして固体量子物性研究室のメンバーの方々の多大なご協力やアドバイスを頂いております．また，寒剤供給の面でLTMセンターの方々のご尽力なくしてこの研究は成り立ちません．この場をお借りして，謝意を表させていただきます．

本研究は科研費特定領域研究「異常量子物質の創製—新しい物理を生む新物質—」の補助を受けて

行っています．また，筆者は特別研究員として日本学術振興会からの支援も受けています．

参考文献

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Müller, *Zeitschrift für Physik B* **64**, 189 (1986).
- [2] Y. Maeno, H. Hashimoto, K. Yoshida, S. Nishizaki, T. Fujita, J. G. Bednorz, and F. Lichtenberg, *Nature* **372**, 532 (1994).
- [3] K. Takada, H. Sakurai, E. Takayama-Muromachi, F. Izumi, R. A. Dilanian, and T. Sasaki, *Nature* **422**, 53 (2003).
- [4] S. Yonezawa, Y. Muraoka, Y. Matsushita, and Z. Hiroi, *Journal of Physics:Condensed Matter* **16**, L9 (2004).
- [5] Shingo Yonezawa and Yoshiteru Maeno, *Physical Review B* **70**, 184523 (2004).
- [6] Shingo Yonezawa and Yoshiteru Maeno, *Physical Review B* **72**, 180504(R) (2005).
- [7] M. B. Robin, K. Andres, T. H. Geballe, N. A. Kuebler, and D. B. MdWhan, *Physical Review Letters* **17**, 917 (1966).
- [8] M. Jansen, M. Bortz and K. Heidebrecht, *Journal of the Less-Common Metals* **161**, 17 (1990).
- [9] H. Abe, J. Ye, M. Imai, K. Yoshii and A. Matsushita, *Journal of Crystal Growth* **241**, 347 (2002).
- [10] Tamio Oguchi, *Physical Review B* **72**, 245105 (2005).
- [11] Mike Sutherland, P.D.A. Mann, Christoph Bergemann, Shingo Yonezawa and Yoshiteru Maeno, *Physical Review Letters* **96**, 097008 (2006).
- [12] T. D. Brennan and J. K. Burdett, *Inorganic Chemistry* **33**, 4794 (1994).
- [13] E. I. Zornberg and F. M. Mueller, *Physical Review* **151**, 557 (1966).
- [14] 実験主体の Review として，北岡良雄, 固体物理 **33**, 295 (1998) を，理論の Review として，Sigrist and Ueda, *Review of Modern Physics* **63**, 239–311 (1991) をそれぞれ挙げておく．
- [15] J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, *Physical Review* **108**, 1175 (1957).
- [16] 第 I 種超伝導体のフェルミ面や超伝導ギャップの異方性に関する実験と理論の Review として，A. G. Shepelev, *Soviet Physics Uspekhi* **11**, 690 (1969) などがある．

マシコヒゲムシ巨大ヘモグロビンの結晶構造

Structure of a giant hemoglobin from beard worm *Oligobranchia mashikoi*

沼本修孝¹, 三木邦夫^{1,2}

¹京都大学大学院理学研究科, ²理化学研究所播磨研究所

N. Numoto¹ and K. Miki^{1,2}

¹ Graduate School of Science, Kyoto University, ² RIKEN Harima Institute / SPring-8

1. はじめに

石川県能登半島の九十九湾海底には、有鬚(ゆうしゅ)動物門に属するマシコヒゲムシ(*Oligobranchia mashikoi*)と呼ばれる、世界的にも大変珍しい生物が生息している(図1)。この有鬚動物は、動物であるにもかかわらず口や消化管がまったく存在せず、他の生き物を食べて自身の栄養源とすることができない。もちろん動物であるからには、何らかの形で有機物を摂取しなければならないが、海中に溶存する有機物を体の表面から直接摂取するだけでは、生きていくのに必要な量を効率よく摂取することは難しい。このような有鬚動物では、生命の維持に必要な栄養源は、体内に存在する共生細菌がつくりだす有機物を獲得することで得ているのである[1]。ある種の細菌は、硫化物や鉄などの無機化合物をエネルギー源として有機物をつくりだすことができる。有鬚動物はおもに海底の熱水噴出孔付近などの硫化水素の豊富な環境に生息しており、この硫化水素をエネルギー源として有機物を産出する細菌を体内に共生させることで、効率よく栄養源を摂取するという巧みな生き方をしている。



図1 マシコヒゲムシ。

ところで、われわれヒトはもちろん、通常の生物にとって硫化水素は猛毒である。それは、酸素を結合して全身に運搬するヘモグロビンの機能を失わせたり、細胞呼吸にもっとも重要なチトクロム酸化酵素などを阻害したりするからであるが、有鬚動物の共生細菌はその硫化水素をエネルギー源として用いなければならない。すなわち、宿主である有鬚動物は、自分自身に影響が及ばないようにして硫化水素を共生細菌に引き渡さなければならないが、その機能を担っているのは、有鬚動物がもつ巨大ヘモグロビン複合体である[2,3]。マシコヒゲムシは、分子量約40万の巨大なヘモグロビン複合体をもっており、このヘモグロビンは赤血球内に存在するのではなく血液中に直接溶解するかたちで存在している。前述のように、通常のヘモグロビンは硫化水素によって酸素の運搬が阻害されるが、有鬚動物の巨大ヘモグロビンは、酸素結合部位とは別に硫化水素に対する特別な結合部位をもっており、このことによって、宿主に必要な酸素を運搬すると同時に、共生細菌が必要とする硫化水素をも宿主に悪い影響を与えないで運搬すると考えられていた。

ヒトをはじめとするほとんどの脊椎動物では、ヘモグロビンは互いに非常によく似た2種類のサブユニット（それぞれの分子量およそ16,000）から成る4量体構造（全体で分子量およそ64,000）をとっている（図2）。この脊椎動物ヘモグロビンの立体構造は、ミオグロビンとともに、X線結晶構造解析の手法により世界で最初に立体構造が明らかになったタンパク質でもある。その後、その立体構造を基にした数々の研究が行われ、酸素を結合し運搬するメカニズムも詳しく研究されている[4]。一方、無脊椎動物のヘモグロビンは、ヒトなどの脊椎動物のヘモグロビン4量体とはまったく異なった分子構築であることが知られており、中には数百万にも達する分子量を持つ巨大なヘモグロビン複合体も存在する[5]。しかしながら、このような巨大ヘモグロビンについては、これまでに立体構造が高分解能で解明された例はなく、また、有鬚動物の巨大ヘモグロビンに関しては、通常の酸素運搬の機能のみならず、硫化水素をいわば無害な状態で運搬するという特殊な機能のメカニズムについて、興味を持たれていた。

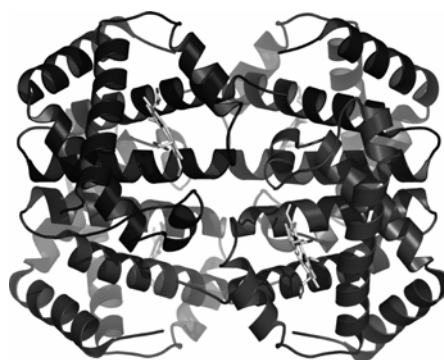


図2 ヒトヘモグロビンの4量体構造（酸素非結合型）。

2. マシコヒゲムシ巨大ヘモグロビンの構造

私たちの研究グループでは、マシコヒゲムシの巨大ヘモグロビン複合体の結晶化に成功し（図3a）、大型放射光施設 SPring-8 を用いた X 線結晶構造解析で、この巨大ヘモグロビンの立体構造を解明することができた[6,7]。マシコヒゲムシ巨大ヘモグロビンは、ヒトのヘモグロビンサブユニットと共通の構造を持つ4種のサブユニット（A1, A2, B1, B2）から成っており、これらがそれぞれ6つずつ会合して、全体では24量体を形成していた。その形状は、外径が約120 Å、内部に直径約50 Åの空洞が存在する球状の構造（図3b）であり、またこの構造は、分子内部に非常に高い対称性をもつものであった（図4）。まず、全体の24量体構造は、球を半分に分割したものに相当する12量体構造が2つ会合したものと考えることができる。さらにこの12量体構造は、4種のサブユニットが一つずつ会合してできる4量体構造が3回対称をもって会合した構造とみなせる。そしてその4量体構造も、サブユニット組成は異なるが、共通の会合状態である2量体構造（A1-B1とA2-B2）が2つ会合したものと考えることができる。このように、共通の構造を持った単位ブロックを構成しつつ、それらが次々

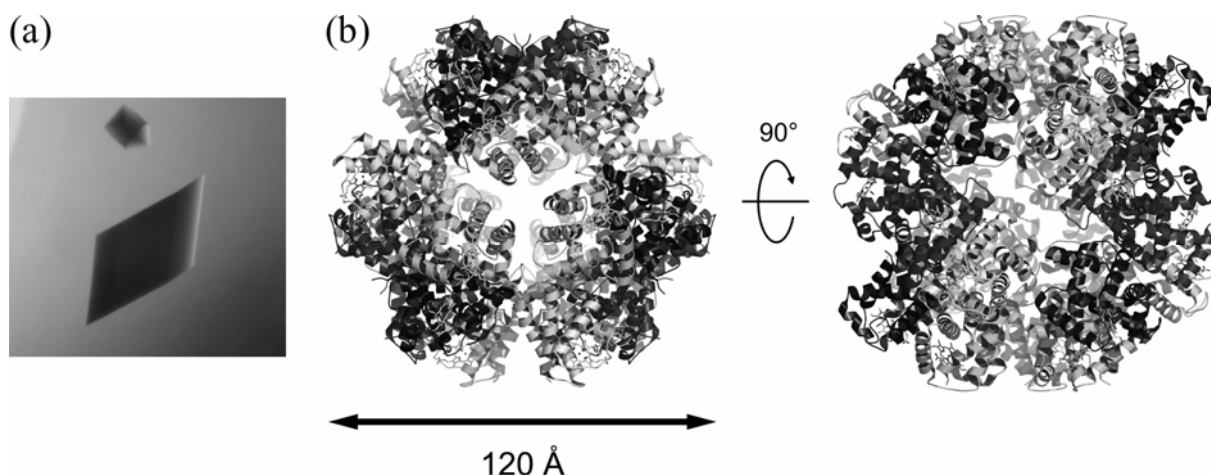


図3 マシコヒゲムシ巨大ヘモグロビンの結晶（a）と全体構造（b）

と規則正しく階層的に会合することで、全体で分子量 40 万にもなる巨大なヘモグロビン複合体が組み上げられていた。加えて、それぞれのサブユニット内、またサブユニット間にも多くのジスルフィド結合が形成されており、ブロックどうしをしっかりとつなぎ止める役目を担っている。

私たちの構造解析とほぼ同時期に、同じく有鬚動物の一つであるガラパゴスハオリムシの巨大ヘモグロビンの構造や、有鬚動物と近縁の環形動物（ミミズ）のもつ巨大ヘモグロビンの部分的な構造が報告されたが[8,9]、マシコヒゲムシのものも含めて、いずれも共通の 12 量体構造をもち（図 5）、これらの動物の巨大ヘモグロビンが、

この 12 量体構造を共通の基本ユニットとして組み上げられていることが明らかになった。さらにこの 12 量体構造を構成している 4 量体構造や 2 量体構造の会合様式は、これまでにその構造が明らかにされている軟体動物（アカガイ）のヘモグロビン 4 量体[10]および 2 量体構造[11]、あるいは棘皮動物（ナマコ）のヘモグロビン 2 量体構造[12]との共通性が高く、いまだに結論の出ていないヘモグロビン分

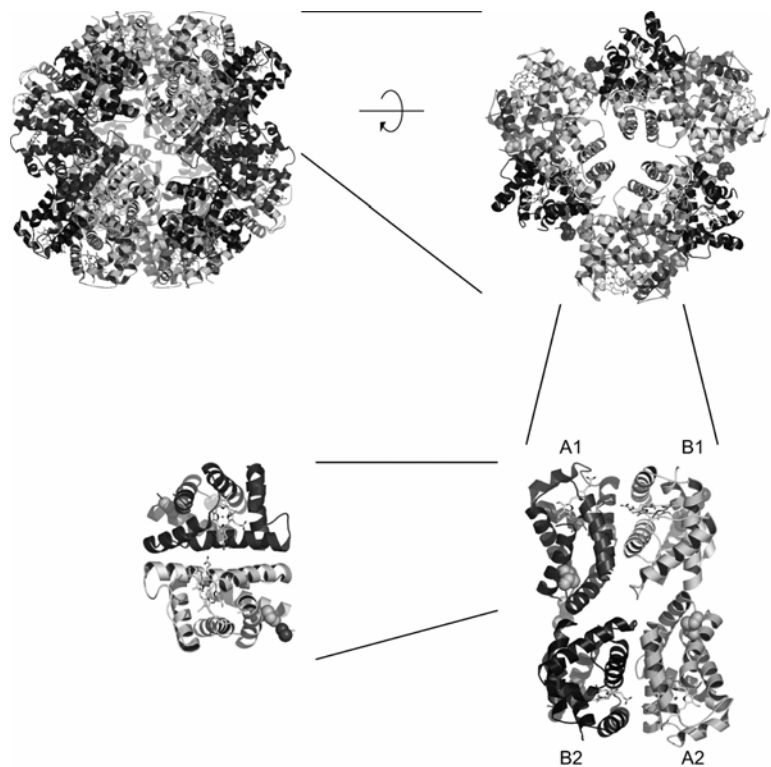


図 4 マシコヒゲムシ巨大ヘモグロビンにおける階層構造

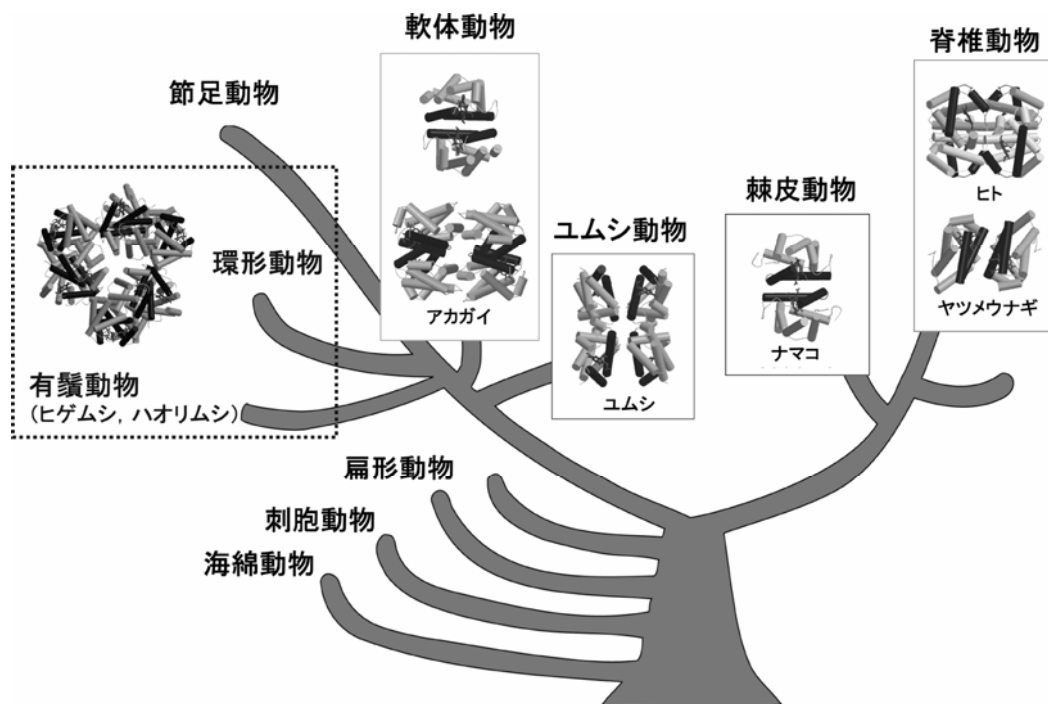


図 5 動物系統樹と構造の明らかになっている、2 量体以上のヘモグロビン。

子の進化の過程を解明する上でも，新たに加わったこれら一連の構造情報が重要な知見を与えるものと期待される．

3. 硫化水素結合の機構

有鬚動物の巨大ヘモグロビンの機能上の大きな特徴である硫化水素の結合に関しては，特定の結合部位の存在がこれまでの研究から提唱されていた[13]．すなわち，イオウ原子を持つシステイン残基（Cys）が，ペルスルフィド（-S-S-）を形成して，硫化水素を安定的に結合して運搬するというものである．実際に，有鬚動物の巨大ヘモグロビンの間では，いずれもそのアミノ酸配列上のある特定の場所に，この Cys が保存されている．今回解析されたマシコヒゲムシ巨大ヘモグロビンの結晶構造は，硫化水素非結合型であるが，こ

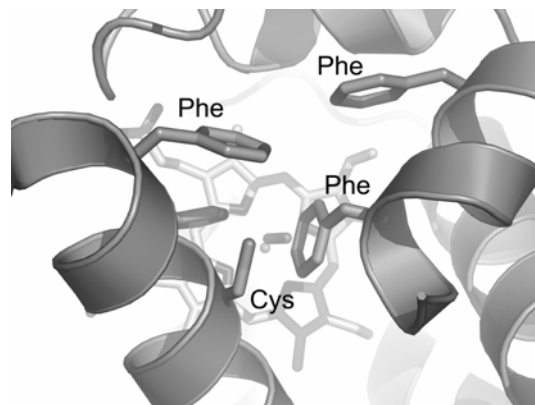


図6 予想される硫化水素結合部位

の保存された Cys の周辺環境を検討することで，いくつかの特徴的な事実が明らかになった．マシコヒゲムシ巨大ヘモグロビンを構成する 4 種のサブユニットのうち，A1，A2，B2 サブユニットにそれぞれ保存された Cys が存在する．とりわけ A1 と B2 については，アミノ酸配列上で互に対応する位置にこの Cys が存在し，かつ立体構造上の周辺環境も，2 つのサブユニットで非常によく似ていた．これらの Cys は，疎水性の芳香族アミノ酸，フェニルアラニン残基（Phe）に取り囲まれるように存在していた（図6）．保存された Cys 周辺のこのようなアミノ酸残基の配置から，この部位に結合した硫化水素（硫化物イオン）が，Phe の芳香環による静電相互作用によって安定化されるというメカニズムが強く示唆される．この Cys を取り囲むように配置している Phe もまた，有鬚動物の巨大ヘモグロビンの間でよく保存されている．さらには Cys に特異的に結合する水銀化合物を結合させた結晶構造中では，これらの Phe 側鎖が実際に Cys に結合した水銀原子と接触していることも，この機構を支持している．一方，A2 サブユニットでは，A1，B2 とは異なる位置に保存された Cys が存在するが，同様に周囲を疎水性のアミノ酸残基に囲まれている．マシコヒゲムシ巨大ヘモグロビンは，このような疎水的環境にある複数の箇所ですulfideを結合して，非常に反応性の高いペルスルフィドが不必要な反応することを防ぎながら，安定に共生細菌まで運搬していると考えられる．

4. サブユニット間の協同性

無脊椎動物ヘモグロビンのサブユニット会合形態は多岐にわたる．小さなものでは，サブユニットひとつで機能するものから，マシコヒゲムシの巨大ヘモグロビンのように 24 量体という大きな複合体を形成するもの，あるいはさらに大きな複合体まで，様々なものが存在することが知られている．なかには，酸素運搬機能をヘモグロビンとは異なるタンパク質が担っている場合さえある．例えば，イカや昆虫などでは，ヘモシアニンと呼ばれる別種のタンパク質が酸素を運搬しており，それゆえにこれらの生物の血液は赤くない．話をヘモグロビンに限っても，無脊椎動物のものが詳細に研究された例はごくわずかであり，構造と機能の詳しい研究は，アカガイのヘモグロビンなど数例にすぎない．脊椎動物ヘモグロビンの大きな特徴の一つは，酸素を結合・放出する際に，4 つのサブユニットが協同性を示すことである．4 つのサブユニットはそれぞれ 1 分子ずつ酸素を結合できるが，4 つのうち一つのサブユニットに酸素が結合（放出）されれば，その 4 量体構造が大きく変化し，その結果，他の

サブユニットの酸素の結合（放出）を促進する．一般に，このような複数のリガンド結合部位でその結合性に互いに影響を与えあう性質を協同性という．脊椎動物のヘモグロ빈は，4 量体構造であるが所以の非常に巧妙な仕掛けをつかって，効率よく酸素を結合して全身に運搬し，また必要なところで酸素を放出しているのである．それに対し無脊椎動物のヘモグロ빈では，このような協同性を強くもつものもあれば，ほとんど持たないものもある．マシコヒゲムシの巨大ヘモグロ빈では，最近になって，このような協同性はほとんど存在しないことがわかったが[5]，一方，共通の 12 量体構造をもつミミズとハオリムシの巨大ヘモグロ빈には協同性が存在する．このような違いを説明するには，酸素を結合した状態と，結合していない状態の構造をそれぞれ決定して，その構造を詳細に比較する必要がある．これまでに明らかにされた巨大ヘモグロ빈の構造はいずれも酸素結合型であり，今後の酸素非結合型の構造決定によって，これらの 12 量体構造におけるヘモグロ빈協同性のメカニズム説明が期待される．同様に，硫化水素結合型の構造解析によって，有鬚動物の巨大ヘモグロ빈のもつ特異な硫化水素結合機能のメカニズムがより詳細に説明できると考えている．

5. おわりに

生命現象のプロセスを，化学や物理学の視点で理解しようとするとき，それを化学的な反応で司っている生体高分子の構造を原子レベルで説明することが重要である．タンパク質など，生体高分子の三次元的構造には，その働きに直結している情報が含まれている．この重要性は，近年，タンパク質立体構造解析数が飛躍的に増加していることに表われている．とはいえ，一つの細胞中でも数万種のタンパク質分子が働いており，極めて多くのタンパク質分子の構造がいまだ未説明のままである．とくに，生体膜に埋もれて存在している膜タンパク質や，何種類ものサブユニットで構成されている複雑で巨大な超分子複合体などでは，このことは顕著であり，かつ，これらのタンパク質が基本的な生命活動あるいは疾病などに重要な役割を果たしていることも多い．X 線結晶解析は，解析できる分子量にほとんど制限がなく，このような複雑な複合体の解析にも適しており，今後も生物学的に重要な生体超分子複合体の説明が進むと期待される．

本稿で紹介した研究は，金沢大学大学院自然科学研究科の福森義宏教授，中川太郎博士，同じく金沢大学自然計測応用研究センターの笹山雄一教授らとの共同研究の成果である．また，X 線回折実験は大型放射光施設SPring-8の複数のビームライン（BL38B1, BL41XU, BL44XU, BL45XU）で行ったものであり，それぞれのビームラインの担当者の方々のご助力に感謝申し上げたい．

参考文献

- [1] A. J. Southward, E. C. Southward, P. R. Dando, G. H. Rau, H. Felbeck, H. Flügel, *Nature*, **293**, 616 (1981).
- [2] A. J. Arp, J. J. Childress, R. D. Vetter, *J. Exp. Biol.*, **128**, 139 (1987).
- [3] T. Nakagawa, S. Onoda, M. Kanemori, Y. Sasayama, Y. Fukumori, *Zoolog. Sci.*, **22**, 283 (2005).
- [4] M. F. Perutz, *Sci. Amer.*, 239, 68 (1978).
- [5] R. E. Weber, S. N. Vinogradov, *Physiol. Rev.*, **81**, 569 (2001).
- [6] N. Numoto, T. Nakagawa, A. Kita, Y. Sasayama, Y. Fukumori, K. Miki, *Biochim. Biophys. Acta*, **1750**, 173 (2005).
- [7] N. Numoto, T. Nakagawa, A. Kita, Y. Sasayama, Y. Fukumori, K. Miki, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **102**, 14521 (2005).
- [8] K. Strand, J. E. Knapp, B. Bhayrabhatla, W. E. Royer Jr., *J. Mol. Biol.*, **344**, 119 (2004).

- [9] J. F. Flores, C. R. Fisher, S. L. Carney, B. N. Green, J. K. Freytag, S. W. Schaeffer, W. E. Royer, Jr., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **102**, 2713 (2005).
- [10] W. E. Royer, Jr., K. S. Heard, D. J. Harrington, E. Chiancone, *J. Mol. Biol.* **253**, 168 (1995).
- [11] W. E. Royer, Jr., *J. Mol. Biol.* **235**, 657 (1994).
- [12] D. T. Mitchell, G. B. Kitto, M. L. Hackert, *J. Mol. Biol.* **251**, 421 (1995).
- [13] F. Zal, E. Leize, F. H. Lallier, A. Toulmond, A. Van Dorselaer, J. J. Childress, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **95**, 8997 (1998).



製作スタッフ 左から、イラストレーターの山崎氏、筆者、玉尾先生、桜井先生、梶井氏、稲見氏

この周期表の成り立ちと基本的なコンセプトについては玉尾皓平先生(元 京都大学化学研究所教授, 現 理化学研究所フロンティアシステム長)の解説(参考記事)に譲りますが, 発端は玉尾先生が2003年1月の第17回「大学と科学」公開シンポジウム「化学: 自然と社会へのかかわり」で提唱されたことから始まります. 昨今, 子供たちの「理科離れ」, 「化学嫌い」, 「物理嫌い」が問題になっています. この周期表は一般の人達に科学技術の恩恵をわかりやすく知ってもらい, 身のまわりのものはすべて元素でできているという, いわば当たり前のことを改めて認識し, 理科, 科学が身近であることを感じてもらうことを目的に制作しました.

2. 周期表ができるまで

この周期表の普及のためには公的なルートが重要ということで, 玉尾先生が文部科学省に働きかけられ, 上記の様に科学技術週間の行事の一環として実現することになりました. また, 日本化学会, 日本物理学会, 日本薬学会, 日本微量元素学会, 高分子学会, 応用物理学会の監修になっていて, 学会から認定されたものになっています. 実際の制作にあたっては化学同人が採算を度外視して協力してくれました.

制作作業が始まったのは2004年9月からで, 制作メンバーは玉尾先生, 桜井弘先生(京都薬科大), 筆者, 化学同人の稲見國男さん, 梶井文子さん, イラストレーターの山崎猛さんの6名です. 有機化学の専門家の玉尾先生が主に典型元素を担当され, 私は主に遷移元素を担当しました. 桜井先生は講談社ブルーバックスの「元素111の新知识」の編著者で, 元素全般に亘る幅広い造詣をお持ちです. 化学同人の本社ビルに制作メンバー全員が集まり 2004年の10月から2005年の3月にかけて10回以上の制作会議を行い完成させました.

制作にあたって、全元素の特性をリストアップし、その中からイラスト案とキーワード候補を絞り込み、各元素につき推敲に推敲を重ね、イラストもほとんどすべてを何度も描き直してもらいながら理想的な周期表に仕上げていきました。ちょっと大げさに表現すれば、わが国の科学技術史上、科学教育史上初めて作られたイラストつきの美しくかつ最先端情報満載の周期表の登場といえます。



それぞれの元素について、用途の写真やイラストがあり、その下に簡潔な説明を記してある。

3. 周期表の特徴

各元素について、原子番号、元素記号、元素名（日本語と英語）、原子量、放射性元素については代表的な同位体とその半減期を示してありますので、十分な実用性があります。その上で用途や性質などを4件以内で示し、その中から代表的なものをイラストや写真で簡潔明瞭に表現しました。

これまでも外国には使用例を示したイラスト、写真入りの周期表はありましたが、これほど美しく詳細で、かつ分かりやすいものは初めてではと思います。この周期表はわれわれの身の回りの世界の縮図であり、まさに世界は元素でできていることを広く一般の人達に実感してもらうことを目的として制作しています。そのため、Fのフライパン、Crのやかんなど身近なものから、Tiの光触媒、Erの長距離光ファイバー用光増幅器、さらにCについてはフラーレン、カーボンナノチューブという最先端の物質、用途まで含まれています。イラストについてはAsの携帯電話とヒジキ、Feのビデオテープと血液など意外性のある組み合わせにして印象に残るよう配慮しました。

また、この周期表ではわが国の科学技術の強さを一般の人達、特に子供達に知ってもらうため、HのH2ロケット、Tiの光触媒、Geのトランジスタラジオ、Gaの青色発光ダイオード、Ruの水素化触媒、TeのDVDディスク、113番元素の発見などを取り上げました。これに関連して、自然科学分野でのわが国のノーベル賞受賞者を掲載したものも用意しました。

この周期表では低温・物質科学についても多くの項目を盛り込んであります。低温についてはHe：液体Heは超伝導磁石の冷却剤、N：液体窒素は優れた冷却剤（-196℃）を入れました。また、超伝導についてはイラストでCu：高温超伝導体の磁気浮上、Nb：リニアモーターカー、説明文でBi：実用高温超伝導線のおもな元素が入っています。磁性についてはイラストでFe：ビデオテープ、Co：ハードディスク、Ni：MRIの磁気シールド（パーマロイ）、Nd：ネオジム磁石、Sm：サマリウム-コバルト磁石、Gd：MDディスク、Tb：プリンタヘッドの7つを取り上げています。さらに半導体についてはイラストでSi：太陽電池、Ge：最初のトランジスタラジオ、Ga：信号機（青色発光ダイオード）、As：携帯電話の4つを、説明文でSb、Te、Tlについても触れています。このように子供たちがこの周期表を見ること

で、自然に低温・物質科学にも興味を持てるようになっていきます。このセンター誌の読者の皆様にもぜひ身近に貼って頂いて、普及にご協力頂ければ幸いです。

4. 周期表の反響

この周期表は発表されて間もなくマスコミの注目を浴び、新聞各紙で紹介されました。特に毎日新聞の記事（当初の10万部がすぐに捌けて、さらに10万部増刷！）の効果が大きく、人気に火がつくことになりました。またNHK（総合）のお昼の番組で取り上げられ、解説委員の方が10分程度にわたり詳しく説明してくれました。これで一般の認知度が一気に高まることになりました。その他、AERAなどでも紹介されています。

この周期表が発表されてから、制作者の私達が予期していなかった形で大きな反響を頂きました。それはインターネットの世界でのことで、いろいろなblogでこの周期表が取り上げられています。これは科学技術週間 科学技術広報財団のサイトから自由にダウンロードできることが効を奏しました。blogは一般の人達がこの周期表をどう見ているのかを直接知ることができるため制作者サイドには非常に有益です。制作者側が今後、こうしていきたいと思っていることを先取りして書いているものもありました。中学校、高校の先生がダウンロードしてクラスの生徒に配布していることもわかりました。印刷版が約35万枚出ていますので、ダウンロード版を合わせると、すでに百万枚以上が世の中に出ているのかもしれませんが、この周期表を家の中に貼っておくことで、おしつけがましくなく自然に科学への興味を持ってもらうことができるのではと期待しています。当初、中学生、高校生を対象として想定していましたが、blogから小学生に対しても効果が大きいこともわかってきました。さらには 幼稚園児を持つお母さんのblogに病院の遊び場に貼ってあるのを子供が見かけ興味を示したので、買って帰ったという記載があったのには驚きました。予想以上にこの周期表は子供の目を引くようです。これは、1つ1つの元素がカードになっていて、カード収集の興味にもつながるものになっているのが効果的なためなのではと思います。もちろん、この周期表は大人の理科離れにも効果はありそうです。「冷蔵庫、トイレに貼って、ただ、見ているだけでも十分楽しめる周期表」、「ママにも1枚周期表」などの記事が踊ります。

5. 周期表の今後

現在、化学同人からはA 1版の大きいポスターも売り出されています。またこの周期表をもとにした、絵本やテーブルマット、マグカップやTシャツなど、多様な企画も計画されていますし、外国語版の企画も持ち上がっています。今後さらに大きく発展していくものと思います。

「一家に1枚周期表」は2005年3月に第1版が発刊され、5月にキーワードの見直しなど最初の改訂を行いました。その後、多くの方々から頂いたご意見を参考にして、2006年3月に第3版の発刊を予定しております。第3版では写真・イラストを含め多くの変更箇所がありますので、第2版までをお持ちの方もぜひ第3版をご覧下さい。今後もより良いものになるようキーワードやイラスト案なども含めてご意見をお寄せ頂きますようお願いいたします。この周期表が世の中に定着していくことを期待しています。

参考記事

月刊「化学」（化学同人発刊）2005年5月号，p.22～23

月刊「化学」（化学同人発刊）2005年12月号，p.28～31

科学技術週間ホームページ（<http://stw.mext.go.jp/>）

科学技術広報財団ホームページ（<http://www.pcost.or.jp/>）

低温物質科学研究センター 研究交流会 開催報告

Report on LTM Center Exchange Meeting

矢持 秀起

京都大学低温物質科学研究センター

H. Yamochi

Research Center for Low Temperature and Materials Sciences, Kyoto University

御参加いただいた皆様，ならびに，本センター教職員の御協力を得て，表題の交流会を2006(平成18)年3月1日に開催致しました．本会は，前年度に開催された講演・研究発表会に続く，本センター利用者の科学的・人的交流を目的とした集会であります．今回も約70名の方々に御参加いただき，講演(口頭発表)3件とポスター形式40件の発表があり，活発な交流会にさせていただきました．今回は，テーマを「低温の楽しみ方」と設定し，現代の低温技術をうまく使って各方面で活躍して居られる先生方に御講演をお願い致しました．

工学研究科・中村 武恒 先生からは，超伝導材料のパワー応用の最先端を御紹介いただいた．電動モーターの分類と基本的な動作原理に始まり，現在，主流となっている誘導モーターについてのやや詳細な解説をいただいた．また，超伝導材料を低温超伝導体と高温超伝導体に分類し，それらの特徴についても御説明いただいた．誘導モーターの回転部分である回転子の導線部分に高温超伝導材料を用いた場合，理論的に期待される動作状況と，実際に講演者グループが作成したモーターの動作特性の比較が報告された．



理学研究科・講師 舟橋 春彦 先生からは，ダークマターの最有力候補素粒子であるアクシオンの検出に向けた本学での現状を御紹介いただいた．先ず，宇宙物理学と素粒子物理学，双方の研究分野から，未発見の物質(素粒子)の探索が望まれていることが紹介された．アクシオンの持つエネルギーが，現在どの程度に見積もられているのかの御説明があった．アクシオンが磁場中で光子に変換されると推定されていることに基づき，この光子を電場中に置いた励起状態の原子と相互作用させることにより，アクシオンを敏感に検出しようとする装置(CARRACK)の御説明があった．



理学研究科・水崎 隆雄 先生(本センター センター長)からは，熱力学の解説に始まり，ヘリウム液化を中心とした低温科学の技術史と波及効果，本学における液化ガス供給の歴史と現状が紹介された．また，本学で寒剤が多様な科学の進展に利用されていることの御説明があった．いずれの話題におい

ても、低温技術・寒剤供給が基礎・応用双方の研究の進展に重要な役割を果たしていることが、解りやすく解説された。

3件の御講演は、いずれもが参加者の興味を引き、専門分野の近い方、異なる方、双方からの質問が講演中に飛び出し、座長(佐々木先生)が時間調整に苦慮する程の活発な口頭発表となった。

この後、ポスター発表会が行われた。人的交流のみならず、科学的な情報交換の場としても良く機能していた様子で、予定の終了時刻を過ぎても議論を行っているポスターが何件も見受けられた。本レポート報告者自身も、御発表内容に引き込まれ、議論を行っている内に、世話役としての飲食物の御世話を怠る失態をさらしてしまうほどであった。



寒剤利用者どうしの情報交換と親交を目的とした集会であるが故に、参加者の専門分野は多岐に渡りました。個人的には、世話役を引き受けた時には、参加者間の科学に関する相互理解が充分に行われるかどうか相当に不安を感じていました。しかし、御講演をいただいた先生方を初めとする皆様の御協力により、活発かつ和やかな交流会をとなりました。本報告の場をお借りして、お礼を申し上げます。

(参照 32頁～54頁：発表要旨集より転載)

L01 高温超伝導誘導モータの不思議な回転現象

中村 武恒

京都大学 工学研究科 電気工学専攻

E-mail : tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

モータとは、一口に言えば電気エネルギーを機械エネルギーに変換して仕事をさせる電気機器である。機械的運動としては、回転運動や直線運動など様々であるが、本講演では回転機としてのモータを扱う。モータとして最も汎用的に使用されているのはかご型誘導モータであり、分数馬力モータから鉄道車両用主電動機に至るまで幅広く使われている。本研究は、どこにでも転がっている一般的誘導モータの 2 次巻線を高温超伝導化しようという素朴な発想に基づくものである。しかしながら、以下に説明するように、巻線を単純に超伝導化するだけで大きな高機能化が発現することが分かってきた。

図 1 は、かご型誘導モータの 2 次側かご型巻線を模式的に示したものである。同図中、ロータバーは回転子鉄心中に収められており、それをエンドリングで短絡してある。一次巻線によって発生する回転磁束がロータバーに鎖交することによって誘導電流が流れ、トルクが発生する。つまり、誘導電流が流れるためには、上記かご型巻線の回転速度は一次側回転磁界速度より必ず“ ずべる ”必要があり、原理上同じ (同期) 速度では回転できないモータである。

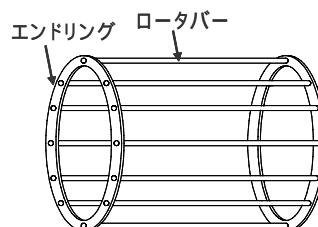


図 1 : 2 次側かご型巻線の模式図

ところが、図 2 のようにかご型巻線を超伝導化することにより、ある条件下で抵抗ゼロの永久電流が流れ、鎖交磁束が捕捉されると考えられる。その結果、かご型巻線が永久磁石のように振る舞い、誘導モータでありながら同期回転可能になると期待される¹⁾。そこで、市販の 3 相 4 極誘導モータの 2 次側かご型巻線をピスマス系高温超伝導テープ材で作製し、試験を行った。一例として、液化窒素大気圧沸点 (77.3 K) における無負荷試験結果を図 3 に示すが、入力電圧 49 V 付近で見事に同期回転数 (1800 rpm) に達している²⁾。また、電圧上昇時と下降時でヒステリシス特性を有しているが、このことは真にかご型巻線に磁束が捕捉されている証拠と考えている。講演では、このメカニズムの詳細と期待される応用をお話する。

1) G. Morita, T. Nakamura et al, in review

2) T. Nakamura et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., accepted; 中村 他, 2006 年電気学会全国大会

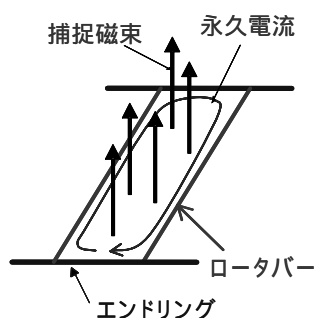


図 2 : 超伝導かご型巻線ループ (1 ループ分) に磁束が捕捉された様子の概念図

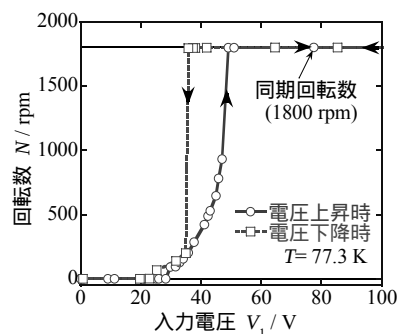


図 3 : 高温超伝導かご型誘導モータの無負荷試験結果 (運転温度 : 77.3 K)

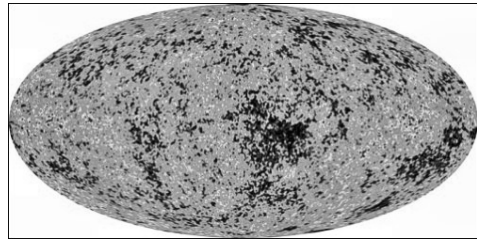
L02 宇宙を満たす冷たい素粒子を地上低温実験で探す。

舟橋 春彦

京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第2分野

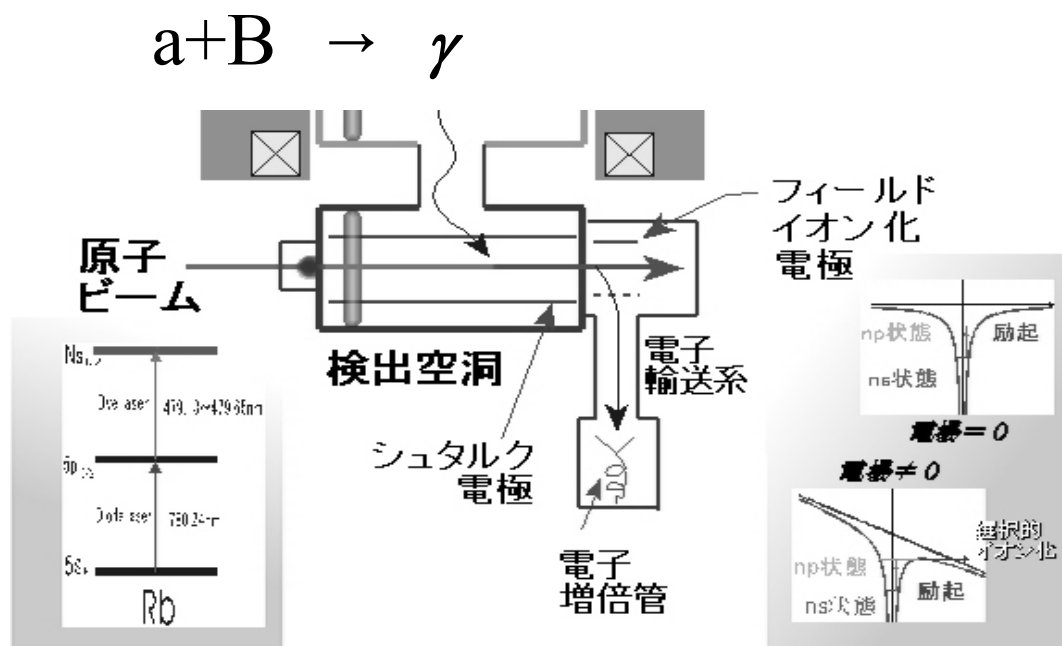
E-mail : hal@nh.scphys.kyoto-u.ac.jp

最新の観測結果に基づく宇宙論によると、宇宙にはその質量密度の23%をも担う“ダークマター”と呼ばれる正体不明の物質が存在することが分かってきた。ダークマターの最有力候補のひとつとして時間反転対称性に関わる未発見の素粒子“アクシオン”が挙げられる。リドベルグ原子を用いた高感度検出装置でダークマターアクシオンを探索する。ダークマターの正体を明らかにすることは、素粒子物理・宇宙物理の最重要課題である。



これまで化学研究所において研究を推進してきたアクシオン探索装置 CARRACK を低温物質科学研究センター隣にこの春完成する新実験棟へ移設する。全学共同利用の低温物質科学研究センターを核に新しい研究チームを形成し、アクシオン探索を行うとともに低温環境下での表面物性科学や空洞量子電磁気学の実験的研究も展開する。これはリドベルグ原子を微弱電場測定やマイクロ波の単一光子検出に応用するものである。

さて、「宇宙」や「素粒子」がどう「低温」に関わるのか？ 本講演では、アクシオンの存否とその探索のアイデアに興味を持って頂けるよう、平易な説明を試みる。



CARRACKの単一マイクロ波光子検出部の概念図

アクシオン a は磁場中 B で光子 γ に転換すると考えられている（プリマコフ効果）。プリマコフ転換光子はアクシオン質量に等しいエネルギーを持つ。このマイクロ波領域の光子をリドベルグ原子によって単一光子感度で検出する。

L03 低温科学の楽しみ方：京都大学の低温科学の歴史と発展

水崎 隆雄

京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

低温物質科学研究センター長

E-mail : mizusaki@scphys.kyoto-u.ac.jp

京都大学に低温科学の研究のためのヘリウムと窒素の液化機の設定と寒剤供給施設ができたのは1963年である。以来、幾多の改革をえて、2002年に理学部附属施設機器分析センターを合わせて、新たに研究部門を加えて、低温物質科学研究センターが発足した。

ヘリウムは1908年にオランダのライデン大学のカメリン・オンネスによって液化された。この年をもって低温物理学の元年としており、今からほぼ100年前になる。その間、低温科学は低温工学や物理学にとどまらず、農学、薬学、医学の分野に応用され、学際領域は広がり、2003年度のノーベル賞を例にとると、物理学賞が超伝導、ヘリウム-3の超流動理論、化学賞がアクアポリン膜の水チャンネルの研究で本学の藤吉教授が開発した極低温電子顕微鏡が極めて重要な寄与をしたと聞いている。また、医学賞は医学の診断には欠かせないものになっているMRIであるが、MRIの実用化にとって高性能の超伝導磁石の開発なくしては実現し得なかったであろう。21世紀の最先端科学にとって低温科学は極めて重要な役割を果たすものと思われる。



京都大学吉田団地配置図



講演では、世界の低温科学の流れの中の京都大学の低温科学の発展の歴史と現状を述べ、低温物質科学研究センターの今後の展望を述べる。

平成19年度特別教育研究経費要求資料

低温科学による最先端技術の開発と新領域創成

低温物質科学研究センター

共同利用装置
博士研究員



既存の研究設備



低次元量子効果実験装置



MRI実験装置



極低温電子顕微鏡



脳磁図測定装置

低温科学

P01 $S=1/2$ 二次元正方格子磁性体(CuCl)LaNb₂O₇及びその関連物質の磁性

大場 紀章、北野太郎、安田淳、馬場洋一、陰山洋、網代芳民、吉村一良、西正和^A、

廣田和馬^A、東正樹^B、齋藤高志^B、金道浩一^A、鳴海康雄^A、萩原政幸^C

京大院理、東大物性研^A、京大化研^B、阪大極限^C

E-mail : nori@kuchem.kyoto-u.ac.jp

イオン交換反応は、もとの物質の構造を残したまま、定比で目的のイオンを入れ替える事が出来るため、とても柔軟な物質開発が可能である。しかし、物性研究においてあまり注目されて来なかった。最近、我々は強いフラストレーションが期待される二次元正方格子を持つ層状ペロブスカイト(CuCl)LaNb₂O₇をイオン交換法を用いて合成し、磁化率、強磁場磁化過程、比熱、中性子非弾性散乱などによって励起ギャップが見出され、興味を呼んでいる[1,2]。しかし、測定手段によってギャップの大きさの評価が異なるなど、その起源はまだ不明である。そこで我々は、この物質と同じ構造を持つ(CuBr)LaNb₂O₇、およびこれらの全率固溶体(CuCl_{1-x}Br_x)LaNb₂O₇(0 ≤ x ≤ 1)を合成し、その物性測定を行った。非常に興味深いことに(CuBr)LaNb₂O₇の磁化率は(CuCl)LaNb₂O₇のそれと異なりギャップレシ的な振る舞いをする。中性子回折の結果、その磁気構造はあまり例のないcollinear型であることが示された[3]。

[1]H. Kageyama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., 74 (2005) 1702.

[2]H. Kageyama *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., 74 (2005) 3155.

[3]N. Oba *et al.* 投稿予定

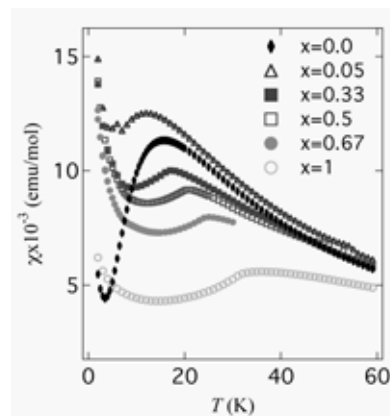


図 (CuCl_{1-x}Br_x)LaNb₂O₇ の磁化率

P02 量子臨界性を持つメタ磁性遍歴酸化物Sr₃Ru₂O₇の¹⁷O-NMR

北川 健太郎^a、石田 憲二^a、R. S. Perry^{a,b}、前野 悦輝^{a,b}

^a京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b京都大学 国際融合創造センター

E-mail : kitagawa@scphys.kyoto-u.ac.jp

層状ペロブスカイト型酸化物Sr₃Ru₂O₇は、磁場印可により急激な磁化の増大を起こし、1次相転移の遍歴メタ磁性を示す。印加磁場の方向によってその1次相転移の臨界温度が約1Kから0Kに変化する。c軸方向の磁場印可では、臨界温度を絶対零度にする事ができ、このとき量子臨界点を持つ¹。すなわち、絶対零度において量子ゆらぎにより相転移が引き起こされる。1次相転移の臨界点ゆらぎに起因する量子臨界点という点では、通常の2次相転移の量子臨界点とは異なる。我々は核スピンを持つ¹⁷O(天然存在比0.01%)で置換した試料を用い、核磁気共鳴(NMR)を主な測定手段として磁気状態を調べている。NMRは試料内部の磁気状態を静的情報(ナイトシフト/スペクトラム)と動的情報(緩和率1/T₁)の2面から調べる事のできる測定手段である。NMRの測定により、c軸方向の磁場印加では反強磁性的な量子臨界ゆらぎが絶対零度に向かって発散していること²、反面、[100]方向の磁場印加では量子臨界ゆらぎが抑えられフェルミ液体的な温度依存が見られることがわかってきた。

[1] S. A. Grigera *et al.*, Science 294, 329 (2001).

[2] K. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. 95, 127001 (2005).

P03 二次元偏極原子状水素の直接観測のためのミリ波ヘテロダイン ESR 分光器の開発

三木貴博^a, 松原 明^b, 福田 昭^b, 水崎隆雄^{a,b}

^a京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b京都大学 低温物質科学研究センター

E-mail: miki@scphys.kyoto-u.ac.jp

偏極原子状水素（以下H↓と略す）とは、超低温・高磁場下で電子スピンを偏極させて安定化した水素原子のことである。本研究における二次元H↓とは、超流動⁴He液面上に吸着されたH↓を指す。H↓は低温で大きな量子効果を現す永久気体であり、その二次元系ではKosterlitz-Thouless転移と呼ばれる二次元超流動転移を起こす事が期待されている。我々のグループは、二次元H↓のESR信号を直接観測し、二次元超流動密度やESR信号の線幅の変化を通じて、この転移を直接検証することを目指している。これまでは、磁場の不均一に起因する広い線幅と、感度不足のため二次元H↓のESR信号を直接観測するには至っていない。感度に関しては120GHz近傍のミリ波受信機として低温部でジョセフソン素子を用いたSISミキサーを使用し、高感度に成功している。今回我々はミラー型共振器の曲率半径を小型にすることで三次元H↓のESR信号の線幅を3.2Gaussから0.055Gaussにまで細くすることが出来た。これは二次元H↓の信号を観測するには十分な線幅である。また線幅が細くなったことで、今までは見ることの出来なかった固体水素中の原子状水素の信号と思われるピークを発見したので、これらのことについて発表する。

P04 偏極原子状水素とヘリウム液面電子共存系におけるエッジマグネトプラズモンの観測

山中修司^a, 新井敏一^a, 矢山英樹^b, 福田昭^a, 澤田安樹^a

^a京都大学低温物質科学研究センター、^b九州大学理学院物理学部門

E-mail: yamanaka@scphys.kyoto-u.ac.jp

我々の実験の目的は、液面電子を使って二次元偏極原子状水素を検出することである。そのために、電子と原子状水素の共存系をヘリウム液面上に作り、液面電子のエッジマグネトプラズモン(EMP) という電子密度の揺らぎのモードの周波数と減衰を調べた。共存系は、先に用意した液面電子系に一定の割合で水素を供給し続けることによって作った。垂直磁場は5.3 T、温度は0.17 K に保った。図1は、パルスで励起したEMP 振動の減衰をプロットしたグラフである。原子状水素の存在している場合としていない場合において、周波数が同じであることから、これらの液面電子密度は等しい。共存系の場合には、EMPの減衰が強くなっているのがわかる。この顕著な違いは、電子が原子状水素によって散乱されることに起因しており、原子状水素の存在が反映されたものである。

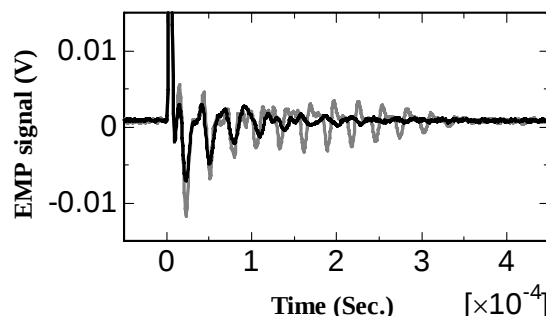


図1. エッジマグネトプラズモンの減衰振動。薄い方が電子のみの場合、濃い方が原子状水素と電子の共存系の場合である。

P05 三角格子反強磁性体NiGa₂S₄の^{69,71}Ga-NMR/NQRによる研究

竹谷英朗^a, 北川健太郎^a, 石田憲二^a, 南部雄亮^a, 小沼圭介^a, 中辻知^a, 前野悦輝^{a,b}

^a京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b京都大学 国際融合創造センター

E-mail: htakeya@scphys.kyoto-u.ac.jp

最近我々の研究グループが物性開発したNiGa₂S₄は低温まで三角格子の対称性を正確に保ち続けるS=1の擬二次元三角格子反強磁性体として注目を集めている。

今回、ミクロな視点からNiGa₂S₄の基底状態や、低温におけるスピンの動的振る舞いを調べることを目的としてGa核における核磁気共鳴(NMR)と核四重極共鳴(NQR)の測定を行った。10 K以上の高温では2つのGaサイトが存在し、それぞれに対してスピン - 格子緩和率 $1/T_1$ を測定したところ、どちらのサイトについても比熱がピークを持つ10 K付近に向かって発散的な振る舞いを観測した(図)。10 Kから1 Kの温度域では緩和時間が短くなりすぎたためGa-NQRの信号が観測できなかった。1 K以下の低温では不均一な内部磁場の発生を示すスペクトル線幅の広がりを観測し、 $1/T_1$ の温度変化がtwo-magnonの緩和過程でよく説明できること(図中の点線)から、二次元格子上でincommensurateな磁気秩序状態が実現していると考えられる。

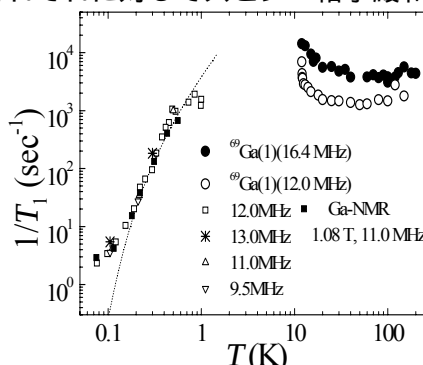


図:Ga-NQR/NMRによる $1/T_1$ の温度依存性

P06 ヘビーフェルミオン三角格子磁性体UNi₄Bのフラストレート磁性

福岡幸太郎^a, 伊藤哲明^a, 小山田明^a, 前川寛^a, 李徳新^b

^a京都大学 人間・環境学研究院

^b東北大学 金属材料学研究所

E-mail: 小山田明 <f52017@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp>

UNi₄Bは、磁気モーメントをもつUが三角格子を形成している反強磁性体であり、フラストレーションとヘビーフェルミオンの振る舞いが共存する系として興味深い。低温で部分無秩序状態が実現していると報告されているが、このような磁気秩序状態の原因については遍歴モデルと局在モデルの2通りの解釈がされている。われわれは部分無秩序状態の原因やスピンドYNAMICSを調べるためにNMRを用いて、1.3 K ~ 100 Kの温度域で¹¹B核の核スピン緩和時間とスペクトルを測定した。

図1、2はそれぞれ縦緩和率 $1/T_1$ とスペクトルの温度変化を示している。スペクトル幅は20 K以下で急激に広がり、また、縦緩和率も20 Kで急峻なピークを示しており、20 Kが磁気相転移点であることが分かる。10 K以下では、遍歴電子のゆらぎによる $T_1 T = \text{一定}$ 、が観測され、また転移点より高温側では緩和率は一定値に近づく傾向がある。このことにより、転移点以上では局在モーメントが存在しているものの、転移点以下では局在モーメントが消失し、遍歴的に振舞っていることが分かる。

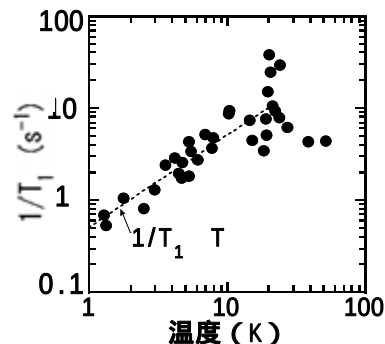


図1 $1/T_1$ の温度変化

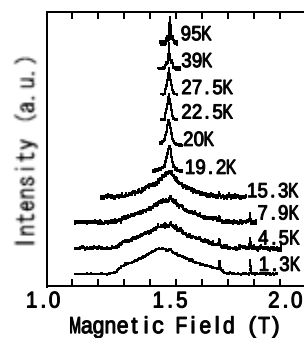


図2 スペクトルの温度変化

P07 二次元三角格子反強磁性体におけるスピン無秩序状態

南部 雄亮^a, 小沼 圭介^a, 中辻 知^a, 前野 悦輝^{a,b}

^a京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b京都大学 国際融合創造センター

E-mail: nambu@scphys.kyoto-u.ac.jp

磁気秩序を抑えることによって低温で現れる新奇な量子状態の可能性から、幾何学的フラストレーションを持つ磁性体が注目されている。その中では三角格子反強磁性体が最も基礎的である。最近我々はバルクの $S = 1$ 三角格子反強磁性体を NiGa_2S_4 (図 1)において初めて実現した。 NiGa_2S_4 では 80 K程度の反強磁性的相互作用に関わらず、磁化率、比熱、中性子回折の結果からこれまでの測定温度下限の 0.35 Kまで磁気的長距離秩序が存在せず(図 2)、低温までスピンが無秩序な状態に留まっていることを見出した。また、10 K以下で短距離相関を持ち、低温での比熱の温度の二乗に比例した振る舞いと絶対零度近傍での有限磁化率から、二次元のスピン系におけるコヒーレントな線形分散の存在が明らかになった。この発表では多結晶、単結晶の実験結果、不純物効果についても述べたい。

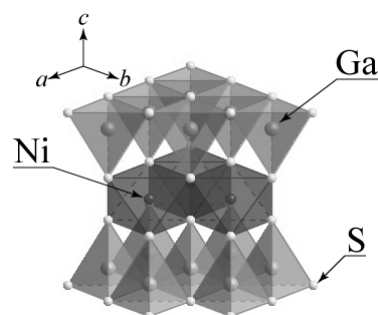


図 1: NiGa_2S_4 の構造

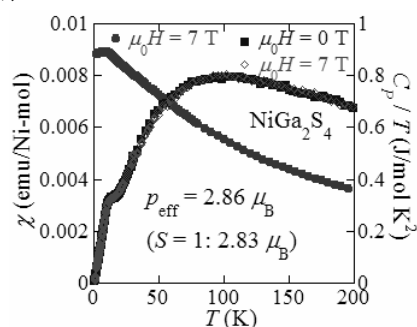


図 2: NiGa_2S_4 の磁化率(χ)と比熱(C_P)の温度依存性

P08 2層系量子ホール効果研究の新展開

澤田 安樹^a, 福田 昭^a, 岩田 一樹^b, 新井 敏一^a

^a京都大学 低温物質科学研究センター

^b京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

E-mail: sawada@scphys.kyoto-u.ac.jp

半導体ヘテロ界面に形成される 2 次元電子系は、低温・強磁場の下で量子ホール効果と呼ばれる特異な量子現象を示す。特に、2 次元電子系を 2 枚近接配置した 2 層系量子ホール状態は、量子ホール状態における巨視的なコヒーレンスの発生が期待できる¹。例えば、2 層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態において、電子の 2 層間でのトンネリングコンダクタンスを観測した実験や、電子とホールの対がなすエキシトンの超流動相の発見²は、2 層系量子ホール状態のコヒーレンスの存在を示唆している。しかし巨視的なコヒーレンスの存在を確認付けるには、巨視的なコヒーレンス状態特有の現象を捉える必要がある。本研究室では、マイクロ波を半導体 2 次元電子系試料に照射することにより、ACジョセフソン効果を観測し、2 層系量子ホール効果における巨視的なコヒーレンス存在の検証を目的とするため、超低温においてマイクロ波を導入できる実験装置を急ピッチで整備している。本交流会では、2 層系量子ホール効果におけるマイクロ波を用いた予備実験結果及び新しい実験計画を報告するとともに、現時点での新実験室の整備状況についても報告を行う予定である。

1. A. Sawada et al. *Phys. Rev. Lett.* **80**, 4534(1998).

2. J.P. Eisenstein and A.H. MacDonald, *Nature* **432**, 691 (2004).

P09 2層系整数量子ホール状態の相図

福田昭^a, 澤田安樹^a, 寺澤大樹^b, 森野正行^b, 岩田一樹^c, 古住信介^b, 江澤潤一^b

^a京都大学 低温物質科学研究センター, ^b東北大学 理学研究科 物理学専攻

^c京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

E-mail: fukuda@scphys.kyoto-u.ac.jp

2次元電子系を2枚近接配置した2層系量子ホール効果は、通常の電子スピン自由度の他に、“層”の自由度（擬スピン自由度）が加わる。これらの自由度は、SU(4)対称群で記述され、磁場によるゼーマンエネルギーと層間および層内の電子間多体相互作用が複雑に絡み合った結果、多彩な量子相を呈することが期待される。2層系 $\nu = 1$ 量子ホール状態では、擬スピンのドメイン構造をなすソリトン格子相の存在を示す磁気抵抗の極大が観測された。また、2層系 $\nu = 2$ 量子ホール状態では、スピンの反強磁性的な振舞いを示す傾角反強磁性相の存在を明らかにした¹。本交流会では、2層系 $\nu = 1$ 及び $\nu = 2$ 量子ホール状態において電子密度や2層間の電子密度差、試料に加える横磁場に対して相図を作成し、その結果得られた2層系量子ホール状態に対して得られた新たな知見について報告を行う。

1. A. Fukuda *et al.*, To be published in Phys. Rev. B, cond-mat/0601654

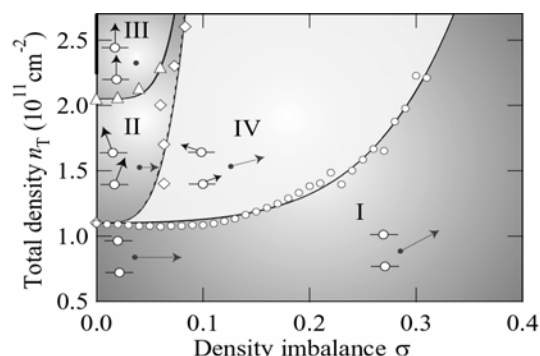


図 2 層系 $\nu = 2$ 量子ホール状態の相図

P10 重い電子系超伝導体CeCoIn₅の超伝導状態における異常輸送現象

笠原 裕一^a, 仲島 康行^b, 井澤公一^{b,c}, 松田 祐司^{a,b}, 宍戸寛明^d, 接待力生^d, 大貫惇睦^d

^a京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b東京大学物性研究所, ^cCEA-Grenoble, ^d大阪大学 理学研究科

E-mail: kasahara@scphys.kyoto-u.ac.jp

我々は重い電子系超伝導状態CeCoIn₅において熱ホール伝導率 κ_{xy} の測定を行い、超伝導状態における準粒子輸送特性を詳細に調べた。その結果、超伝導転移温度以下において準粒子の平均自由行程が急激に増加していることが分かった。しかしながらこの増加はわずかな磁場によって急激に抑制される。渦糸による散乱が考えられるが、通常の機構では説明がつかない。さらに κ_{xy} から非局在準粒子のDOSがd波超伝導体に期待される $H^{1/2}$ 依存性を示すことがCeCoIn₅においてはじめて見出された。またCeCoIn₅は渦糸コア内の離散的な状態が支配的となる新しい領域、スーパークリーン領域にあることが分かった。これらの結果はCeCoIn₅の超伝導状態がこれまでにない特異なものであることを示している。

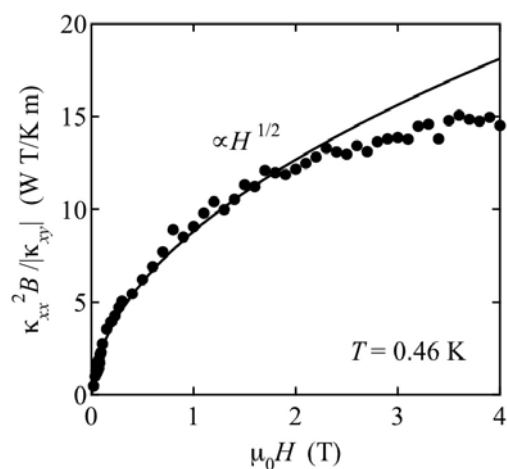


図 1: $\kappa_{xx}^2 B / |\kappa_{xy}|$ 非局在準粒子のDOSの磁場依存性。

P11 Ni₃AlとYCo₂における量子臨界点近傍の非Fermi 液体振る舞い

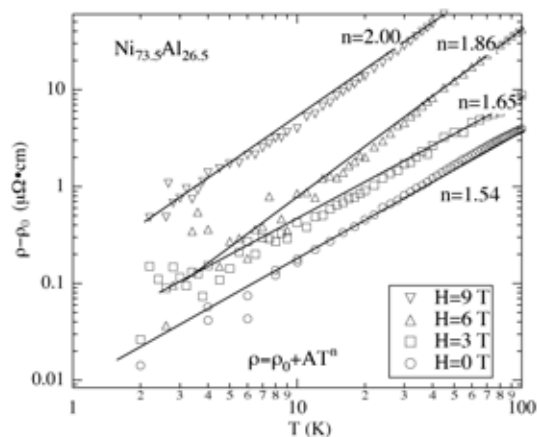
張 維^{a,b}, 吉村 一良^b, 方 明虎^c, 小野 輝男^d,

^a京都大学 低温物質科学研究センター, ^b京都大学 理学研究科 化学専攻

^c浙江大学 理学研究科 物理専攻, ^d京都大学 化学研究所

E-mail : wzhang@kuchem.kyoto-u.ac.jp

弱い強磁性体MnSi, ZrZn₂の圧力効果において、強磁性転移温度 $T_c = 0$ Kとなる量子臨界点近傍での非Fermi液体的振る舞いや超伝導が発見され、注目を集めている。不純物効果を用いても量子臨界点に到達することができ、置換によって強磁性—常磁性転移が見られる。Ni_{3-x}Al_{1+x}とY(Co_{1-x}Al_x)₂は置換効果によって量子臨界現象を調べるのに理想的な系であると考えられる。量子臨界点近傍での物性を調べるために、我々はこれらの遷移金属化合物の臨界点近傍の試料を作成し、磁化率と磁場中電気抵抗を測定した。図にNi_{73.5}Al_{26.5}の電気抵抗率の温度依存性を示した。ゼロ磁場下の電気抵抗は非Fermi液体振る舞いであることが明らかになった。高磁場で電気抵抗の温度依存性はFermi液体的な振る舞いになる傾向が見られるが、これは磁場により、スピン揺らぎが抑えられ、非Fermi液体からFermi液体に変化することによって考えられる。



Ni_{73.5}Al_{26.5}の磁場中電気抵抗率の温度依存性

P12 スピン三重項超伝導体Sr₂RuO₄のRuO₂面内低磁場下におけるナイトシフトの測定

村川 寛^a, 石田憲二^a, 北川健太郎^a, 毛志強^a, 前野悦輝^{a,b}

^a京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b京都大学 国際融合創造センター

E-mail : mura@scphys.kyoto-u.ac.jp

Sr₂RuO₄では、RuO₂面内の 3 kOe以上の磁場中における¹⁷Oや⁹⁹Ru核のナイトシフトの測定の結果、スピン帯磁率は超伝導状態でも変化しないことが報告されている。最近さらに測定条件を広げ、c軸方向の 200 Oe以上の磁場中においてもスピン帯磁率が変化しないという結果を得た。いずれの実験結果も、クーパー対のスピンは印加磁場方向を向いていることを示唆するものであり、超伝導状態のスピン帯磁率の振る舞いに異方性は観測されていない。一般にスピン三重項超伝導体において、クーパー対のスピンと軌道との相互作用が強い場合には、超伝導状態のナイトシフトの振る舞いに異方性が見られるはずである。これまでの実験結果を考慮すると、この相互作用のエネルギーは非常に小さいと考えられる。そこで我々は、ゼロ磁場におけるクーパー対のスピンの方向を実験的に確認するために、RuO₂面内に平行に 3 kOe以下の低磁場を印加して¹⁰¹Ru核のナイトシフトの測定を行っている。今回の測定では、横磁場超伝導マグネットと希釈冷凍機とを組み合わせることにより、低温で 0.5°の精度で測定試料を磁場方向に対して制御できるようになった。その状態の下で測定したナイトシフトの結果について発表する予定である。

P13 新奇三角格子超伝導体 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ における ^{59}Co , ^{17}O -NMR

井原慶彦^a, 石田憲二^a, 竹谷英郎^a, 道岡千城^b, 加藤正樹^b, 伊藤豊^b, 吉村一良^b, 高田和典^c, 佐々木高義^c, 桜井裕也^d, 室町英治^d

^a京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b京都大学 理学研究科 化学専攻 化学教室

^c物質・材料研究機構 物質研究所

^d物質・材料研究機構 超伝導材料研究センター

E-mail: ihara@scphys.kyoto-u.ac.jp

層状三角格子超伝導体 $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の超伝導は2002年にtakada *et al.*により初めて発現が観測された。この超伝導体は優れた熱電材料として注目を浴びていた母物質 Na_xCoO_2 の層間に水分子を導入することによって発現する。また、我々は更に水分子を大量に導入した試料において磁気転移を観測した(図)。この超伝導は銅酸化物超伝導体やルテニウム酸化物超伝導体と並ぶ強相関系超伝導体として理解されることが考えられる。

我々は $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ において ^{59}Co 核と ^{17}O 核のNMR実験を行い、この物質における常伝導状態、超伝導状態の性質を微視的側面から調べた。ポスターではこれまでの実験で明らかになった常伝導状態の磁気的性質や、超伝導対の対称性について主に発表する。

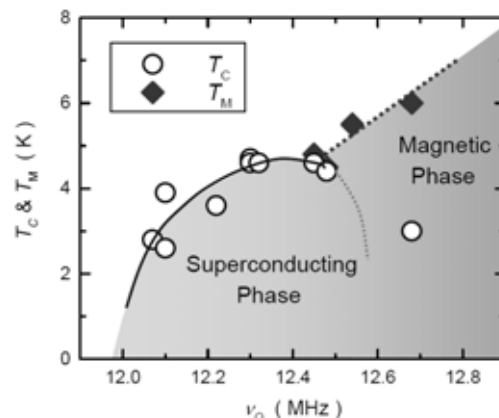


図: $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ の相図

P14 擬一次元圧力誘起超伝導物質 $\beta\text{-AgV}_6\text{O}_{15}$ の常圧でのNMR

久田 旭彦^a, 藤原 直樹^a

^a京都大学 人間・環境学研究科 相関環境学専攻

E-mail: A.Hisada@s01.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

バナジウム酸化物 $\beta\text{-AV}_6\text{O}_{15}$ ($A=\text{Li}, \text{Na}, \text{Ag}$)は、電荷秩序転移を伴う金属-絶縁体転移や、反強磁性転移、圧力誘起超伝導を示すことが知られている。この物質のV原子は、結晶学的に三種類存在する。超伝導発現機構の解明には、これらのサイトの電荷秩序状態についての微視的情報を得ることが重要である。

我々は $\beta\text{-AgV}_6\text{O}_{15}$ 単結晶についての ^{51}V -NMRを行い、30K、100K、200K付近において、NMRスペクトルの明らかな変化を確認した。これらの温度は、帯磁率、抵抗率、X線回折の測定結果から得られる、反強磁性転移温度、電荷秩序転移温度、Ag原子の再配列温度にそれぞれ対応している。当日は、こうしたスペクトルから得られるVサイトの電荷状態について紹介する。

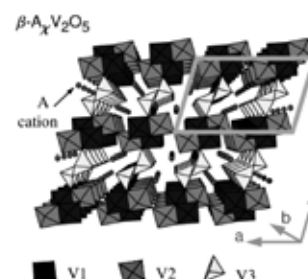


図1 $\beta\text{-AV}_6\text{O}_{15}$ の結晶構造

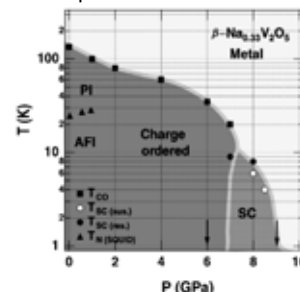


図2 $\beta\text{-AV}_6\text{O}_{15}$ の電子相図

参考文献

[1] T. Yamauchi, Y. Ueda and N. Môri, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 057002-1.

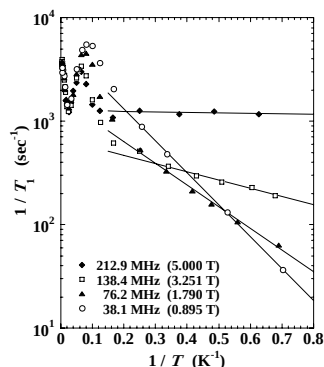
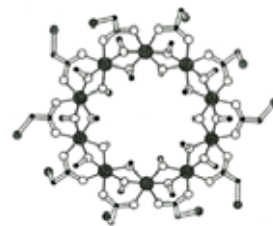
P15 反強磁性リング分子磁性体 Fe10、Fe12 のスピンダイナミクス

前川 寛, 嵯峨根 多美, 伊藤 哲明, 小山田 明

京都大学 人間・環境学研究科 相関環境学専攻

E-mail: smaegawa@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

金属錯体Fe10やFe12分子はスピン $s=5/2$ を持つ10個または12個の Fe^{3+} がリング状に並んだ反強磁性体である。分子間の磁気的相互作用は極めて弱いため、各分子は独立したナノスケール単分子磁石、0次元磁性体と見なすことができ、古典性と量子性の中間のメゾスコピックな振舞の発現が期待される。また磁気メモリー等、工業的応用も期待される。我々はこれらの低エネルギースピンダイナミクスを明らかにするために、磁化率と核磁気共鳴(NMR)の実験を行っている。



Fe10の磁化率は60 K付近でピークを示した後、温度低下とともに零に向かって減少し、基底状態が $S=0$ であることを示している。磁化率の高温展開および厳密解で交換相互作用の大きさを見積もった。図2は緩和率 T_1^{-1} を逆温度 $1/T$ でプロットしたものである。高温域では T_1^{-1} は磁化率と温度の積に比例し、連続的励起エネルギーの存在を示している。緩和率は $T \sim J/k_B$ 付近でピークを示し、低温域では離散的エネルギー準位を反映して、熱活性化型の温度依存性を示す。ギャップエネルギーは $S=0$ の基底状態と $S=1$ の励起状態間のエネルギーに相当し、その磁場依存性を明らかにした。Fe10とFe12との比較検討を行っている。

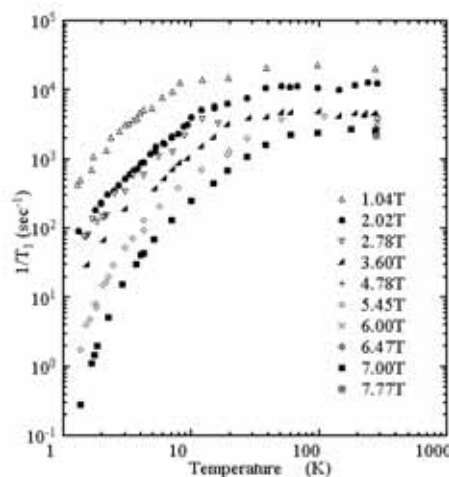
P16 フェリリング分子磁性体 Mn6R6 のスピンダイナミクス

伊藤哲明, 舟橋修一, 小山田明, 前川寛, 藤田健一, 雨澤浩史, 山口良平

京都大学 人間・環境学研究科 相関環境学専攻

E-mail: tetsuaki@phys.h.kyoto-u.ac.jp

$[\text{Mn}(\text{C}_5\text{HF}_6\text{O}_2)_2\text{C}_3\text{N}_2\text{O}_2(\text{CH}_3)_4\text{C}_6\text{H}_5]_6$ (略称Mn6R6)はスピン $5/2$ をもつ6個の Mn^{2+} とスピン $1/2$ を持つ6個のラジカルとが交互に円環状に並び、それぞれが反強磁性的に交換相互作用 $J=57\text{K}$ で結合している。リング間の磁気的相互作用は非常に小さく、基底状態は合成スピン $S=12$ のナノサイズフェリリング磁性体と見なすことができる。低エネルギー状態やスピンダイナミクスを解明するために1.5-300Kの温度域、1-8Tの磁場域で ^1H -NMRのスピン格子緩和率 T_1^{-1} の測定を行った。



5K以下では、 $T_1^{-1} \propto \exp(-\Delta/k_B T)$ を示し、急激に変化している。これは合成スピン $S=12$ の離散的なエネルギーの系での、異方性 D と試料が粉末であることを考慮した最低エネルギーと第一励起エネルギーとのギャップ Δ による緩和機構として説明ができる。5K以上の温度域の T_1^{-1} は、単調に増加し、50K以上で一定値に近づく。この温度域における T_1^{-1} は、通常の磁性体における高温での緩和率とは異なり磁場依存性が残っていて、 $T_1^{-1} \propto \omega^{-1}$ と磁場に反比例している。これはリングであるがゆえに、スピン相関が減衰せずリング中に長時間とどまっているためであり、そのふるまいに興味をもたれる。

P17 s=1/2 量子スピンかごめ格子磁性体の低エネルギー励起

加納 聖土, 鍛冶 亮佑, 伊藤 哲明, 小山田 明, 前川 寛, 藤田 健一, 山口 良平

京都大学 人間・環境学研究科 相関環境学専攻

E-mail : kanou@seiji.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

反強磁性的な相互作用をする磁性イオンが 2 つある場合、スピンの状態は 1 つに定まるがスピンの 3 つある場合はユニークに決定することができず不安定な状態になってしまう。この現象はスピンフラストレーションと呼ばれている。

我々はこのフラストレーション効果に量子効果が加わる量子スピンかごめ格子磁性体の候補物質として、 $s=1/2$ の Cu^{2+} イオンがかごめ格子を形成している金属錯体化合物 $[\text{Cu}_3(\text{titmb})_2(\text{CH}_3\text{CO}_2)_6] \cdot \text{H}_2\text{O}$ (略称 Cu-titmb) の試料を合成し、SQUID による磁化測定と核磁気共鳴 (NMR) 法により低温での研究を行っている。

スピン・格子緩和率 T_1^{-1} は、室温から 20 K 程度までは温度及び磁場に依存せず一定で、緩和は高温領域での常磁性的な揺らぎとして理解される。図 1 は緩和率に対する温度の逆数の依存性を示した図である。低温域では急激に減少し、熱励起型の式 $T_1^{-1} = \exp(-\Delta/k_B T)$ で表現される。このことからエネルギーギャップ Δ の磁場依存性を求めると、3.2 T ~ 4.5 T, 5.3 T ~ 6.5 T にステップ状の構造が存在することが見出され、何らかの特異なエネルギー構造の存在を示唆しており、非常に興味深い。

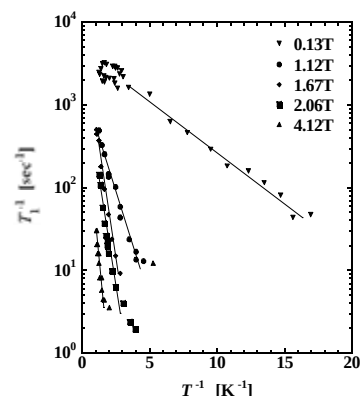


図1 T_1^{-1} の温度の逆数依存性

P18 非対称配位子を用いた Cu(II) 配位高分子の構造とフェリ磁性的挙動

米田 宏, 大場 正昭, 北川 進

京都大学 工学研究科 合成・生物化学専攻 機能化学講座

E-mail : kyonedat@t05.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

<序> 近年、多孔性配位高分子の研究において、ゲスト分子の吸脱着に加えて、中心金属の電子状態を生かしたホスト骨格の多機能化が注目を集めている。本研究では、多核錯体をユニットに用いることで、高いスピン密度により磁気秩序を示す配位高分子の構築を試みた。今回は、非対称型架橋配位子 H_3L

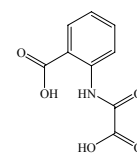


Fig.1 H_3L

(2-(oxalylamino)benzoic acid) (Fig. 1) を用いた Cu(II) 錯体 $[\text{Cu}\{\text{Cu}(\text{L})(\text{H}_2\text{O})\}_2]$ (1) の集積構造と磁性について報告する。

<結果と考察> X線構造解析の結果より、錯体 (1) は Cu の面内に L^3 -の三座の NON サイトが配位した $[\text{Cu}(\text{L})(\text{H}_2\text{O})]^-$ 2 分子が、オキサマト架橋により Cu に結合して、 $\text{Cu} : \text{L} = 3:2$ の 3 核ユニット構造を形成し、さらに隣接ユニットのカルボキシル基が

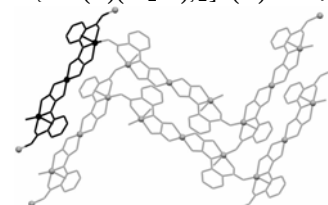


Fig. 2 錯体(1)の集積構造

$[\text{Cu}(\text{L})(\text{H}_2\text{O})]^-$ の面内に syn 型で配位することで 2-D シート構造を構築していた (Fig. 2)。磁化率の温度依存において、2 K 付近で秩序磁性の傾向が観測された。これは、反強磁性的にカップリングした三核ユニットの残留スピン ($S = 1/2$) が、anti-syn 型カルボキシル架橋を介した強磁性的相互作用により整列したためと考えられる。ホモメタルによるフェリ磁性の傾向は、飽和磁化の値 (1.1 $\text{N}\beta$)、飽和曲線及び交流磁化の結果からも支持された。

P19 La-NMR, Sb-NQRによる充填スクッテルダイトLaOs₄Sb₁₂における

ラトリングの研究

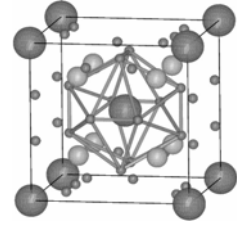
中井 祐介^a, 石田 憲二^a, 菅原 仁^b, 菊地 大輔^c, 佐藤 英行^c

^a京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b徳島大学 総合科学部

^c首都大学東京 理学研究科

E-mail : nakai@scphys.kyoto-u.ac.jp



充填スクッテルダイト化合物 RT_4X_{12} (R ;希土類元素, T ;遷移元素, X ;プニクトゲン元素) は右上図のようなPやSb等のプニクトゲン元素から成るカゴ状の結晶構造をもち、そのカゴの中に希土類元素が存在するという特徴的構造を持つ。そのカゴが大きいために希土類と周りの元素との相互作用が弱く、希土類元素は比較的自由に振動し、局所的なフォノンモード(Einsteinモード)を示す。この希土類元素の運動はラトリングと呼ばれ、充填スクッテルダイトで実現されている低い熱伝導率の原因であると考えられている。しかし実験的検証が難しいためにラトリングの微視的性質についてはほとんどわかっていない。

そこで我々は、微視的観点から希土類原子のラトリングを調べるためにLaOs₄Sb₁₂においてLa-NMR、Sb-NQRを行なった。LaサイトとSbサイトで $1/T_1T$ の温度依存性が異なり、Laサイトにのみ50K付近にブロードなピークが見られた。またLa-NMRスペクトルのすそが100K付近で広がり始め、50K付近で一定値に落ち着くのが観測された。これらの実験結果はLa原子がカゴの中のオフセンター位置にポテンシャル極小点をもつオフセンター運動をしており、そのオフセンター運動による電場勾配のゆらぎが存在し、温度低下とともにその運動が凍結することにより、Laサイトに有限の電場勾配が現れることを示している。

発表では実験の詳細とラトリングに起因するアインシュタイン振動に基づいたモデルでLaサイトの $1/T_1T$ の振る舞いを詳細に議論する予定である。

P20 Sr₂RuO₄-Sr₃Ru₂O₇共晶体における超伝導

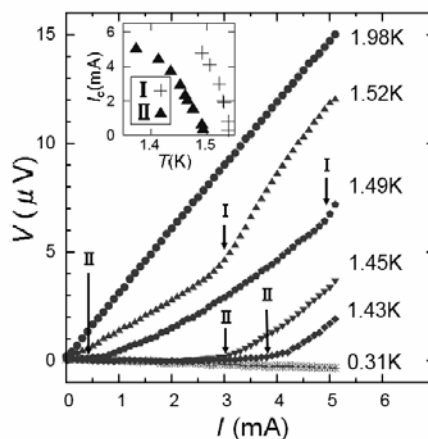
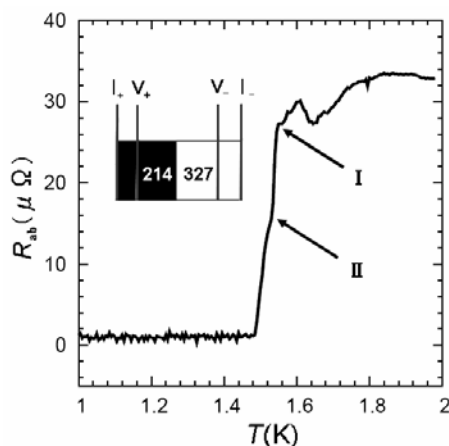
橘高 俊一郎^A, 房登 真司^A, 矢口 宏^A, 米澤 進吾^A, 前野 悦輝^{A,B},

R. Fittipaldi^{A,B,C}, and A. Vecchione^{A,B,C}

京大院理^A、京大国際融合創造セ^B、Univ. of Salerno^C

E-mail : kittaka@scphys.kyoto-u.ac.jp

我々はSr₂RuO₄とSr₃Ru₂O₇の共晶体の単結晶育成に成功し、その超伝導性を研究している。Sr₂RuO₄は $T_C \approx 1.5$ Kの超伝導体であるのに対して、Sr₃Ru₂O₇は低温まで超伝導性を示さないことが知られている。しかし、共晶中のSr₃Ru₂O₇部分において超伝導性が観測された。電気抵抗の温度依存性のグラフからはバルクのSr₂RuO₄によると思われる超伝導転移の他に転移が確認できる。交流磁化率等の測定結果もふまえて議論する。



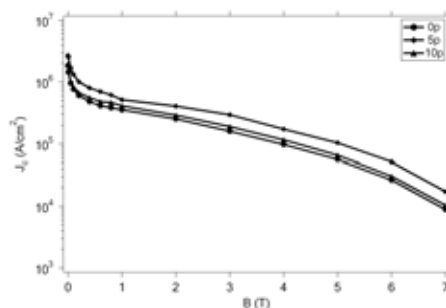
P21 Critical current enhancement in PLD $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films using artificial pinning centers

P Mele^{1,7}, K Matsumoto^{1,7}, T Horide^{1,7}, O Miura^{2,7}, A Ichinose^{3,7}, M Mukaida^{4,7}, Y Yoshida^{5,7}, S Horii^{6,7}

¹Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan; ²Tokyo Metropolitan University, Tokyo 192-0364, Japan; CRIEPI, 2-6-1 Nagasaka, Yokosuka 240-0196, Japan; ⁴Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan; ⁵Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan; ⁶University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan; ⁷CREST-JST, Saitama 332-0012, Japan

E-mail : pmele@htsc.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

For wide applications of YBCO high temperature superconductors to electric devices, it is necessary to obtain high J_c at the liquid nitrogen temperature and under magnetic fields. We introduced high-density columnar defects as artificial pinning centers (APC s) of the quantized vortices into YBCO films, during the film deposition procedure. APC s were introduced perpendicular to the film surface by using the distributed nano-sized Y_2O_3 islands prepared on SrTiO_3 (100) substrates by PLD. The Y_2O_3 islands obtained with 5 laser pulses have a mean diameter of 20 nm, an height of 4 nm and their density is $200 \mu\text{m}^{-2}$. In comparison with the pure YBCO film, the best performance among the APC`s samples was obtained on 5 pulse sample. As shown in the figure, J_c at 77K was enhanced by linear defects from $1.8\text{MA}/\text{cm}^2$ to $2.7\text{MA}/\text{cm}^2$ (self field) and from $0.06\text{MA}/\text{cm}^2$ to $0.10\text{MA}/\text{cm}^2$ ($H=5\text{T}$) even when both films were prepared on the same deposition conditions.



P22 YBCO 薄膜における単一粒界の臨界電流密度に及ぼす影響

堀出 朋哉, 松本 要 京都大学 工学研究科 材料工学専攻

E-mail : tomoya.horide@t04.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

臨界電流密度(J_c)は $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)薄膜の線材応用において非常に重要である。YBCO 薄膜の J_c はナノスケールの組織に非常に強く影響を受けるため、そのナノ組織の制御が盛んに研究されている。本研究ではYBCO薄膜に存在する小傾角粒界の J_c に及ぼす影響について検討した。

Pulsed laser depositionにより[001]バイクリスタル SrTiO_3 基板上に 200-380nmのYBCO薄膜を蒸着した。バイクリスタルの傾角は $2, 5, 10^\circ$ とした。蒸着したYBCO薄膜の J_c 及び I - V カーブを測定した。

バイクリスタルSTO(2°)上に作製したYBCOの J_c はどの磁場においても単結晶STO上に作製したYBCO薄膜の J_c とほぼ一致した。一方バイクリスタルSTO($5^\circ, 10^\circ$)上に作製したYBCOの J_c は単結晶STO上のYBCOの J_c に比べ大きく低下した。さらに J_c が低下した2つの試料の I - V カーブは異なる振る舞いを示した。傾角の異なる3つの粒界でそれぞれことなる振る舞いが見られたのはそこに存在する量子化磁束が粒界傾角とともに変化したためであると考えられる。

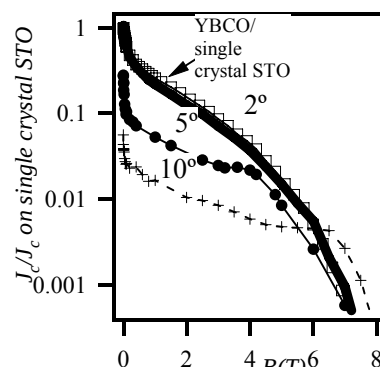


Figure Magnetic field dependence of J_c in YBCO on bicrystal STO and single crystal STO

P23 $\text{LaNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ 強磁性絶縁膜を障壁としたトンネル型スピンフィルター 効果の検証

橋坂 昌幸^{a,b}, 菅 大介^c, 増野 敦信^c, 寺嶋 孝仁^b, 壬生 攻^d

^a京都大学理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b京都大学低温物質科学研究センター, ^c京都大学化学研究所, ^d名古屋工業大学

E-mail: hashisaka@ssc1.kuicr.kyoto-u.ac.jp

強磁性絶縁体を障壁とするトンネル接合は、障壁層の電子状態密度の磁気分裂により、特定方向のスピンのみを選択的に透過させる。このスピンフィルター効果の検証は、これまでにEuカルコゲナイドを障壁層とした接合での液体He温度程度の極低温下の実験に限られていた。これは、高い強磁性転移温度 (T_C) を持つ強磁性絶縁体の均質で平坦な超薄膜を作製することが非常に困難であるためである。最近我々は、室温付近まで強磁性を示す絶縁体 $\text{LaNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ に着目し、レーザーアブレーション法によってこの物質の良質な強磁性絶縁膜を作製することに成功した。この強磁性絶縁膜を用いて非磁性金属 / 強磁性絶縁体 / 強磁性金属トンネル接合を作製し磁気抵抗効果を測定したところ、この接合が 200 K 以上までスピンフィルター効果を示すことを見出した。本講演ではこのトンネル接合の電気伝導特性について詳細に報告する。

P24 π -d系錯体 $(\text{DIETSe})_2\text{FeCl}_4$ の異常な輸送特性

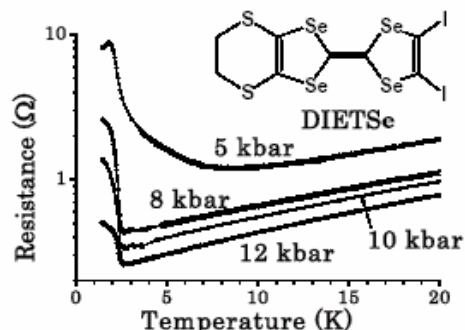
川嶋 智仁^a, 前里 光彦^a, 斎藤 軍治^a, 白旗 崇^b, 木舩 愛^b, 今久保 達郎^b

^a京都大学 理学研究科 化学専攻

^b理化学研究所 今久保独立主幹研究ユニット

E-mail: cihma@kuchem.kyoto-u.ac.jp

遍歴 π 電子と局在 d 電子の間のヨウ素を介した相互作用によってできる新たな π -d 複合系の構築を目的として、有機ドナー DIETSe と局在スピンを持ったアニオンからなる擬 1 次元伝導体 $(\text{DIETSe})_2\text{FeCl}_4$ が開発された。今回、この Fe 塩および Fe 塩と同型構造をもつ Ga 塩の 2 種類について、低温 (~ 0.5 K)、高圧下 (静水圧、 ~ 12 kbar) および磁場下 (~ 12 T) で伝導度測定を行った。双方とも常圧では約 11 K で金属絶縁体転移を示す。しかし、非磁性の GaCl_4^- アニオンを含む Ga 塩に対し、Fe 塩では約 2.5 K 以下で抵抗の温度依存性に、局在スピンの反強磁性転移に伴った異常な振る舞いが見られた。また 1.5 K での抵抗の磁場強度依存性や磁場角度依存性においても、Fe 塩では Ga 塩に見られなかった異常な振る舞いが観測された。擬 1 次元伝導体における電子系の低次元不安定性と局在スピンの磁気秩序が共存していることが、これらの特異な磁気輸送現象の原因と考えられる。



静水圧下における $(\text{DIETSe})_2\text{FeCl}_4$ の電気抵抗の温度依存性

P25 Ti4O7における金属絶縁体転移の光学的研究

上野若菜, 渡辺雅之, 林哲介

京都大学 人間・環境学研究科

E-mail: j51061@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp

Ti4O7はマグネリ相と呼ばれる化合物の一種であり、約150Kで金属-半導体転移を、約130Kで半導体-半導体転移を起こす。150K以上の高温相では非局在化したチタンの3d電子が電気伝導に寄与して金属的な振る舞いを示す。半導体相に転移すると、2つのTi³⁺イオンが格子変位して共有結合し、2つの電子が結合準位に入る。これは格子歪みを伴った電子2個が対になった状態(バイポーラロン)とみなすことができる。本研究ではTi4O7の相転移による電子状態の変化を実験的に解明することを目的として、反射スペクトルを広いエネルギー領域にわたって調べた。Ti4O7の高温相、中間相、低温相における反射スペクトルを測定すると、各相のスペクトル形状は異なり、その変化は2つの転移温度で突然起きる。高温相のスペクトルは赤外領域では反射率が高く、1.9eVで極小値をとる。また約4eVにピークがある。中間相になると、赤外領域の反射率が減少し、可視域で上昇する。低温相になると、さらに赤外領域の反射率が減少し、4eVのピークは高エネルギー側にシフトする。我々は、反射スペクトルをDrude Modelと2つのLorentz振動子を取り入れて解析を行った。解析の結果、2つの振動子は紫外域と赤外域にあり、低温の相に移り変わると、高エネルギーにシフトしている事が分かった。金属-半導体転移での遷移のシフトは、バイポーラロンが形成されることにより、Tiの3d軌道が分裂してギャップが生じたためであると思われる。

P26 FIB加工したSrTiO₃単結晶をゲート絶縁体に用いたFETの作製とその特性

辻本 吉廣^a, 高野 幹夫^a, 寺嶋 孝仁^b

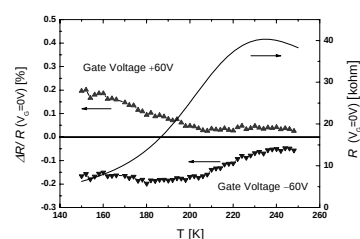
^a京都大学 理学研究科 化学専攻、^b京都大学 低温物質科学研究センター

E-mail: yoshi@msk.kuicr.kyoto-u.ac.jp

緒言 強相関電子系物質からなる電界効果トランジスタ(FET)において、電界効果により磁性や輸送特性などの物性を変化させるためには $10^{21}/\text{cm}^3$ におよぶ大きなキャリア密度の変調が必要になる。そのためには静電容量の大きなゲート絶縁体が必要である。今回、Mn系ペロブスカイト型酸化物($\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3 = \text{LSMO}$)について集束イオンビーム(FIB)により加工して $5\mu\text{m}$ まで薄くすることで静電容量を大きくした常誘電体SrTiO₃(STO)単結晶基板をゲート絶縁体に用いたFETを作製し、その電界効果を調べた結果について報告する。

実験と結果 厚さ $50\mu\text{m}$ のSTO基板の片側をFIBで $5\mu\text{m}$ まで加工した。1000、12時間アニールした後、加工していない側の面に膜厚 3.5nm のLSMO(チャネル)をPLD法で蒸着した。ソース・ドレイン(S-D)電極に金、ゲート電極にPtを各々用いた。

右図に電界効果測定の結果を示す。ゲート電圧を印加しない場合のLSMOの電気抵抗(S-D間)の温度依存性を右縦軸に、ゲート電圧($\pm 60\text{V}$)を印加した場合の抵抗変化率の温度依存性を左縦軸にとる。LSMOのホール濃度の増減に対応して抵抗が変化している。低温に向かって抵抗変化率が増加していくが、これはSTOの誘電率の温度変化に対応していると思われる。



P27 EuTiO₃エピタキシャル薄膜の作製と磁気および輸送特性

釘宮 一真^a, 藤田 晃司^a, 田中 勝久^a, 平尾 一之^a

^a京都大学 工学研究科 材料化学専攻

E-mail : kazuma@collon1.kuic.kyoto-u.ac.jp

ペロブスカイト構造を持つTi酸化物は、エキゾチックな誘電特性を示すことが知られている。例えばBaTiO₃は強誘電体であり、SrTiO₃やCaTiO₃は量子常誘電特性を有している。EuTiO₃も2価のEuと4価のTiを含んだペロブスカイト構造をとり、量子常誘電挙動を示す。他のペロブスカイト酸化物との相違点は、局在した磁性イオン(Eu²⁺)を有していることであり、5.3 Kで反強磁性相へ転移する。またEu²⁺をLa³⁺やGd³⁺のような3価のカチオンで置換したとき、Tiの3d軌道に伝導電子が導入される。伝導電子は局在したスピンと強く相互作用し、Eu²⁺イオン上のスピンは強磁性的に整列する。さらに量子常誘電体であるEuTiO₃の誘電率は磁場に強く依存することが報告されている。そのような興味深い物性にもかかわらず、EuTiO₃薄膜の作製やその物性はほとんど報告されていなかった。それは薄膜を作製する過程で、EuとTiの価数を同時にコントロールする困難さが伴うためである。本研究では磁気および輸送特性を調べるため、PLD法により良質のエピタキシャルEuTiO₃薄膜の作製を試みた。酸素分圧と基板温度を最適化することにより、EuTiO₃薄膜がSrTiO₃(001)面にエピタキシャル成長した。得られた薄膜は金属的挙動を示し、6 Kにキュリー温度をもつ強磁性体であった。そのような電気特性と磁気特性はLaやGdで置換したEuTiO₃における挙動に類似しており、Tiの3d(特に t_{2g})軌道にドーパされた電子を介して、Eu²⁺のスピンが平行に整列するためであると考えられる。

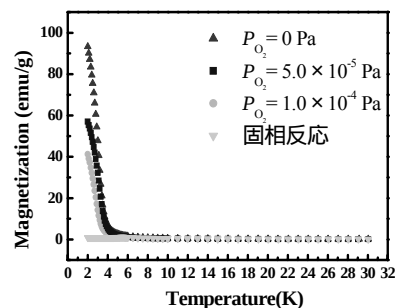


図. EuTiO₃薄膜の磁化の温度依存

P28 擬2次元重い電子系超伝導体CeCoIn₅の薄膜作製

井崎学^a, 加藤智成^a, 松田祐司^a, 芝内孝禎^a, 寺嶋孝仁^b

^a京都大学大学院理学研究科、^b京都大学化学研究所

E-mail : izaki@msk.kuicr.kyoto-u.ac.jp

CeやUを含むいわゆる重い電子系化合物のなかには超伝導を示すものも多い。それらの超伝導体はf電子間の強い相互作用のため従来の超伝導体とは異なる超伝導発現機構を持つと考えられてきた。ここで議論するCeCoIn₅もこのような物質群の1つであり、比熱、NMR、熱伝導などの研究から超伝導ギャップがノードを持ついわゆる異方的超伝導体の一つであると考えられている。CeCoIn₅の特徴は2次元的な電子構造を持ち反強磁性量子臨界点近傍に位置することでありその超伝導対称性の解明は非従来型超伝導体の超伝導発現機構を研究する上で極めて重要となる。またこの物質の超伝導状態ではFFLO状態等のこれまでにない新しい超伝導状態が出現している可能性があり興味深い。超伝導状態を調べる強力な実験手段はトンネル接合等の実験であるがこのためには試料の薄膜化が必要不可欠である。これまで重い電子系の薄膜化はほとんど成功していなかったが、我々はスッパタリング法により3元素を同時に蒸着し、c軸配向膜の作製に成功した。現在はエピタキシャル成長を目標に、分子線エピタキシー法による実験を試みている。今回はその途中経過について報告する。

P29 チタンドープスピネルの光検出磁気共鳴

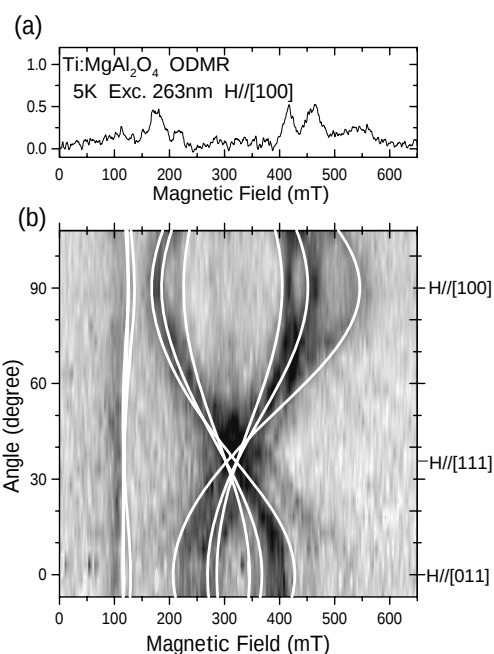
白井 正伸^{a,c}, 田中 耕一郎^{a,c}, 花村 榮一^{b,c}

^a京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b千歳科学技術大学 ^c科学技術振興機構CREST

E-mail: shirai@scphys.kyoto-u.ac.jp

赤外域で発振する超短パルス波長可変レーザーのレーザー媒質として、チタンサファイア($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)が広く用いられている。我々は可視域で発振するレーザー媒質の候補として、緑色の広帯域発光を呈するチタンドープスピネル($\text{Ti}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$)に着目し、その光励起状態の構造を光検出磁気共鳴法(ODMR)を用いて調べた。図にODMRスペクトル(a)およびその角度依存性(b)を示す。これらの結果から、光励起状態は $\text{Ti}^{3+}(S=1/2)$ にトラップされた電子と、 $\langle 100 \rangle$ 方向に隣接する $\text{O}^-(S=1/2)$ にトラップされた正孔のペアからなる、スピン三重項状態であると考えられる。



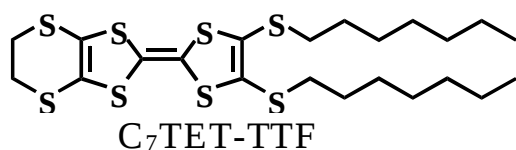
P30 固体液体共存系の特異な電導

大塚 晃弘^{a,b}, 齋藤 軍治^b, 喜納 修^b, 吉田 幸大^b, 矢持 秀起^{a,b}

^a京都大学 低温物質科学研究センター

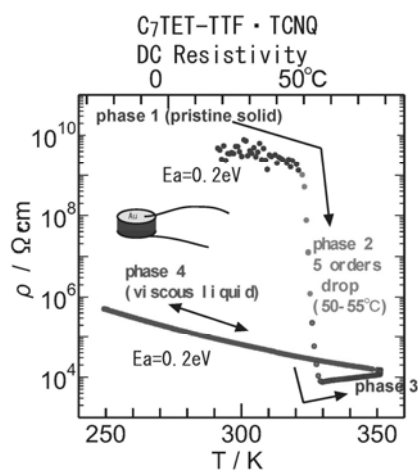
^b京都大学 大学院理学研究科 化学専攻

E-mail: otsuka@kuchem.kyoto-u.ac.jp



融点約 12 の電子供与体(D) $\text{C}_7\text{TET-TTF}$ と、電子受容体(A)TCNQから作製される組成比 1:1 の電荷移動錯体は、層状構造を有する結晶で、基底電子状態は中性である。

この電荷移動錯体は約 55 において出発物質成分(液体Dと微結晶A)に解離すると同時に電気抵抗が5桁減少する(右図)。変化後の電気伝導は、EPR、DC定電圧下の電流値の挙動等から、イオン種の移動によるものではなく、液体Dと微結晶Aの間の電荷移動相互作用で生じるキャリアーによるものと考えている。



P31 有機ラジカル系におけるスピン - 格子緩和時間と スピン - スピン緩和時間の温度依存性

山内 淳, 山路 俊樹

京都大学 理学研究科 化学専攻 電子スピン化学研究室

E-mail : yamauchi@esr.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

電子スピンの緩和時間にはスピン - 格子緩和時間(T_1)とスピン - スピン緩和時間(T_2)がある。緩和時間を詳細に解析することにより、分子物性・分子環境などに関する知見を得ることができる。

そこで、アドバンスド ESR 分光装置であるパルス ESR 装置を用い、低温物質科学研究センターの寒剤を使用することにより、有機ラジカル系のスピンエコーを室温から液体ヘリウム温度領域にかけて観測することに成功した。そして、スピンエコーの時間減衰から見積もられるスピン - 格子緩和時間及びスピン - スピン緩和時間の温度依存性について詳細に解析を行なった。

緩和時間の温度変化において 200K 付近と 100K 付近でミニマムが観測された。これらはそれぞれ分子内の置換基 (*tert*-butyl 基及びメチル基) の束縛回転運動による緩和機構が顕著に表れたものだと考えられる。また、20K 以下の極低温領域では緩和時間の異常な減少が見られた。これは、メチル基の量子力学的トンネル回転による効果であると考えられる。

P32 水チャネルアควアポリン-4 における結晶性アレイと二次元結晶の形成

谷村 幸宏¹, 西川 幸希^{1,2}, 亀川 亜希子^{1,3}, 廣明 洋子^{1,3}, 藤吉 好則¹

¹京都大学 理学研究科 生物科学専攻 生物物理学系 構造生理学

²日本電子, ³ JST・CREST

E-mail : yukihiro@em.biophys.kyoto-u.ac.jp

アควアポリン-4 (AQP4) は脳に優勢的に発現している水チャネルであり、脳内のイオンや水分子のホメオスタシスの制御を担う重要な分子である。AQP4の機能の根幹である水の透過の分子機構を構造解析によって解明するために、AQP4の2種類のisoformのうちの1つ、M23を用いて実験を行った。発現には組み換えバキュロウイルスとSf9細胞による大量発現系を用いており、組み換えバキュロウイルス作製のために2種類のバキュロウイルストランスファーベクター、pBlueBacHis2BとpAcHLT-Aを選択した。作製した2種類のコンストラクト由来のタンパク質をSf9細胞に発現させ、Freeze fracture法を用いて発現状況の観察を行った。その結果、pBlueBacHis2B由来のAQP4M23はSf9細胞膜において結晶性アレイを形成するが、pAcHLT-A由来のAQP4M23は結晶性アレイを形成しないことがわかった。結晶化を行ったところ、pBlueBacHis2B由来のAQP4M23は2.4 分解能の回折点を得られる結晶性の良い二次元結晶を形成したが、pAcHLT-A由来のAQP4M23は二次元結晶を形成しないことが判明した。これにより、結晶性アレイ形成能と二次元結晶形成能に関連性があることがわかった。また、Freeze fracture法を用いることで、精製・結晶化を行うことなく結晶化に適したAQP4M23コンストラクトを選別できることを明らかにした。

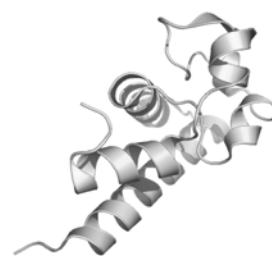
P33 New crystal form of Tetraspanin CD81 LEL

北所健悟^a, Grandi G^b, Bolognesi M^c

^a京都大学低温物質科学研究センター、^bカイロンワクチンリサーチセンター、^cミラノ大学
E-mail: kengo@nice.kumac.kyoto-u.ac.jp

CD81 is a four transmembrane protein of 236 amino acids, belonging to the tetraspanin protein family, involved in various immune responses. Besides the four hydrophobic transmembrane regions, CD81 hosts two extracellular domains, known as large and small extracellular loops (LEL and SEL, respectively). Human CD81 is held to act as (co)receptor for hepatitis C virus (HCV), thus a key participant in the infection.

To widen our knowledge on the roles played by CD81 LEL in binding the HCV E2 glycoprotein, the LEL crystal structure was approached. Three different crystal forms have so far been obtained. We report here on the most recently grown form (R32). Marked conformational fluctuations in the molecular regions held to be involved in binding to the viral protein, suggest rules for recognition and assembly within the tetraspan web.



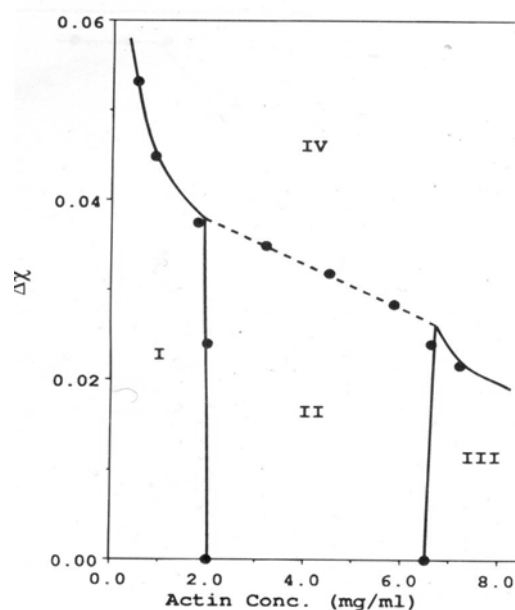
P34 アクチン系細胞骨格の多形態性の物理的基礎と細胞機能

伊藤 忠直^a, 芳賀 永^b

^a京都大学 低温物質科学研究センター、^b北海道大学 理学研究科 生物科学専攻

E-mail: ito@em.biophys.kyoto-u.ac.jp

細胞内のアクチン系細胞骨格は多様な形態をとり、それぞれが構造特異的に様々な細胞機能を担っている。本研究交流会では、その多形態性を決定するアクチンフィラメント(F-アクチン)の集合状態が、左図にあるようにフィラメント-フィラメント相互作用エネルギー($\Delta\chi$)および濃度によって、isotropic (I)、liquid crystalline (III)、それらの共存 (II)および tight bundle(IV)の各相をとり、それぞれに対応する構造が細胞内にも見られること、また F-アクチンの集合状態がliquid crystalline相に相当する stress fiber の細胞頂上面での形成が、アクチン架橋タンパク質の filamin A によって特異的に誘導され、細胞を力学的に安定に保つのに寄与していることなどについて論じる。



F-アクチン集合状態の相図

P35 脳磁図によるヒト大脳聴覚野の過興奮性の検討

臼井 桂子^a, 松林 潤^a, 長峯 隆^a, 池田 昭夫^b, 平海 晴一^c, 松本 理器^b,
川又 純^b, 高橋 良輔^b, 福山 秀直^a

^a京都大学 医学研究科 高次脳機能総合研究センター, ^b同 神経内科, ^c同 耳鼻咽喉科

E-mail: kusuikar@kuhp.kyoto-u.ac.jp

ヒトの大脳皮質が後天的に過興奮性を獲得したために生じる疾患がある。てんかんはその代表例である。てんかんの発作は、ある特定の脳部位の神経細胞群が突発的に同期して過剰発火し、結果として痙攣、意識消失等の症状が引き起こされる状態である。発作以外の時(発作間欠期)は、大多数の場合、問題なく日常生活を送れるのがこの病気の特徴である。診断には脳波が有効であるが、発作間欠期の脳波では異常を認めない場合が存在する。そこで、本研究では発作間欠期に聴覚誘発脳磁場を記録し、発作間欠期における脳の異常活動の検出を試みた。対象は、発作時に機械的な雑音や高音が聞こえるといった聴覚症状を示し、また、特定の音や音楽が引き金となって発作が起こる場合があるという特徴を持つ遺伝性てんかんの5症例。脳磁場の記録は306チャンネル全脳型脳磁図計で実施した。音刺激(周波数 1kHz の純音)を左右の耳に交互に提示し、得られた誘発脳磁場を左右大脳半球で別々に解析し、刺激提示後最も強い脳磁場活動の見られる時間と脳磁場活動の大きさを、正常被験者10名のデータと比較した。5症例中3例で、正常被験者の平均値の2.5SDを超える脳磁場活動を認め、発作間欠期においても、大脳の聴覚野が過剰反応を生じる症例が存在することが確認された。

P36 拡散MRIを用いた脳機能計測

浦山 慎一^a, 麻生俊彦^a, 福山秀直^a, Denis Le Bihan^{a,b}

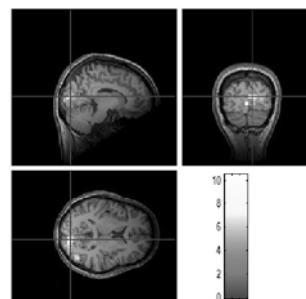
^a京都大学大学院 医学研究科附属 高次脳機能総合研究センター

^b Lab. Anatomical and Functional Neuroimaging, SHFJ, CEA, Orsay, France

E-mail: urayama@kuhp.kyoto-u.ac.jp

1990年、BOLD効果(Blood Oxygenation Level-Dependent)によりMR信号が変動することが報告されて以降、この効果を用いた機能的MRI法は、非侵襲的に脳機能を計測出来る手法として、広く用いられている。一方で、拡散MR撮像法は、生体内での水分子の拡散現象を画像化する手法として開発され、脳梗塞部位の評価や、脳内神経束走行の画像化、癌検出など、細胞構造変化を検出出来る手法として、近年高い注目を集めている。拡散MR撮像法を用いた機能的MRI法は、賦活時の脳細胞の微小な構造変化をとらえる手法として考案され、従来の機能的MRI法のように脳活動による血行動態変化をとらえるものよりも、より直接的に脳活動をとらえることが出来る手法として期待されている。

本報告では、高次脳機能総合研究センターに於いて行われた実験に基づき、本手法を紹介する。



拡散MRI法により得られた
光刺激に対する脳活動

P37 磁気共鳴法によるマウス雄性生殖器官機能の検討

杉本 実紀^a・森田 眞紀^a・今西 哲^a・久米 新一^a

^a京都大学 農学研究科 応用生物科学専攻 生体機構学分野

E-mail : sugimoto@kais.kyoto-u.ac.jp

高磁場NMR装置 (9.4T) によりマウス精巣近傍の磁気共鳴マイクロイメージ (MRM) および³¹P-NMRスペクトルを *In vivo* で観測し、加齢およびエストロジェン様化合物 (diethylstilbestrol または 17beta-estradiol 3-benzoate) 投与に伴う変化について検討した。MRMは、内径 38mm のイメージング用プローブ内にマウスを保定し、2次元および3次元フーリエ変換スピンエコー法により空間解像度約 160 μm のプロトン密度強調像、T1 強調像、T2 強調像を撮像した。³¹P-NMRスペクトルは局所コイルを使用して測定した。MRMの加齢に伴う変化としては、T2 緩和時間が未成熟または老齢個体と比較して成熟個体では長い傾向が見られた。³¹P-NMRスペクトルでは、他の動物で精子形成状態の指標となることが報告されているphosphodiester (PDE) およびphosphomonoester (PME) の信号強度に変化が認められた。PMEは性成熟期以降、高信号から低下し再び高信号となった後、低下する傾向がみられ、PDEは性成熟期に低信号から高信号となり、加齢個体では低化した。エストロジェン様化合物投与の影響としては、一部の個体の³¹P-NMRスペクトルでPDEのシグナルの低下が観察された。これらの個体の観測後の精巣組織像においては変性細胞が散見され、精細管内腔の精子が減少する傾向が認められた。以上の結果から、³¹P-NMRスペクトル観測はマウス雄性生殖器官の機能変化の検出に利用できると考えられる。

P38 β-γ 偏光相関によるパリティの破れの検証

石川 丈寛^a、音野 瑛俊^a、久保 一^a、関原 隆泰^a、田中 宏臣^a、山本 新^a、吉田 晃^a、

今井 憲一^b、舟橋 春彦^b

^a京都大学 理学部 物理学第二教室 課題研究P3

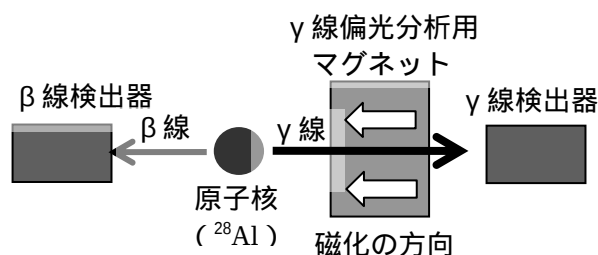
^b京都大学 理学研究科 物理学宇宙物理学専攻 物理学第二分野

E-mail : hal-2005p3@nh.scphys.kyoto-u.ac.jp

1957 年に弱い相互作用における parity の破れが C.S.Wu らの実験によって確認された。これは、それまで信じられていた「左右対称な世界」を否定する重要な発見であり、様々な追試によってその正しさが確かめられてきた。我々は、卒業研究のテーマとして β-γ 偏光相関による parity の破れの検証を選んだ。

実験ではβ崩壊した直後にγ線を放出して安定する原子核を用いる。Parity が破れていれば、β線を特定の方角で検出することで原子核のスピンの偏りが生じる。その偏りが同時計測したγ線の偏光から間接的に得られるため、parity の破れの検証ができる。γ線の偏光分析にはマグネットの磁化方向による透過率の差異を利用する。

γ線検出器の一つに用いたGe検出器は液体窒素温度に冷却することで高いenergy分解能を発揮するものであり、京都大学タンデム加速器で生成した²⁸Alの準位の同定など重要な情報をもたらした。Ge検出器で得たenergy spectrumなどにも触れつつ、parityの破れの検証実験の内容について発表を行う。



P39 MRI顕微鏡による ^3He - ^4He 混合液体相分離面の可視化

陳 夢元^a, 上野 智弘^b, 福田 耕治^b, 佐々木 豊^{a, c}, 松原 明^{a, c}, 水崎 隆雄^a

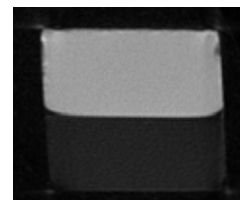
^a京都大学 大学院理学研究科

^b京都大学 医学部

^c京都大学 低温物質科学研究センター

E-mail: mychen@scphys.kyoto-u.ac.jp

現在、 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ の2次元解像度を目標にMRI顕微鏡の開発を行っている。高解像度を得るためには高い信号雑音比が必要である。そこで、超低温、高磁場の極限環境を駆使し、高い信号雑音比の達成を目指している。また、新たなパルス系列や強磁場勾配を開発することで、スピン拡散の効果の抑制も行っている。開発の第一段階として、磁場を0.33 Tから0.92 Tに高め、磁場勾配を0.25 T/mから0.5 T/mに向上させて、高磁場と強磁場勾配の影響を議論した。超低温MRIで用いたものと同じ試料容器を使い ^3He - ^4He 混合液体の相分離界面の形状を再度可視化した。相分離界面により解像度を評価すると、以前に得られた2次元解像度 $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ を、 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ に改善できたことが分かった(上図)。本発表会で、高磁場・強磁場勾配による改善点や問題点についての考察を報告する。また、現在準備中の新しい試料容器の概要も合わせて報告を行う。



改善された ^3He - ^4He 混合液体の相分離界面のMRI画像(700 mK)

P40 超低温 MRI による固体ヘリウム3 U2D2 相の磁区構造の研究

田中 孝佳^a, 佐々木 豊^{ab}, 水崎 隆雄^{ab}

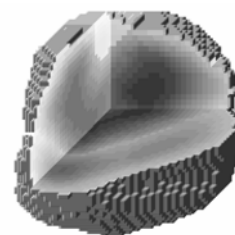
^a京都大学 大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 物理学第一分野

^b京都大学 低温物質科学研究センター

E-mail: sasaki@scphys.kyoto-u.ac.jp

我々の研究グループでは数百 μK という超低温下でのみ存在する、固体ヘリウム3の核磁気秩序相の核磁性を研究しています。このうちU2D2相は一軸異方性の反強磁性相であり、単結晶中にお互いに直交した異方軸を持つ3種類の磁区が、共存していることが知られています。近年我々はこのU2D2相の単結晶内部の磁区構造を3次元MRI法により測定することに世界に先駆けて成功しました。下図で色分けして示されているのが磁区の分布で、結晶サイズと同程度の大きな磁区が平面状の磁壁を挟んで共存している様子がよく分かります。

この磁区構造に関わってメモリー効果という不思議な現象があることも、3次元MRIによって初めて明確に示すことができました。外部磁場を掃引して一軸異方性を持たない別の反強磁性相に転移させた後、元の磁場に戻すとなぜか元々の磁区分布を再現するという、不思議な記憶力が存在します。また、この2相の間の相転移は一次相転移なのですが、安定相が相転移時にどう時間空間発展するかなど興味深い現象もMRI技術を駆使して研究しています。



直径2ミリの固体の磁区分布像(0.5 mK)

低温物質科学研究センターセミナー報告

日時：2005 年 11 月 9 日（月）10：00～

場所：物理学教室519号室（理学部 5 号館 5 F）

講師：Sang Gap Lee 博士

所属：韓国先端科学技術研究所(KIST)

題目：ESR Detected by Measuring Mechanical Forces of a Cantilever in Samples of a Limited Number of Spins
- A potential of MRFM for studying physics of interfaces and thin films

要旨： Measuring mechanical forces of ultrasoft cantilevers coupled to magnetic resonance, so called magnetic resonance force microscopy (MRFM), is a novel scheme recommended for imaging a single molecule by MRI technique and for reading spin states in solid-state quantum computing. Moreover, MRFM is quite adequate for studying materials of a limited number of spins like artificially-layered thin-film samples in-situ because signal-to-noise ratio (SNR) of MRFM is basically determined by a spin concentration rather than by the number of spins. For example, a study on high-k gate dielectric materials for the next generation MOSFET can be one of the important subjects of MRFM in a material research field. Recently, we built a low temperature (~ 6 K) MRFM setup and tested the setup successfully at room temperature by measuring a force-detected ESR signal in a DPPH sample. We have been replacing a cantilever by one of much lower spring constant for improved force sensitivity and increasing a magnetic field gradient (> 0.01 G/nm) to acquire such a large filling factor to apply to thin-film samples. We will report our recent progresses in MRFM instrumentation and discuss the preliminary data.

日時：2005 年 11 月 17 日（火）15：00～

場所：物理学教室519号室（理学部 5 号館5 F）

講師：Prof. Allan Griffin

所属：University of Toronto, Canada

題目：Two-fluid hydrodynamics in the BCS-BEC crossover of trapped Fermi gases

要旨： In the BCS-BEC crossover region in atomic superfluid Fermi gases, the collision cross-section is so large that one should be able to access the local equilibrium region described by Landau's two-fluid hydrodynamic equations. These equations are difficult to solve in a trapped gas because all the thermodynamic functions are position-dependent. We present a new variational approach that allows one to deal with this problem. The nature of first and second sound modes changes in the different regions of the BCS-BEC crossover.

日時：2006年1月19日（木）14：00～

場所：物理学教室 第二講義室

講師：Prof. John Doyle

所属：University of Harvard, U.S.A

題目：Evaporative Cooling of Buffer-gas Loaded Atoms

要旨：Buffer-gas loading of magnetic traps has been shown to be a versatile method for loading large numbers of atoms and molecules into magnetic traps. Further cooling, after trapping, is important for exploration of new physics. In this talk, evaporative cooling of magnetically trapped, buffer-gas loaded samples is discussed. Evaporative cooling of buffer-gas loaded Cr and Mo has been achieved. Recently we have also evaporatively cooled metastable helium. Using a cryogenic helium buffer-gas, 10^{11} $^4\text{He}^*$ atoms are trapped at an initial temperature of 0.4~K. The trapped sample is evaporatively cooled into the ultracold regime, resulting in a cloud of 2×10^9 ^4He atoms at 1.4~mK. This is a ten-fold improvement on the number produced by laser cooling and demonstrates a significant increase in phase space density for a sample trapped using buffer-gas loading.

日時：2006年2月8日（水）11：00～

場所：物理学教室519号室（理学部5号館5F）

講師：上野 智弘 博士

所属：京都大学医学部保健学科

題目：MRI顕微鏡開発と ^3He - ^4He 混合液体相分離界面の形状

要旨： ^3He - ^4He 混合液体の相分離界面が試料容器の壁になす角である接触角を精密に再測定するために、2次元解像度 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ を目標にMRI顕微鏡を開発している。 ^3He - ^4He 混合液体は0.87 K以下で、 ^3He の濃度が異なる2つの相に相分離するので、超低温においてMRI画像を撮影する必要がある。そこで、以前に開発した超低温MRIを基に、高磁場・強力磁場勾配、超低温の極限環境を駆使して、目標の解像度の達成を目指している。解像度の向上に最も必要なのは、信号雑音比の向上である。そこで、超低温、高磁場を用いて磁化を大きくし、高周波NMRを行うことで信号雑音比を高めている。また、スピン拡散の影響を抑制するために、新しいパルス系列の開発や磁場勾配の強化も行っている。

以前に行った超低温MRIによる測定では、3重臨界点近傍において、測定誤差が大きくなり、その挙動について明らかにすることができなかった。その後、パリ高等師範学校において、光の干渉を用いて接触角の測定を再度行った。しかし、光の屈折や他の干渉縞の漏れ込みにより、はっきりとした結論を得る事が出来ていない。そこで、光の屈折などの影響を受けないMRI顕微鏡を用いて、相分離界面の接触角の温度変化を精密に再測定し、 ^3He - ^4He 混合液体の接触角の問題に決着を付けようとしている。

MRI顕微鏡の開発第1段階として、超低温MRIによる測定で用いた試料容器を使い、均一磁場を高め、磁場勾配を大きくしたときの画像を調べた。これにより、2次元解像度 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ を得る事が出来た。さらに解像度を向上させるべく、新たな試料容器を準備中である。

日時：2006年2月23日（木）16：00～

場所：物理学教室439号室（理学部5号館4F）

講師：福田 昭 博士

所属：京都大学低温物質科学研究センター

題目：QHE in 2-D electron system

要旨： 2次元電子系を2枚近接配置した2層2次元電子系においては、電子が層間をトンネルすることが可能であり、“層”の自由度（擬スピン）を持っている。この、擬スピン自由度と通常のスピン自由度とが織り成すことにより、多彩な量子相を呈することが期待される。本講演では、ランダウ占有率 $\nu = 1$ における「ソリトン格子相(Soliton Lattice Phase)」及び $\nu = 2$ における「傾角反強磁性相(Canted Antiferromagnetic Phase)」を中心に、最近2層系量子ホール状態において発見された新しい量子相について、量子輸送現象測定の結果とその考察を含めて講演したい。

日時：2006年2月23日（木）16：00～

場所：化学教室571号室（理学部6号館）

講師：張 維 博士

所属：京都大学低温物質科学研究センター

題目：Search for new alloys and intermetallic compounds with novel physical and functional properties

要旨：

1) Studies of half metallic Co_2MnSn Heusler alloy on bulk, thin-film and nano-scale hetero-interface 伝導電子のスピン分極率がフェルミ面において100%を示すHalf metallic強磁性体をTMR素子の強磁性層に用いることによって大きなTMR比を得ることが期待される。我々はHeusler合金 Co_2MnSn に注目し、 Co_2MnSn のMnをFeまたはCrで置換した合金の合成に成功した。それらの合金の磁性はSlater-Pauling曲線で説明できることを明らかにした。 Co_2MnSn を用いて強磁性トンネル接合の作製にも試みている。超高真空蒸着法で Co_2MnSn の単結晶薄膜作製し、磁性および電気伝導性を調べた結果も報告する。

2) Non-Fermi liquid behavior near ferromagnetic quantum critical points in Ni_3Al and YCo_2

MnSi , ZrZn_2 の圧力効果において強磁性転移温度 $T_c = 0 \text{ K}$ となる量子臨界点の近傍で非Fermi液体や超伝導が発見されて、注目を集めている。不純物効果を用いても量子臨界点近傍に到達することができ、 Ni_3Al のNiサイトを1% Alで置換すると $T_c=0 \text{ K}$ となり、また、交換相互作用により大きなPauli 常磁性を示す YCo_2 のCoサイトを13% Alで置換すると強磁性が誘起される。 $\text{Ni}_{3-x}\text{Al}_{1+x}$ と $\text{Y}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ 系は量子臨界現象を調べるのに理想的な系であると考えられる。これらの遷移金属化合物系の量子臨界点近傍の領域について磁化測定と磁場中抵抗測定の結果を報告する。

京大吉田地区の液体ヘリウム供給情報管理システム Information Management System for Liquid Helium Supply

新井敏一，松原明

京都大学低温物質科学研究センター

Toshikazu Arai and Akira Matsubara

Research Center for Low Temperature and Materials Sciences, Kyoto University

1. はじめに

1965 年に京都大学で液体ヘリウムの供給が開始されてから40 年が経過した。当初は液化機的能力よりも供給希望量の方が多く，じゃんけんやあみだで当選した人だけが供給を受けることができたそうである[1]。筆者らが学生ではじめてヘリウムを使い始めたころはさすがにじゃんけんをする必要はなくなっていたが，極低温研究室(現在の低温物質科学研究センター，以下LTM センター) 玄関に貼られた用紙に記入して供給を申し込んでいた。この申込用紙は1969 年から実に36 年もの間，毎週玄関に張り出されていた。原則としてユーザーがLTM センターに足を運び，この用紙に記入してはじめて申し込みが成立するのである。国内の大学の中では最大級的能力を誇る液化機が導入され，現在では液体ヘリウムユーザーが吉田南構内にまでおよび，今後はLTM センターから2 km離れた病院地区にも供給を開始しようというのに，このままではいけない。LTMセンターにもIT 革命をおこし，コンピュータ(以下PC) やインターネットを駆使した液体ヘリウム供給申し込み・データ管理システムを構築することはもはや必須である。このような思いからLTMセンターのIT 担当職員が立ち上がり，本稿で紹介するシステムを開発した。運用開始から約半年経過した。大きなトラブルもなく順調に稼働し，多くのユーザーから喜びの声をいただいた。実際の使い方は前号のお知らせ[2] とweb サイト上のマニュアル[3] を参照していただきたい。本稿ではシステムの概要とシステム開発に利用した技術について解説する。

2. システム概要

情報管理は，図1 にあるように，(1) ユーザーや液体ヘリウム申し込みの情報を管理するデータベース，(2) 申し込みやデータ管理のためのweb ページ，(3) 容器の搬入・搬出の記録や計量，集計作業に使う端末の三種類から成り立っている。以下これらについて順に述べる。

データベースとweb ページはUnix 系のOS であるFreeBSD [4, 5] を使用したPC 上で運用している。FreeBSDは多くの強力なアプリケーションをサポートするシステムであり，それら全てがフリーで簡単にインストールできる大変便利なOS である。特に今回のようにデータベースやweb ページなどのアプリケーションにおいてはその能力が存分に発揮される。また，システムの安定度にすぐれ，情報セキュリティ確保やデータ保護も行いやすく，サーバーとして運用するのに最適なOS の一つである。

液体ヘリウム申込の流れ

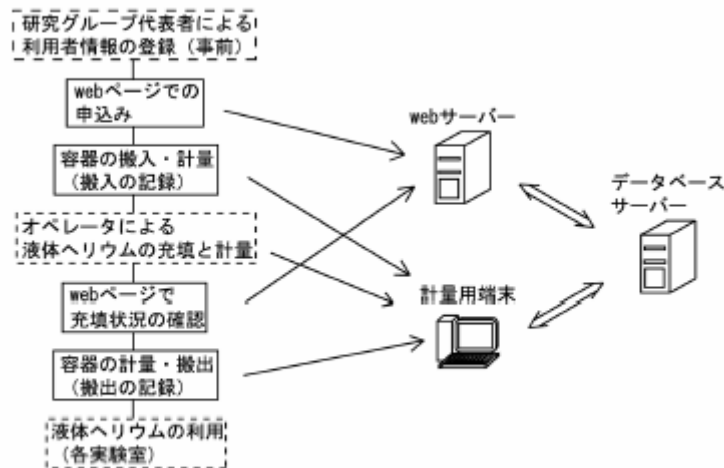


図 1: 液体ヘリウム申し込みの流れ

データベースはPostgreSQL [6] というリレーショナルデータベースを用いている。リレーショナルデータベースはデータ抽出の効率がよく、さまざまな条件によるデータ検索の能力に優れ、運用中のテーブル情報を変更しやすいなどの特徴を持っている。Unixとの相性も抜群である。

データベースへのアクセスは一般の利用者はもちろん、管理者も単純なミスを軽減するためにwebページを通して行なっている。データベース管理専用のwebページの製作には手間がかかるが、より安全で安定したシステム運用の上では欠かすことのできない部分である。データベースがサーバー上にあることで、プライベートネットワーク内にある計量用端末PCからのアクセスも容易である。これによりデータの一元管理を行いやすく、システム構成をシンプルで信頼できるものにできる。

データベースは研究室情報、ユーザー情報、容器情報、液体ヘリウムの申し込み情報などの複数の情報を管理しており、それぞれ1個ずつのテーブルが対応している。ユーザー情報や容器情報はwebページを通して担当者が情報の管理を行っている。液体ヘリウム申し込み情報テーブルはユーザーが申し込みを行った際に自動的に新しくデータが作成され、のちに述べる計量用端末PC等での処理に従ってデータが追加・更新される。データは申込者のアカウント、研究室、申し込み日時、液量など以外に液体ヘリウム充てん前後の計量結果、搬入・搬出時の計量結果などを含み、液体ヘリウムの申し込みの最初から最後の容器の返却までの情報を一括管理している。申し込みが現在どのような状況にあるかはstatus項目に書き込まれる。ユーザーはstatusをwebで随時把握することができる。Statusがfillingで充てん作業中、readyで充てん完了などである。月ごとの利用実績や日付ごとの申し込み情報一覧、研究室ごとの集計も行いやすくなっている。

webページはFreeBSD上でapache2 [7] を用いている。データベースへのアクセスとパスワードによる保護等の目的から、cgi（記述言語はperl [8, 9]）を用いて記述した。これによりエラー処理などの多彩な処理も可能となっている。データベースへのアクセスはDBI [10, 11] と呼ばれるインターフェースルーチンをもちいている。

一般利用者向けのwebページは、液体ヘリウムの申し込みページ(研究室ごとのパスワードで管理)と、日付別と研究室別の申し込み一覧、ユーザーアカウントの変更ページなどからなっている。現在、液体ヘリウムの申し込みは、液体ヘリウムの供給を受けたい日付の前営業日の16:00まで、かつ申し込みを行なっている日から2週間以内としている。申し込みページ(図2)ではカレンダーを表示し、申

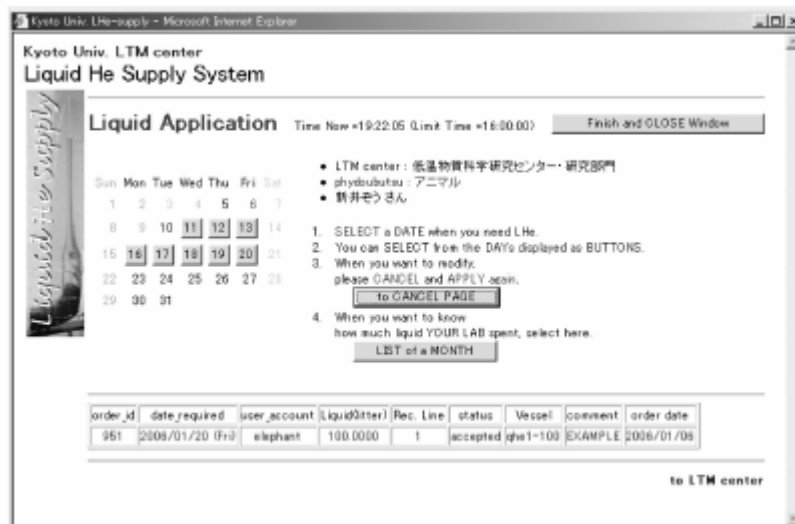


図 2: ユーザーの液体ヘリウム申し込み画面

申し込み可能な日付のみボタンを表示して、実際の申し込みを行なうweb ページへと進めるようにした。キャンセルボタンもあり、必要に応じて申し込みをキャンセルできるようにしている。また、ページの再読み込みを行なうと二重三重に申し込みをしてしまう可能性があるため、申し込みのページではブラウザの制御ボタンを表示しないなどの工夫をしている。

ユーザーはweb を通して申し込みを行ったのち、充てん日の朝9:30 までに容器をLTM センターに搬入しなければならない。当日の朝9:30 までに容器が搬入されていない時は、申し込みデータのstatus 項目が自動的に「late」状態になるようにしている。これはUnix のcron という機能を用い、指定した時刻にperl のスクリプトが実行される。

web ページやデータベースはセキュリティ保護のためにパスワードで管理されている。web ページは学内からのアクセスは自由に行えるが、学外からのアクセスに対してはパスワード保護を行っている。また、各ユーザーは所属研究室ごとに設定されたパスワードを用いて液体ヘリウムの申し込みを行う。このパスワードはMD5 という形式で暗号化してある。パスワードは研究室の担当者が変更できるようになっている。

現在のシステムは2005 年6 月の試験運用開始から停電等を除いて一度も止まることなく安定に稼働している。しかし、データベースやweb ページはハードディスクやPC 本体が壊れて失われる危険性がある。対策として液体ヘリウム供給システムは万全のバックアップ体制を取っている。データベースとweb ページが搭載されているハードディスクは毎日別のハードディスクに自動でコピーされるほか、複数台の別のPC にもコピーされる。それぞれのPC がバックアップ用のハードディスクを持っているため、何重にもバックアップがなされていることになる。またPC 本体が停電や落雷の場合でもできるだけ止まらないように、無停電電源(UPS) を用いてPC を保護している。UPSとしてはFreeBSD と相性のよいものを選択して用いている。さらに、サーバー用のPC 本体の故障にも即時に対応できるように、全く同じ構成のPC を別に1 台用意している。このPC は通常はバックアップのみ行なっているが、ネットワークの設定を少し変更するだけで、すぐに現在運用しているPC の代替とされるように全てのシステムを同一に設定している。

3. 計量用端末のユーザーインターフェース

ユーザーがLTMセンターに容器を搬入・搬出した時、およびセンター職員が容器にヘリウムを充てんする前後に日時、液量、供給量、容器のある場所、容器を持ち出したユーザー等をデータベースに記録として残している。ユーザーとセンター職員がそれぞれの場面で容器を計量した内容をデータベースに書き込むプログラムが容器置き場の端末PCで稼働している。ここでは液量の測定法とユーザーインターフェースプログラムについて解説する。

端末PCには次に述べる重量計のほか、容器を識別するためのバーコードリーダ、職員証・学生証(IDカード)の磁気情報で個別ユーザを識別するためのカードリーダが接続されている。

容器内の液量測定はLTMセンター内のヘリウム容器置き場に設置された重量計を使用する。重量計には以下の仕様が要求される。(1) 吉田地区で現在使用されている最も重い容器(150 kg)が測定範囲内であること。(2) 液体ヘリウム0.5以下の分解能があること。すなわち、ヘリウムの密度が125g/であるので60 g以下の精度で測定できること。(3) PCとの通信ができること。これらを考慮して、地元京都のハイテク企業イシダ[12]のMTX-Mタイプを選定した。この重量計はロードセル方式で、300 kgまでを50 gの分解能で測定する。PCとのデータ通信をRS-232Cで行うことができ、しかも動作が安定していて申し分ない。50 gの分解能は、液量0.4ℓの精度に対応する。これは、従来の気柱振動液面計で約2 mmの精度で測定しているのと同様である。

容器の重量と液量は、それぞれの容器について気柱振動液面計で測った液量とそのときの重量のデータを集めて校正している。図3のようにその結果は直線で近似できるので、データベースの容器情報テーブルにフィッティングで求めた0次と1次の係数を登録しておく。容器には容器名が記録されているバーコードが貼ってあり、重量計にのせてバーコードリーダで読み込むとプログラムはデータベースからその容器の校正係数を取得して重量から液量を計算し、表示する。

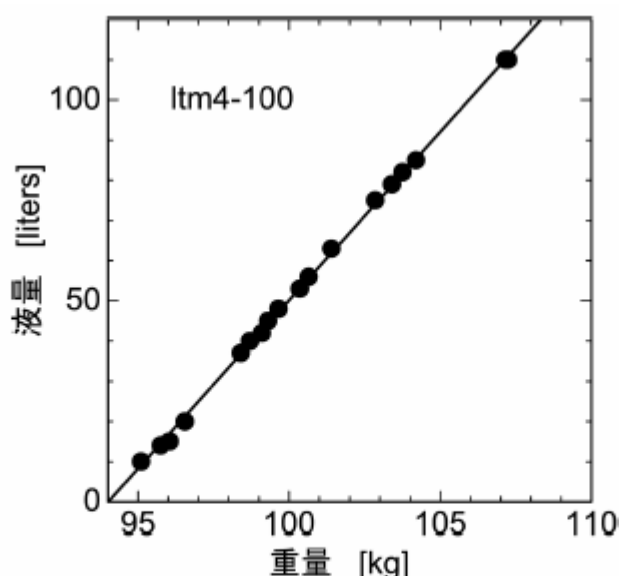


図 3: MVE 社製 HELIUM 100 (ステンレス容器) 容器の重量と気柱振動液面計で測定した液量の関係。点は測定データ、直線は1次関数によるフィットの結果である。

重量計を導入する以前はセンター職員はヘリウムを充てんする前後に毎回気柱振動液面計で液量を測ってノートに記録していた。その際いくらかのヘリウムガスを大気に放出することは避けられな

かった。システム導入後は計量によるヘリウムガスのロスがゼロになり、職員の労力も軽減された。また、気柱振動液面計に慣れていないユーザーでも正確に液量を測ることができるようになった。容器置き場の計量用端末PCは、多くのユーザーが操作するものであることを考慮してOSにはMicrosoft Windowsを採用し、ユーザーインターフェースはMicrosoft Visual C++.NET (VC++)を用いて作成した。VC++はWindowsアプリケーションを作成するのに適したオブジェクト指向型C言語である。重量計はRS-232CでPCのCOMポートに情報を送信し続けている。VC++でCOMポートから文字列を取得することで容器の重量をプログラムに取り込む。

VC++とPostgreSQLサーバーとの通信にはODBC (Open Database Connectivity) を使っている。ODBCとは、Microsoft PCからネットワーク経由でUnix系のデータベースにアクセスするための通信方式で、PostgreSQL ODBCドライバがインターウィズからネットで公開されている[13]。VC++にはODBC関連の関数が各種用意されている。ODBCドライバのインストール後、これらの関数を呼び出すことでデータベースとの接続および読み書きが可能になる。データベースへのアクセスには、ほかにlibpqというPostgreSQLアクセスライブラリも利用可能である[13]。環境に応じて使い分けるとよいだろう。

ユーザー用のプログラムは「容器を返却する」、「容器を持ち出す」、「容器の残量を測る」、「IDカードを登録する」の4つのボタンからなる。ユーザーによるキーボード入力を無くすように配慮した。充てんされた容器をLTMセンターから搬出する際「容器を持ち出す」で研究室名とユーザー名を入力する必要がある。IDカードの磁気情報をあらかじめ「IDカードを登録する」から登録しておく、カードリーダーにIDカードを通すだけで容器を持ち出す個人を識別できるようにしてある。この機能はとても便利なのでもっと多くのユーザーに利用していただきたい。

吉田地区には共同利用の精密磁化測定装置(MPMS)が2台あり、全学から多数の利用者が訪れる。共同利用という性質からMPMSでのヘリウム使用に関しては特別の配慮をした。MPMSユーザーには専用容器からヘリウムトランスファーした後に容器の残量を測るようお願いしている。プログラムはMPMS専用容器であることを識別すると、ユーザー情報を入力するように求める。これにより各装置にヘリウムをトランスファーしたユーザー、日時、液量がデータベースに記録される。また、容器の残量が少なくなると翌営業日に充てんするように自動で申し込みをする。

4. データベースの利用

センター職員は週別、月別にさまざまな集計作業をしている。たとえば、研究室別・部局別の供給量・回収率、日々の供給効率、ヘリウム貯槽の残量管理などである。この管理システムが稼働する前はこれらはすべて手作業で行われていた。毎月約160件、10,000のヘリウムを供給する吉田地区では、集計作業にはたいへんな時間と労力が必要であった。データベースで供給データを管理するようになってからは、管理者用プログラムで「今週(今月)のデータ集計をする」のボタンをクリックするだけで瞬時に集計作業が完了するようになり、圧倒的な省力化が実現した。

また、ユーザーは各研究室の月別供給量の情報をweb経由で得ることができる。ヘリウム申し込み画面でカレンダー横にある「LIST of a MONTH」をクリックすると、図4のようにその月の供給データが表示され、ユーザー自身でヘリウム消費量の管理ができる。

5. おわりに

ヘリウム供給申し込みのオンライン化、情報管理の電子化によってユーザーはもちろん、LTMセンター職員にとっても便利になり手間も省けるようになった。しかし、依然として安全は私たちひとり

Kyoto Univ. LTM center
Liquid He Supply System

List of a MONTH
アニメル (phydoubutsu)

back to LIQUID APPLY. BACK to Previous Page

filled date	user account	Name	Δliq [liter]	Loss liq [liter]	Hokan	Memo
2005/12/02 (Fri)	elephant	新井そう	102.7700	27.4053	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/05 (Mon)	elephant	新井そう	99.8644	26.6306	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/08 (Thu)	elephant	新井そう	86.4300	23.0480	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/09 (Fri)	elephant	新井そう	103.7384	27.6636	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/14 (Wed)	elephant	新井そう	86.2200	17.6586	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/16 (Fri)	elephant	新井そう	95.9903	25.5974	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/19 (Mon)	elephant	新井そう	96.7500	25.8000	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/22 (Thu)	elephant	新井そう	92.5468	24.6791	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/23 (Fri)	giraffe	松原きりん	109.1859	29.1162	1	accepted returned filling ready out by giraffe
2005/12/23 (Fri)	giraffe	松原きりん	98.5429	26.2780	1	accepted returned filling ready out by giraffe
2005/12/24 (Sat)	giraffe	松原きりん	98.0101	26.1360	1	accepted returned filling ready out by giraffe
2005/12/26 (Mon)	elephant	新井そう	97.1800	25.9146	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/27 (Tue)	elephant	新井そう	98.3076	26.2153	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/27 (Tue)	elephant	新井そう	108.0182	28.9048	1	accepted returned filling ready out by elephant
2005/12/27 (Tue)	giraffe	松原きりん	64.2133	17.1236	1	accepted returned filling ready out by giraffe
2005/12/27 (Tue)	giraffe	松原きりん	76.7821	20.4752	1	accepted returned filling ready out by giraffe
TOTAL			1496.1499	398.7060		

to LTM center

図 4: 研究室ごとの今月の供給データ画面

ひとりの注意と心掛けに依存している。これからも事故のないように安全には十分注意しながら実験をして、良い成果がたくさん出てくることを願っている。

この管理システムを開発するにあたって東京大学物性研究所低温液化室のシステムを参考にさせていただいた。物性研究所のシステムについて詳しく説明をしてくださった鷲山玲子さん、土屋光さんに感謝いたします。

参考文献

- [1] 西下博紹. 京都大学低温物質科学研究センター誌, 4, 40 (2004).
- [2] 新井敏一. 京都大学低温物質科学研究センター誌, 7, 38 (2005).
- [3] <http://www.ltm.kyoto-u.ac.jp/liqsupply/>.
- [4] <http://www.freebsd.org/jp/>.
- [5] 後藤大地. FreeBSD ビギナーズバイブル. MYCOM (2005).
- [6] <http://www.postgresql.jp/>.
- [7] <http://www.apache.jp/>.
- [8] <http://www.perl.org/>.
- [9] エリークイグリー. Perl 入門第2 版. ピアソンエデュケーション(2000).
- [10] <http://dbi.perl.org/>.
- [11] アリゲータデカルト, ティムバンス. 入門Perl DBI. オーム社(2001).
- [12] <http://www.ishida.co.jp/>.
- [13] <http://www.interwiz.koganei.tokyo.jp/software/PostgreSQL/windows.html>.

ナノ量子物性研究室の新しい実験室

New Experimental Room of “Physics of Low Dimensional Quantum Systems” Group

澤田安樹，福田昭，岩田一樹
京都大学低温物質科学研究センター

A. Sawada, A. Fukuda and K. Iwata
Research Center for Materials Sciences, Kyoto University

低次元量子凝縮系物理学研究室が，平成 16 年 4 月，低温物質科学研究センターに発足しました．この研究室においては，量子輸送現象測定やマイクロ波分光等の手法を使って，半導体接合界面の 2 次元電子系における量子ホール効果[1]や液体ヘリウム液面上に浮かんだ 2 次元電子系など，超低温において低次元系で起こる量子現象の研究をします．しかし，研究室開設当初は，実験室と呼べる場所はなく，急いで実験室を整備する必要がありました．

特に，量子ホール効果を観測するためには，超低温・強磁場という複合極限環境が必要です．そのためには，大型超伝導マグネットを備えた希釈冷凍機の運用が不可欠です．幸い，磁気輸送現象測定用の一台は，前身の東北大学理学部より，マイクロ波分光測定用のもう一台は宇治の化学研究所より，本研究室に移設することが可能となり，冷凍機の設置スペースを探すことになりました．希釈冷凍機を設置するためには，液体ヘリウム貯槽であるデュワーの脱着あるいは冷凍機インサートの抜き差しをするため，最低 6 m 程度の鉛直方向のスペースが必要となりますので，おのずと設置場所はピットの掘れる建物地下に限られてきます．そのために，最初，整備計画を立てたのは，低温物質科学研究センターの隣にある，放射性同位元素総合センター北部分館の地下でした．しかし，理学部等施設掛の担当の方にピット掘削時の建物強度を検討していただいたところ，敢え無く No という冷たい返事が返ってきました．

次に矢面に立った場所が，旧付属機器分析センターのあった理学部 1 号館の地下でした．今度も建物の耐震強度の問題でピットを掘ることができるかどうかとても心配しま



図 1 整備前（2004 年 9 月）



図 2 ピット工事開始（2004 年 11 月）



図 3 ピット型枠にコンクリートが
流し込まれたところ（2004 年 12 月）

したが、2004 年 9 月に、なんとか施設掛の方から OK の返事をいただきました。その後、施設整備の検討、業者への見積もり、荷役装置の設置を経て、12 月ようやくピット工事に着工することができました(図 1)。深さ 3m のピット掘削工事は、室内において重機の使用が困難なため、古代の土木工事のような手作業で行われました。途中で巨大な岩石が出現したり(図 2)、地下水が染み出したりなど、波瀾万丈で、かつとても時間のかかる工事でしたが、2005 年 1 月には 2 機のピット掘削工事を無事に完了することができました(図 3)。ピット掘削が完了するとすぐに東北大学より移転した除震機能付き架台を設置しました(図 4)。



図 4 ピット及び架台が完成したところ(2005 年 1 月)

磁気輸送現象測定用の希釈冷凍機本体は平成 16 年 3 月まで東北大学において使用されていたため、平成 17 年度に入って移設作業を開始しました。その後順調に冷凍機本体の設置作業、室外に設置した排気用真空ポンプと希釈冷凍機本体を結ぶ配管工事、電源等電気系統の整備等を行い、ようやく平成 18 年 3 月より稼動状態に入りました(図 5)。現在、順調に連続運転を継続し、量子ホール効果の輸送現象測定を行っています。マイクロ波分光測定用の希釈冷凍機の整備はこれからの課題ですが、近々着手する予定です。平成 18 年度からは、研究室名を「ナノ量子物性研究室」と改称し、宇治キャンパスの寺嶋教授とも共同の研究室を構成し、新たなスタートを切っています。

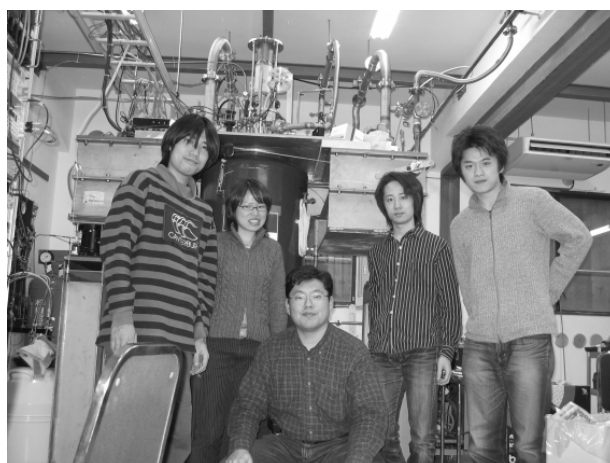


図 5 ようやく稼動した希釈冷凍機の前にて(2006 年 3 月)

本実験室整備にあたり、水崎センター長、理学部物理教室の八尾教授、理学部物理教室技術開発室の皆様、理学部等施設掛の方には大変お世話になりました。また、冷凍機整備においては、新井敏一氏及び学部学生の上田哲寛君、酒向正己君、杉浦晴香さんに尽力いただきましたので、ここに感謝いたします。

[1]澤田安樹「2 層系量子ホール効果」京都大学低温物質科学研究センター誌 5, 10 (2004)

運営委員会より

寒 剤 供 給 状 況

吉田キャンパス

平成17年度

液体ヘリウム供給量

単位 ℓ

	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	合 計
理学研究科・化学	1738	1581	1741	1814	1478	8352
理学研究科・物理学第一	6103	5667	6273	6243	6937	31223
理学研究科・生物科学	184	347	393	303	327	1554
理学研究科・地球惑星科学				107		107
人間・環境学研究科	1234	1553	1683	765	1535	6770
工学研究科・機械理工学					51	51
工学研究科・材料化学	256	226	282	228	253	1245
工学研究科・材料化学	90	162	48	65	160	525
農学研究科	31		71	65	27	194
国際融合創造センター	32	65	67			164
低温物質科学研究センター	514	642	572	98	378	2204
合 計	10182	10243	11130	9688	11146	52389

平成17年度

液体窒素供給量

単位 ℓ

	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	合 計
理学研究科・化学	3212.8	3179.4	2922.1	2785.0	2930.1	15029.4
理学研究科・物理学第一	2014.6	1906.2	3041.5	2541.9	2064.8	11569.0
理学研究科・物理学第二	33.5	55.9	23.9			113.3
理学研究科・その他	2346.5	2430.1	2407.4	1993.1	2142.1	11319.2
人間・環境学研究科	1005.0	1143.5	1166.2	615.0	490.6	4420.3
工学研究科	1090.0	1390.0	1240.0	1510.0	1615.0	6845.0
農学研究科	2402.6	2611.1	2623.7	2279.7	1933.1	11850.2
エネルギー科学研究科	440.0	470.0	375.0	435.0	200.0	1920.0
総合博物館	10.0		10.0			20.0
医学研究科	91.8	143.6	140.0	84.1	141.8	601.3
医学部附属病院	469.4	550.3	700.7	461.8	392.4	2574.6
保健診療所	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	50.0
生命科学研究科	780.1	711.7	640.4	670.4	630.6	3433.2
情報学研究科	10.0		10.0	10.0	10.0	40.0
高等教育推進機構 物理学実験	100.0	60.0	90.0	30.0		280.0
各種センター合計	880.1	1089.1	256.1	464.1	317.4	3006.8
各種研究所合計	1612.3	1972.3	1446.5	1591.9	1389.4	8012.4
合 計	16508.7	17723.2	17103.5	15482.0	14267.3	81084.7

宇治キャンパス

平成17年度

液体ヘリウム供給量

単位 ℓ

	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	合 計
化学研究所	1671.4	1668.6	1667.1	2099.8	1716.6	8823.5
エネルギー理工学研究所	53.2	82.4	38.9		118.6	293.1
生存圏研究所				88.5		88.5
農学研究科						
理学研究科						
工学研究科	52.1	30.6				82.7
エネルギー科学研究科			710.0	805.0	1033.1	2548.1
低温物質科学研究センター	52.7	50.9	54.9	63.7	44.3	266.5
国際融合総合センター						0.0
合 計	1829.4	1832.5	2470.9	3057.0	2912.6	12102.4

平成17年度

液体窒素供給量

単位 ℓ

	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	合 計
化学研究所	4185.2	4535.4	4570.8	2072.0	4099.1	19462.5
エネルギー理工学研究所	713.0	714.8	642.9	290.3	735.0	3096.0
生存圏研究所	328.1	424.0	525.2	208.8	348.6	1834.7
農学研究科	179.7	135.6	155.4	56.5	159.1	686.3
防災研究所	43.3	31.5	33.0	16.0	33.1	156.9
理学研究科						0.0
工学研究科	288.1	280.6	285.8	125.0	318.7	1298.2
エネルギー科学研究科	152.7	234.1	1074.7	417.1	697.3	2575.9
低温物質科学研究センター						
国際融合総合センター						
合 計	5890.1	6356.0	7287.8	3185.7	6390.9	29110.5

寒剤供給関係業務 担当者

キャンパス	施設設置場所	担当者 (電話)
吉 田	北部構内・極低温寒剤供給施設	澤田 安樹(4068), 大塚 晃弘(4036,4055) 新井 敏一(4055,4056), 西崎 修司(4055,4058)
	本部構内・工学部液体窒素貯蔵所	宮嶋 直樹(5474), 松本 要(5440)
宇 治	化学研究所・極低温物性化学実験室	楠田 敏之(17-4357), 寺嶋 孝仁(17-3121)

吉田キャンパス ヘリウムガス回収中継所責任者 (2005年4月現在)

No	部 局	中 継 所 名	設 置 場 所	責 任 者	所 属 電 話
1	大学院理学研究科	物 理 学	物理学教室地階 南西隅廊下	松原 明	低物セ(物理学・宇宙 物理学) 3 7 5 5
2	放射性同位元素 総合センター	R I セ ン タ ー	R I センター 分館地階	五十棲 泰人	R I センター 7 5 0 2
3	大学院農学研究科	農 学 部	農学部総合館地階 N 0 2 9 室	入江 一浩	食品生物科学 6 2 8 2
4	大学院理学研究科	理 学 部 1 号 館	1号館地階廊下東端 0 1 2 室前	新井 敏一	低物センター 4 0 5 5, 4 0 5 6
5	大学院理学研究科	生 物 物 理 学 系	1号館地階生物物理 学系 045 室東ド ライエリア	七田 芳則	生物科学 4 2 1 3
6	大学院理学研究科	理 学 部 6 号 館	6号館南校舎 地階B 0 8 室	大塚 晃弘	低物センター 4 0 3 6, 4 0 5 5
7	大学院理学研究科	構 造 生 理 学	電気第一分館地階 A - 0 0 2 室	藤吉 好則	生物科学 4 2 1 5
8	大学院工学研究科	機 械 理 工 学	2号館地階0 1 7 室 ドライエリア	稼働休止中	低温物質科学研究 センター 4 0 5 5
9	大学院工学研究科	材 料 工 学	工学部総合校舎地階 0 0 8 号室	松本 要	材料工学 5 4 4 0
10	大学院工学研究科	物 理 工 学	物理系校舎 地階0 1 5 室	蓮尾 昌裕	機械理工学 5 2 2 0
11	工 学 部	工 学 部 R I 研 究 実 験 棟	1階ヘリウム回収室	稼働休止中	低温物質科学研究 センター 4 0 5 5
12	大学院人間・ 環境学研究科	吉 田 南 3 号 館	地階南端階段下	渡邊 雅之	大学院人間・環境学 6 7 9 7
13	総合人間学部	総合人間学部棟	地階1 B 0 2 室	道下 敏則	大学院人間・環境学 6 7 9 5
14	大学院人間・ 環境学研究科	人間・環境学研究科棟	地階東端階段下	小山田 明	大学院人間・環境学 2 9 4 3
15	パンチャー・ビジュ アル・ラボ	V B L	パンチャー・ビジュ アル・ラボ	山田 啓文	電子工学 1 5 - 2 3 0 5

低温物質科学研究センター 専任教官名簿

平成 18 年 4 月 1 日現在

Name	E-mail	職	TEL
齋 藤 軍 治	saito@kuchem.kyoto-u.ac.jp	センタ - 長	4035
澤 田 安 樹	sawada@scphys.kyoto-u.ac.jp	教授	4068
矢 持 秀 起	yamochi@kuchem.kyoto-u.ac.jp	教授	4036
寺 嶋 孝 仁	terashim@scl.kyoto-u.ac.jp	教授	17-3121
伊 藤 忠 直	ito@em.biophys.kyoto-u.ac.jp	助教授	4217
佐々木 豊	sasaki@scphys.kyoto-u.ac.jp	助教授	3755
松 原 明	akira@scphys.kyoto-u.ac.jp	助教授	3755
新 井 敏 一	toshikaz@scphys.kyoto-u.ac.jp	助手	4055
大 塚 晃 弘	otsuka@kuchem.kyoto-u.ac.jp	助手	4036
春 日 井 昇	kasugai@scphys.kyoto-u.ac.jp	助手	4068
北 所 健 悟	kengo@nice.kumac.kyoto-u.ac.jp	助手	4061

低温物質科学研究センター 運営委員会委員名簿

平成18年 4月 1日 現在

Name	E-mail	所 属	TEL
齋藤 軍治	saito@kuchem.kyoto-u.ac.jp	理学	4035
澤田 安樹	sawada@scphys.kyoto-u.ac.jp	LTM	4068/4056
矢持 秀起	yamochi@kuchem.kyoto-u.ac.jp	LTM	4036
寺嶋 孝仁	terashim@scl.kyoto-u.ac.jp	LTM	17-3121
伊藤 忠直	ito@em.biophys.kyoto-u.ac.jp	LTM	4217
佐々木 豊	sasaki@scphys.kyoto-u.ac.jp	LTM	3755
松原 明	akira@scphys.kyoto-u.ac.jp	LTM	3755
大塚 晃弘	otsuka@kuchem.kyoto-u.ac.jp	LTM	4036
藤吉 好則	yoshi@em.biophys.kyoto-u.ac.jp	理学	4215
吉村 一良	kyhv@kuchem.kyoto-u.ac.jp	理学	3989
竹腰清乃理	takeyan@kuchem.kyoto-u.ac.jp	理学	4015
松田 祐司	matsuda@scphys.kyoto-u.ac.jp	理学	3790
長峯 隆	nagamine@bpp2.kuhp.kyoto-u.ac.jp	医学	19-3602
中村 武恒	tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp	工学	15-2223
松本 要	kaname.matsumoto@materials.mbox.media.kyoto-u.ac.jp	工学	5440
菅野未知央	sugano@kuee.kyoto-u.ac.jp	工学	15-2270
山田 雅保	masayasu@kais.kyoto-u.ac.jp	農学	6059
藤原 直樹	naokif@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp,	人・環	6786
前野 悦輝	maeno@scphys.kyoto-u.ac.jp	IIC/理学	3783
小野 輝男	ono@scl.kyoto-u.ac.jp	化研	17-3108
幹事(事務長)	jimuch05@mail.adm.kyoto-u.ac.jp	理学	3602

低温物質科学研究センター 協議員名簿

平成 1 8 年 4 月 1 日

Name	E-mail	所 属	TEL
齋 藤 軍 治	saito@kuchem.kyoto-u.ac.jp	理学研究科 1 号委員	4035
澤 田 安 樹	sawada@scphys.kyoto-u.ac.jp	LTM センタ - 2 号委員	4068
矢 持 秀 起	yamochi@kuchem.kyoto-u.ac.jp	LTM センタ - 2 号委員	4036
寺 嶋 孝 仁	terashim@scl.kyoto-u.ac.jp	LTM センタ - 2 号委員	17-3121
齋 藤 軍 治	saito@kuchem.kyoto-u.ac.jp	理学研究科 3 号委員	4035
三 木 邦 夫	miki@kuchem.kyoto-u.ac.jp	理学研究科 3 号委員	4029
藤 吉 好 則	yoshi@em.biophys.kyoto-u.ac.jp	理学研究科 3 号委員	4215
芹 川 忠 夫	serikawa@anim.med.kyoto-u.ac.jp	医学研究科 3 号委員	4360
半 田 哲 郎	handatsr@pharm.kyoto-u.ac.jp	薬学研究科 3 号委員	4555
長 村 光 造	osamura@hightc.kyoto-u.ac.jp	工学研究科 3 号委員	5434
大 東 肇	ohigashi@kais.kyoto-u.ac.jp	農学研究科 3 号委員	6281
前 川 覚	d54355@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp	人・環研究科 3 号委員	6787
小 野 輝 男	ono@scl.kyoto-u.ac.jp	化学研究所 3 号委員	17-3103
福本穂 事務長	jimuch@mail.adm.kyoto-u.ac.jp	幹 事	3602

「京都大学低温物質科学研究センター誌 (LTM センター誌)」への投稿のお誘い並びに原稿の作成要領

Call for Manuscripts for
"Low Temperature and Materials Sciences (Kyoto University)"

水崎隆雄^{1,2}, 編集委員会²

¹京都大学大学院理学研究科, ²京都大学低温物質科学研究センター

T. Mizusaki^{1,2} and Editorial Committee²

¹Graduate School of Science, Kyoto University,

²Research Center for Materials Sciences, Kyoto University

1. はじめに

「京都大学低温物質科学研究センター誌 (通称: LTM センター誌, 英文名: Low Temperature and Materials Sciences (Kyoto University))」では, 低温物質科学研究センターが提供する寒剤・共通機器の利用者の皆様や関係者の皆様より「研究ノート」, 「技術ノート」, 「サロン」への投稿を歓迎いたします。投稿されました原稿は, 編集委員会で審議のうえ掲載の可否を決定いたします。投稿にあたっては, 電子ファイルおよび印刷原稿を, 下記投稿宛先にそれぞれ電子メールと郵送にてお送りいただきますようお願いいたします。初校刷りは電子ファイルより作成しますので, 以下第2章を御参考のうえ可能な限り MS-Word を用いてカメラレディ的に作成してください。なお, 編集委員会からの原稿依頼も行いますので, 依頼させていただいた際にはよろしくお願い申し上げます。

2. 原稿の作成要領

A4 用紙の上下左右に 25 mm ずつマージンをとって, 和文表題, 英文表題, 和文著者・所属, 英文著者・所属, 本文, 参考文献の順に記述してください。本文は 1 行あたり全角 45 文字, 1 ページあたり 40 行を基準にしてください。漢字・かな・カナには MS 明朝, 英字・数字には Times New Roman, 本文中の見出しには MS ゴシック (またはこれらに準じる書体) を使用してください。表題は 14 point, 著者・所属は 12 point, 本文は 10.5 point, 図・表のキャプションは 10 point の文字を用いてください。表題の前に空行を 3 行入れてください。本文中, 物理記号を表す記号は斜体 (イタリック), 単位記号は立体 (ローマン) で表記し, 物理量と単位の間や数字と記号の間にはスペースを 1 個入れてください。また, 章の間にもスペースを 1 行設けてください。参考文献の引用スタイルは各分野の慣習に従っていただいて結構です。句読点は「.,」に統一してください。図は本文中に貼り付けてください。一旦印画紙に落としますので, 高解像度のものを使用してください。原則, 白黒印刷ですが, カラー図が必要な場合はお教えください。ソフトウェアの互換性の問題で, 原図が忠実に再現できない場合もありますがご了承ください。印刷原稿の右下に鉛筆でページ番号を振ってください。その他の細部については, 本稿ならびに下記 Ref. [1,2] のスタイルを参考にしてください。

参 考 文 献

[1] 水崎隆雄, 京都大学低温物質科学研究センター誌 1, xxx (2003).

[2] K. Mibu, Low Temperature and Materials Sciences (Kyoto University) 1, xxx (2003).

投稿宛先: 京都大学低温物質科学研究センター編集委員会, 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町,

TEL&FAX: 075-753-4057, E-mail: kengo@nice.kumac.kyoto-u.ac.jp (北所健悟)。

編集後記

本誌第8号も無事発行することができ、内容も最新研究成果からLTMセンターのアクティビティを伝える記事まで多岐にわたる興味深い号になりました。高度な内容の質を落とさず、また初めての読者にもよく分かるように原稿を仕上げることは大変な労力だと思います。執筆者の方々には頭が下がります。しかし、最新の科学の成果を分かりやすく伝えるということは、大学に籍を置くものの務めであるのも確かです。科学技術が高度化し、ともすれば専門が異なるととたんに理解が難しくなる昨今の状況にあって、本誌は相互理解のための場を提供するという役割も担っていると思います。今後もタイムリーな記事掲載を目指して努力してまいりますのでよろしくお願いいたします。

K. M.

京都大学 低温物質科学研究センター誌

Low Temperature and Materials Sciences
(Kyoto University)

第8号 2006年4月 Volume 8, April 2006

編集委員会：前野 悦輝（編集委員長）、水崎 隆雄、
寺嶋 孝仁、松本 要、北所 健悟、
前里 光彦、藤原 直樹

事務局：〒606-8502 京都市左京区北白川追分町
京都大学 低温物質科学研究センター
TEL&FAX: 075-753-4057
E-mail: kengo@nice.kumac.kyoto-u.ac.jp（北所健悟）

印刷：紵書房