

物性研だより

第45巻
第2号

2005年7月

目次

- 1 隕石の話.....松田准一
5 中性子散乱より評価したガラス形成物質のフラジリティ.....筑紫格
8 新規Aサイト秩序型ペロブスカイトMn酸化物の開発と
ランダムネス効果.....中島智彦

研究室だより

- 14 ○上田研究室.....上田和夫

物性研究所短期研究会報告

- 21 ○マイクロプローブを用いた強磁場物性研究の展開—現状と将来—

物性研究所ISSPワークショップ報告

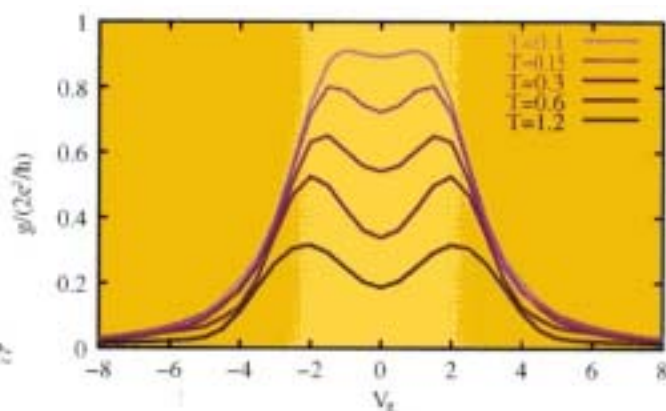
- 44 ○ラットリングと超伝導

物性研究所談話会

物性研ニュース

- 57 ○人事異動
58 ○東京大学物性研究所の教員公募の通知

編集後記



有限温度密度行列繰り込み群で計算した
ファノ-近藤効果の温度依存性の例

東京大学物性研究所

ISSN 0385-9843



隕石の話

大阪大学大学院理学研究科、物性研客員教授 松田 准一

1. はじめに

今年度、八木教授の研究室で物性研究所の客員教授を勤めることになりました。八木研究室では、高圧下における希ガスの溶解度やその挙動を調べる研究をすることになります。

希ガスは物理的・化学的に不活性であることから、複雑な化学反応を考慮することなく、その挙動から地球のコアやマントルができた時の様子やその後の大気や海洋の起源と進化の様子を調べることができます。高圧下における希ガスの挙動そのものも物性的に面白いものです。例えば、キセノンはコアぐらいの深さでちょうど金属化することが指摘されており、コアの鉄と合金を作ることも考えられます。実際、地球の大気には隕石などと比較して、キセノンが1/20になっていることが知られているのですが、この大部分のキセノンが地球のどこに隠れているのかは、まだわかっていません。もし、キセノンが地球のコアに入ることが証明できれば、大変面白い研究結果となります。ただ、これらの研究については客員所員着任紹介講演会でもお話ししたので、この物性研だよりでは別の話にしようと思います。

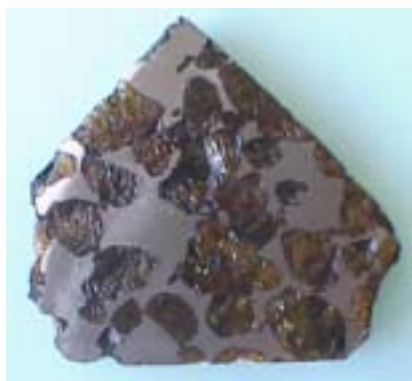
太陽系の構成物質には、地球だけでなく、その他の惑星、月、また隕石などがあります。我々の研究室では、隕石を使って太陽系の起源や進化を調べる研究もしています。そこで、隕石とはどのようなものか、その落下の様子はどのようなものかというのは、一般にも大変興味を持たれることが多いので、そのような話を書こうと思います。

2. 隕石とは？

まず、隕石というと、だいたい“隕鉄”(鉄隕石)を思い浮かべる人が多いと思います。これは地球上では酸素があり、鉄がずっと錆びずに地球上にあるのは大変珍しいので、実際落ちてくるところを見なくても、鉄のかたまりがあると、これは隕石だとわかるためです。ところが、実際に落ちてくるところを見て拾ったもので統計をとると、大部分が、普通の地球の岩石と変わらない“石質隕石”といわれるものです。この中でも特に“コンドライト”と呼ばれる種類のものが一番多いのですが、これは“コンドリュール”と呼ばれる数 mm 程度の大きさの球状のガラス物質が入っているものです。ちなみにこの“コンドリュール”が含まれていないものを“エコンドライト”と言いますが、これなど、落ちてくるところをみてないと、地球の岩石とまるで区別が付きません。この他、鉄と岩石の混ざった“石鉄隕石”というものがあります(図1)。鉄の比重は岩石の比重の2倍くらいあり、こんなに比重の違うものが均等に混じっているのは無重力下でしかありません。このことは隕石が宇宙から来たという証拠の一つになりました。



石質隕石(アレन्दコンドライト)



石鉄隕石(イミラックパラサイト)



鉄隕石(キャニオンダイアブロ)

図1 3種類の隕石。

隕石が本当に宇宙から来たものだとはっきりしたのは、実はごく最近です。1807年にアメリカのコネティカット州に隕石が落ち、2人のエール大学の教授が調査して、「どうも空から落ちてきたらしい」と報告しました。それに対し、時のアメリカのジェファーソン大統領は、「岩石が空から落ちてくるというより、エール大学の2人の教授がうそをついているという方がもっともらしい」と、語ったと言われています。もっともアメリカ先住のインディアンなどは、古くから隕石は空から落ちて来るということを知っていたようです。ですから、非常に神聖だということで、酋長のお墓と一緒に埋葬したりしているのが見つかっています。また、イスラム教の聖なる石である「カーバの石」も隕石であると思われています（別の説では黒曜石という説もあるようです）。

年間にどのぐらいの隕石が地球に落ちて来るのか、授業の時に学生に聞きますと、少ない人で1kgぐらい、多い人でも1tonぐらいと答えます。ところが、実に、年に10万tonも落ちてくることがわかっています。ものすごい量かと思うかも知れませんが、地球の年齢45.5億年をかけても現在の地球の質量の0.00001%もありません。もっとも、昔はもっと落下量が多くて、現在の地球はそのような隕石の落下によって作られたことは間違いありません。

隕石はどのぐらいの速度で地球に落ちてくるのでしょうか。だいたい秒速10km/秒ぐらいです。時速に直すと36,000km/時になりますから、ざっと新幹線の200倍というスピードになります。ですから、地球の大気圏に入ると、大気との摩擦で表面が溶けてどんどん流れ落ちて行きます。これは、落下後は表面に“フュージョンクラスト”と呼ばれる黒い溶けた痕を残すことになり、隕石かどうかの簡単な判断材料にもなります。隕石はいびつな形をしていますから、空中で割れることも多いです。ですから、1個でなく、大量の隕石になって落ちて来ることが多いです。また、粉が出るせいか、雷が鳴ることもあるようです。このようにすごい音と光を伴い、華々しく隕石は落下してくるというわけです。

なお、隕石は落ちたところの地名で名前がつけられることになっています。隕石命名委員会というものが、国際隕石学会の中にあり、そこに新しく落下した隕石は命名を申請することになっています。もっとも、近年南極で大量の隕石が見つかり（“南極隕石”と呼ばれる）、これには南極での簡単な地名と発見された年と発見された順の番号でつけられています。

3. ダイヤモンド入りの隕石

有名なアメリカのアリゾナ隕石孔は直径が1.2kmぐらいありますが、これは鉄隕石が落下してできたもので、地球上で一番新しいクレーターです（約25,000年前）。この鉄隕石は“キャニオンダイアブロ”と呼ばれていますが、ダイヤモンドが含まれていることで有名です。

面白い話があって、1900年の初めに「このクレーターの下には大きな鉄の塊が埋まっているに違いない。掘り出して、大儲けしよう!」と考えた人がいて、何カ所かでボーリングをしたのです。ところが、地下には何も見つからなかったのです。もちろん、かけらは周囲に落ちているのですが、ほとんどの鉄は蒸発してしまったと思われます。しかし、このボーリングのおかげで、隕石が落下した時にどのように物質が飛び出し、どのように堆積するのかという研究が進んだのですから、皮肉というしかありません。

数ある鉄隕石の中で、ダイヤモンドが入っている鉄隕石は2つ知られており、キャニオンダイアブロはその1つです。昔、この隕石をダイヤモンドカッターで切っている時に、途中で切れなくなり、それでダイヤモンドがあることがわかったと言われています。図2はオーストリアのウィーン自然史博物館に展示されている約20cmのキャニオンダイアブロの断面です。その中央にダイヤモンドが含まれています。ダイヤモンドというと、宝石に使われる透明できれいな結晶を想像しがちですが、残念ながら隕石中のダイヤモンドはこのような黒くて細粒の微結晶できれいではありません。

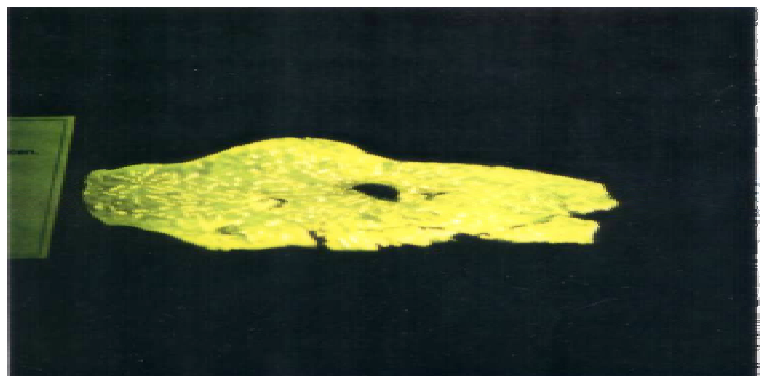


図2 ウィーン自然史博物館にあるキャニオンダイアブロ。中央の黒いところがダイヤモンド。横幅は約20cm。

石質隕石では、エコンドライトの1つである“ユレイライト”といわれる隕石がありますが、これにもダイヤモンドが含まれています。鉄隕石と異なり“ユレイライト”のほとんどがダイヤモンドを含んでいます。これら隕石中のダイヤモンドの成因については昔からいろいろと議論されてきました。これには工業的な技術の発展も関係しています。

1955年頃、アメリカのジェネラルエレクトリック社が世界で初めて高温高压状態を長時間保持できる装置を開発して、ダイヤモンドの生成できる温度、圧力が明らかになりました。この当時、地球の中のダイヤモンドと同じように、隕石のダイヤモンドも隕石の母天体深部の高温高压状態で作られたと考えられていました（「静水圧説」という）。そして、この新しいダイヤモンドの安定領域のデータを使って、その母天体のサイズなどが推定されていました。

ところが、1960年代になると、フランスのグループが、火薬を爆発させて瞬間的な高温高压状態を作り出しダイヤモンドを合成することに成功しました。実際、あるフランスの総合化学会社から、このような衝撃合成のダイヤモンドが市販されています。そこで、隕石中のダイヤモンドも、隕石が宇宙空間で互いに衝突した時、あるいは地球上に落下した時の瞬間的な高温高压状態で生成されたのだという考えが出てきました（「衝撃説」という）。実は、隕石中のダイヤモンドを静水圧で作るには月ほどの大きさの天体が必要で、隕石が飛来してくると考えられる小惑星帯（火星と木星の間に数10万個ともいわれる小惑星の集合帯があり、そこから隕石が来ると考えられている）では、月ほどの大きい天体はないのです。また、隕石中のダイヤモンドはある方向に結晶軸がそろっています。これは単なる静水圧で等方に圧力が加わったのではなく、ある一方方向に圧力が加わったということで、衝撃波が走ったということとうまくつじつまが合います。静水圧説と衝撃説では、長い間論争があったのですが、このようなことからだんだんと衝撃説の方が優勢になってきました。

ところが、1970年代になると、ロシアの科学者たちが、ダイヤモンドは高温高压状態で作るばかりでなく、水素が主成分のほとんど真空に近い低圧からも気相成長でできることを示しました。我々は、実際に希ガスを含んだ水素とメタンの混合ガスからダイヤモンドを電子レンジ（！？）中で気相成長させ（図3）、ダイヤモンドに含まれる希ガスの存在量のパターンが隕石中のダイヤモンド中のものと同じで、衝撃合成で作った場合とは異なることを示しました。それで、隕石のダイヤモンドは原始太陽系のガスから直接析出してきたのではないかと断言しているのです（「気相成長説」という）。ところが、鉱物を研究している人は、グラファイトがダイヤモンドに変化しかかっているものもあるので、やはりもともとあったグラファイトになんらかの圧力が加わってダイヤモンドに変換したのだと主張し、未だ論争中です。



図3 気相成長で作成したダイヤモンド。上図は製作にもちいた電子レンジ（電子レンジの中を希薄気体のチューブを通し放電させた）。下図は気相成長させたダイヤモンド（左）とグラファイト（右）。ダイヤモンドは水素99%、メタン1%で、グラファイトは水素95%、メタン5%の条件で気相成長させた。シリコン基板の上のダイヤモンドは数10ミクロンの大きさ。

4. 隕石落下の最古の目撃記録

先に、隕石は、実際に落ちてくるところを目撃して隕石だとわかる場合と、落ちてくるところを見ないで後から隕石だとわかる場合があるという話をしました。それでは、人類が実際に隕石が落ちるところを見たという記録はどこまでさかのぼれるのでしょうか。実は、1492年にフランスのアルザス地方に落ちた隕石が、もっとも古い隕石落下の目撃記録だとされていたのですが、もっと古いものが日本にあるのです。

福岡県の直方(のうがた)の須賀神社に隕石の納めた箱があります(図4)。この箱のふたの裏に「貞観三年四月七日二収納ム」と書いてあるのです(図5)。これは西暦861年5月19日になりますから、一気に630年も古い記録となりました。西暦861年といえば、ちょうど平安時代で、小野小町など六歌仙の活躍した時代です。

言い伝えによりますと、この貞観三年四月七日の夜、空が昼間のようにものすごく明るくなって、境内で大きな爆発音がしたということです。朝になって、人々が恐る恐るその神社に行ってみると、社殿の屋根が一部壊れていて、境内が深くえぐられていました。その中にこぶし大の真っ黒な石があったので、これを掘り出して納めたというのです。大正11年には京都大学におられた山田邦彦博士が鑑定され、隕石であることが確認されたのですが、山田博士が急逝されたため、発表の機会もなく、ずっと眠りつづけていました。昭和54年になり、九州のラジオ局が九州地方の昔話として紹介したことから、国立博物館の村山博士が知るところとなり、再び脚光を浴びたようです。ふたの一部を削り、年代測定をしたところ、箱の放射性年代は1450 +/- 300年で間違いなく古いものであることもわかりました。

まさに「かぐや姫」のような話です。空から落ちて来た石というだけでもめずらしいのに、神社に落ちたというので、さぞ人々はびっくりしたことと思います。

5. 終わりに

隕石とはどのようなものが、少し研究の話も含めて紹介しました。平安時代に隕石の落ちた記録が日本にあることは意外と知られていないと思います。この記事から隕石に親しみを持っていただけると幸いです。



図4 須賀神社の岩熊宮司さんが直方隕石を箱から取り出したところ。



図5 直方隕石の納めてあった箱の裏書き。「貞観三年四月七日二収納ム」と書いてある

中性子散乱より評価したガラス形成物質のフラジリティー

千葉工業大学工学部、物性研究所客員講師 筑紫 格

この度、平成 17 年 4 月より 1 年間、客員講師として物性研にお世話になります。私は、分子性液体や高分子のガラス状態について、主に熱測定と中性子散乱を使った研究をしております。ガラス状態は熱力学的には非平衡の状態ですし、本質的に動的な性質だということに興味を持っています。以下、まだ粗っぽい段階ではありますが、中性子散乱を使ってできるガラス形成物質の新たな評価法について述べてみたいと思います。

構造的に原子・分子が不規則に配列しているアモルファス固体は、結晶に比べて大きく理解が遅れています。その理由は、結晶構造やデバイモデルのような物性の理解の基礎となる分類やモデルがアモルファス固体では存在しないことにあります。逆にアモルファス固体に物性の理解の基礎となる分類やモデルを確立することにより、材料開発の観点からも大きな発展が期待されます。

現在、アモルファス固体を分類する有力な指標としてよく使われている概念に Fragility (フラジリティー) の概念があります。この概念は、1980 年代に Angell によって提唱され 以下のように緩和時間のガラス転移点での傾きで定義されます。

$$m = \left. \frac{d \log \langle \tau \rangle}{d(T_g/T)} \right|_{T=T_g} \quad (1)$$

フラジリティーは、粘性測定、誘電率測定など様々な測定から算出されているのですが、粘度からは、 $\eta \propto \tau$ と考えて良いので粘度のガラス転移温度での傾きで算出されます。傾きの小さいガラスはストロングなガラス、傾きの大きなガラスはフラジャイルなガラスと呼ばれ、フラジャイルなほど、物理量の緩和関数が非指数関数的で、活性化エネルギーも非アレニウスの温度依存性を示します。ただその詳細については、まだはっきりとしていないところもあり未だに様々な提案がなされている段階です。近年、パリージラのグループにより、フラジリティーを説明する際に概念的に示されてきたエネルギーランドスケープを理論的に説明しようとする提案がなされ、大きな注目をあびています。そのフラジリティーを、ある仮定をおくことによって中性子散乱から得られる平均 2 乗変位からも導出できることを示したいと思います。

実験は、高エネルギー加速器研究機構(つくば)にある逆転配置型結晶アナライザー分光器(LAM-80ET)を用いて行いました。LAM-80ET は、高エネルギー分解能型の準弾性・非弾性中性子散乱装置です。実験に用いた試料はスチレントリマー(ST)、スチレンペンタマー(SP)およびポリスチレン(PS)です。アモルファス高分子の特色を生かし、モノマー単位は同じにして分子鎖の長さを変化させることによってフラジリティーを変えました。測定は 10K からガラス転移温度以上の温度範囲でおこないました。

図 1 は、LAM-80ET で弾性散乱強度の Q 依存性の測定より計算した平均 2 乗変位の温度依存性です。2 試料とも 200K 付近より平均 2 乗変位が直線的な温度依存より外れ、何らかの非調和振動的な運動が起こっていることがわかります(速い過程)。ガラス転移温度以上で平均 2 乗変位はさらに大きく温度変化します。ポリスチレンでは、速い過程が起こる温度が 200K 付近であるにも関わらず、ガラス転移温度が 373K とかなり高温です。これは、分子鎖が長くなることによりガラス転移温度が抑制されていることを示しています。また、ガラス転移温度が 3 試料で大きく変わるのに比べて、速い過程の観測される温度がほぼ変わらないということは、速い過程が、高分子化効果の影響を受けないほど局所的な運動であることを示しています。

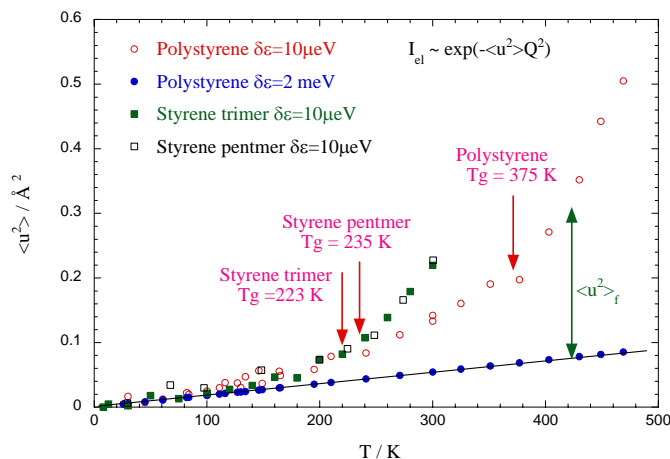


図 1 ST、SP、PS の平均 2 乗変位の温度変化

図 1 において、エネルギー分解能が 2meV の平均 2 乗変位は、観測した全温度領域に渡って直線的な温度依存性を示しています。よってこの平均 2 乗変位は、結晶的（～調和振動的）な振動モードであると仮定して、アモルファス高分子のエネルギー分解能が 10 μeV の平均 2 乗変位を、調和振動部分と過剰変位部分とに分離しました。この過剰平均 2 乗変位の温度依存性を、ガラス転移温度での値でスケールしたのが図 2 です。

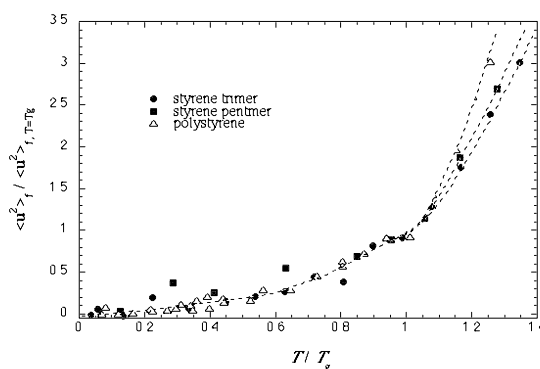


図 2 ガラス転移温度の値でスケールした ST、SP と PS の過剰平均 2 乗変位 $\langle u^2 \rangle_f$ の温度変化

過剰平均 2 乗変位は、ガラス転移温度以下では温度依存性に違いが見られないのに対して、ガラス転移温度以上では温度依存性に違いが見られました。ガラス転移温度以上での温度依存性の違いは、Buchenaus らによって指摘された過剰平均 2 乗変位と粘度に以下の関係式を仮定すると

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{u_0^2}{\langle u^2 \rangle_f}\right) \quad \eta_0, u_0 \text{ は定数} \quad (2)$$

フラジリティーを反映すると考えられます。式(2)の関係はセレン、ポリブタジエンやポリスチレンのアモルファス物質で成立することが確認されています。表 1 は、フラジリティーとしてポリスチレンの文献値を基準にしてガラス転移温度での過剰平均 2 乗変位の傾きより求めたフラジリティーです。この表より、スチレンの場合分子鎖が長くなるほどよりフラジールになることがわかります。また、グリセロールの値をみると、粘度測定より得られたフラジリティーと過剰平均 2 乗変位の傾きより求めたそれとはほぼ一致していることがわかります。粘度測定でみている時間スケールは、ほぼ 10^3s なのに対して、中性子散乱でみている時間スケールはおよそ 10^{-11}s であることより、かなり広い時間スケールにわたってフラジリティーの傾向が変わらないことを示しています。このように、平均 2 乗変位からフラジリティーの評価を試みた

表1 平均2乗変位から評価したフラジリティー

	m	$\left. \frac{d(1/\langle u^2 \rangle_r)}{d(T_g/T)} \right _{T=T_g}$
PS	139*	2.92
ST	85	1.78
SP	123	2.58
Glycerol	59...(53*)	1.24

* 粘性率のデータからえたフラジリティー

のですが、その評価方法の一般性、他の測定から得られるフラジリティーとの整合性等については、さらに検討する必要があると考えています。私個人としては、ガラス転移現象を時間スケールとの関わりを考えることにより理解していきたいと思っています。その意味で、実験的な手法で 10^{-11} s 程度の短い時間スケールを見ることが可能な中性子散乱と 10^3 s 程度の長い時間スケールを見ることが可能な熱測定は、幅広い時間スケールを見る上で重要なツールといえます。

最後に、物性研究所の客員研究員という私にとっては過分とも思える恵まれた機会を与えていただいた山室 修 助教授、吉澤 英樹 教授を始め中性子散乱研究施設スタッフおよび所員の方々に感謝して、この稿を終わりたいと思います。

新規 A サイト秩序型ペロブスカイト Mn 酸化物の開発とランダムネス効果

物質設計評価施設 上田寛研究室 博士課程 3 年 中島 智彦

このたび、今春に ISSP 学術奨励賞を頂いた内容で「物性研だより」の執筆をさせて頂く事になりました。まず、初めにこれまでお世話になった皆様に感謝したいと思います。元々、学部生時代には触媒をやっており、固体は固体でも物性研の固体物性研究のように厳密な世界ではなかったため、ほとんど素人同然で物性科学の研究に取り組み始めた。そんな私を育てて下さった物性研の方々に心から御礼申し上げます。

現在、私はペロブスカイト型構造を持つ Mn 酸化物のカチオンランダムネス効果についての研究を行っている。ペロブスカイト型 Mn 酸化物は巨大磁気抵抗(CMR)効果の発見によって世界中の多くの研究者の興味を惹き、これまでに膨大な数の実験的・理論的研究結果が報告されている物質である。このように大きな注目を集めてきたのは、この系がスピン・電荷・軌道・格子の自由度が互いに深く絡み合った“強相関効果”を発現する結果として、強磁性金属転移や電荷軌道整列、電子相分離、それに伴う CMR 効果などの非常に多彩な物性を示すところにある¹⁾。また、応用の面でも CMR を利用した次世代磁気ヘッドなどの開発に期待が寄せられており、これは記録面密度を飛躍的に向上させる磁気ディスク装置の実用化には欠かせない。さらに、ペロブスカイト型 Mn 酸化物が示す TMR(トンネル磁気抵抗)効果を利用した磁気メモリ(MRAM)、電場誘起抵抗スイッチング効果を利用した Resistance RAM(RRAM)も次世代の不揮発メモリとして実用化が期待されており、今後のさらなる情報化社会に多大な貢献をし得る。このような社会的要請もあり、この分野の研究は大きな期待を寄せられている一方で、複雑な物性の発現機構は明らかになっていない部分も多く、今後も基礎研究の発展に対する期待は非常に大きい。

ペロブスカイト型 Mn 酸化物における電荷・軌道整列、電子相分離、CMR 効果等の興味深い現象は $R^{3+}MnO_3$ の R^{3+} (希土類金属イオン) を A^{2+} (Ca^{2+} , Sr^{2+}) で置換した系 $R_{1-x}A_xMnO_3$ において現われる (R , A イオンが占めるサイトをこれ以降、ペロブスカイト構造の A サイトと呼ぼう)。系の物性は A サイトを大きさ、価数の異なる種々のカチオンで置換していくことにより、Mn イオンの e_g 電子に関するバンドフィリング、バンド幅を変化させてコントロールされ、その結果が体系的に捉えられてきた。しかし、A サイトを無秩序に占める 2 種類以上のカチオンによって構造・電荷のポテンシャルに大きな乱れが導入されていることが予想され、複数の自由度が絡み合うこの系では、このランダムネスが物性を非常に大きく変化させる要因になるという理論予測はされているが²⁾、具体的にどのように影響を与えるか、実際の物質を用いての実験研究例はないに等しい状況であった。

また応用上の問題点としては、室温付近で高い CMR 効率を示す物質が全くないことが挙げられる。そして、この原因として考えられるのも A サイトのランダムネスである。構造・電荷の乱れが強磁性転移・電荷整列転移などの相転移温度を低下させているのではないかと考えられるため、応用上もこの問題を解決することが次のステップへ進むための大きな課題となる。そこで、ペロブスカイト型 Mn 酸化物における A サイトカチオンの秩序度(ランダムネス)に注目し、秩序度を変化させた物質を合成して物性の比較を行い、ランダムネス効果を理解することを目的として実験を行うこととした。

前述した A サイトのランダムネス効果を系統的に調べるためには、これまでになかった A サイトが秩序化した物質群が必要となる。そこで 2 種類の A サイトカチオン、 R と Ba を層状に規則配列させた物質を A サイト秩序型物質の候補とすることにした。図 1 に示すように、この物質の合成はまず、出発物質を還元雰囲気中 (Ar 中) で反応させると、小さな希土類イオンと非常に大きな Ba イオンの周囲で酸素の配位の仕方が変わってくる。酸素イオンは小さな希土類イオンよりも大きな Ba イオンの周りで 12 配位をとりたがるため、A サイトが層状秩序し、希土類イオンの周りだけ酸素が欠損した

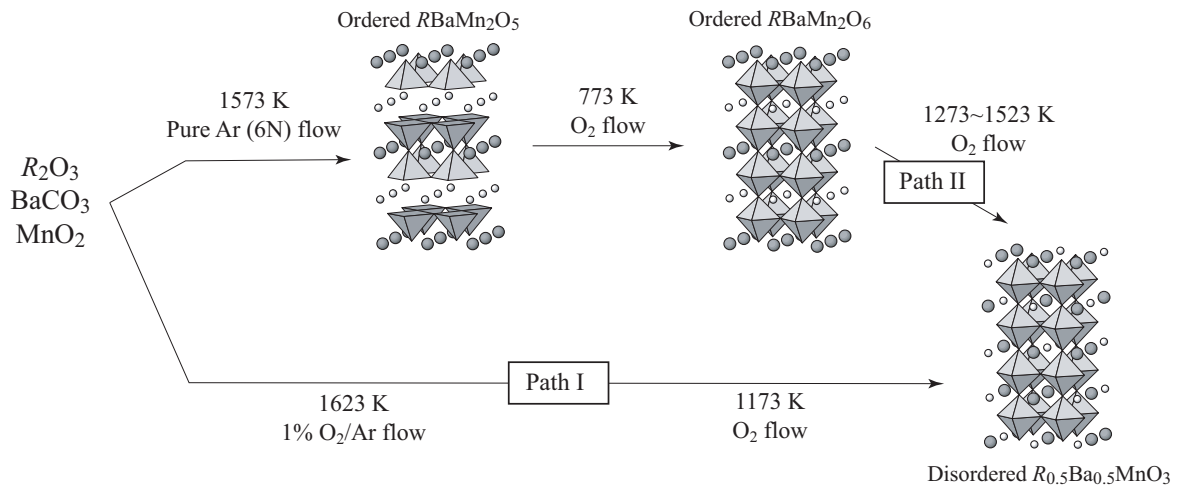


図1 秩序型 $RBaMn_2O_6$ /無秩序型 $R_{0.5}Ba_{0.5}MnO_3$ の合成フローチャート

$RBaMn_2O_5$ が出来上がる。そして、この層状構造を乱さないよう低いマイルドな温度で酸素処理することにより、層間に酸素がインターカレートされ、目的の $RBaMn_2O_6$ ($R = Y, La \sim Ho$) を得ることに成功した。私がこの合成を試みた頃、 $RBaMn_2O_5$ のような A サイトが層状秩序した物質は $M=Co, Fe$ などの物質で精力的に研究が進められていたが、 $M=Mn$ では Millange らの報告³⁾等、僅か数例に留まり、まだ物質群の研究が展開されていなかったため非常にラッキーであり、希土類イオンの非常に広い領域で合成に成功したため、以下に示すような一連の研究を広く展開することが可能になったのである。

さて、 $RBaMn_2O_6$ の合成では出発物質を還元雰囲気処理したが、酸化雰囲気中で反応させると従来型の A サイトが固溶した $R_{0.5}Ba_{0.5}MnO_3$ が出来る。これだけでも同じ組成を持つ物質に対しての A サイトの乱れの効果が検討出来るが、得られた $RBaMn_2O_6$ の安定性を調べている段階で興味深いことが分かった。それは、A サイトが層状秩序した物質は高温及び酸化雰囲気では安定にその A サイト秩序を保っていられず、A サイトが固溶してしまうこと、そして A サイトの秩序 無秩序の変化が非常に遅い (通常の温度プログラムで十分にコントロール出来る) ことである。その結果、温度と反応時間を制御することで様々な A サイトの秩序度を持つ $RBaMn_2O_6$ の合成に成功した。このようにして同一組成を持つ物質で A サイトの秩序度のみが異なるものを作り分け、物性が A サイトの乱れにどのように影響を受けるかを定量的に評価することを可能にした。得られたサンプルを用いて、結晶構造・物性を比較した結果を以下に示す。(紙面の都合上本研究の全てを詳述することは出来ないため電子相図を中心に説明を進めたい。)

合成した $RBaMn_2O_6$ について結晶構造解析を行った結果、A サイトは一樣に層状秩序を形成しており、さらに特徴的なことは図2に示すように MnO_2 副格子がサイズの異なる二つの岩塩型副格子 RO と BaO に挟まれる結果、 MnO_6 八面体は、一般的なヤーン・テラー歪みとは大きく異なり、対称心を持たない特徴的な歪みを持つことが分かった。即ち、頂点酸素と Mn との距離は BaO 層側で伸び RO 層側で縮んでいて、 MnO_2 面も平面でなく酸素原子は Mn 原子よりもより RO 層側に寄っている。このような歪みの程度は R のイオンサイズが小さくなるに従いより大きくなる⁴⁾。

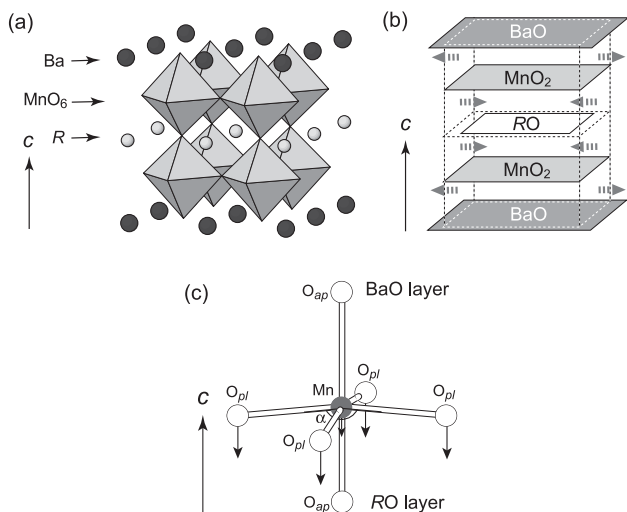


図2 (a) $RBaMn_2O_6$ の結晶構造 (b) $RBaMn_2O_6$ のサンドウィッチ構造 (c) MnO_6 八面体の歪み

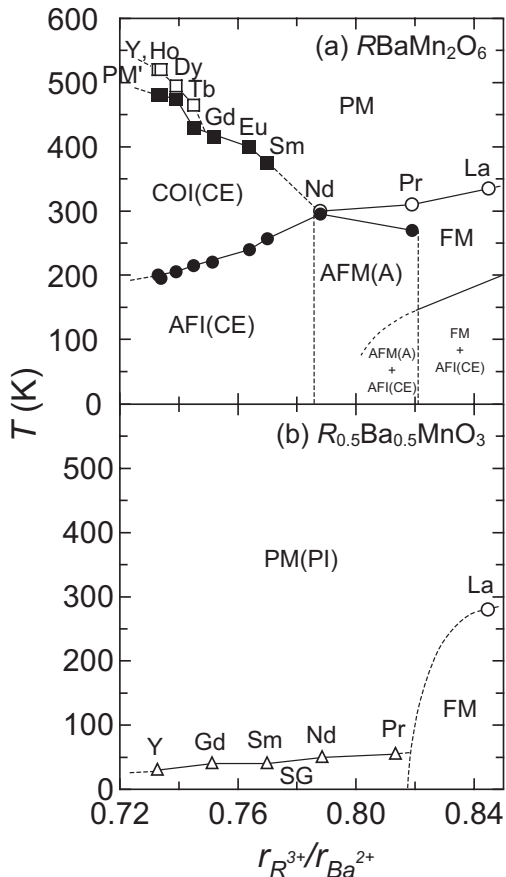


図3 (a)秩序型 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ / (b)無秩序型 $R_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{MnO}_3$ の電子相図; PM:常磁性金属相, PI:常磁性絶縁体相, FM:強磁性金属相, AFM(A):A型反強磁性金属相, COI(CE):CE型電荷・軌道整列絶縁体相, AFI(CE):CE型反強磁性絶縁体相, SG:スピングラス相

$R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ についての物性の測定結果を電子相図として図 3(a) に示す⁵⁾。ここで横軸は R^{3+} と Ba^{2+} のイオン半径比で、 RO 格子と BaO 格子の格子不整合の大きさであり、この値の大きさがバンド幅の大きさに対応すると考えていただいて差し支えない。 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ はその構造・物性から三つのグループに分けられる。第1グループ ($R = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}$) の構造は MnO_6 八面体の回転傾斜のない単純正方晶である。従って強磁性金属相がまず現われ、 $R = \text{Pr}, \text{Nd}$ では $d_{x^2-y^2}$ 型の軌道秩序を持つ A 型反強磁性金属相 (AFM(A): 図 4(a)) が基底状態である。A 型反強磁性金属相が安定である原因として、A サイトイオンの層状配列による結晶の 2 次元性が考えられる。一方、 RO 格子と BaO 格子の格子不整合が大きくなる第2グループ ($R = \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$) と第3グループ ($R = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Y}$) は MnO_6 八面体の回転傾斜による超格子構造を示す。構造歪みの大きさを反映し、バンド幅は第1グループと比べて狭くなるために CE 型電荷・軌道整列相 (図 4(b-d)) が安定となっている。CE 型電荷・軌道整列温度は従来の無秩序型 $R_{0.5}A_{0.5}\text{MnO}_3$ ($A = \text{Ca}, \text{Sr}$) に比べ 100 K 以上高く、 YBaMn_2O_6 では 480K に達する。このことは、A サイトイオンの層状配列により A サイトでの電荷分布の不均一さがなくなり、Mn サイトの電荷整列がより促進されると解釈できる。

$R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ における電荷・軌道整列で興味深いのは ab 面内では従来の CE 型電荷・軌道整列パターン (図 4(b)) と同じであるが、 c 軸方向に 4 倍周期の積層パターン (図 4(c,d)) を持つことである⁶⁾。さらに注目すべきことは、この 4 倍周期は反強磁性になると同時に消え、電荷・軌道整列としては 2 倍周期の、一方でスピン構造としては CE 型 4 倍周期の構造 (図 4(e)) を持つようになる⁶⁾。また、 RO 格子と BaO 格子の格子不整合が最も大きい第3グループ ($R = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Y}$) では、電荷・軌道整列温度より高温側に電荷秩序も磁

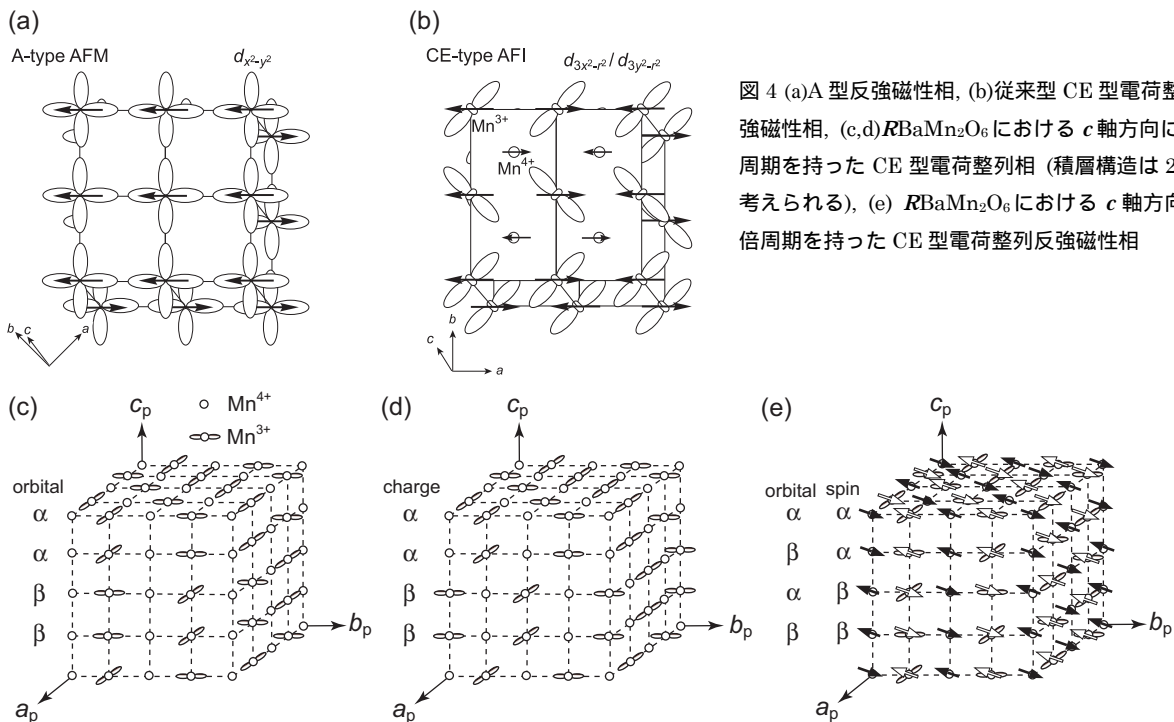


図4 (a)A型反強磁性相, (b)従来型 CE型電荷整列反強磁性相, (c,d) $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ における c 軸方向に 4 倍周期を持った CE 型電荷整列相 (積層構造は 2 種類考えられる), (e) $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ における c 軸方向に 4 倍周期を持った CE 型電荷整列反強磁性相

気秩序も伴わない構造相転移が観測される。この相転移は磁気相関、結晶構造、電気抵抗の異方性測定などにより $d_{x^2-y^2}$ 型の軌道秩序が起こっていると考えられる。もしこれが正しいならば、軌道・電荷・スピン自由度の凍結温度が分離していることになり、軌道・電荷自由度が縮退している従来型と大きく異なる。

以上のような新奇な性質は、A サイトが層状に秩序化することによる MnO_2 層でのフラストレーション(図 2(b))やそれによる MnO_6 の特異な変形(図 2(c))に伴い、互いに拮抗した電荷・軌道・スピン相互作用に新たな摂動が加わることに起因していると考えられる。

次に特徴的なことは $\text{NdBaMn}_2\text{O}_6$ 、 $\text{SmBaMn}_2\text{O}_6$ 間の強磁性金属相(A 型強磁性金属相)と CE 型電荷・軌道整列反強磁性相との臨界領域において、転移点の落ち込み及び電子相分離状態が認められないことである。従来 A サイトが無秩序化したペロブスカイト型 Mn 酸化物($R_{1-x}A_x\text{MnO}_3$ $A=\text{Ca}, \text{Sr}$)では、この 2 種の相互作用が競合する領域では局所構造の揺らぎや組成揺らぎにより転移点は著しく抑えられ、電子相分離状態が観測されていた¹⁾。しかし A サイトからランダムネス(局所構造・組成揺らぎ)を排除したことで、強磁性相と反強磁性相の競合が非常に小さくなりこれらの現象が抑えられたと考えられる。このように、A サイト秩序型物質は従来のペロブスカイト Mn 酸化物とは構造・物性が大きく異なり、ペロブスカイト Mn 酸化物に対する新たな理解の必要性を示している。

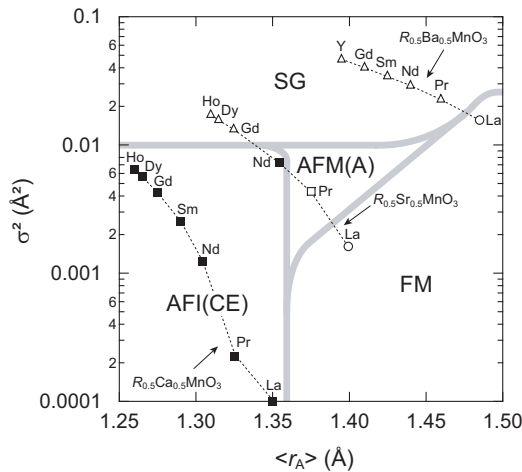


図 5 無秩序型 $R_{0.5}A_{0.5}\text{MnO}_3$ ($A=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$)の $\langle r_A \rangle$ - σ^2 相図; FM:強磁性金属相, AFM(A):A 型反強磁性金属相, AFI(CE):CE 型反強磁性絶縁体相, SG:スピングラス相 (Ca,Sr 系のデータは参考文献 1,7 より)

まず $R_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$ は Ca のイオン半径が Sr、Ba に比べて R イオンのそれに近いため σ^2 の値は小さくなる。そのため構造のランダムネスによる長距離秩序形成の阻害は抑えられ、狭いバンド幅に対応して CE 型の電荷・軌道整列が現れる。Sr の場合には σ^2 の値が 10^{-2} 以下の範囲では長距離秩序を形成し、それぞれのバンド幅の大きさに対応して、強磁性相、A 型反強磁性相、CE 型反強磁性相が現れる。ただし σ^2 の値が 10^{-2} を越えると長距離秩序の形成が不利になり、スピングラス相になってしまう。Ba 系の物質では、 σ^2 の増大によって長距離秩序の形成は困難になり、 $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{MnO}_3$ を除いてスピングラス相が支配的になっている。以上のことから明らかなように、A サイト無秩序型ペロブスカイト型 Mn 酸化物では、従来のように A サイトの平均イオン半径から考えるバンド幅だけでなく、A サイトカチオンのランダムネスの影響を無視できない。それは、A サイトランダムネスが磁気・電荷の長距離秩序の形成に多大な影響を与えているためである。

このように A サイトのランダムネスはペロブスカイト型 Mn 酸化物の物性をコントロールする上で非常に重要であり、またこれまでに見られなかった新奇な相転移を起こさせるためには欠かせない要素であることが分かった。では、ランダムネスの効果の程度問題はどうかになっているだろう。こういった秩序相がどの程度のランダムネスの導入でどう変化してい

さて、 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ と全く同じ構成元素を持ち、A サイトが無秩序化した $R_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{MnO}_3$ ではその結晶構造・物性はどうか変化するだろう。物性と格子定数の変化を図 3(b)の電子相図に示す。結晶の平均構造は全て単純立方格子である。 $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{MnO}_3$ を除く全ての化合物で磁気・電荷長距離秩序を示さず、スピングラス的振る舞いを示した。あれだけ奇妙な相転移(電荷・軌道・磁気秩序)しかも室温よりはるかに高温で起こっていたものが、きれいさっぱりなくなってしまった。 $\text{La}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{MnO}_3$ では強磁性転移を示すものの転移温度は $\text{LaBaMn}_2\text{O}_6$ と比較して 50 K も低下している。これは明らかに A サイトの無秩序化が原因であり、構造の乱れが長距離秩序の形成を妨げていると考えられる。このとき、構造の乱れをミクロなスケールから評価することは難しいので全体の平均構造から理解することにする。

図 5 に A サイトカチオンのイオン半径の分散 σ^2 ($\sigma^2 = \sum_i y_i r_i^2 - r_A^2$, r_i : それぞれのイオン半径, y_i : 占有率, r_A : 平均イオン半径)と A サイトの平均イオン半径 $\langle r_A \rangle$ 、及びその基底状態との関係を示す。横軸 $\langle r_A \rangle$ はバンド幅に対応する。一方、縦軸 σ^2 は構造のランダムネスの大きさを表している。

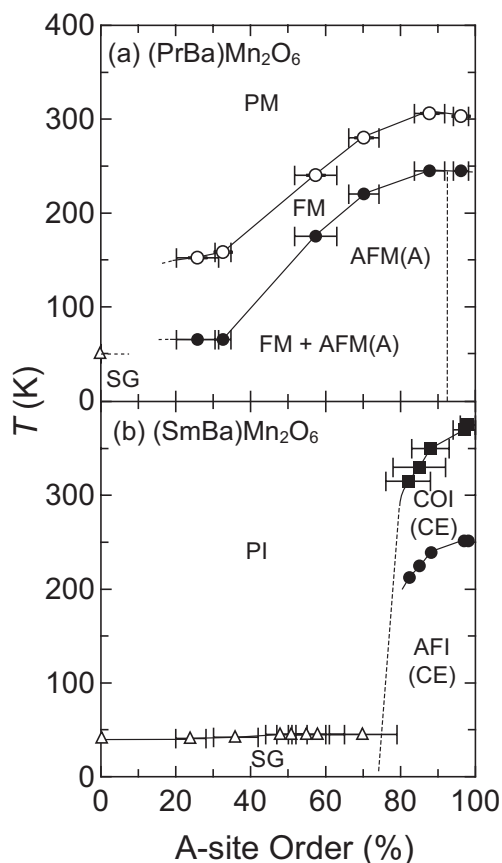


図6 (a) $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ /(b) $\text{SmBaMn}_2\text{O}_6$ のAサイト秩序度に対する相図; PM:常磁性金属相, PI:常磁性絶縁体相, FM:強磁性金属相, AFM(A):A型反強磁性金属相, COI(CE):CE型電荷整列絶縁体相, AFI(CE):CE型反強磁性絶縁体相, SG:スピングラス相

属酸化物ではこれまでにない桁違いの大きさであり、前述の研究を経なければ得られない結果である。

このようにペロブスカイト型Mn酸化物においてランダムネスの問題を同一組成の物質で定量的に検証することによって、乱れの大きさの制御を系の物性をコントロールする大きな要素として扱えることが分かった。

以上の研究は現京大助教授の陰山洋先生、物性研中性子の吉澤英樹先生、電顕室の市原正樹さん、X線室の山浦淳一さん、上田研の山内徹さん、院生の光野直美さん、分析室の坂井富美子さん、木内陽子さん、そして私のボス・上田寛先生と共同で行った研究です。また普段より、ディスカッション等々、上田研の皆様には大変お世話になりました。この場を借りて感謝致します。

昨年、ベルギーのアントワープであった無機化合物材料の会議で私の今回の研究の初期段階で非常に役に立った論文³⁾を執筆されたFranck Millange氏にお会いした。個人的に気になっていた方だったので実際に会えたことが嬉しかったのと、その後、彼に私の成果についていろいろと褒めて頂いたことが若い私には非常に良い刺激になった。(彼も私が物性研に来る随分前に同じ物質(YBaMn_2O_6)の構造・物性の研究に手をつけていたらしいのだが、途中でやめてしまっていたらしい。ラッキーだった...)概して外国人は褒め上手であるが、何故か日本の外で日本人以外の研究者に褒められると、日本で日本人に褒められるより数倍嬉しい。これにはいくつかの理由があるのだと思うが、こういった経験がまた次頑張ろうという糧になるのであって、大変良い経験をした。ちょうどこの後、室温CMR物質の合成に成功し、今回のISSP賞受賞に繋がったのも、もしかするとアントワープで自分のモチベーションが数段高められたからかもしれない。今後もうこういった“良い刺激”があることを楽しみにしつつ、また次なる目標へ向けて日々精進していきたいと思う。

くか。実際に $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ 、 $\text{SmBaMn}_2\text{O}_6$ についてAサイトの秩序度を様々に変えることで物性の変化を追いかけた(図6)⁸⁾。その結果、 $\text{PrBaMn}_2\text{O}_6$ では強磁性及びA型反強磁性転移が乱れの導入とともにみるみる抑えられていくことが分かった。そして、Aサイトが秩序化した場合には基底状態に磁気相分離は見られないのに対し、乱れの導入に伴い、低温で磁気相分離が大きくなって、磁気抵抗効果も顕著に増大することが明らかとなった。つまり、結晶中の乱れの導入が磁気・電荷秩序のコヒーレンス長に大きな影響を与え、競合する2相(強磁性相・電荷整列相)の揺らぎを強くして電子相分離状態の形成を促す。その結果、磁気抵抗効果の発現には、結晶中に乱れを導入することが必要不可欠であるといえる。

では、電荷整列転移を示す $\text{SmBaMn}_2\text{O}_6$ ではどうか。こちらは電荷整列相を持つことから、乱れを導入していけばCMR効果が期待出来るのではないかと。PrBaMn₂O₆と同様にAサイトの秩序度を変えていったところ、電荷整列は前述の磁気秩序に比して非常に電荷の乱れ($\text{Sm}^{3+}/\text{Ba}^{2+}$)に敏感であり、わずかな乱れの導入で長距離秩序の形成が困難になってしまうことが分かった。この乱れに対する電荷整列転移の変化は理論予測の結果とも良く合い²⁾、やはり電荷整列には乱れの大きさが顕著に効いてくることが分かる。しかしながら、SmとBaの大きなイオン半径の差(大きな σ^2)は、大きな局所歪みを生んでいるため、電気伝導には必要以上に不利な状態をつくり、残念ながら磁場をかけても磁気抵抗効果は発生しなかった。乱れの導入(Aサイト秩序度の変化)は磁気抵抗効果に必要なパラメータとなっているが、CMR効果の発現には局所的に見た場合の乱れ方の程度(この場合は σ^2)も考慮しなくてはならないことが分かる。以上の研究結果を踏まえ、最近、電荷・構造の乱れを適切に制御した $\text{Sm}_{1-x}\text{La}_x\text{Ba}_{1-y}\text{Mn}_2\text{O}_6$ において室温で1,000%を超える非常に大きなCMR効果を得ることに成功した。これはバルクの遷移金属酸化物ではこれまでにない桁違いの大きさであり、前述の研究を経なければ得られない結果である。

参考文献)

- 1) See reviews, C. N. R. Rao and B. Raveau: *Colossal Magnetoresistance, Charge Ordering and Related Properties of Manganese Oxides* (World Scientific, Singapore, 1998)
- 2) Y. Motome, N. Furukawa and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 167204.
- 3) F. Millange, E. Suard, V. Caignaert and B. Raveau, Mater. Res. Bull. **34** (1999) 1.
- 4) T. Nakajima, H. Kageyama, M. Ichihara, K. Ohoyama, H. Yoshizawa and Y. Ueda, J. Solid State Chem. **177** (2004) 987.
- 5) T. Nakajima, H. Kageyama, H. Yoshizawa and Y. Ueda, J. Phys. Soc. Jpn. **71** (2002) 2843.
- 6) H. Kageyama, T. Nakajima, M. Ichihara, Y. Ueda, H. Yoshizawa and K. Ohoyama, J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2003) 241.
- 7) T. Terai, T. Sasaki, T. Kakeshita, T. Fukuda, T. Saburi, H. Kitagawa, K. Kindo and M. Honda, Phys. Rev. B **61** (2000) 3488.
- 8) T. Nakajima, H. Yoshizawa and Y. Ueda, J. Phys. Soc. Jpn. **73** (2004) 2283.

研究室だより 上田和夫研究室

私が物性研に着任したのは1994年4月なので、物性研で研究活動を開始して11年余りが経過したことになる。編集者によると、所員は着任後ほぼ5年で研究室だよりを書くのが通例ということであるが、なぜ私の場合10年以上見逃して頂いていたのかはよくわからない。いずれにしてもよい機会なので、物性研における私の研究室の研究活動を振り返ってみたい。

物性研着任以来研究室に在籍された研究者、学生の方々を表1に、また、この間なされた研究の主なテーマを表2にまとめた。これらを見ながら以下を読んで頂くと、より具体的なイメージが湧くのではなからうか。

表1 研究室在籍者

年度	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
物性研	助手	紺谷 浩						藤井 達也					
		Mike Zhitomirsky		武藤 哲也			Stephanie Cumoe						
	学生	Matthias Troyer											
		柴田 尚和		PD			丸山 勲						
		佐藤 洋一								広橋 究一			
		宮原 慎						PD					
		山下 靖文							PD				
		西山 守						関口 好文		高橋 吉浩			
								森 太省		谷山 晃一			
										長谷川 真弘			
原研									堀田 貴嗣				
									眞榮平 孝裕				
									瀧本 哲也				
									大西 弘明				

表2 研究テーマ

年度	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
重い電子系	一次元近藤格子							115系				
						Yb ₄ As ₃						
量子スピン系	CaV ₄ O ₉							SrCu ₂ (BO ₃) ₂				
						一次元スピン・軌道結合系		パイロクロア				
高温超伝導	スピンの揺らぎの理論											
量子輸送現象								量子ドットの輸送現象				

1. 重い電子系

近藤効果の厳密解が見つかったのは70年代終わりの頃で、これによって一つの磁性不純物の研究は一段階を画することになった。その後、ある人々は磁性イオン対の研究へ、また他の人々は磁性イオンが周期的に並んだ場合の研究へと向かった。こうした研究分野は、わが国では高濃度近藤系の研究と呼ばれ、東北大学の糟谷先生を中心に活発な研究が展開された。実験的にも、70年代の後半にはCeAl₃における大きな有効質量(重い電子)の発見、CeCu₂Si₂における重い電子系の超伝導の発見があり、現時点から振り返ると、高温超伝導の発見を契機にピークを迎える80年代の強相関電子系の研究の幕明けを告げるものであった。

80年代の重い電子系の理論的研究には、大別して二つの潮流があった。一つは、大きな有効質量に代表される、相関の強い電子系における正常相の理論的記述である。もう一つは、重い電子系で実現している超伝導の秩序変数の特異性を調べることである。ミクロな立場に立つ一貫した理論的理解を追及するという観点に立てば、重い電子系の超伝導の理解は、その正常相における準粒子状態の記述の上に立って、準粒子間の残留相互作用を理解することを通してなされるべきであるが、それは今日においても遼遠な道であって、重い電子系の超伝導の研究の多くは半現象論的な道筋を辿った。

重い電子の記述については、80年代の半ばにスレーブボソンを導入しての平均場近似、f電子の縮退度の大きなことに注目した1/N展開、あるいはグッツヴィラー型の変分理論などの手法が展開され、重い準粒子の記述には一応の成功を収めることになる。しかしこれらの近似理論は、超伝導の議論に耐え得るほどに、準粒子間の残留相互作用を定量的に議論できるレベルには程遠いのが実情であった。

こうした状況を打ち破るため、Manfred Sigrist氏、常次宏一氏などと一緒に、われわれが取った戦略は次のようなものであった。まず、重い電子系に対するミクロな理論モデルである周期的近藤格子模型、あるいは周期的アンダーソン模型において、厳密に言えることは何かを種々の極限で調べることから始めた。それは、一次元近藤格子模型の強相関極限の強磁性の発見や、ハーフフィリングの周期的アンダーソン模型の基底状態が一重項状態であることの厳密な証明などの成果を生むと同時に、それらの知見を数値計算の結果と突き合わせることで、一次元近藤格子模型の基底状態の相図の全貌が明らかになってきた。私の物性研着任直前の状況である。

前置きが長くなってしまったが、物性研着任以降の研究の紹介に入る。東京理科大学石井研究室所属で博士課程に進学したばかりの柴田尚和氏が、重い電子系の研究をわれわれと一緒にしたいということで、私の所でお預かりすることになった。出来たばかりの研究室で、私以外は技官の丸山志津枝さんのみという状況で、研究室の立ち上げには彼に負うところが大きかった。

やがて、柴田氏は西野友年氏と一緒に密度行列繰り込み群を用いて一次元近藤格子模型の研究を始めた。近藤格子模型の基本的な問題として、ラッティンジャーの総和則の問題がある。近藤格子模型は周期的アンダーソン模型の強相関極限における有効模型と考えることが出来る。周期的アンダーソン模型のフェルミ体積は、少なくとも弱相関領域では、局在性のよいf(ないしd)電子と伝導電子の和で決まっている。これを大きなフェルミ面と呼ぶことにすると、ラッティンジャーの総和則は、相転移が無い限り、その体積が変化しないことを主張するものである。これが強相関極限まで成り立つとすると、近藤格子のフェルミ面も大きいままで、その体積には局在スピンの分も含まれることになる。

密度行列繰り込み群で精度よく計算するには、infinite methodと呼ばれる方法でシステムサイズを大きくした後、finite methodと呼ばれる方法で精度の向上を図る。従って、両端のある有限系を扱うのが普通であるが、端のある伝導系では端点の存在によるフリーデル振動が誘起される。その振動は、フェルミ面の大きさによって決まっている。とくに、端点に磁場を掛けた際のスピン密度のフリーデル振動から、大きなフェルミ面が形成されていることが明瞭に見取れた。この計算は、局在スピンもラッティンジャーの総和則に含まれることを疑いようの無い形で示した最初の例ということが出来よう[1]。一次元の伝導系は一般にラッティンジャー液体として記述されるが、その性質を調べる方法として、端点の存在によるフリーデル振動を調べる手法は、その後いろいろな問題に対して用いられている。密度行列繰り込み群による研究を含め一次元近藤格子模型に関する一連の研究成果は、総合報告[2]および重い電子系の教科書[3]にまとめられている。

重い電子系の分野に関しては、現在に至るまで一貫して研究を続けている。そのなかから、私にとって印象深い、二つのトピックスについて書いておこう。

Yb₄As₃は室温付近で構造相転移を示した後、あたかも電子比熱であるかのような温度に比例する比熱が低温で観測され

ている。しかしながら、ホール係数などから評価されるキャリアー数は少なく、こうした特徴からこの物質は少数キャリアー近藤系と呼ばれることもあった。高温では Yb^{3+} と Yb^{2+} が 1 対 3 の割合で存在し、各サイトで Yb イオンは二つの価数状態の間を揺らいでいる。構造相転移温度以下では電荷秩序が形成され、111 方向を向いた等価な 4 本の Yb 鎖の一本を Yb^{3+} が占め、磁性鎖を形成する。この一次元鎖がハイゼンベルク模型で記述されるとすると、温度に比例した比熱を説明することが出来るというアイデアが、Peter Fulde 氏のグループによって提唱された。実際、中性子散乱で観測された励起は一次元ハイゼンベルク模型で期待されるものとよい一致を示した。ところが、この系に磁場を掛けると励起にギャップが生じることが報告され、単純なハイゼンベルク模型では説明できない謎として残されていた。このころ、安息香酸銅での磁場誘起ギャップの理論的研究が押川、Affleck の両氏によってなされた。 Yb_4As_3 の構造を調べてみると、磁場誘起ギャップを形成するために必要な交代 g 因子、あるいは交代的な Dzyaloshinsky-Moriya 相互作用が存在しうる構造であることがわかり、実験データの定量的な解析も可能であった[4]。対称性の議論からは、等方的ハイゼンベルク模型である必然性はないが、その後混成項に関する摂動論から、等方的ハイゼンベルク模型がよい出発点になっている理由も明らかにされた[5]。

物性研における研究室ではないが、2001 年の 4 月から日本原子力研究所にある先端基礎研究センターで新しい理論グループを立ち上げることになった。良質の基礎研究をするには理論グループが不可欠であるとの安岡センター長の考えに共鳴してのことである。立ち上げに際して考慮したポイントは二つある。まず第一は何を中心テーマにして研究をするかということである。原子力研究所の特徴を生かしたテーマで、なおかつ理論的普遍性のあるものということで、グループ名を多体電子系理論研究グループとし、第 1 期の 5 年間のプロジェクトテーマを「軌道縮退の大きな系における多体電子理論の研究」とした。第二のポイントは人の問題である。私自身は客員としてこのグループに加わるので、実質的に中核になって働いてくれる人が必要である。それには堀田貴嗣氏をお願いし、瀧本、眞榮平両氏とあわせて 3 名のグループとして出発した。後に大西氏が加わりグループは 4 名となった。

具体的な研究対象としては、当時発見されてまだ間もなかった重い電子系の超伝導体 CeTIn_5 ($T=\text{Rh, Co, Ir}$) を取り上げることにした。 HoCoGa_5 型の構造を持ち興味深い物性を示す一連の f 電子系物質が次々と合成され、現在では 115 系と通称されている。 Ce115 系の相対論的バンド計算を実行する一方、その電子構造を見ながら、115 系に対するミクロな多体モデルを考えた。

この理論グループでは、トピックを絞って、若手、中堅の研究者が理論実験の枠を超えて議論できるような、比較的小規模の国際ワークショップを開催する予算を付けて頂いた。2002 年の 3 月には 115 系を中心とするワークショップを開いたが、その講演で Joe Thompson 氏が PuCoGa_5 の超伝導発見の第一報の報告をした。われわれは、この物質の相対論的バンド計算に取り掛かると共に[6]、アクチニド系の有効八ミルトニアンを構築する処方箋として $j\text{-}j$ 結合のスキームを提案した[7]。

2003 年 4 月に物性研所長になったため、私自身は先端基礎研究センターの理論研究室の活動を続けることが出来なくなったが、このグループが堀田氏を中心にその後も活発な研究を続けているのは、よく知られている通りである。

2. 量子スピン系

あるパーティーの席で、名古屋大学の佐藤正俊さんとスピニングギャップの性質を示す CaV_4O_9 という物質について立ち話をする機会があった。この物質は、正方格子から $1/5$ の格子点を規則的に抜いた構造をしていて、4 個の格子点からなる正方形が連なった構造をしている。 V イオンは 4 価なので d 電子は一個であり、軌道の自由度が quenched されているとすると、スピン $1/2$ のモデルが適用できる。この構造では、正方形の辺に対する結合定数と、正方形を結ぶボンドに対する結合定数は幾何学的に等価でないで、それらを独立な変数に取ることによって、フラストレーションの無い格子構造で秩序無秩序転移を実現することが可能である。ループアルゴリズムを用いた量子モンテカルロシミュレーションにより、上記の二つの結合定数が等しいときには、量子臨界点に近いながらも反強磁性秩序があり、実験で観測されているようなスピニングギャップ相を実現するには、フラストレーションをもたらず次近接相互作用が重要であることが明らかになった[8,9]。

CaV_4O_9 に触発されて、局在系の量子相転移に興味を持ち、いくつかの問題について研究を進めた。当時、重い電子系や遷移金属酸化物で軌道自由度が再度（再々度？）注目を集め始めていたので、軌道揺らぎの特徴を理解するため、一次

元で軌道とスピンの自由度を持つ系について調べてみることにした。そのうちで最も対称性が高いのは $SU(4)$ 対称性であるので、その場合から始めることにした。このモデルはベーター可解であるが、基底状態における相関関数や励起状態の様子を調べた[10]。次に対称性を $SU(2) \times SU(2)$ に落とすと、パラメータに応じて多彩な量子相転移が現れる。われわれはその様子を、密度行列繰り込み群を用いて調べた[11]。この山下君の数値計算によって決定された相図に導かれる形で、ボゾン化法を用いた場の理論によって、 $SU(2) \times SU(2)$ の場合の相図が解析的にも確定された。

物性研では初夏にビアパーティをするのが恒例になっている。1998年のビアパーティで、当時上田寛研の助手であった陰山さんから、彼が見つけたスピンギャップを示す新しい物質 $SrCu_2(BO_3)_2$ の話を聞いた。 $SrCu_2(BO_3)_2$ は二次元性のよい物質であるが、スピンギャップを持つだけでなく磁化にプラトーがあるのが特徴である。早速、当時 D1 の宮原君と理論的研究を開始した。この物質の二次元面の構造に対応したハイゼンベルグ模型を考えると、ダイマー上にシングレットをおいた非磁性状態が厳密な基底状態になっていることがわかった。次いで励起状態を調べてみると、通常のスピンギャップ状態とは事情が異なり、トリプレット励起の移動に強い制限があり、分散が小さく局在性の強い励起であることがわかった。この性質から、トリプレット励起の密度が適当な値となる磁化の場合には、トリプレット励起の液体・固体転移が生じて磁化プラトーとなることが自然に理解される[12]。われわれが最初に考えたモデルは Shastri 氏と Sutherland 氏が 1980 年に考えたモデルと等価であるが、以上述べたような特徴はダイマーが直交した幾何学的配置に原因があり、そのことを使うと様々な一般化が可能であることが明らかになった。とくに、 $SrCu_2(BO_3)_2$ に対する三次元のモデルに対してもダイマー状態は厳密な基底状態になっていることを示すことが出来る[13]。その後も $SrCu_2(BO_3)_2$ に関する実験および理論研究が世界中で活発に展開されたのはよく知られている。

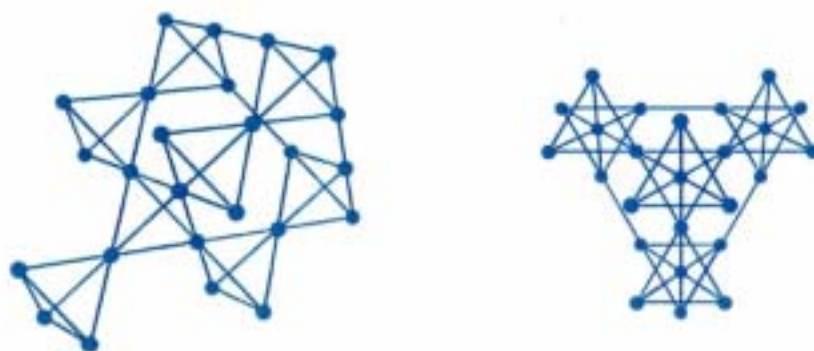


図1 パイロクロア格子の単位胞(左側)と[111]方向から見た射影図

直交ダイマー系もフラストレーションが重要な役割を果たしている典型例の一つであるが、フラストレーションが最も顕著なのは正4面体が頂点を共有して三次元ネットワークを組んでいるパイロクロア格子である。パイロクロア格子上のスピン1のハイゼンベルグ模型を考える。大きさ1のスピンをスピン1/2が2個から合成されたと考え、対称化操作を施してスピン1のヒルベルト空間を構成する。これは、スピン1の一次元鎖がギャップを持つという Haldane 問題に対して、Affleck, Kennedy, Lieb, Tasaki の4氏が考えた方法であるが、パイロクロア格子では各頂点が二つの正4面体によって共有されているので、三次元であるにもかかわらず自然な記述方法になっている。こうして構成される非磁性基底状態はマクロな縮退を持っているが、その縮退は格子との結合を考えて解消することが出来る。われわれはこれを spin driven Jahn Teller 効果と名づけた[14]。

3. 高温超伝導の理論

よく知られているように、銅酸化物高温超伝導体が発見されたのは 1986 年のことである。この系で超伝導に主要な役割を果たしているのは CuO_2 面であり、キャリアがドーブされない母物質では、 CuO_2 面は二次元正方格子ハイゼンベルグ模型で記述されると考えられる。そこに、キャリアがドーブされて高温超伝導が実現している。

高温超伝導の理論に関して P.W. Anderson 氏は、その発見の直後から、正方格子ハイゼンベルグ模型における反強磁性長距離秩序の存在を疑問視し、仮に基底状態に長距離秩序がなく短距離シングレット相関の成長した状態であるとすれば、そこにキャリアをドーブしたとき、それがそのまま超伝導状態へ移行すると考えた。これは大変魅力的な考え方で、RVB(Resonating Valence Bond)理論と呼ばれる。それを受けて二次元正方格子ハイゼンベルグ模型の再検討が精力的に行われたが、その結果はスピン波理論で形成されていた伝統的描像、すなわち揺らぎによって磁気モーメントは縮んでいるものの反強磁性秩序は存在する、ということを確認するものであった。従って、RVB 理論の考え方で高温超伝導の理論を構成しようとするれば、キャリアをドーブしたときに、反強磁性が消え、さらに超伝導が出現する、この二つのことを記述するという困難な道をとらなければならないことになる。

これに対して、守谷氏たちは高温超伝導体の正常相で見られる各種の物理量の特異な温度依存性が、二次元金属の反強磁性量子臨界点近傍の揺らぎによるものとして理解できることを指摘した。概念的には、RVB 理論がモット絶縁体から高温超伝導にアプローチしようとしているのに対し、守谷氏たちのスピンの揺らぎの理論はオーバードープ側からアプローチしようとしている、と言うことが出来る。このスピンの揺らぎによるアプローチにとって理解が困難な物理量として、ホール係数があった。紺谷氏たちは、輸送係数に対する久保公式のパーテックス補正の中に、反強磁性量子臨界点で特異性を持つ寄与があることを示し、ホール係数の温度依存性の問題を理解する筋道を見出した[15]。

スピンの揺らぎの理論による高温超伝導に対する理解を、review にまとめて 2000 年に出版した[16]。また、2003 年にも Reports on Progress in Physics の編集者の求めに応じて、反強磁性スピン揺らぎと超伝導というもう少し広い視点から review を書いた。

4. 量子輸送現象その他

既にだいぶ長くなっているのので、そろそろ終わりにしなければならない。紺谷氏の後任の助手として、大阪大学工学研究科の川上研で学位を取った藤井氏が着任した。量子ドットを介した輸送現象では、微分コンダクタンスが低温でユニタリ極限に到達する様子が実際に観測されている。通常の磁性不純物の近藤効果と比べて、量子ドットの系の実験では有限のバイアス電圧がかかっているのので、本質的に非平衡系であるという特徴がある。平衡系の近藤効果に対しては、クーロン相互作用に関する摂動論が極めて効率的であることは、山田・芳田理論以来よく知られている。藤井氏は、非平衡の場合の Keldysh 形式を摂動論で扱い、近藤共鳴の有限バイアス下での分裂など興味深い結果を得ている[18]。

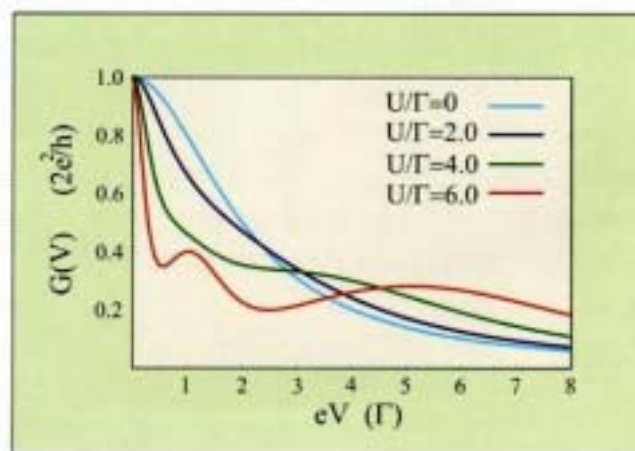


図2 有限バイアス下での量子ドットを介した微分コンダクタンス

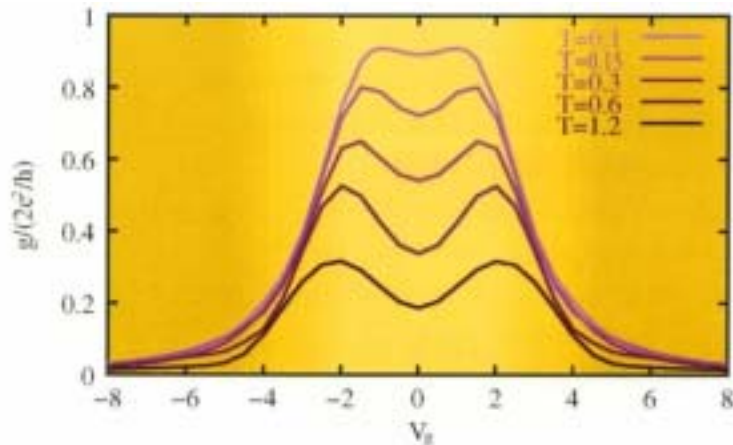


図 3 有限温度密度行列繰り込み群で計算したファノ-近藤効果の温度依存性の例

バイアス電圧がゼロの極限での微分コンダクタンスは久保公式で表され、平衡系での性質で記述される。一般に、連続スペクトルと局在状態との間に結合が生じて形成される共鳴状態の位相関係は Fano 効果として知られている。Fano 効果としての側面は通常の近藤効果でも存在しているが、磁性不純物の性質を見ているときは、あまり表立った役割を果たしてはいない。これに対して、量子ドットを介した輸送現象では、電流が流れるパスをいろいろ人工的にデザイン出来るので、Fano 効果を明示的に見る事が出来る。丸山君は学位論文でこの Fano-Kondo 効果を扱い、見通しのよい理論を完成させた[19]。

はじめにも触れたが、丸山志津枝さんには私が着任して以来昨年 3 月末退官されるまで、技官として研究室の運営や私が関与した国際会議、ワークショップのアレンジなどに活躍して頂いた。とくに、研究室の学生たちの公私にわたる支柱として果たして頂いた役割に改めて感謝したい。丸山さんの退官後は、江口浩子さんがその後を受け継いでくれている。

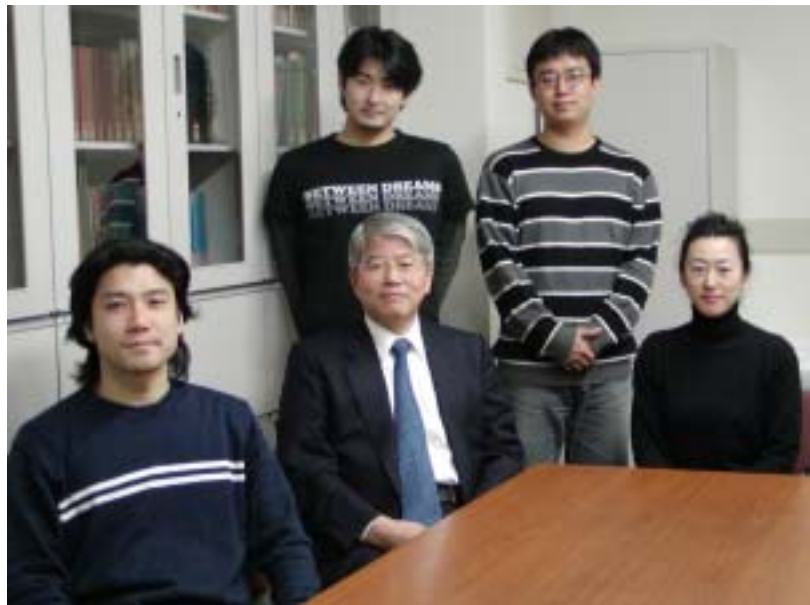


表 1 を眺めると、現在 D3 の広橋君が卒業する来春には、このままでは研究室の学生が一人も居なくなることがわかる。十年一昔と言う。気持ちを新たにして、もう一回新しい研究室を作るつもりで研究活動を再構築したいと思っている。

文献

- [1] N. Shibata, K. Ueda, T. Nishino, and C. Ishii: Phys. Rev. B 54 (1996) 13495.
- [2] H. Tsunetsugu, M. Sigrist, and K. Ueda: Rev. Mod. Phys. 69 (1997) 809.
- [3] 上田和夫、大貫惇睦: 重い電子系の物理 (裳華房、1998).
- [4] M. Oshikawa, K. Ueda, H. Aoki, A. Ochiai, and M. Kohgi: J. Phys. Soc. Jpn 68 (1999) 3181.
- [5] H. Shiba, K. Ueda and O. Sakai: J. Phys. Soc. Jpn 69 (2000) 1493.
- [6] T. Maehira, T. Hotta, K. Ueda and A. Hasegawa: Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 207007.
- [7] T. Hotta and K. Ueda: Phys. Rev. B 67 (2003) 104518.
- [8] K. Ueda, H. Kontani, M. Sigrist, and P.A. Lee: Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 1932.
- [9] M. Troyer, H. Kontani, and K. Ueda: Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 3822.
- [10] Y. Yamashita, N. Shibata, and K. Ueda: Phys. Rev. B 58 (1998) 9114.
- [11] Y. Yamashita, N. Shibata and K. Ueda: J. Phys. Soc. Jpn 69 (2000) 242.
- [12] S. Miyahara and K. Ueda: Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 3701.
- [13] K. Ueda and S. Miyahara: J. Phys.: Cond. Matter 11 (1999) L175.
- [14] Y. Yamashita and K. Ueda: Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 4960.
- [15] H. Kontani, K. Kanki, and K. Ueda: Phys. Rev. B 59 (1999) 14723.
- [16] T. Moriya and K. Ueda: Adv. Physics 49 (2000) 555.
- [17] T. Moriya and K. Ueda: Rep. Prog. Phys. 66 (2003) 1299.
- [18] T. Fujii and K. Ueda: Phys. Rev. B 68 (2003) 155310.
- [19] I. Maruyama, N. Shibata and K. Ueda: J. Phys. Soc. Jpn 73 (2004) 3239.

物性研究所短期研究会

マイクロプローブを用いた強磁場物性研究の展開 現状と将来

日時：2005年6月13日(月) 10:00 開始

6月14日(水) 12:30 終了

場所：東京大学物性研究所 6階大講義室

世話人 萩原 政幸
木戸 義勇
嶽山正二郎
金道 浩一
野尻 浩之

近年、大型放射光や中性子散乱施設など従来は 20 テスラを超える強磁場下での研究がほとんど行われなかった施設において 20 テスラを超える磁場環境を整備し科学研究を進めるプロジェクトが国内外を問わず進められてきている。国内においては第 3 世代大型放射光施設 SPring-8 や現在建設中の大型パルス中性子源 J-PARC において上記のプロジェクトが進行中である。これら X 線や中性子線を用いたマイクロ物性計測により磁性、超伝導、半導体といった従来の物性研究はもとより生体物質を含めたより広範な物質の電子状態とスピン関連の研究が強磁場下で行えるように計画されている。また、より強磁場での物性研究への展開として 100 テスラ領域までのフライホイールを用いた非破壊パルス磁石の開発や 40 テスラ級の定常磁場用ハイブリッド磁石の開発が計画されている。これらは日本の 4 大強磁場施設においてそれぞれの特徴を生かしながら強磁場研究の基盤を強化する強磁場コラボラトリー構想に繋がる。このような時期に、日本の強磁場施設の中核にある物性研において強磁場関連の研究者が一堂に会して、分野の垣根を越えて強磁場物性研究の現状を概括し、併せて将来構想を議論する場を持つために本研究会を企画した。研究会では強磁場を用いた強相関電子系、量子スピン系、半導体、分子性半導体などの凝縮系物理の最近の成果について発表(オーラル 17 件、ポスター 27 件)してもらおうとともに、中性子散乱実験及び放射光 X 線回折実験関係者から五人の招待講演者を招いて磁場下測定の実況と将来構想や希望に関して講演してもらい、これまでの強磁場研究会とは異なる斬新な研究会となった。講演者を含めた全参加者数は 60 名の予想をはるかに超え 96 名であった。以下にプログラムと講演要旨を掲載する。

プログラム

6月13日(月)

10:00~10:10 「はじめに - 研究会の趣旨と目的」 大阪大学極限科学研究センター 萩原 政幸

セッション A 座長 萩原 政幸

10:10~10:30 O-1 「強磁場下の電荷密度波状態の諸相」
東京大学物性研究所 長田 俊人、加治木 康介、大道 英二

10:30~10:50 O-2 「傾斜磁場下における半導体超格子の電界ドメインの形成」
東京大学物性研究所 小早川 将子、蔵口 雅彦、大道 英二、長田 俊人

10:50~11:10 O-3 「高指数面基板上 GaAs/AlGaAs 量子井戸からの磁気発光スペクトル」
東京大学物性研究所 内田 和人

- 11:10~11:30 O-4 「単層カーボンナノチューブ配向膜の超強磁場下磁気光吸収特性」
熊大工 横井 裕之、黒田 規敬
- 11:30~11:50 O-5 「マイクロコイルパルス磁場の発生と可能性」
物質・材料研究機構 高増 正

11:50~12:50 昼休み

セッション B 座長 野尻浩之

- 12:50~13:10 O-6 「カンチレバーを用いたパルス強磁場中の ESR 測定法の開発」
神戸大学分子フォトサイエンス研究センター 太田 仁
- 13:10~13:30 O-7 「高圧下強磁場 ESR システムの開発と応用」 神戸大学研究基盤センター 櫻井 敬博
- 13:30~13:50 O-8 「 $S=1/2$ トライマー鎖 $M_3Cu_3(PO_4)_4$ ($M=Sr, Ca$)の強磁場 ESR」
神戸大学 分子フォトサイエンス研究センター 大久保 晋
- 13:50~14:10 O-9 「有機一次元磁性体 F5PNN の低温磁性と構造変化」
大阪府立大学大学院理学系研究科 細越 裕子
- 14:10~14:30 O-10 「量子磁性鎖の磁場誘起相におけるスピン・フロップ転移」
岡山大・院自然科学 原田 勲
- 14:30~14:50 O-11 「量子スピン系の磁場誘起量子相転移」
原研関西研播磨研 坂井 徹

14:50~15:10 COFFEE BREAK

セッション C 座長 高増 正

- 15:10~15:30 O-12 「パルス強磁場 ($60T > H > 20T$) 領域でのフェルミ面研究」 静大理 海老原 孝雄
- 15:30~15:50 O-13 「希土類化合物 $PrPb_3$ における四極子変調構造」 東京大学物性研究所 鬼丸 孝博
- 15:50~16:10 O-14 「 $CdCr_2O_4$ の強磁場磁化過程」 東京大学物性研究所 三田村 裕幸
- 16:10~16:30 O-15 「 $InGaAs/AlAs$ 超格子における不純物サイクロトロン共鳴」
大阪大学低温センター 百瀬 英毅

16:30~18:30 ポスターセッション

- P-1 「低次元有機導体の磁気光学測定とフェルミ面の決定」 神戸大学自然科学研究科 木俣 基
- P-2 「一次元量子スピン系 $DMACuCl_3$ の強磁場 ESR」 神戸大学分子フォトセ 吉田 誠
- P-3 「スピギャップ系 $ACuCl_3$ ($A=Ti, K$) の圧力下強磁場 ESR 測定」 神戸大学自然科学研究科 竹谷 明朗
- P-4 「1次元系 $MCuP_2O_7$ ($M=Sr, Pb$) の強磁場 ESR による研究」 神戸大学自然科学研究科 白木 高輔
- P-5 「擬二次元三角格子反強磁性体 $RbFe(MoO_4)_2$ 単結晶の多周波 ESR と強磁場磁化」
大阪大学極限科学研究センター 八代 晴彦
- P-6 「 $LiCu_2O_2$ の多周波数 ESR」 大阪大学極限科学研究センター 柏木 隆成
- P-7 「有機磁性体の強磁場 ESR 測定」 神戸大学自然科学研究科 児玉 政文
- P-8 「スピネル化合物 $CdCr_2O_4$ の強磁場 ESR」 大阪大学極限科学研究センター 木村 尚次郎
- P-9 「光照射で臨界電流値が変化する量子ホール効果のブレイクダウン」
千葉大学理学部物理 片桐 崇良、音 賢一
- P-10 「量子ホール状態のキャパシタンス測定による $GaAs/AlGaAs$ 2次元電子系のポテンシャルの揺らぎの評価」
千葉大学理学部物理 土肥 将人、音 賢一
- P-11 「光ファイバーを用いた低温・強磁場でのマイクロスポット分光システムの開発」
千葉大学理学部物理 荒原 幸士郎、沈 睿、宮部 翔、音 賢一、室 清文
- P-12 「テラヘルツ光による半導体強磁場物性測定」 物質材料研究機構ナノマテリアル研究所 今中 康貴

- P-13 「AlAs:Yb/GaAs 超格子の強磁場中における電子状態」 物質材料研究機構ナノマテリアル研究所 佐藤 康一
- P-14 「量子ドット結合 2DEG における $v < 1$ での輸送現象異常」 物質・材料研究機構 竹端 寛治
- P-15 「電子正孔分離型量子構造におけるパルス強磁場磁気分光」 東京大学物性研究所 小笠 和夫
- P-16 「パルス磁場を用いた単層カーボンナノチューブ配向」
東京大学物性研究所 中村 修司、内田 和人、嶽山 正二郎
- P-17 「希薄磁性量子井戸における励起子分子発光とその強磁場効果」
東京大学物性研究所 名取 義顕、三野 弘文、小嶋 映二、内田 和人、嶽山 正二郎
- P-18 「低温・パルス強磁場における分数荷電励起子」
東京大学物性研究所 平山 康博、小笠 和夫、内田 和人、小嶋 映二、三田村 裕幸、嶽山 正二郎
- P-19 「層状伝導体のパルス強磁場中輸送現象測定」 大阪大学極限科学研究センター 菅 健一
- P-20 「物性研究所における電磁濃縮法の現状と展望」 東京大学物性研究所 小嶋 映二、福田 毅哉、嶽山 正二郎
- P-21 「強磁場下放射光 X 線回折実験用パルスマグネットの開発」 大阪大学極限科学研究センター 川内 周
- P-22 「卓上 30T コンデンサバンクの開発」 東京大学物性研究所 大道 英二
- P-23 「単鎖磁石の磁気励起とサイズ効果」 東北大学金属材料研究所 大島 勇吾
- P-24 「スピン 1 擬一次元ギャップ系における不純物・磁場効果」 東北大理 松本 宗久
- P-25 「スクッテルライト化合物 AFe_4Sb_{12} ($A = Ca, Sr, Ba$) における遍歴電子メタ磁性」
大阪大学極限科学研究センター 吉居 俊輔
- P-26 「量子スピン系物質 $SrCu_2(BO_3)_2$ の強磁場磁歪測定」 大阪大学極限科学研究センター 沢井 祥東
- P-27 「ナノ空間に閉じ込められた酸素の強磁場磁化」 東京大学物性研究所 松尾 晶

6月14日(火)

セッション D 座長 太田 仁

- 9:00~9:30 O-16 「量子スピン系の磁場中中性子散乱研究—現状と J-PARC における展望—」
原研先端研 加倉井 和久(招待講演)
- 9:30~10:00 O-17 「スピン軌道複合 f 電子系における高磁場中性子散乱による研究」
原研先端研 目時 直人(招待講演)
- 10:00~10:30 O-18 「高温超伝導体の磁場中中性子散乱」 東京大学物性研究所 廣田 和馬(招待講演)

10:30~10:50 **COFFEE BREAK**

セッション E 座長 鳴海 康雄

- 10:50~11:20 O-19 「極限環境下の放射光 X 線回折実験」 理研播磨研 勝又 紘一(招待講演)
- 11:20~11:50 O-20 「超小型パルスマグネットによる 30 テスラ以上での放射光 X 線実験」
岡山大理 松田 康弘(招待講演)
- 11:50~12:10 O-21 「実験室系における強磁場低温高感度 X 線カメラの開発」
岡山大学大学院自然科学 野上 由夫
- 12:10~12:30 O-22 「強磁場 X 線回折測定の方法開発への応用」
東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター 小山 佳一

講演要旨

O-1 強磁場下の電荷密度波状態の諸相

東京大学物性研究所 長田 俊人

強磁場中の電荷密度波(CDW)状態の問題は、磁場中での超格子構造の変化を伴うため、強磁場中 X 線散乱実験の重要な研究対象となると思われる。磁場中では、CDW を不安定化する Zeeman 効果と、CDW を安定化する軌道効果、さらには軌道量子化の効果が競合し複雑な CDW 相図が現れ得る。従来の CDW 物質ではこれらの効果に対し転移温度が十分高く磁場効果は無視できた。しかし近年、転移温度 10K 以下の弱い CDW 系である α -(BEDT-TTF)₂KHg(SCN)₄ や (Per)₂Pt(mnt)₂ などの有機導体が逐次転移を含む複雑な CDW 磁気相図を示すことが欧米の強磁場施設において見出され注目を集めている。磁場中 CDW の標準モデルとなっている Zanch らの理論によれば、ゼロ磁場の CDW 絶縁相(CDW₀相)は磁場中で Fermi 面の Zeeman 分裂のために不安定化し、十分低温では片側スピンの Fermi 面のみが CDW 形成に寄与する CDW 金属層(CDW_x相)に転移する。しかし実験では CDW₀と CDW_xの間に逐次転移を示す新たな CDW 状態が現れる。そこで本グループは Zanch らの平均場理論を Fermi 面ネスティングが不完全な異方的 2 次元電子系(擬 1 次元系)に拡張した。その結果、新たな CDW 状態が双方のスピンの Fermi 面が不完全ネスティングした CDW 半金属相(CDW_y相)であり、一方の Fermi ポケットが完全軌道量子化されることに対応して逐次転移が現れることを明らかにした。

O-2 傾斜磁場下における半導体超格子の電界ドメインの形成

東京大学物性研究所 小早川 将子、蔵口 雅彦、大道 英二、長田 俊人

半導体超格子の層間方向に電場を印加すると、超格子全体に一樣な電場がかからずに電場の分布に偏りが生じることがある。この現象は電界ドメインと呼ばれ、異なるミニバンド間の遷移によって起こることが知られている。Kuraguchi らによって、傾斜磁場を印加したときに新たな電界ドメインが生じることが見出されたが、我々はさらに詳細な測定をすることによって、電界ドメインの 2 次元マッピングを得ることに成功した(図)。また、超格子の隣接 2 層間における電子のトンネル確率を計算し、実験結果と比較した。その結果新たな電界ドメインは、超格子の隣接 2 層間の異なるランダウ準位間の遷移によるものであることが分かった。

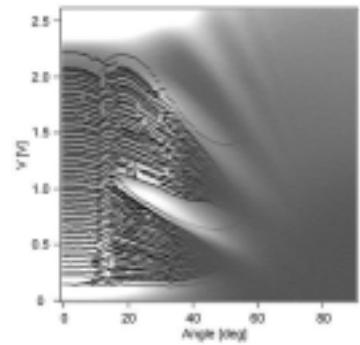


図 13T における傾斜磁場下の層間伝導の微分コンダクタンス。黒い線の部分が電界ドメインをあらわす。

O-3 高指数面基板上 GaAs/AlGaAs 量子井戸からの磁気発光スペクトル

東大物性研¹、IFW Dresden²、阪大院基礎工³

内田 和人¹、嶽山 正二郎¹、三浦 登²、下村 哲³、冷水 佐壽

半導体ヘテロ構造中の励起子磁気発光は、反磁性シフト等のエネルギー準位の磁場変化に加えて、ヘテロ界面の揺らぎの状態を反映する。すなわち、励起子ボーア半径内の平均的ポテンシャルを感知するセンサーとしての励起子が、磁場による波動関数の収縮に伴い、より細かなポテンシャル揺らぎの情報を与える可能性があり、ヘテロ界面に垂直に磁場を加

えると界面揺らぎが大きいほど発光幅が増大することが予想される。そこで我々は超平坦ヘテロ界面をもつ高指数面基板 GaAs/AlGaAs 量子井戸らの励起子磁気発光スペクトルを通常の (100) 量子井戸と比較して調べた。

試料は MBE 法により、(411)A および (100)GaAs 基板にいくつかの異なる井戸幅を持つ GaAs/AlGaAs 量子井戸を同時成長した。約 40 Tesla におよぶ強磁場の発生にはパルスマグネットを用い、OMA あるいは ICCD 検出器で量子井戸からの発光スペクトルの磁場依存性を測定した。その結果、両基板の井戸幅 12 nm と 7.2 nm の量子井戸において、ヘテロ界面に垂直に磁場を加えたときの磁気発光スペクトルにおいて、磁場による発光幅の増大が(100)基板試料において、より顕著になっていることがわかった。これは、高指数面基板による超平坦ヘテロ界面の形成を裏付ける結果と考えられる。

O-4 単層カーボンナノチューブ配向膜の超強磁場下磁気光吸収特性

熊本大学工学部 横井 裕之、黒田 規敬

単層カーボンナノチューブは、グラフェンシートがナノメートルサイズ径のチューブ状に丸まった構造をもっているため、その構造に由来してさまざまな特異的物性を示すことが理論的に予想されている。そのひとつが量子干渉効果である Aharonov-Bohm 効果(AB 効果)の発現である^[1]。実験的には、重水中に分散させた単層カーボンナノチューブについて、半導体性チューブの第 1 サブバンド間遷移による吸収ピークが 45T までの定常磁場によって分離することが報告されている^[2]。我々は、AB 効果の検証をさらに進めるために、ゼラチン膜中に単層カーボンナノチューブを高分散・延伸配向させた試料において、縦型一巻きコイル装置による 120T までのパルス超強磁場下で可視光域吸収スペクトル測定を行った。その結果、吸収ピークのプロードニングが、半導体性チューブと金属性チューブの第 2 サブバンド間遷移のどちらについても、ナノチューブの配向方向に磁場を印加した場合のみ起こり、その磁場分離の大きさが、Ajiki, Ando らによる予測にほぼ合致したことから、単層カーボンナノチューブにおける AB 効果がさらに広範に検証された。また、金属性ナノチューブにおける磁場誘起金属 - 半導体転移の可能性について実験的な示唆が得られた。

[1] H. Ajiki and T. Ando, J. Phys. Soc. Jpn. **62**, 1255 (1993).

[2] S. Zaric et al., Science **304**, 1129 (2004).

O-5 マイクロコイルパルス磁場の発生と可能性

物質・材料研究機構 高増 正

近年、NMR 研究等の目的のためマイクロメートルサイズの小型コイル(マイクロコイル)を利用した電磁波の検知等の技術が大いに注目されている。こうしたマイクロコイルを利用したパルスの強磁場発生に関しては、現状ではそれほど例がないが、50 μm 程度の内径で 50T の磁場を非破壊的に発生できることが知られている^[1]。マイクロコイルパルス磁場は、限定的な空間に数十ナノ秒という短時間の磁場発生であるため、他の長時間パルス磁場とは異なる応用が考えられ、多様化している物性測定に対応させることで興味深い応用が可能である。

我々は、フォトエッチングによるコイルの作製と市販の部品による簡単なマイクロコイルパルス磁場発生装置の作製を行った。現状では発生磁場は数テスラ程度であるが、放電型スイッチや MOSFET 等の改善により数十テスラの磁場発生が容易に可能であると思われ、また、パルス波形の整形も FET の制御等に可能であることを示した。今後、フェムト秒レーザー等による測定やカンチレバーによる高感度の磁気力測定との組み合わせにより、これまでのパルス磁場では出来なかったような測定が可能となることが予想される。

[1] K. Mackay, M. Bonfim, D. Givord and A. Fontaine, J. Appl. Phys. **87**, 1996 (2000).

O-6 カンチレバーを用いたパルス強磁場中の ESR 測定法の開発

¹神戸大学分子フォトサイエンス研究センター、²神戸大学自然科学研究科、³東京大学物性研究所
太田 仁^{1,2}、木俣 基²、大久保 晋¹、大道 英二³、長田 俊人³

我々は、これまでパルス強磁場を用いたミリ波からテラヘルツ領域の高周波 ESR によって量子スピン系を中心とした磁性体の研究で多くの成果を上げてきた^[1]。強磁場 ESR は市販の X-band ESR に比べ、ギャップをこえて ESR が観測できるなど多くの利点があるが、X-band ESR に比べ現状の感度が劣るため化学や生体への応用に困難があった。X-band ESR は空洞共振器を使用するため高い感度を持つが、テラヘルツでは波長が 1mm 以下で空洞共振器を使うことが困難でそれにかわる高感度測定法が望まれてきた。また 0.6THz をこえた ESR 測定では磁場が 20T 超伝導磁石では不足するため、パルス磁場中での測定が必要となるが、エディーカレントのため金属空洞共振器を使うことはできない。そこで我々は、この問題を解決するためパルス磁場中でカンチレバーを用いた強磁場 ESR 測定を $\text{Co}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 単結晶についておこない 150GHz までの周波数で ESR の観測に世界で初めて成功した^[2]。感度は 10^{10} spins/G でこれまでの透過法による感度を約 1 万倍改善することができた。カンチレバーは原理的に周波数の制限が存在しないので、我々の結果は高感度テラヘルツ ESR への道を開くもので、今後さらに高い周波数での測定をめざして開発をすすめる予定である。

[1] H. Ohta, H. Nojiri, M. Motokawa eds., *Application of Submillimeter Wave Electron Spin Resonance for Novel Magnetic Systems*, J. Phys. Soc. Jpn. **72** (2003) Supplement B 183 pages.

[2] 太田、大道、出願番号：特願 2004-215203、出願日：平成 16 年 7 月 23 日

O-7 高圧下強磁場 ESR システムの開発と応用

神戸大研究基盤セ、神戸大自然^A、神戸大分子フォトセ^B、東工大極低温セ^C、東大物性研^D
櫻井 敬博、竹谷 明朗^A、白木 高輔^A、児玉 政文^A、吉田 誠^B、大久保 晋^B、太田 仁^B、田中 秀数^C、上床 美也^D

物性研究を行う上で圧力というパラメーターは近年では必要不可欠のものとなりつつある。既に我々は 3.5 kbar までの圧力下でパルス強磁場を用いた ESR 測定が可能なシステムの開発を行ってきた。圧力発生には内径 3 ミリ、外径 6 ミリのピストン・シリンダー型圧力セルを用いているが、この圧力セルの最大の問題点は発生圧力が低いという点であった。圧力セルではミリ波・サブミリ波の電磁波の入射・透過を可能にするため内部部品にサファイアを用いているが、発生圧力は同部品の破損や CuBe シリンダーの膨張に制限される。そこで内外径をそのままにより硬い NiCrAl をシリンダー材料として用い、また内部部品をより安価なジルコニアで作製し、更により単純な構造に変更した。これらにより 6.5 kbar 程度までの圧力発生に成功した。同圧力セルを用いたスピンギャップ系物質 KCuCl_3 の測定では、基底状態から第一励起状態への直接遷移の観測からエネルギーギャップの圧力依存性を得ることに成功している。また KCuCl_3 の臨界圧力はおよそ 8 kbar 程度であると見積もられた。更に現在ではパルスマグネットの芯材を薄くする等の改良により、1 GPa を目指した内径 3 ミリ、外径 8 ミリの NiCrAl・ジルコニア製圧力セルでの ESR 測定が可能となった。

O-8 S=1/2 トライマー鎖 $M_3Cu_3(PO_4)_4$ (M=Sr, Ca) の強磁場 ESR

A)神戸大学分子フォトサイエンス研究センター、B)神戸大学大学院自然科学研究科、C)大阪大学極限物質科学研究センター、
D)九州大学理学部、E)東北大学金属材料研究所、F)京都大学化学研究所、G)物質材料研究機構
大久保 晋^{A)}、石川 博文^{B)}、太田 仁^{A, B)}、木村 尚次郎^{C)}、稲垣 祐次^{D)}、
野尻 浩之^{E)}、小山 佳一^{E)}、東 正樹^{F)}、高野 幹夫^{F)}、A. A. Belik^{G)}

$M_3Cu_3(PO_4)_4$ (M=Sr, Ca)は、直鎖状のトライマーが一次元鎖を形成している系である。トライマー内相互作用の大きさは129K(Sr)と見積もられており、磁化曲線には1/3 プラトーが現れている。この系のスピンドYNAMIXを調べる目的で、パルス強磁場を用いて16Tまでの強磁場 ESR 測定を行った。g 値の温度依存性から3つの吸収のg 値は100K以下で変化していることが明らかとなり、100K以上では常磁性状態、100K以下ではトライマーの性質が現れていると考えられる。また、低温におけるスペクトルは通常 Cu^{2+} に見られる powder pattern とは異なり、低磁場側の吸収が高磁場側の吸収よりも強いスペクトルとなった。結晶場の考察よりトライマーの端の $Cu-O_6$ の八面体が潰れた構造であるので通常の powder pattern と逆の強度比となり矛盾がない。さらに25K以下でg 値が減少、線幅が増加していることは、S=1/2の一次元反強磁性鎖の性質を示している。以上のことから、強磁場 ESR によって $M_3Cu_3(PO_4)_4$ は100Kを境いに常磁性—トライマー、25Kを境に一次元反強磁性鎖的な振る舞いへと変化していることが明らかとなった。

O-9 有機一次元磁性体 F_5PNN の低温磁性と構造変化

大阪府立大学大学院理学系研究科 細越 裕子

有機磁性体 F_5PNN は低温において、S=1/2 の Heisenberg 反強磁性交互鎖 ($2J/k_B = -5.6$ K, $\alpha = J/J' = 0.4$) として振る舞う^[1]。ギャップがつぶれ磁化が生じる第一臨界磁場(約3 T)から磁化が飽和する第二臨界磁場(約7 T)までの全磁場範囲において、朝永-ラッティンジャー液体に特有の熱励起が観測されている^[2]。この物質の特徴は格子が極めて柔らかいことにあり、低温・磁場・圧力によって格子歪みが起こる。室温では均一鎖構造を持つが、温度低下に伴う2段階の構造転移により、5 K以下で交替鎖に変化する。この構造転移は単結晶を用いた交流比熱測定における小さなピーク、単結晶 EPR の g 因子の主軸変化によって同定される。2 K以下の磁化曲線を理論計算と比較すると、4 T以上の磁場下で交替比 α が0.4 から0.5 に変化しているように見える。ギャップの消失する磁場の印加によって格子が歪むことは、磁歪測定においても確認された。また、この物質の構造転移は5 kbarの圧力によって抑制される^[3]。低温・磁場中の構造について、引き続き検討を行なってゆく。

[1] M. Takahashi, et al., Mol. Cryst. Liq. Cryst., 306, 111-118 (1997).

[2] Y. Yoshida, et al., Phys. Rev. Lett., 94, 037203 (4 pages) (2005).

[3] Y. Hosokoshi, et al., Mol. Cryst. Liq. Cryst., 306, 423-430 (1997); M. Mito, et al., Solid State Commun., 111, 607-611 (1999).

O-10 量子磁性鎖の磁場誘起相におけるスピン・フロップ転移

岡山大学大学院自然科学研究科 原田 勲

近年、低次元量子磁性体におけるスピンギャップと量子揺らぎによるスピン液体状態に興味を持たれ、量子揺らぎを外部磁場によって制御することが試みられている。特に、強磁場によりそのギャップを閉じ、スピンの秩序化を実現しよう

という試みが $S=1$ スピン系 (NDMAP ; Ni 化合物) や $S=1/2$ スピン系 (TlCuCl₃ など) で成功している。これら磁場誘起秩序状態はこれまで知られている秩序状態と一体どの様に異なるのであろうか。この様な問いの一つ、“磁場誘起秩序相でのスピン・フロップ転移は可能か” に答えるため以下の研究を行った。

磁場下でのスピンギャップを持つ量子系を記述するために Landau-Ginzburg 流の平均場ラグランジアンを用いて、ギャップが閉じ秩序相が現れる臨界磁場の磁場方向依存性や可能な秩序相を調べた。その結果、古典系に対応するスピン・フロップ転移は起こらないことが結論された。これは磁場誘起秩序相で秩序変数が常に磁場に垂直になり、古典系のような秩序変数が磁場と平行な相が存在しないからである。しかし、磁場が主軸から傾くと、磁場誘起秩序相でもスピン・フロップ転移が可能であることが示された。事実、NDMAP で発見されている高磁場相^[1] が発見されたスピン・フロップ状態であると示唆されるが、これは NDMAP でスピン異方性の主軸が結晶の主軸からわずかに傾いていることに起因する。今後の理論・実験研究の展開が期待される。

[1] H. Tsujii et al., Phys. Rev. B71, 014426 (2005).

O-11 量子スピン系の磁場誘起量子相転移

日本原子力研究所関西研究所放射光科学研究センター 坂井 徹

最近の強磁場技術の進歩により、低次元磁性体の分野で巨視的量子現象として注目されてきたスピンギャップを、磁場によってつぶし、ギャップレスのスピン液体やさらに高磁場における新たな磁場誘起ギャップ (磁化プラトー) などを実現する研究が可能となってきた。とくに一次元系におけるスピン液体相は、朝永・ラッティンジャー液体と呼ばれ、磁場に垂直な反強磁性的スピン相関と、磁場に平行な非整合スピン相関について、相関距離が無限に長い臨界状態であることが知られている。通常の擬一次元反強磁性体では、鎖間相互作用のために、この臨界相の代わりに磁場に垂直な反強磁性長距離秩序が実現する。この磁場誘起反強磁性相は、マグノンのポーズ・アインシュタイン凝縮相と考えられている。一方、最近の密度行列繰り込み群と鎖間平均場近似を用いた我々の理論的解析により、ある程度の次近接相互作用のあるフラストレートした擬一次元ボンド交代鎖において、上記の反強磁性凝縮相の中に、新たに磁場誘起非整合秩序相 (磁場に平行) が現れる可能性のあることが示された。^[1]この非整合秩序相もポーズ・アインシュタイン凝縮相である可能性も高く、またこれらふたつの凝縮相が共存した場合、固体ヘリウム - 4 で観測されているスーパーソリッドと等価な相が実現していることも考えられ、今後の進展に期待がかかる。

[1] N. Maeshima, K. Okunishi, K. Okamoto and T. Sakai: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 127203.

O-12 パルス強磁場中でのフェルミ面研究 ~ CeIn₃ を例として ~

静岡大学理学部 海老原 孝雄

強相関電子系、特に Ce 系重い電子系物質における、磁気秩序あるいは重い電子状態といった、ある安定した相の出現のために、スピンの果たす役割は大きい。安定した相の境界領域には一般的に、揺らぎに起因する、不安定状態が出現する。Ce 系重い電子状態の磁気秩序相と重い電子状態といった量子相を分かつ境界領域では、スピンの揺らぎに起因する不安定状態が出現し、量子臨界状態と呼ばれる。量子臨界状態では、従来のフェルミ流体論的解釈を超えなければならない程強い相互作用が働く場合や、従来のフォノン媒介の超伝導とは異なる、磁気媒介超伝導状態が出現する。相を決定する主因は、第一義的には原子配置だが、原子距離を制御する圧力は CeIn₃ および CePd₂Si₂ での圧力に依るネール温度制御 (低下) と超伝導出現させた研究成果によって、量子相制御の強力なプローブとして、広くしられるようになった。一方、

連続的かつ精密に制御できるのにも関わらず、従来の解釈の延長線上では、磁場が超伝導を壊す方向に働くため、あまり重要視されてこなかった。この点に着目し、磁場を有効なチューニングパラメーターとして利用できないか、CeIn₃を対象物質として、ネール温度の制御と量子臨界状態の誘起を試みた。その結果、ネール温度が低下し絶対零度に近づくと、量子臨界状態が出現する事を、磁化率とドハース・ファンアルフェン効果の2つをコアの実験手法として、磁場のチューニングパラメーターとしての有用性をつまびらかにした。

O-13 希土類化合物 PrPb₃における四極子変調構造-

東京大学物性研究所 鬼丸 孝博

希土類化合物においては $4f$ 電子がその磁性を担っており、スピン軌道相互作用が強いため合成角運動量 J がよい量子数となる。そのため自由度としての磁気双極子の他に、電気四極子（以下、四極子と記述）といった多極子はその物性に大きな影響を与えることがある。例えば四極子が整列する現象を四極子秩序と呼び、特に四極子が交替的に整列する場合を反強四極子 (AFQ) 秩序と呼ぶ。この AFQ 秩序転移前後においては、格子はほとんど歪まず、また転移温度が磁場の印加とともに上がるなど興味深い現象を示す。今回我々は、基底状態で四極子の自由度しかもたず、 $T_Q=0.4$ K で AFQ 秩序転移を起こす単純立方晶化合物 PrPb₃ に着目し、秩序状態および秩序変数を明らかにするために磁場中での中性子回折実験を行った。実験は、原子力研究所改3号炉炉室に設置されている東大物性研汎用三軸型中性子分光器 GPTAS において、希釈冷凍機・5T 超伝導マグネットを用いて行った。その結果、これまでの AFQ 秩序物質とは全く異なる四極子の長周期秩序構造が明らかになった。この構造からは、四極子間に伝導電子を介するような長距離力が働いていることが示唆される。また 1 T 以下の低磁場では非整合 Sinusoidal 構造が最低温まで実現しており、この系では四極子と伝導電子の混成の効果が重要であると考えられる。

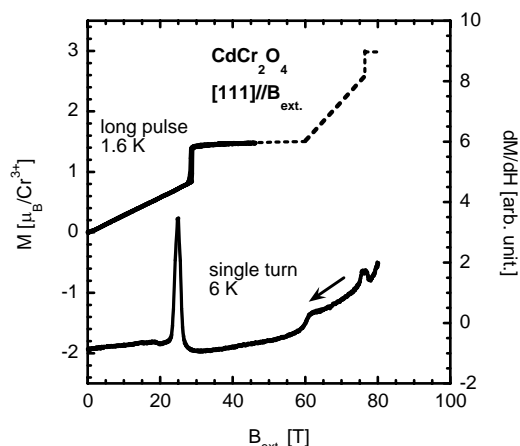
Ref. [1]Onimaru *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 197201 (2005).

O-14 CdCr₂O₄の超強磁場磁化過程-

東京大学物性研究所 三田村 裕幸

CdCr₂O₄はスピネル型酸化物で、Cr³⁺(3d³, S=3/2) が磁性を担っている。Cr サイトはパイロクロア格子を形成しており最隣接サイトに反強磁性相互作用が働けば幾何学的フラストレーションが期待できる。Cr³⁺は、 t_{2g}^3 状態にあり軌道の自由度が消失しているため、磁化過程の方向依存性が小さく理想的なハイゼンベルクスピン系と考えられる。この物質の磁化は低磁場側で直線的に増大するが 28T で 1 次転移を起こした後平坦部が現れる。このいわゆる “1/2 プラトー” の発現機構やその磁気構造はまだ明らかでない。

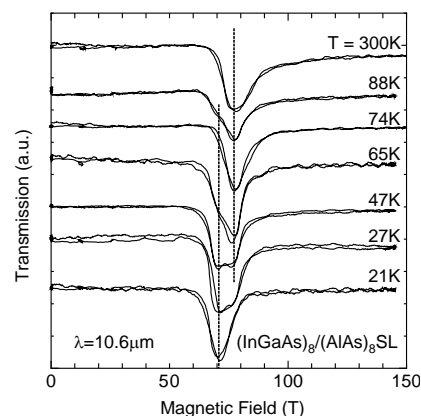
この物質の単結晶について一巻きコイル法磁場発生装置を用い磁化測定を行い、60T 付近に 2 次転移、77T 付近に 1 次転移をそれぞれ観測した。この結果は、「磁化の 1/2 プラトーは格子の歪みに起因して発現する」というモデルと整合性がある。



O-15 InGaAs/AlAs 超格子における不純物サイクロトロン共鳴

大阪大学低温センター 百瀬 英毅

InGaAs は GaAs に比べて電子有効質量が軽い為、高電子移動度トランジスタのチャネル材料として使用されるなど、最近 GaAs-AlAs 系と組み合わせ利用されるようになった。しかし、格子定数の違いからヘテロ接合を形成すると歪が発生するので、これらを組み合わせたヘテロ構造におけるバンドや電子状態については不明な点も多い。そこで我々は超強磁場サイクロトロン共鳴現象をプローブ手段とした解析を行っている。今回は $(\text{InGaAs})_s/(\text{AlAs})_s$ 超格子におけるサイクロトロン共鳴の温度依存性について実験を行ったので、その結果を右図に示す。室温では自由電子サイクロトロン共鳴が明瞭に観測され、測定温度を下げると新たな吸収が低磁場側に現れシフトした。これは不純物サイクロトロン共鳴に遷移したもので、GaAs/AlAs 超格子の実験結果と比較すると、遷移が起きた温度が低く、ピーク磁場の差が小さい。このため、この超格子中の不純物での電子束縛エネルギーが小さいと考えられた。



図： $(\text{InGaAs})_s/(\text{AlAs})_s$ 超格子におけるサイクロトロン共鳴の温度依存性

O-16 量子スピン系の磁場中中性子散乱研究 - 現状と J-PARC における展望 -

原研先端研 加倉井 和久

最近話題の量子スピン系における定常炉における 10T 級磁場中中性子散乱実験に関して、 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ 及び TlCuCl_3 の研究を例に挙げ報告した。直交ダイマー系 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ では磁気励起分散の磁場依存性を明らかにし、Dzyaloshinski-Moriya 異方的相互作用を決定した^[1]。3 次元的に弱く結合したダイマー系 TlCuCl_3 では、シングレット状態から磁場誘起秩序状態への量子相転移の中性子回折研究^[2]を紹介した。2007 年運転開始を目指して建設されている大強度パルス中性子源及びそこに設置が予定されているチョッパー型分光器の概要を説明した。そのような装置における 25T 級またはそれ以上の定常強磁場試料環境による量子スピン系の研究の可能性に関して展望し、最先端の量子ビーム利用施設における強磁場環境の重要性を強調して、中性子散乱と強磁場施設による共同開発を切望した。

[1] K. Kakurai, N. Aso, K. Nukui, M. Nishi, H. Kageyama, Y. Ueda, H. Kadowaki and O. Cépas in 'Quantum Properties of Low-Dimensional Antiferromagnets' ed. by Y. Ajiro and J.-P. Boucher, Kyushu University Press (2002) ISBN 4-87378-740-8, p. 102-108.

[2] H. Tanaka, S. Oosawa, T. Kato, H. Uekusa, Y. Ohashi, K. Kakurai and A. Hoser; J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 939-942.

O-17 スピン軌道複合 f 電子系における強磁場中性子散乱による研究

日本原子力研究所先端基礎研究センター 目時 直人

原研先端基礎研究センターが 1996 年より 5 年間かけて開発してきた中性子散乱実験用 10T 及び 13.5T マグネットの紹介を行った。中性子が透過するための窓を有するスプリットペアータイプが用いられたが、漏洩磁場対策のために磁気シールドや分光器の非磁性化などの作業が必要であった。三種類のアルミニウム合金の液体ヘリウム温度における引っぱり

強度試験で強度を測定し、窓の厚さをできるだけ薄くした。運転経費の節約とクエンチした場合の対策から、液体ヘリウムフリーのマグネットを用いた。スプリットペアーとして 13.5 T は、世界最高磁場である。研究例として、 $U_3Pd_{20}Si_6$ における高次の相互作用によるコリニアーな磁気構造と、その相互作用を破壊する事で生じる新しいタイプのメタ磁性転移の研究、 $PrOs_4Sb_{12}$ の磁場誘起反強四極子秩序の研究、 $NpTGe_5$ における $5f$ 電子状態の変化と、磁気及び四極子相互作用の競合によって生じる 2 段磁気転移とメタ磁性転移に関する研究例を紹介した。さらに、JRR-3 の T2-3 ビームポートを、汎用的に利用できる単色ビームポートとして開放し、そこで年間 1-2 サイクル程度のパルス強磁場実験が行えるようにする提案について報告した。この提案は現在前向きに検討されており、高磁場研究者の積極的な関与に期待している。

O-18 高温超伝導体の磁場中中性子散乱

東京大学物性研究所 廣田 和馬

高温超伝導研究において、 CuO_2 面上でコヒーレンスの短い d 波超伝導が実現し、強い電子相関が超伝導形成に寄与している、ということはコンセンサスとなっているが、それ以上の具体的な機構については解明されたとはいえない。本研究では、磁場もしくは微量の不純物によって超伝導状態が段階的に抑制されていくことを利用し、その過程でのスピンドイナミクスの変化を観測することにより、スピンの揺らぎと超伝導形成の関係を明らかにすることを目指した。 $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ は、 T_c 付近以下から (π, π) 近傍の格子非整合な磁気非弾性散乱にスピンギャップが生じる。非磁性不純物 Zn を 0.1% 単位で制御してドーブした $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ 単結晶では、Zn : 0.8-1.1% においてスピンギャップが開いたあと低温でギャップ内に新しい状態 (in-gap state) ができ、Zn : 1.7% ではそれが弾性散乱へとウェイトがシフトすることが分かった。一方、Ni をドーブした系では磁気非弾性散乱全体が Ni 量とともに低エネルギー側に renormalize されるが、弾性散乱は Ni : 2.9% においても出現しなかった。このことは Zn と Ni の超伝導抑制が定性的に異なることを意味している。また、Zn : 0.5% 試料に磁場を印可すると 3meV 付近の散乱強度が増大したのに対し、Zn : 2.0% では磁気弾性散乱が 14.5T では 50% 程度増大することが分かった。このことは磁場と Zn 不純物が協力的に超伝導抑制に寄与していることを示唆している。磁場実験は HMI-BENSC で行ったが、磁場実験設備が非常によく整備されており、専任技官のサポートもあって初めてでも不安なく実験ができた。中型研究炉の特色ある共同利用体制のあるべき姿として参考になりたいと思う。

O-19 極限環境下の放射光 X 線回折実験

SPring-8/理研 勝又 紘一

大型放射光施設 SPring-8 の理研ビームライン BL19LXU で現在進行中の超伝導磁石を用いた X 線回折実験および今後の計画について報告した。我々の所では、X 線用としては世界最高の 15 テスラを発生する超伝導磁石があり、これに希釈冷凍機を挿入することにより強磁場・超低温での X 線回折測定が可能である。最近の成果として以下の三つを紹介した。

1) スピンパイエルス物質 $CuGeO_3$ の非整合相における測定に於いて臨界磁場付近では、非整合度は温度に強く依存するが、15 テスラの磁場中では温度に殆ど依存しないことが分かった。これは、強磁場が非整合相を安定化するためとして説明できる。2) 少数キャリア磁性体 CeP においてはこれまでの中性子や X 線回折測定より、結晶の c 軸に沿って、Ce の Γ_8 の二重層の間に Γ_7 層が挟まった構造をしており、 Γ_7 層の枚数が磁場や温度により変化することが知られていた。都立大・神木グループとの共同研究により行った 14.5 テスラまでの測定で新たに Γ_7 層が 8 枚および 9 枚の構造が見つかった。3) 梯子磁性体 $Cu_2(C_5H_{12}N_2)_2Cl_4$ は量子効果のために基底状態は非磁性となる。磁場をかけると、非磁性状態から磁気秩序相への転移が起こる。この時、スピんと格子との結合があると、格子変形が生じることが期待される。フランスの E. Lorenzo 博士達との共同研究により、超低温・強磁場中での X 線回折測定を行い、温度 40 mK、磁場 7.3 テスラにおいて格子定数が急激に減少することを見つけた。この転移磁場は比熱測定より求めたものと一致し、我々の X 線実験に於ける温度測定が正しいことが証明された。

理研・東大物性研・阪大極限センターの三者の連携により現在開発中の X 線回折用パルス強磁場の概要についても説明した。

O-20 超小型パルスマグネットによる 30 テスラ以上での放射光 X 線実験

岡山大学大学院自然科学研究科 松田 康弘

放射光 X 線を用いた物性研究は近年非常に発展しており、強磁場環境の整備は最も注目されている実験技術の一つである。放射光 X 線の持つ高輝度性、波長可変性、偏光制御性を利用すれば、磁場中構造解析や内殻磁気分光による電子状態研究などが可能となり、磁場誘起相転移や磁場誘起新奇現象の解明に大きな威力を発揮すると考えられる。しかしながら、30 テスラ以上の磁場発生装置は一般に大規模となるため、これまでにそのような研究は困難であった。

最近我々は SPring-8 において超小型のパルス磁場発生装置を用いて比較的容易に磁場中放射光 X 線回折実験を行うことに成功した。価数転移物質 YbInCu₄ について低温で磁場誘起価数転移にともなう構造相転移を 33 T までの磁場中で観測し、相転移が 2 相共存領域をもつ 1 次の相転移であることを初めて明瞭に確認した。また、2 相のドメインからのそれぞれからのブラッグ反射ピークの磁場依存性は、相転移の初期段階でのマイクロな核形成の様子を反映しているものと理解される結果を得た。この超小型パルス磁場技術は分光測定にも適用可能であり、現在、放射光 X 線を用いた強磁場内殻磁気分光の実験も計画中である。

O-21 実験室系における強磁場低温高感度 X 線カメラの開発

岡山大学大学院自然科学 CREST 野上 由夫

大型放射光を用いた強磁場下での構造研究がブレイクスルーを起こしている今日、これに相補的な手段の強磁場 X 線装置があると有益である。強磁場下 X 線装置は、多軸回折計と零次元検出器からなり、高い分解能を持つ。しかし、一点一点ごとに観測をおこなうために、広い k 空間の観測は膨大な時間を要する。またスプリットマグネットの窓は狭く、観測領域には大きな制限を生ずる。強磁場下での、広い k 空間スキャンを意図して、観測領域の制限を考慮不要の強磁場 X 線カメラを開発した。10 テスラの寒剤不要型のソレノイド超伝導磁石を横置きにして、ボアに平行に回転対陰極から発生した X 線を通させる。X 線源は AgK α 、MoK α 、CuK α が可能である。回折角を大きく取るために、X 線受光にはイメージングプレートを採用し、室温ボア内部に挿入している。用途に応じ、現在までに 2 種類のカメラを作成した。1) 低温回転カメラ：構造解析用にミニ θ テーブルを室温ボア内に配置して、強磁場下で試料の 360 度回転が可能である。到達温度は約 30K である。2) 低温散漫散乱カメラ：集光系にし、試料回転なしで、高 S/N の疑似回転写真を撮影する。ブラッグ反射の 5~6 桁落ちの衛星反射が容易に検出可能である。到達温度は約 7K である。このような強磁場下高感度 X 線カメラの試みは、我々の知る限り世界で初めてである。

O-22 強磁場 X 線回折測定の方法開発への応用-

東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター 小山 佳一

最近、磁場を積極的に利用した材料の研究・開発が国内外で注目されてきている。その中に、高磁歪材料、磁場誘起マルテンサイト変態物質、高磁気熱量材料がある。これらの材料は、磁場と温度をコントロールすることによりその機能を発現させるが、このとき大きな結晶歪みや一次相転移的な結晶変態を伴う。今後、このような磁場制御型機能性材料の研究・開発が進むにつれ、磁場中における磁性と微視的な構造特性のデータの蓄積が重要となる。東北大金研強磁場センターでは、液体ヘリウムフリー強磁場 (5T) 低温 (8~330K) X 線回折装置を用いて、これら磁場制御型機能性材料の“磁場中 X 線回折その場観測”を系統的に進め、多くの成果を得てきた。

例えば、高磁気熱量材料である、MnFeP_{0.5}As_{0.5} は六方晶 Fe₂P 型構造を持つが、キュリー点直上におけるメタ磁性転移

により、磁気相転移に伴い異方的な格子の変化を生じる ($\Delta a/a=+0.5\%$ 、 $\Delta c/c=-0.6\%$) こと、同一構造への相転移に伴う体積の変化はほとんど無く、常磁性 - 強磁性状態を通して、連続的に体積が減少することが明らかとなった。^[1]

[1] K. Koyama, T. Kanomata and K. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys., **44** (2005) L549-551.

P-1 低次元有機導体の磁気光学測定とフェルミ面の決定

神戸大自然¹、¹神戸大分子フォトセ、²東北大金研、³東北大金研強磁場セ、
⁴名古屋大工、⁵筑波大院化学、⁶都立大院理、⁷理研、⁸JST-CREST
木俣 基、太田 仁¹、大島 勇吾²、小山 佳一³、本河 光博³、伊東 裕⁴、黒田 新一⁴、西川 之⁵、菊地 耕一⁶、
池本 勲⁶、梅宮 将充⁶、宮坂 等⁶、杉浦 健一⁶、山下 正廣⁶、山本 浩史^{7、8}、加藤 礼三^{7、8}

金属の性質を理解する上でフェルミ面を研究することは非常に重要である。フェルミ面を研究する手段として般的なものにはド・ハース・ファンアルフェン効果をはじめとする量子振動や角度依存磁気抵抗振動 (ADMRO) などがあるが、磁気光学測定もまたフェルミ面を研究するための強力な手段であり、我々は磁気光学測定によってフェルミ面を研究している。今回我々は有機導体(DMET)₂X(X=I₃, CuCl₂)およびβ⁺-(BEDT-TTF)(TCNQ) について磁気光学測定を行ない、低温におけるフェルミ面の詳細な形状を明らかにした。(DMET)₂X については I₃ 塩の方が CuCl₂ 塩よりも二次元性が強く、複雑にたわんだフェルミ面をもつことを明らかにし、フェルミ面の細部が異なるため I₃ 塩の方がより高磁場まで金属状態を維持するというモデルを提案した。またβ⁺-(BEDT-TTF)(TCNQ)については擬一次元であると考えられていたフェルミ面が、実は非常に異方的な二次元フェルミ面であることを明らかにし、低温での一次元フェルミ面のネスティングの可能性を示した。

P-2 一次元量子スピン系 DMACuCl₃の強磁場 ESR-

神戸大分子フォトセ^A、神戸大自然^B、九大院理^C、神戸大研究基盤セ^D、神戸大 VBLE^E、東北大金研^F、京大理^G
吉田 誠^A、北野 優美子^B、稲垣 祐次^C、櫻井 敬博^D、木俣 基^B、大久保 晋^{A、E}、
太田 仁^{A、E}、小山 佳一^F、本河 光博^F、浅野 貴行^C、網代 芳民^G

DMACuCl₃は低温で4倍周期の一次元交替鎖を持つ量子スピン系で、磁化過程に1/2プラトーを持つ。比熱と帯磁率の結果はフェロダイマーとアンチフェロダイマーが独立に存在するモデルでだいたい説明できるが、磁場中比熱の結果からは磁場誘起秩序相の存在が示唆されている。そこで我々は、DMACuCl₃の磁場中でのスピンの状態を微視的な点から調べるために強磁場 ESR 測定を行った。メインピークに磁化過程を反映した g 値と線幅の異常を観測すると同時に、ダイマー構造を反映したと考えられるサブピークを観測した。これらのサブピークの共鳴モードは2種類に分けられ、それぞれ0磁場で420GHz(20K)と325GHz(16K)のgapを持つ。これらの値は比熱及び帯磁率から見積もられたフェロダイマー及びアンチフェロダイマーのsinglet-triplet gapに良く一致する。このことは、微視的な観点からも、この物質がフェロダイマー アンチフェロダイマーモデルが良い出発点であることを示唆している。

P-3 スピンギャップ系 ACuCl_3 (A=Tl, K) の圧力下強磁場 ESR 測定

神戸大自然、神戸大研究基盤セ^A、神戸大分子フォトセ^B、東工大極低セ^C、東大物性研^D、阪大極限セ^E
竹谷 明朗、櫻井 敬博^A、児玉 政文、大久保 晋^B、太田 仁^B、田中 秀数^C、上床 美也^D、木村 尚次郎^E、萩原 政幸^E

スピンギャップ系 ACuCl_3 (A=Tl, K) においては $S=1/2$ の Cu^{2+} が強い反強磁性相互作用でカップルし Cu_2Cl_6 のダイマーユニットを組んでいる。この物質は基底一重項と励起三重項のあいだに有限なギャップを有しており、ギャップが潰れる程度の磁場を印加するとマグノンのボーズ・アインシュタイン凝縮に相当する磁場誘起磁気秩序が起こることが知られている。近年、これらの物質は圧力によってギャップの大きさが変化すると松本ら^[1]によって予測されており非常に注目を集めている。今回、我々は直接的にギャップの大きさの変化を観測するのに有効な手段である ESR 測定を圧力下において行い、ギャップの大きさを見積もった。 TlCuCl_3 の場合、4.2 K においてギャップの大きさが転移磁場換算で 1 bar で 7.5 T から 1.5 kbar で 4 T へ減少する事が確認できた。また KCuCl_3 の場合、4.2 K においてギャップの大きさが 1 bar で 22 T から 6.4 kbar で 9 T へ減少した事を確認し、松本らによって予測されるスピンギャップの圧力依存性からギャップの潰れる臨界圧力が 7.8 kbar であると予測した。

[1]: M. Matsumoto *et al.*: Phys. Rev. B **69** (2004) 054423.

P-4 一次元系 MCuP_2O_7 (M=Sr, Pb) の強磁場 ESR による研究

神戸大自然、神戸大 VBLA、神戸大分子フォトセ^B、東大院工^C、東大院理^D、物材機構^E、京大化研^F
白木 高輔、吉田 誠^A、大久保 晋^{AB}、太田 仁^{AB}、坂本 昌彦^C、
宮下 精二^D、Alexei A. Belik^E、東 正樹^F、高野 幹夫^F

MCuP_2O_7 は、結晶構造から 1 次元 zigzag 鎖反強磁性体と考えられている。この物質の帯磁率と比熱は Belik 氏によって調べられており^[1]、帯磁率は約 5K に、比熱は約 4K にブロードなピークをもっており、それらは典型的な 1 次元 Heisenberg 鎖のふるまいである Bonner-Fisher curve でフィッティング出来る。さらに鎖内の相互作用などの情報を得るために強磁場 ESR の測定を行ったところ、約 10K から温度の低下に伴い共鳴磁場がシフトする現象が見られた。しかしながら、チェーンに対して垂直に磁場を加えると、シフトの方向が古典的な共鳴磁場シフト理論 (Nagata-Tazuke 理論) とは異なっているという結果が得られた。このような例は Cu Benzoate でも知られているが、 MCuP_2O_7 の方がシフト量のはるかに大きくなっている。またシフトに、Nagata-Tazuke 理論では説明できない周波数依存性も観測された。そこで、我々はこの系に対して zigzag 鎖の角度や相互作用の強さが考慮出来る共鳴磁場シフトの直接数値計算^[2]を行い、実験結果と比較・検討を行った。数値計算では、シフトが磁気双極子相互作用で定性的に再現できる結果が得られ、周波数依存性も実験結果より小さいが得ることが出来た。今後は、異方的な相互作用も計算に考慮に入れて、シフトの原因をさらに調べていく予定である。

[1] A. Belik, M. Azuma, M. Takano, J. Magn. Magn. Mater, **272-276** (2004) 937.

[2] S. Miyashita, T. Yoshino and A. Ogasahara, J. Phys. Soc. Jpn, **68** (1999) 655.

P-5 擬二次元三角格子反強磁性体 $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ の多周波 ESR と強磁場磁化

大阪大学極限科学研究センター 八代 晴彦

三角格子反強磁性体はスピンプラストレーションにより多くの相転移を示し、理論と実験の両面から盛んに研究されている。今回用いた $\text{RbFe}(\text{MoO}_4)_2$ は室温で $P3m1$ の六方晶系 ($a=5.69$ 、 $c=7.48$) であり、磁性イオン $\text{Fe}^{3+}(S=5/2)$ が c 面内で擬二次元三角格子反強磁性体 (2D-TAFM) とみなせる数少ない試料である。容易面型の異方性を持ち、磁気秩序する温度下で c 面内に磁場をかけると磁化に $1/3$ プラトー ($H_{c1} < H < H_{c2}$)、および面間の交換相互作用が起因と考えられる一次相転移が $H_{c3} (< H_{c1})$ で起こる事が報告されている^[1]。この磁気構造の詳細を調べるため単結晶試料の多周波 ESR と強磁場磁化の測定を行った。 $H \parallel c$ 面の場合、磁化曲線は飽和磁場まで単調に増加し、ESR の周波数-磁場図はゼロ磁場で約 90GHz のギャップを持ち磁場の増加とともにこのシグナルが単調増加、減少する 2 つのモードが観測された。面間の相互作用を含めた 6 副格子分子場近似解析から飽和磁場までアンブレラ形の磁気構造を保つことが分った。 $H \parallel c$ 面の場合、磁化は上述のプラトー後は飽和まで単調に増加し、ESR の周波数-磁場図は磁場の増加に従い単調減少し H_{c1} で消滅するモード、 H_{c2} から飽和磁場まで弧を描くモード、 H_{c2} まで単調増加し以後低周波数側に緩やかにシフトするモードが観測された。3 副格子モデルで解析を行うと ESR モードは定性的にほぼ再現され 2D-TAFM に近い事が分る。しかし、 H_{c3} での磁化の異常は 6 副格子などのより詳細な解析が必要である。

[1] T. Inami *et al.* JPSJ, **65**, 2374 (1996). L. E. Svistov *et al.* PRB, **67**, 094434 (2003)

P-6 LiCu_2O_2 の多周波 ESR

大阪大学極限科学研究センター 柏木 隆成

LiCu_2O_2 単結晶は斜方晶系 (空間群: Pnma) に属し、 b 軸方向に沿って Cu^{2+} のジグザグ鎖が伸びた構造を持つ。このような低次元磁性体は理論、実験の両面から近年盛んに研究され興味深い結果が得られている。この物質に関しては、これまでに帯磁率、中性子散乱実験^[1]や ESR^[2]などが行われており、23K 付近に転移点をもち、その温度以下で ab 面内にらせん構造をとることが報告されている。^[1]そこで本研究では中性子散乱よりエネルギー分解能の良い ESR により、23K 以下での励起状態の詳細を調べるために、超伝導磁石とパルス磁石を用い LiCu_2O_2 単結晶の多周波 ESR 測定を行った。(1.3, 1.5K, 30GHz - 1.5THz, 0-55T)

その結果、 a 軸と b 軸に外部磁場をかけて得たシグナルは、強度が異なるが共鳴磁場を周波数-磁場ダイアグラムにプロットしてみるとほぼ等しいことが分かった。また、 c 軸に外部磁場を印加して得たシグナルは、 a, b 軸で得られたものと同様な傾向をもつことが分かった。この事は ab 面内での磁気異方性が小さく、また ab 面内と c 軸でも異方性に大きな違いが無いことを反映した結果ではないかと考えている。本研究会では、ESR により得られた共鳴モードの 1 つの解釈として、らせん構造を考えた場合の解析について報告を行った。

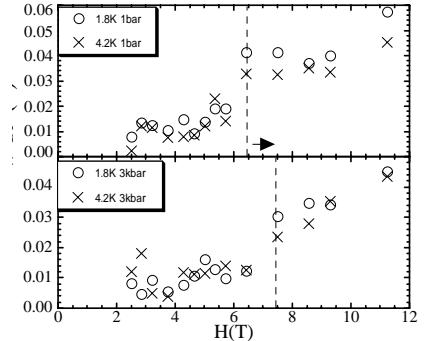
[1] T. Masuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 177201 (2004).

[2] A.M.Vorotynov *et al.*, JETP **86**, 1020 (1998).

P-7 有機磁性体の強磁場 ESR 測定

神戸大自然、神戸大研究基盤セ^A、神戸大分子フォトセ^B、阪府大院理^C
児玉 政文、櫻井 敬博^A、大久保 晋^B、太田 仁^B、細越 裕子^C

スピンギャップ系の量子現象はこれまで非常に注目を集め様々な研究がなされてきた。有機磁性体においては様々な安定ラジカル分子の合成と、これらの分子配列の制御により、種々のスピンギャップ系が見出されており、特徴的な磁性を示す。S=1/2 のボンド交替鎖 F₅PNN もギャップを有し、また圧力下での帯磁率、比熱測定などから、ギャップの大きさが圧力に依存して変化するのではないかと考えられている非常に興味深い物質である。今回我々は、よりミクロな視点からギャップの圧力依存性を観測するために、上記試料に対して圧力下強磁場 ESR 測定を行った。右図が ESR 測定より得られた線幅の磁場依存性の結果である。この結果より、圧力をかけたことで線幅に異常が現れる磁場が高磁場側にシフトしたように見える。これは結晶構造が圧力により固くなったからだと考えられる。今後はギャップの情報とその圧力依存性を中心に研究を進めていく予定である。



P-8 スピネル化合物 CdCr₂O₄ の強磁場 ESR

大阪大学極限科学研究センター 木村 尚次郎

クロムスピネル化合物 CdCr₂O₄ は、格子の変形を伴って飽和磁化の 1/2 の磁化プラトーを発現する極めて特異な磁場誘起転移を 28.5T 付近で示すことが知られている^[1]。我々はこの物質の磁気秩序状態を調べるため、~55T のパルス強磁場と 70~1400GHz の高周波を用いた ESR 測定を行った。最近の中性子回折からこの物質の零磁場での磁気構造が螺旋構造であることが示されているが^[2]、我々の観測した低磁場領域での ESR モードは、10 倍周期の螺旋構造を仮定して得られた計算結果とかなりよく合う。磁化過程に小さな以上が現れる 5T 付近で螺旋構造に特有な ESR モードが消失し、それ以上の磁場領域では単純な二副格子モデルから期待される様な ESR モードが観測された。更に上述の磁気転移を反映し、28.5T 付近で急激な ESR モードの変化がみられた。H_c 以上の領域での ESR モードの傾きは常磁性共鳴モードに平行である。このことは分子場がスピンに対して平行あるいは反平行に働いていることを示唆し、collinear な磁気構造がこの磁場領域で実現しているとする予想と矛盾しない。

[1] H. Ueda, H. A. Katori, H. Mitamura, T. Goto and H. Takagi: Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 47202.

[2] J.-H. Chung, M. Matsuda, S.-H. Lee, K. Kakurai, H. Ueda, T. J. Sato, H. Takagi, K. P. Hong and S. Park: preprint.

P-9 光照射で臨界電流値が変化する量子ホール効果のブレイクダウン

千葉大学 大学院自然科学研究科、理学部 片桐 崇良、音 賢一

量子ホール効果のブレイクダウンの臨界電流値が、試料の線幅に比例しないタイプのブレイクダウンの機構について調べた。このタイプのブレイクダウンの臨界電流値は、線幅に比例するタイプに比べて小さい値を示すことが知られている。この原因を探るため、ブレイクダウンの線幅依存性が光照射でスイッチする GaAs/AlGaAs ホールバー試料を用いて、光照射の前後で何が変化しているかを調べた。量子ホールプラトー(ν=2)での電気伝導度の温度依存性から求めた活性化エネ

ルギーは照射後に大きく減少した。また、ブレイクダウンには至らない微小電流での I-V 測定から、照射後にドープ層での平行伝導が増大していることも分かった。これらはドープ層に mobile な電子が生じ、これがイオン化不純物からのポテンシャル揺らぎを遮蔽することでランダウ準位が先鋭化するものと考えられる。シュブニコフ振動より求めた Quantum Mobility も照射後に増大している。ランダウ準位が先鋭化すると、量子ホール状態での電気化学ポテンシャルの変化は大きくなるため、電流が流れているときの試料の両端付近の電子状態は Compressible な状態になり、試料の中心付近にのみ細かい strip 状の Incompressible な電子状態が残る。この細い領域が量子ホール効果を担うため、臨界電流が小さくなっていると考えられる。

P-10 GaAs/AlGaAs 量子ホール状態のキャパシタンス測定によるポテンシャルの揺らぎの評価

千葉大学大学院自然科学研究科、理学部^A 土肥 将人、音 賢一^A

半導体 2 次元電子系などの試料のクオリティを表すパラメータとして移動度が用いられるが、弱磁場下のホール効果や伝導度より算出される移動度には、電子によるポテンシャルのスクリーニング効果のため、厳密には“2 次元電子系の乱れ”を反映していない。本研究では GaAs/AlGaAs 2 次元電子系とゲート間のキャパシタンス測定を行い、照射前後で“2 次元電子系の乱れ”の大きさを定量的に評価した。キャパシタンスの磁気振動から求めたランダウ準位の状態密度の大きさの計測および“Quantum Mobility”の値を調べることで、照射後における電子の感じる“2 次元電子系の乱れ”が小さくなっていることが示された。一方、ゼロ磁場でゲートに負バイアスをかけたときの空乏化直前のキャパシタンスのゲート電圧依存性の測定からは、照射によってイオン化不純物の作るランダウポテンシャル自体は強くなっていることが分かった。以上の結果から、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造では、照射によりイオン化不純物によるクーロンポテンシャルは大きくなるが、照射で増したドナー層（平行伝導層）のキャリアや 2 次元電子系によるスクリーニング効果により、“2 次元電子系の乱れ”は小さくなるものと考えられる。

P-11 光ファイバーを用いた低温・強磁場でのマイクロスポット分光システムの開発

千葉大学理学部 荒原 幸士郎、沈 睿、宮部 翔、音 賢一、室 清文

低温・強磁場下での単一量子ドットや単一カーボンナノチューブなどの観測を目的として、ファイバーベースの分光システムの構築を行った。本システムではコア径が 4 μm の偏波保存ファイバーと NA が 0.55 の対物非球面レンズを用いることで 1.3 μm のスポット径を得た。この光学系を用いて低温下 (~0.4K) で半導体量子井戸からの発光測定を行ったところ、数ナノワットの励起強度でも RT から 0.4K にわたって安定した発光強度が測定できた。しかしこの系では液体ヘリウムの浸入による焦点ずれを補正するための複雑な可動構造が必要なことと、液体冷媒中では泡による散乱のため観測する発光強度が低下するという問題があることが判明した。これらの問題を解決するために、GRIN レンズを用いた光学系（スポット径 1.6 μm ）を開発し、再び同様の測定を行ったところ焦点合わせの必要も無くなり、泡による散乱は抑制された。構造が簡単な本光学系では強磁場中 (up to 12T) でも同一スポットからの安定した発光測定が可能であると考えられ、さらには希釈冷凍機を用いた極低温下 (~30mK) での分光測定、PM ファイバーの偏光特性を利用した測定などを考えている。

P-12 テラヘルツ光による半導体強磁場物性

物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所 今中 康貴

これまでテラヘルツ領域の光、すなわち遠赤外光によるサイクロトロン共鳴の研究が、様々な半導体及びその低次元系に対して、パルス強磁場と遠赤外ガスレーザー（第一世代）や定常磁場とフーリエ型遠赤外分光器（第二世代）などの組み合わせにより行われてきた。特に II-VI 族半導体は一般的に移動度が小さいため、サイクロトロン共鳴実験を行う際に強磁場が必要となり、電磁濃縮法を始めとするメガガウス領域のパルス強磁場や超伝導磁石による定常強磁場を利用することで、LO フォノンエネルギーを挟む非常に広範なエネルギー領域での有効質量のエネルギー依存性や電子格子相互作用を起源とする半導体のポラロン効果に関する知見が明らかになっている。

今回、第一世代、第二世代のテラヘルツ光源による II-VI 族半導体 (ZnO, ZnS, ZnSe, CdS, CdSe, CdTe) および II-VI 族希薄磁性半導体 2 次元電子系 CdMnTe/CdMgTe のサイクロトロン共鳴を行い、有効質量の磁場依存性、温度依存性などから電子格子結合定数や多体効果に関する様々な知見を得たので報告を行った。また最近、第三世代のテラヘルツ光源として注目されている光伝導アンテナによるパルステラヘルツ光システムの開発を行っているので、その現状と強磁場極低温測定への拡張に関して報告を行った。

P-14 量子ドット結合 2DEG における $\nu < 1$ での輸送現象異常

物質・材料研究機構 竹端 寛治

2 次元電子の近傍に量子ドットが存在する試料に強磁場を印加した場合、量子ドットの持つ離散的な電子準位が 2 次元電子に実現する量子ホール効果状態に与える影響などを調べるため、量子ドット結合 2DEG 試料の強磁場中輸送現象を測定した。試料としては、GaAs/(AlGa)As 量子井戸の近傍に InAs 自己形成量子ドットを成長させた基板を用い、ゲート付きのホールバーに形成したものをを用いている。測定の結果、 $\nu > 1$ の低磁場領域で明瞭な量子ホール効果が観測され異常な振る舞いは観測されないが、 $\nu < 1$ の強磁場領域でゲート電圧の変化に伴い磁気抵抗値およびホール抵抗値が共に抑制されるなどの輸送現象異常が現れた。また、一定磁場下でのゲート電圧掃引に対し $\nu < 1$ の強磁場領域で $V_g = 0$ V 近傍の狭い領域でヒステリシスを伴う異常を観測している。同ゲート電圧領域でキャパシタンスの変化を観測したことも含め、ゲート電圧挿引により量子ドットの帯電、電離が起こっていると同定した。量子ドットの帯電、電離が起こることにより量子ドットのスピン状態が変化し、 $\nu < 1$ の強磁場領域でスピン偏極した量子ホール効果領域にある 2 次元電子系にスピン散乱を与えるため、輸送現象異常が起こると考えている。

P-15 電子正孔分離型量子構造におけるパルス強磁場磁気分光

東大物性研 小埜 和夫

高密度電子正孔系の研究については、GaAs/AlGaAs タイプ ヘテロ構造において長い励起子緩和時間を利用して格子温度まで十分に冷えた「冷たい励起子」を生成し、励起子ボーズ凝縮を実現する取り組みが世界的に盛んである。半導体ヘテロ構造の界面に垂直な強磁場を加えると磁気励起子の質量が増加するという報告があり、励起子-励起子散乱が抑えられる結果として励起子のボーズ凝縮臨界密度が下がることや臨界温度が上昇するといったように、凝縮実現に向けて強磁場が有利に働くという予測がある。

一方でキャリアを高密度に生成した場合、タイプ 半導体中において電子正孔液滴状態が基底状態になるという理論的予測もあり、その強磁場効果にいたっては報告例がほとんどない状態である。このような背景の下、今回我々は CdS/ZnSe

タイプ 構造および、GaAs/AlAs タイプ 構造を用いて高密度励起下における強磁場磁気分光測定を行った。CdS/ZnSe タイプ 構造は荷電子帯および伝導帯のバンドオフセットが非常に大きく、電子および正孔の波動関数が隣接層にほとんど染み出さない系である。この系における発光は励起密度を桁違いに変化させても発光エネルギーおよび発光スペクトル形状がほとんど変化しないという非常に特異な特徴を持つ。非破壊パルス磁場下において磁気発光測定を行うと、励起密度に応じて、磁場によるエネルギーシフトおよび発光強度の変化が、大きく異なるという特異な振る舞いを見出した。また、GaAs/AlAs タイプ 超格子構造においては、低励起密度においては磁場により発光強度が急激に減少するのに対して、高密度励起下においては磁場の増加と共に急激に発光強度が増加する現象を見出した。これらの磁気発光における特異な振る舞いはこれまで報告例がほとんど無く、キャリアの高密度効果が大きく関与していると考えられる。

P-16 パルス磁場を用いた単層カーボンナノチューブの磁場配向

東京大学物性研究所 中村 修司、内田 和人、嶽山 正二郎

単層カーボンナノチューブ(SWNT)を配向させることはSWNTの基礎・応用研究にとって重要な課題であり、様々な配向方法が提案されている。延伸配向や交流電場配向など様々な配向方法が報告されているが、磁場によるSWNT配向も有効な配向法として提案され超伝導マグネット等の定常磁場を用いたSWNT配向が報告されている。我々はパルス磁場による磁場配向を試み、それがSWNTを有効に配向させることができると見出した。磁場と光の偏光方向が垂直(B⊥E)の場合と平行(B//E)の場合についての光吸収スペクトルの変化を観察し、そこから光学異方性を求めることから配向度を評価した。またパルス磁場の強度や時間幅を変えてSWNTの応答を観察することによって十分な磁場配向のために必要な磁場強度や磁場発生時間を見積もることができた。SWNTの光吸収スペクトルはパルス磁場に追従するように変化することからSWNTにおける反磁性効果を考えることもできる。

今回の報告では、パルス磁場に追従して変化するSWNTの光吸収スペクトルの様子を紹介し、そこからわかるSWNTの光学異方性を通じて配向度を評価した。またパルス磁場配向のために必要なパルス磁場時間幅・強度を導出した。またパルス磁場とほとんど同様に振舞う様子からSWNTの反磁性が磁場時間変化量に依存している可能性を示すことができた。

P-17 希薄磁性量子井戸における励起子分子発光とその強磁場効果

物性研究所、*千葉大自然院
名取 義顕、三野 弘文*、小嶋 映二、内田 和人、嶽山 正二郎

(Cd, Zn)Te/ (Cd, Zn, Mn)Te 量子井戸において強い励起子分子発光が観測された。その起源についてはダーク状態の励起子の寄与が大きく、ダーク状態の溜まり込みにより励起子分子ができているものと考えられる。一方、励起子分子についての研究は過去にいくつもなされているのだが、その多くはひとつのスピンのみしか考えていないものがほとんどである。しかしながら実際には励起子分子にもいくつものスピン状態が存在するはずであり、今回強磁場をかけることでそれが見えることを期待し、実験を行った。

P-18 低温・パルス強磁場における分数荷電励起子

東大物性研 平山 康博

半導体量子井戸の二次元電子系では、光学測定で電子・励起子複合体である荷電励起子が観測される。希薄磁性半導体に磁場を印加すると、スピン交換相互作用により大きなスピン偏極が引き起こされる。荷電励起子の形成には電子、正孔

のスピ状態が大きく影響することから、希薄磁性半導体中では多様な磁気光学効果が観測される。また、半導体二次元電子系試料に磁場をかけることで、整数・分数量子ホール効果が起きることが前から知られているが、この量子状態が荷電励起子発光に多大な影響を及ぼす。

我々の研究は、希薄磁性半導体・二次元荷電励起子の低温・強磁場での振る舞いを解明することを目的とし、CdMnTe/CdMgTeの磁気光学測定を行っている。低磁場領域では、複数の発光ピークが観測された。これらの発光ピークは一重項、三重項荷電励起子、ランダウ準位間遷移によるものである。また2 T以下で一重項荷電励起子と三重項荷電励起子のエネルギー差も起きている。さらに強磁場（ランダウ準位の電子の充填率 $\nu < 1$ ）では、三重項荷電励起子の発光のみが強く現われる。この発光を詳しく解析すると、磁場がある値で（ ν が分数の値）発光ピークの低エネルギー側へのシフトや発光強度の変動が観測された。このことから、分数量子ホール状態による影響が荷電励起子発光に現われたと考え、現在その検証を行なっている。

P-19 層状伝導体のパルス強磁場中輸送現象測定

大阪大学極限科学研究センター 菅 健一

近年、半金属的な層状物質 η - Mo_4O_{11} が10テスラ付近にピークを示したあと磁場の増加とともにホールプラトーを伴って減少するといった特異な量子ホール効果(QHE)が低温・強磁場中にて発見された^[1]。この物質は温度の降下とともに二度の電荷密度波転移を示し、低温では電子と正孔の小さな2次元柱状フェルミ面のみが残る。発見当初、この特異なQHEは正孔系のフェルミ面に起因するものと考えられ、Fermi面の変化によって占有率 ν が磁場とともに増加するという“Field-dependent Fermi surface model”で説明された。

今回、我々はこの特異なQHEについて詳細な研究を行った結果、40テスラ以上でホール抵抗がゼロになることに注目し、正孔のみでなく電子の寄与も考慮した電子・正孔系の補償QHEの可能性を見出した。また、これまで量子極限領域に到達していたと考えられていた磁場領域 $B_{QL} > 19$ Tにて、磁気抵抗に磁場誘起の振動成分を観測し、この振動成分の周波数が36 Tと49 Tを境に逐次的に大きくなることを発見した。

研究会ではこれらの実験結果についてポスター発表を行い、量子ホール系や、低次元導体系の研究者らと意見を交換した。

[1] M. Sasaki, N. Miyajima, H. Negishi, K. Suga, Y. Narumi, and K. Kindo, *Physica B* **298**, 520 (2001).

P-20 物性研究所における電磁濃縮法の現状と展望

東京大学物性研究所 小嶋 映二、福田 毅 哉、嶽山 正二郎

物性研究所の電磁濃縮法装置は唯一、室内で300テスラ超の磁場が発生可能な装置であり、これまで様々な物性測定に応用されている。最近ではフィードギャップコンベンサー^[1]を用いることにより飛躍的に磁場の均一性、再現性が向上した。その結果、622テスラの磁場の観測に至ったのであるが、安定した物性測定の為には依然として、いくつかの課題が残されている。その一つは投入する電気エネルギーとライナーの運動エネルギーのエネルギー変換効率が10パーセント程度と低いことである。この点を解決するためにはプライマリコイルの最適化が必要である。我々は、最近電極の取り方に工夫したプライマリコイルを用いて電磁濃縮法による磁場発生実験を行った。また、今後の展望としてさらなるエネルギー変換の効率化と測定精度の向上の観点から、銅板プライマリコイルやパウダーカスケード方式による磁場発生などについても計画している。

[1] Y.H.Matsuda et al., *Rev.Sci.Instrum.* **73**, 4288 (2002).

P-21 強磁場下放射光 X 線回折実験用パルスマグネットの開発

大阪大学極限科学研究センター 川内 周

第三世代大型放射光施設 SPring-8 の BL19LXU ビームラインでは 15 テスラスプリット型超伝導マグネットを用いた磁場中 X 線回折実験が行われてきたが、15 テスラを超える磁場ではパルス磁場発生装置と組み合わせる必要がある。ここではパルス磁場中での時分割測定に適した世界最高輝度の放射光 X 線を発生させることができるので、このビームラインと組み合わせるスプリット型パルスマグネットの開発を行った。

阪大で使用している 60 テスラの磁場を発生するパルスマグネットを少し改良したものを 2 つ用意し、それらを上下に配置しスプリット型マグネットを作った。阪大での磁場テストではスリット中心で最大磁場 40 テスラを記録し、SPring-8 ではコンデンサー容量の関係で最大 36.5 テスラを発生させることに成功した。現在、このマグネットを用いてパルス磁場下における X 線回折測定を行うために測定システムの整備を行っている。時分割測定は、パウダーサンプルでは IP(Imaging Plate)、単結晶測定では APD(Avalanche Photo Diode)を用いる予定である。そしてこれらの整備したシステムを用いてまずは 40 テスラ領域、そして近い将来に 50 テスラ領域での測定を可能にすべくマグネットの開発を行っている。

P-22 卓上 30T コンデンサバンクの開発

東京大学物性研究所 大道 英二

ミクロンサイズから数センチ程度の小型コイルを用いたパルス磁石は、取り扱いが簡便であること、新しい測定手法との組み合わせが可能になること、局所的な磁場発生ができることなど従来のパルス磁石にはない特徴を備えている。こういったパルス磁石では、磁場発生に必要なエネルギーが小さくできるため、液体ヘリウム容器中でのパルス強磁場測定が可能になると期待できる。本研究では、実際に卓上コンデンサバンクを製作し、液体ヘリウム温度域で磁場発生テストを行ったところ 30 T の強磁場をえることに成功した。コイルの大きさは直径 5.5 mm、高さ 6 mm 程度で、ボア径は 1.6 mm である。このシステムを用いて液体ヘリウム温度で磁化と磁気抵抗の測定を行った。磁化測定では、ピックアップコイルとしてチップインダクタを用いた。試料としてメタ磁性を示すマンガン酸化物を測定したところ、ロングパルス磁石で得られた結果と良い一致を示した。また、磁気抵抗測定では、有機導体を測定したところ明瞭な量子振動が 20 T 以上の高磁場領域に観測された。このことから、本研究で製作した小型パルス磁石は、パルス幅が 600 μ s と短いながらも、実用的な測定に使用できることがわかった。

P-23 単鎖磁石の磁気励起とサイズ効果

東北大学金属材料研究所 大島 勇吾

配位子化学的手法を用いて合成されるナノ磁性体は構造の柔軟性やテンプレートを用いた派生物の多様性から興味深い物性の宝庫として期待されている。単分子磁石と呼ばれる強磁性あるいはフェリ磁性ユニットを一次元的に連結した系は単鎖磁石と呼ばれるが、一般的に無機化合物の 1 次元物質に比べ鎖間相互作用が弱く、良い 1 次元性が期待される。近年、 $S=3$ のフェリ磁性ユニット $\text{Mn}(S=2)\text{-Ni}(S=1)\text{-Mn}(S=2)$ が強磁性的に連結した様々な単鎖磁石が開発されてきている。我々はこれら物質群のうち、ユニットの長さが違う単鎖磁石について ESR を用いて磁気励起のサイズ効果を調べた。約 100 個のユニットが連結した単鎖磁石では、ゼロ磁場で異方性による約 15K の励起ギャップを持つ $g=2$ のモードが観測された。このモードの温度変化は、鎖内相関の発達に起因すると考えられる、共鳴磁場シフトを示す。これらの振る舞いから、このモードは $S_z=1$ のスピン波による集団的磁気励起と考えられる。同様の測定を 2 個のユニットのみが連結した単鎖

磁石で行ったところ、温度変化を示さない ESR 吸収が観測され、これよりフェリ磁性ユニット間の相互作用がほとんどない局所的磁気励起であることがわかった。講演では、これらの結果とともに、理論計算から定量的に求めた交換相互作用及び異方性定数について報告した。

P-24 スピン 1 擬一次元ギャップ系における不純物・磁場効果

東北大学大学院理学研究科物理学専攻固体統計物理学講座 松本 宗久
東京大学物性研究所物質設計評価施設 高山 一

ボンド交替スピン1反強磁性ハイゼンベルグ鎖が三次元的に弱く結合した擬一次元系における不純物効果を連続時間ルーブアルゴリズムによる量子モンテカルロ法を用いて解析した。均一系は鎖間相互作用が十分に弱いと相転移を起こさない^[1]が、不純物がランダムにドーブされると局所的な磁気モーメントが不純物近傍に現れ、それらの間に三次元的な相互作用がはたらくことにより有限温度の相転移が起きると考えられている。この相転移温度の大小関係を非磁性不純物と $S=1/2$ 磁性不純物について比較すると、不純物近傍に誘起される全局所磁気モーメントの大きさは前者の方が大きい、反強磁性秩序に寄与する局所スタグガード磁気モーメントとしては後者の方が大きいと期待され、これらの相反する効果のいずれが勝るかは非自明な問題であると考えられる。ここでは不純物濃度を10%に固定し、それぞれの誘起する反強磁性相転移温度を決定した。不純物誘起転移温度は後者の方が高いことが分かり、局所スタグガード磁気モーメントの効果が勝ることが分かった。また磁場中ではギャップが縮小する、すなわち相関長が延伸されることで離れた局所磁気モーメント間の相互作用が強化されることおよび磁性に寄与する局所磁気モーメントの大きさが縮むことが期待され、不純物誘起相転移における磁場効果は非常に興味深い問題である。

[1] T. Sakai and M. Takahashi: J. Phys. Soc. Jpn. (1989) 3131.

P-25 スクッテルダイト化合物 AFe_4Sb_{12} ($A = Ca, Sr, Ba$) における遍歴電子メタ磁性

阪大極限セ、広大院先端物質^A、東大物性研^B
吉居 俊輔、松岡 英一^A、高畠 敏郎^A、金道 浩一^B、萩原 政幸

アルカリ土類金属が充填されたスクッテルダイト化合物 AFe_4Sb_{12} ($A=Ca, Sr, Ba$) は強磁性的に相互作用する Fe の 3d バンドによる遍歴磁性を示す。いずれの物質においても帯磁率は 100K 以上でキュリー-ワイス的に振る舞い、50K 付近でなだらかな極大を示す。本研究ではメタ磁性の有無などこの系における磁氣的性質をより詳細に調べ電子状態に関する知見をさらに得るために、粉末試料を用いてパルス強磁場中における磁化測定を行った。

低温において $A=Ca$ では最初急激に立ち上がった後 13T 付近でメタ磁性的な異常が観測される。 $A=Sr, Ba$ においてもメタ磁性様の振舞が観測される。帯磁率から見積もられる T_{max} や μ_{eff} はいずれの物質も同程度の値を示すが、このメタ磁性的な異常は $Ca < Sr < Ba$ に従って系統的に弱くなると共に、観測される温度範囲も著しく低温側にシフトする。スピンのゆらぎをとり入れた理論をもとに磁気相図や転移磁場の変化などについて他の遍歴電子メタ磁性体との比較を行ったところ、磁気相図に関しては強磁性転移を示す $A=Na$ も含めて横軸に適切なパラメータをとることで、他の遍歴電子メタ磁性体と似た振る舞いを示すことが明らかとなった。一方、多くの遍歴電子メタ磁性化合物では転移磁場 $B_c(T=0K)$ は $\chi(T_{max})^{-1}$ に比例して増加するが、 AFe_4Sb_{12} では $\chi(T_{max})^{-1}$ が大きく変化するにも関わらず $B_c(T=0K)$ はほとんど変化しないなどの違いも見られることが分かった。

P-26 直交ダイマー系 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ の強磁場磁歪測定

大阪大学極限科学研究センター 沢井 祥束

低次元磁性体の磁場中での振る舞いは、磁化プラトーや磁場誘起秩序などに代表されるように多彩な物理を展開している。近年、この低次元磁性体においてスピンと格子の強いカップリングが理論的に示唆されており、これに関する実験が精力的に行われている。強磁場磁化測定において $1/3$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 磁化プラトーが観測されている直交ダイマー系物質 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ もその興味の対象となっており、各プラトー領域での超格子構造が理論的に示唆されている。また、NMR 測定において $1/8$ プラトー領域での超格子構造を裏付けするような結果が得られており、さらに強磁場領域での磁化プラトー領域に関心が持たれている。今回の強磁場磁歪測定は、NMR 測定などでは届かない 50T 級の強磁場領域での格子の変形から、未解明である $1/3$ 、 $1/4$ プラトー領域での超格子構造を推察することを目的として行った。磁化の発現とともに負の磁歪が観測され、 $1/4$ プラトー領域では磁歪でもプラトーが観測された。これよりスピンと格子の強いカップリングの存在が明らかになり、さらに $1/4$ プラトー領域での超格子構造が安定であることが分かった。

P-27 ナノ空間に閉じ込められた酸素の強磁場磁化

東京大学物性研究所 松尾 晶

ここで言うナノ空間は、金属イオンと有機配位子からなる金属錯体が持つ細孔が実現させている空間のことをさす。この多孔性金属錯体の結晶性はきわめて高く、その細孔サイズも均一で、かつ規則的にのびている。応用面から見ると、この金属錯体は活性炭やゼオライトなどと同様のガス吸着剤としての機能を有し、その設計のたやすさ、細孔の高均一性を持つことから次世代エネルギー社会に貢献しうる新たな機能物質として注目を集めている。一方、基礎科学の興味から見ると、この多孔性金属錯体は新奇の低次元磁性体を作るステージと捉えることが出来る。原子サイズオーダーの口径を持つ細孔に任意のガスを吸着させると、ガスはチェーンを形成することが出来る。このチェーンは既成の化学合成法から出来た低次元物質と異なり、極めて緩い束縛条件である物理吸着により実現されており、そのガスが持つ本来の電子状態を少しだけ変えてチェーンを構成していると考えられる。今回、ガスに酸素分子を用いてその磁氣的性質を調べた。帯磁率結果から 160 K 付近から吸着が始まり 80 K 付近で緩いピークを示し、更に低温では非磁性状態の落ち込むことが分かった。磁化過程は 50 T 付近からの急激な磁化の伸びがあり、 $S=1$ ダイマーモデルを適応できる系の可能性がある。今後 120 T 付近までの測定を行い、更に詳細を解明していく。

物性研究所 ISSP ワークショップ報告

ラットリングと超伝導

日時：平成 17 年 5 月 9 日（月）午前 11 時～午後 7 時

場所：物性研究所大講義室（本館 6 階）

趣 旨

最近、かご状構造を有する超伝導体の研究が活発に行われている。そこでは比較的大きな「かご」の中に存在する原子が「がらがら」と動き回り、異常に低い熱伝導やラットリングフォノンと呼ばれる非調和性の特異な格子振動の原因となっている。本ワークショップでは、いくつかの関連する物質を取り上げ、実験・理論両面から議論を行い、ラットリングの本質とかご上を動き回る伝導電子との相関について新たな知見を得ることを試みる。

概 要

本ワークショップは物性研外部から 14 名の先生方をお招きし、総勢約 50 名の参加の下に開催された。かご状構造を有する超伝導物質として、 β 型パイロクロア酸化物、充填スクッテルダイト、Si/Ge クラスレート化合物を取り上げ、また、シリコンの点欠陥に関する話題とともに最近の実験結果について報告があった。これに対して、理論の立場から、これらの化合物の電子状態とラットリングの関連について発表が行われた。

ラットリングと呼ばれる現象は最近、熱電材料における低い熱伝導の原因として注目を集めているが、その物理的意味・意義についてはまだ不明な点が多いと思われる。ラットリングという言葉自身が様々な用いられ方をしており、その物理的描像は必ずしも明確ではない。本ワークショップはその本質を明らかにすることを第一目的として企画されたが、研究会での活発な議論を通して、その理解が深められた。さらに、ラットリングと「かご」上に存在する伝導電子との相互作用についても興味深い議論が行われ、その特異性が認識された。

本研究会は、ラットリング現象が今後、新しい物理のテーマとして発展することを予感させ、大変有意義なものとなった。

世話人 廣井 善二

プ ロ グ ラ ム

	座長	福山 秀敏	
11:00	廣井 善二	物性研	β型パイロクロア酸化物超伝導体
11:30	山浦 淳一	物性研	結晶構造と比熱から見たβパイロクロア酸化物のラットリング
11:40	瀧川 仁	物性研	オスミウム・パイロクロア酸化物における核磁気緩和

12:00 ランチ

	座長	後藤 輝孝	
13:00	及川 健一	原研	充填スクッテルダイト RT_4Sb_{12} (R=La, Ce, Pr, Nd; T=Os, Ru) の結晶構造解析
13:20	根本 祐一	新潟大	超音波による $PrOs_4Sb_{12}$ のラットリングの研究
13:40	石田 憲二	京大	$LaOs_4Sb_{12}$ に見られる異常緩和(ラットリングとの関連性)
14:00	筒井 智嗣	SPring-8	充填スクッテルダイト化合物の X 線非弾性散乱
14:20	宇田川眞行	広島大	希土類化合物のラマン散乱

14:40 休 み

	座長	三宅 和正	
15:00	谷垣 勝己	東北大	Si/Ge クラスレートのラットリングと超伝導
15:30	高島 敏郎	広島大	Ge クラスレートのラットリングによる熱伝導度の抑制
15:50	後藤 輝孝	新潟大	超音波による $R_3Pd_{20}Ge_6$ のラットリングと Si の点欠陥
16:20	柿本 浩一	九大	Si 結晶成長と点欠陥
16:40	金田 寛	富士通	デバイス用シリコン結晶における点欠陥の振舞いと品質への影響

17:00 休 み

	座長	瀧川 仁	
17:20	播磨 尚朝	神戸大	パイロクロアとスクッテルダイトの電子構造
17:50	大野 義章	新潟大	強結合電子フォノン系におけるラットリングと重い電子状態の理論
18:10	三宅 和正	阪大	ラットリングと多準位近藤効果と重い電子系
18:30	福山 秀敏	金研	総合討論

βパイロクロア型の結晶構造を有するオスmium酸化物 AOs_2O_6 は、A 元素として 3 種類のアリカリ金属元素 Cs、Rb、K を含み、それぞれ転移温度 T_c が 3.3K、6.3K、9.6K において超伝導を示す。以前に報告したα型のパイロクロア酸化物 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ の T_c (1.0K) と比べると最大一桁 T_c が上昇したことになる、何らかの新しい超伝導機構が働いていることを予感させる。その結晶構造は特徴的であり、 OsO_6 八面体を作る 3 次元ネットワーク上に電気伝導を担う 5d 電子が存在し、そこに内在する大きな「カゴ」の中に 1 個の A イオンが入る。しかし、カゴの大きさは A イオンのイオン半径に比べて大きすぎるため、A イオンはカゴ中で「がらがら」と振動することが出来る。最近の理論計算によると、かご内でのポテンシャルは極めて非調和的であり、底が平坦な形を有することが示唆されている。実験的には A イオンについて異常に大きな熱振動が見いだされ、また、比熱に局在振動モードに対応するアインシュタイン型の寄与が観測された。A イオンが Cs、Rb、K と軽く、サイズが小さくなるにつれて、その特性温度は低下し、K では 40K と見積もられている。単純な調和振動では逆にエネルギーが増加するはずであり、非調和性の高い、ラットリングが起こっている証拠と考えられる。

このような低エネルギーのラットリング振動は、周りのかごにおける通常のフォノンに大きな影響を及ぼすことが期待される。実際、βパイロクロア酸化物の電気抵抗率は広い温度範囲に渡って上に凸の異常な温度変化を示し、特異な電子・格子相互作用の存在を示唆している。さらに 10K 以下の低温格子比熱には通常の音響フォノンから期待される T^3 の温度依存性が見られず、むしろ T^5 の変化を示すことが見つかった。これは音響フォノンの分散関係において ω が q に比例せず、 q の $3/5$ 乗にのることを意味している。このような異常性は低エネルギーのラットリングモードが音響モードと強く相互作用した結果であると思われる。実際に Si/Ge/Ga クラスレート化合物において、同程度の低エネルギーラットリングモードが音響モードのブランチを切ることが報告されており、これが異常に低い熱伝導の一因であると考えられている。

一方、 $\text{KO}_2\text{Os}_2\text{O}_6$ 単結晶を用いた比熱測定において、超伝導転移温度以下に新たな相転移の存在を示唆するピークが見いだされた。このピークは形状、温度とも磁場にほとんど影響されず、14T の磁場中では超伝導転移よりも高温側に顔を出すことから、超伝導の内部自由度に関連したものではないと考えられる。現時点ではその起源は不明であるが、本来局在モードであるラットリングが低温でコヒーレントになって何らかの相転移を起こしているのかもしれない。ちなみに他の Cs、Rb 系ではこのような第 2 ピークは見つかっていない。Cs、Rb 系と $\text{KO}_2\text{Os}_2\text{O}_6$ の違いは電子比熱係数にも現れており、前者では Os 1 モルあたり $20\text{mJ}/\text{K}^2$ であるが、後者ではこれが数倍大きくなっている。この有効質量増大はこれまで反強磁性相関によるものとされてきたが、ラットリングと関係した電子・格子相互作用によるものである可能性も考えられる。

ラットリングという言葉はただの「がらがら」現象を意味するが、ラットリングフォノンはゲストである重原子の非調和性振動とホストのカゴの音響フォノンが一体となった低エネルギー励起と定義すべきであり、そこには新しい物理が期待される。他の類似物質と合わせて、βパイロクロア酸化物の今後の研究の展開が楽しみである。

結晶構造と比熱から見た β パイロクロア酸化物のラットリング

物性研、物構研 山浦 淳一、米澤 茂樹、村岡 祐治、廣井 善二、垣内 徹、澤 博

βパイロクロア酸化物 AOs_2O_6 (A=Cs、Rb、K) は、それぞれ $T_c=3.3\text{K}$ 、 6.3K 、 9.6K で超伝導を示す[1-3]。この物質では、A サイトの一箇のアリカリ金属イオンが、 $\text{Os}_{12}\text{O}_{18}$ で構成される cage の中に存在し、周囲の O 原子との原子間距離が離れているため、A イオンにはラットリングの存在が期待される。このラットリングの存在と特徴を見出すために、結晶構造解析と比熱測定を試みた。A=K には単結晶を、A=Cs、Rb には粉末試料を用い、粉末構造解析には、KEK-PF BL-1B における実験データを用いた。

室温での結晶構造解析の結果、Cs、Rb、K 原子の等方性温度因子は、Os や O 原子に対して、2 から 5 倍と大きな値を示した。特に K 原子では、 $B_{\text{iso}}=5.7 \text{ \AA}^2$ と非常に大きな値を示す。また、比熱測定からも、Cs、Rb、K からの寄与と思わ

れるアインシュタインモードの存在を確認した[4]。これらの結果から、A サイトの原子は、cage 内で周囲の O 原子と結合が弱く、ほぼ独立して熱振動(ラットリング)をしていることが明らかになった。また、K イオンの電子密度は、 $\langle 111 \rangle$ 方向へ引き伸ばされた形になっており、 $\langle 111 \rangle$ 方向への非調和性の存在を示唆している。これは、 $\text{Os}_{12}\text{O}_{18}$ の cage が $\langle 111 \rangle$ 方向に開口して channel を形成していることに起因していると思われる。また、 $A=\text{K}$ において、 T_c 以下の $T_p=7.5\text{K}$ で、 $A=\text{Cs}$ 、 Rb では観測されない新奇な相転移を見出ししている。ラットリングとの関連を調査中である。

- [1]. S. Yonezawa *et al.*, J. Phys. Condens. Matter 16 (2004) L9.
- [2]. S. Yonezawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 819.
- [3]. S. Yonezawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 1655.
- [4]. Z. Hiroi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 74 (2005) 1255.

オスmium・パイロクロア酸化物における核磁気緩和

物性研 瀧川 仁

ベータ・パイロクロア型構造を持つオスmium酸化物超伝導体 AOs_2O_6 ($A=\text{K}, \text{Rb}$) について、アルカリ・サイトの NMR およびオスmium・サイトのゼロ磁場 NQR の測定結果を報告した。アルカリ・サイトの核磁気緩和率の振る舞いは K 化合物と Rb 化合物で大きく異なり、K 化合物で反強磁性 (SDW) 的な強いスピンの揺らぎがあることを示唆している。特に、K 化合物では超伝導転移温度の 2 倍近い高温から顕著な擬ギャップの振る舞いが観測される。ところがオスmium・サイトの核磁気緩和率に関しては、2 つの物質でこれほど極端な違いがない。この原因はまだ確定していないが、オスmiumサイトの緩和率には軌道磁気モーメントの揺らぎが大きく寄与しており、スピン揺らぎの寄与の違いが隠されている可能性が考えられる。一方、200K 以上の高温でアルカリ・サイトの核磁気緩和率が、試料の温度履歴に依存する異常な増大を示すことが見つかった。これは K 化合物でより顕著であり、ラットリングに関係する格子振動によって引き起こされているのではないかと考えている。

充填スクッテルダイト $\text{RT}_4\text{Sb}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$; $\text{T}=\text{Os}, \text{Ru}$) の結晶構造解析

日本原子力研究所 及川 健一

充填スクッテルダイト $\text{RT}_4\text{Sb}_{12}$ ($\text{R}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$; $\text{T}=\text{Os}, \text{Ru}$) の粉末中性子回折データを用いた結晶構造解析について報告する。測定に用いた粉末試料は、都立大(当時)菅原氏により合成された純良単結晶を粉末にしたものである。

中性子回折測定は高エネルギー加速器研究機構の粉末回折装置 Vega を用いて室温で行い、Rietveld 解析は RIETAN-2001T を用いた。僅かながら Os や RuSb_2 といった不純物が含まれていることは事前の X 線回折により確認されており、これらも解析に含めた。 $\text{RT}_4\text{Sb}_{12}$ の解析モデルは報告されている空間群 ($\text{Im}\bar{3}$) および初期座標を用いた。不純物を含めて、全てのピークをフィットすることが出来た。最終的な解析結果としては、すでにいくつか報告されているように、R の元素(ランタノイド)の熱振動パラメータが、通常考えられる値と比べ、かなり大きな値となった。

我々はこの数年、充填スクッテルダイト化合物の中でも最も興味深いとされている重い電子超伝導体 PrOs₄Sb₁₂ に焦点を当てて超音波による研究を進めてきた。これまでの成果をおさらいすると、第一に弾性定数の精密測定により横波に対応した $C_{44}, (C_{11}-C_{12})/2$ が降温に伴いソフト化を示し、超伝導転移点においてそれが消失することを見出した。このことから PrOs₄Sb₁₂ の超伝導が電気四極子揺らぎと深く関連していることを明らかにした。第二に $(C_{11}-C_{12})/2$ の磁場依存性の結果から、PrOs₄Sb₁₂ の結晶場状態が $\Gamma_1-\Gamma_4^{(2)}$ の一重項-三重項からなる擬四重項であることを示した。第三にこの系における最も重要な結果として、 $(C_{11}-C_{12})/2$ およびそれを成分として含む弾性定数にのみ 20-40K 付近に超音波分散(周波数依存性)を見出した。これは Sb で形成された 20 面体のカゴ中で Pr 原子が Γ_3 対称性のオフセンター振動のラットリングを起こしていることを示している。超音波の測定周波数は 10-100MHz 程度であるので、分散が観測される 20-40K の温度領域でラットリングの振動数が $10^{-7}-10^{-8}$ s という極めてゆっくりとした特性時間をもっていることが分かる。さらに、単に Pr 原子がカゴの中でガラガラ振動を起こしているのではなく、そのオフセンター振動に対称性が存在し、縮対している点が重要な意味を持っている。PrOs₄Sb₁₂ で出現する重い電子状態や重い電子超伝導は、共通認識が得られている Γ_1 一重項基底状態では説明困難である。また電気抵抗に近藤散乱が見られないことから、通常のスピン起源の近藤効果では理解できず、電荷揺らぎをともなう別の機構の重い電子を予想させる。オフセンターラットリングによる局所フォノンの自由度と伝導電子系とが強く結合することで PrOs₄Sb₁₂ の異常物性が出現している可能性が高い。これは電気四極子による多チャンネル近藤効果などの新しい強相関問題を含んでおり、超伝導の起源とともに今後の発展が期待できる。

参考文献

- Y. Nemoto *et al.*, Phys. Rev. B **68** (2003) 184109.
 T. Goto, Y. Nemoto *et al.*, Phys. Rev. B **69** (2004) 180511(R).
 T. Goto, Y. Nemoto *et al.*, Phys. Rev. B **70** (2004) 184126.
 T. Goto, Y. Nemoto *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 263.
 S. Yotsuhashi, K. Miyake *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 49.
 K. Mitsumoto and Y. Ono, Physica C (2005) in press.

LaOs₄Sb₁₂ の常伝導状態に見られる異常緩和(ラットリングとの関連)

京都大学大学院理学研究科^A、徳島大学総合科学^B、東京都立大学理学部^C
 石田 憲二^A、中井 祐介^A、菅原 仁^B、菊池 大輔^C、佐藤 英行^C

充填スクッテルダイト化合物 RM_4P_{12} (R :希土類化合物、 M :Fe,Ru,Os、 P :P,Sb)は、低温で様々な基底状態を取ることが知られ、現在精力的に研究されている。これらの中で我々は PrFe₄P₁₂ と PrOs₄Sb₁₂ に着目し、重い電子状態の形成機構について研究を行ってきた。これは両者の物質について、四重極ゆらぎに基づく近藤効果(quadrupole-Kondo)の可能性が、重い電子状態が発見当時議論されたからである。

我々は PrFe₄P₁₂ について P-NMR 実験を行い、P 核の核スピン-格子緩和率($1/T_1$)の測定から、Pr-4f 電子の磁気緩和率(Γ)の温度依存性を求めた。その結果 Pr-4f 電子の Γ は Ce や Yb の重い電子化合物で見られる Γ の振る舞いと酷似していることがわかった[1]。実際 PrFe₄P₁₂ の Γ の振る舞いは、Otsuki *et al.*による理論計算で、基底一重項と三重項の結晶場の splitting と伝導電子の coupling を考慮することにより理解される[2]。この結果は PrFe₄P₁₂ で実現している重い電子状態は、Pr-4f 電子と伝導電子によって引き起こされる「磁気的な近藤効果」によるものであることを示している。ところが同じ解析を PrOs₄Sb₁₂ で行ってみたところ、 Γ は質的に異なる振る舞いが観測され、「磁気的な近藤効果」とは別の機構により重い電子状態が実現していると考えられる。

我々はさらに、スクッテルダイト化合物特有の「かご」構造に着目し、希土類サイトと「かご」との関係性を調べた。具

体的には 4 種類のスクッテルダイト化合物 $\text{LaFe}_4\text{P}_{12}$ 、 $\text{LaRu}_4\text{P}_{12}$ 、 $\text{LaRu}_4\text{Sb}_{12}$ 、 $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$ において La-NMR を行い、La 核の Knight-shift と $1/T_1$ を測定した。その結果 $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$ においてのみ高温でフォノンによると考えられる、 $1/T_1 \propto T^2$ の依存性が見られることがわかった。現在この異常な緩和の原因、特性を調べている。この緩和異常と $\text{Os}_4\text{Sb}_{12}$ かごに見られるラットリングや、重い電子状態との関連を明らかにしていくつもりである。

[1] K. Ishida *et al.*, Phys. Rev. B 71 (2005) 024424.

[2] Otsuki, Kusunose, and Kuramoto, cond/mat 0503665.

充填スクッテルダイト化合物の X 線非弾性散乱

高輝度光科学研究センター 筒井 智嗣

フォノンを調べる X 線非弾性散乱の手法としては、meV のエネルギー分解能を持ち分散関係を調べることのできる高分解能非弾性散乱と、特定元素の状態密度を調べることのできる核共鳴非弾性散乱がある。前者は中性子非弾性散乱と相補的であり、後者はメスパワー効果を応用したものである。両者は第 3 世代放射光源の出現によって確立された比較的新しい手法である。これらの方法を組み合わせると、元素別のフォノン分散を調べることが原理的に可能となる。本研究では、これらの手法を充填スクッテルダイト化合物に応用し、カゴの中の希土類元素、カゴの骨格を構成する遷移金属元素の各サイトでのフォノン状態密度、分散に関して調べた。

カゴ状希土類化合物のラマン散乱

広島大総合科学 宇田川 眞行

希土類イオンがカゴの中に捉えられている構造を持つ希土類化合物としては、希土類六硼化物 (RB_6)、希土類充填スクッテルダイト (RT_4X_{12}) など多数が知られている。しかし、従来の Si や Ge クラスレート化合物についての非弾性散乱による研究ではカゴの中に入ったイオンの振動の帰属だけで、実際にラットリング状態にあるかどうかについては不明である。本講演では従来のラマン散乱では検討されてこなかった二次のラマン散乱 (ブリルアンゾーン境界の二つの格子振動を同時に励起する過程) を利用することで、カゴの中の希土類イオンの運動を観測できることを示した。内容は RB_6 結晶についての結果[1]を中心に、希土類化合物の最近の研究結果も紹介した。

RB_6 結晶では、R イオンが 2 価の場合には少数キャリア系で絶縁体であるが、3 価は金属である。低エネルギー領域にブリルアンゾーン境界の R イオンの格子振動の二次のラマン散乱ピークが現れる。この振動の振動数と強度は B_6 がつく空間の大きさで決定され、しかも低温での強度の低下は希土類イオン熱振動因子と明瞭な相関がある。従って、希土類の熱振動がラマン散乱で測定されたことになる。しかし、低温での強度低下が 2 価結晶では生じないことから、カゴの中のイオンの運動とキャリアの相関が重要である。更に、類似の励起が $\text{ROs}_4\text{Sb}_{12}$ でも観測されており、スクッテルダイトにおける希土類イオンの運動についての知見を得る有力な手がかりとなる。また、最近測定を開始した $\text{La}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$ では、La の振動と推定される格子振動の強度が 200K 以下で急激に減少することも得られている。今後のカゴ状物質の系統的な研究は必要となるが、カゴ中の希土類の運動の決定にラマン散乱も有効な手段と考えられる。

[1] N.Ogita *et al.*, Phys. Rev. B **68** (2003) 224605.

Si/Ge クラスレートのラットリングと超伝導

東北大理 谷垣 勝己

IV 族元素 (C, Si, Ge) で構成される多面体クラスタを基本構成要素とする物質である C_{60} 固体およびクラスレート物質は、キャリアを導入する事により超伝導が発現する。内部空間を有するシリコン系物質に関しては、1995 年に山中等によりアルカリ土類元素である Ba をシリコン多面体クラスタの内部空間に包摂した Si_{46} 系物質に対して、超伝導が見いだされて以来多くの注目を集めている。本報告では、シリコンとゲルマニウムから構成される $Ba_{24}IV_{100}$ (IV=Si および Ge) クラスレート物質が結晶学的に同じ構造で、両物質とも超伝導である事を報告する。シリコンとゲルマニウムから構成されるクラスレート物質が同構造で超伝導となった初めての例である。 $Ba_{24}Ge_{100}$ が超伝導物質である事は、MaxPlanck 研究所で報告されているが、 $Ba_{24}Si_{100}$ が超伝導体である事は本研究により初めて見いだされた。特に非常に興味深い事は、結晶学的に同構造であるにもかかわらず、2 つに物質は、超伝導転移温度の圧力効果などに全く異なる挙動が見られることである。この現象を、X 線 MEM 解析および比熱測定などから得られる包摂 Ba 原子のラットリング運動と関係づけて議論する。同構造のシリコンおよびゲルマニウムクラスレートに関して様々な比較を行う事により、超伝導機構に関して多くの知見が得られると考えている。

クラスレート単結晶 $Sr_8Ga_{16}Ge_{30}$ と $Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$ のラットリングによる熱伝導度の抑制

広島大学先端物質科学研究科 高畠 敏郎、梅尾 和則、M. A. Avila、坂田 武章、末國 晃一郎

13 属と 14 属の原子が造るカゴにアルカリ土類金属が入ったクラスレート化合物は、大きな熱電能と小さな熱伝導率を併せ持つために、新規な熱電変換物質の候補として注目を集めている。熱伝導の抑制の機構は、内包された原子の異方的な変位を伴う非調和振動 (ラットリング) がカゴのネットワークを伝導する音響フォノンを共鳴的に散乱するためとされてきた [1]。しかし最近、電荷キャリアによるフォノン散乱が低温では重要との指摘もある [2]。ラットリングの証拠として、タイプ I の $X_8Ga_{16}Ge_{30}$ の大きな 14 面体中の $X=Eu$ と Sr の平均位置はカゴの中心からそれぞれ 0.45\AA 、 0.3\AA ずれているという報告がある [3]。

我々は、ラットリングに対応する低エネルギー励起を調べるために $Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$ (BGG) と $Sr_8Ga_{16}Ge_{30}$ (SGG) の単結晶試料を Ga フラックス法で作製し、室温から 0.3K までの比熱と熱伝導度を測定した。熱電能の測定から、前者は p 型で後者は n 型であることが分かった。どちらの試料も格子による熱伝導率 κ_L は $0.3\text{-}1\text{K}$ の範囲で T^2 に従い、 $10\text{-}20\text{K}$ でプラトーを示す。プラトーの値は SGG の方が BGG の約 $1/3$ である。このガラスに似た温度変化は、ガラスの低エネルギー励起を現象論的に説明するソフトポテンシャルモデル [4] でよく再現できた。低温でのトンネル状態と高温でのソフト振動状態とのクロスオーバーを特徴付けるエネルギー W は、BGG と SGG でそれぞれ 7.0K と 4.4K である。比熱を C/T^3 対 $\log T$ でプロットすると、それぞれ 10K と 7K に最大をもつなだらかな山が現れる。上記の W の値をソフトポテンシャルモデルの比熱の式に用いると、BGG の山はあまりよく再現できないが、SGG の山はよく再現された。この解析から得られたフォノンの状態密度は、それぞれ 1THz と 0.7THz にピークをもつ。これらのピークが今後ラマン散乱や中性子散乱で確認され、ラットリングのミクロな描像が得られることを期待している。

[1] J. L. Cohn *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 779.

[2] A. Benti *et al.*, Phys. Rev. B 69 (2004) 045107.

[3] R. Baumbach *et al.*, Phys. Rev. B 71 (2005) 024202.

[4] L. Gil *et al.*, Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 182.

超音波による $R_3Pd_{20}Ge_6$ のラットリングと Si の点欠陥

新潟大学自然科学 後藤 輝孝

最近、超音波によってカゴ状化合物のラットリングや Si 半導体における点欠陥の研究が進展している。 $R_3Pd_{20}Ge_6$ ($R=La,Ce,Pr,Nd$)の横波超音波 C_{44} モードに顕著な分散がみられた。これは、12 個の Pd と 6 個の Ge で囲まれた 32 面体に充填された 3 価の希土類イオンがオフセンターとなり、ポテンシャル障壁を熱的に飛び越すラットリング運動を示している。超音波分散から決定したラットリングの緩和時間はアレニウス型の温度変化 $\tau = \tau_0 \exp(E/k_B T)$ を示し、活性化エネルギーは $E=70 \sim 225K$ と小さな値となった。オフセンター振動の特性時間は $\tau_0 = 3 \times 10^{-11} \sim 2 \times 10^{-12} s$ とかなり大きい値となっている。4f 電子が存在しない $La_3Pd_{20}Ge_6$ の C_{44} は 3K 以下の低温域で温度の逆数に比例したソフト化を示し、オフセンターとなった希土類イオンがトンネル振動をしていることが明らかとなった。最近、私たちが低温超音波計測で見いだした Si 半導体結晶の弾性定数のソフト化も、点欠陥および付随した歪みの局所振動に起因していると考えられ、ラットリングも点欠陥の局所振動も重要な物理が内包されており新しい発展が期待できる。

Si 結晶成長と点欠陥

九州大学応用力学研究所 柿本 浩一

情報化社会を担うシリコン結晶には、ナノスケールの大きさを持つ空洞欠陥が存在し、そのデバイスへの影響は極めて大きい。これは、結晶成長に伴う結晶温度低下により、過冷却下にある原子空孔が凝集してできた一種の“ネガティブクリスタル”であり、電子顕微鏡等で観測できる。その大きさと密度は、それぞれ約 100nm と $10^5 cm^{-3}$ から $10^6 cm^{-3}$ 程度で存在していることが従来の研究で判明している。この空洞欠陥形成の根源は、点欠陥である空孔であり半導体デバイスの誕生以来、その実態を観測しようとして 50 年以上にわたり世界の研究開発者がその実態を観測しようとしてきたが、残念ながらその実態の観測に成功した例は報告されていない。

本発表では、シリコン結晶成長のプロセスを総合的に解析することにより、空孔の点欠陥濃度が室温でシリコン中に約 $10^{10} cm^{-3}$ から $10^{11} cm^{-3}$ 程度の濃度で残留していることを定量的に求めた例について報告する。最近、新潟大学の後藤先生グループと富士通研究所の金田研究員グループとの共同研究で超音波を用いた実験により点欠陥を観測することに成功しているが、その試料中の点欠陥濃度に関してシリコン結晶成長プロセス総合解析を用いた解析結果について紹介する。

デバイス用シリコン結晶における点欠陥の振舞いと品質への影響

Intrinsic point-defects in commercial-base silicon crystals : Behavior and influence on afer-processes

(株)富士通研究所 金田 寛 Fujitsu Laboratories Ltd., Hiroshi Yamada-Kaneta

約 10 余年前までは、シリコン結晶工学の主な話題は酸素析出の制御技術に関するものであった。当時のデバイスは、デザインルールで言うところの、いわゆる 0.35 ミクロンデバイスと呼ばれるものであり、メモリデバイスで表現すると 16M DRAM と呼ばれるものであった。当時のデバイスが必要とする精度に関する限り、酸素析出制御の技術は満足できるレベルに到達していた。ちょうど、日本の電子デバイス産業が、技術的にも営業的にも世界をせっけんしていた頃である。しかし、ちょうどその頃、その 16M DRAM デバイスが突如不良品の山を出し始めた。これは、日本の大手デバイスメーカーがいずれも遭遇した出来事であったと“推測”される。国内のデバイスメーカーの多くは、当時、DRAM を主力としていたため、日本中が騒然となった。各社とも、ウェーハメーカーとタイアップして必死の原因究明と対策に追われた。その結果、この大問題は、それまで経験したことのない全く新しい起源によるものであることが判明した。すなわち、点欠陥、特に原子空孔が凝集して空洞欠陥(ポイド)をつくっていることが原因であることがわかった。ポイドの大きさは、

大きい物では、差し渡しで、約 0.1 - 0.2 ミクロンと非常に大きく、それまで、デバイス用シリコン結晶の無欠陥性を疑わなかった関係技術者・研究者は、一様に驚きを覚えると同時に、点欠陥の挙動について強い興味を抱き始めた。その後、現在に至るまで、点欠陥の巨視的（熱力学的）あるいは微視的（欠陥反応）挙動それが結晶品質に与える影響は、関係学会でも議論の中心になっている。現在、とりあえず、サイズの大きなボイドの障害を避けて通る対処技術は確保され、世界に広く普及している。しかし、現在の観測手段では検出できないような小さなボイドや点欠陥そのものによる影響は、今後、デバイスの更なる微細化の過程において、必ず顕在化してくるものと懸念される。そもそも、熱平衡状態にある結晶中に含まれる（含まれる）点欠陥濃度の温度依存性（平衡点欠陥濃度曲線）すら求められていない。商品ベースのシリコン結晶に含まれる（孤立）原子空孔濃度のあたりですら、それを推定する技術者（研究者）によって 3 - 4 桁もの違いがあるという現状である。点欠陥の基本的な性質と挙動に関する研究は、これから更なる微細化の時代を迎える現在、決して十分な状態であるとはいえない。

講演では、デバイス用シリコン結晶の中の点欠陥の挙動と、それがデバイスに与える影響について、この 10 年余りで明らかになったことを紹介し、次世代の微細デバイスを見据えたとき、点欠陥に関する研究がいかに重要不可欠であるかという点を、結晶を使う立場から、個々の要求項目について詳しく説明する。

パイロクロアとスクッテルダイトの電子構造

神戸大理 播磨 尚朝

β -パイロクロア AOs_2O_6 ($A=\text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) は、A 元素がほぼ完全にイオン化され、フェルミ準位近傍の電子状態に A 元素の成分がほとんど現れないという特徴を持っている。これは、電子状態が格子定数と酸素位置を決める内部パラメータのみに依存していることを示しており、従って 3 種類のバンド構造は極めて類似している。フェルミ準位における状態密度から求まる電子比熱係数は 格子定数が大きくなるほど大きく ($A=\text{Cs}$ で最大) なり、超伝導転移温度 ($A=\text{K}$ の時に最大) とは逆の傾向を持つ。蜜柑の皮の様な電子フェルミ面は、 $A=\text{K}$ の場合にネスティングの条件をよく満足している様に見え、このフェルミ面のネスティングが超伝導転移温度を押し上げているのではないかとと思われる。

一方、3 価の希土類が充填された充填スクッテルダイトにおいては、プニクトゲンが作る a_u の対称性を持つ分子軌道が主な伝導帯を作っている。このバンドは 3 次元のネスティング条件を満たし、極めて高い状態密度を産み出し、La 系の充填スクッテルダイトにおいて、大きな状態密度の起源になっている。一般的には、複数のフェルミ面が存在し、フェルミ面がよく解っている $\text{LaFe}_4\text{P}_{12}$ や $\text{LaOs}_4\text{Sb}_{12}$ ではサイクロトロン有効質量に約 2 倍の電子・格子相互作用が原因と思われる質量増強が存在している。しかしながら、ラットリングと見られる現象が観測されている $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ に特徴的な電子構造があるとは認められない。

パイロクロアとスクッテルダイトに共通する電子状態は、カゴ中の元素の電子がフェルミ準位近傍に存在せずに、比較的良好にイオン化されている点にあるが、それが、必ずしもラットリングと思われる現象の発現条件ではないようで、さらなる研究が必要である。

強結合電子フォノン系におけるラットリングと重い電子状態の理論

新潟大理 大野 義章、新潟大自然 三本 啓輔

充填スクッテルダイト化合物 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ やクラスレート化合物 $\text{R}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$ ($R=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$) などのカゴ状物質では、カゴに内包された希土類イオンがオフセンターに複数の極小値を持つポテンシャルの中で局所振動（ラットリング）を示し、その重い電子状態や超伝導との関わりが注目されている。希土類イオンの局所振動とかごの上を動く伝導電子との結合の効果を明らかにするため、伝導電子と局所フォノンとの相互作用を考慮に入れた周期的アンダーソン・ホルスタイン

模型を動的平均場理論(厳密対角化法)を用いて調べた。電子フォノン相互作用の増大と共に準粒子の有効質量が増大し、強結合領域では重い電子状態が実現する。それに伴ってフォノンのソフト化や格子の揺らぎと電荷揺らぎの増大が見られる。また、イオンの有効ポテンシャルを変分波動関数を用いて調べ、強結合領域では単純な調和ポテンシャルから double-well 型ポテンシャルへと変形しラットリングフォノンが現れることがわかった。カゴの中心からポテンシャルの極小値までの距離は相互作用がないときの零点振動の振幅の約 5 倍で、実験とコンシステントな値となる。

ラットリングと多準位近藤効果と重い電子系

阪大基礎工 三宅 和正、服部 一匡

80 年代の前半までの高温超伝導体は V_3Si 、 Nb_3Sn などの A15 型化合物 A_3B であった。これらの物質は、(その当時) 高い超伝導転移温度をもつこと以外にも、電気抵抗 $\rho(T)$ が低温で T^2 に比例すること、室温付近でユニタリティー極限程度の値に飽和すること、Debye-Waller 因子が低温極限で格子振動の大きな非調和性に対応する値を示すことなど、通常の強結合電子格子相互作用系としては理解できない多くの側面をもっていた。80 年代の前半には、Yu-Anderson がこれらの現象を説明するために、 A_3B の A イオンが 2 準位構造をもち、そのことが種々の異常性の原因であるというモデルを提唱した。Matsuura-Miyake はこれを敷衍して、「2 準位近藤格子」という概念により超伝導の性質を議論した。最近、充填スクッテルダイト化合物やクラスレート化合物において、イオンのラットリングの自由度が重要な働きをしていることを示唆する現象が見出されており、実験・理論の両側面から研究が始まっている。更に、最近廣井グループにより見出された β パイロクロア構造をもつ、 AOs_2O_6 ($A=K, Rb, Cs$) においてもラットリングの自由度が重要ではないかとの指摘がなされている。

本講演では、2 準位近藤効果および局所電子格子相互作用に対する「数値くりこみ群」を用いた理論を紹介し、充填スクッテルダイト化合物の 4 準位モデルの結果を議論する。そこでの新しい様相は、1) イオンの基底状態には(単純な量子トンネリングから期待される対称状態ではなく)非対称な成分がかなり混成することが可能であること、2) 局所フェルミ液体の比熱は大きく増大する(重い電子の出現)ことが可能である、という 2 点にまとめられる。1)、2) は充填スクッテルダイトやクラスレート化合物で見られる興味ある現象とよい対応を示す。

物性研究所談話会

日時：2005年5月16日(月) 午後4時～

場所：物性研究所本館6階 講義室

講師：Emeritus Prof. Richard S. Stein
(University of Massachusetts)

題目：Why Polymers?

要旨：

Polymers, composed of large molecules, have unique properties leading to important applications and increasing use. They may be composed of a single repeating unit (monomer) or several, forming copolymers. In this latter case, controlled variations in the order of their monomer units is possible, serving to affect properties and convey information. Various geometries are possible involving linear or branched chains or structures like dendrimers. Structure and composition controls their ability to assemble in patterns having special electrical, optical, or biological properties. They may be oriented to produce anisotropic materials and can be made in the form of films, fibers or other shapes. The flexibility of polymeric chains permits large strain reversible deformation. They may be soluble to produce solutions of controlled viscosity, or joined together (crosslinked) to give swellable gels. Their economic attractiveness relates to their ease of fabrication. They are serving an increasing role as materials for construction, communication, and for biomedical applications.

日時：2005年6月15日(水) 午後4時～

場所：物性研究所本館6階 講義室

講師：長田 俊人
(東京大学物性研究所 極限環境物性研究部門)

題目：超強磁場伝導物性

要旨：

物性研究所では電磁濃縮法および一巻きコイル法を用いて、コイルの破壊を伴う時間幅数マイクロ秒の単発パルス掃引ではあるが、100～500T領域の超強磁場の発生が行われており、物性実験に利用することが可能である。電子物性の探索研究には電気伝導測定が有効であるが、パルス超強磁場下では誘導電圧と放電雑音の重畳や渦電流による導電性試料の温度上昇といった原理的困難に直面する。本研究室では高周波検波と試料の微細加工を用いてこれらの困難を回避しつつ超強磁場下伝導測定を進めてきた。今回は進行中の以下の研究課題について議論したい。

(1) 擬1次元電子系を用いた Hofstadter 準位の探索

通常結晶では数1000Tの超々強磁場が必要となる磁場中 Bloch 電子の Hofstadter 準位構造を観測するために、擬1次元導体と傾斜磁場の組み合わせが有効であることを示し、その観測条件を満たすと期待される擬1次元電荷密度波物質 NbSe₃ の低温相について300Tまで磁気抵抗測定を行った。磁場方位が主要な結晶方位に平行な場合、強磁場量子極限での磁気抵抗は予想通りの異常な単調減少を示した。これは基底ランダウ準位が隣接ゾーンの自分自身と磁気貫通結合したことに起因すると解釈され、一般磁場方位での Hofstadter 準位形成を示唆する結果となっている。

(2) 平行強磁場下の層状物質の層間伝導と Fermiology

多層系において平行磁場は、電子の面内波数を層間トンネルに際し一様にシフトさせる。これから平行強磁場下の層間

磁気抵抗には各種の Fermi 面形状効果を考えることができる。こうした現象のいくつかの例と、BEDT-TTF 系擬 2 次元有機導体を用いた超強磁場実験について述べる。

(3) 量子極限近傍の電子状態に対する電子多体効果

高田らの理論によれば、量子極限近傍では磁気長（電子軌道の大きさ）が電子間距離より小さくなることを反映し、電子構造が電子多体効果により大きく変調される。

半金属ビスマスとグラファイトについて超強磁場磁気抵抗の実験を行った結果、強磁場量子極限近傍での Shubnikov-de Haas 振動の位置が一体バンドモデルの予測値からずれるという結果を得た。これは理論の効果を示唆する結果である。

日時：2005 年 6 月 21 日(火) 午後 4 時～

場所：物性研究所本館 6 階 講義室

講師：Dr. Bernard Barbara

(Laboratoire Louis Néel)

題目：Classical and quantum nanomagnetism

要旨：

Nanomagnetism is a branch of magnetism devoted to the study of magnetic particles with sizes going from a few nanometers to a few hundred nanometers. In order to understand the (classical) nature of the magnetization reversal of these objects it is important to perform single-particle measurements. This review sketches what we learnt during the last decade, after single nanoparticle measurements became possible (using the micro-SQUID technique).

Other "particles" with similar properties but with subnanometer sizes are also studied. These "particles" are in fact large spin molecules. Each molecule spin results from the addition of its strongly coupled constituent spins (Mn, Fe...). These molecules form single crystalline networks. They are generally weakly interacting through dipole-dipole interactions. Ensemble measurements show that, in this case, nanomagnetism is no longer classical but quantum. In particular magnetisation reversal occurs by resonant tunneling. This leads to a new field of research with many interesting aspects on the slow quantum dynamics of these systems and its transition to classical dynamics. Extensions to the case of rare-earth ions where tunnelling is associated with two (single ion) or four (two ions) bodies entanglements will also be discussed.

日時：2005 年 7 月 4 日(月) 午後 4 時～

場所：物性研究所本館 6 階 講義室

講師：Prof. Robert M. Metzger

(Department of Chemistry, University of Alabama)

題目：Unimolecular Electronics and Unimolecular Rectifiers

要旨：

Molecular-scale electronics, or unimolecular electronics, is coming of age. Molecules, with their small size (1 to 3 nm) and fast intramolecular electronic transitions (ps to ns), may present a viable alternative to inorganic electronics when the present drive to faster and faster integrated circuits may become problematical. Gordon Moore's "law" [1] chronicled the doubling of the speed of computer circuits, as the separation ("design rule") between electronic components halved, at present roughly every 18 months. Commercial inorganic integrated circuits now use a 100 nm design rule, and 2 GHz microcomputers are now on sale. These are exciting times. What is needed is a good way to interrogate a single molecule with three electrodes, and see power gain in an electronic device based on a single molecule. When that is done, the game will have been won. The recent advances (1996-present) in unimolecular

electronics by other research groups will be reviewed. For the last several years we have been studying unimolecular rectification [2,3]. In 1997 we showed that hexadecylquinolinium tricyanoquinodimethanide is a unimolecular rectifier, both by scanning tunneling microscopy and also as a Langmuir-Blodgett (LB) monolayer of this molecule, sandwiched between Al electrodes. The current is due an allowed electronic transition between the highly polar zwitterionic ground state and an excited state with much less polarity. Later, we observed the same rectification, but between Au electrodes: this required a deposition of "cold gold" atoms atop the organic monolayer: the current was as high as 90,000 electrons per molecule per second; the rectification ratio was as high as 27, but decreased upon repeated scans. Rectification was also found in an LB monolayer of 2,6-di[dibutylamino-phenylvinyl]-1-butylpyridinium iodide, which may be an interionic back-charge transfer rectifier, and in an LB monolayer of dimethylanilinoazafullerene, within which Au stalagmites often form, which can sometimes dominate the current-voltage behavior. Rectification was sought in thioacetyl derivatives of alkylquinolinium tricyano-quinodimethanide, which exploits the joint advantages of good film transfer (LB method) and covalent attachment (self-assembly on Au). A Langmuir-Schaefer monolayer of a fullerene acceptor with two triphenylamino donor substituents, sandwiched between Au electrodes, rectifies above 4.5 Volts; the rectification does not decay with cycling, and there is evidence that the Fermi level moves inhomogenously within the monolayer.

[1] G. E. Moore, *Electronics*, p. 114 (19 April 1965).

[2] R. M. Metzger, *Chem. Reviews* 103: 3803 (2003).

[3] R. M. Metzger, *Chem. Record* 4: 291 (2004).

人事異動

【研究部門等】

平成17年5月1日付け

(採用)

氏名	所属	職名	異動内容
鳴海康雄	極限環境物性研究部門	助手	採用(大阪大学から)

東京大学物性研究所の教員公募の通知

下記により助手の公募をいたします。適任者の推薦、希望者の応募をお願いいたします。

1. 研究部門名等および公募人員数

ナノスケール物性研究部門（勝本研究室） 助手 1 名

2. 研究内容

当研究室は、半導体、超伝導体、磁性体など多岐にわたる材料を用いて、量子ドット、量子細線、超格子などの人工物質を作成し、そこで起こる物理現象を、主に電気伝導測定や走査プローブ測定を通して研究している。このような人工系の設計・製作や、そのような系での量子現象の発見・解明に意欲を持ち、大学院生の教育にも熱意を持って取り組んでくださる方を希望する。

3. 応募資格

修士課程修了、またはこれと同等以上の能力を持つ方。

4. 任 期

任期は5年とする。ただし、再任は可とし、1回を限度とする。

5. 公募締切

平成17年8月15日（月）必着

6. 着任時期

決定後なるべく早い時期を希望する。

7. 提出書類

(イ) 推薦の場合：

推薦書（健康に関する所見を含む）

履歴書（略歴で結構です）

業績論文リスト（特に重要な論文に 印をつけること）

主要論文の別刷（3編程度）

(ロ) 応募の場合

履歴書（略歴で結構です）

業績論文リスト（必ずタイプし、特に重要な論文に 印をつけること）

主要論文の別刷（3編程度）

健康診断書

所属の長または指導教員作成の本人についての意見書（作成者から宛先へ直送）

8. 書類提出先

〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5丁目1番5号

東京大学柏地区庶務課人事係

電話 04(7136)3205

e-mail jijin@kashiwa-jimu.u-tokyo.ac.jp

9. 本件に関する問い合わせ先

東京大学物性研究所 ナノスケール物性研究部門 教授 勝本 信吾

電話 04(7136)3305

e-mail kats@issp.u-tokyo.ac.jp

10. 注意事項

ナノスケール物性研究部門（勝本研究室）「助手応募書類在中」、または「意見書在中」の旨を朱書き、郵送の場合は書留で郵送のこと。

11. 選考方法

東京大学物性研究所教授会で審査決定いたします。ただし、適任者のない場合は、決定を保留いたします。

平成17年5月11日

東京大学物性研究所長

上 田 和 夫

下記により教授の公募をいたします。適任者の推薦、希望者の応募をお願いいたします。

1. 研究部門名及び公募人員数

物性理論研究部門 教授 1名ないし2名

2. 研究内容

物性理論

3. 任期

下記の場合を除き任期はない。

着任後満55歳に達する年度の初めに任期制に入り、任期は5年とし再任は1回を限度とする。

なお、任期制の詳細については下記問い合わせ先までお尋ねください。

4. 公募締切

平成17年9月9日(金)必着

5. 就任時期

決定後なるべく早い時期を希望する。

6. 提出書類

(イ) 推薦の場合

推薦書(健康に関する所見を含む)

履歴書(略歴で結構です)

業績リスト(必ずタイプし、特に重要な論文に印をつけること)

主要論文の別刷(5編以内)

研究業績の概要(2000字程度)

研究計画書(2000字程度)

(ロ) 応募の場合

履歴書

業績リスト(必ずタイプし、特に重要な論文に印をつけること)

主要論文の別刷(5編以内)

研究業績の概要(2000字程度)

研究計画書(2000字程度)

健康診断書

所属長・指導教官等による本人に関する意見書(作成者から宛先へ直送)

7. 書類提出先

〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5-1-5

東京大学柏地区庶務課人事係

電話 04(7136)3205

e-mail jinji@kashiwa-jimu.u-tokyo.ac.jp

8. 本件に関する問い合わせ先

東京大学物性研究所物性理論研究部門主任 高田 康民

電話 04(7136)3280

e-mail takada@issp.u-tokyo.ac.jp

9. 注意事項

「物性理論研究部門教授応募書類在中」、または「意見書在中」の旨を朱書し、郵送の場合は書留で郵送のこと。

10. 選考方法

東京大学物性研究所教授会で審査決定いたします。ただし、適任者のない場合は、決定を保留いたします。

平成17年7月14日

東京大学物性研究所長

上 田 和 夫

下記により助手の公募をいたします。適任者の推薦、希望者の応募をお願いいたします。

1. 研究部門名等および公募人員数

新物質科学研究部門（八木研究室）助手1名

2. 研究内容

当研究室では、超高压高温環境下における相転移や物性の研究を通して、新物質の探索や、地球・惑星深部に存在すると考えられる物質の研究を行っている。研究手法としては、シンクロトロン放射光を利用した高温高压X線その場観察実験が主体であるが、ラマン散乱や回収試料の電子顕微鏡による観察も組み合わせ、100万気圧を越す超高压領域までに生成するさまざまな新物質や超高压相に関する多様な研究を展開している。またこれらの研究は、技術的にまだ開発すべき要素も多いので、実験技術の開発にも精力的に取り組んでいる。本公募ではこれらの研究に意欲的に取り組む若手研究者を希望する。

3. 応募資格

修士課程修了、またはこれと同等以上の能力を持つ方。

4. 任期

任期は5年とする。ただし、再任は可とし、1回を限度とする。

5. 公募締切

平成17年9月9日（金）必着

6. 着任時期

決定後なるべく早い時期

7. 提出書類

(イ) 推薦の場合：

推薦書（健康に関する所見を含む）

履歴書（略歴で可）

業績論文リスト（特に重要な論文に印をつけること）

主要論文の別刷（3編程度）

(ロ) 応募の場合

履歴書（略歴で可）

業績論文リスト（特に重要な論文に印をつけること）

主要論文の別刷（3編程度）

健康診断書

所属の長または指導教員作成の応募者本人についての意見書（作成者から宛先へ直送）

8. 書類提出先

〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5丁目1番5号

東京大学柏地区庶務課人事係

電話 04(7136)3205

e-mail jinji@kashiwa-jimu.u-tokyo.ac.jp

9. 本件に関する問い合わせ先

東京大学物性研究所 新物質科学研究部門 教授 八木健彦

電話 04(7136)3230

e-mail yagi@issp.u-tokyo.ac.jp

10. 注意事項

新物質科学研究部門（八木研究室）「助手応募書類在中」、または「意見書在中」の旨を朱書し、郵送の場合は書留で郵送のこと。

11. 選考方法

東京大学物性研究所教授会で審査決定いたします。ただし、適任者のない場合は、決定を保留いたします。

平成17年6月16日

東京大学物性研究所長

上田和夫

編集後記

梅雨が明け、夏本番のこの時期に「物性研だより」をお届けします。本号はいろいろな意味でバラエティに富む内容になりました。まず、上田和夫所長による「研究室だより」があります。これまでの編集長は、所長業というとんでもない激務を勘案して、とても上田所長に原稿依頼などできないと考えられたと思います。しかしながら、今回、思い切って執筆を打診したところ、快く引き受けてくださり、ここ約 11 年間における上田研究室関連の研究成果を俯瞰的に分かりやすく解説されています。

さて、上田所長の原稿を熟練したシニア研究者の代表例とすれば、大学院博士課程 3 年在学中の中島智彦氏のそれは若手研究者による熱気あふれる好原稿の例といえるでしょう。そもそも、6 ページにもわたる大学院学生の記事を「物性研だより」に掲載するのは初めてと思われるが、中島氏は第 2 回（平成 16 年度）ISSP 学術奨励賞の受賞者である。そこで、その受賞対象となった研究内容を自ら詳しく紹介するようにお願いした。なお、もう一人の受賞者である関川太郎氏については別の機会に執筆をお願いするかと思いますが、同氏の関連する記事は日本物理学会誌第 60 巻（2005 年）第 7 号に掲載されているので、併せてご覧いただければと思います。

以上 2 つの記事の内容は物性研究所が従来から得意としている研究分野、すなわち、いわゆる強相関電子系に関係するものであるが、それとは対照的な研究分野の記事が客員所員の松田准一先生と筑紫格先生から届けられている。松田先生の隕石のお話には科学だけに止まらない蘊蓄が込められており、また、筑紫先生のお話はガラス転移研究の一断面が紹介されています。ご一読いただければと思います。

高 田 康 民