

タイトル：非破壊パルスマグネットの展望

講演者：金道浩一

所属：東京大学 物性研究所

要旨：非破壊型のパルスマグネットの今後について述べたい。最先端の科学の世界では20年後を予測するのは困難であるが、非破壊パルスマグネットに関してそれが可能であることは歴史が証明している。約100年前に Kapitza が初めて作ったパルス磁場が20Tを、そして約40年前の阪大強磁場が60Tを使っていた事実(図1)と現状を比べて見ると、20年後の予測もそれほど難しくないと考える。もちろん科学の世界では予想もしない驚くべき進化が起きるので、私の予測が外れることは歓迎すべきことではあるが、歴史の教えるところでは最大磁場の成長速度は1T/年程度のものであろう。

結論から言うと、20年後のパルスマグネットは日常的に100Tを発生して実験に使われていることと予想する。発生方法は、外コイルと内コイルを独立の電源で発生させた磁場を重ね合わせることによって得られる2段パルス方式が有望である。この方法では、外コイルの電源に必要なエネルギーが大きいため、阪大や物性研以外での実施は難しい。内コイルは発熱と応力に耐えるためコンパクトな形状となり、パルス幅も最大で10ミリ秒であろう。図2の磁場を発生しているコイルをベースに外コイルとの整合を取る必要があるが、それは困難ではない。多分、この先で最も難しいと思われるのが線材の安定的な製造であり、私がこの10年間取り組んできたことがまさにこの課題解決である。講演では良い線材を作るために得た最近の知見を紹介する。

パルスマグネットの展望を考える上でもう一つの大きな問題があり、実はそちらの問題を解決する方が重要かも知れない。つまり、誰がこの役割を担うのかという後継者問題が解決できていないのである。身も心もコイル開発に捧げる研究者が現れなければ、非破壊パルスマグネットの展望も意味のない話であるし、日本の強磁場研究の先行きは極めて多難であると言える。本講演が若手研究者の興味を魅ききっかけとなれば幸いである。

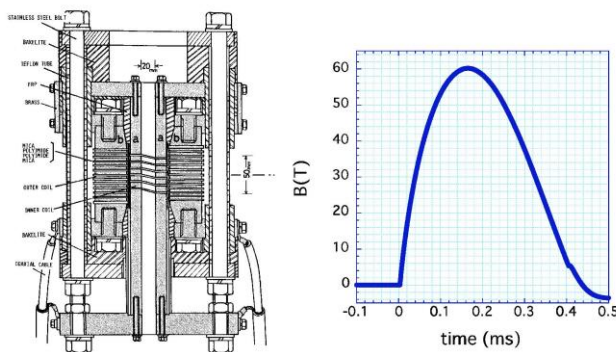


図1 阪大強磁場の伊達マグネットと磁場波形

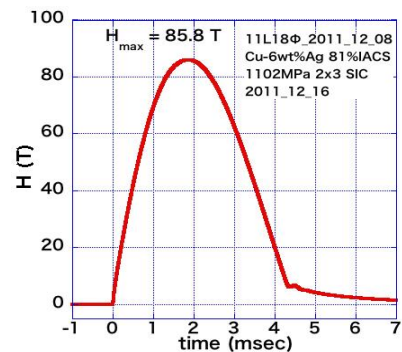


図2 物性研のパルス磁場波形

タイトル：一地方大学での（超）強磁場とのかかわり

講演者：横井裕之

所属：熊本大学産業ナノマテリアル研究所

要旨：東京大学物性研究所三浦登教授の下で「超強磁場における化合物半導体の赤外サイクロトロン共鳴」の研究を行って 1991 年に博士課程修了後、通産省工業技術院化学技術研究所（現産業技術総合研究所）を経て、2004 年に助教授（現准教授）として熊本大学工学部に赴任した。その後、現在に至るまでの（超）強磁場とのかかわりを振り返り、地方大学の一教員が強磁場研究ネットワークに有機的にかかわる手立てについて反省も織り交ぜて検討したい。

化学技術研究所在職時は、物性物理学への磁場応用から少し離れて、爆縮法による超強磁場発生技術開発や磁気科学現象の探索研究（磁気アルキメデス効果、ケイ酸化物チューブの二重らせん成長）を行っていた。熊本赴任前から物性研究所嶽山正二郎教授（当時）に超強磁場を用いたカーボンナノチューブにおけるアハラノフーボーム（A-B）効果の共同研究を提案し、2004 年から 2010 年にわたって一巻きコイル超強磁場施設を共同利用させていただいた。その間、'09 年まで囑託もさせていただき、超強磁場下近赤外吸収スペクトル測定システム（図 1）を立ち上げて、カーボンナノチューブの励起子吸収ピークの A-B 効果による分裂の観測に成功した。これと並行して、物質・材料研究機構（NIMS）の故高増正氏のご協力で、超強磁場実験用カーボンナノチューブ磁場配向膜試料のハイブリッド磁石による作製にも取り組んだ。

その後、独自性の高い自前の物質をもつことが強磁場利用研究を主導的に進めるための必要条件であると感じて、ナノカーボン物質開発に取り組んだ結果、カーボンナノポットの創製に成功した（図 2）[1]。カーボンナノポットは数層の多層チューブの一端が数十層の多層のキャップ構造で閉じられ、他端が開口した壺型ユニットがファイバー状に連なった物質である。ユニークな電子物性の発現を期待して、NIMS の今中康貴氏のご協力で極低温磁気伝導測定を行ったところ、予備的ながら磁気振動現象が観測された。

当日は、熊本大学の極低温液化設備も併せてご紹介する。一地方大学から強磁場研究ネットワークへの有機的なかかわり方についてご議論いただければ幸いである。

[1] H. Yokoi *et al.*, *J. Mater. Res.*, **31**, 117 (2016) (Invited Feature Paper).

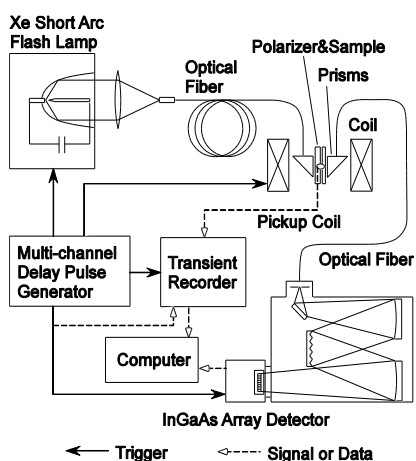


図 1：超強磁場下近赤外吸収分光系

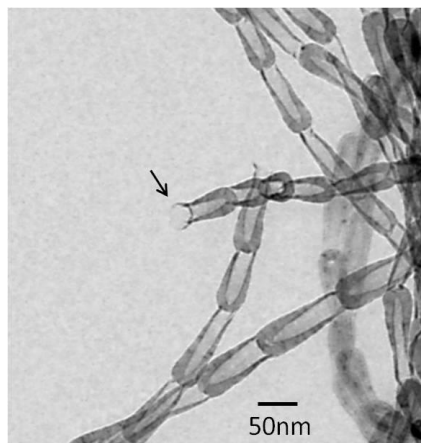


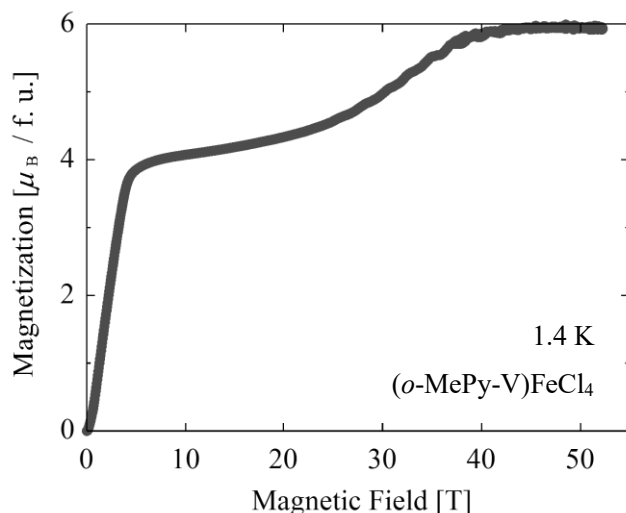
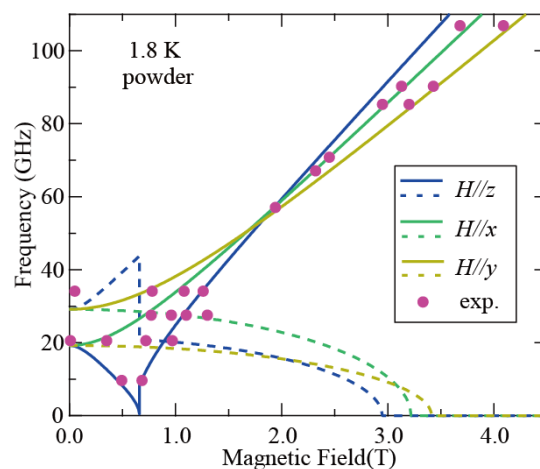
図 2：カーボンナノポットの TEM 像

タイトル：ハニカム格子系における特異なスピンモデルの磁場誘起量子物性

講演者：岩崎 義己^A, 山口 博則^B, 細越 裕子^B, 川上 貴資^C, 木田 孝則^A, 萩原 政幸^A所属：^A大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター, ^B大阪府立大学大学院理学系研究科, ^C大阪大学大学院理学研究科

要旨：フェルダジルラジカルは非局在型のスピン分布を有する安定ラジカル的一种である。これまでにフェルダジルラジカルへの元素置換を利用した緻密な分子設計により、分子軌道の形状とその重なりを制御し、多種多様な量子スピンモデルの設計を実現してきた[1,2]。さらに、カチオン化したフェルダジルラジカルをアニオンと組み合わせることで有機ラジカル塩を合成し、高度な電子状態の制御も可能にしている[3]。

本研究では、磁性を持つアニオン FeCl_4^- とのラジカル塩である $(o\text{-MePy-V})\text{FeCl}_4$ [$o\text{-MePy-V}^+ = 3\text{-(methylpyridinium-2-yl)-1,5-diphenylverdazyl}$] の合成に成功した。X線構造解析の結果を基に第一原理計算を行った結果、 FeCl_4^- とラジカルのスピンからなるハニカム格子をベースとしたスピンモデルの形成が示唆された。磁化率及び比熱の測定から、ラジカル $S=1/2$ とアニオン $S=5/2$ が低温領域で反強磁性的に結合して合成スピン 2 を形成していることが明らかになった。実際に低温 1.4 K での磁化曲線は、約 5 T 付近まで $S=2$ に起因する線形的な振る舞いを示した (図 1)。さらに、ESR 共鳴吸収シグナルの周波数依存性に関して、二軸異方性をもつ $S=2$ の反強磁性一次元鎖における反強磁性共鳴モードで良く説明することができた (図 2)。磁化曲線は最初の急激な増加とその後の 2/3 磁化プラトー的な振る舞い、それに続く緩やかな下に凸の飽和への増加が観測された。この振る舞いは約 4 T 以上の磁場中でスピン 1/2 のハニカム格子が実効的なモデルとなり、それに伴う量子性を反映したものであると考えられた[4]。本発表ではそれらの起源について議論する。

[1] H. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 157205 (2013).[2] H. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 235135 (2017).[3] H. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 094402 (2018).[4] Y. Iwasaki *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 085113 (2018).図1: $(o\text{-MePy-V})\text{FeCl}_4$ の磁化曲線 at 1.4 K.図2: ESR 共鳴磁場プロット (z :容易軸, x :第二容易軸, y :困難軸).

タイトル：三角格子反強磁性体 CsCuCl_3 の圧力下における磁場誘起量子相転移の観測

講演者：二本木 克旭^A, 田原 大夢^A, 木田 孝則^A, 鳴海 康雄^A, Julien Zaccaro^B,
高阪 勇輔^C, 井上 克也^D, 萩原 政幸^A

所属：^A大阪大学大学院理学研究科附属先端強磁場科学研究センター,^Bフランス国立科学研究センターネール研究所,^C大阪府立大学工学域大学院工学研究科,^D広島大学大学院理学研究科

要旨：スピン 1/2 三角格子反強磁性体の CsCuCl_3 では、量子スピン揺らぎと容易面型異方性の競合により強磁場中で量子効果を反映した物性を示す[1]。1.1 K の c 軸方向の磁化は、 $H_c=12.5$ T で磁気転移 (umbrella 型から 2-1-coplanar 型への変化) し、 $H_{\text{sat}}=31$ T で飽和する[2]。また、圧力印加により H_c の直前に、up-up-down 構造の出現が報告されている[3]。さらに理論的には、圧力印加による磁気異方性の変化に伴い、新たな磁気相の出現も予測されている[4]。本研究では、LC 共振回路を利用して新たに開発したパルス強磁場・高圧力磁化測定装置を用いて、 CsCuCl_3 の異なる圧力下磁場誘起量子相の探索を目指し、飽和に至るまでの磁化過程の圧力依存性を調べた。LC 共振回路を用いた測定(以下 LC 法)[5]では、回路内のコイル中に配置された磁性絶縁体試料の磁化の磁場微分を周波数応答(Δf)として検出する[6]。この手法によって、約 30 ターンの微小コイルと試料を圧力セル内部に配置することができる。そのため、これまでパルス強磁場と組み合わせられて使用されていたピストンシリンダー型圧力セル(PCC)の外径(6 mm ϕ)を広げることが可能となり、新たに開発した NiCrAl 製の PCC(外径 8.6 mm ϕ)では最大圧力 1.98 GPa の圧力発生を確認している。

図 1 に 1.4 K における Δf の磁場変化($H//c$)を示す。常圧(ambient)では、umbrella 型から 2-1-coplanar 型への磁気転移($\mu_0 H_c=12.3$ T)と飽和磁場($\mu_0 H_{\text{sat}}=29.7$ T)に対応するアノマリーを観測した。 H_c は圧力増加(最大圧力 0.62 GPa)に対しほとんど変化しないのに対し、 H_{sat} は圧力増加に伴い高磁場側に移動することが分かった。これは圧力をかけることで格子間距離が縮まり、面内の反強磁性交換相互作用が大きくなったことが原因と考えられる。講演では、LC 法を用いた高圧力下強磁場磁化測定によって得られた磁場誘起量子相転移の圧力依存性についての詳細を報告する。

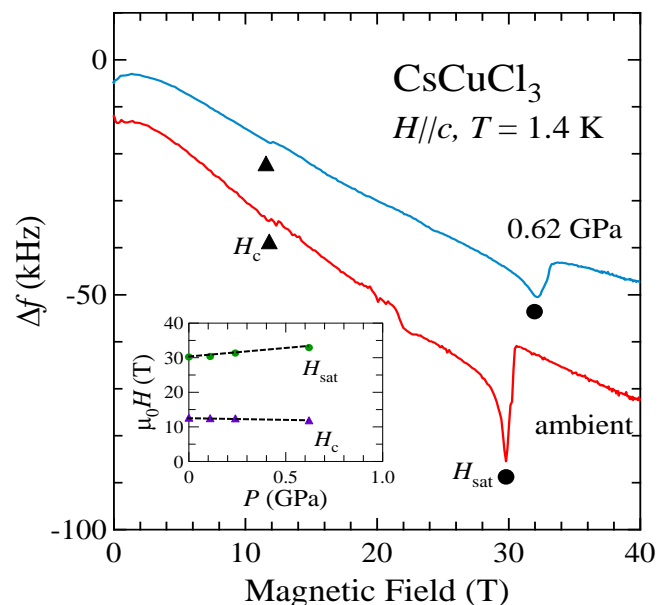


図 1：共振周波数の磁場依存性
(挿入図) H_c , H_{sat} の圧力依存性

- [1] T. Nikuni and H. Shiba, JPSJ **62**, 3268 (1993). [2] H. Nojiri *et al.*, J. Phys. (Paris) **49**, Suppl. C8, 1459 (1988). [3] A. Sera *et al.*, PRB **96**, 014419 (2017). [4] M. Hosoi *et al.*, JPSJ **87**, 075001 (2018). [5] M. M. Altarawneh *et al.*, RSI **80**, 066104 (2009). [6] S. Ghannadzadeh *et al.*, PRB **87**, 241102(R) (2013).

タイトル：熱的な検出法による高周波 ESR の高感度化

講演者：高橋英幸^{A,C}, 大道英二^B, 太田仁^A

所属：^A神戸大学分子フォトサイエンス研究センター, ^B神戸大学大学院理学研究科, ^CJST さきがけ

要旨：

ESR の熱的な検出法は 1960 年代から報告があるが、共振器法に対する優位性に乏しく現在の主流な測定法とはなっていない [1]。しかし、共振器法が技術的に難しくなる 100 GHz 超の高周波領域では、依然有望であり、実際に我々は、熱的な磁化変調を力に変換してマイクロメカニカルデバイスで検出することで光透過法よりも圧倒的に高い感度が得られることを示している [2]。とくに、比熱が小さくなる低温領域では、弱いミリ波・光源を用いた場合でも検出可能な温度変化を生じさせられるので、新奇磁性体研究との相性が良いという特徴がある。

今回、我々は力検出法よりもより直接的な温度測定に基づいた ESR 測定を以下のようにして行った。高真空下でベリリウム銅のカンチレバー上に試料を置き、ミリ波を照射する。共鳴が起こると試料が発熱するので、それにより生じた試料付近と熱浴との温度差を差動熱電対を用いて検出する。

図 1 (a) は $T=10$ K における DPPH 粉末 $10\mu\text{g}$ の ESR スペクトルである。変調周波数 3 Hz の条件で 280 の信号雑音比が得られている。これはスピン感度に換算すると 1.8×10^{12} spins/gauss に相当し、力検出の検出感度に匹敵する。高温になるにつれ、信号は弱くなるが、図 1 (b) に示すように室温での観測にも成功している。

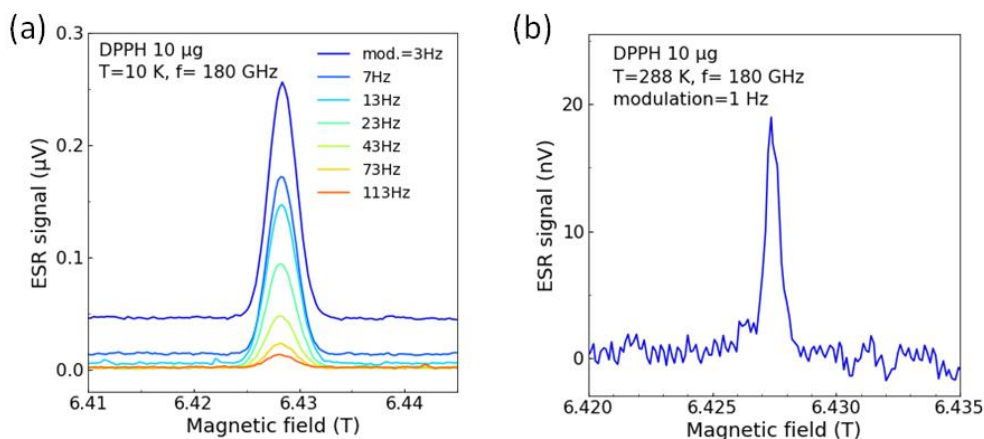


図 1 . (a) $T=10$ K, (b) 288 K における DPPH の熱検出 ESR スペクトル。

[1] J. Schmidt, and I. Solomon, *Journal of Applied Physics* 37, 3719 (1966).

[2] H. Takahashi *et al.*, *Review of Scientific Instruments* 89, 083905 (2018).

タイトル：二重電子ビームを用いた高周波ジャイロトロンの開発講演者：光藤誠太郎^A、藤井裕^A、石川裕也^A、出原敏孝^B所属：^A福井大学遠赤外領域開発研究センター、^B(株)ジャイロテック

要旨：近年、ミリ波、サブミリ波(THz波)等の遠赤外領域電磁波の利用は5Gの通信周波数帯の拡大のみならず自動車のリモートセンシングやセキュリティーといった幅広い分野で民間利用が始まっている。福井大学では以前から高出力の遠赤外領域電磁波の発振源としてジャイロトロン発振器の開発を行ってきた。数十GHzから約1THzまでの数W～数kWの高出力電磁波の発振が可能であり、遠赤外電磁波の安全利用の観点からの生体を含む照射実験やこの電磁波領域のESRやDNP-NMR等の計測、電磁エネルギー伝送や材料プロセッシングなど様々な応用研究に用いられている。

ジャイロトロンの発振の機構は、電子銃から打ち出された電子を高電圧の電場中で加速し強磁場中でサイクロトロン運動をさせて、磁場中心にセットした共振器で電磁波と相互作用させることでパラメトリックに電子のエネルギーが電磁波に変換される。そのためジャイロトロン発振周波数は電子のサイクロトロン周波数とほぼ同じ、またはその整数倍(高次高調波発振)となり、どれだけ強磁場が利用できるかにより発振周波数の上限が決まる。これまでに20Tの超電導磁石を用いたジャイロトロンを開発し、二次の高調波発振により1THzを超える連続発振を達成した。

次世代の高周波ジャイロトロンの試みとして、より高次の相互作用を用いた発振の可能性について研究を進めている。これまでは二次の高調波発振による高周波化を進めてきたが、次のステップとして三次の高調波発振の実現を目指している。これまでに、ジャイロトロンでは三次高調波によるTHz帯の発振は実現されていない。三次高調波発振を用いた高周波化の難しさは、高次の相互作用では結合効率が小さくなり、より高電圧、大電流の電子ビームが必要となるが、電子ビームを大電流化するとエネルギー分散等により期待していない低次モードとの結合が増加し発振して、高次の発振を妨げてしまうことである。そこで新しい試みとして、電子ビームを二つに分けてそれぞれを高次高調波と結合しやすい位置に入射する二重電子ビームを用いたジャイロトロン開発をスタートしている。

最初の二重電子ビームを用いたジャイロトロンとして、15Tの無冷媒超電導マグネットを組み合わせた二次高調波で890GHzのジャイロトロン開発を行った。図に磁場を掃引した時の発振出力の様子を示す。両サイドの強い発振は基本波による発振である。基本波の発振条件の谷間部分の磁場電流が115Aで設計モード(TE₈₅共振器モード)の二次高調波発振が観測された。他にも113Aとその周辺で二次高調波発振が確認されている。

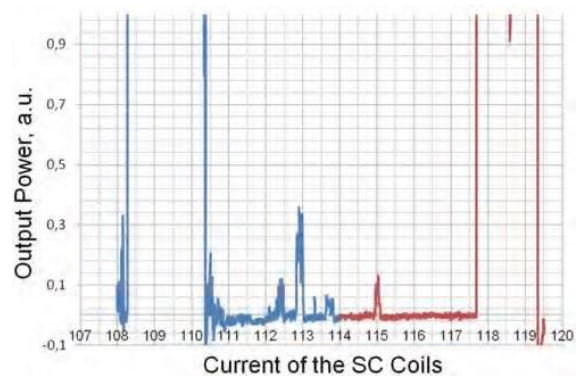


図 二重電子ビームジャイロトロンによる二次高調波発振の様子。

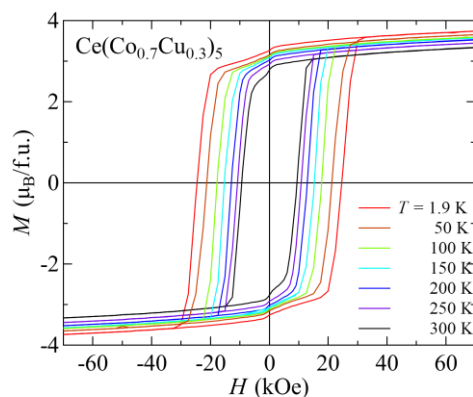
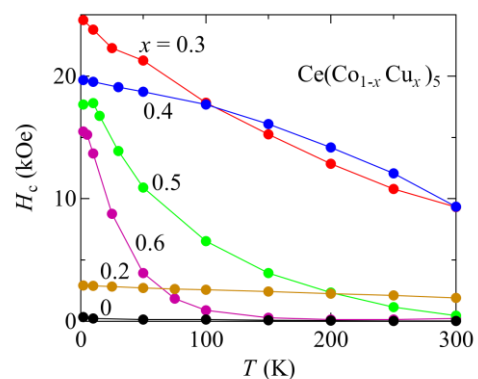
タイトル：希土類磁石の保磁力に対する価数揺らぎの影響

宍戸寛明^A^A大阪府立大学工学研究科

CeCo₅は磁石材料として広く利用されているSmCo₅と同じ結晶構造を持ち、Coの3d電子に由来する強磁性体である。そのキュリー温度は $T_C = 649$ Kであることが報告されている[1]。エネルギーバンド計算からCeは4価的であると報告されている[2]。同じ結晶構造を持つCeCu₅においては、Ceは3価的であり4f電子に由来した重い電子系反強磁性体であることが知られている[3]。そのため、CoをCuに置換したCe(Co_{1-x}Cu_x)₅では、Ceの価数が4価から3価へ移り変わることが期待される。また T_C はCu置換濃度の増大と共に急激に抑制され、 $x = 0.6$ 付近で消失することが報告されている[4]。Ceの価数転移が起きる近傍のCu置換濃度では、4f電子と伝導電子の混成による運動エネルギーの利得から、容易軸異方性が安定して非常に大きな磁気異方性エネルギーを持つことが期待できる。

そこで我々はCe(Co_{1-x}Cu_x)₅の多結晶試料をアーク溶解法により育成し、低温までの磁化測定を行った。CeCo₅ではヒステリシスはほとんど見られなかったが、CoをCuで置換するにつれてヒステリシスは増大し、価数転移近傍であることが期待できる $x = 0.3 \sim 0.4$ で最も大きな保磁力を示した。図1に各温度でのCe(Co_{0.7}Cu_{0.3})₅のヒステリシス曲線を示す。 $x > 0.5$ のCu置換領域では保磁力は減少を示した。図2に各置換量における保磁力 H_c の温度依存性を示す。Ce(Co_{0.5}Cu_{0.5})₅、Ce(Co_{0.4}Cu_{0.6})₅においては100 K以下で保磁力が急激に増大している。これは4f電子の価数が降温に伴って大きく変化していることを反映している可能性がある。

以上のように、Ce(Co_{1-x}Cu_x)₅においてCe 4f電子の価数転移近傍で保磁力が増大していることを示唆する結果を得た。これは従来提案されてこなかった保磁力増大機構であり、今後より実用的な希土類磁石への応用が期待される。

[1] A. V. Korolov *et al.*, Phys. Met. Metallogr. **40** (1975) 191.[2] L. Nordstrom *et al.*, Phys. Rev. B **41** (1990) 9111.[3] E. Bauer *et al.*, J. Mag. Mag. Mater. **63-64** (1987) 37.[4] D. Girodin *et al.*, J. Less Common Met. **110** (1985) 149.図 1: Ce(Co_{0.7}Cu_{0.3})₅におけるヒステリシスループ図 2: Ce(Co_{1-x}Cu_x)₅における保磁力の温度依存性