



技術解説

パルス強磁場による磁化測定

杉山 清寛*

Magnetization Measurement Technique Using Pulsed High Magnetic Field

Key Words : pick up coil, pulsed High magnetic field, field distribution, field compensation, magnetization process

1. はじめに

「ハリーポッターと賢者の石」の映画が公開され、今や魔法がブームになっている。ほおぎに乗って大空を飛び回り、チェスの駒が実際に戦争をする。なんとも不思議で楽しい世界だが、映画の中だけではなく私たちの身の回りにも不思議なことはいっぱいある。たとえば、家の冷蔵庫の扉で学校からのプリントを止めている「磁石」！。私たちは慣れっこになっているので不思議に感じないかもしれないが、ドーナツ状の磁石を2つ、反発しあうようにして穴を棒に通してみよう。磁力の力でふわふわ浮くのが見える。2つの磁石が力を交わして反発しているわけだが、目に見えないために「不思議」と感じる。何か「魔法」と同じような特殊な力のように感じるが、これは魔法ではなく私たちの世界を大きく支えている磁場の効果である。

磁石というと、この磁気の力を示す何か「特殊」な物質、そう、「賢者の石」ならぬ「特殊な石」のような気がする。実はこの磁石を示す性質は、普通の電子が持っている性質から来ている。電子が電荷を持っていることはよく知られているが、同じ基本的な性質として「スピン」も持っていて、この「スピン」と電子の軌道運動による磁気モーメントが磁石を示す性質の素である。イメージとしては、ミクロな電磁石だと思えば良い。つまり、磁石でなくても私たちの回りのものはどれでも磁石になりうる「潜

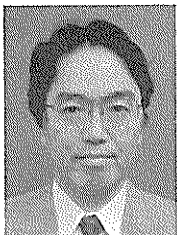
在力」を持っているわけである。

物質のこの磁石になりうる「潜在力」を、対象となる物質に磁場をかけて引き出して調べるのが磁化測定である。磁化とは、物質がどれくらい「磁石」になっているかを調べることで考えてもらってよい。簡単にいうと、磁石になっていない物質は原子内や原子間などのいろいろなレベルで、上向きと下向きのミクロな磁石がペアを作って消しあっている。そこに強い磁場を上向きにかけると、下向きの磁石は磁場方向に揃いたくなくて、だんだんに上向きに戻ってそろうために磁石になってくる。では、普通の物質はなぜそんなペアを作って磁石になっていないのだろうか。それは、それぞれの物質にいろいろな事情が有って一概には言えないが、磁石になるよりペアを作っていたほうが安定な物は磁石にならない。磁場中ではそのペアを壊しながら磁化されて行くので、その磁化の仕方からミクロな電子間の情報が得られる。

電子のペア間の相関は強いものもあれば、弱いものもある。強固にペアを作っている物質のほうが、その仕組みを隠すベールが厚いと考えられる。隠されると見たくなくなるのが人情というもので、そのためには強い磁場、強磁場が必要になる。強磁場磁化測定を行なうと、いろいろ今まで見つけられなかった物理現象が目の前に現れる。これが強磁場磁化測定の醍醐味である。

強磁場については次の章で触れたいと思うが、結論からいうと、非常に強い強磁場を私たちが実現させるには、パルス磁場しか選択肢がない。パルス磁場とは短い時間で磁場が発生して消える磁場のことである。したがって、強磁場での磁化測定といえは、パルス強磁場による磁化測定のことになる。

ここで磁場 H の単位について断っておく。本来、磁場の単位は[A/m]という単位がSI単位系で用いられる。テスラというのは磁束密度 B の単位であり



* Kiyohiro SUGIYAMA
1955年4月生
1985年大阪大学大学院理学研究科物理学専攻後期課程修了
現在、大阪大学・大学院理学研究科・物理学専攻、助教授、理学博士、強磁場物性
TEL 06-6850-5371
FAX 06-6850-5372
E-Mail sugiyama@phys.sci.osaka-u.ac.jp

[T]で表わす。これは[Wb/mm²]と同じものである。BとHの間に透磁率 μ を用いて $B=\mu H$ という関係が有る。cgs単位系では空気中では $\mu \simeq 1$ で磁場の単位エルステッド[Oe]と磁束密度の単位ガウス[G]は同じような値になる。磁性の専門家はずっとこのcgsの値で研究してきた。ところが、近年、SI単位系に移行しようとしたら磁場の単位は1[Oe]=79.6[A/m]である。なれ親しんだ値と数値が大きく変わってしまうので、議論しにくくなった。ところが磁束密度だと、1[G]=10⁻⁴[T]なので10の指数倍だけが違って数値が変化しない。そこで、現在では慣習的に磁束密度の単位を用いて議論するようになってしまった。当然、必要な時は磁場と磁束密度は区別して考えているが、普段は[T]を用いて議論している。この解説でも[T]を使うことをお許し願いたい。

2. パルス強磁場

強い磁場を作るには、電磁石(マグネット)に流れる電流を増やせばよい。なあんだ、簡単だ!と思われのかもしれないが、実はここに避けがたい2つの大きな問題がある。電磁力とジュール熱である。

強い磁場を作るということは、強い磁場を局所空間に閉じ込めるということである。強い磁場のある空間はエネルギー的にかかなり高くなる。電磁気学によると、磁束密度Bを閉じ込めると単位体積あたり、 $\frac{1}{2\mu}B^2$ のエネルギーが貯えられる。エネルギー的に高い状態は不安定なので、安定な状態、つまり磁束密度を下げようとする。磁束が互いに反発しあうイメージである。強い磁場を維持しようとする、この広がろうとする力を支える必要がある。電磁石の場合磁場を支えるのは電流であり、物質的にはコイルの導線が支える。つまり、導線が膨れようとする磁束をマグネットの線材が支えて、強磁場を維持することになり、線材の強度が弱ければ低い磁場でマグネットが壊れてしまうことになる。

この問題に対して現在取られている方法は大きく2つに別れる。一つは壊してもよいという方法である。壊れるのには時間がかかるので、壊れる前にそれだけの磁場を発生してしまおう、という方法だ。さらに、どうせ壊れるのなら、マグネットを外から内側に向けて壊して、中にある磁場と一緒に濃縮してしまおうという方法もある。これらの方法は、非常に短い時間で磁場を発生する方法で、東京大学の

物性研究所で実際に行なわれている。最近のホームページによると、前者は301T、後者は622Tという大きな磁場の発生に成功している¹⁾。

しかし、これらはマグネットが一回ごとに壊れてしまうので精密な物性測定にはいろいろ工夫が必要になる。そこで、設計により強い電磁力を支えようという考え方がある。大阪大学の伊達宗行名誉教授が最初に発案した多層型マグネットである²⁾。コイルを同軸状に多層組あわせてマグネットを作る。一番外側のコイルはそれ自身が出せる一番強い磁場を発生させる。この磁場の中に置かれるそのすぐ内側のコイルは、全く零磁場下と同じではないが、このコイルに電流をある程度流して磁場を発生させることができる。したがってそのマグネットの内側の磁場は、2つのコイルの発生した磁場の足し合わせになる。理論的には無限の多層コイルによるマグネットを設置できれば無限の磁場が発生できる。しかし実際には空間的な制約や、技術的な問題もあり、現在非破壊最高磁場は阪大極限科学研究センターの80.6Tである。このマグネットの話も興味深い、詳しい解説があるのでここでは触れない³⁾。

もう一つの大問題はジュール熱である。昔からの鉄心磁石でも1T近くの磁場を出すマグネットは水でその発熱を冷やしている事をご存知の方も多いただろう。50Tの磁場を作るのにジュール熱でコイルが溶けてしまっただけは何にもならない。この問題を回避するのに3つの方法が取られている。古くからあるのが水で冷やしながらか磁場を発生するという方法である。東北大学金属材料研究所・強磁場超伝導材料研究センターにある水冷型マグネットが代表である。大きなクーリングタワーを使った大々的な施設を必要とするが、25T程度の磁場を発生している。

超伝導を使って電気抵抗をなくするという方法がある。これが超伝導マグネットで低温にするための液体ヘリウムが高価であることを除けば精度の良い強磁場を得る手段として現在主流になっている。しかし、超伝導はマグネット自身が作り出す磁場で壊れてしまう。これが上限を決めていて、実用マグネットでは20Tが現在の限界である。これも、高温超伝導の発見とともにヘリウムなしの超伝導マグネットや、高い臨界磁場を利用した試みなどがなされ、この限界は広げられつつある。

そして、発熱を避けるのに磁場の発生している時間を制限しようという発想がパルス磁場である。冷

却の効果やマグネット線材の電気抵抗率の温度変化を考えなければ、磁場が発生している時間とマグネットの発熱はほぼ比例するだろう。磁場の発生している時間を10分の1にすれば発熱も10分の1になる。実際には更に液体窒素に漬けて温度を下げ、線材の強度を上げ電気抵抗を下げる工夫がされているが、パルス幅は10~20msec程度の長さが一般的である。

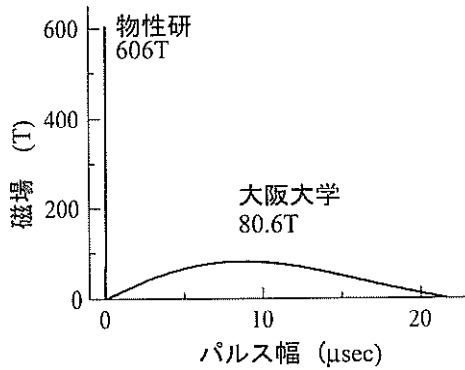


図1 代表的な2つのパルス波形

現在世界に誇れる日本の代表的な2つのチャンピオンマグネットの磁場を図1に示す。これを見て一目瞭然であるが、この2つの磁場は目的が異なっている。物性研のマグネットは最高磁場をとにかく発生することが主目的で、光の実験など、マイクロ秒で測定が終わる実験に適している。阪大のマグネットは、非破壊での物性測定に主目的がある。物性測定や磁場中での化学反応、生体への応用まで視野に入れた実用型マグネットである。

3. パルス磁場での磁化測定

磁化測定の方法はいろいろあるが、大きく分けると磁場から受ける力を測るファラデー法と、ピックアップコイルの誘導起電力を測るピックアップコイル法に分けられる。これだけというわけではなく、ほかにも光が透過する場合は光の振動面の回転、いわゆるファラデー回転、を利用するなどの方法もある。ファラデー法は磁場勾配がある場所に置かれた磁性体が力を受けることを利用した方法で、磁気天秤が有名である。受ける力は、 x を磁場の勾配の方向として、 $H \frac{dH}{dx}$ に比例するので、パルス磁場の強い磁場を利用して感度を上げた高感度帯磁率測定装置もある⁴⁾。また、実際に試料を動かさなくても良く、受けた力を相殺するよう力を与えその力を測定するので静的な測定といえる。物性研の榎原俊郎

氏はこの性質を利用して、超低温での磁化測定に成功している⁵⁾。

ピックアップコイル法はコイルの両端に生じる電圧がそのコイルをよぎる磁束の時間変化に比例するというファラデーの法則を利用する。ファラデーの法則を式にまとめると以下のようなになる。

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

式(1)はコイルをよぎる磁束 Φ の時間変化がないと電圧が生じないことを意味しているので、ピックアップコイルを利用する場合、磁束の変化をいろいろな方法で工夫して人為的に与える。たとえば、VSM (Vibrating Sample Magnetometer) システムでは試料をピックアップコイル内で振動させて磁束を変化させる。引き抜き法は、試料をピックアップコイルの例えば下方から上方へ、また、その逆というように引き抜いて磁束を変化させる。交流磁化率を求める場合は、定常的な磁場のもとで変調磁場をかけて、その磁場によって誘起された磁化から得られた磁束の時間変化をピックアップコイルが検出する。これらの方法の場合、周期的な変動を人為的に与えることによって、ロックインアンプ等を用いて感度を上げることができる。その典型的な例がドハース・ファンアルフェン効果の実験である⁶⁾。

これらに比べパルス磁場を用いる場合は、磁場が本質的に時間変化しているので、新たに磁場を人為的に変化させる必要がない。当然磁化も時間変化するので、ピックアップコイルはこの磁化による磁束の時間変化に比例した電圧を検出する。したがって磁化を得るには、この得られた電圧を時間に対して積分すれば良い。簡便に磁化測定が出来るわけであるが、他のピックアップコイルでの測定と同様に磁場による磁束の変化も一緒に検出してしまおうという問題を解決しなければいけない。

この問題を解決する鍵は磁束の空間分布が磁場に

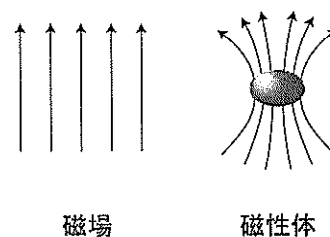


図2 磁束の形

よるものと磁化によるもので異なることである。測定は磁場が一様になっている所で行なっているので、図2に示すように磁束密度は今考えているピックアップの中ではどこでも等しい。それに対し、試料の磁化からによる磁束は図2の右側のようになる。磁束はピックアップコイルの中の試料空間だけにあると考えれば良い。実際は上に行った磁束はどこかで下の磁束とつながっているのだが、それはピックアップコイルから離れた広い空間のどこかを通ってもどって行くので、今ピックアップコイルの中だけを考える時は無視できる。

このような磁束の分布を考えると、磁場による電圧をキャンセルするのはそれほど困難ではない。式(1)の符号は磁束の進む方向に対して右ねじの進む方向にかかる電圧を示している。磁束が増えて行く時、つまり、 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ のとき、図3の左側のように電圧がかかる。そうすると、全く同じ形のコイルを逆向きに巻いて同じように置くと、図3の右側のように生じる電圧は逆になる。この2つのコイルを直列につなげば、両端から出る電圧はちょうどキャンセルしてゼロになる。このようなコイルでは外からかかる磁場による効果をキャンセルできる。試料による

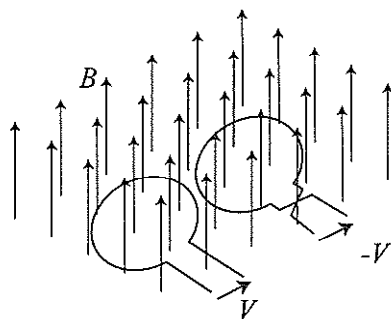


図3 ピックアップコイルの出力電圧

る磁束は図2の右側のようになっているので、試料の磁束変化を検出できるピックアップコイルは試料の外側に巻かれたコイルのみである。したがって、図3の左側のコイルに試料を入れれば、右側のコイルには試料の磁束変化による電圧は生じないので、直列につないだコイルの両端には試料の出力のみが現れる。これがピックアップコイルの原理である。実際にもこのように測定するコイルとキャンセルするコイルを空間的に分離して巻いて用いているピックアップコイルも多い。

磁場の分布の一様性があまり良くない場合には2つのコイルからの出力電圧が同じでなくなってくる。このような場合には、さらにピックアップコイルの巻き方に工夫が必要になる。現在、パルス強磁場で用いている重要な方法に同軸型というタイプがある。このピックアップコイルは空間的に対称性の良い形状をしており、磁場の均一度が悪い場合および、大きな空間が取れない場合に有利である。この、同軸型ピックアップコイルは以下に説明するように感度は余り取れないのであるが、磁場のキャンセルが良いので強磁場磁化のほかにもドハース・ファンアルフェン効果等の測定に用いられている方法である。

図4に同軸型ピックアップコイルの原理を示す。実際には図3のように1ターンのピックアップコイルではシグナル強度が稼げないので、複数巻くのが普通である。a-コイルの巻き数を N_a 、コイルの断面積を S_a とし、一様な外場による磁束密度を B_0 とすると、コイルをよぎる磁束は $\Phi_a = N_a S_a B_0$ と表わすことができる。磁場は一様なので、b-コイルをよぎる磁束も $\Phi_b = N_b S_b B_0$ と表わすことができる。直列につないだ時に磁場による誘起電圧をキャンセル

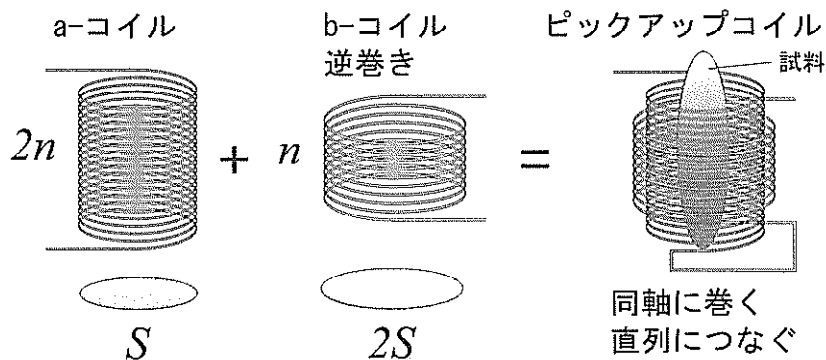


図4 同軸型ピックアップコイルの原理

させるためには、 $\Phi_a = \Phi_b$ とすればよいので

$$\begin{aligned} N_a S_a B_0 &= N_b S_b B_0 \\ N_a S_a &= N_b S_b \end{aligned} \quad (2)$$

となる。実際には図4のようにb-コイルのピックアップコイルの断面積を2倍(a-コイルの断面積を S として $2S$)、巻き数を半分(a-コイルの巻き数を $2n$ として n)にすれば式(2)を満足する。試料による磁束は、a-コイルでもb-コイルでもサンプルの面積 S_s だけにしかないので、 $\Phi_{sa} = N_a S_s M$ 、 $\Phi_{sb} = N_b S_s M$ と、巻き数だけに依存する。したがって試料からくるピックアップコイルの出力電圧 V_s は、直列につないだコイルでも完全にキャンセルされず

$$\begin{aligned} V_s &= - \frac{d}{dt} (\Phi_{sa} - \Phi_{sb}) = (N_a - N_b) S_s M \\ &= (2n - n) S_s M = n S_s M \end{aligned} \quad (3)$$

となる。この方法は、 $2n$ 回巻いたa-コイルに対して出力が半分になり感度的には不利であるが、コイルの空間的対称性が良く、磁場のキャンセルの度合いが高いというメリットがある。

今までの話は、原理的には外部磁場をキャンセルできるというものであったが、実際にはコイルの巻きむらや電流の空間分布などによってマグネットの磁場は厳密にはキャンセルできない。さらに、実際の磁束密度は

$$B = \mu H + M \quad (4)$$

と書けるわけだが、強磁場では μH と M はその大きさがかけ離れている。例えばフェライトの飽和磁化はざっと 0.5 Wb/mm^2 という大きさだが、これはパルス強磁場の 50 T の約 $1/100$ である。フェライトでさえこの大きさなので、実際に測定する小さな磁化の場合では磁場との比率が 10^5 程度にさえなる。したがって、このような磁化にとって大きな磁場をキャンセルするのは至難の業で、実際の測定では試料を抜いて測定したブランクデータで差し引くということになる。

図5に実際の測定データの処理の一例を示す。実際に起る現象は瞬きより短い時間で終わってしまうので、トランジエントレコーダーという測定装置を用いている。入力電圧をAD変換し、1データを $1 \mu\text{sec}$ 以下の短い時間でメモリーに書き入れてくれる装置で、4000データを1パルス間に取り込むこ

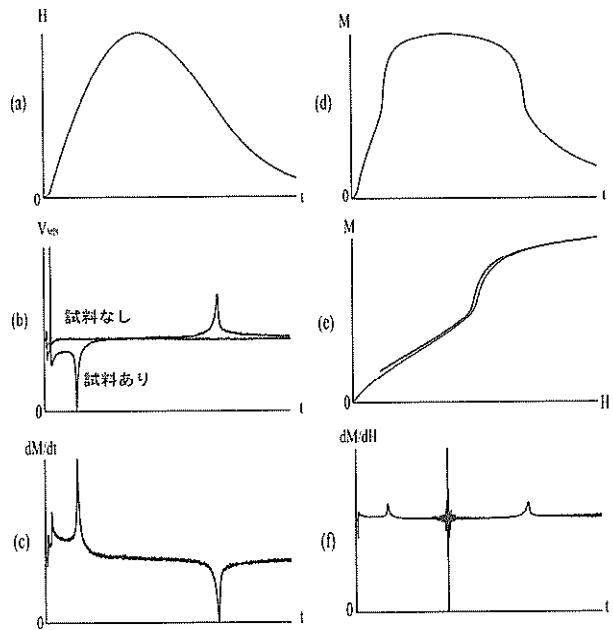


図5 磁化測定の実際

とができる。測定の後に、コンピューターを用いてゆっくりデータ処理できるわけである。

(a)は磁場波形である。横軸は時間でパルス幅がだいたい 20 msec 程度になる。(b)の波形が尖がっているほうが試料がピックアップコイルに入っている時のシグナル波形、 dM/dt である。ほぼ、真直ぐにみえるほうが試料なしの波形で、かなり磁場がキャンセルされていることがわかる。なお厳密にいうと、ピックアップコイルの巻き数は整数でしかあり得ないので、つまり1周、2周となるので、正確にa-コイルの磁場による出力をキャンセルするにはb-コイルのほかにもう一つ1~3ターンのc-コイルを巻いて、その出力がa-コイルの出力をちょうどキャンセルできるように、抵抗分割してb-コイルの出力に足し合わせる。この処理をバランスを取ると呼んでいるが、この波形はその処理をしたものである。試料ありから試料なしの波形を引いたものが(c)になる。これが、得られたピックアップコイルによる磁化のシグナルになる。この波形は次の過程で積分する関係上、 -1 をかけている。(d)にコンピューターにて積分して得られた磁化の波形を示してある。(a)と(d)は時間に対する磁場と磁化の変化なので、同じ時間どおして磁化-磁場のデータの組になる。それを横軸磁場、縦軸磁化のグラフにプロットしたものが(e)で得られた磁化曲線である。

実際には(a)の磁場曲線もピックアップコイルを用いて dH/dt を測定し、積分して用いている。そうすると、(c)の波形をこの dH/dt で割ると、

$$\frac{\frac{dM}{dt}}{\frac{dH}{dt}} = \frac{dM}{dH} \quad (5)$$

となり、微分磁化率 $\frac{dM}{dH}$ が自動的に求まる。磁化の変化や小さな異常なども微分磁化率を用いると感度良く調べることができるので大変便利である。

これがパルス磁場の磁化測定の実際であるが、最後に磁化の絶対値について触れる。パルス磁場の場合、それほど大きな磁場空間を確保できないので、(せいぜい、 1cm^3 程度の空間)ピックアップコイルも当然小さくなる。内径 $3\text{mm}\phi$ 、外径 $5\text{mm}\phi$ 、長さ 4mm というのが現在使っているピックアップコイルの大きさである。このとき問題となるのが、ピックアップコイルの端である。

試料が十分ピックアップコイルに比べて小さければ、試料からの磁束は試料を代えても同じようにピックアップコイルが検出することができる。したがって、出力は試料の量、つまり重さに比例する。逆に十分試料が長い場合、ピックアップコイルが検出する磁束の量は試料の単位長さ当りの重さで定まる。これらの量を測定しておいて、標準サンプル、例えば、 MnF_2 という試料の 10T 以上の磁場での磁化の磁場に対する伸び率(強磁場磁化率)を用いて、ピックアップコイルの比例定数を決めれば良い。

ところが、試料の長さがピックアップコイルと同じ程度になると、話がややこしくなる。ピックアップコイルの実効感度が試料の長さに依存してしまうのである。これは、実際に長さのちがう標準試料をたくさん用意して、感度の長さ依存性を測定し、補正曲線を作成して用いている。

4. 測定例

今までに阪大強磁場を中心に、強磁場磁化測定からいろいろな興味深い測定結果が見つかってきている。ここでは紙面の都合もあるので、その中から私がよく知っている重い電子系のメタ磁性について簡単に触れる⁷⁾。重い電子系とは、金属の伝導電子の物質内での有効質量が低温で非常に重くなる特異な物性を示す物質群のことである。磁性を示す f 電子系であるのが特徴で、本来局在性の強い f 電子が伝

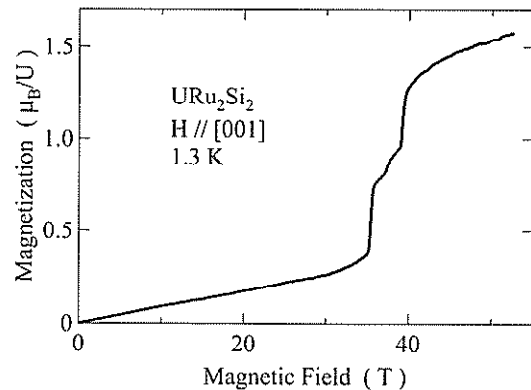


図6 URu₂Si₂の強磁場磁化過程

導電子と相関を持ち、低温で遍歴性を持つため、動き回る電子の質量が f 電子の局在性を引きずるために重くなっていると考えられる。この重くなる時に f 電子の持つ磁気モーメントは伝導電子の磁気モーメントと反平行に結びつくために消えてしまう。この解説の「はじめに」で示した、磁石が反平行に結びつくということに対応する。ところが、強磁場中ではすべての磁気モーメントは磁場方向に揃うほうがエネルギーが低くなるので、この結合を解こうとする。そこで、ある磁場で結合が解かれ磁気モーメントが復活し、伝導電子は軽くなることが期待される。図6に典型的な重い電子系物質URu₂Si₂の強磁場磁化を示す。温度は 1.3K の低温で重い電子系を形成しているために磁化は小さくなっている。強磁場をかけると、 $36\sim 40\text{T}$ の磁場で3段のステップ上のメタ磁性が発見された。この物質は、低磁場状態では $0.03\mu_B$ という非常に小さな磁気モーメントしか観測されていないにもかかわらず、 40T 以上の磁場では $1.5\mu_B$ という大きな磁化が観測されている。上に示したようなメタ磁性になっていると思われるが、これだけでははっきりしない。3段に分かれているのは、磁気構造の複雑な問題があるが、ここでは触れない。

そこで、この磁化の温度変化を測定した。パルス磁場は 20msec くらいの短い時間で終わってしまうため、磁場を止めた温度変化の測定は出来ない。しかし、温度を変えて詳細に測定し、同じ磁場での磁化をプロットする事で、磁化の温度変化を得ることができる。その結果を図7に示す。下段の図は定常磁場(SQUID)で測定した磁化の温度変化である。 55K くらいから低温で磁化が小さくなっているのは、

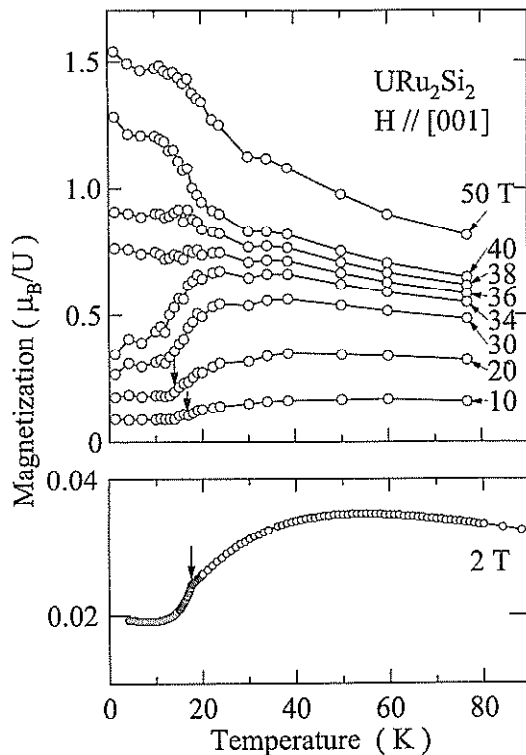


図7 URu₂Si₂の強磁場磁化の温度変化

重い電子系が形成され磁気モーメントがほとんどゼロになっていることを反映している。上の図を見ると、10Tでの磁化の温度変化は2Tの温度変化と基本的に同じである。ところが、メタ磁性を示す磁場、36~40Tを超えた50Tの磁化は温度減少にともなって単調に増加している。これは、磁気モーメントが復活していることを意味している。この磁化の温度変化は、磁気モーメントが室温から同じ大きさであると考えることによって、容易に説明することができる。つまり先に示した、重い電子系は磁場に対して不安定になり壊れることが明らかになった。重い電子系で同様なメタ磁性を示す物質を系統的に見て行くと、磁化率が低温でピークを作って小さくなって行く温度、URu₂Si₂では55K、と、メタ磁性が起る磁場には一定の比例関係がある。重い電子系が、電子の磁石を反平行に結合して低温で安定に存在し

ているために、磁場によってそれが壊されていることがわかる。

5. 終りに

このほかにも、いろいろな磁性状態について強磁場磁化は数々の知見を与えてくれている。最近、高圧下の測定、超低温下での測定などの複合環境での測定装置も開発されており³⁾、このようなデータの積み重ねによって、さらなる磁性の発展が得られるものと期待している。

一見した所は普通の物質でも、今まで見てきたようにパルス磁場を用いた強磁場磁化を行なうことで、物質に隠されているいろいろな不思議な「潜在力」が現れて来る。それがまた、私たちに研究の意欲を与えてくれる。私たちにとってはこれらの物質はまさに「賢者の石」である。

参考文献

- 1) 東京大学物性研究所・極限環境物性研究部門ホームページ：<http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/extreme/>
- 2) M.Date：J. Phys. Soc. Jpn. 39(1975)892.
- 3) 金道浩一：あたりあ 40(2001)260.
- 4) K.Kindo, S.Ookita, Y.Sasaki, T.Matsukawa, A. Kawamori, K. Akabori：J. Phys. Soc. Jpn. 70(2001)1495.
- 5) 測定原理については、榊原俊郎, 三田村裕幸, 田山孝, 網塚浩：固体物理28巻12号(1993)919. 希釈冷凍機への組み込みについては, T.Sakakibara, H.Mitamura, T.Tayama and H.~Amitsuka：Jpn. J. Appl. Phys. 33(1994) 5067.
- 6) 例えば, 田沼静一責任編集：実験物理学講座 15「低温」共立出版(1974)347.
- 7) K.Sugiyama, M.Nakashima, H.Ohkuni, K.Kindo, Y.Haga, E.Yamamoto and Y. Ōnuki：J. Phys. Soc. Jpn. vol.68(1999) 3394.

