

Title	強磁場かつ高圧下での磁化測定
Author(s)	濱本, 輝文
Citation	大阪大学低温センターだより. 2000, 109, p. 1-5
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/8946
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

強磁場かつ高圧下での磁化測定

極限科学研究センター 濱本輝文

そもそも「強磁場や高圧、極低温においていろいろ面白い現象が発見されているのだから、これをミックスした複合極限下でなら、もっともっと面白いことがあるだろう。」という考えから、古くから複合極限状態の生成やその状態下での物性測定実現のため、開発が行われてきました。今回説明させていただく強磁場・高圧下での物性測定に限定して言えば、定常強磁場を用いた磁化測定ならば可能になっていました。けれど現在得られる定常強磁場は高々40 T程度で、胸を張って「我々は強磁場で高圧磁化測定をやっていますよ」と言うためには、やはりパルス磁場を用いて実現させたい。その思いで開発を行ってきたパルス磁場を用いた高圧磁化測定法と測定例についてこれから説明します。

装置開発

実は前年度の『極限科学研究センター報告書』において、装置開発については既に説明しています。ですので、前年度までの開発については手短にお話しし、続けて今年度改良した部分についてお話しします。

図1に実験装置と高圧セルの概略図を示します。測定法は磁化検出コイルを高圧セルの外側に巻いて、高圧セルごと試料の磁化を測定する誘導法です。

装置開発においての一番の難点は『うず電流の影響をいかに軽減するか』でした。うず電流は磁場の時間変化に比例して発生する誘起電流で、定常磁場では発生しないパルス磁場特有のものです。これは磁化信号のノイズとなったり発熱の原因になります。特に精密に磁化を測定するためには、磁化信号によるノイズを消すことが一番の問題でした。それを軽減する方法はうず電流そのものを減らす方法とそれを

をあたかも感じないようにする方法の2つがあります。我々はその両方からのアプローチをしました。簡単に説明すると磁場の時間変化を緩やかにすること、比較的電気抵抗の大きな素材 (Be-Cu 合金)

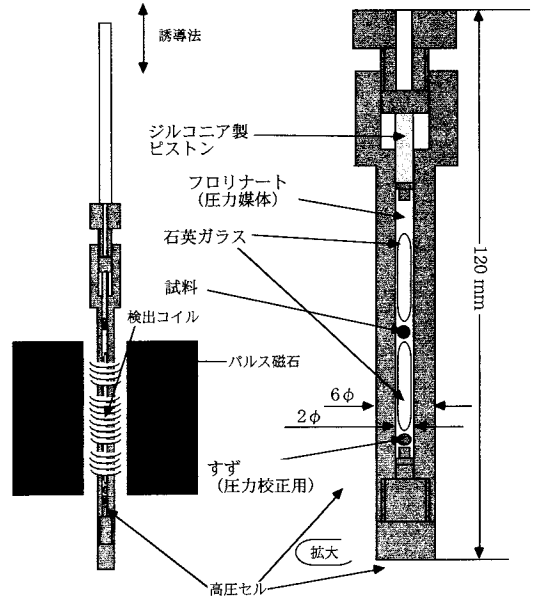


図1 実験装置と高圧セルの概略図

を使うことによって、うず電流そのものを減らしました。また、マグネットの最高磁場を発生する空間の高圧セルの構造をなるべく均一にして、うず電流が生じても試料を入れた時と抜いた時のバックグラウンドの誘導起電力がほぼ同じになるようにし、磁化信号のノイズを軽減しました。

次に、磁場発生中の発熱の問題ですが、実際に高圧セルの中に温度計を入れて確かめてみました。液体ヘリウム温度4.2 K以上では磁場発生中に温度変化がないことが分かり、4.2 K以下では温度校正をすることによって、問題なく2 K以上の測定が行えることが分かりました。このことにより、前年度までに12 kbarまでの高圧かつ43 Tまでの強磁場下での磁化測定が可能となりました。

一方、今年度の改良点は(1)4.2 K以上の温度変化が可能になった(2)最高磁場が50 Tになった(3)測定感度が向上したことです。このことにより磁場・圧力・温度の3つの外場をパラメータとした磁化測定が可能となり、測定磁場範囲も向上しました。また、測定感度が向上したことによって低次元磁性体のような比較的小さな磁化しかもたない試料についても測定できるようになりました。

測定例

高圧下でのパルス磁化測定は、これまで行われてこなかった新しい試みなので測定してみると面白いような対象物質はいろいろとあります。ここでは低次元磁性体 NH_4CuCl_3 と重い電子系反強磁性体 CeRh_2Si_2 について行った測定例を紹介します。

低次元磁性体 NH_4CuCl_3 について

これまで高圧強磁場下での物性測定は、ほとんどが電気抵抗測定であり、絶縁体である低次元磁性体に対する高圧強磁場下での物性測定は、今回が初めてなのではないでしょうか。例えば電気抵抗測定などによって高圧強磁場下で何かありそうだ分かっているものならば、結構手を出しやすいのですが、 NH_4CuCl_3 についてはそういった情報はありませんでした。『イオン結晶だから柔らかそうだ。磁性イオン間の距離に依存する交換相互作用くらいは変化するかな。もしかしたら新現象が現われるかもしれない。』というモチベーションで実験を行ってみました。

低次元磁性体は一般に磁化の小さい試料が多く、この実験は今年度行った改良によって初めて可能となりました。

図2に NH_4CuCl_3 の高圧磁化過程を示します。一見して分かることは常圧下で見られた階段状の磁化過程が、7 kbarにおいては、単純な上ぞりの磁化過程（あたかも $S=1/2$ ハイゼンベルグ反強磁性鎖⁽³⁾の磁化過程）となり、階段状の構造が消えていることです。また、当初のモチベーションを支持して飽和磁場（すなわち交換相互作用の大きさ）は常圧下の約30 Tから7 kbarでは約18 Tになりました。

このような『分数の磁化の大きさに安定状態が観測される低次元磁性体』が最近いろいろと見つかっています。これは『量子スピン系における磁化プラトーの問題』として理

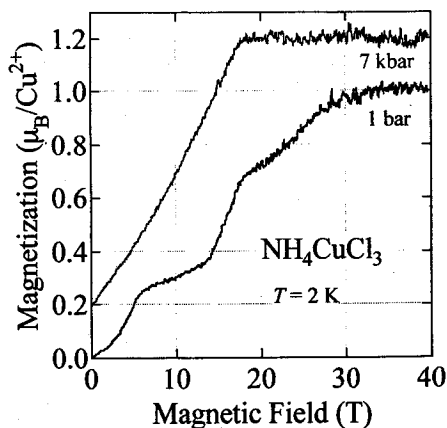


図2 NH_4CuCl_3 の高圧磁化過程
ただし7 kbarのデータには縦軸に0.2のオフセットをつけている。

論・実験の両面から現在注目されています。

図2をあらためて見ますと、7kbarの磁化過程は異なる磁気的なサイトが、圧力をかけることによって同一のサイトになったため、階段状の構造がなくなったと説明できるのかも知れません。また7kbarでの磁化過程を良くみると、通常期待される $S=1/2$ （従って $1\mu_B$ ）を持つ1次元磁性体の磁化過程に比べ、上ぞりっぷりが小さいことが分かります。おそらくもっと圧力をかけるとほとんど直線的に飽和に達する磁化過程が得られるでしょう。これは圧力印加によって反強磁性秩序状態に磁気相転移している可能性を示唆しています。またこの予想を支持する帯磁率測定の結果も得ています。このように低次元磁性体 NH_4CuCl_3 において面白い現象が観測されました。現在は他の低次元磁性体についてもパルス磁場を用いた高圧磁化測定を行っています。

重い電子系⁽²⁾反強磁性体 $CeRh_2Si_2$ について

次に重い電子系反強磁性体 $CeRh_2Si_2$ に対する実験結果についてお話します。この結果の一部は前年度の『極限科学研究センター報告書』でも紹介していますが、その後、装置改良によって温度変化の測定が可能となったので、その新しい結果を交えてお話します。

この $CeRh_2Si_2$ は重い電子系反強磁性体で、正方晶の結晶対称性を持ち、その長軸方向の c 軸方向に磁化しやすい物質です。この磁化容易軸(c 軸)に強磁場をかけると、鋭い磁化の跳びが観測されます。この現象を『メタ転移』と言いますが、このメタ転移は反強磁性体で特に1軸異方性の大きな物質で観測されます。一方、このメタ転移は常磁性体の重い電子系物質でも観測されます。反強磁性体に見られるメタ転移は交換相互作用に打ち克つ強磁場下で観測されますが、重い電子系のメタ転移は局在モーメントを小さくしている近藤効果に打ち克つ強磁場をかけることによって現われます。つまり、常圧下での $CeRh_2Si_2$ のメタ転移はこの2つの理由のどちらでも説明できるのですが、『本当はどちらか?』を明らかにするため、高圧下でのパルス磁化測定を行いました。では『なぜ高圧下で測定するとそれが明らかになるのか?』ですが、それは単純に $CeRh_2Si_2$ は高圧下で常磁性体になるからです。

まず、図3(a)の各圧力下での帯磁率の温度変化を見ましょう。実線の下向き矢印は各圧力下における反強磁性転移温度 T_N を示しており、圧力によって反強磁性状態が抑制されている様子が分かります。また、9.5kbarにおいては反強磁性秩序化を示す帯磁率の折れ曲がりが見られず、すでにこの圧力下では常磁性状態になっていることを示しています。図中の破線上向き矢印は帯磁率が極大を持つ温度 $T_{x,max}$ を示しています。 $T_{x,max}$ 以下で温度減少に伴い帯磁率は小さくなり、これは近藤効果によって局在モーメントが小さくなり始めたことを示しています。

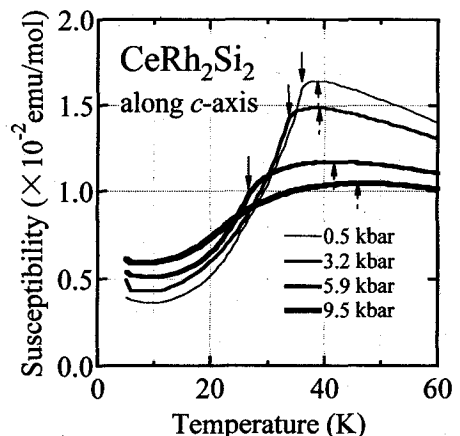


図3(a) 帯磁率の温度変化の圧力変化

図3(b)は9.5kbarにおける磁化過程の温度依存性です。御覧のように常磁性状態でもメタ転移がハッキリと観測されました。つまり $CeRh_2Si_2$ のメタ転移は重い電子系特有の『近藤効果によって小さくなっ

た局在モーメントが復活するタイプのメタ転移』であることが分かりました。このメタ転移は近藤効果によって局在モーメントが小さくなり始める $T_{z,max}$ まで観測されるでしょう。温度揺らぎのためにメタ転移がブロードになり、 $T_{z,max}=46\text{K}$ 近傍までは観測できませんでしたが、図に示すように30K以上までメタ転移が観測されました。

図3(c)にメタ転移磁場 H_M の圧力・温度依存性をまとめました。また、各圧力における T_N に対応する圧力の黒塗り印で示しました。常磁性体となっている9.5kbarの H_M の温度変化は重い電子系常磁性体 CeRu_2Si_2 のそれに類似して、温度上昇に伴って H_M は高磁場側へとシフトしています。また、3.2と5.9kbarにおける H_M の温度変化は重い電子系反強磁性体 UPd_2Al_3 や URu_2Si_2 のそれに類似して、温度上昇に伴って T_N に向かっていったん小さくなり、 $T_{z,max}$ に向かってまた上昇する結果が得られました。このようにただ一つの試料を用い、その局在モーメント間の距離を圧力によって変化させることによって、代表的なメタ転移を示す重い電子系物質のメタ転移の温度・圧力変化と同様な温度・圧力変化が得られました。ところで、 CeRh_2Si_2 の常圧下での T_N と $T_{z,max}$ は非常に接近しています。図3(a)を見ると、『もしも局在モーメント間を引っ張ってのばすことができたなら、 $T_{z,max}$ は低温側にシフトし、 T_N における帯磁率の折れ曲がりに隠れてしまうだろう』と予想できるでしょう。すなわち常圧下の CeRh_2Si_2 は $T_{z,max}$ がぎりぎり観測される重い電子系反強磁性体の極限と言えます。つまり、図3(c)は、重い電子系において、帯磁率にブロードな極大を持つ反強磁性体の極限から、常磁性状態になったばかりの状態までのメタ転移の温度変化をすべて表しています。

以上、低次元磁性体 NH_4CuCl_3 については『圧力をかけることによって新現象を発見したこと』を、重い電子系物質 CeRh_2Si_2 については『圧力をかけることによって磁気状態を制御し、重い電子系反強磁性体から常磁性体までのメタ転移の様子を系統的に調べたこと』について紹介しました。

どうです。面白いでしょう。私は面白いと思います。なぜ面白いのか？それは新しい現象だったから。なぜ新しかったか？それは今回の場合は新しい装置を作って測定を行ったからです。これからもガンガン面白い結果を出そうと思っています。

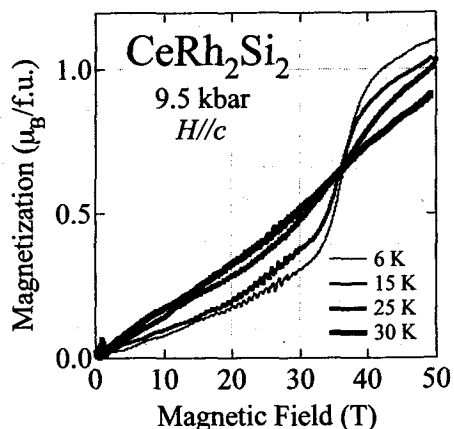
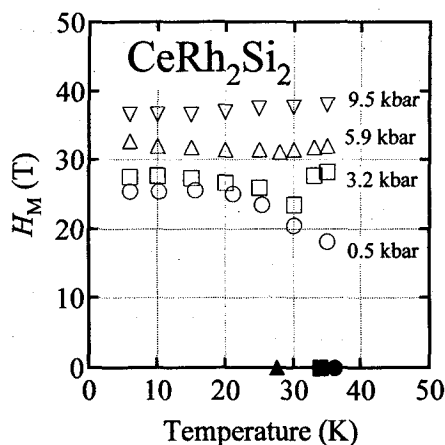


図3 (b)9.5kbarにおける磁化過程の温度変化



(c) メタ転移磁場の圧力・温度依存性

最後に

最近、強磁場・高圧・極低温での物性測定が確立されてきており、その道の技術者がそばにいないともある程度の物性測定が手軽にできるようになってきている。それはそれで良いことなのかもしれないが、『この測定装置を立ち上げるのに青春をかけています』というような愚痴にも自慢にも聞こえるような声が聞こえてこないのは、それはそれで残念に思う。

などということを書いて先生から聞くことがある。筆者は若輩者なのでそんなことは言わないが、そうおっしゃられると「そうかいな」と思う。今回、パルス強磁場と高圧を組み合わせた磁化測定装置の開発が一段落し、自慢はいけませんが自分自身「これならば」と自信を持てる装置に育てあげたので、末筆を歴史ある低温センターに記載していただいた。『濱本くん、書いてみたら?』と薦めていただいた低温センター竹内助手、極限科学研究センター金道助教授に感謝します。

「これからもガンガン面白い結果を出そうと思います」などと書きながら、当の本人はアカデミックなところを離れ、企業に就職してしまいました。ここで紹介した装置を引き継ぐ同僚と、極低温と強磁場を組み合わせた測定装置を開発した同僚の鳴海さんにエールを送ります。

用語説明

① $S=1/2$ ハイゼンベルグ反強磁性鎖

スピンの大きさが $1/2$ ($S=1/2$) で交換相互作用が等方的な (ハイゼンベルグ) 反強磁性的交換相互作用で磁氣的に結合した1次元磁性体 (反強磁性鎖) のこと。理想的な $S=1/2$ 反強磁性鎖には磁気秩序はありません。それは量子揺らぎによって磁気秩序状態が基底状態にならないからです。スピンの大きさが小さければ小さいほど、量子揺らぎの効果は顕著になります。常圧下での NH_4CuCl_2 は反強磁性鎖ですが、反強磁性体ではありません。

② 重い電子系物質

CeやU化合物によく見られる最近話題の物質群。比較的局在しているf電子と伝導電子が結合して、電子が重くなったように見える物質のこと。f電子と伝導電子を結合させる結晶全体に作用する交換相互作用 (RKKY相互作用) とf電子の局在モーメントを伝導電子のスピンの打ち消す局所的な効果 (近藤効果) によって、その物性が支配される。RKKY相互作用と近藤効果の温度・磁場・圧力変化は複雑で、さまざまな磁気相が観測されている。特に近藤効果の強さを表す近藤温度が $10\sim 100\text{K}$ オーダーの物質群に対する『強磁場・高圧』の効果は大きく、非常に興味を持たれている。