

# 100 T 超の高精度磁化測定に成功—未知なる新物質の物性研究に新

## たな道

我が国の磁性研究は、1930年初頭の本多光太郎博士によるKS鋼の発見を先駆けとして実験・理論ともに世界をリードし続けてきた。磁性研究は、日本の伝統お家芸と言っても過言でない。様々な磁性材料の創成に伴い新しい物性物理の発見が繰り返されて今日に至っている。磁気物性の理解は、磁性体の研究に留まらず、広く、超伝導体、金属、半導体などの様々な分野で物性を理解する上でも益々その重要性を増している。今日では、物質創成を行っているほとんどの研究室は、超伝導量子干渉計(SQUID)や物理特性測定装置(PPMS)を頻繁に利用し、実験経験の少ない大学院生でも10 T程度までの磁化過程ならば試料をセットするだけで見事なデータを手にすることができる。

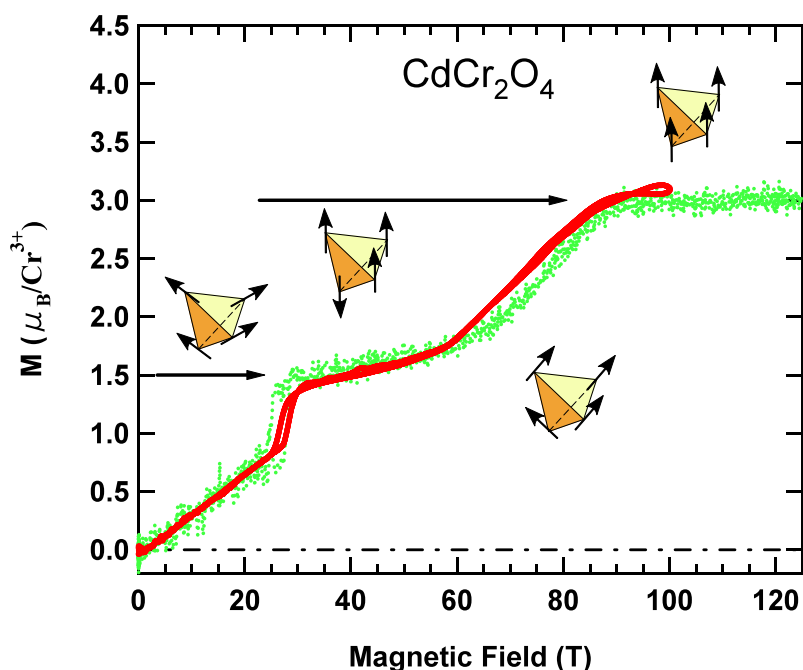


図1. 液体ヘリウム温度4.2 Kの極低温下、超強磁場103 Tまで得られたフラストレート磁性体CdCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>の磁化曲線(赤の太い実線)。1/2 磁化プラトーを含めた逐次磁気相転移の強磁場磁化過程が明確に観測されている。比較のためファラデー回転(光測定)によって得られた磁化曲線(7 Kでの測定結果)を緑色の薄い点線で示す。超強磁場の発生には破壊型のパルス磁場「縦型一巻きコイル超強磁場発生装置」が用いられた。

三角格子やカゴメ格子磁性体、パイロクロア磁性体、ペロブスカイト型マンガン酸化物などでは、磁性、電荷、格子、軌道などが相互に絡んで様々な量子現象を引き起こすことから、近年多くの研究者を様々な角度から引きつけている。これらの物質の磁性を解明するのに、強磁場下での磁化測定は重要な役割を果たすので、新しい物質開発とともに、より強い磁場環境での測定が益々必要となってきた。これまで、市販の測定装置では届かない磁

化測定には様々な方法が開発されてきた。10 T 以上の強磁場中では、磁気天秤法、強磁場中に置いた試料を上下に動かす引き抜き法、試料を振動させる試料振動型磁力計などが活躍してきた。定常的な強磁場発生は、超伝導と水冷型マグネットを組み合わせたハイブリッド型マグネットにより現在のところ 45 T が上限値となっている。それ以上の磁場はパルス法で得られ、パルス磁場発生技術も世界の主要なパルス強磁場施設間でしのぎを削っている。現在では、米国ロスアラモスの 97 T、独国ドレスデンでは 91 T、また、ごく最近では中国武漢の強磁場センターで 83 T と、それぞれ 100 T に向って非破壊的にパルス磁場を発生させる技術開発が進んでいる。パルス強磁場での磁化  $M$  の測定では、外部磁場  $B$  の時間変化に伴う  $dM/dt$  をそのまま利用して試料の周りに巻きつけた小さなコイルに誘導される電圧を検知すれば良いので、磁化測定装置はパルス強磁場中での他の物性測定に比べ比較的簡便に自作できる。

我が国では、1970 年頃から大阪大学の伊達グループによる 100 T に向けた物性測定が提案され、磁化測定技術開発への努力がなされてきた。しかし、1988 年、嶽山、天谷等による物性研究所の一巻きコイル超強磁場発生装置を用いた 100 T 弱の磁化測定成功に至るまでの長年の間、精々 60 T までの磁化測定が限界であった。それまで一巻きコイル法など 100 T 以上の磁場発生は、マグネットコイルの破壊だけでなく高電圧、大電流放電に伴う劣悪なノイズ環境のために、超強磁場中での磁化コイル内の微弱な誘導電流による磁化測定は不可能との認識があった。従って、当時の一巻きコイル法を用いた磁化測定の技術開発は、100 T 越えでの磁化測定へのブレークスルーとなった。その後、この手法は物性研究所の後藤グループを中心に引き継がれ、遍歴電子メタ磁性の発見などに大きな役割を果たした。また、一巻きコイル超強磁場発生装置はドイツのフンボルト大学の強磁場施設でも導入され、100 T 超強磁場磁化測定技術は更に進歩した。しかしながら、何れの場合も磁化の微分  $dM/dB$  の信号、すなわち、磁化の変曲点を上手く捉えることができても、大きなバックグラウンド信号のために物理的評価に耐えうるほどの磁化の「絶対値」を得ることは不可能に近かった。磁化の変曲点は磁気相転移点を見いだすのには役立つが、近年話題となっているフラストレート磁性体などで現れる磁化プラトー問題などを調べるには、磁化の絶対値測定が必要不可欠となってきた。そこで、100 T 以上での磁化の評価には、磁気光学的な手法としてファラデー回転が用いられてきた。ファラデー回転角がおおよそ磁化に比例することを利用するのであるが、この方法には試料の光透過性など様々な適用限界がある。

物性研究所国際超強磁場科学研究施設の嶽山等を中心とする研究グループは、極低温下で 100 T 超に至る超強磁場磁化測定技術の再開発に取り組んできた。彼らは、この破壊型コイル装置の磁場発生の特性を徹底的に調査研究した。その結果、パルス発生時間とともに変化する一巻きコイル内の磁場強度の空間分布から最適位置を見だし、特殊な磁化検知コイルの開発に成功した。また同時に、強い衝撃波と大きな誘導電流が伴うため金属が使えないといった厳しいパルス超強磁場環境の中で長時間使用可能な液体ヘリウム低温容器の開発にも成功した。これらの開発により液体ヘリウムという極低温で 103 T までの磁化の絶対値測定を成功させた。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2011 年 12 月号に掲載された。

パルス磁場下の磁化測定では、目的とする  $dM/dt$  信号の 4 から 5 桁以上の大きさを発生する  $dB/dt$  の信号を完全に打ち消すための外部補償回路を用いるのが一般的である。当施設に

ある一巻きコイル超強磁場発生装置は 100 T 以上の超強磁場を数  $\mu$  秒のパルス立ち上がり時間で発生し、その直後にコイルは外に向かって破壊する。同研究グループは、一巻きコイル超強磁場発生法では磁化検知コイルの外部補償法には適用限界があると考え、自己補償の並列型検知コイルを開発した。完成した磁化測定システムの比較検討の評価を兼ね、上記フンボルト大学での磁化測定で使用された同一試料、ビスマスをベースとしたマンガン酸化物、の磁化測定を行い、バックグラウンドがほとんど無い磁化曲線を得ることに成功した。また、開発した低温容器を用いて、幾何学的フラストレート磁性体として興味をもたれている  $\text{CdCr}_2\text{O}_4$  の磁化を極低温 4.2 K で測定して、飽和磁化に至る逐次相転移を観測し、非破壊のロングパルス磁場での測定精度に比べても遜色ないデータを得ている。図 1 は、極低温下で 100 T を越えた磁化の絶対値の測定に成功した世界に先駆けた成果である。この成功は 100 T 以上の超強磁場での磁化測定に新たな可能性を与えたと言える。世の中には内在する強力な磁気スピンの交換相互作用の為にその神秘に満ちた本質の解明を拒み続けている磁性体がまだまだ数多く存在する。本論文の成果は、今後、これらの物質の未知なる領域での物性物理の解明に大きく貢献することが期待される。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) No.1, p.014702

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/014702> (2011 年 12 月 5 日公開済)

< 情報提供：嶽山正二郎（東京大学物性研究所） >