磁気光学手法による超高密度磁束の精密測定 東大物性研 中村大輔,宮田敦彦,澤部博信,松田康弘,嶽山正二郎

High precision measurements of ultra-high density magnetic flux by magneto-optical techniques Institute for Solid State Physics, Univ. of Tokyo D. Nakamura, A. Miyata, H. Sawabe, Y. H. Matsuda, and S. Takeyama

High precision measurement of ultra-high density magnetic flux is now of urgent necessity owing to the recent development of generation of ultra-high magnetic fields over 700 T and its maximum value is approaching to 1000 T. In such a region of ultra-high magnetic fields, the pickup coil method which has been conventionally employed is limited to use due to enormous voltage induced in the pickup coils. Therefore, the magneto-optical Faraday rotation method is a potential candidate for this purpose since the method is free from the limit of high frequency change of the flux and from the electrical noises. Precise determination of the Verdet constant of a fused quartz is attempted in ultra-high magnetic fields using the electro-magnetic flux compression method.

1. はじめに

東京大学物性研究所では、Cu ライ ニングコイルという新コイル方式を 導入した電磁濃縮法により、現在ま でに室内最高到達磁場である730テス ラの磁場発生に成功している[1]。図1 に示すようなCu ライニングコイル(一 次コイル)に瞬間的に流れる一次電流 により誘起されるマクスウェル応力 によって、一次コイル内部にある銅 製のライナーが収縮する。これにより、 初期磁場注入コイルによってあらか じめ導入された数テスラ程度の磁束 が数十マイクロ秒で濃縮され、数百 テスラの超強磁場領域に到達し、そ の後衝撃で一次コイルが破壊される。 このようなパルス超強磁場領域で





は、磁場の大きさを測定するため に従来は収縮するライナー内に配置 したピックアップコイルに生じる誘 導起電力を測定していた。しかし、ラ イナーが収縮して小さくなる超強磁 場領域の測定に際してはピックアッ プコイルの径もまた小さくする必要



図2 ファラデー回転測定の模式図。

があるために、磁東密度測定におけ るエラーバーが大きくなってしまう といった、ピックアップコイルの加 工上の問題がある。さらに、このよう な電気的測定ではピックアップコイ ルから測定機器に至るまでにリード 線が存在するために、超強磁場発生 に伴い数百ボルト程度の巨大な電磁 ノイズがリード線に生じて、磁場の 大きさに比例した信号だけを取り出 すのは困難が伴う場合がある。

上記のような電気的測定に対して, 磁場中に配置した石英などの標準試 料中で光の偏光面が回転するファラ デー効果(図 2)を利用して磁場の大き さを調べる光学的方法がある。この手 法はバルク結晶の右円偏光と左円偏 光に対する屈折率の違いを利用する 測定方法であるために、 試料の径を 小さくしても磁束密度測定のエラー バーが大きくならないこと、そして 磁場検出器(石英)と測定機器の間に はリード線がないために電磁ノイズ の影響が少ないことから、将来的に 超強磁場領域での精密な物性測定を 行う際に磁場の大きさを計測するリ ファレンスとして有用であると考え られる。ファラデー効果を利用した磁 場測定は、一巻きコイル法[2]のよう な200テスラ程度までの磁場領域での 実験においては比較的研究の蓄積が あるが、700 テスラ程度までの磁場発

生が可能な電磁濃縮法の実験におい てはまだ研究例がほとんどない。特に、 通常の解析では図 2 中の数式 (V は Verdet 定数と呼ばれ、物質固有の値 を持つ)のように磁場中に置いた試料 を透過した光の偏光面の回転角(θ_{i}) は単純に磁場の大きさに線形に比例 すると仮定するが、 電磁濃縮法で到 達できるような超強磁場領域では研 究例が著しく少ないために、石英の ような標準的試料の右円偏光と左円 偏光に対する屈折率の違いは低磁場 領域における違いと同じかどうか. これまでの磁場の大きさを求める解 析をそのまま用いてよいかどうかと いった点についても適宜確かめる必 要があると考えられる。

今後 1000 テスラ領域の磁場発生を 目指すうえで、このような超強磁場 領域における精密な磁束密度測定方 法の開発は、ますます重要な課題に なると考えられる。

2. 実験

超強磁場領域における磁場計測を 光学的手法で行うための測定・解析技 術をより確かなものとすることを目 指すことを目的として、従来使用さ れてきたピックアップコイルを用い た電気的手法と石英のファラデー効 果を用いた光学的手法で、最大で700 テスラ程度までの磁場発生が可能な 電磁濃縮法によって発生した超強磁 場の大きさを同時に測定して比較し た。 また、200 テスラ以下の磁場領域 においては一巻きコイル法による実 験も行って電磁濃縮法による結果と 比較した。ファラデー回転測定は室温 で行われ, 光源には波長 638 nm の半 導体レーザーを用いた。



図3(a)石英試料まわりの測定系の模式 図。(b)石英試料の周囲に巻いたピック アップコイルの拡大写真。(c)電磁シー ルドを巻いたベークライト筒。

図 3(a)はピックアップコイルと石英 のファラデー回転による磁束密度の 同時測定のためのサンプルホルダー の模式図である。収縮するライナーの 中心に厚さ2mmの石英試料(ハッチ部 分)を配置している。図3(b)は石英試 料周りの写真であり、石英結晶はカ プトンチューブ内部に固定され、そ の外側にピックアップコイルを巻い た。また、巨大な電磁ノイズを減らす ために石英試料外側のベークライト 円筒には図 3(c)のように電磁シール ド(スーパーインシュレーション箔) を巻いている。磁束密度の時間微分に 比例したピックアップコイルからの 信号は、アッテネータを介して測定 機器に取り込まれるか, CR 積分器を 通して磁束密度に比例した信号とし て測定機器に取り込まれるようにな っている。



図4 電磁濃縮法におけるピックアップ コイルと石英のファラデー回転による 磁束密度の同時測定の結果。

3. 実験結果

図4は電磁濃縮法におけるピックア ップコイルと石英のファラデー回転 による磁東密度の同時測定の結果の 例である。単調に増加する線がピック アップコイルに誘起される誘導起電 力から求められた磁場の大きさを示 し,薄い対称的な2つの線がそれぞれ 石英試料を透過したレーザー光のう ちs偏光, p偏光成分の強度の時間変 化を示している。

図4で得られた各偏光成分の強度の 変化をファラデー回転角に変換して、 ピックアップコイルで測定された磁 場の関数として示したのが図5である。 直線はそれぞれ低磁場側(200 テスラ 以下)と高磁場側(200 テスラ以上)で のフィッティング結果であり、200 テ スラ以下では Verdet 定数に換算して 0.195 deg./mm T という値が得られた。 この値は別の電磁濃縮実験や一巻き コイル法による実験においても再現





された。一方,200 テスラ以上の高磁 場では Verdet 定数が若干減少するふ るまいが観測された。この原因につい ては,高磁場領域でピックアップコ イルで測定された磁場に対して何ら かの補正項が必要である可能性や石 英の高磁場領域における intrinsicな 光物性を反映している可能性が考え られる。この高磁場側のふるまいに関 しては,系統的な実験によるさらなる データの蓄積が必要であると考えら れる。

4. まとめ

超強磁場領域における磁場値のよ り正確な計測方法の確立をめざして, ピックアップコイルと石英のファラ デー回転の同時測定を行った。これま でに400T付近までの同時測定に成功 し,比較的低磁場領域(200 テスラ以 下)においてはVerdet 定数が 0.195 deg./mmTとなる結果が得られた。 今後はより強磁場のふるまいについ て詳細に調べる予定である。

5. 参考文献

 S. Takeyama, H. Sawabe, and E.
Kojima, J. Low Temp. Phys. <u>159</u>, 328-331 (2010).

[2] 三浦登, 毛利信男, 重川秀実 著, 極限実験技術 (朝倉書店, 2003).