OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | レーザービーム走査型磁気光学顕微鏡の開発と超伝導体中の磁束観測 |
| Author(s) | 村上, 博成 |
| Citation | 大阪大学低温センターだより. 2011, 153, p. 25-29 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/9983 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

研究ノート

# レーザービーム走査型磁気光学顕微鏡の開発と超伝導体中の磁束観測

レーザーエネルギー学研究センター　村上　博成（内線7982）
E-mail: hiro@ile.osaka-u.ac.jp

光と磁気の相互作用により光の偏光面が回転する効果は一般に磁気光学効果としてよく知られているが、その一つに1845年マイケル・ファラデーによって発見された磁気光学ファラデー効果がある。これは、ある物質に磁場をかけ、それと平行な方向に直線偏光を透過させたときにその偏光面が旋光する現象のことで、このときの旋光度（ファラデー回転角）$\theta_F$は以下の式によって与えられる。

$$\theta_F = VtH \qquad (1)$$

ここで、$V$は光が通過する物質（ファラデー素子）の種類、光の波長、温度などに依存する定数でヴェルデ定数と呼ばれる。また$t$はファラデー素子の厚み、$H$はファラデー素子にかかる垂直磁場（直線偏光が進む方向と同じ方向の磁場）である。また、$\theta_F$の符号は$H$の方向に対応して変化し、直線偏光がファラデー素子内を往復して戻ってくるときはその大きさは2倍となる。

本研究では、この磁気光学ファラデー効果を使って、超伝導体中の磁束分布および超伝導デバイス中の局所的な磁気シグナルの高速検出を目的として、レーザービーム走査型の磁気光学顕微鏡の開発を行った[1]。

この磁気光学顕微鏡について言えば、従来から超伝導体中の磁束観察などに使用されているが、今回開発したシステムの主な特徴として、

①従来の磁気光学顕微鏡が何れも水銀ランプやハロゲンランプなどの光源を用いた通常の明視野顕微鏡法をベースとして、また冷却CCDなどを用いて磁束の二次元分布像を観察するのに対し、開発したシステムではレーザーを光源としてガルバノメータによりレーザービームを二次元走査することにより1画素ごとの信号を検出している。

②レーザー光検出部を2つの検光子とフォトダイオードを有した差動型検出器の構成にしているため、データの積算や平均化などの処理を一切することなく5 μT（テスラ）程度の磁気感度を達成している。また、この構成のため磁束の向きや大きさを直接反映した信号を得ることが可能である。

③レーザービームを試料表面上で走査させながら磁気光学信号を検出するため、試料内の特定の位

置にレーザービームを固定することで、デバイス内の局所的な磁気シグナルを連続的に検出することが可能である。

④画素ごとのデータサンプリングを行うため、磁場変調、光変調法などを併用してロックイン検出することで、より高感度なイメージングおよび信号検出が可能。

などが挙げられるが、以下にその詳細について述べる。

まず構築したシステムであるが、図**1**にその概略図を示す。

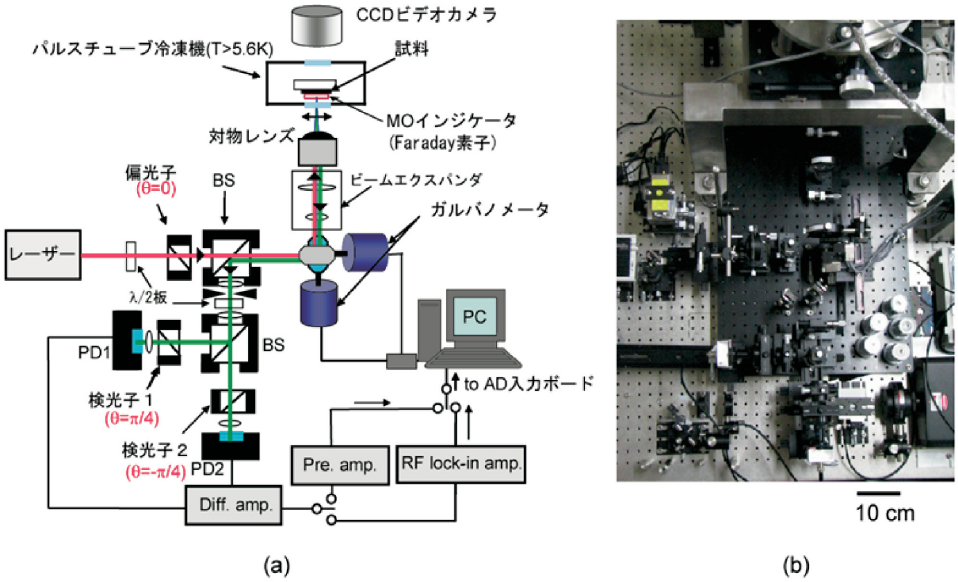


図**1**．レーザービーム走査型磁気光学顕微鏡システムの（**a**）概略図と（**b**）写真

このシステムでは光源として主に空冷式の**Ar**レーザーから出射される波長**514 nm**のレーザービームを使っている。このレーザービームはもともと直線偏光されているが、その偏光度を高めるため消光比の高い偏光子（グランテーラープリズム：消光比$10^{-6}$）を通している。その後ガルバノメータを介し、最終的に対物レンズを通して試料表面上にスポットとして照射される。このガルバノメータから対物レンズの間のレーザービーム走査光学系はビームエクスパンダー構成となっており、これによりレーザービームの広がり角が抑えられ、また開口数（**NA**）の大きな対物レンズを使用することにより**1** μ**m**以下のスポット径が達成されている。このときの照射スポット径は空間分解能と直接関係しており、またレーザー照射位置を固定して特定の領域で信号検出を行う際の位置精度の目安として重要なファクターでもある。なお、このとき対物レンズから出てくるレーザー光のパワーは**1 mW**程度である。

一方試料部であるが、観測試料の表面には金属反射膜付のファラデー素子（**Bi**置換型希土類鉄ガーネット膜）がスプリングによって押しつけられて密着して取り付けられており、この金属反射膜を介してファラデー素子を往復して直線偏光が反射してくる。この際、レーザー入射方向と同じ向きにガーネット内部への磁束の侵入があればレーザービームの偏光面がファラデー効果によってファラデー回転することになる。

磁気光学顕微鏡では、この$\theta_F$の変化をイメージングするが、従来の磁気光学顕微鏡では、偏光

面を直交配置（クロスニコル）にした一組の偏光子と検光子を使ってこのファラデー回転成分 $E\sin\theta_F$（$E$は検光子に入射するレーザーの振幅）を取り出している。この回転成分を電荷結合素子（CCD）やフォトダイオード（PD）で検出した場合、その光強度に比例した出力が得られるため、出力信号は$E^2\sin^2\theta_F$（$\sim\theta_F^2$）（ただし、$\theta_F\sim0$）、すなわち磁場強度の2乗に比例したものとなってしまう。よってこの出力値から直接的に磁場の大きさや方向を求めることはできない。

またこのクロスニコルでの磁気検出感度について少し検討してみると、消光比が最も高い$10^{-6}$を持つ偏光子、検光子の組を使った場合においても、検光子に入射する光はパワーにして$10^{-6}$程度がその偏光面に関係なく通過して検出器に入力されることになる。一方、ガーネット膜のファラデー回転能は、我々が現在使用している1.4 μm厚のもので約$3\times10^{-5}$ rad/Oe程度であり[2]、これを仮に$10^{-4}$ rad/Oeにしたとしても、10 Oe（エルステッド）（＝1 mT）程度の磁場を印加しない限り、観測すべき光の強度は漏れ光の強度より小さくて信号の検出が難しいことを意味している。よって従来の磁気光学顕微鏡の場合、より高感度な測定を行おうとすれば、イメージングの際に積算や差分等の方法をとる必要がある。

今回構築したシステムでは差動検出方式を採用することにより、ダイナミックにこの漏れ光の影響や、各光学素子表面で散乱され反射してくるノイズ光の影響を抑えることに成功した。以下にその詳細について述べる。

試料部で反射したレーザービームは入射光と同じパスを通って戻ってくるが、途中ビームスプリッターによりこの差動検出部へと導かれる。

この差動検出部は、光学的には分割比50：50の無偏光ビームスプリッター（BS）と2組の検光子とフォトダイオードからなっており、これら検光子の偏光面は偏光子の偏光面に対してそれぞれプラス45度、マイナス45度だけ傾けた状態で固定されている。この2つのフォトダイオードの電流出力を差動増幅器にかけて増幅した後、ADボードを介してパソコンにデータとして取り込んでいる。

この際の差動増幅器からの出力は、簡単な計算を行えば$E^2\sin2\theta_F$、すなわち$\theta_F$（$\theta_F\sim0$）に比例することがわかる。このことは、出力信号が直接磁場の大きさおよび方向をも反映したものになることを意味している。

実際のイメージング時のデータ取得については、積算、平均化などは一切行わずにAD入力ボードを使って2 μsもしくは10 μs毎のサンプリングを行っている。よって、イメージングに要する時間は500×500ピクセル時の観察で約1秒もしくは5秒程度である。現在モーター駆動のガルバノメータを使用しているため、それほど高速のイメージングを行うことはできないが、X方向走査用のガルバノメータを共振駆動タイプに変更することにより、イメージング時間を極端に短縮することも可能である。

以上述べてきたように、このシステムを使えば磁束の空間分布をその方向も含めて観察することが可能である。図2に実際に$YBa_2CuO_{7-\delta}$（YBCO）薄膜ストリップライン（線幅300 μm、膜厚200 nm）に1 Aおよび3 Aの電流を印加した際にストリップラインの周辺に発生する磁場を観察した結果を示す。ストリップラインの周りに発生した回転対称の磁場分布が確認できる。なお、この磁

気光学イメージは500×500ピクセルのデータから成っており、画素データの取得はレーザービームをガルバノメータでXY方向にラスタースキャンさせる途中の2 μs毎の瞬時データを取り込むことにより行った。全体のイメージの取得に要した時間は約 1 秒である。また、冷却試料の測定では、クライオスタットの振動の影響がノイズ源となるが、室温の試料に対する磁気検出感度は、平均化などの処理を一切行わない条件下において約5 μTを達成している[1]。

また、本システムの特徴の一つである局所的な磁気シグナルの観察であるが、このシステムではガルバノメータを使ったレーザービームのスキャン方式を採用しているため、観察される 2 次元イメージとガルバノメータのスキャンプログラムの座標を照合することにより、磁気光学イメージ上の希望する任意の場所にレーザービームの照射位置を固定して、その場所での局所的な磁気シグナルを連続的に観察することが可能である。その一例として図 3 に単一のSQUIDを有するジョセフソン・ボルテックスフロー型トランジスタを使った実験結果を示す[3]。測定では3×3 μm²のループ面積を持つSQUIDの周辺に設けたコントロール電流ラインにパルス電流$I_C$を印加し、SQUIDループ内に発生する磁束の観察を、このループ内にレーザービームを固定した状態で連続的に行った。この際、このデバイスのコントロール電流－SQUIDフロー電圧特性から予め、コントロール電流3 mAに対し 1 つの磁束量子がSQUIDループ内に発生することが観測されており、図3bに示す$I_C$=3 mA、6 mAのパルス高をもつ電流を印加した際のシグナル変化はそれぞれループ内に 1 個、2 個の磁束量子が発生したことを示している。

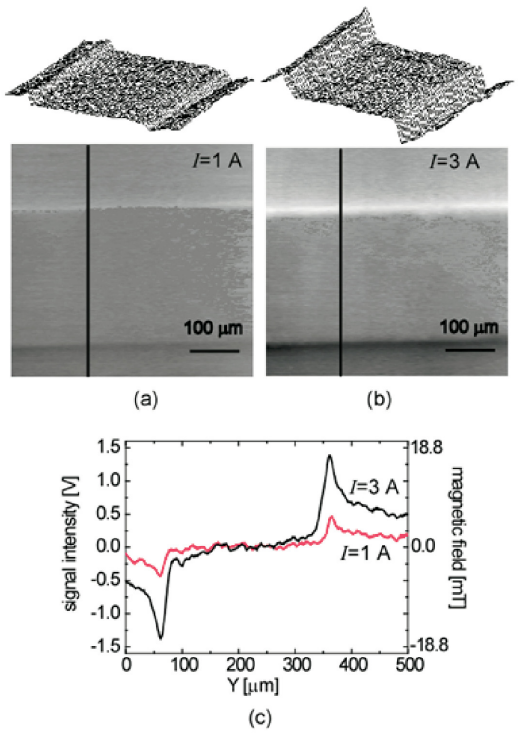


図 2．YBCOストリップラインに電流を印加した際に発生する磁場分布。（a）電流1 A、（b）電流3 A印加時。（c）各挿入ラインに沿った磁場分布。

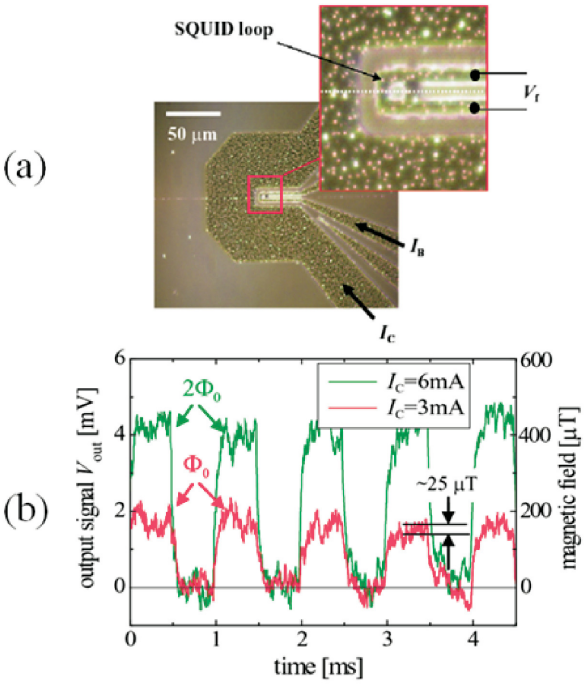


図 3．（a）YBCO-ジョセフソン・ボルテックスフロー型トランジスタ。（b）コントロール電流をパルス的に流した時のSQUIDループ内の磁気光学シグナル。

またこの局所的なシグナル検出において、その検出速度は高速デバイスなどへの応用を考える際重要であるが、現在使用している差動増幅器の帯域が30 MHzであり、この帯域によって制限され

ている。しかしながら、ファラデー素子自体の応答性はピコ秒程度とかなり高速であり、今後光検出系の高速化を行うことにより少なくとも**1 GHz**程度の高速信号の取り扱いは可能になると考えている。

最後に、より高感度なイメージングを行う上で、本システムではロックインアンプを利用した交流変調法による測定ができるのが大きな特徴の一つと言える。これは従来の**CCD**を使った **2** 次元画像取得法では不可能で、このシステムでは個々のピクセルデータを順次読み込むためこのロックイン検出が可能となる。またこの交流変調法には磁場変調、光変調などを使うことが可能である。図 **4** にその一例としてジョセフソン・ボルテックスフロー型トランジスタのコントロール電流ラインに変調周波数**40 kHz**、振幅**3 mA**の電流を流し、コントロールラインの周辺に生じる変調磁場を観察した結果を示す。従来の直流電流の印加では**100 mA**近く電流を流さないとこのような発生磁場の分布観察はできなかったが、このロックイン検出により僅か**3 mA**の印加電流でも、発生する磁場分布の様子、さらに詳細にはライン括れ付近に集中した磁束やジョセフソン粒界接合部に侵入した磁束の観察もできていることがわかる。

以上、今回構築したレーザービーム走査型磁気光学顕微鏡の特徴について紹介させていただいたが、本システムのより詳細については参考文献をご参照いただきたい。

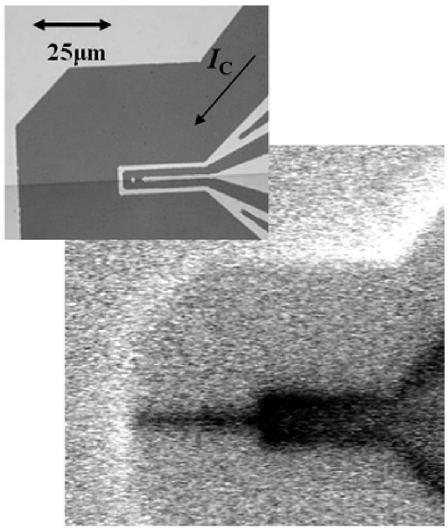


図 **4**．周波数**40 kHz**、振幅**3 mA**の交流変調電流を印加した際に観測された周辺磁場分布

## 【参考文献】

［1］**H. Murakami, M. Tonouchi, " High-sensitive Scanning Laser Magneto-Optical Imaging System " Rev. Sci. Instrum.** 81（**2010**）**13701.**

［2］**H. Murakami, K. Ueno, I. Kawayama, M. Tonouchi, " Development of a prototype laser magneto-optical imaging system " Supercond. Sci. Technol.** 19（**2006**）**941.**

［3］**H. Murakami, R. Kitamura, I. Kawayama, M. Tonouchi, " Magneto-optical detection of single flux quantum signals in superconducting quantum interference device " Appl. Phys. Lett.** 95（**2009**）**192503**