

## 【隔月連載記事】

### 高温超電導 SQUID

住友電気ハイテックス株式会社  
開発事業部技師長 糸崎秀夫

1. はじめに (「超電導 Web21」2001 年 5 月号掲載)
2. SQUID の原理 (「超電導 Web21」2001 年 7 月号掲載)
3. 高温超電導 SQUID キットの開発 (「超電導 Web21」2001 年 9 月号掲載)
4. 高温超電導 SQUID の実用化 (「超電導 Web21」2001 年 11 月号掲載)

#### 1. はじめに

高温超電導 SQUID について 4 回にわたってご紹介します。SQUID は Superconducting Quantum Interference Device (超電導量子干渉素子) の略称です。超電導リングの穴には、量子化した磁場が磁束として形成されます。この現象を利用した超電導電子素子が SQUID と呼ばれるもので、超高感度な磁気センサとして利用できます。詳しいセンサの構造などは次回に紹介します。今回は、まず SQUID の性能とその応用の可能性についての概要をご紹介します。

現在すでに利用が進み始めている SQUID の利用分野は、物性研究などに利用する帯磁率評価と脳磁場の計測をあげることができます。いずれも SQUID 以外の磁気センサでは検出が困難な数十フェムトテスラ ( $10^{-14}$  Tesla) レベルの微小磁場の計測です。

これらの装置には SQUID として実績のあるニオブ系超電導体を用いたセンサが使用され、液体ヘリウム温度にて運転されています。液体ヘリウムが高価であることから、運転費用がかかることや、超極低温媒体の取り扱いの難しさなどの課題を抱えています。しかし高温超電導体の発見により、安価で簡便に利用が可能な液体窒素による冷却で簡単に動作する高温超電導 SQUID の開発が進み、これまであきらめていた微小磁場計測を用いた新しい分野における SQUID の利用検討が進んでいます。

SQUID の磁気に対する感度は、磁場分解能として定義され、高温超電導 SQUID では、サブピコテスラ ( $10^{-13}$  Tesla) の磁場程度の磁場分解能があります。これは、およそ地磁気の 1 億分の 1 以下と大変微小な磁場となっています。各種磁場と代表的な磁気センサの検出領域を図 1 に示します。SQUID の検出できる磁場がいかに小さいかお分かりいただけたと思います。この超高感度な磁気センサを用いると、従来できなかった微小磁場検出を利用した計測が可能となります。

SQUID はいろいろな分野に応用できます。まず、医療機器に関しては、脳磁診断のほか、心磁診断、肺磁診断、癌細胞の転移状態の検査などへの応用が検討されています。バイオ関連では、マイクロ磁気ビーズを用いた抗原抗体反応による免疫診断が検討されています。非破壊検査の分野では、航空機、原子炉などの構造体の疲労や傷検査、建築物中の鉄筋などの検査、また食品や工業原料などへの磁性体不純物混入などの検討が進んでいます。半導体産業においては、半導体結晶の引き上げ時にできる不純物分布の検査や IC 配線の非破壊による検査の可能性が検討されています。さらに、地質調査や地殻変動調査への可能性も精力的な検討が進んでいます。(図 2 参照)

このように、SQUID が液体窒素温度で簡便に動作が可能となり、大学の研究室での評価装置から脱皮して、工場や屋外など広い応用分野への適用が可能となったことで、その利用範囲が大幅に広がっています。以降、高温超電導 SQUID の開発状況や応用機器開発の最前線について、述べてゆくことにします。

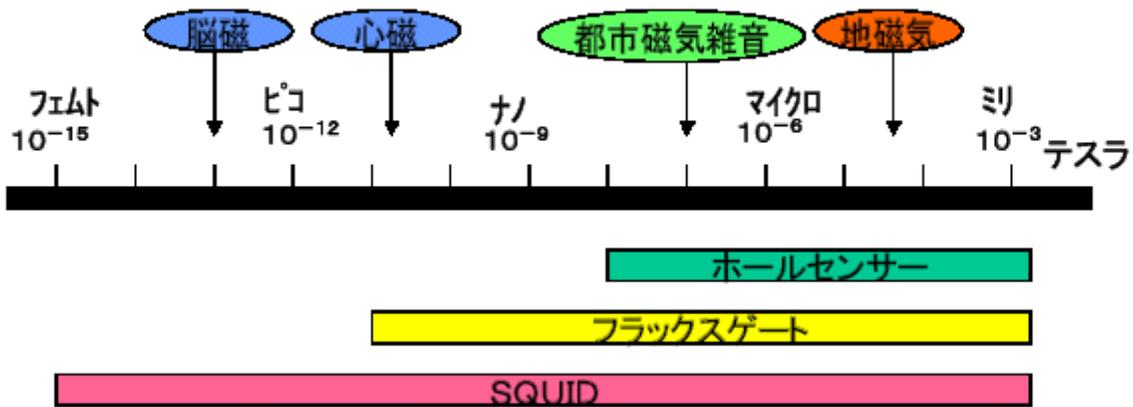


図1 代表的な磁気センサの感度



図2 SQUID の応用分野

## 2. SQUID の原理

SQUID は超電導量子干渉素子の略称です。超電導体では、すべての超電導電子がコヒーレントな状態になります。そこで図 3 のような超電導リングをつくると、そのリングの中には、電子の位相をそろえるために、リングに流れる電流が飛び飛びの値しかもてなくなる量子化現象が起こり、リングの中に入る磁場を量子化することになります。この量子化した磁場を磁束とよびます。最小の磁束  $\Phi_0$  は  $2.07 \times 10^{-15}$  ウェーバです。この現象を利用した超電導デバイスが SQUID です。今回は、SQUID の基本構造、基本動作と磁気センサとして利用するために必要な電子回路について解説します。SQUID は図 3 のように超電導リングにジョセフソン素子を 2 つ組み合わせた構造です。この素子にバイアス電流を流すと図 4 のような電流 - 電圧特性を示します。

中心部の水平な部分は、電流が流れているにもかかわらず電圧が発生していない超電導状態を示す領域です。電流をそれ以上流すと、ジョセフソン接合部の超電導が破れはじめ、電圧を発生します。SQUID を磁気センサとして利用するには、外部からの磁気信号に反応して SQUID に電圧を発生させる必要があるため、このジョセフソン接合の臨界電流値をわずかに超えたバイアス電流を素子に加えた状態で SQUID の出力電圧を計測します。SQUID は図 5 に示すように磁場を加えることにより、SQUID の電圧が正弦波状に変化しているのがわかります。この 1 周期が最初に述べた量子化磁束  $\Phi_0$  に相当します。このように SQUID は磁場に対して非線形な動作をします。しかし SQUID を磁気センサとして利用するためには、磁気に対して線形な応答が必要となります。

そこで、図 6 に示すように SQUID 素子に外部からの磁場を相殺する磁気を与えるフィードバックコイルとその電子回路を設けます。するとコイルに流れる電流を計測すると、外部磁場とコイルの電流は比例することになり、外部磁場を計測することができるようになります。磁場を固定することから、この電子回路を FLL(Flux locked loop)回路と呼びます。磁場による SQUID 出力電圧の変化は大変小さいので、超低ノイズのアンプを用いたり、商用の 50Hz または 60Hz のノイズまたは環境のノイズを除去するためにノイズフィルタをいれるなどの工夫をして用いる必要があります。この電子回路は実際には特殊な回路をいろいろ組み合わせることで、SQUID の超高感度な磁気センサとしての能力を発揮するようにできます。現在では、ニオブ系や高温超電導系などそれぞれの SQUID 素子に対応した電子回路が市販されるようになり、簡便に SQUID を磁気センサとして利用できるようになっています。

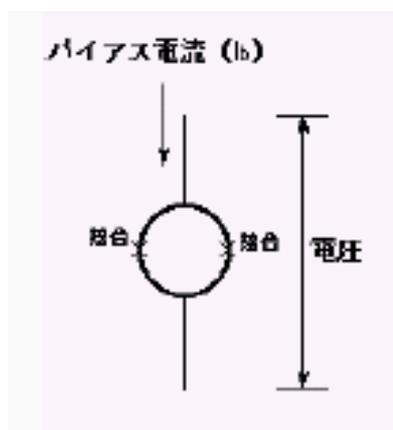


図 3 SQUID の構造

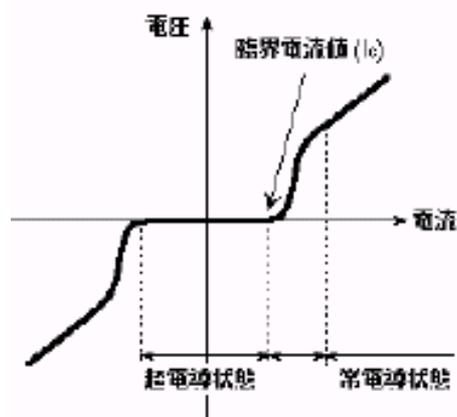


図 4 SQUID の電流-電圧特性

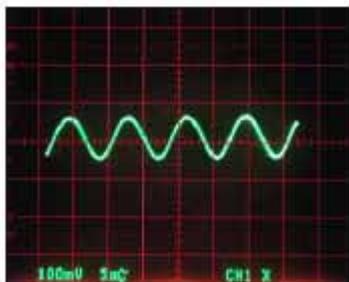


図5 SQUID の磁場 - 電圧特性  
(X:0.68  $\mu$ /div. Y:5 $\mu$ V/div.)

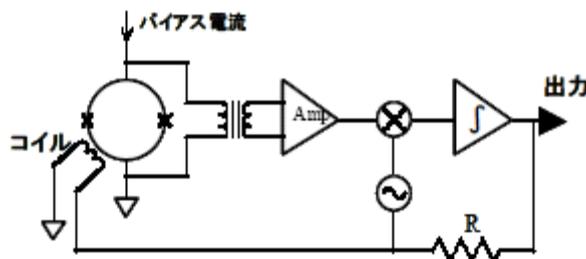


図6 SQUID の駆動電子回路ブロック図  
(FLL 回路)

### 3. 高温超電導 SQUID キットの開発

高温超電導 SQUID キットの電子回路は、もともと住友電工で試作した高温超電導 SQUID を評価するために用いていた電子回路である。SQUID 素子の開発では、試作した素子の評価が当然必要となるが、開発当初高温超電導 SQUID を駆動させる電子回路は一般に市販されていなかった。そのため、SQUID 素子の開発には SQUID 駆動電子回路の開発も必要だったのである。

SQUID の駆動には、素子に微弱なバイアス電流を流し、超電導接合にわずかの電圧を発生させながら、SQUID の出力電圧をモニターする必要がある。SQUID の出力信号がマイクロボルトと小さいため、信号増幅回路が必要となる。また SQUID にとらえられている磁束を一定とするための磁束ロック回路が必要であり、発信器やロックインアンプも高価なものを用意する必要があった。このように計測機器をそろえていくと、電子機器が机2つ分山積みになってしまった。これらの機器を接続するケーブルはまるで蜘蛛の巣のような状況であった。たしかにこれで SQUID はなんとか動作したものの、シールド線を用いても雑音を十分におさえることが難しく、低雑音で SQUID の特性を十分に評価できる機器構成ではなかった。低ノイズアンプメーカーなどへ SQUID 駆動電子回路の開発試作を相談したが、数千万円の見積もりが出てきたので、外注はあきらめざるを得なかった。そこで専用の SQUID 駆動電子回路の独自開発に踏み切ったのである。電子回路は秋葉原で買ってきた自作プリント基板を利用した手作りのものだった。プリアンプだけはドイツ製の高価なものを利用した。その結果、机2つ分の電子機器がなんと弁当箱1つにおさまってしまった。大変な小型化である。手作りとはいえ、雑音を拾う引き回しケーブルの大幅な減少で、ノイズも低減して、高温超電導 SQUID 素子の評価が可能になったのである。この手作り回路は SQUID 素子開発に大活躍した。SQUID 素子の開発も進み、電子回路についても、雑音をキャンセルするためのバイアス電流の交流化などの技術や、独製超低ノイズプリアンプを自作のステップアップトランスと低ノイズプリアンプの組み合わせで置き換え可能とするなどの要素技術の開発をあわせた回路ができあがった。

このころになると、高温超電導の SQUID について、展示会、学会、大学などでデモをする機会も多くなり、簡単に持ち運びのできる回路を作っておくと便利だとの思いもあって、コンパクトなものに仕上げ、社外に持ち出し高温超電導 SQUID のデモンストレーションをした。すでに高温超電導 SQUID は超高感度磁気センサーとして開発が進み、いろいろな用途への展開が考えられ始めていた。我々も医療診断や非破壊検査などへの応用を社内ですべて独自に開始していた。しかし、我々だけではできないことに限界があり、より多くの研究者に高温超電導 SQUID を利用した評価技術の開発を進めてもらいたい思いが募っていた。

そこで、社内で使っている SQUID の評価装置を外部の研究者にも提供する検討を開始した。これまで数年間にわたって蓄積した評価技術の集大成として、よりコンパクトで性能のよいものをつくることを目指した。これが、現在「高温超電導 SQUID キット」として販売しているものである。簡単に高温超電導 SQUID の動作実験ができるよう小型の液体窒素容器と磁気シールドもおまけにつけたので、購入後オシロスコープと液体窒素を用意すれば、すぐに SQUID 動作は確認できる。このキットでは、デモ用の簡易磁気回路と微小磁場計測用の高性能駆動回路の 2 つの回路を持つ為、学生実験などとともに、微小磁場計測を利用した SQUID の応用開発研究を進めることができる。

このキットははじめて SQUID を手にする入門者用であることから、あえて電子回路の自動化は行わずに、マニュアル操作とし、SQUID の動作を身をもって体験できるようにし、自由度のあるセットにした。より多くの研究者に使ってもらうために発売に当たっては、新聞発表や学会誌への技術情報提供、また超電導関連の学会展示会への出展などを行った。

ところが、超電導研究者に関心はもってもらえたものの、一台も導入いただけない日々が続いた。結局第一号機を大阪大学の小林猛研究室に納入したのは、発表からすでに半年以上もたった 1996 年の年末であった。その後大学を中心に徐々に導入頂けるようになり、現在、国内ではすでに大学、国立研究所、民間企業などで 50 台以上の SQUID キットをご利用いただいております、高温超電導 SQUID の利用人口が着実に増加していることがわかる。

発売からすでに数年が経過しようとしており、2 台目、3 台目を導入される研究室が出てきている。さらに、簡便な利用ができるようパソコンによる自動調整、データ取り込み、データ処理の要望が大きくなり、多チャンネル SQUID 計測装置で用いていた自動計測回路を基にパソコン制御型の高温超電導 SQUID の販売も開始している(現在の製品名:SEIQUID II)。これらのキットを利用した SQUID 応用分野の開拓が着実に始まっており、これまで難しかったいくつかの計測が高温超電導 SQUID により可能となってきている。



写真 1 高温超電導 SQUID キット(住友電気ハイテックス製)  
現在、国内ですでに 50 台以上が大学、国研、民間企業で使用されている。  
(URL:<http://www.shs.co.jp/squid/>)

#### 4. 高温超電導 SQUID の実用化

高温超電導体が発見されてからすでに 15 年が経過した。発見当時に期待された応用機器がどこまで実現しているのだろうか。高温超電導 SQUID についてはどうであろうか。もう一歩でイエスと言う状況になっている。どんな新材料でも、実用的に用いられて、はじめて一人前である。そこで、今回は、液体窒素温度で動作する高温超電導 SQUID の実用化を目指した最新の開発状況をご紹介します。

## (1)非破壊検査

金属の亀裂などの非破壊検査に SQUID を利用しようとする検討がドイツで進んでいる。検査対象物に電磁波を照射し対象物に誘導電流を流すと、傷などによる誘導電流分布の乱れが生じ、電流による磁場を非破壊で計測することで、傷を検知することが可能となる。ドイツでは航空機の検査や橋梁検査などで有効性が実証されている。非破壊検査は、航空機などのより高い信頼性確保の観点から期待されている。また、原子炉など大型プラントの老朽化診断への適用も期待されている分野である。

## (2)医療診断装置

SQUID は金属系超電導 SQUID の時代から生体磁気計測への応用研究が行われ、300ch の大規模脳磁診断装置が、一部実用化しているが、運転に必要な液体ヘリウムのコストが高いことなどから、必ずしも広く普及するには至っていない。一方高温超電導 SQUID においては、心臓磁場計測の研究が進められている。我々は、胸部の 32 箇所と同時に微小磁場計測を行い、胸部直上の磁場分布をリアルタイムに計測する装置を試作した。最近では、磁気シールドを用いずに心臓磁場の計測をする試みが進んでいる。大阪大学では、高温超電導 SQUID を複数もちいて、環境磁気ノイズを電氣的にキャンセルし、磁気シールドレス心臓磁場計測システムを開発した。(写真 2)この心磁計の実用化により、心臓疾患の非侵襲検査が進展することが期待できる。

## (3)半導体回路検査装置

IC 回路配線の断線やショートなどの不良解析として、SQUID 顕微鏡とレーザー顕微鏡を組み合わせたレーザー-SQUID 顕微鏡が注目されている。1 ミクロン程度にしばったレーザースポットを IC 上で走査し、発生する光電流による磁界を SQUID で計測する方法である。位置分解能がレーザー光により決定されるため、1 ミクロン程度の高い位置分解能が得られる。すでに IC 配線検査への試みが半導体メーカーで始まっており、従来難しかったウェハ段階での検査、非配線、非接触でも電氣的な検査が可能なることから、実用化が期待されている。(写真 3)また、Si 単結晶の成長時に発生する欠陥や不純物濃度の微小な揺らぎを、レーザー-SQUID 顕微鏡で鮮明に分析した結果がドイツより報告されており、半導体ウェハ製造ラインへの適用が期待されている。

## (4)地質調査機器

地中に誘起した電流の減衰を磁氣的に計測することで、地質電気伝導度の分布を求めることができる。従来は、誘導コイルによる計測を行っていたが、低周波感度が低く深部探査に問題があった。そこでドイツ、オーストラリア、日本で、SQUID を利用する地質調査機器の開発が進んでいる。屋外、地磁気下での測定など、課題も多いが、SQUID の優位性はフィールドテストですでに実証され、野外使用可能な可搬式機器開発が進んでいる。(写真 4)この装置開発により、地下資源探査の精度向上や、地震や火山地帯の地質調査など災害対策への応用も期待されている。

## (5)金属混入物検査

SQUID が超高感度な磁気センサであることから、各種材料へ混入した微小な金属粉検出が可能となる。磁性体では、磁化して検出感度を上げる方法を取り、非磁性体でも誘導電流を誘起することで、磁気を発生させることが可能である。工業原料への金属粉混入は、製品の品質の低下をまねくことから、原料検査は重要である。我々は、銅線に混入した微小な鉄微粉を高速で検査できることを実証した。(写真 5)この方法は、工業原料、医薬品などへの混入物検査に応用が可能である。また、安全性が要求される食品や衣料品への金属物混入検査への展開も大いに期待されている。

以上のように最近検討が活発化している高温超電導 SQUID の応用機器について列挙した。開発

には、SQUID センサメーカー、検査機器メーカー、検査機器ユーザーの連携した開発体制や、大学、国研の支援による実用化の加速が必要であり、関係各位のご協力に期待する。

最後に、「高温超電導 SQUID」の記事を掲載させて頂いた。高温超電導の応用研究進捗の一端がご理解頂ければ幸いです。本記事掲載の機会を与えて頂いた ISTECS および超電導 Web21 編集局の皆様に深く感謝します。



写真 2 磁気シールドなしで心臓磁場診断が可能な高温超電導 SQUID を用いた心磁計  
(提供：大阪大学)

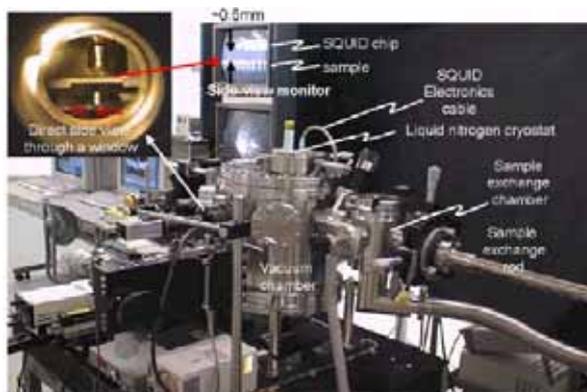


写真 3 LSI 検査用レーザー-SQUID 顕微鏡 (提供：NEC エレクトロニクス)



写真 4 地質調査用高温超電導 SQUID  
(提供：金属鉱業事業団)



写真 5 銅線中铁微粉混入検査装置  
(提供：住友電気工業)