

脳磁計用 SQUID 磁束計の実装・評価技術の開発

Development of Assembly Technology and Evaluation Method of SQUID Gradiometers
for MEG Systems

河 合 淳^{*1} 久 保 田 寛^{*1} 上 原 弦^{*2}
KAWAI Jun KUBOTA Hiroshi UEHARA Gen

1996年より、横河電機と金沢工業大学の産学連携において、脳磁計(MEG: magnetoencephalograph)システムの開発を行ってきた。特に2002年からは将来の量産化を見据えた超伝導量子干渉素子(SQUID: superconducting quantum interference device)の実装技術の開発を推進し、2006年の金沢事業所の操業開始とともに本格的に当社への技術移転を進めた。本稿では、脳磁計用SQUIDの内製化に関し、実装技術と評価技術を中心として報告する。

We have been developing magnetoencephalograph (MEG) systems through industry-academia collaboration with Kanazawa Institute of Technology (KIT) since 1996. In particular, we have been carrying out the development of assembly technology of superconducting quantum interference device (SQUID) focusing on future mass production since 2002, and transferring manufacturing technology from 2006 with the launch of the Life Science Business Headquarters in the same year. This paper describes mainly assembly and evaluation techniques of SQUID gradiometers for the in-house manufacturing of the MEG systems.

1. はじめに

ヒトの脳活動において発生する微弱な磁場を検出し、脳疾患診断や脳機能研究に役立てる脳磁計(MEG: Magnetoencephalograph)⁽¹⁾に使われている高感度なSQUID(Superconducting Quantum Interference Device)磁束計は、磁場を捕捉する検出コイルと、その磁場を電圧に変換するSQUID本体から構成されるが、目的に応じてそのサイズや形状、方式が異なる。当社のMEGに採用している磁束計は、一次微分同軸型SQUIDグラジオメータ(以下単にグラジオメータ:Gradiometerと表記)と呼ばれるもので、互いに逆相に巻かれた同軸の検出コイルによって脳磁場以外の外来ノイズを除去し、頭の表面に鉛直な方向の磁場の差分成分(ΔB_z)を検出することができる。この方式のメリットは、「湧き出し・吸い込み」といった磁場の方向が直感的に分かり易いこと、深い部分からの信号を取り易いこと、超伝導検出コイルの作製とSQUIDチップとの接続が比較的容易なことなどが挙げられる。

本稿では、産学連携の中で金沢工業大学において開発され、当社に技術移転を行っている脳磁計用SQUID磁束

計の内製化における実装技術と、評価技術を中心に報告する。

2. SQUID チップの設計と作製

SQUIDとしては、一般的な磁束伝達方式のdc-SQUID(以下、単にSQUID)を採用した。図1に、磁束伝達方式の模式図を示す。この方式の利点は、形状の異なる検出コイルを接続して磁束計を構成できるところにある。SQUIDは、心臓部となるジョセフソン素子、シャント抵抗、SQUIDループ、入力コイル、帰還コイルで構成される。このうちSQUIDループは、二つのワッシャーを差動

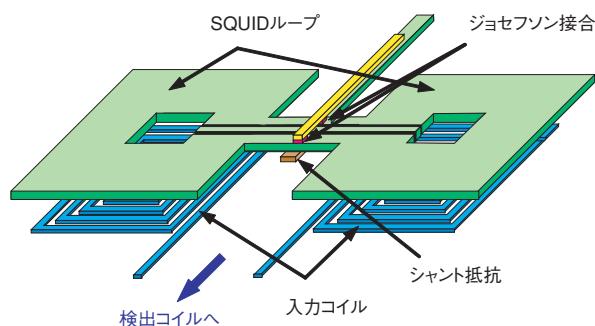


図1 磁束伝達方式 SQUID の模式

*1 ライフサイエンス事業部 MEGセンター開発Gr.

*2 金沢工業大学 先端電子技術応用研究所

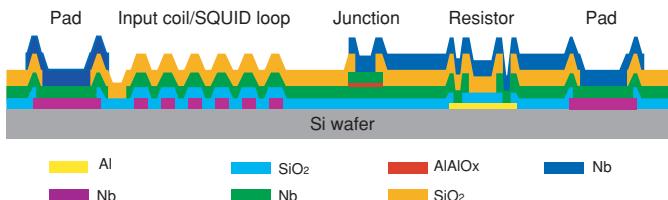


図2 SQUIDチップ断面図

に設計することで、固有ノイズに影響するループインダクタンスを低減させると同時に、ループに直接入る磁場をキャンセルする構造となっている。また、帰還コイルを入力コイルにカップリングさせることで、磁束計を高密度に配置した際に心配されるクロストークの低減を図っている。

SQUIDは、スパッタリングやフォトリソグラフィを用いた薄膜プロセスによって、Siウェハ上に作製される。図2に、SQUIDチップの断面構造を示す。ジョセフソン素子には信頼性の高いNb/Al-AlOx/Nbトンネル接合を用い、抵抗素子にはアルミを用いた。コイルおよび配線にはNbを、また層間絶縁にはSiO₂を用い、両者共バターニングはRIE(Reactive Ion Etching)で行っている。薄膜総数は7層で、チップのサイズは2.5mm□である。図3に、完成後、切斷前のウエハを示す。ウエハ上には、約400個のSQUIDチップとTEG(Test Element Group)が作製されている。

作製したSQUIDからは、直接読み出し型FLL(Flux Locked Loop)による動作に十分対応できる大きな出力電圧を得ており、また入力超伝導ショート時の固有磁束ノイズも、生体磁場計測に十分な低ノイズを実現している。このSQUIDチップを検出コイルと超伝導接続し、グラジオメータを構成する。

3. グラジオメータの実装

金沢事業所内のファクトリーサイトにグラジオメータ実装用のクリーンルームを設置し、将来増産時における拡張性を考慮して、グラジオメータ実装・組立ラインを構築した。クリーンルーム内は温湿度が管理され、静電気によるジョセフソン接合の破損などを防ぐために、作業台などには静電気対策を施している。

図4に、グラジオメータの実装・組立行程を示す。先ず、検出コイルとSQUIDチップ間の超伝導接続を行うための中継Nb端子および信号線用の銅端子が、予め配置されたガラスエポキシ基板上にSQUIDチップをマウントし、接着する。同時に、磁束トラップ時にSQUIDを常伝導に戻すための局所加熱用ヒータ抵抗を半田付けする。その後、SQUIDチップと銅端子はAl線で、一方SQUIDチップの入力コイルと基板のNb端子はアニールしたNb線を用いて、それぞれボンディング接続を行う。

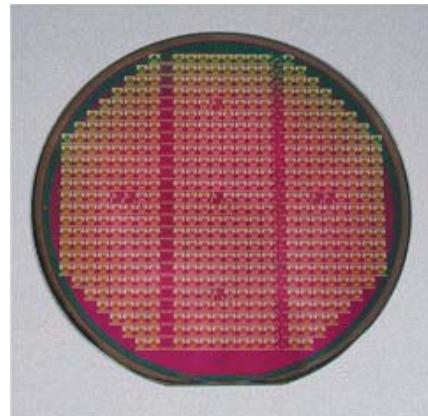


図3 完成したウエハ(SQUIDチップ切断前)

ボンディング接続を終えると、実装部の保護のためエポキシ系の樹脂をポッシングし、ベーキングによって硬化させる。この際、モールド樹脂内部に気泡が残存し、硬化後に空洞が発生すると、冷却時に空洞に浸透した液体ヘリウムが昇温時に膨張・破裂を起こす危険性があるため、ベーキング前に脱気を行っている。尚、極低温下では、モールド材と実装部品の熱膨張率の差が大きいと容易にボンディング線の断線が発生するが、ここで用いているモールド材は、金沢工大における多くの実装実績を経て信頼性を確認したものであり、温度サイクルにおける断線は非常に少ない。

完成したSQUIDチップ実装済基板には、液体窒素での冷却と室温での乾燥を繰り返す温度サイクルを与え、端

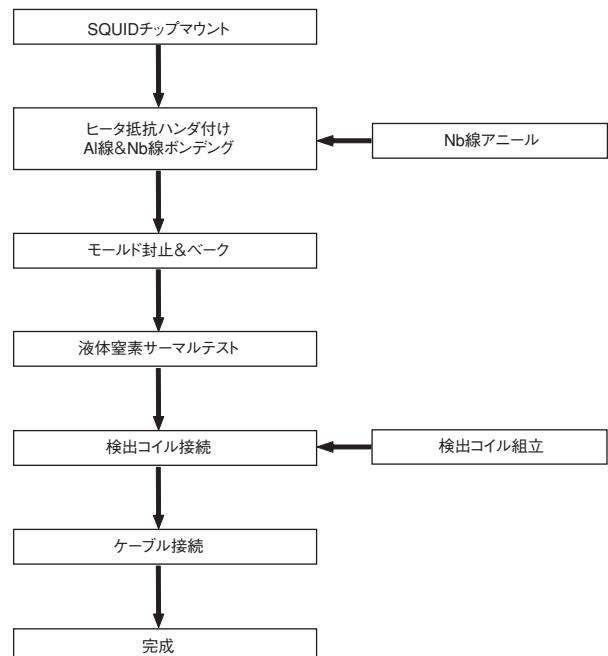


図4 グラジオメータ実装・組立工程

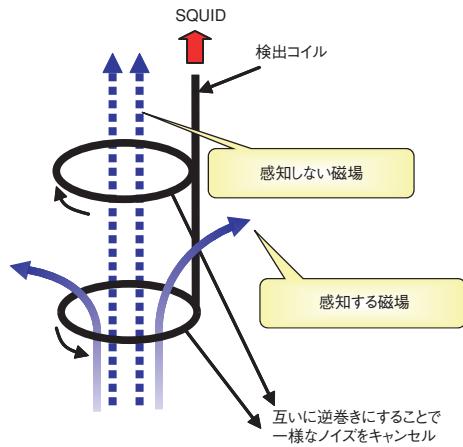


図5 検出コイル

子間の導通チェックを通じて、ポンディングの断線やSQUIDチップ内部の回路の断線のチェックを行い、良品をスクリーニングする。現在のところ、断線の有無に関しては良好な良品率を得ている。尚、液体ヘリウム中以外での評価手法として、この導通チェックは非常に有効であるが、今後は入力コイルのインダクタンスなど、素子パラメータを事前にチェックする方法を検討している。

一方、同軸型差分検出コイルは、円筒状のボビンにNb線を同軸状に巻いて作製する。図5に、検出コイルの模式を示す。互いに逆相に巻かれたコイルによって逆向きの遮蔽電流が誘起されるため、遠くからくる一様な外来性ノイズはキャンセルされ、コイルに近い信号源からの磁場の差分を検出することができる。二つのループ間の距離はベースラインと呼ばれ、デュワ(グラジオメータが実装された液体ヘリウム容器)の断熱層の厚さ、および頭皮から脳内信号源までの距離を考慮して、50 mmに設定している。また、検出コイルの直径は、有意なダイポール情報を損失することなく測定できる空間分解能を考慮して、15 mmとなっている。

この検出コイルを先のSQUID実装済基板上のNb中継端子に接続し、信号ケーブルを接続してグラジオメータが完成する(図6)。ケーブルの途中には、SQUIDへの高周波ノイズの混入を防ぐためのフィルタが挿入されてい



図6 完成したグラジオメータ

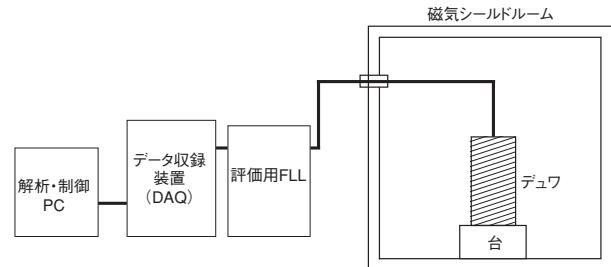


図7 グラジオメータ評価用システム構成

る。また、デュワから室温へ出る部分は高抵抗線用い、室温側からの熱侵入を低減してヘリウムの蒸発量を抑える工夫を行っている。

4. グラジオメータの評価

完成したグラジオメータは液体ヘリウムによって冷却され、特性評価を通じて選別が行われるが、評価作業の効率を考慮して、一度に多くのグラジオメータの冷却が可能な評価用大型デュワを開発した。このデュワ内に作製したグラジオメータを挿入し、先ず液体窒素を用いて予備冷却を行う。予備冷却は、高価な液体ヘリウムを注入する際の消費量を抑える目的で行う。その後、液体窒素を抜き、液体ヘリウムを注入して本冷却を行う。評価シーケンスとして、「グラジオメータ取り付け→予冷→本冷→評価→昇温→グラジオメータ取り出し」という一連のサイクルを確立した。

図7に、グラジオメータ評価システムの構成を示す。グラジオメータを冷却したデュワは、地磁気や外部磁気ノイズの影響を避けるため、磁気シールドルームに設置される。グラジオメータに評価用のFLLを接続し、リモートコントロールによって、磁気シールドルームの外から動作させる。グラジオメータからの信号は、12 bitのAD変換器によってデジタル変換され、データ収録システム

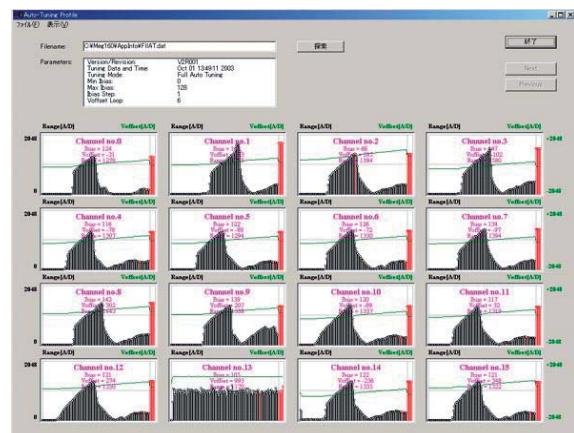


図8 バイアス電流一出力電圧プロファイル

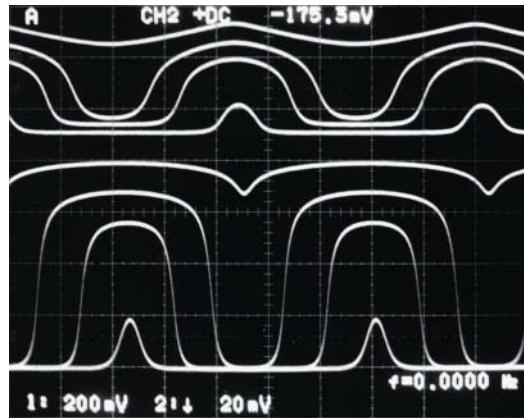


図9 グラジオメータの磁束一電圧特性

(DAQ)に収録される。得られた信号は評価用ソフトウェアを用いて解析し、グラジオメータの特性を評価する。

図8に、16個のグラジオメータのバイアス電流(横軸)と出力電圧(縦軸)のプロファイルを示す。このプロファイルによって、液体ヘリウム冷却時の故障を判断すると共に、SQUIDの最大出力電圧や最大臨界電流の評価を行う。例えば、この図では、Channel No.13において所望のプロファイルが得られていないことが確認できる。

図9に、グラジオメータの磁束-電圧特性を示す。横軸が磁束で縦軸が電圧である。この特性を観測することで、出力電圧値および磁束-電圧特性の周期が規定値の範囲内かどうかを確認すると同時に、最適バイアス電流を決定し、グラジオメータをFLL動作させ、感度校正を行う。感度とは、グラジオメータの出力電圧1ボルトが何テスラに相当するかという値である。機械的位置と電流値が保証された複数のコイルが作る磁場を、校正しようとするグラジオメータで検出し、その値とコイルが作る磁場とを解析的に比較し、最適値を探索することで行う。また、求めた校正值が正しいかどうかは、その値を用いて、逆にコイルの位置を推定することで確認する。その後、校正した感度を用いてノイズ(磁束密度分解能)を評価する。

図10は、複数のグラジオメータのノイズプロファイルを重ねて示したものである。MEGの仕様を満足させるために、ノイズ密度が白色雑音領域(100 Hz以上)で $5\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (図中赤破線)以下のものを良品と判断している。この図では、ほとんどのグラジオメータが目標値を満足していることが分かる。

また、実際のMEGシステムは磁気シールドルーム内に設置されるとはいっても、グラジオメータは磁気シールドルームの開閉時に侵入する地磁気はもとより、様々な種類の直流磁場に曝される可能性がある。この時グラジオメータの入力ループ(入力コイルと検出コイル)の臨界磁場(超伝導が破壊される磁場)が小さいと、大きな直流磁場によって超伝導が壊れ、その後超伝導に復活しても、グ

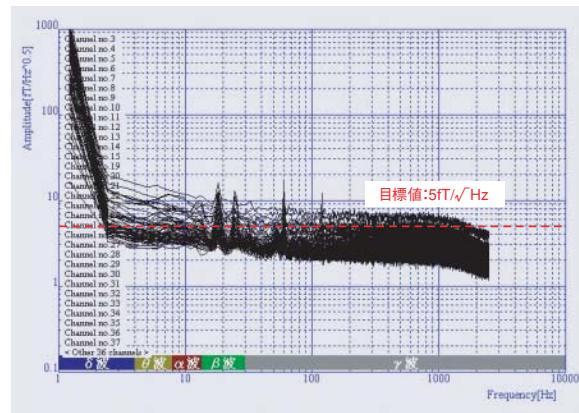


図10 ノイズプロファイル

ラジオメータには臨界磁場程度の残留磁場が残ることになる。この状態でグラジオメータをFLL動作させると、グラジオメータ出力にはしばしば電圧のジャンプ(ブラックスジャンプ)が発生し、安定な動作が得られなくなる。この現象を防ぐためには、入力ループが十分大きな臨界磁場を持つ必要がある。そこで、MEG使用時における様々な種類の直流環境磁場レベルを想定した臨界磁場の規定値を定め、グラジオメータ評価時に、規定値以上の臨界磁場を持つグラジオメータを良品として選別している。

ところで、グラジオメータの良否判定の最終基準となるノイズであるが、評価時に計測されるノイズはSQUIDの持つ固有ノイズ、FLLのプリアンプの入力ノイズ、デュワのサーマルノイズを含んでいる。現在の技術では、これら3種類のノイズはほぼ同レベルであり、個別に評価することは難しい。従って、グラジオメータのノイズとは、実は評価システム全体のノイズを示していることを認識しなければならない。

5. おわりに

以上、SQUIDチップの概要とグラジオメータの実装・評価技術について述べた。グラジオメータの構成材料には、一般的に流通している部材を多く用いているが、それらを極低温という特殊な世界で使用していることにこの技術の難しさがある。すなわち、半導体製造技術のように十分に確立された領域とは異なり、約300 Kの温度差に耐える実装技術に加え、液体ヘリウム中の評価技術など、工程上のノウハウの蓄積が重要な特殊技術であることを忘れてはならない。

参考文献

- (1) 下川原正博、田中博昭、風見邦夫、春田康博，“脳磁計測システムMEGvisionとその応用”，横河技報，Vol. 48, No. 4, 2004, p. 145-148