磁性体蓄冷材を充填した GM 冷凍機による SQUID の冷却と生体磁場の計測

藤本 修二*, 風見 邦夫, 高田 洋一
吉田 哲夫, 尾形 久直, 賀 戸 久**

超伝導センサ研究所 千葉県印旛郡印西町武西学園台 2-1200

* 現住所: ダイキン工業㈱ つくば市御幸が丘3番地

** 電子技術総合研究所 つくば市梅園 1-1-4

(1993 年 10 月 6 日受理)

Cooling of SQUID by a GM Cryocooler with a Magnetic Regenerative Material
and Measurement of Biomagnetism

Shuji FUJIMOTO,* Kunio KAZAMI, Yoichi TAKADA,
Tetsuo YOSHIDA, Hisanao OGATA and Hisashi KADO**

Superconducting Sensor Laboratory, 2-1200 Muzaigakuendai, Inzai, Chiba 270-13

* Present address: Daikin Industries, Ltd., 3 Miyukigaoka, Tsukuba 305

** Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono, Tsukuba 305

(Received October 6, 1993)

Synopsis :

To develop a small, light, and highly reliable cooling system for a Nb-based SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) magnetometer, we measured the magnetic noise produced by a Gifford-McMahon (GM) cycle cryocooler containing magnetic regenerative material, Er_3Ni , and calculated the magnetic field around the regenerator by integral computation. Both results showed that the GM cryocooler containing magnetic regenerative material such as Er_3Ni was able to be used for SQUID systems for biomagnetic measurement. The GM cryocooler with Er_3Ni was installed in a GFRP cryostat. Two SQUID magnetometers were mounted in this cryostat and the magnetic noise produced by the GM cryocooler was measured in a magnetically-shielded room. Intensity of the magnetic noise was about 40 pT p-p. It was about six times the value expected from the results measured under the earth magnetic field. So we eliminated the magnetic noise by digital filtering and magnetocardiogram (MCG) and auditory evoked magnetoencephalogram (MEG) were successfully measured.

Keywords : SQUID, magnetometer, biomagnetism

1. はじめに

近年, SQUID を用いた生体磁気計測システムの研究開発が大きな進展を見せつつある。SQUID の冷却には液体ヘリウムを冷却剤として使うのが一般的であるが, より実用的な冷却装置として極低温冷凍機を搭載した装置が開発され, 心磁波あるいは脳磁波の計測

も行われている¹⁻⁴⁾。

ニオブ製の SQUID センサの冷却に限れば, Gifford-McMahon/Joule-Thomson サイクル冷凍機 (GM/JT 冷凍機) が一般的に用いられている。これに対して, 数年前から希土類の磁性体蓄冷材を GM 冷凍機に充填して, 液体ヘリウム温度あるいはそれ以下の温度を容易に得ることができるようになった^{5,6)}。

Fig. 1 Schematic drawing of experimental apparatus (measurement with fluxgate magnetometer).

JT サイクル無しで冷却できれば、従来の冷却装置に比べて小型、軽量で信頼性の高い装置を構成することが可能になる。

しかしながら、磁性体蓄冷材は強磁性体あるいは反強磁性体であり、GM 冷凍機の内部でディスプレイサと共に往復運動することにより、磁気雑音を発生することが予想される。本研究では、市販されている磁性体蓄冷材 Er₃Ni (反強磁性体) を商用の GM 冷凍機に充填し、発生する磁気雑音を測定した。また、既に液体ヘリウム温度で実用に供せられているニオブ製 SQUID センサをこの冷凍機により冷却して発生する磁気雑音の測定を行った。さらに、生体磁場の計測を試みた。

2. 磁気雑音の測定および数値解析による予測

2.1 フラックスゲート型磁束計による測定

冷凍機としては、磁気雑音の発生源であるバルブモータを膨張機本体から分離することが原理的に可能なガス圧駆動式の GM 冷凍機 (改良 Solvay サイクル冷凍機, ダイキン工業社製 UV 204 S) を採用した。この冷凍機の第 1 冷却ステージ (80 K) および第 2 冷却ステージ (20 K) の冷凍能力はそれぞれ 15 W, 7.5 W (50 Hz) で、消費電力は 2.5 kW である。ディスプレイサのストロークは 11.2 mm, 1, 2 段目シリンダの内径はそれぞれ 50.8 mm, 25.4 mm であり、2 段目ディスプレイサ内部の蓄冷材充填スペースの径および長さはそれぞれ 19.0 mm, 長さ 78.0 mm である。膨張機の運転周波数は 2.0 Hz である。この冷凍機の第 2 段目ディスプレイサに Er₃Ni を充填し、第 1, 2 冷却ステージにそれぞれ 2 W, 50 mW のヒータ負荷を加えた時の冷却ステージ温度は、47.5 K, 4.47 K であった。

磁気雑音計測方法の概略を Fig. 1 に示す。膨張機の

Fig. 2 Relation between distance and magnetic noise.

1 段目ディスプレイサにリン青銅の金網を充填し、2 段目ディスプレイサには鉛球を充填した冷凍機を磁気シールド室の外部 (地磁気の直流成分を環境磁場とする, 水平方向: 3.2×10^{-5} T, 鉛直方向: 3.5×10^{-5} T) で運転してクールダウンし、定常状態 (第 1, 2 冷却ステージの温度はそれぞれ 57 K, 8.4 K) に達した時点でフラックスゲート型磁束計によりディスプレイサの往復運動方向成分の磁気雑音を測定した。磁束計を膨張機の軸方向 (水平方向) に移動させ、磁気雑音の距離減衰特性を調べた。蓄冷材以外の磁性材料による影響を取り除くために、バルブモータを膨張機本体から 2 m 分離した。この時、モータによる磁気雑音の強度は磁束計の分解能 (3×10^{-11} T) 以下であった。また、膨張機および真空容器に使われていた磁性材料は、部品交換で済む範囲で可能な限り非磁性材料に交換した。その主なものとして、2 段目ディスプレイサのシールリングをバックアップするためのスプリングを SUS 302 製からベリリウム銅製に交換し、真空容器やボルト、ナット、座金を SUS 304 製からアルミニウム製に交換し、第 1 段冷却ステージに取り付けた輻射シールドを金メッキ (下地にニッケルを使用) されたものからメッキを施していないものに交換した。それ以外に、膨張機シリンダの溶接部に磁性が検出された (比透磁率 1.01 程度) が、本研究においては極力市販品を使うという立場から、特別な処置はしなかった。

次に、第 2 段目の蓄冷材をすべて磁性体蓄冷材 Er₃Ni と交換し、鉛球を充填した場合と同様にクールダウン後に定常状態 (第 1, 2 冷却ステージの温度は、それぞれ 39 K, 4.31 K) に達した時点で磁気雑

Fig. 3 Measured and calculated magnetic noise vs. distance.

音を測定した。充填した Er_3Ni の重量は、140 g である。

Fig. 2 に両蓄冷材の測定結果を示す。図中の距離は、蓄冷器の中心位置とフラックスゲート間の距離を表す。

2.2 磁場分布の解析および測定結果との比較

磁性体蓄冷材 Er_3Ni が発生する磁気雑音を概略的に評価するために、積分方程式法による3次元磁場解析ソフトを用い、磁気雑音を解析的に求めた。前項に述べた磁気雑音測定時の環境磁場を磁性体蓄冷材 Er_3Ni 周りの空間の1様磁場として与えて同蓄冷材周りの磁場分布の歪みを計算し、磁気雑音として求めた。蓄冷材は同じく測定時に用いた蓄冷器の容積と同容積の磁性体蓄冷材 Er_3Ni のインゴットとし、比透磁率は 4.2 K における 1.3 という一定の値を用いた⁷⁾。

測定結果と解析結果の比較を Fig. 3 に示す。磁気雑音は、環境磁場 B_0 と磁気雑音 ΔB の比で表して無次元化した。解析値に比べて測定値は大きな値になっており、距離依存特性も若干異なっている。これは、前述のように本解析にはかなり大胆な仮定を用いていることが原因であると考えられる。すなわち、 Er_3Ni の比透磁率として 4.2 K の値を用いているが、実際に動作している冷凍機内部での蓄冷器の温度は、低温端側が 4.2 K 程度であるが、高温端側は 40 K 近くになっていて、しかも時間的にも（膨張機の運転周波数に同期して）変動している。 Er_3Ni はネール温度が 9 K⁷⁾ である反強磁性材料であり、蓄冷器内における多くの部分の比透磁率は 4.2 K の値とは異なっているはずである。このことを考えると、環境磁場で磁化した磁性体が動くことによって磁気雑音が発生するだろうということは、第一次近似としては妥当であ

Fig. 4 Schematic drawing of SQUID cooling system containing a GM cryocooler.

と思われる。ただし、以下の考察では実測値を採用する。

Fig. 3 の測定結果から、距離 x が 300 mm の点での磁気雑音強度は、環境磁場の直流成分の強度に対して 2×10^{-5} 程度になることがわかる。この冷凍機を直流磁場に対する遮蔽率 S を有する磁気シールド室内で運転する場合、磁気シールド室内部の鉛直方向の直流磁場の強度は $3.5 \times 10^{-5} \times S$ [T] であるから、発生する磁気雑音の強度 B_n [T] が周囲の磁場強度に比例するものと仮定すると、 B_n は次式で与えられる。

$$B_n = 3.5 \times 10^{-5} \times S \times 2 \times 10^{-5} \\ = 7 \times 10^{-10} \times S \text{ [T]}$$

例えば、 S を 1/100 とすると、雑音の強度は約 7 pT になると予測される。一般に、ヒトの心磁波の強度は数十 pT 程度であることから、この磁性体蓄冷材を充填した冷凍機を磁気シールド室の内部で用いれば心磁波の計測が可能であると予測された⁸⁾。

3. SQUID 磁束計による磁気雑音の測定

3.1 冷凍機を搭載したクライオスタットの構成

前項における磁気雑音の測定と解析の結果から、磁

Fig. 5 Experimental system for biomagnetic measurement.

性体蓄冷材を充填した GM 冷凍機を生体磁場計測を目的とした SQUID 磁束計の冷却に応用することが可能であるという見通しを得ることができたので、同冷凍機を搭載した SQUID 冷却用のクライオスタットを作製した。内部構成の概略を Fig. 4 に示す。クライオスタットの内槽に磁性体蓄冷材を充填した GM 冷凍機を挿入した。冷凍機の第 1 段冷却ステージによりクライオスタット内槽の中間温度部（真空断熱層にある輻射シールド板の接続部）が冷却される。また、冷凍機の第 2 段冷却ステージにより内槽先端部のヘリウムガスが液体ヘリウム温度まで冷却される。

測定に用いた SQUID センサは検出コイルと SQUID リングが一体となった構成 (Drung 型) になっており、いわゆるマグネトメータタイプの磁束計である⁹⁾。この磁束計を、クライオスタット内槽底面の真空空間に 2 チャネル取り付け付けた。前項の測定および解析結果から、心磁波の測定が可能な装置を構成することを目指し、磁性体蓄冷材と SQUID センサの距離が 300 mm となるように構成した。内槽内部のヘリウムガスの自然対流によって内槽底面が冷却され、さらに熱伝導によって磁束計が冷却される。

微弱磁場を計測するため、冷凍機取り付けフランジ部分を除き、クライオスタットの部品はすべて GFRP 製とし、輻射シールドには、フレキシブル絶縁基板に銅箔 (35 μm 厚) を両面貼りし、渦電流の発生

を防止するために 0.2 mm 幅の糸状にしたものを用いた。多層断熱材 (スーパーインシュレータ) は 5 mm おきに 1 mm 幅のスリットを入れたアルミ蒸着ポリエステルフィルムを用いた。冷却時の磁束計とクライオスタット外槽との間隔は約 20 mm である。

磁束計を常温部にあるプリアンプに接続するためのリード線には、熱侵入を小さくするためにマンガニン線のより線を用いた。

冷凍機が発生する機械的な振動が磁束計に与える影響を小さくするために、真空容器と冷凍機の間金属 (ステンレス) 製ベローズと防振用ゴムを挿入した。また、クライオスタット内槽の中間温度部と冷凍機の第 1 冷却ステージ部を機械的に接触させることなく熱的に接触させるために、両者に銅製の伝熱フィン (幅 40 mm, 高さ 8.5 mm, 厚さ 1 mm をそれぞれ 50 枚) を取り付け双方を約 1 mm の間隔で対向させ、ヘリウムガスの熱伝導で熱伝達を行わせた。

クライオスタット外槽の外径は約 130 mm, 冷凍機を含む全長は約 630 mm, 総重量は約 13 kg である。

クライオスタットの冷却性能を確認するために、磁束計を装着する前に、各冷却ステージに温度計 (第 1 冷却ステージには銅-コンスタンタン熱電対, 第 2 冷却ステージにはゲルマニウム抵抗温度計) を取り付け到達温度を測定した。冷凍機起動後、約 5 時間にて常温から最低温度に到達して定常状態になった。この

Fig. 6 Typical magnetic noise pattern.

時の冷却フィン部および冷却ステージの温度は、それぞれ 70 K と 5.1 K であった。なお、冷却ステージの温度変動（冷凍サイクルに同期した変動）は、数 mK 以下であり、磁気雑音の原因にならないレベルであった。

3.2 冷凍機冷却 SQUID による磁気雑音の測定

実験装置の全体構成の概略を Fig. 5 に示す。冷凍機を搭載したクライオスタットに SQUID 磁束計を装着し、磁気シールド室内に設置した。バルブモータは磁気シールド室の上部に設置された電磁シールド室の内部に設置した。冷凍機とバルブモータはプラスチック製のチューブで接続して電氣的に絶縁した。チューブの長さは約 2 m である。

この SQUID 磁束計により、冷凍機が発生する磁気雑音を測定した。磁気雑音の時間波形を Fig. 6 に示す。2.0 Hz の正弦波的な変動と急峻な雑音波形が観測された。前者はディスプレイサの変位による磁場変動に起因するものであり、後者は膨張機内部でディスプレイサがストロークの両端において衝突することおよびシリンダ内部のガス圧変動に起因する機械的な振動によるものであると考えられる。雑音の強度は、約 40 pT p-p であった。また、磁気雑音のスペクトルを Fig. 7 に示す。2.0 Hz 成分とその高調波成分が見られた。

Fig. 7 Noise spectrum.

Fig. 8 System for measuring noise distribution.

3.3 液体ヘリウム冷却 SQUID による磁気雑音の測定

磁気雑音の発生源を特定するために、冷凍機で冷却した SQUID 磁束計と同型の磁束計を 3 軸方向に配置して液体ヘリウムを充填した別置きの FRP 製デュウにより冷却し、冷凍機が発生する磁気雑音を測定した。測定方法の概略を Fig. 8 に示す。別置きのデュウを冷凍機の軸方向に移動させて雑音の分布を測定した。

各軸の磁束計で測定された磁気雑音の強度と位置の関係を Fig. 9 にまとめた。磁気雑音は、磁性体蓄冷材が存在する冷凍機シリンダの先端付近から発生している。それ以外に冷凍機シリンダのフランジ部（ステンレス製）あたりからも発生していることがわかった。クライオスタットと冷凍機の間に防振機構を挟んだために冷凍機の振幅が大きくなり、溶接により磁化され

Fig. 9 Longitudinal distribution of magnetic noise from the cryostat.

たシリンダや防振ベローズの振幅が大きくなったことが、後者の原因であると考えられた。この防振機構の代わりにアルミニウム製のドームを挟むことにより、冷凍機とクライオスタットを剛体化した。冷凍機の振幅は小さくなるが、冷凍機と真空容器（磁束計も含まれる）はほぼ一体となって振動すると予想される。この状態で発生する磁気雑音を冷凍機で冷却した SQUID 磁束計により測定したが、防振機構を用いた場合の雑音強度との間に有意な差は見られなかった。したがって、冷凍機によって冷却されている SQUID 磁束計により観測されている磁気雑音は、磁性体蓄冷材が存在するシリンダ先端付近から発生している雑音によるものが支配的であるといえる。

3.4 磁気雑音の発生源に関する考察

測定に使用した磁気シールド室の直流磁場に対する遮蔽率は、1/100 程度である。したがって、SQUID 磁束計によって測定された雑音強度 (40 pT p-p) は、

フラックスゲート型磁束計による測定の結果から予測された値 (7 pT p-p) に対して、約 6 倍と大きなものである。この原因としては、外部磁場に比例しない成分（例えば、物質の残留磁化など）が影響していることが考えられる。磁気雑音の測定波形がディスプレイサの動きに対応していることから、雑音の原因となる物質はディスプレイサの中に含まれていると推定した。Er₃Ni 以外のディスプレイサ構成部品の磁性材料は非磁性材料と交換したため、この磁気雑音は Er₃Ni 以外から発生しているとは考えにくいものの、その物質を特定し雑音発生のメカニズムを明らかにすることはできなかった。

今後の課題として、冷凍機動作温度における各要素部品の材料の透磁率を定量的に評価することも含め、磁気雑音の発生源を特定することが必要である。

雑音強度が予測値よりも大きな結果となったため、次章における生体磁場の計測に際してデジタル信号処理を用い、磁気雑音の除去を試みた。

4. 生体磁場の計測

4.1 心磁波の計測

Fig. 5 に示す計測装置により、冷凍機を作動させた状態で心磁波の計測を行った。測定波形の 1 例を Fig. 10 に示す。測定周波数帯域は 0.3 Hz から 100 Hz である。冷凍機の雑音と心磁波が重なって見られる。冷凍機の磁気雑音は繰り返しが強いいため、この特徴を利用した信号処理により冷凍機雑音の除去を行った。ヒトがいない状態で冷凍機の雑音波形を測定し、加算平均を行う。この雑音波形を心磁波の測定波形と位相を合わせて差し引いた。この処理は、DAT (digital audio tape) と 8 ビットデジタルオシロスコープのチャンネル間位相調整機能によってリアルタイムで

Fig. 10 Magnetocardiogram (raw signal).

Fig. 11 Magnetocardiogram (cancelled).

Fig. 12 Magnetocardiogram (averaged).

行うことができる。この信号処理によって冷凍機の磁気雑音は約 15 デシベル低下させることができる。処理後の心磁波形を Fig. 11 に示す。この波形を 100 回程度加算平均することによって Fig. 12 に示すように P, Q, R, S, T 波を明瞭に識別することができる。しかしながら、同波形には磁気雑音の低周波成分が残っていることによる基線（出力零の線）の動揺が見られる。

4.2 聴性誘発脳磁波の計測

聴性誘発脳磁波の計測を行った。1 kHz の刺激音をランダムな間隔（1～8 秒）で 0.5 秒間発生して被験者に聞かせ、その時に発生する脳磁波を測定した。測定周波数帯域は 0.3 Hz から 60 Hz である。この測定波形に対しても以下のようなデジタル雑音除去を行った。刺激音が発生している時間の直前および直後の冷凍サイクルの雑音波形を加算平均し、この雑音波形を刺激音が発生している時間中の波形から位相を合わせて差し引いた。この信号処理によって冷凍機の磁気雑音は約 25 デシベル低下させることができる。この雑音除去を行った後、100 回加算平均した結果を Fig. 13 に示す。測定波形において N 100, P 200 のピークが見られ、誘発磁場が検出されている。また、刺激音がない時の波形を加算平均した結果から、残留雑音の強度は約 200 fT p-p であった。

Fig. 13 Auditory evoked field (cancelled and averaged).

4.3 生体磁場計測システムとしての評価

心磁波の計測結果 (Fig. 12) においては、P, Q, R, S, T 波を識別することが可能であり、その意味に限れば医療診断に用いることが可能であるといえる。しかしながら、同波形には基線の動揺が見られ、例えばマルチチャネルシステムに展開した場合にこのようなデータを用いて磁場源推定を行うと、推定精度が低下することが予想される。脳磁波の測定結果においても、同様に N 100 および P 200 のピークが見られるが、磁場源推定等の解析に用いるにはさらに雑音レベルを低下させて S/N 比を向上させる必要がある。

したがって、今後の課題として、冷凍機が発生する磁気雑音の発生源を特定して雑音レベルを低下させるとともに、雑音除去のための信号処理方法を改善する必要がある。

5. まとめ

磁性体蓄冷材 Er_3Ni を充填した GM 冷凍機が発生する磁気雑音を、地磁気の直流磁場を環境磁場とする

条件で測定した。また、積分方程式法による磁場解析によって同蓄冷材が発生する磁気雑音を解析的に求めた。この2つの結果から、直流磁場に対する遮蔽率が1/100程度の磁気シールド室の内部でこの冷凍機を運転した場合に発生する磁気雑音の強度は、心磁波の測定が可能なレベルであるという見通しを得た。

磁性体蓄冷材 Er_3Ni を用いた GM 冷凍機を搭載したクライオスタットを作製し、2チャンネルのニオブ製 SQUID 磁束計を冷却して動作させた。冷凍機が発生する磁気雑音を直流磁場に対する遮蔽率が1/100程度である磁気シールド室の内部で測定したところ、その強度は約 40 pT p-p であり、磁気シールド室外での測定結果に基づく磁気雑音強度の予測値よりも約6倍大きな値であった。しかしながら、その雑音源を特定することはできなかった。そこで、デジタル信号処理によって雑音を除去することを試み、心磁波をリアルタイムで計測することができた。また、聴性誘発脳磁波を測定し、同じくデジタル信号処理により雑音除去を行った結果、100回程度の加算平均によって GM 冷凍機だけで冷却した SQUID の動作としては初めて N 100, P 200 のピークを検出することができた。

しかしながら、生体磁場計測システムとして評価した場合、さらなる低雑音化が必要であり、今後の課題といえよう。

最後に、心磁波および聴性誘発脳磁波の測定に際して、御助力いただいた当所伊藤、樋口、神鳥各氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) D. B. Sullivan, J.E.Zimmerman and J.T.Ives : NBS Special Publication 607 (1981) 186
- 2) T.Inoue, T. Fujita, T.Ohtsuka and Y.Ishizaki : Ext. Abstr. ISEC '87 (1987) 147
- 3) D. S. Buchanan, D. N. Paulson, G. A. Klemic and S. J. Williamson : Proc. Cryocoolers 5 (1988) 35
- 4) 吉田哲夫, 佐多健一, 福井直樹, 康 倫明, 西口和夫 : 第7回日本生体磁気学会大会論文集 (1992) 120
- 5) M. Nagao, T. Inaguchi, H. Yoshimura, T. Yamada and M. Iwamoto : Adv. Cryog. Eng. 35 (1990) 1251
- 6) T. Kuriyama, R. Hakamada, H. Nakagome, Y. Tokai, M. Sahashi, R. Li, O. Yoshida, K. Matsumoto and T. Hashimoto : Adv. Cryog. Eng. 35 (1990) 1261
- 7) C. Becle, R. Lemaire and D. Paccard : J. Appl. Phys. 41 (1970) 855
- 8) S. Fujimoto, H. Ogata and H. Kado : Proc. Cryocoolers 7 (1993) 560
- 9) K. Kazami, Y. Takada, G. Uehara, N. Matsuda and H.Kado : Ext. Abstr. ISEC '93 (1993) 136