高感度磁束センサ SQUID

杉 山 卓 ・ 井 深 丹

株式会社横河電機製作所 東京都武蔵野市中町 2-9-32

(1979年10月23日受理)

SQUID-A Very Sensitive Magnetic Flux Sensor

Takashi SUGIYAMA and Makoto IBUKA

Yokogawa Electric Works, Ltd.

9-32 Naka-cho, 2 chome, Musashino-shi, Tokyo

(Received October 23, 1979)

Synopsis :

SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) is a very sensitive magnetic flux sensor based on magnetic flux quantization and the Josephson effect. This paper describes the principles of operation of SQUID and gives historical details of some RF SQUID prototypes. A general model for a SQUID magnetometer comprising a SQUID sensor, RF amplifier and phase-locked loop is described. Its flux resolution limit, maximum flux slew rate and input coil current sensitivity can be estimated, as described in the paper.

Various instruments which apply SQUID are now under development...SQUID can be used to measure voltage, current, noise temperature, magnetic susceptibility, and the magnetic fields of the earth and the human body. The paper shows a magnetocardiogram obtained with a SQUID magnetometer; this magnetometer was developed at the authors' company. The paper concludes by listing references which describe some of the many possible applications of SQUID.

1. はじめに

SQUID は Superconducting Quantum Interference Devices の略で超伝導量子干渉計と訳す。これは超伝導リングにおける磁束の量子化と dc ジョゼフソン効果を利用した高感度の磁束センサであって $10^{-19} \text{Wb}/\sqrt{\text{Hz}}$ オーダの磁束分解能を有する。

このような高感度は磁束量子とよばれる磁束を動作単位としているため得られるものである。磁束量子 ϕ_0 は超伝導体内のうず電流の作りうる最小磁束であり、 $h/2e (= 2.07 \times 10^{-15} \text{Wb})$ h : プランクの定数, e : 電子の電荷, で与えられる。磁束量子が何個出入りしたかによって磁束を測定するのが基本である。

SQUID の応用は本来の精密磁気測定である物質の帯磁率測定, 残留磁化測定, 生体の脳や心臓からの磁束測定だけでなく電圧, 電流の測定, 極低温温度測定, 重力測定にも用いられており, 最近では磁束量子のあり, なしが 1, 0 に対応するコンピュータ用メモリ素子まで出現している。

超高感度磁束計である SQUID 磁束計は磁束量子 ϕ_0 を数えるカウンタとしてではなく, 巧妙な電子回路により磁束量子の 1 万分の 1 までもアナログ量で表示する計測器として使用される。SQUID 磁束計は SQUID 素子, 信号検出用前置増幅器およびロックイン増幅器から成り, すでに商品化され市販されている。SQUID 磁束計を使いこなすにはその特徴をよく理解し, 性能

を評価することが大切である。

本稿では SQUID 素子の最近の進歩について述べるとともに、SQUID 磁束計の主要な性能についてその性能評価方法を述べる。

2. SQUID の動作原理

二つの超伝導体を薄い絶縁膜や細いくびれを介して接触させたものをジョゼフソン接合(弱結合)と呼び、ある電流値(超伝導臨界電流値)までは抵抗 0 の電流が流れること、弱結合に電圧があるときその電圧に比例した周波数の振動電流が生ずるというのがジョゼフソン効果である。弱結合を 1 個含む超伝導リングは rf SQUID* と呼ばれ微小磁束変化に対して周期応答を示す。これを図 1 に示す。超伝導リング内では磁束は磁束量子 $\Phi_0 = 2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ の整数倍しか取りえないので、外から加える磁束 Φ_x を 0 から次第に増加していくと Φ_x を打消すようなしゃへい電流 I が流れる。リングインダクタンスを L_s とすると $I = \Phi_x / L_s$ で表わされることは自明であろう。リングの一部に弱結合があって超伝導臨界電流値を I_c とすると Φ_x が増加して $I = I_c$ になったとき超伝導がくずれて常伝導となり、磁束がリング内に入ってしまう。

磁束が入ることによりしゃへい電流は 0 になり再び超伝導にもどるが、 Φ_0 だけ磁束が入ったことになる。したがって、磁束 Φ_x を 0 から増加させていくと弱結合がスイッチング素子となり磁束量子を出し入れするわけである。しゃへい電流 $I (= \Phi_x / L_s)$ が I_c に等しくなったとき、外部磁束 Φ_x が磁束量子 Φ_0 より大き

図 1 rf SQUID の動作原理

* 弱結合 2 個を含む超伝導リングを dc SQUID と呼びやはり周期応答を示すが、磁束計への応用は少なく、メモリ素子への応用が盛んである。本稿ではふれない。

くなっているとスイッチング動作にヒステリシス現象が生ずる。以上の現象を電子波の位相やフラクソイドの量子化の式を用いて記述すると、その特性を図形化することができる。

まず、弱結合を流れる電流 I 、二つの超伝導体の状態関数の位相差(電子対波の位相差)を θ とすると、dc ジョゼフソン効果は(1)式で表わされる。

$$I = I_c \sin \theta \quad (1)$$

また、超伝導体リングでは内部磁束 Φ は量子化されているが、一部に弱結合をもった超伝導リングではフラクソイドが量子化され(2)式が成り立つ。

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} + \frac{\theta}{2\pi} = n \quad (2)$$

n : 正整数, Φ : リング内磁束

さらに、外部磁束 Φ_x としゃへい電流 I の関係から(3)式が成り立つ

$$\Phi = \Phi_x + L_s \cdot I \quad (3)$$

(1), (2), (3)式から外部磁束 Φ_x とリング内磁束 Φ の関係を求めると

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{\Phi_x}{\Phi_0} + \frac{L_s I_c}{\Phi_0} \sin \left\{ 2\pi \left(n - \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \right\} \quad (4)$$

が得られる。これを図 2 に示す。 $2\pi L_s I_c$ が Φ_0 より大きいとヒステリシス現象があらわれることがわかる。このようにして外部磁束 Φ_x の変化に対してリング内磁束 Φ が Φ_0 を周期として変化することがわかったので、これを電気信号として取出すことを述べる。

rf SQUID の電気回路の基本形を図 3 に示す。超伝導リングインダクタンス L_s 、弱結合の臨界電流値 I_c に対して LC 共振回路のインダクタンス L_t 、キャパシタンス C_t 、リングとの相互インダクタンス M とす

図 2 rf SQUID の Φ と Φ_x の関係

図 3 rf SQUID の電気回路と出力電圧特性

る。

RF 電源から 20~25 MHz の高周波電流 I_d を流すと共振電流 I_t は $Q \cdot I_d$ となり L_t 内に高周波磁束 Φ_{rf} が作られる。 Φ_{rf} で図 2 のようなヒステリシス現象が生じたとき、エネルギー損失は

$$\Delta E \doteq 2 \Phi_0 I_c - \Phi_0^2 / (2 L_s) \quad (5)$$

で近似的に表われ、これが LC 共振回路の電圧変化として取出せる。そしてヒステリシスをもつ $2 \pi L_s I_c > \Phi_0$ のとき、RF 電流による外部磁束 Φ_{rf} の振幅を Φ_0 よりやや小さくえらんでおくと、この上加わる直流外部磁束 Φ_{dc} の大きさによりヒステリシスが 0 個になったり 1 個になったりする。これを図 4 に示す。

このようにして高周波電流でコイル内に磁束を作り

図 4 rf SQUID における外部直流磁束変化

超伝導リングと結合させると、信号として入ってくる直流磁束の変化に応じて、磁束量子を周期として、共振回路の電圧 V_t が変わるのである。

電圧 V_t は高周波の帯域増幅器により増幅され、高周波成分は整流されて、外部磁束信号と同じ変化の信号が増幅器の出力となる。

本報ではこの rf SQUID を単に SQUID とよぶことにする。

3. SQUID 磁束計の構成

前章で述べたように SQUID は磁束量子 Φ_0 を動作単位とする高感度磁束センサであるが、実際に磁束を測定するには計測システムを構成する。構成要素を便宜上下記のように区分する。

1. 液体ヘリウム容器
2. 磁束検出コイル
3. SQUID
4. RF 増幅器
5. ロックイン増幅器

SQUID で検出した磁束変化は RF 増幅器出力では磁束量子の周期関数である。ロックイン増幅器を使用してフィードバック回路を構成し、外部磁束と同じ磁束をフィードバック電流によって発生させ SQUID をゼロ検出器として動作させることにより磁束量子の 1 万分の 1 まで測定することができる。この測定系を図 5 に示す。本稿では超伝導リング、LC 共振回路および磁束入力コイルを合せて SQUID と呼び、超伝導リングを SQUID リングと呼ぶことにする。説明の便宜上、勝手に名称をつけたことをお許し願いたい。

SQUID 磁束計の性能として次の三点が重要である。

1. ノイズ (磁束分解能) 単位 $\Phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$

図 5 SQUID 磁束計の回路構成

2. スルーレート (応答性) 単位 Φ_0/s
 3. 磁束感度 (磁束入力コイル) " $\mu A/\Phi_0$

この章では SQUID, RF 増幅器, ロックイン増幅器についてその特性と性能評価方法を述べる。

3.1 SQUID (SQUID リング)

SQUID は SQUID リング, LC 共振回路および磁束入力コイルから成り, 液体ヘリウム中に入る部分である。SQUID リングは超伝導リングの一部にジョゼフソン接合をもつものである。ジョゼフソン接合には代表的なものとして点接触形, トンネル接合形, 薄膜ブリッジ形の三種ある。特に図は示さない。超伝導リングの形状には 1 hole 形, 2 hole 形, Multi-hole 形の三種あり, これらを組合せて種々の rf SQUID が試作, 実用化されている。

図 6 に SQUID リングの形状を示す。(a) の 1 hole 形は原理そのものの形をしており磁束入力コイルの信号もリング周辺の磁束も同時に入る。これに対して (b) の 2 hole 形はリング周辺の磁界が一樣なら 2 個の穴で打消し, 一方の穴に結合した磁束入力コイルの信号のみを入力とするので外来ノイズに強い。2 hole 形で一方のリングをねじっておくと 2 個の穴に入る磁束は加算されて 1 hole 形の 2 倍の信号がえられる。これを (c) に示す。多数の穴を同一平面上に配置し磁界がかかったときのしゃへい電流の総和が 1 個の弱結合に流れるようにしたものを Multi-hole 形という。

基本実験用に, また精密測定用によく使用されるのが点接触形 SQUID である。代表的な 2 hole 形を図 7 (a) に示す。材料は Nb, Nb-Ti がよく使用され, 先端の平らなネジと, 先端が鋭くとなったネジをわずかに接触させて点接触部分を作る。Nb ブロックはリング状になっていて, 全体で SQUID リングを構成している。点接触形は作りやすく, リングインダクタンス L_s が小さいため感度が高いという長所がある反面, 振動やショックで接触が変わったり経時変化があるという欠点もある。1970 年ころから試作, 応用例が発表されており¹⁾²⁾ わが国でも実験報告がでている³⁾⁴⁾。

図 6 SQUID リングの形状 I

性能を維持させるため, 常温で点接触を調整, 固定したあと気密容器に入れて真空または He ガスで封じてしまうことが行われており, 外国製の点接触形 SQUID ではこのタイプが多いといわれている。わが国では東海大の小菅氏の研究があり本誌に提載された⁵⁾。点接触 SQUID の安定化に関しては, 点接触部分の表面処理や密封方法に種々の know how があり, 4.2K と 300K の温度サイクルに耐えて数年間の寿命をもたせるのは技術的に容易ではない。

SQUID リングを薄膜で作り, 局部的なくびれを弱結合として使用する薄膜ブリッジ形 SQUID は機械的に安定なので種々の試作が行われた。

石英等の円筒に超伝導金属を蒸着し, 細いみぞを切

図 7 SQUID リングの形状 II

って一部分をのこし弱結合を作ったものが報告されている⁶⁾⁷⁾。この形状を図7(b)に示す。インダクタンス L_s が小さく、また、磁束入力コイルとの結合もよい。蒸着技術を用いず、セラソルザという特殊ハンダの膜で作った SQUID は簡単に作れて性能もよいことから、現在よく使用されている。東大の小林、村田氏は石英ガラスの円筒に細いみぞをつけてから超音波ハンダごてでセラソルザを塗布し、ナイフで膜をけずって細いみぞに残ったセラソルザが弱結合を構成するようにして SQUID を作成した⁸⁾。弱結合の抵抗を実測しながら調整することと、表面状態の変化を防ぐため特殊接着剤を塗布することが重要である。九大の石津氏らはこの形の SQUID についてセラソルザをめぐる前の基板表面処理や抵抗調整方法について検討しよい性能のものを再現性よく得ている⁹⁾。

平面状基板に薄膜を蒸着しフォトリソグラフィにより SQUID リングパターンを作った例もある。

東北大の大塚氏は反応スパッタ法により NbN 薄膜を作り、2 hole 形 SQUID を作成した¹⁰⁾。これを図7(c)に示す。NbN は超伝導臨界温度が 17K と高いので、将来液体ヘリウムを使用せず、小型冷凍機で動作させる可能性があり期待されている。著者らは高周波スパッタ法により Nb 薄膜を形成し、2 hole 形 SQUID を作成した¹¹⁾。くびれの幅は $0.5 \mu\text{m}$ で通常フォトリソグラフィ技術ではこれが限度と思われる

る。平面形 SQUID はリングインダクタンス L_s が大きいので、Nb の超伝導ブロックを近接させ、等価的なインダクタンスを下げて性能を向上させた。これを図7(d)に示す。

薄膜ブリッジ形 SQUID は弱結合部分の超伝導臨界電流値の温度依存性があるため、SQUID 動作する温度に制限があるが、機械的に丈夫で信頼性が高い。

超伝導金属の間に数 $10 \text{ \AA}$ の絶縁層をはさんだトンネル接合形の弱結合は電圧標準用やメモリ素子用に使用されているが、静電容量が大きいため高周波で駆動する rf SQUID には使用された例が少ない。

ヘルシンキ大の Ehnholm らは Nb-NbOxide-Pb のトンネル接合に銅のショートバーを蒸着して SQUID リングを構成し実用化した¹²⁾¹³⁾。

以上のように安定な SQUID リングの開発は着実に進んでおり、実験室で作ったものでも、市販品でも安心して使用できるようになったのはよろこばしいことである。将来、微細加工技術(サブミクロン加工技術)が進歩すれば、高性能の SQUID リングが容易に作成できるようになるであろう。

3.2 RF 増幅器

rf SQUID では、SQUID リングに近接しておかれた LC 共振回路に高周波定電流を流し、両端電圧を増幅して磁束変化に対応した電圧信号を取り出す回路が必要である。電圧信号の増幅を行うのが RF 増幅器で

図 8 RF 増幅器の回路例

あるが、SQUID 磁束計のノイズはこの RF 増幅器のノイズが支配的である。主な仕様を下に示す。

電圧増幅率 20~90 dB 可変

増幅帯域幅 1 MHz

中心周波数 20~25 MHz (可変であるとよい)

検波帯域幅 DC~60 KHz

入力容量 20 pF

入力ノイズ電圧 $3\sim6\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

入力は $20\sim30\text{ }\mu\text{V r.m.s}$ の高周波電圧であり磁束 $1/2\Phi_0$ 当り $5\sim10\text{ }\mu\text{V r.m.s}$ 程度変動するものである。回路構成の一例を図8に示す。初段は接合形FET 2個をカスコード接続したもので、ノイズを少なくし、充分な増幅率を得るには FET を選び、バイアス電圧を調整する必要がある。このあと高周波用 IC を使用するが、増幅帯域幅を定めるためトランス結合とし、インダクタンスを調整して増幅の中心周波数を定めている。最終段では Ge ダイオードにより検波している。入力回路部分は厳重なシールドが必要で、ふつうは金属ケースをいくつかに仕切って入力回路、電源、帯域増幅部分等を分離しておく。

SQUID と RF 増幅器を組合せて磁束分解能を測定することができる。SQUID を液体ヘリウム中に入れて動作させて、LC 共振回路のインダクタンス L_s に外部から直流電流を流して図9(a)の動作点Aに固定

図9 SQUID 磁束計の磁束分解能測定

する。1 磁束量子変化したときの RF 増幅器出力電圧をこう配から求めて ΔV_0 とする。動作点Aにおける出力電圧の変動分を図9(b)の回路でロックイン周波数を変えながら測定し、実効値を求め V_n とすると、磁束分解能は $(V_n/\Delta V_0)\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ で与えられる。 $1\times 10^{-4}\sim 5\times 10^{-4}\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ がふつうである。周波数は $1\text{ Hz}\sim 50\text{ kHz}$ 程度まで測定しておくといいが床振動や電源の周波数では異常にノイズが増大するので少しずらした方がよい。

3.3 磁束ロックループによる精密測定

SQUID と RF 増幅器の組合せで $10^{-4}\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ オーダの磁束分解能を有するので、出力電圧を直線化すれば、極めて高感度の磁束計ができる。これにはロックイン増幅器を含む積分フィードバック回路を付加する。動作原理を図10に示し、回路図を図11に示す。

外部磁束—出力電圧特性で三角形の頂点Bを動作点に選び、LC 共振回路のコイルに周波数 f_0 の三角波交流電流を流して交流磁束を発生させる。 f_0 は $10\sim 50\text{ kHz}$ である。動作点がBであれば RF 増幅器出力は

図10 ロックイン増幅器を含むフィードバック回路の動作原理

図11 SQUID 磁束計の回路図

図12 SQUID 磁束計のスルーレートの測定例

$2f_0$ 信号となるが、外部から磁束が加わると動作点がずれ B' となり、 $2f_0$ 信号の他に f_0 信号が発生する。 f_0 信号のみを増幅するロックイン増幅器の出力を積分してフィードバックすると f_0 信号がなくなるまで LC 共振回路に電流が流れて平衡する。

したがって動作点は常に B 点に保たれ、フィードバック電流 I_f が磁束信号になるのである。

このフィードバック系では急激な磁束変化に対して応答できず、動作点のロックがはずれる欠点がある。応答しうる最大磁束変化率を SQUID 磁束計のスルーレートとよび Φ_0/s の単位で表わす。これを実測するには SQUID 磁束計のフィードバック系を構成して SQUID の LC 共振回路に周波数、振幅可変の正弦波交流電流を加えフィードバック電流 I_f をオシロスコープで見て、ロックはずれによる波形ひずみが生ずる周波数、振幅をプロットする。図12に著者らが試作した SQUID 磁束計のスルーレートグラフを示す。たとえば 100 Hz の周波数で、振幅 100 Φ_0 の正弦波を SQUID に加えたとき、 I_f がロックはずれをおこさなければスルーレートは $6.3 \times 10^4 \Phi_0/s$ となる。図10の動作原理図で明らかのように f_0 の周波数で $\Phi_0/4$ 程度の振幅を加えているのでこれより速い応答は得られない。 f_0 が 50 kHz であればスルーレートは $1.5 \times 10^5 \Phi_0/s$ 以下である。

3.4 磁束トランス

SQUID は超伝導リングに入る磁束を測定する高感度磁束計であるが、超伝導リング内には磁束入力コイルがあって、これを流れる電流により磁束を発生させることが多い。特に 2 hole 形 SQUID では片方のリングにのみ磁束信号を加えるため磁束入力コイルが必要である。また、磁束入力コイルがあれば微小電流計

図13 磁束トランスの原理

として使用できて便利である。

さて磁束信号を一旦電流に変換して磁束入力コイルに流し磁束を発生させるには磁束トランスを使用する。磁束トランスの原理を図13に示す。二つの超伝導コイル L_p と L_i とで閉ループを作り、 L_p を磁束検出コイル、 L_i を磁束入力コイルとする。 L_p のターン数を N_p 、SQUID リングのインダクタンス L_s 、 L_i と L_s の相互インダクタンスを M とする。外部磁束 Φ_x が L_p に入ろうとするとしゃへい電流 I が流れ

$$N_p \cdot \Phi_x + (L_p + L_i) I = 0 \quad (6)$$

が成立する。一方 SQUID リング L_s に入ろうとする磁束を Φ_s とすると $\Phi_s = MI$ なので

$$\frac{\Phi_s}{\Phi_x} = \frac{N_p M}{L_p + L_i} \quad (7)$$

結合係数 k を導入すると $M = k \sqrt{L_i L_s}$ により

$$\frac{\Phi_s}{\Phi_x} = \frac{N_p \cdot k \sqrt{L_i L_s}}{L_p + L_i} \quad (8)$$

を得る。

数値として $L_s = 1 \text{ nH}$ (リング内径 2 mm), $L_p = L_i = 0.4 \mu\text{H}$ (L_p として直径 50 mm の 1 ターンコイル), $N_p = 1$, $k = 0.5$ を入れると $\Phi_s/\Phi_x = 0.012$ となり、1.2% 程度の磁束変換効率をもつことがわかる。しかし L_p と L_i の断面積は 50° 対 2° で 600 倍もあるので、 L_p にくらべ L_i では磁束密度は約 8 倍に増加している。磁束変換効率があるいは SQUID リングのインダクタンス L_s が 1 nH と L_p , L_i にくらべ小さいためである。この大きさは、SQUID の動作特性上 $2\pi L_s I_c \cong \Phi_0$ と制約されることから定まっている。

したがって磁束変換効率を大きくするには L_i を小

図14 磁束トランスの例

さく、 k を大きくするのがよい。2 hole 形 SQUID リングに入れる磁束入力コイル L_1 を直径 2 mm 程度で作り k を 0.5 以上にするのはなかなか難しい。一方、磁束入力コイル L_1 に電流を流して、微小電圧、電流を測定するような使用方法では $\phi_s = MI$ の式だけでよいので M は大きいほど電流感度がよい。磁束量子 ϕ_0 を発生させるのに $0.1 \mu\text{A}$ の電流をえらべば、 $M = 2 \times 10^{-8} \text{H}$ となり $M = k\sqrt{L_1 L_s}$ の式から $k = 0.5$ 、 $L_s = 1 \text{nH}$ として $L_1 = 1.6 \mu\text{H}$ となる。つまり磁束入力コイルのインダクタンスは大きいほど電流感度は高くなる。

生体計測等、磁束発生体からの磁束を S/N 比よく測定するには磁束検出コイルを 2 個または 4 個使用する。図14にその例を示す。(a)は磁束こう配トランスといわれるもので上下のコイルの直径が等しくできていけば一様な磁界に対して互いに打消し合って信号が発生せず、近傍にある di pole の発生する磁束に対しては二つのコイルの電流の差として取出すことができる。コイル直径が等しくないときはコイルボビン内に超伝導体の小片を入れ、これを上下に動かして鎖交磁束を調整してバランスをとる。感度はコイル 1 個にくらべると $1/\sqrt{2}$ に減少する。(b)は二次微分形磁束トランスとよばれるもので、(a)の磁束こう配トランスを 2 個差動接続したものである。4 個のコイルの直径がすべて等しく、 $L_1 L_2$ 間距離と $L_3 L_4$ 間距離が等しければ一様な磁界と一定こう配の磁界について打消して近傍からの磁束のみを検出できる。コイルの数

が多いので精密な加工が必要であり、石英ボビンにみぞを切ってまくとよい。ここでもやはり補正用に超伝導体の小片をコイル L_4 のリング内に入れてバランスをとる。

磁束入力コイルについては磁束感度の測定が必要である。測定には SQUID と RF 増幅器を使用しロックイン増幅器は使用しない。磁束入力コイル L_1 のリードを延長し常温部分まで出して電流源に接続し、RF 増幅器出力が 1 周期分変化する電流値を測定すればよい。磁束入力コイルのリードを延長するとノイズをひろうので厳重なシールド処理が必要である。磁束感度は $0.1 \sim 0.2 \mu\text{A}/\phi_0$ 程度がふつうである。

4. SQUID 磁束計の応用分野

SQUID 磁束計は超高感度磁束センサであることから、種々の応用が考えられてきた。その性能を充分発揮させるためノイズ対策も進歩した。

精密電気計測の分野では微小電圧測定の例がある¹⁴⁾¹⁵⁾。電圧源の抵抗が $10^{-8} \Omega$ ならば 10^{-15}V の電圧測定ができる。磁気測定の分野では岩石や海底堆積物の磁化測定¹⁶⁾、磁化率、帯磁率の測定例がある¹⁷⁾。

温度測定の分野では熱雑音電流を SQUID で測定する方法や SQUID リングの一部に常伝導金属を入れる方法や常磁性塩 (CMN 等) の磁化率が絶対温度に反比例することから磁化率を測定する方法等が研究されており、2 mK まで測定できるようになっている¹⁸⁾¹⁹⁾。

生体計測の分野では以前から心臓磁気信号の測定²⁰⁾²¹⁾が行われていたが、心筋梗塞時の ST shift の解明²²⁾、母体内の胎児の心臓磁気測定²³⁾、ベクトル心磁図の測定²⁴⁾の報告もある。心臓以外では肺にたまった粉塵の磁気測定²⁵⁾や脳波測定²⁶⁾の研究も行われている。

他に、重力測定²⁷⁾²⁸⁾や水中通信²⁹⁾³⁰⁾への応用例もある。

図15 横河電機の SQUID 磁束計

図16 横河電機の SQUID 磁束計による心磁波形測定例

るが、応用の詳細についてはそれぞれの解説を参照していただきたい。

著者らは SQUID 磁束計を国産化して、広く利用してもらうため試作を続けてきたが、Nb の薄膜ブリッジ形 SQUID を使用したものを開発した。これを図15に示す。SQUID 磁束計は SQUID 部分、RF 増幅器部分と SQUID コントローラ部分にわかれており、SQUID コントローラ部分にはロックイン増幅器、積分器、RF 電源が含まれる。この SQUID 磁束計を使用して測定した心臓磁気測定例を紹介する。磁束検出コイルは直径 32 mm のコイル2個で構成した磁束こう配トランス形のもので、周囲の磁気ノイズをへらすため、パーマロイ二重構造の磁気シールドルーム³¹⁾内で測定した。液体ヘリウム容器はガラス製積層断熱形クライオスタットで、体表面から磁束検出コイルまで約 20 mm である。図16に測定結果を示す。

電極を使用した心電計とほぼ同程度の S/N 比で心臓磁気信号の非接触測定ができる。

5. おわりに

SQUID 磁束計の動作原理とその回路構成、性能評価について述べ、応用例として心臓磁気信号の測定結果を示した。SQUID 磁束計は極めて高感度な磁束計であってその応用分野は将来ますます増加すると思われる。著者らは計測器メーカに属し SQUID 磁束計の開発を行っているが、SQUID 磁束計を使用している方々からご指導をいただければ、よい製品を作ることができ、応用分野もひろがるであろう。また SQUID 磁束計を動作させるには性能のよい磁気しゃへい装置、液体ヘリウム容器の開発が必要であり、将来は小型冷凍機によりどこでも極低温がえられることを望むものである。

参 考 文 献

ジョゼフソン効果および SQUID 磁束計に関する総合解説は下記の 1), 2), 3) がよい。

- 1) 電気学会クライオエレクトロニクス常置専門委員会編「ジョゼフソン効果〈基礎と応用〉」コ

ロナ社 (1978)

- 2) V.L.Newhouse (edt.) : *Applied Superconductivity*, Vol.1. Academic Press (1975)
 - 3) B.B.Schwartz, S.Foner (edt.) : *Superconductor Application : SQUIDs and Machines*, Plenum Press (1977)
- 引用 文 献
- 1) J.E.Zimmerman, et al. : J.Appl. Phys. 41 (1970) 1572
 - 2) J.E.Zimmerman, et al. : J.Appl. Phys. 42 (1971) 30
 - 3) 大塚, 藤田, 鈴木 : 日本物理学会誌 26 (1971) 745
 - 4) 古賀, 中村 : 電総研彙報 40 (1976) 748
 - 5) 小菅 : 低温工学 13 (1978) 297
 - 6) W.L.Goodman, et al. : Proc. IEEE 61 (1973) 20
 - 7) D.Duret, : Rev. Sci. Instrum. 46 (1975) 474
 - 8) 村田 : 固体物理 12 (1977) 23
 - 9) 石津, 飯島, 坂, 北村 : 信学技報 78 (1978) ED 78-111
 - 10) T.Fujita, et al. : IEEE Trans. Magnetics MAG-11 (1975) 739
 - 11) 井深, 細松 : 計測自動制御学会論文集 15 (1979) 689
 - 12) R.Graeffe, et al. : J.Appl. Phys. 42 (1971) 2146
 - 13) G.J.Ehnholm, et al. : Low Temp. Phys. LT-14 4 (1975) 234
 - 14) J.E.Lukens, et al. : J.Appl. Phys. 42 (1971) 27
 - 15) J.Clarke : Proc. IEEE 61 (1973) 8
 - 16) W.S.Goree, et al. : Rev. Geophys. Space Phys. 14 (1976) 591
 - 17) J.S.Philo, et al. : Rev.Sci. Instrum. 48 (1977) 1529
 - 18) R.A.Kamper : *Temperature; Its Measurements and Control in Science and Industry* Vol.4 (1972) 349 ISA
 - 19) R.P.Giffard, et al. : J.Low Temp. Phys. 6 (1972) 533
 - 20) D.Cohen : IEEE Trans. Magentics, MAG-6 (1970) 344
 - 21) D.Cohen, et al. : J.Electrocardiology 9 (1976) 398
 - 22) D.Cohen, et al. : Circulation Res. 36 (1975) 414
 - 23) V.Kariniemi, et al. : J.Perinat. Med. 2 (1974) 214
 - 24) J.P.Wikswow, et al. : IEEE Trans. Magnetics MAG-13 (1977) 354
 - 25) D.Cohen : Science 180 (1973) 745
 - 26) D.Cohen : Science 175 (1972) 664
 - 27) J.M.Goodkind, et al. : IEEE Trans. Magnetics MAG-11 (1975) 708
 - 28) B.S.Deaver, et al. (edt.) : *Future Trends in Superconductive Electronics* (1978) 166 AIP Conf. Proc. Series No.44
 - 29) S.A.Wolf, et al. : IEEE Trans. Communications COM-22 (1974) 549
 - 30) H.D.Hahlbohm, et al, (edt.) : *SQUID Superconducting Quantum Interference Devices and their Applications*. Walter de Gruyter (1977) 439
 - 31) 井深, 佐々木 : 第17回 SICE 学術講演会予稿集 (1978) 139