

高温超伝導体 SQUID をめぐる研究

量子計測研究分野 栗城 真也

1 はじめに

高温超伝導体 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) は YBaCuO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$) などの酸化物超伝導体材料から作製される磁気センサーであり, Nb などの低温超伝導体 SQUID とは異なり液体窒素 (77 K) を冷媒とする冷却で動作する. 高温超伝導体 SQUID の利点はいろいろあるが,

1. 冷却のためのランニングコストが安く装置の維持が容易
2. 冷却能力が高いのでシステム構築の自由度が高い

が挙げられる. 他方, 欠点としては,

3. 動作温度が高いので低温 SQUID に比べ感度が低い
4. 動作温度が臨界温度に近いので磁束量子運動による低周波 (1/f) 雑音が大きい
5. 全体として安価な (特に低温 SQUID とくらべ) システムでなければならない

が大きな必要条件となる.

極微弱磁場を検出する SQUID システムにおいては, 外部からの環境雑音を低減する磁気シールドが, コストや装置の大きさにおいて大きなウエイトを占めている. そこで,

6. 簡易 (小型, 安価) で効率の良い磁気シールド技術と
 7. 簡易なシールドによる磁場環境 (できれば無シールド状態) で安定に動作する SQUID の開発
- がクローズアップされる. また, 4, 7 の条件から SQUID の特性としては

8. 磁場中での磁束運動を抑制し低周波雑音を低減させる方法

が重要な課題となる. これは, 酸化物超伝導体の磁束ピンニングや磁束ダイナミクスに関わる基礎的な問題を含み, さらに SQUID の構造設計に至る工学的

な側面を持っている.

量子計測研究分野では高温超伝導体の登場以来, いろいろな場所で種々の用途に使える汎用性のある SQUID の開発を目指して研究を行ってきた [1]. この数年の研究で, YBCO 薄膜や結晶粒界における磁束運動のふるまいが徐々に明らかとなり, 7, 8 の項目に関する研究に進展が見られた. また, 6 の磁気シールドについても有効な方法が開発されつつある. 本稿ではこれらに関する量子計測研究分野の研究の現状について概説する.

2 高温超伝導体 SQUID の構造

2.1. 直結型磁束計

酸化物超伝導体は, 線材によりコイルを作製しても SQUID を構成する薄膜材料との超伝導コンタクトが取れない. 従って Nb のような低温超伝導体 SQUID で使われているハイブリッド技術, すなわち薄膜 SQUID と巻線型検出コイルを組み合わせる磁束計を構成する技術は使えない. そこで, 薄膜検出コイルを基板上にいっぱい大きさに作り, 同一基板上に作製した薄膜 SQUID と直接結合させる. また, 積層構造の超伝導薄膜では段差を乗り越える部分で結晶粒界ができたり, 超伝導特性が劣化したりして磁束ゆらぎ雑音が容易に増加する. したがって, 超伝導薄膜一層から形成できる直結型磁束計が一般的である.

図 1 a に示したのは, YBCO 薄膜から作製した, 我々のオリジナルデザインによる直結型 SQUID 磁束計である [2, 3]. 10 mm×10 mm の SrTiO_3 (STO) 基板上に 200~250 nm の厚さで成膜した YBCO 薄膜を使ってフォトリソグラフィとアルゴンイオンミリングによって作製している. 検出コイルは矩形のワッシャー型 (内径 3 mm×3 mm の孔) をしており, 基板の中央付近に形成した SQUID に直接結合している (図 1 b 等価回路参照). このような構造の検出コイルの磁場捕獲面積は, 外径を a , 内径を b とするとき $A \sim ab$ で与えられる. また,

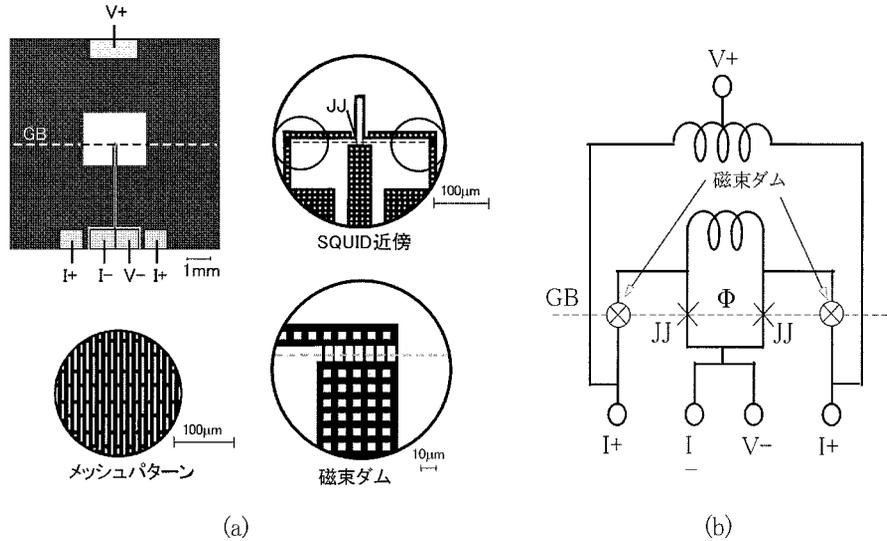


図1 (a)検出コイル直結型 SQUID 磁束計の構造と(b)等価回路

SQUID への磁束伝達効率を考慮した検出コイル有効面積 A_{eff} は, SQUID と検出コイルのインダクタンスを L_S , L_P とすると

$$A_{eff} = ab(L_S/L_P) \quad (1)$$

となる. 実測によると, 図1の構造で $A_{eff} \sim 0.4 \text{ mm}^2$ が得られたが, これは直結型 SQUID では比較的大きな値である.

使用した STO 基板は, (001) 方位をなす二つの結晶を傾角 30° で焼結したバイクリスタル構造をしている. (001) 面上にエピタキシャル成長した YBCO は, 基板の中央に存在するバイクリスタル線 (結晶の境界線) 上でそのまま結晶粒界が形成される. この結晶粒界を利用するため SQUID を基板中央に配置し, YBCO 膜にできる粒界接合を使って 2 つのジョセフソン素子 (JJ; 図 1 a) としている.

2.2. メッシュ構造とフラックスダム

地球磁場のような静磁場中でデバイスを冷却する場合, 臨界温度以上の温度で超伝導薄膜を貫いていた磁束の一部は, 臨界温度で超伝導になったあとも欠陥などにトラップされる. トラップされた磁束量子は熱エネルギーによりゆらぎ, 検出コイルと SQUID に低周波型 ($1/f$) の磁束雑音を生じさせる [4]. ここで, 超伝導薄膜をストリップ状としその線幅を w とすると, 磁束トラップが生じる冷却磁場の閾値 B_{th} は

$$B_{th} \cong \frac{\pi\Phi_0}{4w^2} \quad (2)$$

になるとされている [5, 6]. なお, Φ_0 は磁束量子で

ある. 図 1 a の構造では, 検出コイルの全面に $45 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ のスロットを作り込み, また SQUID の近傍の配線部には $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ のホールをあけ, いずれも YBCO 膜の線幅は $5 \mu\text{m}$ となるようにした. SQUID 自身も線幅 $5 \mu\text{m}$ のストリップからなる構造をしている [7]. したがって, 式(2)から $B_{th} \sim 65 \mu\text{T}$ と推定され, 地球環境磁場中 ($\sim 50 \mu\text{T}$) で冷却した場合でも, 磁束トラップによる低周波雑音の増加が抑制されると期待できる.

ところで, 地磁気は環境に強磁性体 (例えば建材中の鉄骨) が存在すると勾配をもつ. その中で装置を移動させると等価的に変動磁場が生じることになり, 検出コイルと SQUID からなる超伝導閉回路には大きな遮へい電流がながれる. このような変動磁場による遮へい電流は, ローレンツ力により超伝導薄膜のエッジに磁束量子を侵入させ, 低周波磁束雑音の増加を引き起こす [8]. 捕獲面積 ab でインダクタンス $L_S \sim 5 \text{ nH}$ の検出コイルに $1 \mu\text{T}$ の磁場変動があると $I_S \sim 5 \text{ mA}$ の遮へい電流となるが, これは $5 \mu\text{m}$ 幅の YBCO 膜 (200 nm 厚) の臨界電流値の $1/5$ 程度の大きさである. 従って, 数 μT の変動磁場で大きな磁束トラップが生じる可能性がある. 汎用型 SQUID 磁束計としては, 変動磁場に対しても耐性をもつ必要がある.

このような遮へい電流の効果を消すために, 超伝導閉回路の一部に超伝導性を弱くした部分を作製し, 低い電流値で磁束を閉回路中に入れる “磁束ダム” がある [9, 10]. 磁束ダムが破れることで磁束が検出コイル内に入り, 遮へい電流が制限される訳

である。我々の直結型磁束計の構造でも磁束ダムを取り入れ、図 1 a に示したように、SQUID と検出コイルの配線（リード線）部がバイクリスタル線をまたぐ部分で形成される粒界接合を磁束ダムとして利用している。しかし、以前の我々の研究では、磁束ダムがあっても数 μT の変動磁場で磁束の侵入を示すような特性が観測されており [2]、リード線の超伝導膜に単に弱結合が存在するだけでは磁束運動は抑制できなかった。そこで、幅 $50\ \mu\text{m}$ のリード線に $45\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ のスロットを $5\ \mu\text{m}$ 間隔で配置した [3]。磁束ダム全体の臨界電流は $450\ \mu\text{mA}$ 程度と推定される。また、スロット一つのインダクタンス L_{SL} を $75\ \text{pH}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 幅の粒界接合の臨界電流 I_c を $100 \sim 150\ \mu\text{mA}$ と見積もると $L_{\text{SL}} I_c > \Phi_0$ となることから、磁束ダム中の磁束量子はスロットの中で安定に存在すると予想される。つまり、侵入した磁束量子をスロット中に留めることによって、磁束雑音の運動と侵入を抑制しようとしたわけである [11]。

3 SQUID 磁束計の特性

作製した SQUID 磁束計に対して冷却時に磁場を印加する磁場中冷却実験と、冷却後に磁場を印加する変動磁場実験の二種類を行った。磁束計の入った液体窒素デューワーは、 μ メタル二層からなる磁気シールドルーム中に置いた一層の μ メタルシリンダー内に設置してある。デューワーの外側に巻いたソレノイドコイル ($4\ \mu\text{T}/\text{mA}$) にバッテリーから電流を供給し、SQUID の面に対して垂直方向に磁場を印加する。磁場中冷却実験では、液体窒素中にあるカプセル (SQUID の入った容器) の外部からヒータで加熱して臨界温度以上にしたのち、ヒータを切っ

て冷却した。変動磁場実験では、磁場印加なしで冷却したあと、徐々に磁場を増加して一定の値とした。

図 2 a は磁場中冷却実験の結果である。磁気遮へいが十分でないため、低周波で増加する環境雑音と振動によると思われる雑音が $1 \sim 3\ \text{Hz}$ に見られる。しかし、磁場印加の効果は明瞭に観測され、 $83\ \mu\text{T}$ 以下の冷却磁場では雑音の増加がほとんど見られないのに対して $110\ \mu\text{T}$ では低周波雑音が顕著に増加する。また、このとき SQUID の出力にはドリフトが観測された。一方、 $40\ \mu\text{T}$ を印加した変動磁場実験では、磁場変化直後にわずかに雑音が増加する傾向が見られたが 20 分ほどで印加前のレベルにまで下がった。これに対し、 $51\ \mu\text{T}$ の磁場を印加した場合には 30 分経過しても SQUID の出力は安定せず、低周波雑音は増加したままであった (図 2 b)。このようにどちらの実験においても、ある閾値磁場以下では低周波雑音の増加がほとんど見られずに安定な動作が得られた。また、磁場中冷却時の閾値 (約 $80\ \mu\text{T}$) と変動磁場の閾値 (約 $40\ \mu\text{T}$) は、シールドの完全でない環境や無シールドの地磁気中でも SQUID 磁束計が安定に動作することを示している。

4 低磁場空間の生成

以上の結果から、超伝導薄膜に磁束ダムとスロットを形成することによって、磁束量子の侵入と侵入後のゆらぎが抑制され低周波雑音が改善されることが分かった。我々はさらに、このような磁束計を用いて、心臓磁場 (MCG: Magnetocardiogram) 程度が計測可能な低磁場空間を構築する技術について検討を行っている [12]。一般に生体磁気信号が存在す

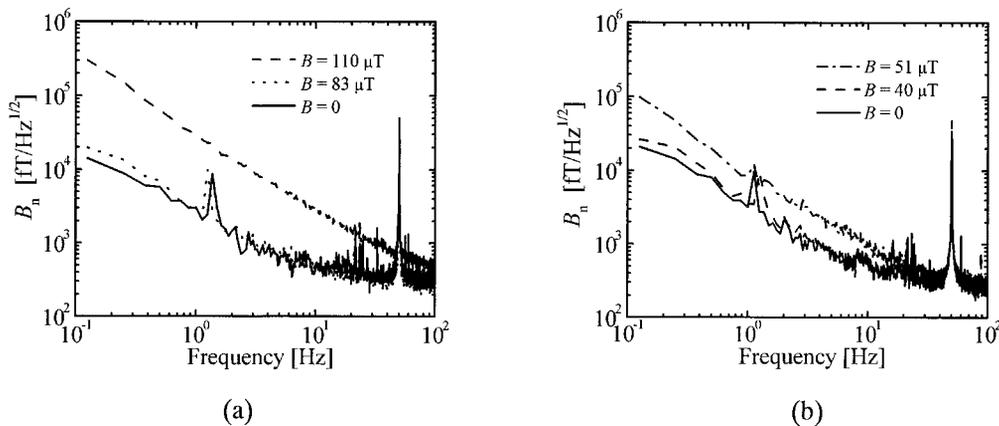


図 2 (a)冷却時の印加磁場と(b)冷却後の変動磁場による磁場雑音の変化

る低周波数帯では、電気機器から生じる電源磁気雑音や電車、車などの作り出す変動磁場雑音が大きな振幅を持っている。このような雑音を低減するため、脳の磁場を計測するシステムでは多層の高透磁率材で構成される重厚広大な（数メートル立方、重さ数トン）磁気シールドルーム（MSR: Magnetically shielded room）が用いられる。これに対し、汎用性と経済性を満足するために、一層のみの μ メタルから構築される MSR と、環境磁場を検出し計測空間に補償磁場を加えることで低磁場空間を実現する能動的方法（アクティブキャンセレーション）[13–15]の組み合わせを検討している。

本研究のために 1 mm 厚のパーマロイ 1 層からなる 1.8 m 立方のプレハブ MSR を試作した。重量は 500 kg で、2 階の実験室に設置できた。MSR の外部においたフラックスゲート（FG）磁束計と、MSR 内中央に置いた SQUID 磁束計で同時測定した環境磁気雑音のスペクトルを図 3 に示す。ここで計測した磁場は鉛直方向の成分であり、以後、磁気雑音と表記するのはすべて鉛直成分である。また、FG 磁束計は 1 Hz の低周波遮断フィルタを用いているため、

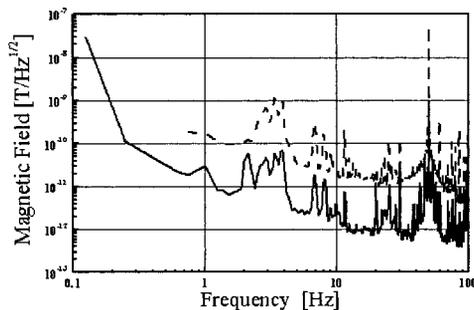


図 3 同時測定した簡易型 MSR 内部（実線）と外部（点線）の環境磁場雑音

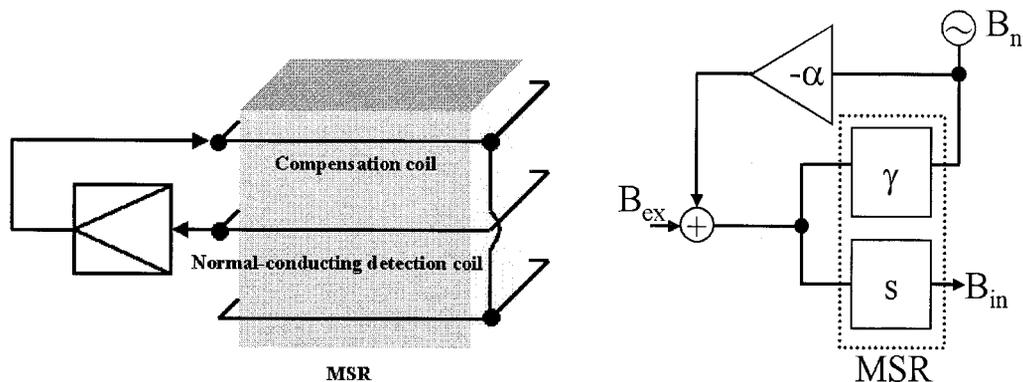


図 4 (a) MSR の外周に検出コイルと補償コイルを巻くフィードバック型アクティブシールド。(b) 磁気信号の流れを示すブロック図。

低周波数の測定値を省いている。1～10 Hz には建物の振動に起因するノイズが MSR 内外部共に見られ、MSR 内部でその最大振幅は 50 pT 程度に達し MCG 信号のピークと同程度になる。商用電源磁気雑音については MSR 外部で約 45 nT、内部で約 1 nT と 100 Hz までの環境磁気ノイズでは最大の振幅を示し、連続周波数をもつ背景ノイズに対して 10^3 倍の非常に大きな値を示す。このような MSR 内外の環境雑音から評価した簡易型 MSR の磁気シールド率は低周波で約 20 dB (1/10) であるが、10 Hz 以上では周波数とともに一次の伝達関数で増加し、100 Hz で約 30 dB (1/30) 程度となる。これらの値は、簡単な式で与えられる磁気シールド率の計算値と一致している。

4.2. フィードバック型磁気シールド

高温超伝導体 SQUID を使った汎用磁場計測システムについての我々の構想は、簡易型 MSR による磁気シールド、MSR 外の磁気センサを使ったアクティブシールド、MSR 内の参照用 SQUID 磁束計を使ったアクティブシールドの組み合わせでそれぞれ 20 dB の磁場低減を行い、トータルで 60 dB (1/1000) の減衰効果を得るものである。これは、現在脳磁場計測用に病院などで使われている重厚広大な多層 MSR に相当する。

この研究で新たに考案したアクティブシールド方式を模式的に図 4 a に示す [12]。簡易型 MSR の中央の高さに MSR の周囲に 60 回銅線を巻いて誘導型の検出コイルとしている。誘導コイルの出力は磁場の時間微分であるので、コイル出力を増幅・積分したあと、高抵抗を介して電流変換して補償コイルに加える。補償コイルは検出コイルと同様に MSR

外周に巻き、上下端に分けたコイル（5回巻き）を直列に接続している。この方式において、補償磁場は高透磁率材料である MSR の μ メタルを介して検出コイルにフィードバックされるため閉ループのアクティブシールドとなる。図 4b にブロック図で示した制御信号の流れの解析から、MSR 内部の磁場 $B_{in}(\omega)$ は

$$\{B_{in}(\omega)\}^2 = \left\{ \frac{s(\omega)}{1 + \gamma(\omega)\alpha(\omega)} B_{ex}(\omega) \right\}^2 + \left\{ \frac{s(\omega)\gamma(\omega)\alpha(\omega)}{1 + \gamma(\omega)\alpha(\omega)} B_n(\omega) \right\}^2 \quad (3)$$

と表すことができる。ここで $B_{ex}(\omega)$ は MSR 外部の磁気雑音、 $B_n(\omega)$ は検出コイルの熱雑音やアンプ系に含まれる電圧性雑音を考慮した等価磁気雑音、 $s(\omega)$ は MSR の遮蔽特性、 $\gamma(\omega)$ は検出コイルの伝達関数（出力特性）、 $\alpha(\omega)$ は検出コイルの出力を補償磁場に変換する回路の伝達関数を表す。 $B_{in}(\omega)$ は、 $\gamma(\omega)\alpha(\omega) \gg 1$ のとき、 $\{B_{in}(\omega)\}^2 \approx [s(\omega)/\gamma(\omega)\alpha(\omega)]^2 \{B_{ex}(\omega)\}^2 + [s(\omega)]^2 \{B_n(\omega)\}^2$ となる。外部磁気雑音に対しては $B_{in}(\omega) \propto B_{ex}(\omega)/\gamma(\omega)\alpha(\omega)$ であるため、ループゲインに比例して $B_{in}(\omega)$ は減衰する。また磁気雑音の最小値は $s(\omega)B_n(\omega)$ で与えられる。

図 5 にフィードバック型のアクティブシールドを行う前後の MSR 内の環境磁気雑音を示す。0.5～数 Hz の低周波領域において 10 dB 程度の低減効果がみられ、さらに 2～数 Hz の範囲にある振動性磁気雑音に関しては 20～30 dB の大きな低減効果が得られた。この振動性雑音の低減は、検出コイルが MSR と一体となって振動する結果、補償磁場が実験室中に存在する傾斜磁場を打ち消すためと考えられる。10 Hz 以上の周波数では、振幅の大きなピーク

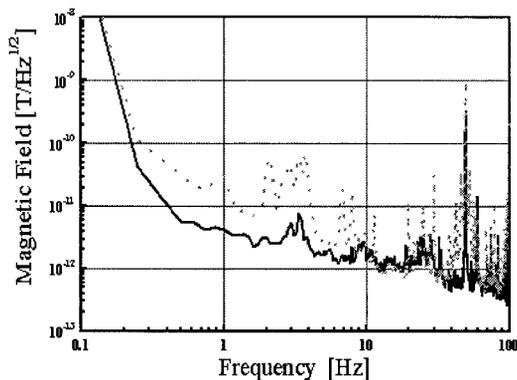


図 5 アクティブシールドをかける前(点線)とかけた後(実線)の MSR 内の環境磁気雑音

性の雑音は 20 dB 以上低減されるのに対し、連続的な背景雑音に対してはほとんど低減していない。これは、MSR 内の磁場検出に用いた SQUID 磁束計の感度が低く (600 fT/Hz^{1/2} at 100 Hz)、その限界に達しているためと思われる。

フィードバックアクティブシールドの特長として、計測を行う空間 (MSR) に最も近い所で雑音が検出できる、振動性の雑音にも有効である、フィードバック型であるのでループゲインの微調整がいらぬ、コイルと電子回路のみからなるのでコストが安い、などが挙げられる。また、検出コイル面積が大きいので感度が高く、コイルの熱雑音とアンプの電圧雑音を考慮した感度は 1 Hz でも 1.3 pT/Hz^{1/2} と十分な値を有している。この感度は、フラックスゲート磁束計を凌駕している。

5 MCG 信号の計測

簡易型 MSR とアクティブシールドを組み合わせ、磁気雑音を低減させたのち高温超伝導 SQUID 磁束計を用いて MCG 計測を試みた。健康被験者(男性：22 才)が仰臥した状態で前胸壁上に、SQUID を設置した FRP 製デュワーの先端を接触させて MCG 計測を行った。なお、電源 (50 Hz) 雑音の振幅が MSR 内で 1 nT_{p-p} 程度あるため、磁束計出力にローパスフィルタ (40 Hz, 48 dB/oct) を適用して低減を図った。図 6 に示す時間波形のように、アクティブシールドを行わない場合、MCG 波形は環境の低周波雑音と振動性雑音に埋もれてしまい観測できない。しかし、アクティブシールドを行うことでこれらの磁気雑音は低減され、約 50 pT の振幅を

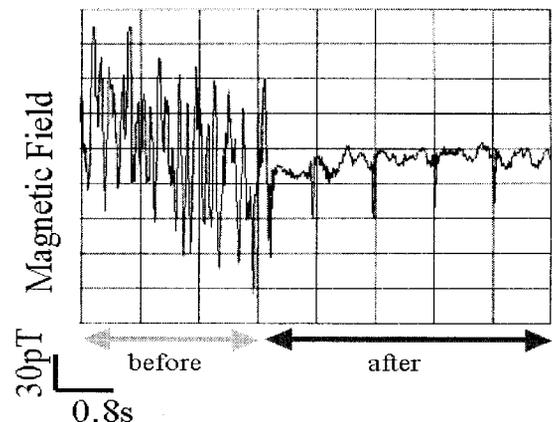


図 6 フィードバック型アクティブシールドを行う前後で計測した MCG 波形

もつ MCG 信号が観測された。

この測定結果は、簡易型 MSR とアクティブシールドを組み合わせた雑音除去方式の有効性を良く示している。しかし、時間波形からも分かるように SN 比はまだ十分ではなく、連続スペクトル性の背景雑音とともに、ピーク性の電源雑音を選択的に除去する必要がある。前述したように、参照用の SQUID 磁束計を設けその信号を MSR 内にフィードバックする方法が残されている。この方法は標準的なものであり、20 dB 程度の改善が見込まれる。

6 おわりに

本研究は、今後研究所内のプロジェクト研究に引き継がれ、適応制御研究分野と情報数理研究分野とともにラットの心磁図の無侵襲計測に発展させる予定である。実験動物の心臓動脈を閉塞させた直後の

急性の活動変化はよく調べられているが、SQUID 磁束計により無侵襲的に長時間計測した研究はこれまでに例がない。梗塞により壊死した心筋の周囲の組織が徐々にモデリングする様子を、心筋リズムの観察により追いかける予定である。それらのデータの生理学的検討や数理的解析は、上記二分野の今後の研究課題である。量子計測分野では、初年度でなんとか装置を立ち上げ、次の年度にかけて装置の改善と計測をじっくり行う予定である。

本稿を終えるにあたり、この研究を実際に実験的に遂行してくれた多くの研究室の諸君（敬称略：平田恵啓、平野悟、小山洋、林周、藤田学、鷺尾知暁）に感謝する。また、岡山大学の藤原耕二助教授と竹中工務店技術研究所の山崎慶太研究員には、MSR の磁場解析でお世話になった。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（10142101, 11359001）によった。

[参考文献]

- [1] 栗城真也, 電気学会誌, 120, 219 (2000).
- [2] 小山洋, 栗城真也, 横澤宏一, 信学論文誌, J 83-C, 860 (2000).
- [3] H. Oyama, S. Kuriki, M. Matsuda, IEEE Trans. Appl. Supercond., to be published.
- [4] M.J. Ferrari, M. Johnson, F.C. Wellstood, J.J. Kingston, T.J. Shaw, J. Clarke, J. Low Temp. Phys., 94, 15, 1994.
- [5] E. Dantsker, S. Tanaka, P.-Å. Nilsson, R. Kleiner, J. Clarke, Appl. Phys. Lett., 69, 4099 (1996).
- [6] E. Dantsker, S. Tanaka, J. Clarke, Appl. Phys. Lett., 70, 2037 (1997).
- [7] S. Kuriki, H. Oyama, E. Maruyama, A. Hayashi, S. Hirano, D. Suzuki, M. Koyanagi, IEEE Trans. Appl. Supercond., 9, 3275 (1999).
- [8] J. Z. Sun, W. J. Gallagher, R. H. Koch, Phys. Rev. B, 50, 13664, (1994).
- [9] R. H. Koch, J. Z. Sun, V. Foglietta, W. J. Gallagher, Appl. Phys. Lett., 67, 709 (1995).
- [10] F. P. Milliken, S. L. Brown, R. H. Koch, Appl. Phys. Lett., 71, 1857 (1997).
- [11] S. Hirano, H. Oyama, M. Matsuda, T. Morooka, S. Nakayama, S. Kuriki, IEEE Trans. Appl. Supercond., to be published.
- [12] S. Kuriki, A. Hayashi, Y. Hirata, Proc. Biomag' 2000, to be published.
- [13] H. J. M ter, R. Huonkerr, H. Rogalla, Meas. Sci. Technol., 4, 1370 (1993).
- [14] D. Platzek, H. Nowak, F. Giessler, J. Röther, M. Eiselt, Rev. Sci. Instrum., 70, 2465 (1999).
- [15] V. O. Kelhä, J. M. Pukki, R. S. Peltonen, A. J. Penttinen, R. J. Ilmoniemi, J. J. Heino, IEEE Trans. Magn., MAG-18, 260 (1982).