

カレントビューアによる電流分布の可視化

齊藤, 兆古 / SAITO, Yoshifuru / HIROTA, Akihiro / HAYANO, Seiji / 早野, 誠治 / 廣田, 章博

(出版者 / Publisher)

電子情報通信学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ, 環境電磁工学 / 電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ, 環境電磁工学

(巻 / Volume)

103

(号 / Number)

564

(開始ページ / Start Page)

77

(終了ページ / End Page)

80

(発行年 / Year)

2004-01-13

カレントビューアによる電流分布の可視化

廣田 章博[†] 早野 誠治[†] 齋藤 兆古[†]

[†]法政大学工学部 〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

E-mail: [†]hirota@ysaitoh.k.hosei.ac.jp

あらまし 超伝導体の量子効果を利用した SQUID (Superconducting Quantum Interface Device) 磁束計の多チャンネル化と広範な普及に伴い、生体の神経活動に伴う微弱な磁界測定が可能となり、新しい医療診断装置として鋭意開発が進められ、実用化直前と言える状況にある。いわゆる MCG, MEG による非侵襲的診断技術・装置の実用化である。MCG (Magnetocardiogram), MEG (Magnetoencephalogram) における技術的問題点は 2 点で代表されるであろう。1 点は生体の神経活動に伴う磁界強度は極めて小さく S/N 比が悪いため、同期加算などの信号処理や磁気シールドルームを必要とする等のハード的な点である。他の問題点は、測定された磁界分布から磁界源となる電流双極子分布などを探査する点にある。換言すれば、磁界から電流を求める逆問題を解くソフト的な点である。

本報告は、後者の問題点、すなわち逆問題解くソフトの問題点をハード的に解決する一方法の提案である。電流が流れる導体周辺全てを取り囲まずに電流分布を測定する変形ロゴスキーコイル(これをカレントビューアと呼ぶ)の動作検証モデルを作成して、原理検証実験を行った結果、比較的良好な結果が得られたので報告する。

キーワード カレントビューア, 磁界分布, 電流分布

Current Viewer for Electric Current Visualization

Akihiro HIROTA[†] Seiji HYANO[†] and Yoshifuru SAITO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Hosei University 3-7-2 Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8584 Japan

E-mail: [†]hirota@ysaitoh.k.hosei.ac.jp

Abstract With widely spreading use of multi-channels SQUID magnetic flux meter utilizing the quantum effect of superconductor, it is possible to measure the extremely small magnetic fields. Since they can measure the magnetic fields accompanying nerve activations of human, then utilization of this performance makes it possible to carry out the measurements of so-called MCG and MEG, which lead to exploit new non-invasive medical diagnostic devices. When measuring the MCG or MEG, we have confronted to the two serious problems. One is the magnetic shielding technology in order to reduce the external noise magnetic fields, and the other is that inverse source problem which essentially accompanies with the ill-posed system of equations. Namely, one is the hardware problem how to build up the magnetic shielding room, and the other is one of the software problems how to obtain unique solution of the inverse source problems.

In this paper, we propose the differential current viewer coil system in order to solve the software problem, i.e., our differential current viewer system enables us to visualize the current distribution from locally measured magnetic field. To verify our approach, this paper carries out the theoretical as well as experimental approaches. As a result, principal key idea of our approach has been clarified.

Keyword Current Viewer, Magnetic Distribution, Current Distribution

1. はじめに

超伝導体の量子効果を利用した SQUID 磁束計の多チャンネル化と広範な普及に伴い、生体の神経活動に伴う微弱な磁界測定が可能となり、新しい医療診断装置として鋭意開発が進められ、実用化直前と言える状況にある。いわゆる MCG, MEG による非侵襲的診断技術・装置の実用化である。

MCG, MEG における技術的問題点は 2 点で代表されるであろう。1 点は生体の神経活動に伴う磁界強度は極めて小さく S/N 比が悪いため、同期加算などの信

号処理や磁気シールドルームを必要とする等のハード的な点である。他の問題点は、測定された磁界分布から磁界源となる電流双極子分布などを探査する点にある。換言すれば、磁界から電流を求める逆問題を解くソフト的な点である。

筆者らは、逆問題を解くソフトの問題点をハード的に解決する一方法として、変形ロゴスキーコイルを用いたカレントビューアを提唱し、電流分布探査を試みてきた^{[1]-[5]}。カレントビューアは平面状の電流位置を推定する場合、ソレノイド型のサーチコイルよりも高

感度に電流の作る磁界を効果的に測定可能とする。近傍磁界の高分解能計測を目指す方向性としては共振周波数を可能な限り高周波化し、さらにコイルを微細化し、測定対象との距離を物理的に接近させる手法が研究されているが、カレントビューアはアンペアの法則に基づいて構成されているので、磁界から電流を拡大して可視化する磁界レンズ機能を有する。したがって、カレントビューアの焦点機能を利用して平面状に分布した電流位置を推定する場合、より高分解能での測定が期待できる。

本論文ではカレントビューアの動作原理検証を行う。カレントビューアは空芯で、且つ、誘起電圧で測定するため、インピーダンスが高くとも、カレントビューアを形成するコイルが充分小さな細線であれば、コイルに生ずる渦電流も抑制され、測定対象とする磁界を乱さない非侵襲的測定を可能と考えられる。さらに、コイル間のキャパシタンスが存在し共振する可能性は否定出来ないが、理想的にカレントビューアコイルに鎖交する磁束が同一で有れば、コイル間の電位差は無く、キャパシタンスの効果は現れない。また、カレントビューアは電流と磁界間の基本的な関係で有るアンペアの周回積分の原理を直接利用することから、理想的に実現できれば理論上無限大の解像度で平面状の電流分布が探査可能で有る。このカレントビューアを用いて電流の深さ方向を計測するための原理検証実験を行った。その結果、比較的良好な結果が得られたので報告する。

2. 差動コイルを用いた電流分布推定

2.1. センサーの形状

複数個の角型コイルを組み合わせた同心円状のサーチコイルで構成されたカレントビューアは、アンペアの周回積分の法則を直接利用するログスキーコイルを部分的に取り出した形状であり、センシング部分は電流が流れる導線を覆う構造となっている。このため、カレントビューアは電流の作る磁界を効果的に測定可能とする磁気センサーである。

カレントビューアの動作原理を、図1を用いて説明する。カレントビューアを通電中の直線導体近傍で水平に走査した場合、カレントビューアの円弧中心と導体位置が一致する時点で電流の作る磁界は半円弧状のカレントビューアコイルに最大鎖交数となる。しかし、カレントビューアの円弧中心と導体位置がずれた場所に位置する場合、電流*i*の作る磁界*H*は半円弧状のコイルの局所部分にのみ鎖交する。従って、電流の位置推定精度が向上する。

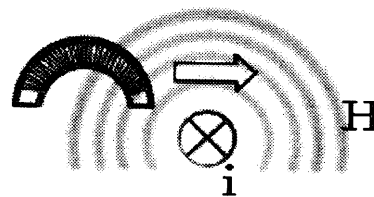


図1 Current Searching For Current Viewer

2.2. 差動コイルの原理

図2のように導線に電流*i*が流れているとする。このコイルから*r*₁と*r*₂離れた位置に2個のサーチコイルが図のように設けられている。一方のサーチコイルの断面積と巻数はそれぞれ*a*₁と*n*₁であり、他方の断面積と巻数は*a*₂と*n*₂である。両方のサーチコイル共に同方向へ巻かれているとすれば、電流*i*の作る磁界に起因する誘起電圧はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$V_1 = -n_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = -\frac{\mu n_1 a_1}{2\pi r_1} \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$$V_2 = -n_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = -\frac{\mu n_2 a_2}{2\pi r_2} \frac{di}{dt} \quad (2)$$

サーチコイル1を固定してサーチコイル2を動かす、両者の誘起電圧が等しくなるサーチコイル間の距離を求める。すなわち、導線とサーチコイル1との距離*R*を固定し、サーチコイル2を移動させ、両サーチコイルの差動電圧が零になるサーチコイル間の距離*r*を求めると以下のようなになる。

$$|V_1 - V_2| = 0 \text{ より}$$

$$r_1 = \frac{n_1 a_1}{n_2 a_2} r_2 \quad (3)$$

ここで、*r*₁=*R*、*r*₂-*r*₁=*r*とすると、上式は以下のように変形される。

$$r = \frac{|n_2 a_2 - n_1 a_1|}{n_1 a_1} R \quad (4)$$

(4)式はサーチコイル1と導線との間の距離*R*とサーチコイル1,2間の距離*r*が比例関係にあり、サーチコイル1,2間の距離*r*が分かればサーチコイル1と電流の流れるコイルとの間の距離*R*がわかり、結果として電流の位置が求まることを意味する。

電流の大きさや波形はサーチコイル1の起電力(1)式を時間に関して積分し、距離*R*が既知であるから、次式によって求められる。

$$i = \frac{2\pi R}{\mu n_1 a_1} \int V_1 dt \quad (5)$$

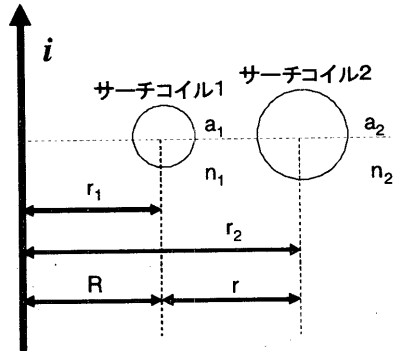


図 2 Constants of Current Viewer for Sensor Output Voltage Calculation

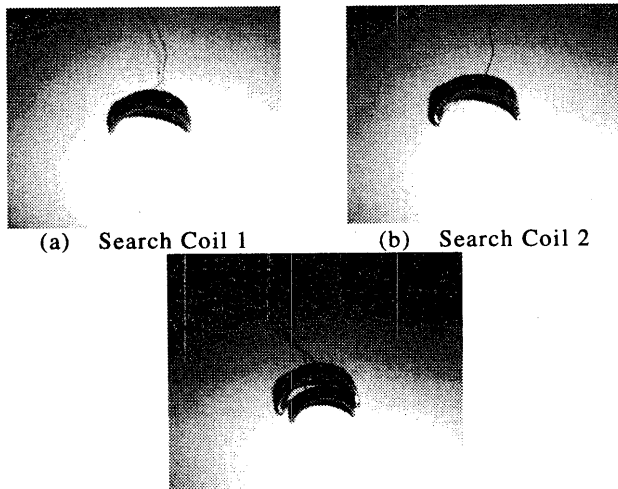
3. 差動コイルを用いた電流分布推定

3.1. 差動コイル

本論文で用いたサーチコイル 1, 2 を図 3 に, その仕様を表 1 に示す.

表 1 Specification of the Current Viewer

	巻き数 [turn]	半径 [mm]	導線の太さ [mm]
サーチコイル 1	160	r1=15	0.2
サーチコイル 2	240	r2=20	0.2



(c) Differential Coil for Current Viewer

図 3 Tested Current Viewers

3.2. 位置推定

10[kHz], 0.5[A] の正弦波電流が流れている導線とサーチコイル 1 間の距離 R を固定し, その導線をサーチコイル 1 の中心に配置する. 導線とサーチコイルの様子を図 4 に示す. 差動コイル間の距離 r を変化させた時の差動電圧を測定した結果を図 5(a)-(c) に示す. また, 各周波数成分において位置推定を行った結果を図 6 に示す. サーチコイル 1 と電流間の距離を(4)式より求め, その理論値と実験値を表 2 に示す.

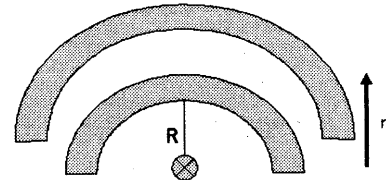


図 4 Schematic Diagram of the Modified Rogowski Coils (Current Viewers) and Current Carrying Coil

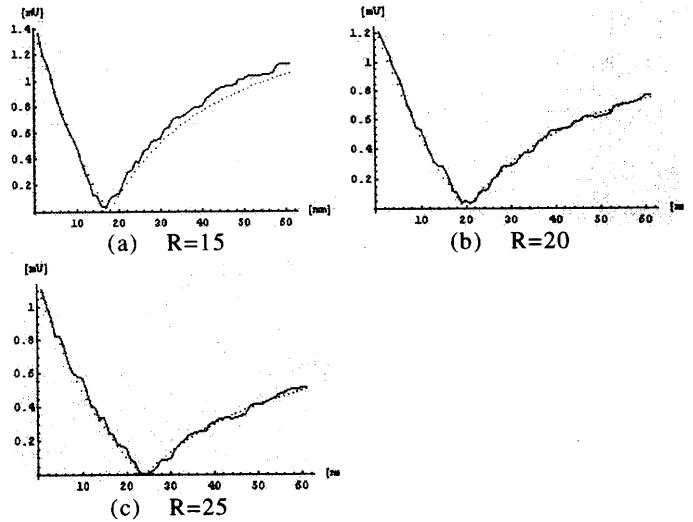


図 5 Output Voltages of the Tested Differential Coil

表 2 Current Positions for Simulated and Experimental Value

Simulated Value	$r=$	15.6[mm]	22.5[mm]	27[mm]
	$R=$	15[mm]	20[mm]	25[mm]
Experimental Value	$r=$	約 16[mm]	約 21[mm]	約 25[mm]
	$R=$	15.2[mm]	18.9[mm]	22.5[mm]

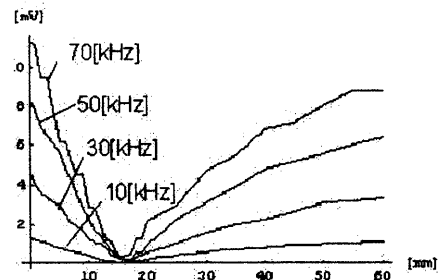


図 6 Output Voltages when Changing the Exciting Frequencies

図 5 と表 2 の結果から分かるように, 距離 R が小さいほど, 急激に差動電圧が低くなり, 差動コイル間の距離 R は正確に決まる. このため, センサーから電流までの距離 r も正確に推定されることとなる. 図 6 の結果から何れの周波数において全てほぼ一致した位置

となっている。

以上のことから原理検証実験としてはほぼ満足できる結果を得ることができた。

3.3. カレントビューアの位置分解能

カレントビューアの円弧内における磁界分布測定を行った。実験では、コイルに流れる電流は 3.2 と同様に 10[kHz], 0.5[A]の正弦波電流である。その導線をサーチコイル 1 の中心から端に向かって 1[mm]ずつ動かす。そして各位置においてサーチコイル 2 を垂直方向に動かした。実験図を図 7 に、そして各位置における差動電圧を図 8 に示す。

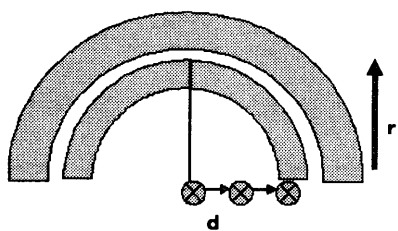


図 7 Diagram of the Current Estimation

この結果、中心から離れるにしたがって理論値と実験値との差が大きくなった。本来カレントビューア的位置分解能はその直径内であることが知られているが、この結果から中心近傍においてのみ良好であった。理論上、カレントビューアはアンペアの法則に基づいて構成されているので、カレントビューアは磁界から電流を拡大して可視化する磁界レンズの機能を有している。その結果、求める対象物に対しキャンシ最大値を得る場所、すなわち、電流から生じる磁束を全て鎖交する中心において差動コイルを用いてフォーカシングをすればその電流の深さ方向を測定可能となることが分かった。

4. まとめ

本論文では、電流が流れる導体周辺全てを取り囲まずに電流分布を測定するカレントビューアの動作検証モデルを作成し、その深さ方向を測定するための原理検証実験を行った。その結果から、電流源の水平方向と深さ方向位置は良好に推定された。

また、筆者らが提案してきたカレントビューアを直交させたベクトルカレントビューアにこの技術を併用することにより、電流分布の大きさや方向、そして深さ方向を測定可能となること判明した。

文 献

- [1] 斎藤兆古, 亀澤高志, 平間 豊 “三相交流磁気センサー”, 電学論 A, 115, 10, pp956-961, Oct. 1995.
- [2] 青木 誠, 早野誠治, 斎藤兆古 “カレントビューアによる 2 次元電流分布の測定”, 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-99-150, Nov. 1999.
- [3] 廣田章博, 早野誠治, 斎藤兆古 “ベクトルカレントビューアによる電流分布の可視化”, 可視化情報学会, Vol.22, Suppl, No.1, pp81-84, July. 2002
- [4] A. Hirota, I. Marinova, S. Hayano, Y. Saito. "The Current Viewer For Electric Current Visualization", ISFV-10, Japan, Aug. 2002.
- [5] 廣田章博, 早野誠治 “ベクトルカレントビューアレイの試作”, 応用磁気学会, Vol.27, No.4, pp389-392, Mar. 2003

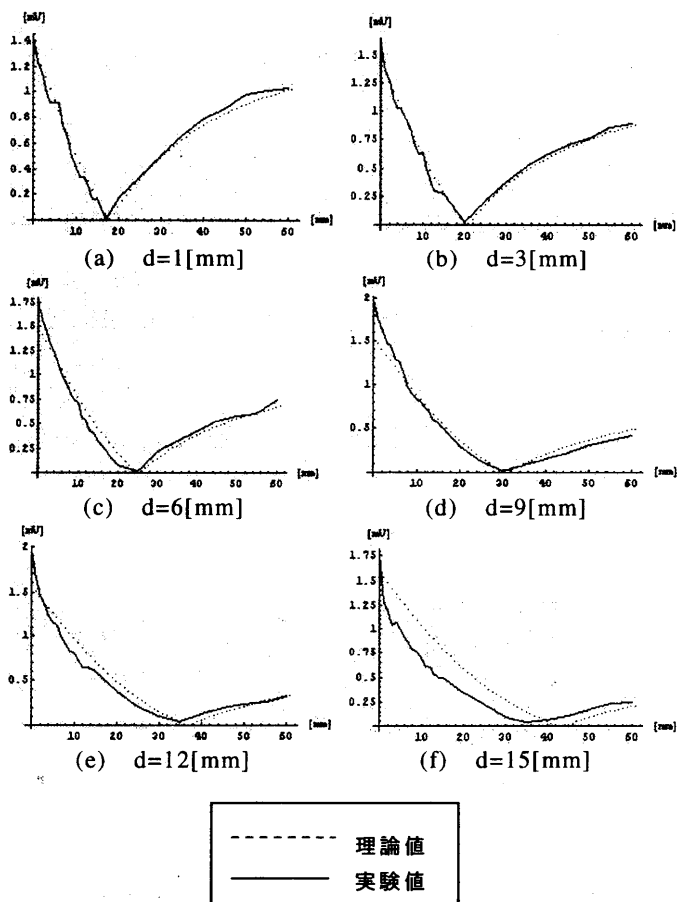


図 8 Output Voltages when Changing the Horizontal Position