

SQUID磁束計による磁場計測法の基礎的検討

山 川 裕 司
(技術研究所)石 川 登
(技術研究所)

§1. はじめに

建築・土木の構造物に溶接不良やジャンカなどの欠陥があれば、設計通りの構造性能が発揮されない原因となる。内部に存在する欠陥を、本体に損傷を与えることなく発見するのが「非破壊試験」の目的である。

現在、建築・土木で行われている主な非破壊試験には、放射線、超音波、電磁波、赤外線などが使われている¹⁾。欠陥の存在を、放射線、超音波などの物理量の変化として捕らえるが、それぞれ長所短所があり、一つの非破壊試験手法であらゆる欠陥を発見できるわけではない。対象や目的に応じて、各種手法を使い分ける必要があり、いくつもの非破壊試験手法を用意しておく必要がある。

一方、建物は高層化、大スパン化、デザインが多様化し、施工技術も変化してきた。それに応じて、非破壊試験に対する要求も変化している。単なる「欠陥の検出」から、「欠陥の形状・寸法の定量的評価」「欠陥が強度・寿命などに及ぼす影響の評価」を要求され、残留応力、強度、弾性係数など「母材の物性評価」を行うことをも要求されている。また、対象となる素材も、極軟鋼、ステンレス、ファイバーコンクリート、CFRPなど、従来の方法では評価が困難なものが増えている。

こういった要求の変化、対象の変化に対して、非破壊試験(NDT: Nondestructive Testing)は定量的非破壊評価(QNDE: Quantitative Nondestructive Evaluation)へと変化している。すなわち、現在存在する各手法における物理量の特性を明らかにし、物理特性の変化を評価する新たな手法を開発することと、別の物理量を把握する新たな手法を開発することが必要となっている。

我々は、新たな物理量として「磁場」に着目した。建築・土木の構造物材として使われる鋼、鉄筋などは

強磁性材料であり、その存在、形状、物性の変化などが磁場の変化として現れると考えられるからである。そして、これを高感度・高分解能で捕らえるために、SQUID磁束計を利用することにした。

SQUIDとは、Superconducting QUantum Interference Devices(超伝導量子干渉素子)の頭文字を取った名称で、従来高感度磁気センサーとして用いられていたフラックスゲートと比べて2桁以上高い感度を持つ磁気センサーであることから、医学分野、地球物理学分野などにおける微弱磁場の計測に応用されており²⁾、実用段階に達したシステムである。現在では酸化物系的高温超伝導体を用いたSQUIDの開発も進められており³⁾、利便性や経済性が飛躍的に向上することが期待され、今後さらに適用分野が広がると考えられる。SQUID磁束計は高い磁場検出感度、高い空間分解能、非接触性を特徴としており、非破壊検査の分野でも、これまでに、欠陥の形状的な不連続性に起因した漏洩磁場の計測⁴⁾やステンレス鋼の塑性化に伴う変態の検出⁵⁾が実験的に試みられている。

建築・土木分野における磁場計測の場合、医学分野での利用とは異なり、磁気シールドルームなどのない屋外にて測定が行われる可能性が高いため、環境磁場の影響を受けにくい測定システムが必要とされる。通常、磁場を直接測定するマグネットメータは、環境磁場の影響を受けやすく、微小磁場の測定

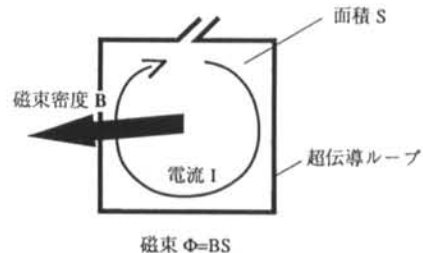


図-1 SQUIDによる磁場計測の原理

が困難であるため、磁気シールドルーム外での測定には磁場の空間1次微分を測定するグラジオメータが用いられる。しかし、高い空間分解能を得ようとする場合、検出コイルの面積を小さくする必要があり、差分を取る2つの検出コイルの微妙な面積の差が出力に大きく影響することになるため、磁場の空間1次微分を正確に測定するグラジオメータを作ることが困難になる。

本報では、バランスの崩れた、すなわち2つの検出コイルの面積が異なるグラジオメータを用い、磁場とその空間1次微分を正しく測定する方法を検討し、その妥当性を実験により確認した結果を報告する。

§ 2. 検出原理

SQUIDマグネットメータは、超伝導状態にある

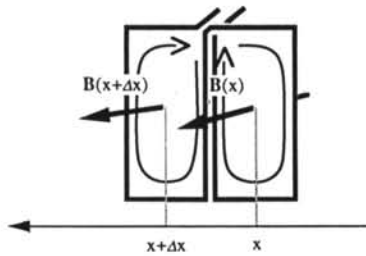


図-2 グラジオメータの原理

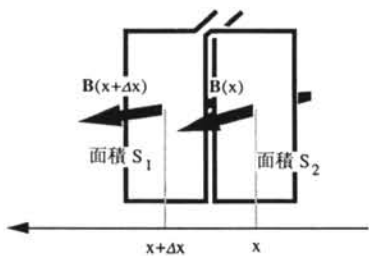


図-3 測定原理図(1)

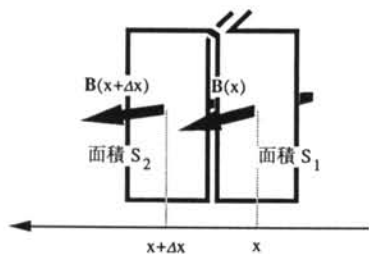


図-4 測定原理図(2)

ループを通る磁束が変化すると、それに応じてループを流れる電流が変化することを利用して磁場を測定する磁束計である。また、図-2のように、向きを反対にしたループを繋ぐことにより、第1のループと第2のループを通る磁束の差に対応した電圧が出力されるものを1次微分型グラジオメータと呼ぶ。

2つのループの面積をS、ループ間の距離を Δx としたときの2つのループに鎖交した磁束の差 $\Delta\phi$ を、式(1)に示す。

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= B_{(x+\Delta x)}S - B_{(x)}S \\ &= \left(B_{(x)} + \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} \Delta x \right) S - B_{(x)}S \\ &= \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} S \Delta x \quad \dots\dots(1)\end{aligned}$$

ループの面積Sとループ間の距離 Δx は一定であるため、 $\Delta\phi$ に対応したグラジオメータの出力Vは、磁束密度の空間1次微分 $\partial B/\partial x$ に比例する。また、環境磁場のように磁場源が遠方にある場合には $\partial B/\partial x$ が極めて小さくなるため、環境磁場の影響を受けにくい磁束計になる。

一方、2つのループの面積が異なる場合には、次のようになる。

2つのループの面積を S_1 、 S_2 とし、 $\Delta S = S_2 - S_1$ とする。2つのループ間の距離 Δx と面積の差 ΔS が十分に小さいとき、2つのループに鎖交した磁束の差 $\Delta\phi_1$ を、式(2)に示す。

$$\begin{aligned}\Delta\phi_1 &= B_{(x+\Delta x)}S_2 - B_{(x)}S_1 \\ &= \left(B_{(x)} + \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} \Delta x \right) (S_1 + \Delta S) - B_{(x)}S_1 \\ &= B_{(x)}\Delta S + \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} S_1 \Delta x \quad \dots\dots(2)\end{aligned}$$

センサーの出力 V_1 は、磁束密度Bとその空間1次微分 $\partial B/\partial x$ の両方に依存する。

ΔS が製作精度に依存する程度ならば、ループの面積が大きいグラジオメータでは、第1項が第2項に比べて十分小さくなるため、第1項は無視でき、グラジオメータとして利用することができる。しかし、高い空間分解能が期待されるグラジオメータでは、ループの面積Sが小さくなるため、第1項が無視できなくなる。

検出コイルのループの面積の差が無視できないグラジオメータを用いて $\partial B/\partial x$ を得るために、以下の方法を検討した。

図-3に示す配置で測定を行なった後、図-4に示すように、ループの左右を入れ換えて測定を行う。

この時の、2つのループに鎖交した磁束の差 $\Delta\phi_2$ を、式(3)に示す。

$$\begin{aligned}\Delta\phi_2 &= B_{(x+\Delta x)}S_1 - B_{(x)}S_2 \\ &= \left(B_{(x)} + \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} \Delta x \right) S_1 - B_{(x)}(S_1 + \Delta S) \\ &= \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} S_1 \Delta x - B_{(x)} \Delta S \quad \dots\dots(3)\end{aligned}$$

$\Delta\phi_1$ と $\Delta\phi_2$ の和ならびに差を、式(4)、式(5)に示す。

$$\begin{aligned}\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 &= B_{(x)}\Delta S + \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} S_1 \Delta x + \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} S_1 \Delta x - B_{(x)}\Delta S \\ &= 2 \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} S_1 \Delta x \quad \dots\dots(4)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 &= B_{(x)}\Delta S + \frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} S_1 \Delta x - \left(\frac{\partial B_{(x)}}{\partial x} S_1 \Delta x - B_{(x)}\Delta S \right) \\ &= 2B_{(x)}\Delta S \quad \dots\dots(5)\end{aligned}$$

したがって、 $V_1 + V_2$ がグラジオメータ、 $V_1 - V_2$ がマグネットメータに対応した出力になる。検出コイルのループの面積がわずかに異なるグラジオメータは、環境磁場の影響を無視できない環境においても動作可能であるとともに、その検出コイルの配置を入れ換えた測定を行うことにより、磁束密度ならびにその空間1次微分を得ることができる。

§ 3. 実験

3.1 試験体

2節で述べた測定法を検証するために、図-5に示す、直径20mm ϕ 、ピッチ10mm、31ターンのコイルを製作した。コイルは非磁性体であるアクリルに溝を切って固定した。コイルには0.5mm ϕ のポリエステル被覆線を用いた。コイル間および電源までの配線はより線にして、配線により誘起される磁気的な影響が及ぼされないよう配慮した。

3.2 計測システム

今回の測定に利用した素子は、図-6に示すよう

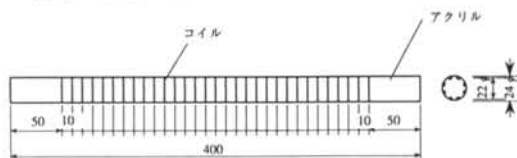


図-5 試験体の形状・寸法

に一枚のシリコン基板上に超伝導薄膜作製技術を用いて、差動型に接続された2つの検出コイルを直接SQUID素子の超伝導リングとして集積した一次微分グラジオメータである。検出コイルのホール面積は100 $\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 、2つの検出コイルの中心間距離は910 μm である。

このグラジオメータは、従来の同軸型グラジオメータと異なり、2つの検出コイルの面が同一平面上にあり、コイル軸方向磁場の検出コイルの並んでいる方向の1次微分を検出する。本グラジオメータの通常の実験室における最小磁場勾配感度は2.3nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ である。

SQUIDグラジオメータは検出コイル面がデュワー（液体ヘリウム容器）底面に垂直になるようにプローブによってデュワー内に保持されている。デュワーの底面から検出コイルの中心までの距離は13.5mmである。測定には、試験体を左右前後に移動できる非磁性体で構成された走査台を用いた。走査台の移動は、空気圧で行われ、移動速度は5mm/secとした。また、試験体の位置設定精度は1mm以内である。

SQUIDの駆動にはFlux Locked Loop Operation (FLL駆動)法を用いた。駆動装置から電圧が出力され、コンピュータに取り込む前にA/D変換される。データ収録時のサンプリング周波数は5Hzである。

測定システムの概略配置図を図-7に示す。

3.3 実験方法

実験は磁気的にシールドされていない室内で行った。コイルの軸方向をy軸に、SQUIDグラジオメータの検出コイル面をxz面になるように設定した。試験体とデュワー底面までの距離を一定とし、試験体をx方向に0mmから500mmまで移動しながら位置x

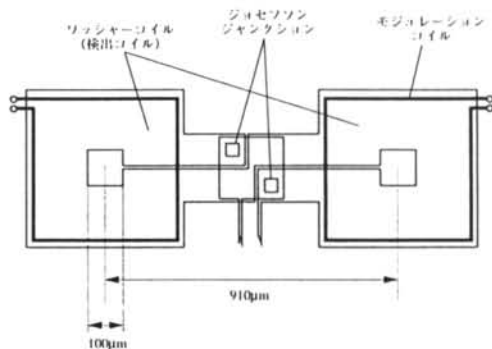


図-6 SQUID素子の構成

と $\Delta\phi$ を測定した。そのあと、デュワーを180°回転し、もう一度同じように走査した。試験体は250mmの位置にあるとき、グラジオメータの真下になる。測定時の検出コイルから試験体中心までの距離は67mm, 96mm, 119mm, 147mmの4段階で行った。

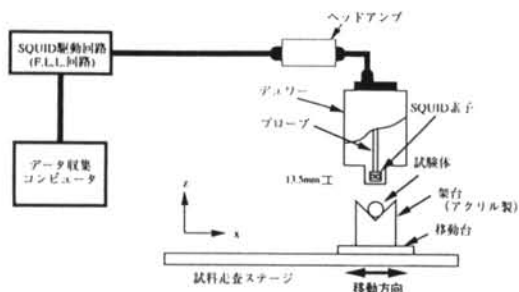


図-7 測定システムの概略

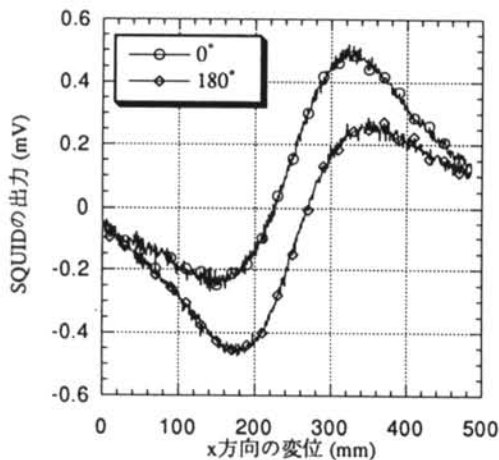


図-8 走査結果 (高さ67mm)

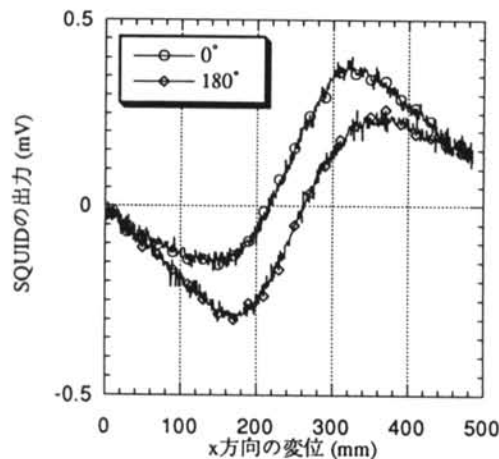


図-9 走査結果 (高さ96mm)

§4. 実験結果

試験体を走査した結果を図-8~図-11に示す。図中の、0°と180°は、検出コイルの向きを表す。出力のばらつきが大きい、SQUID駆動装置と、そこからA/Dコンバータまでの間で拾う電気的なノイズに起因することが確認されている。

式(4)と式(5)に基づき、走査結果をグラジオメータとマグネットメータに対応した出力に変換する。グラジオメータへの変換の際には、グラフを見やすくするため、 $x=250\text{mm}$ 近傍の $\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2$ の平均値が0になるように縦方向に平行移動した。グラジオメータへの変換結果を図-12~図-15に、マグネットメータへの変換結果を図-16~図-19に示す。

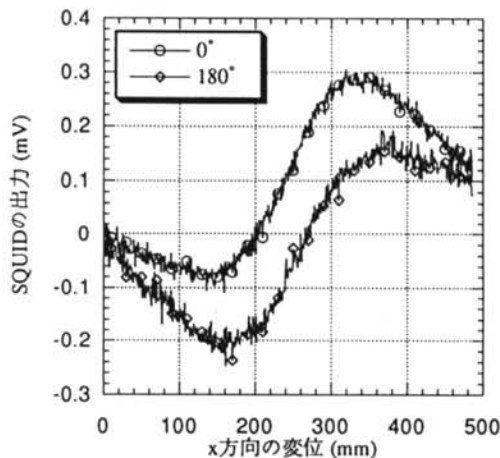


図-10 走査結果 (高さ119mm)

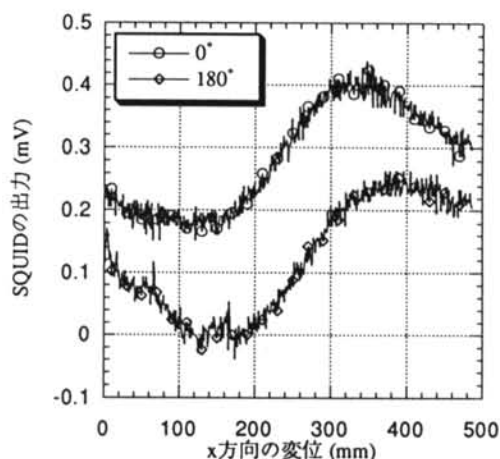


図-11 走査結果 (高さ147mm)

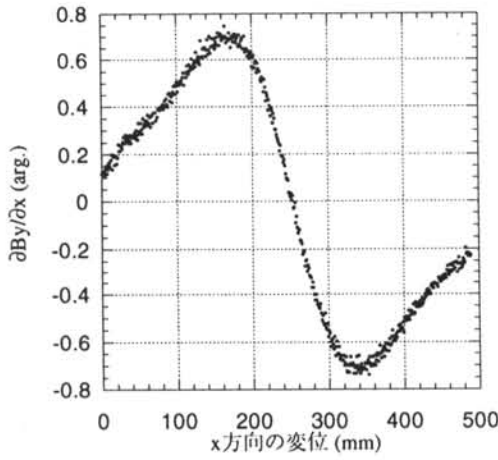


図-12 磁場の空間1次微分 (高さ67mm)

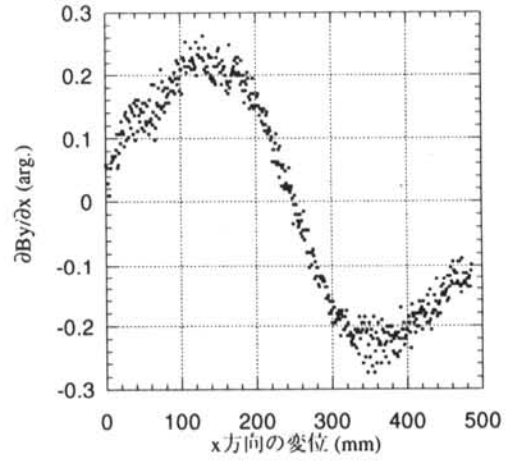


図-15 磁場の空間1次微分 (高さ147mm)

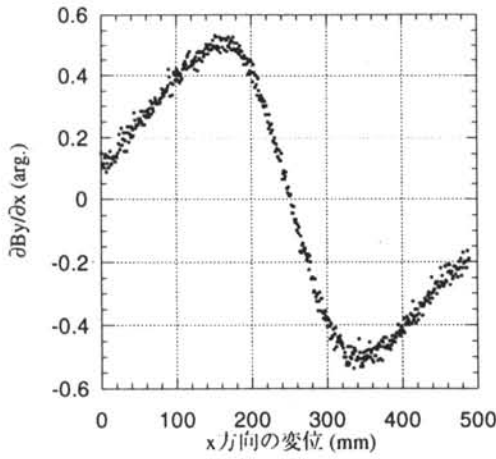


図-13 磁場の空間1次微分 (高さ96mm)

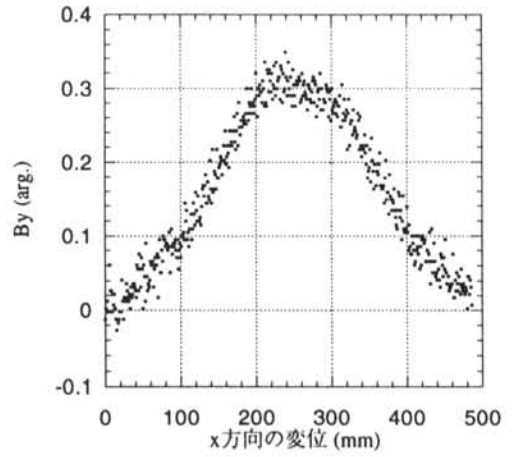


図-16 磁場 (高さ67mm)

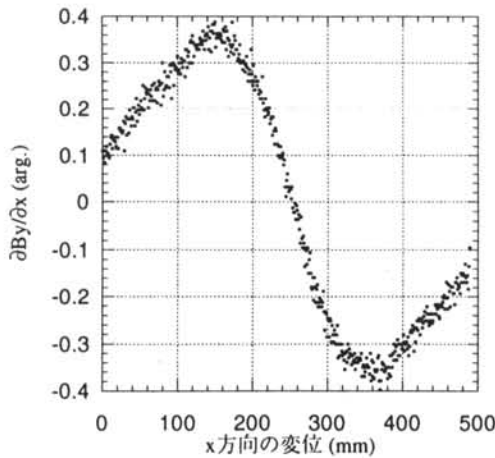


図-14 磁場の空間1次微分 (高さ119mm)

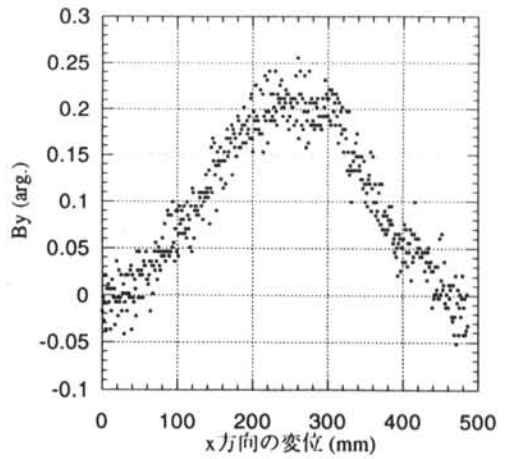


図-17 磁場 (高さ96mm)

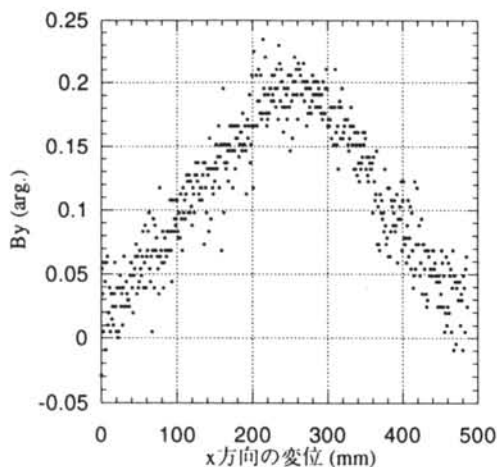


図-18 磁場 (高さ119mm)

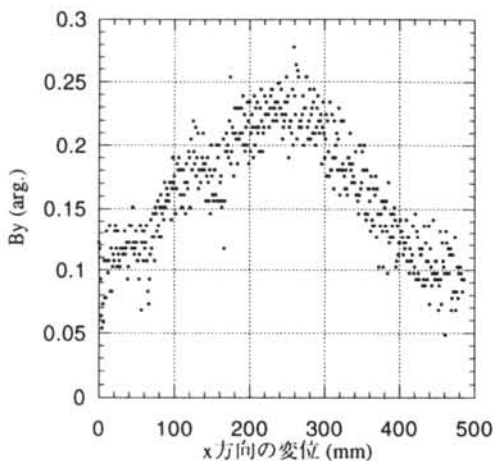


図-19 磁場 (高さ147mm)

§ 5. 考察

コイルが作る磁場をBiot-Savartの法則に基づき解析的に求めた。解析から期待されるグラジオメータとマグネットメータの出力の例を図-20、図-21に示す。グラジオメータに対応した測定結果、図-12～図-15は、検出コイル位置に対する出力値の変化の形態に関して解析結果と良く一致した。したがって、式(4)に基づく測定手法は、磁束密度の空間1次微分を測定する方法として有効な手法と考えられる。一方、マグネットメータに対応した図-16～図-19は、解析結果と同様にコイルの真上をピークとする変化を示したが、ピーク部の領域が広がり、解析結果と比較して緩慢な変化を呈した。式(5)

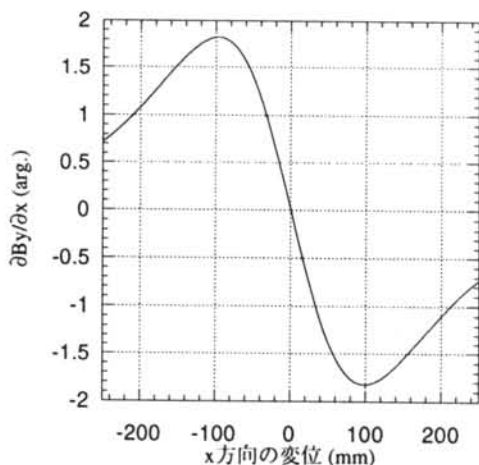


図-20 磁場の空間1次微分 (解析結果)

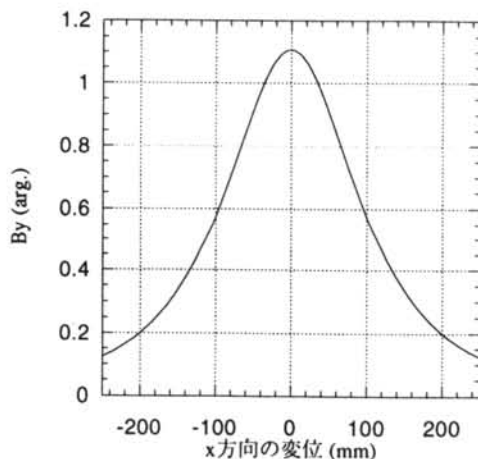


図-21 磁場 (解析結果)

に基づく測定手法においては測定値は ΔS に依存する。一方、環境磁場の影響を少なくするためには ΔS は小さくすることが望ましく、そのためこの測定手法においてはS/N比が悪くなることが避けられず、グラジオメータとして使うときより、ノイズを落とす必要がある。

マグネットメータの結果が実験値と解析で若干異なる原因の1つとして、デューワーを回転させることによって、最初の走査と2回目の走査で検出コイルの位置がずれている可能性が考えられる。図-16～図-19は、ピーク近傍がなだらかになっており、2度の走査でx方向の位置を正しく対応させない場合、ピークが2つに分離し、定性的にはこのようなグラフになる。検出コイルは、デューワー上部から真下へ下ろされており、途中に支えはない。幾何学的

にはデュワー中心にあるはずだが、プローブが真下に位置していない場合、デュワーを回転させたとき、位置がずれる可能性はある。ただし、その差はせいぜい数mmである。データを解析した結果、20~30mm程度のずれがないと説明がつかず、これだけで説明することは困難である。なお、グラジオメータの結果は、20~30mm程度ずらしても、形状はそれほど大きく変わらない。

§6. まとめ

今回、検出コイルの面積が異なるグラジオメータを用いて、磁場とその空間1次微分を正しく測定する方法を考案し、それを確認する実験を行った。その結果、この方法で磁場の空間1次微分を高い精度で測定できることが確認された。磁場分布の測定では、解析結果と若干差異が見られ、この理由は今後検討していく予定である。

<参考文献>

- 1) 例えば 石井勇五郎 編：「新版 非破壊検査工学」，産報出版，(1993)
- 2) 原宏：“量子電磁気計測”電子情報通信学会，コロナ社，(1991) pp.155-157
- 3) D.Koelle, A.H.Miklich, E.Dantsker, F.Ludwig, D.T.Nemeth, and J.Clarke：“High performance dc SQUID magnetometers with single layer $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ flux transformers”，Appl. Phys. Lett. vol.63, (1993) pp.3630-3632
- 4) I.M.Thomas, Y.P.Ma and J.P.Wikswow Jr.：“SQUID NDE：Detection of Surface Flaws by Magnetic Detection”，IEEE Trans. on Appl. Supercon. Vol.3, No.1, (1993), pp.1949-1952
- 5) 鈴木隆之，平野一美：“SQUIDによる極低温構造材料の疲労損傷解析”，第51回低温工学・超電導学会講演概要集，(1994) p.133

