九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

SQUIDピコボルトメータを用いた非破壊検査における欠陥深さの推定

八尾, 健一朗
九州大学大学院システム情報科学府電気電子システム工学専攻 : 修士課程

山崎, 大輔
九州大学大学院システム情報科学府電気電子システム工学専攻 : 修士課程

楊, 同青
九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学部門

円福, 敬二
九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学部門

https://doi.org/10.15017/1516852

出版情報：九州大学大学院システム情報科学紀要. 11 (1), pp.57-62, 2006-03-24. 九州大学大学院システム情報科学研究院
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

九州大学大学院
システム情報科学紀要
第11巻 第1号 平成18年3月

Research Reports on Information Science and
Electrical Engineering of Kyushu University
Vol.11, No.1, March 2006

SQUIDピコボルトメータを用いた非破壊検査における欠陥深さの推定

八尾健一朗* ・ 山崎大輔* ・ 楊 同青** ・ 円福敬二**

Estimation of Defect Depth in Non Destructive Evaluation Utilizing Superconducting Quantum Interference Device Picovoltmeter

Kenichiro YAO, Daisuke YAMASAKI, Tong Qing YANG and Keiji ENPUKU

(Received December 9, 2005)

Abstract: Eddy current testing utilizing a cooled normal pickup coil and a high-T_c superconducting quantum interference device (SQUID) picovoltmeter was performed both experimentally and analytically. In the experiment, we successfully detected a small crack on the back surface of the Cu plate by moving the coil in unshielded environment. First, we showed a method to avoid a drift of the detected signal that was caused by the variance of lift-off. Next, we clarified the dependencies of the detection signal on the excitation frequency and thickness of the Cu plate. It was shown that an optimum frequency that maximizes the detected signal exists. Since this frequency changed with the thickness of the Cu plate, the frequency dependence could be used to estimate the depth of the crack from the surface of the Cu plate. The experimental results were analyzed by taking account of the phase and amplitude of the signal field caused by the crack. Good agreement was obtained between experiment and analysis.

Keywords: SQUID picovoltmeter, NDE, ECT, crack depth, lift off

1. まえがき

高温超伝導体SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) は酸化物超伝導体 YBaCuO からなる磁気センサである．SQUID センサの応用の一つとして金属中の微小欠陥を検出する非破壊検査 (NDE) が注目されている[1]．非破壊検査では，通常，センサを測定対象物上で走査し，欠陥からの信号磁界のマッピングを行うことが必要とされる．しかしながら，SQUIDは地磁気の影響を受けやすいため，磁気シールド外でSQUID を走査することが困難である．この問題を解決するため，検査したいサンプルを動かす方式や地磁気を補償しながら低速度で SQUID を走査する研究がなされているが，これらは実際の広い範囲の検査には向いていない[2]．

本研究ではこの問題を解決するためにSQUID 本体を磁気シールドの中に入れることができる SQUID ピコボルトメータに注目し，SQUID ピコボルトメータと冷却銅コイルを用いた NDE システムの開発を行ってきた[3),4)]．その中で従来の方式と同様に傷からの信号磁界を 2 次元マップ として表すことに成功し[3)]，傷の大きさ，形状などを推定する方法を構築してきた[4)]．しかしながら，実際の応用分野では傷の深さを推定することも重要になってくる．本論文では，従来の渦電流法 (ECT) で使われている信号磁界の位相を利用した方法を用いて，傷の深さを推定する実験を冷却銅コイルと SQUID ピコボルトメータで行った結果を報告する．また，実験モデルに基づいた渦電流の解析を行い，実験結果との妥当性を検証した．

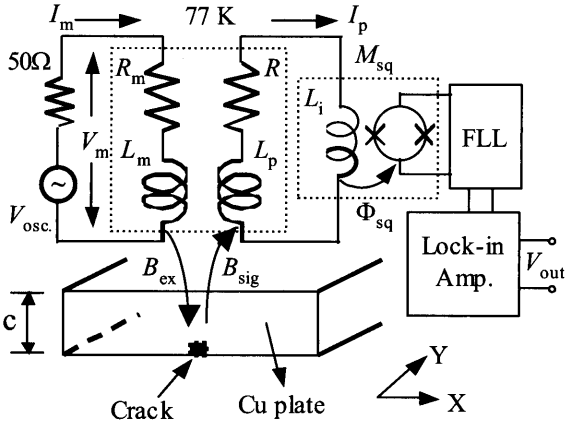

Fig. 1 Configuration of ECT system utilizing detection probe made of cooled normal pickup coil and SQUID picovoltmeter.

2. SQUID NDE

2.1 実験装置

Fig.1 にSQUIDピコボルトメータと冷却銅コイルを用いた渦電流法による検査システムの原理を示す．サンプ

平成17年12月9日受付

* 電気電子システム工学専攻修士課程
** 電気電子システム工学部門

ルとして銅板の底面に微小傷（幅 0.3 mm，長さ 6 mm，厚さ 0.03 mm）を作ったものを用いる．銅板の幅は50 mmで厚さ c を変化させた．

システムの詳細はすでに他の論文で示している[4]．簡潔に述べると，銅製の磁場コイル L_m は 400 巻でコイルの平均半径 $r_m = 7$ mm である．また，磁場コイルのインダクタンスは $L_m = 2870$ μH で，抵抗は 77 K の条件で $R_m = 13$ Ω である．磁場コイルに周波数 f，振幅 I = 80 mA の正弦波電流を流すと励起磁界 B_{ex} が発生する．磁場コイルにかかる電圧 V_m がロックインアンプの参照信号となる．

励起磁界 B_{ex} によって渦電流 j_{eddy} が銅板に流れるが，傷が存在するときは傷の周囲で渦電流に乱れが発生する．その結果，傷から信号磁束 B_{sig} が発生し，この磁界を検出コイル L_p で検知する．励起磁界 B_{ex} が検出コイルに直接鎖交しないように検出コイルは 2 つのコイルを逆巻きに繋いであり，これにより励起磁界をキャンセルしている．2 つのコイルはいずれも，巻数 $n_p = 200$，$r_p = 2.2$ mm であり，総インダクタンスは $L_p = 323$ μH である．なお，**Fig.1** に記していないが，検出コイルに入る励起磁界 B_{ex} を充分に相殺するために補償コイル L_c も用いている．

Fig.1 に示しているように，検出コイル L_p は入力コイル $L_i = 9$ μH と繋がっており，入力コイルは高温 SQUID と相互インダクタンス $M_{sq} = 487$ μH で磁気結合している．回路の総抵抗は 77 K で $R = 3.7$ Ω である．SQUID は flux locked loop（FLL）回路に接続され，FLL 回路の出力 V_{FLL} がロックインアンプで検知され，その出力電圧 V_{out} が検出電圧となるる．

実験を行う際は L_m，L_p，L_c の 3 つのコイルを磁気シールドされていないデュワーの中に入れ，液体窒素で 77 K に冷却した．一方，SQUID と入力コイルは円筒型の磁気シールド内に設置した．銅板につけた傷の検出は，サンプルを固定した状態でデュワーを電動 X-Y ステージで動かして測定を行った．X 軸方向に 55 mm/s で往復させ，Y 軸方向には 0.5 mm づつ動かして，ロックインアンプの出力電圧 V_{out} の波形をオシロスコープで記録した．

2.2 B_{surf} によるリフトオフの問題

検出コイルには，傷からの信号磁界 B_{sig} の他に誘導電流によって生じる表面磁界 B_{surf} も鎖交する．この表面磁界 B_{surf} はサンプルの傾きなどのために検出され，その大きさはコイルが移動するごとに変化する．このため，出力信号には B_{surf} によるオフセットが生じ，検知したい傷からの信号磁束 B_{sig} が見えにくくなる．この問題を解決するためには，B_{surf} と 90 度位相の異なる信号磁界成分を測定することが有効であることがこれまでの研究でわかっている[4]．信号が最大になる傷の端を測定した結果を **Fig.2** に示す．銅板の厚さ $c = 3$ mm，励磁周波数 600 Hz の条件下で測定した．(a) は傷からのリフトオフを取り除かずにそのまま測定した結果で，(b) はリフトオフを取り除くために位相を調整した結果である．**Fig.2** からわかるように，90 度位相の異なる信号磁界 B_{sig} 成分を測定することが有効である．ロックインアンプで出力の位相を変化させて B_{surf} と 90 度位相の異なる信号磁界成分を検出する時，検出コイルで検知する磁界 B_p は次の式で表される．

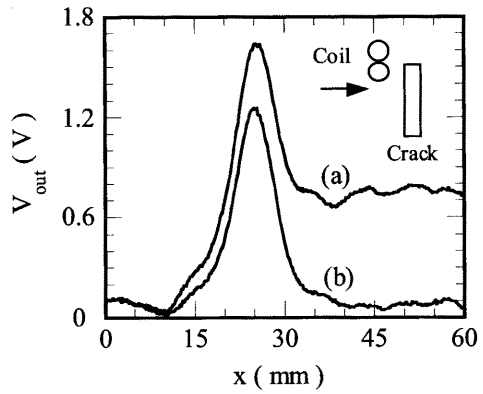

Fig. 2 Waveform of detected signal when the pickup coil is moved above crack. The liftoff is suppressed in-case of Curve (b). The inset shows the position of the pickup coil relative to the crack.

$$B_p = B_{sig} \sin\phi \tag{1}$$

但し，

$$\phi = \arg(B_{sig}) - \arg(B_{surf}) \tag{2}$$

B_p は B_{surf} の影響を受けないため，オフセットを軽減できる．

2.3 傷の深さの測定

欠陥深さの特定には出力電圧の周波数依存性を利用することが有効である．渦電流法では周波数が大きくなると，渦電流は増加し，表皮深さは減少するため，傷からの信号電圧が最大になる周波数 f_{opt} が存在する．f_{opt} は金属の種類や傷までの深さによって変化する．

オフセットを軽減した結果，周波数 f を変えながら測定した実験結果を **Fig.3** に示す．**Fig.3** は銅板の厚さ c を 2〜5 mm まで変化させた場合の結果である．同図に示すように銅板の厚さに対応した最適周波数が存在する．このことを利用すれば，f_{opt} から傷の深さを推定することが可能である．

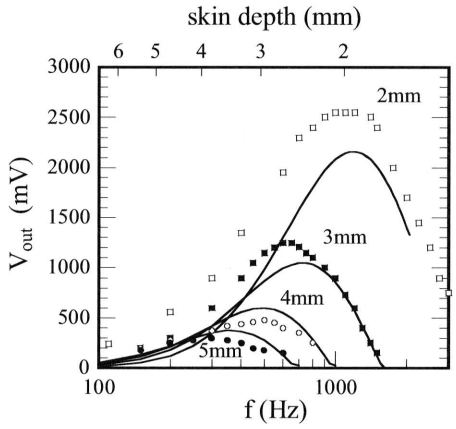

Fig. 3 Frequency dependence of V_{out} for different thickness of Cu plate. The lines are calculated from eq.(11). The symbols are experimental results.

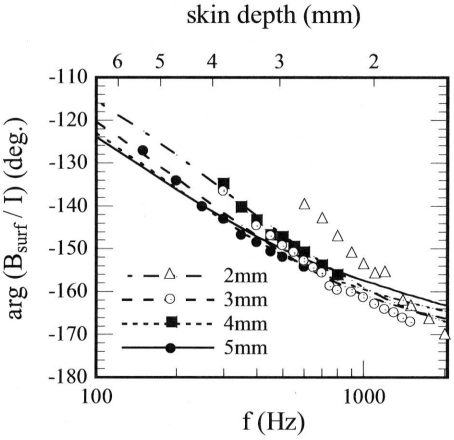

Fig. 5 Frequency dependence of the phase of the magnetic field B_{surf}/I for different thickness of Cu plate. The lines are calculated from eq.(5). The symbols are the experimental results.

3. 渦電流法によるシミュレーション

励磁コイルに電流を流した場合に金属内部に流れる渦電流の表式は文献 [5] で与えられている．本論文ではこの表式を基に，表面磁界 B_{surf} と傷からの信号磁界 B_{sig} を計算し，傷からの信号磁界の振る舞いを解析する．**Fig.4** に本論文で用いる円柱座標系を示す．

3.1 表面磁界 B_{surf}

最初に銅板に傷がない場合を考える．励磁コイルに電流を流すと励起磁界 B_{ex} が発生し，傷が無い場合でも導伝体表面に流れる誘導電流によって反射磁界 B_{surf} が発生する．このため，検出コイルの点における磁界 B_s は励起磁界 B_{ex} と表面磁界 B_{surf} の和として，$B_s = B_{ex} + B_{surf}$で与えられる．この場合の磁界 B_s と励起磁界 B_{ex} は以下の表式で与えられる[5]．

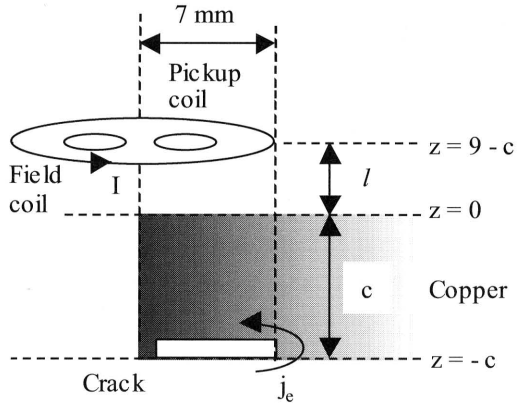

Fig. 4 Simulation model of the sample with a crack. The cylindrical coordinates is used in the analysis.

$$B_s(r,z) = \frac{\mu I r_0}{2}\int_0^\infty J_1(\alpha r_0)J_0(\alpha r)\alpha e^{-\alpha l} \times \left[e^{\alpha z} + \left(\frac{(\alpha^2-\alpha_1^2)+(\alpha_1^2-\alpha^2)e^{2c\alpha_1}}{-(\alpha_1-\alpha)^2+(\alpha_1+\alpha)^2 e^{2c\alpha_1}}\right)e^{-\alpha z}\right]d\alpha \quad (3)$$

但し，

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha + i\frac{2}{\delta^2}} \quad (4)$$

$$B_{ex}(r,z) = \frac{\mu I r_0}{2}\int_0^\infty J_1(\alpha r_0)J_0(\alpha r)\alpha e^{\alpha z}e^{-\alpha l}d\alpha \quad (5)$$

であり，$\delta = \sqrt{2/\omega\sigma\mu}$ は表皮深さ，f は周波数，σ は導伝率，μ は透磁率である．この 2 式から金属表面に流れる誘導電流によって発生する磁界 B_{surf} は以下の式で求めることが出来る．

$$B_{surf}(r,z) = B_s(r,z) - B_{ex}(r,z) \quad (6)$$

Fig.4 に示した実験モデルにおいて，励磁コイルの半径を $r_m = 7$ mm，測定位置を検出コイルの中心 $(r,z) = (2.5, l)$，$l = 9 - c$ として，銅板の厚さ c を 2〜5 mm で変化させ，表面磁界 B_{surf} を計算した．**Fig.5** に B_{surf} の位相の周波数依存性を計算した結果を示す．同図に示すように実験と解析結果はよく一致している．また，銅板が厚くなるほど，実験値と理論値の誤差が小さくなっていることがわかる．これは銅板が表皮の深さよりも厚くなると表面磁界 B_{surf} が安定することが原因であると考えられる．

3.2 傷からの信号磁界 B_{sig}

銅板に傷が存在する場合に，傷から発生する信号磁界

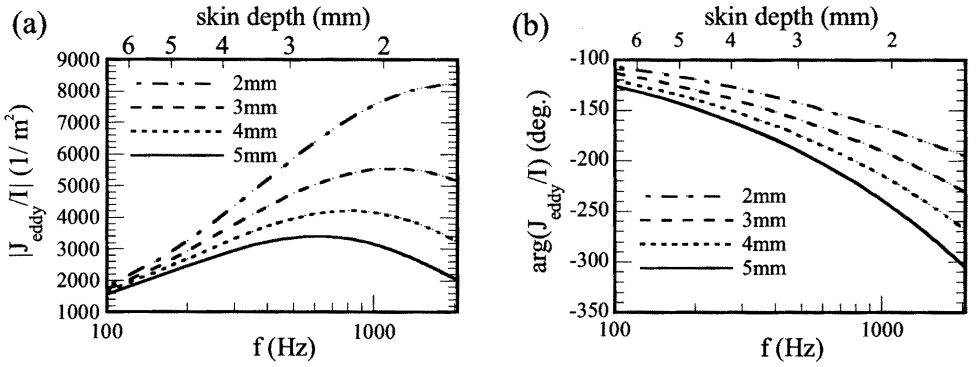

Fig. 6 Frequency dependence of (a) the absolute value $|j_{eddy}/I|$ and (b) the phase of the eddy current density j_{eddy}/I for different thickness of Cu plate. The lines are calculated from eq.(8).

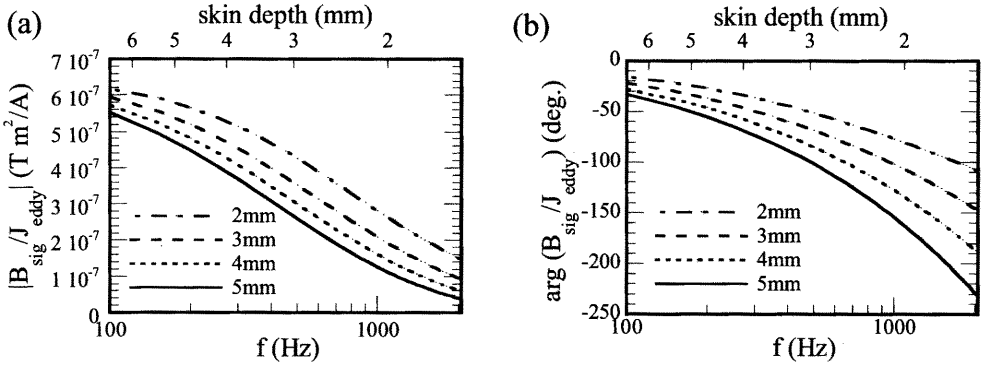

Fig. 7 Frequency dependence of (a) the absolute value $|B_{sig}/j_{eddy}|$ and (b) the phase of the magnetic field B_{sig}/j_{eddy} for different thickness of Cu plate. The lines are calculated from eq.(9).

は以下の様に表すことが出来る.

$$\frac{B_{sig}}{I} = \frac{j_{eddy}}{I} \times \frac{I_s}{j_{eddy}} \times \frac{B_{sig}}{I_s} \tag{7}$$

(7) 式第一項は磁場コイルに流す電流 I によって傷の位置に流れる誘導電流 j_{eddy} を表す. 第二項は, 傷の周囲で誘導電流 j_{eddy} が迂回することによって発生する電流 I_s を表す. 第三項は, この電流 I_s により発生する信号磁界 B_{sig} を表す. 以下にこれらの表式を求める.

Fig.4 に示すモデルでは傷は深さ c の位置にあり, この時の励磁電流 I と渦電流 j_{eddy} の関係は次式で与えられる[5].

$$J_{eddy}(r,z) = -\frac{2iIr_0}{\delta^2}\int_0^\infty J_1(\alpha r_0)J_1(\alpha r)\alpha e^{-\alpha l} \times \left[\frac{(\alpha_1+\alpha)e^{2c\alpha_1}e^{\alpha_1 z} + (\alpha_1-\alpha)e^{-\alpha_1 z}}{-(\alpha_1-\alpha)^2 + (\alpha_1+\alpha)^2 e^{2c\alpha_1}}\right] d\alpha \tag{8}$$

実験モデルより, 渦電流の流れる位置は励磁コイルの端 $(r,z) = (7,-c)$ である. 銅板の厚さ c を 2〜5 mm で変化させた時の j_{eddy}/I の結果を **Fig.6** に示す. (a), (b) はそれぞれ絶対値と位相である. j_{eddy}/I は周波数の増加に伴って極大値をとっていくことがわかる.

(7) 式の第二項で表される傷によって発生する電流 I_s は傷の大きさや形状に依存する. ここでは簡単のため, 電流 I_s は傷の位置に流れる誘導電流 j_{eddy} に比例すると近似し, $I_s = \mathrm{K}\, j_{eddy}$ とした. ここで, K は比例定数である.

(7) 式の三項は以下の様に求めた. すなわち, 傷の位置に半径 r_s のループ電流 I_s が存在すると近似し, この電流によって, 検出コイルの位置に発生する信号磁界 B_{sig} を計算した. この場合の電流 I_s と信号磁束 B_{sig} の関係は次式から求められる[5].

$$B_{sig}(r,z) = \mu r_s I_s \int_0^\infty J_1(\alpha r_0')J_0(\alpha r')\alpha^2 e^{-\alpha l} \times \left[\frac{2\alpha_1 e^{c(\alpha_1+\alpha)}e^{\alpha z'}}{-(\alpha_1-\alpha)^2 + (\alpha_1+\alpha)^2 e^{2c\alpha_1}}\right] d\alpha \tag{9}$$

なお上式では, 電流 I_s の中心が原点になるように座標変換している. すなわち, **Fig.4** の座標系で, 電流 I_s の中心を $(r,z) = (r_s, z_s)$ とすると, $r' = r - r_s$, $z' = z - z_s$ となる.

実験モデルに対応させて, 電流 I_s の中心を傷の端である $(r,z) = (7,-c)$ とし, その半径を $r_s = 0.757$ mm とした. また, 検出コイルの中心を $(r,z) = (4.5, l)$, $l = 9 - c$ とした. 銅板の厚さ c を 2〜5 mm で変化させた時の B_{sig}/j_{eddy} の結果を **Fig.7** に示す. (a), (b) は

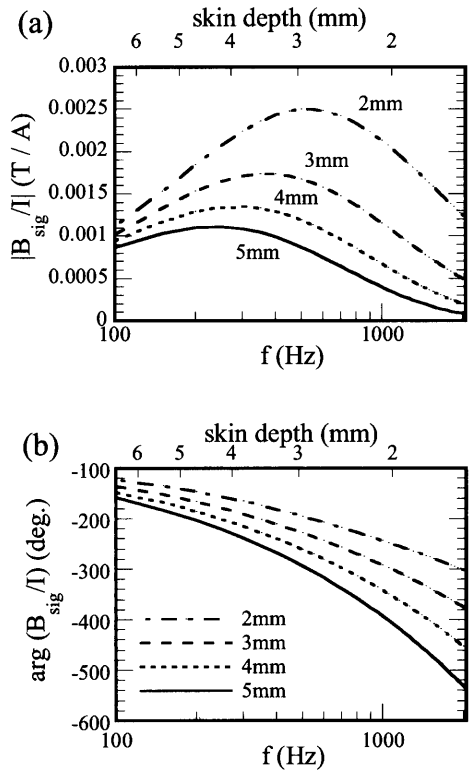

Fig. 8 Frequency dependence of (a) the absolute value $|B_{sig}/I|$ and (b) the phase of the magnetic field B_{sig}/I for different thickness of Cu plate. The lines are calculated from eq.(7).

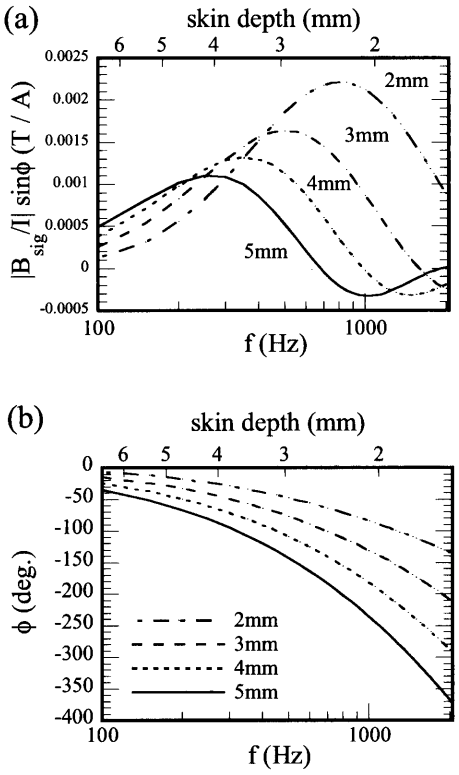

Fig. 9 Frequency dependence of (a) $|B_{sig}/I|sin\phi$ and (b) the phase ϕ for different thickness of Cu plate. The lines are calculated from eq.(7).

それぞれ絶対値と位相である．周波数が増加すると B_{sig}/j_{eddy} の絶対値は減少している．

これらの結果を利用して，式 (7) より求めた信号磁界 B_{sig}/I の結果を **Fig.8** に示す．(a)，(b) はそれぞれ絶対値と位相である．B_{sig}/I の絶対値は銅板の厚さによって決まる特定の周波数で最大値をとることがわかる．

なお第 2 章に述べたように，実際の実験ではリフトオフの影響を無くすため 表面磁界 B_{surf} と 90 度位相の異なる信号磁界 の成分 $|B_{sig}/I|$ sinϕ を測定している．このため，$|B_{sig}/I|$ sinϕ と ϕ の周波数依存性の結果を **Fig.9** に示す．この場合も$|B_{sig}/I|$ sinϕの絶対値は銅板の厚さによって決まる特定の周波数 f_{opt} で最大値をとることがわかる．

3.3 傷深さの推定法

Fig.8 と **Fig.9** に示すように，信号磁界を最大にする周波数は傷の深さによって異なる．この特性を利用すれば信号磁界の周波数依存性から傷深さの推定が可能である．そこで，傷深さ c と最適周波数 f_{opt} の関係を **Fig.10** に示す．なお，**Fig.10** では最適周波数 f_{opt} として，$|B_{sig}/I|$ と $|B_{sig}/I|$ sinϕ の絶対値を最大にする周波数，及び位相差 ϕ が $\phi = -90$ ° になる周波数を選んで

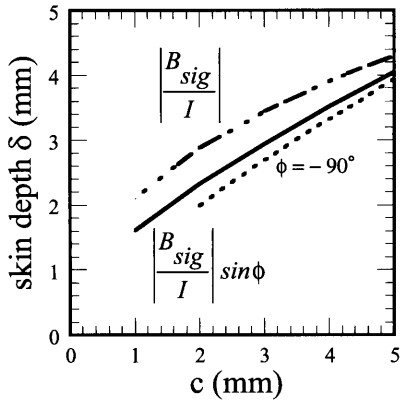

Fig. 10 Relationship between skin depth at f_{opt} and thickness c of the Cu plate.

いる．また，最適周波数 f_{opt} をそれに対応する表皮深さ δ で表している．

Fig.10 から，厚さ c と 表皮深さには線形の関係があることがわかる．従って，この関係を利用することにより出力電圧を最大にする周波数 f_{opt} から傷までの深さを推測することができる．

Fig.11に，周波数を最適周波数 f_{opt} に選んだ時の $|B_{sig}/I|$ と $|B_{sig}/I|$ sinϕ の傷深さ依存性を示す．**Fig.11** に示すように，信号の値は傷深さとともに減少する．ま

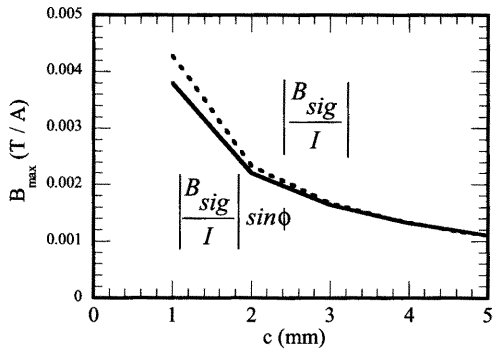

Fig. 11 Relationship between maximum magnetic field of $|B_{sig}/I|$, $|B_{sig}/I|sin\phi$ at f_{opt} and the thickness c of the Cu plate.

た，$|B_{sig}/I|$ と $|B_{sig}/I|$ sinϕの値はほぼ同じである．これは，最適周波数では表面磁界 B_{surf} と信号磁界 B_{sig} の位相差 ϕ がほぼ $\phi = -90\,^{\circ}$ になっているためである．

4. 実験とシミュレーション結果

第 3 章の解析結果と **Fig.3** の実験結果を比較する．**Fig.1** において，検出コイルには電圧 $V_p = i\omega B_{sig} sin\phi$ が誘起される．これにより入力コイルに流れる電流 I_p を式で表す．

$$I_p = \frac{i\omega B_{sig} sin\phi}{R + i\omega(L_p + L_i)} \tag{10}$$

入力コイルに流れた電流が発生させた磁束は SQUID に鎖交する．信号は FLL 回路を通してロックインアンプで増幅され，結果的に出力される電圧 V_{out}は次の式で表すことができる．

$$V_{out} \propto \frac{\omega B_{sig} sin\phi}{\sqrt{R^2 + \omega^2(L_p + L_i)^2}} \tag{11}$$

出力される電圧 V_{out} の周波数依存性について，実験とシミュレーションの結果をまとめると **Fig.3** のようになる．実線が計算結果，プロットが実験結果となっている．同図に示すように両者はよく一致している．特に，厚さ c を変化した場合の出力電圧 V_{out} を最大にする周波数の変化を良く説明している．このことから **Fig.10** のようなグラフを用いて，V_{out} を最大にする表皮深さから傷までの深さを推測できると考えられる．

5. ま　と　め

SQUID ピコボルトメータを用いて渦電流法による微小傷の検出を行った．傷の深さを推定するため，検出信号の周波数依存性を調べ，検出信号を最大にする最適周波数が存在することを示した．また，この最適周波数に対応する表皮深さと銅板の厚さには線形の関係があることを示した．従って，この特性を用いれば欠陥深さの推定が可能である．さらに，欠陥からの信号磁界の絶対値と位相を求めるための解析手法を示した．この解析結果と実験結果は良く一致することを示し，解析の妥当性を示した．

参　考　文　献

1) H.J. Krause, and M.v. Kreutzbruck, "Recent developments in SQUID NDE", Physica C **368** (2002) 70-79.
2) J.T. Jeng, H.E. Horng, and H.C. Yang, "Detection of small cracks using high-T_c SQUIDs in an unshielded environment", Supercond. sci. techn. **15** (2002) 416-420.
3) T.Q.Yang, K. Yao, D. Yamasaki, and K. Enpuku, "Magnetometer Utilizing Cooled Normal Pickup Coil and High-Tc Superconducting Quantum Interference Device Picovoltmeter for Nondestructive Evaluation", Jpn J. Appl. Phys. **44** (2005) L626-L628.
4) T.Q.Yang, K. Yao, D. Yamasaki, and K. Enpuku, "Eddy Current Testing Utilizing Cooled Normal Pickup Coil and Superconducting Quantum Interference Device Picovoltmeter", Jpn J. Appl. Phys. **44** (2005) L1128-L1130.
5) C.V. Dodd, and W.E. Deeds, "Analytical solution to eddy-current probe coil problems", J. Appl. Phys. **39** (1968) 2829-2839.
6) J.R. Claycomb, N. Tralshawala, and J.H. Miller Jr., "Theoretical Investigation of Eddy-Current Induction for Nondestructive Evaluation by Superconducting Quantum Interference Devices", IEEE Trans. Magn, **36** (2000) 292-298.