

第三高調波電圧誘導法によるノイズ測定の コイル依存性

吉田 信之

平成20年2月26日

電子情報工学科

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	YBCO-coated 線材	2
1.3	第三高調波電圧誘導法	2
1.4	馬渡らの理論	5
1.5	研究背景	6
1.6	研究の目的	7
第2章	測定	8
2.1	試料	8
2.2	実験装置	8
2.2.1	コイル	8
2.2.2	サンプルホルダー	8
2.2.3	測定装置	9
2.3	測定条件	10
2.4	コイルの形状依存性の測定	10
2.4.1	1コイル系と2コイル系の測定	10
2.4.2	2コイル系の形状変化の測定	10
2.5	臨界電流密度の計算	11
第3章	結果と検討	12
3.1	コイルの形状依存性の測定結果	12
3.1.1	1コイル系と2コイル系の測定結果	12
3.1.2	2コイル系の形状変化の測定結果	16
第4章	結論と今後の課題	29
4.1	結論	29

4.2 今後の課題 29

参考文献 31

図目次

1.1	: YBCO-coated 線材の構造	3
1.2	: 第三高調波電圧誘導法のモデル図	3
1.3	: 臨界電流に達した遮蔽電流のようす	4
1.4	: V_3 の立ち上がり	4
1.5	: $I_0 > I_{c0}$ における $\varphi - r$ 曲線	6
2.1	: コイルの構造	9
2.2	: サンプルホルダー	9
2.3	: 測定装置	9
2.4	: コイルの形状依存性の測定	11
3.1	1 コイル系 -2 コイル系の V_3-I_0 特性の変化	13
3.2	規格化した 1 コイル系 -2 コイル系の V_3-I_0 特性の変化	14
3.3	1 コイル系 -2 コイル系の $E-J$ 特性の変化	15
3.4	: 2 コイル系 A の巻数変更による V_3-I_0 特性の変化	17
3.5	: 2 コイル系 A の巻数変更による 512Hz での V_3-I_0 特性の変化	18
3.6	: 規格化した 2 コイル系 A の巻数変更による V_3-I_0 特性	19
3.7	: 2 コイル系 A の巻数変更による $E-J$ 特性	21
3.8	: 2 コイル系 B の巻数変更による V_3-I_0 特性の変化	23
3.9	: 2 コイル系 A, B の V_3-I_0 特性の比較	24
3.10	: 2 コイル系 A, B の $E-J$ 特性の比較	26
3.11	: 2 コイル系 A, B のノイズの比較	28

第 1 章 序論

1.1 はじめに

1911年にオランダの物理学者 Kamerlingh-Onnes によって超伝導が発見された。超伝導とは物体の温度の低下とともに電気抵抗が無くなる現象であり、発見当初は無窮大の電流を流せると期待されたが、実際には無抵抗のまま流せる電流の密度には限界があることが分かった。ここで、無抵抗のまま流せる電流密度の限界値を臨界電流密度 J_c と言う。超伝導体は電気抵抗がゼロであると言う事に加えて完全反磁性（マイスナー性質）も示す。マイスナー効果は超伝導体の内部に磁界が侵入できない性質であり、超伝導体に磁界を加えると磁界の侵入を妨げるように遮蔽電流が誘導されて内部の磁界を打ち消す現象である。マイスナー効果にも臨界電流のように限界があり、ある程度以上の磁界を加えると遮蔽できず内部に磁界が侵入する。このとき、超伝導体の種類によって磁界の侵入に対して二種類の性質があり、この性質の違いによって第一種超伝導体と第二種超伝導体に分けられる。第一種超伝導体は磁界がある強さを超えるとマイスナー効果が破れて磁界が侵入し、常伝導状態に転移する。このときの磁界を臨界磁界 H_c と言う。本研究で用いた YBCO($YBa_2Cu_3O_7$) を含む第二種超伝導体も磁界が大きくなると内部に磁界が侵入するが、すぐには常伝導にならずある程度磁界の侵入を妨げる。ここで、磁界が侵入し始めるときの強さを下部臨界磁界 H_{c1} と言い、常伝導状態に転移する強さを上部臨界磁界 H_{c2} と言う。

超伝導体の実用化のためには臨界電流密度などの特性を測定する方法が必要である。現在使われている測定法の 1 つに第三高調波電圧誘導法がある。第三高調波電圧誘導法は非破壊非接触で局所的な特性を評価できるため、長尺線材の生産過程における簡易測定法として有効である。

1.2 YBCO-coated 線材

YBCOはY系の超伝導体で、臨界電流密度が高く磁界特性にも優れている。しかし、傾角が大きい結晶粒間ではほとんど超伝導電流が流れないために粒間の結晶軸をそろえてやる必要があるが、機械的な応力では配向しないため結晶配向制御が必要である。YBCO-coated 線材は図1.1のような積層構造を持っており、基板、中間層、超伝導層、保護層からなっている。基板もしくは中間層を配向させて作り、その上に超伝導層を作成することで高い配向性を得ることができる。これらの層の配向にはいくつかの方法があり、本研究で使用した試料は中間層をIBAD法、超伝導層をPLD法で作成したものである。

IBAD法 (Ion Beam Assisted Deposition method: イオンビーム支援蒸着法) は中間層の作成時に基板にイオンビームを照射して中間層を配向させる方法である。この方法では配向性が高く長尺化に適した中間層を作ることができる。その一方で製造速度が遅いという欠点もあり、これを改善するための研究が行われ、製造速度の向上が進んでいる。

PLD法 (Pulsed Laser Deposition method: パルスレーザー蒸着法) はPVD法 (Physical Vapor Deposition method: 物理気相蒸着法) の一種であり、主に薄膜生成に用いられる成膜法である。レンズを通してパルスレーザーを集光させて真空チャンバー内のターゲットに断続的に照射すると、強力なエネルギーによってレーザーの当たった部分がプラズマ化しターゲットに対面する基板上に薄膜状に物質を体積させることができる。この方法はターゲットの組成と基板上に体積する薄膜の組成の差が小さいため組成制御が容易にできるという利点がある。

1.3 第三高調波電圧誘導法

第三高調波電圧誘導法は Claassen ら¹⁾によって提案された臨界電流密度 J_c の測定法である。図1.2のように超伝導薄膜の近くにコイルを置き、交流電流 $I_0 \cos \omega t$ を流すと交流磁界が発生するが、このとき超伝導体にはその磁界を中に入れないように遮蔽電流が流れる。 I_0 が小さいときには、遮蔽電流はコイルに流した交流電流に比例した \sin 波形だが、 I_0 が大きくなると図1.3のように遮蔽電流の大きさは臨界電流 I_c を超えられないため波形が変化する。ここで、遮蔽電流が臨界電流に達する I_0 を I_{c0} とする。 $I_0 > I_{c0}$

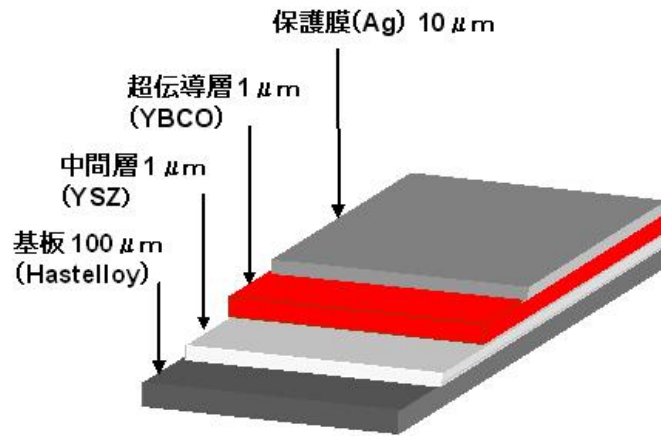


図 1.1 : YBCO-coated 線材の構造

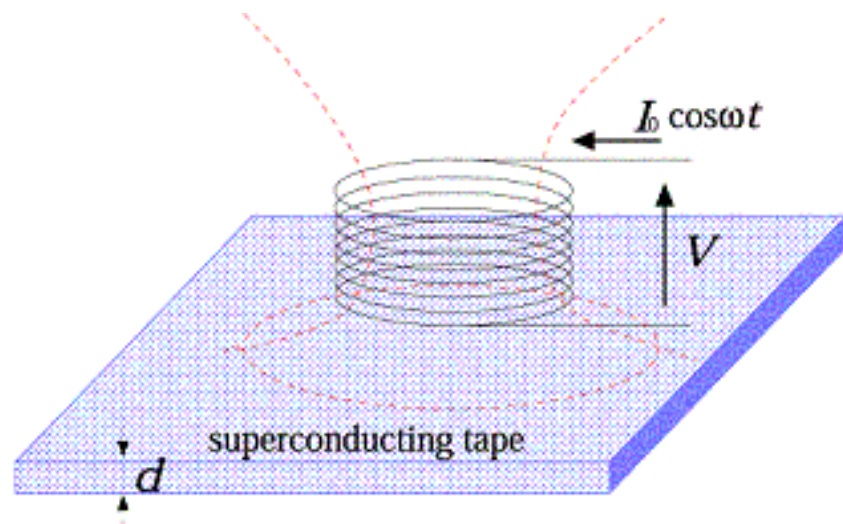


図 1.2 : 第三高調波電圧誘導法のモデル図

のとき、波形の対称性から元の周波数の奇数倍の周波数の成分のみが含まれていることが分かる。

超伝導薄膜に遮蔽電流が流れているときその電流による磁界が発生する。第三高調波電圧誘導法とは、遮蔽電流が作る交流磁界によってコイルに誘導される電圧 V の三倍周波数成分である第三高調波電圧 V_3 を測定することによって、 J_c を求める方法である²⁾。 V_3 は、図 1.4 のように I_{c0} を境に急に表れ、これを V_3 の立ち上がりと言う。このとき、 J_c は I_{c0} に比例することから J_c を求めることができる。

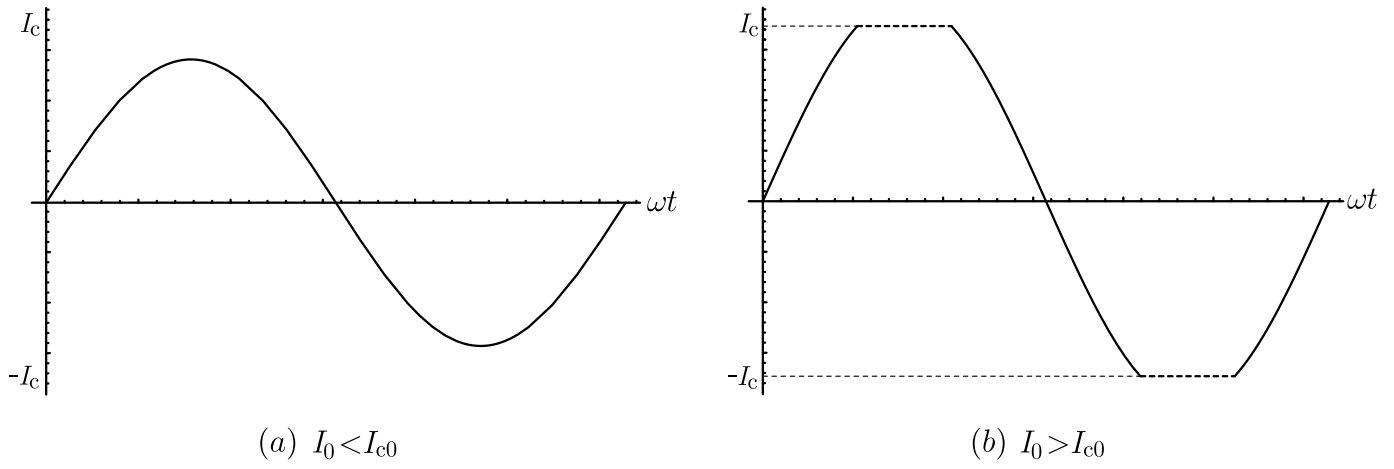


図 1.3 : 臨界電流に達した遮蔽電流のようす

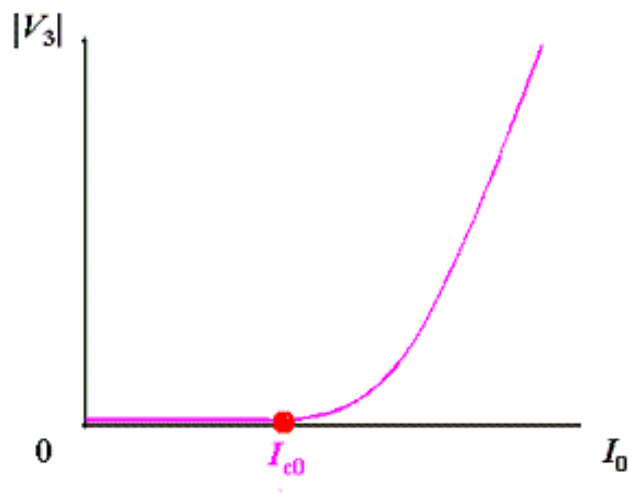


図 1.4 : V_3 の立ち上がり

1.4 馬渡らの理論

図1.2のようなモデルを仮定する。このモデルでは超伝導薄膜は無限に広いとし、薄膜の厚さは d とする。座標系は円柱座標系 (r, θ, z) とし、コイルの中心軸を z 軸、 z 軸と薄膜の上面が交わる点を原点とする。ここで馬渡ら³⁾による理論的分析によると、磁界は薄膜表面に対し平行であると仮定し、薄膜表面での磁界の強さ H_0 は

$$H_0(r, t) = -I_0 F_1(r) \cos \omega t \quad (1.1)$$

と表される。 $F_1(r)$ はコイルの形状で与えられる関数であり、コイルの巻き数 N 、半径を $R_1 < r < R_2$ 、高さ方向の位置を $Z_1 < z < Z_2$ として、

$$F_1(r) = \frac{N}{4\pi S} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{r' z \cos \theta}{R^3} dr' d\theta dz \quad (1.2)$$

$$S = (R_2 - R_1)(Z_2 - Z_1) \quad (1.3)$$

$$R = (z^2 + r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta)^{1/2} \quad (1.4)$$

である。

次に薄膜に流れる遮蔽電流から発生する磁束 Φ_s は、

$$\Phi_s = 2\pi\mu_0 \int_0^\infty r K_s(r, t) F_2(r) dr \quad (1.5)$$

である。ここで K_s は薄膜に流れる遮蔽電流である。 $|K_s| \leq J_c d$ であり、 $|K_s|$ は $J_c d$ より大きくなることはない。 $F_2(r)$ はコイルの形状で与えられる関数であり、

$$F_2(r) = \frac{N}{4\pi S} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{r' \cos \theta}{R} dr' d\theta dz \quad (1.6)$$

である。ここで抵抗が無視できるコイルに誘導される電圧 $V(t)$ は $V = -d(\Phi_d + \Phi_s)/dt$ より、

$$V(t) = \omega L_c I_0 \sin \omega t - 2\pi\mu_0 \int_0^\infty r F_2(r) \frac{\partial K_s(r, t)}{\partial t} dr \quad (1.7)$$

となる。(1.7)式の第一項はコイルに印加した交流電流 $I_0 \cos \omega t$ から発生した磁束 Φ_d の成分であり、第二項は Φ_s の成分になっている。 $V(t)$ は以下のようにフーリエ級数展開できる。

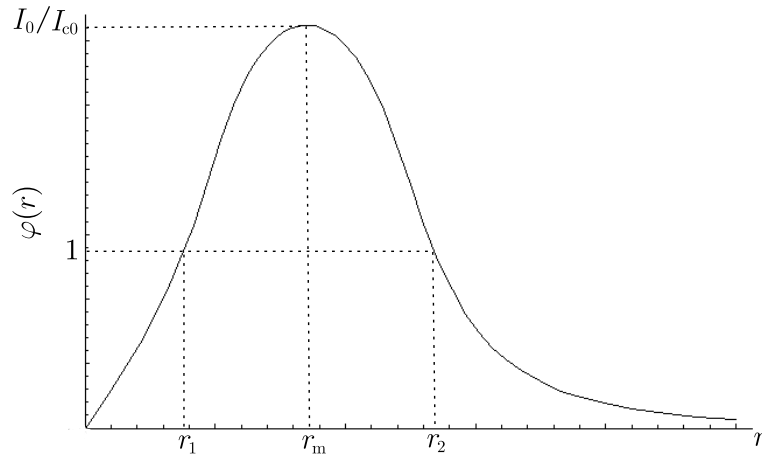


図 1.5 : $I_0 > I_{c0}$ における $\varphi - r$ 曲線

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (1.8)$$

1.8式における $n = 3$ の項が V_3 である。図 1.5 の $\varphi(r)$ はコイルの発生磁界 $F_1(r)$ を規格化したものであり、コイルが作る磁束の分布を表している。馬渡らは J_c と I_{c0} の関係については、図 1.5 に示すように $\varphi(r)$ が最大となる r を r_m として、

$$I_{c0} = \frac{J_c d}{2F_1(r_m)} \quad (1.9)$$

$$\varphi(r) = \frac{I_0 F_1(r)}{J_c d / 2} = \frac{I_0 F_1(r)}{I_{c0} F_1(r_m)} \quad (1.10)$$

という I_{c0} が J_c に比例する理論式を与えている。 $F_1(r)$ は $r = r_m$ のとき最大となる。また、 $\varphi(r) = 1$ となる $r = r_1, r_2$ を磁束が最初に薄膜を突き抜ける位置としている。

1.5 研究背景

第三高調波電圧誘導法は非破壊、非接触で局所的な測定ができ、線材の製造過程での測定法として有効である。第三高調波電圧誘導法を使えば簡単に全体を検査することができ、局所的な情報を得られるので、線材内の

J_c の分布を調べることができ、欠陥があればその位置を特定することもできる。

しかし、第三高調波電圧誘導法には実用上の問題がいくつかあり、その中に測定機器や測定環境によるノイズの問題がある。第三高調波電圧誘導法の実際の測定では測定機器、測定環境の影響を考えなければならない。

また、コイルの形状も測定結果に影響し、コイルのサイズを変更すると検出される V_3 にも影響があると考えられる。コイルの径や高さを大きくしすぎるとコイルから発生した磁界が薄膜の裏から侵入してしまう。このことから、理論上ではコイルのサイズが小さいほうが測定に有利と言える。しかし実際に作成できるコイルのサイズには限界があるため、サイズを小さくしすぎるとコイルの安定性に問題がでてくる。

以上のように第三高調波電圧誘導法においてノイズの影響は重要な要素であるが、その全容についてはよく分かっていない。

1.6 研究の目的

本研究では、第三高調波電圧誘導法において、コイルの形状を変えながら V_3 - I_0 特性を測定し、測定結果がどのように変化するかを調べて測定結果を解析し、この結果からノイズの増減を比較し、第三高調波電圧誘導法で有効な測定が可能なコイルの形状を見積もることを目的とする。

第 2 章 測定

2.1 試料

試料は株式会社フジクラが IBAD-PLD 法で製作した YBCO-coated 線材を使用した。試料の構造は、表 2.1 のようになっており、幅、長さともに 1.0×10^{-2} m である。試料の臨界温度は 91K、臨界電流密度は液体窒素温度 77.3 K、自己磁界中で 1.92×10^{10} A/m² である。

表 2.1 : 試料の構造

	材料	厚さ
基板	Hastelloy	100 μ m
中間層	YSZ	1.0 μ m
超伝導層	YBCO	0.25 μ m
保護層	Ag	10 μ m

2.2 実験装置

2.2.1 コイル

測定に使用したコイルは図 2.1 のような形状になっており、その大きさは表 2.2 の通りである。導線はエナメル線を使用し、軸はベーク材でできている。

2.2.2 サンプルホルダー

実験のためにベーク材を加工して図 2.2 のような器具を作成し、これを用いて試料とコイルの固定を行った。図中のねじとナットで各パーツの固定を行うことができる。

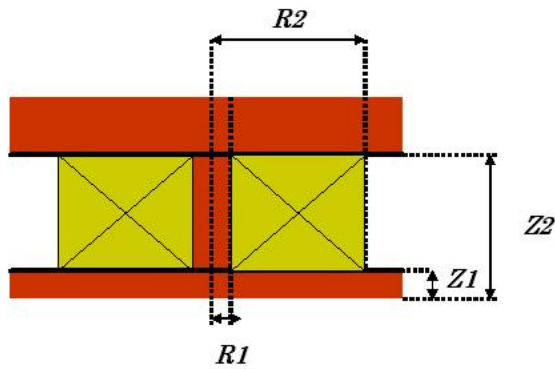


図 2.1 : コイルの構造

表 2.2 : コイルの大きさ

	coil
線径	80 μm
巻き数	200 回
R_1	0.60 mm
R_2	2.64 mm
Z_1	1.83 mm
Z_2	0.20 mm

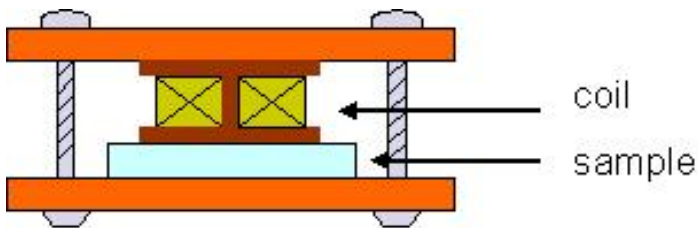


図 2.2 : サンプルホルダー

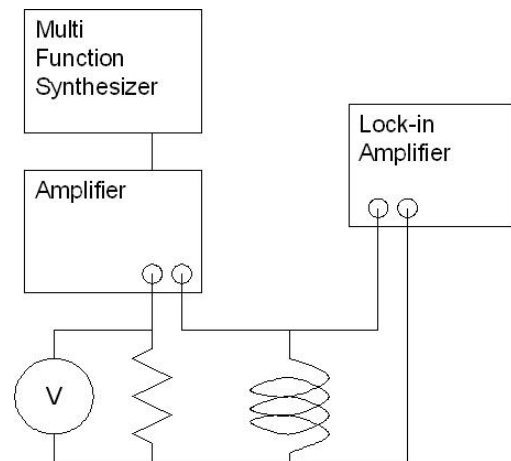


図 2.3 : 測定装置

2.2.3 測定装置

本研究では図 2.3 の装置を用いて測定を行った。この装置はマルチファンクションシンセサイザ、AC アンプ、ロックインアンプ、シャント電流計を用いて構成されている。コイルへの入力にはマルチファンクションシンセサイザで波形、周波数、振幅を決め、AC アンプで信号を増幅して出力した。ロックインアンプにはコイルへの入力の三倍の周波数の信号を同期信号として入力し、コイルの両端の第三高調波電圧を測定した。マルチファンクションシンセサイザの設定振幅と AC アンプの出力電流の関係はシャント電流計を用いて測定した。これらの装置の制御及び測定値の記録はコンピュータを使って行った。

2.3 測定条件

本研究では温度は液体窒素中で 77.3 K、外部磁界は存在せず、交流電流の周波数は 130, 256, 512, 1024, 1536 Hz として測定を行った。

2.4 コイルの形状依存性の測定

2.4.1 1 コイル系と 2 コイル系の測定

一個のコイルに交流電流を流し、そのコイルから V_3 を検出する 1 コイル系と、通電する drive コイルと V_3 を検出する pick-up コイルを独立させた 2 コイル系の V_3 - I_0 特性を測定した。また、2 コイル系は 1 コイル系と異なり V_3 を測定するロックインアンプと電流源がコイルの部分で独立しているため、2 コイル系が 1 コイル系と比べてどれだけノイズが抑えられているかを調べた。コイルの形状は図 2.4 のようなもので、従来法の 2 コイル系 (2 コイル系 A) を用い、1 コイル系の上から V_3 を検出するための pick-up コイルを巻いている。2 コイル系 A の諸元は 1 コイル系の上に pick-up コイルを巻いているということ以外は同じ条件で、drive コイル、pick-up コイルの巻数は共に 200 回で測定を行った。

2.4.2 2 コイル系の形状変化の測定

コイルの最適な形状を検討するために今回はコイルの巻数が変化するとき、 V_3 - I_0 特性がどのように変わるかを調べた。本実験では測定条件、試料、巻数以外のコイルの緒元を同じとし、変更した巻数は pick-up の巻数だけで drive の巻数は 200 回に統一した。また、図 2.4 の 2 コイル系 A の形状では、drive コイルから発生している交流磁界がリターンパスとして遮蔽電流による磁界に影響を及ぼす可能性がある。そこで図 2.4 の新規法の 2 コイル系 (2 コイル系 B) ように pick-up コイルの上に drive コイルを巻くことでリターンパスを抑えるための測定を行い、2 コイル系 A, B の pick-up コイルの巻数が 50, 100, 150, 200, 300, 1000 回のそれぞれの V_3 - I_0 特性を比較した。

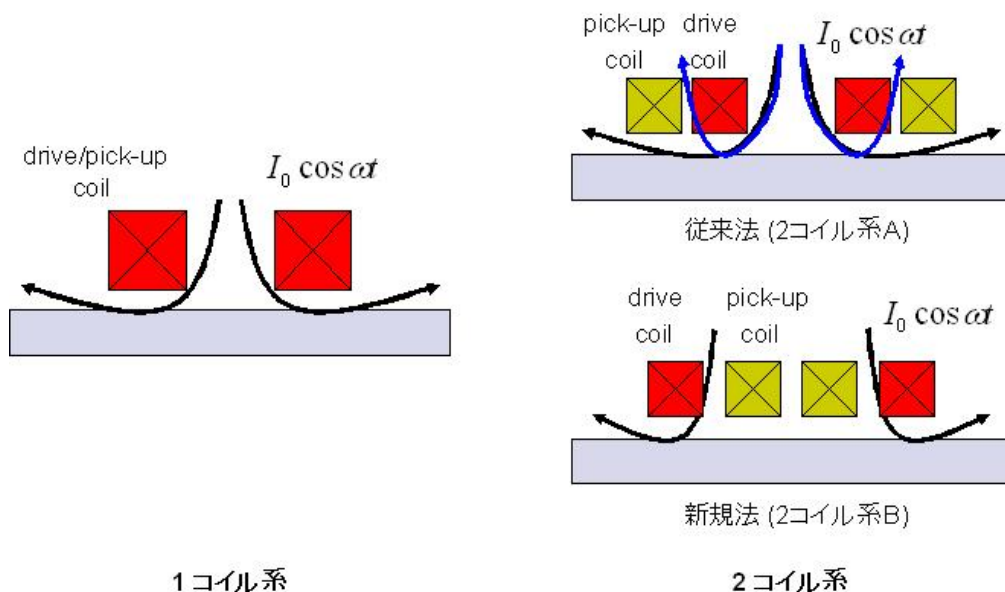


図 2.4 : コイルの形状依存性の測定

2.5 臨界電流密度の計算

第三高調波電圧誘導法によって測定した V_3 - I_0 特性の I_{c0} から J_c を求めるにはコイル定数 K が必要である。コイル定数は、

$$J_c = \frac{2K}{d} I_{c0} \quad (2.1)$$

という式で定義され、馬渡らの理論の項で述べたように $K = F_1(r_m)$ で与えられる。なお、 K によって J_c と I_{c0} の関係が決まるのは、表面の磁界が最も強い位置 r_m で遮蔽電流が初めに限界に達し V_3 が表れるからである。

I_{c0} は V_3 - I_0 特性の測定結果から求めることができるが、実際の測定においては I_c が I_{c0} より小さくてもノイズの影響で V_3 が完全には 0 にならないため、 I_0 が I_{c0} より小さい時に表れる V_3 より大きい値を閾値として、 V_3 が閾値を超える I_0 を閾値電流 I_{th} とする。閾値は立ち上がり前の V_3 のノイズよりわずかに大きい値でも I_{th} は決められるが、ある程度の余裕を持って決めている。

コイル定数 K を求めるには $F_1(r)$ を計算する必要がある。 $F_1(r)$ を解析的に解くことは困難であるのでコンピュータを用いて数値積分を行った。 r の値を 0 からコイルの半径までの範囲で大きくしながら $F_1(r)$ を計算し K を求めた。

第 3 章 結果と検討

3.1 コイルの形状依存性の測定結果

3.1.1 1 コイル系と 2 コイル系の測定結果

図 3.1は左のグラフが 1 コイル系、右のグラフが 2 コイル系 A を用いて測定したときの V_3-I_0 特性である。この図の実線が試料を置いて測定した V_3-I_0 特性であり、破線が試料を置かずに測定したこの測定で発生したノイズである。このグラフから 2 コイル系 A は 1 コイル系よりノイズが抑えられていることがわかる。図 3.2では図 3.1の第三高調波電圧を周波数と電流値で規格化し、閾値をとっている。また、1 コイル系の立ち上がり前の V_3 のノイズレベルを考慮し、立ち上がりの判定に用いる閾値は共に $4.0 \times 10^{-7} \Omega \text{sec}$ とする。1 コイル系のグラフはノイズが大きすぎて、 V_3 の立ち上がりが判断できなくなり、低い周波数では I_{th} をとることができなかった。2 コイル系 A は V_3 を検出するコイルが独立しているため、電流源から発生している V_3 の影響を受けず、ノイズが抑えられている。測定で使用した 1 コイル系、2 コイル系 A の形状は 2.4 節で説明したものであり、表 3.1は 2 コイル系 A の諸元であり、1 コイル系の諸元は表 3.1の drive coil のサイズのみとなっている。

表 3.1 : コイルの大きさ

	drive coil	pick-up coil
線径	80 μm	50 μm
巻き数	200 回	200 回
R_1	0.60 mm	3.54 mm
R_2	3.54 mm	4.53 mm
Z_1	1.83 mm	1.83 mm
Z_2	0.20 mm	0.20 mm

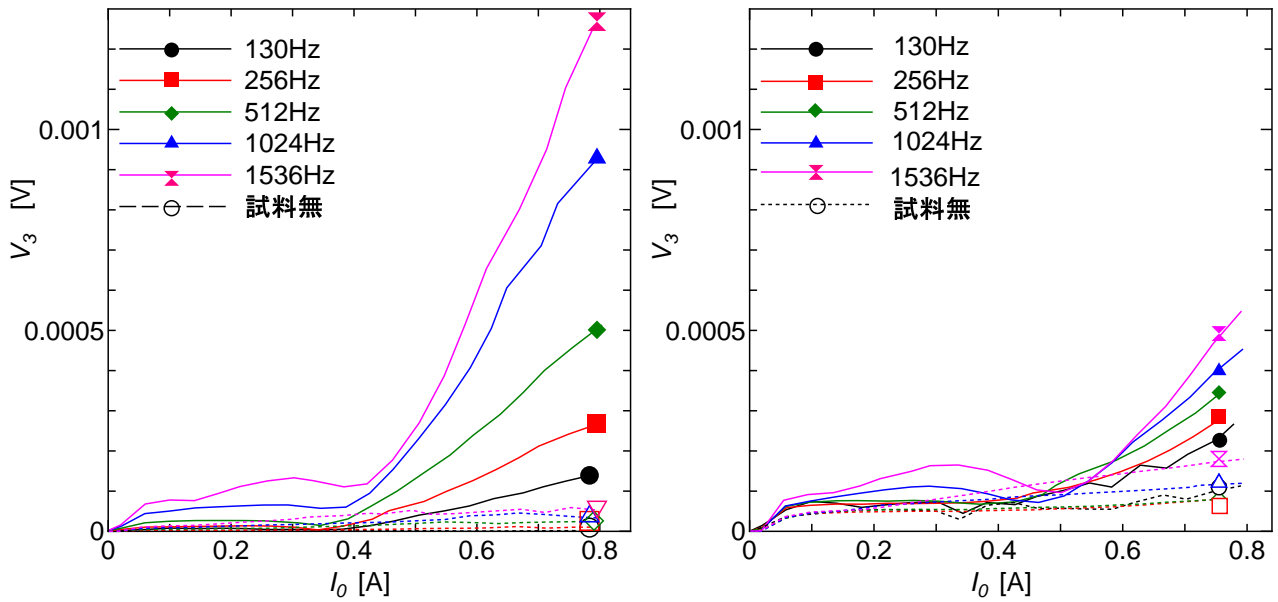


図 3.1 1 コイル系-2 コイル系の V_3 - I_0 特性の変化

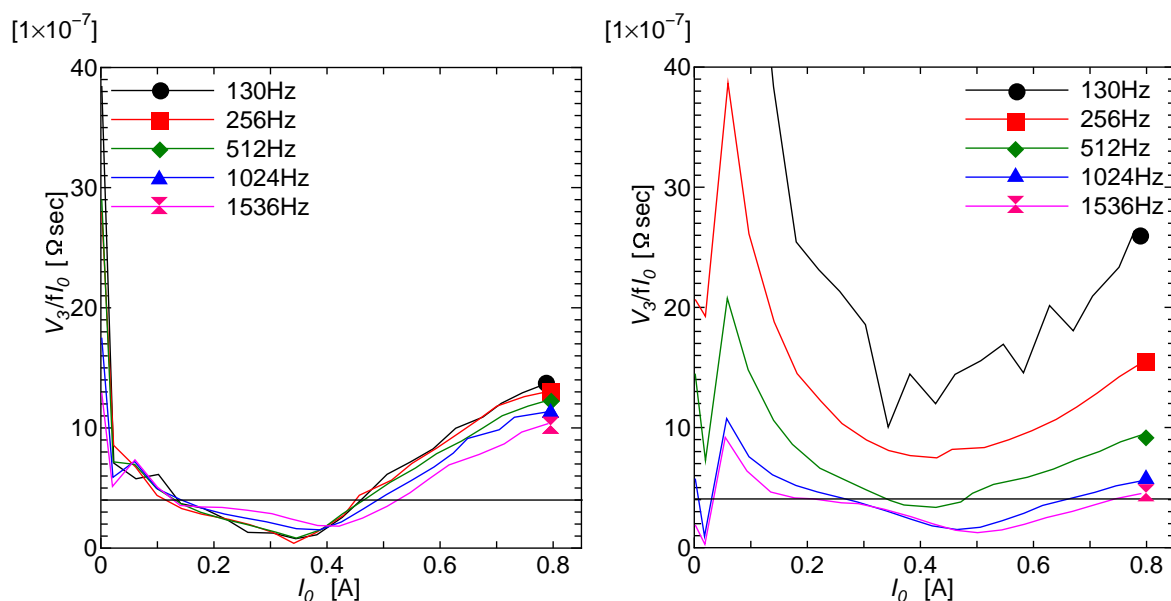


図 3.2 規格化した1コイル系-2コイル系の V_3-I_0 特性の変化

図 3.3は図 3.2の I_{th} から求めた $E-J$ 特性である。直流四端子法で求めた $E-J$ 特性と比較すると、第三高調波電圧誘導法での特性に J の過大評価がある。第三高調波電圧誘導法ではノイズレベルを考慮し、閾値をとる際に実際の閾値電流より少し高い電流値を閾値電流としているため $E-J$ 特性に J の過大評価が見られる。1コイル系と2コイル系Aの $E-J$ 特性を比較すると、1コイル系より2コイル系Aの方が安定している。この原因は1コイル系のノイズレベルが大きすぎて V_3 がノイズに埋もれてしまい、正確な立ち上がり判別できなくなっているためである。1コイル系のノイズレベルが2コイル系に比べて大きすぎるのは、電流源と検出用の回路が独立していないため、試料からだけでなく電流源から発生している V_3 をも検出していることが大きな要因だと考えられる。

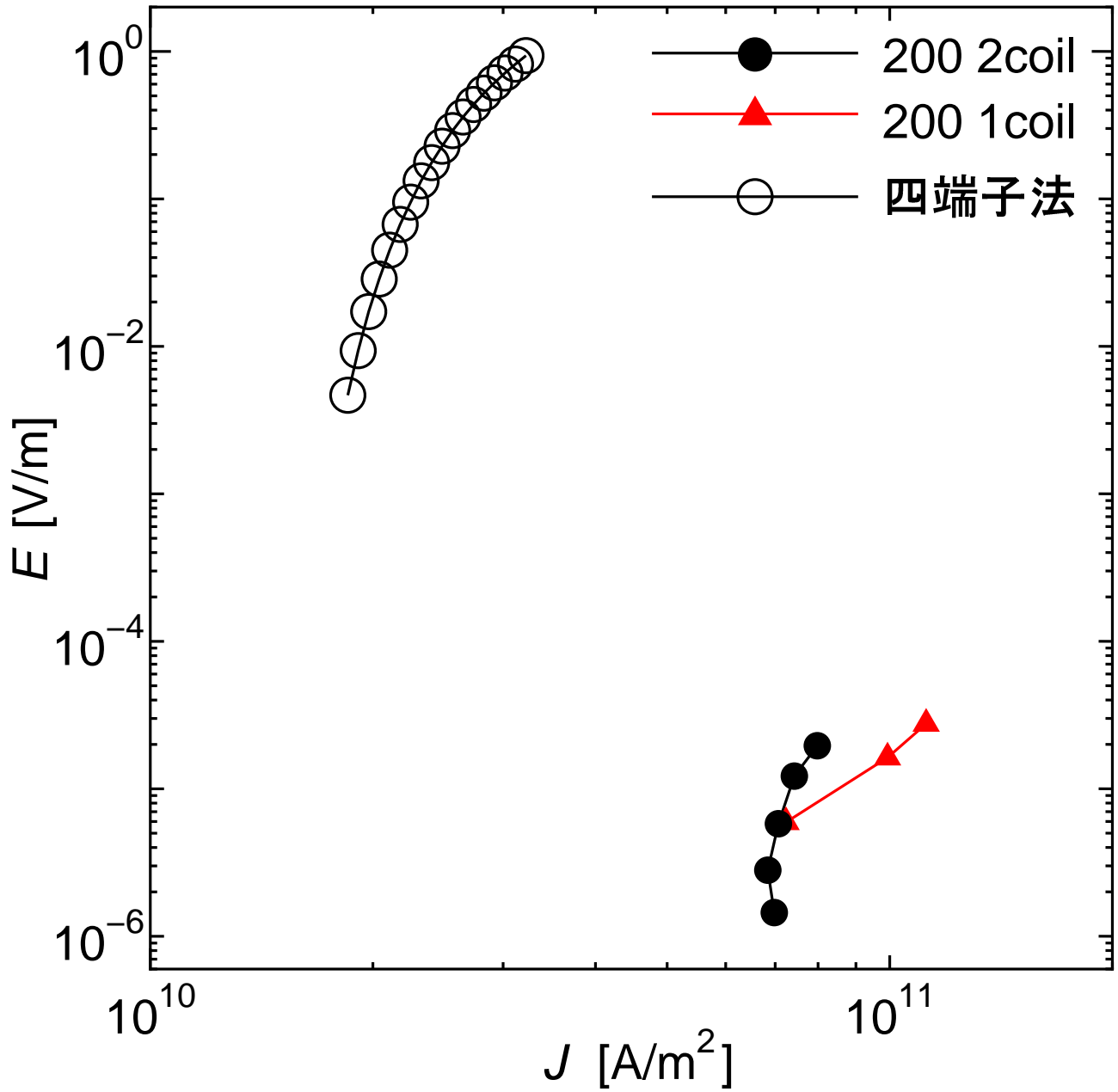


図 3.3 1 コイル系-2 コイル系の E - J 特性の変化

3.1.2 2 コイル系の形状変化の測定結果

図 3.4は pick-up の巻数を変更したときのそれぞれの V_3 - I_0 特性である。図 3.5は各巻数の 512 Hz のときの特性を比較したものである。各巻数においてのコイルの諸元は表 3.2とする。巻数が増えるにつれ V_3 の立ち上がりは早くなり、増加の傾きも大きくなっている。また、 V_3 が立ち上がる I_{th} 以下の値を見ると巻数が増えるにつれ径が大きくなり、ノイズの検出量も多くなっている傾向が見られた。表 3.2の通り測定に使用したコイルは複数あり、手作業で作成したためサイズにわずかな誤差があるためコイル定数にも誤差が最大でも 3 % 程出ている。図 3.4を各周波数と電流値で規格化し、巻数と閾値の増加は比例させてそれぞれの閾値を決める。

表 3.2 : 2 コイル系 A の大きさ

巻数 [回]	試料間距離 [mm]	高さ [mm]	内径 [mm]	drive の外径 [mm]	pick-up の外径 [mm]	コイル定数 [m ⁻¹]
50	0.2	2.78	0.6	2.53	2.68	1.26×10^4
100	0.2	2.76	0.6	2.37	2.73	1.28×10^4
150	0.2	2.68	0.6	2.46	3.10	1.31×10^4
200	0.2	2.75	0.6	2.54	3.29	1.28×10^4
300	0.2	2.72	0.6	2.56	3.91	1.29×10^4
1000	0.2	2.68	0.6	2.67	6.47	1.30×10^4

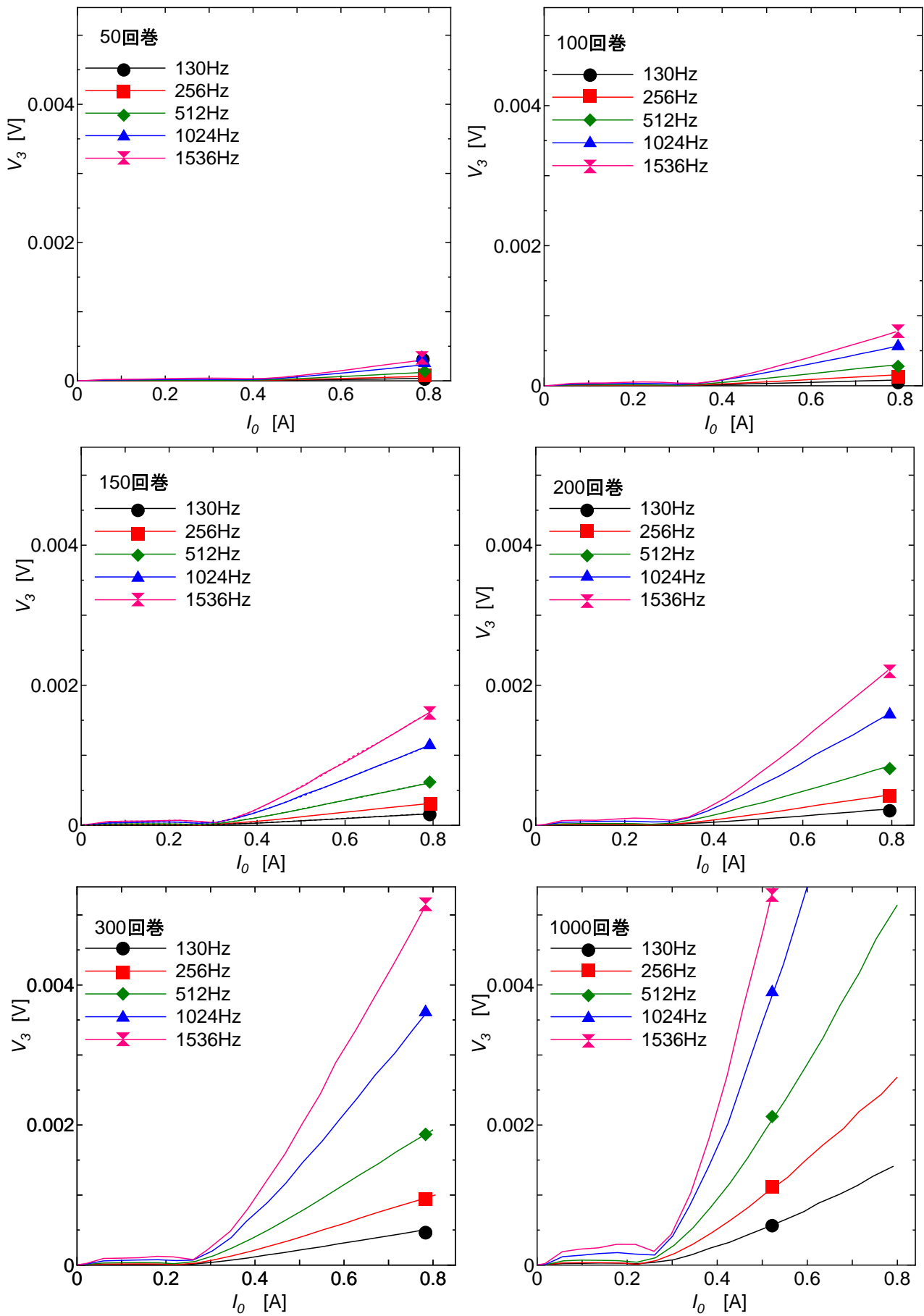


図 3.4 : 2 コイル系 A の巻数変更による V_3 - I_0 特性の変化

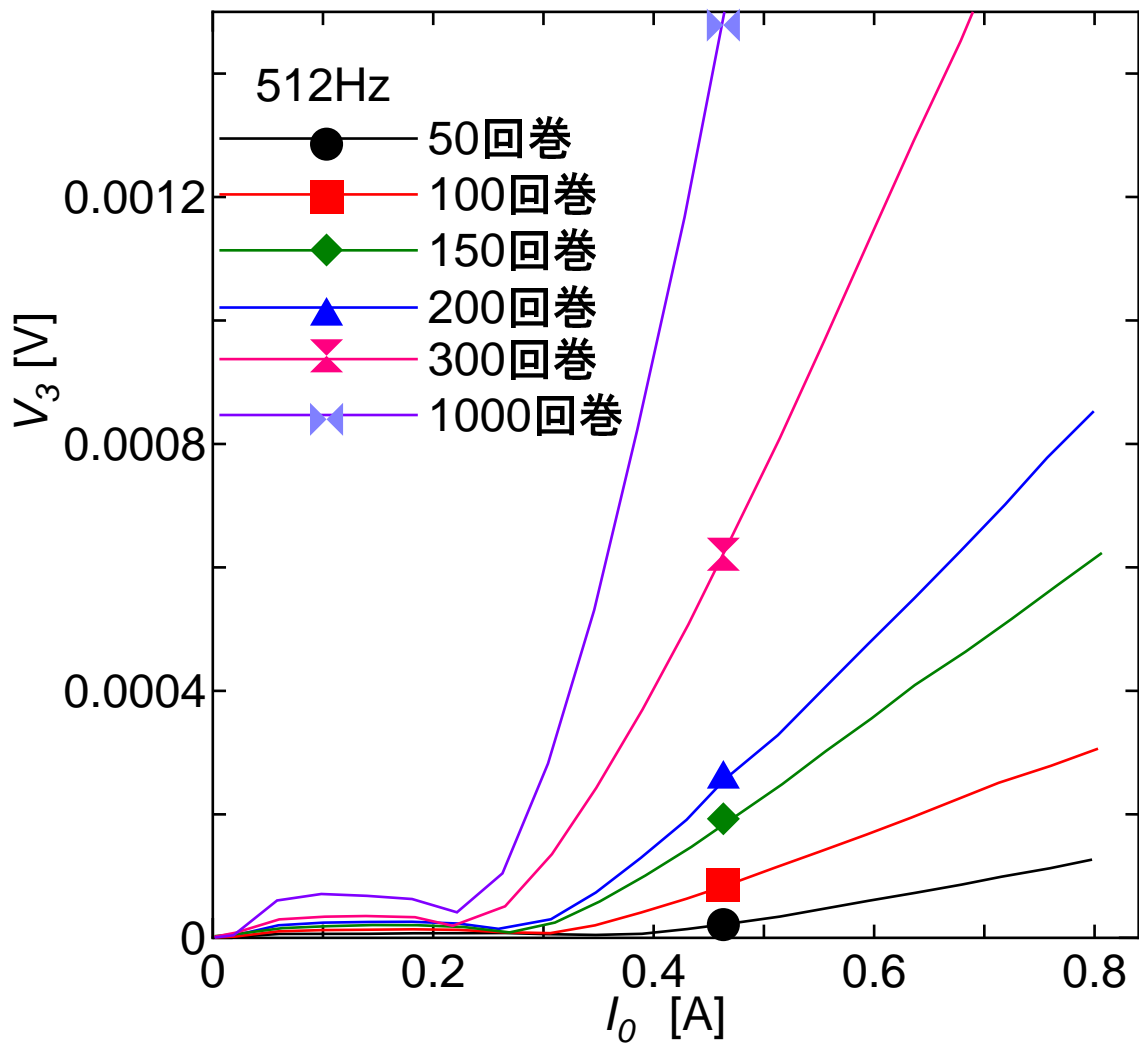


図 3.5 : 2 コイル系 A の巻数変更による 512Hz での V_3 - I_0 特性の変化

図 3.6は図 3.4の第三高調波電圧を各周波数と電流値で規格化したグラフである。ここでは 50, 100, 200, 1000 回巻きのグラフのみを載せている。一番立ち上がりの遅い 50 回巻きの閾値を $1.0 \times 10^{-7} \Omega \text{sec}$ とし、巻数が 2 倍の 100 回巻は閾値を $2.0 \times 10^{-7} \Omega \text{sec}$ 、巻数が 4 倍の 200 回巻は閾値を $4.0 \times 10^{-7} \Omega \text{sec}$ 、巻数が 20 倍の 1000 回巻は閾値を $2.0 \times 10^{-6} \Omega \text{sec}$ とする。

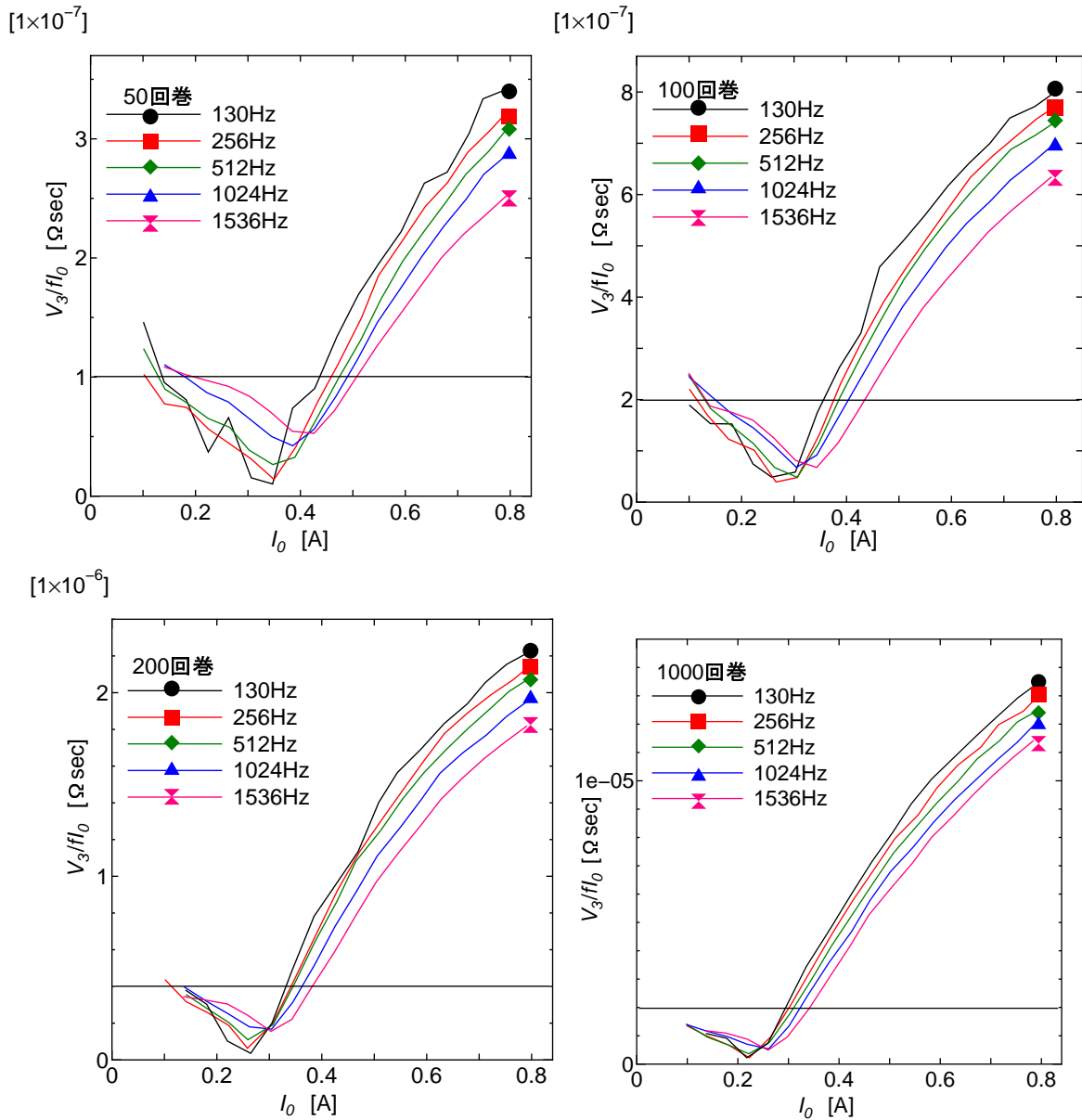


図 3.6 : 規格化した 2 コイル系 A の巻数変更による V_3-I_0 特性

閾値と交差する電流値を I_{th} とし、 E - J 特性を求める。2 コイル系 A のコイル定数 K は drive コイルのサイズを基準に馬渡らの理論を用いて計算した。各巻数の E - J 特性と四端子法の E - J 特性を比較したグラフを図 3.7 に示す。図 3.3 の 2 コイル系 A の結果と比べ E - J 特性に変化があるのは、図 3.3 で使用した 2 コイル系 A とは巻数以外に高さ、径のサイズが大きく異なる。図 3.3 のように実際の閾値電流より少し高い電流値を閾値電流としているため四端子法に比べ J に過大評価があるが、図 3.7 で用いた 2 コイル系 A の方が高さが高いため、薄膜の裏に磁束が入り込み、少ない電流値で V_3 が立ち上がったことで、図 3.7 では逆に J の過小評価があると考えられる。本節では巻数を変えることによる V_3 - I_0 特性の変化を検証しているため、この影響は無いものとする。図 3.7 では巻数が少ないほど四端子法の結果に近いことがわかる。しかし、巻数が少ないほど特性が良いとすれば 1000 回巻の E - J 特性には他の巻数に比べ J の過大評価が見られる。コイルを複数使っているため、コイル定数の誤差によることも考えられるが、リターンパスの影響も考慮すべきである。

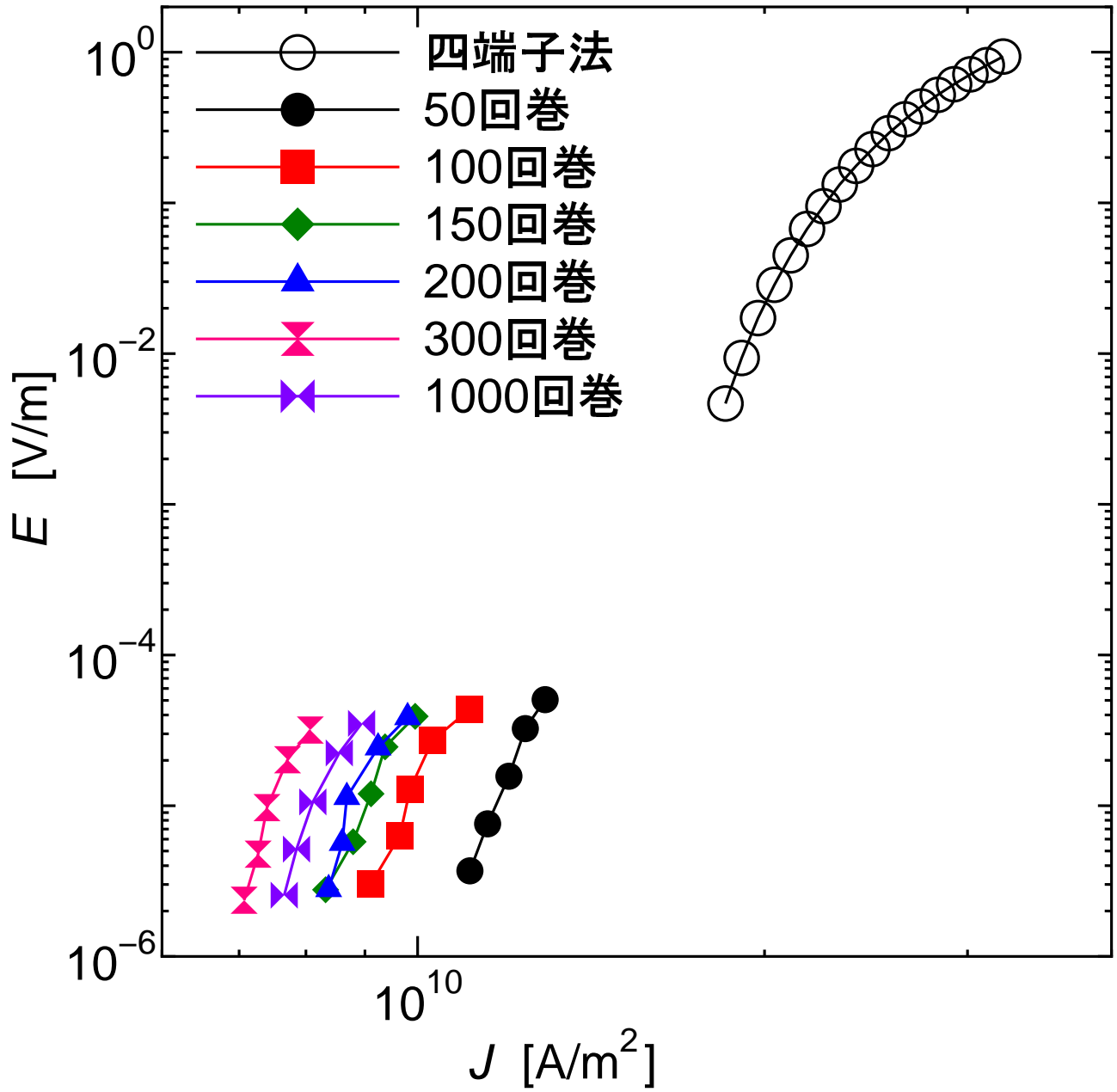


図 3.7 : 2 コイル系 A の巻数変更による E - J 特性

上記で行った2コイル系Aとは別に、リターンパスの影響をなくすために2コイル系Bとしてpick-upを内側に、driveを外側にして作成し、測定を行った。使用した2コイル系Bの諸元は表3.5の通りであり、driveコイルの外径が一定ではないのでコイル定数に大きく誤差が生じている。図3.8は2コイル系Bを用いた V_3-I_0 特性であり、図3.9では50回巻と200回巻の2コイル系A, Bをそれぞれ比較している。2コイル系A, Bではdriveの位置が異なるので2コイル系Bは V_3 の立ち上がりが早い傾向にあるが、 V_3 の値そのものは小さい傾向にある。

表 3.3 : 2コイル系Bの大きさ

巻数 [回]	試料間距離 [mm]	高さ [mm]	内径 [mm]	pick-upの外径 [mm]	driveの外径 [mm]	コイル定数 [m ⁻¹]
50	0.2	2.67	0.6	1.12	3.28	1.61×10^4
100	0.2	2.66	0.6	1.35	3.64	1.68×10^4
150	0.2	2.73	0.6	1.57	3.72	1.66×10^4
200	0.2	2.58	0.6	1.77	3.81	1.68×10^4
300	0.2	2.61	0.6	1.98	4.04	1.57×10^4
1000	0.2	2.48	0.6	5.20	6.86	3.50×10^3

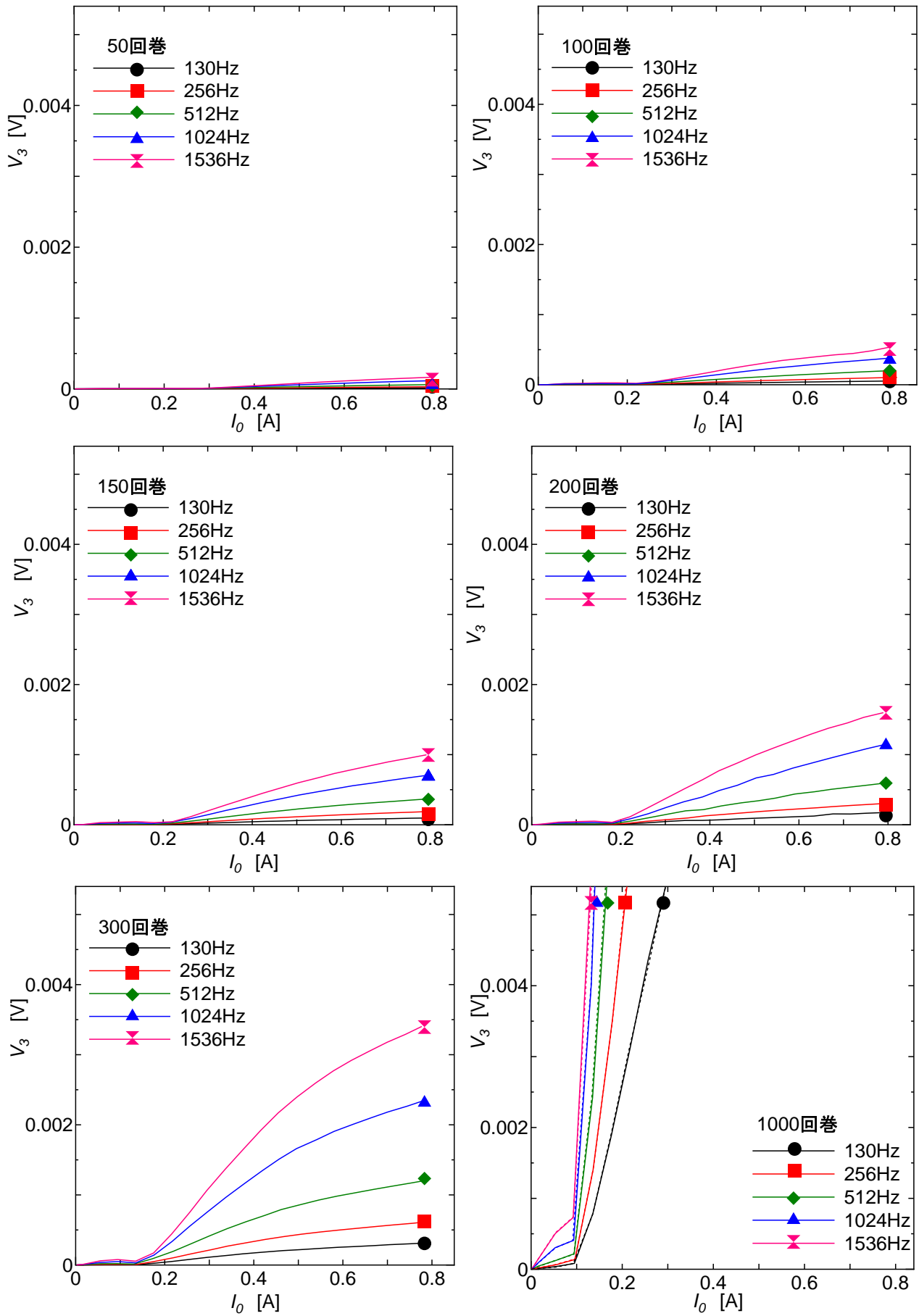


図 3.8 : 2 コイル系 B の巻数変更による V_3 - I_0 特性の変化

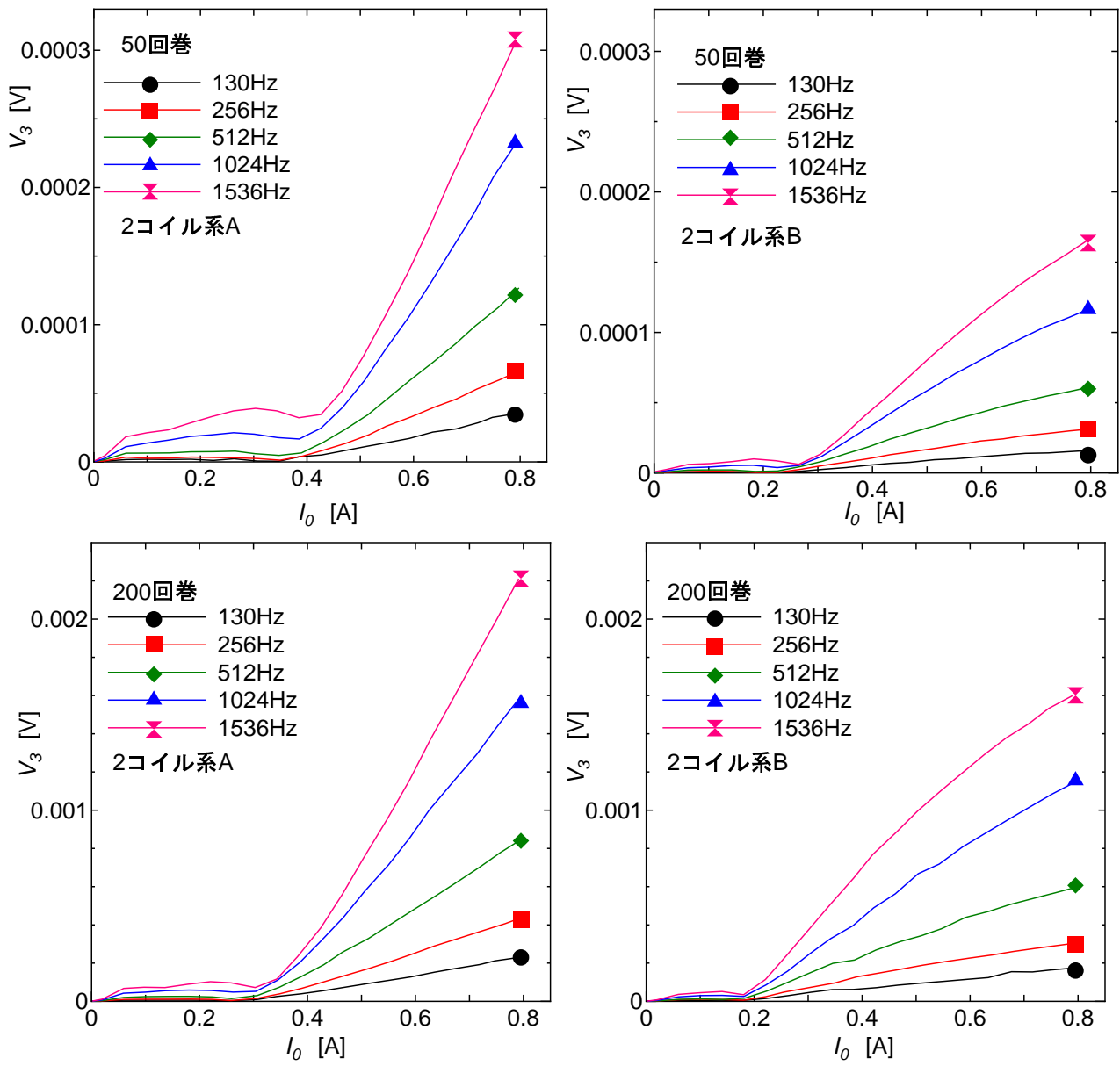


図 3.9 : 2 コイル系 A, B の V_3 - I_0 特性の比較

図 3.8 の V_3 を I_0 と各周波数で規格化し、図 3.6 と同様に閾値から I_{th} を求めた。求めた I_{th} から 2 コイル系 B の E - J 特性を求め、2 コイル系 A の E - J 特性と比較した図を図 3.10 とする。表 3.4 は 2 コイル系 A, B の各巻数のコイル定数値である。2 コイル系のコイル定数は drive コイルのサイズを基準に馬渡らの理論を用いて計算しているのので、drive の径に変化がない 2 コイル系 A のコイル定数に大きな誤差はないが、pick-up コイルの巻数が増加すると drive コイルの径が変化する 2 コイル系 B では、コイル定数に大きく誤差が生じている。2 コイル系 A, B のコイル定数 K は drive コイルのサイズを基準に馬渡らの理論を用いて計算した。2 コイル系 A, B の E - J 特性を比べると、2 コイル系 B では 2 コイル系 A で過大評価された 1000 回巻のグラフは取れなかった。図 3.8 の 1000 回巻を見ればわかるように、 V_3 の立ち上がりが非常に早く、値も大きい。2 コイル系 A での 1000 回巻の閾値に合わせてようとしても 2 コイル系 B ではノイズレベルが大きすぎて V_3 が立ち上がるところで I_{th} が取れず、 E - J 特性を求めても非常に小さいものとなった。しかし巻数が多いほど特性が悪くなるという結果に当てはまっているので 2 コイル系 B ではリターンパスの影響は殆どないといえる。

表 3.4 : 各巻数のコイル定数

巻数 [回]	2 コイル系 A のコイル定数 [m^{-1}]	2 コイル系 B のコイル定数 [m^{-1}]
50	1.26×10^4	1.61×10^4
100	1.28×10^4	1.68×10^4
150	1.31×10^4	1.66×10^4
200	1.28×10^4	1.68×10^4
300	1.29×10^4	1.57×10^4
1000	1.30×10^4	3.50×10^3

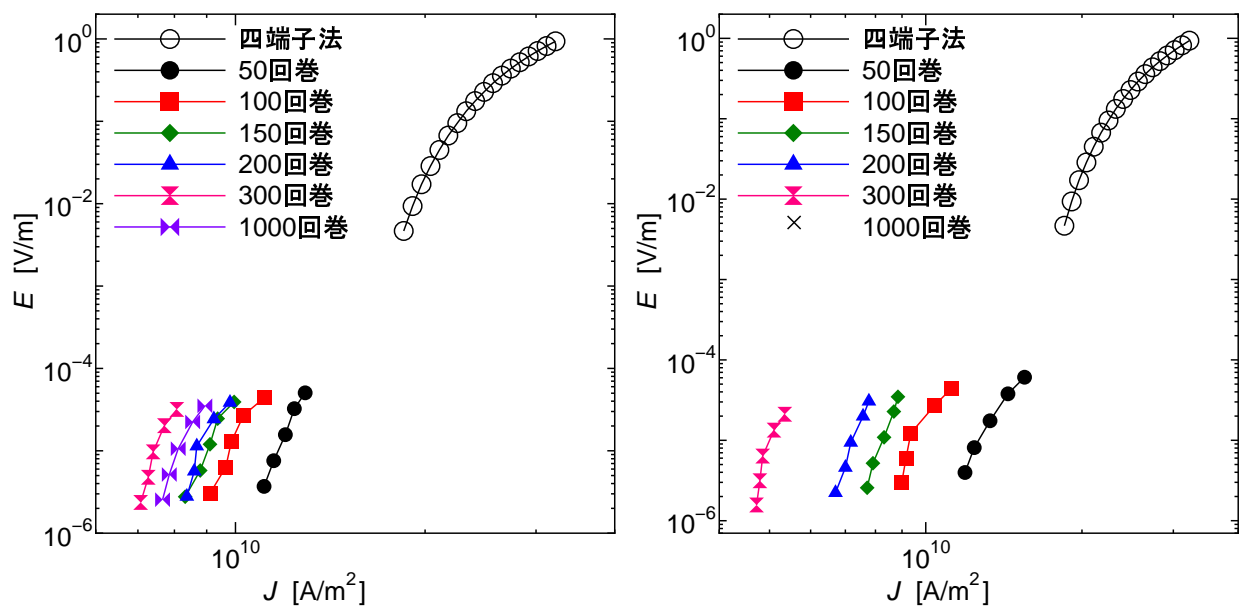


図 3.10 : 2 コイル系 A, B の E - J 特性の比較

2 コイル系 A, B で V_3 が立ち上がる前のノイズ量を比較した。 V_3 が立ち上がる前のノイズで最も高い値を各周波数ごとに2 コイル系 A, B で比較し、その低減率を求めた。表 3.5 は2 コイル系 A, B の 50 回巻と 200 回巻の V_3 が立ち上がる前のノイズで最も高い値とその低減率を示している。図 3.11 は表 3.5 のグラフであり、2 コイル系 A に比べて2 コイル系 B はノイズが 50 回巻は平均 68.8 %、200 回巻は平均 47.0 % 低減している。50, 100, 150, 200, 300 回巻での2 コイル系 B のノイズは平均 52.7 % も低減している。しかし、2 コイル系 B の 1000 回巻は V_3 の立ち上がりが非常に早いためノイズの最も高い値が判断できず、立ち上がる前の2 コイル系 B のノイズレベルは2 コイル系 A のノイズレベルよりも非常に高いため、低減率は求まらなかった。2 コイル系 B ではリターンパスの影響が抑えられているので、2 コイル系 A に比べて V_3 値が小さく、 V_3 が立ち上がる前のノイズも抑えられている。

表 3.5 : 2 コイル系 A, B のノイズ量

巻数 [回]	周波数 [Hz]	2 コイル系 A [V]	2 コイル系 B [V]	低減率 [%]
50	130	2.34×10^{-6}	8.94×10^{-7}	61.8
	256	3.29×10^{-6}	1.27×10^{-6}	61.4
	512	7.68×10^{-6}	2.11×10^{-6}	72.6
	1024	2.12×10^{-5}	5.53×10^{-6}	73.9
	1536	3.90×10^{-5}	1.01×10^{-5}	74.0
200	130	6.93×10^{-6}	2.90×10^{-6}	58.1
	256	1.19×10^{-5}	8.19×10^{-6}	30.9
	512	2.58×10^{-5}	1.27×10^{-5}	50.9
	1024	5.83×10^{-5}	3.15×10^{-5}	45.9
	1536	1.03×10^{-4}	5.25×10^{-5}	49.2

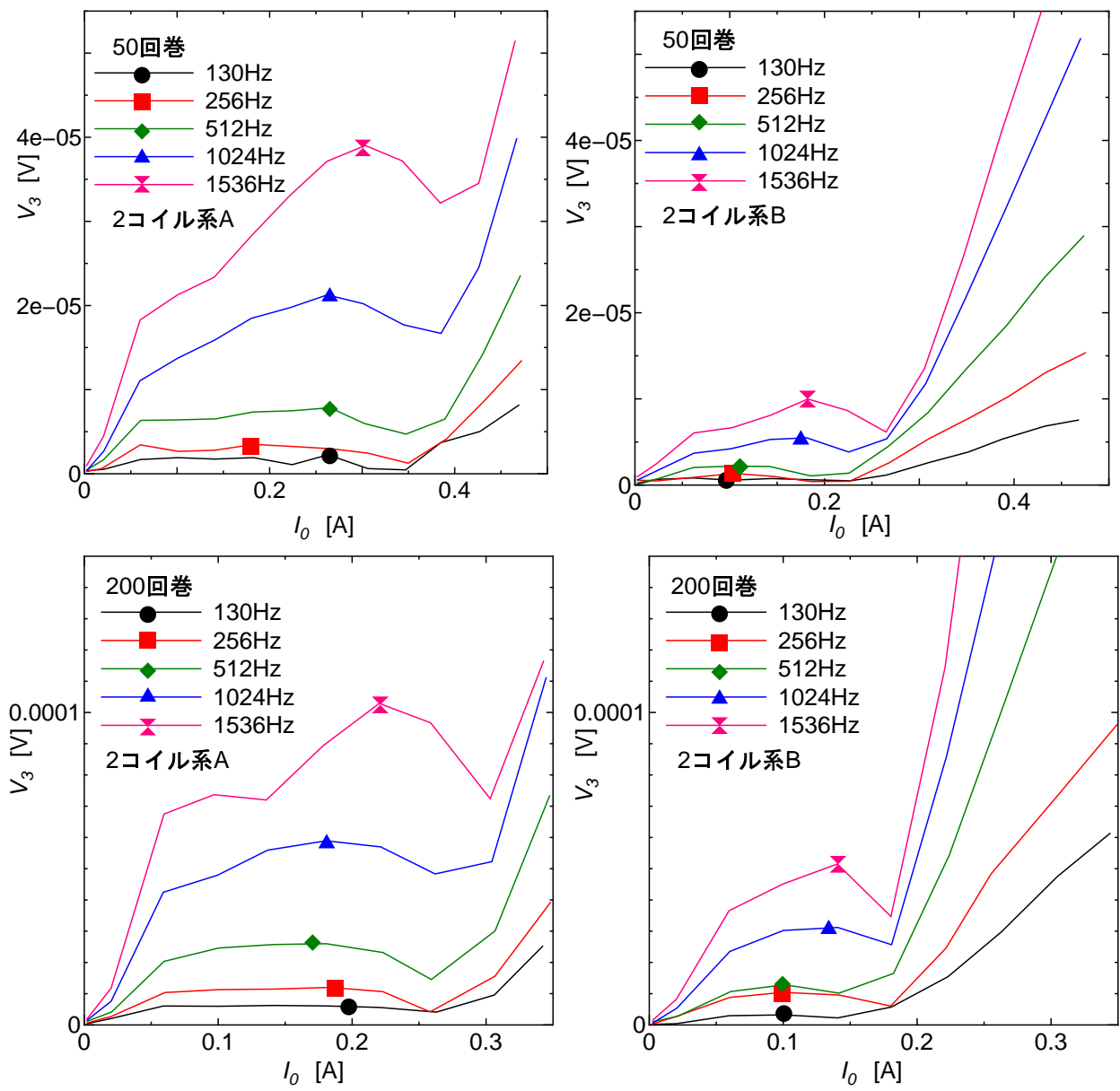


図 3.11 : 2コイル系 A, B のノイズの比較

第 4 章 結論と今後の課題

4.1 結論

本研究の結果から 2 コイル系は pick-up コイルを電流源から独立させることでノイズを低減できることがわかった。そのため、1 コイル系に比べて E - J 特性を正しく評価できた。2 コイル系 B を用いることでリターンパスの影響による信号の減少を抑えられると考えられたが、2 コイル系 B は 2 コイル系 A に比べ drive コイルの径が大きいため薄膜に印加され磁界が大きく、pick-up コイルの径が小さいため磁束の量そのものが小さくなっている。そのため 2 コイル系 B は 2 コイル系 A に比べ V_3 が少ない電流値で立ち上がり、 V_3 の値が小さくなったと考えられる。コイルの巻数の変化ではコイルの巻数を増加させると J_c が低下した。drive コイルを pick-up コイルの外側に巻くことでリターンパスの影響を抑えることはできたが、巻数が増えることにより誘導起電力が増加したためと考えられる。リターンパスの影響を抑えることで、 V_3 が立ち上がる前のノイズが低減しているため、検出した V_3 からノイズを低減できていると考えられる。

4.2 今後の課題

本研究の結果から第三高調波電圧誘導法においてコイルの形状を変えることによって測定結果がどのように変化するかについてある程度明らかにすることができた。しかし、本研究ではコイルの巻数を変更した場合について調べただけであり、コイルの高さ、コイル-試料間距離を変更した場合など、コイルの形状最適化に向けて様々な形状の変更についても検討する必要がある。また、2 コイル系 B では巻数を変更するとコイル定数に大きなずれが生じるため、その問題を解消できる形状を検討しての測定を行う必要がある。また、外部磁界を与えるなどの測定条件を変えたり、違う試料を使用しての測定も行う必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり多大なご指導、ご助言を頂いた松下照男教授、並びに小田部荘司准教授に深く感謝いたします。そして、実験や論文作成をはじめ様々なご指導を頂いた吉田貴昭さんや他の松下・小田部研究室の皆さんに深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) J. H. Claassen, M .E .Reeves, R .J .Soulen Jr. , Rev. Sci. Instrum. **62**(1991)996.
- 2) Y. Mawatari, H. Yamasaki, Y. Nakagawa, Appl. Phys. Lett. **82** (2003) 3275.
- 3) Y. Mawatari, H. Yamasaki, Y. Nakagawa, Appl. Phys. Lett. **81** (2002) 2424.