

極小局所ベクトル磁気センサによる
磁気特性測定法に関する研究

大分大学大学院工学研究科

博士後期課程

博士論文

2013年3月

相原 茂

目次

第1章	序論	4
第1.1節	本研究の社会的意義	4
第1.2節	従来の研究の到達点とその課題	11
第1.3節	本研究の目的	14
第1.4節	本論文の概要	15
第2章	極小局所ベクトル磁気センサによる磁気特性測定方法の確立	16
第2.1節	緒言	16
第2.2節	ベクトルヒステリシス (V-H) センサ	17
2.2.1	二次元ベクトル磁気特性	17
2.2.2	V-H センサの構造と測定原理	18
第2.3節	探針法	20
2.3.1	探針法の測定原理	20
2.3.2	電磁鋼板の絶縁被覆貫通機能	22
2.3.2.1	探針と試料の接触安定性	22
2.3.2.2	探針の絶縁被覆貫通機能	23
2.3.2.3	探針の絶縁被覆貫通性能の評価方法	25
2.3.2.4	探針の絶縁被覆貫通性能の評価結果	27
2.3.3	探針法の測定精度の評価	28
2.3.3.1	二次元ベクトル磁気特性測定装置による磁束密度測定精度の評価	28
2.3.3.1.1	探針間隔の可変方法	28
2.3.3.1.2	評価方法	30
2.3.3.1.3	評価結果	32
2.3.3.2	ソレノイドコイルによる磁束密度測定精度の評価	34
2.3.3.2.1	ソレノイドコイルを使用した評価装置	34
2.3.3.2.2	評価試料	37
2.3.3.2.3	評価結果	38
第2.4節	H コイル法	51
2.4.1	H コイル法の測定原理	51
2.4.2	H コイルの構造	52
2.4.3	H コイルの評価装置	55
2.4.4	H コイルのエリアターンの評価結果	59

2.4.4	H コイルの周波数特性の評価.....	60
2.4.5	H コイルの周波数特性評価結果の検証	63
2.4.6	H コイルの周波数特性の補正.....	65
第 2.5 節	ロゴスキー・チャトックコイル法	67
2.5.1	ロゴスキー・チャトックコイル法の測定原理	67
2.5.2	ロゴスキー・チャトックコイルの構造の検討	68
2.5.3	ロゴスキー・チャトックコイルの構造.....	69
2.5.4	ロゴスキー・チャトックコイルの評価装置.....	71
2.5.5	ロゴスキー・チャトックコイルの磁界強度測定精度の評価結果	73
第 2.6 節	結言	75
第 3 章	変圧器型磁気回路モデルのベクトル磁気特性分布.....	76
第 3.1 節	緒言	76
第 3.2 節	自動分布測定システム.....	77
3.2.1	自動分布測定システムの構成.....	77
3.2.2	自動分布測定システムの制御.....	80
第 3.3 節	方向性電磁鋼板の絶縁被膜の効果	82
3.3.1	方向性電磁鋼板の絶縁被膜	82
3.3.2	V-H センサの構造 <探針間隔 7mm H コイルサイズ 4 mm×4 mm>	83
3.3.3	測定モデルと測定条件	86
3.3.4	測定結果.....	89
第 3.4 節	方向性電磁鋼板の結晶粒とスクラッチの効果	106
3.4.1	方向性電磁鋼板のスクラッチの効果	107
3.4.2	V-H センサの構造 <探針間隔 2.5mm H コイルサイズ 2 mm×2 mm>	107
3.4.3	測定モデルと測定条件	110
3.4.4	測定結果.....	113
第 3.5 節	結言	122
第 4 章	ベクトル磁気特性分布測定装置の構築	123
第 4.1 節	緒言.....	123
第 4.2 節	ベクトル磁気特性分布測定装置の構成.....	124
4.2.1	ベクトル磁気特性可視化装置概略.....	124
4.2.2	ベクトル磁気特性可視化装置構成.....	126
4.2.3	ベクトル磁気特性可視化装置仕様.....	128

4.2.4	ベクトル磁気特性可視化装置動作フロー	133
4.2.5	測定位置の設定方法	135
4.2.6	ベクトル磁気特性可視化装置操作手順	137
第 4.3 節	モータモデルの磁気特性	147
4.3.1	測定モデルと測定条件	147
4.3.2	測定結果	149
第 4.4 節	結言	152
第 5 章	結論	153
第 5.1 節	本研究の総括	153
第 5.2 節	今後の研究課題	155
謝辞	156
参考文献	157

第 1 章 序論

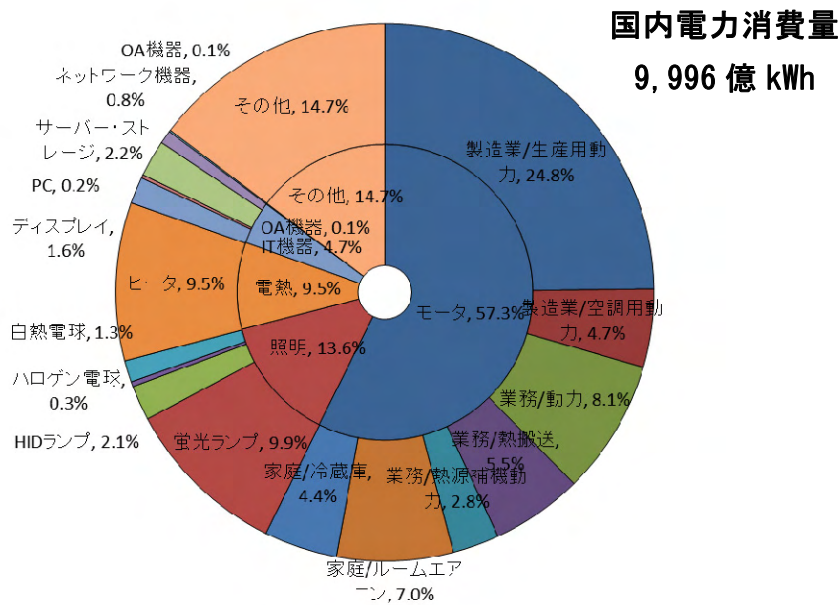
第 1.1 節 本研究の社会的意義

我々が生活する現代社会は工場の生産用動力，通勤では鉄道，家庭ではエアコン，冷蔵庫などや照明機器，電熱機器そして OA 機器などを動作させるために必要な電気エネルギーに依存している。図 1.1.1 および図 1.1.2 に示すように 2009 年の集計によれば産業，業務，家庭をあわせた国内電力消費量は 9,996 億 kWh に達する[1]。この電気エネルギーの源は近年の太陽光発電をはじめとする風力発電等の再生可能エネルギー発電が多くなったとはいえまだ枯渇性エネルギーである化石燃料による火力発電や原子力発電が主体である。図 1.1.3 に示すように平成 22 年度エネルギーに関する報告（エネルギー白書 2011 年度）[2]によれば，原子力発電 30.8%，石炭 23.8%，LNG 27.2% になり，これらの枯渇性エネルギーの化石燃料による発電の合計は 81.8% になる。我々はこの枯渇性エネルギーの化石燃料を基にして近代的な社会生活を謳歌している。

しかしながら，化石燃料の消費の増加は，地球環境を大きく変えることが懸念されている。産業や家庭で消費するエネルギーの基となる化石燃料の消費の増加は，大気中の温室効果ガス濃度を上昇させ地球温暖化を招き自然環境に影響を及ぼす。生活環境であれば，水温の上昇，水質の悪化，河川流量の変化，生植物の絶滅，分布変化，生態系の劣化，生物季節の変化などから，農林水産業では，作物の品質低下，栽培適地の移動，養殖の不適が発生し，災害では，高潮や台風による被害，河川洪水，土砂災害など，健康では熱中症や感染症の増加が増加する。そして，国民生活では，産業界への影響による収入の低下，快適さの阻害，季節感の喪失，観光資源等への被害などにより，我々社会の利益減少およびコストの増大に結びつく[3,4]。温室効果ガスである二酸化炭素の排出は企業・公共部門関連が主体であるが，家庭生活，商業活動によって必要なエネルギーの消費によっても排出される[5]。

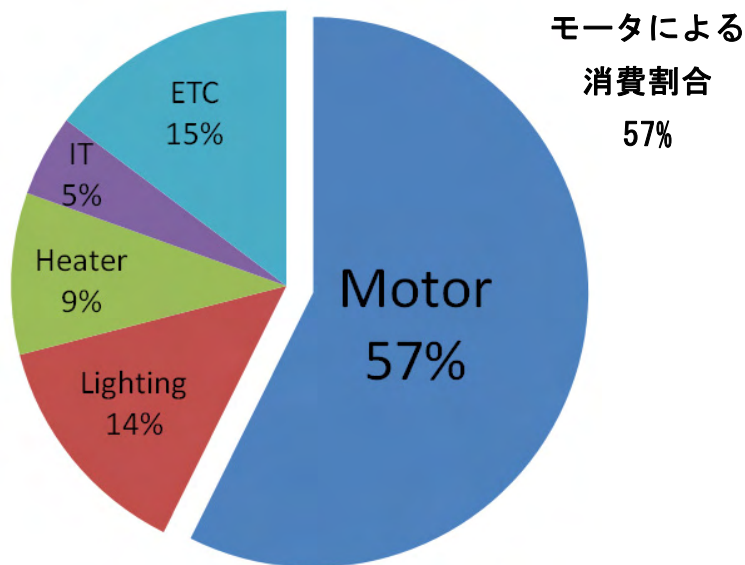
地球温暖化は大気中の温室効果ガスである二酸化炭素濃度の上昇による。具体的な例は図 1.1.4 に示すように北極海の家氷面積の変化[6]に現れており，測定を開始した 1979 年から最近の 2011 年にかけて北極海の家氷面積が大きく減少していることがわかる。

電気エネルギーに関連する省エネルギーや環境保全是数多く試みられており，例えば，電気機器のトップランナー機器[7]の取り組みが進められているが，地球温暖化の原因である温室効果ガスとして主な二酸化炭素の排出[8]をより効果的に減らすことや，図 1.1.5 に示すように 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震と津波により福島第一原子力発電所の事故が発生し，日本の原子力発電所が運転できない状況である。今後は原子力発電の全廃の気運であり省エネルギー化は切実な問題である。



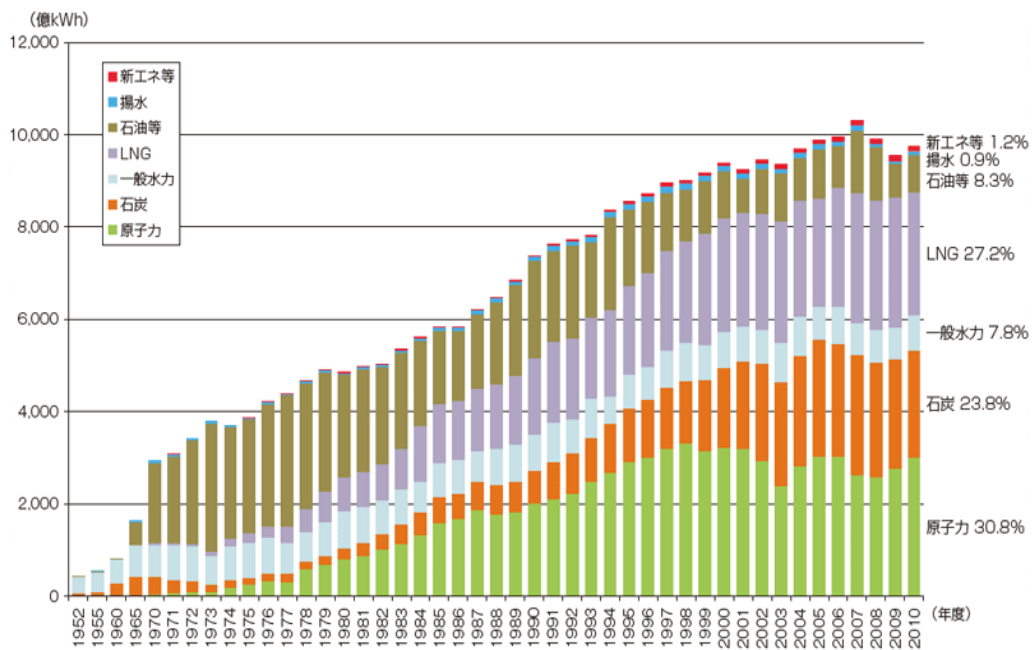
出典：(株) 富士経済 電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査 2009
 Fig. 1.1.1 Details of the domestic power consumption of the industry ,business, home in 2009.

図 1.1.1 2009 年の産業，業務，家庭の国内電力消費の内訳



出展：(株) 富士経済 電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査 2009
 Fig. 1.1.2 Consumption electricity ratio with the motor.

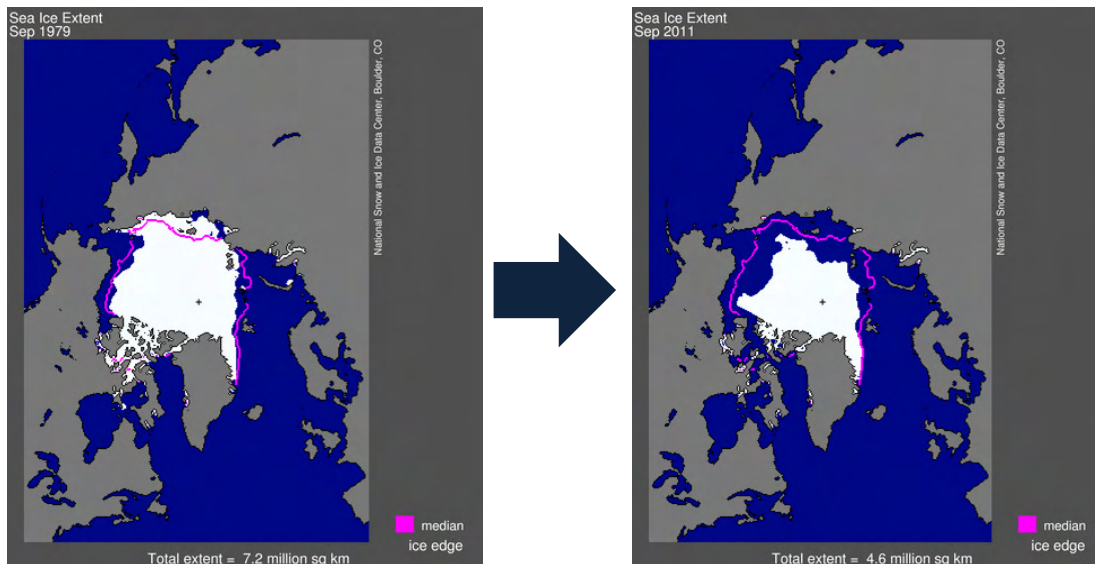
図 1.1.2 モータによる消費電力割合



出典：経済産業省 資源エネルギー庁 エネルギー白書 2011

Fig. 1.1.3 Domestic transition of primary energy.

図 1.1.3 一次エネルギー国内供給の推移



出典：National Snow & Ice Data Center Arctic Sea Ice News & Analysis

Fig. 1.1.4 Change of the sea ice area in 1979 and 2011.

図 1.1.4 1979 年と 2011 年の海氷面積の変化



出典：INTERNATIONAL BUSINESS TIMWS 2011 年 4 月 12 日

Fig. 1.1.5 Fukushima daiichi nuclear power station after earthquake disaster.

図 1.1.5 震災後の福島第一原子力発電所

先に述べたように、2009 年の国内の産業と業務および一般家庭をあわせた電力消費の総量は 9,996kWh である。この消費される電力は図 1.1.6 に示すように発電所で発電され、送・配電網で需要家に送られる。これらの電力は需要家の電気機器や照明およびヒータ等で消費され効率良く使用される必要がある。電力の発電には、水力、火力、原子力等の化学的、物理的エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機には鉄心の材料として電磁鋼板が使われている。送電するときは、発電された電気エネルギーを需要家まで効率良く送るためには電圧を上げる必要があり、需要家についたら、用途に応じて電圧を下げる必要がある。その際に使用されるのが変圧器でその鉄心にも電磁鋼板が使われている。電力を消費するときは、電気エネルギーを機械エネルギーに変換するため電動機が使用され、その鉄心には電磁鋼板が同様に使われている。そのほかにも 2 次的に電圧を変化させる小型トランス、インダクタ等の鉄心として電磁鋼板は広く使用されている[9]。電磁鋼板は、電気と磁気の相互作用を効果的に使用するための材料であるが、強磁性体である電磁鋼板は交流磁化されるときに鉄損と呼ぶエネルギー損失を生じる。そのために、送・配電網に使用されている変圧器の鉄損は総発電量の約 0.8% に達する。この損失は 61 億 kWh になり、原油換算で 57 万 kl になる[10]。交流送・配電システムは 1890 年代にウエスティングハウスとニコラ・テスラが開発し今日に至る。これに先んじて 1884 年にルシアン・ゴラーレルにより発明された変圧器を基にウ

イリウム・スタンリーが図 1.1.7 に示す現在の構造と変わらない変圧器を開発した[11]。変圧器は現在までに改良を積み重ねているが損失は存在する。そのために、変圧器の鉄損の改善は省エネルギー化に直結し、地球温暖化対策に寄与することが出来る。また、送・配電路により送られた電力は需要家で消費されるが、消費される割合は、生産用動力や空調用動力などのモータ関連が 57.3 %にもなり、モータの高効率化を行うことも省エネルギー化に結びつく。

送・配電線路を構成する変圧器や電力を消費するモータの省エネルギーおよび高効率化を進めるためには、変圧器やモータの稼働中の特性を知る必要がある。変圧器は先に述べたように 125 年ほど前に開発され、鉄心材料及び巻線材料の高性能化、鉄心及び巻線の加工技術により改善されてきた。図 1.1.8 に示すように鉄心材料の改善としては、結晶方位のずれが小さく、磁気特性の優れた特別な結晶粒を造り上げることにより低鉄損としている[12-14]。しかしながら、損失を知る手段としては変圧器やモータの入力と出力の関係や電磁鋼板などの素材そのものの特性から求められていた。しかし、変圧器やモータとしての損失や電磁鋼板の特性を知ることができても変圧器やモータが組み立てられた状態での特性を知ることは難しい。実際に現在の鉄損値が改善された電磁鋼板を使用した変圧器やモータを材料の磁気特性を把握し設計し、そして、鉄心構造や材料特性の改善を行っても、実際にものづくりした場合に計算値より損失が大きくなることもある。これらは変圧器やモータの組み立て時の応力などによる材料特性の劣化に起因しており、設計に必要なデータが不足していることになる。実機の変圧器やモータを正しく評価するには、それらの材料が変圧器やモータに組み立てられた状態で稼働中の磁気特性を詳しく測定することが重要となる。

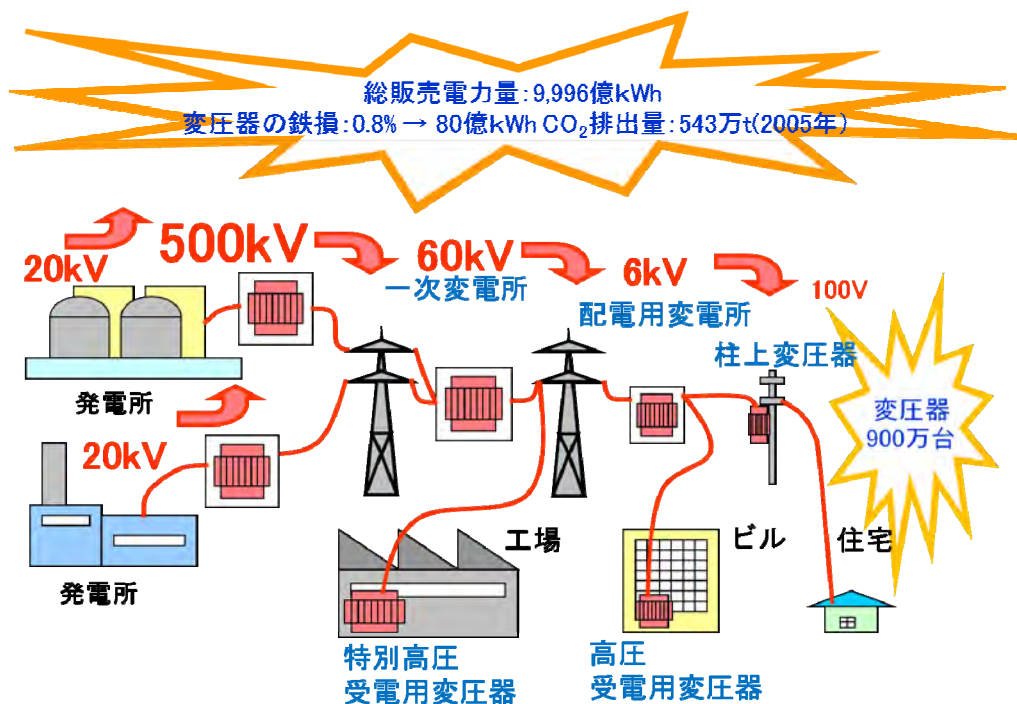
これらの変圧器やモータの電気機器の高効率化において鉄損低減が重要課題であり、さらに、これらの高性能電磁材料が持つ特徴を有効に活用するためには、その材料特性を正確に把握しなければならない。ところが、従来の測定技術では本来ベクトル量である磁気特性をスカラー量によって取扱い、磁気飽和特性や交番磁束下の磁気ヒステリシス特性のみが考慮される程度である。したがって一般的に電気機器の鉄心材料として使用される電磁鋼板において、交番磁束や回転磁束などの複雑な磁化現象と磁気異方性が考慮されず適切な測定とは言えない。従来の磁気測定法については JIS や IEC に規定されるエプスタイン試験法や単板磁気試験法[15]といった一次元測定は、測定方向の交番磁束条件下の磁気特性のみを評価するもので、磁束密度 B 、磁界強度 H の関係をスカラー量でしか評価できない。したがって、ベクトル量で示されるべき磁気特性の概念に基づく二次元ベクトル磁気特性法が提案されている[16]。二次元ベクトル磁気特性は、 B と H のベクトル関係を用いて任意方向の交番磁束、および回転磁束下の磁気特性を表現することができる。さらに、磁気異方性や鉄損を正確に評価できる。

損失を知る他の方法として、熱電対[17]やサーモカメラや magnetovision[18]などがある

が、磁気特性として B と H の方向と大きさを知ることは重要である。二次元ベクトル磁気特性技術により、稼働中の磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルの挙動を詳しく知ることで変圧器やモータ等の特性改善の手掛かりを得ることができる。

本研究では変圧器やモータの低損失化に大きな役割を持つ実機鉄心中の磁気特性を詳細に知る技術として二次元ベクトル磁気センサの測定方法の確立と小型化を行い、実機鉄心中の磁束密度 B と磁界強度ベクトル H の測定を行う。そのことにより、磁束密度分布、磁界強度分布、鉄損分布などをビジュアルに表示するベクトル磁気特性の可視化を実現し、変圧器やモータなどの電磁応用機器の性能向上に寄与することを目的としている。

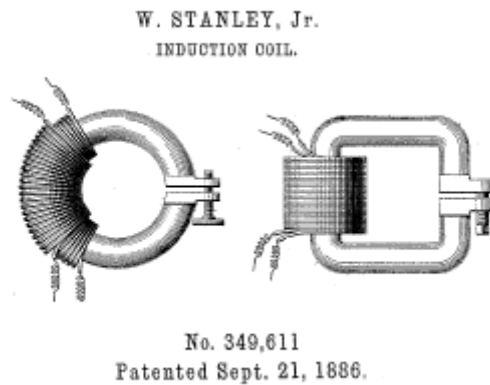
また、実機に対する磁気特性評価手法の開発は、電磁応用機器の設計技術を前進させることができる点において本研究の社会的意義は大きい。



出典：超低損失柱上トランス用材料の開発 NEDO 省エネルギー技術開発室

Fig. 1.1.6 Diagram of an electric power system and transformer loss on 2005.

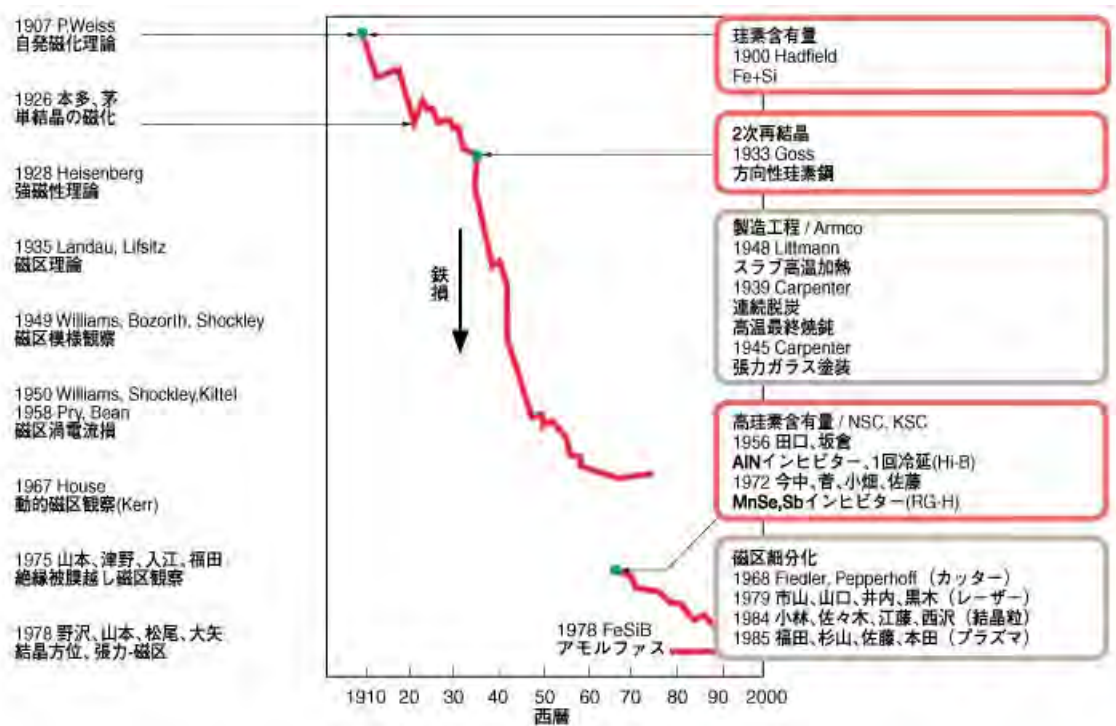
図 1.1.6 送配電路と 2005 年の変圧器損失



出典：United States Patent Office No. 349,611

Fig. 1.1.7 Transformer of the Stanley patent.

図 1.1.7 データ：スタンリー特許の変圧器



出典：第 155・156 回西山記念技術講座 日本鉄鋼協会(1995)

Fig. 1.1.8 Transition of the iron loss of the electrical steel sheet for transformers.

図 1.1.8 変圧器用電磁鋼板の鉄損の推移

第 1.2 節 従来の研究の到達点とその課題

電磁鋼板などの材料の磁気特性を知るために、エプスタイン測定法や単板磁気測定法[15]により磁気特性の測定が行われている。これらの磁気特性の測定は、磁束密度 B と磁界強度 H は大きさのみのスカラー量として表現されているため、磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルが平行な方向にある交番磁束条件下の特性となる。しかしながら、実際の鉄心中は磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルが異なるのが一般的である。つまり、異方性材料に任意方向の磁界を印加した交番磁束や回転磁束のような大きさと向きを持つ特性の測定は難しいため、従来の測定方法ではすべての特性を表すことはできない。そのために、磁束密度 B と磁界強度 H をベクトル量として磁気特性を測定することができるベクトル磁気特性測定法が必要となる[19,20]。電磁応用機器に使用される電磁鋼板は厚み 0.2~0.5 mm であり、厚み方向に磁束はほとんど通らない。このことから、厚み方向の磁気特性は一様であると考えられるために二次元ベクトル磁気特性により磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルの関係を表すことができる。

変圧器やモータに使用されている鉄心内の磁気特性を測定する技術として、磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルを測定する局所的二次元ベクトル磁気特性測定法がある。二次元ベクトル磁気特性の測定では、磁束密度の測定に探りコイル、磁界強度の測定に H コイルが使用されている。しかしながら、変圧器のような機器の磁気特性の分布を測定しようとする、探りコイルを巻線する孔を空ける数が多くなり煩雑となる。また測定対象に孔を空けたことによる応力により鉄心の磁気特性が変化してしまう可能性がある。このために、磁束密度を測定する方法として、探りコイルの代わりに一対の探針を用いる探針法が考案された[21,22]。探針法は試料の 2 点に探針を電氣的に接触させ、その 2 点間の電位差を測定することにより磁束密度が測定できる方法である。

我々の研究室では、図 1.2.1 に示す探針法と H コイル法と組み合わせた二次元ベクトル磁気センサ(Vector magnetic sensor : V-H センサ)を開発してきた。これまでに著者らは開発した V-H センサを用いて、変圧器モデルや誘導電動機モデル鉄心中の二次元ベクトル磁気特性の測定を行ってきた[23-28]。しかしながら、測定対象が小型化されてきたことや、より局所的な測定を行うために小型の V-H センサの開発が望まれていたが、H コイルの実用的な感度や巻棒の製作精度の限界などから、H コイルのサイズが 7 mm×7 mm、探針間隔が 10 mm に留まっていた[30]。

この V-H センサにより方向性電磁鋼板を使用した変圧器モデルの詳細な磁気特性分布を測定し、最大磁束密度分布、最大磁界強度分布および鉄損分布から変圧器モデル形状の影響による磁気特性を明らかにすることはできた。しかしながら、変圧器の鉄心細部の磁気特性や方向性電磁鋼板特有な構造である結晶粒などの影響を測定することはできなかった。また、

モータの磁気特性を測定しようにも、固定子のティース部分が細いために物理的に測定ができなかった。このようなことから、電気機器の高効率小型化の流れのなかで鉄心の小型化も進み V-H センサの小型化が必要である。

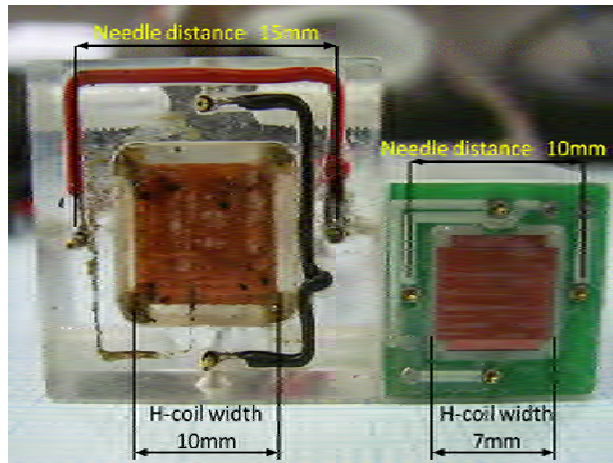
探針法の測定は試料と探針を電氣的に接触する必要があるが、電磁鋼板に絶縁被膜があると電氣的な接触できずに測定できないことから、測定前に絶縁被膜を除去する必要があった[29]。しかしながら、方向性電磁鋼板に施された絶縁被膜は絶縁の目的以外に張力を持たせ電磁鋼板の磁気特性を改善していることから、絶縁被膜を除去すると本来の特性から変化してしまう[9]。探針法が試料に接触するだけで測定できる方法であるにもかかわらず、絶縁被膜を除去するという手間と、電磁鋼板の磁気特性が変化してしまう根本的な問題を解決する必要がある。

探針法の原理は 1949 年と古く、図 1.2.2 に示す E. Werner の特許 (Austrian Patent No. 191 015) [21]があり、1952 年に L. H. Sauffer が装置化している[22]。このように古くから測定方法は知られていたが活用事例は少ない。1988 年に松原らが基本的な理論を示し、その後、測定原理の確立や測定誤差の評価は比較的最近で 1995 年に山口らが行っている[31-34]。

探針法を使用し電気機器を測定した報告は探針間隔が 2 mm 程度までの例はあるが、磁束密度測定精度の報告例は 4 mm 程度に留まっている。また、これらの報告事例は探針単体の場合である。磁束密度と磁界強度を測定した事例では、磁束密度の測定に探針を使用しているが磁界強度の測定にはホール素子を使用している。また、探針とホール素子の一対をセンサとしたもので、2次元ベクトル磁気特性を測定するには 90 度回転し測定する必要がある。

以上のように、二次元ベクトル磁気特性として磁束密度と磁界強度の測定を一度で行える V-H センサの小型化に取り組むと共に、探針間隔が 4 mm 以下と短い場合の磁束密度の測定精度評価、それに合わせた極小 H コイルの評価方法を確立することが必要である。

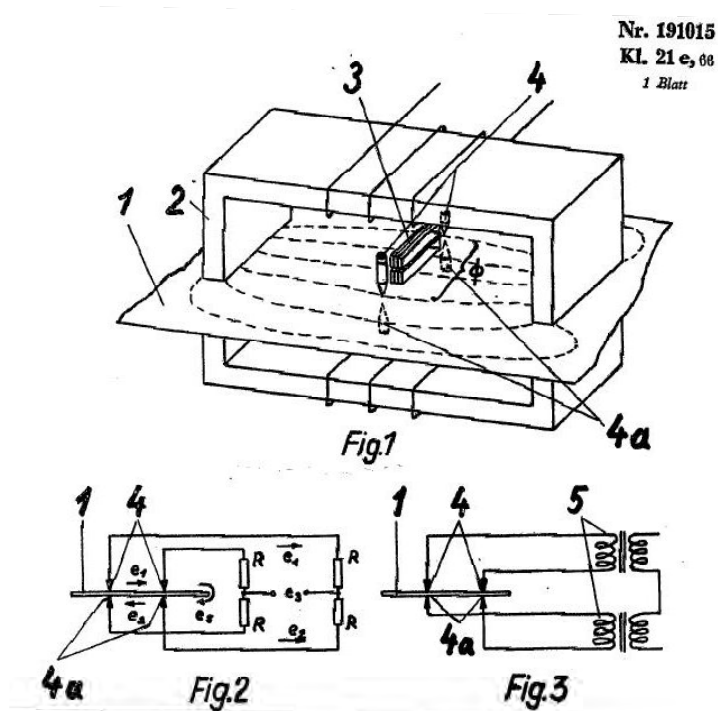
本研究ではこれらの課題を解決し、電磁力応用機器である変圧器やモータの実機を測定することができる極小局所 V-H センサを開発するとともに、測定の設定が容易で測定結果が直感的にわかるベクトル磁気特性可視化装置を開発し、電磁力応用機器の性能向上に必要なベクトル磁気測定技術およびベクトル磁気特性分布測定装置を創出する。



Left: Produced by Dr. J. Sievert in PTB
 Right: Produced by Dr H. Shimoji in Oita University

Fig. 1.2.1 Conventional V-H sensor.

図 1.2.1 従来の V-H センサ



出典 Austrian Patent. 191015, 1957

Fig. 1.2.2 Diagram of the needle probe method.

図 1.2.2 探針法の説明図

第 1.3 節 本研究の目的

前節で述べた研究の社会的意義から明らかなように、極小局所 V-H センサの開発および、磁気特性測定結果が直感的にわかるベクトル磁気特性可視化装置を開発するには以下の項目について詳細な検討が必要である。

- (1) V-H センサの小型化に伴う問題点とは別に、探針法は探針と試料が電氣的に接触する必要がある。しかしながら、測定対象である電磁鋼板を積層して使用する場合には層間の絶縁が必要であるし、方向性電磁鋼板であれば磁気特性を改善する張力を付加した絶縁被膜が施されており、探針を試料の上に置いただけでは安定した電氣的な接触が難しい。そのために、電磁鋼板に絶縁被膜が施されていても安定して測定できる探針の開発を行う。
- (2) V-H センサの小型化に伴い、不明確であった小型化した V-H センサの測定精度を明らかにする必要がある。そのためには V-H センサを構成している磁束密度 B を測定する B 探針と磁界強度 H を測定する H コイルの評価が必要である。従来の研究では探針間隔が 4 mm 程度までの評価の報告[35]はあるが、それ以下の探針間隔とした場合の磁束密度 B の測定精度を明らかにする。また、極小 H コイルのエリアターンを校正するシステムをヘルムホルツコイルにより構築する。
- (3) 磁界強度の測定を H コイル以外の方法で小型化の検討を行い、コイルセンサのひとつとしてロゴスキー・チャトックコイルの試作および評価を行う。
- (4) 極小局所 V-H センサを自動磁気特性分布測定装置と組み合わせ、従来の大きさの V-H センサでは明確にすることが出来なかった磁気特性を明らかにするために、方向性電磁鋼板を使用した変圧器型モデルを製作し、詳細な磁気特性分布を測定することで結晶粒の影響やスクラッチの効果を明らかにする。
- (5) V-H センサを有効な測定ツールとするために、ベクトル磁気特性分布を可視化するベクトル磁気特性可視化装置を構築し、従来測定が困難であった回転中のモータモデルのベクトル磁気特性分布を明らかにする

第 1.4 節 本論文の概要

本論文は以下の 5 章で構成しており。以下にその概要を示す。

第 1 章序論では、本研究の社会的意義、従来の研究の到達点と問題点を明確にし、本研究の目的を示す。

第 2 章では、V-H センサの小型化と、B 探針の絶縁被膜貫通機構の追加および、小型化した際の B 探針の磁束密度の測定精度の評価を行い、H コイルのエリアターンの評価方法および周波数特性について評価を行った。また、H コイル以外の磁界強度測定方法としてロゴスキー・チャトックコイルの検討および試作結果について示す。

第 3 章では、変圧器型モデルの局所磁気特性分布を測定し、絶縁被覆貫通機能の優位性と、方向性電磁鋼板に施されたスクラッチの効果と結晶粒の影響を測定することで極小局所 V-H センサの優位性を示す。

第 4 章では、小型化した V-H センサを有効に使用するために、V-H センサの位置決め装置に高精度ロボットを使用したベクトル磁気特性可視化装置の構築を行い、磁気特性測定システムとしての優位性を示す。

最後に、第 5 章では、本研究の総括を行い、今後の研究課題を挙げる。

第2章 極小局所ベクトル磁気センサによる磁気特性測定方法の確立

第2.1節 緒言

電磁鋼板は1889年に英国のハッドフィールド(Hadfield)が、鉄にケイ素を添加すると電気抵抗が上がり、鉄損を低下させる事を発見した。これを応用した電磁鋼板を用いることにより磁束が鉄心に集中することが可能になった。この電磁鋼板の磁気特性を把握する事が電磁応用機器の開発のために重要で、この磁気特性を評価する技術として二次元ベクトル磁気特性[16]がある。

磁気測定において重要なのは、磁束密度と磁界強度の関係を正確に測定することである。二次元ベクトル磁気特性は、磁束密度と磁界強度をそれぞれベクトル量として扱い、回転磁束下の磁気特性を表現できる。この二次元ベクトル磁気特性の結果から磁気異方性を持つ磁性材料に対して、磁化容易軸方向と異なる方向に励磁した場合や回転磁束条件下では、磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルは同じ方向をとらずに両者の間に位相差が生じる。

二次元ベクトル磁気特性測定に使用する V-H センサは磁束密度を測定する探針法と磁界強度を測定する H コイル法により、磁束密度を測定する探針と磁界強度を測定する H コイルから構成される。電気機器の磁気特性分布を測定する方法として探りコイルを巻線する孔を開けることなく、鉄心の地鉄の2点に電氣的に接触するだけで磁束密度を測定出来る探針法は探りコイル法に比較して多数の箇所を測定する分布測定に優位な方法である。

磁界強度を測定する方法として、H コイル以外に半導体であるホール素子やロゴスキー・チャットクコイル[36]などがあるが、ホール素子が持つ温度特性や素子に電源が必要であることや、実際に入手できるホール素子では X, Y 方向に均等にレイアウトすることが難しい。そのために、我々は、X, Y 方向に均等にレイアウトしやすい H コイル法を基にしたダブル H コイルにより V-H センサの開発を進めている。ダブル H コイルは構造が単純でありコイル巻枠の寸法精度を向上させることで、ダブル H コイルの X, Y 方向の直交度の精度を得やすい利点がある。

小型化するには単純に巻線数を多くすれば良いが、マグネットワイヤ（エナメル線と同じ意味であるが、本論文ではマグネットワイヤと表記した。）の細径化にも限界がありマグネットワイヤの細径化だけによる H コイルの小型化には限界がある。その点、ロゴスキー・チャットクコイルの場合は U 字状にすることで巻線数を多くすることが出来るために、感度を保ちつつ小型に出来る可能性を持つが、形状を U 字状にする方法やコ字状のように分割して製作する場合には巻線部分のジョイント方法など解決すべき項目も多い。

探針法の精度の報告事例[37,38]はあるが、極小の V-H センサとしての測定精度を明らかにする必要がある。

第 2.2 節 ベクトルヒステリシス (V-H) センサ

2.2.1 二次元ベクトル磁気特性

二次元ベクトル磁気特性は、1 周期の磁束密度ベクトル B と磁界強度ベクトル H のベクトル関係を測定し、磁気特性を表す手法である。磁束密度と磁界強度をベクトル表現するため、磁気異方性を持った材料を評価することが出来る。ベクトル磁気特性の関係を図 2.2.1 に示す。 θ_{BH} はベクトルの空間的位相差であり、磁界強度ベクトル H と磁束密度ベクトル B の角度差を示している。

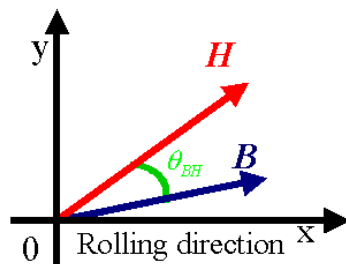


Fig. 2.2.1 Vector relationship between B and H .

図 2.2.1 B と H のベクトル関係

図 2.2.2(a) は交番磁束条件、(b) は回転磁束条件を示す。交番磁束条件は最大磁束密度 B_{\max} と圧延方向（磁化容易軸方向）からの傾き角 θ_B で定義される。回転磁束条件は最大磁束密度 B_{\max} と圧延方向（磁化容易軸方向）からの傾き角 θ_B と軸比 (B_{\min} / B_{\max}) で定義される。交番磁束条件は最小磁束密度 B_{\min} が 0 となるので軸比 $\alpha = 0$ の交番磁束条件と同等である。

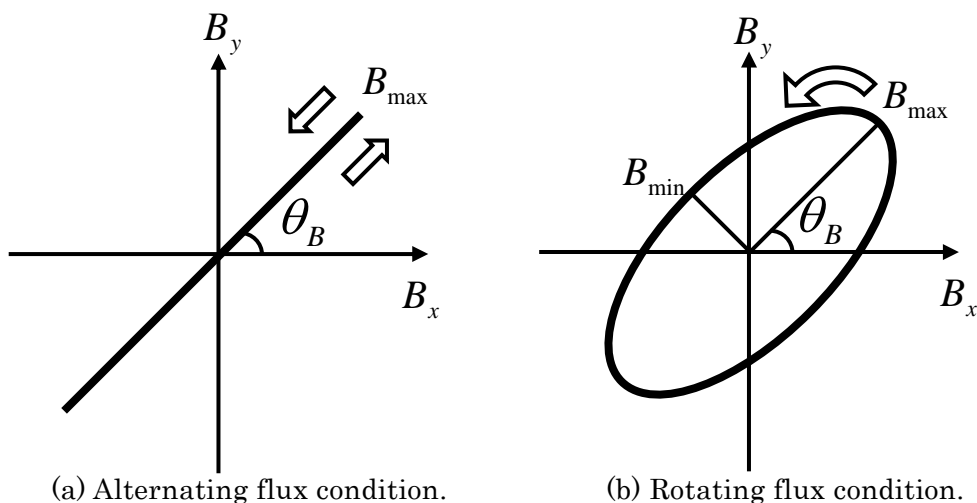


Fig. 2.2.2 Definition of the alternating flux conditions and the rotating flux conditions.

図 2.2.2 交番磁束と回転磁束の定義

2.2.2 V-H センサの構造と測定原理

V-H センサは図 2.2.3 の検出モデルに示すように、探針法と H コイル法を組み合わせたもので、磁束密度 B を測定するための B 探針と磁界強度 H を測定するための H コイルにより構成される。2 方向成分を同時に測定出来るように、X 方向と Y 方向にそれぞれ B 探針と H コイルが配置されている。

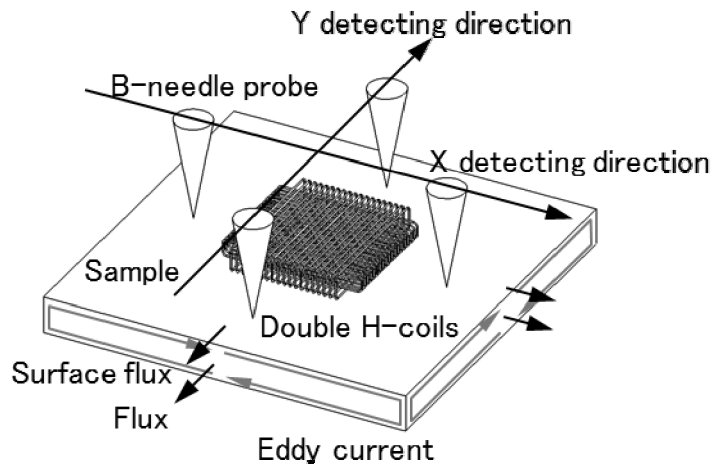


Fig. 2.2.3 Conceptual diagram of the V-H sensor to measure local magnetic flux density vector B and field strength vector H .

図 2.2.3 V-H センサの磁束密度 B と磁界強度 H の検出モデル

二次元ベクトル磁気特性測定では、磁束密度 B および磁界強度 H を直交する二方向を測定し、それぞれをベクトル B , H として扱う。直交する 2 方向（電磁鋼板の圧延方向を X 方向とする場合が多い）で検出する。このようにして得られるベクトル B , H の X, Y 方向成分をそれぞれ B_x , B_y , H_x , H_y とすると二次元鉄損は、X, Y 方向の損失の和となる。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T H \frac{dB}{dt} dt \quad (2.2.1)$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T \left(H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \quad (2.2.2)$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T H_x \frac{dB_x}{dt} dt + \frac{1}{T} \int_0^T H_y \frac{dB_y}{dt} dt \quad (2.2.3)$$

従来の電磁鋼板内部の磁気特性測定手法としては、探りコイル法が一般的であり、局所領域においても磁束密度 B の測定に使用されてきたが、測定試料を変更する毎に、探りコイルを巻線する為の小径な $\phi 0.2 \text{ mm}$ の孔開けと、その孔に外径 $\phi 0.04 \text{ mm}$ のマグネットワイヤを試料に開けた孔のエッジでマグネットワイヤを傷つけて短絡しないように数ターン巻線する必要があり、非常に手間のかかることである。そして、孔の間隔および、 X 方向と Y 方向の角度を正確に管理する必要がある。また、孔を開けた部分の空気領域の増加や孔開けの歪みなどにより特性が変化してしまうことがある。そもそも磁気特性の分布を測定するためには孔開けを測定間隔で行われなければならないし、孔を開けたとしても、電磁鋼板の体積が減ってしまい本来の特性とは異なる。

$V\text{-}H$ センサによる磁気特性の測定は探針を試料表面に電氣的に接触するだけで測定できるため探りコイルを巻線する必要もなく、探針と H コイルがハウジングで一体となっており H コイル、 B 探針の間隔及びそれらの角度が一定になるので測定誤差要因を減らせることもあり測定箇所が多くなる分布測定に適した測定方法である。

第 2.3 節 探針法

2.3.1 探針法の測定原理

探針法は電磁鋼板の磁束変化により発生する渦電流の起電力を 2 本の探針で取り出したもので、その出力は B 探針の間隔で巻線した探りコイルの 1/2 ターンの出力と等価として導き出す方法である。探針法の測定原理モデルを図 2.3.1 に示す。

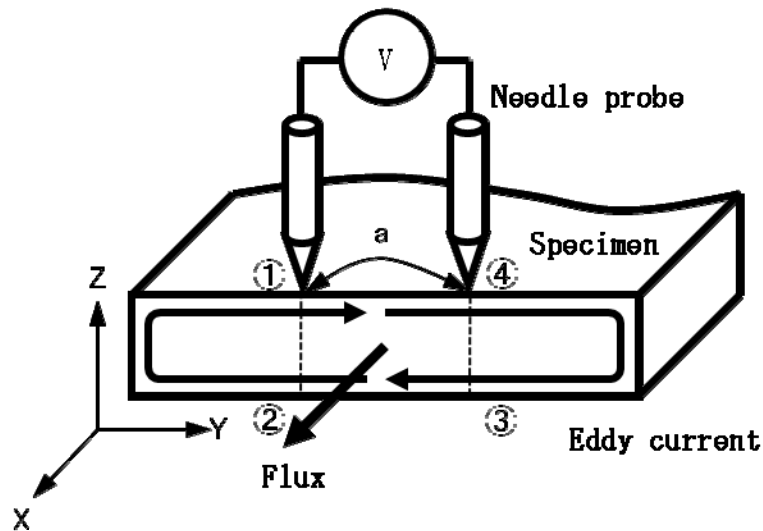


Fig. 2.3.1 Definition of needle probe method.

図 2.3.1 探針法の測定原理モデル

X 軸方向に一様に磁化されているとすると、①-②-③-④-①を 1 ターンの探りコイルと等価とする。ここで、 E は B より誘起される渦電流場である。このとき探りコイルに生じる起電力 e は電界 E の周回積分で与えられるので次の式となる。

$$e = \oint E \cdot dl \quad (2.3.1)$$

$$= \int_{\textcircled{2}}^{\textcircled{1}} E_{(z)} dz + \int_{\textcircled{2}}^{\textcircled{3}} E_{(y)} dy + \int_{\textcircled{3}}^{\textcircled{4}} E_{(z)} dz + \int_{\textcircled{4}}^{\textcircled{1}} E_{(y)} dy \quad (2.3.2)$$

ここで、X 軸方向に一様に磁化されているので、

$$e = 2 \int_1^2 E_{(z)} dz + 2 \int_4^1 E_{(y)} dy \quad (2.3.3)$$

①-②-③-④-①のループにおいて、板厚 d が a に比べて十分に小さい、または磁束 B が Y 方向に一様で Z 方向の起電力 $E_{(z)} = 0$ と仮定すると、

$$e = 2 \int_4^1 E_{(y)} dy \quad (2.3.4)$$

また、ファラデーの電磁誘導の法則から

$$\text{rot}E = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3.5)$$

有効断面積を S 、その外周を C とすると、式の両辺を S 上で面積分すると、左辺はストークスの定理を用いて、

$$\int_S \text{rot}E \cdot dS = \int_C E \cdot dl \quad (2.3.6)$$

$$= \int_{\text{④}}^{\text{①}} E_{(y)} dy \quad (2.3.7)$$

$$= V \quad (2.3.8)$$

右辺は、

$$\int_S \left(-\frac{\partial B}{\partial t} \right) \cdot dS = -S \frac{dB}{dt} \quad (2.3.9)$$

$$\oint_C E \cdot dl = -S \frac{dB}{dt} \quad (2.3.10)$$

(2.3.6), (2.3.9), (2.3.10)式より、

$$2V = -S \frac{dB}{dt} \quad (2.3.11)$$

$$B = -\frac{2}{S} \int V dt \quad (2.3.12)$$

以上の様に、探針によって検出される電圧は 1-2-3-4 領域に巻いた 1 ターンの探りコイルの 1/2 として、磁束密度 B を測定することが出来る。

2.3.2 電磁鋼板の絶縁被膜貫通機能

2.3.2.1 探針と試料の接触安定性

探針による磁束密度の測定は探針法の原理に従い、探針と電磁鋼板の地鉄の間は電氣的に接触させる必要がある。しかしながら、方向性電磁鋼板には以下の理由により強固な絶縁被膜が施されている。方向性電磁鋼板の磁区の細分化による磁気損失の改善は鋼板に張力を付加することによっても起こることが知られており、これは張力付加に伴う材料内部の磁氣的エネルギーの変化によって、磁区の幅が細分化された方が全体のエネルギーが低下するためである。また、方向性電磁鋼板は積層されて磁心材料として使用されるために、電磁鋼板を鉄心に加工する際のプレス加工や焼鈍に耐える電気絶縁性を保持する目的で、鋼板表面にはガラス質の絶縁被膜が施されている。絶縁被膜は、電磁鋼板の表面に約 800 °C で焼き付けられ、処理後までの冷却に際して鋼板と絶縁被膜の熱膨張率の差異に起因した張力が地鉄に付加される [39]。

我々の研究室では、市販の半導体検査装置に使用されるプローブを使用した場合は絶縁被膜を貫通することができないため、探針と地鉄を接触させる方法として電磁鋼板の絶縁被膜を化学的に除去することを選択していた。除去には、9%に薄めたフッ化水素水溶液に30分程浸けると鋼板の結晶粒を確認できるほどになったが、取り出してそのままではフッ化水素の反応が止まらず表面が酸化し錆が生じる。そのために、フッ化水素の中和を目的にフッ化水素水溶液から取り出した後すぐに PH 12.5 の水酸化カルシウム水溶液に1分程度浸ける必要がある。このことにより、探針と試料の接触は可能になるが、多くの工程と危険な作業を必要とする[29]。

他の研究例では、探針の材質をタングステン等の超硬合金を使用し先端を鋭く尖らし、荷重をかけ絶縁被膜を突き刺すことで電氣的な接触を得ている。しかしながら、探針先端の摩耗や、突き刺す時の荷重と測定時の荷重の最適値が異なるために、突き刺す荷重と測定時の荷重を変えるなどの制御が必要となっている[34]。

探針法の測定には、絶縁被膜を取り除かずにできる工夫と、探針の電氣的な接触の不安定性を取り除くことが必要である。このために、我々は半導体検査装置等に使用されているターンプローブを改良した B 探針を製作し、電磁鋼板に絶縁被膜が施されたままの試料においても簡便に測定出来る V-H センサを開発した[40, 41]。

2.3.2.2 探針の絶縁被膜貫通機能

V-H センサを試料である電磁鋼板に押し付けるだけで電磁鋼板の絶縁被膜を貫通する機構として探針のニードル部分にネジ状の機構を設け、そのスリーブのガイドに沿ってニードルが回転するようにしたものである。探針の先端は6角錐になっており、電磁鋼板に押し付けられる過程でニードルが回転し絶縁被膜を貫通する。探針1本の押し付け圧力は0.49 Nである。

開発の当初は市販品の半導体や基板の検査装置に使用される探針の中から、被検査物に付着しているフラックス及び酸化被膜を破壊するためにニードル先端が検査物に接触すると同時に2/3ストロークにて先端部が70°回転するターンプローブをそのまま使用していたが、磁気特性の分布を測定するには、測定箇所が多いため探針の先端が摩耗し貫通しなくなる問題があった。そのために、B探針を測定途中に数回交換して対応していたが、V-Hセンサを壊さないように探針を4本交換しなければならず煩雑であった。これは市販品の探針のニードル部分の材質が工具鋼（SK材）を使用していたために硬度が低く、ニードルの耐摩耗性が不足しているためと判断した。このことから、新たに探針のニードル部分を耐摩耗性に優れて硬度が高く、かつ、非磁性である材質に変更した。ニードル部分の材料はタングステン等の名称で知られている超硬合金を選択した。材料のメーカおよび特性は共立合金製作所、製品型式KN20、硬度HRA 90、抗析力3.2 GPa、比透磁率1.0002である。ニードルには回転させるための「ネジ状の機構」が必要であることと、外径がφ0.52mmと極細であり、また、絶縁被膜の貫通性能を向上させるために先端を6角錐にしている。このことから、超硬合金の材料を今回のニードルに加工するのは大変難しいが、高速で回転する砥石を使用して加工を行う研削加工技術を微細加工に適応した加工メーカーの協力により実現することが出来た。

探針は試料に接触するニードルとスプリングおよびスリーブとからなり、磁気特性測定に影響しないようにすべての材料を非磁性で製作した。図2.3.2のプロープの全景および図2.3.3に探針内部の回転するニードル部分、図2.3.4にニードルの先端構造、図2.3.5に探針の内部構造を示す。

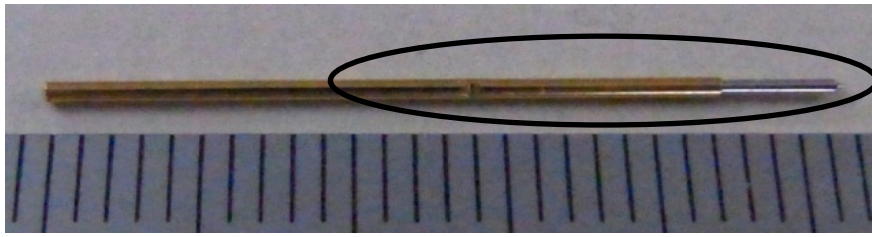


Fig. 2.3.2 Overview of the needle probe.

図 2.3.2 探針の外観

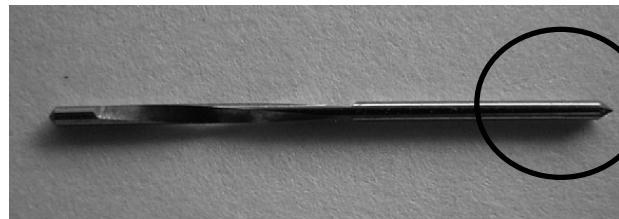


Fig. 2.3.3 Appearance of the needle.

図 2.3.3 ニードル部分の構造

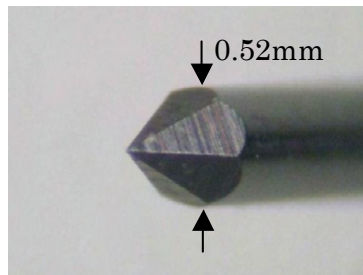


Fig. 2.3.4 Shape at the tip of the needle.

図 2.3.4 ニードルの先端形状

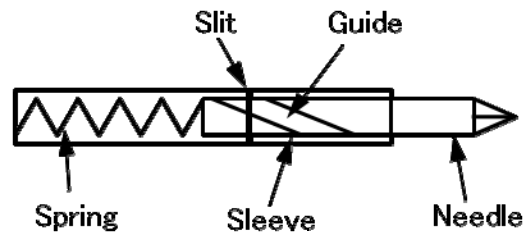


Fig. 2.3.5 Internal structure of the needle.

図 2.3.5 探針の内部構造

2.3.2.3 探針の絶縁被膜貫通性能の評価方法

試作した絶縁被膜貫通型 B 探針の絶縁被膜貫通性能の評価には XYZ ステージと抵抗計をパーソナルコンピュータにより制御した探針寿命評価装置を使用し、探針の押し付け回数と探針と電磁鋼板地鉄との接触抵抗を測定した。使用した探針寿命評価装置を図 2.3.6 に示し、探針と試料のクローズアップを図 2.3.7 と図 2.3.8 に示す。試料は方向性電磁鋼板 (30Z150) を使用した。評価した探針は市販のニードル部分が工具鋼の日本電針のターンプローブ CT-0.72 と試作したニードル部分を超硬合金製にした探針を使用して行った。

試験の際に市販の工具鋼を使用した探針は絶縁被覆の貫通性能が低く 1 度の押し付けでは接触抵抗が安定せず 10 往復後の接触抵抗を測定した。超硬合金製探針も条件を合わせ 10 往復後の接触抵抗を測定した。探針のストロークはフルストロークの 4.5mm で行った。

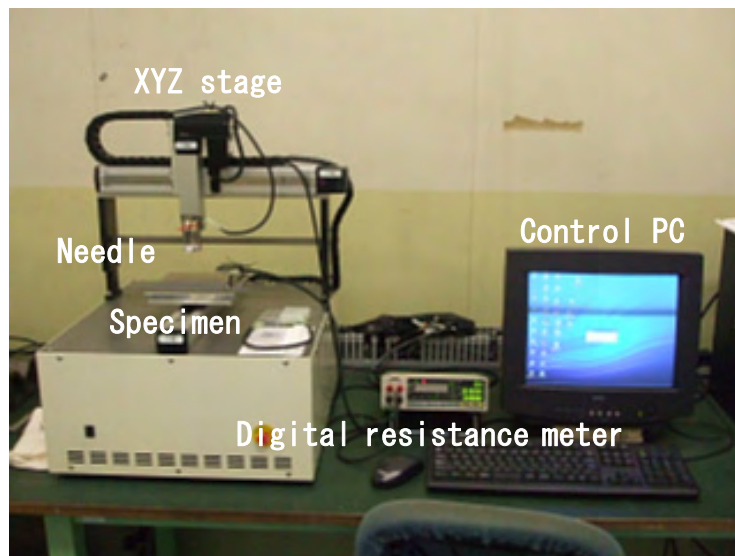


Fig. 2.3.6 Evaluation system of the needle probe life.

図 2.3.6 探針寿命評価装置

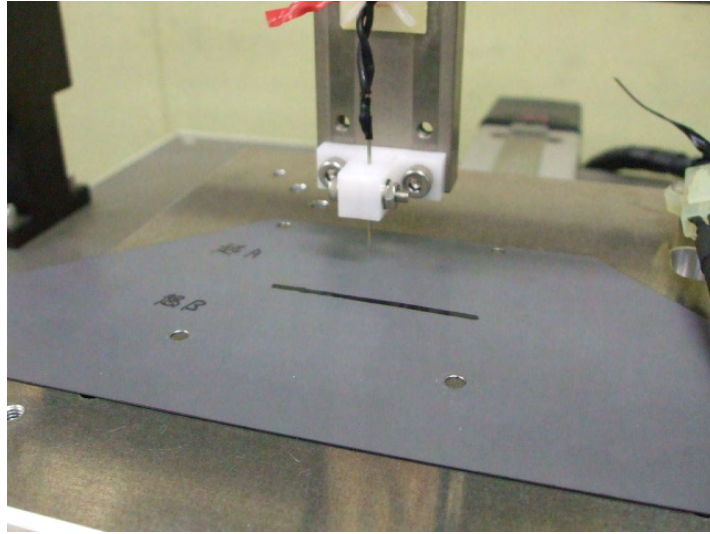


Fig. 2.3.7 Close-up of the needle probe and specimen.

図 2.3.7 探針と試料のクローズアップ

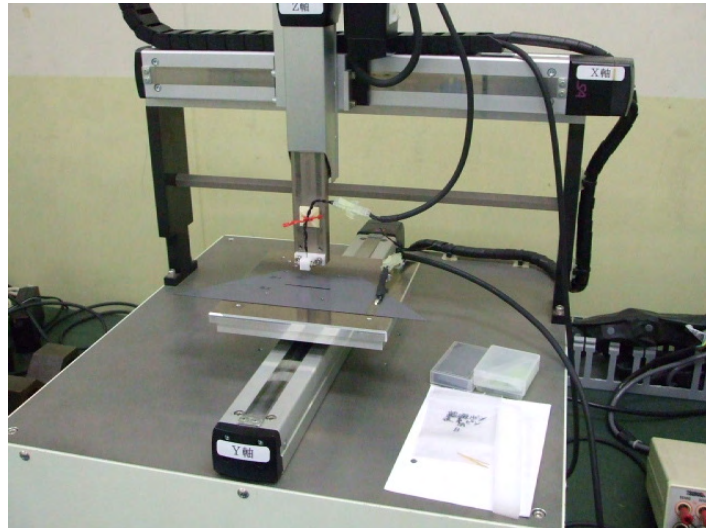


Fig. 2.3.8 Close-up of the XYZ stage.

図 2.3.8 XYZ ステージのクローズアップ

2.3.2.4 探針の絶縁被膜貫通性能の評価結果

測定結果を図 2.3.9 に示す。従来のニードル部分が工具鋼の探針は押し付け回数が 700 回で方向性電磁鋼板の絶縁被膜を貫通できずに接触抵抗がオープンとなったが、ニードル部分が超硬合金製の探針では押し付け回数 25000 回後でも接触抵抗が安定しており、 3.5Ω 以下の接触抵抗を示した。この結果により変圧器モデルなどの磁気特性分布を測定するのに十分な寿命と判断した。絶縁被膜貫通型 B 探針と地鉄との接触抵抗値は探針のニードル部分の材料に超硬合金を使用していることから工具鋼に比べて接触抵抗値が高いが、測定中の最大値が 3.5Ω 以下であり、そして、探針からの信号を増幅するプリアンプの NEC A11201 の入力インピーダンスは $10 \text{ M}\Omega$ であることから 3.5Ω 程度の接触抵抗は無視できるため測定に影響がないと判断した。

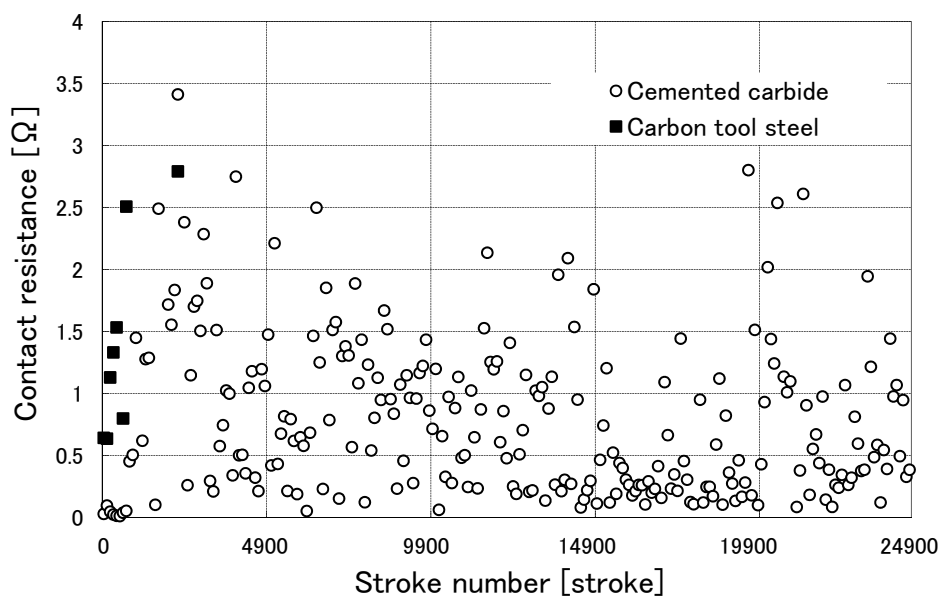


Fig. 2.3.9 Number of measurement and contact resistance.

図 2.3.9 探針の測定回数と接触抵抗

2.3.3 探針法の測定精度の評価

2.3.3.1 二次元ベクトル磁気測定装置による磁束密度測定精度の評価

2.3.3.1.1 探針間隔の可変方法

試作した局所ベクトル磁気センサを使用し、磁気回路モデルを測定するには、試作したセンサの測定精度を明らかにする必要がある。過去の報告事例では特定の探針間隔で測定精度を報告した例はあるが、同一条件で 20 mm から 2 mm までを連続的に評価した事例はない。そのため、B 探針の針間隔を短くして磁束密度測定精度を評価するために、探針の間隔を 20 mm から 2 mm まで 2 mm ピッチで可変できる B 探針治具を製作した。製作した探針間隔を可変できる治具の構造を図 2.3.10 および図 2.3.11 に示す。このことにより、探針間隔を短くした際の問題点や測定結果の連続性を確認できる。

深針で検出すべき鎖交磁束は鉄心内のみの値であり、試料表面の漏れ磁束を拾うと誤差の要因となる。試料表面と探針出力のリード線のループを極力小さくするために測定時のリード線の引き出し位置を試料表面から 1 mm 以下にしてリード線を探針スリーブにハンダ付けした。ハンダ付けは、スリーブ内面にハンダやハンダのフラックスが入らないようにカバーするなど十分に注意する必要がある。接続したリード線はツイストペアを行いプリアンプに接続した。

使用した探針はネジ状の機構を持ったニードルとニードルを保持するスプリングがあるために全長が 22 mm となる。また、探針は交換できるようにスリーブと組み合わせて使用する。探針のニードル部分はスプリングで支えられ測定前はニードルが 4.5 mm 飛び出しており、測定時はスリーブ先端まで押し込まれる。

探針の試料に接触するニードルは方向性電磁鋼板の強固なガラス質の絶縁被膜を貫通するために非磁性の超硬合金で製作し、ニードル、スリーブ及びバネも非磁性材料で製作している。探針を挿入するスリーブアダプタは PEEK (polyetheretherketone) 材で製作している。探針間隔の変更はデルリン材で製作した厚さ 2 mm のスペーサーを重ねることで可変している。そして、探針間隔可変機構全体を PEEK 材で製作したハウジングに組み込み、測定時に探針間隔が変動しないようにしている。

探針間隔可変治具は電磁鋼板の測定位置が変化しないように 80 mm×80 mm 厚みが 10 mm のデルリン材に窓を開け挿入し、探針の荷重はがスリーブに先端まで押し込まれる 0.98 N とした。

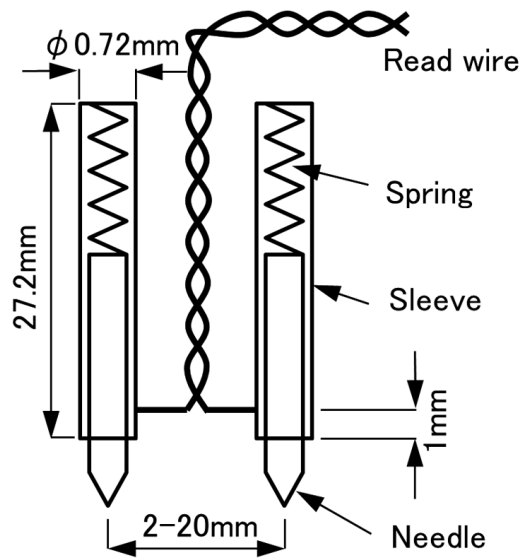


Fig. 2.3.10 Structure of the needle probe for evaluation.

図 2.3.10 磁束密度測定精度評価用探針の構造

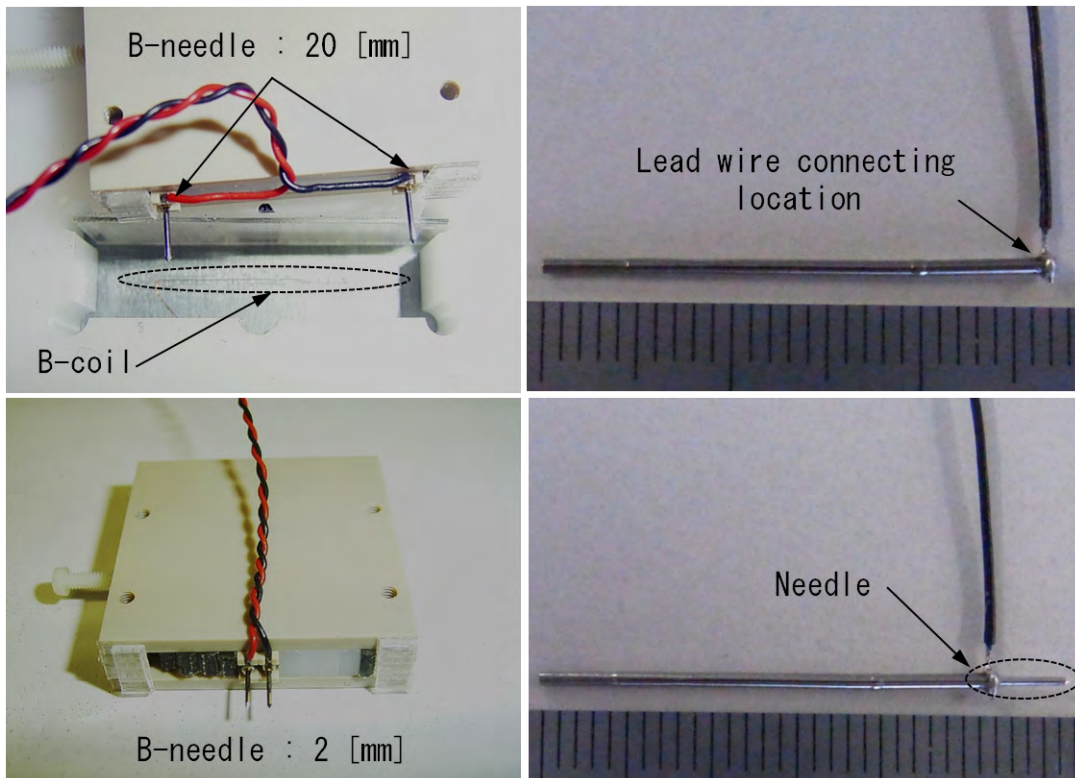


Fig. 2.3.11 Structure of the needle probe with variable gap.

図 2.3.11 間隔可変型探針の構造

2.3.3.1.2 評価方法

試料に均一な磁場を発生させるために、評価には二次元ベクトル磁気測定装置[16]を利用した。試料は 80 mm×80 mm サイズの無方向性電磁鋼板(35H360)を使用した。磁束密度を制御するための探りコイルは試料中央部に 20 mm の間隔で直径 0.3 mm の孔を開け、直径 0.04 mm のマグネットワイヤを 1 ターン巻線している。

図 2.3.12 に二次元ベクトル磁気測定装置の構造を示す。X 方向と Y 方向に励磁用継鉄を対向して配置し、試料内に磁束を集中させるために磁極用継鉄の先端を図のように、磁界解析から得られた最適角度である 45 度に加工し縦方向に積層した構造を有している。また、試料内の磁束を制御しやすくするため試料と励磁継鉄の間に 0.1 mm のシートをはさんでエアギャップを作っている。励磁コイルは対向して配置した励磁継鉄にそれぞれ巻線している。H コイルは試料近傍に配置され、試料を装置中央のステージに設置している。PC と各測定機器を組み合わせ、波形制御、波形処理をすべてソフトウェアで行っている。磁束密度が正弦波になるように磁束成分のフィードバックにより印加電圧を制御している。

二次元ベクトル磁気測定装置は X 方向と Y 方向に励磁ヨークを備えているが、本評価では Y 方向のみに 50 Hz の正弦波交番磁束条件で励磁し、歪み率および振幅率ともに 0.5 %以下になるよう制御した。磁束密度測定ではノイズの影響を極力避けるために 64 回の測定を行い平均化した。磁束密度は 0.2 T から 1.6 T まで 0.1 T 間隔で変化させた。探針の間隔は前述の通り 2 mm から 20 mm まで 2 mm ピッチで測定した。探針の押し付け圧力は 0.98 N とした。探針からの出力は増幅率 2000 倍のプリアンプを通して A/D コンバータに接続しパソコンに取り込み、制御用探りコイルの最大磁束密度を基準として、式(2.3.13)によりそれぞれの探針間隔で最大磁束密度の相対誤差を求めた。

$$Relative\ error\ [\%] = \frac{B_{coil}[T] - B_{needle}[T]}{B_{coil}[T]} \times 100 \quad (2.3.13)$$

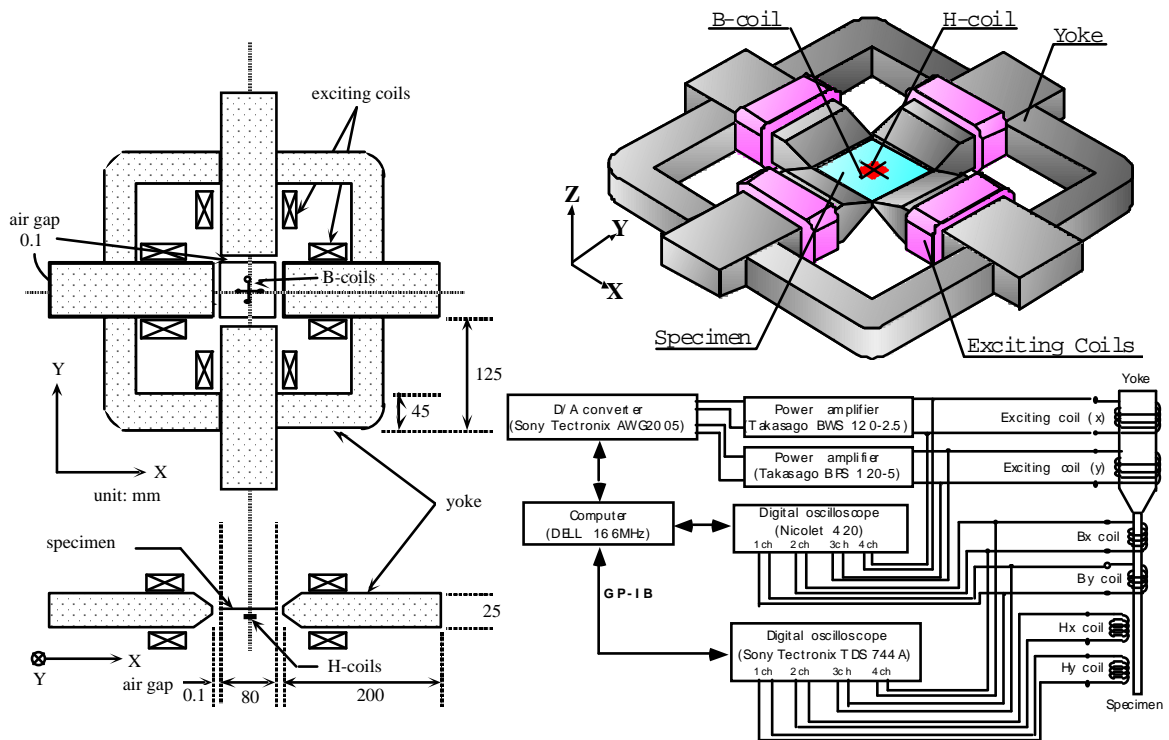


Fig. 2.3.12 Two-dimensional magnetic measurement apparatus

図 2.3.12 二次元ベクトル磁気測定装置励磁機構寸法.

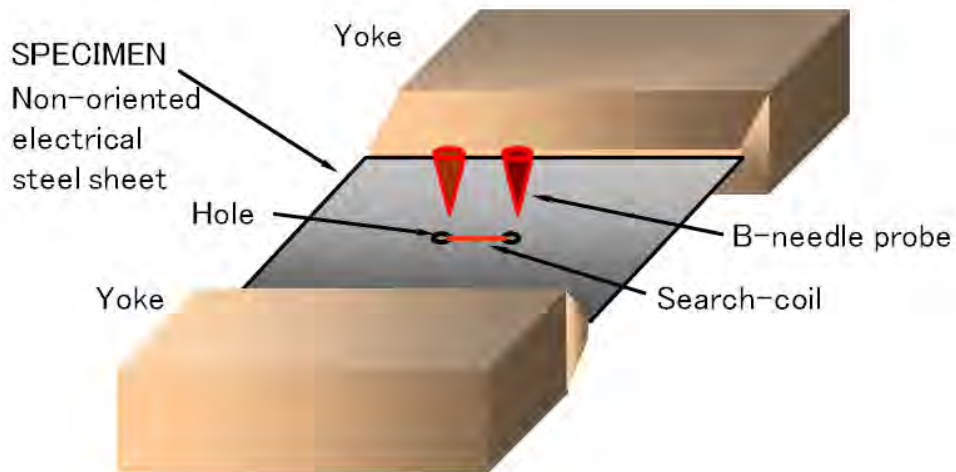


Fig. 2.3.13 Position of the search coil and the needle probe.

図 2.3.13 探りコイルと探針の位置概略図

2.3.3.1.3 評価結果

20 mm 間隔で巻線した探りコイルの磁束密度を基準として B 探針の間隔に対する磁束密度の相対誤差を図 2.3.14 に示す。

測定結果として探針間隔が 20 mm の相対誤差が最大で 0.5 T の時に 3.8 % であり他の探針間隔の場合と比較して最も相対誤差が小さい。これは、20 mm の探りコイルを 80 mm×80 mm の試料の中央に巻線し磁束密度を制御しているため測定領域が近いためと思われる。これに続いて探針間隔が 12 mm, 14 mm, 18 mm の時の相対誤差は小さいことがわかる。探針間隔が短いと誤差は増大するが、全ての探針間隔で 9 % 以下の相対誤差であることがわかる。探針間隔が 2 mm の場合を省いて、磁束密度が 0.4 T から 0.6 T の間で相対誤差が大きくなる傾向にある。探針間隔が 2 mm の場合は 0.5 T の時に相対誤差が小さくなり、他の探針間隔の傾向と異なり相対誤差の変動が大きくなった。これは、探針間隔が小さくなり、出力信号が低下し S/N 比が低下したためと思われる。探針間隔が 2 mm の時の探針からの出力電圧は mV オーダーである。

以上により、二次元ベクトル磁気測定装置で測定した場合に探針間隔が 2 mm と短い場合において信号出力レベルの小ささから S/N 比が低下することの対策と、探針の接触安定性を向上させることは必要であるが、探針間隔が 2 mm の場合でも磁束密度の測定の精度が相対誤差で 9 % 以下であることが確認できた。また、探りコイルを 20 mm 間隔で巻線し基準としたことで探針間隔が 20 mm 以外の場合は測定領域が異なり厳密には探りコイルと探針との測定誤差の違いを測定した訳ではないが、探針間隔の違いによる差は小さいと言える。

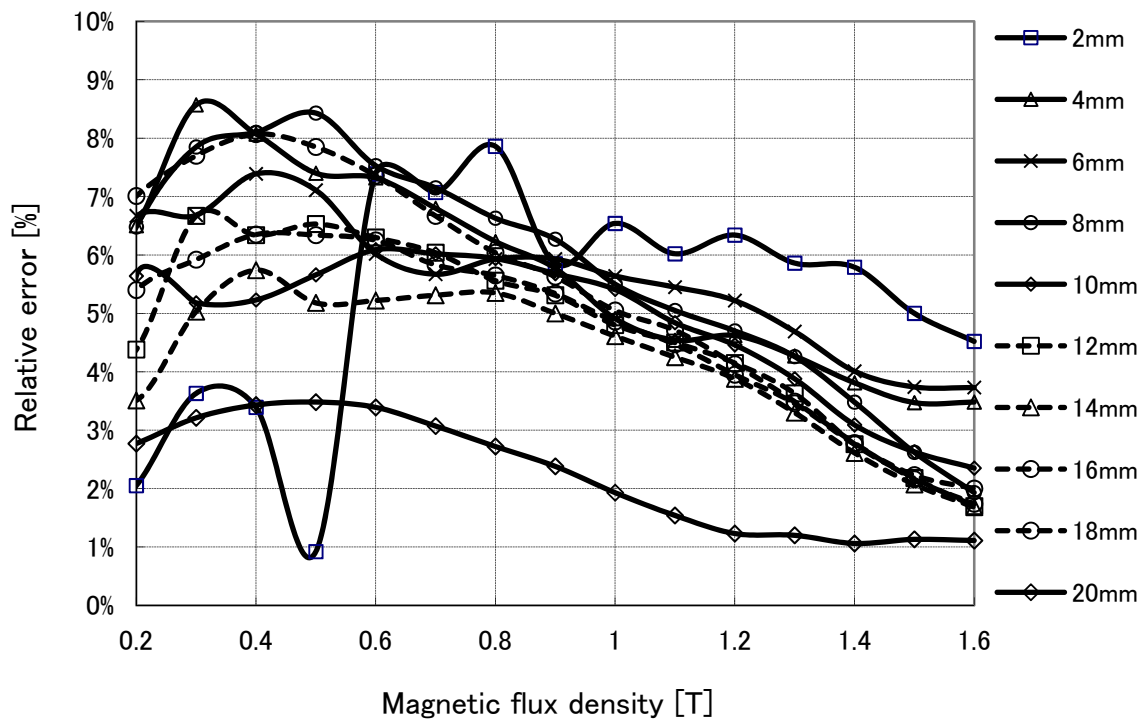


Fig. 2.3.14 Magnetic flux density accuracy of the needle probe distance and the search coil.

図 2.3.14 探針間隔と磁束密度測定精度

2.3.3.2 ソレノイドコイルを使用した磁束密度精度の評価

2.3.3.2.1 ソレノイドコイルを使用した評価回路

探針法による磁束密度測定精度の評価において、探針間隔の影響について詳細な評価を行うためにソレノイドコイルによる標準磁界発生装置を使用して評価を行った。

磁束密度測定精度評価を行うために、図 2.3.15 に示す標準磁界発生装置を使用した。ソレノイドコイルは全長 2100 mm、内径 110 mm である。電源の性能とソレノイドコイルのインピーダンスマッチングにより、50 Hz 励磁時に最大 21 A の電流を印加することができる。この時のソレノイドコイル中心部の磁界強度は 5300 A/m となる。

試料は幅 30 mm の短冊状の電磁鋼板を使用した。試料は図 2.3.16, 図 2.3.17 および図 2.3.18 に示す探針位置決め治具を使用し、ソレノイドコイル中央に設置した。試料の励磁はソレノイドコイルに 50 Hz の正弦波励磁電流を印加することで試料を励磁している。正弦波電流は 0.02 App から 10 App までとした。試料の磁束密度の測定は電磁鋼板の試料の長手中央部に 3 ターン巻線した探りコイルにより行った。探針は試料の中央とし探りコイルの近傍に設置した。探りコイルの出力には 10 倍、探針の出力には 100 倍のプリアンプ（岩通計測 IE-973C）を經由して A/D コンバータに入力している。ノイズ処理として 64 回の平均化処理を行っている。探りコイルと探針の出力を PC 内で数値積分を行っている。磁束密度波形は歪んでいるため実効値とし、式(2.3.14)により相対誤差を求めた。

探針間隔の間隔を変更する治具は、前述の 2.3.3.1.1 二次元ベクトル磁気測定装置による磁束密度測定精度の評価で使用した探針間隔を 2 mm から 20 mm までを 2 mm 間隔で測定できる治具を使用した。B 探針は外径が 0.72 mm で先端形状が六角錐のニードルプローブである。ニードルプローブにはスプリングが内蔵されており探針の先端を支えている。探針からの引き出し線は試料面から 1 mm 以下になるように配線した。探針の押し付けは探針間隔可変治具とブラケットの間に適度の厚みのスポンジを挿入し調整した。

$$Relative\ error\ [\%] = \frac{B_{coil}[T] - B_{needle}[T]}{B_{coil}[T]} \times 100 \quad (2.3.14)$$

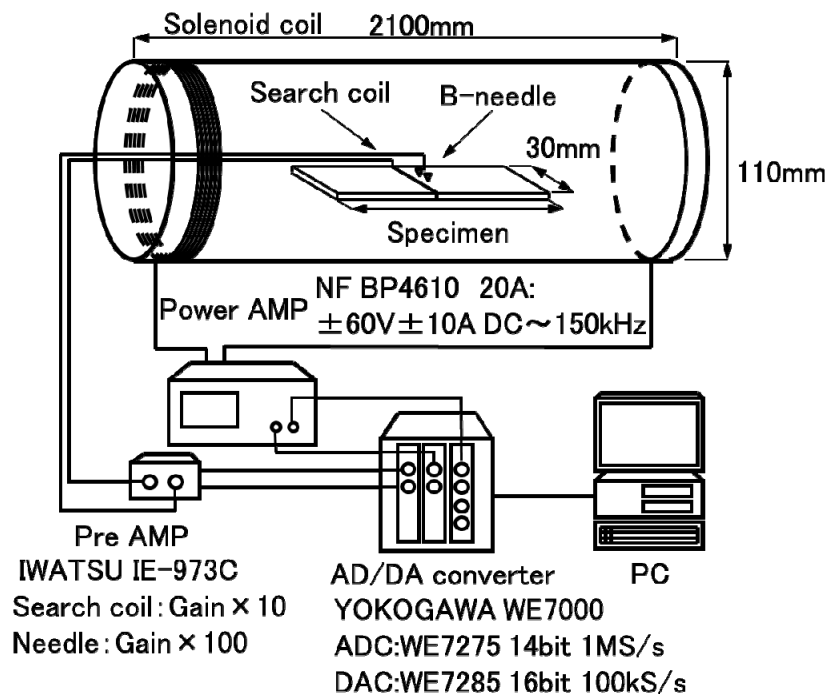


Fig. 2.3.15 Magnetic flux density evaluation system.

図 2.3.15 B 探針磁束密度評価装置構成

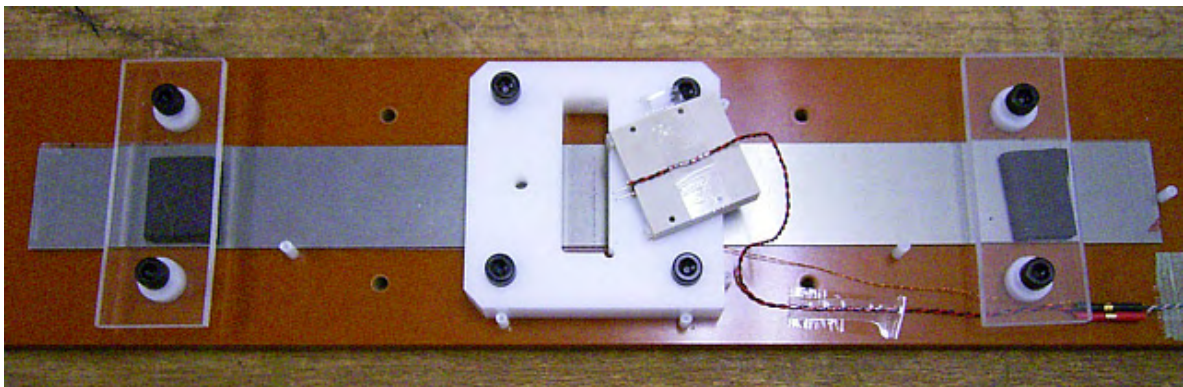


Fig. 2.3.16 Position of needle probe and specimen.

図 2.3.16 探針と電磁鋼板の位置関係

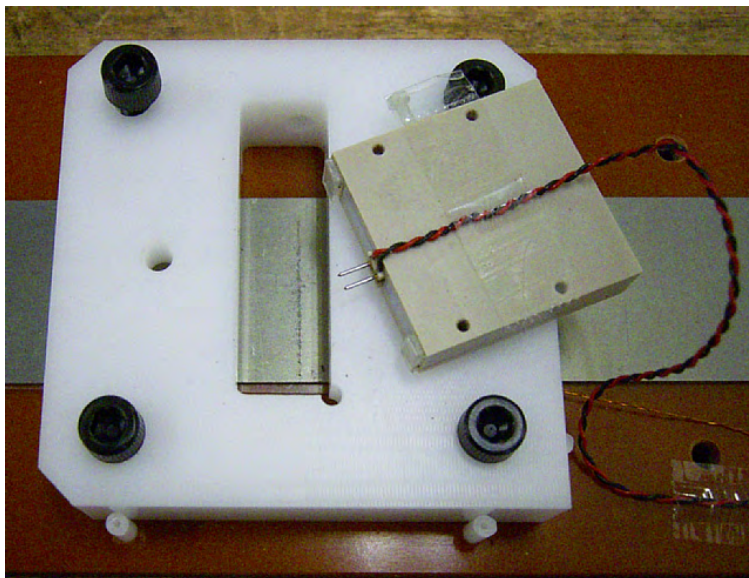


Fig. 2.3.17 Position of needle probe and specimen.

図 2.3.17 探針と電磁鋼板の位置関係

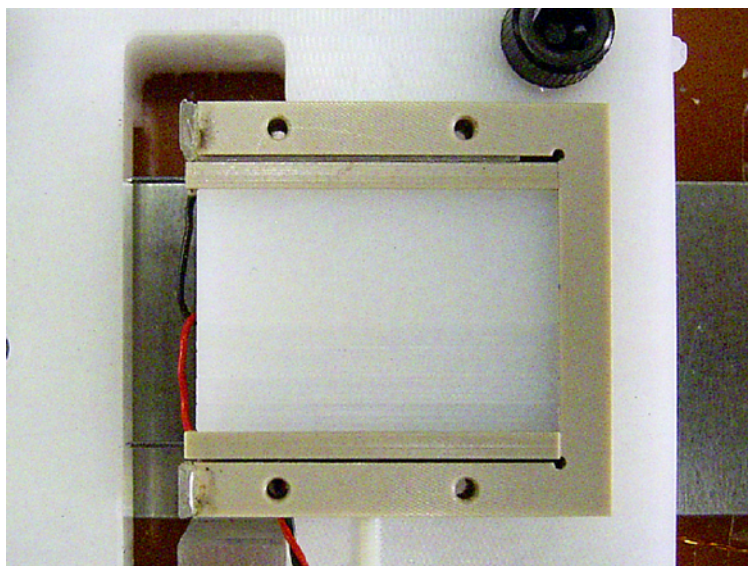


Fig. 2.3.18 Internal structure of needle probe and specimen.

図 2.3.18 探針治具の内部構造

2.3.3.2.2 評価試料

測定は試料の違いによる差を見るために各種用意した。無方向性電磁鋼板は切り出し方向の違い、試料厚みの違いを含めて8種類、方向性電磁鋼板は2種類と、Niの試料である。試料一覧表を表2.3.1に示す。試料と探りコイルの位置を図2.3.19に示す。

表 2.3.1 測定試料一覧表

Table2.3.1 Table of specimen.

Specimen No.	Type	Thickness [mm]	Size [mm]	Core Loss [w/kg]	Cutting direction	Grade
a-L	NO	0.35	H30×W250	4.4	L	35A440L
a-C					C	35A440C
b-L	NO	0.50	H30×W305	13	L	50A1300L
b-C					C	50A1300C
c-L	NO	0.35	H30×W250	2.5	L	35A250L
c-C					C	35A250C
d-L	NO	0.35	H30×W250	2.3	L	35A230L
d-C					C	35A230C
e	GO	0.35	H30×W305	1.75	L	35G175
f	GO	0.27	H30×W320	0.90	L	27P90
g	Ni 99.9%	0.50	H30×W300	-	-	-

L : specimens taken longitudinal to the rollong direction.

C : specimens taken transverse to the rollong direction.

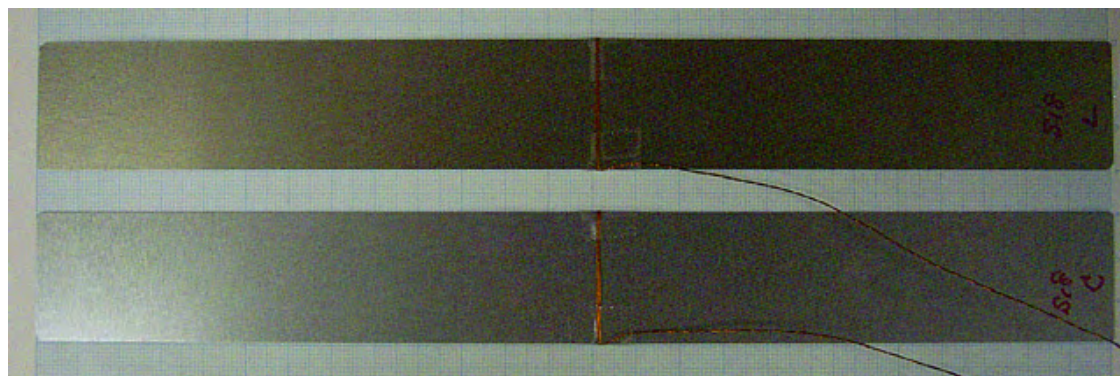


Fig. 2.3.19 Position of search coil and specimen.

図 2.3.19 探りコイルと電磁鋼板の位置関係

2.3.3.2.3 評価結果

探針間隔を 20 mm から 2 mm まで 2 mm 間隔で可変できる B 探針治具を用いてソレノイドコイルの励磁電流を 0.02 App から 10 App まで印加させることで磁束密度を可変し、30 mm 幅で巻線した探りコイルの磁束密度を基準として B 探針の間隔に対する磁束密度の相対誤差を求めた。磁束密度波形は歪んでいるため実効値とした。

図 2.3.20 に示す探針間隔が 10 mm で磁束密度が 1.0 T の際の各試料の厚みと相対誤差より、試料の厚みが 0.27 mm, 0.35 mm, 0.50 mm と変化しても試料の厚みに対する相対誤差に関連性は見られず、探針法による磁束密度の測定は試料の厚みに影響を受けないと考えられる。また、図 2.3.21 に各試料における探針間隔が 10 mm の探りコイルと探針の相対誤差よりからも、試料厚みの関係性は見られないことがわかる。

各試料の特性について述べると、全体的な傾向としては、試料および試料の切り出し方向によって磁束密度の相対誤差が異なるが、探針間隔が 10 mm 以下の場合に探りコイルと B 探針の相対誤差は±5 %程度であることがわかる。特徴的なことは、試料 No.c-L および No.d-L の試料の切り出し方向が圧延直角方向では、相対誤差は探針間隔が広い方がマイナス側に悪くなっている。

図 2.3.22 に示す無方向性電磁鋼板を圧延方向に切り出した試料 No.a-L では 0.3 T 付近で-8 %のピークを持ち、探針間隔の違いによる探針間隔が短くなるにつれて相対誤差が減少していることがわかる。図 2.3.23 に示す同じ試料を圧延直角方向に切り出した試料 No.a-C では 0.2 T 付近で-8 %のピークを持つが、探針間隔の違いによる差は少ないことがわかる。

図 2.3.24 に示す無方向性電磁鋼板を圧延方向に切り出した試料 No.b-L では、0.2 T 付近に-6 %の相対誤差が見られる。図 2.3.25 に示す圧延直角方向の試料と共に探針間隔が 2 mm の時に相対誤差が大きいことがわかる。

図 2.3.26 に示す無方向性電磁鋼板を圧延方向に切り出した試料 No.c-L では探針間隔の違いに関係なく低磁束密度領域で-8 %程度の誤差となり、高磁束密度領域で相対誤差が少なくなることがわかる。図 2.3.27 に示す試料 No.c-C の圧延直角方向の試料では探針間隔が広いほど相対誤差が大きいことがわかる。

図 2.3.28 及び図 2.3.29 に示す無方向性電磁鋼板を切り出した試料 No.d-L と No.d-C の相対誤差特性は前述の試料 No.c-L 及び No.c-C と同様な傾向を示すことがわかる。

図 2.3.30 に示す方向性電磁鋼板を圧延方向に切り出した試料 No.e の相対誤差は探針間隔が 4 mm 及び 2 mm の場合に他の探針間隔と異なり、1 T 以下の領域で相対誤差の変動が大きくなっていることがわかる。試料表面には絶縁被膜があり直接見ることはできないが結晶粒の影響を受けている可能性がある。

図 2.3.31 に示す方向性電磁鋼板を圧延方向に切り出した試料 No.f の相対誤差は 1.2 T 以下で相対誤差がマイナスになる傾向があるが、探針間隔の違いに大きな差は見られないことがわかる。

図 2.3.32 に示す Ni 純度 99.9 % の厚み 0.5 mm の試料は透磁率低いことから磁束密度が 0.31 T までとなった。探針間隔によらず相対誤差は同様な傾向となっていることがわかる。探針間隔が 2 mm の場合が他の間隔と比べ差が見られるが探針からの出力電圧が小さく誤差が大きくなったと思われる。

図 2.3.33 に示す試料 b-L の探針間隔毎の磁束密度波形 ($B_a=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.6$ T) から探針間隔が狭い 2 mm, 4 mm の場合に磁束密度波形が上下が非対称になっていることがわかる。これは図 2.3.34 に示す試料 b-L の探針間隔毎の探針からの電圧波形 ($B_a=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.6$ T) からわかるように探針間隔が短いことにより出力電圧が低下しノイズの影響を受けていると思われる。

探針法は探針間隔と試料の厚みの影響を受けるが[32],これらの測定結果から, B 探針の間隔を 2 mm まで狭くしても間隔が 20 mm の場合と同じ傾向の相対誤差を示すことから, 0.27 mm から 0.5 mm 程度の板厚の影響はないと考えられる。相対誤差が大きくなる原因は低磁束密度での信号の減少によるノイズの増加, リード線に鎖交する漏れ磁束の影響, 磁化過程の違いなどが考えられる。

磁束密度が低い領域での絶対値には誤差があるものの相対的な分布評価は可能と考えられる。また, 今回の分布測定においては, 探りコイルの巻線が実質的に不可能な 2 mm×2 mm の局所領域を測定できる優位性がある。

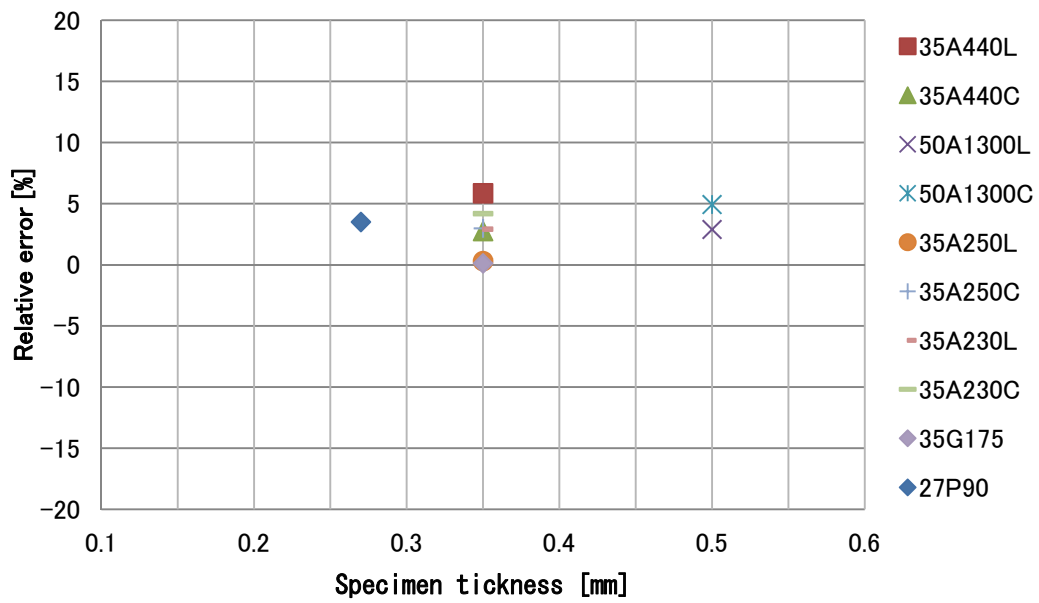


Fig. 2.3.20 Relative error of the specimen thickness and the search coil.

図 2.3.20 試料厚みと相対誤差 (探針間隔 10 mm)

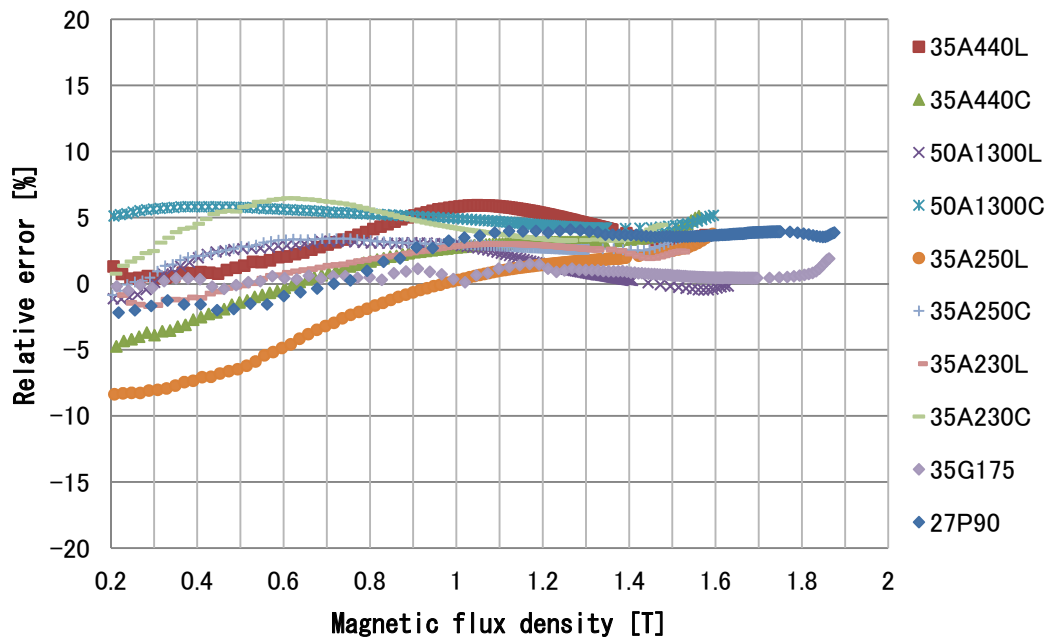


Fig. 2.3.21 Relative error of the needle probe distance at 10 mm.

図 2.3.21 探針間隔 10mm の磁束密度の相対誤差

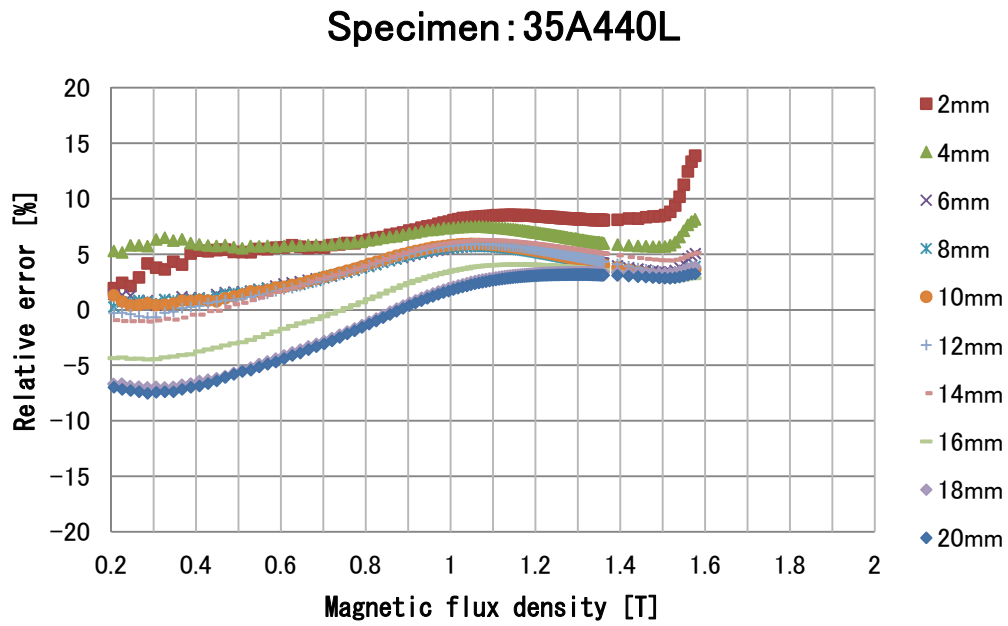


Fig. 2.3.22 Relative error of the needle probe distance and the search coil.

図 2.3.22 磁束密度の探針間隔と相対誤差 35A440L

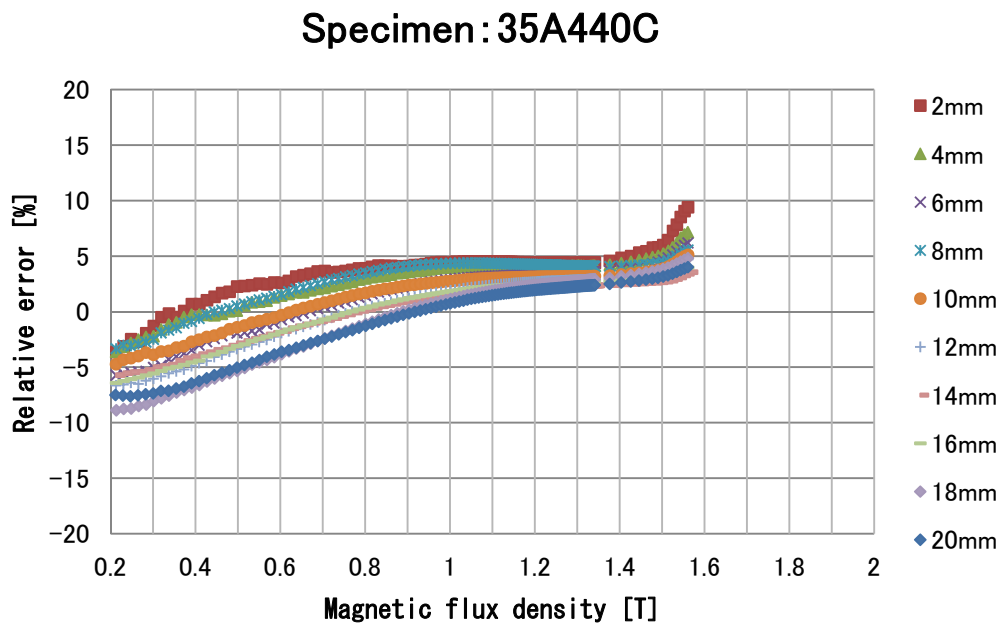


Fig. 2.3.23 Relative error of the needle probe distance and the search coil.

図 2.3.23 磁束密度の探針間隔と相対誤差 35A440C

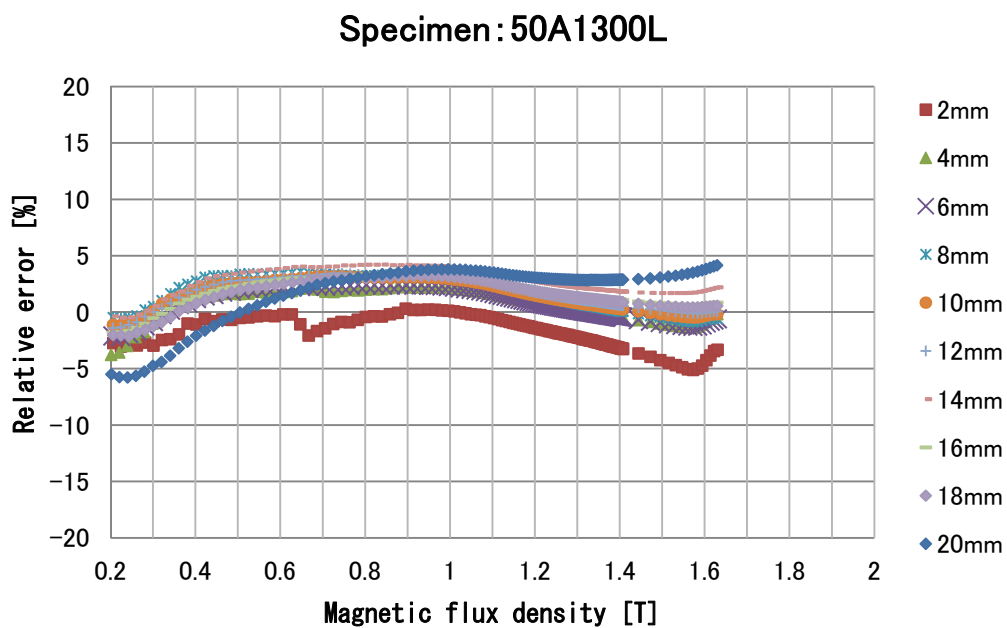


Fig. 2.3.24 Relative error of the needle probe distance and the search coil.
 図 2.3.24 磁束密度の探針間隔と相対誤差 50A1300L

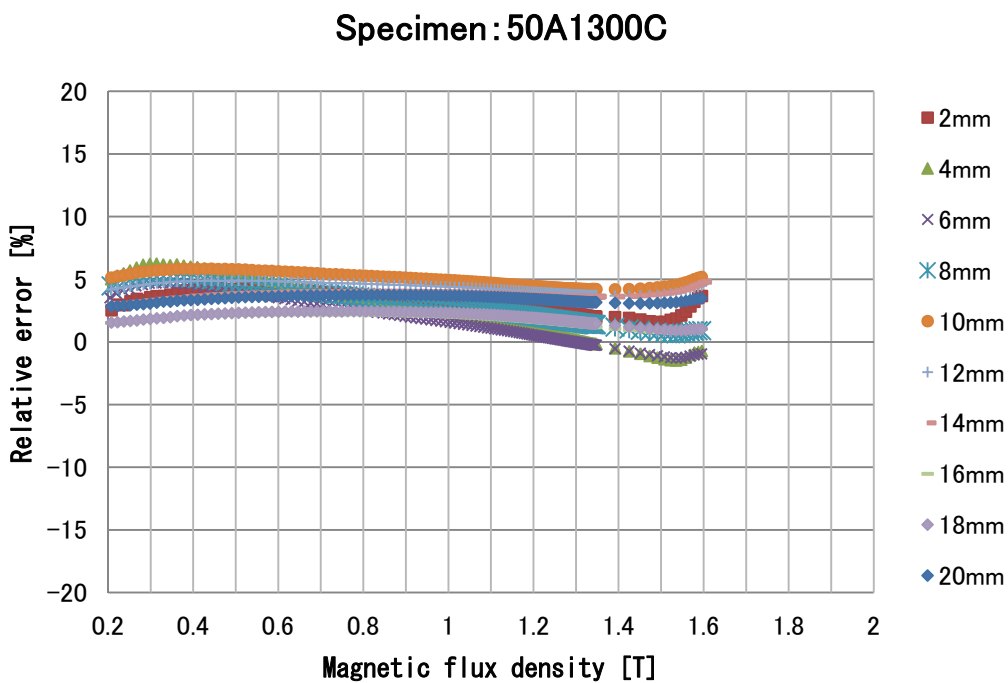


Fig. 2.3.25 Relative error of the needle probe distance and the search coil.
 図 2.3.25 磁束密度の探針間隔と相対誤差 50A1300C

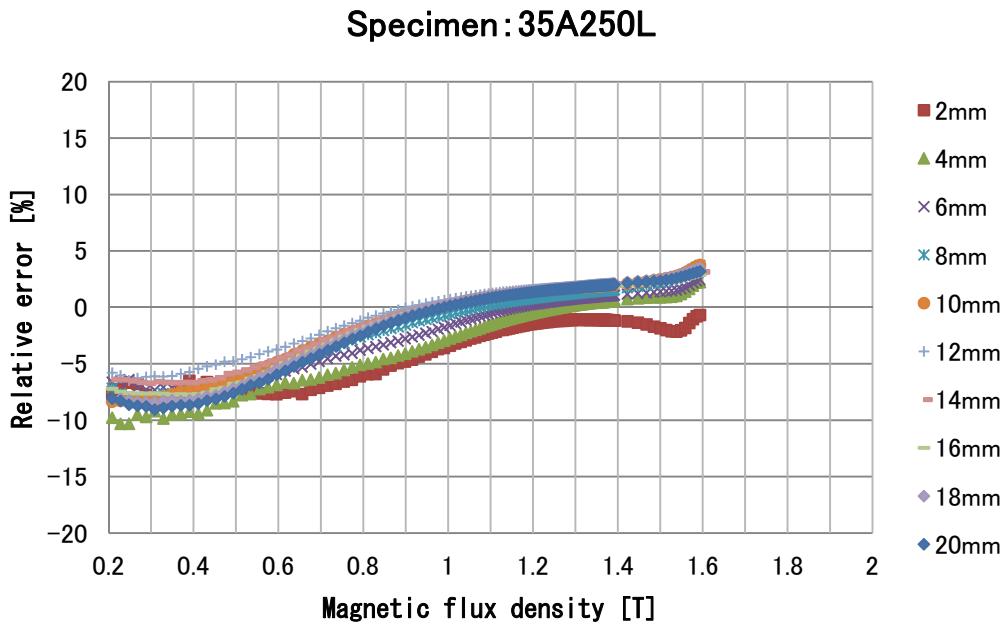


Fig. 2.3.26 Relative error of the needle probe distance and the search coil.

図 2.3.26 磁束密度の探針間隔と相対誤差 35A250L

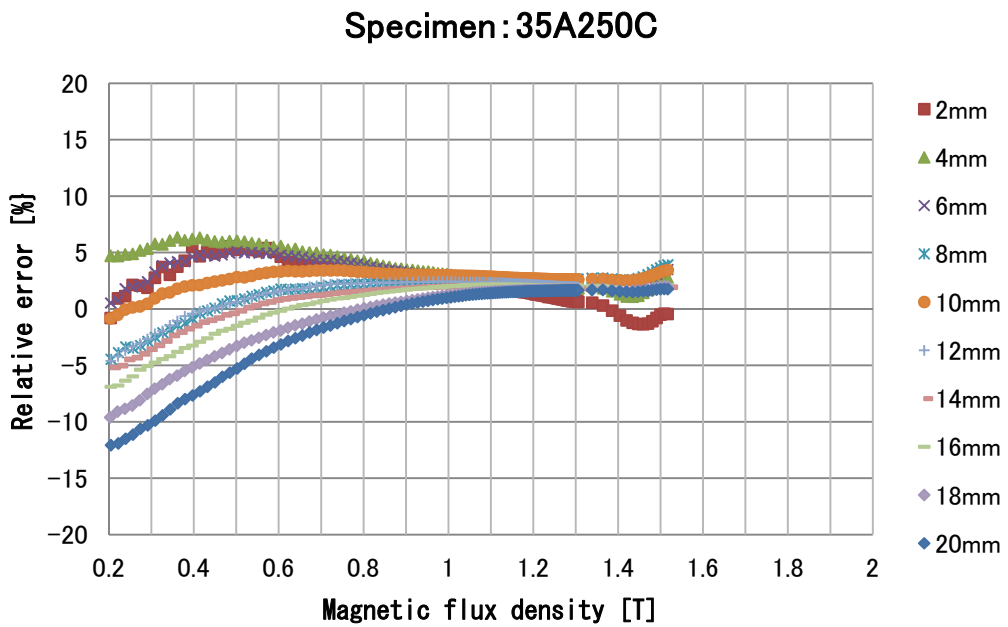


Fig. 2.3.27 Relative error of the needle probe distance and the search coil.

図 2.3.27 磁束密度の探針間隔と相対誤差 35A250C

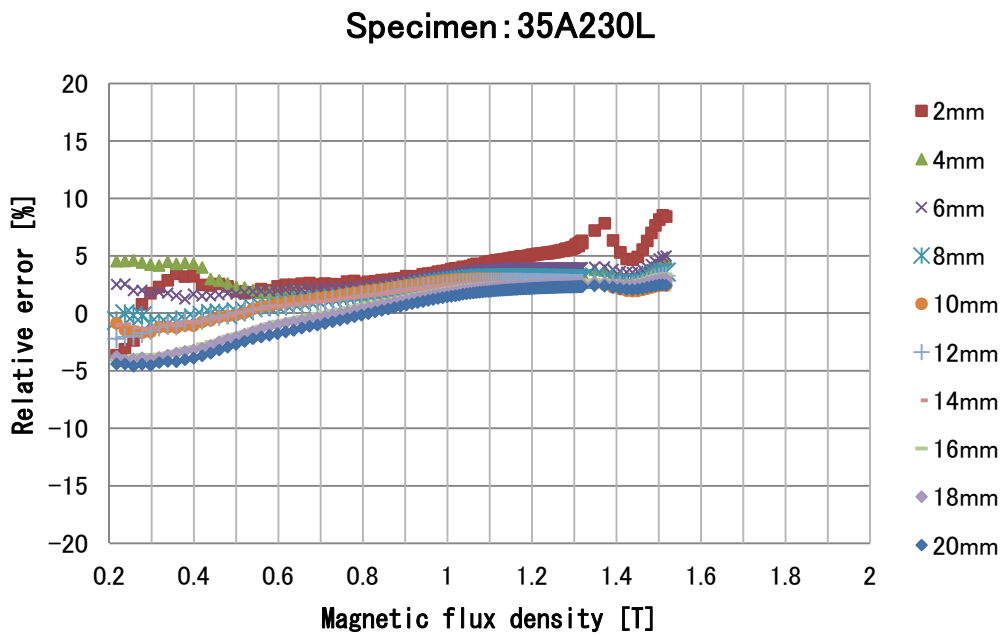


Fig. 2.3.28 Relative error of the needle probe distance and the search coil.

図 2.3.28 磁束密度の探針間隔と相対誤差 35A230L

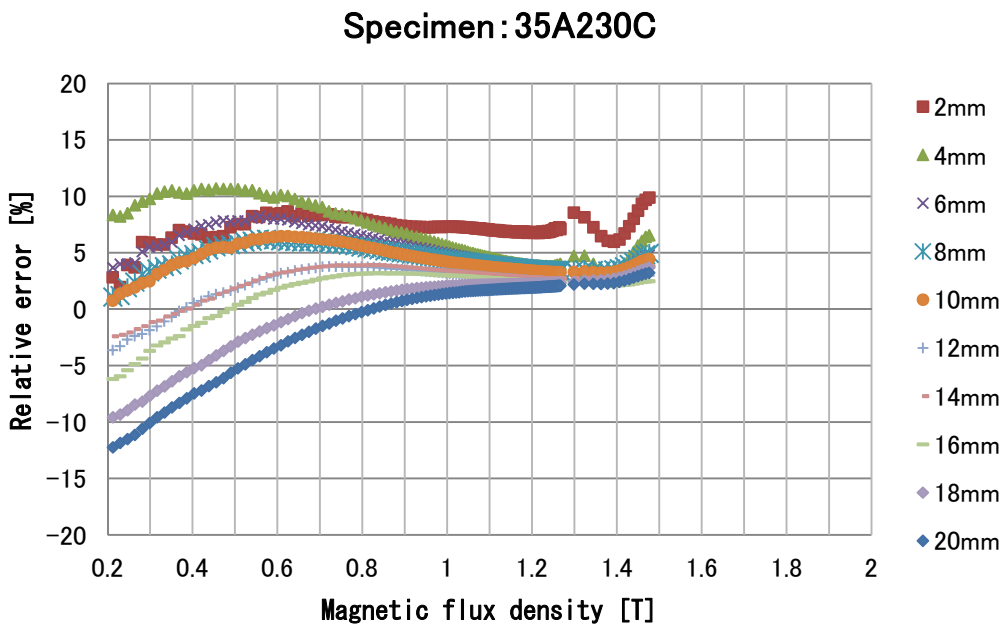


Fig. 2.3.29 Relative error of the needle probe distance and the search coil.

図 2.3.29 磁束密度の探針間隔と相対誤差 35A230C

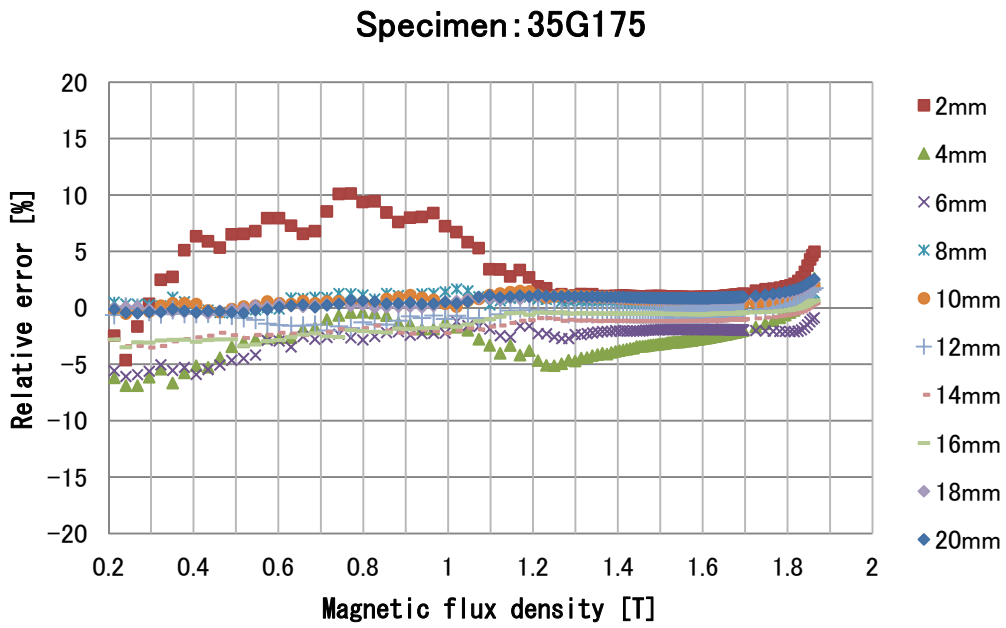


Fig. 2.3.30 Relative error of the needle probe distance and the search coil.

図 2.3.30 磁束密度の探針間隔と相対誤差 35G175

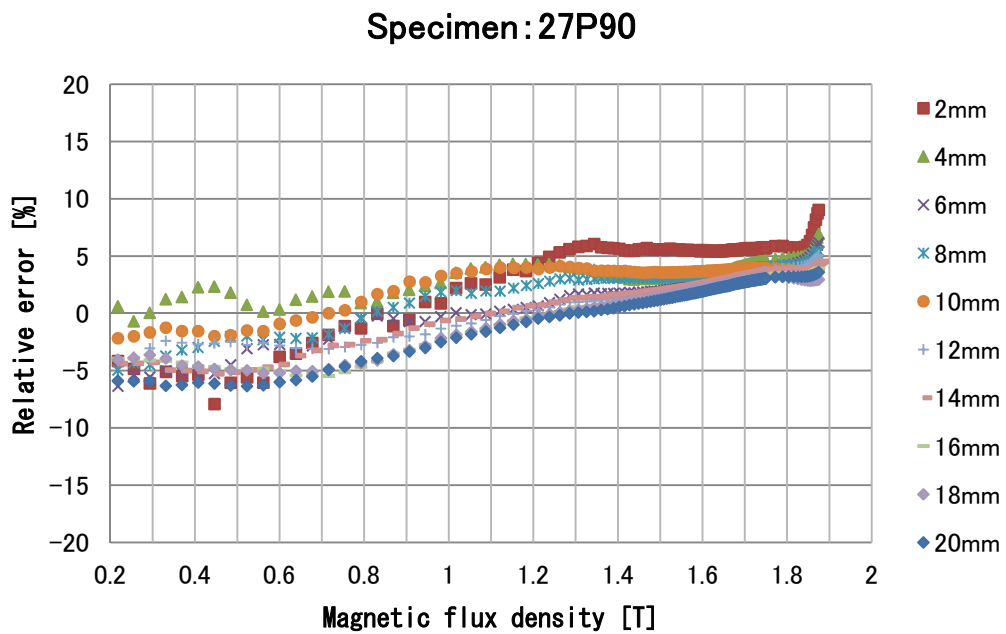


Fig. 2.3.31 Relative error of the needle probe distance and the search coil.

図 2.3.31 磁束密度の探針間隔と相対誤差 27P90

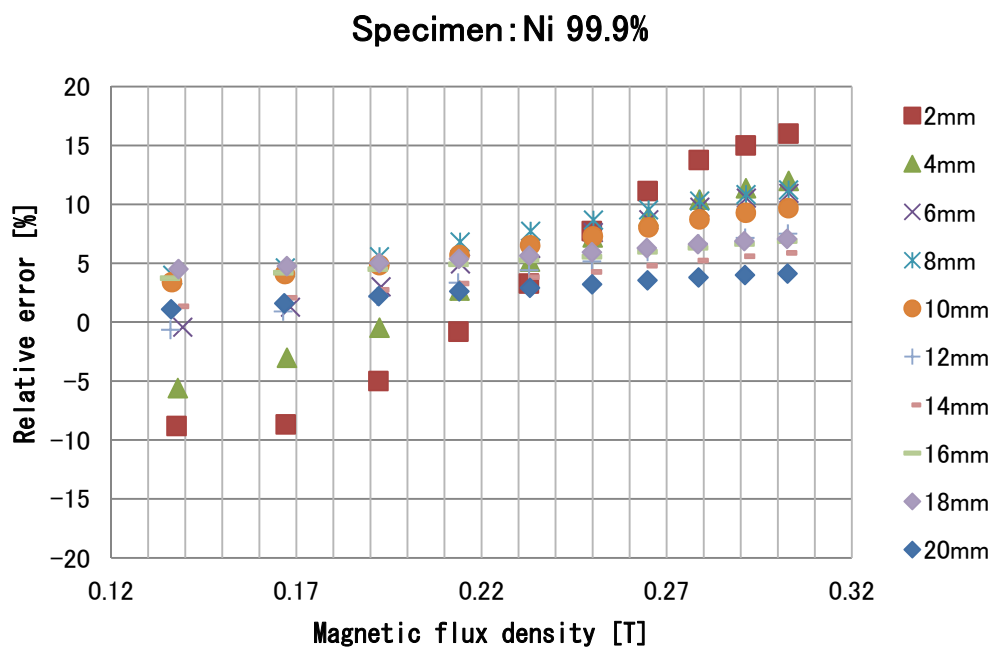
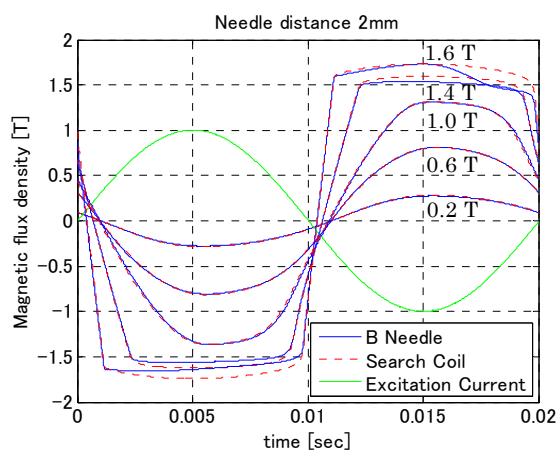
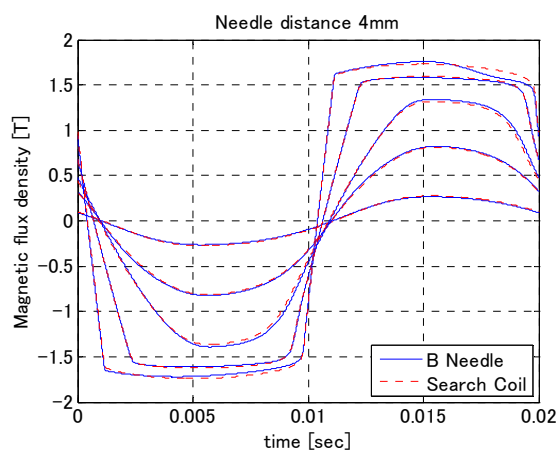


Fig. 2.3.32 Relative error of the needle probe distance and the search coil.

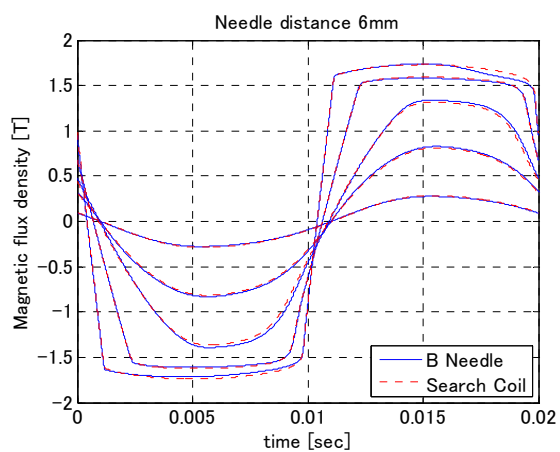
図 2.3.32 磁束密度の探針間隔と相対誤差 Ni 99.9%



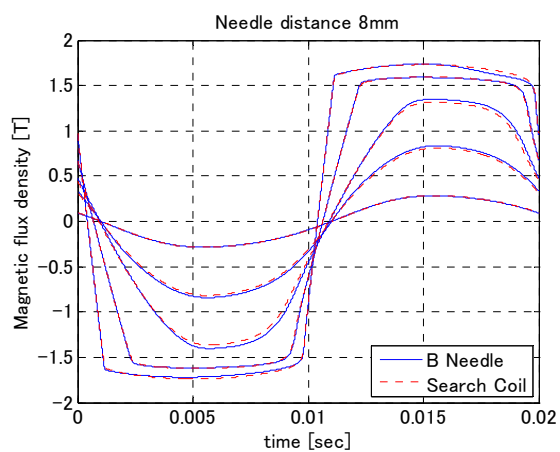
Needle distance 2 [mm]



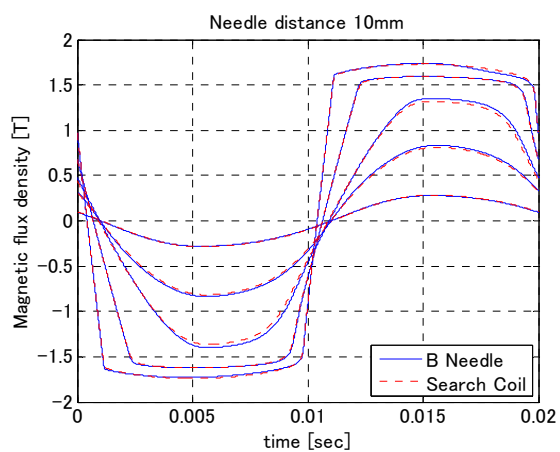
Needle distance 4 [mm]



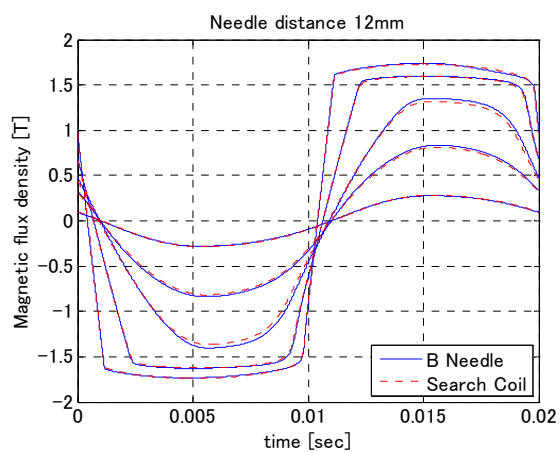
Needle distance 6 [mm]



Needle distance 8 [mm]



Needle distance 10 [mm]

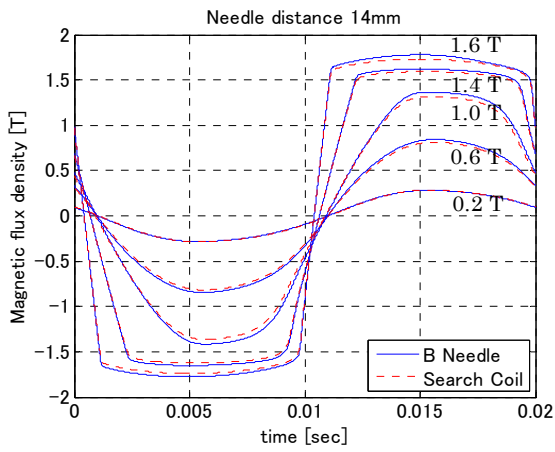


Needle distance 12 [mm]

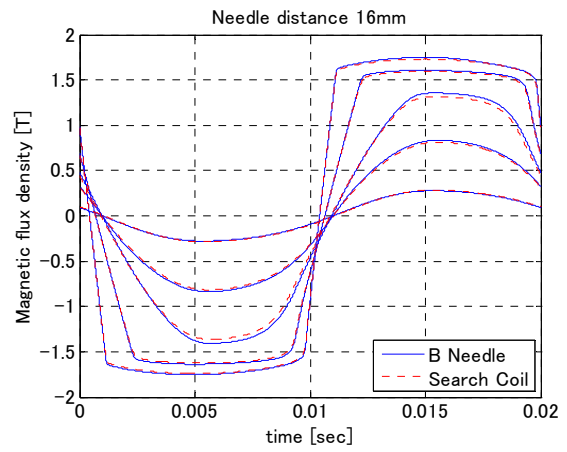
励磁磁束密度 $B_a=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.6$ [T]

Fig. 2.3.30 (a) Magnetic flux density wave for needle probe distance.

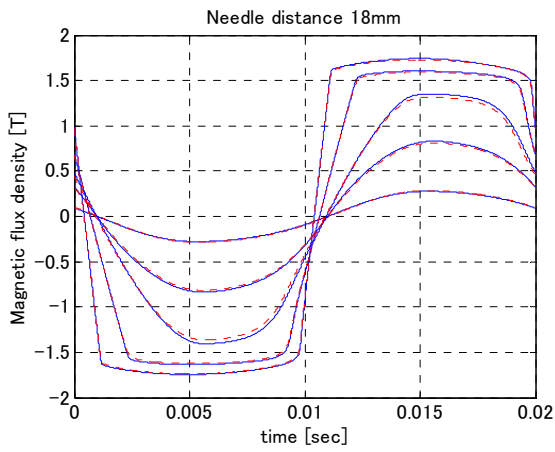
図 2.3.30 (a) 探針間隔毎の磁束密度波形



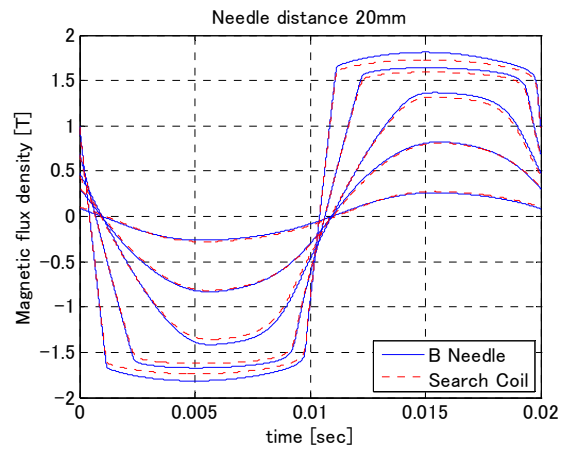
Needle distance 14 [mm]



Needle distance 16 [mm]



Needle distance 18 [mm]

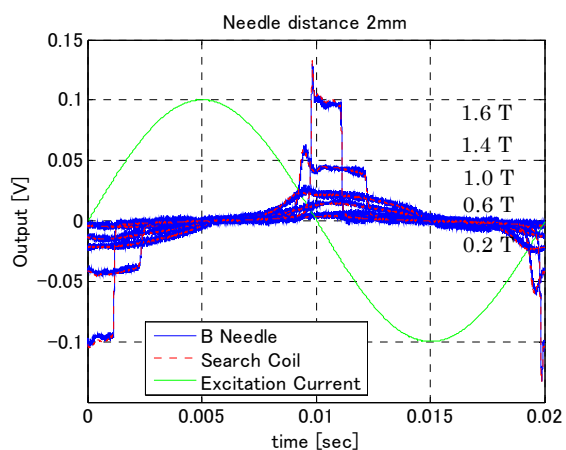


Needle distance 20 [mm]

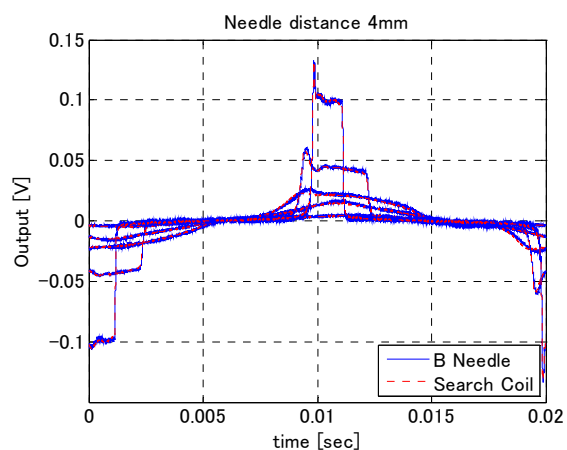
Magnetic flux density $B_a=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.6$ [T]

Fig. 2.3.30 (b) Magnetic flux density wave for needle probe distance.

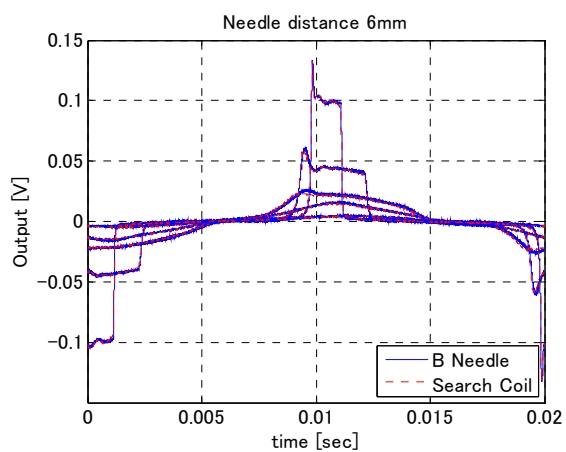
図 2.3.30 (b) 探針間隔毎の磁束密度波形



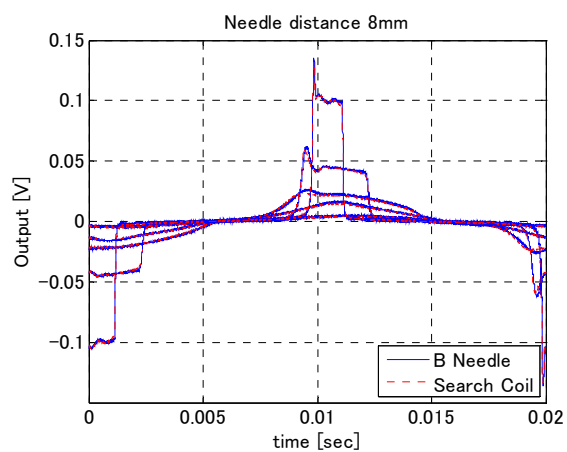
Needle distance 2 [mm]



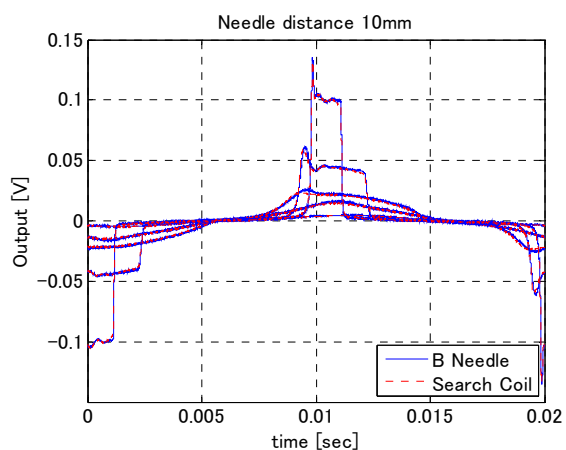
Needle distance 4 [mm]



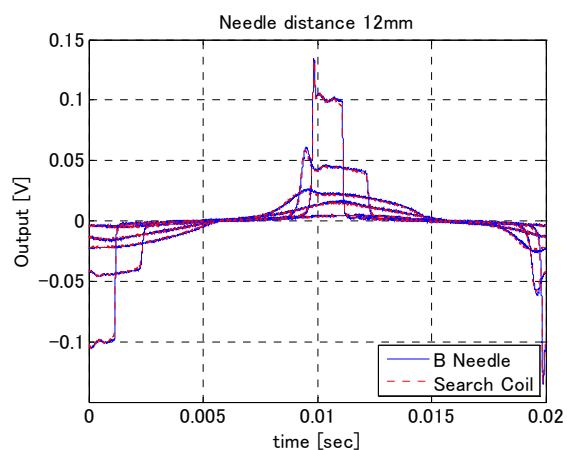
Needle distance 6 [mm]



Needle distance 8 [mm]



Needle distance 10 [mm]

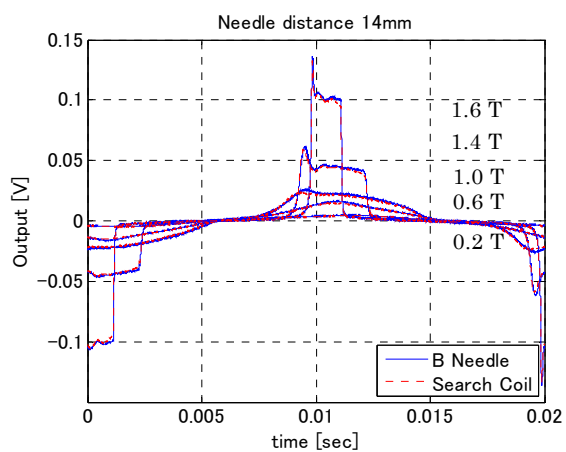


Needle distance 12 [mm]

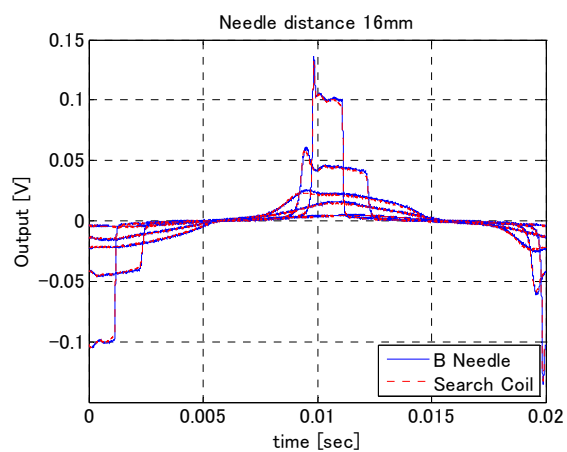
Magnetic flux density $B_a=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.6$ [T]

Fig. 2.3.31 (a) Voltage wave for needle probe distance.

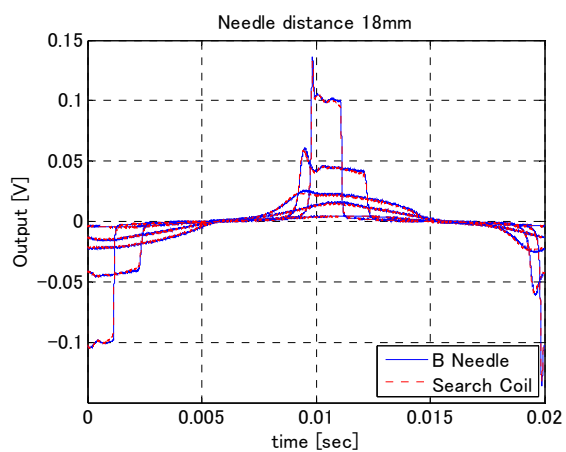
図 2.3.31 (a) 探針間隔毎の電圧波形



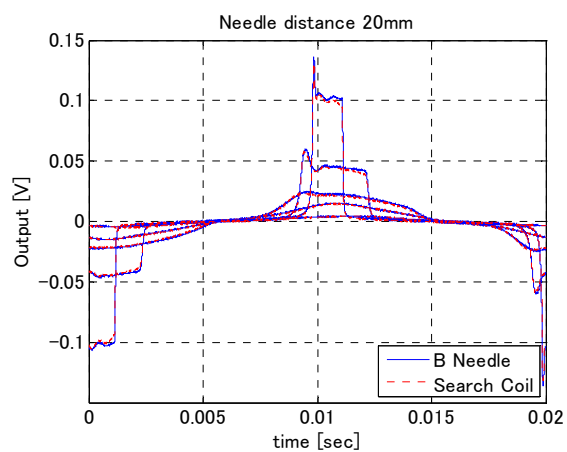
Needle distance 14 [mm]



Needle distance 16 [mm]



Needle distance 18 [mm]



Needle distance 20 [mm]

Magnetic flux density $B_a=0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.6$ [T]

Fig. 2.3.31 (b) Voltage wave for needle probe distance.

図 2.3.31 (b) 探針間隔毎の電圧波形

第 2.4 節 H コイル法

2.4.1 H コイル法の測定原理

H コイル法は、電磁鋼板表面の磁界成分が電磁鋼板内部の面方向の均一磁界成分と等価であることを利用して、電磁鋼板表面に置かれた H コイルの誘起電圧により磁界強度を導き出す方法である。磁界強度は次式で与えられる。

$$H_i = \frac{1}{\mu_0 S_{H_i} N_{H_i}} \int v_{H_i} dt \quad (2.4.1)$$

μ_0 は磁気定数、 v_H は H コイルによる出力電圧、 $S_H N_H$ は H コイルのエリアターン、添字 i は方向成分 (X, Y) を表す。

H コイル法はエリアターンを校正することにより正確に測定が可能となる[42]。図 2.4.1 に H コイル法の検出原理モデルを示す。

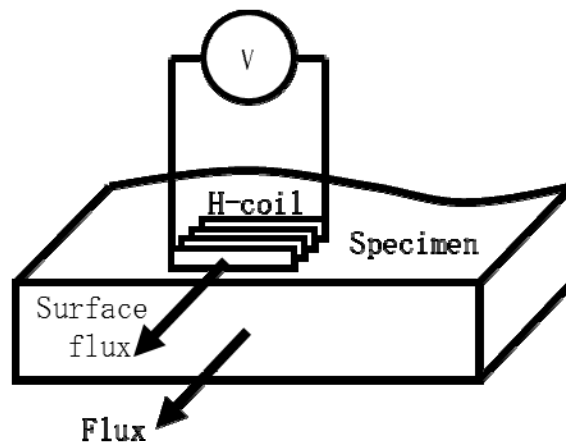


Fig. 2.4.1 Definition of H-coil method.

図 2.4.1 H コイル法の検出原理モデル

2.4.2 H コイルの構造

H コイルの巻線に使用するマグネットワイヤは銅線に極薄のポリエステルなどの絶縁被膜が焼き付けられたものである。以前のダブルH コイル製作はV・Hアナライザ用のサイズが18 mm×18 mmのダブルH コイルがあり、巻線に使用したマグネットワイヤの導体径は0.016 mm（被膜焼き付け後の仕上がり外径は0.020 mm）である。ダブルH コイルを小型化すると共に実用的な感度を得るためにはマグネットワイヤをより細くして、コイルのターン数を多くする必要がある。

H コイルの巻枠には温度変化によりH コイルのエリアターンの変動をなくすためにセラミックス材を使用している。そして、X方向とY方向の直交度の精度を確保するために精密な研削加工を行っている。当初はセラミックス材の中からアルミナを使用していたが、加工中に微細なカケが発生し、巻線中にマグネットワイヤが巻枠の欠けた部分に落ち込み巻乱れの原因となることから、アルミナより破壊靱性の高いジルコニアに変更した。そのことにより、巻枠の平滑度などの機械的な寸法精度は向上したが、巻枠の加工難度が上がり加工時間の増加を招くこととなった。また、比誘電率はアルミナ10に対してジルコニアは30程度となる。アルミナとジルコニアの物性を表2.4.1に示す。

H コイルの小型化に取り組み、当初はH コイルの巻枠の幅が4 mm×4 mmを製作し、この時に製作した加工のノウハウにより、巻枠の幅を2 mm×2 mmに小型化したダブルH コイルを製作することができた。図2.4.2にH コイル巻枠寸法と図2.4.3に巻線後のH コイルを示す。

エリアターンは我々の研究室で従来製作された7mm×7mmのダブルH コイルを参考にして、極端に小さくならないようにした。

H コイルの厚みは18 mm×18 mmサイズH コイルと同様に試料表面から1.2 mm以下になるように設計した。4 mm×4 mmサイズおよび2 mm×2 mmサイズH コイルは検出感度を得るためにより細い極細のマグネットワイヤを使用した。

H コイル巻枠に極細マグネットワイヤを巻線する際は、マグネットワイヤが断線しない安全張力以下で張力制御を精密に行うことが必要である。4 mm×4 mmサイズH コイルの巻線はマグネットワイヤの導体外径が0.012 mmで安全張力は0.0020 Nである。2 mm×2 mmサイズH コイルの巻線はマグネットワイヤの導体外径が0.010 mmで安全張力は0.0014 Nである。

H コイル巻枠にマグネットワイヤの巻線を行い、ハウジングに組み込んだ後は巻線の取扱中の破損防止と巻線の形状が温度変化で変化しないように低粘度のエポキシ樹脂を充填している。

H コイル巻枠の寸法は外寸が2 mm×2 mmであるが、巻線機の治具の固定部分や、V・Hセンサのハウジングに組み込み易さを考慮して巻線部分の四隅に支柱を持った構造である。そのため、H コイルの巻線部分の寸法はHxが1.6 mm×1 mm×0.8 mm、Hyが1.6 mm×1 mm×0.5 mmである。

Table. 2.4.1 Physical property of alumina and zirconia.

表 2.4.1 アルミナとジルコニアの物性

Material	Alumina	Zirconia
Main component purity	Al ₂ O ₃ 99.5%	ZrO ₂
Color	Ivory	White
Water absorption [%]	0	0
Young's strength [GPa]	360	210
Poisson's ratio	0.25	0.31
Vickers hardness [HV10]	1700	1300
Volume Resistivity (RT) [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$>10^{14}$	$>10^{14}$
Thermal expansion(RT~200°C) [$\times 10^{-6}/\text{k}$]	8.1	10.4
Thermal conductivity (400°C)[W/m · k]	300	3
Fracture toughness [Mpa√m]	3.5	6
Dielectric constant	10	30

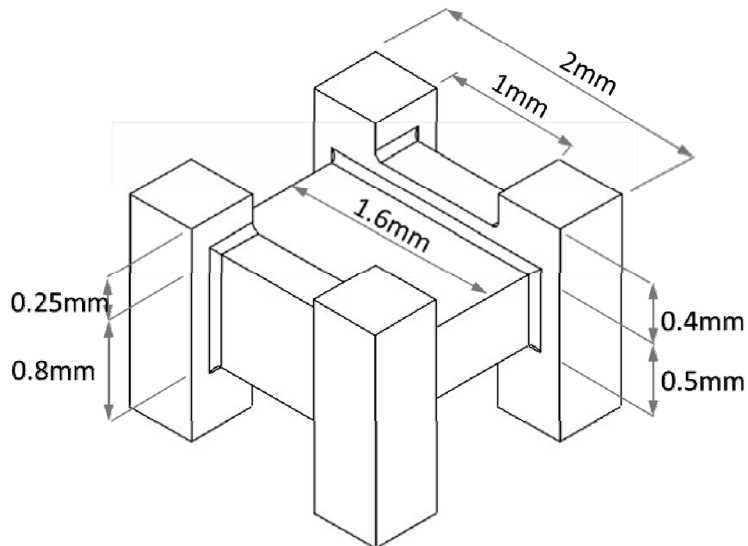


Fig. 2.4.2 2 mm × 2 mm size H coil bobbin.

図 2.4.2 2 mm × 2 mm サイズ H コイル巻枠寸法

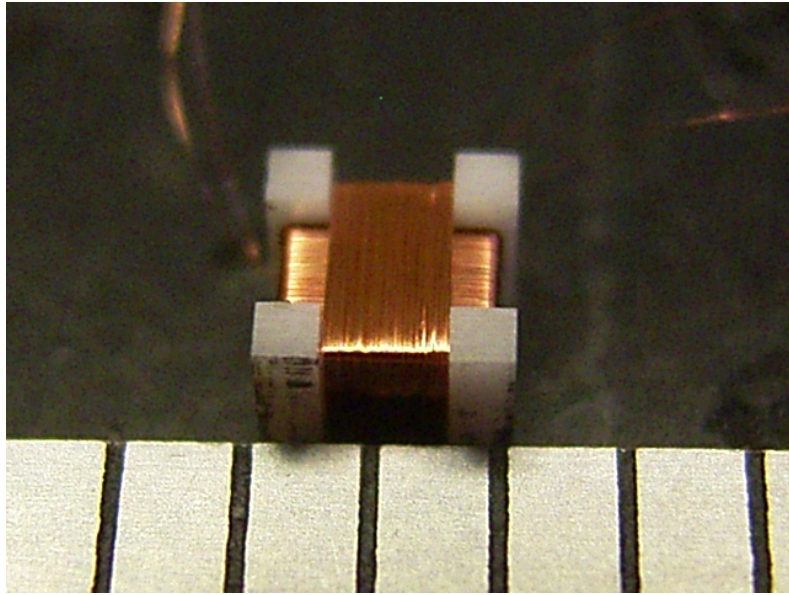


Fig. 2.4.3 2mm×2 mm size H coil.

図 2.4.3 2 mm×2 mm サイズ H コイル

2.4.3 H コイルの評価装置

H コイル法により磁界強度を測定するには H コイルのエリアターンを正確に知る必要がある。このために、ヘルムホルツコイルおよび高精度ターンテーブルから構成される評価装置を構築した。図 2.4.4 に評価装置構成図，図 2.4.5 に評価装置外観，表 2.4.3 にヘルムホルツコイル仕様を示す。

ダブル H コイルを評価するために均一磁界を発生する外径 750 mm のヘルムホルツコイルを製作した。均一磁界は数値解析により中心部に 20 mm×20 mm の領域で 0.001 %未満の均一磁界を発生する。このヘルムホルツコイルに 20 A の電流を流すと 3406 A/m の磁界が発生する。この領域にダブル H コイルを設置し評価を行う。ダブル H コイルとヘルムホルツコイルを平行にするために高分解能ステッピングモータを使用した高精度ターンテーブルを使用した。ステッピングモータはヘルムホルツコイルの領域外に設置している。図 2.4.6 にヘルムホルツコイル中央の 50 mm×50 mm の領域に発生する磁界強度，図 2.4.7 に 100 mm×100 mm の領域の磁界強度の均一度，図 2.4.8，図 2.4.9 に中心部分の領域の磁界強度の均一度を示す。

エリアターンは測定する H コイルと同軸状にレイアウトした PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt : The national metrology institute providing scientific and technical services)製作の標準 H コイルと比較して求めた。

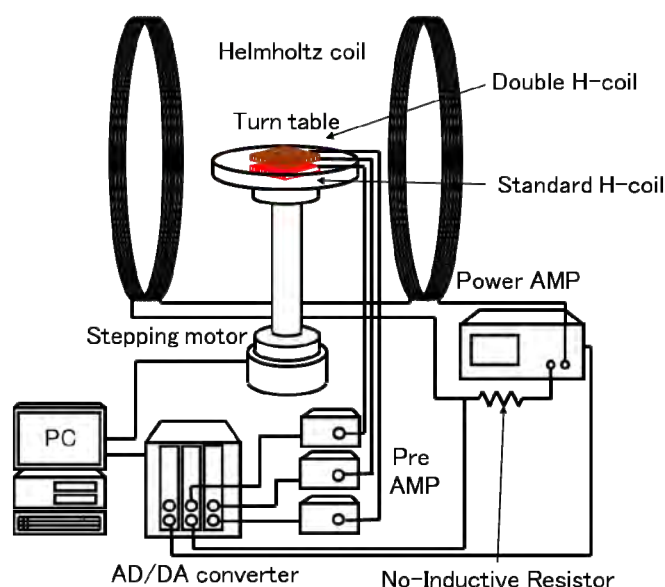


Fig. 2.4.4 H-coil evaluation system with Helmholtz coil.

図 2.4.4 ヘルムホルツコイルを使用した H コイル評価装置構成図



Fig. 2.4.5 H-coil evaluation system with Helmholtz coil.

図 2.4.5 ヘルムホルツコイルを使用した H コイル評価装置外観

Table. 2.4.3 Specification of Helmholtz coil.

表 2.4.3 ヘルムホルツコイル仕様

Item	Specification
Coil diameter [mm]	750
Number of turns [turn×Layers]	18 turn×5 layers
Excitation current [A]	20

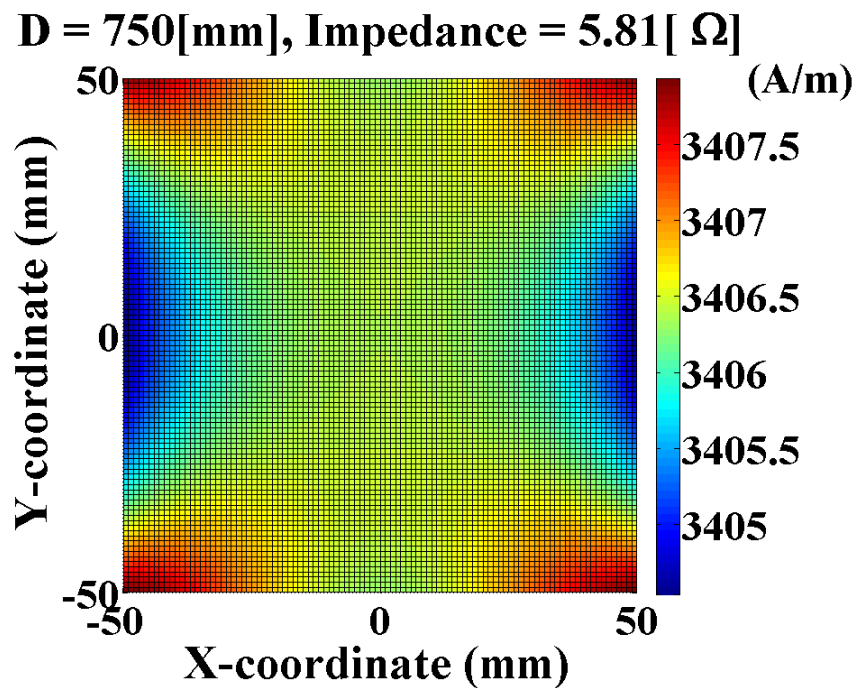


Fig. 2.4.6 Uniform area of Helmholtz coil.

図 2.4.6 ヘルムホルツコイルの均一領域（磁界強度）

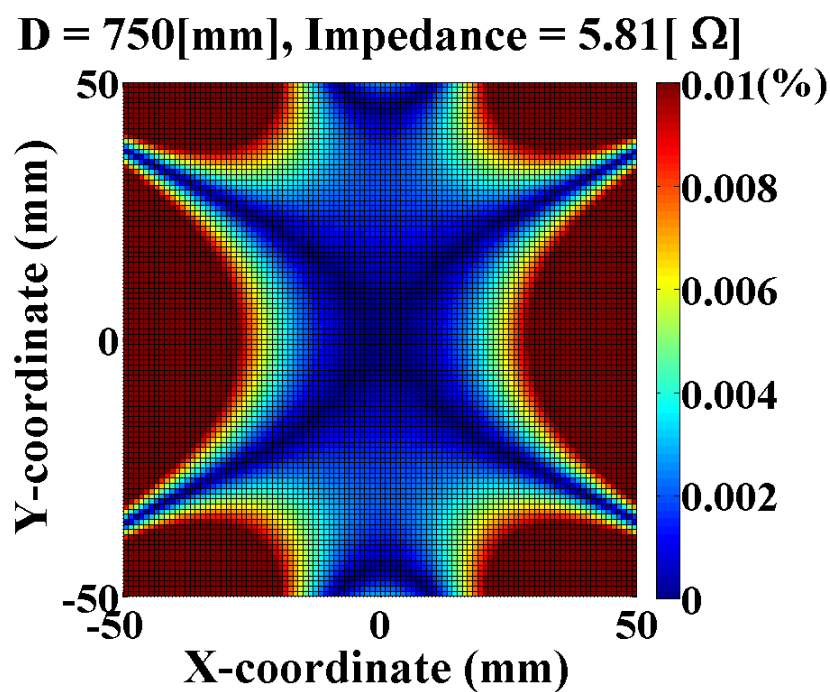


Fig. 2.4.7 Uniform area of Helmholtz coil.

図 2.4.7 ヘルムホルツコイルの均一領域（100 mm×100 mm 領域）

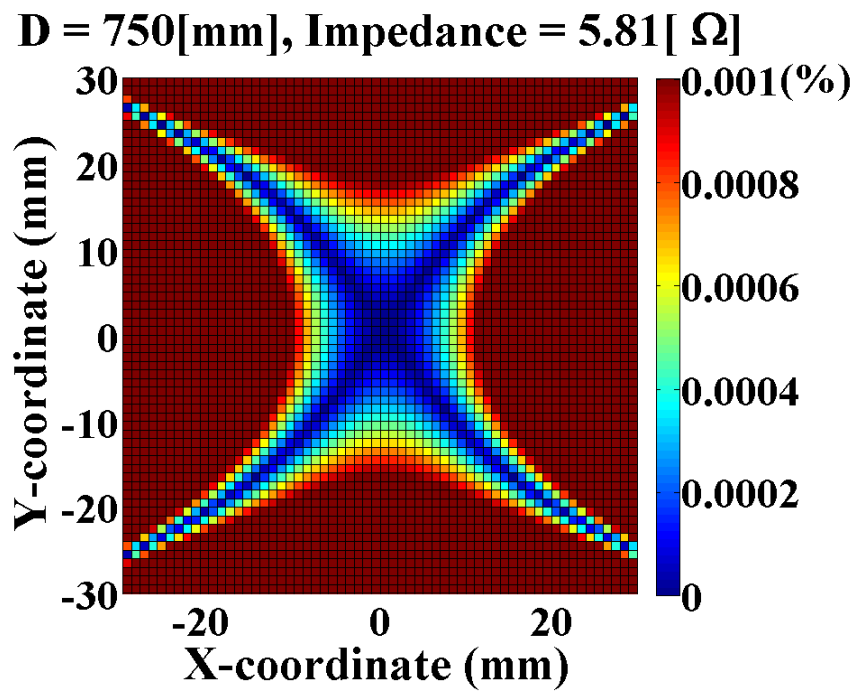


Fig. 2.4.8 Uniform area of Helmholtz coil.

図 2.4.8 ヘルムホルツコイルの均一領域 (60 mm×50 mm 領域)

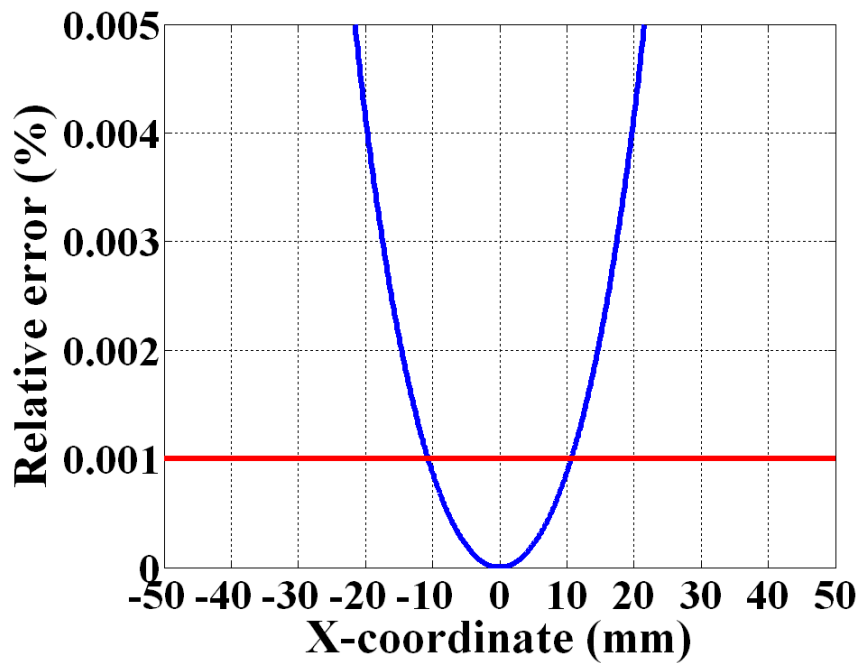


Fig. 2.4.9 Uniform area of Helmholtz coil.

図 2.4.9 ヘルムホルツコイルの均一領域

2.4.4 H コイルのエリアターン評価結果

4 mm×4 mm と 2 mm×2 mm サイズの H コイルのエリアターンを測定した。H コイルの巻線数とエリアターンの測定結果を表 2.4.4 に示す。それぞれ、Hy 側が外側の巻線となるためエリアターンが大きくなっている。また、2 mm×2 mm サイズの H コイルは巻線数を 560 ターンとすることで 4 mm×4 mm サイズの H コイルと同等のエリアターンを得ることができた。

Table. 2.4.4 Specification of H-coil and Area turn.

表 2.4.4 H コイルの仕様とエリアターン測定結果

4 mm×4 mm H-coil	Number of turns [turns]	350
	Area turn(Hx) [cm ² ·turn]	5.25
	Area turn(Hy) [cm ² ·turn]	7.91
2 mm×2 mm H-coil	Number of turns [turns]	560
	Area turn(Hx) [cm ² ·turn]	5.64
	Area turn(Hy) [cm ² ·turn]	8.52

2.4.4 H コイルの周波数特性の評価

コイルセンサは巻線間に浮遊容量があることから周波数特性を持つ。2 mm × 2 mm サイズの H コイルは導体外径が 0.010 mm の極細のマグネットワイヤを 560 ターン巻線していることから線間に大きな浮遊容量があることが予想され、浮遊容量による周波数特性が磁界強度測定に影響する[43-45]。H コイルの等価回路は図 2.4.10 の H コイルの等価回路に示されるように巻線のインダクタンスとインダクタンスの抵抗分に並列に巻線の浮遊容量を持つ。

H コイルの抵抗値はデジタルマルチメータで測定し、インダクタンスおよびキャパシタンスは LCR メータ (Agilent Technologies E4980A) でインピーダンスを測定した後、式 (2.4.5) から、非線形最小化法[46]によりインダクタンス L およびキャパシタンス C の値を求めた。

$$Z = \frac{(R + j\omega L) \times \frac{1}{j\omega C}}{(R + j\omega L) + \frac{1}{j\omega C}} \quad (2.4.5)$$

Hx および Hy コイルの抵抗の測定値およびインダクタンス、キャパシタンスの計算結果を表 2.4.1 に示す。

Hx び Hy コイルの抵抗、インダクタンス、キャパシタンスから H コイルの周波数特性を計算式 (2.4.6) により求めた。

$$\theta = \cos^{-1} \frac{Z_{real}}{|Z|} \quad (2.4.6)$$

計算結果を図 2.4.11 に示す。Hx コイルに比べ、Hy コイルの位相の値が小さくなっているのは、Y 方向の上に X 方向を巻線したことによりエアーターンが大きくなっているためである。極細のマグネットワイヤを 560 ターン施したことにより線間容量の増加により周波数特性の悪化が予測されたが、基本波である 50 Hz の時に 0.01 degree であり、磁界強度測定帯域の上限である 1 kHz 時においても位相特性は 0.2 degree であり。また Hx および Hy 間の差も 0.038 degree であることがわかる。

プリアンプのゲインおよび AD 変換器の入力レンジは同じ設定にしてチャンネル間で位相特性に差が出ないようにした。

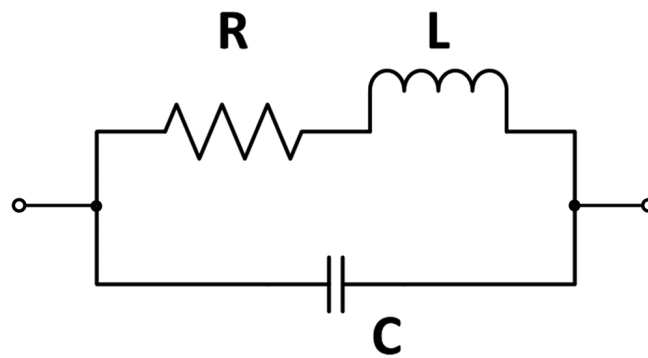


Fig. 2.4.10 Equivalent circuit of H-coil.

図 2.4.10 H コイル等価回路

Table. 2.4.1 Actual measurement of LCR.

表 2.4.1 2 mm×2 mm サイズ H コイルの LCR 実測値

Item	Hx	Hy
R [Ω]	625.60	557.40
L [μ H]	354.22	255.35
C [pF]	18.65	17.59

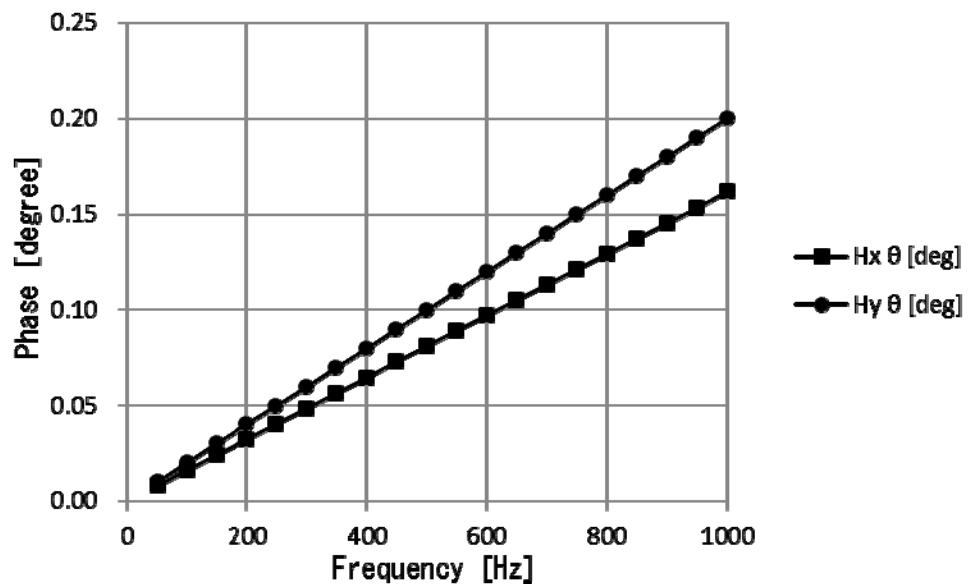


Fig. 2.4.11 Phase characteristic of H-coil.

図 2.4.11 H コイルの周波数特性

2.4.5 H コイルの周波数特性評価結果の検証

前述で算出したインダクタンスおよびキャパシタンスの検証のために、H コイルの巻線のインダクタンスと浮遊容量による LC 共振点を実測した。測定は図 2.4.12 の測定回路のように、H コイルに 500 Ω の抵抗を直列に接続し、ファンクションジェネレータにより正弦波を入力し、H コイル端の電圧をマルチメータで測定した。

LC 共振周波数は式 2.4.1 に示される。

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.4.1)$$

上記の式から、H コイルの共振周波数を求めると 2.38 MHz となり、実測値の 2.3 MHz と一致することにより、非線形最小化法により求めたインダクタンスおよび浮遊容量によるキャパシタンスの値が正しいことがわかる。

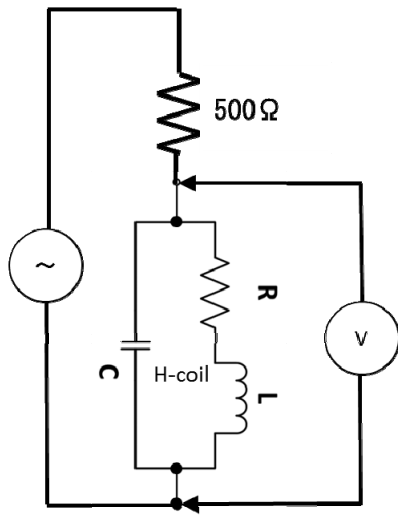


Fig. 2.4.12 Measurement circuit of LC resonat frequency of H-coil.

図 2.4.12 H コイルの LC 共振周波数測定回路

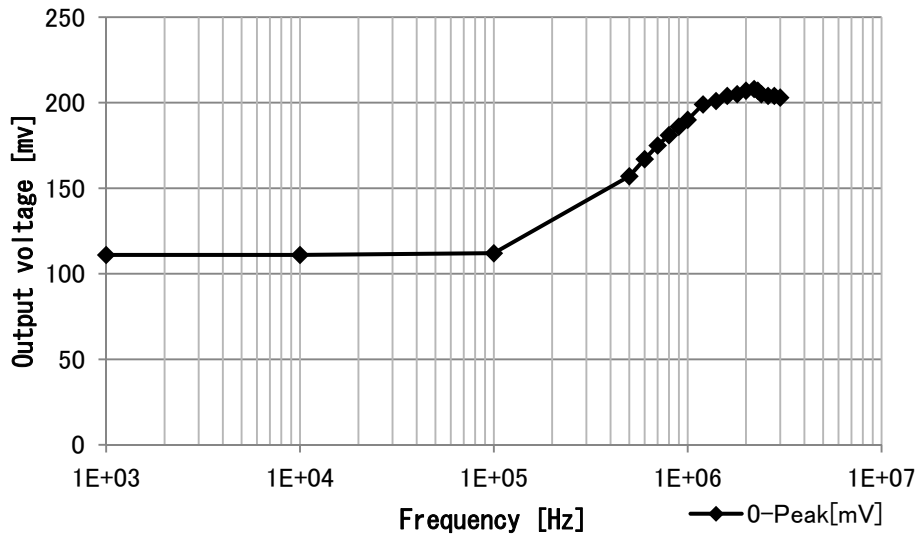


Fig. 2.4.13 LC resonat frequency of H-coil.

図 2.4.13 H コイルの LC 共振周波数

2.4.6 H コイルの周波数特性の補正

ダブル H コイルを小型化し感度を確保しようとして極細線を多数巻線することによってエリアターンは増加し、誘起出力電圧は大きくなるが、線間のキャパシタンスの影響が大きくなり磁束密度波形に対して磁界強度波形の位相が遅れる。前節の実験結果より得られたダブル H コイルの周波数特性から磁界強度波形の補正について検討を行った。補正は測定値を高速フーリエ変換により 19 次(950 Hz)までの調波毎に位相差を補正し各調波の波形を加算した。式(2.4.2)から鉄損を求め、磁界強度波形の補正前の式(2.4.3)と補正後の式 (2.4.4)を以下に示す。

$$P = \frac{1}{\rho T} \int_0^T \left(H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \quad (2.4.2)$$

ρ :Material density

T :Period of exciting waveform

$$H_{x(\tau)} = \sum_{n=1}^N H_{mx} \sin(n\tau + \theta_n) \quad (2.4.3)$$

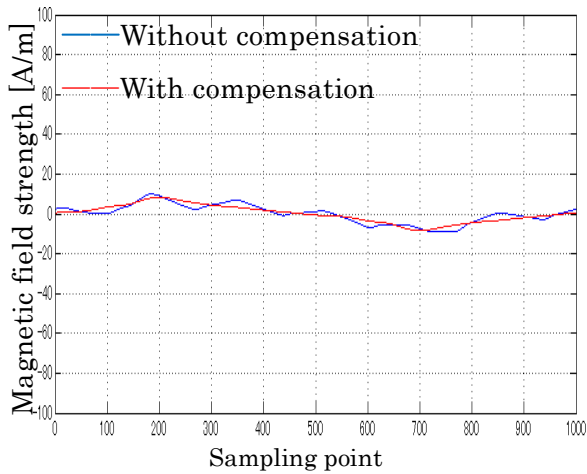
$$H_{x(\tau)} = \sum_{n=1}^N H_{mx} \sin(n\tau + \theta_n + \phi_{xn}) \quad (2.4.4)$$

補正前と補正後の波形を変圧器モデルの中央脚部分の測定箇所を例に波形の補正結果を示す。また、補正後のすべての測定点の鉄損の平均値を計算した結果を表 2.4.1 に示す。その結果、周波数特性の影響は 0.2563 %以下であることがわかる。そのことから、測定には H コイルの周波数補正は行っていない。

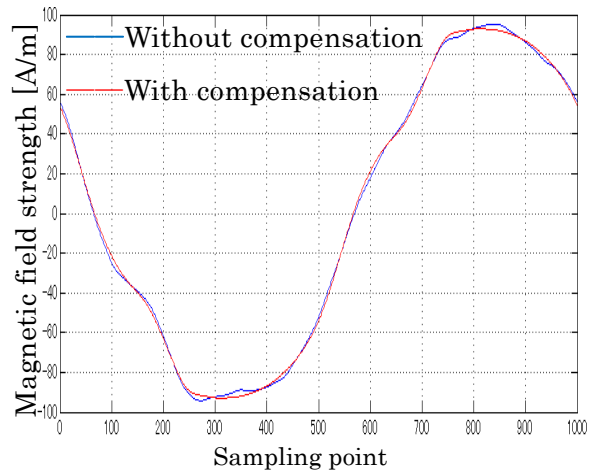
表 2.4.1 H コイルの位相補正効果

Table 2.4.1 Effect of phase compensation of H coil.

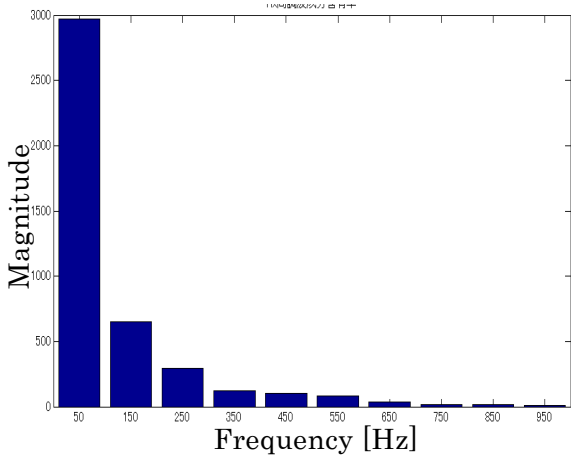
Phase compensation	Average iron loss [W/kg]
Without compensation	0.5475
With compensation	0.5489
Error [%]	0.2563



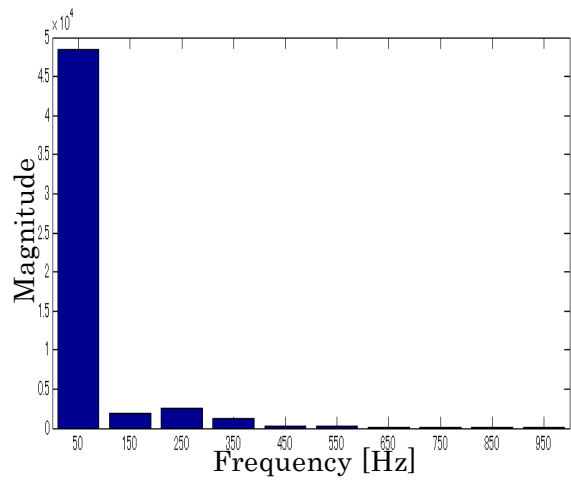
(a) Hx phase compensation



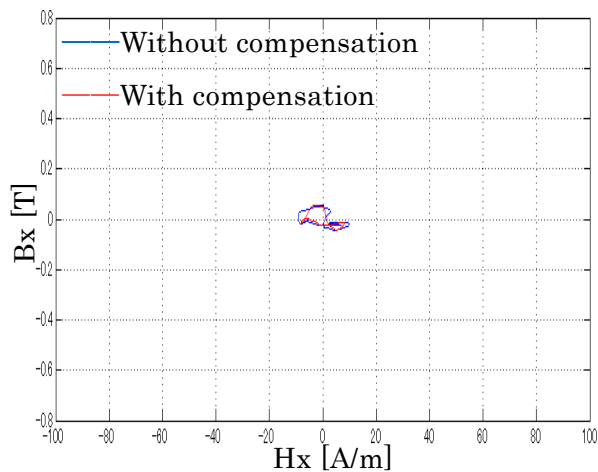
(b) Hy phase compensation



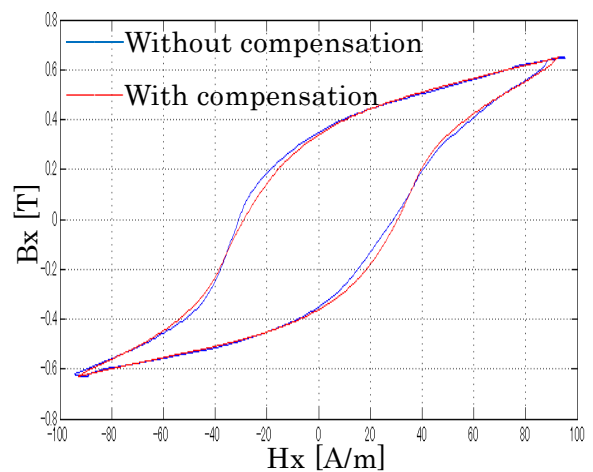
(c) Hx relative harmonic content



(d) Hy relative harmonic content



(e) Hysteresis loop Hx-Bx



(f) Hysteresis loop Hy-By

Fig. 2.4.14 Effect of phase compensation of H coil.

図 2.4.14 H コイルの位相補正効果

第 2.5 節 ログスキー・チャトックコイル法

磁界強度測定法としてログスキー・チャトックコイル法があり，極小局所ベクトル磁気センサの磁界強度測定にログスキー・チャトックコイルを組み込む検討を行った。ベクトル磁気センサの磁界強度測定にログスキー・チャトックコイルを組み込むには，X 方向，Y 方向をひとつのセンサハウジングに組み込む必要がある。今回は小型化への取り組みとして，試料との接触面が 6 mm×1 mm のログスキー・チャトックコイルの試作を行い，小型化への問題点を明らかにした。

2.5.1 ログスキー・チャトックコイル法の測定原理

ログスキー・チャトックコイルの磁界強度検出図を図 2.5.1 に示す。ログスキー・チャトックコイルの測定原理[47-49]は，励磁された電磁鋼板内部に磁界強度が生じ，試料内部の磁界強度とログスキー・チャトックコイルに生じる磁界強度 H_{eff} の関係は，アンペールの法則によって，

$$\oint H \cdot dl = H_s l_s + H_{eff} l_{eff} = 0 \quad (2.5.1)$$

と表すことができる。ここで， H_s はログスキー・チャトックコイル内部の磁界強度， l_s はログスキー・チャトックコイルの長さ， l_{eff} はログスキー・チャトックコイルが試料と接している両端の長さである。さらに，式(2.5.1)を計算すると，電磁鋼板内部の有効磁界は，

$$H_{eff} l_{eff} = -H_s l_s \quad (2.5.2)$$

$$H_{eff} = -\frac{l_s}{l_{eff}} H_s \quad (2.5.3)$$

と表される。この時に， H_s はログスキー・チャトックコイルの誘起電圧 e_s から計算できる。

$$H_s = -\frac{1}{\mu_0 N_s S_s} \int e_s dt \quad (2.5.4)$$

となる。ここで， N_s はログスキー・チャトックコイルの巻数， S_s はログスキー・チャトックコイルの断面積である。

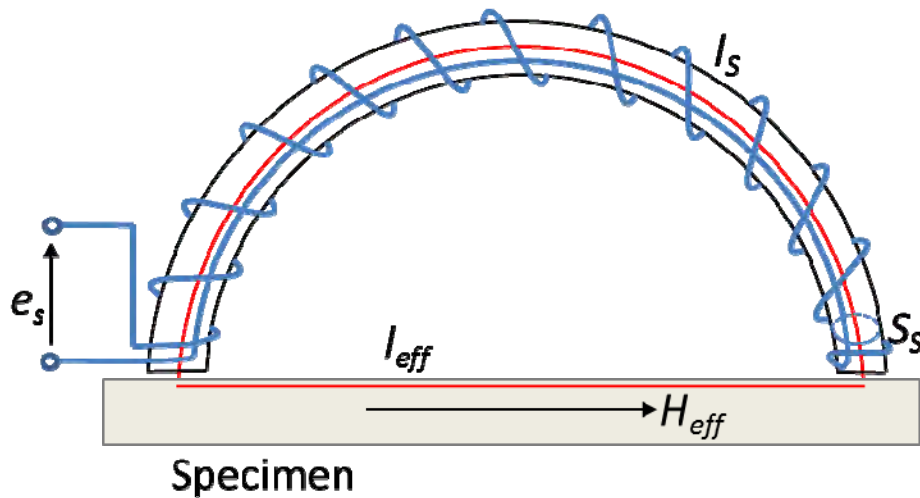


Fig. 2.5.1 Measurement principle of magnetic field strength by using Rogowski-coil.

図 2.5.1 ログスキー・チャトックコイルの磁界強度 H 検出図

2.5.2 ログスキー・チャトックコイルの構造の検討

ログスキー・チャトックコイルはコイル端を試料と平行にするため、コイルの形状を U の字もしくはコの字状にする必要がある。U の字部分の形状の制約はなく、ひとつひとつの形状が異なっても問題はないが、製品化を考慮するのであれば、同一形状になることが望ましい。そのことから、U の字状にするにはログスキー・チャトックコイルの巻枠の素材に柔軟性があり変形できるものが必要となり、素材が柔らかいことで加工精度が出にくいこと、および、U の字状に保持するハウジングへの組み込みが難しくなることがある。また、リジッドな U の字状の巻枠を製作し、直接巻線を行うことも考えられるが、巻線機に巻枠の姿勢を制御する機構の追加が必要であることから、今回は同一形状にしやすい直線状の部品で構成できるコの字状のログスキー・チャトックコイルを試作した。

コの字状にするには、3 分割した巻枠に連続して巻線し折り曲げるか、分割して巻線後に接続する必要がある。極細のマグネットワイヤを接続するのは難しいため連続して巻線し折り曲げる構造とした。コの字状に折り曲げた後に形状を保持するハウジングに固定する必要がある。

2.5.3 ログスキー・チャトックコイルの構造

コの字状で試作したログスキー・チャトックコイルの製作概要を図 2.5.2 に示す。寸法精度と温度変化による形状変化を少なくするために巻枠にアルミナを使用した。巻線機を使用して巻線後に、コの字状にするために、巻枠の構造を3分割とし、巻枠の1面に粘着テープを貼り付けている。巻枠は折り返した片端をログスキー・チャトックコイルの中央に通せること、および、巻線機が使用して一度に巻線できるように巻線用のシャフトを通せるように巻枠の中央に孔を開けた。

図 2.5.3 の巻線中のログスキー・チャトックコイルに示すように、巻枠中央の孔にシャフトに通し巻線機にセットした。巻線後に巻枠からマグネットワイヤが外れないように分割部分と巻始め、巻き終わりにワニス塗布し固定した。図 2.5.4 に示す巻線後のログスキー・チャトックコイルおよび図 2.5.5 のケースに挿入したログスキー・チャトックコイルに示すように、ワニス乾燥後に巻線機から巻枠を取り外しコの字状にしてハウジングに挿入した。ハウジングはログスキー・チャトックコイルの挿入状態が確認できるように透明なアクリル材を使用した。

コの字状の加工が必要であることから、極細のマグネットワイヤの取扱は困難と判断し、マグネットワイヤの導体外径は $\phi 0.04$ mmを使用した。ターン数は600ターンである。

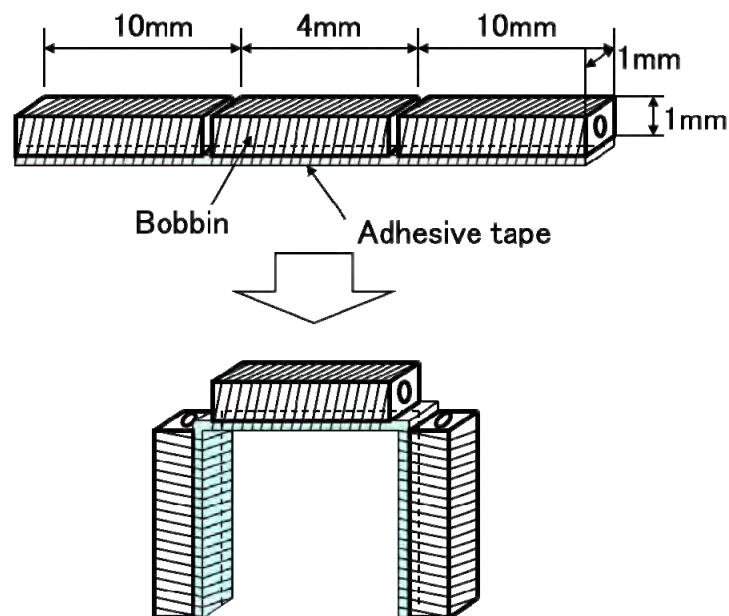


Fig. 2.5.2 Outline of manufacture of Rogowski-chattock coil.

図 2.5.2 ログスキー・チャトックコイルの製作概要

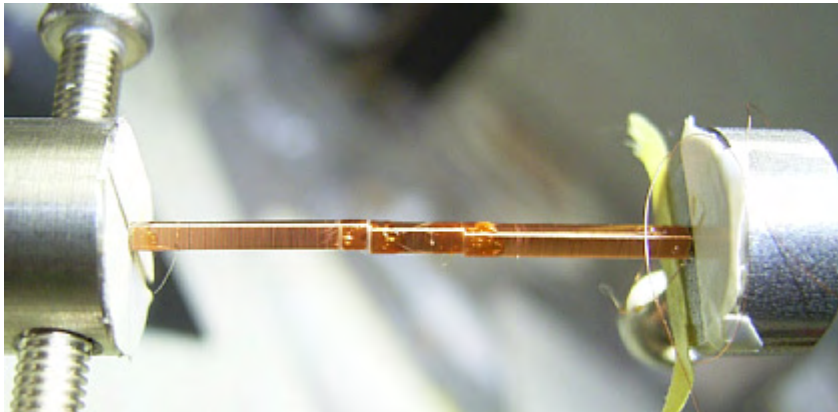


Fig. 2.5.3 Rogowski-chaddock coil in winding.

図 2.5.3 巻線中のロゴスキー・チャトックコイル

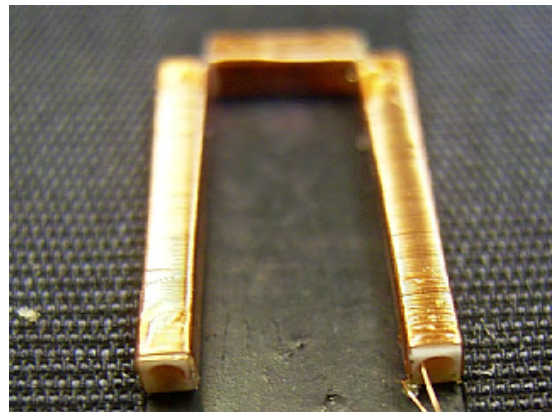
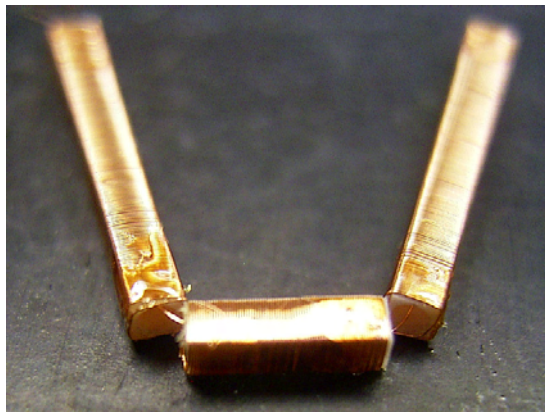


Fig. 2.5.4 Rogowski-chaddock coil after winding.

図 2.5.4 巻線後のロゴスキー・チャトックコイル

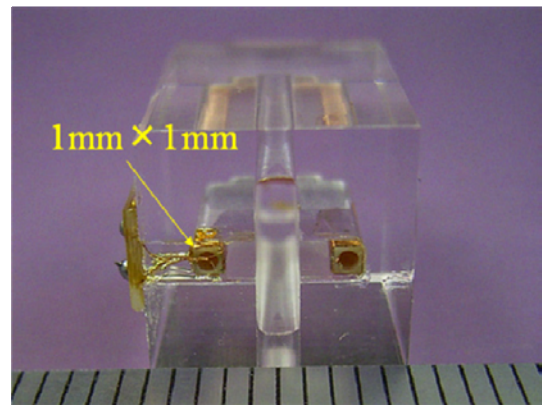
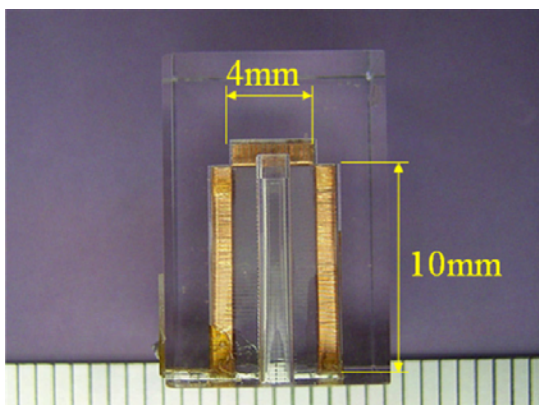


Fig. 2.5.5 Assembly Rogowski-chaddock coil.

図 2.5.5 ケースに挿入したロゴスキー・チャトックコイル

2.5.4 ログスキー・チャトックコイルの評価装置

試作したログスキー・チャトックコイルの測定精度を評価するために、図 2.5.6 に示す二次元ベクトル磁気測定装置を使用した。この装置の磁束密度の測定は探りコイルから 20 mm 間隔の B 探針に変更した装置である。

図 2.5.7 ログスキー・チャトックコイルの評価方法に示すように、試料の下面に H コイル、試料の上面に試作したログスキー・チャトックコイルをレイアウトし、磁束密度は B 探針で制御している。励磁条件を 50 Hz 正弦波とし、H コイルとログスキー・チャトックコイルの磁界強度波形を比較した。図 2.5.8 にログスキー・チャトックコイルの評価風景を示す。

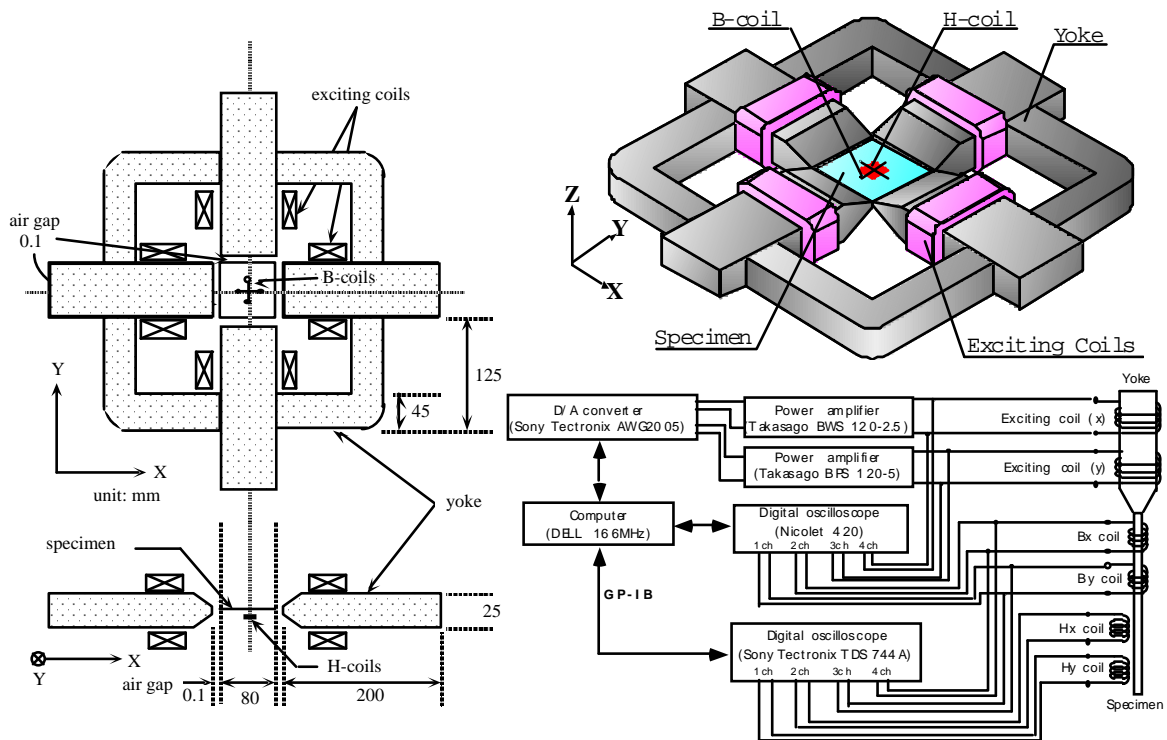


Fig. 2.5.6 Two-dimensional magnetic measurement apparatus.

図 2.5.6 二次元ベクトル磁気測定装置

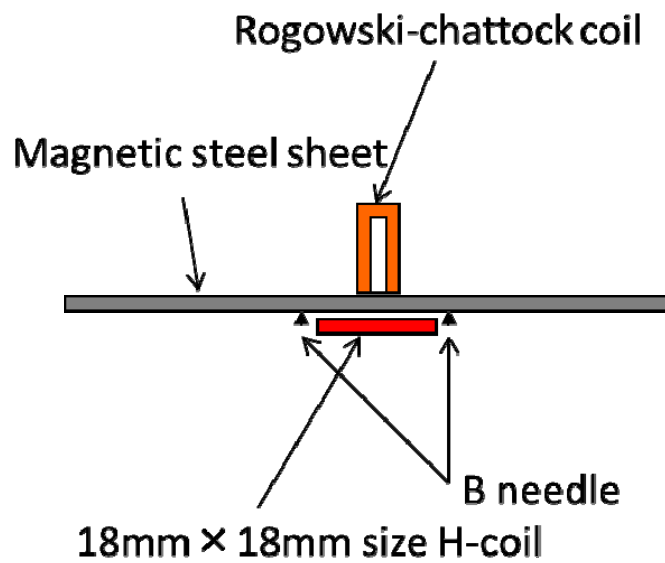


Fig. 2.5.7 Evaluation method of the rogowski-chattock coil.

図 2.5.7 ログスキー・チャトックコイルの評価方法

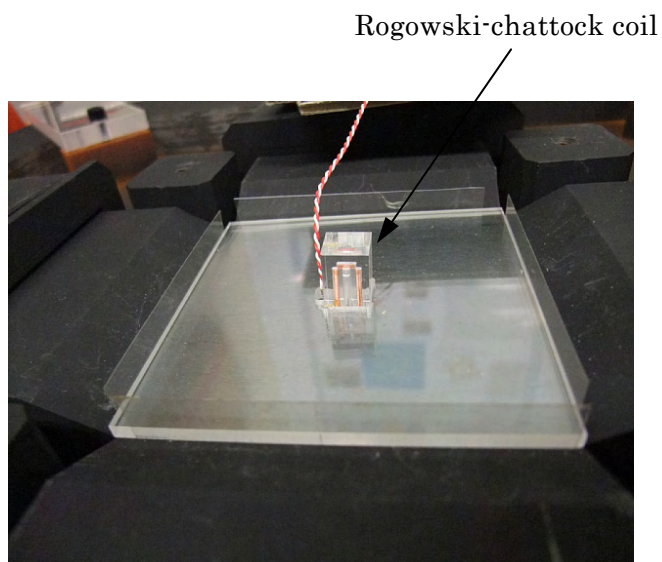


Fig. 2.5.8 Photograph under evaluation of the rogowski-chattock coil.

図 2.5.8 ログスキー・チャトックコイルの評価風景

2.5.5 ログスキー・チャトックコイルの磁界強度測定精度の評価結果

二次元ベクトル磁気測定装置を使用し、磁束密度を 50 Hz 正弦波で 0.4 T から 1.4 T まで励磁した。歪み率、振幅率とも 0.5 %以下で制御した条件でログスキー・チャトックコイルと 18 mm×18 mm サイズ H コイルで測定した磁界強度波形を図 2.2.9 に示す。比較のために H コイルとログスキー・チャトックコイルの磁界強度波形のピーク値をあわせている。この結果から、ログスキー・チャトックコイルが 18 mm×18 mm サイズ H コイルより大きな出力値となっている。H コイルが 18 mm×18 mm サイズであり、ログスキー・チャトックコイルの長さが 6 mm であることから測定領域が異なるために差が出ている可能性はある。

H コイルではソレノイドコイルなどの標準磁界発生装置によりエリアターンの測定が可能であるが、ログスキー・チャトックコイルでは二次元ベクトル磁気測定装置で基準となる H コイルと比較するなどの校正が必要となる。

ログスキー・チャトックコイルを製作して確認出来たのは、極小の磁界強度測定用のセンサコイルとしては今回の製作例では巻線後にコの字に折り曲げるなど製作難易度が高いことである。今回は導体外径が $\phi 0.04$ mm のマグネットワイヤを使用したことから、コの字の折り曲げ、ハウジングへの挿入、リード線の処理ができたが、より極細のマグネットワイヤを使用しているのは難しいと思われる。また、断面が 1 mm×1 mm サイズの巻枠を使用した。この形状で二次元ベクトル磁気特性として測定するために十字に組み込む必要があり、ログスキー・チャトックコイルの試料との接触面の大きさは 3 mm×3 mm より小さくすることができない、巻枠の寸法を 1 mm 以下にするのはセラミック材の加工を考慮すると難しいため、ログスキー・チャトックコイルを使用して、極小な V-H センサを製作することは難しいと思われる。

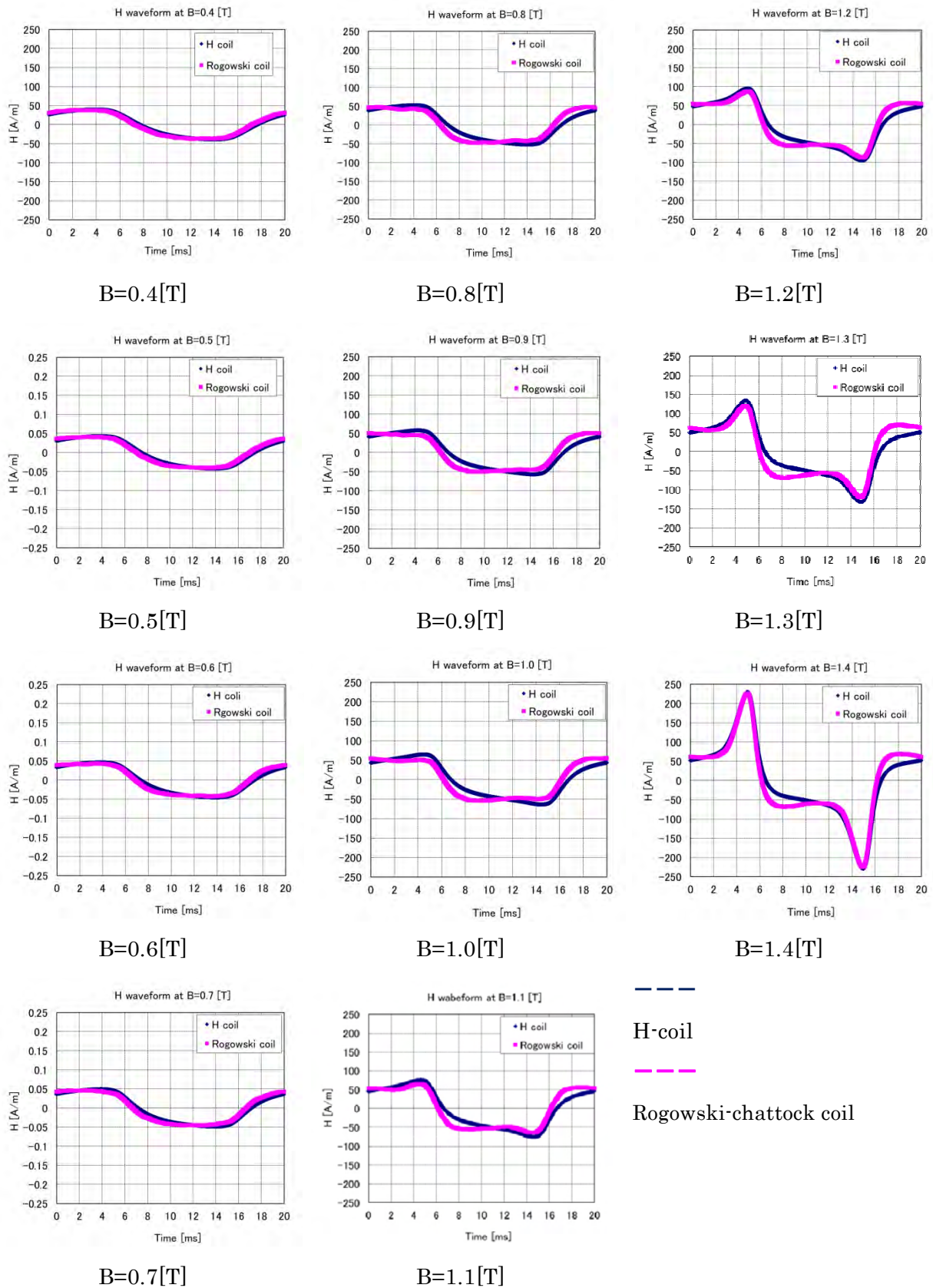


Fig. 2.5.9 Evaluation result of the rogowski-chattock coil.

図 2.5.9 ログスキー・チャトックコイルの評価結果

第 2.6 節 結言

本章では B 探針と H コイルを用いた測定方法の評価を行うために、探針法の探針間隔を可変させ探りコイルとの相対誤差を示し、H コイルの評価装置を構築し周波数特性を明らかにした。また、H コイルに変わる可能性のある、ロゴスキー・チャトックコイルを試作し評価した。

以下に知見をまとめる。

- (1) 二次元ベクトル磁気センサの測定精度に重要な B 探針の測定精度を B 探針の間隔を 20 mm から 2 mm まで可変できる治具を使用し、80 mm×80 mm の試料を二次元ベクトル磁気測定装置で励磁した場合と、ソレノイドコイルで 30 mm 幅の短冊状の試料を励磁した場合により評価した結果、探りコイルとの相対誤差は低磁束密度領域で誤差が増加する傾向にあるが、±10 %程度であることが確認出来た。
- (2) ヘルムホルツコイルを使用した H コイルのエリアターン評価装置を構築し、2 mm×2 mm サイズのエリアターンを評価することが可能になった。
- (3) 2 mm×2 mm サイズ H コイルのインピーダンスを測定し非線形最小化法により L, C, R 値を求め、巻線間の浮遊容量による周波数特性が 1 kHz で 0.20 degree であることを明らかにした。
- (4) ロゴスキー・チャトックコイルはダブル H コイルより小型化が難しいため V-H センサを小型化する場合に使用するメリットは少ない。

第3章 変圧器型磁気回路モデルのベクトル磁気特性分布

第3.1節 緒言

本章では、磁気特性測定向上の観点から、V-H センサを小型化し、方向性電磁鋼板による磁気回路モデルの磁気特性分布を測定することにより、小型化したV-H センサによる磁気特性分布測定が電磁力応用機器の低損失・高効率化に有用であることを示す。

電気機器の高効率化のためには磁気特性を正しく測定し得られた特性を活かすことが求められる。そのためには、方向性電磁鋼板の絶縁被膜の影響や、モータティースを測定できるようにV-H センサの小型化が必要となる。従来の研究では探針間隔が10 mmで磁界強度測定用のセンサとしてホール素子を使用した一次元の磁気センサの報告事例[50,51]はあるが、それより小型の二次元ベクトル磁気センサの製作例は見られない。

絶縁被膜貫通型B探針を搭載し、B探針間隔7 mm、Hコイルを4 mm×4 mmサイズに小型化したV-H センサを製作し、三相変圧器型磁気回路モデルの二次元ベクトル磁気特性分布を測定した。

従来のB探針では難しかった絶縁被膜を除去することなく磁束密度を測定出来ることから、方向性電磁鋼板の絶縁被膜の効果について焦点を当てた測定を行った。磁気回路モデルの形状はV-H センサの測定結果の差が分かりやすくするために、磁化容易軸が水平方向の一枚板の方向性電磁鋼板をくり抜いた構造とした。このことにより、励磁方向に対して磁化容易軸と磁化困難磁区方向が混在した測定となる。

磁気回路モデルは絶縁被膜付きと絶縁被膜を除去した2つを用意し、方向性電磁鋼板に施された張力を付加された絶縁被膜の影響を評価した。

さらにV-H センサを小型化した、B探針間隔2.5 mm、Hコイルを2 mm×2 mmサイズの極小局所V-H センサを使用して前述の三相変圧器型磁気回路モデルを使用し、方向性電磁鋼板の結晶粒およびスクラッチの影響を評価した。

第 3.2 節 自動分布測定システム

3.2.1 自動分布測定システム構成

V-H センサを小型化したことにより分解能が向上し測定点が多く取れるようになる。このため、安定した V-H センサの位置決め精度と押し付け圧力を得るために、ステッピングモータで駆動するリニアアクチュエータを使用した XYZ ステージにより自動測定システムを構築している[29]。本研究にあたり、従来の自動分布測定システムに不足していた構造および機能を改善した。

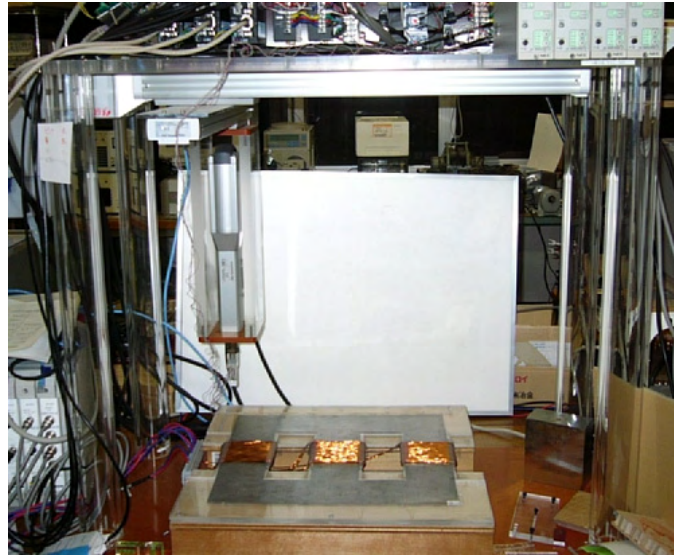
- (1) 自動測定システムのメインフレームの剛性を高めるために XYZ ステージを支えるアクリルの支柱をアルミ引き抜き材に変更した。
- (2) V-H センサの押し付け圧力を一定に制御出来るように Z 軸と V-H センサの間に圧力センサを追加した。

自動分布測定システムの改善前の外観を図 3.2.1(a)に、改善後の外観を図 3.2.1(b)に示す。

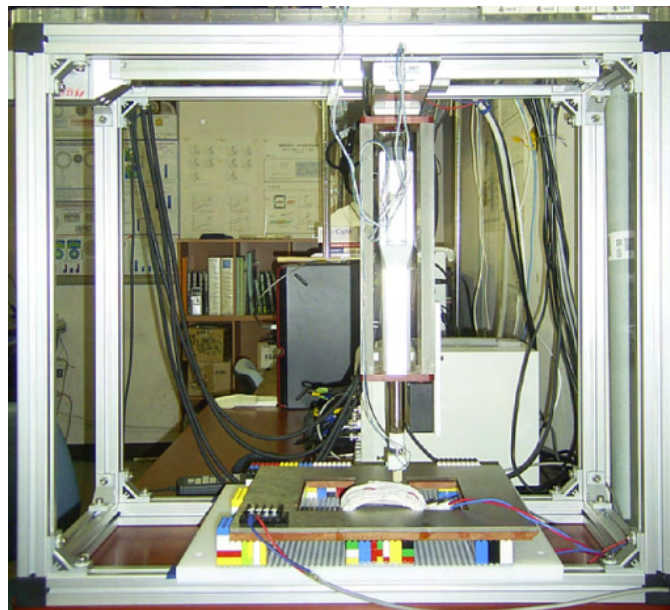
ステッピングモータは、オリエンタルモーター製を使用した。各軸に使用したステッピングモータの性能を表 3.3.1 に示す。X 軸には EZHS6A-50M, Y 軸には EZHS4A-30M, Z 軸には EZHC4A-10M のスライダを使用した。測定範囲は 500 mm×300 mm×100 mm であるが、Z 方向の範囲は装置の天板の高さを変えられるので任意の高さで測定が可能である。この範囲内に測定試料を置き、Z 軸のスライダを高さ方向に移動し設置すれば測定を行うことができる。この XYZ 軸のステッピングモータは制御用 PC 内の PCI スロットに挿入した Interface 社製ボード PCI-7404V を経由して接続されている。

V-H センサの押し付け圧力を一定に制御するために V-H センサ取付け台と Z ステージのシャフト間に圧力センサを取付けた。圧力センサはイマダ製ロードセル LMU-50N を使用し、アンプは FA PLUS を使用した。制御用 PC とのインターフェースは USB である。

V-H センサからの信号はプリアンプ NEC 製 DC AMPLIFIER AL1201 を GAIN 2000 倍で使用した。モデルコア励磁用のパワーアンプは高砂製 BIPOLA POWER SPPLY/AMP BPS 120-5 を使用した。図 3.2.2 に自動分布測定システムの構成図を示す。



(a) 改善前：フレームにアクリルパイプを使用



(b) 改善後：フレームにアルミ引き抜き材を使用

Fig. 3.2.1 Improvement of automatic measuring instrument frame.

図 3.2.1 自動測定機フレームの改良

Table. 3.2.1 Performance of stepper motors.

表 3.2.1 ステッピングモータの特性

	X axis	Y axis	Z axis
Part number	EZHS6A-50M	EZHS4A-30M	EZHC4A-10M
Travel length [mm]	500	300	100
Resolution [mm]	0.01	0.01	0.01
Repeat accuracy[mm]	±0.02	±0.02	±0.02
Magnetic brake	○	○	○

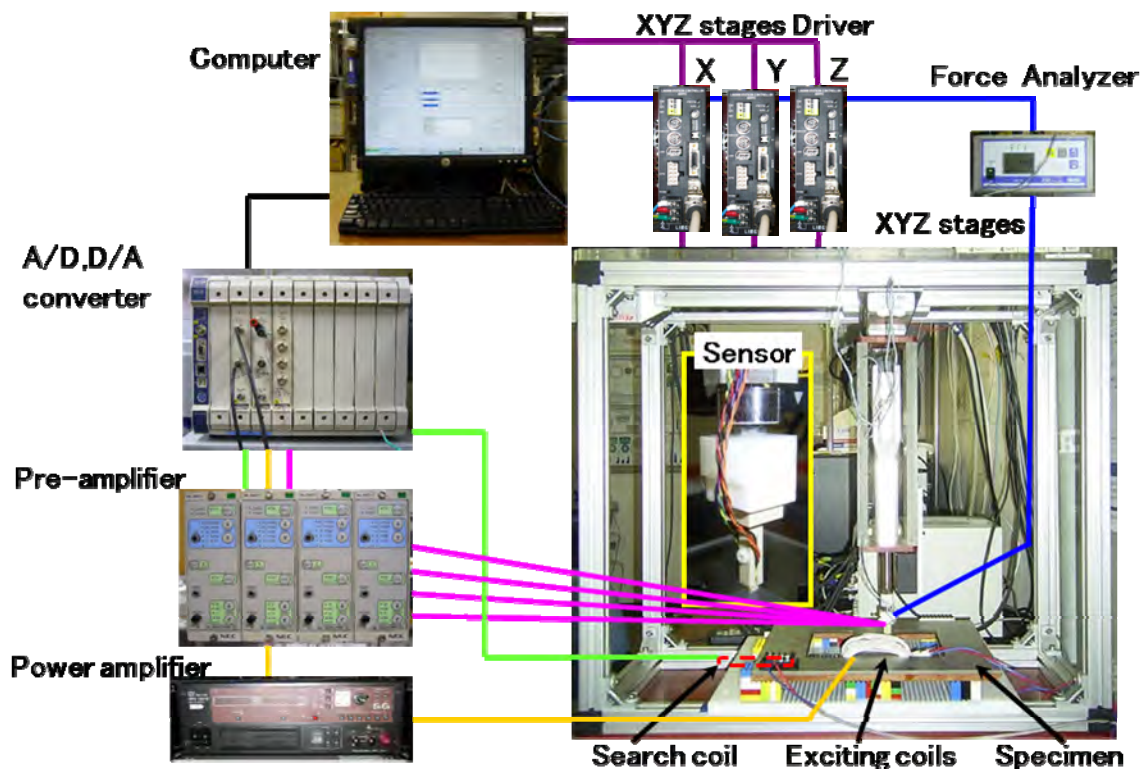


Fig. 3.2.2 Automatic measuring instrument block diagram.

図 3.2.2 自動分布測定器構成図

3.2.2 自動分布測定システムの制御

図 3.2.3 に測定のフローチャート図を示す。測定は、制御用パーソナルコンピュータで励磁波形を作成し、その作成した励磁波形の信号を D/A コンバータに送り、パワーアンプ高砂 BPS120-5 DC-20 kHz を通して変圧器型モデルコアに巻かれた励磁コイルを励磁する。励磁によって発生した磁束 B_m を三相変圧器型磁気回路モデルコアの脚部に巻線した探りコイルで検出し、A/D コンバータ横河電機 WE7275 1 MS/S 14 bit を通し、パーソナルコンピュータで目標の励磁状態に到達するまで制御される。目標の励磁状態になると、XYZ ステージを駆動し、V-H センサを測定ポイントまで動かしセンサを試料まで下ろし、設定した V-H センサの測定圧力をイマダフォースアナライザ経由で接続したロードセルより $5 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ になると、磁束密度および磁界強度の測定を開始する。そして測定データはプリアンプ NEC AL1201 により 2000 倍に増幅して A/D コンバータを通して制御用パーソナルコンピュータに送られて処理される。測定はノイズの影響を除去するため複数回の読み取り後に平均化処理を行う。測定が繰り返され測定点が最終の測定点に到達すると、V-H センサが原点に戻り測定が終了する。

主プログラムは MATLAB で記述され、XYZ ステージのハードウェアに密着した制御部分は C 言語で記述されている。

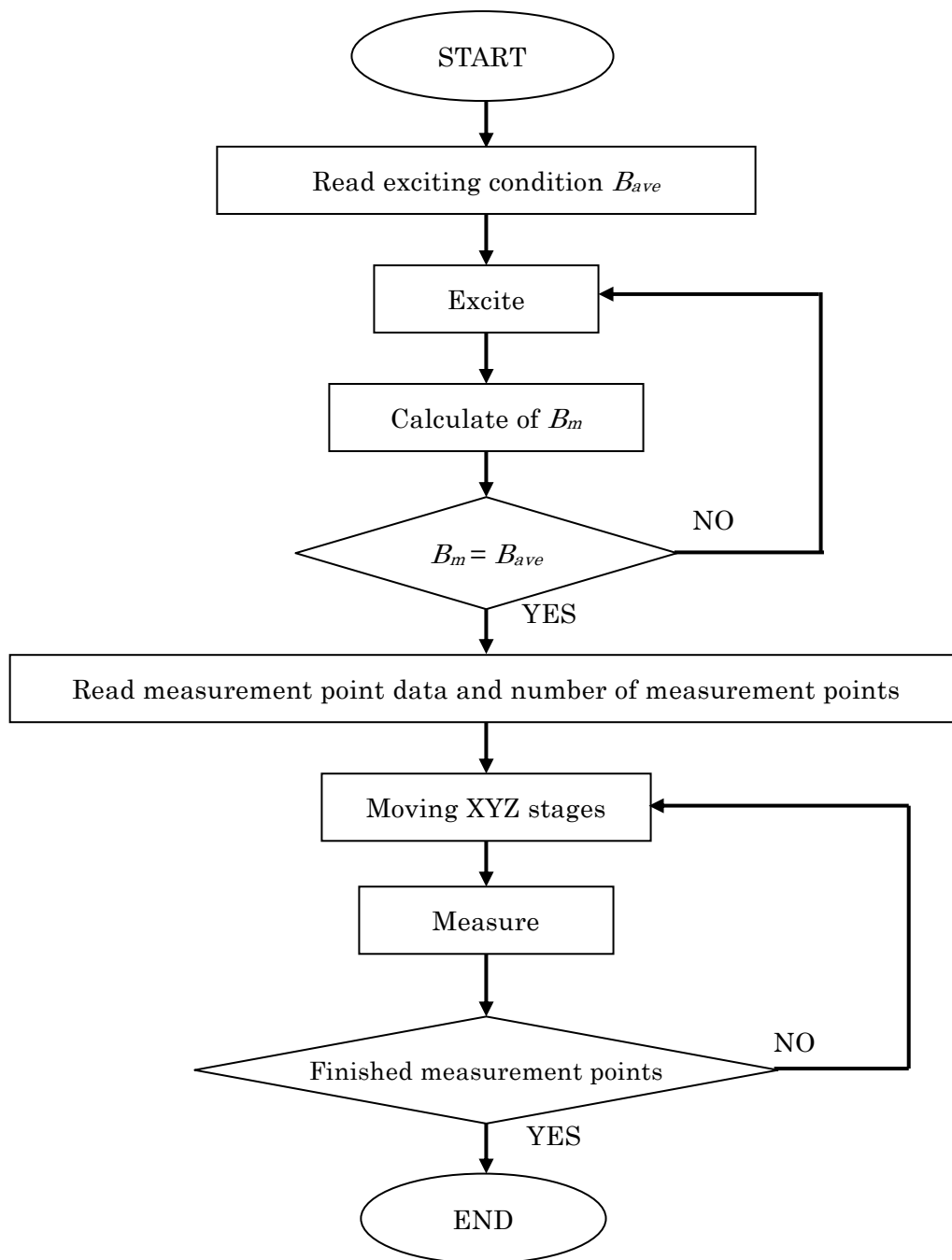


Fig. 3.2.3 Flow chart of measurement system.

図 3.2.3 自動分布測定装置動作フローチャート

第 3.3 節 方向性電磁鋼板の絶縁被膜の効果

本節では、絶縁被膜貫通機能を持った B 探針を搭載した探針間隔が 7 mm で H コイルサイズが 4 mm×4 mm の局所 V-H センサを用いて方向性電磁鋼板の絶縁被膜の影響について評価を行った。

3.3.1 方向性電磁鋼板の絶縁被膜

方向性電磁鋼板の磁区の細分化による磁気損失の改善は鋼板に張力を付加することによっても起こることが知られている。これは張力に伴う材料内部の磁気的エネルギーの変化によって、磁区の幅が細分化された方が全体のエネルギーが低下するためである。方向性電磁鋼板は積層されて磁心材料として使用されたため、積層される鋼板間に電気絶縁性を保持する目的で、鋼板表面にはガラス質の絶縁被膜が施されている。この絶縁被膜は、電磁鋼板の表面に約 800 °C で焼き付けられるが、処理後までの冷却に際して鋼板と絶縁被膜の熱膨張率の差異に起因した張力が地鉄に付加される [39]。

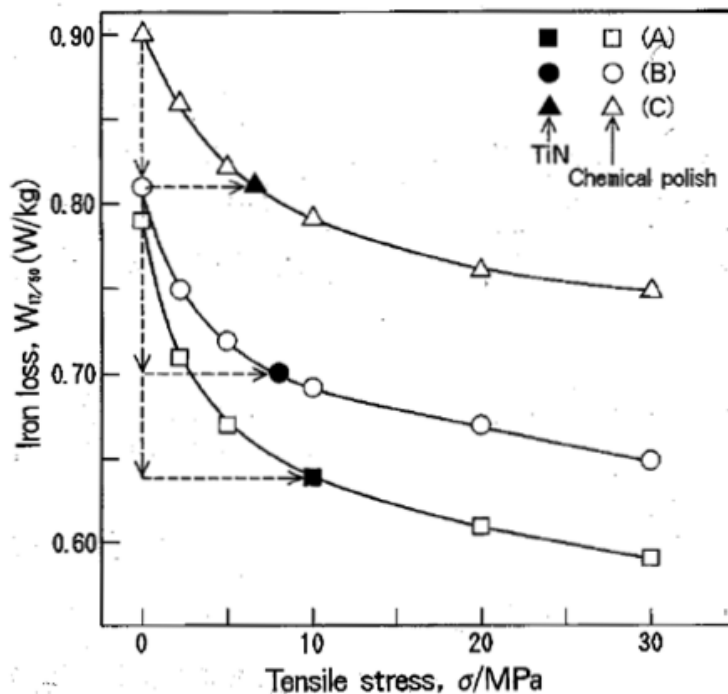


図 3.3.1 電磁鋼板への印加張力と鉄損低減の関係 日本金属学会誌 60(1996)674

Fig. 3.3.1 Relationship on iron loss reduction to tensile stress.

3.3.2 V-H センサの構造 <探針間隔 7mm H コイル幅 4mm>

V-H センサは磁束密度 B を測定する B 探針と磁界強度 H を測定する H コイルにより構成されている。B 探針は V-H センサを電磁鋼板に押し付けるだけで絶縁被膜を貫通する機構を備えている。H コイルは測定分解能を高めるために小型にしたいが、最初に開発した本 V-H センサでは H コイルのセラミックス製巻き枠の加工限界から外形を 4 mm × 4 mm サイズとした。

H コイルのエリアターンは我々の研究室で製作された V-H センサに搭載された 7 mm × 7 mm サイズの H コイルのエリアターンを参考にして極端に小さくならないようにし、巻線のターン数を増やすために H コイルの巻線の導体外径が 0.012 mm と極細のマグネットワイヤを使用した。H コイル巻幅 3.6 mm に 1 層あたり 175 ターンを 2 層とし合計 350 ターンを巻線している。巻線した H コイルはエリアターンの校正がしやすいように、H コイル単体で取り扱えるように、PEEK 材を使用したハウジングに入れリード線をハンダ付けしている。PEEK 材は耐熱温度が高くハンダ付けを行っても損傷せず、また、精密な加工に耐えるエンジニアリングプラスチックである。

探針の間隔は H コイルの形状に合わせて 7 mm とした。H コイルと探針を組み込むベース部分は PEEK 材を使用した。また、探針からの引出線と試料表面の面積が測定誤差にならないようにフレキシブル基板に引出パターンを形成しフレキシブル基板の厚みである 0.035 mm で試料に接している。表 3.3.1 に V-H センサの仕様を示し、図 3.3.1 に V-H センサの外観を示す。図 3.3.2 に探針の動作状況を示し、図 3.3.3 に V-H センサの構造を示す[52,53]。

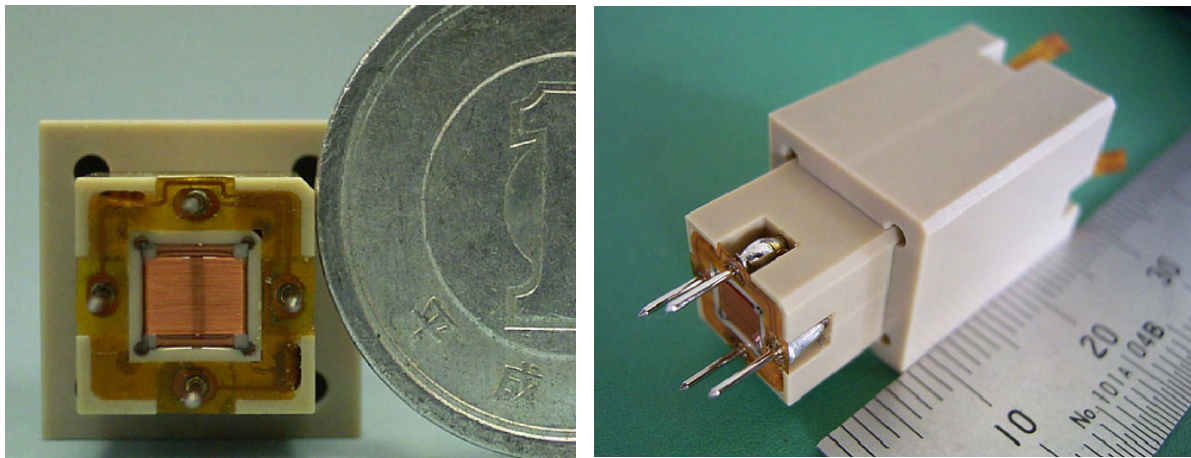


Fig. 3.3.1 Appearance of V-H sensor.

図 3.3.1 4 mm×4 mm サイズ V-H センサ外観

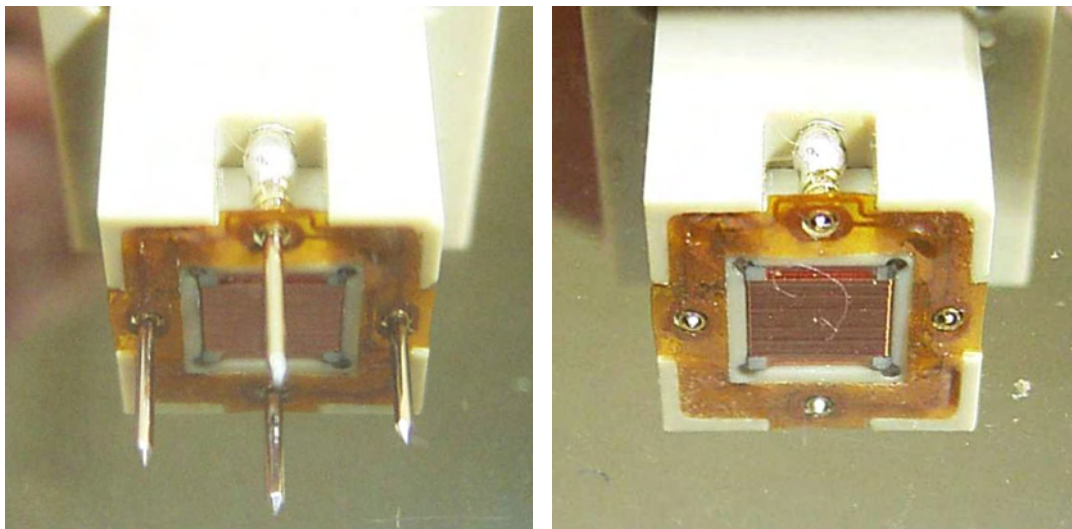


Fig. 3.3.2 Diagram of operation by B needles.

図 3.3.2 B 探針の動作

Table. 3.3.1 Specification of 4 mm×4 mm V-H sensor.

表 3.3.1 4 mm×4 mm サイズ V-H センサの仕様

H-coil	Size [mm]	4×4
	Number of turns [turns]	350
	Area turn(Hx) [cm ² ·turn]	5.25
	Area turn(Hy) [cm ² ·turn]	7.91
B-needle	Distance [mm]	7

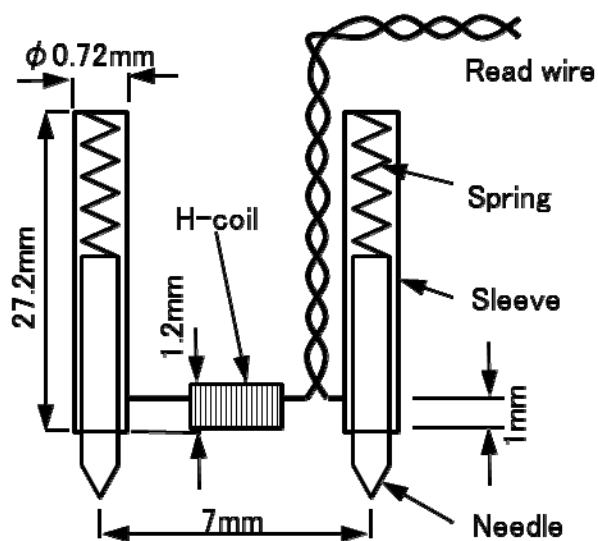


Fig. 3.3.3 Structure of the 4 mm×4 mm V-H sensor.

図 3.3.3 4 mm×4 mm V-H センサ構造

3.3.3 測定モデルと測定条件

通常、変圧器に用いられる方向性電磁鋼板は圧延方向と圧延直角方向では磁気特性が大きく異なる材料である。そのため、磁束の方向に圧延方向が向くようにセグメントを積層して形成される。本測定ではセンサの精度などを評価する目的のために、あえて磁気特性の差がわかりやすい様に、方向性電磁鋼板(23ZDK90)の一枚板をくりぬいた測定モデル形状を採用した。今回は電磁鋼板の絶縁被膜の影響による磁気測定分布の変化を比較するために、最上部の1枚の電磁鋼板の表および裏の絶縁被膜を取り除いた測定モデルも用意した。

三相変圧器型磁気回路モデルコアの外形は400 mm×350 mm、窓寸法は80 mm×190 mmで、板厚0.23 mmの電磁鋼板を27枚積層した。三相変圧器型磁気回路モデルコアの形状を図3.3.4に示す。

測定条件は、パーソナルコンピュータで50 Hzの正弦波励磁波形を作成し、D/Aコンバータ、パワーアンプを通して励磁を行い、測定試料に巻いた探りコイル部の磁束密度の平均値 B_{ave} が0.5 Tとなるように制御して測定を行った。

測定点の位置を図3.3.5および図3.3.6に示す。測定範囲はモデル形状の対称性を考慮して、三相変圧器型磁気回路モデルコアの下半分を測定し、X、Y方向ともに2 mmの間隔で測定を行い、合計9272点の測定を行った。

励磁コイルは50ターン巻線している。巻線の手間を短縮するために50極コネクタを使用した励磁コイルを製作し脱着を容易できる構造とした。

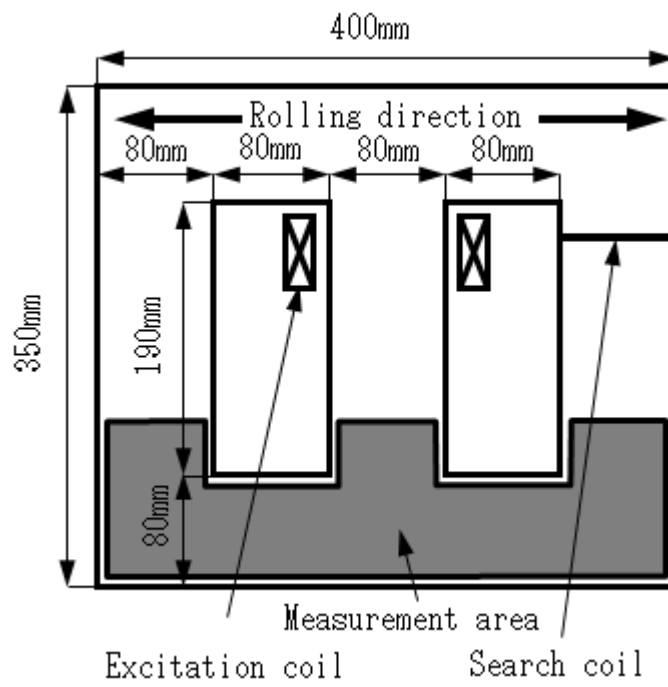


Fig. 3.3.4 Magnetic circuit model and measurement area.

図 3.3.4 磁気回路モデルと測定領域

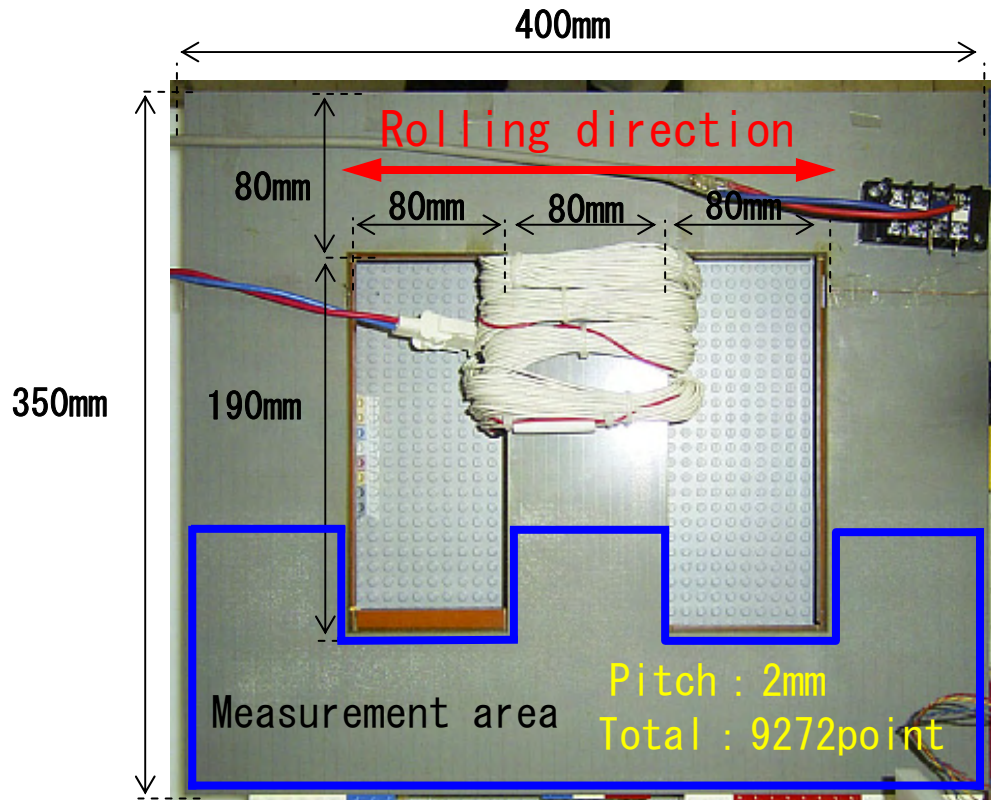


Fig. 3.3.5 Magnetic circuit model and measurement area with coating.

図 3.3.5 磁気回路モデル外観と測定領域

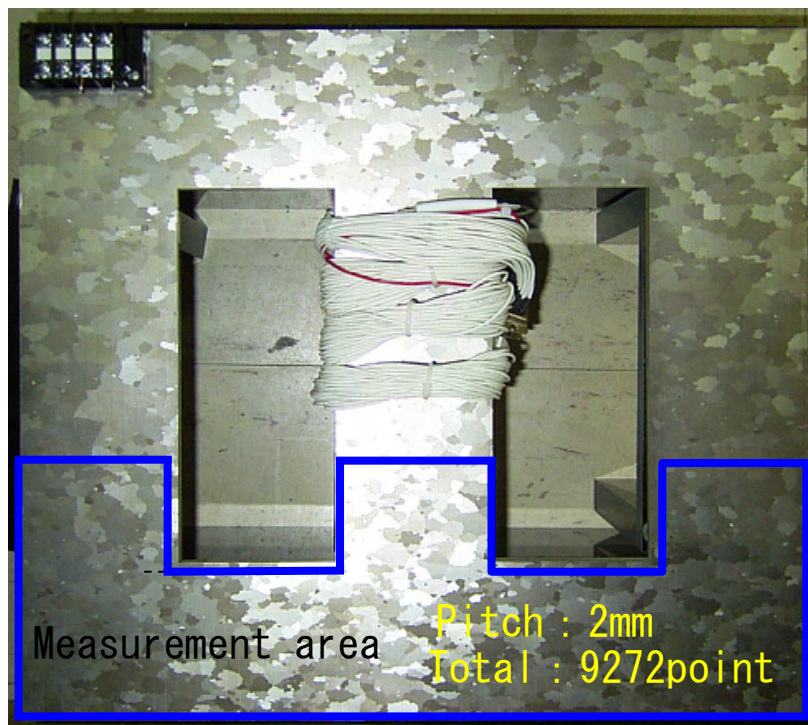


Fig. 3.3.6 Magnetic circuit model and measurement area without coating.

図 3.3.6 磁気回路モデルと測定領域

3.3.4 測定結果

前節で述べた通り，絶縁被膜が〈あり〉と〈なし〉の磁気回路モデルの測定を行った。それぞれの測定結果を以下に示す。

電磁鋼板の絶縁被膜〈あり〉

図 3.3.7(a)：最大磁束密度分布

図 3.3.7(b)：最大磁界強度分布

図 3.3.7(c)：鉄損分布

図 3.3.8： B_x ・ B_y , H_x ・ H_y 軌跡

図 3.3.9： H_x ・ B_x , H_y ・ B_y ヒステリシスループ

図 3.3.10：磁束密度の瞬時値分布

図 3.3.11：磁界強度の瞬時値分布

電磁鋼板の絶縁被膜〈なし〉

図 3.3.12(a)：最大磁束密度分布

図 3.3.12(b)：最大磁界強度分布

図 3.3.12(c)：鉄損分布

図 3.3.13： B_x ・ B_y , H_x ・ H_y 軌跡

図 3.3.14： H_x ・ B_x , H_y ・ B_y ヒステリシスループ

図 3.3.15：磁束密度の瞬時値分布

図 3.3.16：磁界強度の瞬時値分布

最大磁束密度は式(2.4.1)により，最大磁界強度は式(2.4.2)により，鉄損は式(2.4.3)により与えられる。

$$B_{\max} = \max\left(\sqrt{B_x^2 + B_y^2}\right) \quad (2.4.1)$$

$$H_{\max} = \max\left(\sqrt{H_x^2 + H_y^2}\right) \quad (2.4.2)$$

鉄損は(2.4.3)式により与えられる。

$$P_t = \frac{1}{\rho T} \int_0^T (H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt}) dt \quad (2.4.3)$$

ただし、 T は励磁周期、 ρ は材料密度である。 P_t は全鉄損を表し、各方向のヒステリシスループの面積の和から得られる。

始めに方向性電磁鋼板の絶縁被膜が<あり>の結果を示す。図 3.3.7(a)に示す最大磁束密度分布より、磁化容易軸方向に大きな磁束密度が発生していることがわかる。磁束は磁路長が最短となるように通ろうとするため、変圧器の内側に大きな磁束密度が発生している、磁化困難軸方向では最短の磁路を取るよりも、磁気抵抗が下がるためいったん外側に迂回するような分布となっている。図 3.3.7(b)に示す最大磁界強度分布を見ると、磁束密度とは反対に磁化困難軸方向に磁束が通る場所の磁界が大きくなっている。これは、方向性電磁鋼板の圧延方向と圧延直角方向の比透磁率が異なるためであり、このモデルでは方向性電磁鋼板を打ち抜いた形状であるため、磁路中に圧延方向と直角方向が混在するためである。図 3.3.7(c)に示す鉄損の分布を見ると、困難軸で高い鉄損が存在している。絶縁被膜を取り除くと磁束密度分布は磁化容易軸に沿った密度の高い部分に均一性が失われており絶縁被膜により付加された張力がなくなったことで方向性が低下したためと思われる。また、困難軸の磁界強度は低下している。そして、鉄損は増加していることがわかる。

図 3.3.8 に示す磁束密度 (B_x ・ B_y : 赤線) と磁界強度 (H_x ・ H_y : 青線) の軌跡より。 B_x ・ B_y 軌跡を見ると、変圧器のT接合中央部及び左右のコーナ部のような磁束の曲がり始めるところでは軸比の大きな回転磁束が発生しているのがわかる。 H_x ・ H_y 軌跡の分布を見ると、全体的に磁化困難軸方向に大きな磁界強度が発生しており、波形は回転磁束密度分布と大きく異なっている。鉄損分布と見比べてみると、回転磁束が発生している点と、損失の高い部分が似たような分布である。このことから、回転磁束が発生している部分に高い鉄損が生じることが推測できる。

図 3.3.9 に示す H_x ・ B_x (赤線), H_y ・ B_y (青線) のヒステリシスループより。磁化困難軸方向に面積の広いヒステリシスループが集まっているので、高い鉄損が生じていることがわかる。鉄損は、 H_x ・ B_x ヒステリシスループと H_y ・ B_y ヒステリシスループの面積の和で得られる。

図 3.3.10(a), (b)に磁束密度の瞬時値分布を示し、図 3.3.11(a), (b)に磁界強度の瞬時値分布を示す。これらの図は、1/8 周期ごとの条件で表示している。時間変化に伴い磁束密度と磁界強度の大きさが変化していく様子を確認することができる。

続いて方向性電磁鋼板の絶縁被膜が<なし>の結果を示す。図 3.3.12(a)に示す最大磁束密度分布より、磁気回路モデル窓下部の磁束密度が高い部分において、絶縁被膜ありでは磁気回路モデル窓に平行して分布が現れていたが、絶縁被膜なしでは乱れた分布となっていることがわかる。また、磁化困難軸部分では絶縁被膜ありに比べて磁束密度が高いことがわかる。図

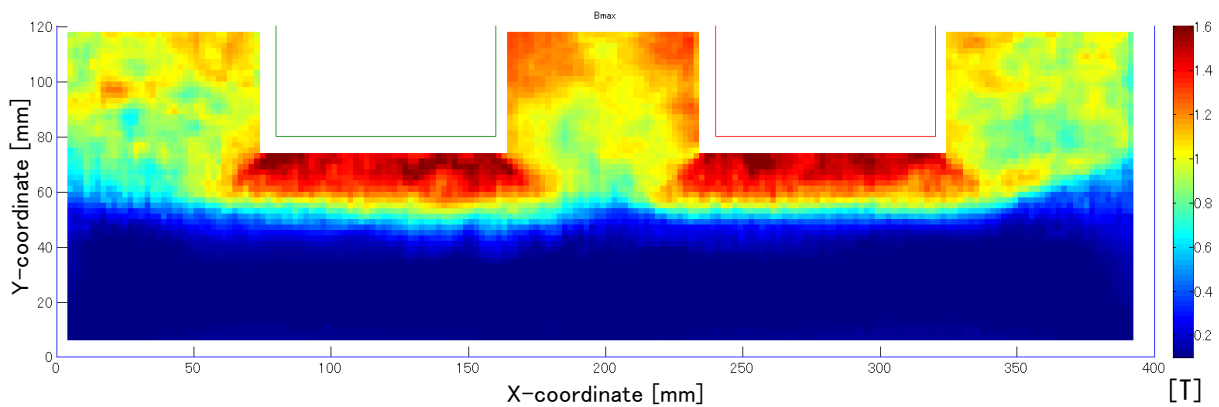
3.3.12(b)に示す最大磁界強度分布より，絶縁被膜ありに比べて全体的に低い磁界強度となっていることがわかる。図 3.3.12(c)に示す鉄損分布より，絶縁被膜ありでは磁化困難軸部分に大きな鉄損が分布していたが，絶縁被膜なしでは，磁気回路モデル窓下部にも大きな鉄損が見られ，また，全体的に鉄損が高いことがわかる。絶縁被膜ありと絶縁被膜なしの鉄損を比較するために，測定したすべての点の鉄損を足して平均を取り，表にしたものを表 3.3.1 に示す。結果を見ると，絶縁被膜ありの磁気回路モデルの鉄損が低い結果となった。

絶縁被膜貫通機能を備えた，探針間隔 7mm，H コイル幅 4mm の局所 V-H センサを使用して，従来探針法で測定が困難であった強固な張力被膜を施された方向性電磁鋼板の変圧器型磁気回路モデルの磁気特性分布を測定することにより，方向性電磁鋼板本来の磁気特性を測定可能となった。

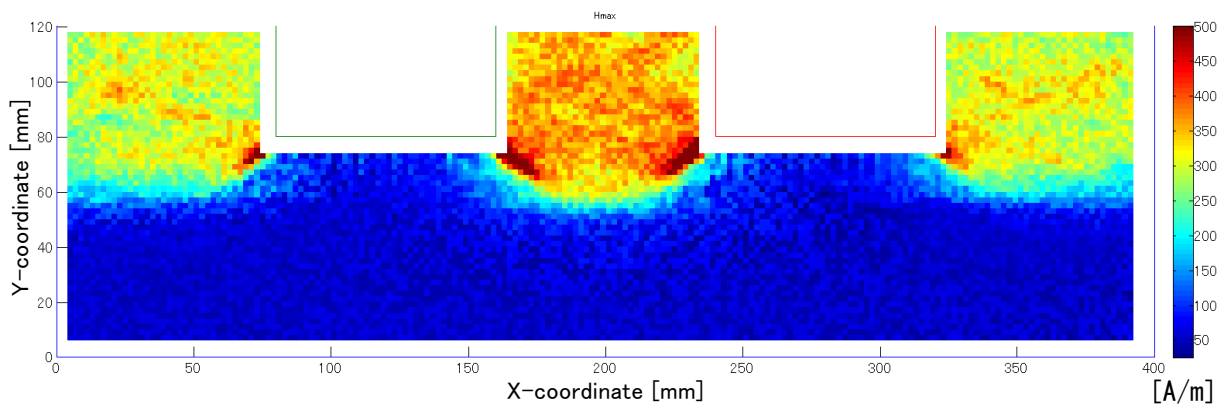
表 3.3.1 絶縁被膜ありなしの平均鉄損

Table.3.3.1 Average of iron loss.

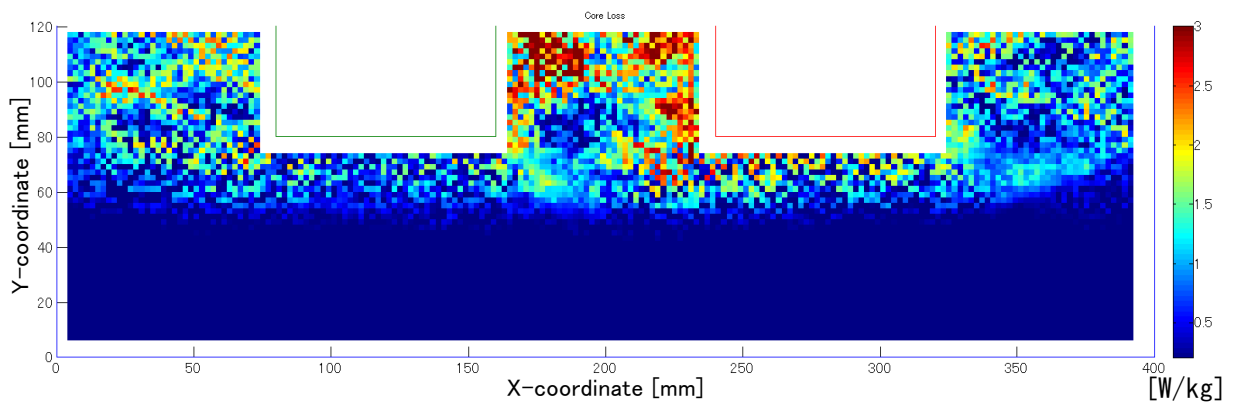
Condition	Average iron loss [W/kg]
With coating	0.5462
Without coating	0.7958



(a) Distribution of the maximum flux density with coating



(b) Distribution of the maximum field strength with coating



(c) Distribution of the core loss with coating

Fig.3.3.7 Distributions of the maximum flux density, the maximum field strength, and the core loss in the model core with coating.

図 3.3.7 絶縁被膜付きモデルコアの磁気特性分布

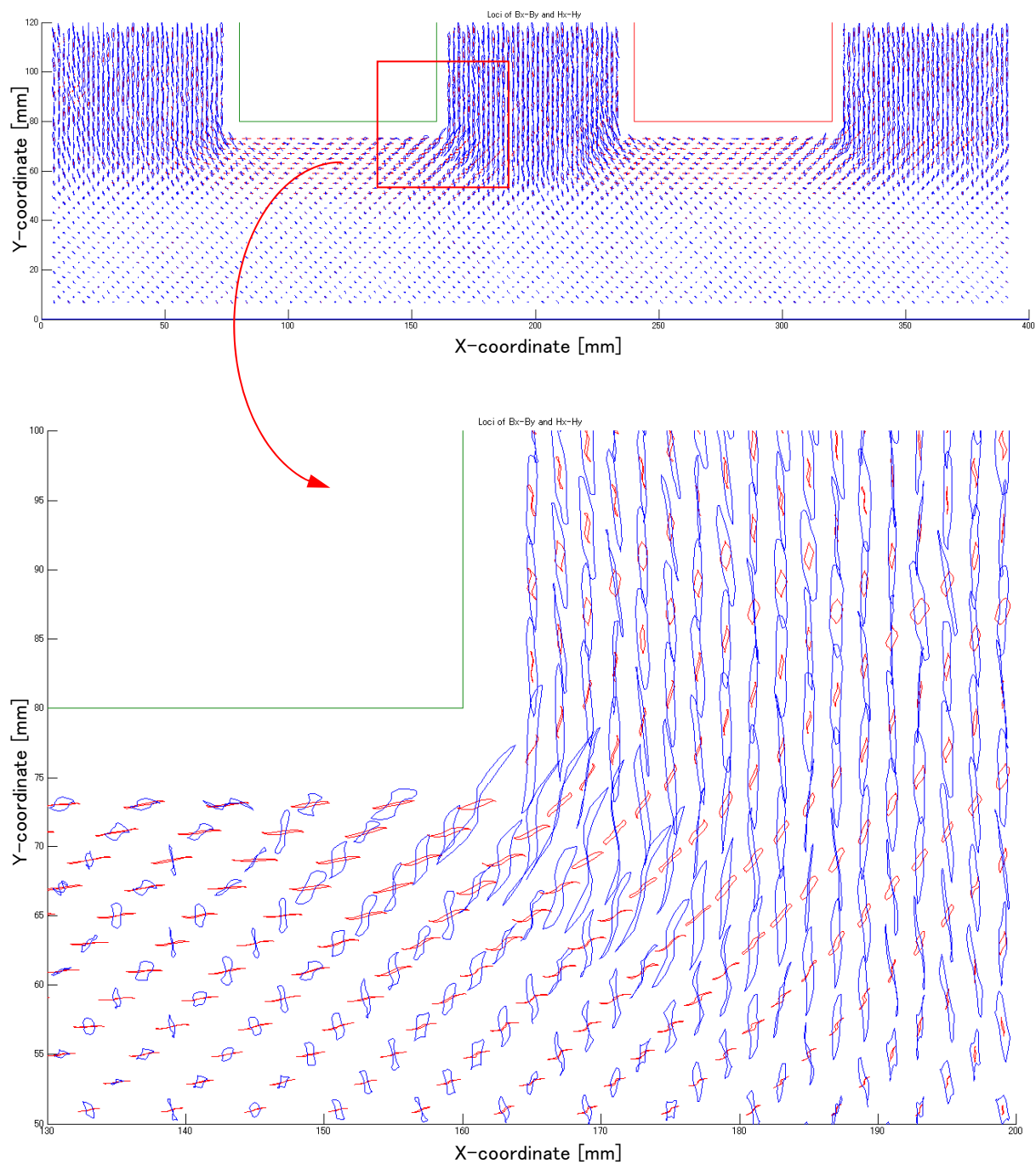


Fig. 3.3.8 Loci of B_x-B_y (Red) and H_x-H_y (Blue) with coating.

図 3.3.8 軌跡 B_x-B_y (赤) and H_x-H_y (青)絶縁被膜あり

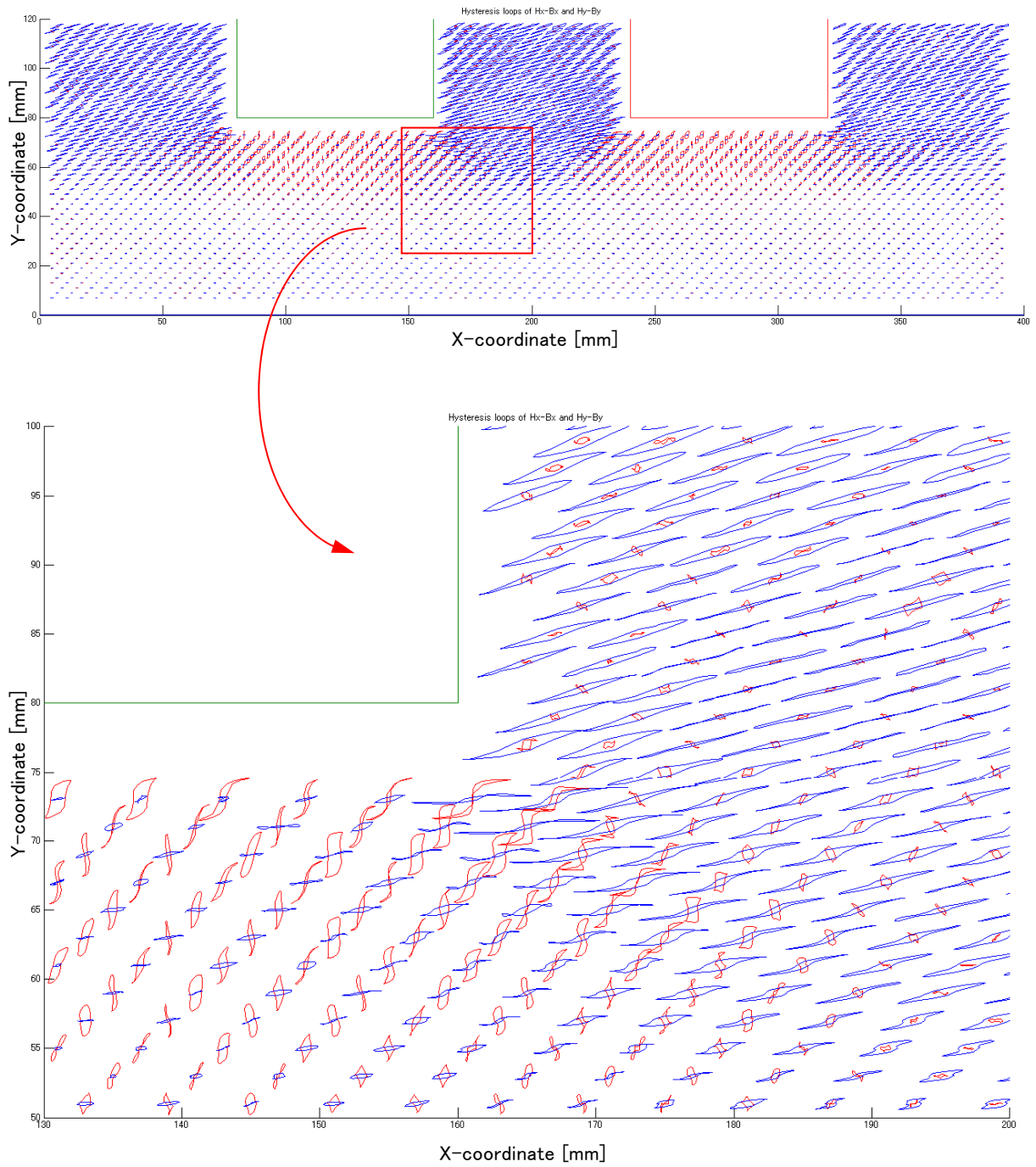


Fig. 3.3.9 Distributions of the hysteresis loops of $Hx-Bx$ (Red) and $Hy-By$ (Blue) with coating.

図 3.3.9 ヒステリシスループ $Bx-By$ (赤) and $Hx-Hy$ (青) (絶縁被膜あり)

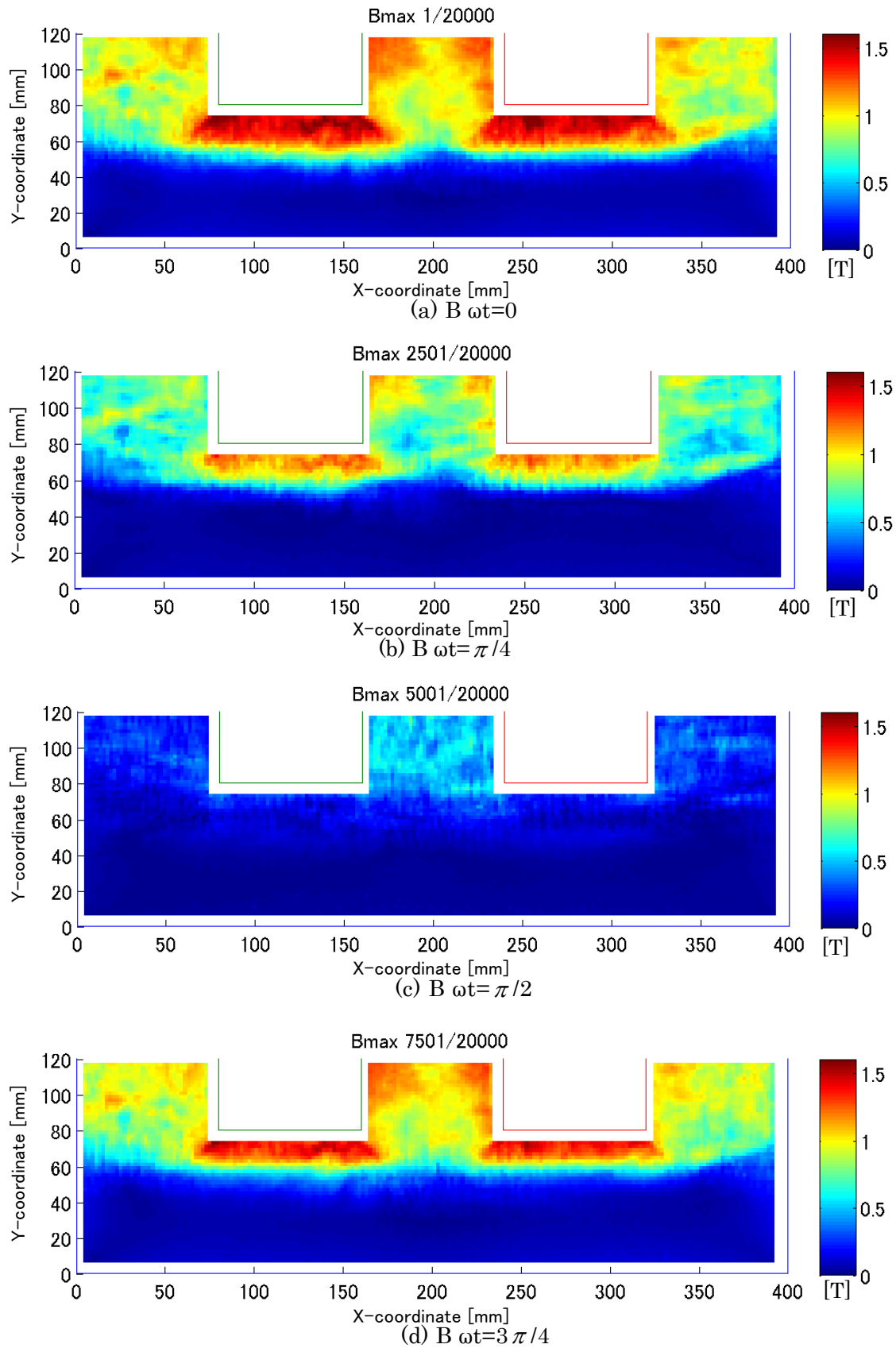


Fig.3.3.10(a) Time variation of distributions of the magnetic flux density.

図 3.3.10(a)磁束密度分布の時間変化 (絶縁被膜あり)

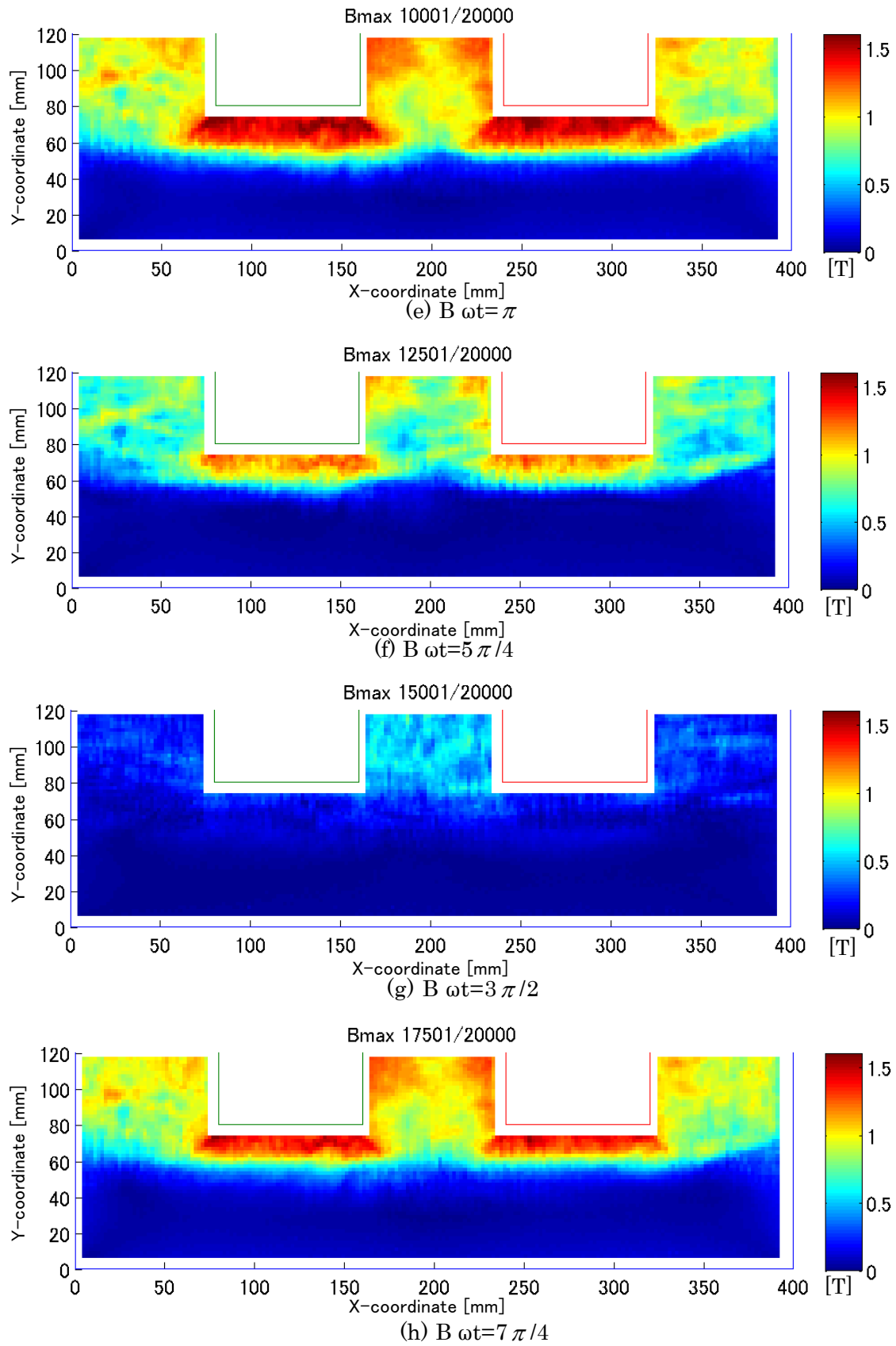


Fig.3.3.10(b) Time variation of distributions of the magnetic flux density.

図 3.3.10(b)磁束密度分布の時間変化 (絶縁被膜あり)

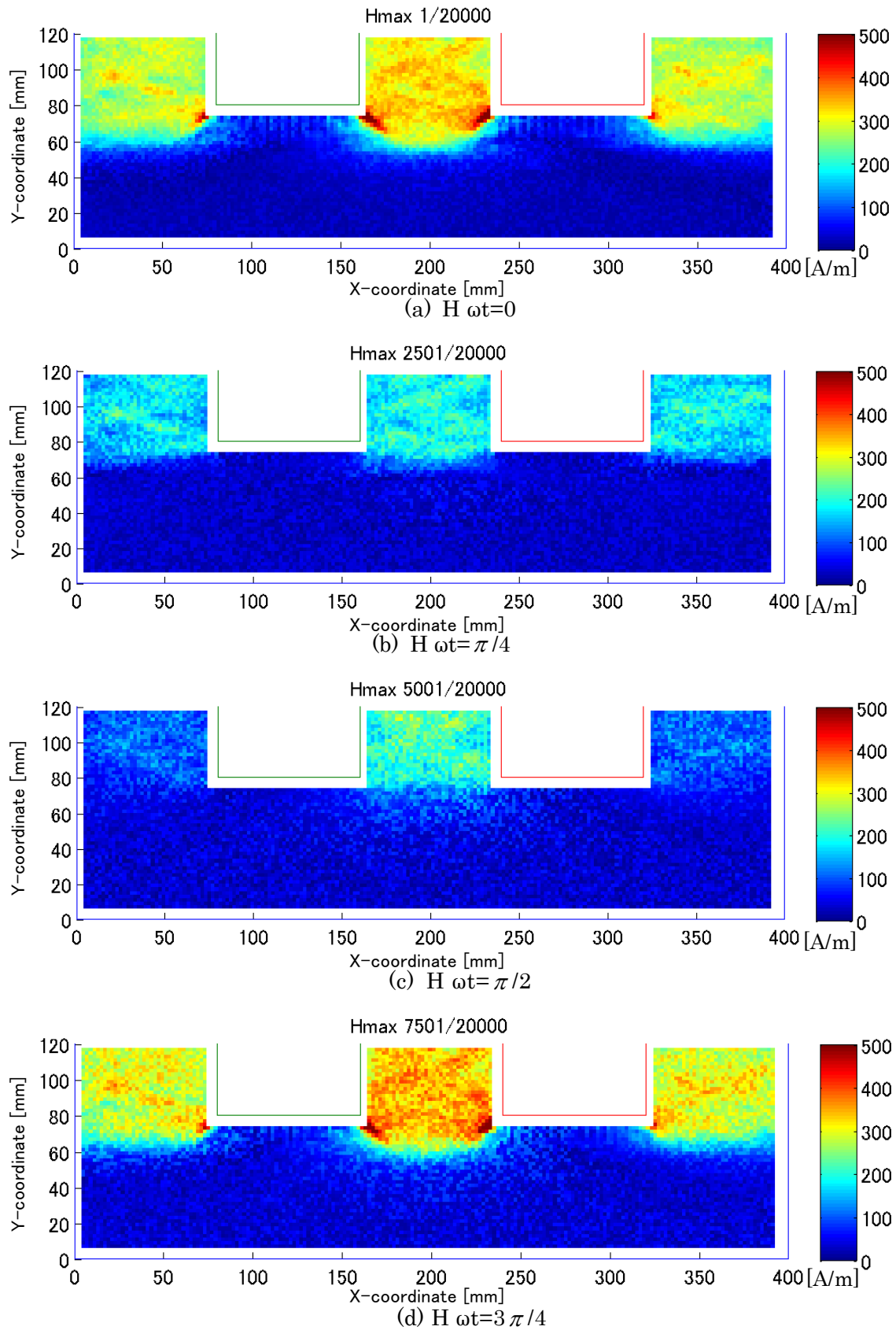


Fig.3.3.11(a) Time variation of distributions of the magnetic field strength.

図 3.3.11(a)磁界強度分布の時間変化 (絶縁被膜あり)

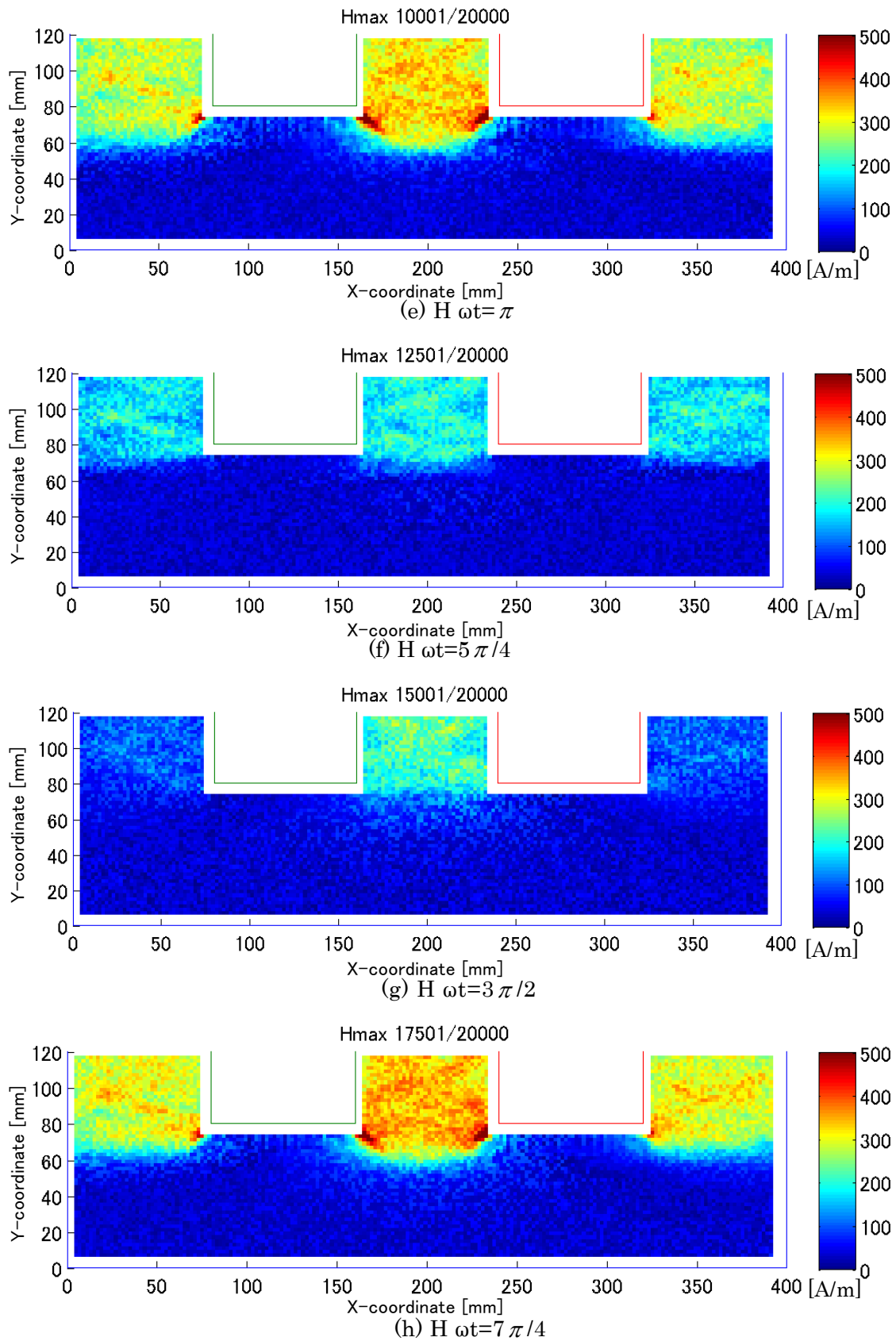
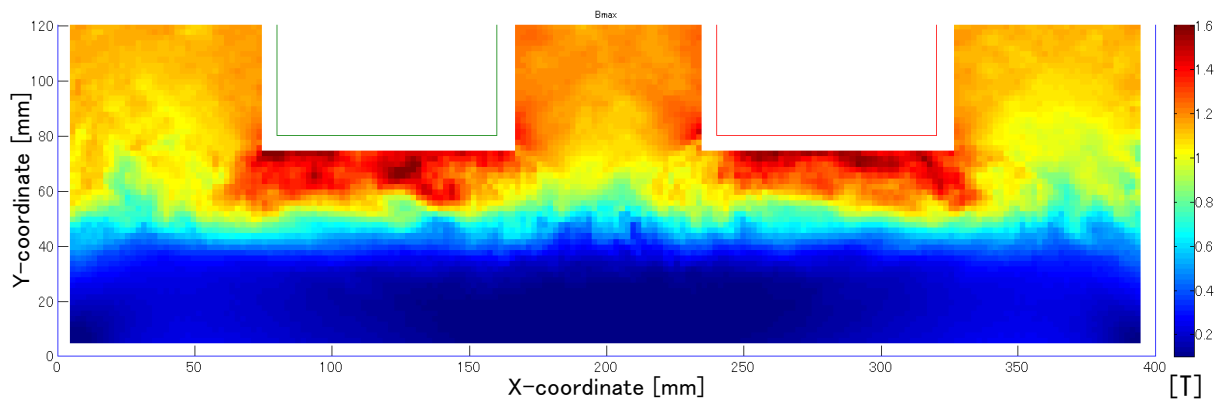
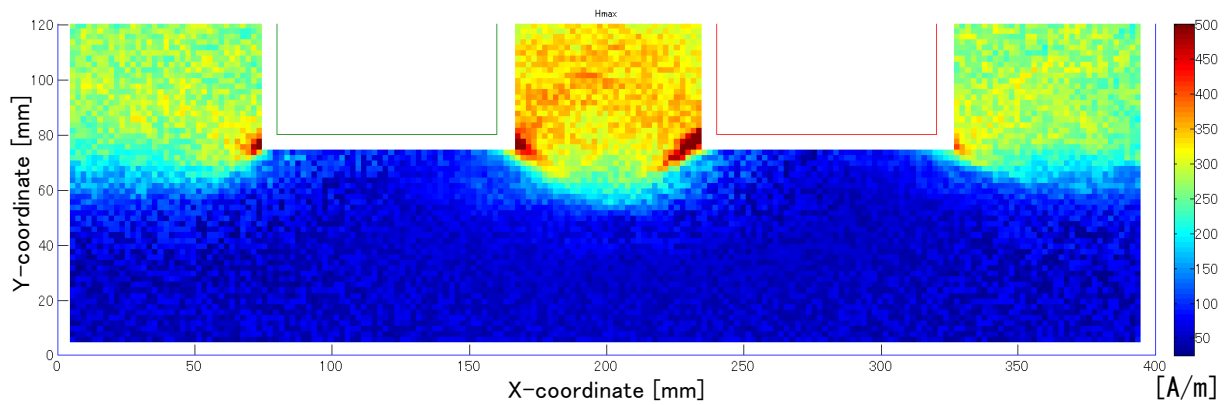


Fig.3.3.11(b) Time variation of distributions of the magnetic field strength.

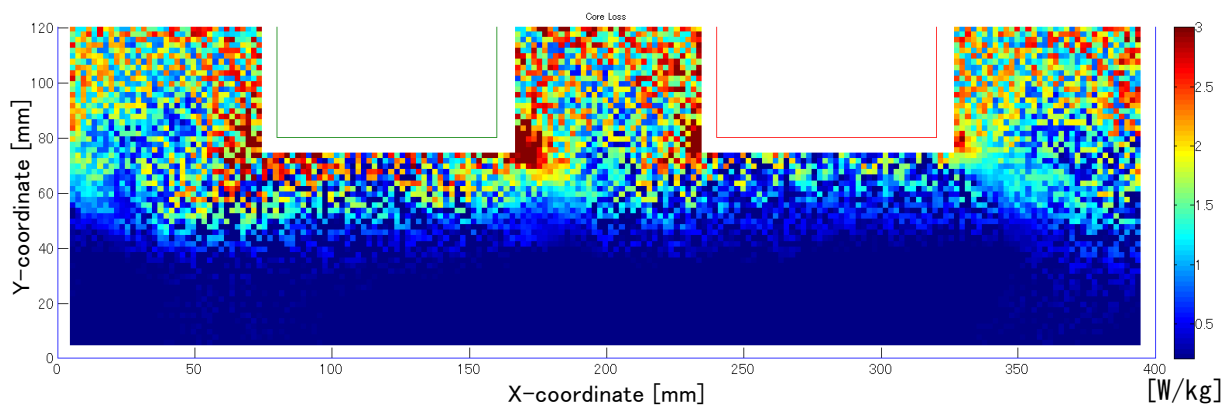
図 3.3.11(b)磁界強度分布の時間変化 (絶縁被膜あり)



(a) Distribution of the maximum flux density without coating



(b) Distribution of the maximum field strength without coating



(c) Distribution of the core loss with coating

Fig.3.3.12 Distributions of the maximum flux density, the maximum field strength, and the core loss in the model core without coating.

図 3.3.12 絶縁被膜なしのモデルコアの磁気特性分布

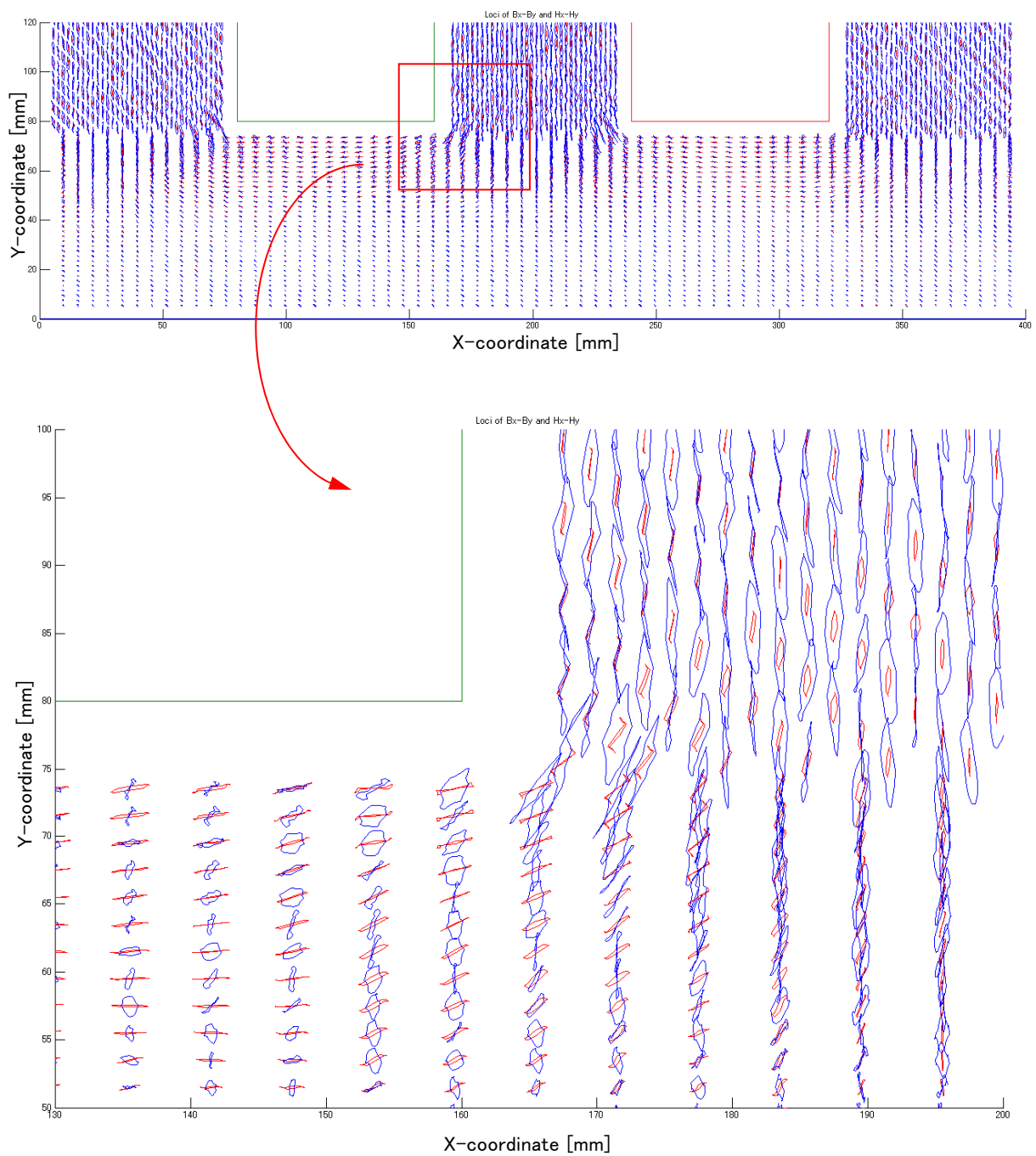


Fig. 3.3.13 Loci of B_x - B_y (Red) and H_x - H_y (Blue) without coating.

図 3.3.13 Loci of B_x - B_y (Red) and H_x - H_y (Blue) (絶縁被膜なし)

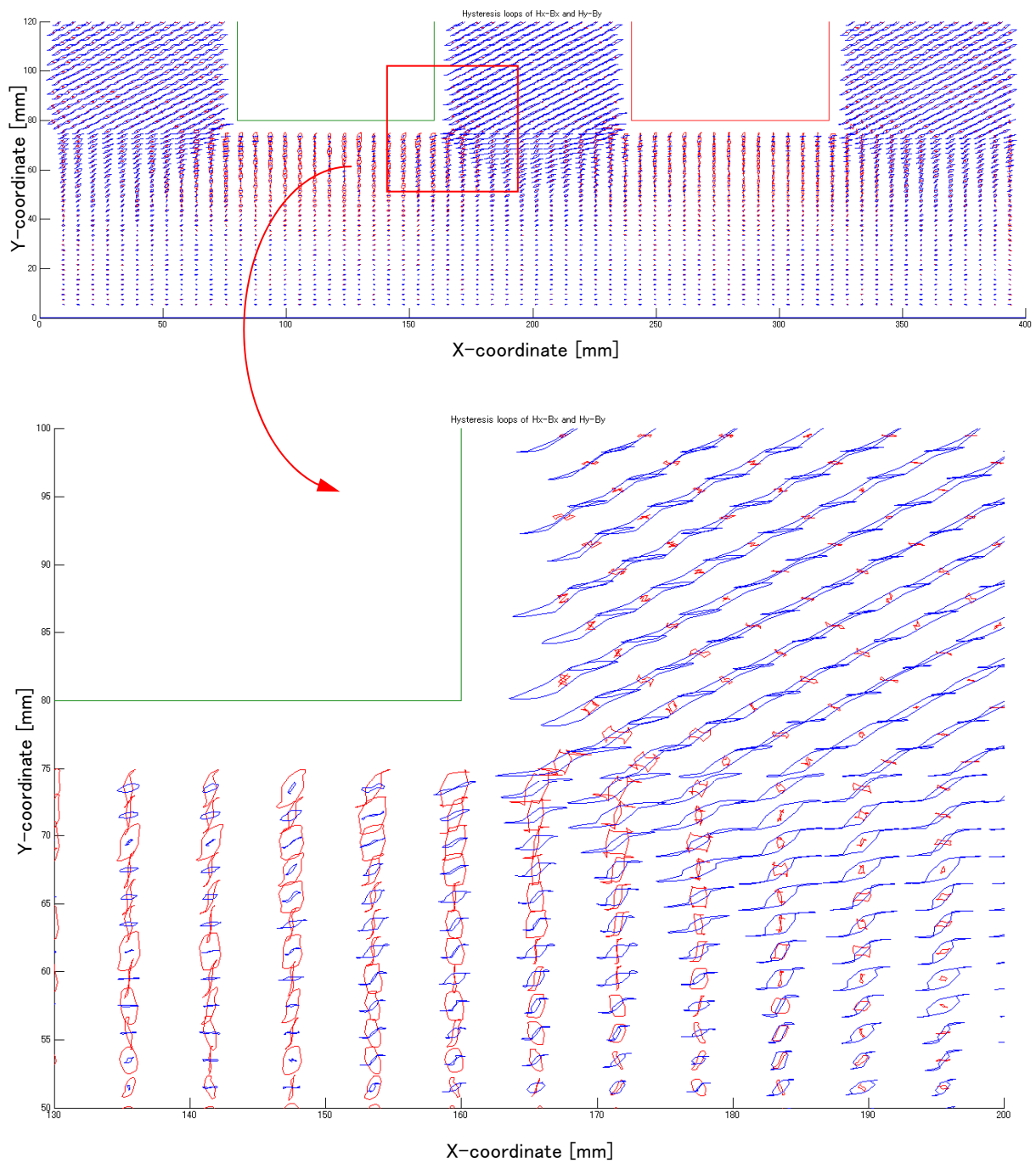


Fig. 3.3.14 Distributions of the hysteresis loops of H_x-B_x (Red) and H_y-B_y (Blue) without coating.

図 3.3.14 Distributions of the hysteresis loops of H_x-B_x (Red) and H_y-B_y (Blue) (絶縁被膜なし)

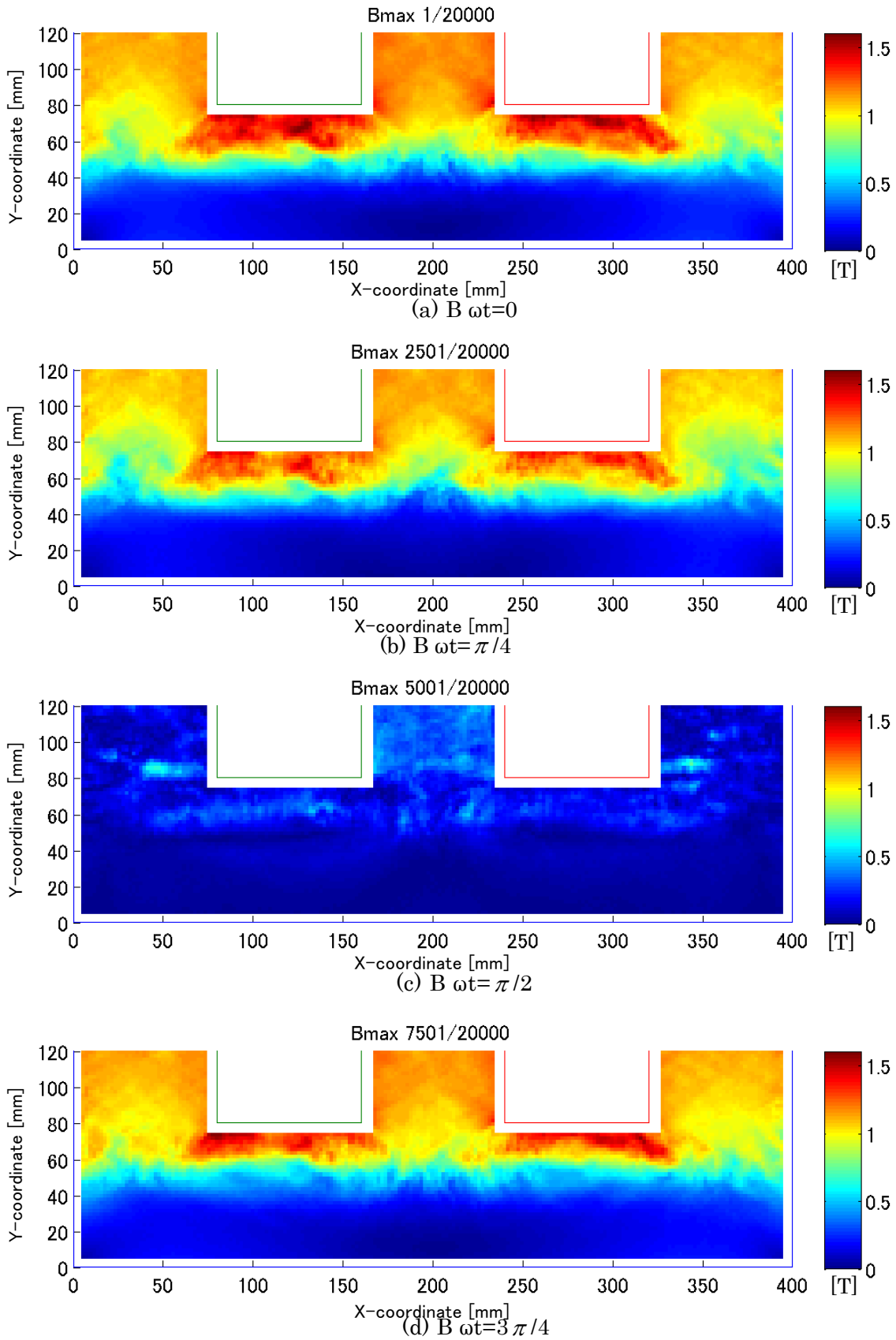


Fig.3.3.14(a) Time variation of distributions of the magnetic flux density.

図 3.3.14(a)磁束密度分布の時間変化 (絶縁被膜なし)

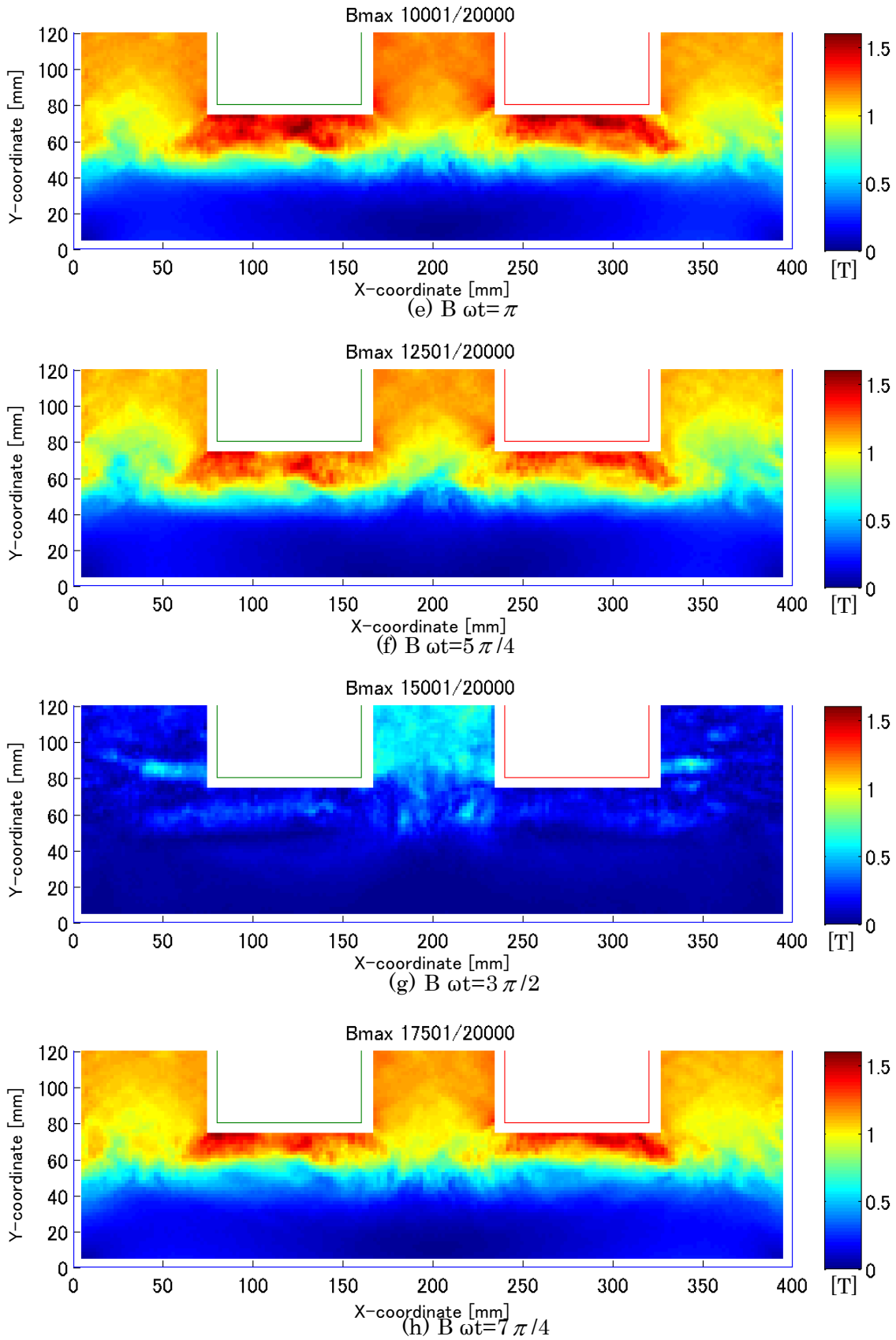


Fig.3.3.14(b) Time variation of distributions of the magnetic flux density.

図 3.3.14(b)磁束密度分布の時間変化 (絶縁被膜なし)

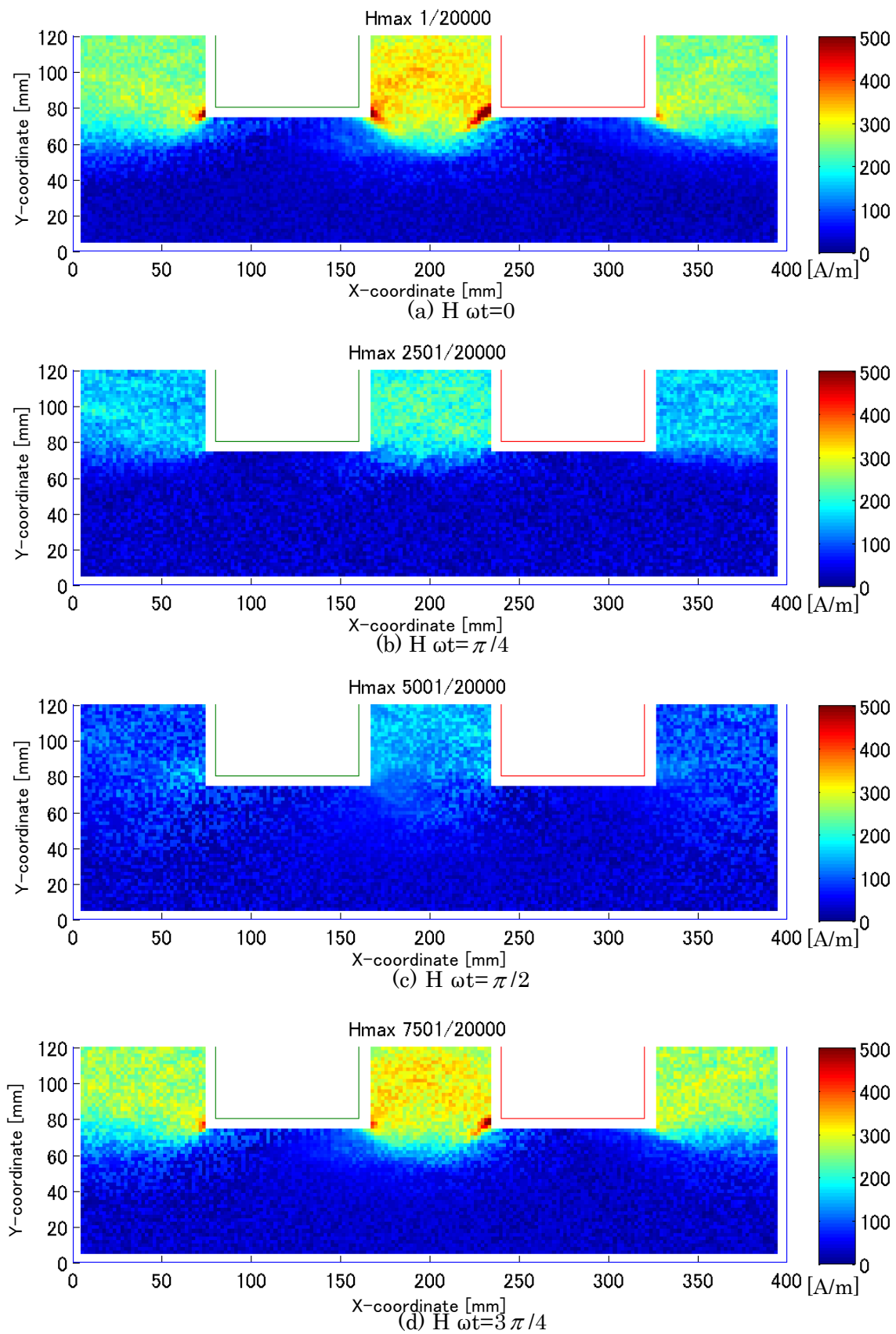


Fig.3.3.16(a) Time variation of distributions of the magnetic field strength.

図 3.3.16(a)磁界強度分布の時間変化（絶縁被膜なし）

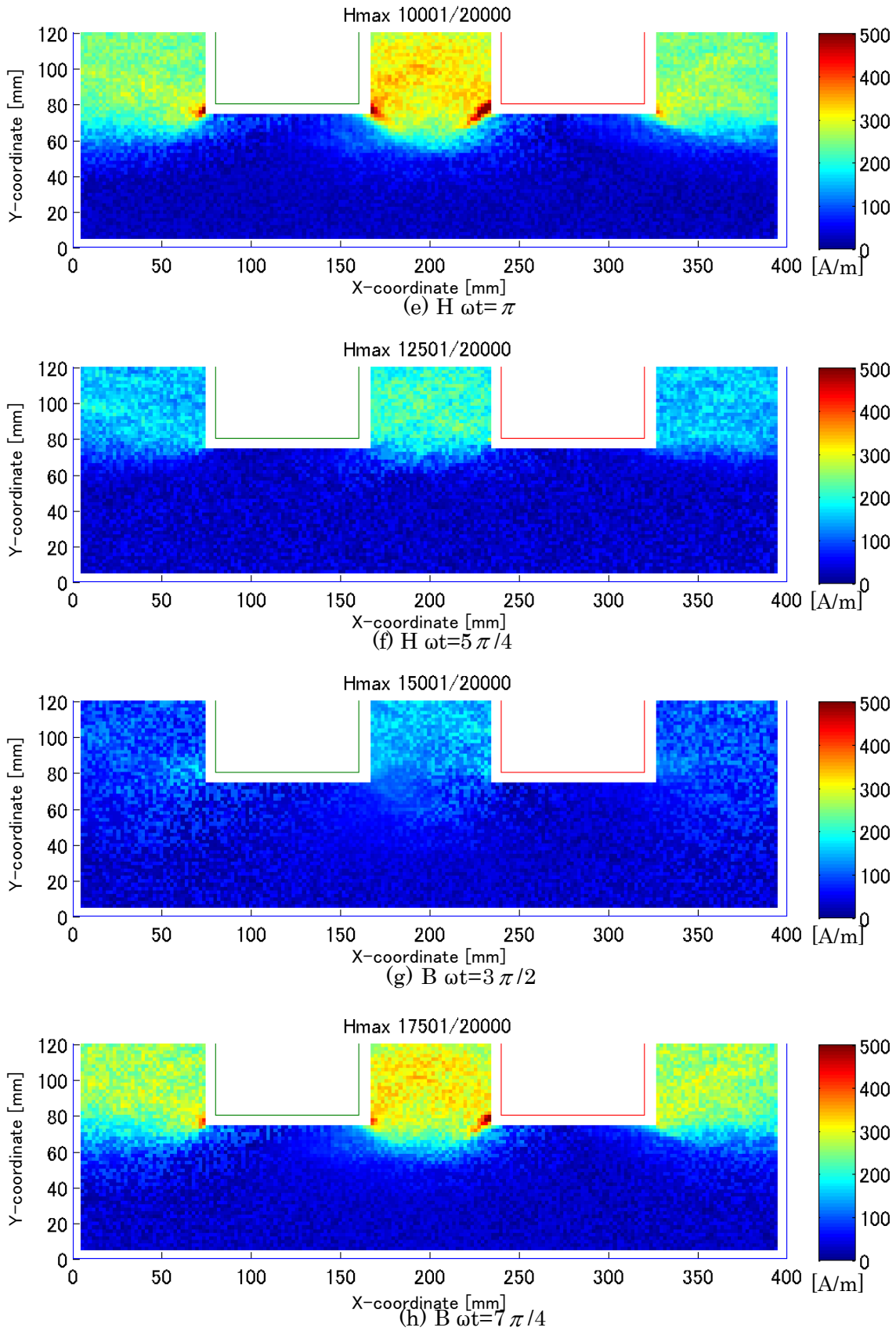


Fig.3.3.16(b) Time variation of distributions of the magnetic field strength.

図 3.3.16(b)磁界強度分布の時間変化 (絶縁被膜なし)

第 3.4 節 方向性電磁鋼板のスクラッチの効果

本節では、B 探針間隔が 2.5 mm で H コイルサイズが 2 mm×2 mm の極小局所 V-H センサを用いて方向性電磁鋼板に施されたスクラッチおよび結晶粒の影響について評価を行った。

3.4.1 方向性電磁鋼板のスクラッチの効果

方向性電磁鋼板の結晶レベルでの最小単位はサイコロ状の体心立方格子であり、これが規則正しく整列して結晶粒を構成している。方向性電磁鋼板の製品は板厚約 0.35 mm、板幅約 1 m でトン・オーダーの重量を持つコイル形状をなしており、直径約 1 cm の結晶粒の集合体である。方向性電磁鋼板の結晶を磁場の中に置いたとき、上記サイコロ状の立方晶の「稜」方向（結晶学的には<100>という記号で表示される。）が磁場の向きと平行になっている場合に結晶はもっとも容易に磁化する性質（磁化し易く、磁化する際の磁氣的損失が小さいことを意味する。）があり、この方向を「磁化容易軸」と呼ぶ。方向性電磁鋼板のような磁性材料は、原子レベルの小さな磁石の集合体からなっていると考えることができる。例えば一つの結晶粒の内部は、ひとつの磁化容易軸方向に磁化した磁区と呼ばれる一定の幅を持つ短冊状の部分に分かれており、隣り合う磁区はお互いに 180° 逆向きに磁化した状態になっている。外部からの磁場が作用しない場合には、相互の磁気が打ち消されて、全体としては磁化していない状態となる。外部から磁場が作用する場合には、外部磁場に近い方向に磁化している磁区の方がエネルギー的に安定になるため、隣の磁区との境界（「磁壁」と呼ぶ。）が移動してその幅が変化し、結果として磁化方向の異なる磁区の体積に差異が生じて、磁界方向の磁化を示すようになる。この磁壁の移動のし易さは、磁氣的損失の大きさと密接に関係しており、一般に磁区の幅が狭い程、磁壁の移動速度が低減し、磁氣的損失は小さくなる[54]。

このような観点から電磁鋼板表面に、レーザー光やプラズマ照射して微細な細状の歪みを形成することや、機械的もしくは腐食液を用いて化学的に微少な溝を作ることによって、微少な歪みや部分的な反磁界部（周囲の磁区と異なる磁化方向を持っている部分）を導入して結晶粒内の磁区の幅を狭めることを通じて磁氣的損失を低減する技術が開発されている[55-57]。

3.4.2 V-H センサの構造 < 探針間隔 2.5mm H コイル幅 2mm >

V-H センサの大きさにより分解能が決まるため、小型の V-H センサの開発が望まれていたが、H コイルの実用的な感度や巻枠の製作精度の限界などから、H コイルのサイズが 4 mm × 4 mm、B 探針の間隔が 7 mm に留まっていた。このサイズの V-H センサにより方向性電磁鋼板を使用した変圧器モデルの詳細な磁気特性分布を測定し、最大磁束密度分布、最大磁界強度分布および鉄損分布から変圧器モデル形状による磁気特性を明らかにすることはできたが、方向性電磁鋼板の結晶粒による磁気特性の影響を正確に把握することは困難であった。そのことから、H コイルのさらなる小型化に取り組み、より小型の V-H センサを開発することによって、より詳細な磁気特性分布の測定を行うことにした。

極小化した V-H センサを図 3.4.1 と仕様を表 3.4.1 に示し、図 3.4.2 に V-H センサの構造を示す。H コイルを小型化する場合、実用的な検出感度を得るためには小型な巻枠に極細のエナメル線を多数巻線する必要がある。そのために巻枠は精密加工が必要となる。巻枠の材質は温度変化に対する形状安定性や研削加工を行うために適した材料としてジルコニアを採用した。エリアターンは 4 mm × 4 mm サイズの H コイルと同等になるように、巻線は 4 mm × 4 mm サイズ H コイルに使用した導体外径よりさらに細い 0.010 mm の極細のマグネットワイヤを使用し、X 方向および Y 方向ともに 1 層に 70 ターンを 8 層巻線し合計 560 ターンとしている。この 2 mm × 2 mm サイズ H コイルのエリアターンの校正はヘルムホルツコイルを用いた校正システムで測定した実測値を使用した。

V-H センサを極小化するため、H コイルだけでは対応できないため、外径の細い B 探針を製作した。B 探針は外径が 0.31 mm の探針を用いて探針間隔を 2.5 mm と狭くした。製作した探針の先端部分は図 3.4.3 に示す形状の超硬合金製のニードルを使用しているが、絶縁被膜貫通型探針のようなネジ状の機構を搭載できずに絶縁被膜の貫通性能が低下している。そのために、分布測定機システムの XYZ ステージにより絶縁被膜を貫通するように電磁鋼板表面を引っ掻く動作を追加し対応している。探針には、ばねが内蔵されており探針の先端を支えている。このばねの押圧力は 0.49 N である。探針の先端形状は先端半径 5 μm、先端角度 90 degree である。

B 探針と H コイルは支持のために、精密加工を行った樹脂製のハウジングに挿入している。また、ハウジング上でリード線をハンダ付けするために、ハウジングには耐熱性の高い PEEK 樹脂を使用した[58-60]。

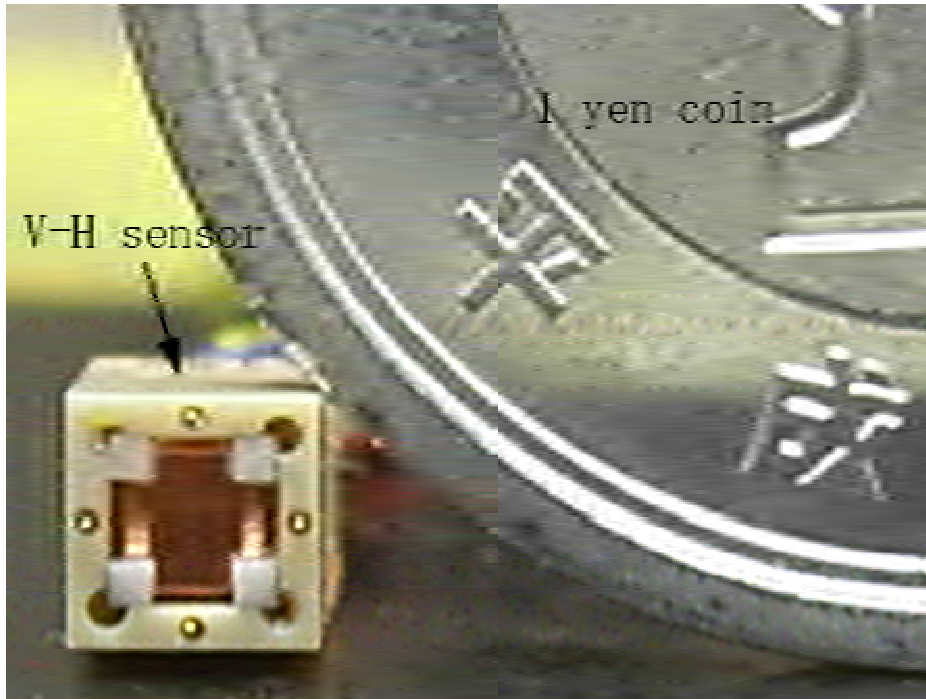


Fig. 3.4.1 Appearance of 2 mm square V-H sensor.

図 3.4.1 2 mm×2 mm V-H センサ外観

Table 3.4.1 Specification of V-H sensor.

表 3.4.1 V-H センサの仕様

H-coil	Size [mm]	2×2
	Number of turns [turns]	560
	Area turn(Hx) [cm ² ·turn]	8.52
	Area turn(Hy) [cm ² ·turn]	5.64
B-needle	Distance [mm]	2.5

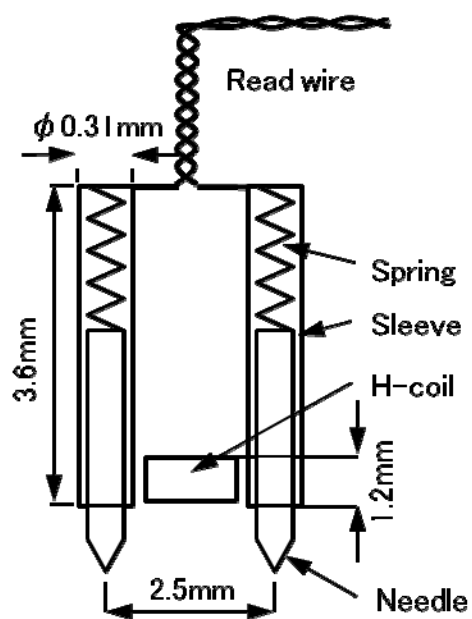


Fig. 3.4.2 Structure of the 2 mm size V-H sensor.

図 3.4.2 2 mm×2 mm V-H センサ構造

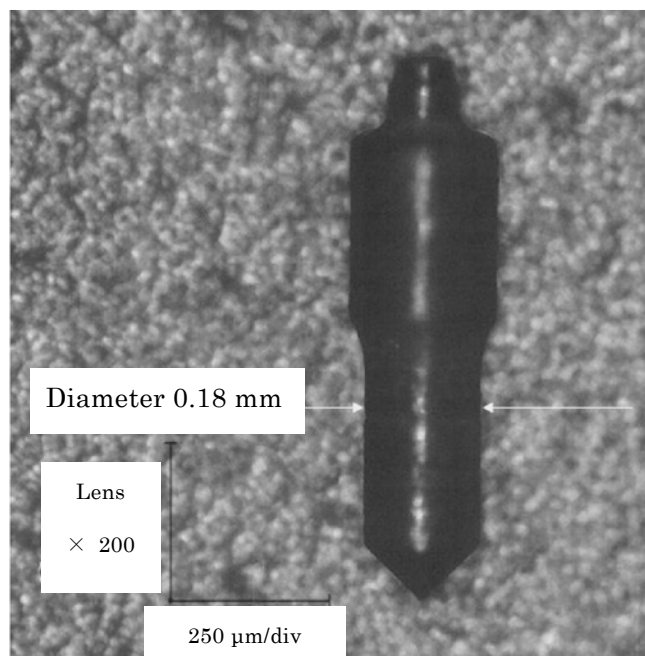


Fig. 3.4.3 Structure of the needle.

図 3.4.3 2 mm×2 mm V-H センサのニードル形状

3.4.3 測定モデルと測定条件

測定モデルは前節で使用した磁気回路モデルであるが、積層枚数を1枚とした。極小局所 V-H センサになり測定の分解能が向上したことにより磁気回路モデルの半分を測定するには測定点数が多く、時間がかかりすぎるため特徴的な部分である中央脚の下部を測定した。図 3.4.4 に測定モデル形状と測定エリアを示す。

測定位置設定の容易化の試みとして、測定ポイントは測定領域に図 3.4.5 に示すメッシュを作成し、変化の大きい部分を詳細に測定できるように分割を細かくしたメッシュとした。メッシュの重心位置を V-H センサの中心として測定した。前節の測定結果から、磁気回路の外周部の磁束密度の低い部分は測定間隔を広くして測定を行い、全測定点数は 12744 箇所である。メッシュの細かい分の測定間隔は 0.8 mm である。

使用した電磁鋼板は、薄板化での鉄損減少に加えて鋼板の表面にレーザーを照射し、磁区幅を小さくしている。図 3.4.6 に示すように 10 mm 程度の結晶粒の存在がわかる。また、図 3.4.7 に示すように電磁鋼板には測定面の裏側に磁化容易軸と直角に約 6.2 mm 間隔でレーザー照射が施されている。

励磁条件は、パーソナルコンピュータで 50 Hz の正弦波励磁波形を作成し、パワーアンプを通して励磁を行い、測定試料に巻いた探りコイル部の磁束密度の平均値 B_{ave} が 0.4 T、中央脚で 0.8 T となるように制御している。

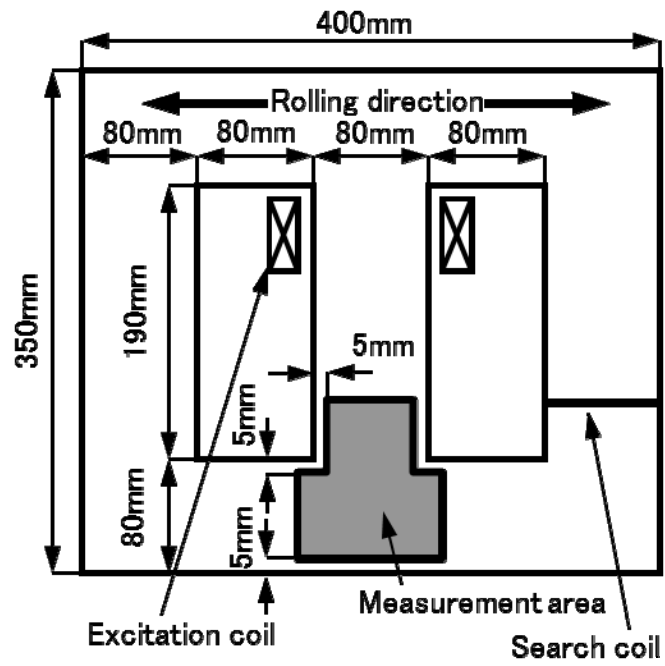


Fig. 3.4.4 Magnetic circuit model and measurement area.

図 3.4.4 測定モデルと測定エリア

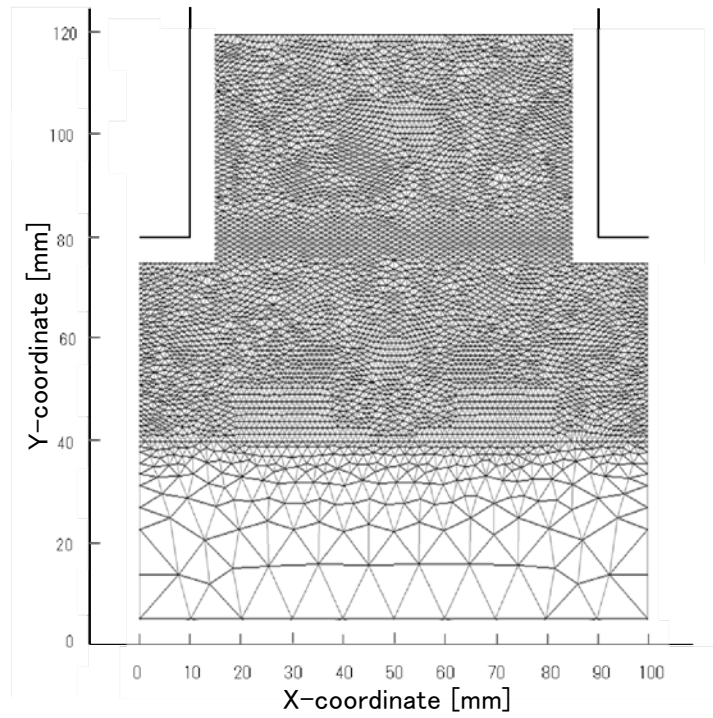


Fig. 3.4.5 Mesh for measurement.

図 3.4.5 測定メッシュ

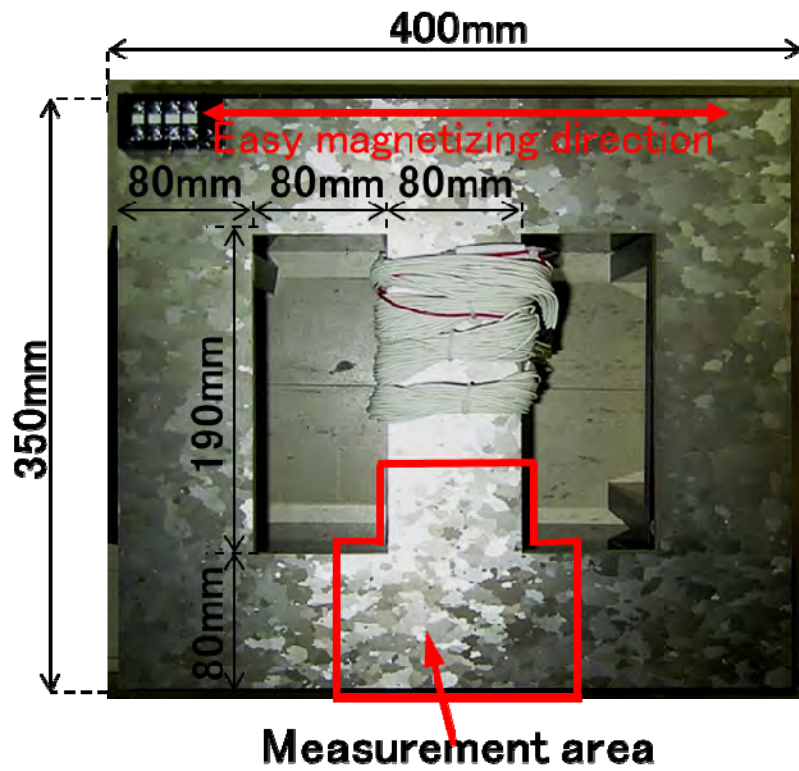


Fig. 3.4.6 Magnetic circuit model and measurement area.

図 3.4.6 磁気回路モデル外観と測定領域

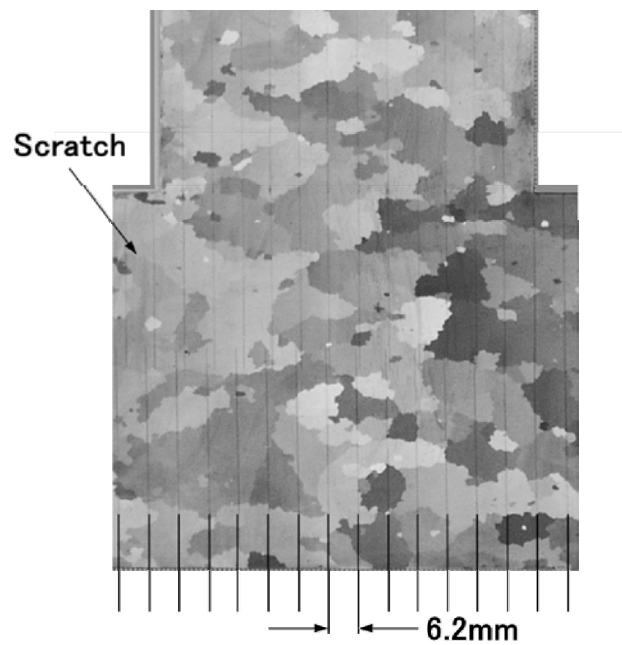


Fig. 3.4.7 Position of scratch.

図 3.4.7 試料裏のスクラッチ位置

3.4.4 測定結果

探針間隔 2.5mm, H コイルサイズ 2 mm×2 mm の極小局所 V-H センサにより方向性電磁鋼板を使用した変圧器型磁気回路モデルの磁気特性分布を測定した。図 3.4.8 に最大磁束密度分布と結晶粒分布, 図 3.4.9 に最大磁界強度分布と結晶粒分布, 図 3.4.10 に鉄損分布と結晶粒を示す。

前述の探針間隔 7 mm, H コイルサイズ 4 mm×4 mm の局所 V-H センサを使用した測定結果の図 3.3.12 の絶縁被膜なしモデルコアの磁気特性分布の最大磁束密度分布, 最大磁界強度分布, 鉄損分布の中央脚部分が本測定結果の測定位置と同じになる。試料の積層枚数や励磁条件が異なるため厳密には比較はできないが, 同様な磁気特性分布であることがわかる。

重要なことは, 先に開発した探針間隔 7 mm, H コイルサイズ 4 mm×4 mm の局所 V-H センサでは, 磁気回路モデル形状や絶縁被膜の影響などの磁気回路モデルをマクロ的に評価することは可能になったが, V-H センサのサイズが小さくなり, 分解能が向上したことで, 方向性電磁鋼板のミクロ的な特性である結晶粒やスクラッチの影響を評価できることである。

図 3.4.8 に示す最大磁束密度分布と結晶粒分布より, この磁気回路モデルは方向性電磁鋼板 1 枚をくり抜いたもので, 水平方向が磁化容易軸になっている。このため, 励磁コイル下部の脚部分は磁束の方向が磁化困難軸方向になる。この部分では磁束密度分布が結晶粒界に沿った分布も確認でき, 結晶粒毎の磁気特性の違いが現れているものと思われるが, 結晶粒による影響以外の 180°磁区幅や結晶粒の α 角等の要因もあり完全には一致していない。

図 3.4.9 に示す最大磁界強度分布より, 磁化困難方向に磁束が通っている中央脚では全体的に磁界強度が大きい。磁界強度分布に関しては, 結晶粒毎の影響が現れにくく磁気回路モデル形状の影響が大きいように見える。

図 3.4.10 に示す鉄損分布より, 磁束密度分布に近い分布であることがわかるが, より局所的に鉄損の高い部分が確認できる。磁気回路窓側コーナ部の鉄損の高い部分を除くと結晶粒毎の特性の違いが現れていると考えられる。

鉄損の発生状態を詳しく見るために図 3.4.11 に鉄損分布, 結晶粒分布ならびに磁束密度ベクトル軌跡を重ねて表示した。図 3.4.12 にも同様にして磁界強度ベクトル軌跡, 図 3.4.13 にヒステリシスループ B_x-H_y , 図 3.4.14 にヒステリシスループ B_y-H_y を示す。磁気回路モデルのコーナ部分には磁束密度のベクトル軌跡および磁界強度のベクトル軌跡に回転磁束が発生しており, この部分で大きな鉄損となっていることがわかる。また, それ以外の鉄損の低い箇所では, それぞれのベクトル軌跡は磁化困難軸方向とほぼ平行な交番磁界となっている。

鉄損が 1 W/kg 付近以上では磁束密度ベクトルの軌跡が膨らみ回転磁束が発生している。しかし, 部分的には磁束密度ベクトル軌跡が大きく膨らんでいるにも関わらず, 鉄損が低いところもある。そのような部分では磁界強度ベクトル軌跡も同様に傾いており, その箇所の結晶粒

の結晶方位が傾いていると思われる。

図 3.4.15 の最大磁束密度分布と結晶粒分布に試料の裏面に施されたスクラッチの位置を重ねた図より、結晶粒の影響以外に磁束密度分布の困難軸部分に縦縞状の磁気特性分布が見られる。図 3.4.16 に示す磁界強度分布と結晶粒とスクラッチより磁界強度分布には磁化容易軸と平行な分布は見られるがスクラッチの影響は小さいことがわかる。図 3.4.17 に示す鉄損分布と結晶粒とスクラッチを重ねた結果より鉄損分布はスクラッチの影響よりも結晶粒の影響が大きいことがわかる。図 3.4.18 に磁束密度分布の時間変化、図 3.4.19 に磁界強度分布の時間変化を示す。磁束密度分布の時間変化の $\omega t = 3\pi/4$ を見ると縦縞状の磁気特性分布がよくわかる。スクラッチの部分は機械的に作られた溝が入っているために磁気特性は劣化している。その部分とスクラッチの位置がほぼ重なるのがわかる。スクラッチの影響を詳しく見るために、図 3.4.20 にスクラッチ位置の水平方向ポイント部分の磁束密度を表示した。磁束密度はスクラッチの部分が約 0.1 T 低くなっていることがわかる。

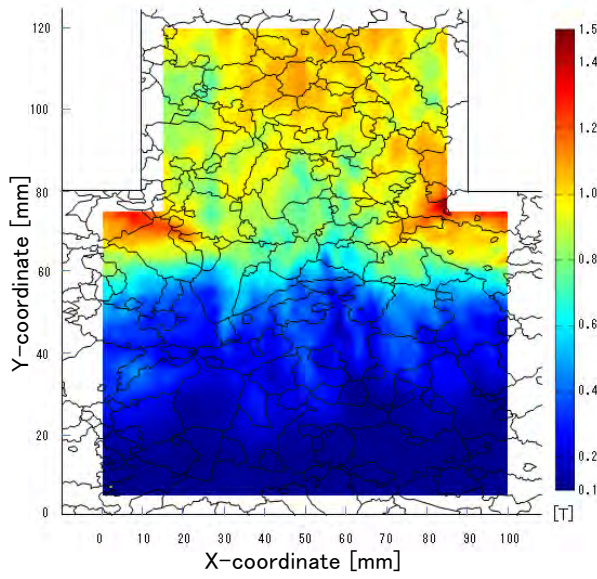


Fig. 3.4.8 Distribution of the maximum flux density and grain.

図 3.4.8 最大磁束密度分布と結晶粒分布

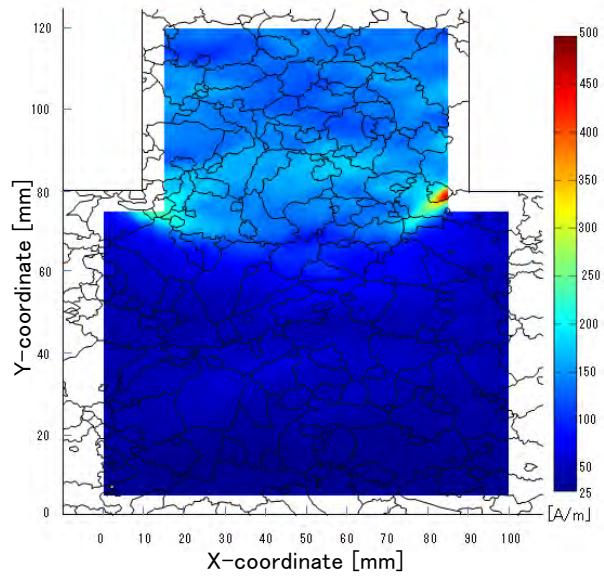


Fig. 3.4.9 Distribution of the maximum field strength and grain.

図 3.4.9 最大磁界強度分布と結晶粒分布

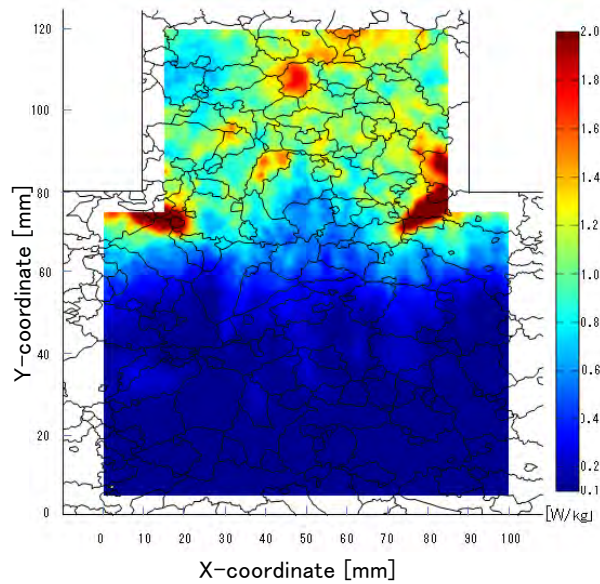


Fig. 3.4.10 Distribution of the core loss and grain.

図 3.4.10 鉄損分布と結晶粒分布

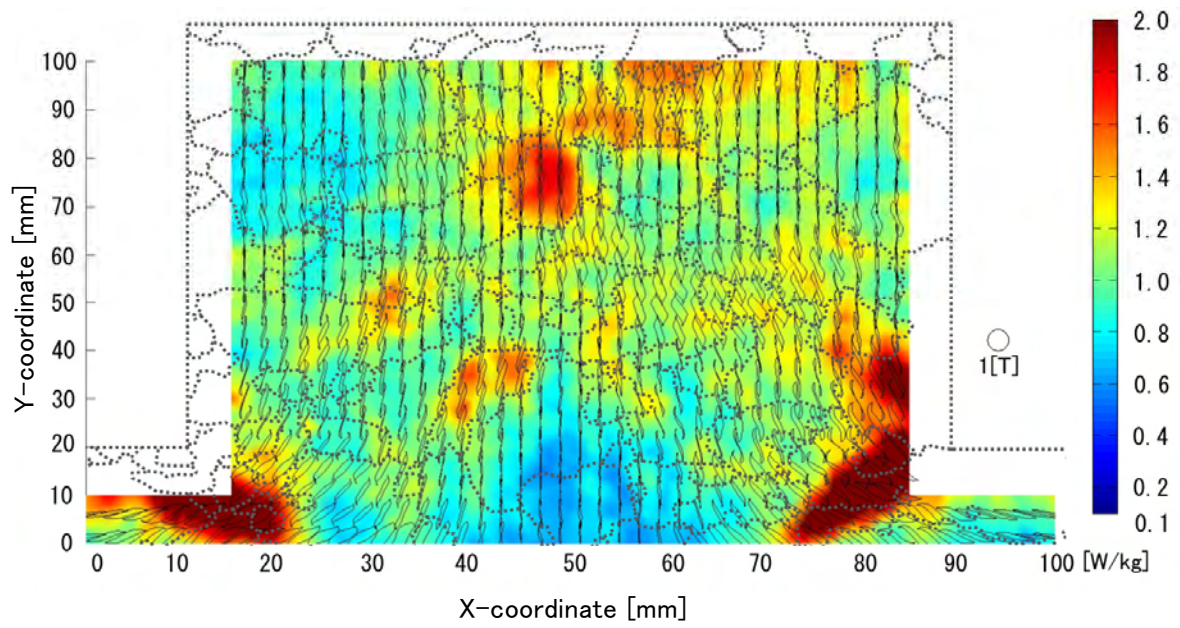


Fig. 3.4.11 Distribution of the core loss on the loci of Bx-By.

図 3.4.11 鉄損分布と磁束密度軌跡

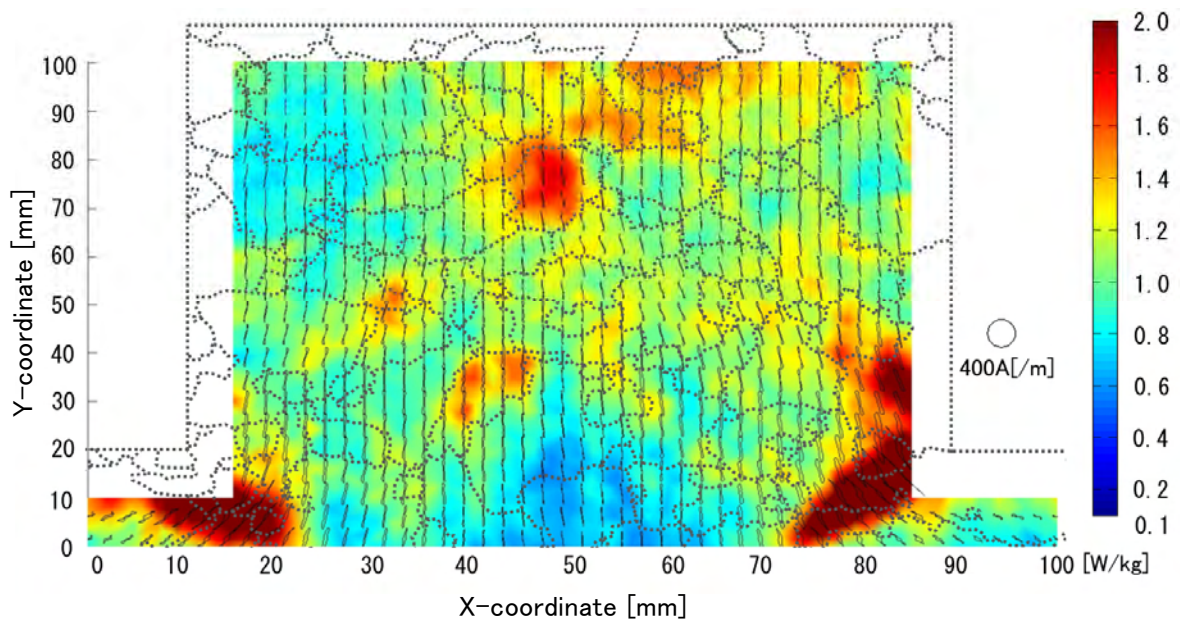


Fig. 3.4.12 Distribution of the core loss on the loci of Hx-Hy.

図 3.4.12 鉄損分布と磁界強度軌跡

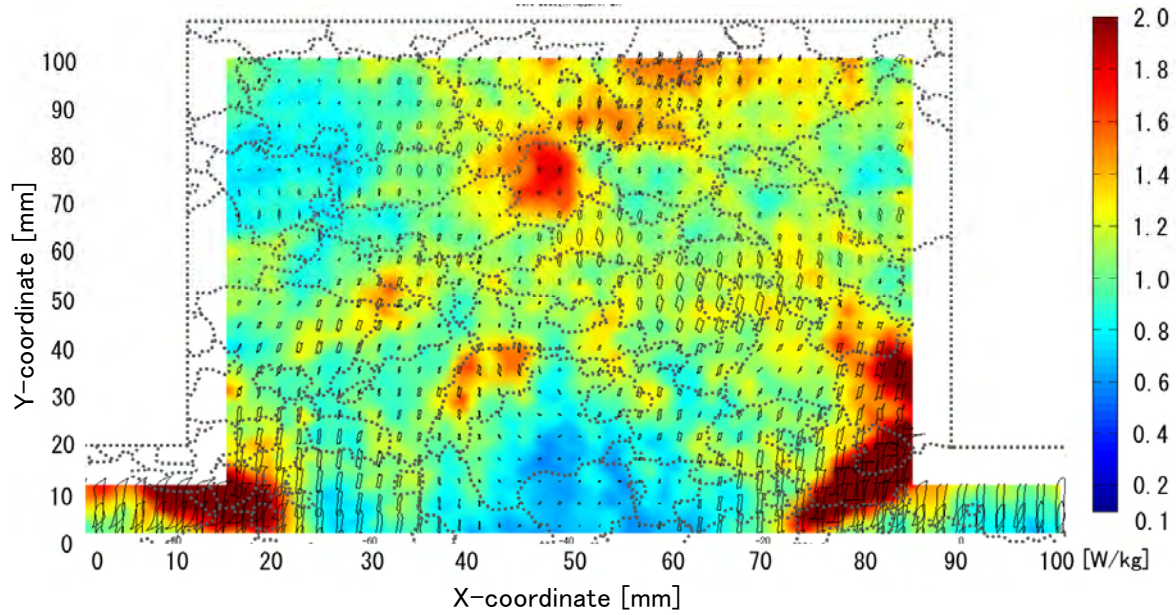


Fig. 3.4.13 Distribution of the core loss on the hysteresis loops of B_x-H_x .

図 3.4.13 鉄損分布とヒステリシスループ B_x-H_x

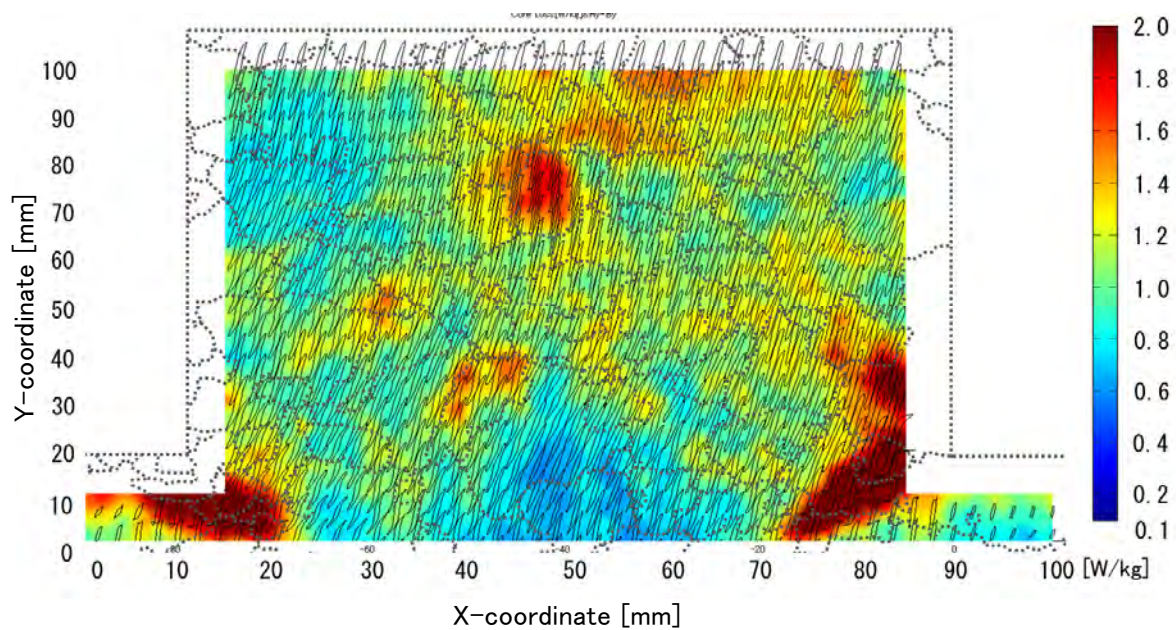


Fig. 3.4.14 Distribution of the core loss on the hysteresis loops of B_y-H_y .

図 3.4.14 鉄損分布とヒステリシスループ B_y-H_y

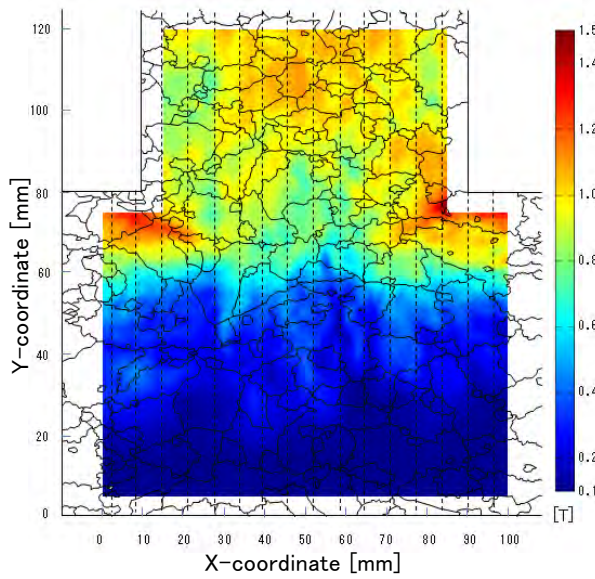


Fig. 3.4.15 Distribution of the maximum flux density and grain and scratch.

図 3.4.15 最大磁束密度分布と
結晶粒分布とスクラッチ

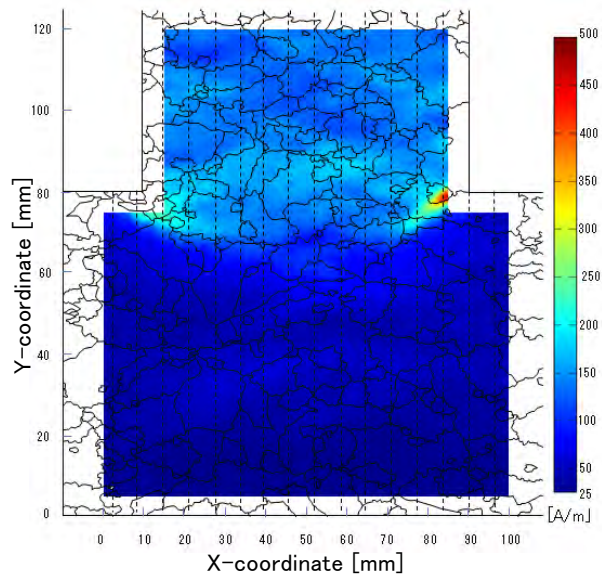


Fig. 3.4.16 Distribution of the maximum field strength and grain and scratch.

図 3.4.16 最大磁界強度分布と
結晶粒分布とスクラッチ

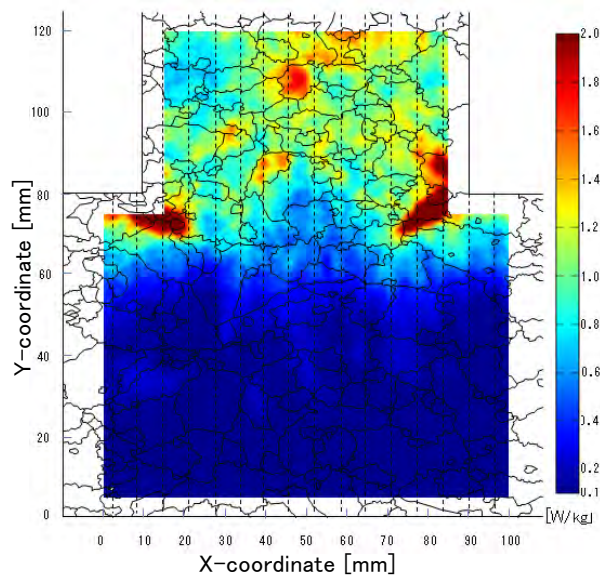


Fig. 3.4.17 Distribution of the core loss and grain and scratch.

図 3.4.17 鉄損分布と結晶粒分布とスクラッチ

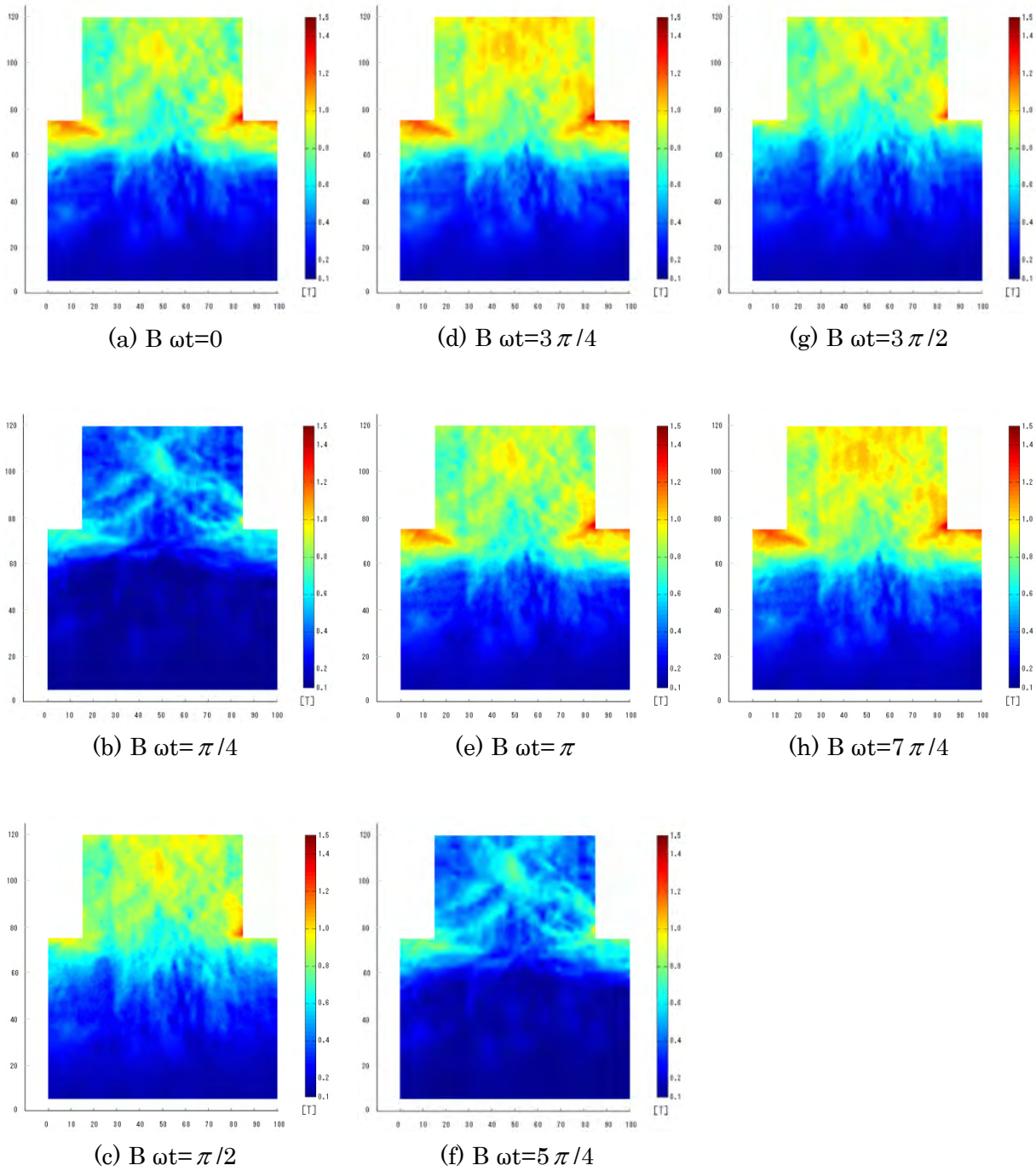


Fig. 3.4.18 Time variation of distributions of the magnetic flux density.

図 3.4.18 磁束密度分布の時間変化

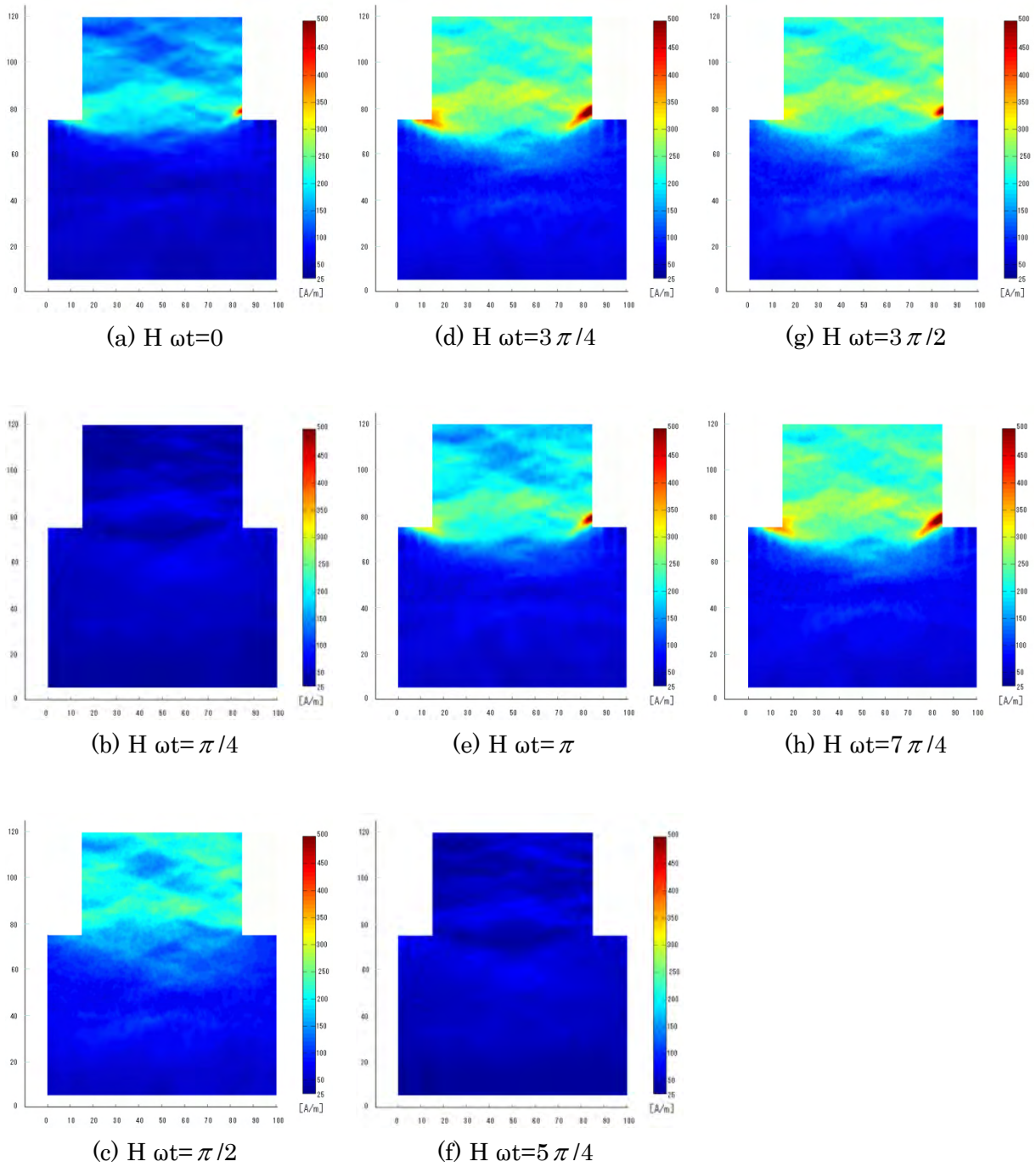


Fig. 3.4.19 Time variation of distributions of the magnetic flux density.

図 3.4.19 磁束密度分布の時間変化

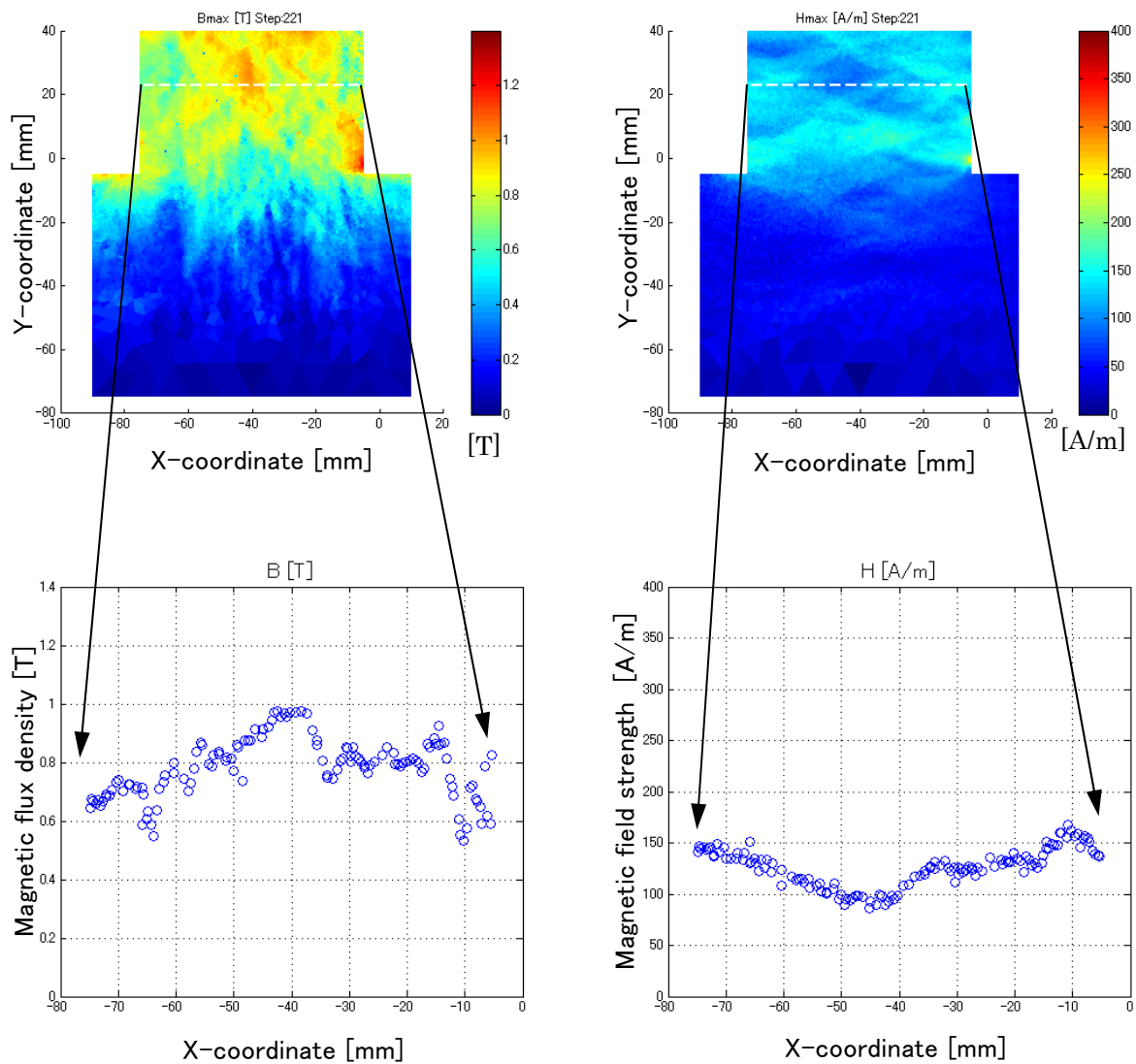


Fig. 3.4.20 Distributions of the magnetic flux density and magnetic field strength of point 23.

図 3.4.20 ポイント 23 の磁束密度と磁界強度分布

第 3.5 節 結言

本章では、探針間隔 7 mm, H コイル幅 4 mm および B 探針が絶縁被膜貫通機能を備えた局所 V-H センサを開発した。また、より分解能が向上した、探針間隔 2.5 mm, H コイル幅 2 mm の極小局所 V-H センサを開発することにより、三層変圧器型磁気回路モデルのベクトル磁気特性を詳細に測定した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 探針間隔 7 mm, H コイルサイズ 4 mm×4 mm で B 探針が絶縁被膜貫通機能を備えた V-H センサを使用し、方向性電磁鋼板を使った変圧器型磁気回路モデルを使用し、絶縁被膜を取らずに磁束密度分布と磁界強度分布および鉄損分布を測定し、絶縁被膜を取り除いた状態のものと比較することで、方向性電磁鋼板の絶縁被膜の効果を明らかにした。極小 V-H センサにより絶縁被膜の効果を評価することが可能であることを示した。
- (2) 探針間隔 2.5 mm, H コイルサイズ 2 mm×2 mm の V-H センサを使用し、方向性電磁鋼板を使った変圧器型磁気回路モデルを使用し、磁束密度分布と磁界強度分布および鉄損分布を測定し、方向性電磁鋼板の結晶粒の影響を評価することが可能であることを示した。
- (3) 探針間隔 2.5 mm, H コイルサイズ 2 mm×2 mm の V-H センサを使用し、方向性電磁鋼板を使った変圧器型磁気回路モデルを使用し、磁束密度分布と磁界強度分布および鉄損分布を測定し、方向性電磁鋼板のスクラッチの効果を評価することが可能であることを示した。

以上のように、これまでの大きさの V-H センサではわからなかった、方向性電磁鋼板に施された鉄損を低減する技術である張力被膜の効果、スクラッチの効果、結晶粒の影響を本極小局所 V-H センサで明らかにすることができた。

第4章 ベクトル磁気特性可視化装置の構築

第4.1節 緒言

前章の2章, 3章までに, 探針法の測定精度および, H コイルの周波数特性を評価することで極小局所ベクトル磁気センサの基本特性を明らかにした。そして, 変圧器型磁気回路モデルを使用して詳細な磁気特性分布を測定し, 方向性電磁鋼板の絶縁被膜の効果や結晶粒および磁気特性を改善するスクラッチの影響を明らかにすることで, 極小局所ベクトル磁気センサの有効性を示した。しかしながら, 形状が大きく単純な変圧器に対して測定が可能となったとしても, 電気機器の大きな割合を持つモータの磁気特性分布を測定するには問題が多い。従来のモータの磁気測定では, 比較的大きなモデルモータを使用し回転子を固定した状態で鉄心中の局所磁気特性分布を明らかにしている[61-63]が, 近年では誘導モータに比べて高効率化と小型化のために永久磁石モータの使用が増えている。そのことから, モデルモータではなく, 実機の永久磁石モータの鉄心内部の損失を詳細に評価する必要がある。実機のモータを測定するには細かいティース部でも測定可能な極小局所 V-H センサが必要であるし, モータの同心円状に配置された固定子および複雑な形状のティース部に対して測定することが必要となる。

本章では, 測定対象としてモータを対象とし, 極小局所ベクトル磁気センサをより効果的に使用するために新たに磁気特性分布測定装置の構築を行った。モータのティース部の複雑な形状に対しても測定位置を簡便に設定できるようにする必要があることと, 前節で使用していたベクトル磁気センサの位置決め装置の問題点として, XYZ ステージのアクチュエータのレイアウトから Z 軸のアクチュエータを吊り下げる構造になり Z 軸の支持剛性が不足しており, 磁気センサを高速で移動させると磁気センサ先端部分の振動が大きくなりすぎることや, ソフトウェアの構成方法にもよるが, XYZ ステージの制御が煩雑であること, そして, XYZ ステージを四角のフレームで吊り下げる構造であるため測定試料がフレームより大きいと設置できないため, モータなどの高さのある試料では磁気センサを上方へ移動させなければならないが, この装置の場合フレームの長さを変更する必要があること, 設定が大がかりになること, また XYZ ステージに接続されているケーブルもステージと共に稼働するためスムーズに動作させるにはケーブルの処理が大変であることなどの問題を解決すべく磁気特性分布測定装置を一新した。

この一新した磁気特性分布装置により表面磁石式モータのベクトル磁気特性分布を測定した結果について述べる。

このベクトル磁気特性分布装置を「ベクトル磁気特性可視化装置」と名付た。

第 4.2 節 ベクトル磁気特性可視化装置

4.2.1 ベクトル磁気特性可視化装置概略

回転中の永久磁石モータの固定子鉄心中の局所二次元ベクトル磁気特性を測定することを目的としたベクトル磁気特性可視化装置を図 4.2.1 に、ベクトル磁気特性可視化装置構成図を図 4.2.2 に示す。前節で開発した探針間隔が 2.5 mm、H コイルのサイズが 2 mm×2 mm の極小局所 V-H センサを搭載し、位置決め用ロボットおよび A/D コンバータ、磁気特性分布測定ソフトウェア等により構成した。

従来の XYZ ステージを組み合わせたフレーム囲まれた V-H センサの位置決め装置では、位置決め精度の不足と測定試料寸法の大きさに制約を受けるため、フレームを持たない市販の産業用ロボットの中から選択した。産業用ロボットはアームの構成により、垂直多関節ロボット、水平多関節ロボット、直交ロボット、パラレルリンクロボットなど各種あるが、左右・上下・ θ 方向の動作が主体であることと、コストが有利な水平多関節ロボット (SCARA : Selective Compliance Assembly Robot Arm) を採用した。このことにより、ベクトル磁気特性可視化装置のコストを抑えることだけではなく、試料の高さに対する調整は SCARA ロボットのベース部分にスペーサーを挿入だけで可能となった。

SCARA ロボットを設置するベースには非磁性のレーザー等の光学装置実験用の光学テーブルを採用している。そのために、テーブル上面には M6 サイズのネジ穴を 25 mm のマトリクス状に加工してあることから測定試料を容易に固定できる。また、テーブル下部の架台部には広い空間があり、SCARA ロボットのコントローラや制御用 PC を設置することができる。そして、キャスターとアジャスターボルトを標準装備しているため、移動と固定が簡単に行える。

測定位置の詳細な設定方法は後述するが、ベクトル磁気特性可視化装置を新たに構築するのに伴い、V-H センサの測定位置を簡便に設定できるようにする CCD カメラとタッチパネルを用いた測定位置設定用のソフトウェアを開発した。

V-H センサの押し付け圧力を一定に制御する圧力センサおよび試料からの距離を測定するレーザー距離計を備えている。

磁気センサからの出力電圧は数 mV であるため、プリアンプを経由して A/D コンバータに入力し制御用 PC に接続している。CCD カメラ、圧力センサや A/D コンバータを PC と接続するインターフェースは USB である。

今回は回転中のモータを測定する一例として、表面磁石式モータの固定子の巻線を施していないモデルモータを準備し、ローターを外部から回転させることにより固定子を励磁している。外部から回転子を回転させるモータは AC サーボモータを使用し、制御用 PC から回転数を制御出来るようにしている。



Fig. 4.2.1 Vector magnetic property visualization system.

図 4.2.1 ベクトル磁気特性可視化装置

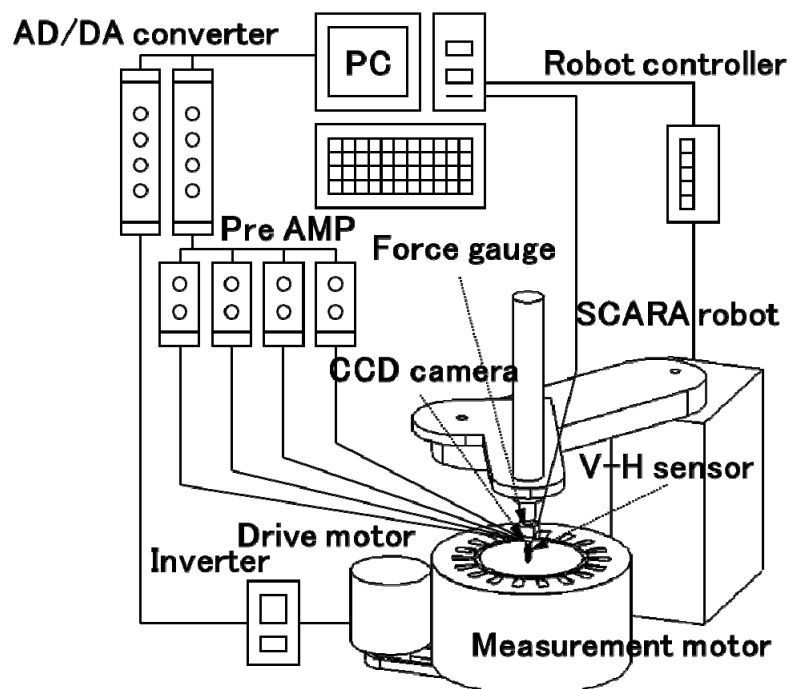


Fig. 4.2.2 Vector magnetic property visualization system block diagram.

図 4.2.2 ベクトル磁気特性可視化装置構成図

4.2.2 ベクトル磁気特性可視化装置の構成

V-H センサを測定位置に移動する装置に SCARA ロボットを搭載し、操作にタッチパネル付き大型液晶モニターを採用し、V-H センサの測定位置設定を容易にしたソフトウェアにより制御するベクトル磁気特性可視化装置の構成を下記に示す。

(1) 超小型ベクトル磁気センサ

探針間隔が 2.5 mm, H コイルサイズが 2 mm×2 mm の超小型 V-H センサを搭載している。

(2) 多様な測定位置設定方法

磁気センサの測定箇所の設定は、搭載した CCD カメラ画像とメッシュデータを重ねることで自動設定が可能であり、CCD カメラ画像とメッシュデータを重ねる際は、2 タッチオペレーション対応のタッチパネル付き液晶モニターにより直感的な操作が可能である。試料の高さ方向の検出にはレーザー距離計を搭載し、磁気センサと試料の高さを自動で設定可能である。それ以外にも、メッシュデータを使用せずに、長方形(X-Y)、放射状(R-Fi)の設定が可能である。

(3) 多様な測定データ

測定結果は磁束密度分布、磁界強度分布、鉄損分布の表示が可能であり、測定箇所の B-H ループ、回転ベクトルアニメーションについても表示が可能である。

(4) 多様な出力ファイル形式

測定結果は CSV ファイル, mat ファイル, HDF5 ファイルに出力可能である。また、分布図は jpg ファイル, png ファイルに出力が可能であり、測定したベクトルアニメーションは avi ファイル, mpeg ファイルに出力が可能である。

(5) 高性能な A/D,D/A コンバータを採用

8つの同時アナログ入力 2 MS/秒/ch, 16 ビットの分解能, 16 MS/秒のスループット。USB のトラフィック競合が発生しても大容量のオンボードメモリ 32 MS で有限収録を保証する。2つのアナログ出力, 3.33 MS/秒, 16 ビットの分解能, 24本のデジタル I/O ラインおよび, PWM, エンコーダ, 周波数, インベントカウンタなどに使用できる 4つの 32 ビットカウンタ/タイマを搭載している。ローパスフィルタのカットオフは測定対象にあわせて可変できる。

(6) 高性能なプリアンプを採用

低消費電力の高精度計装アンプで低電圧ノイズと低消費電力である。MIN 200 GΩ の高入力抵抗を実現している。このプリアンプの電源はバッテリーを使用し低ノイズ環境としている。7.5 nV/√Hz (1 kHz 時) の低電圧ノイズである。非常に低い入力オフセット電圧 (最大 40 μV) およびドリフト (0.3 μV/°C), 高い CMRR (90 dB, G=1) および PSRR (105 dB, G=1) を実現している。

(7) 大型タッチパネル付き液晶ディスプレイを採用

液晶画面上で測定位置を合わせるために、マルチタッチ機能付き 21.5 型 16:9 のワイド液晶ディスプレイを採用した。表示解像度は 1920×1080 ドットである。タッチパネルは光学カメラ方式である。ベクトル磁気特性可視化装置の搭載にはモニターアームを取り付けオペレータの見やすい位置に設置が可能である。

(8) 非磁性の試料固定台を採用

光学実験用に開発された光学テーブルのトッププレートはハニカムサンドイッチ構造で軽量かつ高剛性であり、上面版は非磁性ステンレスに M 6 サイズのネジ穴を 25 mm マトリクス状に加工してあるため、複雑な形状の試料をネジで簡単に固定が可能である。

4.2.3 ベクトル磁気特性可視化装置仕様

ベクトル磁気特性可視化装置およびベクトル磁気特性可視化装置を構成する機器の詳細な仕様をまとめた。まずベクトル磁気特性可視化装置の仕様を表 4.2.1 に示す。続いて、V・H センサの仕様を表 4.2.2、2 mm×2 mm サイズ V・H センサ外観を図 4.2.3 に示す。V・H センサの測定位置精度を決める SCARA ロボットはヤマハ YK400XG を採用した。SCARA ロボットの仕様を表 4.2.3 に示し、SCARA ロボットの外観を図 4.2.4、SCARA ロボットの動作範囲を図 4.2.5 に示す。SCARA ロボットの稼働範囲はアームの回転半径により決まり、この YK400XG の場合約 600 mm×300 mm の範囲の測定が可能となる。AD/DA コンバータの仕様を表 4.2.4 に示す。

Table 4.2.1 Specification of Vector magnetic property visualization system.

表 4.2.1 ベクトル磁気特性可視化装置仕様

Item	Specifications	Note
External dimension	W1100mm×D800mm×H1800mm	
Weight	About 130kg	
Measurement area	About 400mm×800mm	
Sensor stroke	150mm	
V-H sensor	B-needle distance:2.5mm H-coil size:4mm	
Power consumption	AC 100V	
Supply frequency	50/60 Hz	
Option	4mm size V-H sensor	B-needle distance:7mm

Table 4.2.2 Specification of V-H sensor.

表 4.2.2 2 mm×2 mm サイズ V-H センサ仕様

H-coil	Size [mm]	2×2
	Number of turns [turns]	560
	Area turn(Hx) [cm ² ·turn]	8.52
	Area turn(Hy) [cm ² ·turn]	5.64
B-needle	Distance [mm]	2.5

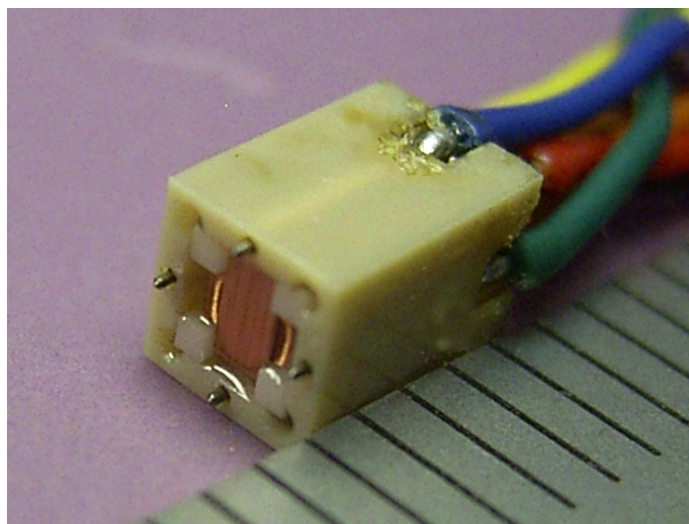


Fig. 4.2.3 Appearance of 2 mm square V-H sensor.

図 4.2.3 2 mm×2 mm V-H センサ外観

Table 4.2.3 Specification of SCARA robot.

表 4.2.3 SCARA ロボット仕様

Item		Specifications	
Axis specifications	X-axis	Arm length	220 mm
		Rotation angle	$\pm 115^\circ$
	Y-axis	Arm length	175 mm
		Rotation angle	$\pm 140^\circ$
	Z-axis	Stroke	150 mm
	R-axis	Rotation angle	$\pm 180^\circ$
AC servo motor output		X-axis	200 W
		Y-axis	100 W
		Z-axis	100 W
		R-axis	100 W
Maximum speed		X-axis	6.0 m/s
		Y-axis	
		Z-axis	1.0 m/s
		R-axis	$1020^\circ /s$
Repeatability		X-axis	± 0.01 mm
		Y-axis	± 0.01 mm
		Z-axis	± 0.01 mm
		R-axis	$\pm 0.005^\circ$



Fig. 4.2.4 SCARA robot.

図 4.2.4 SCARA ロボット

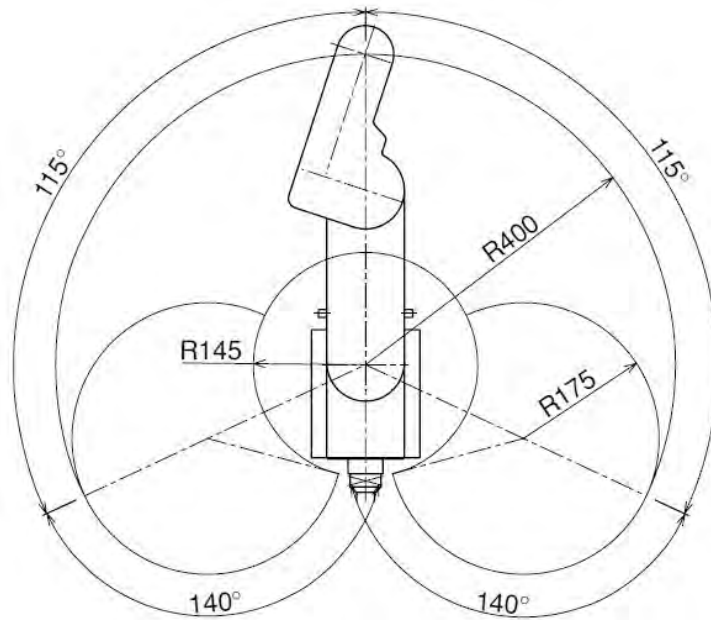


Fig. 4.2.5 SCARA robot moving area.

図 4.2.5 SCARA ロボット動作範囲

Table 4.2.4 Specification of AD/DA converter.

表 4.2.4 AD/DA コンバータ仕様

Item	Specifications	
Analog input	Number of channels	8 (differential)
	ADC resolution	16bits
	Sampling rate	2.00 MS/s
	Timing accuracy	50 ppm
	Timing resolution	10 ns
	Input range	$\pm 10V, 5V, 2V, 1V$
	Input coupling	DC
	Input impedance	100 G Ω In parallel with 10 pF
	Input bias current	± 10 pA
	Cross talk (at 100 kHz)	-80 dB
Analog output	Number of channels	2
	DAC resolution	16 bits
	Update rate	3.3 MS/s
	Timing accuracy	10 ns
	Timing resolution	10 ns
	Output range	$\pm 10 V, 5V$
	Output coupling	DC
	Output impedance	0.4 Ω
Digital I/O	Number of channels	24
	Ground reference	D GND
	Pull-down resistor	50 k Ω (typ)
Bus interface	USB 2.0 Hi-Speed or full-speed	

4.2.4 ベクトル磁気特性可視化装置動作フロー

図 4.2.6 にベクトル磁気特性可視化装置の測定のフローチャートを示す。測定を開始するに前に、測定位置設定のデータとなるメッシュデータの作成を行い、ベクトル磁気特性可視化装置にインポートする。その後、測定位置の設定をインポートしたメッシュデータとモータ測定位置の CCD カメラ画像をタッチパネル付きモニタ画面上であわせることで行う。その後、モータ測定表面と V-H センサの高さ調整をレーザー変位計により行う。設定位置設定終了後に、測定するモータを外部のサーボモータにより回転させ設定した回転数になっていることを確認し、測定を開始する。SCARA ロボットを駆動し、V-H センサを測定ポイントまで試料まで下ろし、V-H センサの測定圧力をイマダフォースアナライザとロードセルにより測定し、設定した圧力になると、探針の絶縁被膜を貫通する動作を行い、探針の接触抵抗が設定値以下であれば、磁束密度および磁界強度の測定を開始する。V-H センサからの測定データはプリアンプにより増幅して A/D コンバータを通して制御用パーソナルコンピュータに送られて処理される。測定はノイズの影響を除去するため複数回読み取り平均化処理を行う。測定が繰り返され測定点が最終の測定点に到達すると、V-H センサが原点に戻り測定が終了する。

ベクトル磁気特性可視化装置は Windows 7 をオペレーティングシステムとし、主要なプログラムは C 言語で記述されている。

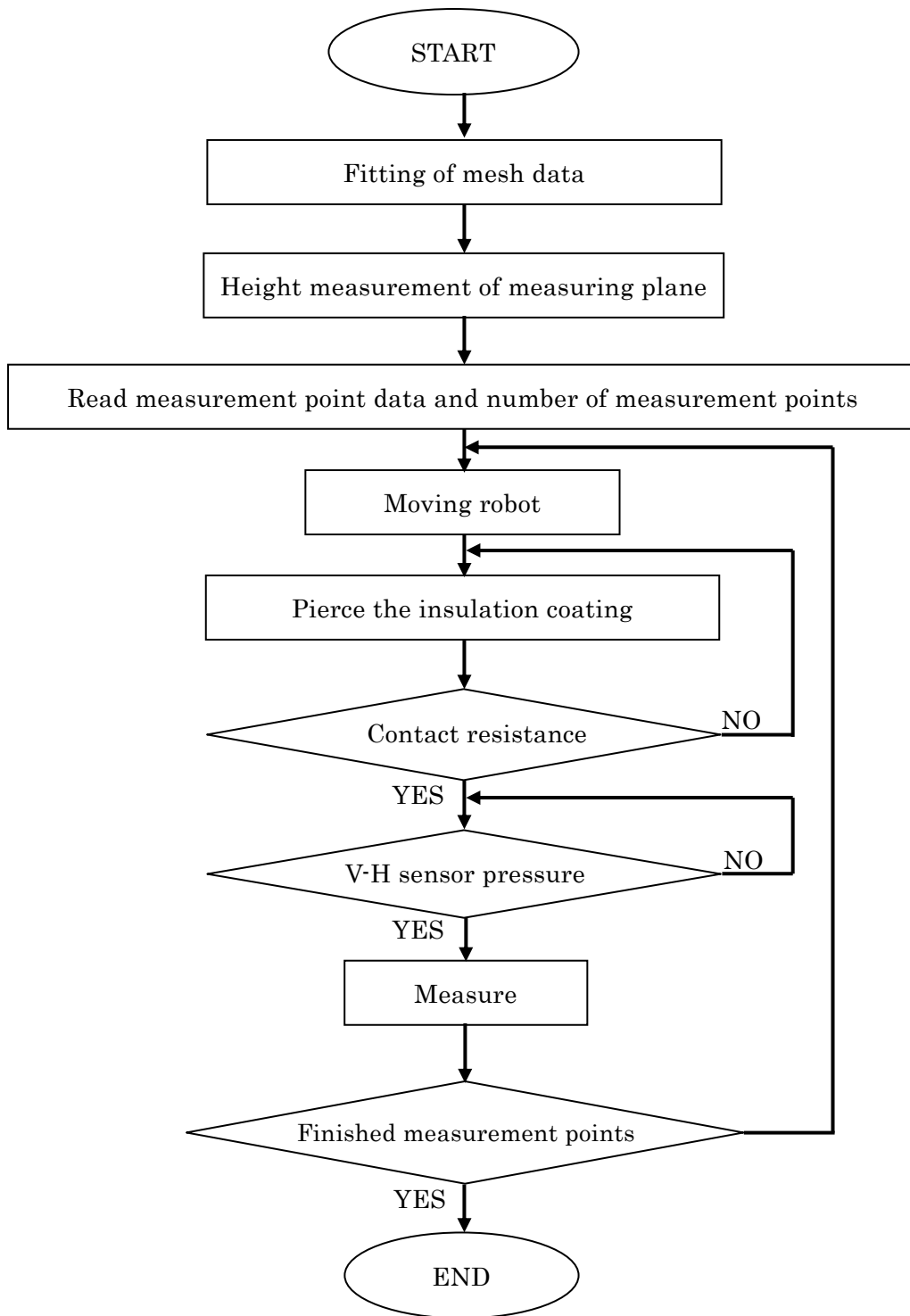


Fig. 4.2.6 Flow chart of vector magnetic property visualization system.

図 4.2.6 ベクトル磁気特性可視化装置動作フローチャート

4.2.5 ベクトル磁気特性可視化装置測定位置の設定方法

ベクトル磁気特性分布の測定は、V-H センサの分解能が向上したことで数多くの測定点を設定可能である。接合部ない四角い変圧器モデルであれば、四角形の測定領域の設定と測定ピッチを設定すれば測定は可能であるが、ラップ接合変圧器モデルの接合箇所や、円周上にレイアウトされるモータの固定子を測定しようとする、V-H センサと試料の角度設定を含む複雑な位置制御が必要となる。そのようなことから、ベクトル磁気特性可視化装置を商品化し多くの研究者・技術者や品質保証に携わる方々に使用していただくためには測定箇所の設定を容易にできることが重要になる。

測定箇所の設定を容易にできる方法として、ベクトル磁気特性可視化装置の利用者は電磁気応用機器を数値解析により設計・開発を行っている研究者が多いと思われるため、数値解析においてモデルを有限要素に分割するメッシュデータを利用することにした。そのことにより、測定位置設定の簡略化と、数値解析の結果とベクトル磁気特性可視化装置の実測結果を同じ評価領域で評価できる利便性も備えることができる。

測定設定位置はメッシュデータを使用することで解決できるが、試料と磁気センサの物理的な設定を可能にする必要がある。ベクトル磁気特性可視化装置では V-H センサの近傍に CCD カメラを設置し、その画像とメッシュデータを重ね合わせることで測定位置が設定できるように考案した。図 4.2.7 にベクトル磁気特性可視化装置の測定位置設定画面を示す。図の設定画面はモータの固定子にメッシュデータを重ね合わせた状態である。メッシュの重心位置を磁気センサの中心として測定を行う。

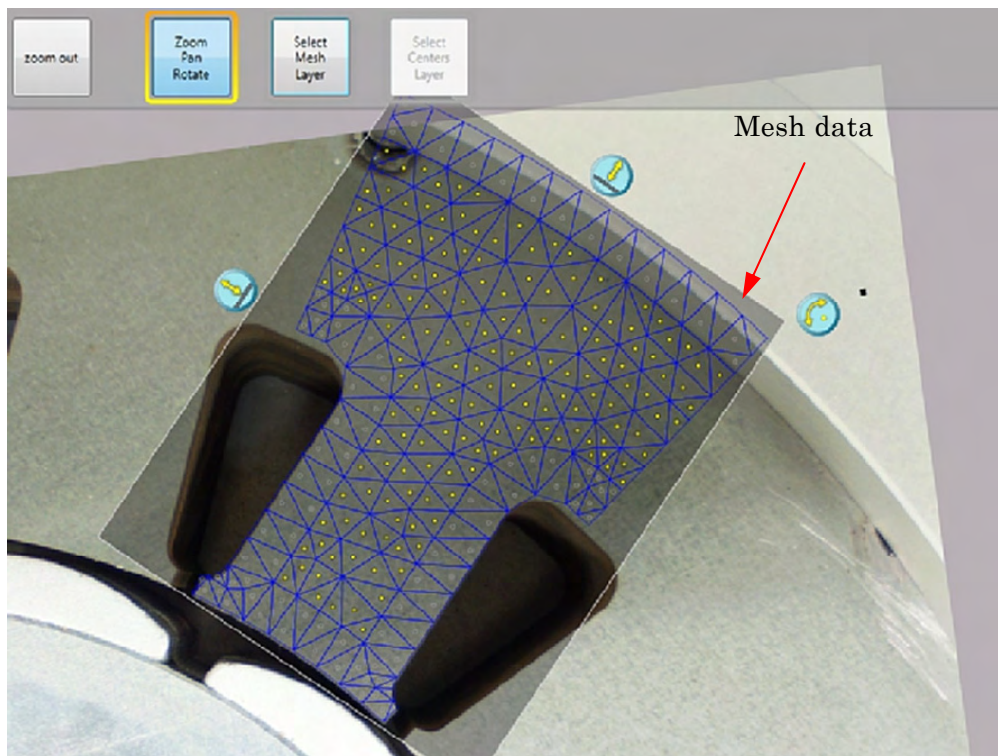


Fig. 4.2.7 Setting screen of a measurement position.

図 4.2.7 測定位置設定画面

4.2.6 ベクトル磁気特性可視化装置操作手順

ベクトル磁気特性可視化装置の操作手順を操作画面により説明する。ベクトル磁気特性可視化装置はソフトウェア「Motor Core Evaluation」により制御されている。この操作画面にしたがって操作することでスムーズに測定条件の設定と測定データの確認がスムーズに行える。

ステップ（1）プロジェクトの作成

測定開始時に測定条件，測定データを管理するプロジェクトを作成する。図 4.2.8 に示すプロジェクト作成画面の Create new project ボタンをクリックすると次の手順に移行する。

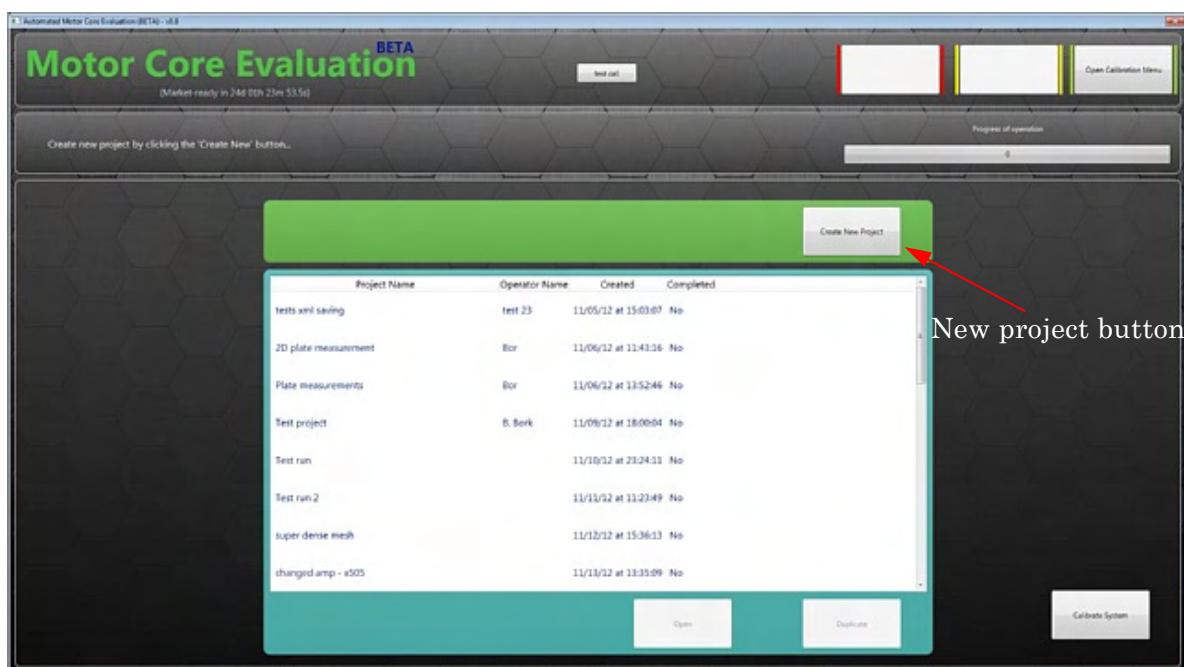


Fig. 4.2.8 Operation screen of create new project.

図 4.2.8 プロジェクト作成画面

ステップ（２）プロジェクト名，記事の入力

Create new project ボタンをクリック後，図 4.2.9 に示すプロジェクトの詳細入力画面となる。

- ・プロジェクトタイトル
- ・プロジェクト詳細
- ・試料名称
- ・オペレータ氏名

を入力することができる。なお，プロジェクト作成日時は自動で入力される。

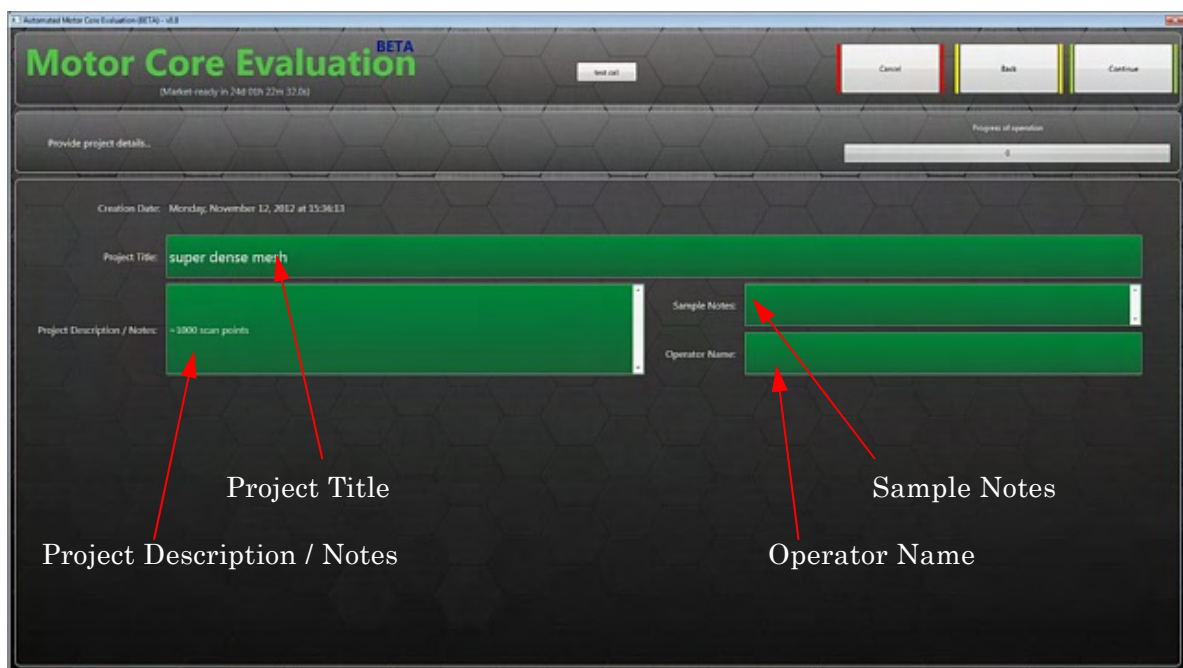


Fig. 4.2.9 Operation screen of provide project details.

図 4.2.9 プロジェクト入力画面

ステップ（3）測定領域の定義

プロパティ記入後は図 4.2.10 に示す測定領域の設定画面となる。操作画面右下にある CCD カメラ移動ボタンを操作し、測定する領域をモニタ画面に表示する。CCD カメラの露光時間およびフォーカスはそれぞれ手動と自動の切り替えが可能であるので、装置の設置環境で選択する。

CCD カメラの移動速度は、High / Medium / Low Speed の 3 段階に設定できるため、試料の大きさにより使い分ける。また、CCD カメラ移動ボタンは FRONT / BACK と RIGHT / LEFT の 4 つのボタンで構成され、連続移動用と 5 mm Step 用の 2 つを用意し、操作性を向上させている。

測定領域を決定後 Add Region ボタンをクリックし測定領域が決定する、右側中段に設定した測定領域が表示される。

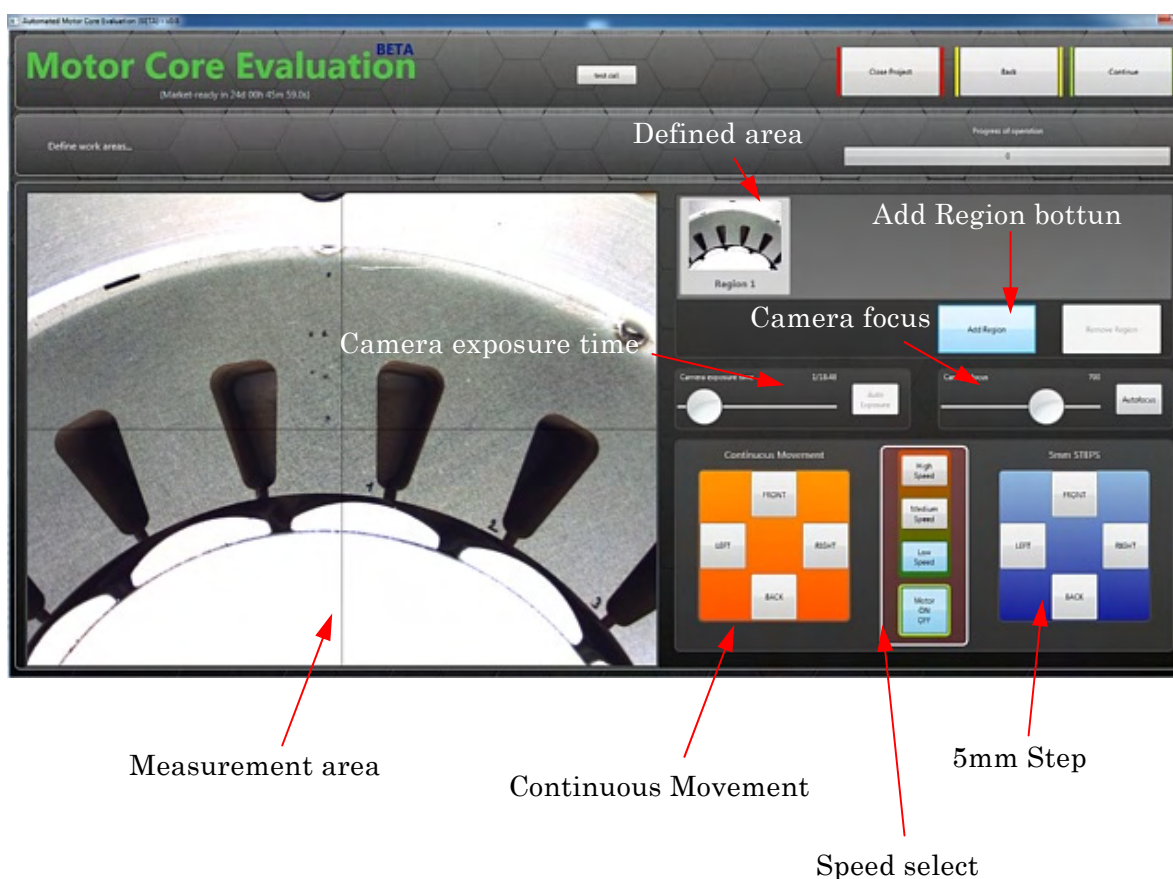


Fig. 4.2.10 Operation measurement area definition.

図 4.2.10 測定領域設定操作画面

ステップ（４）測定間隔（X-Yメッシュ）の設定

測定領域設定後は図 4.2.11 に示す測定メッシュの設定画面となる。測定メッシュは「メッシュなし」, 「X-Yメッシュ」, 「メッシュデータのインポート」から選択できる。この画面は X-Yメッシュの設定を選択している。

Measurement Point Mesh 内の X-Y Mesh をクリックし「X-Yメッシュ」モードに設定する。領域画面中には X-Yメッシュが表示される, 表示された X-Yメッシュを指でドラッグし測定領域に移動させる。測定領域の幅, 高さ, 角度の調整は X-Yメッシュの右側および下部に表示されているボタンをドラッグし調整する。

測定の分割数は操作画面左下の(X-Y) Rectangular Mesh Properties 内の Width Points と Height Points の増減ボタンを操作して設定する。

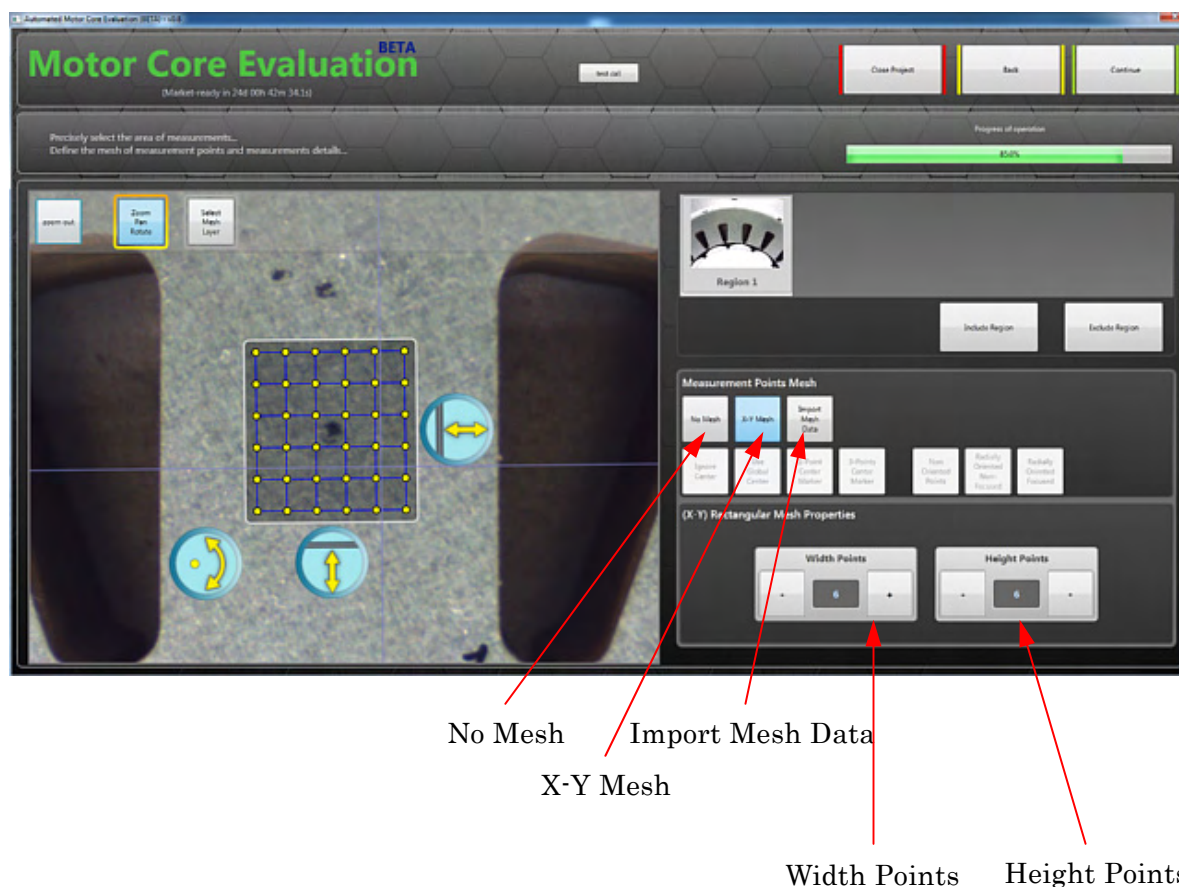


Fig. 4.2.11 Operation measurement point definition.

図 4.2.11 測定メッシュ設定操作画面

ステップ（５）測定間隔（メッシュデータのインポート）の設定

「メッシュデータのインポート」選択後は図 4.2.12 に示す測定メッシュを使用したの設定画面となる。この画面はメッシュデータインポート後の設定画面である。

Imported Mesh Properties 内の Mesh Source File 欄右の Load Mesh ボタンをクリックしメッシュデータをインポートする。領域画面中にメッシュデータが表示される、表示されたメッシュデータを指でドラッグし測定領域に移動させる。測定領域の幅、高さ、角度の調整はメッシュデータの右側および下部に表示されているボタンをドラッグし調整する。設定の完了後は操作画面右上の Continue ボタンをクリックし次の設定を行う。

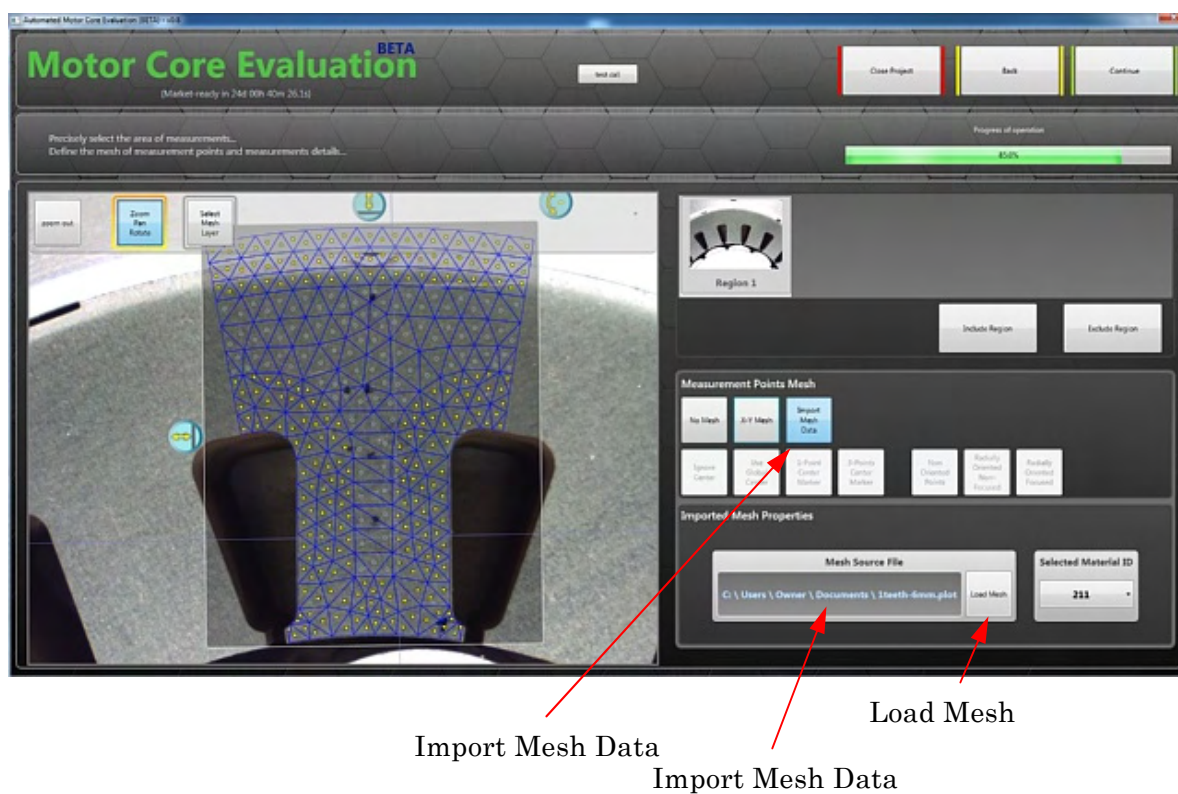


Fig. 4.2.12 Operation measurement point definition.

図 4.2.12 測定メッシュ設定操作画面

ステップ（６）測定条件の設定

測定メッシュ設定後は図 4.2.13 に示す測定条件の設定画面となる。設定項目は A/D コンバータの入力フィルターカットオフ、記録時間、トリガーレベル、入力レンジの設定を行い、測定試料特性の試料厚み、モータの極数の設定および、V-H センサの押し付け圧力、絶縁被膜貫通動作回数、V-H センサ移動時のリフトオフ高さの設定を行う。

各設定は画面上の白丸状のアイコンをドラッグすることで行う。



A/D Converter Settings

- Signal Bandwidth
- Record Length
- Trigger Level
- Signal Voltage Range

Sample Properties

- Sample Thickness
- Number of poles

Sensor Contact Settings

- Scratching Force
- Scanning Force
- Scratch the Sample
- Travel Lift-off

Fig. 4.2.13 Operation measurement condition.

図 4.2.13 測定条件設定操作画面

ステップ（7）測定画面

測定条件設定後は SCARA ロボットが動作し、V-H センサを設定位置に移動し磁気特性の測定を開始する。測定中は図 4.2.14(a)に示す測定中のモニタ画面となる。

測定中は、画面左に測定箇所、画面中央に V-H センサの押し付け圧力をモニタし、画面右は V-H センサの出力信号をモニタでき、V-H センサの電圧出力、磁束密度波形、B-H 波形の表示を切り替えできる。

画面右上に進捗レベルのバーグラフを備えている。測定終了後 SCARA ロボットは原点に戻る。

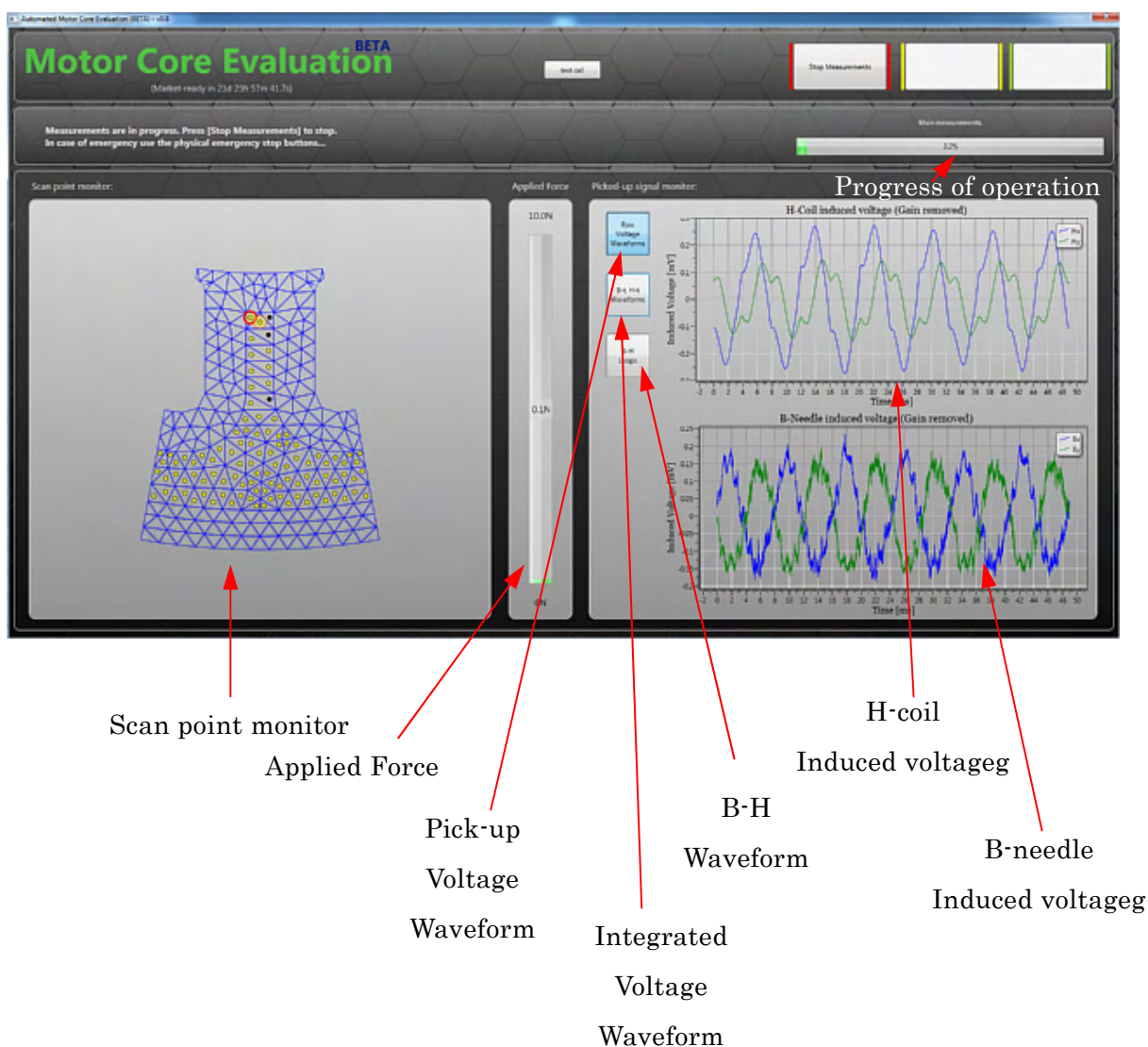


Fig. 4.2.14 (a) Measurement monitor.

図 4.2.14 (a) 測定画面

波形モニタ画面を磁界強度波形および磁束密度波形に切り替えた状態を図 4.2.14(b)に示し、測定中の波形モニタ画面を Hx-Hy, Bx-By Loop および Bx-Hx, By-Hx Loop に切り替えた状態を図 4.2.14(c)に示す。

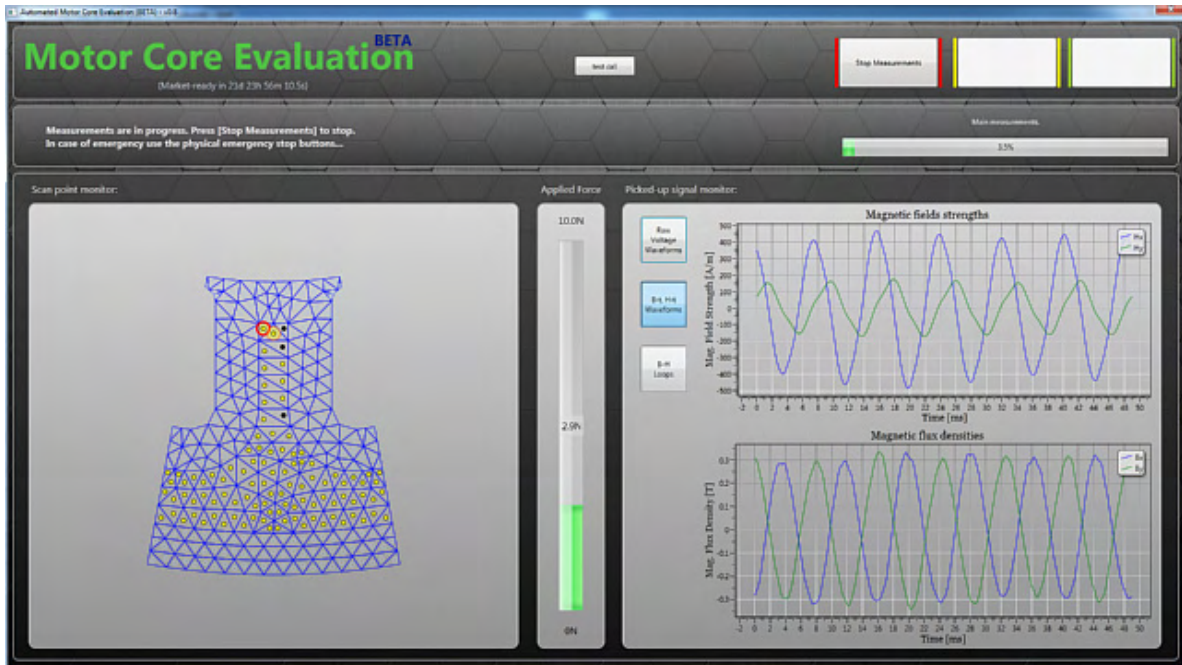


Fig. 4.2.14 (b) Measurement monitor.

図 4.2.14 (b) 測定画面

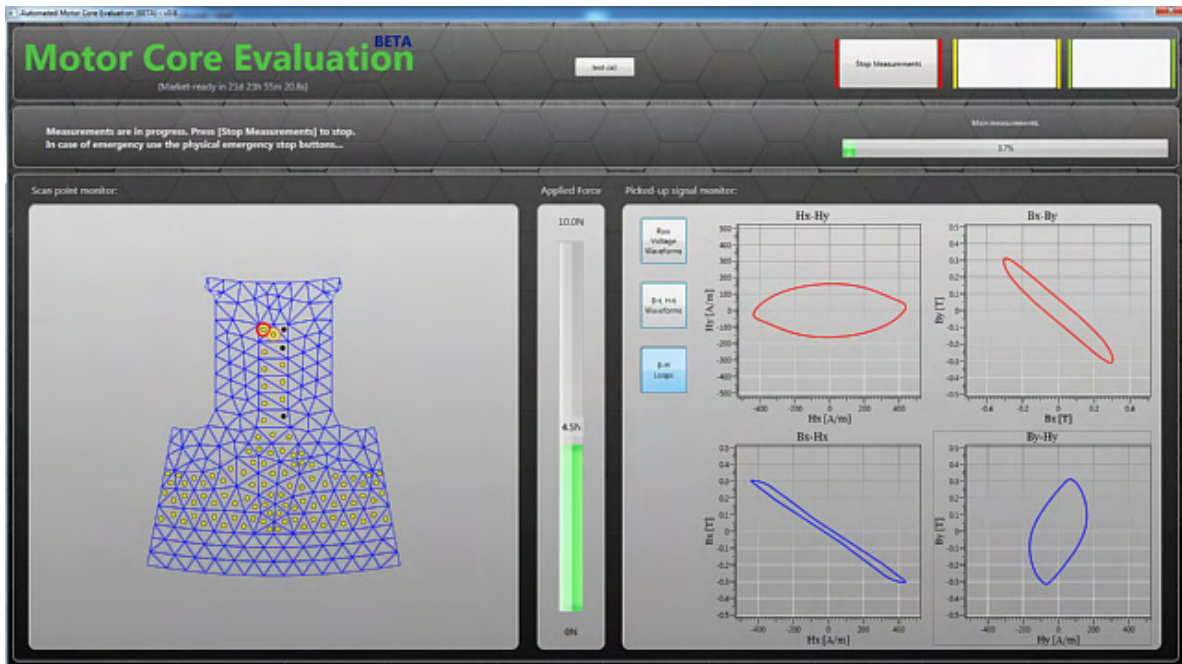


Fig. 4.2.14 (c) Measurement monitor.

図 4.2.14 (c) 測定画面

ステップ（８）分布表示画面

測定終了後はの図 4.2.15(a)に示す磁気特性分布表示画面となる。

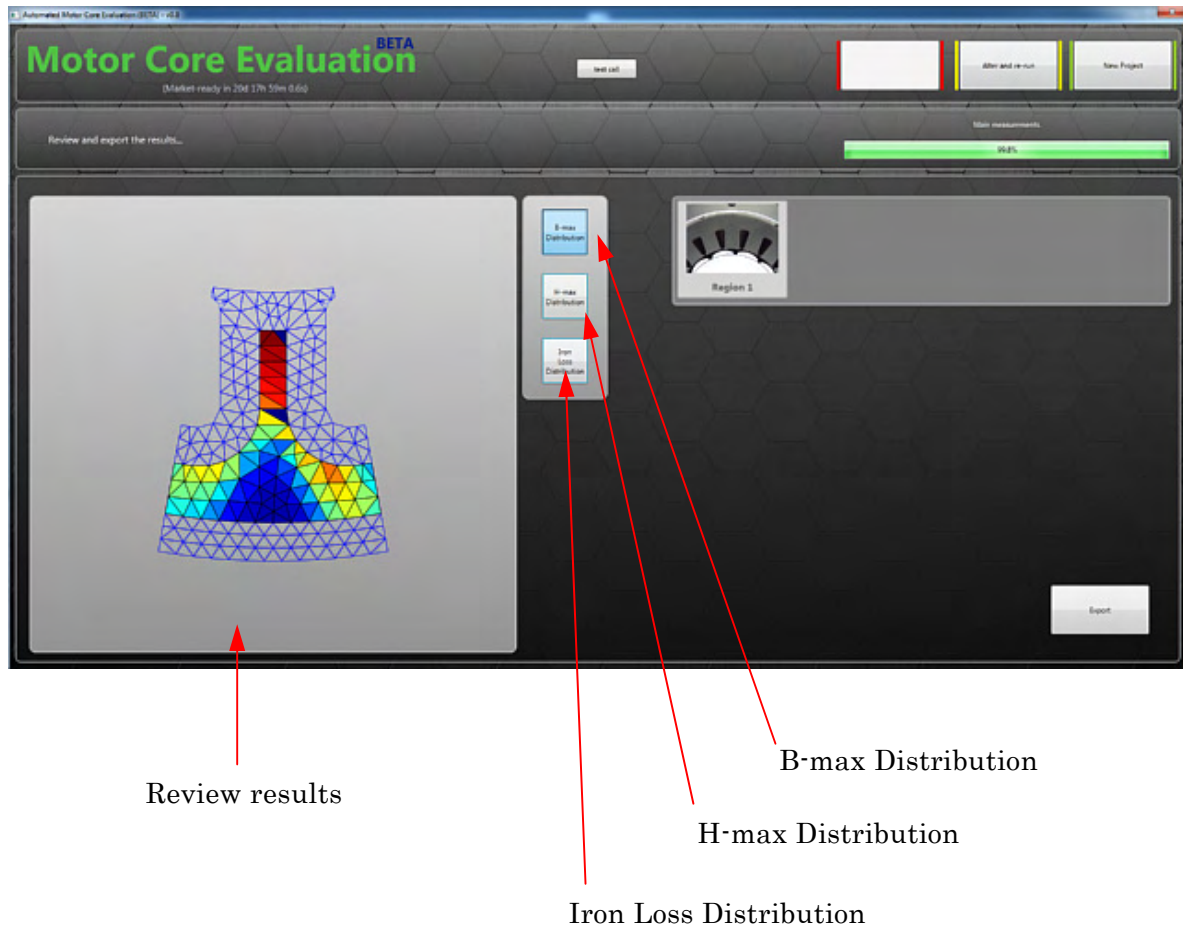


Fig. 4.2.15 (a) Measurement results monitor.

図 4.2.15 (a) 測定結果表示画面

測定中の波形モニタ画面を磁界強度分布に切り替えた状態を図 4.2.15(b)に示し、測定中の波形モニタ画面を鉄損分布に切り替えた状態を図 4.2.15(c)に示す。

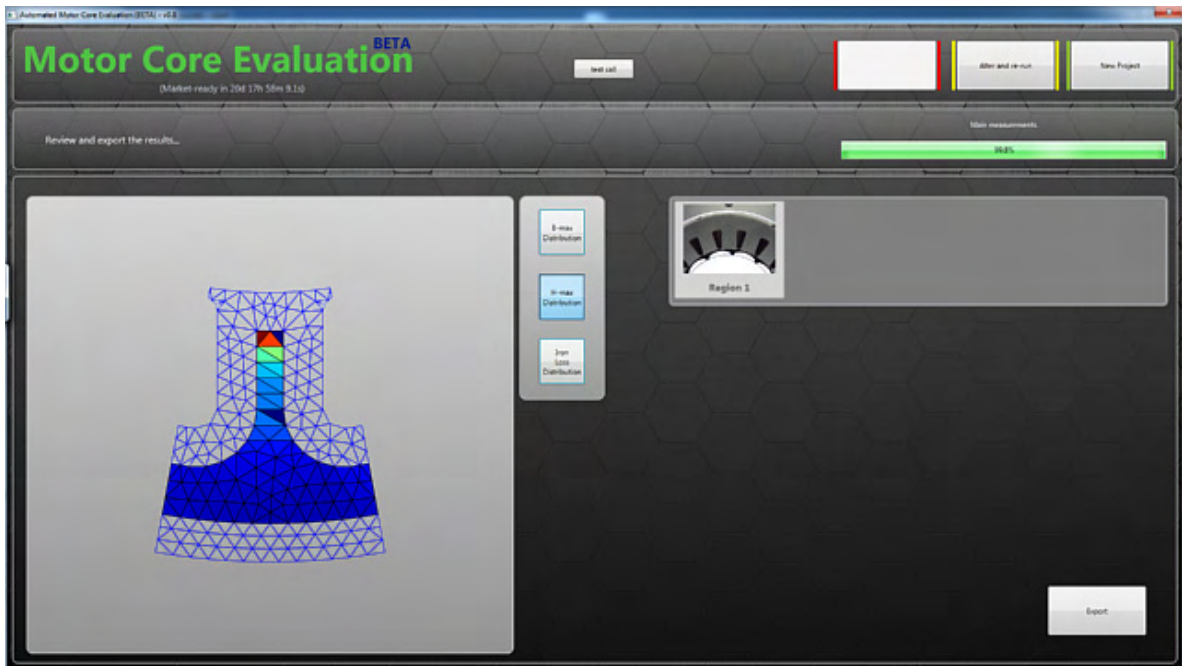


Fig. 4.2.15 (b) Measurement results monitor.

図 4.2.15 (b) 測定結果表示画面

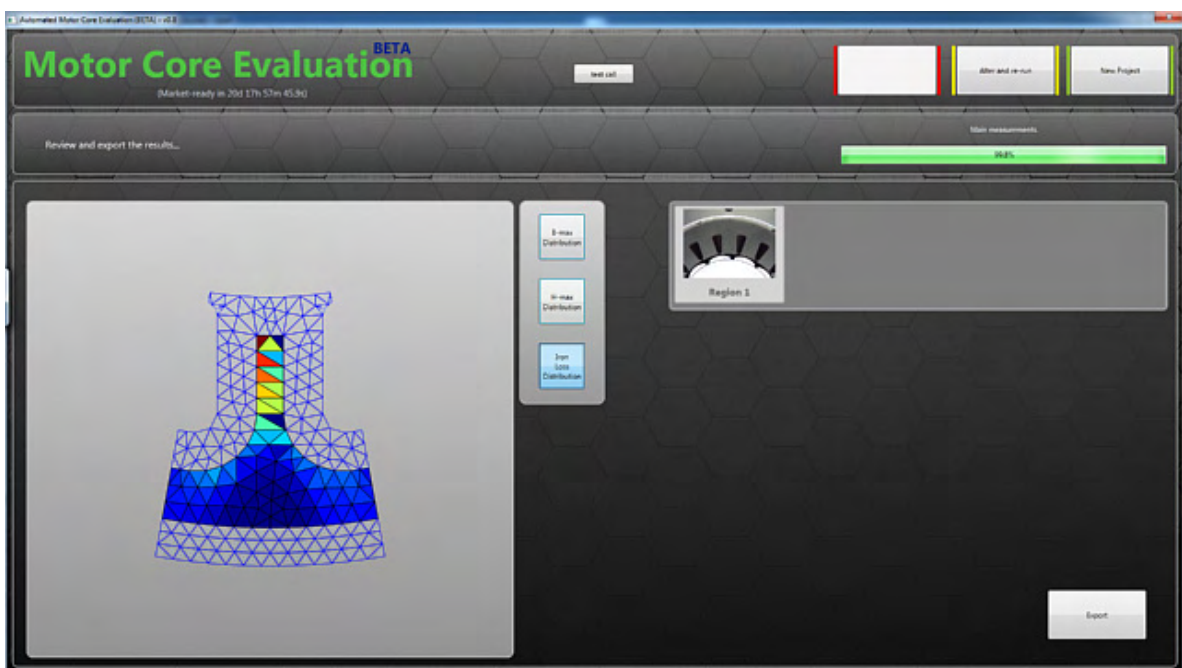


Fig. 4.2.15 (c) Measurement results monitor.

図 4.2.15 (c) 測定結果表示画面

第 4.3 節 モータモデルの磁気測定

4.3.1 測定モデルと測定条件

固定子の磁気測定を測定するために励磁巻線があると鉄心上に V-H センサを当てることができない。近年では、モータの高効率と小型化のために永久磁石モータの採用が増えていること。また、市販品のモータを購入して測定するまでの改造の手間を考慮して、本測定では表面磁石型回転子のモデルモータを製作し、固定子を励磁するための工夫として回転子を外部のモータにより回転させ固定子を励磁出来る装置を製作し組み合わせた。測定用のモータはベルトにより接続した AC サーボモータにより回転数を制御できる。

測定するモデルモータの構造を図 4.3.1 に、モデルモータの外観を図 4.3.2 に示す。表面永久磁石型モデルモータの外径は $\phi 120\text{mm}$ 、長さ 100mm で、固定子の極数は 12 スロットである。固定子の幅は 10mm である。固定子の電磁鋼板は 50H470 を使用し 30mm 積層した。回転子の永久磁石には NEOMAX-50 を使用している。回転子の回転数は V-H センサの出力周波数が 50Hz になるように 1200rpm とした。

V-H センサは探針間隔が 2.5mm で H コイルのサイズが $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ の極小サイズである。この V-H センサの B 探針は探針間隔が 7mm ものと同様な絶縁被膜貫通機能を搭載することが出来ず、位置制御用のロボットの θ 軸の回転を付加することで電磁鋼板の絶縁被膜を引っ掻き、絶縁被膜を部分的に取り除くことで探針と電磁鋼板の地鉄との安定した電氣的な接触を実現している。

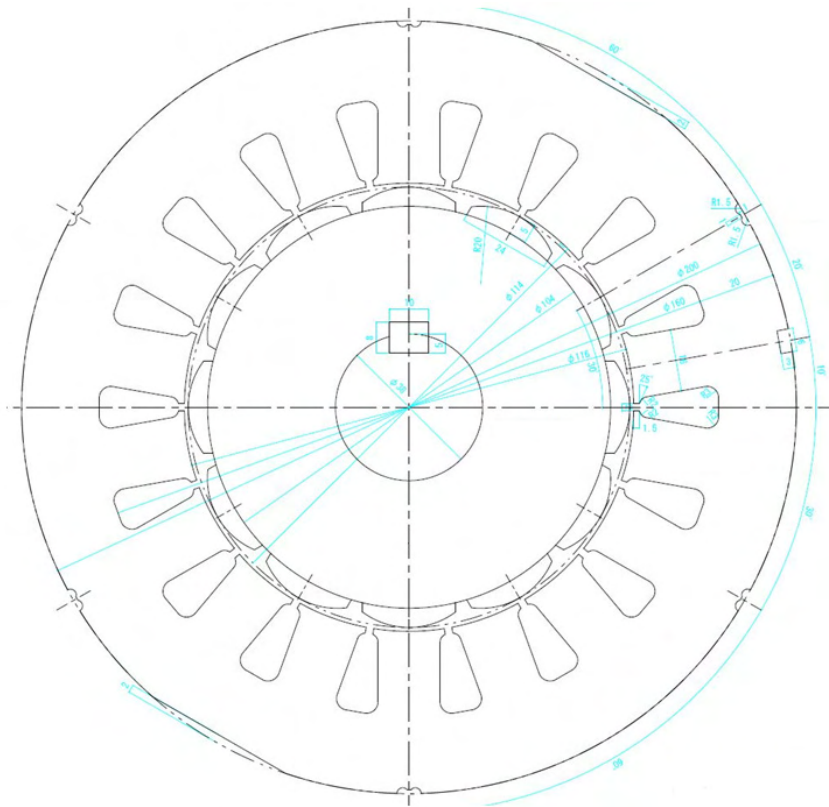


Fig. 4.3.1 Specification of model motor.

図 4.3.1 モデルモータ形状

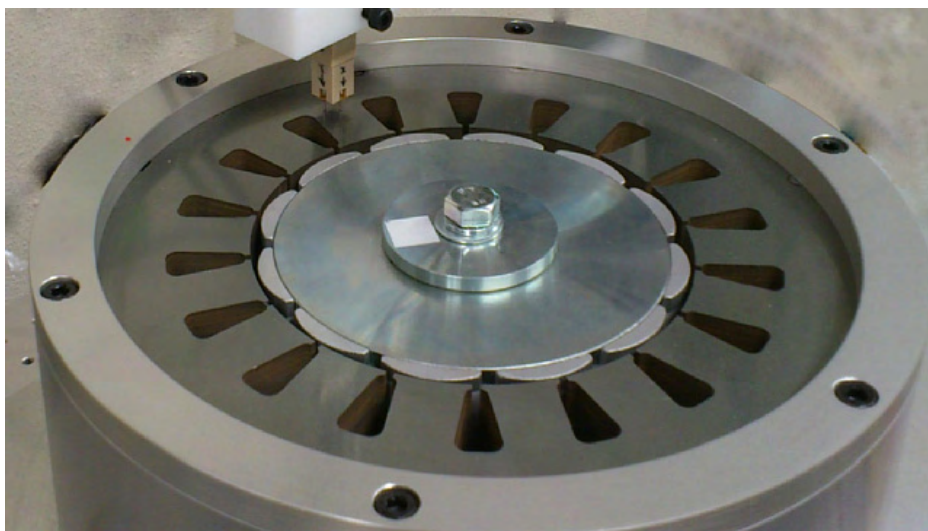


Fig. 4.3.2 Photograph of model motor.

図 4.3.2 モデルモータ外観

4.3.2 測定結果

永久磁石型回転子を外部より回転させることにより固定子を励磁した時の磁気特性を測定した。結果を以下に示す。

図 4.3.3(a)の最大磁束密度分布と図 4.3.3(b)の最大磁界強度分布からティース先端に向かって磁束密度および磁界強度が高い分布となっていることがわかる。そして、図 4.3.3(c)の鉄損分布もティース先端部分に高くなっていることがわかる。

図 4.3.4(a)の最大磁束密度分布に B_x - B_y の軌跡を重ねた結果を見ると磁束密度の高い部分に大きな回転磁束が発生している。同様に図 4.3.4(b)の最大磁界強度分布に H_x - H_y の軌跡を重ねた結果にも磁界強度の高い部分に回転磁界が発生しているのがわかる。

このように、従来の磁気特性測定技術では、磁気センサのサイズの制約から測定できなかったモータティース部のベクトル磁気特性の分布が測定可能となり、数値解析で設計した磁気特性と測定した磁気特性を比べることにより、実機で発生している今まで見ることはできなかった問題点を確認できることや、数値解析の精度を向上することが可能となる。

本測定では、モデルモータであるが、従来の磁気センサでは測定出来なかったが、極小局所 V-H センサと一新した自動分布測定装置の組合せによりベクトル磁気特性の可視化を実現できた。

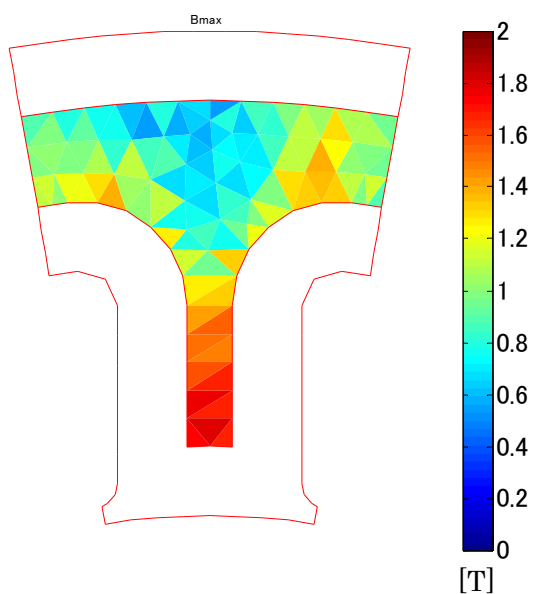


Fig. 4.3.3(a) Distribution of the maximum flux density.

図 4.3.3(a) 最大磁束密度分布

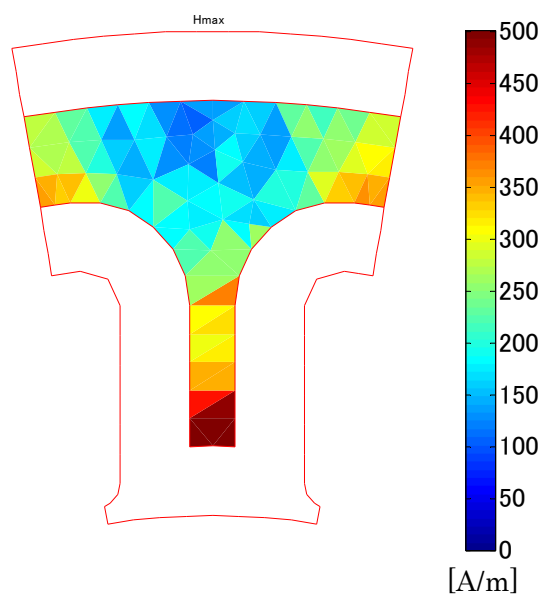


Fig. 4.3.3(b) Distribution of the maximum field strength.

図 4.3.3(b) 最大磁界強度分布

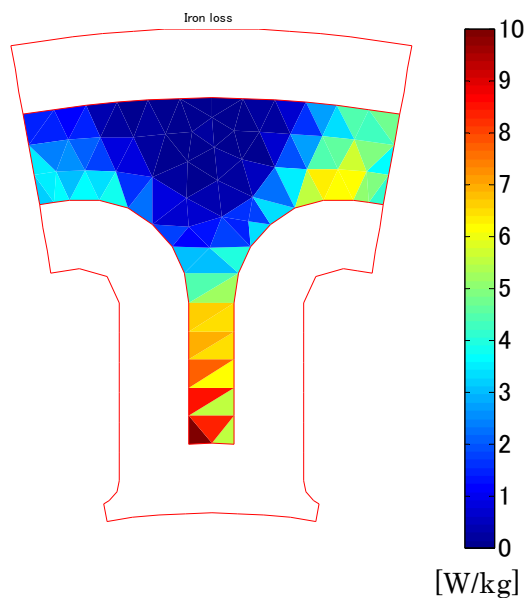
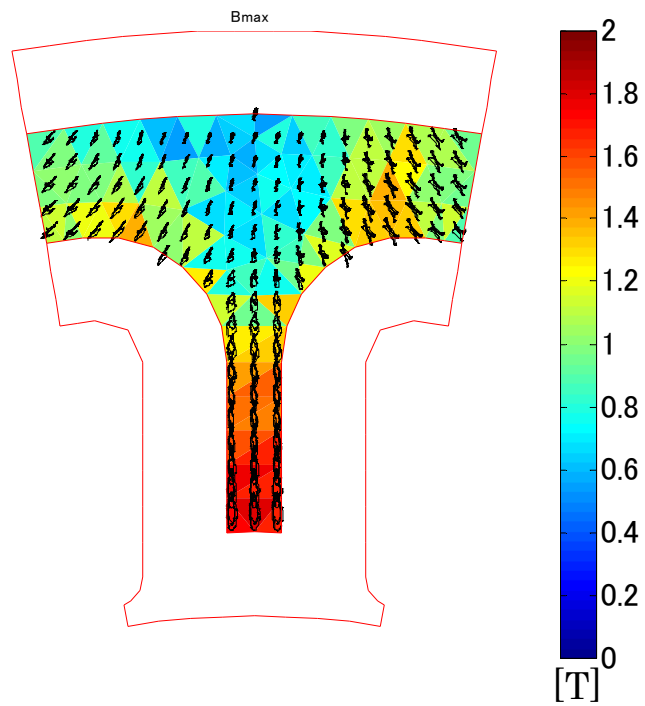
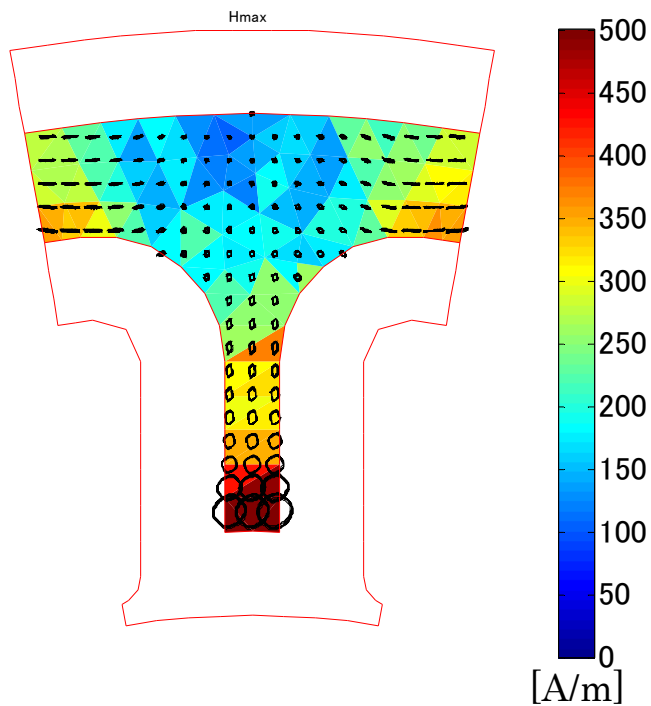


Fig. 4.3.3(c) Distribution of the core loss.

図 4.3.3(c) 鉄損分布



(a) Distribution of the maximum flux density



(b) Distribution of the maximum field strength

Fig.4.3.4 Distributions of the maximum flux density, the maximum field strength.

図 4.3.4 磁束密度軌跡と磁界強度軌跡

第 4.4 節 結言

本章では、極小局所 V-H センサを搭載したベクトル磁気特性可視化装置を構築し、表面磁石型モータモデルコアの詳細な二次元ベクトル磁気特性の分布を明らかにした。その結果を以下にまとめる。

- (1) 極小局所 V-H センサの位置決め装置として SCARA ロボットを搭載したベクトル磁気特性可視化装置を構築した。
- (2) 測定箇所の設定を容易にするために、数値解析用のメッシュデータをモータ表面形状の画像と重ね合わせることで測定位置の設定が可能な方法を開発した。
- (3) モータの磁気特性測定の方法として、表面磁石型回転子を外部より回転させることにより固定子のティース部分の二次元ベクトル磁気特性の測定が可能であることを示した。
- (4) 探針間隔が 2.5 mm で H コイルサイズが 2 mm×2 mm の極小局所 V-H センサを搭載したベクトル磁気特性可視化装置により従来測定することができなかった表面磁石モータの二次元ベクトル磁気特性が測定可能となり、モータティース部の詳細な二次元ベクトル磁気特性分布を可視化することができた。そのことにより、従来のモータの特性改善方法と異なる局所的な磁気特性手法の取り組みおよび確認が可能となった。

第5章 結論

第5.1節 本論文の総括

本論文は変圧器やモータの低損失・高効率化を目的として、電気機器実機中の鉄心の磁気特性を測定するための局所 V-H センサの小型化と、小型化した局所 V-H センサの精度の検証および測定手法について研究を行ったものである。本研究で得られた成果は、極小局所 V-H センサを使用して電気機器実機中の鉄心の磁気特性を測定することで鉄損の発生状況はもとより、磁束密度および磁界強度ベクトルを詳細に把握できることである。そのことにより、変圧器やモータ等の特性改善効果が容易に評価・測定できることから変圧器およびモータの低損失・高効率化の開発・設計に大きく貢献することができると考えられる。

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 電磁材料の有効活用技術の観点から、二次元ベクトル磁気特性を考慮した磁気特性測定が重要であり、電気機器実機の鉄心中の磁気特性測定を正確に知ることが重要である。開発した極小局所 V-H センサは本目的に対して有効に利用できる。
- (2) 極小局所 V-H センサのサイズを探針間隔 2.5 mm で H コイルサイズを 2 mm×2 mm にすることにより、方向性電磁鋼板の持つ結晶粒の影響や、鉄損低減のために施されたスクラッチの効果を測定することが可能となり、鉄心中の交番磁束や回転磁束など複雑な磁化現象を正しく表現し磁気異方性を測定することができる。そして、鉄損低減とコア形状の最適化のための磁気回路測定手法として有効な測定技術であるといえる。
- (3) 極小局所 V-H センサの B 探針に電磁鋼板に施された絶縁被膜を取り除くことなく測定できる絶縁被覆貫通型探針を開発することにより、電磁鋼板の特性を劣化させることなく磁気特性を測定可能とし、方向性電磁鋼板の張力被膜の効果を明らかにした。
- (4) 探針法の測定精度を 2 mm から 20 mm まで 2 mm 間隔で評価することにより、探りコイルと遜色ない精度であることを示した。
- (5) H コイルの巻線が持つ浮遊容量を明らかにすることで、H コイルの周波数特性を明らかにし、磁界強度の補正方法について提案し、極小局所 V-H センサの測定精度を向上できることを示した。

- (6) 極小局所 V・H センサを搭載し、複雑な形状のモータコアのような実機に対しても測定箇所の設定が容易なベクトル磁気特性可視化装置を「ベクトル磁気特性可視化装置」として商品化し、変圧器やモータ実機鉄心中の磁気特性分布の可視化を可能にした。このことにより二次元ベクトル磁気特性測定技術を身近なものとするとともに、モータの複雑な形状でも容易に測定できることを示した。

第 5.2 節 今後の研究課題

今後の研究課題として、下記のような点が挙げられる。

電気機器の実機中の磁気特性を正しく把握するために極小局所 V-H センサを開発し、モデルコアの二次元ベクトル磁気特性を測定することで極小局所 V-H センサが有効なことを確認した。また、極小局所 V-H センサを使用して電気機器実機中の磁気特性測定が容易に出来るベクトル磁気特性分布装置である「ベクトル磁気特性可視化装置」を開発した。

本研究での測定はモデルコアを製作して行ったが、研究本来の目的である電気機器実機中の磁気特性測定を行い損失の低減・効率の向上を行う必要がある、そのためには次の課題の解決が必要である。

(1) 実機に対応した測定技術の改良

本論文では、磁気回路モデルおよびモータモデルを使用して極小局所 V-H 磁気センサを使用して測定を行っているが、実際の変圧器やモータ実機測定はまだできていない。二次元ベクトル磁気特性技術をより実際の応用に生かすには、極小局所 V-H センサおよび測定システムの改良が必要である。

(2) より局所的な極小局所 V-H センサの開発

本論文では、B 探針の間隔が 2.5 mm、H コイルの幅が 2 mm の極小局所 V-H センサを開発し、磁気回路モデルの測定を行ったが、モータティース等の複雑な形状の磁気回路を測定するにはもう一段小型化した極小局所ベクトル磁気センサの開発が必要である。

小型化の方法として、構造を簡略化し加工をしやすくするために極小局所 V-H センサを一次元とすることで H コイルの幅は 1.5 mm 程度まで小型化できるものと思われる。測定はベクトル磁気特性可視化装置の θ 軸モータを使用し X 方向測定後 90° 回転し Y 方向を測定することで可能となる。

(3) 測定システムの改良

極小局所 V-H センサの探針間隔を 2.5 mm まで極小化したことにより、出力信号が小さくなり S/N 比が低下するとともに、探針の接触が不安定になり再測定や、ノイズ対策で測定時間を費やすことになった。探針の接触状態を磁気特性測定前に確認する回路を内蔵することや、測定時のノイズ対策のために適切な平均化回数を設定し測定時間の短縮が必要である。

V-H センサ表面と試料表面が平行に接触できるように、試料テーブルの角度調整が容易にできる機構の付加などの機構面の改良が必要である。

謝辞

本論文は、著者が大分大学大学院工学研究科博士後期課程に在学中において「極小局所ベクトル磁気センサによる磁気特性測定法」に関する研究についてまとめたものである。また、在学中に参画した、科学技術振興機構が支援する地域イノベーション創出総合支援事業の大分県地域結集型開発プログラム「次世代電磁力応用機器開発技術の構築」の研究開発プロジェクトにおいて、当該研究の一環として遂行した研究成果を集約したものである。

本研究にあたって、ご指導とご鞭撻を頂いた大分大学工学部電気電子工学科、榎園正人教授に心から感謝の意を表し、ここに厚く御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたり数多くの有益な御教示を頂いた大分大学工学部電気電子工学科の秋田昌憲教授、戸高孝准教授、福祉環境工学研究科の小川幸吉教授、群馬大学の長屋名誉教授ならびに、大分工業高等専門学校情報工学科の岡茂八郎教授に深く感謝の意を表します。

本論文をまとめる機会を頂きました元西日本電線株式会社研究開発部長柴北俊英氏（現吉野川電線株式会社取締役）に深く感謝いたします。

また、本研究を進めるにあたり、数多くの配慮を頂いた大分大学工学部電気電子工学科の槌田雄二助教、また、V-Hセンサによる二次元ベクトル磁気特性測定の研究に関して多大なるご支援とご指導を頂きました大分県産業創造機構研究員の工学博士下地広泰氏、工学博士ARTOSZ BORKOESKI氏さらに工学博士佐藤尊氏に深くお礼申し上げます。

なお、本研究を進めるにあたり、数多くのご協力を頂いた大分大学工学部磁気工学研究室の卒業生の甲斐孝幸氏、院生の大岡慶一郎氏ならびに院生と卒論生諸氏に感謝いたします。

最後に本論文は家族の理解と協力がなければまとめることができませんでした。子供たちと妻真裕美に心から感謝します。

参考文献

- [1] (株)富士経済,「電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査」2009
- [2] 経済産業省, 資源エネルギー庁, エネルギー白書, 2011
- [3] PLASTIC AGE ENCYCOPEDIA 進歩編編集委員会,「世界のエネルギー問題と日本の対応」, 2011
- [4] 佐藤友香, 小林茂樹「化石燃料の現状と石油の将来」豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol. 32, No. 2, 1997
- [5] PLASTIC AGE ENCYCOPEDIA 進歩編編集委員会, 弘岡正明,「日本経済, 地球環境の諸問題」, 2011
- [6] 気象庁,「海氷面積の長期変化傾向(全球)」, 2011
- [7] 越智政和,「変圧器の特定機器化と省エネルギー」, 総合設備コンサルタント, 技術年報, Vol. 31, pp. 30-33, 2006
- [8] 環境省地球環境局,「地球温暖化の影響・適応情報資料集」, 2009
- [9] 財団法人川鉄 21 世紀財団,「鉄鋼プロセス工学入門」, 1994
- [10] 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 省エネルギー技術開発室,「即効性・革新的エネルギー環境技術開発 超低損失柱上トランス用材料の開発」, 2002
- [11] WILLIAM STANLEY, United States patent No. 349611, INDUCTION-COIL, 1958
- [12] NIPPON STEEL MONTHLY ,「世界の省エネルギーを支える新日鉄の電磁鋼板」, 2004
- [13] NIPPON STEEL MONTHLY,「電磁鋼板 磁性材料として“鉄”の特性を最大限に引き出す(上)」, 2005
- [14] NIPPON STEEL MONTHLY,「電磁鋼板 磁性材料として“鉄”の特性を最大限に引き出す(下)」, 2005
- [15] 日本工業規格, JIS C 2556,「電磁鋼板単板磁気特性試験方法」, 1996
- [16] M. Enokizono, T. Suzuki, J. Sievert, J. Xu, "Rotational Power Loss of Silicon Steel Sheet", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, No. 5, pp. 2562-2564, 1990
- [17] G. Krismanic, E. Leiss, S. Barsoum, H. Pfutzer, "Automatic Scanning System for the Determination of Local Loss Distributions in Magnetic Cores" Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 254-255, pp. 60-63, 2003
- [18] S. Tumanski, M. Stabrowski, "The Magnetovision Method as a Tool to Investigate the Quality of Electrical Steel" Warsaw University of Technology, Institute of Electrical Theory and Measurements, Vol. 9, pp. 488-795, 1998
- [19] 石原好之,「電力用磁性材料の測定技術」, 電気学会マグネティックス研究会資料,

- MAG-11-066, pp. 19-25, 2011
- [20] J. Sievert, "Studies on the Measurement of Two-dimensional Magnetic Phenomena in Electrical Sheet Steel at PTB", First International Workshop on Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel under Two-Dimensional Excitation Proceedings of the 93. PTB-Seminar, PTB-E-43, pp. 102-116, 1992
- [21] F. Werner, Austrian Patent No. 191015, 1949
- [22] L. H. Stauffer, "Methods of and Device for Determining the Magnetic Properties of Specimens of Magnetic Material" United States Patent No. 2828467, 1958
- [23] 榎園正人, 戸高孝, 川村耕世, J. D. Sievert, 「三相変圧器モデルの 2 次元磁気特性分布」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 39-42, 1993
- [24] 榎園正人, 田邊郁雄, 「方向性けい素鋼板の局所 2 次元磁気特性」, 日本応用磁気学会誌, Vol. 22, No. 4-2, pp. 901-904, 1998
- [25] M. Enokizono, I. Tanabe, T. Kubota, "Localized Distribution of Two-dimensional Magnetic Properties and Magnetic Domain Observation," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 196-197, pp. 338-340, 1999
- [26] 榎園正人, 橋本芳典, 茂木尚, 「電磁鋼板の結晶粒の影響による鉄損分布と 2 次元磁気特性」, 日本応用磁気学会誌, Vol. 25, No. 4-2, pp. 899-902, 2001
- [27] Y. Hashimoto, M. Enokizono, "Measurement of the Localized Iron Loss in Electromagnetic Steel Sheet by Using the Needle Probe Method" Journal of Applied Physics, Vol. 91, No. 10, pp. 6935-6937, 2002
- [28] 利根貫司, 下地広泰, 榎園正人, 戸高孝, 「回転磁界条件での結晶粒を考慮した方向性電磁鋼板の 2 次元ベクトル磁気特性」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 13, No. 1, pp. 38-43, 2005
- [29] 倉員淳, 「ベクトル磁気特性自動測定システムを用いた三相変圧器鉄心内の磁気特性分布の測定」, 修士論文, 2009
- [30] W. Brix, K. A. Hempel and F. J. Schulte, "Improved Method for the Investigation of the Rotational Magnetization Process in Electrical Steel Sheet," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 20, No. 5, pp. 1708-1710, 1984
- [31] 三木智之, 原田和朗, 石原好之, 戸高敏之, 「探針法によるけい素鋼板の磁気特性の測定」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-94-70, pp. 65-71, 1994
- [32] 山口俊尚, 今村正明, 千田邦浩, 石田昌義, 佐藤圭司, 本田厚人, 山本孝明, 「探針法による局所磁束測定精度の理論的評価」, T. IEE Japan, Vol. 115-A, No. 1, pp. 50-57, 1995
- [33] 千田邦宏, 石田昌義, 小松原道朗, 「探針法による 3%珪素鉄単結晶板の局所磁気特性

- の測定」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-95-99, pp. 7-16, 1995
- [34] 千田邦浩, 石田昌義, 佐藤圭司, 小松原道朗, 山口俊尚, 「探針法による方向性電磁鋼板の局所磁気測定」, T. IEE Japan, Vol. 117-A, No. 9, pp. 942-949, 1997
- [35] G. Loisos, A. J. Moses, "Critical Evaluation and Limitations of Localized Flux Density Measurements in Electrical Steels" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 4, pp. 2755-2757, 2001
- [36] S. Tumanski, "Induction coil sensors-a review" Measurement Science and Technology, Vol. 18, pp. R31-R46, 2007
- [37] H. Pfitzner, G. Krismanic, "The Needle Method for Induction Tests: Sources of Error" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 3, pp. 1610-1616, 2004
- [38] G. Crevecoeur, P. Sergeant, L. Dupre, L. Vandenbossch, R. V. Walle, "Analysis of the Local Material Degradation Near Cutting Edges of Electrical Steel Sheets" IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, pp. 3173-3176, 2008
- [39] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構・ナノテクノロジー・材料技術開発部, 「変圧器の電力損失削減のための革新的磁性材料の開発」, 2005
- [40] 相原茂, 梅原英嗣, 戸高孝, 榎園正人 「絶縁被膜貫通型 4mm×4mm センササイズ磁気センサの試作とモデル変圧器鉄心内のベクトル磁気特性」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 18, No. 4, pp. 323-328, 2010
- [41] S. Aihara, T. Todaka, M. Enokizono, "Influence of Insulation Coating of Electrical Steel Sheets on Local Two-dimensional Vector Magnetic Properties" Journal of Electrical Engineering, Vol. 61, No. 7, pp. 85-88, 2010
- [42] S. Aihara, T. Todaka, M. Enokizono, "Characteristic Evaluation of 4mm-square-sized double H-coil" Electrical Review, R. 87, No. 9b, pp. 85-88, 2011
- [43] 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人, 「H コイルの位相特性を考慮した高磁束密度下における磁界強度波形の補正法の検討」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-11-126, pp. 61-66, 2011
- [44] 木部稔晴, 高橋康人, 藤原耕二, 石原好之, 沓掛暁史, 城門由人, 金田嗣教, 榎園正人, 「単板磁気特性試験器の精度検証 (その 2) -H コイルの巻線密度が測定精度に与える影響-」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-11-127, pp. 67-70, 2011
- [45] 前田義隆, 下地広泰, 戸高孝, 榎園正人, 「二次元ベクトル磁気特性におけるセンサコイルの影響の検討」, T. IEE Japan, Vol. 127-A, No. 4, pp. 159-164, 2007
- [46] J. A. Nelder, R. Mead, "A simplex method for function minimization" The Computer Journal, Vol. 7, Issue. 4, pp. 308-313, 1965
- [47] 甲斐祐一郎, 「磁気特性を利用した非破壊材料評価技術に関する研究」, 博士論文, 2009

- [48] 天岸祥光, 「磁気プローブ, ループでプラズマを探る」, プラズマ実験入門VI, pp. 1187-1193, 1993
- [49] 川崎昌二, 「ロゴスキーコイルによる交流大電流測定」, 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート, Vol. 1, pp. 14-23, 2000
- [50] K. Senda, M. Ishida, K. Sato, and M. Komatsubara, T. Yamaguchi, "Localized Magnetic Properties in Grain-Oriented Electrical Steel Measured by Needle Probe Method," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 126, No. 4, pp. 942-949, 1999
- [51] K. Senda, M. Kurosawa, M. Ishida, M. Komatubara, T. Yamaguchi, "Local Magnetic Properties in Grain-oriented Electrical Steel Measured by the Modified needle probe method," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216, pp. 136-139, 2000
- [52] 相原茂, 梅原英嗣, 下地広泰, 戸高孝, 榎園正人, 「局所 2 次元ベクトル磁気センサによる絶縁被膜付方向性電磁鋼板の磁気特性分布測定」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 140-145, 2011
- [53] 相原茂, 下地広泰, 戸高孝, 榎園正人, 「方向性電磁鋼板の結晶粒と局所 2 次元ベクトル磁気特性分布」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20, No. 1, pp. 72-77, 2012
- [54] 佐藤圭治, 石田昌義, 日名英司, 「耐熱型磁区細分化方向性電磁鋼板」, 川崎製鉄技報, Vol. 29, No. 3, pp.153-158, 1997
- [55] 岡部誠司, 石田昌義, 「積鉄心用の方向性電磁鋼板」, 公開特許公報, 特開平 11-111516, 1999
- [56] 石田昌義, 千田邦浩, 「磁気特性に優れた方向性電磁鋼板およびその製造方法」, 公開特許公報, 特開平 8-41602, 1996
- [57] 森戸延行, 小松原道朗, 清水洋, 「川崎製鉄の方向性電磁鋼板の歴史と最近の進歩」, 川崎製鉄技報, 29, 3, pp 129-135, 1997
- [58] S. Aihara, H. Simoji, T. Todaka, M. Enokizono, "Magnetic Property Distribution in a Magnetic Circuit Model Core Measured with a Very Small Two-dimensional Vector Magnetic Sensor" 日本 AEM 学会誌, Vol. 20, No. 2, pp.192-197, 2012
- [59] S. Aihara, H. Simoji, T. Todaka, M. Enokizono, "Measurement of Local Vector Magnetic Properties in Laser Scratched Grain-oriented Silicon Steel Sheet with a Vector-hysteresis Sensor" *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 11, pp. 4499-4502, 2012
- [60] 相原茂, 下地広泰, 戸高孝, 榎園正人, 「2.5mm×2.5mm サイズ 2 次元ベクトル磁気センサの精度評価と方向性電磁鋼板を用いた磁気回路モデルの磁気特性分布」, *T. IEE Japan*, Vol. 132-A, No. 11, pp. 1053-1060, 2012

- [61] 相原茂, 下地広泰, 戸高孝, 榎園正人, 「2次元ベクトル磁気センサの磁束密度測定精度の評価と磁気回路モデルの磁気特性分布の測定」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-11-131, pp. 13-18, 2011
- [62] T. Kai, S. Aihara, S. Todaka, M. Enokizono, "Investigation of Measured Distributions of Local Vector Magnetic Properties in a Three-Phase Induction Motor Model Core" *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 61, No. 7, pp. 115-118, 2010
- [63] 甲斐孝幸, 相原茂, 戸高孝, 榎園正人, 「小型 VH センサによる誘導電動機モデルコア中のベクトル磁気特性分布の測定」, 日本 AEM 学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 192-197, 2011
- [64] T. Kai, S. Aihara, T. Todaka, M. Enokizono, "Distributions of Local Vector Magnetic Property in a Three-phase Induction Motor Model Core by Using a Small-size Vector Hysteresis Sensor" *日本 AEM 学会誌*, Vol. 20, No. 2, pp. 149-154, 2012