

学術論文

局所 2 次元ベクトル磁気センサによる 絶縁皮膜付方向性電磁鋼板の磁気特性分布測定

Magnetic properties measurement of Insulation Coating of Grain-oriented Electric Steel Sheets on Local Two-dimensional Vector Magnetic Properties

相原 茂^{*1,2}(正員), 梅原 英嗣^{*1} (正員), 下地 広泰^{*3}(正員),
戸高 孝^{*2} (正員), 榎園 正人^{*2} (正員)

Shigeru AIHARA (Mem.), Eiji UMEHARA (Mem.), Hroyasu SHIMOJI (Mem.)
Takashi TODAKA (Mem.), Masato ENOKIZONO (Mem.)

This paper presents a small-sized vector-hysteresis sensor (V-H sensor), which has piercing B-needles to go through insulating coating of silicon steel sheets. The B-needle probe can break through the insulation coating of silicon steel sheets like a drill. The magnetic flux density vector B and the field strength vector H are measured with the B-needle probe and the double H-coil, respectively. The piercing ability of the needle probe has been improved. The detailed two-dimensional vector magnetic property of the transformer model core of grain-oriented electric steel sheets with insulation coating was investigated.

Keywords: Vector magnetic property, V-H sensor, needle probe method, H-coil, B-needle.

1 緒言

変圧器やモータは社会生活に不可欠な電磁気応用機器で、信頼性はもとより軽量化や高効率が求められてきた。さらに最近では地球温暖化対策のためによりいっそうの高効率化と省エネルギー化が求められている。変圧器やモータの高効率化のためには使用されている材料の特性を詳しく知ることが重要で、そのことによって改善の手掛かりを得ることができる。特性評価方法としては、変圧器やモータに使用している鉄心内の磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルを測定する 2 次元磁気ベクトル特性測定法がある[1]。2 次元ベクトル磁気特性の測定では、磁束密度ベクトルの測定に探りコイルを使用し、磁界強度ベクトルの測定に H コイルを使用する。しかしながら、変圧器のような磁気特性の分布を測定しようとする、探りコイル用の孔を開けるのが煩雑となる。また孔を開けたことにより磁気特性が変化してしまう可能性がある。著者らは磁束密度を測定する方法として探りコイルに代わり探針法を用い[2-4]、H コイルと探針をそれぞれ X 方向と Y 方向に 2 組を搭載した 2 次元ベクトル磁気センサ (Vectore-hysteresis sensor : V-H センサ) を開発した。

これまでに変圧器モデル鉄心や誘導電動機モデル鉄心中の 2 次元ベクトル磁気特性分布の測定を行ってきた[5-7]。

探針法による測定では、探針法の原理から探針と電磁鋼板は電氣的に接触する必要があるが、電磁鋼板には絶縁皮膜が施されてるために、絶縁皮膜を取り除く必要が生じる。方向性電磁鋼板に施されている絶縁皮膜は渦電流の低減のほか損失低減のために張力が付加されており、絶縁被膜を取り除くと磁気特性が変化してしまう。また、取り除かず鋭い針状の探針で突き刺すことも可能であるが探針の荷重の付加方法や耐久性を解決する必要がある。この探針法の問題を改善するため電磁鋼板に絶縁皮膜が付いたまま測定できる探針を開発した。さらに H コイルと組み合わせた V-H センサを試作し電磁鋼板の絶縁被膜がついたままの状態での磁気特性分布の測定を行っている。しかしながら、より詳細な磁気特性分布を測定しようとする、B 探針の貫通寿命が不足し、ひとつの試料の磁気特性分布を測定する際も何度か探針を交換していた。このことから、探針の材質をより硬質な材料に変更し探針の絶縁皮膜貫通寿命を向上させ、絶縁皮膜がついたままの電磁鋼板を使用した変圧器モデルコアの詳細な磁気特性を測定することを可能にした。

本研究では絶縁皮膜の貫通寿命を改善した B 探針を

連絡先：相原 茂，〒870-0011 大分市春日浦，西日本電線（株）研究開発部，
e-mail: aiharas@nnd.co.jp

^{*1} 西日本電線 ^{*2} 大分大学 ^{*3} 大分県産業創造機構

搭載した極小な V-H センサを使用して、絶縁皮膜がついたままの変圧器モデルコアを使用し測定点が 9000 点以上に及ぶ従来では測定できなかった変圧器モデルコアのコーナー部分の間際まで測定した詳細な 2 次元磁気特性分布の測定結果について報告する。

2 V-H センサの構造と B 探針の改良

2.1 2 次元ベクトル磁気センサ (V-H センサ)

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皮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。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 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ サイズとし、探針の間隔は H コイルの形状に合わせて 7 mm とした。表 1 に V-H センサの仕様を示し、図 1 に V-H センサの構造を示す。この V-H センサはダブル H コイル搭載では最小である。

2.2 B 探針の構造

B 探針を使用する探針法は励磁された試料内部の磁束変化にともない試料内に発生する渦電流による起電力を 2 本の探針で取り出す手法である。その出力は探りコイル法の $1/2$ ターンと等価となる。図 2 に測定原理図を示す。B 探針には、V-H センサを押し付けるだけで電磁鋼板の絶縁皮膜を貫通する機構を付加している。この機構は探針のニードル部分にネジを切りスリーブのガイドに沿って回転する。探針の先端は六角錐になっており、電磁鋼板に押し付けられる過程で探針が回転し絶縁皮膜を貫通する。探針 1 本の押し付け圧力は 50 g である。従来製作した V-H センサでは B 探針の先端が摩耗し貫通しなくなるために 2 次元磁気特性分布を測定するには、B 探針を測定途中に数回交換する必要がある煩雑であった。従来の B 探針の上下に動くニードル部分の材質は工具鋼 (SK 材) を使用していたために探針の耐摩耗性が不足していると判断し、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、非磁性である超硬合金 (株式会社共立合金製作所 製品型式 KN20, 硬度 HRA 90, 抗析力 3.2 GPa , 比透磁率 1.0002) を使用して製作した。製作した B 探針のニードル部分を図 3 に示す。ニードルには回転させるためのネジがあり、外径が $\phi 0.52\text{ mm}$ でありまた先端が六角錐の形状で加工は難しいが、高精度なミクロンレベルの研削加工により実現している。

Table 1. Specification of V-H sensor.

H-coil	Size[mm]	4×4
	Number of turns[turns]	350
	Area turn(H_x)[$\text{cm}^2 \cdot \text{turn}$]	5.25
	Area turn(H_y)[$\text{cm}^2 \cdot \text{turn}$]	7.91
B-needle	Distance[mm]	7

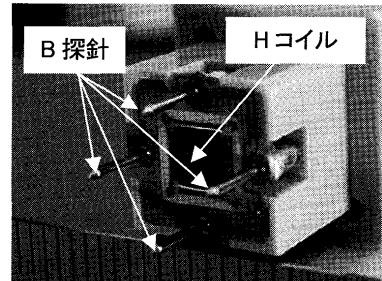


Fig.1. Photograph of the V-H sensor.

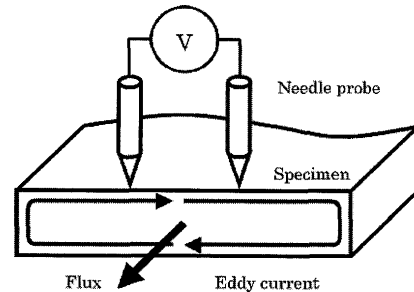


Fig.2. Uniform field.

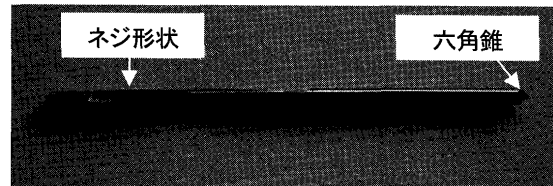


Fig.3. Photograph of the B-needle.

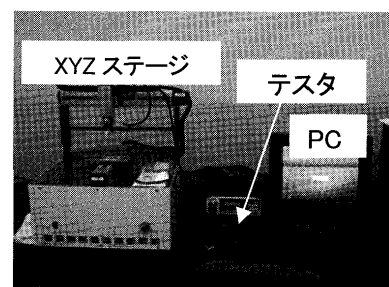


Fig.4. Photograph of the needle tester.

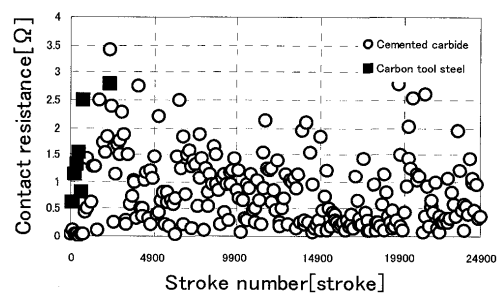


Fig.5. B-needle performance.

2.3 B 探針の貫通性能の評価

新たに製作した B 探針の寿命の評価に、探針の評価装置を使用し、探針の押し付け回数と接触抵抗の関係を測定した。探針の評価装置を図 4 に示す。試料は方向性電磁鋼板 (30Z150) を使用した。なお試験の際に従来の探針の場合、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 4.5mm である。測定結果を図 5 に示す。従来の探針は押し付け回数が 700 回で絶縁被膜を貫通せずに導通がなくなったが、超合金製探針では押し付け回数 25000 回後でも安定した接触抵抗を示した。この結果により変圧器モデルコアの磁気特性分布を測定するのに十分な寿命と判断した。また、接触抵抗も 3.5Ω 以下であり、プリアンプの入力インピーダンスは $10M\Omega$ であることから接触抵抗は無視できて測定に影響がないと判断した。

3 測定方法

3.1 磁気特性分布自動測定器

磁気特性分布を測定する際は分解能が高いことから測定点が多くなり自動化する必要と、高精度の位置決め機構が必要となり図 6 に示す XYZ ステージを使用した自動測定システムを構築した[8]。

3.2 測定試料と測定条件

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耐久性や、精度などを評価する目的のため、あえて特性の差がわかりやすい絶縁皮膜が付いたままの方向性電磁鋼板(20ZDK90)の一枚板をくりぬいた形状を採用した。外形は $400\text{mm} \times 350\text{mm}$ 、窓寸法は $80\text{mm} \times 190\text{mm}$ 、板厚 0.23mm、積層枚数は 27 枚とした。変圧器モデルコアの形状を図 7 に示す。

測定条件は、PC で 50Hz 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 0.5T となるように制御して測定を行った。測定箇所は X 方向、Y 方向共に 2mm の間隔で測定した。測定箇所は合計で 9000 点である。

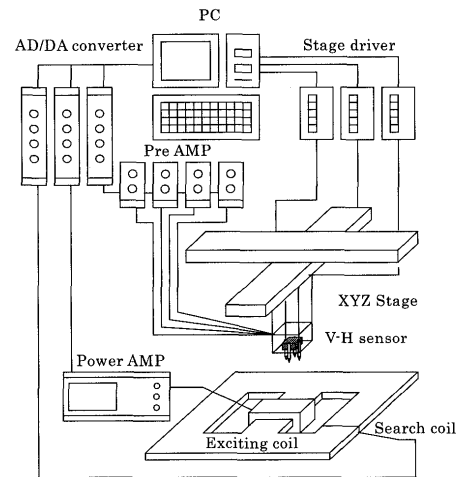


Fig. 6. Measurement system.

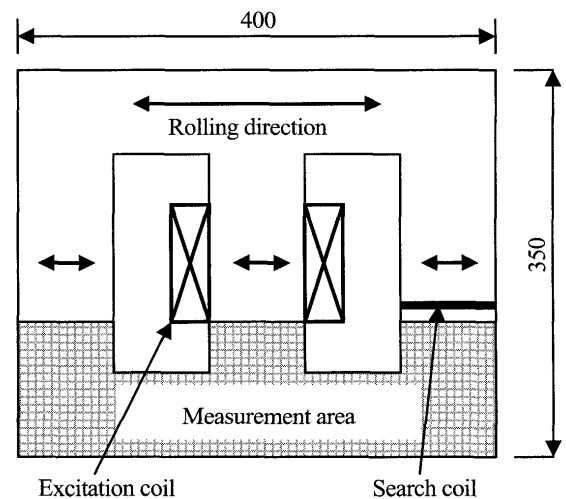


Fig. 7. Transformer model core.

4 測定結果

極小な V-H センサを使用して絶縁被膜が施されたままの方向性電磁鋼板を用いた変圧器モデルコアの磁気特性を測定した結果として、図 8 (a)に最大磁束密度分布、図 8 (b)に最大磁界強度分布、図 8 (c)に鉄損分布を示す。図のように電磁鋼板に絶縁皮膜が施された状態でも絶縁皮膜貫通型の探針により探針と電磁鋼板の地鉄の間の導通がとれることにより磁束密度分布が測定出来ることが分かる。また、V-H センサを小型化したことにより変圧器モデルコアの窓コーナー間際まで測定できるようになり詳細な磁気特性分布が得られた。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。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。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約 1000 倍異なるためであり、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。鉄損の分布を見ると、困難軸で高い鉄損が存在している。また、分布中の白い点は他部分より鉄損が低い部分を示している。図 9 に 1/10 周期ごとの磁束密度の瞬時値分布を示し、図 10 に 1/10 周期ごとの磁界強度の瞬時値分布を示す。これらの図に示すように、一枚の方向性けい素鋼板をくり抜いた変圧器モデルでは、磁束密度分布と磁界強度分布が異なることが 2 次元ベクトル磁気特性を測定することで分かる。

5 結言

本論文では絶縁皮膜貫通型極小局所 2 次元ベクトル磁気センサの B 探針の絶縁皮膜貫通性能を改善し、絶縁皮膜が付いた変圧器モデルコアのコーナー部分の窓際を含む詳細な磁気特性の分布を測定した。このことにより、絶縁皮膜が施されたままの変圧器モデルコアの磁束密度と磁界強度の局所分布を明らかにした。探針法の測定で従来は電磁鋼板に施された絶縁被膜を取り除く必要があったが、電磁鋼板に絶縁被膜が施されたまま測定することにより絶縁被膜の張力による効果を維持したより実機に近い状態で詳細な磁気特性分布の測定が出来ることを示した。電磁鋼板の結晶粒のサイズを考慮すると V-H センサのさらなる小型化は必要で小型化の障害である H コイル巻き枠の材質の変更や加工方法の検討は今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人 科学技術振興機構、大分県地域結集型研究開発プログラム「次世代電磁力応用機器開発技術の構築」により遂行されたことを付記し、関係各位のご協力に心から感謝致します。

(2010 年 11 月 16 日受付, 2011 年 2 月 25 日再受付)

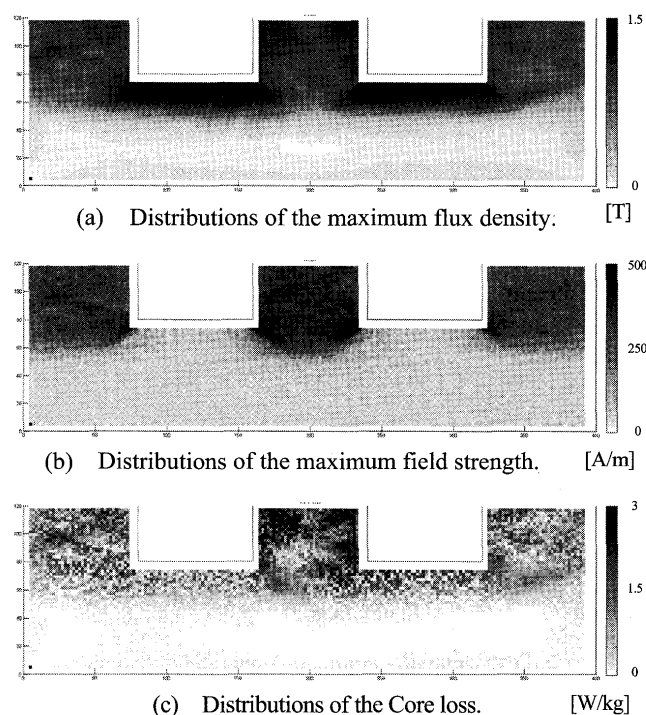


Fig. 8. Distributions of the maximum flux density, the maximum field strength, and the core loss in the transformer model core.

参考文献

- [1] M. Enokizono, T. Suzuki, J. Sievert, and J. xu, Rotational Power Loss of Silicon Steel Sheet, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, No. 5, pp. 2562-2564, 1990.
- [2] W. Brix, K.A. Hempel and F.J. Schulte, Improved Method for the Investigation of the Rotational Magnetization Process in Electrical Steel Sheets, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 20, No. 5, pp. 1708-1710, 1984.
- [3] 千田邦浩, 石田昌義, 佐藤圭司, 小松原道朗, 山口俊尚, 今村正明, 探針法による局所磁束測定精度の理論的評価, 電気学会論文誌 A, 基礎・材料・共通部門誌, Vol. 115(1), pp.50-57, 1994.
- [4] 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, 電気学会マグネテックス研究会資料, MAG-94-49, pp. 65-70, 1994.
- [5] 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.
- [6] 榎園正人, 川村耕世, J. D. Sievert, モデル鉄心を用いた三相変圧器内の局所 2 次元磁気特性分布に関する特性, 日本応用磁気学会誌, Vol. 19, No. 2, pp.585-588, 1995.
- [7] 榎園正人, 橋本芳典, 茂木尚, 探針法によるけい素鋼板中の局所ベクトル磁気特性, 電気学会マグネテックス研究会資料, MAG-00-113, pp. 61-64, 2000.
- [8] 倉員淳, 下地広泰, 戸高孝, 榎園正人, 局所二次元ベクトル磁気特性分布自動測定システム, 電気学会マグネテックス研究会資料, MAG-07-61, pp. 43-46, 2007.

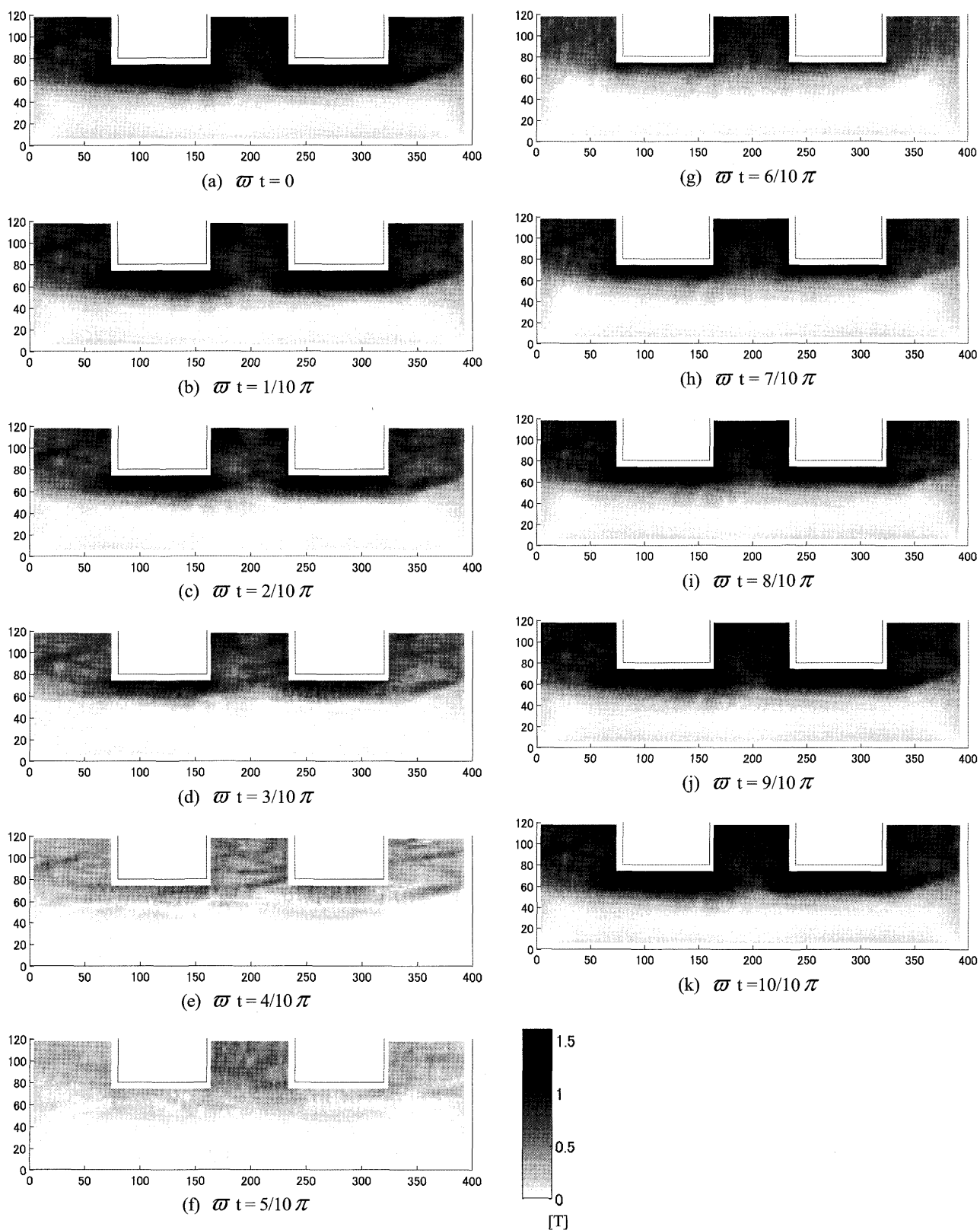


Fig. 9. Time variations of distributions of the magnetic flux density ($B_{ave} = 0.5T$)

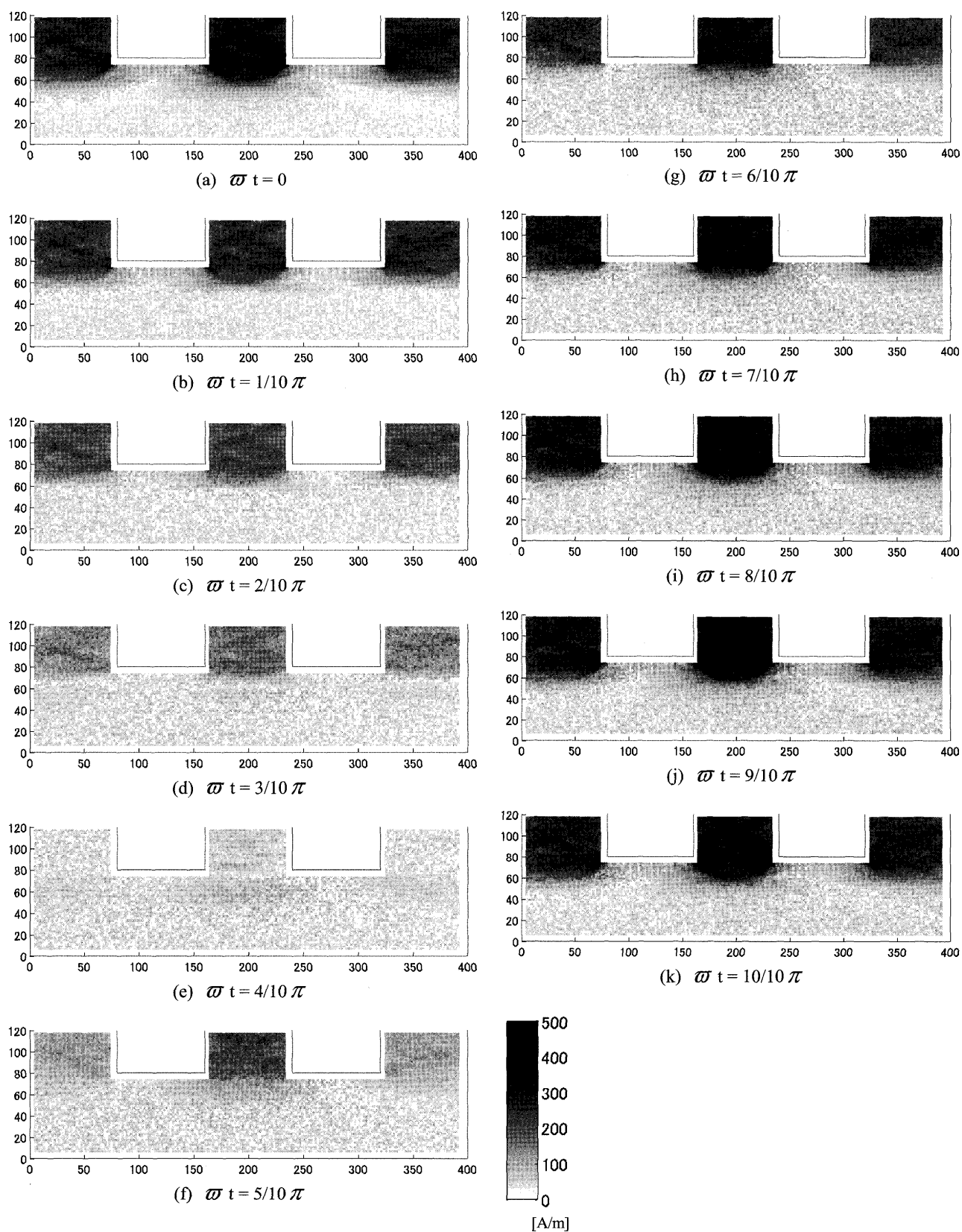


Fig. 10. Time variations of distributions of the magnetic field strength ($B_{ave} = 0.5T$)