

パッシブシェル付マルチシェルシールドにおける能動補償効果

Performance of Active Compensation for a Multi-shell Shield with an Inner Passive Shell

斉藤拓司・田代晋久・笹田一郎

九州大学大学院総合理工学府, 福岡県春日市春日公園 6-1 (〒816-8580)

T. Saito, K. Tashiro, and I. Sasada

Department of Applied Science for Electronics and Materials, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, 6-1 Kasuga-Koen, Kasuga-Shi, Fukuoka 816-8580, Japan

Active compensation is studied for a multi-shell shield with an inner passive shell. We made a miniature shield consisting of four concentric magnetic shells, which has the same structure as our previously developed shielding system for a demonstration of MEG alpha-rhythm measurement. FINEMET rather than Permalloy was chosen as the material for the inner passive shell. We measured the amplitude and phase of the incoming magnetic field to the shielded area. It was found that the inner passive shell can help to suppress the phase difference between the observed field and the external field. A model for explaining this phenomenon is presented. We tried a simple feed-forward active compensation system for the shield, which consists of three canceling ring coils and a single monitoring flux-gate magnetometer. The axial shielding factor at 10 Hz, 10 μ T was 300, and with active compensation a value of 12,000 was achieved.

Key words: magnetic shield, active compensation, passive shell, phase different, magnetic shaking

1. はじめに

我々の身の回りには地磁気や様々な電子機器などから発生する環境磁界が存在している。こうした環境下で脳磁界や心磁界などの微小磁界を測定するには、高性能な磁気シールドが必要になってくる。現在用いられているパーマロイを使用した部屋型の磁気シールドは低周波になるにつれてシールド効果が低下し、重量も数トンと重く高価である¹⁾などの問題を抱えている。

これに対して、我々は高角形磁化特性を持つCo系アモルファス磁性薄帯に磁気シェイキングを施して増分透磁率を飛躍的に増大させることによって²⁾、低周波でも高いシールド性能を持つ両端開口型円筒磁気シールドの開発を行っている。両端開口型磁気シールドは構造上、径方向のシールド比 TSF (Transverse Shielding Factor) に比べ軸方向のシールド比 ASF (Axial Shielding Factor) は低く、その向上が課題であった。実際、ヒトの脳磁界計測のために製作したヘリカル構造、アキシヤル構造を組み合わせた人体サイズ両端開口型磁気シールドにおいて、各シェルに最適な磁気シェイキングを施した状態で、TSF が 100,000 と高いのに対し、ASF は 380 と極めて低い値であった³⁾。このように低い ASF を付加的な方法によって高くするため、我々は円筒の外壁に設置したリングコイルにより逆位相のキャンセル磁界を発生させ、両端の開口端に侵入する外部磁界を低減する能動補償法 (アクティブキャンセル) を提案している^{4),5)}。そのなかでは、シェルが磁性薄帯を円周方向へ巻き付けたヘリカル構造⁴⁾、あるいは薄帯を円筒軸方向に

平行に多数固定したアキシヤル構造⁵⁾ 単体からなる円筒磁気シールドを対象にしていた。実際に ASF, TSF 共に高くするにはヘリカル、アキシヤルの両構造を巧く組み合わせる必要があり、また、磁気シェイキングによる磁界の漏洩を防ぐために円筒構造の最内には磁気シェイキングを適用しなくても比較的良好なシールド性能を持つパッシブシェルを組み合わせる必要がある。しかしこれらの 3 つのシェルを組み合わせたマルチシェル構造からなる磁気シールドにおいて能動補償効果は十分に検討されていない。

本論文ではこの問題を考察するために、シェルの組み合わせ方と低周波軸方向磁界がシールド内へ伝播する際の振幅、位相特性について検討した。その結果、パッシブシェルは内部に伝播する磁界の位相進みを抑制する効果があることがわかった。これらの基礎データをもとにマルチシェル構造からなるシールドに対して能動補償法を試みたところ、補償前に比べ約 40 倍の効果である 12,000 という高い ASF が得られた。以上のことについて報告する。

2. 測定方法

今回の検討は、ヒトの脳から出る α 波脳磁界計測に成功した⁶⁾ 人体サイズ両端開口型円筒磁気シールド³⁾ への能動補償法の適用を念頭に行ったので、その構造を Fig. 1 に、サイズ等の詳細を Table 1 に示す。Shell 1 はパーマロイ薄帯 (厚み 0.05 mm) で構成され、磁気シェイキングは行わない。Shell 2 はコバルト系アモルファス磁性薄帯 METGLAS2705M (幅 50.8 mm, 厚み 0.02 mm) を螺旋状に巻いたヘリカル構造である。螺旋の向きを交互に変えながら空隙を入れ 4 層積み重ね、磁気シェイキングを行うためのトロイダルコイルが巻かれている。Shell 3, 4 は METGLAS2705M を円筒の長手方向に配置した構造であり、同じく磁気シェイキング用のトロイダルコイルが巻かれている。最適な ASF を設計する上で、直径 D_i に対する円筒長さ L_i の比 L_i/D_i は重要なパラメータである⁷⁾ が、本研究で実際に用いたのは、上述の人体サイズ磁気シールドを 1/5 に相似縮小したモデルであり、その諸元を Table 2 に示す。パッシブシェルにはパーマロイに代わり製作上容易なナノ結晶軟磁性合金 FINEMET[®] を代用した。この際、透磁率と厚みの積がパーマロイの場合と出来るだけ等価となるようにした。Table 2 には各層ごとのアモルファス磁性薄帯及び FINEMET の層数 n も示している。それぞれのシェルは大型サイズと同様に紙パイプを巻き芯として製作した。Shell 2, 3, 4 に巻くトロイダルコイルの巻数はそれぞれ 16, 24, 28 とし、最適な磁気シェイキング効果を与える 1kHz の交流電流 (95mA, 670mA, 620mA) を印加する。

円筒軸方向からの一様磁界 (以降、外部磁界と示す) に対する

磁界の振る舞いを観測する方法を Fig. 2 に示す. 3-コイルシステム⁹⁾ (以降 Cubic-3 と示す) により外部磁界を発生させ, フラックスゲートセンサ(Bartington Instruments MAG-03 MC)とロックインアンプ (Stanford Research Systems, SRS830) を用いて磁界の振幅と位相を計測した. Cubic-3 中央部に磁気シールドを配置し, 円筒軸上で軸方向磁界の振幅と位相を計測することで, ASF (シールドがない時の磁束密度/シールドがある時の磁束密度) と位相差 (シールド内磁界の位相-コイルに流す電流の位相) を求めた. 外部磁界の磁束密度はシールドがない時において 0.1, 1, 10 μT と定め, 周波数はそれぞれ 2, 10, 50 Hz とし, 観測は円筒中心軸上で円筒の中心位置から -5 cm ~ +25 cm の範囲とした. 使用する磁気シールドのシェルの組みあわせは Table 3 に示す 3通りと, Shell1 のみについて行い, それぞれにおける磁界の振る舞いを比較した. 黒丸番号はシェイキングを行ったシェル番号, 白丸番号はシェイキングを行わなかったシェル番号を表す.

能動補償法は, Fig. 3 に示すようなフィードフォワード法^{4),5)}を採用した. キャンセルコイルは円筒開口端と中央にそれぞれ 5 ターンずつ巻いたリングコイルを使用し, 上記外部磁界に対する計測結果との振る舞いを比較し基本特性を取った. 次にキャンセルコイルが発生する磁界を一番受けにくいシールド外壁上の位置を調査し, シールドの外部磁界参照用フラックスゲートセンサを設置した. 外部磁界参照用センサの出力を電力増幅器で増幅し, キャンセルコイルに電流を流し能動補償効果を測定した.

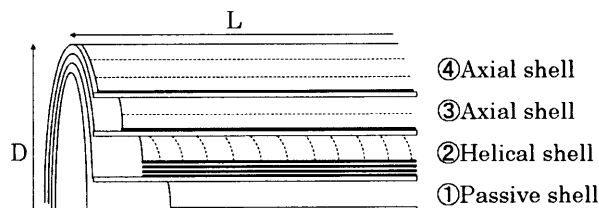


Fig. 1 A multi-shell shield, in which the innermost shell is a passive shell.

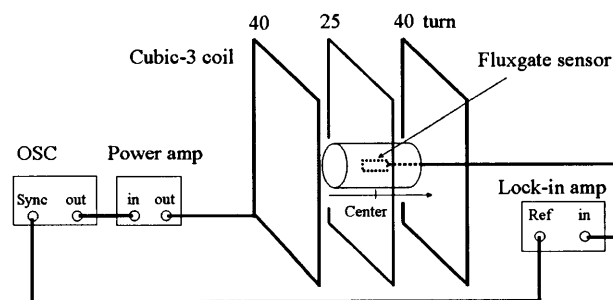


Fig. 2 Method of observing the behavior of a magnetic field inside the magnetic shield and its vicinity.

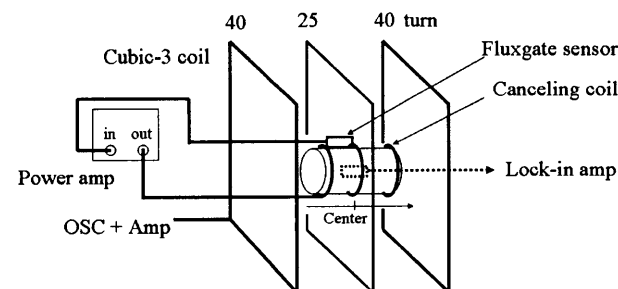


Fig. 3 Evaluation of an active compensation system for a feed-forward scheme.

Table 1 Structure of our large-scale vertical open-structure cylindrical shield²⁾ (Unit: mm).

Shell	Material / Structure	D_i	L_i	L_i / D_i
1	Permalloy / Helical	670	1,800	2.7
2/1	METGLAS2705M / Helical	720	2,200	3.1
2/2		730		3.0
2/3		740		3.0
2/4		750		2.9
3	METGLAS2705M / Axial	822	2,430	3.0
4	METGLAS2705M / Axial	974	2,750	2.8

Table 2 Structure of a miniature model (Unit: mm).

Shell	Material / Structure	D_i	L_i	L_i / D_i	n
1	FINEMET / Helical	132	356	2.7	3
2/1	METGLAS2705M / Helical	157	471	3.0	3
2/2		159		3.0	3
2/3		161		2.9	3
2/4		163		2.9	3
3	METGLAS2705M / Axial	182	546	3.0	6
4	METGLAS2705M / Axial	208	582	2.8	6

Table 3 Combinations of the shells.

Type	Shells
A	①+②+③+④
B	①+②+③+④
C	②+③+④

①②③④: Shell ②③④: Shells with magnetic shaking

3. 磁界の振る舞い

3.1 パッシブシェル単体

外部磁界を 10 μT とした時の, Shell 1 単体での ASF と位相の変化を測定した結果をそれぞれ Fig. 4, と 5 に示す. ASF, 位相とも周波数の変化によらず, 同じ振る舞いを示すことがわかる. 次に外部磁界の振幅変化に対するシールド中心での ASF と位相の変化を測定した結果を Fig. 6 に示す. 100 nT 程度の磁界に対しても ASF はほぼ一定の値を保ち, 位相変化は 1 μT 以下になると 1 度以下に抑えられることがわかる.

これまでにシールド内部の位相が遅れる原因はシェルの円周方向に流れる渦電流によるもので⁴⁾, 位相が進む原因は磁性体のヒステリシスによるものであることを明らかにしている⁵⁾. まず Fig.5 より周波数変化による位相変化がない原因として PET フィルムで被覆加工を施している FINEMET を円周方向に巻いてあるために渦電流が円周方向に一巡する電流路がなく, 渦電流に起因する周波数特性の影響を受けなかったためだと考えられる. 次に Fig.6 に見られる外部磁界の大きさによる位相進みを説明する概略図を Fig.7 に示す. 外部磁界は端部を有する磁性体を通過し, 他方の端部から出て行く. 磁性体中の磁化 M は磁性体のヒステリシスにより外部磁界 Hex の位相より遅れ, さらに磁化 M から出た磁界がシールド内部の空間を帰路として Hreturn が生じる. シールド内ではこれと直接侵入する外部磁界 Hex の重ね合わさったものが磁界 Hin として観測され, その位相が進む

ことになる。このように磁性体のヒステリシスが位相進みに影響を及ぼす重要なファクターになる。このことから、Fig.6 の外部磁界の振幅が小さくなるにつれて位相進みが減少する理由は、磁化のヒステリシスが小さくなり透磁率が線形的になったためであると考えられる。

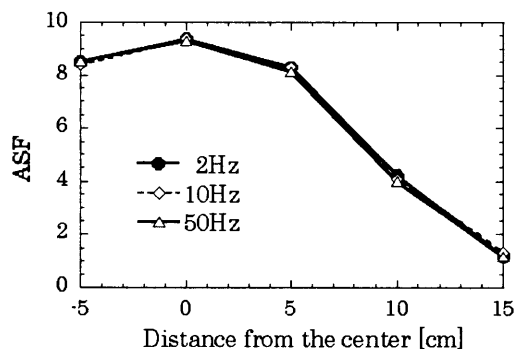


Fig. 4 Profiles of the ASF on the central axis of Shell 1. The external magnetic fields are 2, 10, and 50 Hz at 10 μ T.

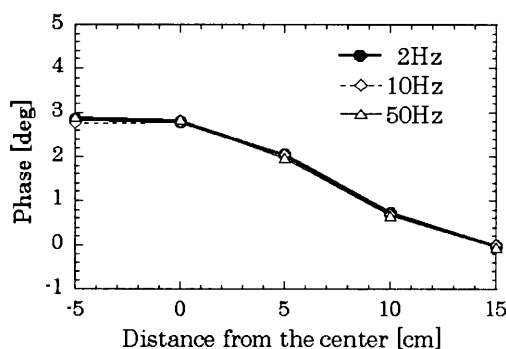


Fig. 5 Profiles of the phase on the central axis of Shell 1. The external magnetic fields are 2, 10, and 50 Hz at 10 μ T.

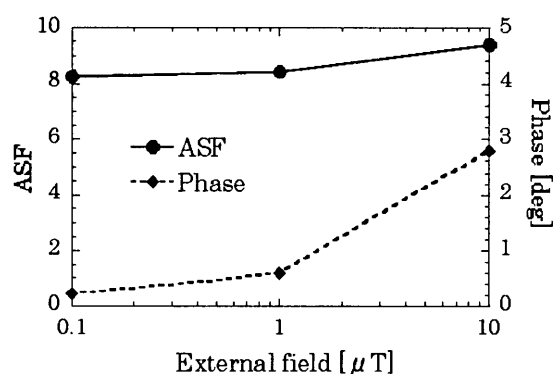


Fig. 6 ASF and the phase shift at the center of Shell 1.

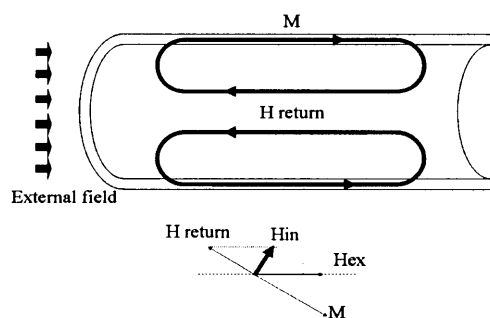


Fig. 7 Diagram of the phase-lead phenomenon for the magnetic field in the magnetic cylinder.

3.2 パッシブシェルを含むマルチシェル

外部磁界を 10 μ T と定め、Table 3 に示すシェルの組み合わせによる ASF と位相の変化を測定した結果をそれぞれ Fig. 8 と 9 に示す。A-type と B-type において、ASF はほぼ同様の振る舞いを示すが、A-type は位相進みが小さいことがわかる。これは Shell4 に磁気シェイキングを行うことで同シェルでの磁化のヒステリシスが減少するために、位相進みが小さくなったからである。A-type は C-type より ASF は高く、位相進みが小さいことがわかる。Shell1 のパッシブシェルはマルチシェルの最内部にあって、微弱になった外部磁界がこれに作用する。Fig.6 に示したように磁界が微弱になればパッシブシェルの磁化のヒステリシスの減少のために位相進みは小さくなる。この結果、A-type で ASF が高く、位相進みも小さい結果となった。外部磁界の振幅変化に対するシールド中心での ASF の変化を測定した結果を Fig.10 に示す。Shell4 を磁気シェイキングしている A-type と C-type は微弱な外部磁界に対しても同じ ASF を保つが、Shell4 を磁気シェイキングしていない B-type では、外部磁界が微弱になるにつれて Shell4 の透磁率が小さくなるので、ASF が低くなることが分かる。以上の結果、A-type は微弱な磁界に対しても ASF が高く、シールド内部の位相進みが小さく、最も優れた性能を持っていることがわかった。

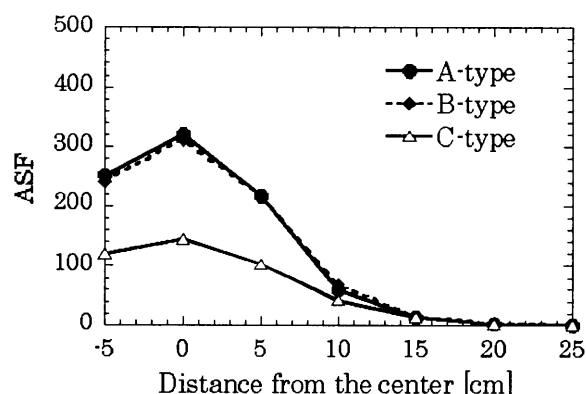


Fig. 8 Profiles of the ASF on the central axes of multi-shell shields. The external magnetic field is 10 Hz at 10 μ T.

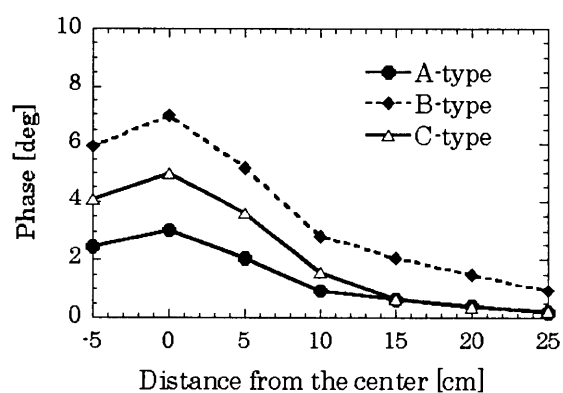


Fig. 9 Profiles of the phase on the central axes of multi-shell shields. The external magnetic field is 10 Hz at 10 μ T.

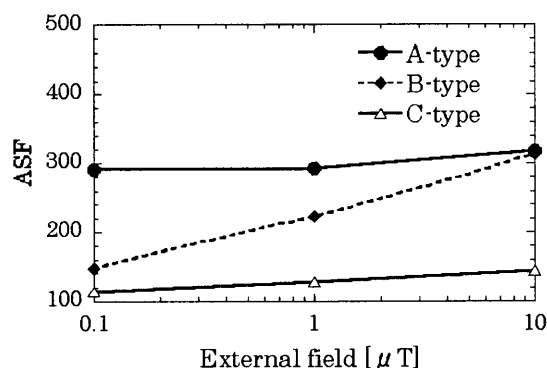


Fig. 10 Profiles of the ASF at the centers of multi-shell shields. The external magnetic fields are 0.1, 1, and 10 μT at 10 Hz.

4. 能動補償効果

A-type のマルチシェルシールドに対して、10 μT , 10 Hz の外部磁界がシールド軸上の中心点に作る磁界と、キャンセルコイルが同位置で発生する磁界が等しくなるようにキャンセル電流をチューニングして、シールド中心軸上で各磁界に対する分布を測定した。振幅の変化を Fig. 11 に示す。外部磁界とキャンセル磁界の振幅は、ほぼ同じ分布を示した。次に位相変化を Fig. 12 に示す。シールド中心で両者の磁界に位相差が見受けられたが 1 度以下であり、位相補償を行わなくとも、従来のフィードフォワード方式により ASF 向上効果は 50 倍程度になることが期待できる。また、この位相差は 2 Hz ではさらに小さくなり、50 Hz では若干大きくなったが 1 度以下であるため、従来と同じく低周波の磁界に対して ASF 向上の効果が期待できる。

外部磁界 10 μT , 10 Hz 時のマルチシェルシールドに対して能動補償法を行った測定結果を Fig. 13 に示す。能動補償法の適用により、シールド内部の広い範囲で補償前に比べて、約 40 倍の ASF 向上が得られた。理論値よりわずかに低い値ではあるが、中心部付近では 12,000 を超え、TSF, ASF 共に大きくバランスの取れた円筒磁気シールドが実現できることが分かった。

5. まとめ

本論文ではパッシブシェル付きマルチシェル構造の磁気シールドに対して ASF の向上を図るために、能動補償法の効果を検討した。シェルの組み合わせ方と低周波軸方向磁界がシールド内へ伝播する際の振幅、位相特性について測定を行った結果、各シェルに磁気シェイキングを施すことで円筒シェル内での磁界の位相進みを抑制することがわかった。また磁気シェイキングを行わないパッシブシェルも最内に置くことで、磁性体のヒステリシスが無視できるほど小さくなるために、同様の効果が得られることがわかった。パッシブシェル付きマルチシェルシールドに対して能動補償法を加えることで ASF の値が中心部付近で補償前に比べて、約 40 倍の 12,000 という高い性能が実現でき、TSF, ASF 共に大きく、バランスの取れた円筒磁気シールドが実現できることが分かった。

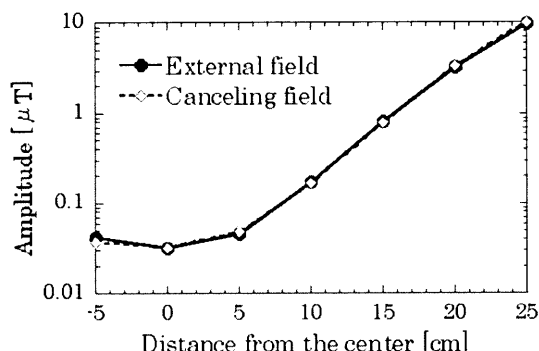


Fig. 11 Profiles of the Amplitude for an external magnetic field and the compensating magnetic field on the axis of a multi-shell (A-type) shield.

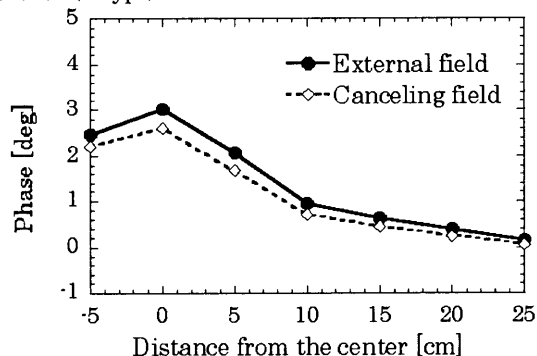


Fig. 12 Profiles of the phase for an external magnetic field and the compensating magnetic field on the axis of the a multi-shell (A-type) shield.

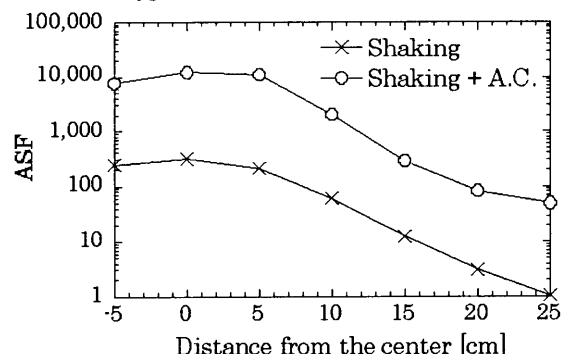


Fig. 13 Profiles of the ASF for the external magnetic field on the axis of the multi-shell (A-type) shield with and without the compensating field.

References

- 1) M. Kotani: Measurements of Biomagnetism, p. 7 (Corona Publishing Company, Tokyo, 1995).
- 2) I. Sasada, S. Kubo, and K. Harada, *J. Appl. Phys.*, **64**, pp. 5696-5698 (1988).
- 3) I. Sasada, E. Paperno, and H. Koide, *J. Appl. Phys.*, **87**, pp. 5962-5964 (2000).
- 4) Y. Umeda, K. Tashiro, and I. Sasada, *IEE Japan A*, Vol. 123, No. 8, pp. 790-796 (2003). in Japanese
- 5) K. Nagashima, I. Sasada, and K. Tashiro, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 39, No. 5, pp. 3223-3225 (2003).
- 6) K. Tashiro, K. Nagashima, A. Sumita, T. Fukunaga, and I. Sasada, *J. Appl. Phys.*, **93**, pp. 6733-6735 (2003).
- 7) E. Paperno, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 35, No. 5, pp. 3940-3942 (1999).
- 8) Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi, *J. Appl. Phys.*, **64**, pp. 6044-6046 (1988).
- 9) I. Sasada, *J. Magn. Soc. Japan*, **24**, pp. 911-914 (2003). in Japanese

2004 年 10 月 4 日受理, 2005 年 3 月 15 日採録