

Disposable Pump System with a Spiral-Type Magnetic Micromachine

S. Hisatomi, A. Yamazaki, K. Ishiyama, S. Agatsuma, M. Sendoh*, and K. I. Arai

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

*Miyagi Organization For Industry Promotion, 1-14-2 Kamisugi, Aoba-ku, Sendai 980-0011, Japan

We propose a disposable pump system with a spiral-type magnetic micromachine. The machine is composed of a permanent magnet and a spiral blade. When a rotating magnetic field is applied, the machine rotates and pumps a surrounding liquid. Since the machine works wirelessly, It is possible to create a small, disposable pump. When a plate containing the machine in a fluid channel is placed on a stage containing two coils for generating a rotating magnetic field, the machine functions as a pump. In this system, the flow rate can be controlled by the rotation frequency. In addition, the system can pump the liquid selectively through several fluid channels containing similar machines on plates.

Key words: spiral-type magnetic micromachine, micropump, rotating magnetic field, disposable pump system

スパイラル型磁気マイクロマシンを用いたディスポーザブルポンプシステム

久富伸一・山崎彩・石山和志・我妻成人・仙道雅彦*・荒井賢一

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

*みやぎ産業振興機構, 仙台市青葉区上杉 1-14-2 (〒980-0011)

1. はじめに

微量の液体を定量的に送液するマイクロ流体デバイスとしてマイクロポンプがある。近年, μ TAS(micro Total Analysis System)や自動投薬システムへの利用を目的とし, 圧電素子¹⁾や形状記憶合金²⁾を用いたダイヤフラムを駆動源とするマイクロポンプの開発が盛んに行われている。これらのマイクロポンプの一般的なスペックはサイズが $1\sim 2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, 最大圧力が $10\sim 20 \text{ kPa}$, 最大流量が $1\sim 2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であり大圧力, 大流量を望むことができるが, 可動部があるため構造が複雑になり小型化には不利であることや, 脈動が生じてしまうといった欠点がある。また電気泳動による送液は構造が単純であるという長所がある一方で, 電解液中のイオン濃度が変化してしまうと流速が変化し定量送液が困難になるといった欠点がある。さらに一度使用したポンプと流路には不純物が残ってしまう可能性があることから μ TAS などの化学分析において正確な分析を行ったり, 自動投薬システムにおいて異なる薬の混入を防ぐためにはポンプと流路の使い捨てが必要となる。

これらに対し, 著者らはスパイラル型磁気マイクロマシン³⁾を用いたマイクロポンプを提案している。磁気マイクロマシンは外部磁界を印加することによりワイヤレスに駆動できるため使い捨てが可能であり, 構造が単純であることから小型化にも適している。また磁気マイクロマシンは幅広い動粘度の液体において駆動することが可能である。

著者らはすでに磁気マイクロマシンを用いて発生圧力と流量を回転周波数により制御可能なマイクロポンプの試作についての報告を行っている^{4),5)}。本研究では磁気マイ

クロマシンを用いたマイクロポンプの応用として, 流路中にマシンを搭載した使い捨て可能な基板を回転磁界発生ステージの上に載せるだけで送液を行うことができるといったディスポーザブルポンプシステムを試作し, 回転周波数と流量の特性といったポンプの基礎特性に関する検討を行った。さらにこのポンプシステムにおいて, 基板上的マシンを搭載した複数の流路から選択的に送液を行うことができるといった選択送液に関する検討を行った。

2. スパイラル型磁気マイクロマシン

Fig. 1 にスパイラル型磁気マイクロマシンの概略図を示す。磁気マイクロマシンは直径方向に磁化された円柱状の永久磁石とらせん構造から成り立っている。マシン軸に垂直な面の回転磁界を印加することによりマシンは回転し推進する。Fig. 2 に今回実験で使用したスパイラル型磁気マイクロマシンの外観写真を示す。永久磁石には直径 0.5 mm , 長さ 10 mm の NdFeB 磁石を用いている。らせん構

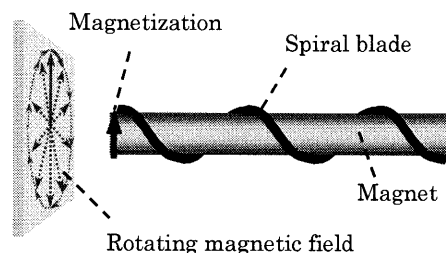


Fig. 1 Schematic view of the spiral-type magnetic micromachine.

造は直径 0.25 mm のタングステンワイヤを 45 度の傾きで磁石に巻きつけることにより形成している。これよりマイクロマシンのサイズは直径 1.0 mm、長さ 10 mm となっている。

3. ディスポーザブルポンプシステム

3.1 動作原理

Fig. 3 にディスポーザブルポンプシステムの概略図を示す。このシステムは流路内にスパイラル型磁気マイクロマシンを搭載した使い捨て可能な基板を回転磁界発生ステージの上に載せるだけで送液を行うことを可能にするものである。

このシステムを得るために、使い捨て可能な基板と回転磁界発生ステージを試作した。Fig. 4 に試作した基板の外観写真を示す。基板にはアクリルを用いており、サイズは 120×100×5 mm である。Fig. 5 にマシン挿入部の外観写真を示す。流路幅をマシン径より狭くすることで、マシンは推進を抑止されその場で回転し送液を行う。ここでマシンと流路の隙間の距離の比較を行うために、マシン挿入部のサイズが 11×1.1×1.25 mm の基板と 11×1.4×1.5 mm の基板を作製した。Fig. 6 にこの 2 種類の挿入部断面の概略図を示す。流路はどちらも幅 0.5 mm、深さ 1.1 mm である。今後前者の基板を断面 1.1 の基板、後者の基板を断面 1.4 の基板とする。基板にはマシンを搭載し、流路にはシリコンオイルを充填した。

Fig. 7 に試作した回転磁界発生ステージの外観写真を示す。ステージはサイズが 120×120×65 mm でマシン周辺に回転磁界を発生させるための一対のコイルを設置している。コイルは直径 1.0 mm の銅線を約 150 巻きし、平均直径を約 50 mm とした。ここで実際にステージ上に基板を載せ、回転磁界を印加するだけでマシンは回転し送液を行った。

3.2 実験

ディスポーザブルポンプシステムの基礎特性評価を目的として回転周波数と流量の特性を求める実験を行った。ここで流体力学において重要なパラメータであるレイノルズ数 Re を式(1)に示す。レイノルズ数は慣性力と粘性力の比で表すことができる。

$$Re = \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}} = \frac{\text{代表長さ} \times \text{代表速度}}{\text{液体の動粘度}} \quad (1)$$

本研究においては、流路内の流体の流れについての検討を行っているため、代表長さを流路径、代表速度を流速としている。磁気マイクロマシンは幅広いレイノルズ数領域 ($10^{-7} < Re < 10^3$) において駆動可能であることがわかってい

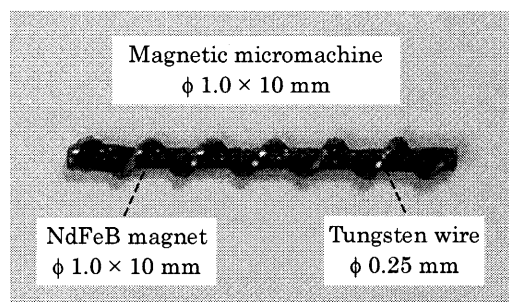


Fig. 2 Photograph of the spiral-type magnetic micromachine.

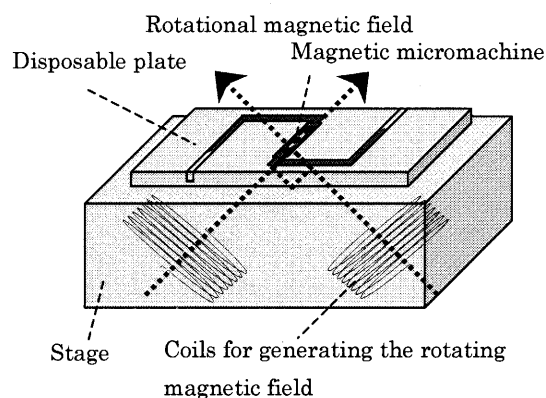


Fig. 3 Disposable pump system.

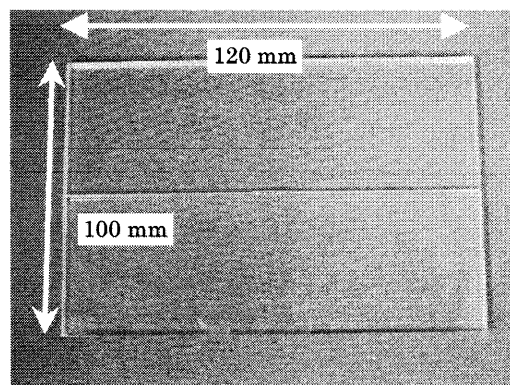


Fig. 4 Photograph of disposable plate containing the machine.

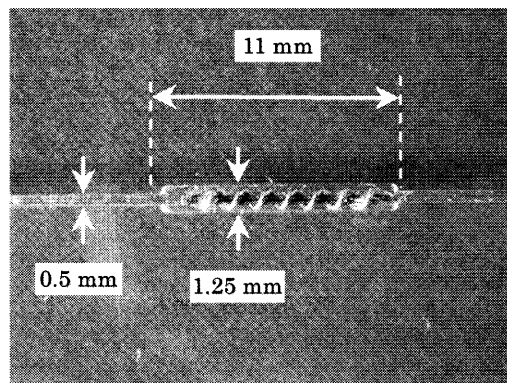


Fig. 5 Photograph of the space containing the machine in the fluid channel.

る 6)・8)。

この実験において、断面 1.1 の基板と断面 1.4 の基板を用いマシンと流路の隙間の距離と液体の動粘度をパラメータとした場合の回転周波数と流量の関係を求めた。この時磁界強度は 1.6 kA/m、流路内に液体を充填した長さは 50 mm とした。Fig. 8 に実験結果を示す。ここで塗りつぶしてあるプロットが断面 1.1 の基板、白抜きのプロットが断面 1.4 の基板の回転周波数と流量の特性を表している。この時のレイノルズ数 Re の範囲は $6.7 \times 10^{-4} \sim 1.19$ であった。

同図より、流量は回転周波数に比例して増加し、同一周波数において動粘度にかかわらず等しくなることが理解される。この実験結果は式(2)に示されるハーゲン・ポアズユの流れにおける流量の式⁹⁾より説明することができる。

$$Q = \frac{\Delta P}{8\mu L} \pi r_0^4 \quad (2)$$

ここで、 Q は流量、 ΔP は圧力差、 μ は液体の動粘度、 L は流路内に液体を充填した長さ、 r_0 は流路の内径を表している。この実験において、流路内に液体を充填した長さ L と流路内径 r_0 は一定であり、圧力差 ΔP はマシンによる発生圧力を表している。流体力学の理論において Re が 1 より十分小さい場合には流体の慣性力を無視でき、発生圧力は動粘度に比例する。それゆえに流量 Q は液体の動粘度 μ に依存しないことになる。

また流量はマシンと流路の隙間の距離が小さいほど増加した。これはマシンの動作時にこの隙間の部分において送液方向と逆方向の流れが発生し送液総量を減少させているためだと考えられる。

以上の結果から本マイクロポンプの流量は動粘度に依存せず、さらにマシンと流路の隙間の距離が小さいほど高効率な送液を行うことができることが示された。またマシン挿入部の角付近において逆方向の流れによる渦流が生じることが予想されるので¹⁰⁾、今後は流体力学的解析を用いて渦流の送液総量への影響などに関する検討、及びマシン挿入部の最適形状に関する検討を行う予定である。

4. 選択送液に関する検討

4.1 動作原理

Fig. 9 に選択送液を行うためのディスプレイポンプシステムの概略図を示す。このシステムにおいて、各マシン近傍に小型の回転磁界発生コイルが設置されている。コイルによりマシン周辺に局所的な回転磁界を印加することで、他のマシンに影響を及ぼすことなく回転磁界を印加したマシンのみ送液を行うことができると考えられる。

Fig. 10 に試作した使い捨て可能な基板の外観写真を示

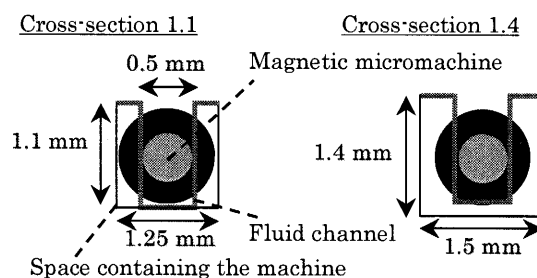


Fig. 6 Cross section of the space containing the machine in the fluid channel.

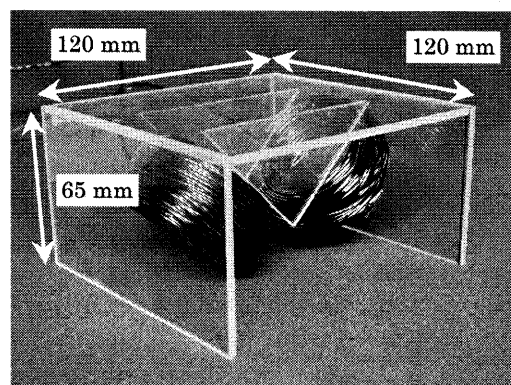


Fig. 7 Photograph of the stage for generating the rotational magnetic field.

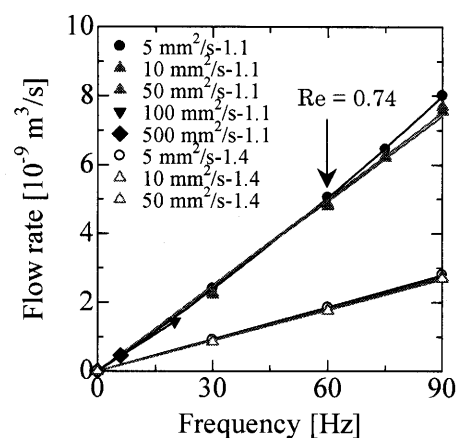


Fig. 8 Relation between the frequency and the flow rate.

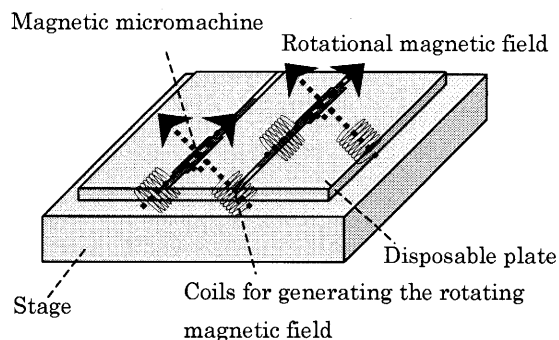


Fig. 9 Disposable pump system for pumping the liquid selectively.

す。基板にはアクリルを用いており、サイズは $140 \times 120 \times 5$ mm である。基板表面には二本の流路と二箇所のマシン挿入部を作製した。流路、及びマシン挿入部は共に断面 1.1 の基板と同形状としている。今後画面上部の挿入部に搭載したマシンをマシン 1、下部の挿入部に搭載したマシンをマシン 2 とする。Fig. 11 に試作した回転磁界発生ステージの外観写真を示す。ステージはサイズが $160 \times 120 \times 36$ mm で回転磁界を発生させるための二対のコイルを設置している。コイルは直径 1.0 mm の銅線を約 50 巻きし、平均直径を約 20 mm とした。実験では流路内に動粘度 $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルを充填し、オイルを充填した長さは 50 mm とした。

4.2 実験

ポンプをどれだけ近接させてもよいかを調べるために、回転磁界発生コイルにより磁界を印加した際に、基板に搭載されたマシンがステージ上で磁界の影響を受けず静止している範囲と磁界の影響を受け動く範囲についての検討を行った。ここで磁界の影響を受け動くとは、(i)マシンが回転磁界に同期して回転し定量送液を行う状態、(ii)マシンは脱調するが送液は行う状態、(iii)マシンが脱調し送液は行わないが磁界の影響を受け微振動する状態のことである。またマシンが磁界の影響を受けず静止している状態を(iv)とする。Fig. 12 にマシンが磁界の影響を受け動く範囲を示す。ここで図中の①は上記(i)の範囲、②は(i)かつ(ii)の範囲、③は(i)かつ(ii)かつ(iii)の範囲を表している。この時、原点(0, 0)は回転磁界の磁界強度が最大となる点であり、ステージ上で回転磁界面と垂直となる方向を X 軸、平行となる方向を Y 軸とした。実験では(0, 0)での磁界強度は 0.4 kA/m 、回転周波数は 10 Hz とし、ステージ上でのマシンはマシン長さ方向と X 軸が平行になるように位置している。図より(iv)の範囲においては、コイルによる磁界の干渉を受けないため別のポンプを配置することができるといえる。この結果をうけて、(iv)の範囲に別のポンプを配置した Fig. 10 に示す基板と Fig. 11 に示すステージを試作し、この基板とステージを用いて流量特性に関する検討を行った。実験では、マシン 1 あるいは 2 のいずれかのみで回転磁界を印加した場合(single)、及びマシン 1 とマシン 2 共に回転磁界を印加した場合(double)の回転周波数と流量の特性を求めた。Fig. 13 に回転周波数と流量の特性を示す。マシンに印加した回転磁界の磁界強度は 0.4 kA/m とした。この時、流量は互いのコイルによる回転磁界の影響を受けることなく等しくなった。このことからマシンがコイルによる磁界の干渉を受けない範囲に別のポンプを配置している場合、選択送液可能であることが実験により示された。

次にポンプの位置をずらして設置した場合における回転周波数と流量の関係を求めることにより、定量送液可能な

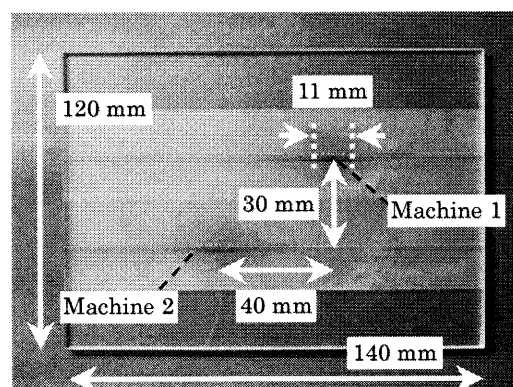


Fig. 10 Photograph of the disposable plate with the machine.

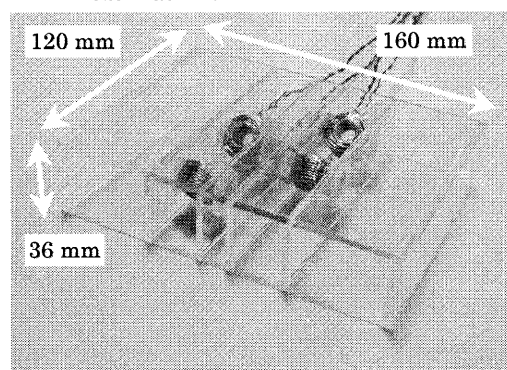


Fig. 11 Photograph of the stage for generating the rotational magnetic field.

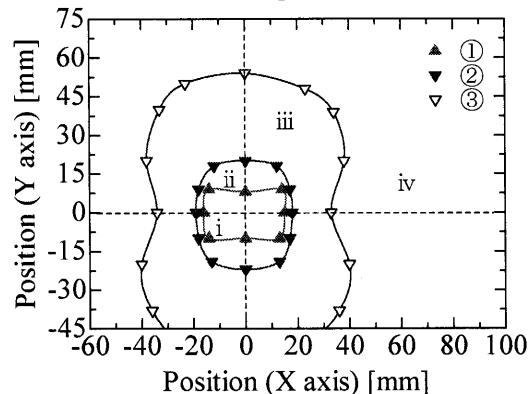


Fig. 12 Range of moving of the machine.

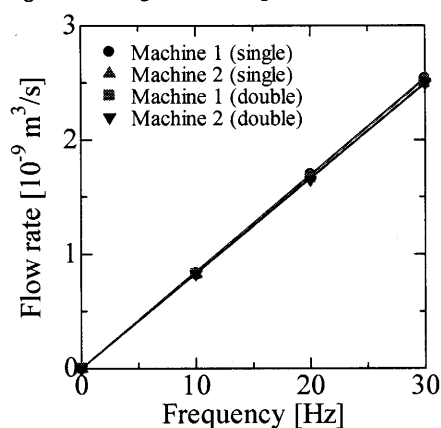


Fig. 13 Relation between the frequency and the flow rate.

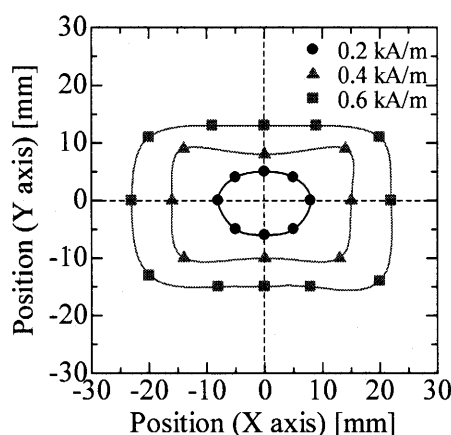


Fig. 14 Range of pumping quantitatively.

範囲についての検討を行った。Fig. 14 に磁界強度を変化した場合の定量送液可能な範囲を示す。図中の磁界強度は点(0, 0)での磁界強度を表しており、回転周波数は 10 Hz とし、ステージ上でのマシンはマシン長さ方向と X 軸が平行になるように位置している。この時、各磁界強度において定量送液可能な回転磁界の最小磁界強度は 0.18 kA/m となった。これは(0, 0)から離れるほど回転磁界の磁界強度が小さくなり、磁界強度が 0.18 kA/m を下回るとマシンの磁気トルクがオイルや流路から受ける負荷トルクを下回り脱調するためである。また(0, 0)での回転磁界の磁界強度が大きいほど定量送液可能な範囲は広くなった。これは磁界強度が大きいほどマシンの磁気トルクが大きくなり、0.18 kA/m 以上の磁界強度の範囲が広がるためである。このことから回転周波数 10 Hz のもとで回転磁界の磁界強度が 0.18 kA/m 以上の範囲においては、多少ポンプが位置ずれしたとしても定量送液可能であるといえる。

以上より、各ポンプが互いの回転磁界発生コイルによる磁界の干渉を受けない範囲において選択送液は可能であることが示された。また回転周波数が 10 Hz のもとで、回転磁界の磁界強度が 0.18 kA/m 以上の範囲では多少ポンプが位置ずれしたとしても定量送液可能であることがわかった。今後は装置の小型化を目的として、ポンプ間をより近づけるためのコイルの最適形状、及びコイルの小型化に関する検討を行う予定である。

5. まとめ

スパイラル型磁気マイクロマシンを用いたディスプレイポンプシステムを得るために、回転磁界発生ステージと流路を搭載した使い捨て可能な基板を試作した。このシ

ステムにおいて、ステージ上に基板を載せるだけでマシンは回転し送液を行った。またこのポンプシステムの基礎特性として回転周波数と流量の特性を定量的に明らかにした。さらにこのポンプシステムにおいて選択送液が可能であることが示された。

本マイクロポンプは電気的な接点なしにワイヤレスに送液可能であり、幅広い動粘度の液体を周波数制御により定量送液可能であることから圧電駆動型ポンプや SMA 駆動型ポンプ、電気泳動による送液の短所を補うことができる。さらに基板の使い捨てが可能であり、選択送液を行うことができることから μ TAS などのマイクロ流体工学や生体工学への応用に適しているといえる。

References

- 1) S. Böhm, W. Olthuis, P. Bergveld: *Sensors and Actuators A* 77, 223 (1999).
- 2) W. L. Benard, H. Kahm, A. H. Heuer, M. A. Huff: *Journal of Microelectromechanical Systems*, 7-2, 245 (1998).
- 3) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, K. I. Arai, T. Inoue: *Trans. IEE Jpn.*, 120-A, 301 (2000).
- 4) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai, T. Hayase: *IEEE Trans. Magn.*, 39, 3289 (2003).
- 5) S. Hisatomi, A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 29, 161 (2004).
- 6) M. Sendoh, A. Yamazaki, K. Ishiyama, M. Inoue, T. Hayase, K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 25, 1223 (2001).
- 7) A. Yamazaki, M. Sendoh, K. Ishiyama, T. Hayase, K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 26, 645 (2002).
- 8) K. Ishiyama, M. Sendoh, A. Yamazaki, M. Inoue, K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, 37, 2868 (2001).
- 9) T. Kanbe: *Ryuutairikigaku* (in Japanese), p. 178 (Shoukado, Tokyo, 1997).
- 10) T. Takori, C. Arakawa: *Ryuutaikougaku* (in Japanese), p. 94 (Sanshusha, Tokyo, 1989).

2005年10月19日受理, 2005年12月16日採録