

日本磁気学会論文特集号

4 巻 2 号

ONLINE ISSN: 2432-0471

Electronic Journal URL: <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/msjtsmj/-char/ja/>

CONTENTS

Thin Films, Fine Particles, Multilayers, Superlattices

反応性パルス DC スパッタリング成膜における BiFeO ₃ 系強磁性・強誘電薄膜の高品位作製の指針	武田航太郎 116
Errata.....	121

Power Magnetics

薄鋼板の湾曲磁気浮上システムの開発 (スライディングモード制御を用いた浮上性能の実験的検討)	成田正敬・小川和輝・多田 誠・加藤英晃 122
---	-------------------------

Board of Directors of The Magnetism Society of Japan

President:	K. Nakagawa
Vice Presidents:	S. Sugimoto, S. Matsunuma
Directors, General Affairs:	Y. Miyamoto, H. Saito, H. Yuasa
Directors, Treasurer:	K. Ishiyama, H. Takahashi
Directors, Planning:	S. Nakagawa, T. Kondo
Directors, Editorial:	T. Ono, T. Kato
Directors, Public Relations:	S. Greaves, S. Sakurada
Directors, International Affairs:	M. Nakano, H. Yanagihara
Specially Appointed Director, Gender Equality:	F. Akagi
Specially Appointed Director, Societies Collaborations:	K. Fujisaki
Specially Appointed Director, International Conferences:	Y. Miyamoto
Auditors:	R. Nakatani, Y. Takano

反応性パルス DC スパッタリング成膜における BiFeO₃系強磁性・強誘電薄膜の高品位作製の指針

Guidelines for fabrication of high quality BiFeO₃ based multiferroic thin films in pulsed DC reactive sputtering method

武田航太郎・山本大地・吉村哲[†]

秋田大学 大学院理工学研究科 革新材料研究センター, 秋田県秋田市手形学園町 1-1 (〒010-8502)

K. Takeda, D. Yamamoto, and S. Yoshimura[†]

Research Center of Advanced Materials for Breakthrough Technology, Graduate School of Engineering Science, Akita University,
1-1 Tegatagakuen-machi, Akita City 010-8502, Japan

BiFeO₃ based thin films with ferromagnetism were fabricated by using a pulsed DC reactive sputtering method. Guidelines on sputtering targets for fabricating the films are discussed in regard to obtaining high-quality BiFeO₃ based thin films. By using a target with a low oxide content (low molar ratio of oxide) and thus good conductivity, it is possible to suppress the charging and arc discharge on the surface of the target and enable high-energy sputtering. As a result, high-quality BiFeO₃ based thin films with a high saturation magnetization were formed. By using a target with a high oxygen content (including oxides with a high oxidation valence), the generation of oxygen vacancies that degrade the ferroelectric properties is suppressed, and pinning sites that suppress domain wall movement are then also suppressed. As a result, high-quality BiFeO₃ based thin films with good ferromagnetic properties could be formed.

Keywords: Multiferroic thin film, pulsed DC reactive sputtering method, sputtering target

1. はじめに

フェライトや窒化鉄などに代表される酸化物や窒化物磁性体には、大きな結晶磁気異方性や大きな飽和磁化などの優れた物性を示すものが多い。Bi フェライト(BiFeO₃)は室温で強誘電・反強磁性を有するマルチフェロイック特性を有しており¹⁾、革新的な次世代電子材料として期待されている。本材料において、Bi³⁺をBa²⁺で置換することでFe³⁺の一部がFe⁴⁺となり、反強磁性からフェリ磁性となることで強磁性と強誘電性が発現することが報告されている²⁾。また、FeをCoで置換することによっても強磁性と強誘電性が発現することが報告されている^{3), 4)}。このような強磁性・強誘電材料は、印加電界 E による磁化 M の方向制御、印加磁場 H による電気分極 P の方向制御が可能とされているため、電界駆動型磁気デバイスへの応用が期待されている^{5), 6), 7), 8)}。我々の研究グループでは本材料を用いた薄膜を、電界記録型のハードディスクドライブや、電界記録型の磁気細線メモリなどへ応用することを目指し研究を行っている。このように電界駆動型の磁気記録デバイスに使用する場合、高信号出力化などの観点から高い飽和磁化が求められる。以前、本研究グループでは RF スパッタリング法を使用して(Bi,Ba)FeO₃ 薄膜を作製していたが、その飽和磁化の最大値は(Bi,Ba)FeO₃ 粉末の飽和磁化の半分程度の 60 emu/cm³ しか示さなかった⁹⁾。これは(Bi,Ba)FeO₃ 薄膜の結晶化が不十分であったことが原因と考えられる。そこで、薄膜を高品位に作製するため、RF スパッタリング法に代えて、反応性パルス DC スパッタリング法¹⁰⁾を用いて(Bi,Ba)FeO₃系薄膜の作製を試みた。逆パルス電圧(+)をターゲットに周期的に印加することで、ターゲット表面の帯電によるアーク放電を抑制する、近年確立された手法であ

る。その結果、反応性パルス DC スパッタリング法で作製した薄膜の飽和磁化は、最大 92 emu/cm³ となり、大幅な向上が見られた。また、反応性パルス DC スパッタリング法で作製した薄膜は、RF スパッタリング法で作製した薄膜に比べ、成膜速度は 5 倍程度、抵抗値は 20 倍程度となり、他の特性に関しても大幅な向上が見られた¹¹⁾。また、本検討において、反応性パルス DC スパッタリング法を用いた場合、成膜電力が高く、周波数が低い条件で作製された薄膜の方が、結晶化が促進しており、より高い飽和磁化を示した。これは高いエネルギーを有するスパッタ粒子を離散的に基板に到達させることで、スパッタが OFF の間に原子の基板表面拡散が促進したためだと考えられる。この反応性パルス DC スパッタリング法において、RF スパッタリング法で使用していた絶縁体である、Bi-Ba-Fe-O ターゲットを用いて薄膜作製を行うと、ターゲットの抵抗が非常に大きいことから、プラズマ着火時のみならずプラズマ着火後においても非常に多くのアーク放電が生じた。それに加えて、作製した薄膜において Bi がまったく含まれず、作製したい組成の薄膜を作製できなかった。そのため、先の実験では、特別に作製した導電性の Ba-Fe-O ターゲットに Bi シートを配置したものをを用いて薄膜作製を行った。よって、反応性パルス DC スパッタリング法におけるターゲットの詳細な検討が必要となっている。

一方で、導電性のターゲットを用いて酸化物薄膜を作製する場合、薄膜中において酸素欠損が生じやすくなることが懸念される。BiFeO₃系薄膜の酸素欠損は、誘電特性を劣化させることが報告されており¹²⁾、この特性は、電界駆動型の磁気記録デバイスへの応用にきわめて重要である。通常の DC 電源および本パルス DC 電源を用いる場合の反応

性スパッタリング成膜において、薄膜中酸素濃度を増大させて酸素欠損を抑制する手法のひとつとして、成膜プロセスガスにおける酸素分圧を増大させることが挙げられるが、Ar と O₂ の分圧比が 7 : 3 で成膜した場合の成膜速度は 0.0733 nm/s であったのに対し、5 : 5 で成膜した場合、成膜速度は 0.0380 nm/s と半分程度となり、酸素分圧の増大に伴い成膜速度が遅くなることが判った。また、5 : 5 で成膜した場合は、薄膜中の Bi 含有量がゼロとなり、薄膜組成の制御が極めて難しくなるなどの問題が見られた。以上のことから、成膜プロセスガスにおける酸素の導入は、Ar と O₂ の分圧比で 7 : 3 が限界であると言え、成膜プロセス中の酸素分圧の増大以外の手法での薄膜中酸素濃度の増大を図る必要がある。

そこで本研究では、反応性パルス DC スパッタリング法において作製された薄膜での、プラズマ安定性および磁気特性におけるターゲット導電性依存を明らかにすることと、薄膜の磁気・誘電特性におけるターゲット中酸素濃度依存を明らかにすることを目的とした。これによって、強磁性・強誘電 BiFeO₃ 系薄膜のパルス DC スパッタリング成膜における高品位作製の指針ができ、より効率的に高品位の薄膜が作製できるようになると期待できる。

2. 実験

2.1 導電性の異なるスパッタリングターゲットを用いた場合の薄膜作製

(Bi,Ba)FeO₃(BBFO)薄膜(膜厚 200 nm)を、反応性パルス DC スパッタリング法を用いて、熱酸化膜付き Si 基板上に Ta(5 nm)/Pt(100 nm)の下地層¹³⁾を成膜した後、積層膜として作製した。積層膜は基板温度として、Ta を室温、Pt を 300°C、BBFO を 695°C で成膜した。さらに、BBFO 薄膜のペロブスカイト構造の形成を促進させるために、成膜時の薄膜に VHF プラズマ照射を施した。BBFO 薄膜の成膜には、Fe 粉末と Ba-Fe-O 粉末とを焼結させて作製した、酸化物の含有量が異なる(導電性が異なる)3 種類のターゲットに、Bi シートを配置したものを用いた。それぞれのターゲットに含まれる酸化物含有量の割合は、14, 17, 20 mol%である(それぞれのターゲット名を便宜上 Ox-14, Ox-17, Ox-20 とする)。スパッタリング電源には ULVAC 社製の反応性 SPUTTER 用 DC PULSE 電源 DPG-5P を用いた。パルス周波数および逆パルス印加(スパッタ OFF)時間を、5~250 k Hz および 0.4~5 μs の範囲で変化させることができる本電源は、アーク放電の回数をカウントできる機能も有している。反応性パルス DC スパッタリング法におけるパルス条件として、周波数を 200 kHz、電力を 150 W、ON : OFF 比を 3 : 2 で固定して成膜を行った。成膜プロセスガスにおける Ar と O₂ の分圧比は前記の観点から 7 : 3 で固定し、全圧を 10 mTorr とした。

2.2 酸素濃度の異なる導電性スパッタリングターゲットを用いた場合の薄膜作製

(Bi,Gd)(Fe,Co)O₃(BGFCO)薄膜(膜厚 200 nm)を、反応性パルス DC スパッタリング法を用いて、BBFO 薄膜の場合と同様の積層構造および基板温度、VHF プラズマ照射により作製した。Bi フェライト(BiFeO₃)の Bi を Gd で置換することによっても強磁性・強誘電が発現することが報告されている¹⁴⁾。BGFCO 薄膜の成膜には、Gd-Fe-O 粉末、Fe 粉末、Co 粉末を焼結させて作製した導電性ターゲットに、Bi シートを配置したものを用いた。使用したターゲットの組成は、Fe 粉末 : Co 粉末 : GdFeO₃ 粉末を 7 : 3 : 2 の mol 比で混合させて焼結作製したターゲット(G1O3)と、Fe 粉末 : Co 粉末 : Gd₃Fe₅O₁₂ 粉末を 8 : 4 : 1 の mol 比で混合させて焼結作製したターゲット(G1O4)の 2 種を用いた。反応性パルス DC スパッタリング法におけるパルス条件として、周波数を 100 kHz、電力を 150W、ON : OFF 比を 3 : 2 で固定して成膜を行った。

2.3 薄膜の特性評価

作製した薄膜の組成分析は、エネルギー分散型 X 線分光器(EDS)により、磁気測定は、振動試料型磁力計(VSM)により、結晶構造および結晶性の評価は XRD により行った。誘電測定は、BGFCO 積層膜の最表面に Pt ドット状電極(φ 100 μm)を成膜した後に、強誘電体特性評価システムにより行った。

3. 結果

3.1 薄膜の結晶構造、磁気特性およびプラズマ安定性におけるスパッタリングターゲット導電性依存

前述の通り、反応性パルス DC スパッタリング法では、逆パルス電圧(+)の印加によりターゲット表面の帯電を抑制する効果があるため、ターゲットには導電性を有することが必要であるが、どの程度の導電性が必要かについては、全くわかっていない。これをふまえて、薄膜の結晶構造、磁気特性および成膜中のプラズマ安定性におけるターゲット導電性の依存性を調べた。

まず、各 Ox-14, Ox-17, Ox-20 ターゲットにおけるシート抵抗を測定した結果、数 Ω/sq, 数十 Ω/sq, 数 kΩ/sq 程度であった。次に、導電性が異なる各 Ox-14, Ox-17,

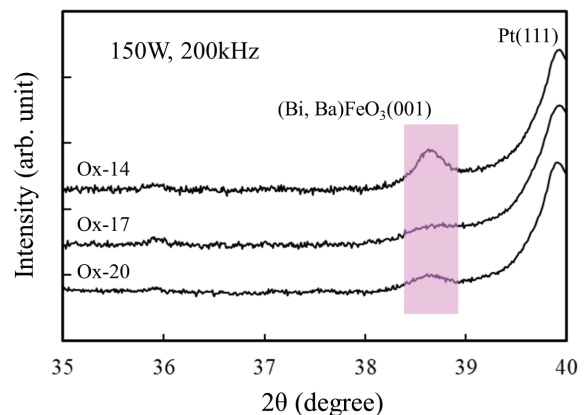


Fig. 1 XRD profiles of Bi-Ba-Fe-O films on Ta/Pt layer fabricated with various sputtering targets.

Ox-20 ターゲットを用いて作製した薄膜の、組成、結晶構造の評価を行った。EDS による組成分析の結果は、Ox-14 ターゲットを用いて作製した薄膜では、 $(\text{Bi}_{0.46}\text{Ba}_{0.54})_{0.35}\text{Fe}_{0.65}\text{O}_x$ 、Ox-17 ターゲットを用いた場合は、 $(\text{Bi}_{0.50}\text{Ba}_{0.50})_{0.40}\text{Fe}_{0.60}\text{O}_x$ 、Ox-20 ターゲットを用いた場合は、 $(\text{Bi}_{0.49}\text{Ba}_{0.51})_{0.44}\text{Fe}_{0.56}\text{O}_x$ となった。また、Fig.1 にこれらの薄膜の XRD による結晶構造の評価結果を示す。図中の色付けされた領域が $(\text{Bi,Ba})\text{FeO}_3(001)$ の回折ピークであり、それ以外の $(\text{Bi,Ba})\text{FeO}_3$ の回折ピークは観測されなかった。これらのことから、いずれのターゲットで作製した薄膜においても、 BiFeO_3 系単相薄膜が形成されており、かつ、酸化物含有量が少なく導電性が高いターゲットを用いることにより、結晶性が向上することが確認された。

Fig.2 に、導電性が異なるターゲット：Ox-14, Ox-17, Ox-20 を用いて作製した薄膜の飽和磁化のターゲット中酸化物含有量依存性を示す。酸化物含有量が少なく導電性が高いターゲットを用いると飽和磁化は高い値を示し、その値は 62 emu/cm^3 だった。なお、過去の我々の実験結果¹¹⁾ に対して飽和磁化が小さい理由は、今回用いたパルス周波数が最適値より高く結晶化の促進が不完全であったからと考えられる。そして、導電性が悪くなると、飽和磁化は急激に減少し、半分以下の値になった。

導電性が悪くなると飽和磁化が減少する要因を調べるために、電源に付属のアーク放電の回数をカウントできる機能を用い、各ターゲットを用いた時のプラズマの安定性を調べた。Ox-14 ターゲットの場合では、プラズマ着火時およびプラズマ着火後においてもアーク放電は全くカウントされなかったが、ターゲット中の酸化物含有量が多く導電性が低い Ox-17, Ox-20 ターゲットの場合では、プラズマ着火直後の数秒間に数十回、プラズマ着火以降においても断続的に数百回のアーク放電が観測された。これらのことから、ターゲットに導電性があっても、その値が低い場合では、逆パルス電圧(+)の印加によってもターゲット表面の帯電を完全に抑制することは出来ないこと、その帯電

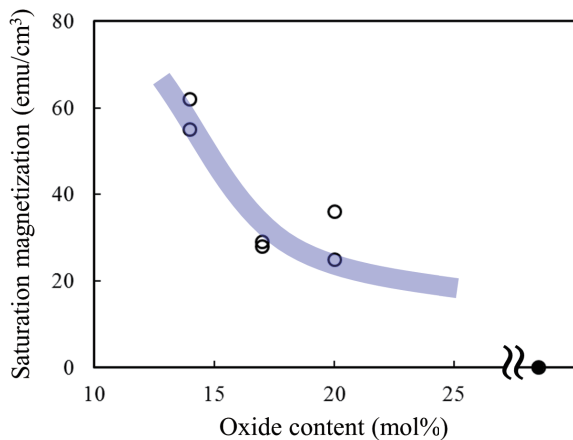


Fig. 2 Dependence of saturation magnetization of $(\text{Bi,Ba})\text{FeO}_3$ films on oxide content in sputtering target.

により高エネルギーのスパッタ粒子が生成されずに結晶化が阻害されたことが示唆される。また、アーク放電の発生は、デバイスの製造を考えた際、欠陥部の生成を原因とする不完全動作や不良品が発生しやすいなどの問題に発展する恐れがある観点からも、できるだけ発生を抑制する必要があると思われる。

以上より、本反応性パルス DC スパッタリング法において、できるだけ導電性の良いターゲットを用いることで、ターゲット表面での帯電やアーク放電が抑制されることから、結晶性が良く高品位な薄膜が形成され、高い飽和磁化を示す薄膜が作製できたと考えられる。

3.2 薄膜の結晶構造および磁気・誘電特性におけるスパッタリングターゲット中酸素濃度依存

これまでの議論から、ターゲットには、導電性が高い、つまりターゲット中酸化物含有量 (酸化物の mol) 比が少ないものが良いことがわかった。しかしながら、ターゲット中酸化物含有量を単純に減少させると、薄膜中酸素欠損が生じやすくなることが懸念される。この影響を調べるために、ターゲットの作製時に用いる酸化物の mol 比を少なく維持しながら、酸化価数が異なる酸化物 (GdFeO_3 粉末および $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 粉末) を用いたターゲット (G103 および G104) を作製して実験を行った。

3.1 の BBFO 薄膜と同様に、まず、各 G103, G104 ターゲットにおけるシート抵抗を測定した結果、いずれも数 Ω/sq 程度であった。次に、酸素濃度が異なる各ターゲットを用いて作製した薄膜の、組成、結晶構造の評価を行った。EDS による組成分析の結果は、G103 ターゲットを用いて作製した薄膜では、 $(\text{Bi}_{0.48}\text{Gd}_{0.52})_{0.36}(\text{Fe}_{0.75}\text{Co}_{0.25})_{0.64}\text{O}_x$ 、G104 ターゲットを用いた場合は、 $(\text{Bi}_{0.52}\text{Gd}_{0.48})_{0.36}(\text{Fe}_{0.75}\text{Co}_{0.25})_{0.64}\text{O}_x$ となった。また、Fig.3 にこれらの薄膜の XRD による結晶構造の評価結果を示す。図中の色付けされた領域が $(\text{Bi,Gd})(\text{Fe,Co})\text{O}_3(001)$ の回折ピークであり、それ以外の $(\text{Bi,Gd})(\text{Fe,Co})\text{O}_3$ の回折ピークは観測されなかった。これらのことから、いずれのターゲットで作製した薄膜においても、 BiFeO_3 系単相薄膜が形成

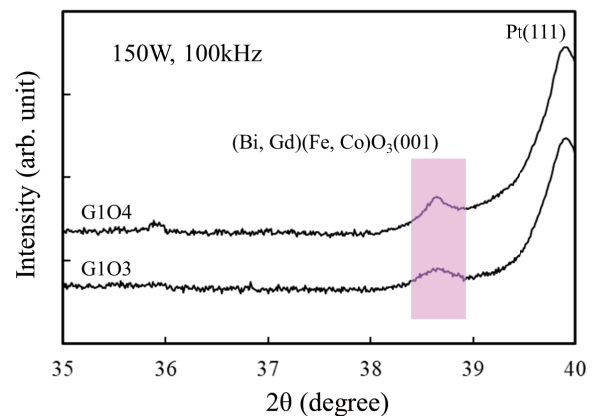


Fig. 3 XRD profiles of Bi-Gd-Fe-Co-O films on Ta/Pt layer fabricated with various sputtering targets.

されており、かつ、酸素濃度が高いターゲットを用いることにより、結晶性が向上することが確認された。

Fig.4, Fig.5 に、酸素濃度の異なる 2 つのターゲットを用いて作製した BGFCO 薄膜の膜面内および垂直方向の磁化曲線を示す。飽和磁化はいずれの薄膜試料においても、 80 emu/cm^3 程度の比較的高い値が得られた。保磁力に関しては、いずれの薄膜試料においても、膜面垂直方向に大きな保磁力が得られたが、酸素濃度が高い G1O4 ターゲットを用いて作製した薄膜の方が小さい値を示した。Fig.6, Fig.7 に、同薄膜の誘電特性を示す。G1O3 ターゲットを用いて作製した薄膜では、明瞭なヒステリシスが確認できなかったことから、常誘電性を有していると思われる。また、図には示していないが、同一薄膜試料内の別素子の測定においては、印加電界を大きくする途中において絶縁破壊がしばしば起こる傾向も見られた。一方で、G1O4 ターゲットを用いた場合の薄膜では、図に示した素子を含めほとんどの素子において原点对称性が良く明瞭なヒステリシスが得られたことから、強誘電特性が示唆される。使用したターゲットにより強誘電特性の違いが生じた要因として、酸

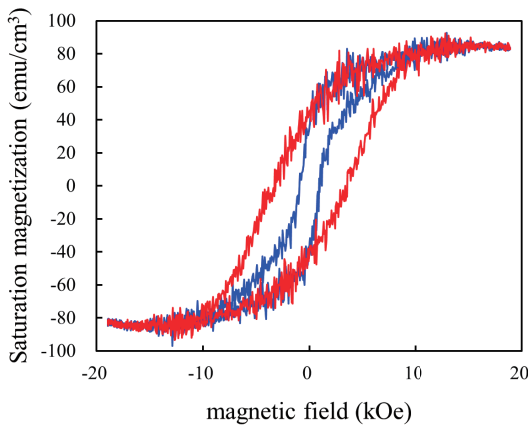


Fig. 4 M - H curves (red line: out-of-plane, blue line: in-plane) of $(\text{Bi,Gd})(\text{Fe,Co})\text{O}_3$ film fabricated with target G1O3.

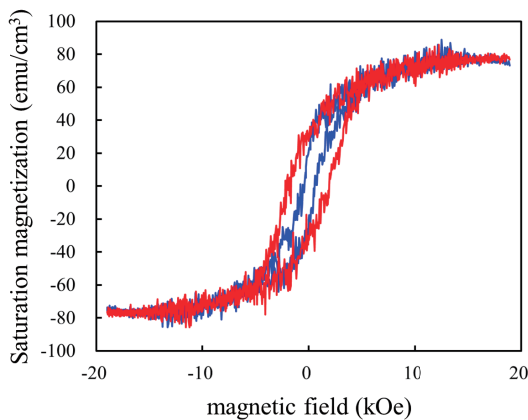


Fig. 5 M - H curves (red line: out-of-plane, blue line: in-plane) of $(\text{Bi,Gd})(\text{Fe,Co})\text{O}_3$ film fabricated with target G1O4.

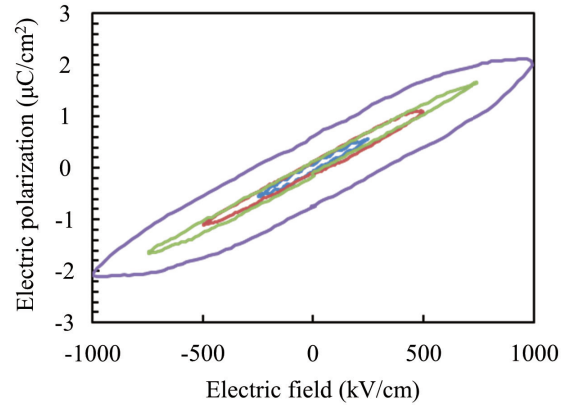


Fig. 6 P - E curves of $(\text{Bi,Gd})(\text{Fe,Co})\text{O}_3$ film fabricated with target G1O3.

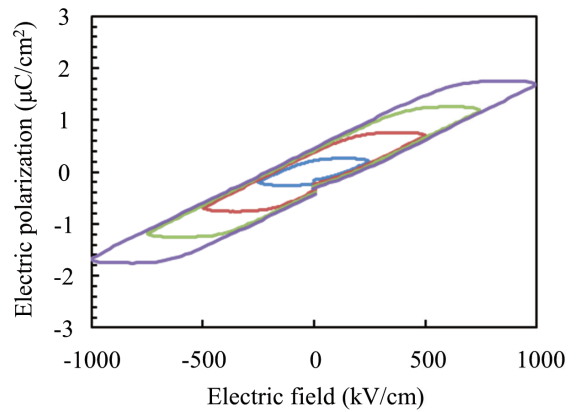


Fig. 7 P - E curves of $(\text{Bi,Gd})(\text{Fe,Co})\text{O}_3$ film fabricated with target G1O4.

素濃度が高い G1O4 ターゲットを用いて積極的に酸素を供給しながら成膜された試料では、結晶性が向上していることから、強誘電特性を劣化させる酸素欠損の発生が抑制されたためであると考えられる。そして、その酸素欠損の低減が、外部磁場に対する磁壁移動を抑制するピンニングサイトの低減をもたらし、Fig. 5 で示したように保磁力が小さくなったと考えられる。

以上より、本反応性パルス DC スパッタリング法において、導電性が高く酸素濃度の高いターゲットを用いることが、高い飽和磁化および強誘電特性が期待される、高品位な薄膜を形成できる条件であるといえる。

4. まとめ

反応性パルス DC スパッタリング法を用いて高品位な強磁性・強誘電薄膜を作製するにあたり、スパッタリングターゲットにおいて、以下の指針を得た。

1. 酸化物含有量(酸化物の mol 比)が少なく導電性の良いターゲットを用いることにより、ターゲット表面の帯電やアーク放電を抑制して、高いエネルギーでのスパッタリングが可能になる結果、高品位な薄膜が形成され、高い飽和磁化を示す薄膜が作製できた、と考えられる。

2. 酸素濃度が高い(酸化価数の高い)ターゲットを用いることにより, 強誘電特性が期待される, かつ小さな保磁力が得られる, 結晶性の良い高品位な薄膜が作製できた. これは, 強誘電特性を劣化させる酸素欠損の発生が抑制され, 磁壁移動を抑制するピンニングサイトの低減が原因であると考えられる.

References

- 1) G. A. Smolenskii and D. H. Wang: *Chupis, Sov. Phys. Usp.*, **25**, 475 (1982).
- 2) D. H. Wang, W. C. Goh, M. Ning, and C. K. Ong: *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 212907 (2006).
- 3) D. G. Barrionuevo, S. P. Singh, R. S. Katiyar, and M. S. Tomar: *MRS Proc.*, **1256**, 1256-N06-47 (2010).
- 4) H. Hojo, R. Kawabe, K. Shimizu, H. Yamamoto, K. Mibu, K. Samanta, T. Saha-Dasgupta, and M. Azuma: *Advanced Materials*, **29**, 1603131 (2017).
- 5) T. Kimura, T. Goto, H. Shinatani, K. Ishizaka, T. Arima, and Y. Tokura: *Nature*, **426**, 55 (2003).
- 6) N. Hur, S. Park, P. A. Sharma, J. S. Ahn, S. Guha, and S.-W. Cheong: *Nature* **429**, 392 (2004).
- 7) J. Wang, J. B. Neaton, H. Zheng, V. Nagarajan, S. B. Ogale, B. Liu, D. Viehland, V. Vaithyanathan, D. G. Schlom, U. V. Waghmare, N. A. Spaldin, K. M. Rabe, M. Wuttig, and R. Ramesh: *Science*, **299**, 1719 (2003).
- 8) W. Prellier, M. P. Singh, and P. Murugavel, *J. Phys.: Condens. Matter*, **17**, R803 (2005).
- 9) S. Yoshimura, Y. Sugawara, G. Egawa, and H. Saito: *Journal of the Magnetism Society of Japan*, **42**, 11 (2018).
- 10) D. R. Pellemounter, D. J. Christie, and B. D. Fries: *57th Annu. Technical Conf. Proc.*, 183 (2014).
- 11) S. Yoshimura, and M. Kupan: *Japanese Journal of Applied Physics, Selected Topics in Applied Physics*, **57**, 0902B7 (2018).
- 12) X. Qi, J. Dho, R. Tomov, M. G. Blamire, and J. L. MacManus-Driscoll: *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 062903 (2005).
- 13) Y. Takeda, S. Yoshimura, M. Takano, H. Asano, and M. Matsui: *J. Appl. Phys.*, **101**, 09J514 (2007).
- 14) A. Ablat, R. Wu, M. Mamat, J. Lia, E. Muhammed, C. Si, R. Wu, J. Wang, H. Qian, K. Ibrahim: *Ceramics International*, **40** 14083 (2014).

2019年11月7日受理, 2020年7月16日採録

Errata

T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues), 4, 16-20 (2020)
反応性パルス DC スパッタリング成膜における
BiFeO₃系強磁性・強誘電薄膜の高品位作製の指針
武田航太朗・山本大地・吉村哲

訂正箇所 1

ページ番号 : page 19

訂正箇所 : Fig. 4 の縦軸タイトル

[Error] : Saturation magnetization

[Correct] : Magnetization

訂正箇所 2

ページ番号 : page 19

訂正箇所 : Fig. 5 の縦軸タイトル

[Error] : Saturation magnetization

[Correct] : Magnetization

薄鋼板の湾曲磁気浮上システムの開発 (スライディングモード制御を用いた浮上性能の実験的検討)

Development of Bending Magnetic Levitation System for Thin Steel Plate (Experimental Consideration on Levitation Performance Using Sliding Mode Control)

小川和輝^{a)}・多田誠^{a)}・成田正敬^{a)†}・加藤英晃^{a)}

^{a)} 東海大学, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

K. Ogawa^{a)}, M. Tada^{a)}, T. Narita^{a)†}, and H. Kato^{a)}

^{a)} Tokai University, 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

Research on non-contact transport technology is being carried out in order to apply magnetic levitation technology using electromagnets to the transport systems used in production lines for thin steel plates. When an ultrathin and flexible steel plate is to be levitated, levitation control becomes difficult due to the flexure of such a plate. Therefore, we previously proposed a bending levitation system in which an ultrathin steel plate is bent to an extent that does not induce plastic deformation. However, in an actual usage environment, there are electrical noise and mechanical disturbances, which deteriorate the levitation performance. To investigate the levitation stability of an ultrathin steel plate in this case, we applied sliding mode control in the bending levitation system. Sliding mode control theory is a robust control theory that hardly deteriorates the control performance even in the presence of modeling errors and disturbances. We conducted experiments on levitation performance with an electromagnet that was vibrated in the vertical direction. The results show that stable levitation can be realized even with input external disturbance when the steel plate is levitated at the optimum bending angle.

Key words: magnetic levitation, vibration control, bending levitation, sliding mode control, ultrathin steel plate

1. はじめに

磁気浮上技術は、支持対象と支持装置が物理的に接触しないため、エネルギー損失や浮上対象の摩耗、破損、騒音といった問題点を根本的に解決できる。中でも浮上装置に設置した電磁石の吸引力により対象を浮上させる常電導磁気浮上は、特殊な材質かつ温度管理が必須の超電導体を使用しないため汎用性が高い¹⁾。浮上制御を行うためには、運動方程式など浮上対象の力学モデルから制御モデルを構築し、フィードバックゲインなどの制御パラメータを設定する。この手法はシステムの実際のパラメータが制御モデルで設定した値と同一であれば優れた制御性能を発揮する。しかし、浮上対象の質量が設定と異なる場合や、長時間システムを稼働させ、電磁石ユニットの発熱によって回路の抵抗値などの電気的なパラメータが変化した場合など、設定した制御モデルから誤差がある場合は制御性能が劣化する。またノイズなどの電気的外乱や、システムそのものに振動などの機械的外乱が入力された際も浮上性能が劣化する。これらのモデル化誤差や外乱が存在した際にも制御性能の劣化が小さいロバストな制御理論が提案されている²⁾。

当研究グループは、表面の高品質化が要求される冷間圧延など薄鋼板製造ラインに着目し、薄鋼板の磁気浮上について検討を行ってきた。この時、鋼板の板厚と面積に起因する柔軟性から弾性振動が励起され、浮上時の安定性が著しく損なわれる。この課題を解決するために、著者らは浮上安定性を阻害していた薄鋼板の柔軟性を積極的に利用し、浮上対象が塑性変形しない範囲で湾曲させて、鋼板の中央と周囲の4箇所合計5箇所の電磁石により浮上させる湾曲磁気浮上システムを提案した。鋼板を湾曲させると、周

囲の電磁石と中央の電磁石で支持する自重が変化し、モデル化誤差が生じるが、湾曲によって高次の振動モードが抑制され浮上安定性が向上した³⁾。この湾曲によって生じるモデル化誤差に対して非線形ロバスト制御のひとつであるスライディングモード制御理論を磁気浮上制御に適用し、最適制御理論と比較してスライディングモード制御理論を用いることで、より一層浮上性能が向上することを確認した⁴⁾。また、最適制御理論を適用した磁気浮上装置を用いて、実際の薄鋼板生産ラインにおいて想定しうる外乱として、電磁石ユニットを設置しているフレームを振動させることで、電磁石ユニットに物理的に振動を与えて、湾曲磁気浮上システムの浮上安定性についての検討を行った。入力される外乱の設定は、薄鋼板の共振周波数を取得し、浮上対象の共振周波数を含む帯域のランダムノイズによって電磁石ユニットを加振した。実験の結果、板厚0.19 mmの薄鋼板において、ある電磁石角度で薄鋼板を湾曲磁気浮上させることにより、外乱状況下においてもある程度の浮上性能を確保できることを確認した⁵⁾。

以上のように、電磁石ユニットに外乱を与え磁気浮上を行う検討に関しては、最適制御理論のみ検討されており、モデル化誤差に対してより優れた結果を示したスライディングモード制御理論も外乱に対してロバスト性を持つが、これについては未だ検討されていない。そこで本論文では湾曲磁気浮上装置の実用に向けたさらに高い浮上性能を追求するため、電磁石ユニットに与えた外乱に対するスライディングモード制御理論の有効性について検討する。この湾曲磁気浮上システムを用いて、既報の最適制御理論と同様の外乱条件下における浮上実験を行い、湾曲磁気浮上装置の浮上性能について比較する。

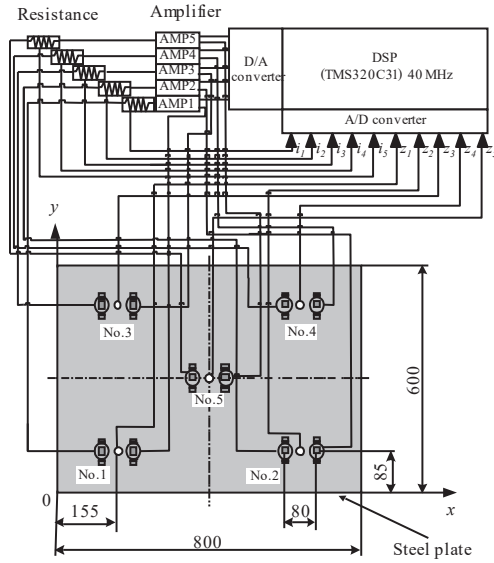


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.

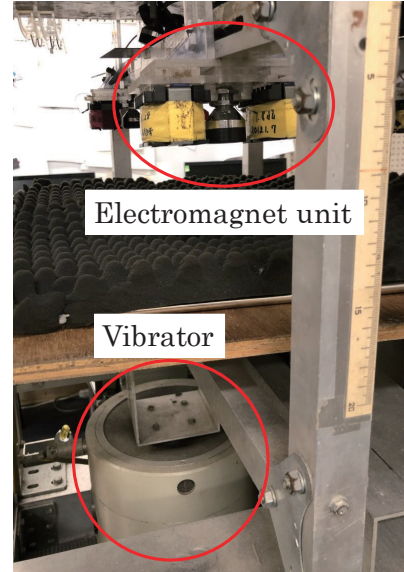


Fig. 3 Photograph of electromagnet unit and vibrator.

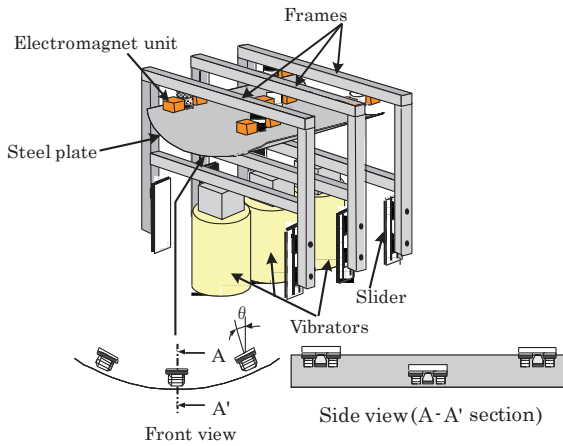


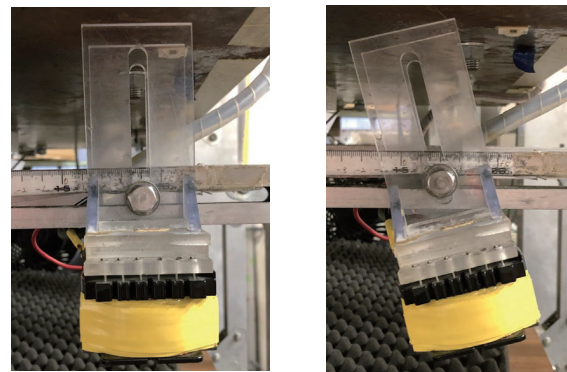
Fig. 2 Schematic illustration of experimental apparatus.

2. 湾曲磁気浮上装置

Fig. 1に制御システムの概略図, Fig. 2に湾曲浮上装置の概略図, Fig. 3 に実験に使用している電磁石ユニットと加振器を示す. Table 1 に使用した加振器の諸元を示す. 浮上対象は長方形亜鉛めっき鋼板(長さ $a=800$ mm, 幅 $b=600$ mm, 厚さ $h=0.19$ mm)を使用している. 渦電流式非接触変位センサを2個の電磁石で挟むように配置した電磁石ユニットを, 3台の加振器によってそれぞれ独立に上下加振させることが可能な3本のフレームに設置してある. なお, 電磁石本体はE型フェライトコアに直径0.5 mmのエナメル線を1005回巻いたものを使用した. また, この3本のフレーム変位を検出するために別途3個の渦流式非接触変位センサを設置している. 5か所の電磁石ユニットにより長方形の薄鋼板を吊り下げようとして非接触支持するため, 鋼板の変位およびそのデジタル微分値である速度, 電磁石コイルに流れる電流の定常値からの変動分の観測値をフィードバックし, 制御電圧(電磁石を駆動するアンプの出力電圧)を計算する. 5個の電磁石ユニット

Table 1 Specifications of vibrator.

Maximum excitation force	98.1 N \pm 5%
Maximum acceleration	264.8 m/s ² \pm 5%
Frequency range	3 Hz–13 kHz
Maximum input current	5.5 A \pm 5%
Maximum speed	1.17 m/s
Maximum amplitude	10 mm



(a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 13^\circ$

Fig. 4 Relationship between tilt angle of electromagnets θ and shape of steel plate.

のうち周囲のNo. 1~4はFig. 2の正面図に示す様にフレームに対して傾けることができる機構になっている. このように電磁石ユニットの角度 θ を変更することで, 鋼板を湾曲させて浮上させることができる. また, 鋼板を湾曲させても電磁石が同じ位置に吸引力を印加できるように周囲の電磁石ユニットNo. 1~4は水平方向

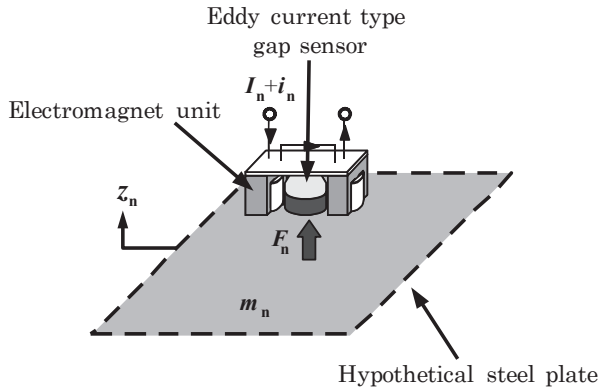


Fig. 5 Theoretical model of levitation control.

に、中央の電磁石ユニット No. 5 は鋼板の湾曲度合いに応じて垂直方向に動かすことができる。Fig. 4 に $\theta = 0^\circ$ の時と $\theta = 13^\circ$ の時の電磁石ユニットの傾斜の様子を示す。加振器は、周波数一定の正弦波を用いて各フレームの振幅および位相が等しくなるように調整した後、フレームを振動させることで浮上鋼板に外乱を入力した。

3. 運動方程式

本論文の浮上制御系は、Fig. 5 に示すように鋼板を各電磁石に対する 5 つの質量に仮想的に分割し、分割した質量の変位、速度および対応する電磁石コイル電流それぞれを集中定数系としてモデル化したものである。このモデルでは、5 個の電磁石ユニットは独立して浮上制御を行う。その場合、各電磁石ユニットは対応する鋼板の、変位、速度、電磁石コイルの電流値をその電磁石ユニットに対してのみフィードバックして制御出力を得て、変位を制御する 1 自由度モデルで表される。

電磁石ユニットからの静的吸引力によって仮想的に分割した鋼板を支持すれば一定の距離に保たれる平衡状態 Z_0 が存在する。そこからの鉛直方向の変位を z_n とすると、運動方程式は以下になる。

$$m_n \frac{d^2}{dt^2} z_n(t) = 2f_n(t) \quad (1)$$

なお m_n は鋼板を仮想的に 5 分割した質量 [kg]、 f_n は電磁石 1 個あたりの吸引力の変動値 [N] であり、添え字 n は電磁石ユニットの No. 1~5 を示す ($n = 1 \sim 5$)。

線形化近似を行った電磁石の吸引力および電磁石コイルに流れる電流に関する方程式は以下になる。

$$f_n = \frac{F_n}{Z_0} z_n + \frac{F_n}{I_n} i_n \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_n = -\frac{K_{em} I_n}{L_n Z_0^2} \frac{d}{dt} z_n - \frac{R_n}{2L_n} i_n + \frac{1}{2L_n} v_n \quad (3)$$

ここで F_n : 各電磁石ユニットから発生する定常的な吸引力 [N]、 I_n : 平衡状態における定常電流 [A]、 i_n : I_n からの変動値 [A]、 L_n : 平衡状態における電磁石コイル 1 個あたりのインダクタンス [H]、 R_n : 電磁石ユニットの抵抗値 [Ω]、 v_n : 電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V]、 K_{em} : 電磁石の吸引力の比例定数 [Hm]、である。また平衡浮上状態における電磁石 1 個あたりのコイルのインダクタンス L_n [H] を以下のように表す。

$$L_n = \frac{K_{em}^2}{Z_0} + L_{lea} \quad (4)$$

ここで、 L_{lea} : 電磁石 1 個あたりの漏れインダクタンス [H] である。

状態変数として鋼板の変位 z_n 、速度 \dot{z}_n および電流 i_n を採用し、式(1)~(3)を整理して以下のような状態方程式を得る。

$$\dot{\mathbf{z}}_n = \mathbf{A}_n \mathbf{z}_n + \mathbf{B}_n v_n \quad (5)$$

ただし、

$$\mathbf{z}_n = [z_n \quad \dot{z}_n \quad i_n]^T$$

$$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_n}{m_n Z_0} & 0 & \frac{2F_n}{m_n I_n} \\ 0 & -\frac{K_{em} I_n}{L_n Z_0^2} & -\frac{R_n}{2L_n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_n} \end{bmatrix}^T$$

4. スライディングモード制御理論

制御系を離散時間系で構成するため、離散時間系のスライディングモード制御理論に基づいてスライディングモード制御則を求める。離散時間系の状態方程式は以下のように表される。

$$\mathbf{z}_d(i+1) = \Phi \mathbf{z}_d(i) + \Gamma v_d(i) \quad (6)$$

ただし、

$$\Phi = \exp(\mathbf{A}_n T_s)$$

$$\Gamma = \int_0^{T_s} [\exp(\mathbf{A}_n \tau)] d\tau \mathbf{B}_n$$

ここで v_d : 離散時間系における電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V]、 T_s : サンプル時間 [s] である。 \mathbf{z}_d は離散時間系における鋼板の変位 z_d 、速度 \dot{z}_d および電流 i_d を含む状態変数ベクトルである。

ここで離散時間系の評価関数は次のように表される。

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} [z_d(i)^T \mathbf{Q}_d z_d(i) + v_d(i)^T r_d v_d(i)] \quad (7)$$

ただし \mathbf{Q}_d : 変位、速度および電磁石コイル電流に関する重み係数を要素とする行列、 r_d : 制御入力に関する重み係数である。式(7)を最小にする離散時間系最適制御則は次の離散時間系 Riccati 型代数方程式において正定対称解 \mathbf{M} を求めることで得られる。

Table 2 Symbols and values.

Symbol	Value
Z_0	5.00×10^{-3} m
K_{em}	2.55×10^{-4} Hm
L_{lea}	9.00×10^{-2} H
$R_1 - R_5$	21.0 Ω
T_s	1.00×10^{-3} s

Table 3 Weighting coefficients for sliding mode control.

Q_d	r_d	η	$\beta(i)$
diag($7.2 \times 10^4, 0.01 \times 10^1, 2.0 \times 10^0$)	2.9×10^{-3}	0.06	1.1

Table 4 Table judging results of levitation probability experiment.

	Levitation pattern	Result
1	After steel plate left jack, it did not make contact with electromagnet and kept levitating for 30 seconds.	Success
2	After steel plate left jack, it fell or made contact with electromagnet within 30 seconds.	Failure
3	When control started, steel plate made contact with electromagnet or attractive force of electromagnet was small, so plate could not levitate.	Retry
4	Steel plate made contact with electromagnet while jack was lowered.	Retry

$$\mathbf{M} = \Phi^T \mathbf{M} \Phi + \mathbf{Q}_d - \Phi^T \mathbf{M} \Gamma (\mathbf{r}_d + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (8)$$

ここで切換超平面を \mathbf{S}_d とし、入力の切換関数 $\sigma(i)$ を次式で表す。

$$\sigma(i) = \mathbf{S}_d \mathbf{z}_d(i) \quad (9)$$

また等価制御入力 $v_{eq}(i)$ は次式となる。

$$v_{eq}(i) = -(\mathbf{S}_d \Gamma)^{-1} \mathbf{S}_d (\Phi - \mathbf{I}) \mathbf{z}_d(i) \quad (10)$$

ここで、 \mathbf{I} は Φ と同じサイズの単位行列である。式(10)の $v_{eq}(i)$ を式(6) $v_d(i)$ として代入すると等価制御系は次のように表すことができる。

$$\mathbf{z}_d(i+1) = \{\Phi - \Gamma(\mathbf{S}_d \Gamma)^{-1} \mathbf{S}_d (\Phi - \mathbf{I})\} \mathbf{z}_d(i) \quad (11)$$

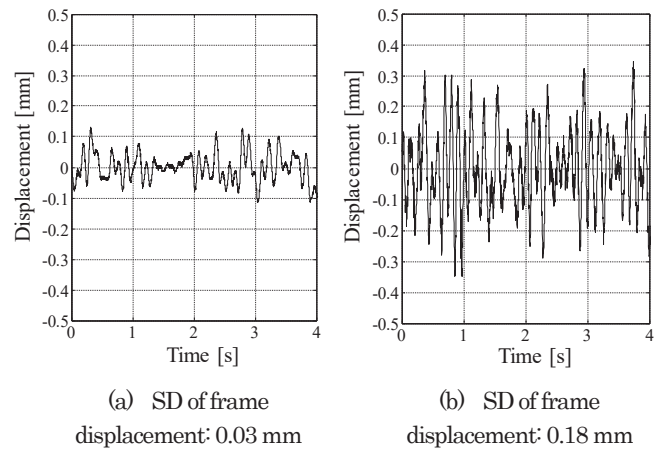
ここで \mathbf{S}_d は式(11)のシステムが安定するように選択する必要がある。本論文ではこの設計法にシステムの零点を利用する方法を用い、これに対して離散時間系最適制御理論を適用し \mathbf{S}_d を得る。

$$\mathbf{S}_d = (\mathbf{r}_d + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (12)$$

ただし、 \mathbf{M} は式(8)の正定解である。

続いて状態を超平面に収束させ、スライディングモードを発生させる制御入力を考える。チャタリングを抑制する離散時間系スライディングモード制御を設計するためにこの条件を満たすようなスライディングモード制御則として次のように与えられるものを用いる。

$$\left. \begin{aligned} v_d(i) &= v_{eq}(i) + v_{nl}(i) \\ v_{eq}(i) &= -(\mathbf{S}_d \Gamma)^{-1} \mathbf{S}_d (\Phi - \mathbf{I}) \mathbf{z}_d(i) \\ v_{nl}(i) &= -\{\alpha(i) + \beta(i)\} \operatorname{sgn}\{\sigma(i)\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

**Fig. 6** Time histories of displacement of frames when vibrated by random disturbance. (SD: standard deviation)

$$\alpha(i) = \eta \frac{\|\sigma(i)\|}{\|\mathbf{S}_d \Gamma\|} \quad (14)$$

$$(0 < \eta < 2, \beta(i) \geq F_{\max})$$

ここで v_{nl} : 状態を超平面に拘束するための非線形制御入力、 η : チャタリングを起こさずに状態を超平面に拘束する制御ゲイン、 $\beta(i)$: 外乱抑圧項、 F_{\max} : 外乱の最大値である。

本検討における各パラメータ値を Table 2 に示す。またスライディングモード制御理論における切換関数 \mathbf{S}_d を決定する際に用いる重み行列 (式(7)), ならびに式(14)における非線形入力項の値を Table 3 に示す。

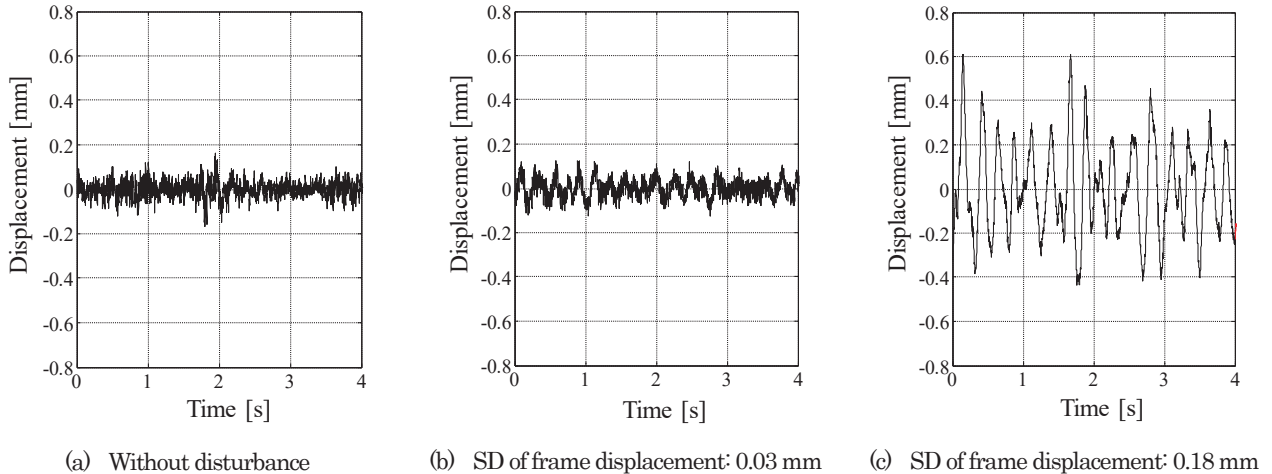


Fig. 7 Time histories of displacement of thin steel plate (electromagnet angle $\theta=0^\circ$).

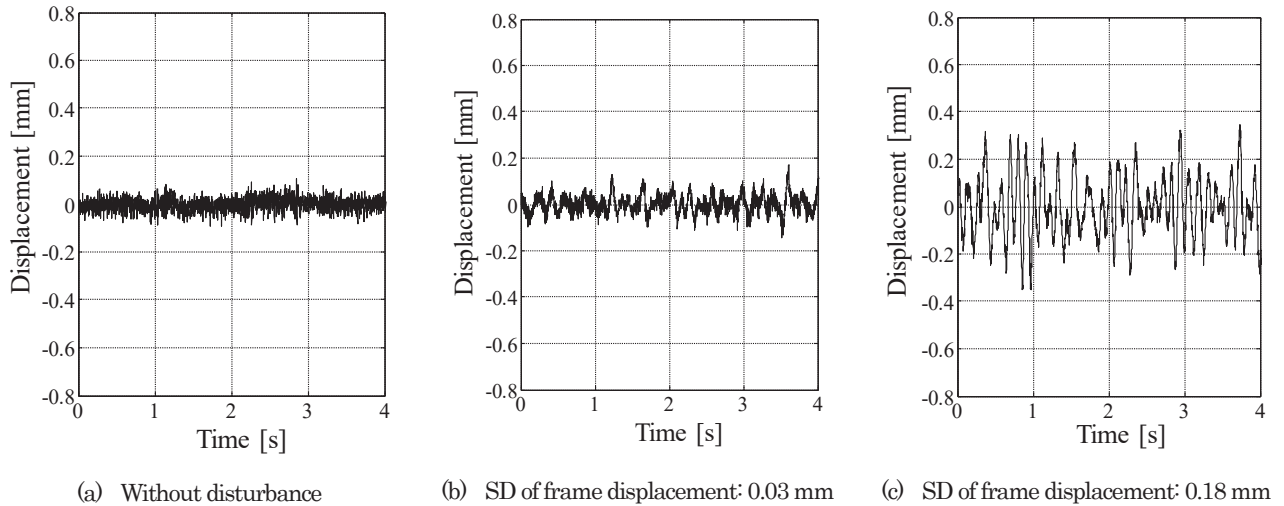


Fig. 8 Time histories of displacement of thin steel plate (electromagnet angle $\theta=13^\circ$).

5. 湾曲浮上実験

5.1 実験方法

機械的な外乱が浮上装置に入力された際の浮上安定性を実験的に評価するためにスライディングモード制御適用して湾曲浮上実験を行った。電磁石角度 θ は湾曲浮上を行わない電磁石角度 0° と、過去の検討¹⁾で最も浮上性能が高かった電磁石角度 13° の2種類の電磁石角度で実験を行った。電磁石角度は Fig. 4 に示すように変更した。浮上中の鋼板には多数の平板の固有振動数が含まれた振動が発生する。このため振幅値ではなく測定した変位時刻歴の標準偏差で鋼板の振動を評価する。浮上実験を行う際は、過渡状態の影響を除くため浮上開始後約 10 秒後から測定を開始した。浮上中の薄鋼板の変位を各条件に対して 10 回ずつ測定し、それらの標準偏差の平均値を実験値とした。浮上確率実験については、Table 4 に示す浮上パターン判定方法に従って浮上の可否を判定し、50 回の浮上実験のうち浮上が成功した回数を百分率によって評価した。

本論文では、鋼板搬送時に磁気浮上装置に外乱が入力されることを想定し、外乱を入力し実験を行った。電磁石ユニットを設置し

ているフレームの下に取り付けている加振器によって物理的に電磁石を振動させることで外乱を入力した。既報にて板厚 0.19 mm の鋼板の共振周波数は 0~10 Hz の帯域に存在することを確認しており¹²⁾、本論文は 0~10 Hz の帯域に設定したランダムノイズによってフレームを加振する。加振振幅の条件は、フレーム加振の振幅は電磁石角度 $10\sim 15^\circ$ において鋼板を浮上させることのできる最大の振幅（フレーム変位標準偏差約 0.18 mm）と、その約 6 分の 1 の振幅（フレーム変位標準偏差約 0.03 mm）を設定した。Fig. 6 に外乱入力時のフレーム変位時刻歴(a)外乱フレーム変位標準偏差約 0.03 mm, (b) フレーム変位標準偏差約 0.18 mm を示す。

5.2 実験結果

Fig. 7 に電磁石角度 0° 時の磁気浮上鋼板の変位時刻歴波形(a)外乱なし, (b)フレーム変位標準偏差約 0.03 mm, (c)フレーム変位標準偏差約 0.18 mm を、Fig. 8 に電磁石角度 13° 時の磁気浮上鋼板の変位時刻歴波形(a)外乱なし, (b)フレーム変位標準偏差約 0.03 mm, (c)フレーム変位標準偏差約 0.18 mm を示す。Fig. 7(a), Fig. 8 (a)の外乱が入力されない場合の結果を比較すると、モデル化誤差のある 13° の結果の方が振動を抑制することができた。これは

鋼板の湾曲による制振効果とスライディングモード制御理論のモデル化誤差に対するロバスト性のためと考えられる。また、Fig. 8 (b),(c)のようにスライディングモード制御理論を適用することにより、外乱が入力される条件であっても浮上を維持することができた。加えて、どちらの外乱条件においても湾曲によって鋼板の振動を抑制することができた。Fig. 9に入力した外乱の標準偏差と鋼板変位より算出した標準偏差の実験値の関係性を示す。なお比較のため、既報にて測定したロバスト性の低い最適制御理論を適用して同様の実験を行った際の結果¹¹⁾を同図にプロットしている。この時の制御パラメータを決定するための重み係数は、参考文献¹¹⁾の通りである。外乱未入力時では、スライディングモード制御理論を適用し、 $\theta = 13^\circ$ で浮上させることで、最も振動を抑制することができた。スライディングモード制御理論を適用した際はどの外乱条件でも浮上させることができたが、最適制御理論では $\theta = 0^\circ$ の際に、入力外乱がフレーム変位標準偏差約0.18 mmでは浮上させることができなかった。同図よりいずれの条件においても入力する外乱の標準偏差が増加すると鋼板の変位標準偏差も増加した。ただし、どちらの制御理論を適用した場合においても、鋼板を湾曲させた際の変位標準偏差が、鋼板を湾曲させない場合の変位標準偏差を下回り、湾曲浮上による制振効果を確認することができた。スライディングモード制御理論を適用した場合は、 $\theta = 13^\circ$ の際にフレーム変位標準偏差約0.18 mm時において最適制御理論よりも変位標準偏差が増加する傾向となった。

Fig. 10に入力した外乱の標準偏差と浮上確率の関係性を示す。比較のために上記条件を適用して最適制御理論を用いた際の浮上確率を測定し、同図にプロットした。どちらの制御理論を適用した場合も、鋼板を湾曲させることにより浮上確率が上昇した。また、最適制御理論を適用した際は、外乱の標準偏差が増加するに従って浮上確率が低下した。一方、スライディングモード制御理論を適用した場合は、入力する外乱の標準偏差が増加した場合であっても、浮上確率はほとんど低下しなかった。これにより、スライディングモード制御理論を適用することで、振動は増加するが浮上確率は向上する事が確認できた。なお、スライディングモード制御理論では、振動が増加するが、浮上確率が高くなる結果が得られたが、この現象について考察するため、実験で得られた鋼板変位からスペクトルを算出した。Fig. 11(a)スライディングモード制御理論、(b)最適制御理論のスペクトルを示す。Fig. 11よりどちらの制御理論においても10 Hzの振動が発生していることが分かる。また、4 Hzの振動が発生しているが、これは、弾性1次モードの振動であると考えられる。スライディングモード制御理論では弾性1次モードの振動が大きく発生している。一方、最適制御では、19 Hzの振動が発生しており、長手方向の弾性1次モードと短手方向の弾性3次モードが組み合わさったモード¹²⁾である。今回使用した装置では2基の電磁石を長手方向に並べて設置しており、鋼板に長手方向の弾性振動が発生すると、電磁石と接触し浮上確率の低下を招いたと考えられる。

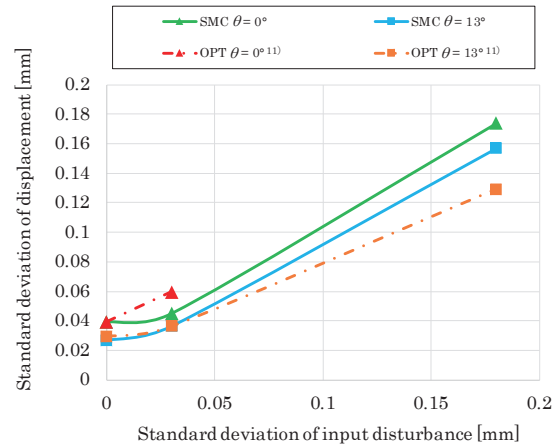


Fig. 9 Relationship between standard deviation of input disturbance and standard deviation of displacement of steel plate. (SMC : Sliding Mode Control, OPT : Optimal Control)

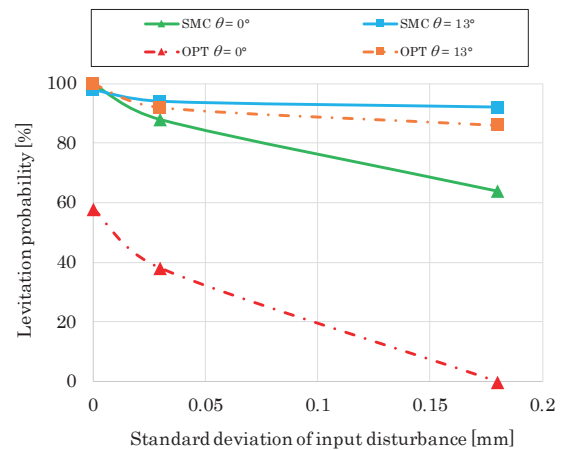


Fig. 10 Relationship between standard deviation of input disturbance and levitation probability. (SMC : Sliding Mode Control, OPT : Optimal Control)

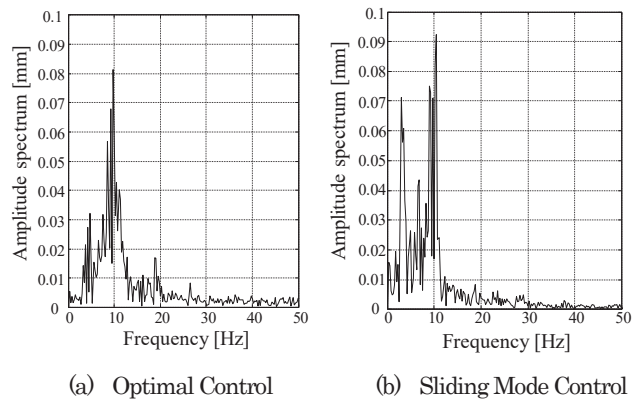


Fig. 11 Measured spectra in each control theory.

6. おわりに

本論文は薄鋼板の磁気浮上システムの浮上安定性をより向上させるため、機械的な外乱に対してロバスト性のある、スライディングモード制御理論を湾曲磁気浮上システムに適用し、薄鋼板の浮上実験を行った。その結果、鋼板を湾曲させることにより、鋼板の振動を抑制することができ、かつスライディングモード制御理論を適用することにより、外乱が入力される条件下であっても高い浮上性能を得ることができた。

本論文では1種類の板厚の鋼板に対して検討を行ったが、浮上する鋼板の板厚が異なる際には最適な電磁石角度、制御パラメータの重み係数についてそれぞれ最適値が存在する。また電磁石の発熱によって電気回路におけるモデル化誤差の影響も考えられる。今後はこれらのモデルや制御器の誤差に対してロバストな湾曲磁気浮上システムについて検討を行っていく。

References

- 1) A. Javed, T. Mizuno, M. Takasaki, Y. Ishino, M. Hara and D. Yamaguchi: *MDPI Actuators*, **7**, 21 (2018).
- 2) J. S. Choi, and Y. S. Baek: *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 4171 (2008).
- 3) K. S. Peterson, J.W. Grizzle, and A.G. Stefanopoulou: *IEEE Trans. Cont. Sys. Tech.*, **14**, 346 (2006).
- 4) Y. Odajima, Y. Takada, I. Oikawa, and T. Nakagawa: *IEEJ Trans. Indu. Appl.*, **138**, 692 (2018).
- 5) H. Aburano, H. Miyazaki, T. Ohji, K. Amei, and M. Sakui: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **35** 123 (2011).
- 6) T. Mizuno, M. Kosugi, and S. Fukuzawa: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 445 (2007).
- 7) N. F. Al-muthairi, and M. Zribi: *Math. Prob Eng.*, **2004**, 93 (2004).
- 8) V. S. Bandal, and P. N. Vernekar: *Proc. Amer. Cont. Conf.*, 4289 (2010).
- 9) H. Marumori, H. Yonezawa, T. Narita, H. Kato, and Y. Oshinoya: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **81**, 14-00471 (2015).
- 10) M. Tada, H. Yonezawa, H. Marumori, T. Narita, and H. Kato: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **25** 82 (2017)
- 11) M. Tada, H. Yonezawa, H. Marumori, T. Narita, and H. Kato: *Int. J. Appl. Elec. Mech.*, **59** 993 (2019)
- 12) M. Tada, K. Ogawa, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn.* (Special Issues), **3**, 107 (2019).

2019年11月8日受理, 2020年2月28日再受理, 2020年5月16日採録

Editorial Committee Members • Paper Committee Members

T. Ono and T. Kato (Chairperson), K. Koike, T. Taniyama and K. Kobayashi (Secretary)					
H. Goto	T. Hasegawa	S. Isogami	K. Kamata	H. Kikuchi	T. Kimura
T. Kouda	S. Kokado	Y. Kota	T. Kubota	T. Maki	T. Morita
S. Muroga	T. Nagahama	H. Nakayama	M. Naoe	T. Narita	D. Oyama
J. Ozeki	N. Pham	T. Sasayama	T. Sato	K. Sekiguchi	T. Shima
Y. Shiratsuchi	T. Takura	S. Yamada	T. Yamamoto	K. Yamazaki	
N. Adachi	K. Bessho	M. Doi	T. Doi	K. Hioki	S. Honda
N. Inaba	S. Inui	K. Ito	Y. Kanai	H. Kato	K. Kato
Y. Kamihara	A. Kuwahata	K. Masuda	Y. Nakamura	K. Nishijima	T. Nozaki
M. Ohtake	T. Sato	S. Seino	T. Suetsuna	K. Tajima	I. Tagawa
T. Tanaka	M. Takezawa	M. Tsunoda	N. Wakiya	S. Yabukami	S. Yoshimura

Notice for Photocopying

If you wish to photocopy any work of this publication, you have to get permission from the following organization to which licensing of copyright clearance is delegated by the copyright owner.

〈All users except those in USA〉

Japan Academic Association for Copyright Clearance, Inc. (JAACC)

6-41 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

Phone 81-3-3475-5618 FAX 81-3-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

〈Users in USA〉

Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA

Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

編集委員・論文委員

小野輝男 (理事)	加藤剛志 (理事)	小池邦博 (幹事)	谷山智康 (幹事)	小林宏一郎 (幹事)					
磯上慎二	小瀬木淳一	鎌田清孝	菊池弘昭	木村崇	窪田崇秀	神田哲典	古門聡士		
小田洋平	後藤博樹	佐藤岳	嶋敏之	白土優	関口康爾	田倉哲也	直江正幸		
中山英俊	長浜太郎	長谷川崇	PHAM NAMHAI		榎智仁	室賀翔	森田孝		
山崎慶太	山田晋也	山本崇史							
安達信泰	伊藤啓太	乾成里	稲葉信幸	大竹充	加藤宏朗	加藤和夫	金井靖	神原陽一	
桑波田晃弘	佐藤拓	末綱倫浩	清野智史	田河育也	竹澤昌晃	田島克文	田中哲郎	角田匡清	
土井達也	土井正晶	仲村泰明	西島健一	野崎友大	日置恵子	別所和宏	本多周太	増田啓介	
藪上信	吉村哲	脇谷尚樹							

複写をされる方へ

当学会は下記協会に複写複製および転載複製に係る権利委託をしています。当該利用をご希望の方は、学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org/>) が提供している複製利用許諾システムもしくは転載許諾システムを通じて申請ください。ただし、本誌掲載記事の執筆者が転載利用の申請をされる場合には、当学会に直接お問い合わせください。当学会に直接ご申請いただくことで無償で転載利用いただくことが可能です。

権利委託先：一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

電話 (03) 3475-5618 FAX (03) 3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

日本磁気学会論文特集号

Vol. 4 No. 2 (通巻第8号) 2020年9月1日発行

Vol. 4 No. 2 Published Sep. 1, 2020

by the Magnetism Society of Japan

Tokyo YWCA building Rm207, 1-8-11 Kanda surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0062

Tel. +81-3-5281-0106 Fax. +81-3-5281-0107

Printed by JP Corporation Co., Ltd.

Sports Plaza building 401, 2-4-3, Shinkamata Ota-ku, Tokyo 144-0054

Advertising agency: Kagaku Gijutsu-sha

発行：(公社)日本磁気学会 101-0062 東京都千代田区神田駿河台 1-8-11 東京YWCA会館 207 号室

製作：ジェイピーシー 144-0054 東京都大田区新蒲田 2-4-3 スポーツプラザビル401 Tel. (03) 6715-7915

広告取扱い：科学技術社 111-0052 東京都台東区柳橋 2-10-8 武田ビル4F Tel. (03) 5809-1132

Copyright © 2020 by the Magnetism Society of Japan