

永久磁石の磁場中における薄鋼板の振動特性に関する基礎的研究 (永久磁石の極性に関する検討)

土屋健*1・磯部嘉城*1・長谷川真也*2
押野谷康雄*3・石橋一久*4

Vibration Characteristics of Thin Steel Plate under Magnetic Field Using Permanent Magnets (Study on Effect of Pole of Magnets)

by

Ken TSUCHIYA, Yoshiki ISOBE, Shinya HASEGAWA
Yasuo OSHINOYA, Kazuhisa ISHIBASHI

(Received on September 30, 2004 & accepted on December 22, 2004)

Abstract

In this study, an examination of the vibration characteristics of a thin steel plate under a magnetic field produced using permanent magnets was carried out. In particular, the effects of the pole and arrangement of the magnets were considered. On the basis of the results of the fundamental study using a single degree of freedom model, examination of a steel plate was performed. The magnetization curve used in the analysis was measured by the ring specimen method. The attractive force of the permanent magnets is analyzed by the finite element method and the elastic vibration of the steel plate was calculated by the finite difference method. To verify the usefulness of the permanent magnet system, experiments were performed for an elastic steel plate. As a result, it was confirmed that the permanent magnets could increase the damping factor of the elastic vibration of the steel plate.

Key Words : Permanent Magnet, Steel Plate, Damping, Elastic Vibration, FEM

1. はじめに

現在、多くの工業製品に広く用いられている薄鋼板は通常ローラで接触搬送されている。しかし、ローラによる圧延工程では傷が発生し、表面処理工程ではめっきの剥離等の不良が発生するために鋼板表面の品質が劣化する場合も少なくない。近年ではその対応策として磁気浮上技術の応用による非接触搬送に関する研究が活発になされている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また、著者らは相対する二辺を梁で補強した長方形薄鋼板の磁気浮上制御に関する考察を行い、浮上の実現性や弾性振動抑制効果に関する報告を行っている⁽⁴⁾。しかし、限られた個数の電磁石では柔軟連続体ゆえに生じる静的なたわみや高次モードの弾性振動を抑制することは困難である。そこで、Fig.1に示すように、電磁石吸引力がほとんど作用していない部分に永久磁石を分布的に配置し、これらの磁力を浮上安定化のために有効利用することを提案している⁽⁵⁾。その際、永久磁石の影響により浮上状態の薄鋼板の弾性振動特性が変化することを報告しているが⁽⁶⁾、いずれも永久磁石の極性を統一した配置のみで極性を考慮した検討には至っ

ていない。そこで、本報告では磁気浮上を想定している大きな鋼板全体を対象とせず、鋼板を部分的に取り出すことによって永久磁石の極の配置が薄鋼板の振動特性へ与える影響の基礎的考察を行う。はじめに、鋼板に作用する磁束の磁気飽和を考慮

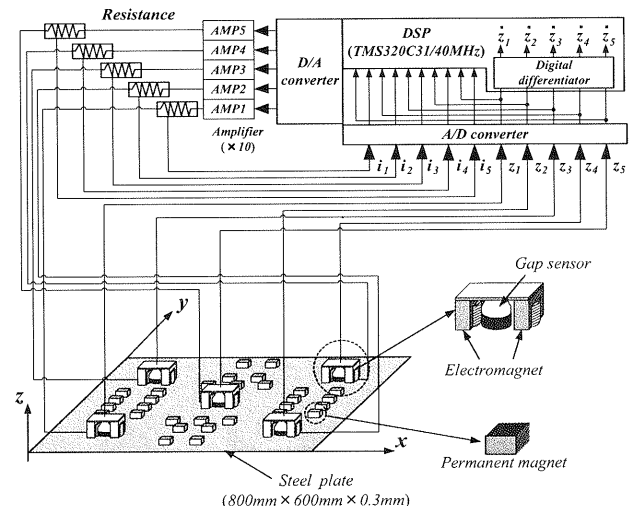


Fig.1 Electromagnetic levitation control system.

*1 工学研究科機械工学専攻博士課程前期
*2 工学研究科機械工学専攻博士課程後期
*3 工学部動力機械工学科助教
*4 第二工学部機械工学科教授

した非線形磁場解析を行うために、鋼板の磁化曲線を測定した。次に、永久磁石の極の配置が薄鋼板の振動特性に及ぼす影響を調べるため両端自由梁の自由振動波形を測定し、見かけ上のヤング率と減衰係数を算出した。また、測定した磁化曲線を用いた解析結果と実験結果を比較することによって、解析手法の妥当性の検討と、永久磁石の極の配置が振動へ与える影響を比較、検討した。

2. 薄鋼板の磁化特性

本研究では磁場解析を行うことから、使用する薄鋼板の磁化特性である磁化曲線を磁性材料試験法の一つである環状試料法を用いて測定する⁽⁷⁾。測定回路図を Fig.2 に示す。磁気浮上対象と同じ材質の薄鋼板を環状に切り抜き(厚さ 0.3mm, 内径 78mm, 外径 82mm), 試料として用いた。この試料に直流電流を流す導線(以下 1 次コイル)を一樣に巻きつけ、その上に起電力を測定する導線(以下 2 次コイル)を巻きつけた。測定方法を以下に示す。1 次コイルに直流電流を流し磁束を発生させる。このとき 2 次コイルには磁束の変化量に応じた誘導起電力が発生する。その際の 1 次コイルに流れる直流電流 I [A]と、2 次コイルに発生する起電力 e [V]をオシロスコープにより測定した。オシロスコープにより測定された電流 I [A]を用い、1 次コイルに発生する磁界 H [A/m]はアンペールの法則より次式により求まる。

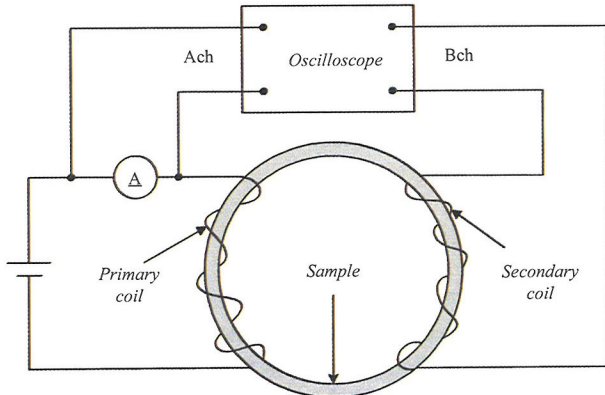


Fig.2 Measurement circuit.

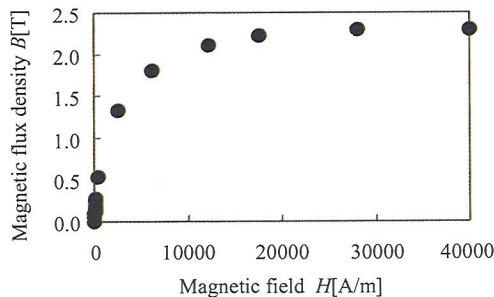


Fig.3 Magnetization curve.

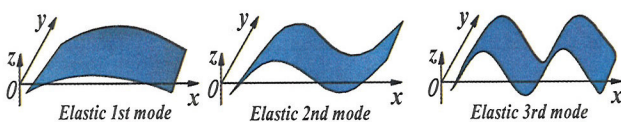


Fig.4 Elastic mode shape of the steel plate.

$$H = \frac{N_1 I}{L} \quad (1)$$

ここで、 N_1 は 1 次コイルの巻き数(833 回)、 L は試料の平均磁路長(502.7mm)を表している。

測定された 2 次コイルに発生する起電力 e [V]と、磁束 ϕ [Wb]との関係は次式となる。

$$e = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

ここで、 N_2 は 2 次コイルの巻き数(833 回)である。式(2)を時間について積分すると

$$\int_0^t e dt = N_2 \int_0^t \frac{d\phi}{dt} dt \quad (3)$$

ここで、 $t = 0$ のとき $e = 0$ である。磁束密度 B [T]と磁束 ϕ [Wb]の関係式より

$$\phi = BS \quad (4)$$

ここで、 B は磁束密度[T]、 S は断面積(1.2mm²)である。式(3)に式(4)を代入し、式を整理すると

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int_0^t e dt \quad (5)$$

となる。

式(1)と式(5)により求めた磁界 H と磁束密度 B によって求めた磁化曲線を Fig.3 に示す。図における横軸は磁界 H [A/m]であり、縦軸は磁束密度 B [T]を示している。図において薄鋼板に発生する磁界が増加するにともない磁束密度は非線形に増加し、磁界 H が 20000 A/m より大きくなると磁気飽和がはじまるのがわかる。本報告では測定した磁化曲線を用いて磁場解析を行う。

3. 磁場中薄鋼板の振動特性

3.1 解析モデル

永久磁石の磁場による薄鋼板の弾性振動への影響を考察するために、800mm×100mm×0.3mm の薄鋼板を対象とした検討を行う。x 方向の振動モードの一例を Fig.4 に示す。実際には、振動モードは無限に存在するが、本報告で使用する鋼板は長手 x 方向に比べて短手 y 方向の寸法が小さいので、短手方向の弾性振動は発生しないものと考え x 方向のみの弾性振動を対象とする。本研究では、最も顕著に現れる弾性 1 次モードを主な対象とした検討を行う。

重力および磁界が存在する場において、更にローレンツ力が鋼板に作用する場合の鋼板の上下変位に関する運動方程式は次式で表される。

$$\rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} z + \frac{C_s h^3}{12} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^4 z + D \nabla^4 z = f_m(x, y, z) + f_e(x, y, z) - \rho h g \quad (6)$$

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (7)$$

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (8)$$

ここで ρ は鋼板の密度、 h は鋼板の厚さ、 C は鋼板の内部減衰係数、 $f_m(x, y, z)$ は吸引力、ローレンツ力は $f_e(x, y, z)$ 、 g は重力加速度、 D は曲げ剛性、 E は鋼板のヤング率、 ν はポアソン比を表している。磁場解析では EDDY(株式会社 Photon)、ポスト

プロセッシングには FEMAP(Enterprise Software Products, Inc.) を使用し 2 章で測定した磁化曲線の結果を用いて $f_m(x, y, z)$ と $f_e(x, y, z)$ を求める⁽⁸⁾。振動解析に際しては差分法を用い、対象とする鋼板を x 方向に 800mm を 80 分割、 y 方向に 100mm を 9 分割し、時間刻み幅は 0.05ms とした。また、弾性 1 次モードの初期条件として初速度 0m/s、最大初期変位を 1mm とした。

3.2 実験装置

実験装置を Fig.5 に示す。鋼板の 1 次モードにおける節の位置を x 方向にのみ移動可能なスライダに乗せた針により支持している。なお、針支持による 1 次モード振動の動特性への影響がほとんどないことは実験的に確認している。表面磁束密度が 0.12T のフェライト永久磁石(30mm×30mm×15mm)を天板(厚さ 1mm 鋼板)にその吸引力によって設置し、永久磁石は黒が N 極、白が S 極を示している。本研究では Fig.6 に示すように 4 個等間隔に配置し薄鋼板に対向する永久磁石が、(a)全ての極が N 極(以下 4N 配置)、(b)2 個が N 極、2 個が S 極(以下 NS 配置)の 2 通りの設置に対して検討を行う。永久磁石表面と鋼板の距離は 45~60mm まで 5mm 間隔で変化させ、渦電流式非接触変位計により鋼板の中心部の変位を測定する。

3.3 永久磁石吸引力

振動解析を行う際、永久磁石の吸引力は距離によって変化するためその非線形性も考慮しなくてはならない。解析により求められる吸引力の妥当性を検証するため、実験により吸引力を測定した。Fig.7 のように薄鋼板を電子秤に乗せ、永久磁石を配置しない時の鋼板本来の重さから、永久磁石と鋼板の距離を 45~60mm まで 5mm 間隔で変化させた場合の鋼板の重さの変動分より吸引力を算出した。

Fig.8 は永久磁石の吸引力の測定結果、および解析結果である。図における横軸は永久磁石と鋼板の距離 Gap[mm]であり、縦軸は吸引力 f_m [N]を表している。NS 配置が 4N 配置よりも最大 40% 大きい吸引力を示している。これまでに薄鋼板に対する永久磁石の極の違いが本結果のように大きく吸引力の差として示される報告はなく、新たな知見が得られた。

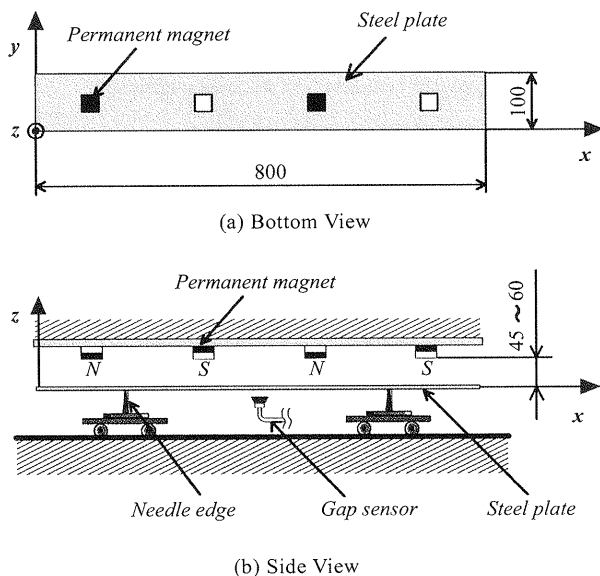


Fig. 5 Experimental apparatus.

Fig.9,10 はこのときの磁束密度分布の解析結果である。Fig.9 は側面(薄鋼板の左半分)から、Fig.10 は鋼板下面から見たときの磁束密度分布を示している。4N 配置(Fig.9, 10 の(a))と比較して NS 配置(Fig.9, 10 の(b))は磁気回路が効率良く組み立てられており、これが吸引力増大の理由である。また、Fig.8 において実験結果と解析結果がよく一致していることが分かる。

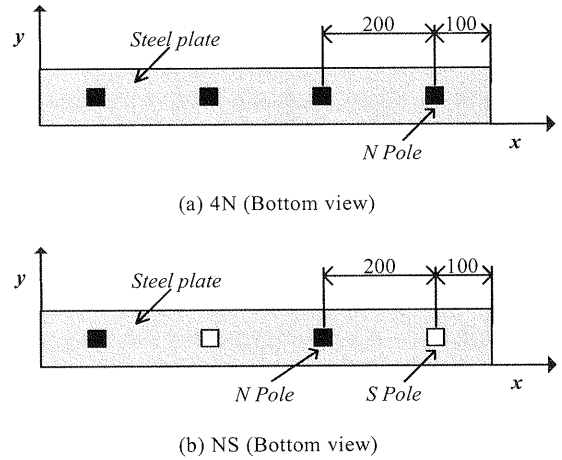


Fig.6 Arrangement of the permanent magnets.

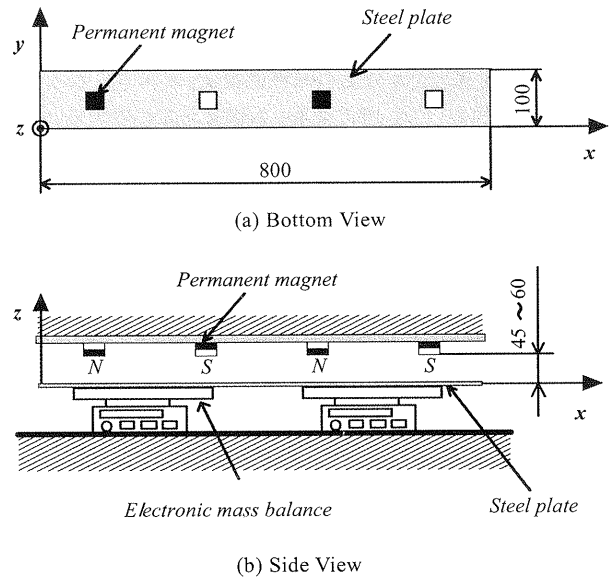


Fig. 7 Experimental apparatus.

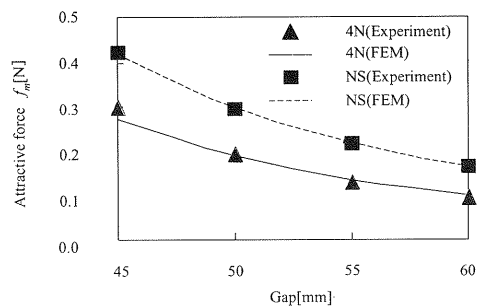


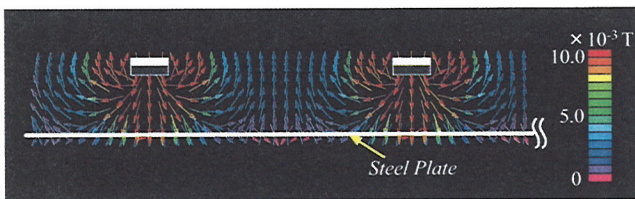
Fig.8 Attractive force of the permanent magnets.

3.4 振動特性

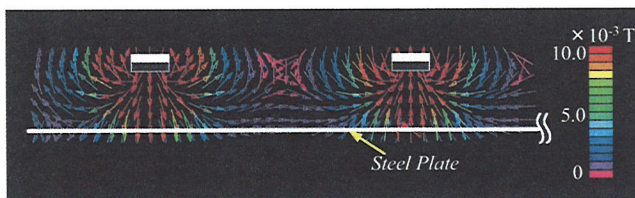
Fig.11,12は永久磁石と薄鋼板の距離を45~60mmまで5mm間隔で変化させたときの変位を測定し、永久磁石を含むシステムとしての見かけのヤング率 E_a (Fig.11)と見かけの減衰係数 C_a (Fig.12)を算出した結果である。図における横軸は永久磁石と薄鋼板との距離 Gap[mm]であり、縦軸は見かけのヤング率 E_a [N/m²]と見かけの減衰係数 C_a [Ns/m]を表している。また同条件において解析を行った結果も示す。

Fig.11より E_a は薄鋼板と永久磁石の表面の距離が近づくともない値が減少しており、永久磁石の吸引力が負ばねとして作用し、鋼板が見かけ上柔軟性を増すことが確認できる。4N配置よりもNS配置の方が最大15%大きい値になっているが、ギャップが60mmではほぼ一致しており、ヤング率はFig.8の吸引力特性ほど大きな差が生じないことを確認した。

一方見かけの減衰係数 C_a については、4N配置よりもNS配置の方が約20%大きい値となっている。Fig.13,14はこのとき発生する渦電流とローレンツ力の解析結果である。Fig.13は鋼板下面から見たときの渦電流、Fig.14は鋼板側面から見たローレンツ力を示している。Fig.13(a)に示すように4N配置では各々の永久磁石の周辺に渦電流が単独に発生するため、Fig.14(a)のようにローレンツ力が永久磁石周辺にしか発生していない。一方、NS配置では先に示したFig.10のように磁気回路が組まれるため、Fig.13(b)で示すように鋼板中央部に渦電流が十分流れる。これにより、Fig.14(b)のように大きなローレンツ力も発生し、NS配置の見かけ上の減衰係数 C_a が大きくなる。また、Fig.11,12において、解析結果と実験結果を比較すると誤差は最大でも7%以内である。このことより、2章において測定した磁化曲線を用いて鋼板に作用するヤング率とローレンツ力を算出し、それらを用いた解析手法の妥当性が確認できたといえる。

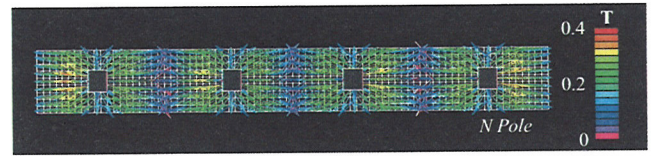


(a) 4N

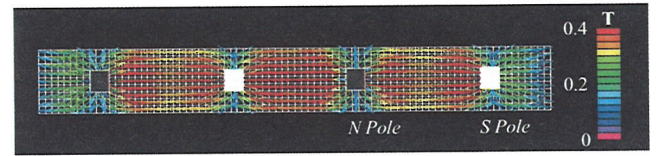


(b) NS

Fig.9 Analytical results of distribution of magnetic flux density (Half size of the plate : Side view : Gap=45mm).



(a) 4N



(b) NS

Fig.10 Analytical results of distribution of magnetic flux density (Bottom view: Gap=45mm).

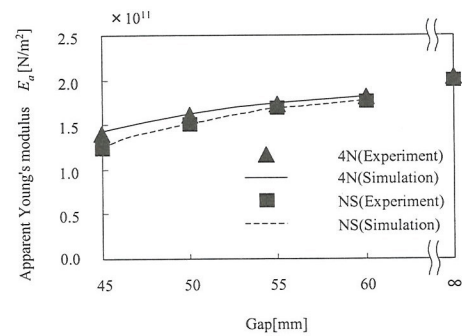


Fig.11 Apparent parameters of Young's modulus.

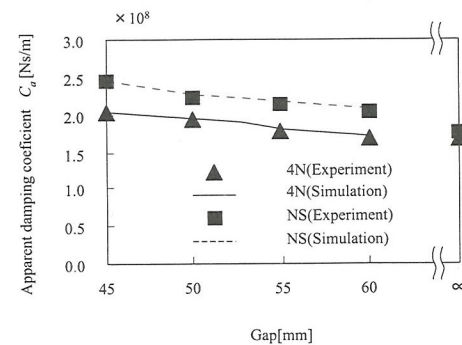
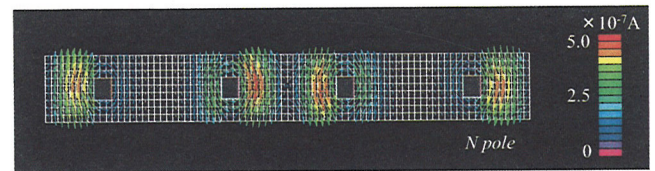
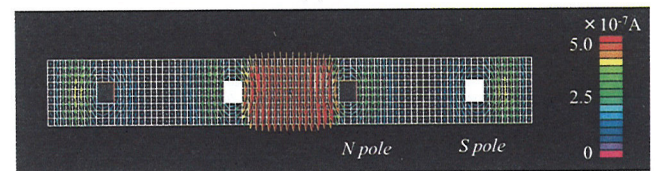


Fig.12 Apparent parameters of damping coefficient.



(a) 4N



(b) NS

Fig.13 Analytical results of Distribution of eddy current on the steel plate(Bottom view : Gap = 45mm).

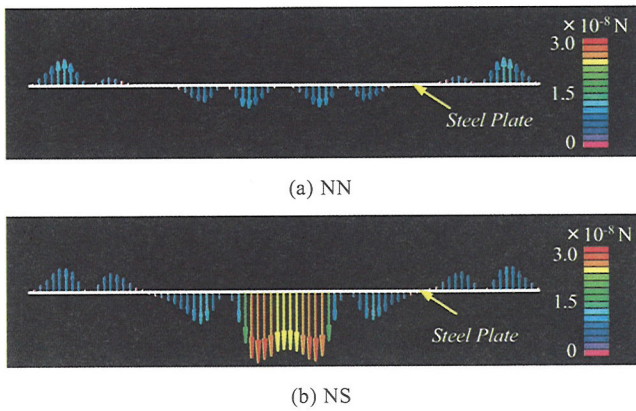


Fig.14 Analytical results of Distribution of Lorenz force on the steel plate(Side view : Gap = 45mm).

4. まとめ

本報告では永久磁石の極の配置が鋼板の振動特性へ与える影響に関する考察を行った。実験と解析の結果より永久磁石の極を鋼板表面に対して交互に配置した方が磁気回路が効率良く生まれ、吸引力と減衰効果が共に増加することがわかった。このことより、薄鋼板の磁気浮上制御に永久磁石の磁力を利用する場合、薄鋼板のたわみの抑制と減衰効果の増加を効果的に得るには極を交互に配置した方が有効であるという知見が得られた。

謝辞

本報告に際して東海大学大学院（現ヤマハオートセンター(株)）平尾正国氏、東海大学学部生 平林浩彰氏に多大な協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 森下, 明石:「磁気浮上鋼板の傾斜案内実験」, 電気学会全国大会講演論文集, (1997), pp.183-184.
- (2) 林屋, 荒木, パディソン, 大崎, 正田:「振動制御用電磁石を用いた可撓性鋼板の磁気浮上システム」, 電気学会論文誌, Vol.117-D, No.2, (1997), pp.238-244.
- (3) A.Tanaka, S.Torii:「Magnetic Levitation Control with Real-Time and Sensor-Less Using Finite Element Method」, The 11th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, (2003), pp.122-123.
- (4) 押野谷, 小林, 丹野:「相対する二辺が梁で補強された長方形薄鋼板の磁気浮上最適制御」, 日本機械学会論文集(C編), Vol.62, No.600 (1996), pp.127-133.
- (5) 押野谷, 石橋:「長方形薄鋼板の磁気浮上制御装置の開発」, 日本機械学会論文集(C編), Vol.67, No.661 (2001), pp.107-114.
- (6) 平尾, 磯部, 押野谷, 石橋:「磁場中で弾性振動する鋼板のパラメータ変動に関する考察」第15回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, (2003), pp.483-486.
- (7) 湧井:「ヒステリシス電動機特性に及ぼす高調波磁界の影響(基礎考察 I: 高調波磁界が一つの場合)」電気学会論文集(B編), Vol.93, No.1(1973), pp.1-10.
- (8) 高木:「導電性薄板の強磁場中での動的挙動に関する解析と実験」日本機械学会論文集(C編), Vol.58, No.556(1992), pp.83-88.