

ゼロパワー磁気浮上を利用した除振装置の開発* (第1報, 基本原理と基礎実験)

水野 毅^{*1}, 吉 富 亮 一^{*2}

Vibration Isolation System Using Zero-Power Magnetic Suspension (1st Report, Principles and Basic Experiments)

Takeshi MIZUNO^{*3} and Ryoichi YOSHITOMI

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

A new vibration isolation system using zero-power magnetic suspension is proposed. Since a zero-power magnetic suspension system behaves as if it has a negative stiffness, infinite stiffness against disturbances on the isolation table can be achieved by combining it with a normal spring. It enables the system to have good characteristics in both the performances of isolation from ground and suppression of direct vibration. An analytical study shows that the proposed system has infinite stiffness against disturbances on the isolation table. Such characteristics are experimentally confirmed with a developed instrument.

Key Words: Vibration Isolation, Vibration Control, Magnetic Bearing, Electromagnetic Actuator, Precision Instrument, Magnetic Suspension, Zero-Power Control, Negative Stiffness

1. ま え が き

先端的半導体製造システムや極微小領域計測システムでは、振動などの外乱を除去する除振装置の重要性がますます増大している。除振装置で除去すべき外乱は、設置床の振動に起因する地動外乱と装置のばね上に入力される直動外乱とに大別でき⁽¹⁾、前者には低剛性、後者には高剛性の支持機構が適している。従来のパッシブな除振装置では、これらの相反する要求を十分に満足することが原理的に困難である。

このような問題を克服するため、アクティブ制御の導入が試みられている。これまでに、2自由度制御⁽¹⁾やロバスト制御⁽²⁾などが適用され、パッシブな除振装置では得られない高い除振性能を実現している。しかしながら、従来のアプローチでは、除振テーブルの振動を検出し、これを抑制するようにアクチュエータを駆

動するというフィードバック制御が基本となっているので、振動を低周波まで正確に検出するサーボ形加速度計のような高性能なセンサを用いる必要があった。このことは、アクティブ除振装置の高コスト化の大きな要因となっている。

本研究では、従来のアクティブ除振装置とは全く異なるアプローチによって、地動外乱に対する振動絶縁と直動外乱に対する制振との両立を図る。具体的には、ゼロパワー制御を施した磁気浮上系（以下、ゼロパワー磁気浮上系と呼ぶ）が「負」の剛性を持っていることを利用して、振動絶縁性能を損なうことなく、直動外乱に対する剛性が無限大となる除振装置を実現する。

これまでに負の剛性を利用した例としては、通常のばね支持機構と「並列」に負の剛性を持つ受動的なメカニズムを設置することによって系の固有振動数を低下させ、地動外乱に対する除振性能を向上させた除振装置が挙げられる⁽³⁾。これに対し、本研究で提案・開発する除振装置は、負の剛性を持つ機構を通常のばねと「直列」に配置するのであり、前述の装置とは根本的に動作原理が異なっている。

* 原稿受付 2001年11月27日。

^{*1} 正員, 埼玉大学工学部(☎338-8570 さいたま市下大久保255)。

^{*2} (株)本田技研工業(☎351-0114 和光市本町8-1)。

E-mail: mizar@mech.saitama-u.ac.jp

本報では、提案する除振装置の基本構成と動作原理について述べ、さらに開発した1自由度モデルを用いて実施した基礎実験の結果を示す。

2. ゼロパワー磁気浮上

2-1 ゼロパワー磁気浮上とは ゼロパワー制御は、電磁石と永久磁石を組み合わせた複合磁石を用いた吸引磁気浮上系において、浮上対象物の重量を永久磁石の吸引力だけで支持し、電磁石の制御電流を定常的には零に保つ制御方法である。ゼロパワー磁気浮上系では、浮上に要する入力エネルギーが定常的には零になるので、消費電力をできるだけ低減する必要がある宇宙用機器⁽⁴⁾、⁽⁵⁾や無集電型磁気浮上搬送装置⁽⁶⁾で利用されている。

ゼロパワー磁気浮上系は、電磁石から引き離す方向に一定の外力が浮上対象物に作用すると、定常的には電磁石と浮上対象物との間のギャップが減少するという、ユニークな特性を持っている。本研究の特徴は、この特性を積極的に利用する点にある。

ここでは、次章以降の準備として、ゼロパワー制御系の基本構造及び基本特性について述べる。

2-2 基本モデル 解析に用いる磁気浮上系のモデルを図1に示す。浮上用磁石としては、永久磁石と電磁石からなるハイブリッド磁石を用いている。簡単のため、浮上対象物は、ハイブリッド磁石の吸引力の作用する方向(図では垂直方向)に並進運動の自由度だけを持っていると仮定する。

浮上対象物に作用する重力と永久磁石による吸引力とが釣り合っている状態からの浮上対象物の垂直方向の変位を x で表すと、この系の運動方程式は次式のようになる。

$$m\ddot{x}(t) = f_e(t) + w(t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- m : 浮上対象物の質量,
- f_e : 電磁石の吸引力,
- w : 浮上対象物に作用する外力(外乱).

電磁石の吸引力は、近似的に次のように表すことができる。

$$f_e = k_s x + k_i i \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- i : 電磁石のコイル電流,
- k_s : 電磁石の特性係数 (=力/変位) ,
- k_i : 電磁石の特性係数 (=力/電流) .

簡単のため、初期値を零として式(1), (2)をラプラス

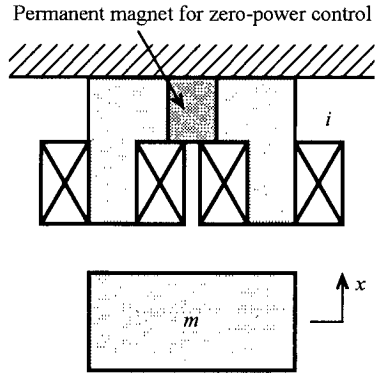


Fig.1 Basic mode of zero-power magnetic suspension

変換し、整理すると次式を得る。

$$X(s) = \frac{1}{t_0(s)}(b_0 I(s) + d_0 W(s)) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$t_0(s) = s^2 - a_0, \quad a_0 = \frac{k_s}{m}, \quad b_0 = \frac{k_i}{m}, \quad d_0 = \frac{1}{m}.$$

2-3 ゼロパワー制御系の基本構造 ゼロパワー

制御について議論するため、外乱 w は一定であると仮定する⁽⁷⁾。このとき、 w は次式のように表される。

$$W(s) = \frac{F_0}{s} \dots\dots\dots (4)$$

通常の磁気軸受では、変位センサの信号に基づいて制御入力が定められる。したがって、時不変ゲインの線形制御を実施する場合には、制御則は一般に次式のように表すことができる。

$$I(s) = -\frac{h(s)}{g(s)} X(s) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $g(s)$ 、 $h(s)$ は互いに素な s の多項式である。本節では、これらの多項式が閉ループ系を安定にするように、すなわち特性方程式

$$t_c(s) = (s^2 - a_0)g(s) + b_0 h(s) \dots\dots\dots (6)$$

$$= 0,$$

のすべての根の実部が負になるように選ばれているとして議論を進める。

式(5)を式(3)に代入して、整理すると

$$I(s) = -\frac{h(s)}{t_c(s)} d_0 W(s) \dots\dots\dots (7)$$

となる。式(7)に式(4)を代入すると次式が得られる。

$$I(s) = -\frac{h(s)}{t_c(s)} d_0 \frac{F_0}{s} \dots\dots\dots (8)$$

$$k_c = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \dots\dots\dots (13)$$

式(8)から、浮上対象物に一定外力が作用しても定常的にはコイル電流が零に収束するというゼロパワー特性を実現するには、 $h(s)$ が s を因子に持つ必要があることがわかる。したがって、ゼロパワー・コントローラは、一般的に次式のように表される⁷⁾。

$$I(s) = -\frac{\tilde{h}(s)}{g(s)} sX(s), \dots\dots\dots (9)$$

$\tilde{h}(s)$: $g(s)$ と互いに素な s の多項式。

図2に、コントローラのブロック線図を示す。

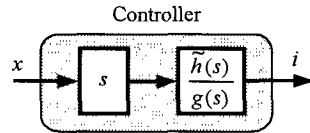


Fig.2 General form of zero-power controller

2・4 基本特性の解析 ゼロパワー磁気浮上系の特徴を図3を用いて説明する。図3(a)は、通常のばねの挙動を示している。ばねで支持されている質量に作用する重力が Δmg だけ増えたとすると、ばねは伸びるので、質量は重力と同じ方向へ変位することになる。これに対し、ゼロパワー磁気浮上系では、図3(b)に示すように、制振対象物は、永久磁石による吸引力が Δmg だけ増加する位置に保持される。すなわち、浮上対象物は、あたかも負のばね定数を持つばねによって支持されているかのように、重力とは反対方向に変位する。以下では、この特性を解析的に示す。

閉ループ系が安定であるとすると、制振対象物はつぎのような関係を満たす位置に保持される。

$$0 = k_s x(\infty) + k_i i(\infty) + F_0 \dots\dots\dots (10)$$

ゼロパワー磁気浮上系では、コイル電流は、零に収束するように制御される。すなわち、次式が成立する。

$$i(\infty) = 0 \dots\dots\dots (11)$$

したがって、

$$x(\infty) = -\frac{F_0}{k_s} \dots\dots\dots (12)$$

式(12)から、この系は $-k_s$ という負のばね定数を持っているかのように動作することがわかる。

3. ゼロパワー磁気浮上を利用した除振装置

3・1 基本構想 最初に、正のばね定数を持つばね(以下、正のばねと呼ぶ)と負のばね定数を持つばね(負のばね)とを直列に結合することによって、ばね定数が無限大のばねを実現できることを説明する。図4に示すように、ばね定数 k_1, k_2 を持つ2つのばねを直列に結合して一つのばねを作ると、そのばね定数 k_c は次式で求められる。

したがって、正のばねを直列に結合すると、結合してきたばねのばね定数は、結合前のそれぞれのばね定数より必ず小さくなる。ところが、仮に負のばねが実現できたとして、

$$k_1 = -k_2, \dots\dots\dots (14)$$

という関係を満たすようにすれば、

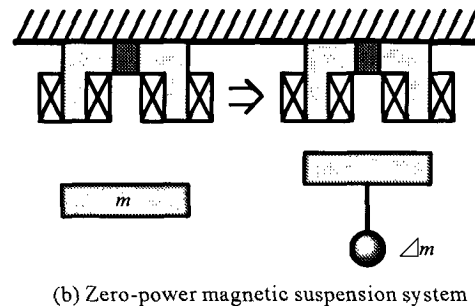
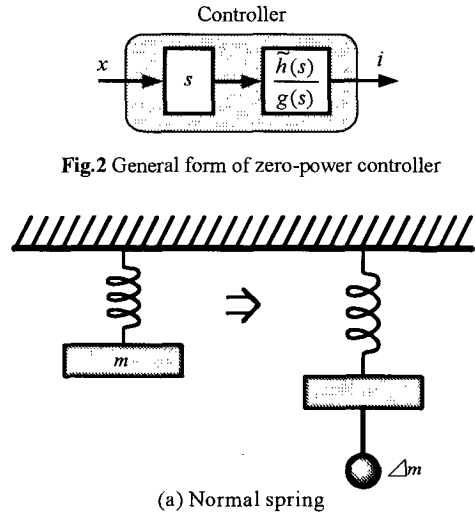


Fig.3 Comparison of zero-power magnetic suspension system with a normal spring

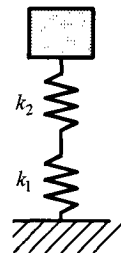


Fig.4 Series springs

$$|k_c| = +\infty, \dots \dots \dots (15)$$

となる。

本研究では、上記の関係を利用して、地動外乱に対する振動絶縁特性を保ちながら、直動外乱に対しては高い剛性を有する支持機構を実現する。具体的には、正のばねと負のばねを直列に接続し、それぞれの剛性は低くすることによって振動絶縁特性を確保し、両者の大きさ(絶対値)を一致させることによって直動外乱に対する剛性を無限大とする。そして、負のばねを実現するのに、ゼロパワー磁気浮上を用いる。

3・2 除振装置の構成 提案する除振装置の基本構成を図5に示す。正のばね k_1 および減衰要素 c_1 によって支持された質量 m_1 の中間台には、磁気浮上用の電磁石が固定されている。質量 m_2 の除振テーブルの電磁石に面する箇所には、ゼロパワー磁気浮上用の永久磁石と強磁性体が取付けられている。このような磁石の配置とすると、コイルを流れる電流の向きによって、吸引力だけではなく、反発力も働くようにすることができるので、電磁石側に永久磁石を組込んだ場合に比べて動作範囲を広くすることができる⁷⁾。

除振テーブルがゼロパワー磁気浮上によって安定に支持されているとすると、この除振装置の直動外乱に対する挙動は、以下ようになる。除振テーブルに下向きに一定の力が加わると、ゼロパワー制御の作用によって、電磁石とテーブルとのギャップは狭くなっていく。言い換えると、テーブルは上向き変位しようとする。ところが、ギャップが狭くなって磁石の吸引力が増加すると、この力によってばね k_1 は圧縮されるので、中間台は下向きに変位する。この二つの変位がちょうど相殺するように設定されていると、結果的には除振テーブルは全く変位しないことになる。これが提案する除振装置の動作原理である。

ゼロパワー磁気浮上を実現するには、浮上対象物の電磁石からの相対変位を検出すれば十分なので、提案する除振装置では、従来のアクティブ除振装置のように絶対加速度を検出する必要がない。具体的には、サーボ形加速度センサの代わりに比較的安価な渦電流形変位センサを用いて実現することができる。さらに、セルフセンシング技術⁸⁾を適用すれば、この変位センサさえも省くことができる。

4. 理論解析

4・1 基本方程式 解析では、図5に示す各質量及び床の垂直方向の変位だけを扱う。この系の運動方程式は、次式のように求められる。

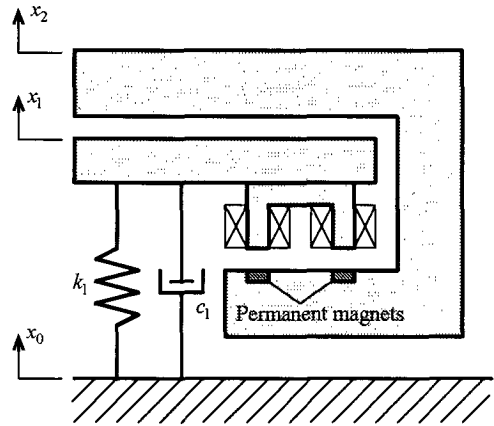


Fig.5 Vibration isolation system using zero-power magnetic suspension

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1(x_1 - x_0) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) - f_e, \dots \dots \dots (16)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = f_e + f_d. \dots \dots \dots (17)$$

ここで、

- x_0 : 床の振動変位,
- x_1 : 中間台の平衡点からの変位,
- x_2 : 除振テーブルの平衡点からの変位,
- f_d : 除振テーブルに作用する直動外乱.

電磁石の吸引力 f_e は、つぎのように表すことができる(式(2)参照)。

$$f_e = k_s(x_2 - x_1) + k_i i. \dots \dots \dots (18)$$

本研究では、中間台と除振テーブルの相対変位から制御入力を構成する。式(9)から、ゼロパワー制御を実現する制御入力は、つぎのように表すことができる。

$$I(s) = -c_2(s)s(X_2(s) - X_1(s)). \dots \dots \dots (19)$$

ここで、

$$c_2(s) = \frac{\tilde{h}(s)}{g(s)}. \dots \dots \dots (20)$$

4・2 基本特性の解析 簡単のため初期条件を零と仮定してラプラス変換すると、式(16)~(19)から、次式が求められる。

$$X_1(s) = \frac{(c_1s + k_1)t_2(s)}{t_c(s)} X_0(s) + \frac{k_1 c_2(s)s - k_s}{t_c(s)} F_d(s), \dots \dots \dots (21)$$

$$X_2(s) = \frac{(c_1s + k_1)(k_1 c_2(s)s - k_s)}{t_c(s)} X_0(s)$$

$$+ \frac{m_1 s^2 + (c_1 + k_1 c_2(s))s + k_1 - k_s}{t_c(s)} F_d(s) \dots (22)$$

ここで、

$$t_1(s) = m_1 s^2 + c_1 s + k_1, \dots (23)$$

$$t_2(s) = m_2 s^2 + k_1 c_2(s) s - k_s, \dots (24)$$

$$t_c(s) = t_1(s) t_2(s) + m_2 s^2 (k_1 c_2(s) s - k_s). \dots (25)$$

各変数のラプラス変換は、対応する大文字で表している。

直動外乱に対する剛性を評価するために、

$$F_d = \frac{F_0}{s} \quad (F_0 : \text{const}) \dots (26)$$

とする。床の振動の影響を無視すると ($x_0 = 0$)、除振テーブルの定常変位 $x_2(\infty)$ は、つぎのように求められる。

$$\begin{aligned} \frac{x_2(\infty)}{F_0} &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{m_1 s^2 + (c_1 + k_1 c_2(s))s + k_1 - k_s}{t_c(s)} \\ &= \frac{k_1 - k_s}{k_1(-k_s)} = \frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_s} \dots (27) \end{aligned}$$

したがって、

$$k_1 = k_s, \dots (28)$$

を満たすように除振装置が設計されているならば、

$$\frac{x_2(\infty)}{F_0} = 0, \dots (29)$$

となる。これは、コンプライアンスが零、すなわち剛性が無限大となることを意味する。

5. 実験

5.1 実験装置 提案する除振方法の有効性を実証するため、図6に概観を示すような実験装置を試作した。図で、中間台および除振テーブルは、それぞれ、直動軸受によって垂直方向に並進運動できるように拘束されている。永久磁石としては、ネオジ磁石を用いている。中間台のベースに対する相対変位および除振テーブルの中間台に対する相対変位は、渦電流形非接触変位センサによって検出している。制御則の実装には、DSP (TI社製 TMS320C31) を核とするデジタルコントローラを用いた。

5.2 実験結果 最初に、中間台を固定した状態で、除振テーブルに重り (付加質量) を載せていき、ゼロパワー磁気浮上系の剛性特性を測定した結果を図7に

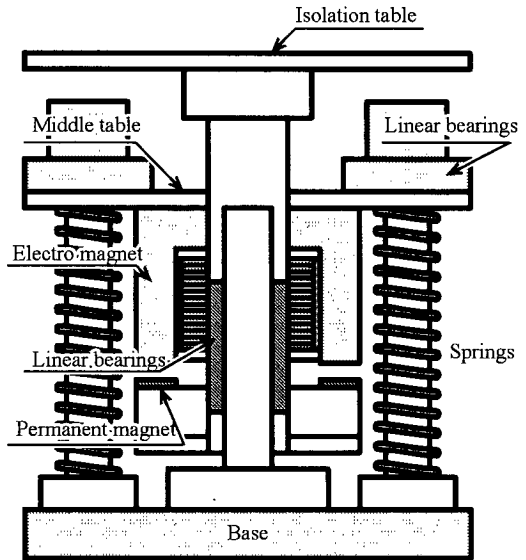


Fig.6 Experimental apparatus

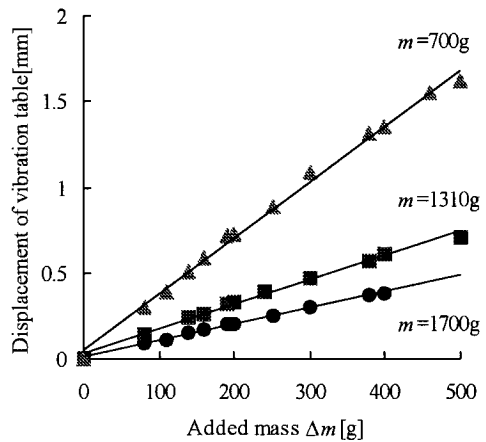


Fig.7. Load-displacement characteristics of the zero-power magnetic suspension system

示す。図のグラフで縦軸は上向きの変位を表している。除振テーブルの質量は、

(a)700g, (b)1310g, (c)1700g,

の3通りに設定している。図から、除振テーブルは、外力 (重力) とは反対方向 (上向き) に変位しているので、負のばね特性を持っていることが確認できる。また、外力の変動が小さい範囲では、線形のばねとして扱うことができることもわかる。

つぎに、中間台をばねで支持した状態で、除振テーブルに重り (付加質量) を載せていったときの除振テ

ーブルの床に対する変位 x_2 を測定した結果を図8に示す。図で、縦軸は除振テーブルの変位の絶対値を表している。また、図には、中間台を支持するばねのばね定数 (k_1) と、ゼロパワー磁気浮上系のばね定数 (k_s) の大きさも示されている。図から、2つのばね定数がほぼ等しくなっている ($m \cong 1380\text{g}$) ときには、積載質量が変動しても除振テーブルの位置はほとんど変化していないことがわかる。実際に、この領域における剛性を求めると 490kN/m で、それぞれのばね定数 ($\cong 6.8\text{kN/m}$) の約70倍となっている。このことから、通常のばねとゼロパワー磁気浮上機構とを直列に結合することによって、直動外乱に対して高い剛性を持つ除振装置が実現できることが確認できた。

6. 結 言

本論文では、まず、浮上対象物に作用する外力に対して、ゼロパワー磁気浮上系があたかも負のばね特性を持っているかのように動作することを説明した。つぎに、ばね定数の大きさが等しい正のばねと負のばねとを直列に結合すると、ばね定数が無限大のばねになることを指摘した。つぎに、通常のばねとゼロパワー磁気浮上系とを中間台を介して直列に結合する方式の除振装置を提案し、中間台を支持するばねのばね定数と電磁石の特性係数 (=力/変位) の大きさを等しく設定することによって、直動外乱に対する剛性が無限大となることを理論的に示した。さらに、試作した基礎実験装置を用いて、提案する方式の除振装置は直動外乱に対して高い剛性を持つことを実験的に確認した。

本報では、静的な直動外乱に対する応答について解析及び実験的な検討を行った。今後、提案する方式の

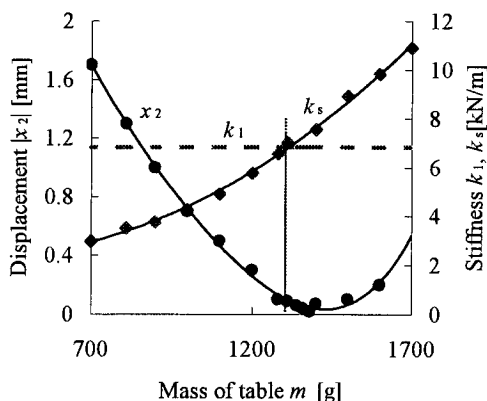


Fig.8. Displacement of the isolation table when the mass of the isolation table is varied; the stiffness of the mechanical spring and that of the magnetic suspension system are also shown.

除振装置の実用化を進めていくためには、周期性外乱や衝撃外乱に対する応答や地動外乱に対する特性を考慮したゼロパワー制御系の設計法を確立する必要がある。また、中間台の質量や支持部の諸特性及び除振テーブルの質量などの構造的なパラメータの最適化についても検討を進めていく予定である。

なお、本研究では、負のばね特性を持つ支持機構を実現するのにゼロパワー磁気浮上を利用したが、このような機構は、ボイスコイルモータなどのリニアアクチュエータを用いても実現することができる⁽⁹⁾。

謝 辞

本研究の一部には、メカトロニクス技術高度化財団研究助成、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)、革新的技術開発研究推進費補助金を用いました。記して感謝いたします。

文 献

- (1) 安田, 池田: ダブルアクティブ制御による除振装置の性能向上 (制御の2自由度化), 日本機械学会論文集(C), 59巻, 562号, (1993), 1694.
- (2) 崔, 野波, 金光, 渡辺: 空気ばねと磁気軸受を併用した除振台の微振動制御, 日本機械学会論文集(C), 61巻, 587号, (1995), 2812.
- (3) Platus, D.L., Smoothing Out Bad Vibes, Machine Design, Vol.65, No.4, (1993), 123.
- (4) Henrikson, C. H., Lyman, J. and Studer, P. A., Magnetically Suspended Momentum Wheels for Spacecraft Stabilization, AIAA paper 74-128, (1974).
- (5) Sabnis, A. V., Dendy, J.B. and F. M. Schmitt, A Magnetically Suspended Large Momentum Wheel, J. Spacecraft, Vol.12, (1975), 420.
- (6) Morishita, M., Azukizawa, T., Kanda, S., Tamura, N. and Yokoyama, T., A New Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System, IEEE Trans. Vehicular Technology, Vol.38, No.4, (1989), 230.
- (7) 水野, 竹森: 伝達関数を用いたゼロパワー磁気浮上制御系の解析と設計, 電気学会論文誌D, 121巻, 9号, (2001), 933.
- (8) 水野: センサレス磁気浮上, 計測と制御, 38巻, 2号, (1999), 92.
- (9) 水野: 負の剛性を利用した零コンプライアンスシステム, Dynamics and Design Conference 2001 CD-ROM論文集, (2001), 528.