

機関番号：12401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2010

課題番号：19360107

研究課題名（和文） 負の剛性を利用したアクティブサスペンション

研究課題名（英文） Active Suspension Using Negative Stiffness

研究代表者

水野 毅 (MIZUNO Takeshi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20134645

研究成果の概要（和文）：負の剛性を持つ支持機構を利用することによって、防振機能とセルフポジショニング機能とを両立できる水平形アクティブサスペンションを提案し、その開発を行った。具体的には、水平方向全方位を対象とする実験装置を製作し、その性能を評価した。さらに、その制御方式として、新たに変位相殺制御を提案し、負の剛性を利用する方式との比較を行った。これらの研究によって、提案する方式のサスペンションが建設機械用のシートサスペンションに適用可能であるとの知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：Horizontal-type active suspension system has been proposed and developed, which is characterized by using negative stiffness to make vibration isolation and self-positioning compatible. An three-axis experimental apparatus was fabricated. Its performances were studied experimentally. In addition, the displacement cancellation control was applied to the fabricated apparatus. Its performances were compared with those of the system using negative stiffness. These studies demonstrate the applicability of the proposed active suspension systems to seat suspension of construction machinery.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：制御工学・メカトロニクス

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：アクティブサスペンション，除振装置，負の剛性，変位相殺制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 乗り物のサスペンションに要求される機能は、路面の凸凹を人体に伝えない防振装置としての機能と、ハンドル操作に伴うロールとピッチを押さえてタイヤと路面のコンタクトを保つ機能とがある。前者には柔らかい（剛性の低い）サスペンション、後者には硬い（剛性の高い）サスペンションが適しており、従来のパッシブなサスペンションでは、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。

(2) これに対し、アクティブサスペンションを用いると、両方の機能を良好にすることが可能となるが、サスペンション駆動に専用の動力源を必要とするため消費エネルギーが大きくシステムのサイズも大きくなってしまいうという問題がある。そのため、最近では、外部から入力する振動エネルギーの一部を利用して作動するセミアクティブサスペン

ションの研究開発が活発に行われ、市販されている一部の乗用車には既に実装されている。しかしながら、基本的に減衰力の大きさの切り替えを行うだけなので、車体の姿勢を一定に保つことはできない。

(3) いっぽう、不整地を走行する建設機械では、防振機能に加えて、傾斜地などにおいても操縦者の姿勢を保持する機能（以下では、セルフポジショニング機能と呼ぶ）が強く求められている。最近では、人体保護の観点から、作業者を過酷な振動環境に暴露することを法的に規制することが国際的にも強化されている。上下方向の振動に対しては、キャブ（運転台）サスペンションをアクティブ制御を適用する研究が報告されているが、水平方向の振動に対してキャブサスペンションに防振機能を持たせることは構造的にもスペース的にも困難であるため、シートサスペンションを用いる必要がある。しかしながら、良好な防振機能とセルフポジショニング機能とを両立したサスペンションは未だ開発されていない。

(4) 技術的に難しい点は、防振機能を優先してサスペンションを柔らかくし過ぎると、傾斜地で運転者のシートが移動してしまうことや、操縦者がシート上で動くとき、それによってシートが揺れてしまうことが挙げられる。

2. 研究の目的

本研究では、従来のアクティブサスペンションとは全く異なるアプローチによって、防振機能とセルフポジショニング機能とを両立する。その原理は、負のばね剛性を持つ支持機構と正のばね剛性を持つ支持機構とを中間質量を介して直列に接続し、それぞれの剛性は低くすることによって防振機能を確保し、両者の大きさ（絶対値）を一致させることによってセルフポジショニング機能を実現するというものである。これは、ばね定数 k_1 , k_2 を持つ二つのばねを直列に連結した場合、全体のばね定数 k_c は $k_c = k_1 k_2 / (k_1 + k_2)$ となり、 $k_1 = -k_2$ とすれば、 $|k_c| = \infty$ となることを利用するものである。

上記したような負の剛性を持つ支持機構を車両用のサスペンションに利用する研究はこれまでにない。したがって、本研究は、サスペンションの分野に負の剛性の利用という新しい方法を導入することによって、この分野に新機軸をもたらす可能性のある研究と位置づけられる。

3. 研究の方法

(1) 水平方向の1自由度の並進運動を対象とした基礎実験装置の設計・製作と、提案する方式のサスペンションの基本的な特性及び

性能に実験的評価。

①基礎実験装置の設計・製作

製作する装置の構造は、平面盤上に取り付けたリニアスライダのガイドに、防振テーブル（シートに相当）、中間質量およびベース部を設置する。防振テーブルは、中間質量に取り付けたリニアモータによって水平方向に駆動する。中間質量は、ベース部に取り付けたリニアモータによって駆動する。基本的には、前者のリニアモータによって負の剛性を持つ支持機構を、後者のリニアモータによって正の剛性を持つ支持機構を実現するが、逆の組み合わせの場合についても実験できるようにする。また、正の剛性を持つ支持機構は、磁気ばねのようなパッシブな要素で構成できるが、ここでは、前記したような負の剛性と正の剛性の組み合わせを入れ替えた実験や、正の剛性の大きさや減衰の効き方を変化させるため、リニアモータを用いて実現する。

②負の剛性を持つ支持機構の実現

中間台から除振テーブルを支持するリニアモータを利用して所定の大きさの負の剛性を持つ支持機構を実現する。所定の大きさの負の剛性を実現すると同時に、過渡状態においても十分な制振性能を持つように、極配置法を用いて制御系の設計を行う。

③性能評価

従来の防振特性を重視した柔らかいサスペンションでは、傾斜地において重力の影響でシートの位置がずれてしまうという問題がある。さらに、操縦者が体を動かすと、その反動でシートが移動するという問題もある。これらの問題に対処するため、様々なパラメータを変化させながら、②で設計した制御系を実現し、地動外乱に対する防振特性、セルフポジショニング機能及び直動外乱に対する制振性能を評価する。

④変位相殺制御の適用とその有効性の検証

中間質量に取り付けたアクチュエータに変位相殺制御を適用することによってセルフポジショニング機能を実現する。

(2) 提案する方式のサスペンションが建設機械用のシートサスペンションに適用できることを実証するための水平全方位シートサスペンション実験装置の製作と性能評価

①水平全方位シートサスペンション実験装置の設計・製作

装置は、シートを取り付ける防振テーブル、中間質量、ベース、中間質量から防振テーブルを駆動するリニアアクチュエータ（4個）、ベースから中間質量を駆動するリニアアクチュエータ（4個）から構成する。使用するリニアアクチュエータは、ローレンツ力を利用したもので、固定子側の4個の永久磁石で構成した一様な強磁場中のコイル（可動子）

に電流を流すことによって駆動力を得る。コイルは、駆動と直交する方向に移動できる自由度を持ち、移動しても駆動力の大きさがほとんど変わらない。シートは水平全方向に移動するので、このような特性は重要である。また、水平全方向へ自由に運動できるようにしながら垂直方向の荷重を支持する機構として、免震装置などに用いられているボールガイドを利用する。

②制御システムの構築

ベースに取り付けたアクチュエータによって正の剛性を持つ支持機構、中間質量に取り付けたアクチュエータによって負の剛性を持つ支持機構を実現する。試作する装置では、水平方向の2自由度の並進運動に加えて、ヨーイングも制御する必要があるため、モード制御（集中制御）を行う。

③性能評価

②で構築したコントローラを組み込んだアクティブサスペンションの性能評価を行う。負の剛性を実現する制御系を設計する際に指定する閉ループ極や正の剛性の大きさなどのパラメータをいろいろと変化させながら、地動外乱に対する防振特性、セルフポジショニング機能などを評価する。

(3)変位相殺制御を適用とその有効性の検証

中間質量に取り付けたアクチュエータに変位相殺制御を適用することによってセルフポジショニング機能を実現し、負の剛性を持つ支持機構を利用したサスペンションとの性能の比較を行う。

(4)空気圧アクチュエータを利用したプロトモデルの設計・製作と性能評価

①空気圧式サスペンションの製作

人を搭載する実大モデルを実現しようとすると、これまでに使用していたリニアモータでは発生力が不足するので、アクチュエータとして空気圧アクチュエータを用いて負の剛性を持つ支持機構を実現する装置の設計・製作を行う。

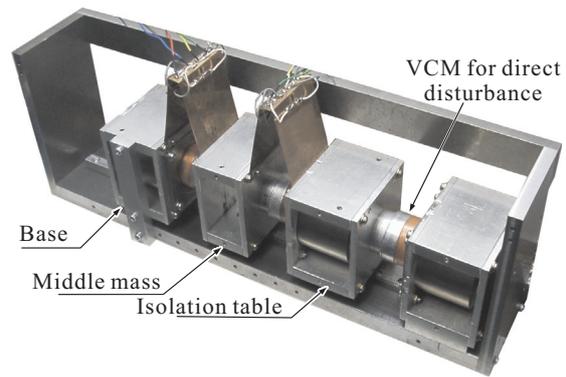
②負の剛性の実現と性能評価

空気圧アクチュエータ部のモデル化を行い、そのモデルに基づいてアクティブサスペンションの制御系の設計及び実装を行う。そして、その性能を実験的に評価する。

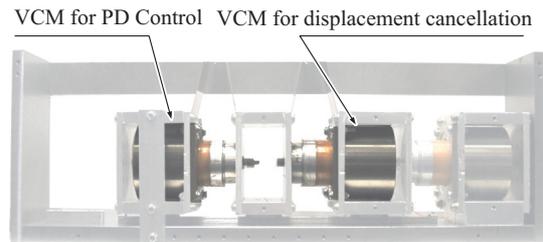
4. 研究成果

(1)図1に外観を示す水平方向の1自由度の並進運動を対象とした基礎実験装置を開発した。

(2)開発した基礎実験装置において、負の剛性を持つ支持機構を実現した。この装置においては、防振テーブルを支持するリニアスライ



(a)全体図



(b)アクチュエータの配置

図1 基礎実験装置

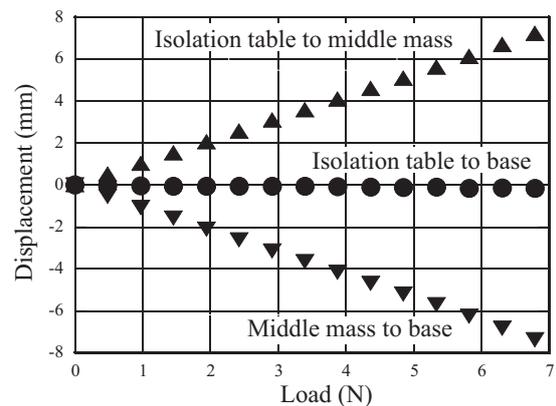


図2 直動外乱に対する静特性

ダーでの摩擦が比較的大きいので、低周波数の自励振動が発生することが確認された。また、設定した負の剛性の大きさが正の剛性の大きさに厳密に等しくないとき、直動外乱に対して防振テーブルが変位することも確認された。

(3)(2)で確認された問題を解決するため、変位相殺制御を適用した。そのときの直動外乱に対する静特性を図2に示す。図2からわかるように、防振テーブルに外力が作用しても、定常的には防振テーブルは全く変位しない。また、負の剛性をりようしたときのような低周波での自励振動は観測されなかった。これ

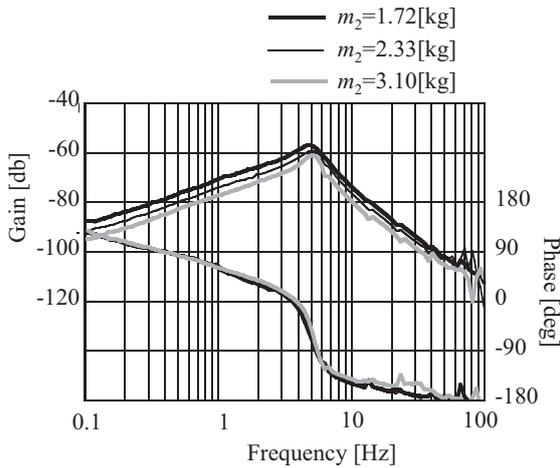


図3 直動外乱に対する周波数応答

らの結果から、変位相殺制御がアクティブサスペンションにおいて有効であるとの知見が得られた。

(4)さらに、変位相殺制御を用いた制御系において、防振テーブルの質量 m_2 をパラメータとして変化させたときの直動外乱に対する周波数応答を図3に示す。図から、質量が大きくなると、より効果的に直動外乱の影響が抑制できることが確認できる。

なお、(1)~(4)の結果については、雑誌論文②にまとめられている。

(5)つぎに、図4に外観を示す水平全方位シートサスペンション装置を開発した。

(6)(5)で開発したサスペンション装置において、まず、負の剛性を持つ支持機構を実現し、つぎに変位相殺制御を適用し、それらの性能を比較した。図5に、静的な直動外乱に対する応答を示す。図から、変位相殺制御を用いた場合には、防振テーブルに外力が作用しても、定常的には防振テーブルは全く変位しない。このことから、実験装置を傾けても、防振テーブルが変位しない、セルフポジショニング機能が実現されていることが確認された。これに対し、負の剛性を持つ支持機構を利用した場合には、基礎実験装置でも観測されたように、摩擦によって低周波の自励振動が生じる場合があることがわかった。

(7)さらに、直動外乱に対する周波数応答を測定した。その結果を図6に示す。図から、変位相殺制御を用いた場合の方が、低周波領域での変位および中周波数領域での振動が抑制されていることが確認された。

(8)これらの結果から、直動外乱に対する性能

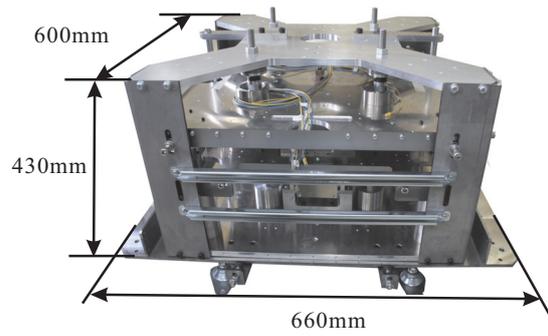


図4 水平3自由度実験装置

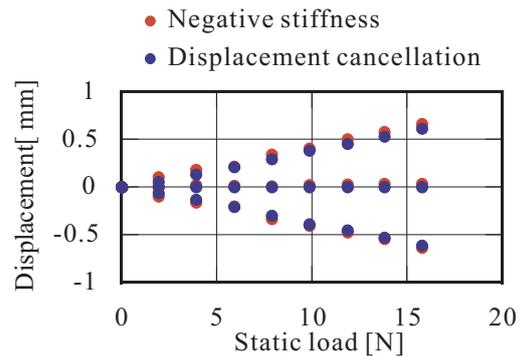


図5 静特性の比較

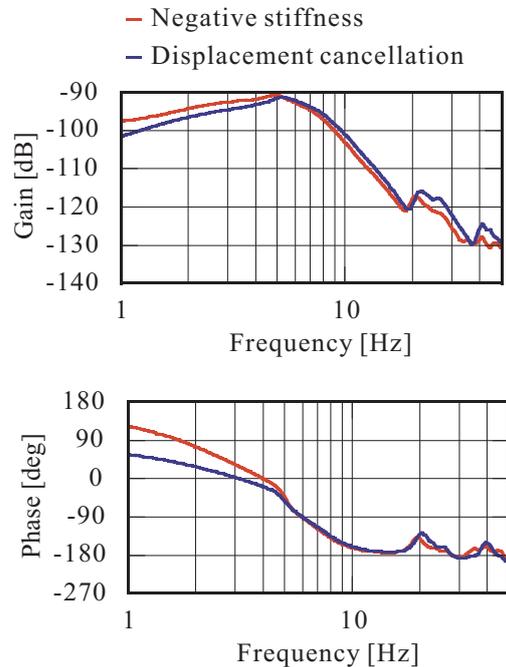


図6 直動外乱に対する周波数応答

に関しては、負の剛性を持つ支持機構を利用するより、変位相殺制御を適用した場合の方が優れていることが確認された。

(9)これまでに、負の剛性を持つ支持機構を利用したサスペンションと、変位相殺制御を利用したサスペンションとを比較した例は報告されておらず、世界的にも、アクティブサスペンションの開発に有用な知見が得られたと結論づけられる。

なお、(5)~(8)については、学会(国際会議)発表①, ③, ⑤の Proceedings 掲載論文にまとめられている。さらに、これらについては、雑誌論文に投稿済みである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Hoque, Md., E., Mizuno, T., Kishita, D., Takasaki, M. and Ishino, Y., Development of an Active Vibration Isolation System Using Linearized Zero-Power Control With Weight Support Springs, *Journal of Vibration and Acoustics, reviewed*, Vol.132, No.4, pp. 041006-1-041006-9 (2010).
- ② Hoque, Md., E., Mizuno, T., Ishino, Y., and Takasaki, M., A Six-Axis Hybrid Vibration Isolation System Using Active Zero-Power Control Supported by Passive Weight Support Mechanism, *Journal of Sound and Vibration, reviewed*, Vol.329, Issue 17, pp.3417-3430 (2010).
- ③ Mizuno, T., Furushima, T., Ishino, Y., and Takasaki, M., Realization of a Zero-compliance System by Using Displacement Cancellation Control, *Journal of Vibration and Control, reviewed*, Vol.16, No.4, pp.585-599 (2010).
- ④ 水野 毅: 負の剛性を利用した除振装置, 機械の研究, 査読無, 第 61 巻, 第 1 号, pp.202-209 (2009).

[学会発表] (計 20 件)

- ① Shahadat, M., M., Z., Mizuno, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., Horizontal Vibration Isolation with Displacement Cancellation and Negative Stiffness Control, Proc. 8th France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, pp.173-178, Keio University, Yokohama, Japan, November 23 (2010).
- ② Hoque, Md., E., Mizuno, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., A Parallel Mechanism Based Vibration Isolation System Using Negative Stiffness, Proc. of 2010 International Conference on Measurement and Control Engineering, ICMCE, pp.672-676, Chengdu, China, November 17 (2010).

- ③ Shahadat, M., M., Z., Mizuno, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., Active Horizontal Suspension System Using Negative Stiffness Control, Proc. International Conference on Control, Automation and Systems 2010, ICCAS2010, pp.1946-1951, KINTEX, Goyang, Korea, October 28 (2010).
- ④ Hoque, Md., E., Mizuno, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., A Modular-Type Three-Axis Vibration Isolation System Using Negative Stiffness, Proc. ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference (DSCC2010), DSCC2010-4128, Cambridge, Massachusetts, USA, September 14 (2010).
- ⑤ Shahadat, M., M., Z., Mizuno, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., Development of A Three-axis Active Vibration Isolator Using Displacement Cancellation Technique, Proc. 10th International Conference on Motion and Vibration Control, CD-4B13, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, August 20 (2010).
- ⑥ Hoque, Md., E., Mizuno, T., Takasaki, M. and Ishino, Y., Application of Feedforward Control to a Vibration Isolation System Using Negative Stiffness Suspension, Proc. 10th International Conference on Motion and Vibration Control, CD-4B11, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, August 19 (2010).
- ⑦ Hoque, Md., E., Mizuno, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., Development of a Multi-Degree-of-Freedom Vibration Isolation System Using Parallel Mechanism, Proc. of the 17th International Congress on Sound and Vibration, CD-876.pdf, Cairo, Egypt, July 21 (2010).
- ⑧ Hoque, Md., E., Mizuno, T., Ishino, Y., and Takasaki, M., A 3-DOF Modular Vibration Isolation System Using Zero-Power Magnetic Suspension with Adjustable Negative Stiffness, Proc. of the 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2010), NF-003107, pp.661-666, Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Japan, March 23 (2010).
- ⑨ 長野裕太, 水野 毅, 高崎正也, 石野裕二: ゼロパワー式除振ユニットを組み込んだハイブリッド型除振装置の性能評価, 第 52 回自動制御連合講演会, CD-ROM D6-2, 大阪大学 (吹田市), 11 月 12 日(2009).
- ⑩ Hoque, Md., E., Mizuno, T., Noda, S., Ishino, Y., and Takasaki, M., Development of a Module-Type Vibration Isolation System Using Zero-Power Control, Proc. of the First Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics and Control, pp.157-160, Hokkaido University, Sapporo, Japan, August 5 (2009).
- ⑪ Hoque, Md., E., Mizuno, T., Ishino, Y. and

- Takasaki, M., An Application of Nonlinear Compensation to Six-Axis Vibration Isolation System Using Zero-Power Control, Proc. of the 16th International Congress on Sound and Vibration, CD-Paper-671, Krakow, Poland, July 7 (2009).
- ⑫ 長野裕太, 水野 毅, 高崎正也, 石野裕二, 稲葉 俊介: ゼロパワー式除振ユニットを組み込んだハイブリット型除振装置の開発, 第 21 回「電磁力関連のダイナミクスシンポジウム」講演論文集, pp.597-600, メルパルク長野 (長野市), 5 月 22 日(2009)
- ⑬ 石野裕二, 高崎正也, 水野 毅: 柔軟な強磁性体を利用したゼロパワー磁気サスペンションの開発, 第 51 回自動制御連合講演会, CD-ROM 1008, pp.630-633, 山形大学 (山形市), 11 月 22 日(2008).
- ⑭ 稲葉俊介, 水野 毅, 高崎正也, 石野裕二: 荷重支持機構を備えたゼロパワー磁気浮上式除振ユニットの開発, 第 20 回「電磁力関連のダイナミクスシンポジウム」講演論文集, pp.409-412, 別府国際コンベンションセンター (別府市), 5 月 22 日(2008)
- ⑮ 野田 祥, 石野裕二, 高崎正也, 水野 毅: ゼロパワー磁気浮上式除振ユニットを利用した多自由度除振装置の開発, 日本機械学会関東支部第 15 期総会講演会講演論文集, pp.153-154, 茨城大学 (水戸市), 3 月 7 日(2008).
- ⑯ Mizuno, T., Furushima, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., Application of Displacement Cancellation Control to Vibration Isolation System, Proc. International Conference on Control, Automation and Systems 2007 TA14-4, pp.335-338, COEX, Seoul, Korea, October 19 (2007)
- ⑰ Mizuno, T., Furushima, T., Ishino, Y. and Takasaki, M., General Forms of Controller Realizing Negative Stiffness, Proc. SICE Annual Conference 2007 in Takamatsu, 3C11-5, Kagawa University, Takamatsu, Japan, September 20 (2007).
- ⑱ Mizuno, T., Kawachi, Y., Ishino, Y., Takasaki, M., Vibration Isolation Unit Using Zero-Power Magnetic Suspension with a Weight Support Mechanism, Proc. 9th International Conference on Motion and Vibration Control, AV4-1298, Munich, Germany, September 17 (2008).
- ⑲ Hoque, Md. E., Mizuno, T., Takasaki, M. and Ishino, Y., Horizontal Motion Control in a Six-Axis Hybrid Vibration Isolation System using Zero-Power Control, Proc. Asia-Pacific Vibration Conference 2007, G16-1-4, Hokkaido University, Sapporo, Japan, August 8 (2007).
- ⑳ Mizuno, T., Unno, Y., Takasaki, M. and Ishino, Y., Vibration Isolation Unit Combining a Air Spring with a Voice Coil Motor for Negative Stiffness, Proc. European Control Conference 2007, WeC02.2, pp.3153-3158, Kos, Greece, July 4 (2007).

〔図書〕 (計 2 件)

- ① Mizuno, T., Vibration Isolation System Using Negative Stiffness, In Mickael Lallart (ed.), *Vibration Control*, pp.79-104, Sciyo, Croatia (2010).
- ② Hoque, Md., E., and Mizuno, T., Magnetic Levitation Technique for Active Vibration Control, In Boštjan Polajžer (ed), *Magnetic Bearings, Theory and Applications*, pp.41-60, Sciyo, India (2010).

〔その他〕

ホームページ等

<http://control.mech.saitama-u.ac.jp/home-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 毅 (MIZUNO Takeshi)
 埼玉大学・理工学研究科・教授
 研究者番号: 20134645

(2) 研究分担者

高崎 正也 (TAKASAKI Masaya)
 埼玉大学・理工学研究科・准教授
 研究者番号: 10333486