

磁気ばねを利用した除振・励振装置の開発

Development of Vibration Control Device and Shaker using Magneto-spring

桑田 勝義^{*1}, 小島 重行^{*1}, 大下 裕樹^{*1}, 杉本 栄治^{*1}, 小倉 由美^{*1},
藤田 悦則^{*1}(正員), 榎園 正人^{*2}(正員), 金子 成彦^{*3}

Katsuyoshi KUWATA, Shigeyuki KOJIMA, Hiroki OSHIMO, Eiji SUGIMOTO, Yumi OGURA,
Etsunori FUJITA(Mem.), Masato ENOKIZONO(Mem.), Shigehiko KANEKO

Positive and negative magneto-spring constants were created by regulating the periodic magnetic fields. The vibration isolating structure which combines the non-linear magneto-spring and the linear metal spring with oil damper and magnetic damper has the same effectiveness as a dynamic vibration reducer. The suspension system using magneto-spring can reduce effectively the vibration energy with a small stroke. The vibration control device using new types of magneto-spring and magnetic damper with the optimized aspect ratio is to be developed by analysis.

Keywords: vibration control, quasi-zero spring constant, magneto-spring, magnetic field analysis, shaker.

1 緒言

近年、ハイブリット車と電気自動車向けの技術開発の進み方が速くなってきた。レシプロエンジン車からの駆動系技術の変換の中で、内外装技術を見直し、一新する動きがでてきた。ここでは、地球環境保全を考慮した新たな視点での軽量・小型化が図られている。また自動車にインテリジェンス機能を持たせるための電気・電子化の流れがある。一方、メンテナンスフリーや洗えるなどの整備・維持性の簡単化の要請もあり、機械式のメカニズムを新たに見直す考えもある。

そこで著者らは、これまで取り組んできた機械式振動機構に磁石の静磁エネルギー変換機構[1,10] (以後、磁気ばねと呼ぶ) を組み込んだパッシブ制御の除振機構[4] (以後、磁気ばね付除振装置と呼ぶ) の磁気回路のスリム化を図ることにした。本報では、磁気ばね付除振装置の振動制御の考え方と開発の流れおよび磁気回路の精緻化の結果について報告する。

2 磁気ばね付除振装置の考え方

従来は、振動吸収性と衝撃力吸収性の両立のために、大きなストロークを持つ機構が採用されてきた。この除振装置はエアばねなどの柔らかいばね要素と減衰力の小さい粘性流体ダンパの組み合わせで構成される。これらを組み込んだ除振装置[2]付シートは、Fig. 1に示

すようにダuffing型のばね特性を持ち、2~3Hz近傍でゲインが1をきることが多い。しかし、ストロークの大きな除振装置は、大きなキャビンが必要とし、さらに上下方向の運動が大きいため、着座姿勢も不安定になり、アクセル・ブレーキペダルの操作性が悪くなることも多い。

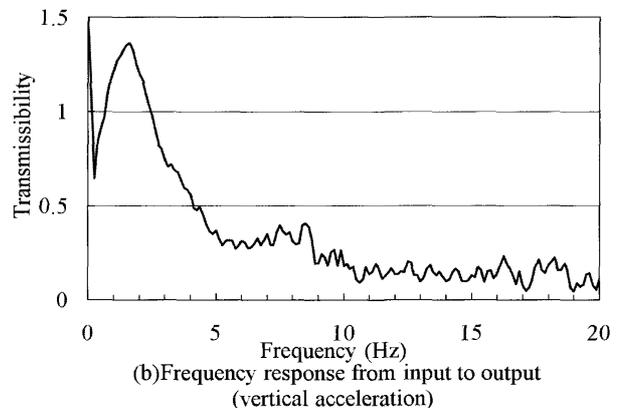
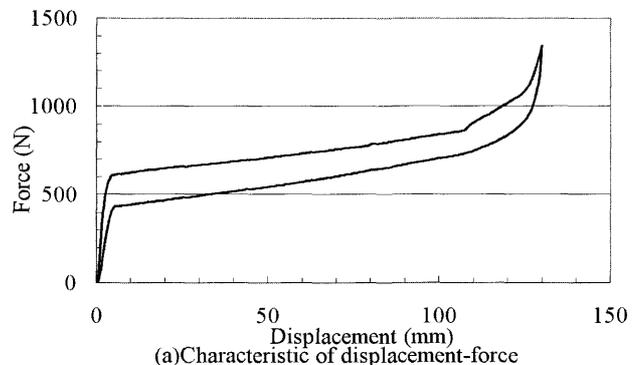


Fig. 1 Characteristic of air-suspension system with oil damper.

連絡先: 桑田 勝義, 〒739-0038 広島県東広島市田口研究団地 3-1, (株) デルタツールリング 開発部 開発二課,
e-mail: kuwata@deltatooling.co.jp

^{*1} (株) デルタツールリング ^{*2} 大分大学 ^{*3} 東京大学

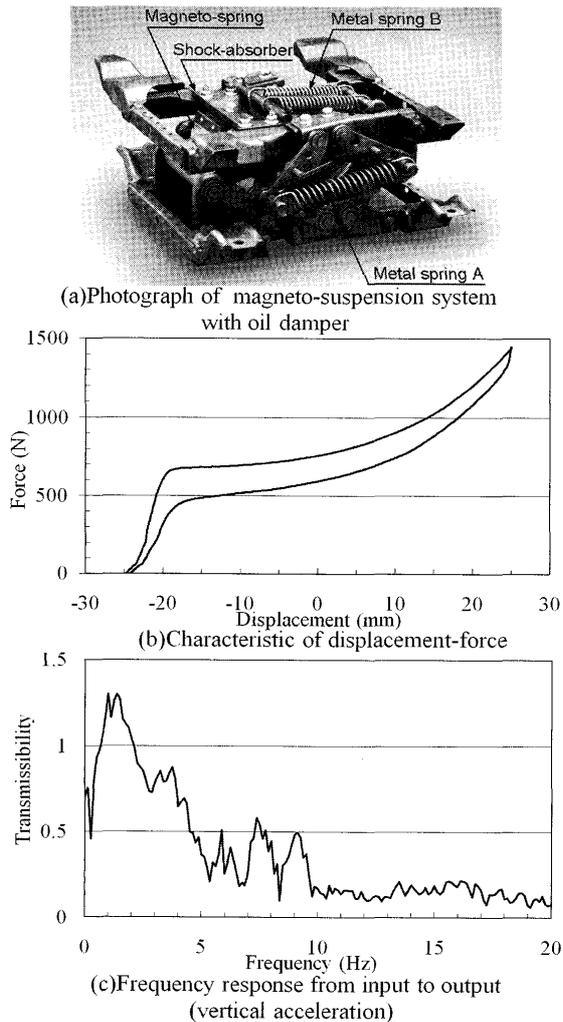


Fig. 2 Characteristic of magneto-suspension system with oil damper.

そこで、Fig. 2に示すような振動特性をもつ反発系の二極磁石対の漏れ磁界及び反発力を利用した正のばね定数およびコイルスプリングとパンタグラフメカニズムから作られる負のばね定数を重畳させた、不感帯を可変できるダフティング型の非線型特性を利用した除振装置[2,3,5,6]付シートを作り上げた。なお、この装置は磁石の力を反発力として利用しており、この力で着座者の体重を支持するために大きな磁石を必要とした。そこで、磁石で体重を支えるための力の発生源として使用するのではなくばね要素として使用することにし、Fig. 3に示すように二極磁石の境界に発生する漏れパーミアンスの磁場勾配をギャップの小さいところで利用した磁気回路[4]を組むことを思いついた。さらに、磁気回路を利用した構造設計の基本は、対称形にあるところから二極磁石を対で使い、Fig. 4に示すようにその二極磁石対の間にギャップの小さいところで反発系

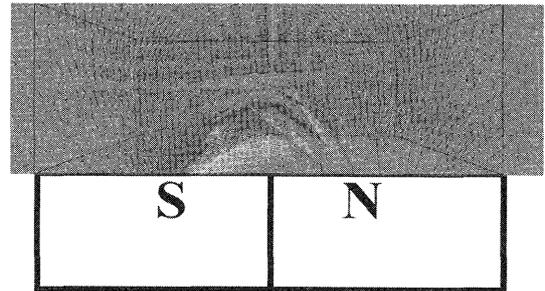
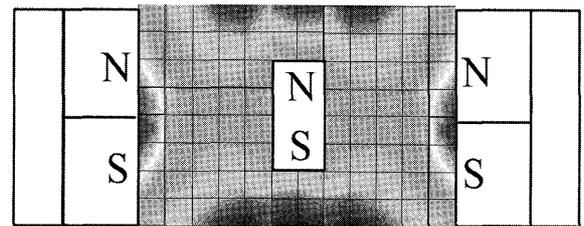
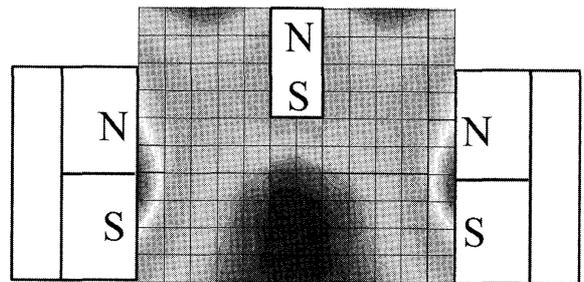


Fig. 3 Magnetic field gradient of leakage permeance.



(a) Neutral position (repulsion system)



(b) Upper and lower end position (aspiration system)

Fig. 4 Flux distributions.

を構成する単極磁石を挿入した。この磁気回路は漏れパーミアンスのあるところは反発系であるが、上下端位置は吸引系となるため、この磁気回路を吸引系-反発系-吸引系と周期的に力が変化する周期型磁気回路[5]と呼んだ。アン・ショーンの定理によれば、中立位置にある反発系は不安定系を構成する。そこで、この中間の単極磁石においても、上下左右前後の3軸方向に対して不安定系を構成する。

3 周期型磁気回路の考え方とそれを用いた磁気ばね付除振装置の実験結果

人の体重を支えるための線形のばね定数をもつトーションバーと、線形のばね定数を持つが運動に不安定性を与える周期型磁気回路を用いた不感帯を可変にできるダフティング型の非線型特性を持つ除振装置[5]を試作した。Fig. 5は、上述の磁気ばね(周期型磁気回路)付除振装置の荷重-変位特性および振動伝達率

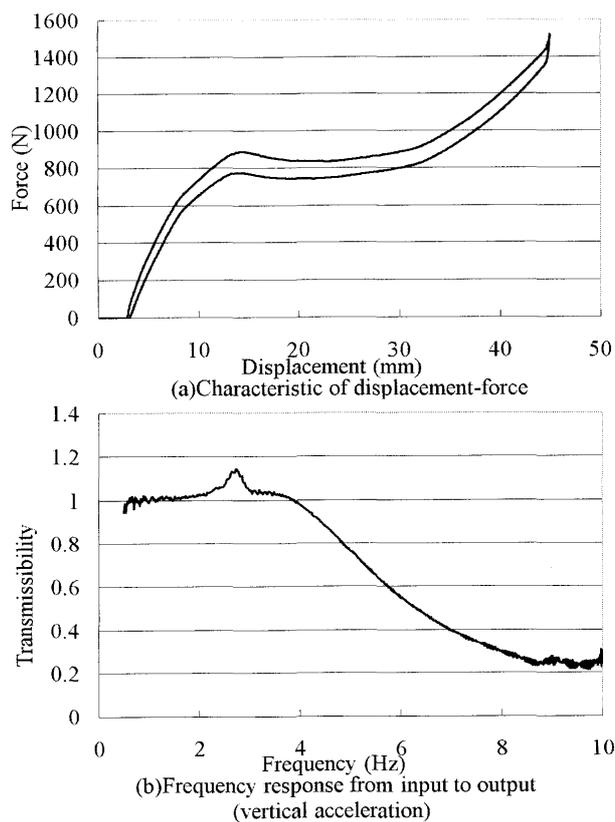


Fig. 5 Characteristic of suspension system with oil damper using magneto-spring.

を示す。振動伝達率の測定は、負荷質量 m を 80kg、加振機の入力波形を 0.5~10Hz、片振幅 2.5mm 一定の正弦波とした。アッパーフレーム上の加速度とベースフレーム上の加速度を加速度ピックアップによって計測した。ここに、低周波のゲインを 1 に近づけることで除振装置上のシートと人とを一体的に運動させ、振動を吸収することにした。そして低周波の共振域にある特徴的な共振峰が微小振動を作り出し、静止摩擦係数を動摩擦係数に変える。これが、除振装置のリンク部などからフロアの振動を人に伝えることを軽減し、人に与える不快感を小さくする。

また、トーションバーには従来の降伏応力の約 1.5 倍のものをういたため、ばね定数を大きく設定できるようになった。また、二極磁石対に発生する漏れパーミアンスとの小さなギャップの中におかれた単極磁石との相互作用で生まれる反発力により、ばね定数が大きく設定できた。そのため、静的環境下における中立位置では、正のばね定数を持つトーションバーと負のばね定数を持つ周期型磁気回路の複合のばね定数は、そのストロークの中立状態においてばね定数が小さくなった。

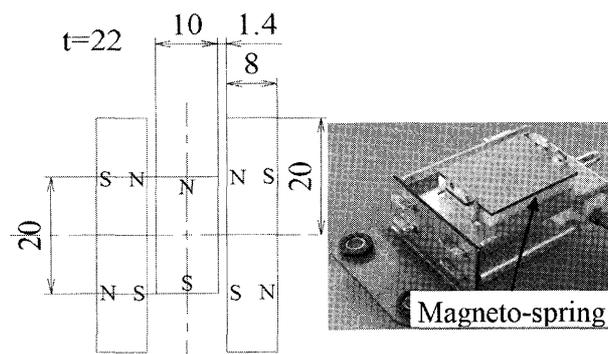


Fig. 6 Current magneto-spring.

一方、動的環境下ではトーションバーのばね力は着座者の体重を支持しているが、外乱による振動エネルギーは周期型磁気回路の中立位置に留まることを妨げる。その結果、除振装置に微小振動が生じ、除振装置のクーロン摩擦による減衰を減少させる。すなわち、リンク部に生じる静的摩擦係数を、動的摩擦係数に変換することで機構に内在するクーロン摩擦力を小さくし、共振点を過ぎたところでの振動特性が改善される。いわゆる周期型磁気回路は、外乱による振動エネルギーをトリガーにした静磁エネルギーを利用した自律型センサー・アクチュエータ機構を実現していると言えることが出来る。

4 磁気ばねの精緻化

周期型磁気回路は、中立位置で反発力が 0 となり、上下端で電磁力が最大となるように設計される。磁石の縦の長さはストロークで決まり、横の長さは電磁力の大きさで決まる。奥行き寸法は、減磁と残留磁束密度の関係から求められる。これらの諸条件から決まった縦・横・奥行き寸法(以後、磁石のアスペクト比と呼ぶ)をもつ磁石を試作して、実験的に求めた荷重-変位特性を用いて構造設計を行ってきた。この、試作による検討は時間とコストがかかるため、磁場解析を導入して、縦・横・奥行き寸法をパラメータにして電磁力を算出し、目標となるばね定数が実現できる効率のよいアスペクト比を探し出した。

4.1 量産品の解析と実験検証

解析と実験値の整合性の検証のため、ベンチマークとなる Fig. 6 に示す希土類磁石を使用した現行の磁気ばねの 3 次元モデルを用いて解析を行った。また、万能試験機を使用し、磁気ばねの荷重-変位特性を測定した。Fig. 7 に電磁力の解析結果と測定結果を示す。3 次元モデルでの解析と実験結果がほぼ同じ傾向を示した。

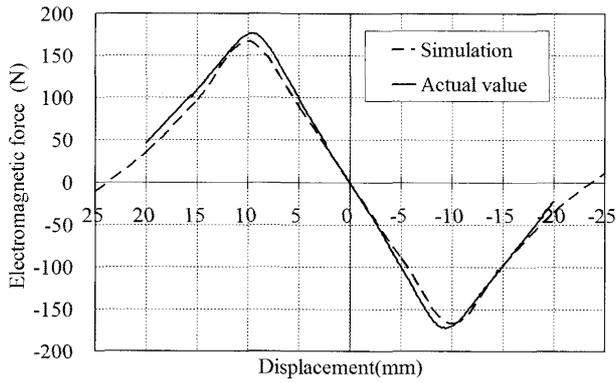


Fig. 7 Characteristics of a current magneto-spring.

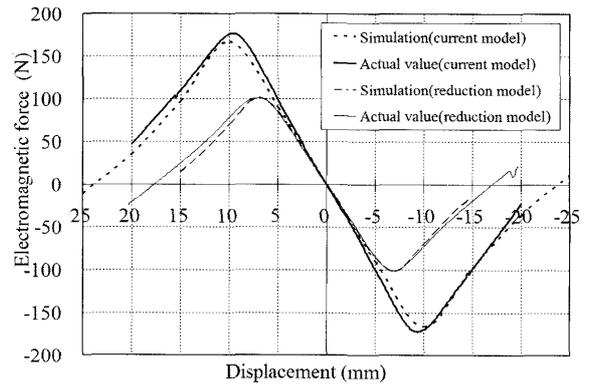


Fig. 9 Characteristics of a magneto-spring model.

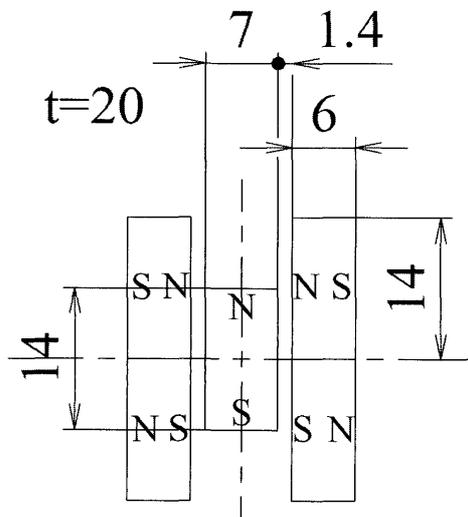


Fig. 8 Magneto-spring model.

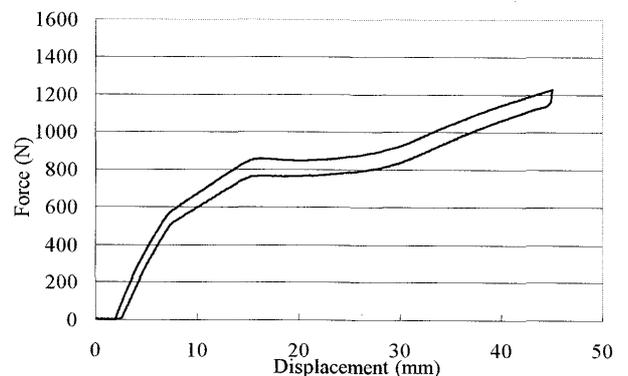
4.2 アスペクト比最適化モデル

Fig. 7 のモデルを用いて現行品とばね定数がほぼ同じとなるが、負のばね定数の範囲が減少する Fig. 8 に示すモデルを解析し、試作した。Fig. 9 に磁気ばねの荷重-変位特性の解析結果と測定結果を比較して示す。両者は値がほぼ一致している。この場合の磁石使用量の低減効果は 53%であった。

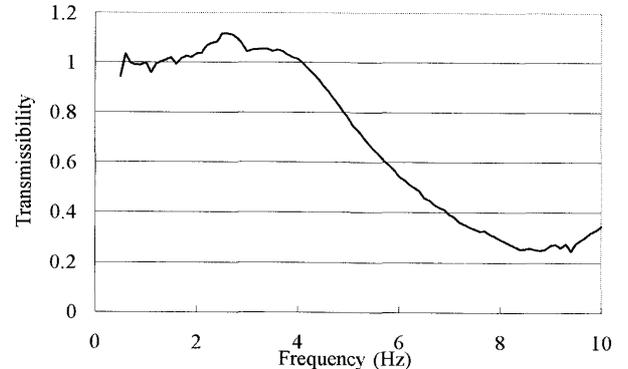
このアスペクト比を最適化したモデルを現行の除振装置に組み込み、荷重-変位特性と振動伝達率を測定した。その結果を Fig. 10 に示す。Fig. 5 に示す荷重-変位特性と振動伝達率にせまる特性をつくり出すことができた。

4.3 磁気ダンパ

Fig. 11 は、希土類磁石を使用した現行の磁気ダンパで、銅の移動速度 v を 0.1m/s とし、銅の幅 w (現行は 10mm) と電磁力の関係を、解析により求めたものであ



(a)Characteristic of displacement-force



(b)Frequency response from input to output (vertical acceleration)

Fig. 10 Characteristics of transmissibility suspension system with oil damper using a magneto-spring.

る。Fig. 12 に解析結果を示す。これによれば、銅の幅 8mm で減衰力が最大となることがわかる。解析条件は、磁石の残留磁束密度を 1.26T、銅の電気伝導率を 56×10^6 S/m とし、ヨークの比透磁率は SS400 の初期磁化曲線を使用した。

4.4 磁石ばね・磁気ダンパ複合ユニット

Fig. 13 は、磁石ばね・磁気ダンパを組合せた複合ユニットを示す。本ユニットは 6 個の希土類磁石が反発系と吸引系に配置され、反発系の空隙間を運動する単極

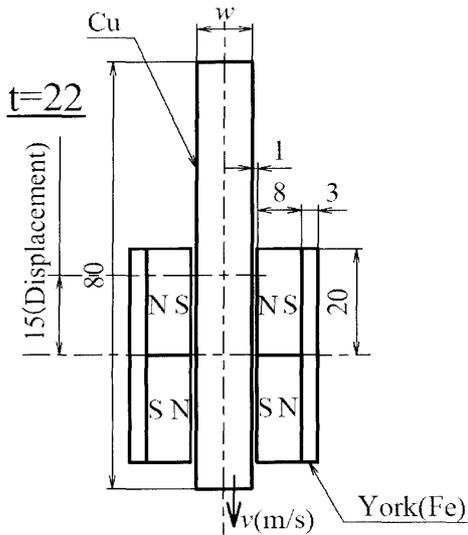


Fig. 11 Current magnetic damper model.

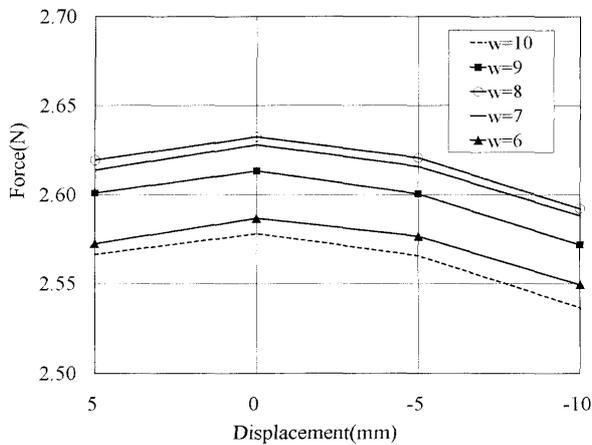


Fig. 12 Electromagnetic force (Simulation).

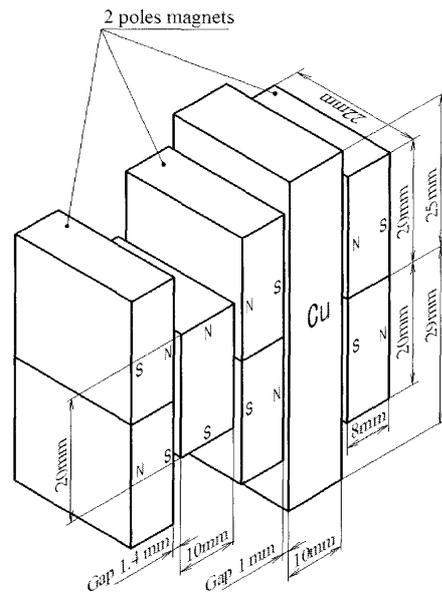


Fig. 13 Magneto-spring and magnetic damper combination model.

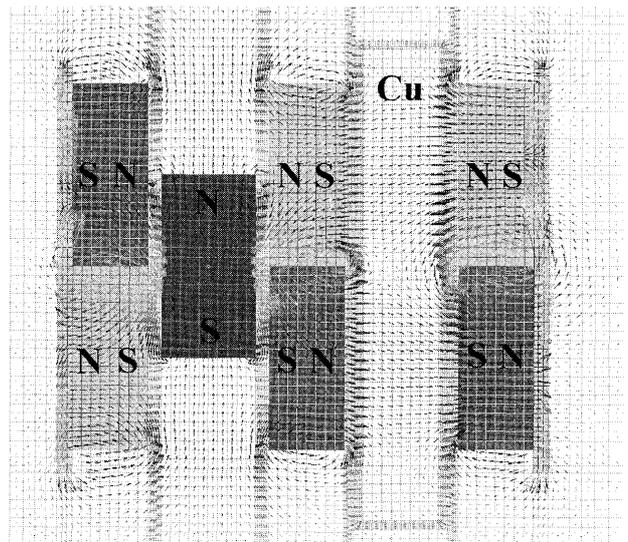


Fig. 14 Distribution of magnetic flux density.

磁石と吸引系の空隙間を運動する銅板により構成される。このユニットを試作し、解析値と実測値を比較した。解析条件は、銅の移動速度を 0.3m/s、磁石の残留磁束密度を 1.26T、銅の電気伝導率を 56×10^6 S/m とし、ヨークの比透磁率は SS400 の初期磁化曲線を使用した。

Fig. 14 に磁束密度ベクトル分布、Fig. 15 に解析値と磁気ばねの実測値を示す。磁気ばね・磁気ダンパの電磁力実測値は、Fig. 7 の値に比べてばね力が 20% 低減しているが、トーションバーのねじり角を調整することで対処した。

5 磁束集束型磁気回路

これまで用いてきた二極磁石の漏れパーミアンスを、複数個の永久磁石の配列を変えることにより、さらに磁石より外に飛ばすことを考えた。これにより磁束を集束することができ、さらに強い減衰力を得るこ

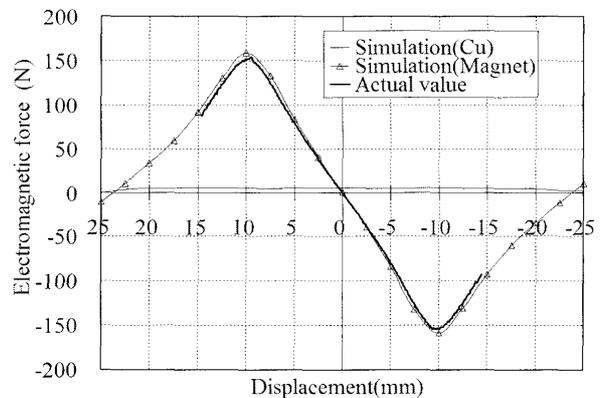


Fig. 15 Characteristics of magneto-spring with magnetic damper.

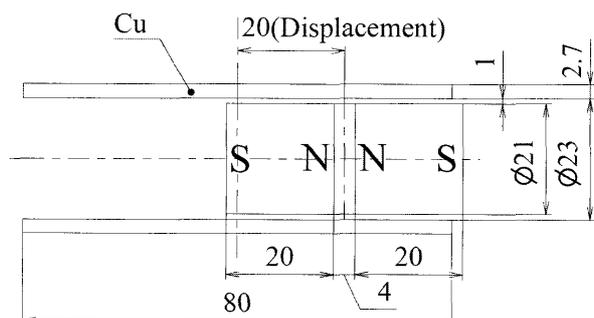


Fig. 16 Electromagnetic force (Simulation).

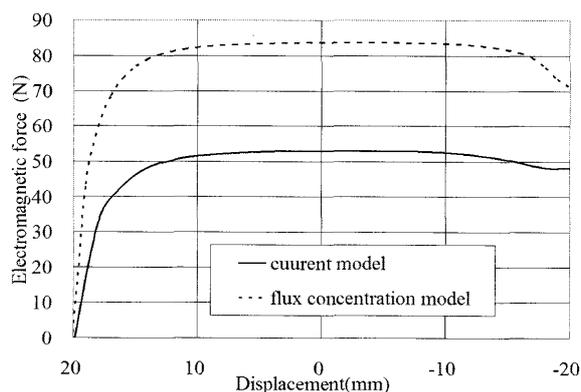


Fig. 17 Electromagnetic force (Simulation).

とができる可能性を見出した。Fig. 16は磁石と銅の使用量を現行モデルとほぼ同じとした磁束集束型磁気回路の円柱型磁気ダンパモデル(断面)である。Fig. 17に銅の移動速度を2m/sとした場合の、現行の磁気ダンパモデルとの解析値の比較を示す。磁束集束型磁気回路のモデルは現行モデルと比較して約1.6倍の減衰力となった。以上のことから磁束集束型磁気回路により除振装置のさらなるスリム化が期待できるものと考えられる。

6 磁気ダンパと磁気ばねを組み合わせた応用事例

Fig. 18は希土類永久磁石で構成される周期磁界型磁気回路に金属ばねを組み合わせたダフティング型のばね要素に、大きな減衰力を有する粘性流体ダンパを組み合わせた除振装置である。この減衰要素として用いられている粘性流体ダンパは、衝撃力を減衰させるには効果的であるが、低周波から高周波にかけて、位相特性により振動吸収性能を劣化させる。そのため、外乱周波数が4Hz近傍にある産業用車両では、低周波域の減衰特性の悪化が問題となる。

そこで、低周波で減衰力が小さく、高周波では減衰力が大きくなる磁気ダンパを用いて動吸振器[17]を試作し、Fig. 19に示す新たな振動制御機構を提案した。

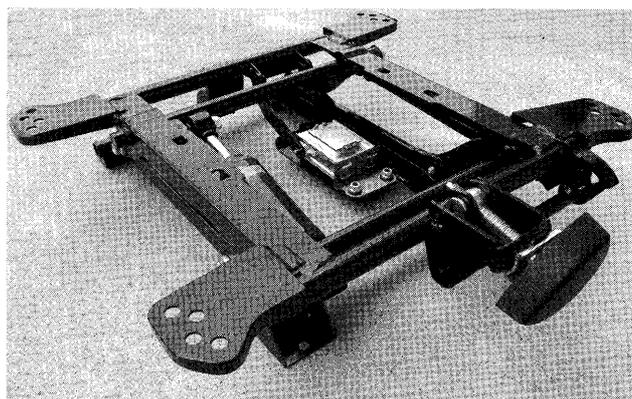


Fig. 18 Suspension system with oil damper using magneto-spring.

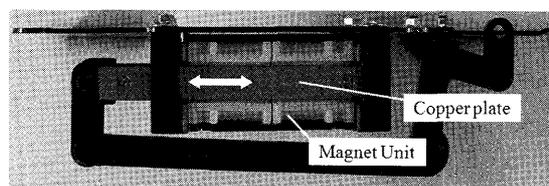


Fig. 19 Magnetic dynamic damper.

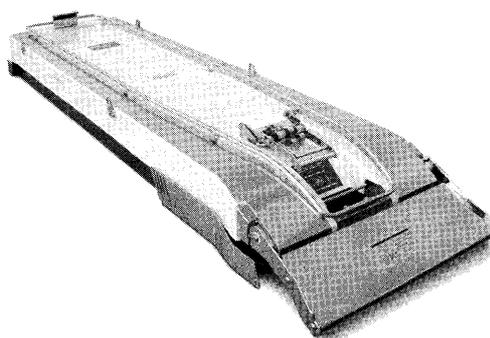


Fig. 20 Vibration isolating bed for ambulance.

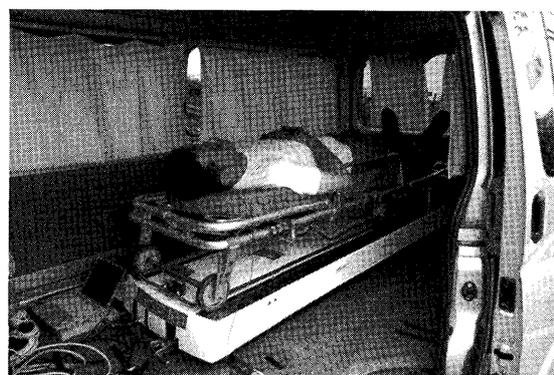


Fig. 21 Appearance of experiment.

また Fig. 11 に示した二極磁石対と銅板の組み合わせで作られた磁気ダンパは、高周波ではノーズダイブ対策兼前後サスペンションのロック機構、低周波ではダンパ要素として、救急車用防振架台に利用した[6]。Fig.

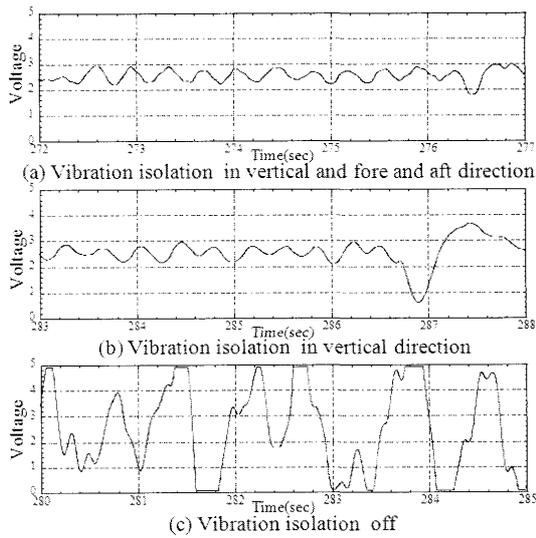


Fig. 22 Comparison of vertical direction vibration input to dorsal.

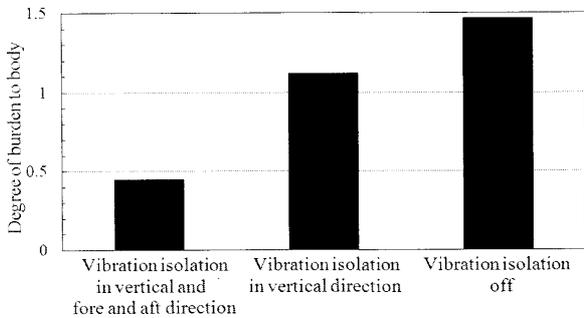


Fig. 23 Degree of burden to body requested from physiology indication.

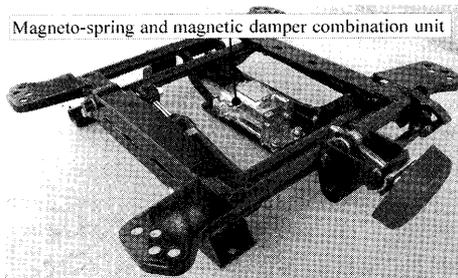


Fig. 24 Suspension system with oil damper using magneto-spring and magnetic damper.

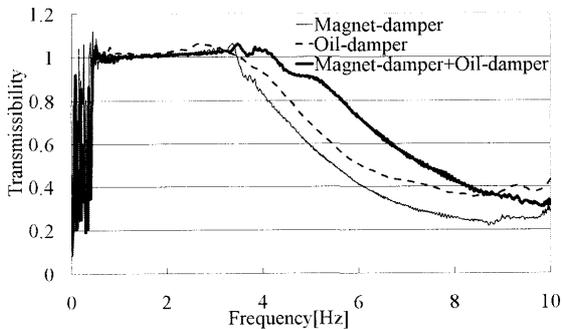


Fig. 25 Characteristics of suspension system with oil damper using magneto-spring and magnetic damper.

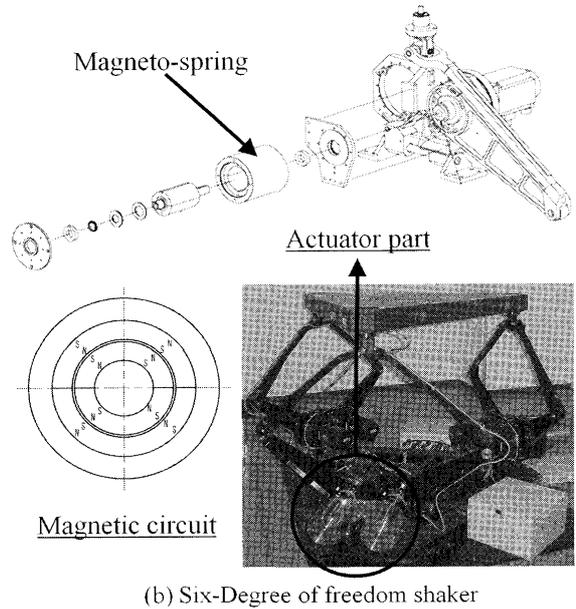
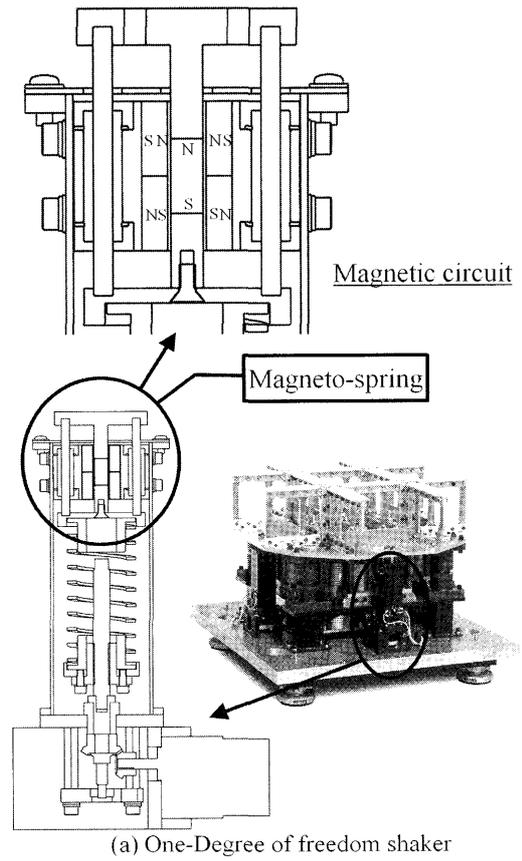


Fig. 26 Shaker.

20は救急車用防振架台を示す。その結果前後・上下・ピッチングによる全身振動と衝撃性振動の低減が可能になった。また、ノーズダイブによる防振架台上の被験者の頭部への血流の増加も抑えることができた。そこで効果を確認するために、実車走行状態で防振架台上の被験者の背部脈波をエアパックセンサで測定し、

振動・ノーズダイブによる体への負担度による磁気ばね付防振架台の性能評価を行った。Fig. 21 は実験風景を示す。Fig. 22 は背部に設置したエアバックセンサ[7,12-15]に入力される上下方向振動変位を示す。Fig. 23 はFig. 22 の波形を解析して[8-9,11-15], 人への疲労度を求めた結果を示す。磁気ばね付防振架台の人体へ疲労を与える負担度の軽減具合は、それが無いときに比べ、70%の軽減効果があった。

Fig. 24 はFig. 13 に示す磁気ばね・磁気ダンパ複合ユニットを実際の金属ばねと粘性流体ダンパで構成される除振装置に組み込んだ事例である。振動特性はFig. 25 に示される。図中破線で示される粘性流体ダンパ付、あるいは磁気ダンパ付のサスペンションに比べて、減衰力が大きくなったが高周波のゲインが小さく抑えられており、振動吸収性の劣化が抑えられている。したがって、磁気ばね・磁気ダンパ複合ユニットは、単純にオイルダンパの減衰力を2倍に上げるよりも高周波域の特性改善が示される。

Fig. 26 はFig. 6 の周期型磁気回路を自動体重調整機能に応用した磁気回路[16]と1軸、6軸加振機を示す。

7 結言

本稿では、磁気ばね付除振装置の振動制御の考え方や磁気回路の精緻化の1997年から現在に至る12年間の開発の流れを紹介した。

今後は、磁束集束型の磁気回路の設計手法を構築し、磁気ばね機構と磁気ダンパ機構に応用していく予定である。

参考文献

- [1] Fujita E., Ogura Y., Sakamoto Y., Honda S., New Vibration System Using Magneto-Spring, *SAE Trans.*, Vol.106, pp.2622-2633, 1997.
- [2] Fujita E., Nakagawa N., Ogura Y., Kojima S., Vibration Characteristics of Vertical Suspension Using Magneto-Spring, *SAE paper*, 1999-01-1781, pp.1003-1017, 1999.
- [3] 藤田悦則, 中川紀壽, 小倉由美, 小島重行, 磁石ばねを利用した組合せ非線形ばねに関する実験的研究, 日本機械学会論文集C編, Vol.66, No.645, 1445, 2000.
- [4] 藤田悦則・中川紀壽・小倉由美・大下裕樹・杉本栄治・小島重行, 磁石ばねを利用した振動絶縁機構に関する実験的研究, 設計工学, 36-3, pp.126-135, 2001.
- [5] Fujita E., Nakagawa N., Ogura Y., Kojima S., An Experimental Study for the Passive Control of Non-Linear Vibration Systems Using Magneto-Spring, *A-PVC'99*, Vol.1, pp.117-122, 1999.
- [6] 藤田悦則, 中川紀壽, 小倉由美, 小島重行, 救急車用防振架台の乗り心地と設計, 日本設計工学会誌, Vol.12, No.35, pp.478, 2000.
- [7] 藤田悦則, 小島重行, 小倉由美, 村田幸治, 亀井 勉, 植田雄二, 榎園正人, 緑川 洋一, 秋田 昌憲, 金子成彦, 快適シート技術, 自動車技術, Vol.62, No.2, pp.33-41, 2008.
- [8] 藤田悦則, 小倉由美, 落合直輝, 安田栄一, 土居俊一, 村田幸治, 亀井勉, 上野義雪, 金子成彦, 指尖容積脈波情報を用いた長時間着座疲労の簡易評価法の開発, 人間工学, Vol.40, No.5, pp.254-263, 2004.
- [9] 藤田悦則, 小倉由美, 落合直輝, 苗鉄軍, 清水俊行, 亀井勉, 村田幸治, 上野義雪, 金子成彦, 指尖容積脈波情報を用いた入眠予兆現象計測法の開発, 人間工学, Vol.41, No.4, pp.203, 2005.
- [10] Etsunori Fujita, Noritoshi Nakagawa, Norio Soga, Yumi Ogura, Eiji Sugimoto, and Shigeyuki Kojima, An Experimental Study for Collision Stimulus Device Using a Magneto-Spring, *Proc. 2001 ASME International Design Engineering Technical Conferences*, CD-ROM, 2001.
- [11] 藤田悦則, 村田幸治, 亀井勉, 小倉由美, 落合直輝, 金子成彦, 指尖容積脈波のゆらぎによる疲労度の評価, 疲労と休養の科学, Vol.20, No.1, pp.71-84, 2008.
- [12] 前田慎一郎, 小島重行, 小倉由美, 藤田悦則, 村田幸治, 亀井勉, 金子成彦, 吉栖正生, 非拘束センサによるドライバの状態推定技術の開発, 第11回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, pp.403-407, 2009.
- [13] 小島重行, 前田慎一郎, 小倉由美, 藤田悦則, 村田幸治, 亀井勉, 辻敏夫, 金子成彦, 吉栖正生: 非拘束センサによる飲酒検知技術の開発, 第11回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, pp.408-411, 2009.
- [14] 延廣良香, 落合直輝, 小倉由美, 藤田悦則, 村田幸治, 亀井勉, 上野義雪, 辻敏夫, 金子成彦, 吉栖正生, マットレスの適合性評価のための生理学的指標の開発, 第11回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, pp.412-415, 2009.
- [15] 落合直輝, 延廣良香, 小倉由美, 藤田悦則, 村田幸治, 亀井勉, 上野義雪, 辻敏夫, 金子成彦, 吉栖正生, 脈波時系列解析による睡眠現象解析アルゴリズムの開発, 第11回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, pp.420-423, 2009.
- [16] Nakagawa N., Fujita E., Sugimoto E., Kojima S., Otsubo K., Pendulum suspension system with quasi-zero spring constant using a magneto-spring, Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Vol.50, No.1, pp.9-14, 2001.
- [17] 作山寛, 小島重行, 藤田悦則, 金子成彦, 榎園正人, 西山勝夫, 磁気ばねと磁気ダンパを用いたサスペンションシートに関する研究, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.7, pp.35-36, 2006.