

内部擾乱低減技術の研究 (A Study on Disturbance Reduction Management)

磁性流体ダンパによる大型柔軟構造物の制振

(MR Fluid Damper for Vibration Suppression of Large Flexible Structure)

総合技術研究本部 システム誘導技術グループ 呉 賢雄

Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group, Hyun-Ung OH

Abstract

A low-power-consumption Magneto-Rheological (MR) fluid damper has been designed and fabricated to suppress the vibration of a space flexible structure. The MR damper fabricated in this study has advantages of both semi-active and optimal passive dampers, unlike the conventional MR and Electro-Rheological (ER) fluid semi-active damper. The vibration is thus damped quickly when the damper is controlled semi-actively, and the vibration energy is dissipated by an optimal passive damper in the absence of control. To implement the aforementioned damper, we fabricated an electromagnet combined with a permanent magnet. Its performance and the characteristics of the damper with the newly developed electromagnet were subsequently measured. The performance of the damper has been confirmed by vibration suppression experiments using 10-bay truss structures.

1. はじめに

構造物の制振方法は、能動的制振と受動的制振に大別され、さらにその中間的な方法として準能動的制振がある。準能動的制振は、構造物の受動的制振能力が極力大きくなるよう、構造物やダンパの持つ特性を積極的に制御する方法である。準能動的制振の場合、エネルギーが受動的メカニズムにより散逸されるため、受動的制振のように系は常に安定であり、同時に、受動的制振に比べてより高い制振効果が期待できる。

従来の準能動的制振用ダンパには、オリフィスの開閉によりダンパの特性を変化させて制振を行うもの、あるいは、入力磁場または電圧によって力学的特性が変化する磁性流体または電気粘性流体をダンパ内の作動流体として用い、ダンパの特性を可変とすることにより振動エネルギーを速く吸収させるもの等がある。

これら従来のオイルタイプ準能動的制振用ダンパ[1-4]では、ダンパ特性を制御しているときのダンパの制振性能を向上させることを目的として、ダンパ特性を制御しない時の作動流体の規程粘度が低い値となるようにダンパを設計するのが通常である。このため、従来の準能動的制振用ダンパは、ダンパ特性を制御している時には高い制振効果を提供するものの、ダンパ特性を制御していない場合には、粘性の低い受動ダンパとしてエネルギー散逸を行うため制振効果が低下する、という問題点を有している(受動ダンパのなかで最も制振性能の高い最適受動ダンパの粘度は比較的高い値となる)。

本研究は平成15年度より実施しており、ダンパ特性の制御を行わない場合であっても、最も制振性能の高い最適受動制振用ダンパとして振動エネルギーの散逸を行うことが出来る一方、ダンパ特性の制御を行う場合には、省エネルギーで振動を速く減衰させることのできる fail-safe を考慮した省エネルギー型準能動的制振用ダンパ装置を提供することを目的としている。本研究では、入力磁場によって流体としての力学的特性が変化する磁性流体をダンパ内の作動流体として用い、磁性流体に磁場を印加するためのデバイスとして永久磁石を組み

込んだ電磁石を含む複合磁石を利用することにより、上記課題を解決し得ることを見いだした。

2. 研究の概要

平成 15 年度に実施した研究項目は以下のとおりである。

- (1) fail-safe を考慮した省エネルギー型準能動的制振用ダンパを実現するために、磁性流体の特性を用いた準能動型ダンパを考案・製作した。
- (2) 準静的試験により磁性流体ダンパの基本特性を測定した。
- (3) 磁性流体ダンパの有効性については磁性流体ダンパを組み込んだ大型柔軟構造物の制振実験により検証した。

3. 成果の概要

磁性流体ダンパ及び複合磁石

図 1 に本研究で製作した磁性流体ダンパの断面図を示す。ダンパ内には磁性流体が充填されており、ベローズで囲まれた二つのチャンバ、それらを連通させる連通部、及び連通部内を流れる磁性流体に磁場を印加するための永久磁石と電磁石の組み合わせからなる複合磁石(図 2 参照)で構成される。

図 2 に複合磁石の断面図を示す。複合磁石は永久磁石を備え、この永久磁石が発生する磁力は複合磁石を通して図 1 に示す磁性流体ダンパの連通部のなかの磁性流体に作用する。また、複合磁石の付近にはコイルが巻きつけられており、さらに、永久磁石の側面には、永久磁石により発生する磁極の中心(point O)での磁束密度を調整するための磁束密度調整用ブロックが取り付けられている。この磁束密度調整用ブロックは所定のギャップを持って互いに離隔している二つのブロックを有している。

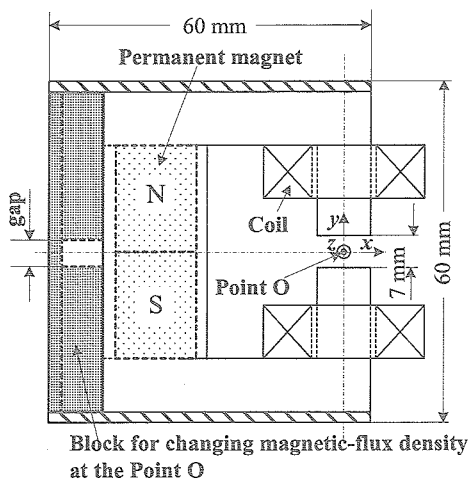


Figure 2 Cross section of the electromagnet combined with permanent magnet

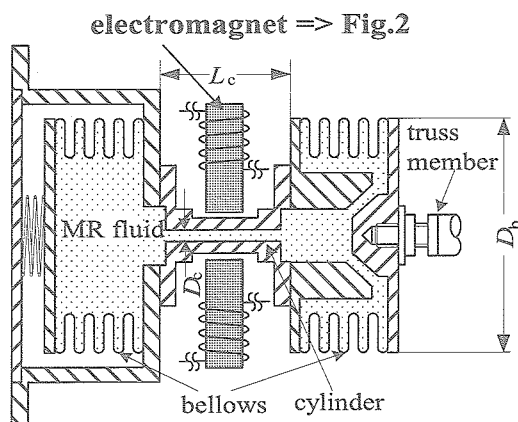


Figure 1 Cross section of the MR fluid damper ($L_c=70$, $D_c=6$, $D_b=40$ mm)

コイルに電流を印加しない場合において、永久磁石の側面に磁束調整用ブロックが取り付けられていなければ、ポイント O での磁束密度は、永久磁石の磁力によって決まる一定の大きさに保たれることになる。また、磁束調整用ブロックを取り付けると、永久磁石からポイント O へ向かう磁束の一部を磁束調整用ブロックの方向へ向けることができ、ブロックのギャップを調整することにより、ポイント O での磁束密度値を変えることができる。さらに、永久磁石と磁束調整用ブロックとの組み合わせによって形成されたポイント O での磁束密度をコイルに電流を印加して反対向きの磁力を発生させることによりキャンセルすることができる。

図 3 は上記のように構成した複合磁石において、コイ

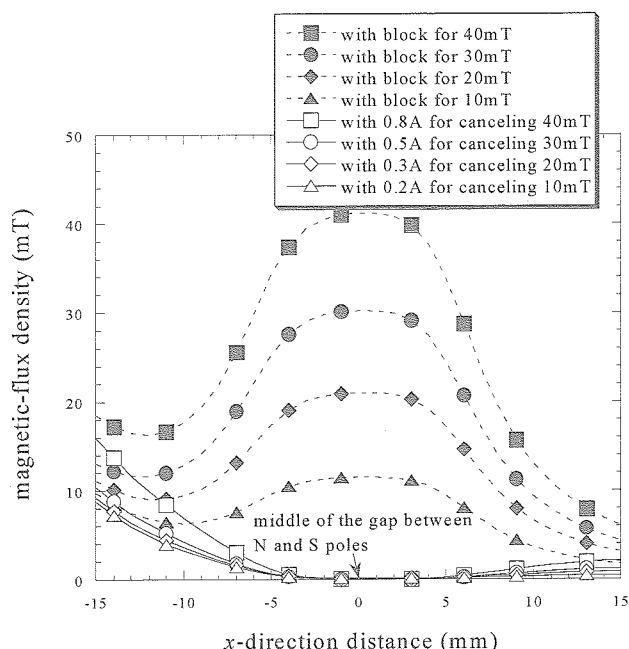


Figure 3 Magnetic-flux density distribution of the electromagnet near point O

図4は、上記のように構成した複合磁石を持つ磁性流体ダンパの特性を理解するために行った、一定速度でのダンパの引張・圧縮繰り返し試験の結果を示す。同図から、永久磁石と磁束調整用ブロックとの組み合わせによりポイントOに形成された磁束密度が40 mTである場合、ダンパにかかる荷重(p)とダンパの伸び(d)との関係は大きなヒステリシスを示すが判る。これに対し、コイルに0.8 Aの電流を印加することによってこの40 mTの磁束密度をキャンセルすると、ヒステリシスは、複合磁石を使用しない場合(0 mT)とほぼ一致する極めて小さなものとなることが判る。

ルに電流を印加することなくギャップの大きさが異なる様々な磁束調整用ブロックのみを使用した場合、及び、さらにコイルに電流を印加した場合における、ポイントO付近での磁束密度分布を示す図である。同図から電流を印加することなく永久磁石と磁束密度調整用ブロックとの組み合わせによってポイントOに形成した磁束密度を、コイルに電流を印加することによってほぼ0 mTまでキャンセルできることが分かる。Table 1に磁束密度調整用ブロックのギャップ寸法及び磁束密度をキャンセルするための電流値を示す。

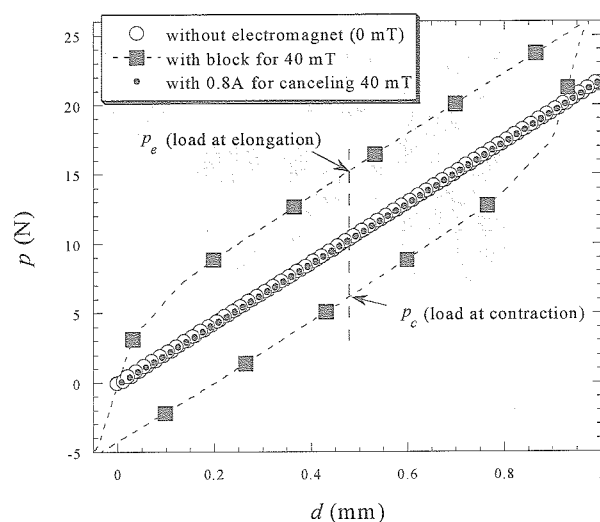


Figure 4 d - p relation of the damper with and without electric-current. (extension/contraction rate=20mm/min)

Table 1 Values of electric-current inputs to the coil to cancel magnetic-flux density at point O formed by permanent magnet combined with blocks of various gap sizes.

Magnetic-flux density (mT)	10	15	20	25	30	35	40
Gap (mm) [Fig. 2]	0.8	0.63	0.5	0.41	0.18	0.1	0
Electric-current (A)	0.19	0.24	0.32	0.41	0.48	0.57	0.81

大型柔軟構造物の制振実験結果

本研究で製作した磁性流体ダンパの制振性能を検証するために磁性流体ダンパを大型柔軟構造物に組み込み、制振実験を行った。図5は制振実験の一例を示すブロック図である。ここでは、制振対象構造物として、

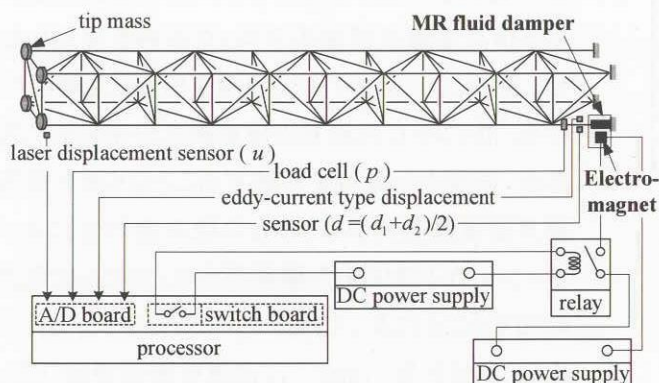


Figure 5 Block diagram for vibration suppression experiments



(a)



(b)

Figure 6 (a) 10-bay truss structure,
(b) MR damper installed on the root of truss

は、コイルに僅かな電流を印加するだけで効率的に制振を行うことができ、省エネルギー型準能動制振用ダンパであることが判る。

図9はダンパへの入力磁場が一定に保たれた受動的制振用ダンパと準能動的制振ダンパとの性能比較を示す図である。図9において、縦軸 U は、図5に示すトラスの先端の変位量 u の絶対値を20秒間積分した値

全長 3.6 m の片持ちトラスを用いており、磁性流体ダンパはトラスの根元に配置されている。制振実験では、まず、ダンパへの入力磁場が一定に保たれた場合の受動的制振実験を行い、ダンパへの特性を制御した場合の準能動的制振実験から得られた結果との比較を行った。準能動的制振実験においては、最適制御理論から成るオン・オフ切り替え判定条件式に基づいて、磁性流体ダンパへの印加磁場の切り替えを行うことにより制振を行った。図6に大型柔軟トラス及び根元に組み込まれたダンパの様子を示す。

図7に、ダンパへの入力磁場が一定に保たれた場合の受動ダンパとダンパの特性を制御した場合の準能動ダンパから得られたトラスの先端の変位(u)と準能動的制振時のダンパにかかる荷重(p)、ダンパの伸び(d)、及び入力磁場(H)の時間履歴を示す。準能動的制振を行った場合、入力磁場の増加と共にダンパの伸びはステップ状に変動しており、受動ダンパに比べて遥かに速い減衰が得られることが判る。

図8(a)に、コイルに電流を印加することによってある磁束密度が得られる従来の電磁石[2]を用いて準能動的制振を行った場合のダンパの伸び(d)と磁束密度(H)の時間履歴の拡大図を示す。図8(b)には本研究で製作した複合磁石を用いた場合の時間履歴の拡大図を示す。図8(a)の従来の電磁石を用いた場合、ダンパへの入力磁場がオンからオフに変わるときダンパの伸びはステップ状に変化しており、磁場 40 mT をダンパへ印加するためのオン状態はオフ時に比べ長く保たれる。一方、本研究で製作した複合磁石を用いた場合、ダンパへの入力磁場 40 mT は永久磁石によって保たれるため、電磁石へ電流を印加するのは永久磁石によって形成された 40 mT をキャンセルするための僅か数ミリ秒のみである。これらの結果から本研究で製作した複合磁石を持つ磁性流体ダンパ

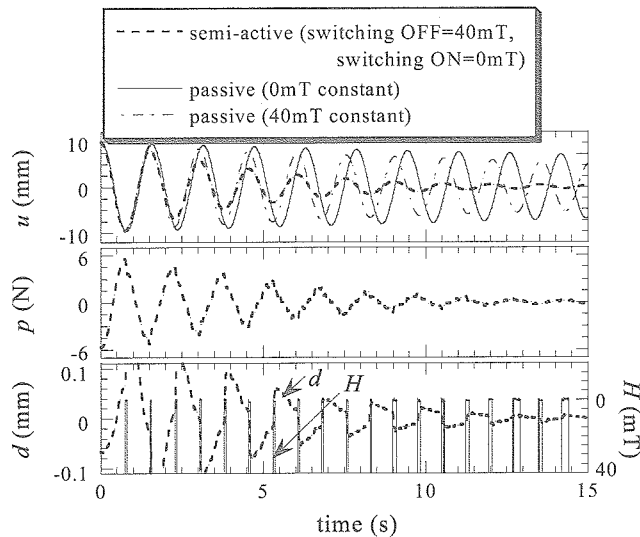


Figure 7 Time histories obtained from semi-active MR damper with newly designed electromagnet and passive MR dampers

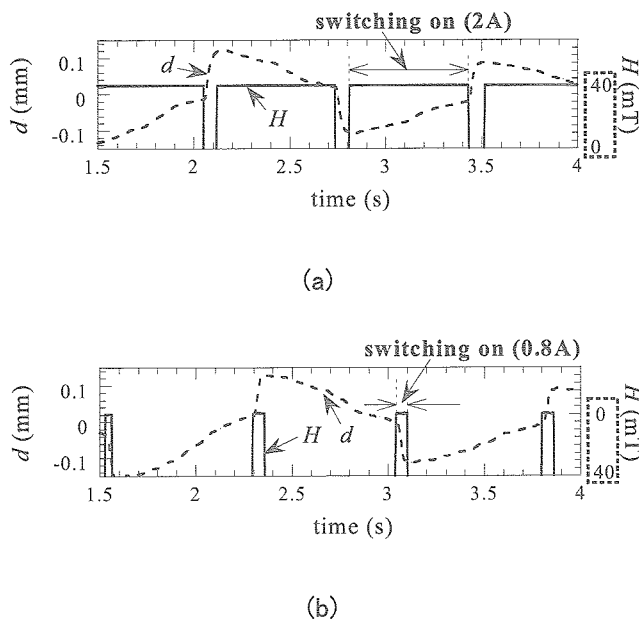


Figure 8 Comparison of d and H time histories (a) Conventional MR damper, (b) MR damper fabricated in this study

ためにダンパを組み込んだ大型柔軟構造物の制振実験を行い、準能動型ダンパは最適受動ダンパより遥かに高い制振性能を示すことが判った。また、従来の準能動型ダンパより僅かな電流を印加するだけで効率的に制振を行うことができる省エネルギー型準能動制振用ダンパであることが判った。本ダンパ装置は、例えば、軌道上においてダンパ装置の制御を行うことが不可能な状態になった場合であっても最適受動ダンパとして振動エネルギーを吸収することができるという利点を有する。

であり、値が低いほど高い制振効果が得られることを示している。受動的制振用ダンパの場合、ダンパへの入力磁場が 25 mT 一定に保たれた場合に、最も低い U 値が得られており、この場合に最も高い制振効果が得られる最適受動ダンパとなることが判る。これに対し、準能動的制振用ダンパを用いることにより、最適受動ダンパより低い U 値が得られており、高い制振効果が得られることが判る。

従来の準能動的制振ダンパでは、ダンパ性能の制御を行うときの制振性能を向上させるために、ダンパ性能の制御を行わない場合の作動流体の基底粘度が低い値となるように設計するのが通常であった。このため、従来のダンパでは、ダンパへの電力供給装置を含む制御系の故障、またはダンパを制御しない場合では、粘度の低い受動型ダンパ(図 9 の 0 mT の場合に相当)によってエネルギー散逸を行うこととなるため、受動型ダンパとしての制振効果は期待できなくなる。これに対し、本研究で製作した磁性流体ダンパ装置では、例えば、ダンパへの入力磁場を最適受動ダンパの 25 mT に設定しておけば、上記のような問題が発生した場合であっても最適受動ダンパとして振動エネルギーを吸収することができる。さらに、本ダンパ装置において準能動的に制御を行うと、最適受動ダンパよりも遥かに速い振動の減衰が得られる。

4. まとめ

fail-safe を考慮した省エネルギー型準能動的制振用ダンパを実現するために、磁性流体の特性を用いた準能動型ダンパを考案・製作し、準静的試験により磁性流体ダンパの基本特性を測定した。

磁性流体ダンパの制振性能及び有効性を調べる

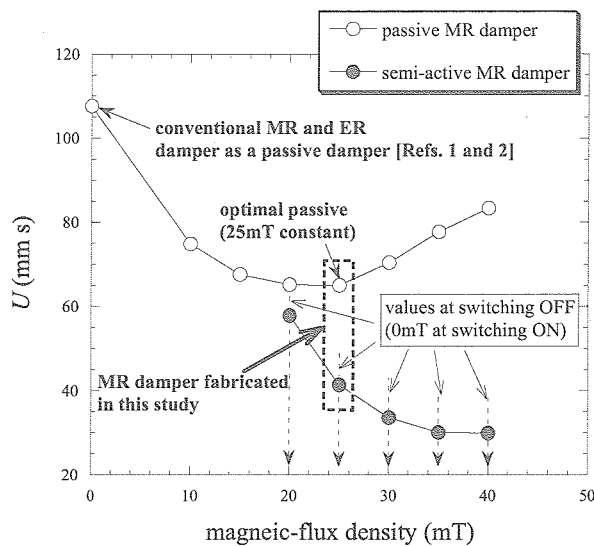


Figure 9 Calculated values of U obtained from passive and semi-active dampers

[参考文献]

1. Onoda, J., Oh, H.-U., and Minesugi, K., "Semiactive Vibration Suppression with Electrorheological-Fluid Dampers" *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 12, 1997.
2. Oh, H.-U., and Onoda, J., "An Experimental Study of a Semiactive Magneto-Rheological Fluid Variable Damper for Vibration Suppression of Truss Structures," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, No. 1, 2002.
3. Oh, H.-U., Onoda, J., and Minesugi, K., "Characteristics of a Liquid-Crystal Type ER Fluid Variable Damper for Semiactive Vibration Suppression," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 122, 2000.
4. Kelso, S. P., and Henderson, B. K., "Precision Controlled Actuation and Vibration Isolation Utilizing Magnetorheological (MR) Fluid Technology," *AIAA 2001-4568, AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 42nd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Seattle, Washington, 2001.