

印加磁場に対する粒状体ダンパーの減衰力特性

Damping Force of a Particles Damper in the Presence of Magnetic Field

林 浩一^{*1}(正員), 川合 琢真^{*1}, 井門 康司^{*1}(正員), 木内 裕也^{*2}

Koichi HAYASHI (Mem.), Takuma KAWAI, Yasushi IDO (Mem.), Yuya KIUCHI

Damping properties of particles damper using magnetic particles in the presence of magnetic field are investigated experimentally. The damping force vs. displacement curve of the particles damper is affected by the strength of applied magnetic field. The maximum damping force and absorption energy can be controlled by changing the intensity of magnetic field. The damping force of the particles damper depends on both of the vibration frequency and the size of the particles in the damper.

Keywords: damper, damping force, magnetic field, absorption energy, particle, vibration

1 緒言

粒子は固体であるが、その集合体である粒状体は流動性を有することが知られている。この特徴を生かし、オイルダンパーの作動流体の代わり、もしくは押出型鉛ダンパーの鉛の代わりに粒状体を充填した構造を持つダンパー（以下粒状体ダンパーと記す）が考案されている[1]。粒状体ダンパーはオイル等の流体を用いないことから、オイルシール等が不要になり、それにより構造の単純化や高い耐久性、さらには適用環境の拡大など様々な利点を持つことが期待できる。筆者らは粒状体にガラスビーズを用いた粒状体ダンパーに、強制変位を与えた場合の減衰力特性を実験的に調べ、粒状体ダンパーは、一般的に使われるオイルダンパーや摩擦ダンパーとは異なる減衰力特性を有することを明らかにしてきた[2]。

一方でダンパーは、制振対象や振動等の状況に応じて減衰力特性を変えることができる、減衰力可変ダンパーが必要とされることがある。それに対し、例えばオイルダンパーでは、メカニカルな機構を用いてオリフィス面積を変えることにより減衰力を変化させる方法が一般的に使われている。しかしこの方法には、構造の複雑化や耐久性の低下、低い応答速度等の欠点がある。これらの欠点を解消する方法の一つとして、ダンパーの作動流体に磁気機能性流体を用い、外部から磁場を印加することで必要な減衰力特性を得る方法が

考案されており[3-5]、様々な条件下における減衰力特性が調べられている[6-9]。この方法は粒状体ダンパーにも適用できると考えられる。すなわち粒状体ダンパーにおいても、粒状体に磁性粒子を用い、それに外部から磁場を印加することにより、減衰力特性を変化させることが期待できる。したがって本研究では、磁性粒子として鋼球を用い、外部コイルにより磁場を印加することができる減衰力可変粒状体ダンパーを製作し、印加磁場が粒状体ダンパーの減衰力特性に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とする。

2 実験

2.1 粒状体ダンパー

実験には Fig. 1 に示すダンパーを用いた。シリンダーとエンドカバーで囲まれた閉空間内に粒状体が充填されており、その中をピストンがシャフトと共に動く構造になっている。ピストンは円柱の両端にテーパ部を設けた形状になっている。シャフトはピストンの両端に配されており、ピストンの位置にかかわらずダンパー内容積は常に一定である。シャフトはリニアベアリングにより支持されており、しゅう動部の摩擦抵抗力は小さい。ダンパーのシリンダー外周部には磁場印加用のコイルが配されている。コイルは直径 0.8 mm のエナメル線を 972 回巻いたものである。このコイルに直流電流を流した際に発生する磁場分布を Fig. 2 に示す。

2.2 粒状体

粒状体には Fig. 3 に示すような鋼球（ベアリング鋼

連絡先： 井門 康司, 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, 名古屋工業大学大学院工学研究科ながれ領域,
e-mail: ido.yasushi@nitech.ac.jp

^{*1}名古屋工業大学 ^{*2}(株) デンソー

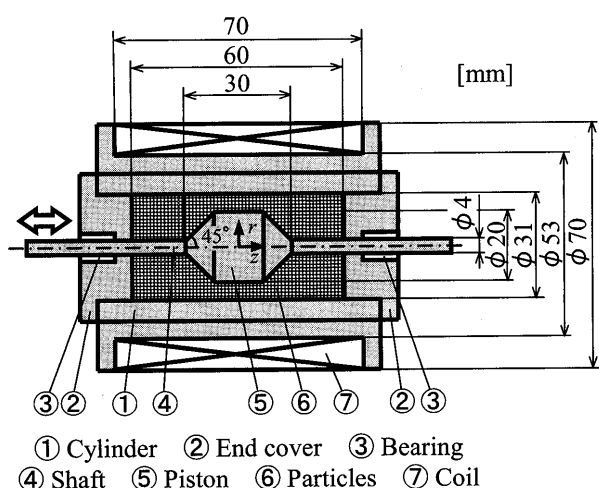
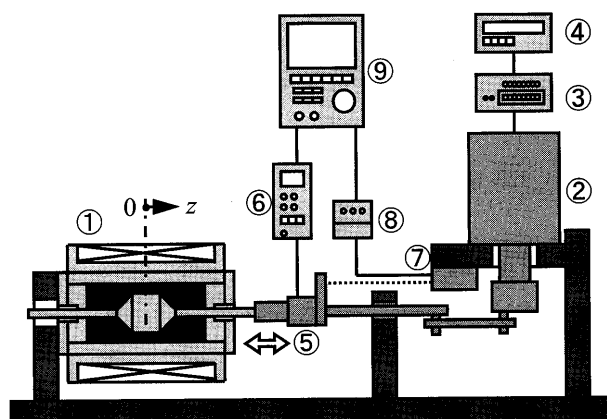


Fig. 1 Schematic of the particles damper.



① Damper ② Motor ③ Motor driver
④ Motor controller ⑤ Load cell
⑥ Strain amplifier ⑦ Displacement sensor
⑧ Amplifier unit ⑨ Oscilloscope

Fig. 4 Schematic of the experimental apparatus.

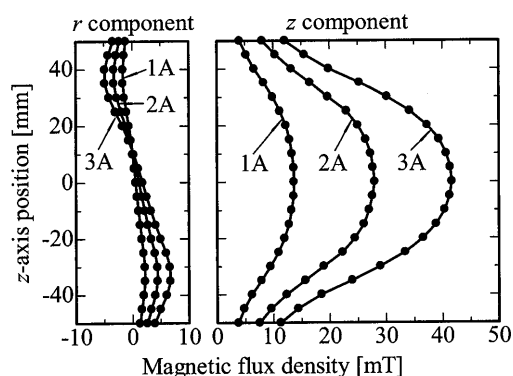


Fig. 2 Distribution of magnetic flux density.

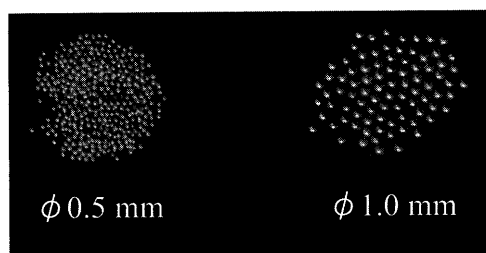


Fig. 3 Appearance of particles.

球, 材質 SUJ2, 等級 G500) を用い, エタノールで簡易的に脱脂した状態でダンパーに充填した。

2.3 実験装置

Fig. 4 に実験装置の概略図を示す。粒状体ダンパーは水平方向に変位するように設置してある。粒状体ダンパーには, モーター (オリエンタルモーター (株) BX6400S) の回転をスライダクランク機構で直線往復運動に変換したものを動力源として, 正弦波状の強制

変位が与えられる。強制変位の加振周波数はモーターコントローラーにより任意に設定可能であり, 振幅は全ての実験において 4 mm で固定されている。強制変位を与えた際の粒状体ダンパーの変位はレーザー変位センサー ((株) キーエンス センサーヘッド: LB-040, アンプユニット: LB-1000) を用い, 変位にともない発生する減衰力はロードセル ((株) 共和電業 LUX-A-1KN) を用いてそれぞれ測定し, オシロスコープ (横河電機 (株) DL1620) で記録した。なお Fig.4 において, ダンパーのピストンが z 方向プラス向きに変位する時, ロードセルには引張力が加わる。以下に示す実験結果においては, このようにロードセルに引張力が加わった時の減衰力の大きさをプラス, 反対にロードセルに圧縮力が加わった時の減衰力の大きさをマイナスとしている。

2.3 実験条件と方法

実験は Table 1 に示すように, 粒状体の粒子サイズ, 強制変位の加振周波数, コイルへの印加電流をパラメーターとして行った。印加電流は印加磁場強度を示す指標である。また充填する粒状体の量の指標としては, 次式で表される充填率を用いた。

$$\text{充填率} = \frac{\text{充填粒状体の質量}}{\text{充填体積} \times \text{粒子密度}} \quad (1)$$

充填率は全ての実験条件において 0.590 とした。

なお粒状体ダンパーでは, 粒状体充填直後に測定さ

Table 1 Experimental condition.

Particle diameter [mm]	0.5, 1.0
Packing fraction	0.590
Frequency [Hz]	1, 3, 5
Electric current [A]	0, 1, 2, 3

れる減衰力の大きさと、しばらくの間加振した後に測定される減衰力の大きさは異なる現象が見られるため、本実験では加振周波数 1 Hz で 1 分間、その後 5 Hz で 60 分間の加振を行い、さらにその後、各実験条件における印加電流と加振周波数条件を 5 分間維持した後に減衰力の測定を行った。減衰力は連続した 10 周期分を測定し、それを加算平均した値を用いた。なお各条件における測定前には、使用する鋼球を十分に消磁している。また測定された減衰力は、ダンパーしゅう動部における摩擦力を含んだものであるが、この摩擦による抵抗力は、ダンパーが発生する減衰力に対して十分小さいため無視している。

3 実験結果および考察

3.1 印加磁場強度の影響

Fig. 5 に粒子サイズ 0.5 mm, 加振周波数 1 Hz, 印加電流 0 A の場合における減衰力-変位曲線を示す。時間進行は時計回り方向である。無磁場下における粒状体ダンパーの減衰力は図中に示すように、変位に対する減衰力の増加勾配の違いにより 3 つのモードに分けることができる。すなわち、死点直後の比較的勾配が小さい領域 (モード I), その後に続く比較的勾配が大きい領域 (モード II), さらにその後に続くほぼ勾配が 0 になる領域 (モード III) であり、これらは充填されている粒状体の状態の違いにより生じていると考えられ

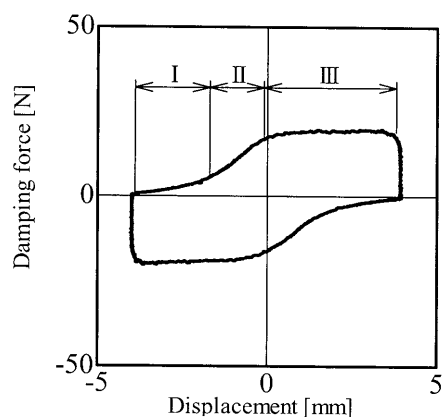
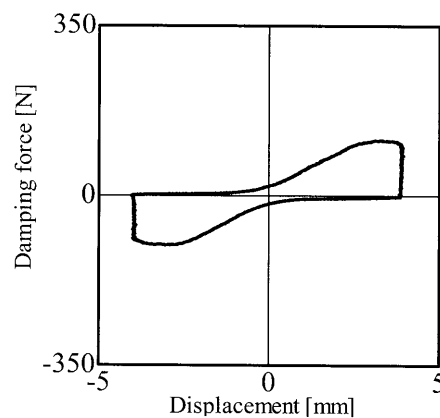


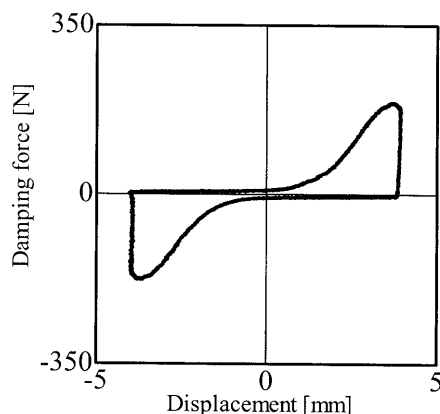
Fig. 5 The damping force vs. displacement curve in the absence of magnetic field (Diameter of the particles = 0.5 mm, Frequency = 1 Hz, Electric current = 0 A).

る。(このモードの違いについての詳細は文献[2]を参照されたい。)

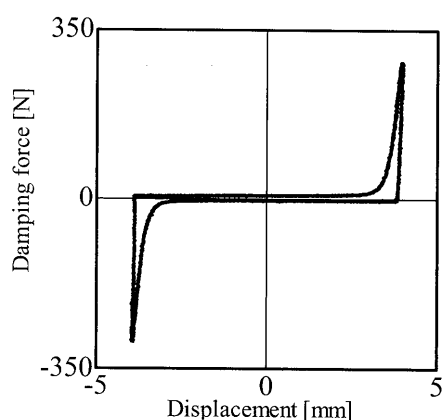
一方 Fig. 6 は、粒子サイズと加振周波数は同じ条件で、粒状体に磁場を印加した場合の減衰力-変位曲線を示したものである。磁場を印加した場合においても、



(a) Electric current = 1 A



(b) Electric current = 2 A



(c) Electric current = 3 A

Fig. 6 Influence of the applied magnetic field on the damping force vs. displacement curve (Diameter of the particles = 0.5 mm, Frequency = 1 Hz).

Table 2 Gradient of damping force.

Electric current [A]	Gradient [N/mm]	
	mode I	mode II
0	1.72	7.2
1	1.16	36.1
2	1.14	92.8
3	0.47	601.1

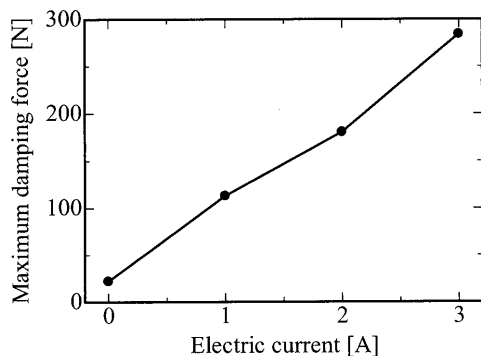


Fig. 7 Relationship between the maximum damping force and the electric current (Diameter of the particles = 0.5 mm, Frequency = 1 Hz).

比較的印加磁場が弱い場合には、無磁場下の場合と同様に3つのモードが存在しているが (Fig. 6(a)), 印加磁場が強くなるにしたがいモードIIIの領域が減少していき (Fig. 6(b)), さらに印加磁場が強くなるとモードIIIの領域が見られなくなる (Fig. 6(c))。またモードIおよびIIにおける減衰力の増加勾配は Table 2 に示すように、印加磁場によって異なっており、モードIでは印加磁場が強くなるほど勾配が小さくなり、反対にモードIIでは印加磁場が強くなるほど勾配が大きくなる傾向にある。さらに各印加磁場強度における最大減衰力の大きさは、Fig. 7 に示すように印加磁場が強くなるにしたがい増加する傾向にある。

以上の現象を踏まえると、粒状体ダンパーの減衰力は次のようなメカニズムで発生しているものと考えられる。まず粒状体ダンパーは、主にピストンの変位にともなう粒状体の流動抵抗により減衰力が発生する。ピストンが最大変位点直後の位置にある場合、ピストン進行方向前方領域の局所的な粒状体充填率は低くなっており、一部には粒状体が存在しない空間がある。この状態がモードIであり、粒状体に磁場を印加していない状態では、粒子間に磁気的な結合力が作用しないために、粒状体の局所的な充填率は低くなっている。そのため、粒状体が存在しない空間は Fig. 8(a) に示すように比較的小さく、重力の影響を受けてダンパー内

の上側にあるものと考えられる。一方で粒状体に磁場を印加すると、粒子間に磁気的な結合力が作用し、それにより Fig. 8(b), (c) に示すように粒状体はピストンを取り囲むように凝集する。それにより粒状体の局所的な充填率は高くなるとともに、粒状体が存在しない空間は大きく、ほぼダンパーの全断面にわたって存在する。なおこの場合は印加磁場が弱いほど重力の影響を受けて、ダンパー下側の領域に存在する粒状体の量が多くなるものと考えられる。このように粒状体が存在しない空間は印加磁場強度の影響を受けて変化するが、この空間の存在により、印加磁場が強くなるにしたがい、ピストンの変位により流動する粒状体の量が減少するため、流動抵抗も小さくなる。したがってモードIでは、減衰力の増加勾配が、印加磁場が強くなるにしたがい小さくなる傾向にあると考えられる。

ピストンの変位が進み、粒状体が存在しない空間が無くなると、ピストン進行方向前方領域の粒状体は流動しながら圧縮されるとともに、局所的な充填率が高くなっていく。この過程ではモードIよりも粒状体の流動抵抗が大きくなる。この状態がモードIIである。この状態における、ピストン進行方向前方領域の局所的な粒状体充填率は、粒状体への印加磁場が強いほど高くなっており、さらにそれに加えて粒子間に作用す

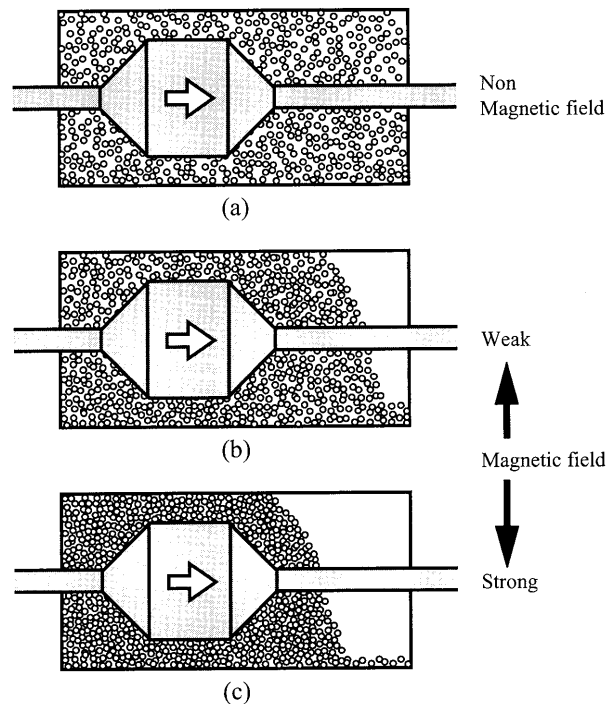


Fig. 8 State of particles in the damper at mode I. The gaps between the particles are exaggerated.

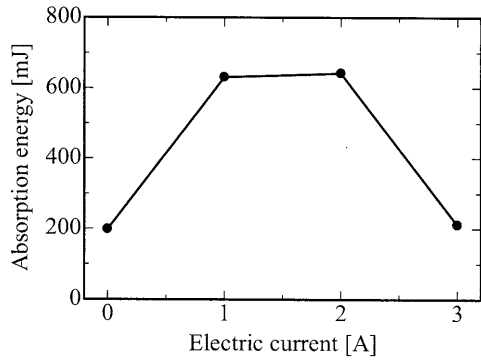


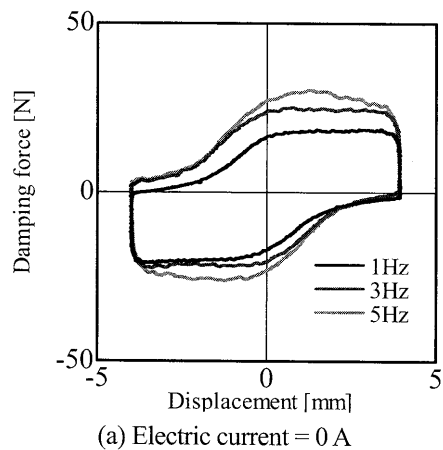
Fig. 9 Relationship between absorption energy and electric current (Diameter of the particles = 0.5 mm, Frequency = 1 Hz).

る磁気的な結合力が增大する影響を受けて、粒状体の流動抵抗は大きくなる。したがってモードIIにおける減衰力の増加勾配、および最大減衰力が、印加磁場が強くなるにしたがい大きくなる傾向にあると考えられる。

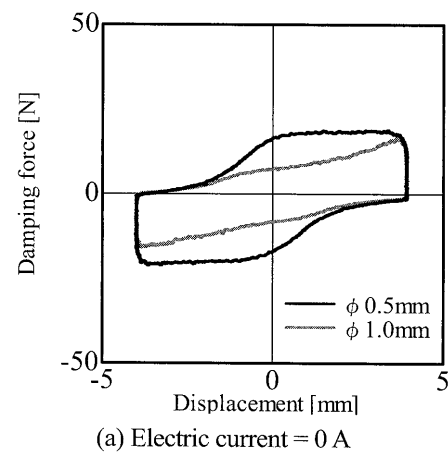
粒状体ダンパーは前述したように、粒状体への印加磁場強度を変えることにより、減衰力の発生パターンが変化する。したがってダンパーの吸収エネルギーも印加磁場強度とともに変化するはずである。Fig.9 は Fig. 5 および Fig. 6 に示した、粒子サイズ 0.5 mm, 加振周波数 1 Hz の場合における減衰力-変位曲線を数値積分することで求めたダンパーの吸収エネルギー量と、コイルへ流す電流の関係を示したものである。印加磁場が弱い領域では、印加磁場強度の増大にともない吸収エネルギー量も増加しているが、反対に印加磁場が強い領域では、印加磁場強度の増大にともない吸収エネルギー量は減少している。この現象は、ほぼ全領域において印加磁場の増大とともに吸収エネルギー量も増加する傾向が見られる磁気機能性流体ダンパー[8]とは異なる点である。

3.2 加振周波数および粒子サイズの影響

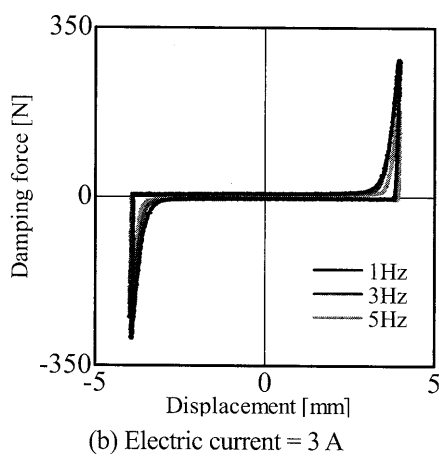
粒子サイズ 0.5 mm の粒状体を用い、加振周波数を



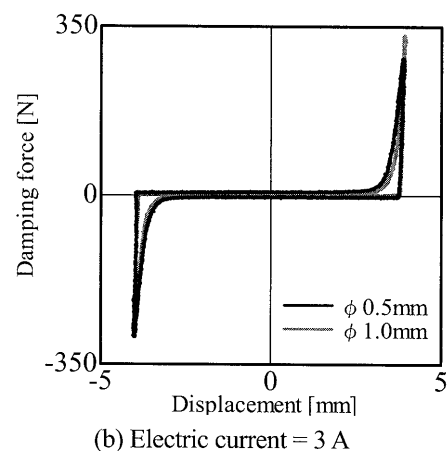
(a) Electric current = 0 A



(a) Electric current = 0 A



(b) Electric current = 3 A



(b) Electric current = 3 A

Fig. 10 Influence of vibration frequency on the damping force vs. displacement curve (Diameter of the particles = 0.5 mm).

Fig. 11 Influence of particle size on the damping force vs. displacement curve (Frequency = 1 Hz).

変えた場合の減衰力-変位曲線を,印加電流毎にまとめたものを Fig. 10 に示す。粒状体に磁場を印加しない状態では,加振周波数が違うことで減衰力-変位曲線の形状が大きく異なっており,加振周波数が高いほど減衰力が大きい領域が見られる (Fig. 10(a))。この減衰力の大きさの差は主に,ピストンとピストンにより流動させられる粒状体の速度差により発生するものと考えられる。一方で粒状体に磁場を印加した状態では,加振周波数の違いによる減衰力-変位曲線の形状に,顕著な差は見られない (Fig. 10(b))。この現象は,磁場を印加した際にピストン進行方向前方領域に生じる粒状体が存在しない空間が,加振周波数に依存せずに,同じように生じていることを表している。

Fig. 11 は周波数 1 Hz で加振し,粒状体の粒子サイズを変えた場合の減衰力-変位曲線を,印加電流毎にまとめたものである。粒状体に磁場を印加しない状態では,粒子サイズが違うことで減衰力-変位曲線の形状が大きく異なっており,粒子サイズが直径 0.5 mm の粒状体を用いた場合の方が,減衰力が大きい領域が見られる (Fig. 11(a))。この減衰力の大きさの差は,各粒状体の流動性の差を表しており,直径 0.5 mm の粒状体を用いた場合の方が,粒状体の流動性は悪いと考えられる。一方で粒状体に磁場を印加した状態では,加振周波数の違いによる減衰力-変位曲線の形状に,顕著な差は見られない (Fig. 11(b))。この現象は,磁場を印加した際にピストン進行方向前方領域に生じる粒状体が存在しない空間が,粒状体の粒子サイズに依存せずに同じように生じていることを表していると考えられる。

4 結言

粒状体ダンパーに磁場を印加した場合の減衰力特性を実験的に調べた結果,次のことが明らかになった。

- ・印加磁場強度を変化させると,減衰力-変位曲線の形状が変わる。
- ・印加磁場強度を強くすると,最大減衰力は増加していくが,吸収エネルギー量は減少する領域がある。
- ・印加磁場強度が強い場合には,異なる加振周波数条件や,異なる粒子サイズの粒状体を用いた場合でも,それらの影響を受けず,減衰力-変位曲線の形状に顕著な差は見られない。

これらの知見は,磁気を利用した減衰力可変機能を持つ粒状体ダンパーの可能性を検討する上で,有意義であると考えられる。

(2011年3月31日受付,2011年10月21日再受付)

参考文献

- [1] 太田徹造,防振装置,特開平 8-219377.
- [2] 林浩一,井門康司,粒状体の流動性を利用したダンパの減衰特性,実験力学,Vol. 10, No. 1, pp. 63-68, 2010.
- [3] 森下信,新素材による制振,免震,日本機械学会誌,Vol. 110, No. 1062, pp. 379-382, 2007.
- [4] 制振工学ハンドブック編集委員会編,制振工学ハンドブック,コロナ社,2008.
- [5] 出頭茂,中村太郎,MR 流体ダンパを用いた振動制御の最前線に迫る,精密工学会誌,Vol. 72, No. 7, pp. 809-812, 2006.
- [6] 島田邦雄,神山新一,磁性流体の粘性ダンパの振動特性に関する基礎的研究,日本機械学会論文集 (B 編), 57 巻, 544 号, pp. 4111-4115, 1991.
- [7] 村上貴裕,酒井理哉,中野政身,変位に依存する減衰特性を持つパッシブ式 MR ダンパの開発に関する研究,日本機械学会論文集 (B 編), Vol.75, No.753, pp. 985-991, 2009.
- [8] K. Hayashi, R. Takagi and Y. Ido, Damping Properties of a Damping Force Variable Damper using Magnetic Functional Fluids, *Journal of JSEM*, Vol. 9, Special Issue, pp. 81-85, 2009.
- [9] 林浩一,高木竜路,赤松渉平,井門康司,磁気機能性流体ダンパに用いる磁性粒子の材質や形状が減衰力に及ぼす影響,実験力学,Vol. 10, No. 4, pp. 433-438, 2010.