

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760165

研究課題名（和文）誘電機能性流体を用いた受動・能動型双方に適用可能な慣性ダンパの開発

研究課題名（英文）Liquid Inertia Damper that Utilizes Electromotive Induction for Passive and Active Vibration Control Device

研究代表者

松岡 太一（MATSUOKA TAICHI）

明治大学・理工学部・講師

研究者番号：80360189

研究成果の概要（和文）：導電性流体と磁性粉体をピストン・シリンダに封入し、細長いバイパス管内に電界および磁界を印加した時に電磁誘導により流路内の流体を制御し、かつ磁界により見かけのオリフィス径を操作することによって、受動・能動の双方に適用可能な流体式慣性ダンパを開発した。バイパス管内部の塩水に電界と磁界を加えると、電磁誘導により内部の流体に力が働き移動すること、および電磁石の磁極配置を変えた場合のダンパの抵抗力が変化することが確認された。

研究成果の概要（英文）：An liquid inertia damper that utilizes electromotive induction of electrically fluid applying for not only passive and also active type vibration control device is developed. Damper has a long by-pass pipe filled in salty water with electric node and magnetic node, and electromagnets are installed around the by-pass pipe. It is obvious from test results that the liquid can move under high voltage and high magnetic field, and resisting force of the test damper are controllable by the Fleming interaction under switching eight electromagnetic nodes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動制御

## 1. 研究開始当初の背景

これまでの流体式のダンパは、オイルダンパのほか、ER流体やMR流体といった機能性流体を用いたダンパなどが多く開発されている。これらの装置は、大荷重の可変減衰力が得られることが特長である。これらの振動エネルギーを消散させる方法は、振動系の弾性能や減衰能を物理的に変化させること

によって最適な振動抑制効果を得るセミアクティブ制振であり、エネルギーを積極的に消散させるアクティブ制振に比べて比較的安価で同等性能かつロバスト性に優れているという観点から現在多用されている。しかし、可変機構には必ず機械的および電氣的な制限や時間遅れが生じてしまうため、風や交通振動等による比較的揺れの遅い振動には

対処できるものの、地震動の早さには追従することが困難といった問題点がある。殆どのセミアクティブ制振では、受動要素を切替える（例えば強震時に最大減衰係数に固定してしまう方法）ものや、制御手法を切替え（例えば受動と能動を数秒単位で切り替え）て、エネルギーを吸収させる方法である。これらの方法では、可制御域と不可制御域（例えば負減衰）が存在してしまい、本来のアクティブ制振の効果が薄れてしまう。

## 2. 研究の目的

流体式の減衰力可変型ダンパにはオイルダンパや機能性流体を用いたものなど様々なものが開発されている。セミアクティブ制振は小さなエネルギー供給によりダンパの特性を変化させて振動系の応答を制御する方法である。アクティブ制振に比べて必要なエネルギー供給が少ないことや常に振動を抑制する方向のみに力が働くので振動系を励振することがないなどの利点があり様々な分野で利用されている。しかしアクティブ制振はセミアクティブ制振に比べて積極的にエネルギーを消散させ振動を制御するので、応答性が高く上記の機械的および電気的な制限や時間遅れが生じにくいことが期待される。磁界によって見かけの減衰力を操作するダンパには磁性流体を用いたMRダンパがあるが、これはダンパの全体に機能性流体が封入されており経年劣化による沈殿、凝固などや鉄粒子とオイルが分離してしまうなどの問題があった。

本研究ではバイパス管を用いた流体ダンパのバイパス管の一部を金網で仕切り、その部分にのみ鋼球を封入する。その他の部分は導電性の流体で満たされている。磁界と電界を様々な方向に印可できるようにその部分の周りに複数の電磁石と電極を取り付ける内部の鋼球に磁界をかけることによって鋼球にクラスタを形成させる。電磁石により磁界を変化させることができるのでクラスタの形状なども制御できることが期待される。これによりバイパス管内に圧力差が生じるので見かけの減衰力を変化させることができる。磁界を加えていない場合には鋼球は力を受けないので流路の妨げにはならない。これはMRダンパと似た仕組みであるが、鋼球は金網に仕切られた空間内にとどまり、導電性の流体のみが全体に封入されているので上述のような問題は生じない。このような方法で流体と鋼球を分離した状態で可変減衰力を得るとするのがこの研究での新しい試みの一つである。また、磁界と電界の両方を印加すると内部の流体は電磁誘導によりフレミング左手の法則に従って力を受ける。ダンパが力を受け内部の流体が流れているとき、これと反対の方向に力を加えることによ

って抵抗力となり、振動を能動的に制御することと期待される。上で述べたクラスタ形成による力と磁界と電界を印加したときに生じる力を組み合わせたアクティブダンパを開発することが本研究の最終的な目的である。

## 3. 研究の方法

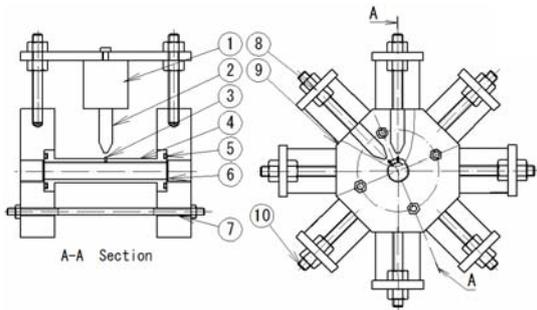
電界と磁界を印加した場合のフレミングの法則による力と、磁界のみを印加した場合の鋼球のクラスタ形成による力それぞれについて調べるため実験装置を製作した。電極の断面積や電磁石の個数の違う2つの実験装置（タイプ1、タイプ2）を製作し、実験を行った。また、理論式の導出とともに有限要素法解析ソフト（ANSYS）を用いて磁場解析を行い内部の磁束密度分布などを調べ実験結果と比較した。

### (1) 構造

実験装置タイプ1の構造を図1に示す。試作した実験装置を図2に示す。二つの八角形ブロック（アルミ）の中心に内径10mmの亚克力パイプを固定し、そのパイプ内に導電性の流体を入れてある。ブロックの両端は管用継ぎ手を用いてチューブが取り付けられている。チューブは外径12mm、内径10mmの耐薬品性の高いフッ素樹脂チューブである。亚克力パイプは直径1mmの穴が8個開けられており、その穴に鉄製の電極が挿入され、内部の流体に電流を流すことができるようになっている。また漏えい防止のために亚克力パイプの端面にOリングを、アルミブロックにはシリコンゴムシートが取り付けられている。内部の鋼球をバイパス管部分に封入するため、穴間隔が0.5mmの金網を挟む。亚克力パイプの外周に8個の電磁石（電気抵抗約320Ω）が取り付けられている。電磁石の鉄心は、亚克力パイプに近づけるために延長され、電磁石コイル部から発生する磁界の磁束密度がより高くなるように先端をテーパ状に加工してある。また、磁気を効率よく伝えるため、鉄心には透磁率の高い工業用鋼（SS400）を使用した。磁界を様々な変化させることができるが、発生する磁界が十分大きくないのでクラスタ形成による抵抗力特性の検証に用いた。

実験装置タイプ2の構造を図3に示す。試作した実験装置を図4に示す。亚克力ブロックに20mm×20mmの溝（流路）を掘り、上板を取り付け両端には管用継ぎ手を取り付ける。流路の側面に溝を掘り、20mm×20mmの電極を取り付ける。タイプ1の電極よりも断面積の大きい電極を使用した場合の流体に働く力の違いを調べる。タイプ1の問題点としては電気分解とそれによって発生する塩素で電極が劣化してしまうことが挙

げられる。これを解決するため耐腐食性が強くイオン化傾向の低いチタン製の電極を用いることとする。内部の気密性を高めるためにアクリルブロックと上板の間には厚さ 0.5 mm のシリコンゴムシートを二枚挟む。この間に導線を通し、電極に電流を流す。内部の流体の漏れを防ぐために導線の周りにはシーリング材を塗布しておく。このアクリルブロックの両端に四角形のアルミブロックを取り付ける。このアルミブロックに固定用の板を取り付け、上下に電気抵抗が約 25 Ω の電磁石を取り付ける。タイプ 1 では電磁石の数が多く直接管中心部に近づけることが出来なかったが、タイプ 2 では電磁石の個数が 2 個なのでアクリルブロックに直接近づけることが出来る。流体に働く力が最大になる磁極配置は磁力線が電流の向きと直交しているときであるので電磁誘導による力を得るためには磁極の向きを変化させる必要がなく、2 つの電磁石のみでも電磁誘導による力の検証には問題がない。またタイプ 1 よりも大型の強力な電磁石を用いるのでタイプ 1 よりも大きな力が得られると期待される。しかし磁極配置のパターンを変化させることはできないので磁界と電界によって生じる力の検証に用いる。



1. Electromagnet
  2. Iron core
  3. Electrode
  4. Acrylic pipe
  5. Sealing rubber
  6. Wire mesh
  7. Pressure bar
  8. Fix plate
  9. Fix block
  10. Screw bar
- Fig. 1 Diagram of the test by-pass part type 1

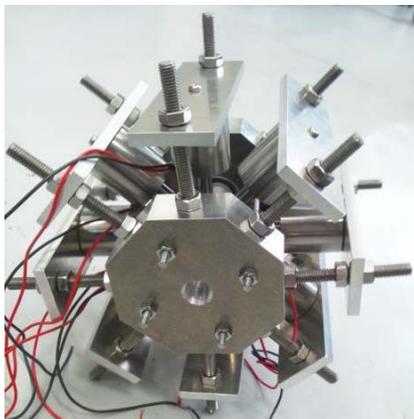
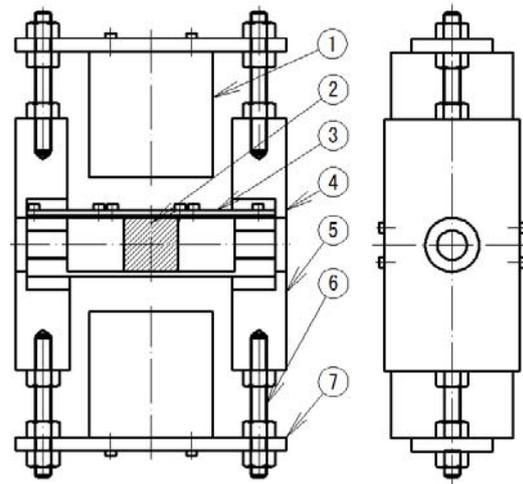


Fig. 2 Photo of type 1



1. Electromagnet
2. Electrode
3. Upper plate
4. Magnetic block
5. Fix block
6. Screw bar
7. Fix plate

Fig. 3 Diagram of the test by-pass part type 2

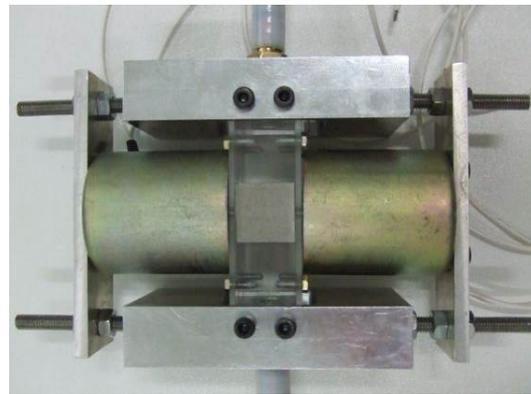


Fig. 4 Photo of type 2

## (2) 磁場解析

磁界と電界により内部に働く力を計算するため、製作した実験装置の管内部に生じる磁界の磁束密度を測定した。図 5 に示すようにガウスメーターのプローブを管の中心に挿入し、電磁石に加える電圧とそれぞれの電磁石の磁極の配置を変化させながら磁束密度を測定した。ガウスメーターのプローブの測定面の方向はそれぞれの磁極配置において磁束密度が最大となる方向とした。それぞれの磁極配置のパターンは図 6 に示す。タイプ 1 の測定結果を表 1 に、タイプ 2 の測定結果を表 2 にそれぞれ示す。タイプ 1 では管の内径が狭いので中心部分の磁束密度を測定したが、タイプ 2 では管の内部が広く、測定する場所によって磁束密度が大きく異なるので最大値と最小値をそれぞれ測定した。

磁極配置①が最も高い磁束密度が得られた。これは片方ずつに同極を配置したので管を横切るようにして磁力線が分布しているためであると考えられる。磁極配置②、③の

場合、隣り合う異極に磁力線が通ってしまい中心付近では磁極配置①に比べ磁束密度が低くなっている。磁極配置④はすべて同極の場合であるが、磁力線同士が反発しあい中心付近の磁束密度がほかの場合に比べて著しく低いことが分かる。磁極配置⑤、⑥の場合は最大値の差は電磁石付近の値なのでもう一方の電磁石の電磁石による影響が及びにくく、中心付近の磁束密度の差よりも小さかったと考えられる。

次に、実験装置の管内部の磁力線と磁束密度の分布を調べ、クラスタ形成の様子などと比較するため有限要素法解析ソフト (ANSYS) を用いて、図 7、図 8 に示す解析モデルを作成し、磁場解析を行った。アクリルパイプとコイル、電磁石とコイルの間のゴムの比透磁率を 1 とし、電極と電磁石の鉄心の比透磁率は表 3 の B-H 特性によって定義した。コイルの線径は実際の磁束密度の測定結果から同定し、タイプ 1 では 0.12 mm、タイプ 2 では 0.54 mm とし、磁束密度測定の際に測定した電流の値から電流密度を計算した。タイプ 1 は 60 V で 1.4 A、タイプ 2 は 57.5 V で 3.0 A とした。電磁石の磁極配置は図 5 の磁極配置を用いた。図 9 はタイプ 1 の磁極配置が図 6 の①、②、③、④の磁束線図を、図 10 はタイプ 2 の磁極配置が図 6 の⑤、⑥の磁束線図を示す。図 10 はタイプ 1 の管内の磁束密度の等高線図である。

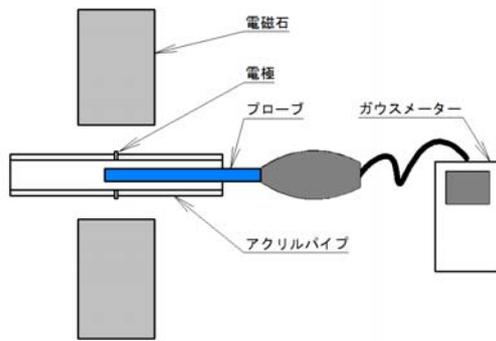


Fig. 5 Test setup

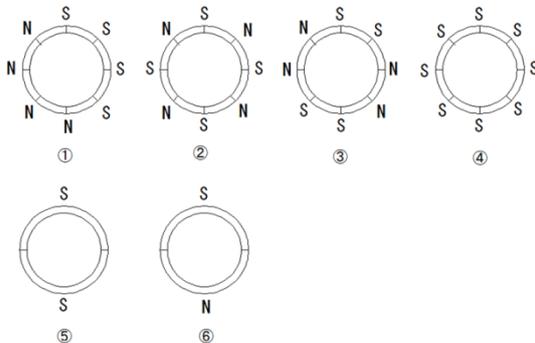


Fig. 6 Electromagnetic pole conditions

Table 1 Magnetic flux density of type 1

配置	電圧 [V]	電流 [A]	磁束密度 [mT]
①	10.0	0.203	6.61
	20.0	0.407	13.01
	30.0	0.608	18.9
	40.0	0.81	24.3
	50.0	1.01	28.9
	60.0	1.20	33.2
②	10.0	0.24	2.49
	20.0	0.48	4.31
	30.0	0.72	6.71
	40.0	0.95	8.68
	50.0	1.19	10.25
	60.0	1.41	11.97
③	10.0	0.23	0.63
	20.0	0.46	1.55
	30.0	0.69	2.44
	40.0	0.90	3.16
	50.0	1.12	4.03
	60.0	1.42	4.46
④	10.0	0.23	0.34
	20.0	0.47	0.67
	30.0	0.69	0.93
	40.0	0.92	1.10
	50.0	1.15	1.27
	60.0	1.40	1.81

Table 2 Magnetic flux density of type 2

配置	電圧 [V]	電流 [A]	磁束密度 [mT]	
			最大	最小
⑤	10.0	0.58	—	4.50
	20.0	1.14	52.2	8.74
	30.0	1.68	75.7	13.05
	40.0	2.21	94.2	18.0
	50.0	2.75	106.8	21.8
	56.8	3.00	114.8	24.6
⑥	10.0	0.58	36.0	19.2
	20.0	1.14	64.6	38.5
	30.0	1.68	90.8	56.0
	40.0	2.21	117.1	68.9
	50.0	2.75	142.2	81.3
	56.8	3.00	161.1	94.1

図 9(a)に示すように N, S 極を片側半分ずつにすると管内を横切るように磁力が分布していることが分かる。これに直交するように二つの電極を選べば磁界と電界による力は一番大きくなること分かる。実際の磁束

密度の測定でもこの配置が最も磁束密度が高かったため電磁石を8個使う場合にはこの配置が大きな力を生じさせるためには一番適しているといえる。図9(b)のようにS極とN極を交互に配置すると隣り合う鉄心同士の間には多くの磁力線が分布しており、管の中心部磁束密度が低いことが分かる。図9(c)はS極とN極をまとめて配置した。図9(b)に比べて磁束線が内側に入っていることが分かる。図9(d)はすべて同じ極にした場合であり、磁力線が反発しあって内部には磁力線があまり分布しない。よって電磁誘導による力については磁極配置②、③、④は電流が横切ることのできる磁力線が少なく力を発生させることが難しいと考えられる。図9(e)のように2つの電磁石を反発するような磁極配置にすると中心付近で磁束密度が低くなり、外側で強くなっていることが分かる。図9(f)のように異なる磁極を向い合わせると全体に一樣な磁界が分布していた。

Table 3 B-H characteristic

磁界強度 H	磁束密度 B
200	0.88
300	1.10
400	1.22
500	1.30
600	1.36
800	1.43
1000	1.47
1400	1.51
2000	1.55
4000	1.61
6000	1.66
8000	1.70
12000	1.76

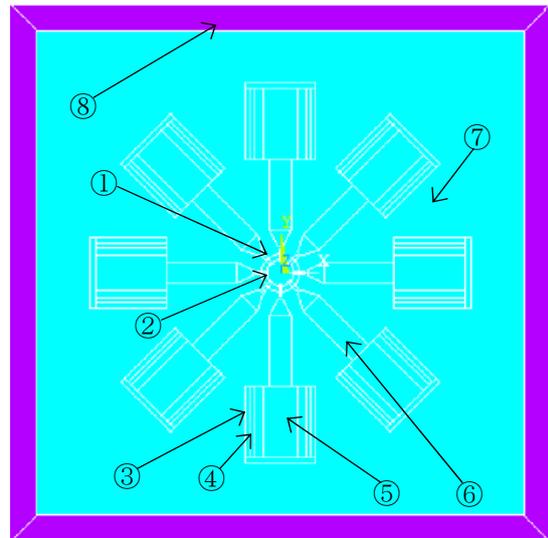
(3) 電磁誘導の理論式

タイプ1とタイプ2の中に導電性の流体を封入し、電場と磁場を印加したときの内部流体に働く力の計算式を導出し、理論値を計算した。図11は実験装置の中心部の計算モデルである。どちらのタイプも一樣な磁束密度Bの磁界が加えられており、管内の流体の粘性抵抗は無視できるものとする。流体の導電率はσとする。

電磁誘導によって生じる力は磁界と電界の加えられている部分に働くので、その部分の電磁力密度fは、電流密度iと磁束密度Bを用いると

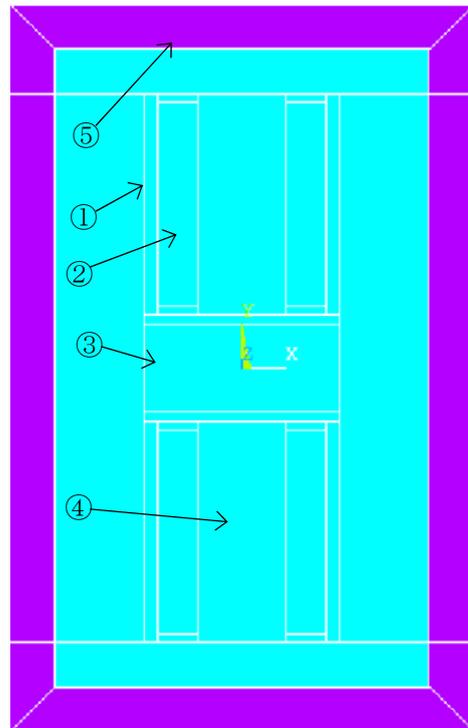
$$f = iB \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表される。実際に生じる力は上式に力の生じる部分の体積を乗じたものであり、これをFとする。一樣な磁場が全体に加えられてい



- 1. Magnetic pipe    2. Electrode    3. Rubber
- 4. Coil            5. Electromagnet    6. Iron core
- 7. Air                8. Infinite boundary

Fig. 7 Analytical model of type 1



- 1. Electromagnet    2. Coil    3. Magnetic block
- 4. Iron core        5. Infinite boundary

Fig. 8 Analytical model of type 2

ると仮定し、力の働く部分は電極の間の部分とする。電極間距離をd、電極の面積をAとすると以下の式となる。

$$F = fAd = iBAD \quad \dots\dots\dots(2)$$

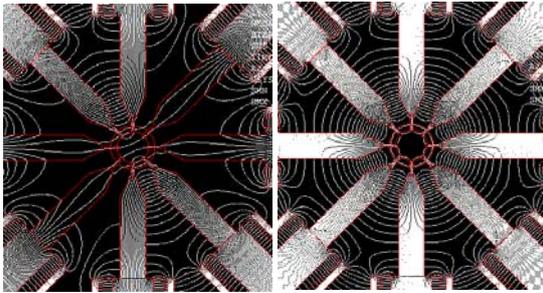
電流密度iは電極間に流れる電流を電極の断面積で割って計算することもできるが、流れ

る電流の大きさは電極の断面積自体によって変化してしまうので、これを用いると棒電極の場合と板電極の場合で比較ができない。よってここでは電極の形状に依存しない一定の値を取ることができる電極間電圧を用いて計算する。σを実験で用いる食塩水の導電率、Eを電極間の電場とすると電流密度は以下のように表される。

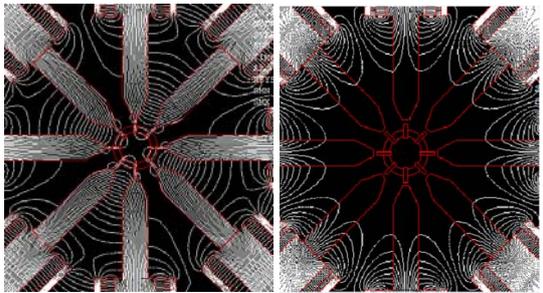
$$i = \sigma E = \sigma \frac{V}{d} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、上の式は流体に速度がない場合であり流体が速度を持っている場合、導体が磁場中を移動していると考えられるので、それによる誘導電界も考慮に含めなくてはならない。速度vで一様な磁束密度Bの磁場中を移動する導体はその運動を妨げる方向に誘導電界Bvを受けるので、これを考慮した電流密度は

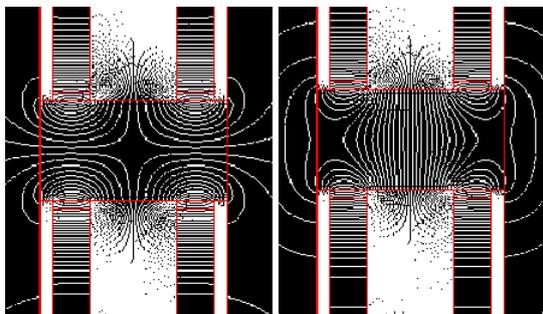
$$i = \sigma \left( \frac{V}{d} - Bv \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$



(a) Case No. 1                      (b) Case No. 2

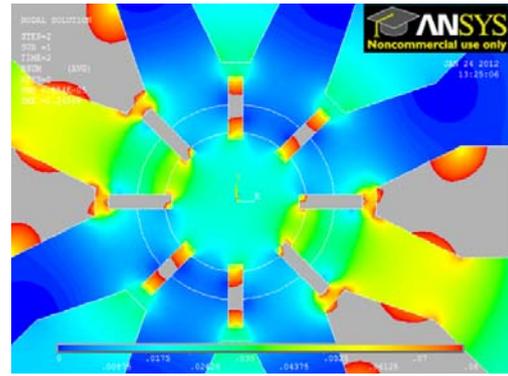


(c) Case No. 3                      (d) Case No. 4

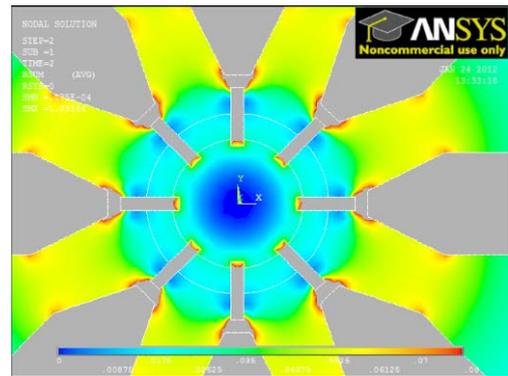


(e) Case No. 5                      (f) Case No. 6

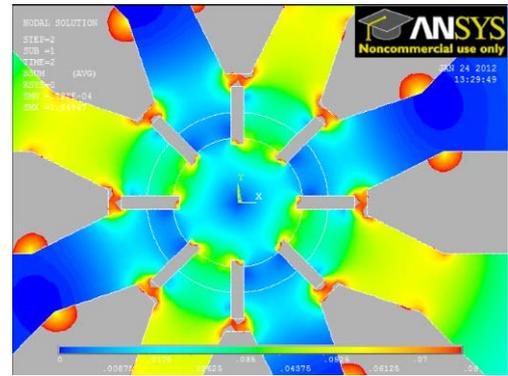
Fig. 9 Analyzed results of magnetic flux



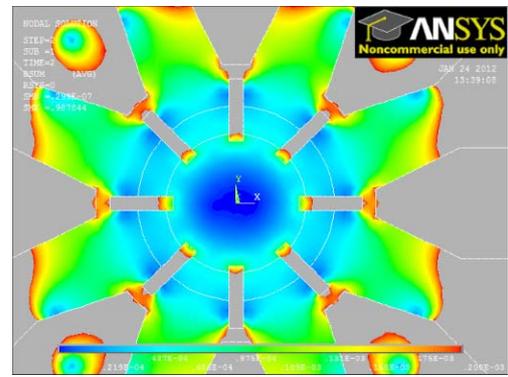
(a) Case No. 1



(b) Case No. 2



(c) Case No. 3



(d) Case No. 4

Fig. 10 Analyzed contour diagrams of magnetic flux density

と表せる. 式(4)を式(2)に代入すると以下のような磁界と電界によって生じる力の一般式が得られる.

$$F = \sigma \left( \frac{V}{d} - Bv \right) BAAd \quad \dots\dots\dots(5)$$

次にタイプ1, タイプ2それぞれについて各値を代入し, 働く力の大きさを比較する.

タイプ1の計算モデルを図11(a)に示す. 棒型電極の直径を $2r$ , アクリルパイプの直径を $d$ とする. タイプ1の管内に働く力を $F_1$ とし, 式(5)に代入すると以下の式が得られる.

$$F_1 = \sigma \left( \frac{V}{d} - Bv \right) B\pi r^2 d \quad \dots\dots\dots(6)$$

タイプ2の計算モデルを図11(b)に示す. 電極の幅を $L$ , 高さを $b$ , 電極間距離を $d$ として式(5)に代入すると以下のようにタイプ2の内部に働く力 $F_2$ が求まる.

$$F_2 = \sigma \left( \frac{V}{d} - Bv \right) BA b L \quad \dots\dots\dots(7)$$

次に棒電極の場合と板電極の場合の管に生じる力 $F_1$ と $F_2$ を比較する. 例として流体の初速度がない場合, つまり $v = 0$ を式(6)および式(7)に代入し, 以下の式となる.

$$F_1 = \sigma BVr^2 \pi \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$F_2 = \sigma BVbL \quad \dots\dots\dots(9)$$

上式に実際の実験装置の値を用いて計算すると,  $r = 0.5 \text{ mm}$ ,  $a = b = 20 \text{ mm}$ のとき式(8)と式(9)の割合は以下になる.

$$\frac{F_2}{F_1} = 509.3 \quad \dots\dots\dots(10)$$

電圧と磁束密度が同じ条件の場合約509倍の力が働くことが分かる. 実際には板電極のほうが使用する電磁石の違いで磁束密度は大きくなるのでさらに大きな力が得られることになる. 導出した式(6), 式(7)からわかるように, 実際にはその時の流体の速度によって働く力は変化する.

タイプ1の場合, 表1より最大磁束密度は図6の①の磁極配置のときの値(60 V, 1.2 Aで磁束密度 33.2 mT)を用いて計算する. 食塩水の濃度は10%であり, 導電率 $\sigma$ は14 S/mとした. これらの値を式(8)に代入すると $F_1 = 2.19 \times 10^{-5} \text{ N}$ が得られる.

タイプ2はタイプ1に比べて流路が広いので, 管内の磁束密度の変化は磁場解析の結果から, 最小二乗法により図12のように二次曲線で近似した. 表2より最大磁束密度は図6の⑥で56.8 V, 3.0 Aで管の中心付近で94.1 mT, 管の外側で161.0 mTである. 図12の縦軸は磁束密度 $B$ を表しており, 横軸は電磁石が取り付けられている面からの距離 $x$ を

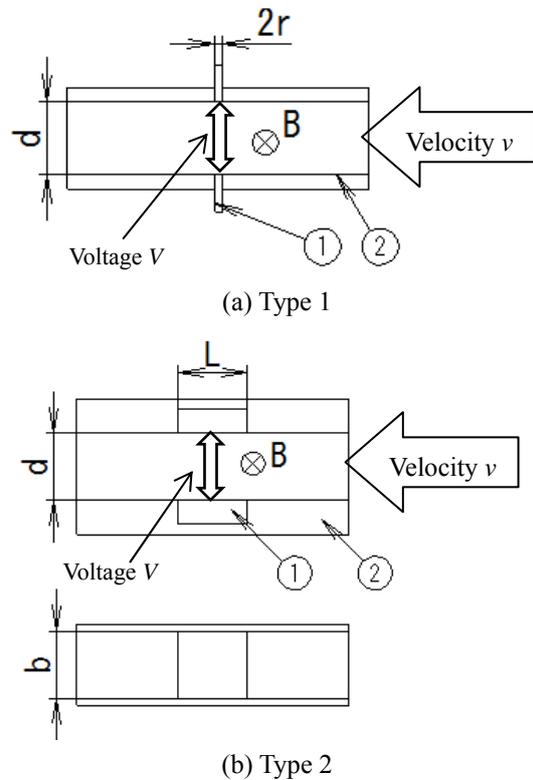
表す. 電磁石の鉄心の幅と流路の幅が同じなので, 横方向の距離によって磁束密度の変化はないとする. それぞれの場所での磁束密度の最大値と最小値から近似曲線の式は以下のように同定した.

$$B(x) = 232.677x^2 + 0.07938x + 0.092 \quad \dots\dots(11)$$

食塩水の濃度, および導電率はタイプ1と同じ, 電極間電圧は25 Vを用いて計算する. 式(9)と式(11)から管内に働く力の和を求めると以下ようになる. ここで式(11)を縦の距離 $x$ で積分するので式(7)を $B \times b = \int B(x) dx$ に置き換えて計算する.

$$F_2 = 2\sigma VL \int_0^{10^{-2}} B(x) dx \quad \dots\dots\dots(12)$$

なお, 近似式から得られる積分値と磁場解析



1. Electrode 2. Magnetic pipe or block  
Fig. 11 Theoretical model

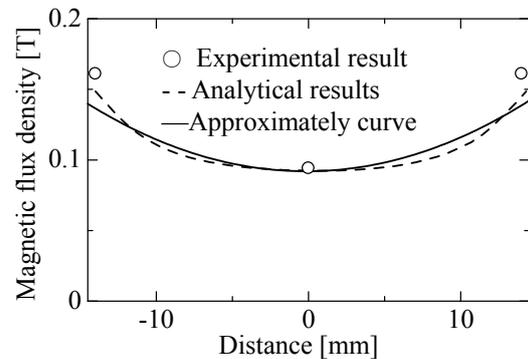


Fig. 12 Curve fitting of magnetic flux density

から得られる総和との誤差は 0.6%であった。上式からタイプ 2 では最大で  $F_2 = 1.39 \times 10^{-2}$  N の力が働くことが分かった。

電磁誘導による力が生じることを確認し理論値と比較するために食塩水に磁界と電界を印加し、フレミング左手の法則により内部に力が働き流体がパイプ内部を流れるかを確かめた。また、電極間電圧を変えて流体の流れを撮影し、流れる速さを測定することで内部に働く力が理論値と一致するかを確かめた。実験値と理論値を比較するため、管内に働く力の理論式と内部の流体についての運動方程式を用いて、速度の理論値を計算する。

タイプ 1 の場合、内部の流体の質量を  $m_1$  とした運動方程式より以下の式が得られる。

$$F_1 = m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} = m_1 \dot{v} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ところで、パイプ内のレイノルズ数  $R_e$  を

$$R_e = vD / \mu \quad \dots\dots\dots(14)$$

とする。ここで  $D$  はパイプ内径 (電極間距離  $d$  と同じ)、 $\mu$  は内部の流体の動粘度とする。パイプ内の流体の速度は実験から最大でも 12 mm/s 程度であったので最初にこれを式 (14) に代入する。実際の寸法  $D = 0.01$  m、 $\mu = 8.9 \times 10^{-7}$  m/s、流体密度  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup> とすると、 $R_e = 135$  となり、 $R_e < 2100$  となることから、パイプ内の流体は常に層流であることがわかる。したがって摩擦係数  $\lambda$  はハーゲン・ポアイズユの式を用いて計算する。

$$\lambda = \frac{64}{R_e} = \frac{64\mu}{vD} \quad \dots\dots\dots(15)$$

管内の摩擦による圧力損失  $\Delta P$  を表すダルシーワイスバッハの式に式 (15) の摩擦係数を代入すると

$$\Delta P = \lambda \frac{l_1 \rho v^2}{2D} = \frac{32\mu l_1 \rho v}{D^2} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここで  $l_1$  はパイプの全長である。さらに圧力を力に直すために、上式にパイプ断面積を乗じると以下のように摩擦による抵抗力  $F_{r1}$  を表す式が得られる。

$$F_{r1} = \Delta P \frac{\pi D^2}{4} = 8\mu l_1 \rho \pi \quad \dots\dots\dots(17)$$

式 (6) と式 (17) の差が摩擦力を考慮した内部に働く全ての力の式であるので

$$F_1 = \sigma VB \pi r^2 - v(\sigma B^2 \pi r^2 d + 8\mu l_1 \rho \pi) \quad \dots\dots(18)$$

この式に運動方程式を代入すると以下の様な速度に関する式が導ける。

$$\dot{v} = \frac{\sigma VB \pi r^2}{m_1} - \frac{v}{m_1} A_1 \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$A_1 = \sigma B^2 \pi r^2 d + 8\mu l_1 \rho \pi \quad \dots\dots\dots(20)$$

式 (19) を  $v$  について解くと時間と速度の関係式が以下のように求められる。ここで初期条件は  $v(0) = 0$  とする。

$$v = \frac{\sigma VB \pi r^2}{A_1} \left( 1 - e^{-\frac{A_1 t}{m_1}} \right) \quad \dots\dots\dots(21)$$

式 (21) から時間と速度の関係のグラフが求まるが、グラフの下側面積が内部の流体が進んだ距離であるので、実験で進んだ距離と理論値を比較する。電磁石と電極間電圧をともに 60 V とした場合の最初の 1 秒間に進む距離は 0.018 mm であった。これがタイプ 1 における最大値であるがとても微小な値なので違いを読み取るのは難しいと思われ、実験は以下の電圧、濃度のみで行う。

タイプ 1 の中に 10% 食塩水を入れ、電磁石と電極にそれぞれ 60 V の電圧を加えた。電磁石の磁極配置は最も磁束密度の高かった図 6 の①の配置とし、磁力線に直交するように電極を選択した。電磁石と電極に電流を流すと間の中心部で内部の流体が渦を巻いている様子が見られた。しかしパイプ内の流体は動いている様子を確認することが困難であった。流路に段差が生じない設計をしたが、ブロックと継手、継ぎ手とパイプ間に断面積の変化があるのでこれが原因で渦が生じ、抵抗が生まれたのではないかと考えられる。抵抗力の理論値は極めて小さい値だったため、渦による抵抗などが作用し、パイプ内の流体を動かすには十分でなかったことが考えられる。大きな力を得る方法としては磁束密度を高めることが考えられるが、電磁石を管の周りに 8 個取り付ける場合には電磁石を近づけられる距離には限界があり鉄心を延長する必要がある。これによって鉄心同士の間多くの磁力線が通ってしまい、管内部にはあまり通らないということが磁場解析からもわかっている。よってタイプ 2 では電磁石は鉄心を延長せず数を減らして直接近づけることとする。磁界と電界による力は電極間のみにはたらき、上記の計算結果より棒状の細い電極を使用したことも十分な力が得られなかった原因の一つであると考え、タイプ 2 では断面積を増やすために板状の電極を用いることとした。また、内部の食塩水は電流を流すことによって電気分解を起し、内部に水素や塩素の気体と黒い化合物が生じた。電気分解によるイオン化と塩素による腐食で電極がすぐに摩耗してしまった。よってタイプ 2 の電極には耐腐食性が高くイオン化傾向も低いチタン電極を用いることとした。

タイプ 2 の場合、内部の流体の質量を  $m_2$  とした運動方程式より以下の式が得られる。

$$F_2 = m_2 \frac{d^2 x}{dt^2} = m_2 \dot{v} \quad \dots\dots\dots(22)$$

ここでパイプ内の流体の管摩擦はタイプ1と同様なので、タイプ2ではさらに管の中心部での摩擦損失を考える。長方形断面の管の摩擦損失を考えるために、 $4r_h$ を中心部の水力直径とすると以下の式で表すこととする。

$$4r_h = \frac{bd}{2(d+b)} \quad \dots\dots\dots(23)$$

上値がパイプ内径  $D$  と等しいとおくと、中心部での摩擦係数を  $\lambda'$  は式(15)，式(23)から以下のように求められる。

$$\lambda' = \frac{64\mu}{4r_h v} \quad \dots\dots\dots(24)$$

円管の場合と同様に、上式をダルシーワイスパツハの式に代入すると以下ようになる。 $l_2$ を管中心部の長さとする。

$$\Delta P = \frac{2\mu l_2 \rho v}{4r_h} \quad \dots\dots\dots(25)$$

上式に管の断面積をかけた抵抗力  $F_{r2}$  は

$$F_{r2} = 8 \frac{(d+b)^2}{db} \rho \mu l_2 v \quad \dots\dots\dots(26)$$

よって中心部での摩擦損失と、タイプ1で計算したパイプでの摩擦損失の和を全体の損失と考え、内部の流体に働く力の式は以下の式で表される。

$$F_2 = \sigma B v b L - v A_2 \quad \dots\dots\dots(27)$$

$$A_2 = \sigma B^2 d b L + 8 \mu l_1 \rho \pi + 8 \frac{(d+b)^2}{db} \rho \mu l_2 \quad \dots\dots(28)$$

式(28)に式(13)の右辺を代入して整理すると以下の速度に関する式が得られる。

$$\dot{v} = \frac{\sigma v b B L}{m_2} - \frac{v}{m_2} A_2 \quad \dots\dots\dots(29)$$

式(29)をタイプ1と同様に解くと時間と速度の関係式が以下のように求められる。

$$v = \frac{\sigma v b B L}{A_2} \left( 1 - e^{-\frac{A_2 t}{m_2}} \right) \quad \dots\dots\dots(30)$$

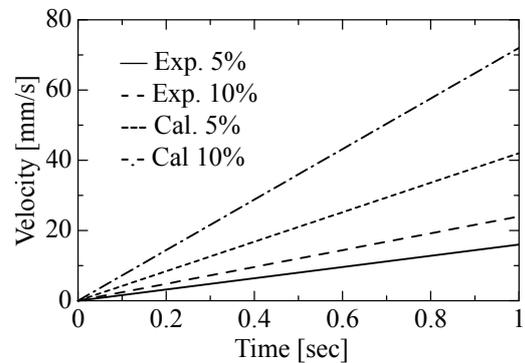
式(30)に実際の数値を代入し、速度と時間のグラフから読み取った理論値と実際の測定値の関係を図13に示す。

タイプ2の実験装置の中に5%または10%の食塩水を入れ、電圧を10Vから25Vまで変化させたときの内部の流体の速度の変化を調べた。磁極の配置は磁束密度の高かった図6の⑥とし、電磁石には3Aの電流を流した。電磁石と電極に電流を流すと管の中心部に渦が生じてしまったが、パイプ内の流体も徐々に加速していくようすが見られた。測定

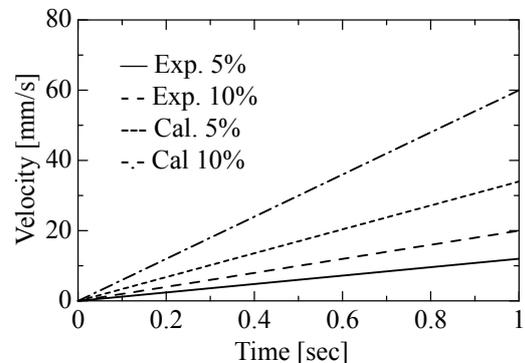
値は理論値よりも全体的に小さい結果であったが電極間電圧と食塩の濃度を上げると内部の流体の速度も上がるということは確認できた。測定値が小さくなってしまった理由としては中心部とパイプの間の断面積の違いにより発生した渦での損失が考えられる。中心部とパイプのつなぎ目を段にせず、断面積が徐々に変化する形にすれば渦による損失は低減できるのではないかと考えられる。使用したチタン電極はタイプ1で用いた鉄の電極よりは耐摩耗性が改善されたが、全く摩耗しないというわけではなく表面がだんだんに黒く変色し、荒くなった。

(4) クラスタ形成の検証

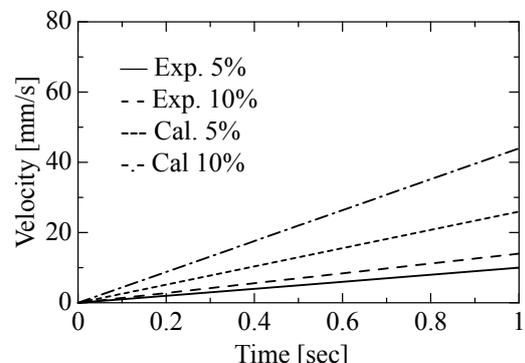
磁界のみを加えた場合の管内の様子を調べるためにクラスタ形成に関する実験を行



(a) In case of voltage 25 V



(b) In case of voltage 20 V



(c) In case of voltage 15 V

Fig. 13 Relations between time and velocity

った。クラスタとは磁界を印加することによって鋼球が磁力線に沿って鎖状に並び形成された構造のことを言う。このクラスタの形状は電磁石の磁極の配置によって異なる。ダンパのバイパス管部分の内部に鋼球のクラスタが形成され、ここを流体が流れようとすることによって抵抗力が生まれる。まず実験装置を実際のダンパに取り付け、タイプ1、タイプ2それぞれの装置の中に鋼球を封入し、それぞれの磁極配置のときの鋼球の様子を調べた。ここでは鋼球として直径0.5mmのクロム球約1000個を使用した。図14はそれぞれ実験装置タイプ1の磁極配置を図6の①、②、③、④としたときの管内の様子である。図15はそれぞれタイプ2の磁極配置を⑤、⑥としたときの管内の様子である。

有限要素法解析による磁束線図とこれらの結果を比較する。磁極配置が①の場合では磁力線は管内部を縦に横切る形になり、それに沿って鋼球が並んでいることが分かる。

4つの磁極配置の中で最も流路が狭まっているのはこの場合であった。磁極配置が②の場合では磁力線は、それぞれ隣の違う極になっている電磁石に入っていくので磁力線の通りに壁側に4つの盛り上がりが出てくる。磁極配置が③の場合ではそれぞれの電磁石の隣の磁極に磁力線が入っていき、管内部にはあまり磁力線が横切らないので鋼球は管の壁側に少し集まるが、ほとんどは全体に散らばったままであった。磁極配置が④の場合は電磁石の磁極をすべて同じにすると鋼球同士が反発し、管の内側に押し付けられるような様子が見られることが分かった。またこのとき鋼球は軸方向にも広がっており、ほかの磁極配置に比べ流路が一番広がっていることが分かった。磁極配置が⑤の場合は管の隅に鋼球が集まり、中心部にはあまり残っていないことが分かる。磁極配置が⑥の場合は①のときと同様にして磁力線に沿って鋼球が並んでいる様子が確認できた。

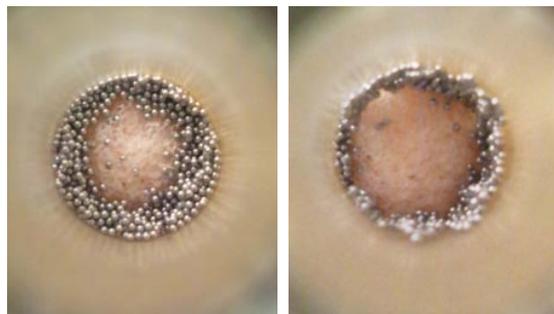
### (5) 抵抗力特性

鋼球のクラスタ形成による抵抗力が生じることを確かめるため実験装置（タイプ1）に金網を取り付け、内部に水と鋼球を封入し装置の両端を実際のダンパに取り付ける。さらにこれを電動サーボ疲労試験機に取り付け、振動させる。図16はダンパにタイプ1を取り付けたときの構造図である。磁界を変化させることで抵抗力がどのように変化するかを調べた。鋼球として直径0.5mmから1mmの鉄の粒をアクリルパイプの半分まで入れて実験を行った。振幅は5mm、周波数は0.6Hzと0.75Hzとした。電磁石には1.5Aの電流を流し、それぞれの磁極配置の場合での荷重-変位曲線を測定した。

図17と図18はそれぞれ周波数0.6Hzと0.75Hzにおけるタイプ1に接続したダンパを振動させたときの抵抗力特性である。図



(a) Case No. 1 (b) Case No. 2



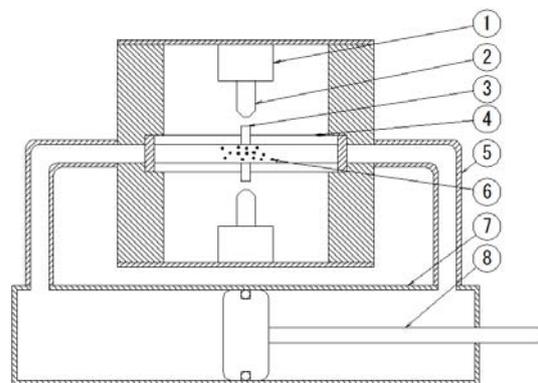
(c) Case No. 3 (d) Case No. 4

Fig. 14 Clustered particles of type 1



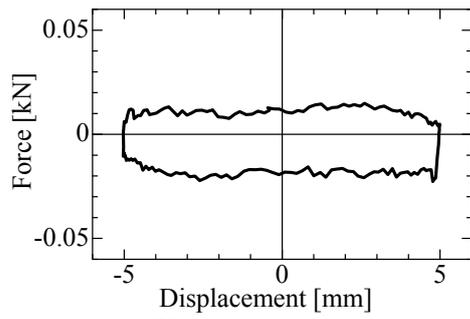
(e) Case No. 5 (f) Case No. 6

Fig. 15 Clustered particles of type 2

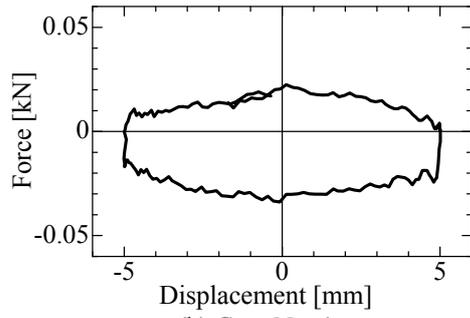


- 1. Electromagnet 2. Iron core 3. Electrode
- 4. Magnetic pipe 5. By-pass pipe
- 6. Steel ball 7. Cylinder 8. Piston

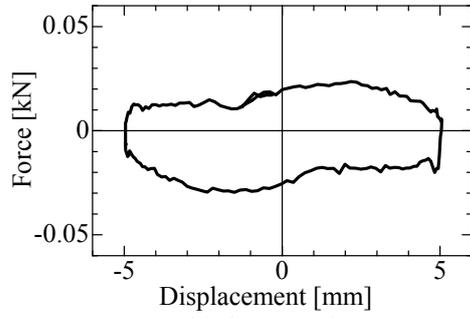
Fig. 16 Test damper



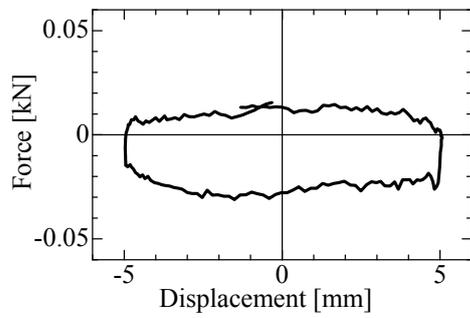
(a) Without magnetic field



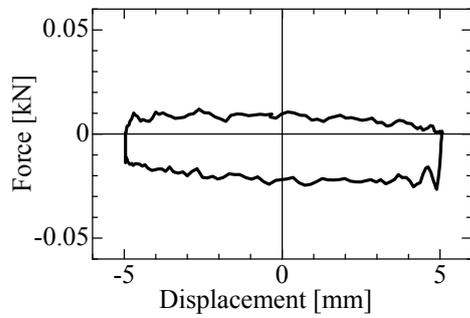
(b) Case No. 1



(c) Case No. 2

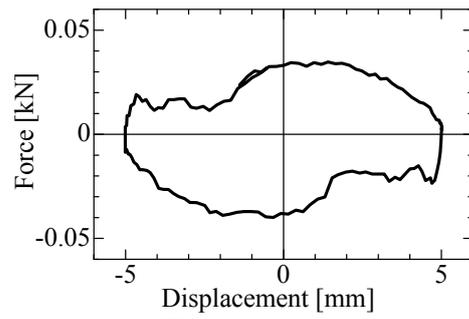


(d) Case No. 3

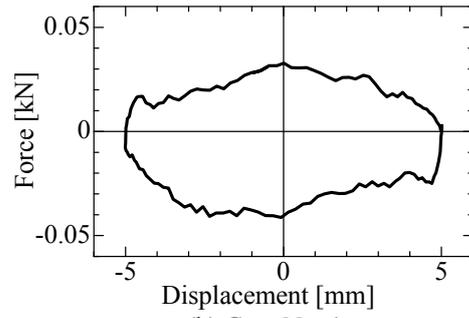


(e) Case No. 4

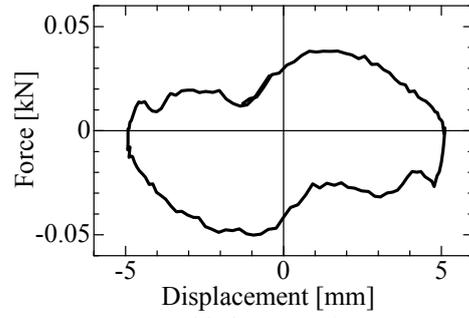
Fig. 17 Resisting force at 0.6Hz



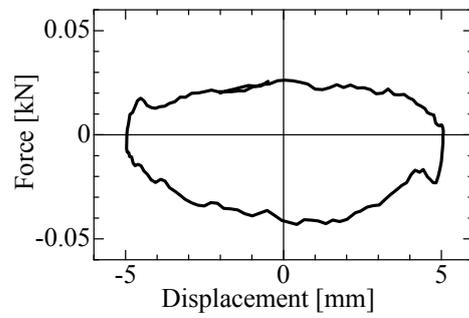
(a) Without magnetic field



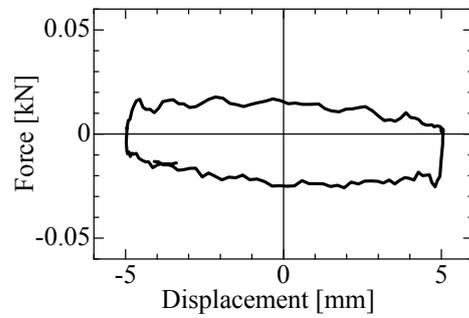
(b) Case No. 1



(c) Case No. 2



(d) Case No. 3



(e) Case No. 4

Fig. 18 Resisting force at 0.75Hz

17(a)では上下の幅と傾きからダンパ自体の摩擦力と内部の水による慣性力のみが働いていることが分かる。図 18(a)にすると流体の加速度が増し鋼球が片側に集まり、詰まることによって途中から抵抗力が増しており、その部分では減衰力が働いていることが分かる。図 17(b)では摩擦力と慣性力に加えて、特性が長方形から楕円形に近づいていることから磁極配置①の時の力に加えて減衰力が働いていることが分かる。図 18(b)では磁界により鋼球が電磁石に引き付けられ、磁界のない場合よりも移動速度が遅くなり、片方に詰まることがなくなったと考えられる。図 9 の磁束密度分布からも管を横切るようにして広い範囲に磁束密度の高い部分が存在していることが分かる。磁界なしの場合よりも楕円形に近づいているが、上下の幅には大きな変化は見られなかった。図 17(c)、図 18(c)ともに磁界なしの時よりも減衰力は多少大きくなってはいるが、この場合も片側が欠けているような形になっている。磁束線図では磁力線は管の内壁近くの部分でのみ存在しており、この部分に引き付けられている鋼球によって流路が狭まるがそれ以外のは磁極なしの場合と同様に動き、片側に詰まることによってこのようになっていていると考えられる。磁極配置を③としたときは減衰力にはあまり変化が見られなかったが図 18(d)においては欠けたような部分がなくなっていた。磁場解析結果では磁極配置②の場合よりもより中心まで磁力線が入っていたので、全体に引き付ける力が加わり、鋼球が片側に詰まらなかったと考えられる。図 10 の磁束密度分布からも磁極配置③がより内側の磁束密度が高くなっていることが分かる。図 17(e)ではあまり変化が見られなかったが、図 18(e)では磁界なしの場合よりもかなり減衰力が低くなっていることが分かる。この場合は鋼球同士が反発することによって図 14(d)のように壁側に分布し、流路を塞がないような形になるからではないかと考えられる。流体中の鋼球に磁場を印加することによって減衰力が発生することは確認できたが、周波数と振幅が大きい場合に鋼球が金網部分まで移動し詰まることが分かった。周波数がこれよりも低い場合は鋼球が沈殿したままであったのでクラスタは形成されなかった。磁界のみをかける場合にはこのような現象が起こらない領域で使用する必要がある。この制限を解決する方法としては鋼球が封入されている部分の管を長くするか、磁束密度を高めることによって鋼球の移動量を減らすことなどが考えられる。

#### 4. 研究成果

主な研究成果は以下の通りである。

(1) 内部の流体に磁界と電界を印加すると、

電磁誘導により内部の流体に力が働き、流れることがわかった。

- (2) 内部に働く力の理論式を導出し理論値を計算したが実験値のほうが小さい値となり一致しては言えなかったが、電極面積と電極間電圧、導電率の関係が理論式に従っていることが以下のように確認できた。
- (3) 電極の面積の違う二つの装置を製作し、電極の面積の大きいほうがより大きな力を得ることが出来ることが確認できた。
- (4) 流体の導電率と電極間電圧を高めると、働く力が大きくなることが確認できた。
- (5) 鋼球に磁界をかけることでクラスタが形成され、磁界の向きを変えることによってクラスタの形状も変化することが確認できた。
- (6) 試作したバイパス管をダンパに取り付け抵抗力測定実験を行い、磁界を加えるとそれぞれの磁極配置で抵抗力が変化することが分かった。

#### 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)

[学会発表] (計 2 件)

松岡 太一、砂子田勝昭、非粘性流体の慣性を利用した振動低減装置、日本機械学会東北支部第 46 期秋季講演会、No. 306、2010. 9. 24、秋田。

Matsuoka Taichi, Vibration Suppression Device Having Variable Inertia Mass by MR-Fluid, ASME, International Design Engineering Technical Conferences (IDETC/CIE-2011), No. 47020, 2011. 8. 31, USA.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松岡 太一 (MATSUOKA TAICHI)

明治大学・理工学部・講師

研究者番号：80360189