

## 205 磁石ばねと衝突振動を利用したエネルギー増幅作用の実験的研究

## An Experimental Study for Collision Stimulus Device Using a Magneto-Spring

○正 藤田 悦則 ((株)デルタツーリング) 正 中川 紀壽 (広島大)

小倉 由美 ((株)デルタツーリング) 小島 重行 曾賀 紀夫 (広島大院)

Etsunori FUJITA, DELTA Tooling Co. Ltd., 3-1 Kenkyudanchi, Taguchi, Higashi-hiroshima  
 Noritoshi NAKAGAWA, Hiroshima University, 4-1, Kagamiyama 1 chome, Higashi-Hiroshima  
 Yumi OGURA, DELTA Tooling  
 Shigeyuki KOJIMA, DELTA Tooling  
 Norio SOGA, Graduate School, Hiroshima University

An experimental device that utilizes a magneto-spring and collision forces for a single-degree-of-freedom stimulus is proposed. By way of an actuator, the experimental device that was created in order to test the response created by a magneto-spring stimulus force arising from an impact force, applies a displacement stimulus to the magnet on one side, changing the distance between the magnets as well as the faced surface area of the magnets. The moving mass that, which supports the loaded mass and the magnet on other side, provides kinetic energy via the actuator and the magneto-spring. When the moving mass impact on impact plate, the impact plate turn over the motion of direction. This collision stimulus device is composed of a mechanisms having low damping, and being vibration device using a magneto-spring, it was verified through analysis and experimental studies to be a highly efficient shaker mechanism.

The relation between the inputs and outputs that use variations in the magnetostatic energy created by changes in the distance between the repulsed magnets and the faced surface area was verified by studying the amount of work created by the magneto-spring stimulus energy of a repulsed magnet system during one vibration cycle of the moving mass attached to a moving magnet and a fixed magnet.

*Key words:* Magneto-spring, Non-linearity, Dynamic spring constant, Collision stimulus device

## 1. 摘要

1970年以降に、新しく開発された永久磁石材料の中で、アルニコ及びフェライト系の磁石を超える磁気特性をもつ希土類磁石として現在、実用化されているものは、サマリウム・コバルト及びネオジウム・鉄・ボロン磁石である。さらに近年、これらの希土類永久磁石の高性能化が進み<sup>(1)</sup>、磁界中の永久磁石の持つ位置エネルギーも大きくなり、永久磁石を組み合わせた小型のばね構造も永久磁石で作ることが出来るようになった<sup>(2)</sup>。機能性材料である永久磁石は、外部の空間に磁束を安定して供給し、磁界を発生するための電気エネルギーを必要としない。そのため、磁石ばねとして利用するとメンテナンスフリーで半永久的なばね構造が作り出せる。しかし、一般的に磁石ばねは、大きな共振ピークと著しい非線形性を持つと言われている<sup>(3)</sup>。

また、磁気回路からみると、磁石ばねは、大きく反発・吸引方式の二つに分けられる。反発方式に関して、長所は上下位置が負荷に応じて安定であるが、短所は左右にずれやすく運動方向を制御するためのガイドが必要となり、減磁しやすいということである。吸引方式に関しては、長所は左右のずれに対し浮上力の変化が小さい、また、左右位置が比較的安定で、減磁しにくいということである。短所は上下位置の調整が不能であり、したがって、電磁力併用による位置制御が必要<sup>(4)</sup>ということである。しかし、この磁石ばねは、物体を非接触で支持することが可能となるため、摩擦、磨耗の問題も少なく、高速運動させることが可能である。

一方、非接触制御技術である磁気浮上を応用したのものには、様々なものが存在する<sup>(5)~(7)</sup>。磁気浮上鉄道、磁気浮上式搬送装置、ハンドリング装置、振動防止装置、位置決め装置、金属浮揚溶解、磁気軸受などがある。特に磁気軸受に関してはさまざま

な応用方法がある。しかし、永久磁石自体に運動を与え、その磁界の変化を利用した励振機構に関する研究は少ない。

そこで、本論文は、ネオジウム(Nd-Fe-B系)磁石対からなる磁石ばねの振動による仕事を検証し、磁石ばねと衝突振動を利用した新たなエネルギー増幅機構を構築するための実験結果について報告する。

## 2. 実験方法

図1は、ネオジウム2極磁石対を磁石ばねとする1自由度(垂直方向)振動機構に、ボイスコイルモータ(G)(以後、VCM(G)と呼ぶ)による他方の磁石の往復運動によりネオジウム磁石対の対向面積を変化させる振動機構を組み合わせた実験装置を示す。本実験装置は摩擦減衰を小さくするためにボールベアリングを有するリニアガイドで構成される。このVCM(G)は、可動磁石

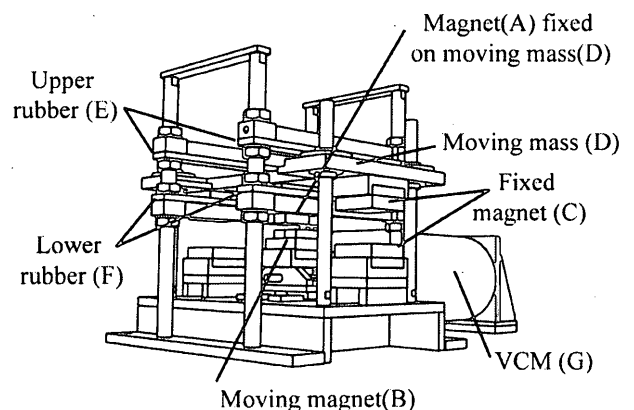


Fig. 1 A reciprocating motion magneto-spring experimental model

(B)に変位を与え、運動体(以後、Moving mass(D); MM(D)と呼ぶ)に取り付けられた磁石(A)との空隙間の静磁エネルギーを変化させ、MM(D)に上下動を生じさせる。なお、可動磁石(B)の励振振幅は励振周波数で変化し、15~5mmである。励振周波数は、0.5Hz刻みで1~10Hzとする。そして、MM(D)はウレタンゴム製の緩衝器を備えている上下衝突板(以後 Upper Rubber; UR・Lower Rubber; LRと呼ぶ)に衝突・反発する。上下衝突板とMM(D)間の距離は、MM(D)の運動挙動により調整する。ただし、振動による仕事の実験は、UR・LRを取り外して行う。図1中の固定磁石(C)は、ばね定数の調整とMM(D)が振動するに必要な磁石間距離を得るために使用する。

図2は本実験装置の振動モデルを示す。可動磁石(B)は磁石(A)端面から20mmずらした状態で配置する。VCM(G)の変位は、VCM(G)に取り付けられた接触式変位計(ポテンシオメータ)で計測する。尚、図中に示すように可動磁石(B)、MM(D)共に離散方向を正の変位量とする。VCM(G)の推力は、その消費電流から算出する。入力は、これらの実験値を用いて算出する。一方、出力は、レーザー変位計により計測したMM(D)の変位と加速度により算出する。加速度は、加速度ピックアップで計測して振動計に出力し、時系列波形を求める。

図3は、可動磁石(B)の運動の方向と図2の配置で、MM(D)が上下動した場合の磁石(A)、(B)、(C)による荷重特性を示す。ここで、実験に使用した磁石(A)、(B)の大きさは55×55×20(mm)、磁石(C)の大きさは75×75×20(mm)で、MM(D)の質量 $m_{pe}$ は11.217kgである。ここに、磁石(A)と可動磁石(B)が異なる磁石配置でも磁石間距離はほぼ同一になることが分かる。 $x$ 軸方向に振動するタイプIの磁石間距離は45mmで、 $y$ 軸方向に振動するタイプIIの磁石間距離は43.5mmである。

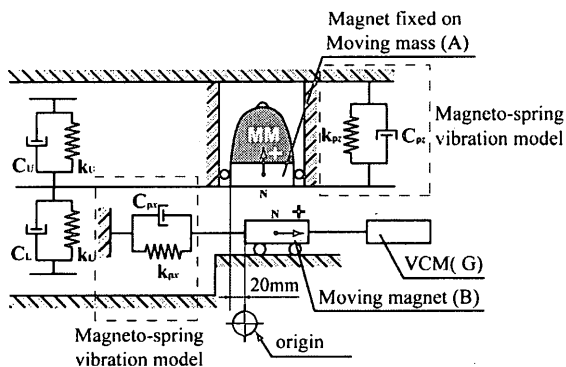


Fig. 2 The magneto-spring and the impact vibration model

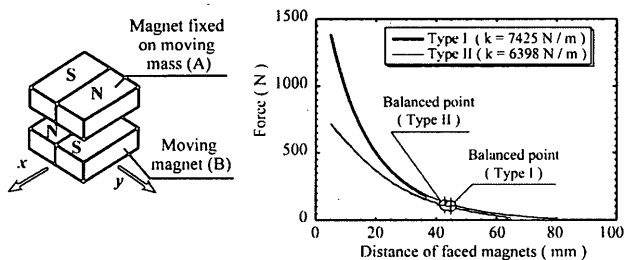


Fig. 3 The moving magnet(B) used in this apparatus, and the direction of motion, and force characteristics

図4は運動方向別(タイプI, II)の荷重特性を示し、上下方向はMM(D)、水平方向は可動磁石(B)の荷重特性である。入力側と出力側のばね定数がともにほぼ零となる荷重特性をもつタイプIは、磁場勾配が小さく、可動磁石(B)の運動だけでは十分な静磁エネルギー変化が生じないことが分かる。一方、タイプIIの水平方向のばね定数は振幅+5~+15mmの間は負のばね定数となり、-10~+30mmの間は正のばね定数となり、垂直方向のばね定数は、1346N/mである。この可動磁石(B)の変位に応じてばね力が変化しているタイプIIは、磁石対の空隙部の磁場勾配が可動磁石(B)の位置で変化すると考えられる。

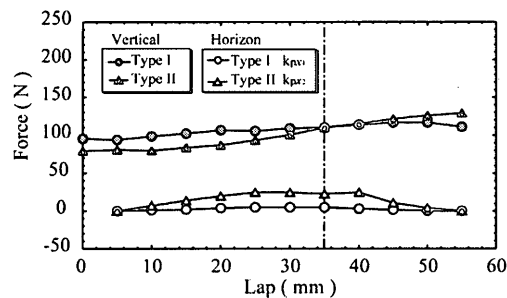


Fig. 4 The force characteristics of the lapped length of faced moving magnet(B) for Type I and II

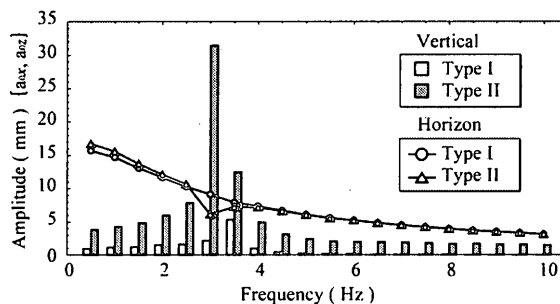


Fig. 5 The maximum stimulus amplitude

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 磁石ばね励振力による仕事

本実験装置において、MM(D)が行う振動の1サイクルあたりの仕事について考察する。図5は、可動磁石(B)とMM(D)のタイプI, II別、励振周波数別の実験から得られた変位量を示す。タイプIは3.5Hz近辺に共振点をもち、タイプIIの共振点は3.0Hz近辺にあると考えられる。そして、タイプIIは共振による弾性エネルギーがVCM(G)の推力を超えるため、VCM(G)の励振振幅を一定値に保つことができないこともわかる。

図6は、タイプI, IIにおけるMM(D)の変位と慣性力のリサージュ図形を示す。これらのリサージュ図形から可動磁石(B)とMM(D)の系が持つ動的ばね定数を求め、仕事の計算に用いる。

この系の粘性減衰係数とクーロン摩擦力は、自由振動波形から実験的に求める。本実験装置は、習動部が転動体による直動案内機構であり、クーロン摩擦力は小さく抑えられる。そのため、一定の摩擦抵抗の代わりに、これと当価の粘性抵抗を用いることにし、減衰比( $\zeta_x, \zeta_z$ )は、共に0.062となった。

図7は、タイプI, IIにおける0.5~10Hzまでの振動による

仕事の計算結果を示したものである。計算は以下の要領で行った。MM(D)に取り付けられた固定磁石(A)と可動磁石(B)の対向面積を変更するために必要な水平方向振動の1サイクル当たりにVCM(G)の励振力によって可動磁石(B)が行う仕事  $W_1$  は、図5の変位  $a_{0x}$  と図4のばね定数  $k_{px}$  を利用して

$$\Delta W_1 = \frac{\pi k_{px}^2 a_{0x}^2}{2\omega_x \zeta_x \sqrt{m_{px} k_{px}}} \frac{\left(2\zeta_x \frac{\omega_x}{\omega_0}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega_x}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta_x \frac{\omega_x}{\omega_0}\right)^2} \quad (1)$$

より求められる。なお、VCM(G)自体が稼動することで失うエネルギーは計算していない。ここで、可動磁石(B)の水平方向振動に連動してMM(D)が行う垂直方向の1サイクル当たりの仕事  $W_2$  は、図6に示される慣性力を利用して

$$\Delta W_2 = \frac{\pi P_z^2}{2\omega_z \zeta_z \sqrt{m_{pz} k_{pz}}} \frac{\left(2\zeta_z \frac{\omega_z}{\omega_0}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega_z}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta_z \frac{\omega_z}{\omega_0}\right)^2} \quad (2)$$

より求められる。ただし、 $P_z = m_{pz} a_{0z} \omega_z^2$  となり、 $a_{0z}$  は図5から求められるMM(D)の変位量を示す。図5、図7及び解析により、VCM(G)の推力を入力とした反発系2極磁石対が行う振動による仕事は、 $W_1$  は固有振動数、 $W_2$  は応答変位の寄与率が高く、動的ばね定数と応答変位の大きいタイプIIの出力エネルギーはタイプIに比べて大きくなるのが分かった。そして、減衰とばね定数の小さい反発系磁石ばね振動系は同一の構成要素から成る振動系でも、その平衡状態からの磁界の変化の仕方、つまり磁場勾配の変化の仕方により、動的ばね定数を変化させることができるのが分かった。さらに、この動的ばね定数は、共振時にVCM(G)自体の制御に影響を与える場合とそうでない場合が生ずるぐらいの大きな共振エネルギー差を生ずることも分かった。

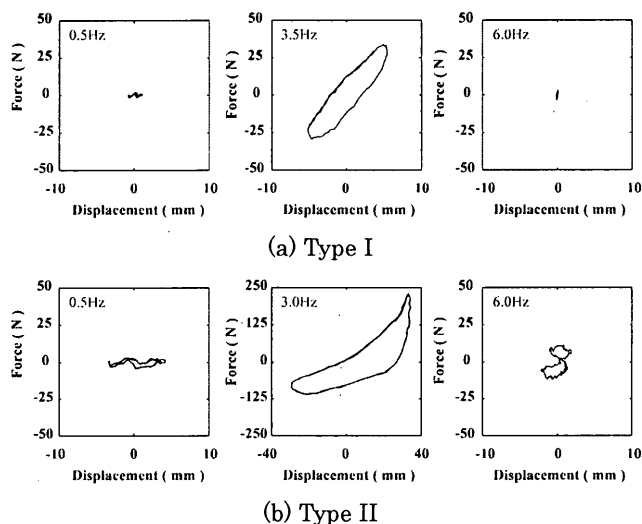


Fig. 6 The force characteristics of the magnet(A)

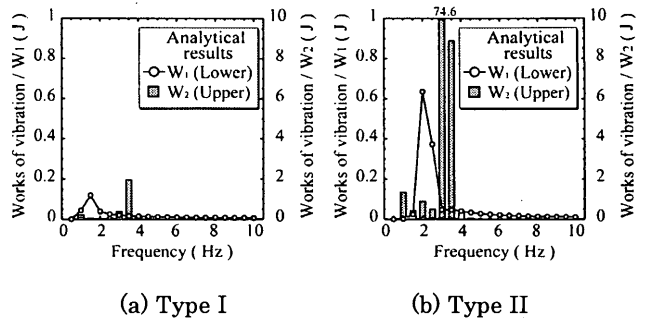


Fig. 7 The work created by the stimulus

### 3.2 衝突振動による応答

表1は、タイプIで衝突板間距離を20mm、タイプIIで10mmに設定した場合の衝突振動発生状況を示す。×は除振状態で、△は上下の衝突板にどちらか一方に衝突する場合、○は外部入力としてハンマリングによりインパルスを与えることで衝突振動が発生する場合、◎はインパルスを与えないでも衝突振動が発生する場合である。そこで、タイプIは共振点近辺の3.5Hzと4Hzでインパルスを与えると衝突振動が発生した。タイプIIは、衝突振動が1~4Hzで発生し、5Hzではインパルスを与えると衝突振動が発生した。しかし、どちらのタイプも共振点以降の高い周波数帯では衝突振動は発生しなかった。

図8は、3.5Hz、4HzのときのタイプIの入力と応答の時系列波形を示す。この場合は、入力変位が小さいため共振が発生しなかった。そのため、衝突振動の発生が無く、MM(D)と可動磁石(B)はほぼ逆位相となっていた。これは、減衰比とばね定数の小さい振動系が変位励振をうけた際の共振点廻りの応答◎に一致する。しかし、インパルスを与えて衝突振動を発生させるとその時系列波形は、増幅された定常振動になった。これはインパルス入力により位相遅れ量が増え、MM(D)が最下端から衝突板により運動の方向が反重力方向に変化したときに可動磁石(B)が接近したため、最下端付近で対向面積が最大となる磁石対が静磁エネルギーを与えたためと考えられる。したがって、インパルスを与えられたタイプIは磁石間距離が小さい場合に生ずる非線形な荷重特性とMM(D)および可動磁石(B)のもつ小さいばね定数の組合せにより、任意に平衡点を有するダuffing型のばね定数をもつ減衰比の小さい非線形モデルとなった。そして、この非線形モデルは衝突振動による位相遅れ量の変化により機械的増幅特性をもち、入力より大きな振幅をもつ定常振動になったと考えられる。

図9にインパルスの有無による3.5Hz、4HzのときのタイプIの変位と力のリサージュ図形を示す。インパルス有のタイプIは、ダuffing型のばね特性となったことが分かる。

図10は3Hz、5HzのときのタイプIIの入力と応答の時系列波形を示す。タイプIIは入力励振周波数が3Hz付近で主共振を、5Hz付近では分数調波共振をもつと考えられる。励振周波数が3Hzである場合のタイプIIは共振エネルギーが大きく、VCM(G)の運動に影響を与える。しかし、上下衝突板により強制的に共振エネルギーを抑え込むとVCM(G)の運動に影響を与えない定常振動になった。また、励振周波数が5Hzである場合のタイプIIは、分数調波共振的波形を上下衝突板による振幅の

抑制と位相遅れ量の変化により応答波形の形が変わった。この場合は、タイプIと同様に、MM(D)が最下端で反重力方向にあるとき、磁石対の対向面積が最大となり静磁エネルギーが与えられる事により応答波形を擬似三角波に変えることができた。しかし、タイプIIの上下方向のばね定数は、図3と図4に示すように、ほぼ線形で、入力振幅が磁石の大きさで規制されるために、磁石間距離による静磁エネルギーの増加が小さい。そのため、空隙間の漏れ磁界による磁場勾配の寄与率が高くなり、応答振幅が小さい。したがって、空隙間の漏れ磁界と磁石間距離の相乗効果により静磁エネルギーを補完する場合は、可動磁石(B)を上下方向に運動させるのが最も効率がよいと考えられる。図11にタイプIIの変位と力のリサージュ図形を示す。

Table 1 Matrix of occurrence condition of shock vibration

	Frequency (Hz)						
	1.0	2.0	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0~
Type I	×	×	△	○	○	×	×
Type II	◎	◎	◎	◎	◎	○	×

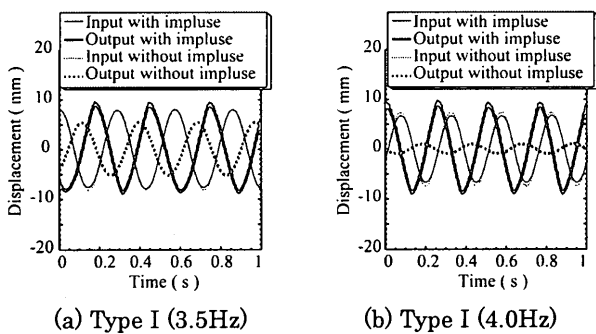


Fig. 8 Response of the displacement time history

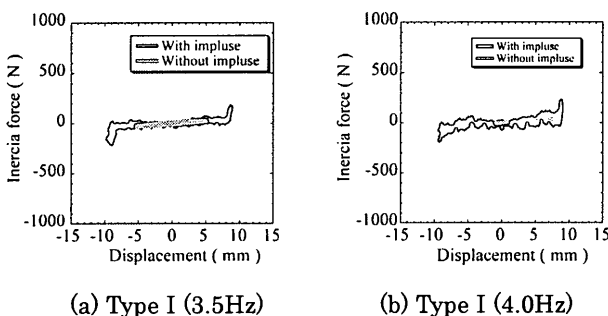


Fig. 9 The Lissajous figure

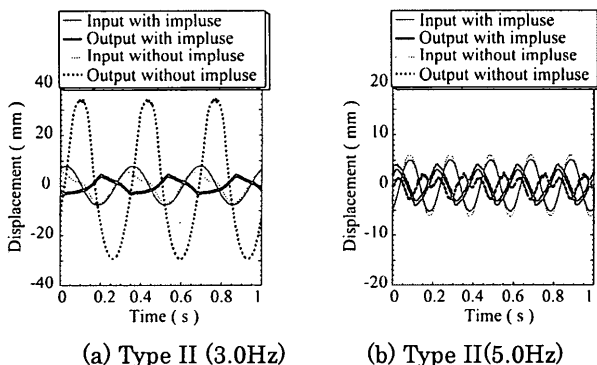


Fig. 10 Response of the displacement time history

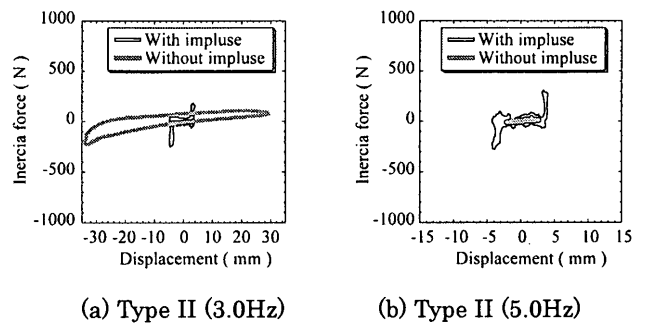


Fig. 11 The Lissajous figure

4. 結言

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

1. 対向面積と磁石間距離をパラメータとする振動モデルは、任意に平衡点を有するダuffing型のばね定数をもつ減衰比の小さい非線形モデルとなる。このモデルは、磁場勾配の低いところを利用した小さなばね定数と衝突板間距離の最適化による静磁エネルギーの増分にインパルス入力を組み合わせることにより効率の良い機械的増幅特性をつくることができる。
2. 任意に平衡点を有するダuffing型の非線形モデルは、衝突板間距離の最適化により応答波形を定常的な擬似三角波に変えることができる。

尚、本論文では、磁石ばねを利用したダuffing型の非線形モデルを用いた探索実験を行った。この探索実験により、ばね定数と減衰比を小さくした振動機構が効率の良いエネルギー増幅特性をもつ可能性があることがわかった。今後は、ばね定数と減衰比を小さくしたダuffing型の非線形ばね特性を持つ振動機構に、励振のための磁石ばねを組み合わせた振動機構により、エネルギー増幅作用に関する実験と解析を行う予定である。

References

- (1) 金子祐治・笹川泰英・小原公一・徳原宏樹・木戸脇伸次, 世界最強のNd-Fe-B焼結磁石の開発と超50MGOe高性能磁石の量産化, 日本金属学会会報, 38-3, (1999), 248-250.
- (2) 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 (2001), 126-135.
- (3) Fujita, E., Ogura, Y., Sakamoto, Y., Honda, S., New Vibration System Using Magneto-Spring, SAE Trans. J. Passenger Cars, 106-6, (1997), 2662-2633.
- (4) 長屋幸助, 機械振動と騒音の電磁力による制御, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集, No.98-8, Vol.A (1998-8), 277-282.
- (5) 酒井宏・藪野浩司・青島信治, 磁気浮上物体に生じる係数励振の安定化, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集, No.98-8 Vol.B (1998-8), 325-328.
- (6) 水野毅・関口秀樹・荒木獻次, 永久磁石の運動制御を利用した反発系磁気軸受機構の開発, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集, No.97-31 (1997-11), 235-238.
- (7) 長屋幸助・小島宏行, 長方形磁束と長方形導体を組合わせた磁気ダンパの形状特性, 日本機械学会論文集, 47-424, C(1981-12), 1620-1625.
- (8) 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, 機論, 66-645, C (2000), 1445-1452.