

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560278

研究課題名(和文) 係数励振によるセミアクティブダンパの時間遅れ改善

研究課題名(英文) Improvement of a time delay at switching damping effect using parametric excitation

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：一般的にセミアクティブダンパは抵抗力を制御できることが利点となっているが、その抵抗力が変化する際に必ず立ち上がり時間の時間遅れが生じる。そのため、どんなに優れた制御手法を用いても、その機械的な遅れのため振動制御の効果を十分に発揮できないのが問題である。仮に、その時間遅れを早くすることができれば、より効果的な振動制御が可能である。

そこで本研究では、その時間遅れを早くするために係数励振を用いた方法を提案するものである。電磁抵抗型ダンパを用いて、その指令信号を励振させて、立ち上がり時間を測定した。実験から、係数励振をした際の時間遅れは、従来のステップ応答時に比べて改善できることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A semiactive damper has a controllable damping force as an advantage point, but it necessarily has a time delay at mechanically switching by a control. Therefore, a control law does not work perfectly enough, a command signal is saturated at upper limit, and performance is depended on the time delay. If the damping force can be switched as quickly as possible, it will be comparatively more effective and useful for vibration reduction.

A radically different approach way how to mechanically improve the time delay at switching for a semiactive damper under control is proposed. In order to switch more quickly, the command signal to the damper using a parametric excitation is demonstrated. Rising time of a mechatronic damper which can switch the damping force are measured. The experimental results are compared with conventional system using a step function or an overshoot impulse function. Finally, improvement of a time delay using parametric excitation is confirmed experimentally.

研究分野：工学

キーワード：振動制御 ダンピング 係数励振 時間遅れ

1. 研究開始当初の背景

近年の振動制御はめざましい発展を遂げており、ソフトウェアに限らずハードウェアとの融合が必要である。これまで、ソフトウェア面では様々な制御手法が研究され、その応用、実用化がなされている。一方、ハードウェア面においては機械の物理的な限界(可変範囲を超える値や負値特性)があるため、ソフトウェア的に最適な状態に機械を操作することができない場合が多い。ソフトウェアが発達するにつれて様々な制御手法が用いられ、コンピュータなどからダンパへの指令信号をリアルタイムで最適な動的特性に変化させることが本来は理想的である。ハードウェアはこれまでもアクティブ、セミアクティブ、パッシブなど数多くの制振装置が開発され、実用化されている一方、制御指標である安定度は議論されるが、速応性(追従性)の改善はあまり見られない。これらのシステムには必ず電気的および機械的な時間遅れが存在する。このうち電気的なものは、コンピュータの発達や制御回路の補償によってほとんど無視できる程になったものの、機械的な時間遅れはほとんどが改善されないまま、制御手法で補うか、もしくは考慮されていないのが現状である。セミアクティブダンパは、外部からの指令信号によって装置の機械的、物理的な性質(復元、減衰、摩擦特性など)を変えることができ、外乱の状況に応じて最適な状態に制御させることが可能である。しかし、制御時に指令信号を送ってからダンパの性質が変わるまで、立ち上がり時間、すなわち時間遅れが必ず生じる。この遅れが制振効果に影響しており、制御手法で補っているのが現状である。例えば、オーバーシュート、時間遅れを考慮した最適制御、速い動きに対して追従困難な場合は二値切替制御などのソフトウェアの改善を図った技術はあるが、物理的、機械的な解決にはなっていない。

2. 研究の目的

抵抗力を変える際の指令信号にあらかじめ高周波成分を励振することによって発電機の反応性を高めることに着目する。従来通りのステップ的な指令信号入力に比べて立ち上がり時間を早くして、より良い制振性能を発揮させることを目標とする。係数励振はこれまでも非線形振動や振動抑制に応用されてきたが、速応性向上に利用した例はない。ここでは、セミアクティブダンパの減衰力切替時に発生する機械的な立ち上がり時間を改善することを目的に、係数励振を利用する。本件では、電磁抵抗型のセミアクティブダンパを用いて、その可変減衰機構である発電機端子間の電気抵抗値を外部からの指令信号によって励振させることにより、ハードウェア的に速応性を向上させるものである。一次遅れ系の定常特性の理論式を導出し、係数励振の最適条件を求めた。また、実際に

ダンパを用いて減衰力の立ち上がり時間を測定し、その改善可能性を実験的に確かめた。

3. 研究の方法

(1) 理論式

ボールねじを用いた電磁抵抗型セミアクティブダンパの減衰力 F は速度 v に比例し

$$F = \frac{K}{R_a + R_l} v \quad (1)$$

と表される。ここで、 R_a および R_l は発電機の内部電気抵抗および端子間の電気抵抗であり、 K は既報から

$$K = \frac{1}{\eta} \left(\frac{2\pi\alpha}{L} \right)^2 K_E K_T \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 L 、 η はボールねじのリードおよび逆作動変換効率、 K_E 、 K_T は発電機の起電力定数およびトルク定数、 α はギア比であることから K は定数となる。式(1)の R_l を変化させることによって可変減衰力が得られる。

ところで、一次遅れ系の伝達関数 $G(s)$ は一般的に

$$G(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (3)$$

で表され、ここで、 T は一次遅れ系の時定数であり、本報では発電機の機械的時定数である。指令信号の切り換えは従来の方法ではステップ応答的に入力されるのが一般的なので、式(1)、(3)より次式で表すことができる。

$$F(s) = \frac{F}{s} \frac{1}{Ts + 1} \quad (4)$$

式(1) ~ (4) から減衰力切替時の立ち上がり応答は

$$F(t) = \frac{K}{R_a + R_l} (1 - e^{-t/T}) v \quad (5)$$

となる。指令信号が入力されてから減衰力が変わり始め、その定常値の 90% (これを目標値とする) に達するまでを立ち上がり時間 T_r とすると、式(5)が $0.9F$ と等値になることから、整理すると

$$T_r = T \log 10 \quad (6)$$

となる。このことから、立ち上がり時間は指令信号に関係なく、装置の物理的な時定数のみに依存することが分かる。そこで、式(1)内の唯一の可変数である電気抵抗を周期的に変化させることを考える。式(1)の分母にある電気抵抗を次式で定義する。

$$R_l = R + r \sin(\omega t - \theta) \quad (7)$$

ここで、 R は励振の平均値、 r は振幅、 ω は振動数、 θ は位相とする。 R および r は正の値をとるが、どちらの値も内部抵抗 R_a 以下にはならない。また、 $R \geq r \geq 0$ の関係にある。式

(1)内の分母に時変数の三角関数が存在するままではラプラス変換しにくいので、式(1)を

$$F(t) = K\{A - B \sin(\omega t - \theta)\}v \quad (8)$$

と置き換え、 A および B はそれぞれ

$$A = \frac{1}{R}, \quad B = \frac{1}{R} - \frac{1}{R+r} \quad (9)$$

とする。式(8)、(9)を用いてラプラス変換し、式(3)の一次遅れ系の伝達率 $G(s)$ を乗ずると、

$$Y(s) = K \left\{ \begin{array}{l} \frac{A - B \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \cos \theta \\ + B \frac{s}{s^2 + \omega^2} \sin \theta \end{array} \right\} \frac{1}{Ts + 1} v \quad (10)$$

となる。式(10)を部分分数分解し逆ラプラス変換すると、外部信号を励振した際の定常特性 Y の理論式が得られ

$$Y(t) = KA(1 - e^{-t/T})v - KB \cos \theta \left\{ \begin{array}{l} -\frac{\omega T}{1 + \omega^2 T^2} \cos \omega t \\ + \frac{1}{1 + \omega^2 T^2} \sin \omega t \\ + \frac{\omega T}{1 + \omega^2 T^2} e^{-t/T} \end{array} \right\} v + KB \sin \theta \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{1 + \omega^2 T^2} \cos \omega t \\ + \frac{\omega T}{1 + \omega^2 T^2} \sin \omega t \\ + \frac{1}{1 + \omega^2 T^2} e^{-t/T} \end{array} \right\} v \quad (11)$$

となる。式(11)において、第一項は従来通りの一次遅れ系の応答であり、それに第二項以降の周期関数成分が組み合わされていることが分かる。

立ち上がり時間をより速くするために、係数励振の最適条件を検討する。まず、位相 $\theta=0$ と仮定したときの減衰力の変化が最大になるまでの時間 \square を求める。式(11)の微分値が零と等値となる条件は、第二項のみに着目すればよいので、それを整理すると

$$\delta = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left(-\frac{1}{\omega T} \right) \quad (12)$$

が得られる。任意の時間 t と δ の差を係数励振の位相 $\theta=\omega\delta$ として用いると定常特性は

$$Y(t) = K \left\{ A + \frac{B}{1 + \omega^2 T^2} (-\omega T \cos \omega t - \sin \omega t + \omega T e^{-t/T}) \cos \omega(t - \delta) + (\cos \omega t + \omega T \sin \omega t - e^{-t/T}) \sin \omega(t - \delta) \right\} v \quad (13)$$

となる。ところで、励振の振幅が小さい場合は、励振していない通常のステップ応答の場合とほぼ同じ傾向になることから、ここでは励振振幅は R_a 以上の範囲内で取り得る最大値とし、

$$r = R \quad (14)$$

とした。また、励振の振動数については、周期が長くなることで抵抗値の定常応答の変化が緩やかになり、異なる目標値(定常値)になって、励振されていない場合と同じ状態になるため、本研究の目標ではない。そこで、ステップ応答が目標値と交わるまでの時間 T_r とし、式(11)の第二項以降の半周期成分が T_r よりも短くなることを前提とした。したがって、励振振動数の最適値は、周期成分の半周期までの時間が T_r に一致する場合なので、次式で与えられる。

$$\omega T \log 10 + \tan^{-1}(-\omega T) = \pi + \theta \quad (15)$$

$\theta=0$ の場合、式(15)を満たす励振振動数は $\omega=329$ rad/s となる。以上のことから、励振の振幅および励振振動数を調整すれば、減衰力の立ち上がり時間を従来のステップ応答に比べ短くでき、改善出来ることが予想される。

(2) 実験

立ち上がり時間測定実験で用いた電磁抵抗型のセミアクティブダンパの構造を図1に、諸元を表1に示す。本装置は、ボールねじ機構によって並進運動を回転運動に変換し、発電機軸を回す構造になっている。式(1)から分かるように、発電機端子間の電気抵抗

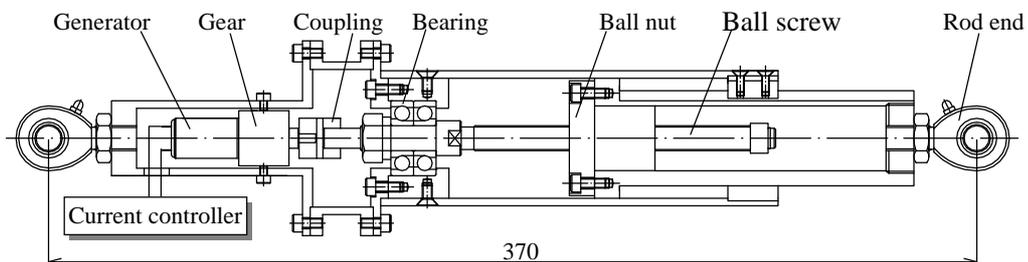


図1 電磁抵抗型セミアクティブダンパ

表1 ダンパ仕様

Lead of the ball screw L	4 mm
Rotary efficiency η	0.94
Gear ratio α	23.9
Torque constant K_T	6.59×10^{-3} Nm/A
Electromotive force K_E	6.59×10^{-3} Vs/rad
Motor resistance R_a	8.4 Ω
Mechanical time constant T	5.56 ms
External resistance R	26.5 Ω
Amplitude of residence r	25.5 Ω

が最大、すなわち開放状態のときは減衰力が最低（ほぼ零）となり、一方、電気抵抗が最小のとき、すなわち短絡状態のときは減衰力が最大（定常値）となる。発電機端子間には電気抵抗の代わりに電流制御器が接続されており、回路の電流を外部からの指令信号によって任意に制御できる。そのため、発電機端子間の見かけの電気抵抗値を変える仕組みとなっている。なお、電流制御器の時間遅れは無視できるほど小さい。ボールねじ軸、発電機軸などの回転部品による回転モーメントは速度比例ではなく減衰力に影響しないため、本件では考慮しない。

立ち上がり時間改善の可否を確かめるために、電磁抵抗型セミアクティブダンパの減衰力切り替え時における立ち上がり時間測定実験を行った。ダンパの一端を固定壁に、他方をロードセルを介してサーボ型疲労試験機に取り付けて、三角波状強制変位、周期4秒、振幅20mm（一定速度0.02m/s）を与えたときの荷重と変位を測定した。減衰力の切り替えは等速運動中にコンピュータから指令信号を電流制御器に出力した。サンプリング時間は0.1msとし、ノイズ除去等のフィルタ措置は一切していない。実験はそれぞれ5回ずつ行い、その結果から指令を出力した瞬間を時間軸の原点として、目標値（定常値の90%）に到達するまでの時間を立ち上がり時間として分析した。

まず、比較のために係数励振をしない従来通りステップ応答の場合の立ち上がり時間を測定した。発電機端子間の電気抵抗値を16.4 Ω に一定となるように制御した場合、式(1)、(2)から減衰力の目標値は47.3Nとなる。電気抵抗が無限大、すなわち開放状態のときは減衰力が最小となるので、そのときの荷重を摺動抵抗として測定し、11.0Nを摩擦力と同定した。実験は同条件で5回行い、そのうちの一つの抵抗力の定常応答と指令電圧を併せた実験値を計算値と併せて図2に示す。図の黒線は抵抗力の実験値を、緑線は抵抗力の計算値を、赤線は指令電圧を表す。図2から、立ち上がり時間は平均15.2msであることが分かった。表1に示す発電機の時定数を用い式(6)よりステップ応答の場合の理論的な立ち上がり時間 T_r は12.8msと求められる。理論値よりも若干遅いのは、発電機の時定数の誤差や機械的ギャップと考えられ

るが、概ね一致していると言える。

同様に比較のため、ステップ応答の際にオーバーシュートさせた場合の立ち上がり時間を測定した。変化させる電気抵抗値、すなわち減衰力の目標値は同じで、オーバーシュートさせる時間を1, 5, 10msの三通り行った。定常応答および指令電圧の実験結果を図3~5にそれぞれ示す。図3のオーバーシュート時間1ms時の立ち上がり時間は平均8.7msとなり、図4および図5の同5, 10ms時の立ち上がり時間は平均5.0, 4.8msと早く改善されているが、行き過ぎ量も大きくなることから分かる。このことから、オーバーシュート時間が立ち上がり時間に影響し、通常のステップ応答に比べて最大1/3程度に改善されることが分かる。この改善手法はよく知られている。

次に係数励振を用いた場合の実験を行った。発電機端子間の抵抗は、電流制御器によって電気抵抗を制御し、振動数329rad/s、位相を0, $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$, π , $3\pi/2$, 2π , および位相 $\pi/2$ 時の始動一波のみの場合の計8種類行った。定常応答および指令電圧の実験結果を図6~13にそれぞれ示す。図6~12から、係数励振をした場合の立ち上がり時間は位相に影響し、 $\pi/2 \sim \pi$ の範囲でステップ応答の場合よりも改善出来ることが分かった。一方、励振しているため整定時間はないに等しい。また、位相0および 2π の場合は同じ傾向であることから、再現性が高いことが分かる。図13から、係数励振始動一波のみの場合は、立ち上がり時間が6.0msとなり、図8~10の励振継続時に比べて若干早く改善されているものの、オーバーシュート5ms時の挙動とほぼ似た傾向を示すことが分かる。しかし、整定時間が早くなっており効果的であると言える。

各実験における5回分の立ち上がり時間の平均値、および従来通りステップ応答との時間差をまとめて表2に示す。表2より、励振時の位相が $3\pi/4$ の時の立ち上がり時間がステップ応答時の場合に比べて8.0ms縮まり、始動一波の場合がさらに9.2ms縮まっていることが分かる。このことから係数励振を用いた場合の立ち上がり時間は、係数励振をしていないステップ応答の場合に比べて最大半分に縮めることができ、時間遅れの改善が可能であると言える。

4. 研究成果

セミアクティブダンパの可変減衰力の立ち上がり時間をより速くするために、指令信号を周期的に励振することによって時間遅れの改善を試みた。速度比例型の減衰力を一次遅れ系で表し、定常応答を導出した。また、ボールねじ式の電磁抵抗型ダンパと電流制御器を用いて、減衰力を切り換えた際の立ち上がり時間を計測した。主な結果は以下の通りである。

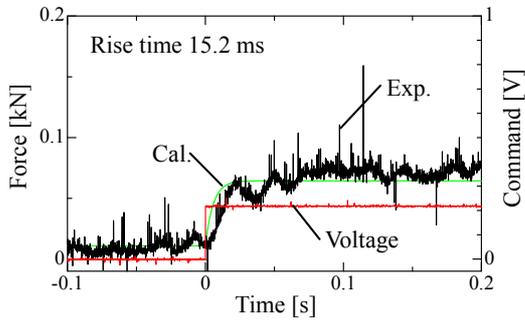


図2 ステップ入力時

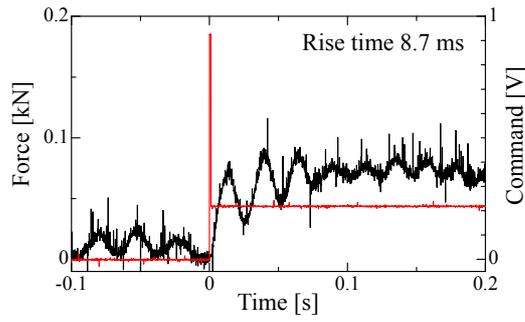


図3 オーバースhoot入力時(1ms)

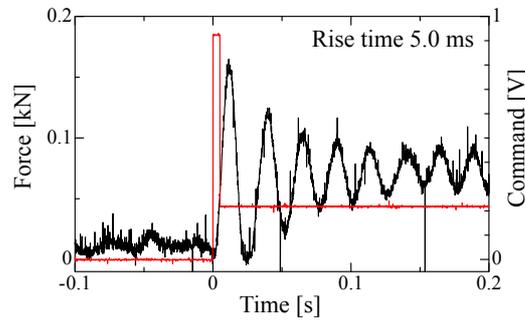


図4 オーバースhoot入力時(5ms)

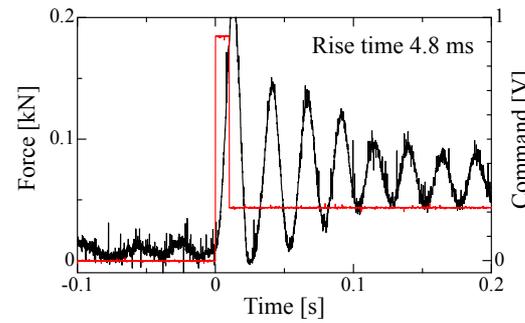


図5 オーバースhoot入力時(10ms)

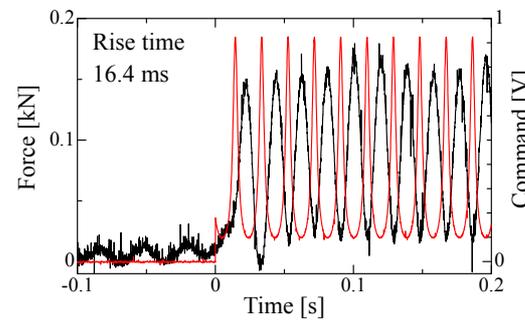


図6 励振入力時($\delta=0$)

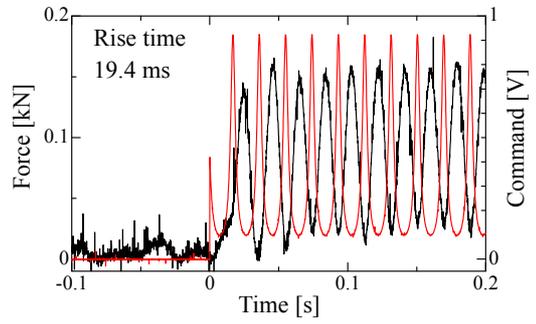


図7 励振入力時($\delta=\pi/4$)

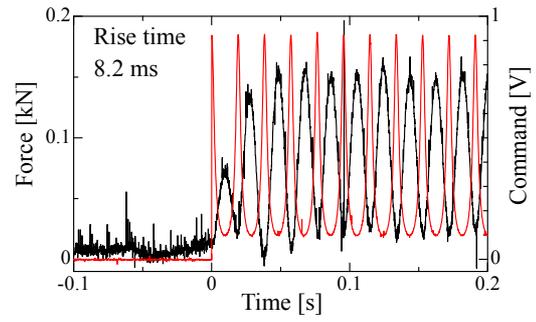


図8 励振入力時($\delta=\pi/2$)

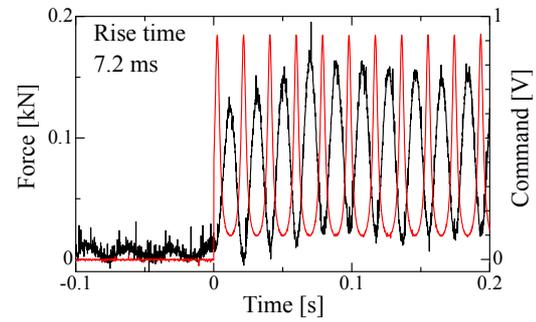


図9 励振入力時($\delta=3\pi/4$)

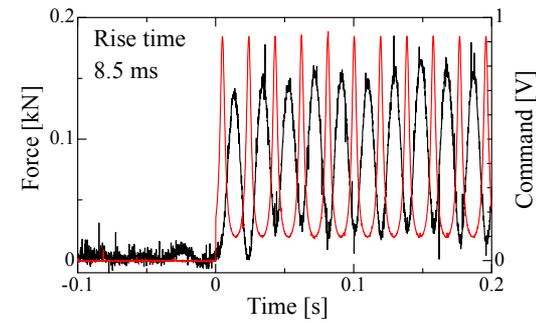


図10 励振入力時($\delta=\pi$)

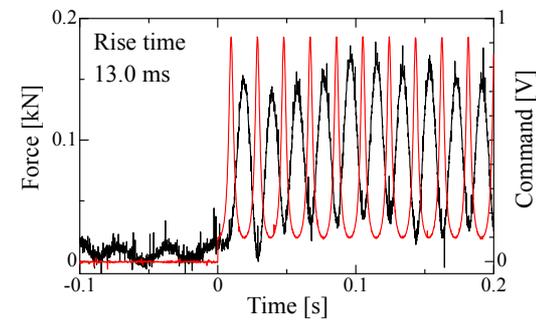


図11 励振入力時($\delta=3\pi/2$)

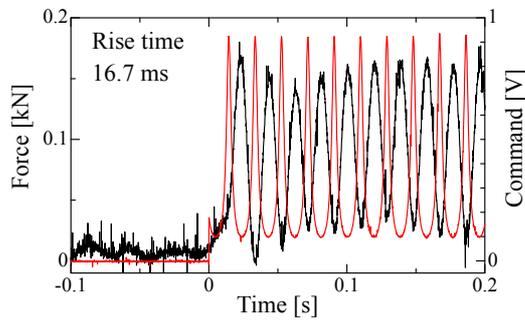


図12 励振入力時 ($\delta=2\pi$)

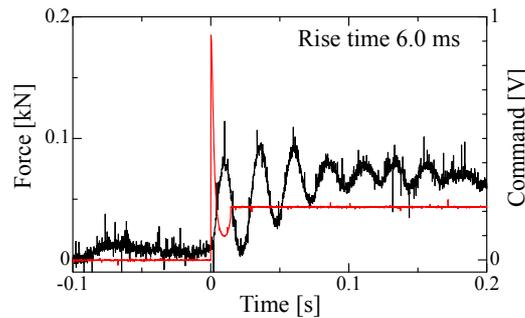


図13 励振一波入力時 ($\delta=\pi/2$)

表2 立ち上がり時間測定値

Conditions		Average	Delay
Step function		15.2	0
Overshoot	while 1 ms	8.7	-6.5
	while 5 ms	5.0	-10.2
	while 10 ms	4.8	-10.4
Parametric excitation $\omega=329$ rad/s	$\delta = 0$	16.4	+1.2
	$\delta = \pi/4$	19.4	+4.2
	$\delta = \pi/2$	8.2	-7.0
	$\delta = 3\pi/4$	7.2	-8.0
	$\delta = \pi$	8.5	-6.7
	$\delta = 3\pi/2$	13.0	-2.2
	$\delta = 2\pi$	16.7	+1.5
	$\delta = \pi/2$, 1st wave	6.0	-9.2

- (1) 指令信号を励振させてダンパに入力することで、ステップ応答の場合に比べて減衰力の時間遅れは最大で半分程度に縮まり、改善が図れた。
- (2) 励振振動数の最適条件は装置の時定数、励振の振幅、および位相によって定まり、実験結果から位相は $\pi/2 \sim \pi$ の間が最適となった。
- (3) 係数励振した場合の減衰力の定常応答を理論式から導出した。また、実験結果から、ほぼ同じ傾向が見られたことから、理論の有効性が確かめられた。

<引用文献>

松岡太一、砂子田勝昭、平元和彦、大竹隆文、発電式振動抑制装置に関する研究、

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)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計1件)

青野 絵里奈、松岡 太一、平元 和彦、係数励振による可変減衰力の立ち上がり時間改善手法、日本機械学会 D&D2014, No. 422、2014

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

(2) 研究分担者

平元 和彦 (HIRAMOTO, Kazuhiko)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00261652