129 制振発電装置の研究（有限動力源の場合）

Research on vibration control and electricity generating device
(In the case of limited power supply)

○正 吉武 裕（長崎大）

正 原田 晃（長崎大）

柴田 佳紀（三菱自エンジニアリング）

永代行日出（長崎大院）

Yutaka YOSHITAKE, Nagasaki University, Bunkyo-machi 1-14, Nagasaki

Akira HARADA, Nagasaki University

Yoshinori SHIBATA Mitsubishi Automotive Engineering Co Ltd.

Yukihide NAGAYO Nagasaki University, Graduate School

This paper deals with the problem of vibration quenching of the system with a limited power supply and electricity generation using the device composed of a Hula-Hoop and a generator. Following was made clear from the results of numerical analysis and experiment: (1) The device is very effective in the region exceeding the resonant point of the system. (2) Although electric power was supplied from the power source in order to rotate a Hula-Hoop, it is confirmed that both vibration quenching and energy saving was established by using the generator with small amount of power generation. (3) The experimental and the analytical results were in good qualitative agreement with each other. (4) The approximate solution by the averaging method has sufficient accuracy in the region exceeding the resonant point. (5) This device is considered as an improved type of an automatic balancer.

Key Words: Nonlinear Vibration, Vibration Control Device, Generation of Electricity, Limited power supply, Hula-Hoop

機械や構造物の振動を抑える装置として、様々な制振装置が実用化され、近年はパッシブな動吸振器に制御機能を加えたハイブリッド型の制振装置が設置されることが多いが、この装置は、ハイブリッドとはいえ、制振のための外部エネルギーが必要である。この欠点を補うために、近年、パッシブ時の振動エネルギーを用いてアクティブ時に必要なエネルギーを供給し、外部からのエネルギー供給を不要とした制振装置の研究が行われ実用化されているものもある。

これに対して、著者の一人は構造が単純なパッシブな制振・発電装置の研究を行ってきた。すなわち、振動を一方の回転運動に変換できるフラフープの原理を利用したフラフープと発電機からなる装置である。これらの研究は強制振動の制振と発電に関するものと、自励振動の制振と発電に関するものに分けられるが、強制振動の研究では理想的な動力源をもつ振動系を対象にしていた。そこで、本研究では、制振発電装置の実用化の観点から有限の動力源をもつ機械・構造物の制振と発電の可能性を実験と数値解析から調べた。

有限な動力源としてDCモータを用い、アンバランスを回転させ、遠心力型の強制力により一自由度振動系に強制振動を発生させた。この系にフラフープと発電機からなる制振発電装置を設置した時の制振効果と発電量を調べた。実験で用いた動力源モータのトルク特性を図A1に示している。回転数の増加とともに出力トルクが減少しており、有限な動力源の特徴を示している。実験と数値計算による共振曲線をそれぞれ図A2, A3に示している。共振点を越えた高振動数域において制振されていることがわかる。一方、全消費エネルギーについては、動力源が有限なため動力源の消費電力が増加してしまい、総合的に省エネにならない実験結果となった。しかしながら、発電能力が小さい発電機を用いると、制振効果が著しく向上し、振動振幅が制振発電装置を設置する前の1%以下になること、および図A4に示すように消費エネルギーも減少し、制振と省エネが両立できることを示した。また、本装置が効果的な振動数の領域では平均法を用いた解析でも十分な精度があることもわかった。

Fig.A1 Torque characteristic of power supply

Fig.A2 Resonance curve (Experiment)

Fig.A3 Resonance curve (Calculation)

Fig.A4 Energy balance

1. 結 言

機械や構造物の振動を抑える装置として、様々な制振装置が実用化され、近年はパッシブな動吸振器に制御機能を加えたハイブリッド型の制振装置が設置されることが多い。この装置は、ハイブリッドとはいえ、制振のための外部エネルギーが必要である。この欠点を補うために、近年、パッシブ時の振動エネルギーを用いてアクティブ時に必要なエネルギーを供給し、外部からのエネルギー供給を不要とした制振装置の研究が行われ^{(1)~(3)}、須田ら⁽⁴⁾のセルフパワー・アクティブ制御のように実用化されているものもある。

これに対して、著者の一人は構造が単純なパッシブな制振・発電装置の研究を行ってきた^{(5)~(9)}。すなわち、振動を一方向の回転運動に変換できるフラフープの原理⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を利用したフラフープと発電機からなる装置である。これらの研究は強制振動の制振と発電に関するもの⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾と、自励振動の制振と発電に関するもの⁽⁵⁾⁽⁷⁾に分けられるが、強制振動の研究では理想的な動力源をもつ振動系を対象にしていた。しかしながら、実際の機械では動力源は有限として扱わなければならないことも多く⁽¹²⁾、実用化においては、動力源と主系や制振発電装置との相互作用の検証、さらにはエネルギー収支の検討も必要と考えられる。

そこで、本研究では、制振発電装置の実用化の観点から有限の動力源をもつ機械・構造物の制振と発電の可能性を調べる。

2. 実 験

有限の動力源として DC モータを採用し、そのアンバランスによる強制振動をフラフープの自己同期現象⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を利用して制振が可能であることを実験により示すとともに、フラフープに接続した発電機による発電を行う。

2.1 実験装置 図 1 に実験装置を示す。実験装置の基本構成は、有限の動力源である DC モータにより回転しているアンバランスによる強制振動を行う一自由度系を主系とし、それを制振するためのフラフープと発電機からなる制振・発電装置である。図 1 に示すように主系はアルミの厚板に動力源である DC モータが固定され、4 本の板ばねで支持されている。動力源の DC モータにはアンバランスが取り付けられている。また、主系の上部には剛な 4 本の柱で発電機が固定され、その回転軸にはフラフープが取り付けられている。動力源モータの回転によりアンバランスが回転すると、板ばねで支えられている主系は水平方向に並進運動を行うが、フラフープに初期角速度を与えることにより、フラフープがアンバランスと同期回転し、制振とともに発電を行う構造になっている。一般に大きさが不明のアンバランスとフラフープがつりあうためにはフラフープは 2 個必要で、それらの重心と軸心との間の距離がアンバランスの重心と軸心との間の距離に等しいと仮定すれば、フラフープの質量の合計はアンバランスの質量よりも大きい必要があるが、本研究では、簡単のため、アンバランスと質量が等しいフラフープ 1 個を設置することとする。

動力源モータと発電機はこの実験のために特別に製作することはせず、以下に示す市販のものを用いている。

動力源モータ：澤村電気工業社製 DC モータ SS32F

(定格 24V, 1.4A, 3000rpm, 0.65kg cm)

発電機：マブチモータ社製 DC モータ RE-140RA

(定格 1.5V, 0.56A, 5700rpm, 5.8g cm)

主系の質量、固有振動数、粘性減衰係数は以下の値である。

$$m_1 = 811.0\text{g}, f_n = 7.94\text{Hz}, c_1 = 0.205\text{Ns/m}$$

ここに、主系の質量には発電機の質量も含めている。アンバランスはアルミ製で質量 m_0 、回転軸から重心までの長さ l_{G0} 、重心回りの慣性モーメント I_{G0} は次のような値である。

$$m_0 = 24.0\text{g}, l_{G0} = 2.0\text{cm}, I_{G0} = 56.1\text{gcm}^2$$

また、フラフープの質量 m_2 、回転軸から重心までの長さ l_{G2} 、重心回りの慣性モーメント I_{G2} は次のような値であり、アンバランスと同じ材質・形状である。

$$m_2 = 24.0\text{g}, l_{G2} = 2.0\text{cm}, I_{G2} = 56.1\text{gcm}^2$$

2.2 実験方法

実験で用いる動力源の DC モータのトルク特性を図 2 に、発電機のトルク特性を図 3 に示す。これらの図は定格などを用いて描いたカタログ値である。図 3 から回転数の増加とともに出力トルクが減少していることがわかる。これが有限の動力源の特徴であり、このために振動系と動力源の相互作用が起こる。

実験は次のように行った。すなわち、動力源である DC モータに定電圧発生装置を接続し、電圧を変化させるとアンバランスの回転数が変化する。これにより主系の振動数を変化させる。主系の変位は加速度ピックアップを用いて計測する。電流計を用いて動力源モータに流れる電流を計測し、与えた電圧との積として消費電力を求める。発電電力については、発電機の内部抵抗 R_2 に等しい $1.0\ \Omega$ の外部抵抗 R_f を発電機に取り付け、端子間電圧 E_f を測定することにより、次式から発電電力 P_0 を求める。

$$P_0 = E_f^2 / R_f \quad (1)$$

なお、外部抵抗が内部抵抗に等しい時に発電電力が最も大きくなる。

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Torque characteristic of power supply

Fig.3 Torque characteristic of generator

Fig.4 Resonance curve (Experiment)

Fig.5 Power consumption (Experiment)

Fig.6 Power generation (Experiment)

Fig.7 Energy balance (Experiment)

Fig.8 Resonance curve (Experiment using potentiometer)

Fig.9 Power consumption (Experiment using potentiometer)

2.3 共振曲線 動力源の DC モータに加えた電圧を変化させることにより、アンバランスの回転数が変化し、主系の振動数も変化する。各振動数における振幅を測定して共振曲線を描いたものが図 4 である。縦軸 A_1 は主系の変位振幅、横軸 f は主系の振動数である。有源の動力源による強制振動では、動力源と振動系との相互作用のために固有振動数付近での周期振動が実現されないのが特徴で

ある。すなわち、固有振動数付近では、非線形振動理論における安定周期解が存在しない⁽¹²⁾。フラフープを取り付けないときの主系の振幅を○印で、フラフープを取り付けたときの主系の振幅を●印で示している。フラフープは動力源モータの回転と同期して定常な回転運動を行っていた。

図 4 からフラフープを取り付けることにより、共振点より低い振動数でわずかに変位振幅が大きくなるものの、共振点より高い振動数では 35%~50%程度に変位振幅が小さくなり、制振できていることがわかる。これらの結果は前報⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾の理想的な動力源の場合の結果と同様である。しかしながら、フラフープが共振点よりもはるかに高い振動数まで回転するという結果は強制力の振幅が一定の前報の場合と異なっている。これは本論文では強制力が遠心力型であるためである。

2.4 電力収支 図 5 に動力源の DC モータの回転数と消費電力の関係を示す。縦軸は消費電力 P_0 、横軸は DC モータの回転数（主系の振動数） f である。フラフープを取り付けないときの消費電力を○印で、フラフープを取り付けたときの消費電力を●印で示している。図 5 からフラフープのあるなしに関わらず DC モータの回転数（主系の振動数）の増加とともに消費電力が増加することがわかる。また、フラフープを用いて主系を制振すると動力源で消費する電力が増加してしまうことがわかる。この例では、フラフープを付けることにより 30Hz で約 30%の消費電力の増加となっている。

図 6 に発電機による発電量を示す。縦軸は発電電力 P_2 、横軸は図 5 同様に DC モータの回転数（主系の振動数） f である。図から振動数の増加にともない発電量も増加しているものの、図 5 に示した動力源モータの消費電力の増加量に比べると発電量は小さいことがわかる。発電量が少ない理由は、極めて安価な模型用モータである上に、定格より低い回転数で使用しているために発電効率が極めて低いことが考えられる。

制振発電装置を設置することによるエネルギーの収支を示したのが図 7 である。制振発電装置を設置した場合について、発電電力を含めたトータルでの電力増加量（負ならばエネルギーの減少量、すなわち省エネを意味し、その絶対値が実質の省エネルギーの量となる）を $\Delta P(W)$ とすると、次式で表される。

$$\Delta P = \{P_0(WHH) - P_2\} - P_0(NHH) \quad (2)$$

ここに、 $P_0(WHH)$ 、 $P_0(NHH)$ はそれぞれフラフープを取り付けた場合と取り付けていない場合の動力源モータの消費電力、 P_2 は発電機の発電電力を表す。実験により得られた電力増加量 ΔP を図 7 に示す。図 7 の縦軸は電力増加量 ΔP であり、横軸は図 5、6 と同様に DC モータの回転数（主系の振動数） f である。図 7 から制振発電装置を設置することにより全体でエネルギー消費量が増加していることがわかる。結局、この実験では主系を制振はできるものの、電力エネルギーの収支としては省エネになっていないという結果を得た。

2.5 発電機の実験の効果 前節の実験では、市販の模型用小型モータとしては最小に近いものを発電機として用いたが、省エネになっていないので、ここではさらに小型の発電機を用いて動力源の消費電力を抑えることを考える。しかしながら適当なものが見つからなかったため、次に示す小型のポテンシオメータを発電機の代わりに用いた。

日本電産コパル電子社製ポテンシオメータ
(JT22-320-500)

ポテンシオメータは当然のこととして発電はできない。ポテンシオメータがもつ回転に対する抵抗を粘性減衰抵

$$K_2 = \{K_{T2}K_{E2} + R_2(N_2 + \mu)\} / m_2 l_{G0}^2 \omega_n R_2 \quad (12)$$

$$K_3 = m_0^2 K_{T0}^2 E^2 l_{G2}^2 / m_1^2 l_{G0}^6 \omega_n^4 R_0^2$$

$$K_4 = m_0 K_{T0} E / m_1^2 l_{G0}^2 \omega_n^2 R_0$$

以下に数値解析に用いるパラメータ値を示す。これらの値は前章の実験に対応する値である。

主系： $m_1=811.0\text{g}$, $c_1=0.205\text{Ns/m}$, $k_1=2.02 \times 10^3\text{N/m}$

アンバランス： $m_0=24.0\text{g}$, $l_{G0}=2.0\text{cm}$, $l_{G0}=56.1\text{gcm}^2$

フラフープ： $m_2=24.0\text{g}$, $l_{G2}=2.0\text{cm}$, $l_{G2}=56.1\text{gcm}^2$

動力源モータ： $I_{GM0}=440\text{gcm}^2$, $L_0=4.4\text{mH}$,

$R_0=4.0\Omega$, $K_{E0}=5.83 \times 10^{-2}\text{Vs/rad}$,

$K_{T0}=58.8 \times 10^{-3}\text{Nm/A}$, $N_0=3.44 \times 10^{-5}\text{kgm}^2/\text{s}$

発電機： $L_2=1.0\text{mH}$, $R_2=1.0\Omega$, $R_f=1.0\Omega$,

$K_{E2}=1.36 \times 10^{-3}\text{Vs/rad}$, $K_{T2}=1.39 \times 10^{-3}\text{Nm/A}$

$N_2=3.3 \times 10^{-7}\text{kgm}^2/\text{s}$, $\mu=8.03 \times 10^{-6}\text{Nms}$

3.3 共振曲線 図 12 に数値積分と平均法によって得られた共振曲線を示す。縦軸 A_1 は主系の変位振幅、横軸 f は主系の振動数を表している。図 12(a) は数値積分による解であり、細線はフラフープを取り付けないときの主系の振幅、太線はフラフープを取り付けたときの主系の振幅である。図 12(b) ではフラフープを取り付けたときの平均法による解と数値積分による解を比較している。平均法による解を灰色で表している。実線が安定解で、点線が不安定解である。平均法による解は共振点より高い振動数の領域においてのみ解が得られるが、図から共振点から離れた振動数の高い領域においては平均法による安定解と数値積分による解はよく一致していることがわかる。また、図から、動力源が有限であるため、動力源と主系の相互作用により共振点 ($f_0=7.9\text{Hz}$) を少し越えた振動数域で解が存在しない不安定領域が確認でき、フラフープ型制振発電装置を取り付けることによって高振動数域における主系の変位振幅が約 39%~60% に制振されていることがわかる。これらの結果は実験から得られた図 4 の共振曲線とよく一致している。

3.4 電力収支 図 13 に数値解析により得られた動力源モータの消費電力を示す。縦軸 P_0 は動力源モータの消費電力、横軸 f は主系の振動数を表す。図 13 から共振点において消費電力が非常に大きいこと、高振動数域では主系の振動数が高くなるにしたがって消費電力が増加していることがわかる。また、制振発電装置を取り付けることによって消費電力が増加していることがわかる。これらの結果は図 5 の実験結果と同様であるが、消費電力は実験結果より少なくなっている。なお、主系の振動数 $f=30\text{Hz}$ において消費電力の増加量は約 0.38W であり、約 30% の増加となっている。

図 14 に発電量を示している。図 6 の実験結果に比較して大きな値となっている。

また、前章と同様に、制振発電装置を取り付けた場合の発電電力を含めたトータルでの電力増加量（負ならば、その絶対値がエネルギーの減少量、すなわち省エネルギー量を意味する） $\Delta P(\text{W})$ を計算した。これを図 15 に示す。主系の振動数の増加にともなって ΔP も増加し、 $f=30\text{Hz}$ における電力増加量 ΔP は約 0.32W となり、制振発電装置を取り付けていない場合の消費電力の約 25% の増加にあたる。実験では $f=30\text{Hz}$ におけるトータルの電力増加量は約 0.67W であり、数値解析結果とは定量的に一致していない。この原因として、DC モータや発電機のカatalog値と実際の値との差や発電機の機械的減衰（損失）の見積誤差などが考えられる。

実験では、減衰力が小さい発電機を用いる代わりとしてポテンショメータを用いた実験を行ったので、それに対し

る数値計算を行った。このとき、式(8)を省略し、式(6)の μ を 2 章で示した $c_2=1.53 \times 10^{-6}\text{Nms/rad}$ で置き換えた。また、粘性減衰抵抗が全て電気エネルギーに変換されるとすれば、発電量は次式で計算される。

$$P_2 = \frac{c_2}{T} \int_0^T \dot{\theta}_2^2 dt \quad (13)$$

得られた高振動数域の共振曲線を図 16 に示す。図から主系が非常によく制振されていることが確認でき、その変位振幅は制振発電装置を設置しない時の約 6%~9% となっている。また、動力源モータの消費電力を図 17 に示す。図から制振発電装置を取り付けても消費電力はわずかしかな増加しないことがわかる。 $f=30\text{Hz}$ における電力増加量は約 0.05W (約 4%) である。

以上の結果から制振発電装置を取り付けることによって主系の振動を制振し、発電を行うことができるが、実験

(a) Result by R.K.G. method

(b) Comparison of results by two methods

Fig.12 Resonance curve (Calculation)

Fig.13 Power consumption (Calculation)

Fig.14 Power generation (Calculation)

Fig.15 Energy balance (Calculation)

Fig.16 Resonance curve (Potentiometer, Calculation)

Fig.17 Power consumption (Potentiometer, Calculation)

Fig.18 Energy balance

と数値解析に用いたパラメータの範囲では、フラフープを回転させるためのトルクを動力源が供給することになるため、たとえ大きな制振量を確保できたとしても系全体で消費電力は増加するが、発電機の代わりにポテンショメータを代用した実験と数値計算結果から小さな発電機を用いることにより、制振効果が大きく向上することと、省エネ(前述の電力増加量 ΔP が負となる状態)の両方を実現できる可能性が示唆された。

3.5 発電機の最適化 前節までの結果に基づき、ポテンショメータを用いたときの数値計算と同様に、発電機の回路の方程式は省略し、発電機の発電能力に相当する粘性減衰係数 c_2 を用い、この c_2 を変えて数値計算を行った結果を図 18 に示している(発電機の効率を 100% とすることに相当する)。このとき、図から $c_2 = 1.0 \times 10^{-7}$ Nms/rad 程度(実験で用いた発電機の約 1/100 の値である)を採用すると制振効果も省エネも両立できることがわかる。このときの主系の変位振幅は制振発電装置を設置しない時の 0.3%~0.5% にまで制振されること、および、これ以上発電機の減衰トルク(発電能力)を小さくしても消費エネルギーは減少せず、省エネに限界があることを確認している。

以上のことから、制振と省エネルギーの両方の目的を達成するためには、かなり減衰力(発電能力)が小さい発電機を採用すればよいことがわかった。

発電機の効率が 80% から 90% 以上もある⁽¹³⁾ことを考えると、実際の装置では本論文の実験で用いた発電機よりも省エネ率は上がり、効率を 100% とした数値計算結果に近い結果が得られると思われる。

さらに、振動系と動力源との相互作用がない機械では、本制振発電装置を設置することにより研究の当初の目的である制振と発電の両立が可能と考えられる。

3.6 自動平衡装置との関係 井上ら⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾により自動平衡装置の研究がおこなわれているが、共振点よりも

高い振動数領域で自励振動が発生することが実用化の妨げになっている。これを抑えるために井上らは転動球を油の中に入れていた。フラフープを転動球に、発電に伴う電磁減衰を自動平衡装置に有害な自励振動を防止するための減衰に対応させ、発電機を転動球に相当するフラフープに初速を与えるモーターと兼用すると考えることにより、本装置は有用な自動平衡装置として実用化の可能性があると考えられる。

4. 結 言

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 有限な動力源を有する振動系に制振発電装置を適用する場合、主系の共振点を越えた高振動数域において制振効果が高いことを明らかにした。
- (2) フラフープを回転させるために動力源から電力が供給されてしまうが、発電能力が小さい発電機を用いることにより、制振と省エネルギーを両立できることを示した。
- (3) 制振発電装置の制振効果について数値解析結果と実験結果の定性的一致を確認した。
- (4) 平均法による近似解は、共振点よりも高い振動数域では十分な精度をもつことを示した。
- (5) 本装置は自動平衡装置の改良型として捉えることができる。

文 献

- (1) 原田秀行ほか 2 名, 動電型エネルギー回生サスペンションの制御, 機論, **62**-604, C(1996), pp.4513-4519.
- (2) 永井文秀ほか 3 名, エネルギー回生ダンパの研究, 機論, **63**-611, C(1997), pp.2337-2242.
- (3) 須田義大ほか 2 名, 再生された振動エネルギーを利用するアクティブ制御に関する研究, 機論, **63**-613, C(1997), pp.3038-3044.
- (4) 須田ほか 4 名, セルフパワード・アクティブ制御による船舶減揺装置(模型船による実証実験), 機論, **68**-670, C(2002), pp.1735-1740.
- (5) 吉武裕ほか 3 名, フラフープを用いた自励振動の制振と発電, 機論, **66**-646, C(2000), pp.1785-1792.
- (6) 吉武裕ほか 4 名, 機械・構造物の制振と発電を同時に行う装置の研究(強制一自由度系の制振), 機論, **66**-650, C(2000), pp.3233-3241.
- (7) Yoshitake, Y. et al., Quenching of Vortex-Induced Vibrations of Towering Structure and Generation of Electricity using Hula-Hoops, *J. Sound Vib.*, Vol.272, No.1-2, (2004), pp.21-38.
- (8) Yoshitake, Y. et al., Vibration Control and Electricity Generating Device using a Number of Hula-Hoops and Generators, *J. Sound Vib.*, Vol.275, No.1-2, (2004), pp.77-88.
- (9) Yoshitake, Y. et al., Design of Vibration Control and Electricity Generating, *REPORTS OF THE FACULTY OF ENGINEERING NAGASAKI UNIVERSITY*, (in Japanese), Vol.35, No.64, (2005), pp.41-48.
- (10) Caughey, T. K., Hula-Hoop: An example of hetero-parametric excitation, *Amer. J. Phys.* Vol.28, No.2, (1960), pp.104-109.
- (11) 吉武ほか 4 名, 水平面内におけるフラフープの運動(周期解とカオス), 機論, **71**-707, C(2005), pp.2172-2179.
- (12) 井上順吉, 機械力学, (1982), p.229, 理工学社.
- (13) 野中作太郎, 電気機器 I, (1983), p.194, 森北出版.
- (14) 井上順吉ほか 3 名, 自動平衡装置(その基礎的な特性), 機論, **45**-394, C(1979), pp.646-652.
- (15) 井上順吉ほか 2 名, 自動平衡装置(動不つりあいへの適用), 機論, **49**-448, C(1983), pp.2142-2148.