

付加ばねを用いた可変ばねによる振動低減

大山 祐也*・小林 義和

Vibration Reduction using Variable Spring by Additional Spring Support

Yuuya OHYAMA* and Yoshikazu KOBAYASHI

(平成22年11月26日受理)

Damper is often used for reducing the amplitude of the vibration system. In this study, variable spring applied for the vibration system. In order to change the spring constant of the spring, additional spring (tensile type and compressive type) is applied for the vibration system. In the range of this study, variable spring system consist of the additional spring support can reduce the amplitude effectively, and shift the resonance amplitude from lower frequency range to the higher one.

1. 緒言

本研究は、比較的ダンパの使用が難しいと考えられる条件において、質量にばねのみを付加した系における振幅の低減を目的としている。ばねのみで振幅を低減させる方法には、振動中にばねのばね定数を変化させることなどが挙げられる。そのような、ばねのばね定数を変化させることができるばねを、可変ばねと呼び、ばね定数の大きさを変更できる可変ばねに関する研究は、すでに尾田らが比較的大型のばねを対象としている研究⁽¹⁾を行っており、林原は線ばねを使用したねじり剛性を変更する場合⁽²⁾についてすでに検討している。本研究では、実験室で検討が可能であり小型で入手の容易なばねのばね定数のあるばね定数から、他のある一定のばね定数の値に変化させ、振幅を低減することを目的として行った。昨年当研究室で行った同様の研究では、渡邊⁽³⁾が研究の第一歩として主に行ったばねの支持点を変更してばね定数を変化させる方法（長さ変化による可変ばね）により、効果的に共振を避け振動を低減することができた。また渡邊らは次に、支持するばねの本数を変化させることによりばね定数を変化させる方法（付加ばねによる方法）を試験的にを行い、振動を低減できる可能性を示した。先の研究では、長さ変化による可変ばねの方法が振動低減に

おいて大きな効果があるが、ばね定数変更のために電子的な制御装置が必要でありイニシャルコスト・ランニングコスト等がかかることが挙げられた。ゆえに、本研究では付加ばねによる方法について昨年に引き続き行い、その振動低減に及ぼす効果を特に詳細に検討することとした。

2. 実験装置と使用機器

本研究で使用した振動装置の概観を図1に示す。モータ①の回転運動をクランク機構によって直線運動に変化させ、強制振動台②を一定の周期で強制振動させた。強制振動台に与えた片振幅は5[mm]である。振動系に入力する加振振動数は、モータの回転速度を変更することで調整した。強制振動台上のリニアガイド③に自由振動台④を載せてばね⑦で両側から支持した。ばねの片方あたりの許容振動長さ

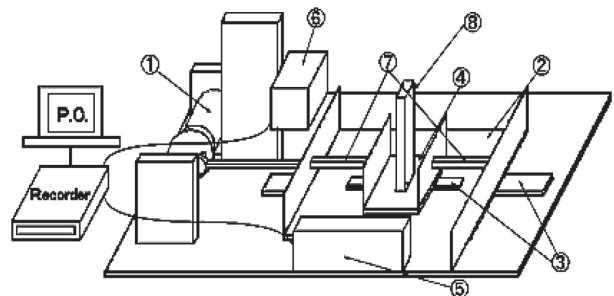


図1 実験装置

* 秋田高専専攻科学生

表 1 主振動系のばね定数

	ばね定数[N/m]
ばねA	約71.93
ばねB	約112

は約140 [mm]とした。本研究で使用したばね⑦は、ばね定数の低いばねAとばね定数の高いばねBの二つである。この二つのばねについては、予備実験として実際にフックの法則を用いてばね定数を測定した。表1にその結果をまとめる。ただし実験時には二本のばねで支持するため、二本のばねのばね定数の和で表記した。自由振動台④のリニアガイドの振動範囲は200[mm]と設定した。これは光学式変位計A⑥の測定範囲が±100[mm]の範囲までしか測定できないことが理由である。強制振動台②の振幅は光学式変位計B⑤を使用して、自由振動台④の振幅は光学式変位計A⑥を使用して測定したものをデータロガーに取り込みコンピューターで解析した。自由振動台および質量⑧は合わせて1.5[kg]と設定した。

3. 実験原理

3.1 振動系の運動方程式と共振振動数

本研究で使用する振動形のモデルは図2のようになり、1自由度系の運動方程式は以下のようになる。

$$m\ddot{x} = -k_1(x-y) - k_2(x-y)$$

$$m\ddot{x} = -(k_1+k_2)(x-y)$$

$k_1+k_2=k$ と置くと上の式は次のように表せる。

$$m\ddot{x} + k(x-y) = 0$$

$$m\ddot{x} + kx - ky = 0$$

$$m\ddot{x} + kx = ky_0 \cos \omega t$$

ここで $x = X \cos \omega t$ とすると、

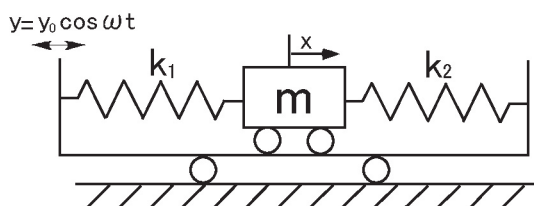


図 2 振動系モデル

表 2 主振動系の理論共振振動数

	振動数[Hz]
ばねA	1.1
ばねB	1.38

$$-m\omega^2 X \cos \omega t + kX \cos \omega t = ky_0 \cos \omega t$$

$$-m\omega^2 X + kX = ky_0$$

$$X(k - m\omega^2) = ky_0$$

$$X = \frac{ky_0}{(k - m\omega^2)}$$

$$x = \frac{ky_0}{(k - m\omega^2)} \cos \omega t$$

共振点は振幅が一番大きく（無限に）なるところなので分母が0になるところより

$$k - m\omega_n^2 = 0$$

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \longrightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

固有角振動数を振動数に直すと

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

これが理論的に求められる共振振動数である。

なお、今回の実験で主振動系に使用されるばねAとばねBについての理論的な共振振動数は表2のようになった。

3.2 ばね数の変化による可変ばね

付加装置の概略は図3のようになる。付加するばねとして引張りばねもしくは圧縮ばねを使用する。加振振動数を上昇させていく時に振幅が大きくなり一定の値になったとき、配置しているばねが効き始

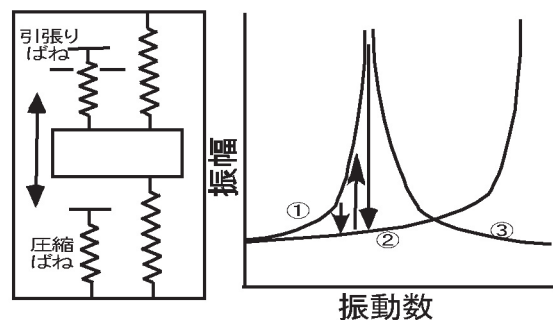


図 3 付加装置概略と原理

める。最初は支持しているのが右側のばねだけなので、図3の振動数応答曲線の左側のシステムの①に沿って振幅は変化していく。一定の振幅になり、配置しているばねが作用し始めると、瞬間的にばね定数が大きくなり、右のシステム②に沿うようになる。自由振動台が中心に近づくと左のシステム①になり、大きく振動するが一定値を超えると、またばねが効き始めるので右のシステム②にまた変化する。これを繰り返して左のシステムの共振点を避け、発生する振幅が減少していき左のシステム③の領域に沿って振動していく。ただし、図3において、引張りばねと圧縮ばねの両方を使用するように表しているが、実験の時はどちらか一方を使用した。

4. 振動低減実験

4.1 振動数応答曲線の作成

予備実験として、主系として今回の実験に用いる

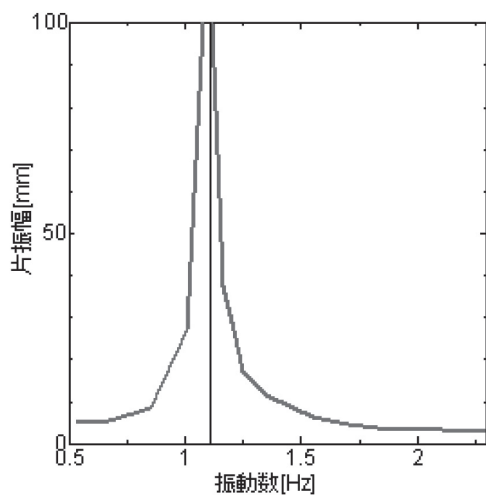


図4 ばねAの振動数応答曲線

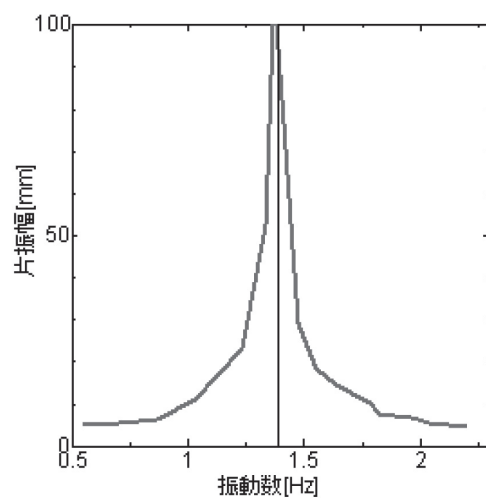


図5 ばねBの振動数応答曲線

表3 付加ばねのパラメータ

	ばね定数[N/m]	ばね長[mm]
ばねC (引張り)	93.15	150
ばねD (引張り)	214.6	150
ばねE (圧縮)	150	80
ばねF (圧縮)	390	80

ばねAとばねBについて種々の振動数における自由振動台上の質量の振動の状態を記録し、振動数応答曲線を作成した。図4としてばねAのものを、図5としてばねBのものを示す。

図中の縦の実線は表2に示す主系のばねのみの理論共振振動数である。ばねA, Bともに共振振動数が理論値とほぼ一致している。以降の振幅低減実験ではこのデータを付加ばねの作用していない状態のデータとして使用する。

4.2 付加装置による振幅低減実験

この実験では図3のように、あらかじめ振動台に引張りばねもしくは圧縮ばねを取り付けておく。付加されるばねのパラメータを表3に示す。ただし振動中に作用する付加ばねは片側のみ、即ち一本なので、ここに示すパラメータはばね一本分のものである。表3に示したばねを使用して、振動数応答曲線を作成する。ばねCとDが引張りばね、ばねEとFが圧縮ばねである。引張りばねC及びD、圧縮ばねEは片振幅35[mm]のところで作用するように配置し、圧縮ばねFは片振幅25[mm]のところで作用するように配置した。表3に示したばねを使用して、3.1節の理論共振振動数の式に基づき付加ばねの作用している状態の理論的な共振振動数を求める。各条件でのばね定数および理論共振振動数を表4に示す。以上に示す条件で、加振振動数を0.5[Hz]から約2.3[Hz]の範囲で操作し振動数応答曲線を作成し、付加ばねによる振幅の低減実験を

表4 付加ばね作用時のばね定数と理論共振振動数

	ばねA使用時 ばね定数[N/m] (理論共振振動数[Hz])	ばねB使用時 ばね定数[N/m] (理論共振振動数[Hz])
ばねC (引張り)	165.08 (1.67)	205.15 (1.86)
ばねD (引張り)	286.53 (2.2)	326.6 (2.35)
ばねE (圧縮)	221.93 (1.94)	262 (2.1)
ばねF (圧縮)	461.93 (2.97)	502 (2.91)

行った。

5. 実験結果と考察

5.1 付加装置による振幅低減実験の結果

まずはばね定数の低い主系のばねAに、引張りばねのうちばね定数の低いばねCを用いたものを図6として、ばね定数の高いばねDを用いたものを図7として振動数応答曲線を示す。

図中の点線は付加ばねがない場合、実線は加振振動数を低振動数側から徐々に上げた時の結果、破線は加振振動数を高振動数側から徐々に下げていった時の結果を示す。縦軸の実線は表5に示す付加ばねが作用している間の理論共振振動数（スケールの都合上2.3[Hz]を超えるものは示していない）であり、横軸の一点鎖線は付加ばねが作用し始める位置を示している。

図6および図7の結果から、引張りばねを使用すると振動数を上げた場合・下げた場合、両方の結果で1.2[Hz]以下の領域では付加ばねがない場合の結果に似た傾向を示している。しかしながら、1.2[Hz]よりも振動数の大きい領域では全く異なった挙動を示している。加振振動数を上げる場合について考察すると、比較的ばね定数の弱いばねCを使用した場合、共振時の振幅を低減しているとはいえないが、共振点をより高次側（約1.6[Hz]）にシフトさせていることが分かる。さらに、よりばね定数の強いばねDを用いた図7ではばねCの結果よりもさらに高次側（約1.8[Hz]）にシフトしている。加振振動数を下げる場合については、付加ばねのない場合と比較して、いずれの場合も効果的に振動が低減されて

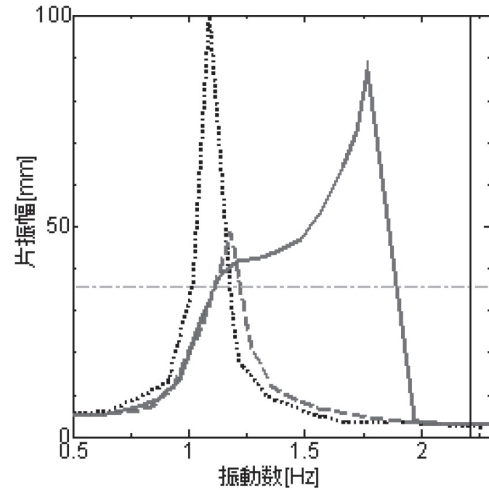


図7 引張りばねの振動数応答曲線 (A-D)

いることが分かる。

次にばねAに、圧縮ばねのうちばね定数の低いばねEを用いたものを図8として、ばね定数の高いばねFを用いたものを図9として振動数応答曲線を示す。圧縮ばねを用いた場合も、先の引張りばねと同じような結果となっているが、加振振動数を上昇させる場合の結果では、付加ばねのない場合と比較して35%~50%の振動を低減することができた。今回用意した圧縮ばねが先の引張りばねと比較して強いために、より振動を低減できたのではないかと考えている。一方、振動数を下降させる場合の結果については引張りばねと同様に、効果的に振動が低減できていることが分かる。

次にばね定数の高い主系のばねBに、引張りばねのうちばね定数の低いばねCを用いたものを図10と

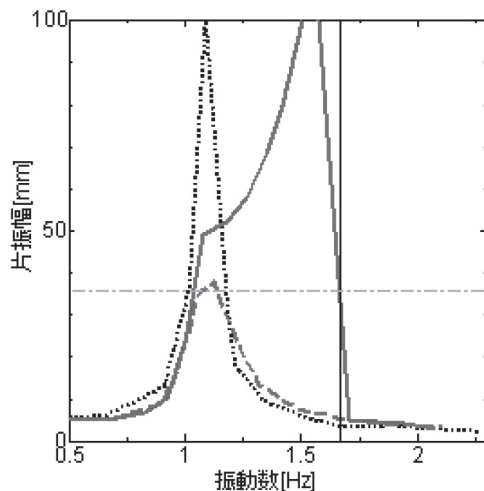


図6 引張りばねの振動数応答曲線 (A-C)

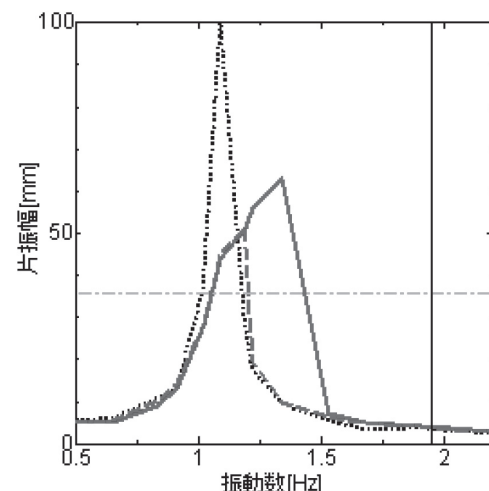


図8 圧縮ばねの振動数応答曲線 (A-E)

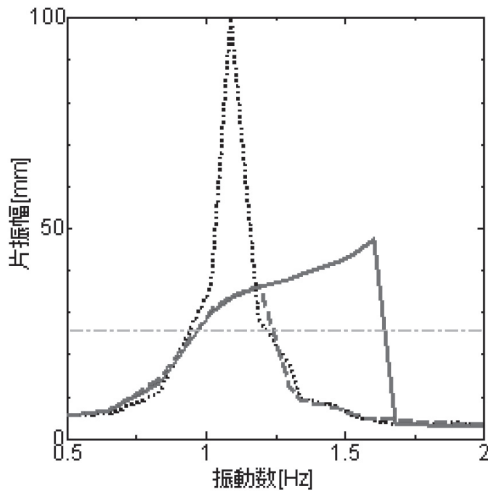


図9 圧縮ばねの振動数応答曲線 (A-F)

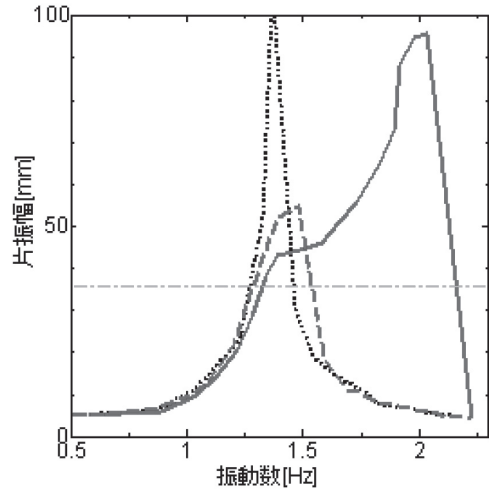


図11 引張りばねの振動数応答曲線 (B-D)

して、ばね定数の高いばねDを用いたものを図11として振動数応答曲線を示す。また、圧縮ばねのうちばね定数の低いばねEを用いたものを図12として、ばね定数の高いばねFを用いたものを図13として振動数応答曲線を示す。

図10～図13の結果を見ると、いずれの場合においても先に示したばねAを用いた場合と同様の結果を得た。しかしながら、ばねAと比較してばねBのばね定数が大きいことから、引張りばねおよび圧縮ばねの寄与がばねAのそれと比較して小さく、振動の低減や共振振動数のシフトの割合は小さくなっている。しかしながら、今回ばねAおよびばねBの二つの場合において引張りばね、圧縮ばねの効果を確認した結果、ほぼ同様の傾向が得られたので、一般的に、今回検討していない他のばねについても定性

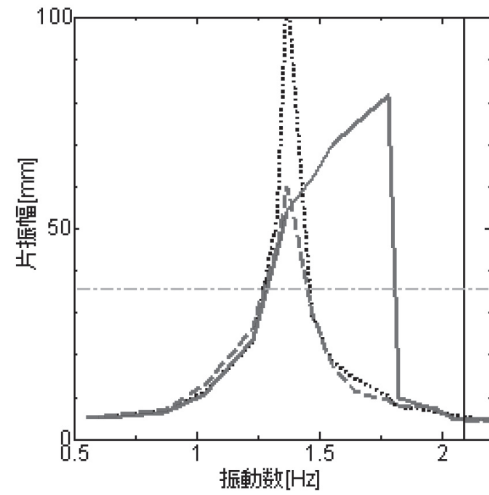


図12 圧縮ばねの振動数応答曲線 (B-E)

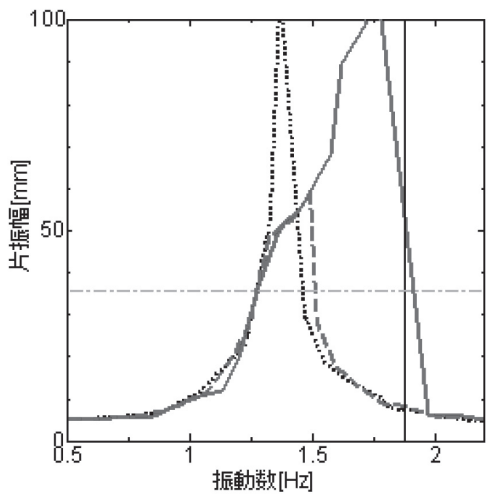


図10 引張りばねの振動数応答曲線 (B-C)

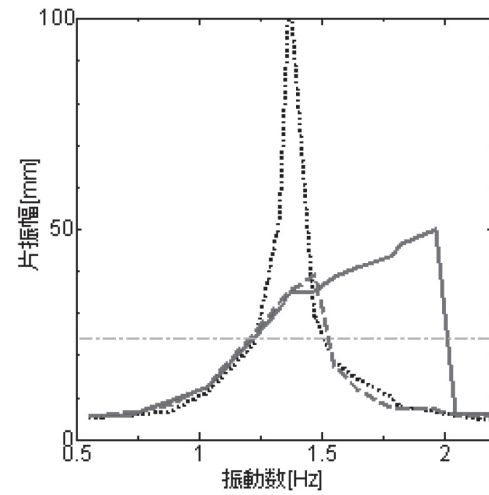


図13 圧縮ばねの振動数応答曲線 (B-F)

的に同様の結果が得られると予想される。また、加振振動数を上げた場合と下げた場合と挙動が異なっている理由についてはいわゆる非線形ばね特有の現象である跳躍現象⁽⁴⁾ (jumping phenomena) と同様の挙動を生じていると考えられる。今後、より詳細に検討することが必要であると考ええる。

6. 結言

今回行った、ばね数の変化による可変ばねの実験の結果から言えることを以下にまとめる。

- (1) 引張りばねを付加することにより、振幅のピークをより高い振動数に移動させることで主系の共振を避けることは可能である。ただし、条件によっては主系だけの時と振動が同じか、または振動が大きくなる場合がある。
- (2) 今回の実験では、引張りばねと圧縮ばねのうち、圧縮ばねを付加した方が効果的に振動を低減できることが分かった。
- (3) 付加ばねとして、引張りばねを用いた場合、圧縮ばねを用いた場合いずれにおいても振動数が上がっていく時と下がっていくときでは、異なる挙動となる。

今回の実験の結果を見るかぎりでは圧縮ばねのほうが付加ばねに適していると予想される。本研究の今後の展望としては、両方のばねでパラメータを揃えて実験を行い、二種類のばねの違いを明確にすることが必要である。さらに、時間応答実験を行い、過渡振動の挙動を調べることも必要であると考えている。

参考文献

- (1) 尾田十八, 他二名, 剛性可変ばねの試作とその変位制御問題への応用, 日本機械学会論文集 C 編 59-564, (1993), pp.262-267.
- (2) 林原靖男, 線ばねを用いた剛性可変機構の研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会2007 (CDROM) 2A2-D12.
- (3) 渡邊恭平, 小林義和, 可変ばねによる振動低減, 秋田高専研究紀要第45号, (2010), pp.42-48.
- (4) S.P.Timoshenko, D.H.Young, W.Weaver,JR, 新版 工業振動学, コロナ社, (1977), pp.152.