

# 可変ばねによる振動低減

渡 邊 恭 平\*・小 林 義 和

## Vibration Reduction using Variable Spring

Kyohei WATANABE\* and Yoshikazu KOBAYASHI

(平成21年11月27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, changing the supporting point of the spring, using the contact sensor and microcontroller (PIC). In addition, the additional spring (tensile type and compressive type) was applied for the vibration system. In the range of this study, variable spring system is the best in reducing the amplitude, but the result indicated that the tensile type-additional spring is more effective for economical and ecological point of view.

### 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、可変ばねと呼ぶ。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<sup>(1)</sup>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<sup>(2)</sup>についてすでに検討している。本研究は、可変ばねの研究の第一歩として、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があるばね定数から、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。具体的には、あらかじめ支持しているばねの支持点を変更することによってばねの長さや、支持するばねの本数を変化させ、その結果ばね定数を可変できる装置を試作して、ばねの共振点を避けることによる振幅の低減効果について検討した。

### 2. 実験装置と使用機器

本研究で設計・製作した振動装置の概観を図1に

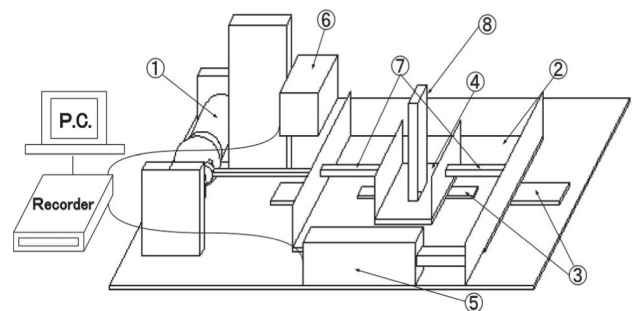


図1 実験装置

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7.5 [mm]である。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。接触式変位計 (SDP-100C 東京測器研究所) ⑤では強制振動台の変位波形を測定し、光学式変位計 (LB-300 KEYENCE) ⑥では自由振動台の変位波形を測定する。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の二つであり、以降これを主振動系のばねと呼ぶ。この二つのばねは、長さは共に140 [mm]であり、ばね定数はフックの法則を用いて測定した。表1にその結果求められたばね定数をまとめる。表1の括弧の中の値は可変機構によってストッパーが入り、ばね定数が大きくなったときのばね定数である。

\* 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 70.3 (140.6)
ばね B	約116.9 (233.8)

可変機構については後述するが、ばねの長さを変化させる可変機構の位置はばねの中間点付近にストッパーが入るように配置した。自由振動台④のリニアガイド③の振動範囲は200 [mm] と設定した。これは、光学式変位計⑥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。自由振動台およびおもり⑧の質量は合わせて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

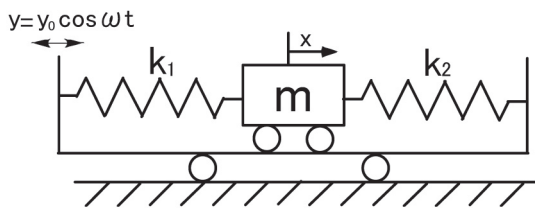


図 2 振動系モデル

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。

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

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

$k_1 + k_2 = k$ と置くと上の式は以下のように表せる。

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

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

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

ここで  $x = X \cos \omega t$  とすると、

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

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

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

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

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

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。

#### 3.2 長さ変化による可変ばね

ばねの長さを変化させる可変装置の概略を図3に示す。可変装置は、自由振動台を支持しているばねの中間点付近にストッパーを導入して、自由振動が可能なばねの領域を制限した状態にするものである。可変装置の実験では、振動数を上昇させる場合、最初はストッパーが入っていてばね定数の大きい状態にし、図3の振動数応答曲線の右側の山のシステムの①の領域を使用する。加振振動数が高くなり②の点に達した時、可変装置を作動させる。ストッパーが外れることによって、振動領域の制限がなくなるので、ばね定数が小さくなる。そのため、ばね定数の小さい左側の山のシステムの③にそって振幅が推移していく。その結果、常に小さい振幅の領域で使用することが可能となると考えられる。加振振動数を低くしていく場合には①'→②'→③'の手順に沿って制御すれば、振幅の制御が可能になるだろう。

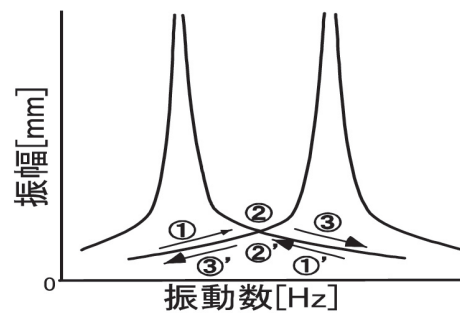
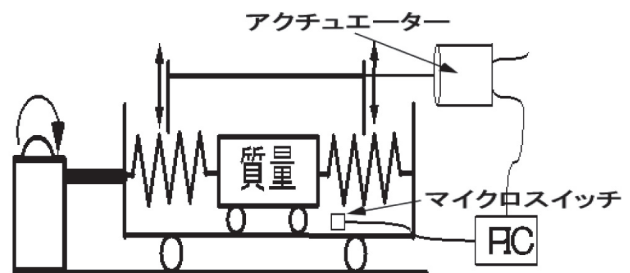


図 3 可変装置概略と原理

### 3.3 ばね数の変化による可変ばね

付加装置の概略は図4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める。最初は支持しているのが右側のばねだけなので、図4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4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。

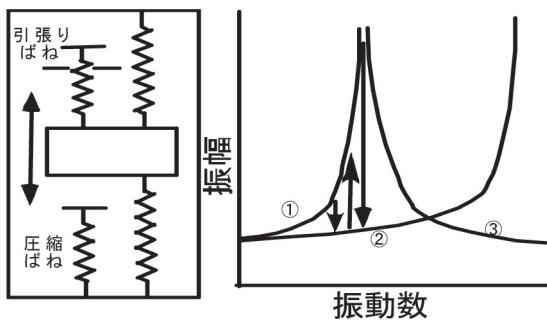


図4 付加装置概略と原理

## 4. 振動低減実験

### 4.1 可変装置による振幅低減実験

3.2節で説明したように、ストッパーがある状態とない状態の振動数応答曲線を作成する。振動数応答曲線は、種々の振動数において定常状態の時の振幅の最大値をグラフ化したものである。多数の実験データをもとにばねAの振動数応答曲線を図5のように作成した。図5の縦に入る線は、理論的に求められる共振振動数である。今回の実験で得られた共振振動数も理論値の付近にあり振動数応答曲線の確かさを確認した。

図5より、ばねAの可変機構を作動させるタイミングは、二つの振動数応答曲線が交差する位置、すなわち理想的な装置作動点は、振動数が約1.3 [Hz]、振幅が20 [mm] 付近である。ばねBにおいて、同様に振動数応答曲線を作成したところ、振動数が

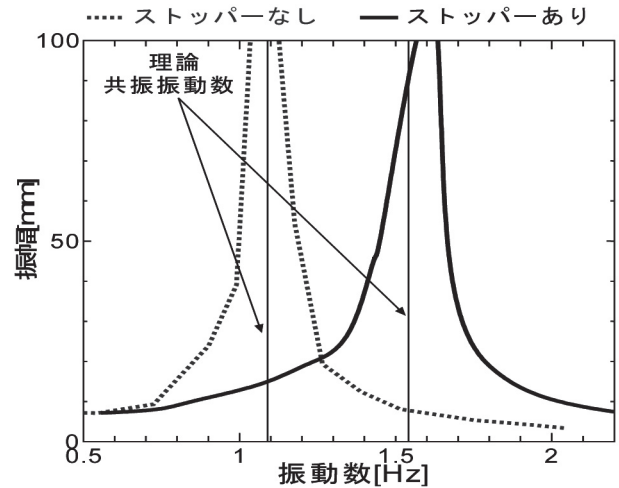


図5 可変装置の振動数応答曲線 (ばねA)

1.55 [Hz]、振幅が25 [mm] 付近となった。可変装置は振幅を基準とし、マイクロスイッチで作動させる方法を用いた。ただし、今回の実験では理想的な作動点ではなく、振動数応答曲線作成時の誤差を低減するために、二つの振動数応答曲線の共振点の間を取ることとした。そして、今回の実験では加振振動数を上昇させる時を重視することとするので、可変装置の作動点は振幅が30 [mm] のところに設定した。ばねBでも同様の場所となった。よって30 [mm] に達した時に、ワンチップマイコンPIC<sup>(3)</sup>によりストッパーを作動させることとする。

### 4.2 付加装置による振幅低減実験

この実験では図4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2に示す。表2に示したばねを使用して、先ほどの可変装置同様に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が圧縮ばねである。引張りばねは振幅が約40 [mm] のところで作用するように配置し、圧縮ばねは30 [mm] と40 [mm] のところで作用するように配置した。

表2 付加ばねのパラメータ

	ばね定数 [N/m]	使用長さ [mm]
ばねC	103.5	150
ばねD	216.1	150
ばねE	390	80

付加装置のばねAにおける振動数応答曲線は図6のような結果となった。

引張りばねと圧縮ばねのどちらも、振動数が低い

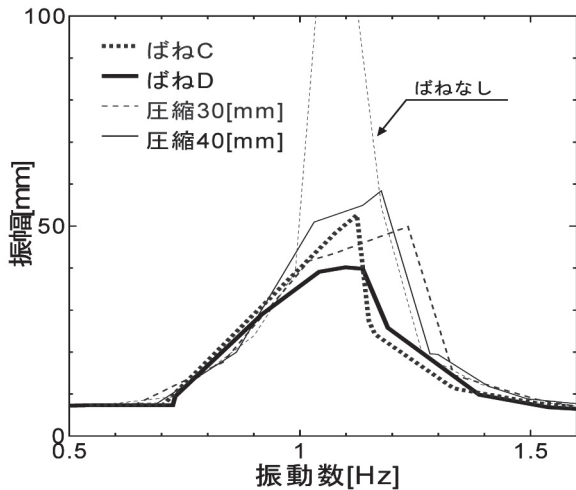


図6 付加装置の振動数応答曲線(ばねA)

範囲では、何もないときの波形に近い形で振動数応答曲線を描き、共振点においては振幅の低減に成功している。圧縮ばねは、比較的最大振幅が、高い振動数域にシフトする傾向が見られた。ばねDを除くと最大振幅は50 [mm] 付近に集まっている。

この結果から、ばねDを使用したほうが、振幅をより低減しているようだが、ばねが作用し始めるのが40 [mm] なのに、40 [mm] より大きな振動が生じないのは問題である。

主振動系をばねBにしてもばねAの結果と似た傾向の振動数応答曲線を得ることが出来た。最大振幅を抑え、圧縮ばねでは高い振動数領域に最大点がシフトしており、ばねDにおいては40 [mm] 以上の振幅が生じにくい。ばねDで40 [mm] 以上の振幅が生じにくい原因は、引張りばねにある初張力ではないかと考える。小さいばね定数の主振動系では、大きい初張力を持った付加ばねがしっかり伸びずに、ばねはばねとしての効果を働かせずあたかも、少し柔らかい棒を引っ張ったかのような作用になったのではないかと予想される。

よって、付加ばね装置では引張りばねは伸びが生じているばねCを使用して比較しやすいように圧縮ばねの作用する位置は40 [mm] とした。

### 4.3 振幅の低減実験

4.1節の可変装置による振幅低減実験と4.2節の付加装置による振幅低減実験の結果から得られた条件を使用して振幅の低減実験を行う。モータの回転数を約0.5 [Hz]~2.3 [Hz] の範囲で、手動で上昇または下降させていき、振幅がどの程度低減するかを検証する。

## 5. 実験結果と考察

### 5.1 可変装置による振幅低減実験の結果

振動中に可変装置を使用し、ばねの途中にストッパーを入れ、振動可能な長さを変化させて、ばね定数を変化させたときのばねAについての時間応答曲線は図7のようになった。ばねAの結果である図7の上の図に注目する。これは振動数を徐々に上昇させたときに可変装置を作動させたときに得られた結果である。最初ストッパーが入っており、一定振幅で可変装置が作動し、ストッパーが外れたときの波形である。最大振幅の小さい中心の波形が可変装置を作動させたときの波形である。今回、研究の第一段階のため振動数の変更を自動制御ではなく手動によって行なったため、若干誤差が生じていると考えられるが、図より明らかなように最初の段階ではストッパーが入っているときの最大振幅が後ろ側にある波形に沿って進んでいる。そして、振幅が30 [mm] の時に可変装置が作動してからは、ストッパーが外れるのでばね定数が小さくなり最大振幅が前側にある波形に沿って進んでいることがわかる。最大振幅

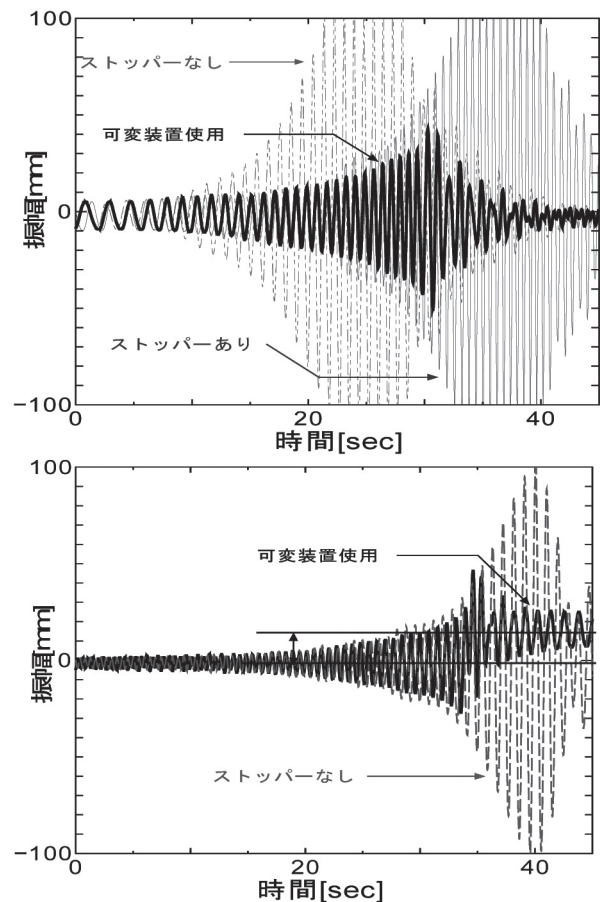


図7 可変装置の振動低減実験(ばねA)

は45 [mm] 程度に抑えることに成功している。光学式変位計の都合上100～-100 [mm] のみの測定となっているが、可変装置を作動させない時はそれ以上の振動をしている。それを考慮に入れると、60 [mm] 以上の振幅の低減に成功している。しかし、可変装置の作動点は30 [mm] のところであり、黒い波形の理想となる最大振幅はもちろん30 [mm] である。実験で生じた最大振幅の45 [mm] と比較すると、この原因として考えられるのが、可変装置を作動させるマイクロスイッチであると考えている。今回の実験では、自由振動台が30 [mm] のところに配置したマイクロスイッチの上を通過したときに接触するように設定した。しかし、マイクロスイッチは多少の誤作動防止のために、浅く入っても電流が流れないように配置した。実際は30 [mm] をオーバーしないといけないこと、そして、可変装置を作動させるモータの回転数が低く、振動中に外れないように、ばねに深くストッパーを入れないといけないことも関係していると考えられる。そのため、時間的にロスが発生して30 [mm] 以上の振幅が発生しているのではないかと考えている。また、急激なばね定数の変化によって、振動に何らかの影響を与えていることも原因ではないかと考えている。図7の下の方の図は振動数を徐々に下降させたときの波形である。なお、この図ではストッパーをつけてばね定数が大きくなった時の波形は示していない。なぜなら、可変装置を作動させた時の最大振幅が小さい波形を見て分かるように、可変装置を作動させた後は中心の位置がずれてしまい単純に比較できないからである。中心がずれてしまう原因はマイクロスイッチが中心から30 [mm] のところに配置されているので、そのマイクロスイッチに反応した時にばねの隙間にストッパーが入る。振動中のばねは片方に、より伸びているので、ストッパーが入った時に支持しているばねの長さは、両方違う長さになってしまう。そのため、ばね定数に差が出てしまい中心からのずれが生じてしまう。中心がずれてしまうことを除けば、可変装置が作動した時の波形は振幅を大きく減少させることに成功している。

今回図示していないばねBにおいては、ばねA同様に、30 [mm] にマイクロスイッチを配置し測定を行った。振動数を徐々に上昇させた時の波形は図7の結果と類似していた。振幅は50～60 [mm] 程度に低減できた。振動数を徐々に下降させたときの波形も図7と似た形の波形をしている。中心はずれてしまっているが最大振幅は30 [mm] 程度に抑えることに成功した。

ばねAとばねBの結果をまとめると、結果の波形が類似しているため、今回得られた結果がばねAやばねBの特徴ではなくて他のばねを使用しても一般的に今回得られたような波形になるのではないかと考えられる。可変装置を使用した場合は使用しない場合と比べて大きく振幅を低減することができている。ばねなどを利用する振動系で非常に頭を悩ませられる、共振点のことをほとんど考えなくてもよいような結果を得ることができた。ただし、今回の実験では振動数を徐々に上昇させる時はきれいな波形を得ることができたが、振動数を徐々に減少させた時の波形は中心がずれてしまう結果となった。

## 5.2 付加装置による振幅低減実験の結果

振動中にあらかじめ配置しているばねに接触することによって、支持するばねの数を変化させ、ばね定数を変化させた時のばねAの時間応答曲線は図8のようになった。図8において上の図が振動数を徐々に上昇させた時の波形であり下の図が徐々に振動数を下降させた時の波形である。まず、振動数

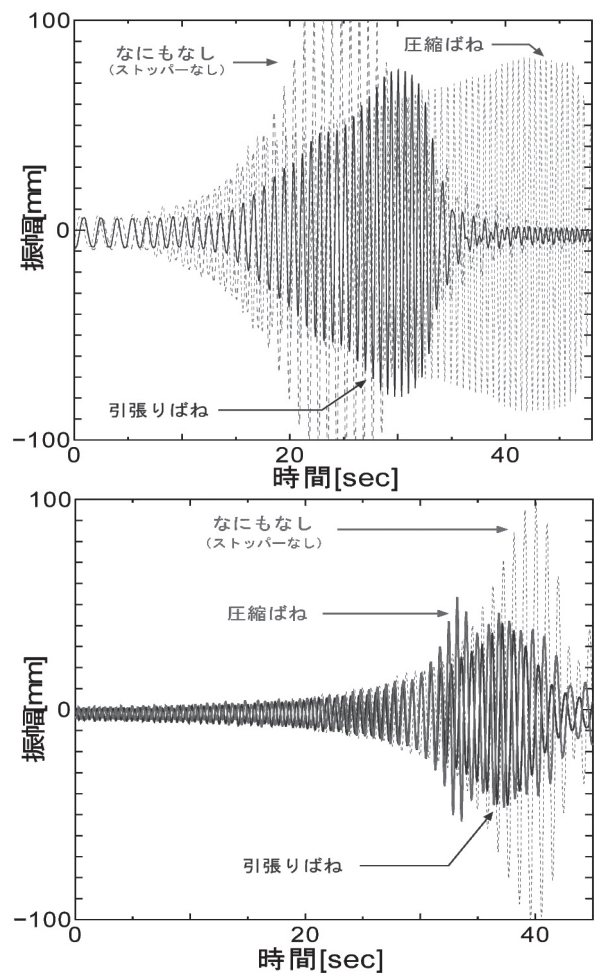


図8 付加装置の振幅低減実験 (ばねA)

を上昇させた時の波形であるが、引張りばねの波形が何もつけていない時の結果に沿って移動していないことがわかる。これは、振動中に引張りばねはリニアガイドで片方を支持し自由に振動できるようにしているが、リニアガイドを使用しているとはいえある程度の摩擦等が生じてしまい、その結果抵抗の分だけ波形が後方にずれてしまったのではないかと推測される。振幅の低減効果であるが、最大振幅は約75 [mm] であり、光学式変位計の測定範囲をオーバーするような共振は避けることができている。しかし、この実験に対応する振動数応答曲線の図6の結果より、振幅は約55 [mm] 程度に抑えることができる予定であったので、定常状態と過渡状態では生じる振幅に差が出てしまうことが分かった。そして、注目したいのが圧縮ばねを使用した時の実験結果の波形である。圧縮ばねは強制振動台に配置しているので、時間0から初期は何もつけていない時の波形に沿って進んでいるが、振幅が圧縮ばねを配置している40 [mm] を越えたあたりから振幅が低減せずに緩やかに上昇している。最大振幅こそ引張りばねのときの結果と大差は無いが、振幅が大きくなっている割合は一目見て分かるほど圧縮ばねのほうが大きくなっている。測定が終了しそうなところにやっと振幅が減少していく兆候が見える。この実験に対応する振動数応答曲線の図6では振幅は60 [mm] 程度まで上昇しており、共振点を過ぎた後は何もしていない時の波形に沿って進んでいくのではないかと予想したが、振動数を徐々に上昇させた時は圧縮ばねではその兆候が見えなかった。次に、振動数を徐々に減少させた時の結果であるが、引張りばねは45 [mm] 程度、圧縮ばねは60 [mm] 程度に振幅を抑えることができている。何もしていない時に比べて早い段階で振幅の最大値が生じてしまっているが、これは図6を見れば分かるように、振動数応答曲線の時からすでに何もつけていない時より高い振動数のときに振幅の最高点がずれていたもので、振動数応答曲線通りの結果となっている。

ここには掲載していないばねBによる結果では、振動数を徐々に上昇させた時も、振動数を徐々に下降させた時もばねAと類似した波形となった。やはり、振動数を上昇させた時の波形は引張りばねも、圧縮ばねも振動数応答曲線から求められた最大振幅以上の値になってしまっている。そして、圧縮ばねでは配置している圧縮ばねに接触した後は緩やかに振幅が大きくなっていき、終了する直前になってようやく振幅に落ち着きが見えてきている。振動数を下降させる時は引張りばねと圧縮ばねともに、振幅

を60 [mm] 程度に抑えることができている。振動数応答曲線でもこの時の最大値は60 [mm] 程度であるので、振動数が下降している時は振動数応答曲線に似た波形になっていた。

ばねAとばねBの結果をまとめてみると、こちらの実験でも、主振動系のばねによらずに似た波形を得ることができたので一般的にこのような結果となると考えてもよいと思う。支持するばねの本数が途中で変化する今回の実験では振動数を徐々に減少させる時は非常にきれいな形で振幅を低減することができている。しかし、問題となるのは振動数を上昇させていく時である。引張りばねの結果は振動数応答曲線の理想的な最大振幅を越してしまうが、共振自体は避けることができている。圧縮ばねは、確かに振幅の最大値は減少しているが、このような波形になってしまった原因が圧縮ばねにあるのか、それとも他のばねに比べてばね定数が大きすぎるのが原因なのかを調べていくことが今後の課題となるだろう。

## 6. 結言

今回の振動低減実験から得られた、種々の最大振幅を表3にまとめる。ただし、付加装置の結果は最大振幅の小さい引張りばねの値を記載する。

表3 実験結果

	最大振幅 [mm]			
	可変装置		付加装置	
	上昇	下降	上昇	下降
ばねA	45	35	75	40
ばねB	60	35	75	55

今回の実験結果から言えることは、

- ①可変装置と付加装置のどちらでも、共振を避けて振幅の低減をすることは可能である。
- ②定常状態で求めた振動数応答曲線の振幅の最大値より過渡状態での振幅の最大値のほうが大きい。
- ③あらかじめ配置するだけで効果を発揮する付加装置よりも、随時電気制御等が必要な可変装置を使用したほうが低減幅は現段階では大きい。ただし可変装置で振動数を下降させたときは中心がずれてしまう。
- ④付加装置では使用するのは現段階では圧縮ばねより、引張りばねのほうが好ましいといえる。ただし、引張りばねにある初張力を考慮したばねの選定をする必要がある。

上で述べたように、可変装置を使用した方が振幅を低減することができている。しかし、制御を必要とせずコスト面、メンテナンス面でも優れている付加装置のほうが実用的と考えられるので、可変装置を使用し積極的（アクティブ）に制御を行って振動を低減するような状況で無い限りは、付加装置を使用し、受動的（パッシブ）に振動を低減することが望ましいと考えられる。

#### 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, pp.262-267, (1993)
- (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 (CD-ROM) 2A2-D12
- (3) 遠藤敏夫著, 誠文堂新光社, 分かるPICマイコン, pp.171-177