弓の振動特性に関する研究

田中 禎一* 谷口 浩平**
高橋 良明*** 高橋 辰郎***

Vibration Characteristics of a Bow

Teiichi Tanaka*, Kohei Taniguchi**, Yoshiaki Takahashi***, Tatsurou Takahashi***

Japanese traditional bow, so called 'Wakyu', has been made from a bamboo. On the other hand, a bow which is made from new material as a glass fiber or a carbon fiber has been developed from 1970's. These new material bow are easy to handle and are durable. However the vibration of a new material bow is different from that of a traditional bamboo bow at shooting an arrow. Therefore it is expected to develop a new material bow which has similar to bamboo bow in vibration characteristics.

The purposes of this study are to measure the vibration characteristics of bows by using accelerometer and to make clear the effect of material and structure to the vibration characteristics. For these purposes, an experimental setup to investigate some of vibration characteristics of bow was constructed.

In this paper, it is explained that the developed experimental setup and the basically vibration characteristics of a new material bow at shooting an arrow.

キーワード: 弓,振動特性,加速度センサー

Keywords: Bow, Vibration Characteristics, Accelerometer

1. 序論

日本古来の弓(和弓)は、竹材を使って作られていた. 一方、1960年代後半から各種の新素材が開発され、身の回 りのさまざまな製品に使用されると同時にスポーツ用具に も使われるようになってきた.弓の世界でも、これら新素 材であるグラスファイバーやカーボンファイバーを使用し た弓、いわゆる、合成弓が登場した.これら新素材から製 作された合成弓は、その取扱いの容易さから、競技用弓の 大部分を占め、その需要は今後益々伸びていくと考えられ ている.しかし、この合成弓は、矢を射るときに手に伝わ る振動が、和弓と異なることから、和弓に近い振動特性を 持つ弓の開発が望まれている.

弓に関しては、これまで、和弓の弦の素材の違いによる研究 (1) や和弓の弦の張力に関する研究 (2) など、弓の弦についての研究が行われ、アラミド繊維、ポリエステル繊維、及び麻の各繊維素材でできている数種類の弦を比較した

* 機械知能システム工学科

〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627

Dept. of Mechanical and Intelligent Systems Engineering, 2627 Hirayama, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

** 熊本高専専攻科

〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627

Dept. of Mechanical and Intelligent Systems Engineering, 2627 Hirayama, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

* (有)タカハシ弓具 〒862-0971 熊本県熊本市大江4丁目17-29

Takahashi Kyugu Co.Ltd

4-17-29 Ooe, Kumamoto-shi, Kumamoto, Japan 862-0971

際、麻の弦が最も振動の減衰が早いことや、弦の素材の違いによる曲げ振動とねじり振動の周波数への影響はほとんどないことが明らかになっている。また、発射過程における弦の張力の増減と矢の圧縮力の増減は、時間的に対応しており、弦の張力のピークは、矢が弦から分離した直後に現れることが明らかになっている。一方、和弓における動力学的研究⁽³⁾ や和弓の剛性に関する研究⁽⁴⁾ など、弓本体についての研究では、弓をモデル化し、そのモデルに大たわみ変形理論を適用した理論解析より、弓の初期曲率を変化させた場合、弓の剛さは初期曲率の増加に対してほぼ一定の割合で増加し、握り近傍ほどその影響は大きいことが明らかになっている。また、和弓の握り部は引絞っても、曲げ変形をあまり起こさず、逆に先端部は大きく曲げ変形を起こすことも明らかになっている。

以上のように、弓に関する研究は、弓の弦に関する研究や弓本体の曲げに関する研究がその多くを占めており、矢射出時における弓本体の振動特性についてはあまり報告例がなく、特に、和弓と合成弓の振動特性の違いについてはほとんど知見が得られていない.

本研究では、和弓、及び合成弓を使って矢を射出し、その時の弓の振動特性を、加速度センサーを用いて測定することによって弓の振動特性を調べると共に、その振動特性に与える材質や構造の影響を明らかにすることを最終的な目標としている.

本報では、弓の振動特性を計測するために開発された実験装置の概略を説明すると共に、本装置を用いた、矢射出時における合成弓の基本振動特性について報告する.

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

弓の振動特性を明らかにするために、図 1 に示されるような実験システムを構築した. 実験システムは、図に示されるように、弓、矢、弓固定装置、及び的、そして計測システムから構成されている.

号固定装置は、図 2 に示されるように、弓固定用バイス (万力)とアルミブロック、及びゴム (3 枚)を介して弓を 固定している。これは、弓の固定を人の手の握りと同様な幅と柔らかさで模擬するためである。また、弓は、この弓 固定装置の小型化のため、図 2 に示してあるように地面に対して水平に固定され実験される。弓の射出には、手の指の引っ掛かり具合が計測に影響を及ぼさないように、アーチェリー (洋弓)用のリリーサーを用いており、リリーサ

ーのトリガーを引くことにより、弓の弦が弾かれ、矢が射出されるようになっている. なお、今回の弓の基本振動特性を調べる実験では、グラスファイバー製で並寸(221cm)、強さ15kgの標準的な合成弓を使用した.

ところで、和弓は、アーチェリーとは異なり、全長の中央に握り部がなく、弓の短方側より全長の1/3の位置に握り部があるという非対称構造を持つ。そのため、図3(a)に示すように、真っ直ぐにカットしたアルミブロックで弓を固定した場合、弓固定部の弓に垂直な軸線と矢に生じる力の向きは一致せず、弓固定部前後のしなり方が同じにはならないため、矢は真っ直ぐには飛ばない。そこで、図3(b)に示されるように、ブロックの弓に接している面を斜めにカットしてバイスで挟み、弓固定部前後のしなり方を同じにすることによって、矢を真っ直ぐ飛ばすことを可能にした。また、ブロックは斜めにカットされており、バイスで挟んでいても、矢射出時の衝撃により、ずれが生じてしまう。そのため、ブロックの両端面を固定具で固定することによって、衝撃でブロックにずれが生じないようにしている。さ

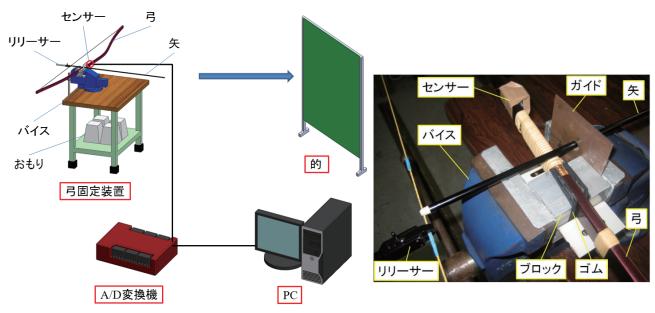


図1 実験システム概略図

図2 弓固定装置

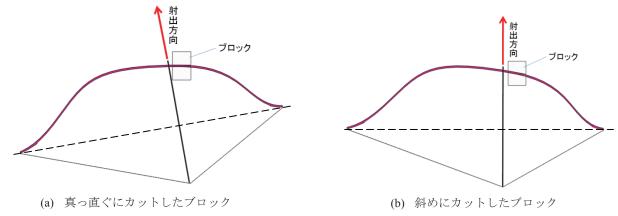


図3 ブロック形状の射出方向への影響

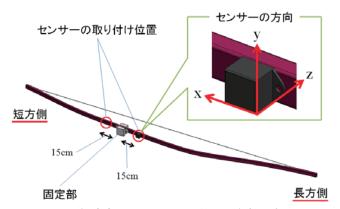


図4 加速度センサーの設置位置と各軸の方向

らに、弓固定部には矢の射出方向をコントロールするため のガイド穴付き板が取り付けられている。なお、加速度セ ンサーは、強力なテープで弓本体に貼り付けており、テー プの端を均等に合わせることで貼り付ける力を均等にして いる。

2.2 実験方法

弓の基本振動特性を調べるために、表 1 に示される各種の実験が行われる.

実験①は、使用したグラスファイバー製合成弓の基本振動特性を調べる実験で、センサー取り付け位置を弓固定部端より弓長手方向の長方側に向かって15cmの位置とし、引き尺を30cmとした実験である。また、実験②は、弓を人の手で保持した場合と弓固定装置で固定した場合における、矢射出時の振動特性を比較した実験であり、弓固定装置が弓の振動特性に及ぼす影響を調べた実験である。実験③は、

引き尺(矢をつがえている弓の弦を定常状態から引っ張る 長さ)を 30cm, 40cm, 50cm として矢を射出した場合の弓 の振動特性を調べた実験であり、引き尺の振動特性への影響を調べた実験である。また、実験④は、弓に取り付けて いる加速度センサーの位置を弓固定部から長方側に 15cm の位置と短方側に 15cm の位置として、矢射出時の振動特性 を調べた結果であり、弓の長方側と短方側の振動特性の違いを調べた実験である。

実験は、センサーの感度調節を行ってから開始される. 矢射出前からサンプリング周波数 5kHz で 3 軸 (x 方向, y 方向, z 方向) 同時に計測を始め、矢を射った後、弓の振動が十分収まってから計測を停止する.

3. 実験結果

3.1 合成弓の基本振動特性

図 5 は、合成弓の基本振動特性を調べた実験① (引き尺: 30cm, センサーの位置:長方側 15cm) の結果である.図 5(a),(b),(c)は、それぞれ、矢射出後の弓のx 軸方向、y 軸方向、z 軸方向の振動波形であり、各図の横軸は矢射出後の時間、縦軸は加速度センサーからの出力電圧である.

図 5 によれば、弓の振動は、弓の長手方向である x 軸方向、長手方向と矢の射出方向の両方に垂直な y 軸方向に比べ、矢の射出方向である z 軸方向の振動加速度の振幅が最も大きいことがわかる. また、x 軸方向と y 軸方向の振動加速度は、矢射出後 0.3[s]程度で振幅が小さくなっているのに対して、z 軸方向の振動加速度は、矢射出後 0.3[s]を過ぎてもx 軸方向と y 軸方向に比べ、大きな振幅が残っており、矢射出後の z 軸方向の振動が弓を保持する人の手の感覚に大きな影響を及ぼしていることが分かる.

図 5 で示された振動の時系列データを FFT 解析したもの が図 6 に示されている. 図 6(a), (b), (c)は,図 5 と同様, それぞれ,矢射出後の弓のx 軸方向,y 軸方向,z 軸方向の 振動波形の FFT 解析結果であり,各図の横軸は周波数,縦軸は各振動周波数成分の大きさを示す.

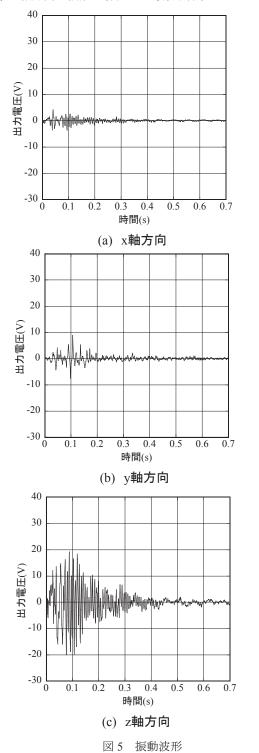
図6によれば、x軸方向とz軸方向の振動は、どちらも、20Hz付近、65Hz付近、130Hz付近に大きな振動加速度のピークがあるのに対して、y軸方向の振動加速度のピーク値の周波数は、x軸方向とz軸方向の振動加速度のピーク値の周波数とは異なることがわかる. 特に、x軸方向とz軸方向の振動において、最も加速度が大きい130Hz付近の振動周波数は、y軸方向の振動ではそれほど大きくない. これらのことから、矢射出時の弓のy軸方向の振動は、x軸方向とz軸

実験番号	センサー位置	引き尺	実験内容
実験①	長方側 15cm	30cm	合成弓の基本振動特性
実験②	長方側 15cm	30cm	弓固定装置が弓の振動特性に及ぼす影響
実験③	長方側 15cm	30cm, 40cm, 50cm	引き尺の振動特性への影響
実験④	長方側 15cm 短方側 15cm	30cm	弓の長方側と短方側の振動特性の相違

表 1 実験条件

方向の振動とは少し異なった振動特性を持っていると考えられる. また, z 軸方向の振動加速度のピーク周波数 (20Hz 付近, 65Hz 付近, 130Hz 付近) における大きさは, x 軸方向および y 軸方向に比べ大きいことから, 前述のように, z 軸方向の振動が弓を保持する人の手の感覚に大きな影響を及ぼしていると考えられる.

以上のことから、弓の振動特性は、z 軸方向、すなわち、 矢射出方向の振動が支配的であるため、以降の実験データ については、z 軸方向の振動に着目して考察を行う.



3.2 弓固定装置が弓の振動特性に及ぼす影響

図 7 は、弓固定装置が弓の振動特性に及ぼす影響を調べた実験② (引き尺:30cm、センサーの位置:長方側15cm)の結果で、弓を人の手で保持した場合と弓固定装置で固定した場合における、矢射出時の振動特性が比較されている。図 7(a)と(b)は、それぞれ、弓固定装置で固定した場合と弓を人の手で保持した場合のz軸方向(矢の射出方向)の振動波形であり、各図の横軸と縦軸は、図5と同様、それぞれ、矢射出後の時間と加速度センサーからの出力電圧である。

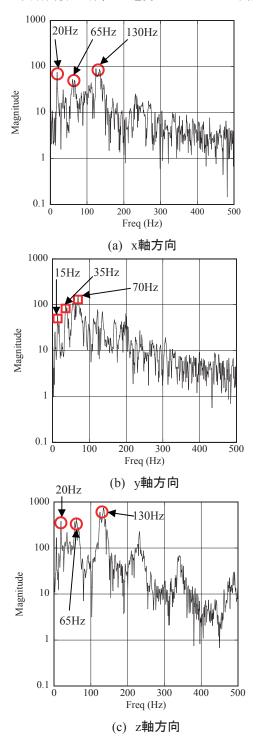


図 6 振動波形の FFT 解析

また、図 7(a), (b)中には、振動加速度ピーク値の最大加速度からの減衰の様子が近似曲線で示されている

図 7 によれば、固定装置に固定した場合と弓を手に持った場合では、振動加速度の最大センサー出力はどちらも20[V]程度で、ほぼ同じであることがわかる。また、どちらの結果も、振動加速度ピーク値が最大加速度からその1/3まで減衰する時間は0.13[s]とほぼ同じであることがわかる。

図 8 は、弓固定装置が弓の振動特性に及ぼす影響を調べた図 7 の振動の時系列データを FFT 解析した結果である.図 8(a)と(b)は、それぞれ、弓固定装置で固定した場合と弓を人の手で保持した場合の振動波形の FFT 解析結果であり、各図の横軸は周波数、縦軸は各振動周波数成分の大きさを示す.

図 8 によれば、弓固定装置で固定した場合と弓を人の手で保持した場合の振動特性は、20~25Hz 付近の振動加速度のピーク周波数域において、両者の振動周波数に少し違いが見られるが、65Hz 付近、130Hz 付近の振動加速度のピーク周波数域では、ほぼ同じ傾向を示している。また、最大

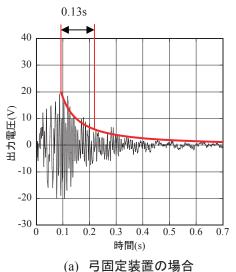
振動加速度の周波数は、どちらも、130Hz 付近となっており、 弓を人の手で保持した場合と弓固定装置で固定した場合で は、弓の振動特性に大きな違いがないことがわかる.

以上のことから、今回開発した弓固定装置は、人が弓を保持する場合と同じ振動特性を得ることができるため、本弓固定装置を用いた各種の実験の結果は、人が弓を射る場合とほぼ同等な結果を示すことになることがわかる.

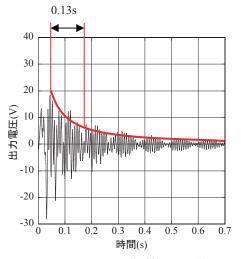
3.3 引き尺の振動特性への影響

引き尺(矢をつがえている弓の弦を定常状態から引っ張る長さ)を 30cm, 40cm, 50cm として矢を射出した場合の弓の振動波形を調べた実験③(センサーの位置:長方側15cm)の結果が、図9に示されている. 図9(a), (b), (c)は,それぞれ、引き尺が30cm,40cm,50cmの場合のz軸方向の振動波形であり、各図の横軸は矢射出後の時間、縦軸は加速度センサーからの出力電圧である.また、図9中には、図7と同様、振動加速度ピーク値の最大加速度からの減衰の様子が近似曲線で示されている.

図 9 によれば、引き尺が 30cm である図 9(a)では、振動加



凶 図 7 振動波形



(b) 人の手で保持した場合

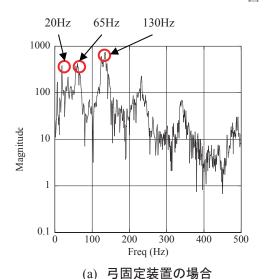
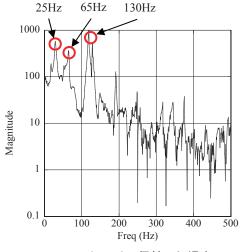


図8 振動波形のFFT解析



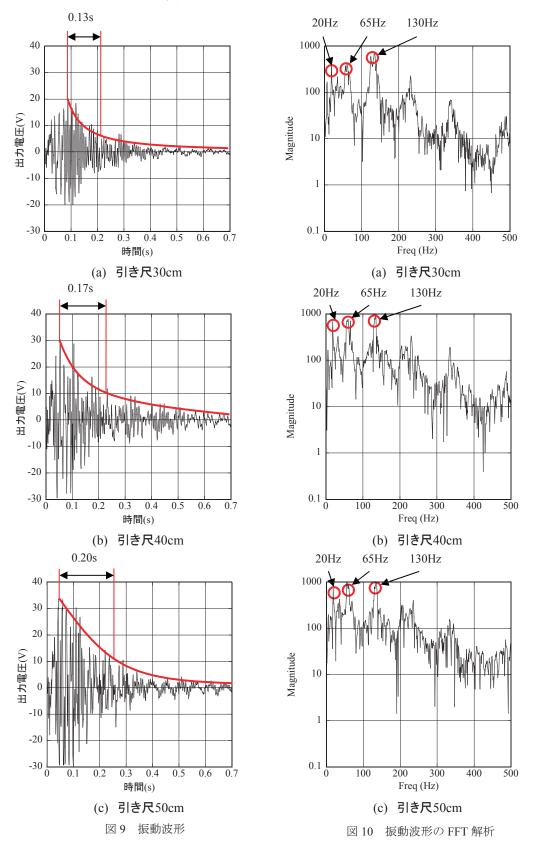
(b) 人の手で保持した場合

熊本高等専門学校 研究紀要 第3号(2011)

速度の最大センサー出力が 20[V]程度なのに対して、引き尺が 40cm の図 9(b)では 30[V]程度、50cm の図 9(c)では 35[V]程度となっており、引き尺が大きいほど最大振動加速度が大きくなることが分かる。また、振動加速度ピーク値が最大加速度からその 1/3 まで減衰する時間は、引き尺 30cm で

0.13[s], 引き尺 40cm で 0.17[s], 引き尺 50cm で 0.20[s]となっており、引き尺が大きいほど振動加速度ピーク値が最大加速度からその 1/3 まで減衰する時間が長いことがわかる.

図 10 は、引き尺の振動特性への影響を調べた図 10 の振動波形を FFT 解析した結果である. 図 10(a), (b), (c)は、そ



Research Reports of Kumamoto-NCT. Vol. 3 (2011)

れぞれ, 引き尺が 30cm, 40cm, 50cm の場合の振動の時系 列データを FFT 解析した結果であり、各図の横軸は周波数、 縦軸は各振動周波数成分の大きさを示す.

図 10 によれば、引き尺が 30cm、40cm、50cm の全ての結 果において, 20Hz 付近, 65Hz 付近, 130Hz 付近と, ほぼ同 一の周波数にピークを持っており、また、500Hz までの周波 数域全体をみても, 引き尺が 30cm, 40cm, 50cm の各ケー スにおいて、周波数特性に大きな差異はないことがわかる.

以上のことから, 引き尺を大きくするほど, 弓の振動加 速度は大きくなるものの、振動の周波数には大きな影響を 及ぼさないことがわかる.

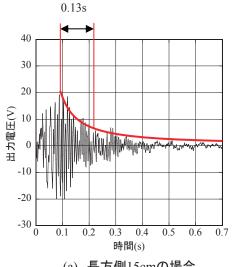
3.4 弓の長方側と短方側の振動の相違

図11は、弓の長方側と短方側の振動の相違を調べる実験 ④ (引き尺:30cm) の結果である. 図 11(a)と(b)は、それぞ れ、弓固定部端から長方側に 15cm の位置と短方側に 15cm の位置にセンサーを取り付けた場合の z 軸方向の振動波形 であり, 各図の横軸は矢射出後の時間, 縦軸は加速度セン サーからの出力電圧である。また、図11中には、図9と同 様、振動加速度ピーク値の最大加速度からの減衰の様子が 近似曲線で示されている.

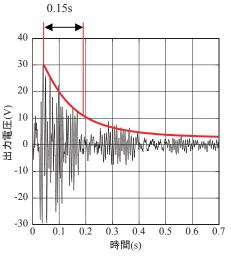
図11によれば、矢射出後の振動波形は、長方側の最大加 速時の出力電圧が 20[V]なのに対して, 短方側は 30[V]と大 きくなっていることがわかる. また, 振動加速度変動のピ ーク値が最大加速度からその 1/3 まで減衰する時間も,長方 側が 0.13[s]なのに対して, 短方側は 0.15[s]と長くなってお り, 短方側の方が減衰が遅い.

図12は、弓の長方側と短方側の振動の相違を調べた図11 の振動の時系列データを FFT 解析した結果である. 図 12(a) と(b)は、それぞれ、弓固定端から長方側に 15cm の位置と短 方側に15cmの位置にセンサーを取り付けた場合のz軸方向 の振動波形の FFT 解析結果であり、各図の横軸は周波数、 縦軸は各振動周波数成分の大きさを示す.

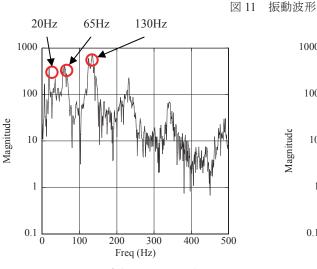
図 12 によれば、弓の長方側(図 12(a))の振動は、周波数 が 20Hz 付近, 65Hz 付近, 130Hz 付近に振動加速度のピー クを持っているのに対して、弓の短方側(図 12(b))の振動 は、周波数が 30Hz 付近、120Hz 付近、190Hz 付近に振動加 速度のピークを持っており、短方側の方が長方側よりも振



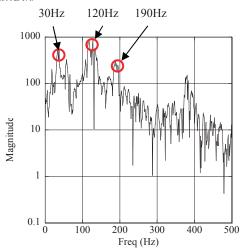
(a) 長方側15cmの場合



(b) 短方側15cmの場合



(a) 長方側15cmの場合 図 12 振動波形の FFT 解析



(b) 短方側15cmの場合

熊本高等専門学校 研究紀要 第3号(2011)

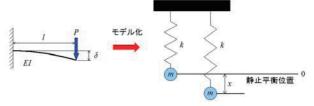


図13 バネの自由振動

動加速度のピーク周波数が高周波側に移動していることがわかる.また,最大振動加速度の周波数は,長方側では130Hz付近,短方側では120Hz付近と近接していることから,本実験に用いた合成弓で矢の射出を行う場合,120~130Hz付近の振動加速度が最も大きくなり,これが,弓射出時の人の手の振動感覚に影響すると考えられる.

図 11 と図 12 で示された、弓の長方側に比べた短方側の最大振動加速度の増大と振動加速度ピーク値の高周波数側への移動は、図 13 に示される簡略化された振動モデルで説明ができる。 すなわち、弓を弓固定部で支持された片持ちはり(板ばね)と考えると、弓のバネ定数 k は次式で表わされる $^{(5)}$.

$$k = P/\delta = Ebt^3/4l^3 \tag{1}$$

ここで、P: 荷重[N]、 δ : たわみ[m]、l: スパンの長さ[m]、E: 縦弾性係数[Pa]、b: 板幅[m]、t: 板厚[m]である.

式(1)より、弓全体のスパンをlとし、長方側を2l/3、短方側をl/3とすれば、縦弾性係数E、板幅b、板厚tは、長方側(添字:long)と短方側(添字:short)で同じなので、

$$\frac{k_{short}}{k_{long}} = \frac{Ebt^3}{4(l/3)^3} / \frac{Ebt^3}{4(2l/3)^3} = (2l/3)^3 / (l/3)^3 = 8$$
 (2)

となり、弓の短方側のバネ定数は、長方側のバネ定数の 8 倍となる.

図 13 に示されるように、弓の端方を引っ張って離した際の振動を減衰要素のないバネを引っ張って離した場合の自由振動にモデル化すると、その運動方程式は、

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{3}$$

で表わされる. ここで、m: 質量[kg]、k: バネ定数[N/m]である. このバネの振動の固有振動数 fは、

$$f = \sqrt{k/m} \tag{4}$$

で表わせ、初期条件 $(t=0:x=A,\dot{x}=0)$ より、加速度 a は、

$$a = \ddot{x} = A \cdot k / m \cdot \cos \sqrt{k / m} \cdot t \tag{5}$$

で表わせる. ここで, A: 定数, t: 時間[s]である.

今,長方側の弓の質量をm,長さを2l/3とすれば,短方側の長さはl/3なので,質量はm/2となる.式(4)より長方側の固有振動数を $f_{long}=\sqrt{k_{long}/m}$ とし,式(2)を用いると,

$$f_{short} = \sqrt{k_{short}/(m/2)} = 4\sqrt{k_{long}/m} = 4f_{long}$$
 (6)

となり、短方側の固有振動数は長方側よりも大きくなることがわかる。また、加速度の振幅についても、長方側の加

速度の振幅 $\left|a_{long}\right|$ は, $\left|a_{long}\right| = A \cdot k_{long} / m$ に対して,短方側の加速度の振幅 $\left|a_{short}\right|$ は,

$$\left| a_{short} \right| = A \cdot k_{short} / (m/2) = 16 A \cdot k_{long} / m = 16 \left| a_{long} \right| \tag{7}$$

以上より,固定部からの弓長が短く,バネ定数が大きくなる短方側の方が,振動の周波数が大きく,また,加速度も大きくなることが理論的にも示すことができ,実験の結果を定性的に説明することができる.

4. 結論

矢射出時における弓の振動特性に与える材質や構造の影響を明らかにするために,グラスファイバー製の合成弓を用いた実験装置を製作して矢の射出実験を行い,その基本振動特性を調べた結果,以下のことが明らかになった.

- (1) 弓の振動は, z 軸方向, すなわち, 矢射出方向の振動が支配的であり, z 軸方向の振動が弓を持つ人の手の感覚に大きな影響を及ぼしていると考えられる.
- (2) 弓を人の手で保持した場合と弓固定装置で保持した場合では、弓の振動特性に大きな差異はなかった. したがって、今回開発された実験装置を用いて、人の手で保持した場合と同等な弓の振動特性を調べることが可能であることがわかった.
- (3) 引き尺を30cm, 40cm, 50cm と大きくした場合, 弓の振動加速度は大きくなるものの, 振動周波数が変わらないことから, 引き尺の大きさは, 振動加速度には影響を与えるが, 振動周波数には大きな影響を及ぼさないことがわかった.
- (4) 弓の長方側と短方側では、短方側の方が振動加速度が 大きく、また、振動加速度振幅のピーク周波数は長方 側より高い周波数側へ移動する.これは、弓の弦を引 き、弓をたわませる時、短方側の方が、長方側より、 相対的に、バネ定数が大きくなるためであることが理 論的考察からわかった.

(平成23年10月11日受付)

参考文献

- (1) 細谷 聡, 宮地 力, 岡田 守彦,:「和弓の弦の素材の違いが発射現象に及ぼす影響」,日本機械学会論文集 C編,第 64 巻 623 号, pp.101-106 (1998).
- (2) 佐藤 明,小林 一敏,: 「和弓の弦の張力に関する力学的考察」,日本体育学会大会号 (31), p447 (1980).
- (3) 大槻 敦巳, 山中 俊二,:「和弓における大変形特性 の理論解析」,計算力学講演会講演論文集 2000(13), pp.61-62 (2000)
- (4) 細谷 聡, 小林 一敏, 宮地 力,:「和弓における弓 幹の曲げ剛性に関する研究」, 日本体育学会大会号 (40A), p381 (1989).
- (5) 小寺 忠, 矢野 澄雄, 演習で学ぶ機械力学 (第2版), (2005), pp.85-105, 森北出版株式会社.