和弓の弦の素材の違いが発射現象に及ぼす影響*

細谷 聡^{*1}, 宮地 力^{*2}, 岡田 守彦^{*2}

Influence of Different Strings on the Dynamics of Japanese Bow

Satoshi HOSOYA, Chikara MIYAJI and Morihiko OKADA

The purpose of this study was to clarify the influence of different strings on the dynamics of Japanese Bow, and to investigate the relationship between the measured mechanical data and the feeling of shooter. Four strings, aramid fiber "Kevlar", "Technora", polyester fiber "Vectran", and hemp string were used for the shooting experiment by nine subjects. At that time, feeling data through questionnaires were collected. The results were summarized as follows: (1) in the logarithmic decrement of bending and torsional oscillation after release, hemp string was highest in this four strings, (2) the difference of fibers didn't have influence on frequency of the oscillation, (3) in the energy transmission efficiency, Kevlar, Technora and Vectran were about 69%, hemp was 67.7%, (4) it is also found that the feeling of shooter was related to the measured mechanical data significantly.

Key Words: Logarithmic Decrement, Energy Transmission Efficiency, New Fibers, String of Japanese Bow, Feeling of Shooter

1. 緒 言

日本の弓矢といえば竹製であり、弦は麻で作られているのが常識であった。1960年代後半から新繊維素材が開発され、身の回りのさまざまな製品に応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。和弓の世界でも例にもれず、グラスファイバーやカーボンファイバーを使用した弓が登場し、矢のシャフトもアルミニウム製やジュラルミン製のものが現在では主流となっている。弦に関しても、ケブラーなど化学繊維で作られているものが麻弦よりも安価なこともあり大変普及している。

和弓の弦などは切れさえしなければよいように素人目には映るが、使用する熟練の射手にとっては弦でさえもなおざりにできない。例えば、試合に臨むにあたっては新品や使い過ぎたものではなく、程々に使い込んでいる弦を使用する。なぜならば、おろしたての新品の弦は非常に伸びやすい特徴がある。弦が伸びてしまえば単に弦を張ったときの和弓の形状が変化してし

まい、結果として矢の着点に影響を及ぼすということを経験的に知っているからである。また、使い過ぎている弦に関しては、競技中に切れる恐れもある。引き心地の点からすると、使い過ぎたものは伸び切ってしまうため発射後の手に残る感触などがよくなり、切れる前でも新品と交換してしまう場合さえある。

現在の弦に使用されている繊維素材の弾性率や強度などは明らかになっているが⁽¹⁾⁽²⁾、製品としての弦の特性は製法などの違いで多少変わる可能性があることも否めない。また、弓と組み合わせて使うわけであるから整合性の問題もある。同一の弦に関してさえも、発射に伴う現象に何らかの影響を及ぼし射手の感覚を左右するわけであるから、仮に弦の素材が変われば、発射現象に何らかの影響を及ぼすことが十分に予想される。先に述べたように、弦の使用程度の差を敏感に感じている射手は、弦の素材が変われば感覚的にその変化を感じ取ることができることも十分考えられる。

そこで本研究では、まず弦の素材の違いで発射に伴う弓体の振動や矢の速度などの力学量へどのような影響を及ぼすかを調べ、それらの力学量と射手の使用感との対応について明らかにすることを目的とする。

* 原稿受付 1997年9月19日。

^{*1} 正員, 信州大学繊維学部(☎ 386-8567 上田市常田 3-15-1)。^{*2} 筑波大学体育科学系(☎ 305-8577 つくば市天王台 1-1-1)。

2. 方 法

2・1 実験試料(弦, 弓, 矢)および被験者 実験に使用した弦はアラミド繊維であるケブラー(A)とテクノーラ(B), ポリエステル繊維であるベクトラン(C), そして麻(D)の各繊維素材で出来ている四種類を用いた。それらを表1に示す。弦は事前に約二十射ずつ使用し, 初期の伸張を済ませたものである。なお質量は, リリース時を検出するために電極として両面テープ式導通テープを装着した状態での値である。

実験には, 被験者が普段稽古で使っているものとはほぼ同程度の強さのグラスファイバー製の弓を用いた。本研究では弓を引く距離0~0.8 mの範囲では, 弓を線形ばねとみなした。この実験弓のばね定数は198.6 N/mである。矢はジュラルミン製のシャフトで長さ0.96 m, 質量0.026 kgのものを使用した。

発射実験を行う被験者は, 大学弓道部に所属する弓道経験豊富な男子七名, 女子二名で全員が有段者である。

2・2 実験方法 図1のように実験室内に設置した巻わらを標的として, 四種類の弦についてそれぞれ五射ずつの発射実験(被験者一人につき計二十射)を行った。単に弦を張った状態での弦と弓の握り部までの距離は0.15 mとし, 各被験者および各試技で同一と

なるようにした。

弓体の握り部付近の前面と背面にひずみゲージを接着して, 曲げ振動およびねじり振動を計測した。また, 弦とその弦を保持する右手部分に両面テープ式導通テープを着け手製のスイッチ回路により, リリース時の信号を検出した。発射直後の矢の速度は, 矢のシャフト内に装着したセラミック磁石の小片が, ニカ所の空芯コイルを通過する際の誘導起電力信号から算出した。なお, これら信号のA/D変換時のサンプリングタイムは0.1 msとした。さらに, 被験者には各試技の後で, 発射時の感覚, 感想を自由に述べてもらう形式のアンケート調査を行った。

2・3 振動の対数減衰率の算出および周波数解析

発射直後の弓体の曲げ振動の一例を図2に示す。弦の素材の違いが弓体の振動にどのように影響するかを調べるために, 各試技の振動の対数減衰率を求めた。理想的な減衰振動では相隣れる極大値の比から求める⁽³⁾ことが一般的であるが, 本研究では各極大値をもとに近似曲線を求め, その求めた式から曲げ振動およびねじり振動の対数減衰率を算出した。また, FFTにて曲げ振動およびねじり振動の周波数解析もあわせて行った。

2・4 エネルギー伝達効率の算出 本研究では被験者に同一の弓を使用させているが, 被験者によってあるいは同じ被験者でも試技によって弓を引き絞る長さは多少異なってしまう。したがって, 発射直後の矢の速度の大小をもって弦の素材の違いによる影響を述べることはできない。そこで, 下の式に示すように引き絞った弓の位置エネルギーから, 矢の運動エネルギー

Table 1 Test string specifications

String	A	B	C	D
Material	Aramid Fiber	Aramid Fiber	Polyester Fiber	hemp
Trademark	Kevlar	Technora	Vectran	-
Mass(g)	7.5	6.5	5.5	8.5

Fig.1 Experimental system

Fig. 2 Curve fitting for calculating logarithmic decrement

ギーへのエネルギー伝達効率を算出することによって弦の素材の違いの影響を比較することにした。弓を引き絞る時の変位は、曲げ振動の計測のために接着したひずみゲージを利用し変位とひずみ量の関係をあらかじめ較正しておき、リリース直前のひずみ量から変位を換算した。

$$Efficiency(\%) = \frac{KE}{PE} \times 100$$

$$KE = \frac{1}{2}mv^2$$

m : mass of arrow

v : velocity of arrow

$$PE = \frac{1}{2}kx^2$$

k : spring constant (bow)

x : displacement

2.5 アンケート調査の処理 発射時の感覚、感想についてのアンケートは、いくつかの項目に分類、集計して、弦の素材の違いで回答に有意な偏りがあるかどうか χ^2 検定を行った⁽⁵⁾。

3. 結果および考察

3.1 振動の対数減衰率への影響 図3に各弦を使用した時の曲げ振動の対数減衰率(平均値±S. D., データ数 $n=45$)を示す。ゲブラー(A) (0.611 ± 0.099), テクノーラ(B) (0.641 ± 0.128), ベクトラン

Fig. 3 Logarithmic decrement of bending oscillation

Fig. 4 Logarithmic decrement of torsional oscillation

(C) (0.645 ± 0.139), 麻(D) (0.702 ± 0.111)の弦の順で減衰率が高くなっていることがわかる。また、曲げ振動の対数減衰率について平均値の差の検定(t検定; 両側検定)を行った。テクノーラ(B)-ベクトラン(C)の組合せでは平均値の差は有意ではなかったが、その他のすべての組合せについては平均値に有意な差が認められた。また、ねじり振動の対数減衰率(平均値±S. D., データ数 $n=45$)を図4に示す。テクノーラ(B) (0.322 ± 0.057), ゲブラー(A) (0.348 ± 0.080), ベクトラン(C) (0.417 ± 0.072), 麻(D) (0.509 ± 0.064)の弦の順で減衰率が高くなっている。また、ね

Fig. 5 Power spectrum (bending oscillation)

Fig. 6 Power spectrum (torsional oscillation)

じり振動の対数減衰率についても同様に平均値の差の検定(t検定;両側検定)を行った。ゲブラー(A)ーテクノロジー(B)の組合せでは平均値の差は有意ではなかったが、その他のすべての組合せについて平均値に有意な差が認められた。

曲げ振動およびねじり振動の減衰率に関して、この四種類の中では麻(D)の弦が比較的高いということが明らかとなった。また、ゲブラー(A)、テクノロジー(B)、ペクトラン(C)は繊維自体の強度、弾性率などのデータはほぼ同程度の数値であるが⁽¹⁾⁽²⁾、振動の対数減衰率の平均値に有意な差が認められた。このことから、製品としての弦の強度や弾性率が関与している可能性があり、今後はこれらの計測の必要性があると考えられる。

図5と6に、FFTにて各弦を使用したときの曲げ振動およびねじり振動を周波数解析した結果の一例を示す。なお、弓体の曲げ状態を感知するひずみゲージの出力は弦を引いた距離[m]に、弓体のねじれ状態を感知するひずみゲージの出力は、握り部に作用するトルク[Nm]にそれぞれ校正している。したがって図5および図6は、発射から200ms間のそれらの信号を周波数解析しパワースペクトルに表したものであ

Fig. 7 Energy transmission efficiency

る。すべての被験者および試技についてパワースペクトルはほぼ同様の結果となり、弦の素材の違いによる振動の周波数への影響はほとんど認められないことが明らかとなった。

3・2 エネルギー伝達効率への影響 図7は、各弦を使用したときのエネルギー伝達効率(平均値±S.D., データ個数 $n=45$)である。ゲブラー(A) ($69.0 \pm 3.3\%$)、テクノロジー(B) ($69.1 \pm 3.6\%$)、ペクトラン

Table 2 Results of questionnaire

Answers \ Test Strings	B	C	D	Frequency
(1) Matters about oscillation and shock	12(15.5)	16(15.5)	21(14.9)	46
(2) Matters about shooting sound	11(7.1)	3(7.1)	7(6.8)	21
(3) Matters about speed of restitution	15(15.2)	20(15.2)	10(14.6)	45
(4) The others	10(10.1)	9(10.1)	8(9.7)	30
Frequency	48	48	46	142

Observed Frequency (Expected Frequency)

Table 3 Chi-square distribution (df=6)

Level of Significance	0.1	0.05	0.01
χ^2 value	9.24	12.59	16.81

(C) ($69.4 \pm 3.5\%$) に関しては、弦の質量が同一ではなかったにもかかわらずほぼ同じ値であった。一方、麻(D)を使用した場合は、 $67.7 \pm 4.0\%$ と他の弦に比べやや低い値となった。このエネルギー伝達効率に関して平均値の差の検定(t検定；両側検定)を行った結果、ゲブラー(A)、テクノーラ(B)、ペクトラン(C)の三つと麻(D)の組合せについてそれぞれ平均値に有意な差が認められた。矢と弦は、引き絞った状態から弓が復元してきて単に弦が真直ぐに張られた状態付近で分離することが高速度映像などの計測でわかっている⁽⁴⁾。弦が真直ぐに伸ばされる瞬間に、弦には最も大きな張力がかかる。ごく短い時間に大きな力が作用したときの製品としての弦の粘弾性特性が、発射される矢の速度に対して影響を与える可能性が考えられる。

3.3 アンケート結果と力学量との対応 被験者に発射後の感覚、感想を自由に答えてもらったところ、表2のように(1)振動・衝撃に関する事項、(2)弦音に関する事項、(3)弦の復元の速さに関する事項、(4)その他 の四項目に分類することができた。ただし、ゲブラー(A)の弦に関しては被験者九人のうち七人が普段使用しており、「感覚は変わらない」、「特にこれといった感想はない」という回答が圧倒的に多かったので以後の処理ではゲブラー(A)の弦を分析の対象から外した。したがって、被験者の回答の四項目とテクノーラ(B)、ペクトラン(C)、麻(D)の三種類について回答の分析を行った。素材の異なる各弦が発射に伴う感覚に影響を及ぼさなければ、被験者の各項目の回答数は表2の括弧内に示す項目ごとの総回答数から算出される期待度数に近いものとなる。そこで各項目における期待度数と回答数の適合度を調べるために χ^2 検定を行った。その結果、検定統計量は $\chi^2(6) =$

Table 4 Residual of Table 2

Answers \ Test Strings	B	C	D
(1) Matters about oscillation and shock	-1.70	0.17	2.34 *
(2) Matters about shooting sound	1.95	-2.05 *	0.10
(3) Matters about speed of restitution	-0.08	1.83	-1.76
(4) The others	0.39	-0.50	-0.75

* $p < 0.05$ ($|\text{Residual}| > 1.96$)

$13.97 > 12.59$ ($p < 0.05$, Table 3 χ^2 分布表参照)となり、回答数の偏りは有意であることがわかった。そして表2のどのセルがこの有意性に貢献したかを調べるために残差分析を行った。ここで残差分析とは、残差の値が標準正規分布にしたがうよう調整することにより、標準正規分布を偶然分布とした検定を行うものである⁽⁵⁾。残差分析の結果を表4に示す。ペクトラン(C)の弦に関しては弦音に関する事項、麻(D)の弦では振動・衝撃に関する事項の二つが、表2における回答数の偏りの有意性に貢献していることがわかった。従って、ペクトラン(C)の弦に関しては、弦音に関する事項の回答数が期待度数より少なかったことから、「弦音が気にならない」特徴があるといえる。また、麻(D)の弦に関しては、振動・衝撃に関する事項の回答数が期待度数より多かったことから、「振動・衝撃が(いつもと違い)気になる＝振動・衝撃が小さい」特徴があるといえる。特に麻(D)の弦は、曲げ振動およびねじり振動の対数減衰率とエネルギー伝達効率について他の弦と比較的大きな差が認められたことから、それらの力学量が少なからず射手の使用感に反映していると考えられる。

以上のように、振動の対数減衰率やエネルギー伝達効率などと射手の使用感との対応が少なからず認められたことから、製品としての弦の評価や使用感を目的とした改良を行う場合に発射時のこれらの力学量を参考にできることも示唆された。

4. ま と め

本研究では、素材(ゲブラー、テクノーラ、ペクトラン、麻)の異なる弦を使用することによって、和弓の振動の対数減衰率および周波数、エネルギー伝達効率などに対しどのような影響を及ぼすかを調べた。また、同時に行ったアンケート調査をもとに、射手の使用感とそれらの力学量との対応について検討した。以下に結論を示す。

(1) 和弓の曲げ振動およびねじり振動について対数減衰率を比較すると、両者とも麻(D)の弦が最も対数減衰率が高いことが明らかとなった。また周波数解析の結果、素材の異なる弦を使用しても、発射後の残留振動のパワースペクトルはすべての被験者および試技でほぼ同様になり、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となった。

(2) 和弓のエネルギー伝達効率を四種類の弦を使用して比較したところ、ゲブラー(A)、テクノーラ

(B)、ペクトラン(C)に関しては約69%でほぼ同じであった。一方、麻(D)を使用した場合は、67.7%とやや低いことがわかった。

(3) アンケート調査の結果、各弦について回答が有意に偏っていることがわかった。振動の対数減衰率、エネルギー伝達効率などに関わる力学量と使用感とは少なからず関係があり、製品としての弦の評価や使用感を目的とした改良する場合にこれら力学量が参考になることが示唆された。

文 献

- (1) 本宮達也・宮本武明, 新繊維材料入門, 63-71(1992), 日刊工業新聞社.
- (2) 次世代繊維科学の調査研究委員会, 新繊維科学, 251-253(1995), (財)通商産業調査会.
- (3) 鈴木浩平・ほか3名, 機械工学のための振動・音響学, 32(1989), サイエンス社.
- (4) 稲垣源四郎, 弓の技術3, 新体育, 49-7(1979), 636-643.
- (5) 田中敏・山際勇一郎, 教育・心理統計と実験計画法, 242-265(1989), 教育出版.