

現代弓と復元弓への力学的、生体工学的アプローチ

細 谷 聡

1 現代弓の力学的特性と発射技術

1) 力学的アプローチ

現在、弓道で使用している弓（和弓）は2.21m前後あり、世界でも稀にみる長弓の部類に入る。さらに、弓幹の構造や全体としての弓の形状は上下対称ではなく非常に複雑である。西洋の文化の合理性を背景に発展したアーチェリー弓（洋弓）とは異なり、和弓は明治以降の歴史的な経緯もあり、精神性が強調され、矢を発するという道具としての存在が第一義的ではないイメージを持たれることがある。

和弓を左手で握り発射するときにも、とても習得に時間のかかる技術が要求されるので非常に不合理に感じられる。このことは、握り部が全長の中間部分になく下端よりに位置していること、矢を弓幹の右側に位置させることが原因である。単に弓を引き絞って射放せば、矢は狙ったところよりも右上方に逸れてしまう。従って、この現象を補正するために発射の際に弓を握っている左手を介して、弓幹の長軸まわり（「ねじり」とよぶ）および長軸とは垂直で弓幹を的側に倒すような回転の軸まわり（「上押し」とよぶ）に力のモーメントを同時に作用させなければならない。弦が右手から離れ、弦から矢が分離するまでの20～30msというごく短い時間にも、握り部を介して弓幹に力のモーメントが作用するようにしなければならない。しかし、弓道の指導書では、この「ねじり」および「上押し」という左手の行なうべき準備や発射時の作用を「手の内の働き」と称してたいへん重視している（図1-1）。

ところで、弓矢の原点は矢を標的に的中させることである。単純に考えれば、現在の和弓でも高度な操作・発射技術を駆使しなくとも矢を発射できる。矢が狙った所から逸れるとしても、その方向などをあらかじめ学習しておき、狙うところを補正する方法をとるほうが、発射技術の習得に時間をかけるよりも効率が良さそうに思える。

しかし、なぜ現在の和弓は複雑な形状と構造を変更せず、しかも高度な発射技術を求め続けているのかという疑問が残る。不合理であるとか、精神性を高めるための手段などの言葉で説明をつけるのは簡単であるが、力学的な観点からこれらを検証していく意義は大きいと思われる。ここでは、複雑な形状の持つ意味、高度な発射技術を必要とする理由を、力学的観点と実験計測から探ることにする。

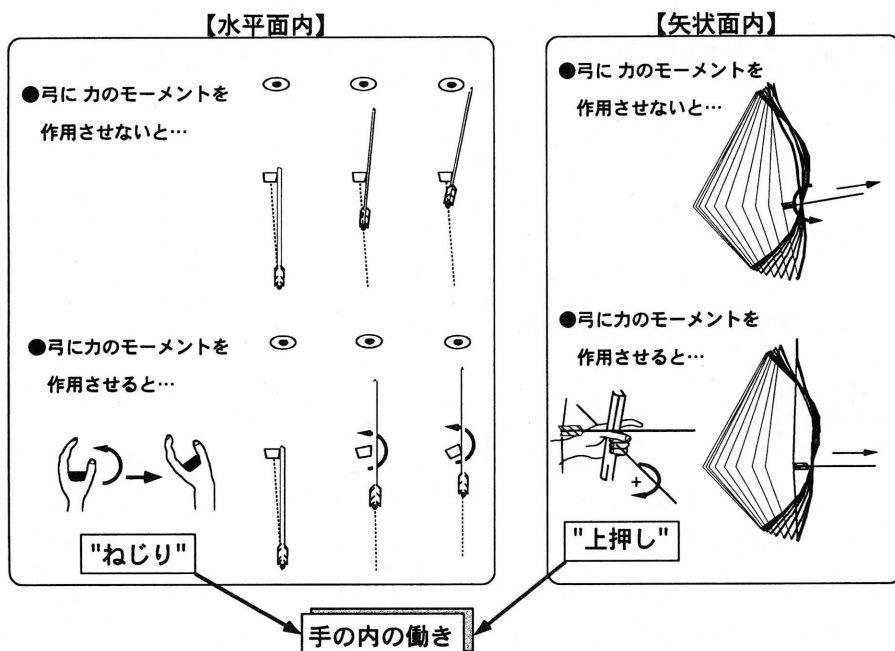


図1-1 和弓の挙動と左手の発射技術

2) 振動特性からみた和弓の握り位置

a) 弓幹における振動の節と振動の腹

先にも述べたように和弓の特徴の一つは、握りの位置である。古墳時代の銅鐸の絵や魏志倭人伝の記述からも、弓の中央ではなく下から約三分の一のところにある。このことは振動という観点から一つの解釈ができる。

図1-2は、発射に伴う弓の挙動の模式図である。弓幹の上下2カ所に位置の変わらない部分があり、これは振動の節（無振動点）といわれる。一方、弓幹の中央部分は位置変化が大きく振動の腹とよばれる。

b) 弓幹における曲げ振動の計測

a) に述べたことを確認するため、弓幹の振動計測を行なった。弓幹の9個所にひずみセンサを接着し（2ゲージ法）で曲げひずみを検出した。ここでの曲げひずみは、

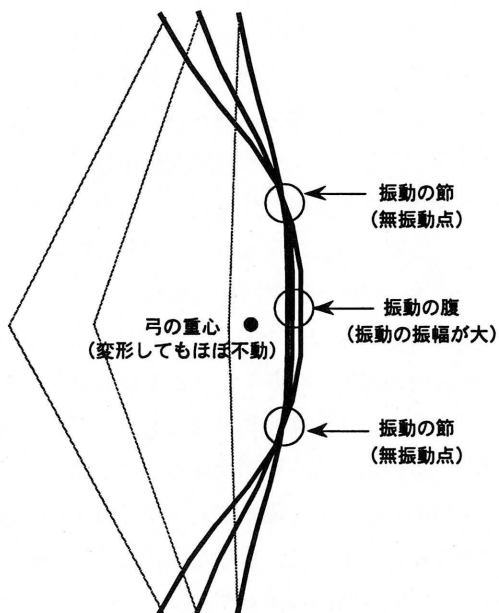


図1-2 振動の節と振動の腹

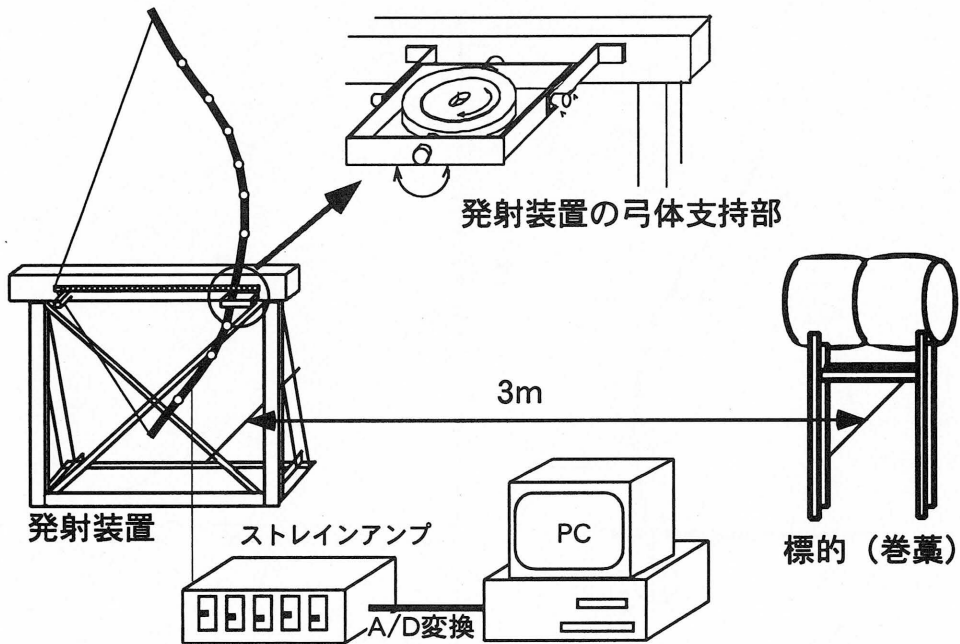


図1-3 発射実験の構成図（○はひずみセンサ装着位置）

図I-2のように弓幹の側方からみたときの弓幹の部分的な変形量（曲げ量）を表すものである。ひずみセンサの接着されたグラスファイバー製の弓を、支持部が人間の手関節のように3軸に可動な手製の発射装置に据え付け、実験室内で発射実験（図1-3）を行なった。的は装置の3m前方に設置した巻藁である。引き絞られた弓幹は発射によって元の形状に戻ろうとするわけで、時々刻々の変形量は変動する。この時間に伴う曲げひずみの変動は振動現象であり、ここで曲げ振動として扱うものである。

実験でひずみセンサから出力される電気信号は、動歪計で増幅し、A/D変換器でアナログ・デジタル変換した後、パーソナルコンピュータに取り込んだ。このA/D変換のサンプリングタイムは0.0001秒（10KHz）である。

c) 振動特性からみた和弓の握り位置

図1-4は実験で得られた曲げ振動の一例である。変形が元に戻る現象であることから、図の波形は右下がりを示す。波形が右下がりを示す中で、その波形に細かな波が乗っているのが振動である。弓幹の中央部の振動は比較的大きく、その上下の振動は比較的小さいことがわかる。このことから、和弓における握りの位置は、振動の節付近にあるわけで、弓幹の挙動からくる矢の飛行方向への影響は否めないが、振動学の立場から考えると合理的だといえる。

このように振動学的観点から握りの位置をみたが、他の解釈がないわけではない。例えば、材料学、材料力学、解剖学を合わせた立場から考えることもできる。弓を作るのに適当な材

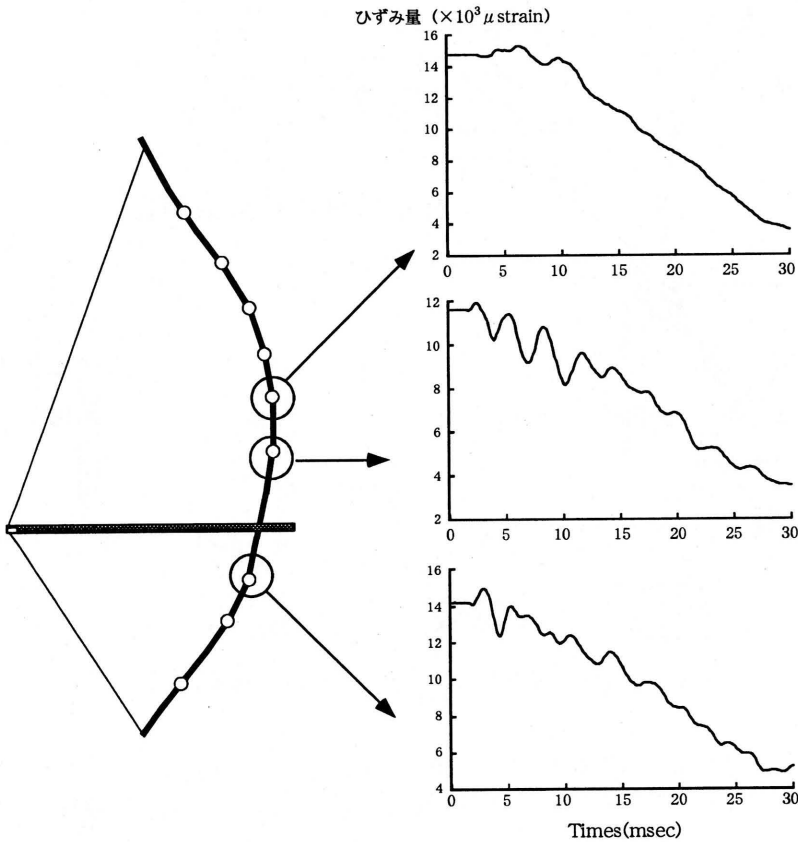


図1-4 曲げ振動の一例

料は生活環境の中から選ばれる。弓射姿勢は、経験の中から解剖学的に合理的なものとなり、弓を引く長さが決まる。同時に、弓幹の変形にかかわる変位から、材料力学的にもっとも合理的な弓の長さや握りの位置を特定していくという考え方である。いずれにせよ、先人はこれらのことを生活経験の中から見出し、和弓を最適化してきたと考えられる。

3) 和弓のユニークな形状と力学的特性

a) 発射技術からみた和弓の形状

和弓の独特な握りの位置は、曲げ方向の振動特性から解釈することができた。振動の節である全長に対して下から約三分の一の所を握るわけだが、矢を射放せば側方より見たときの矢状面内において弓幹は反時計回りの回転を起こすことになる（図1-1）。従って、「上押し」はこの挙動を抑えるためのもので、結果として矢の飛行方向が上方へ向かいすぎないようにする技術だと考えられる。

もう一つの和弓の特徴は、ユニークな形状である。この形状解明の鍵は、左手の発射技術の一要素である「ねじり」にあると考えられる。弓の挙動は「上押し」によって抑えれば、

左右方向の矢の逸れ具合のみの補正となるため、わざわざ「ねじり」加えなくても良さそうなものである。しかし、敢えて「ねじり」を加えることも強調されているということは、それに関わる特性を和弓は有しており、形状も必ずや経験から最適化された結果だと考える方が自然である。

b) 和弓の「ねじり」特性の計測

握り部を介して「ねじり」を加えるということから、和弓の「ねじり」に対する力学的特性を調べる必要がある。和弓は板ばねのような弾性体と考えることができる。威力のある矢を発することができるか否かは、変位（矢を引く長さ）が同じであれば、ばね定数の大小に依存する。しかし、和弓は厚みや形状が一樣ではない板ばねとみなせることから、握り部に加わるねじりモーメントの大きさと弓を引く長さを段階的に変化させたときの弓幹各部の曲げ変形を計測した。

図1-3に示されているのと同様に、弓幹の6個所にひずみセンサを接着し（2ゲージ法）で曲げひずみを検出した。実験弓の握り部付近にはねじりモーメントを検出するひずみセンサも接着した。計測には2での実験と同様の手製の発射装置を使用した。握り部に加えるねじりモーメントの大きさと弓を引く長さ（以後「矢尺」とする）を20cm～90cmで10cmずつ変化させ、それぞれの矢尺で段階的に握り部に作用させるねじりモーメントを変化させた。但し、弦を張った初期状態の矢尺は15cmである。

2の実験と同様、ひずみセンサから出力される電気信号は、動歪計で増幅し、A/D変換器でアナログ・デジタル変換した後、パーソナルコンピュータに取り込んだ（サンプリングは10KHz）。

c) 和弓の形状に潜む非線形特性

図1-5はねじりモーメントを加えないときの曲げひずみに対して、ねじりモーメントを加え、矢尺を段階的に変えたときの曲げひずみの割合を示したものである。ここでの曲げひずみは弓幹6個所から得られた平均値である。矢尺90cm～50cmではねじりモーメントを大きくしていても曲げひずみに変化は生じないが、矢尺40cm～20cmでは、ねじりモーメントを大きくしていくと曲げひずみの割合が大きくなるという非線形的な性質を示すことが明らかとなった。

これは、矢尺90cm～50cmでは弓幹各部は曲げ変形が比較的大きく、カーボンファイバーなどの弓幹を構成する素材が、伸びきっている（あるいは縮みきっている）状態だと考えられる。従って、握り部に加えられたねじりモーメントは弓幹各部に多少伝わるが曲げ変形に影響しない。ところが、矢尺40cm～20cmの弓幹各部の曲げ変形が比較的小さな時では、カーボンファイバーなどの素材が曲げに対して比較的余裕があり、握り部に加えられたねじりモーメントが弓幹内部のゆがみに変換され、結果として曲げ変形に影響がでると考えられる。繊維素材であれば基本的な弾性的性質は同じであるから、竹弓でも同様な特性を持っていると考えられる。

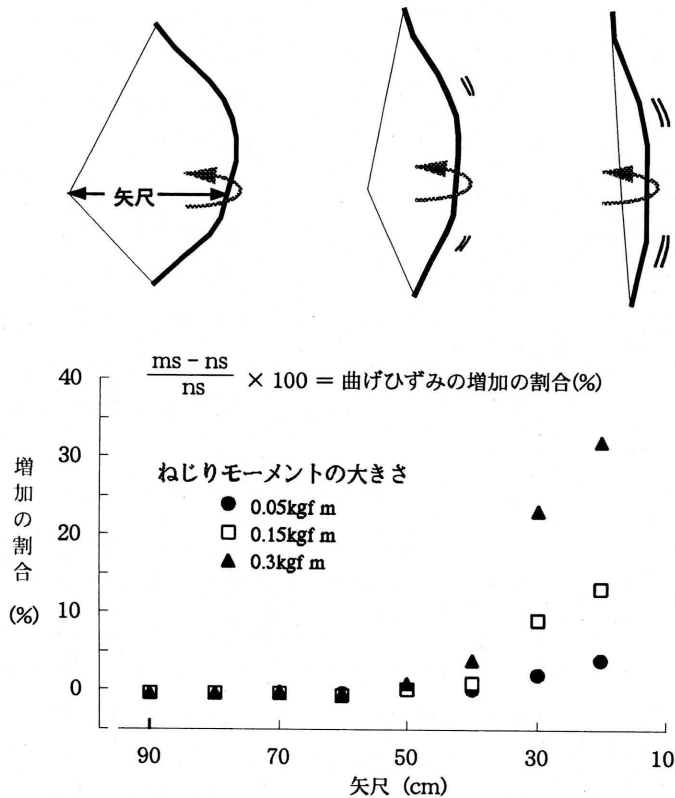


図1-5 ねじりモーメントを加えないときの曲げひずみ (ns) に対する
ねじりモーメントを加えたときの曲げひずみ (ms) の増加の割合

弓に加えた中で最も大きな0.3kgf・mというねじりモーメントは、発射直前に人間が弓に対して加えている値とほぼ同じかもしくはやや小さい程度である。この場合、矢尺40cm～20cmでねじりモーメントを加えないときに対して、曲げひずみが4～32%増加する。その半分の0.15kgf・mというねじりモーメントの値でも、曲げひずみが1～15%増加する。つまり、復元の終盤（矢尺40cm～20cm）で握り部にねじりモーメントを維持できていたとすれば、見かけよりも弓のポテンシャルを高めることになる。ばねで例えれば、本来ばね定数は変位によらず一定のはずが、ねじりモーメントの効果によって特定の変位からばね定数が大きくなるのと等価だということである。

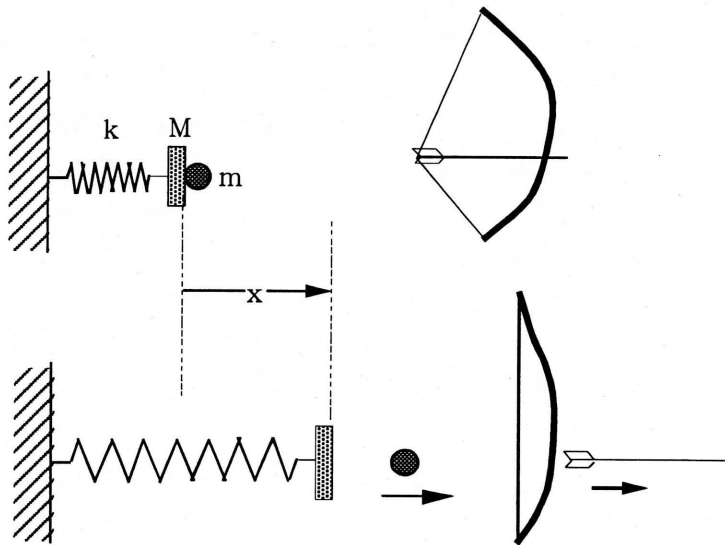
d) 和弓の非線形特性を考慮したモデルによるシミュレーション

和弓の握り部にねじりモーメントを加えることによって、和弓の曲げ特性には非線形性が確認された。この特性を有することによる効果を定量的に表すため、要素と質量要素からなるシンプルなモデル（ばね質量モデル）を構成し、シミュレーションを行なうことにした。

非線形的な性質は、復元の変位に比例するばね (k_1) と、ねじりモーメントと変位の関数となるばね ($k_2(N, x)$) の2つの和で表すことにした。つまり、 k_1 は先の単純ばね質量モデ

ルのばね定数 (202.5N/m) と同じである。一方、 $k_2(N, x)$ は図1-6に示すように復元中のねじりモーメントと変位 (矢尺) によって決まるばねである。シミュレーションの際に入力として用いるねじりモーメントは、被験者による発射実験計測で得られる典型的な3つのタイプとした。ねじりモーメント力積の大小による影響を排除するため便宜的に、この力積値を同一にし関数化した。さらに、復元中のねじりモーメントの総和 (力積) の大小による影響をなくするため、3つのタイプの総和 (力積) が同じ値になるようにも配慮した。

シミュレーションの結果、矢の初速度は約52.7m/sであり、エネルギー伝達効率が約70.7%となった (線形ばね)。弦と矢が分離した直後の矢の速度はタイプAのねじりモーメントを加味した場合53.2m/s, タイプBの場合53.5m/s, タイプCの場合53.7m/sであり、エネルギー伝達効率はタイプAの場合72.0%, タイプBの場合72.9%, タイプCの場合73.4%という結果が得られた。ねじりモーメントを加味しない場合に比べて1.3~2.7%の増加が認められた。



【線形ばね質量モデル】

$$\text{運動方程式: } (m + M) \ddot{x} = -k x$$

【非線形ばね質量モデル】

$$\text{運動方程式: } (m + M) \ddot{x} = -k x$$

$$k = k_1 + k_2(N, x)$$

m, M : 質量要素

k, k_1, k_2 : ばね要素

N : 弓に加わったねじりモーメント

x : 平衡状態からの変位

図1-6 復元のばね質量モデルと運動方程式

非線形性を加味したモデルによるシミュレーション結果は、矢の初速度にして1 m/s (3.6km/h) 程度の差である。しかし、このシミュレーション結果は、あくまでもねじりモーメントの力積値を同一にした場合のものである。発射過程の終盤まで「ねじり」を加え続けることができる射手は、そうでない射手に比べて全体の「ねじり」が大きいことは、過去の研究からわかっている。さらに、「ねじり」を加えず射放せば、発射過程で矢柄と弓幹との摩擦抵抗が大きくなり矢の初速度は、「ねじり」を加えないときの計算結果よりも小さくなることは明らかである。従って、実際的な効果は、矢の初速度にして数m/s、エネルギー伝達効率にして数%にとどまらないと考えられる。

4) 和弓のユニークな形状と左手の発射技術の意味

利に合わないように思える複雑でユニークな和弓の形状には、力学的にみて興味深い特性が隠されていた。和弓固有の握り位置に始まり、和弓の形状は徐々に最適化されていったものと考えられる。現在のような系統だった科学的知識がなくとも、非常に長い年月と先人達の経験によって和弓の形状は現在のように発展、変化してきたのである。

武器あるいは道具を使用するのであれば、その性能を最大限に引きだし使用することが合理的であり、その技術は評価されるべきである。現在の弓道は、的中もさることながら、ややもすると射形、立ち振る舞いなどに主眼が置かれスポーツ的、作法的要素が色濃い。狩猟の道具として糧を得るために弓矢を使った時代、あるいは流派弓術が勃興した時代を考えれば、的中の他に獲物に致命傷を与えることや的の甲冑を射貫くために矢の威力をいかに高めるかというということは的中と並び重要だったはずである。用具の改良に合わせ、弓のポテンシャルを最大に引き出す操作・発射技術の習得のための努力が注がれてきたことは当然といえるだろう。

以上のことから、現在も弓道の指導時に強調される「上押し」や「ねじり」を含む高度な左手の操作・発射技術は、和弓の力学的特性まで考えると射手の生涯に渡る修練課題になっているということはずけることである。

2 射手の左前腕の筋活動と発射時の衝撃からみた復元弓の特徴

1) 生体工学的なアプローチ

和弓を科学的に研究していくには、先の章のように弓自体の特性を調べていくのが基本的なアプローチである。一方で、先人達の経験は道具を使用する中で生まれてきたことから、ヒトと道具の相互作用に着目する考え方もある。特に、矢を発射することで、射手に対する弓からの作用は射手の感覚を左右する重要な情報である。

発射に伴う射手の感覚は、生体内で起きる生理的な変化や弓から受ける力や振動などが感

覚器から入力され統合された結果である。特に、身体運動を成り立たせるのは生体内では骨格筋の活動（収縮）である。この活動を電氣的に捉える筋電図は、生体内の筋活動を客観的に捉えるのに非常に有効な手法である。また、発射に伴い弓から受ける力は、射手に対して発射の衝撃となる。これは力と同位相の加速度を計測することによって捉えれば、弓から射手に作用する衝撃をみることができる。

問題となるのは、被験者である。出土した弓具を現代の知識で忠実に復元しても、当時の射手に発射してもらうことは不可能である。従って、現代人のデータで先人の感覚をもとに推測しなければならないという限界がある。しかし、この千～二千年で体格は大型化しているが、生理・解剖学的機能が劇的に進化、変容したという知見は全くないことから、現代人を被験者とした計測結果も十分信頼できるものだと考えられる。

ここでは、現代弓と復元弓を用い、筋電図計測や衝撃加速度計測などの生体工学的なアプローチによってヒト側から捉えることのできる復元弓の特徴を調べることにする。

2) 筋電図、加速度からわかること

筋電図は、大脳の中樞神経からの信号により、脊髄の運動細胞を興奮させ、運動神経のインパルスによって筋線維の細胞膜が脱分極し電位を膜外へ放出する現象を時々刻々記録したものである。筋電図は筋活動の時間的な変化を捉えたものであるから、個々の筋活動のタイミングや射手の技量差における活動パターンの違いなどを分析することができる。また、活動量（収縮量）は中枢からの命令の大きさおよび筋自体の収縮負荷を示す。従って、筋活動の比較から筋自体の負担を見積もることも可能である。

加速度は、ニュートン力学の第二法則にあるように $F=ma$ で示される。質量 m の物体に、 F という力が作用したときに生じるのが加速度 a である。つまり、加速度は力に比例（定数は m ）しており、時々刻々の変化は力と同位相ということになる。従って、射手が弓から受ける急激な力（衝撃）は、射手の左手に生じる加速度（衝撃加速度）と比例していると考えられる。ここでは、衝撃加速度から射手に対する弓からの衝撃力（衝撃加速度に比例）をみていくことになる。

3) 現代弓と復元弓発射時の筋電図、衝撃加速度の比較

a) 被験者による現代弓と復元弓の発射実験

実験にはグラスファイバー製の現代弓（ばね定数226N/m）と復元弓8（古墳時代、栃木県七廻り鏡塚古墳丸木弓、ばね定数298N/m）を使用した。

被験者は大学弓道部に所属する男子大学生1名（弓歴8年、4段、的中率75～80%）である。筋電図の計測は、左前腕部の総指伸筋（五指の伸展時、手関節の背屈時に収縮）および浅指屈筋（五指の屈曲時に収縮）について行なった。発射時の衝撃加速度を計測するために、左手関節部に小型加速度計を動作の妨げにならぬように装着した（図2-1）。発射時の感覚も、

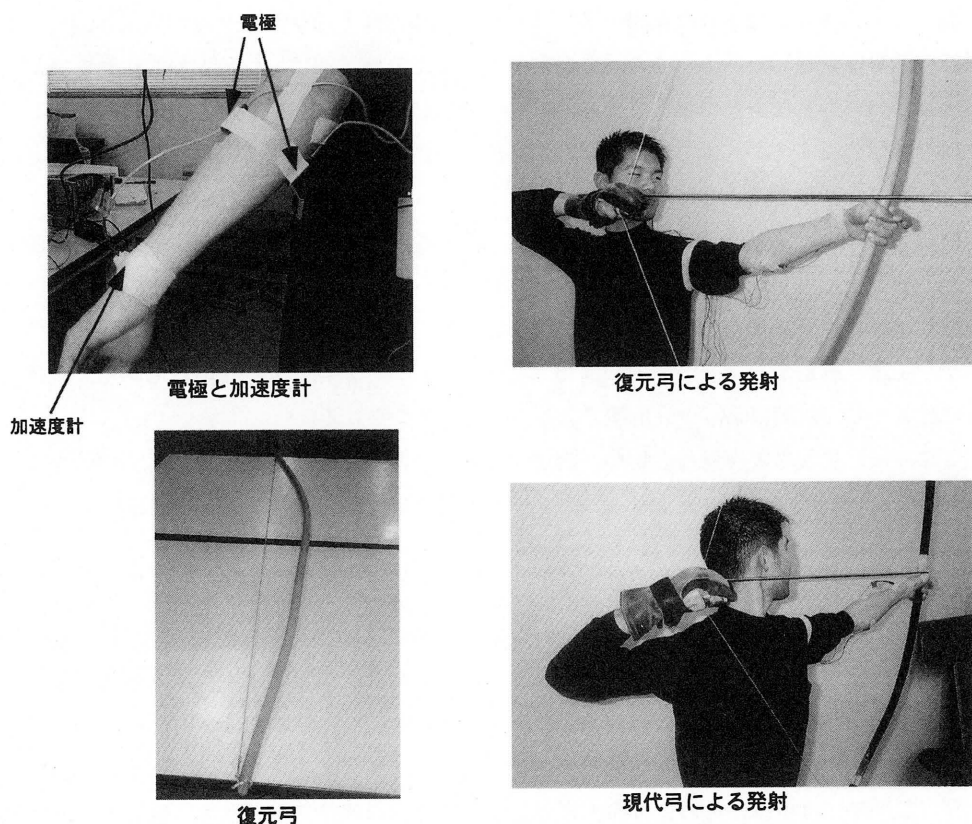


図2-1 実験の概要

合わせて聞き取り調査した。

実験は、各実験弓について5射ずつ行なった。なお、引尺（引いた長さ）は、現代弓が矢尺80cm（弓からの射手への作用：181N）、復元弓は弓力が大きかったため80cmを引くことが難しかったため矢尺を50cm（弓からの射手への作用：149N）とした。

皮膚表面に接着した電極から出力される電気信号は生体アンプで、加速度計から出力される信号は動歪計で増幅し、A/D変換器でアナログ・デジタル変換した後、パーソナルコンピュータに取り込んだ（サンプリングは5KHz）。計測した筋電図から、発射前後0.5秒間を整流し、時間積分することによって筋活動を算出した。一方、加速度は出力電圧と加速度の較正表から換算した。

b) 筋活動からみた現代弓と復元弓の比較

図2-2は、発射前後1秒間の現代弓と復元弓を発射したときの筋電図である。この発射前後を0.5秒間ずつで活動量を比較したものが図2-3である。

発射前の引尺での弓力が、復元弓は現代弓より小さいにもかかわらず、発射直後の浅指屈筋の活動量が現代弓の場合と比較し大きい（発射前）かほぼ同じ（発射後）であり、弓力

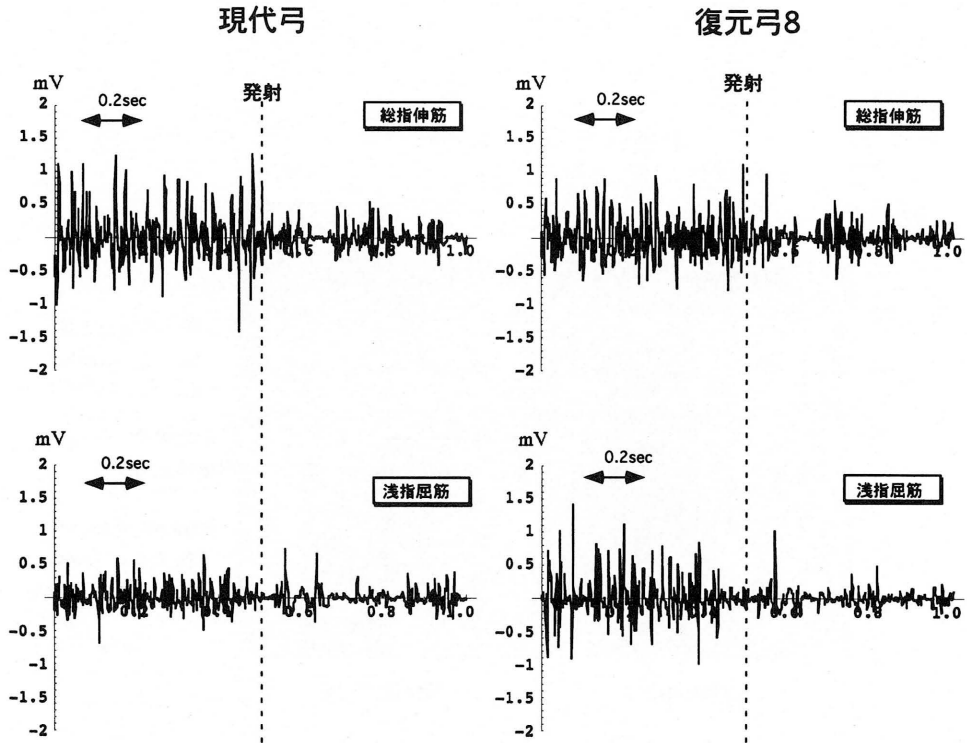


図2-2 発射前後の筋活動

を同様にして実験した場合には筋活動量が上回ると予想される。合わせて調査した発射後の感覚（弓の残留振動や総合的な引いた後の感覚）も、復元弓8は現代弓と比較して評価は良くなかった。

総指伸筋は、手関節を背屈させることに関わる筋であり、つまりは「ねじり」を作用させるときに主動筋となる。総指伸筋の活動を現代弓と復元弓8で比較すると、発射前の引尺での弓力に比例して現代弓の方が大きくなっている。発射前後の「ねじり」に対する射手の感覚には、特に顕著な評価は得られていないことから、浅指屈筋の活動を発射時の感覚と対応させ評価させることが重要ではないかと推測できる。

c) 衝撃加速度からみた現代弓と復元弓の比較

図2-4上段は、発射前後1秒間の現代弓と復元弓を発射したときの手関節に装着した加速度計が検出した加速度信号である。図2-4下段は、その一部を拡大して表示している。発射直後、射手方向に生じる衝撃加速度のピークが、復元弓8は現代弓のほぼ2倍になっていることがわかる。復元弓8は発射前の引尺での弓力が現代弓よりも小さいにも関わらず、射手に対して作用する衝撃はかなり大きいということが明らかとなった。

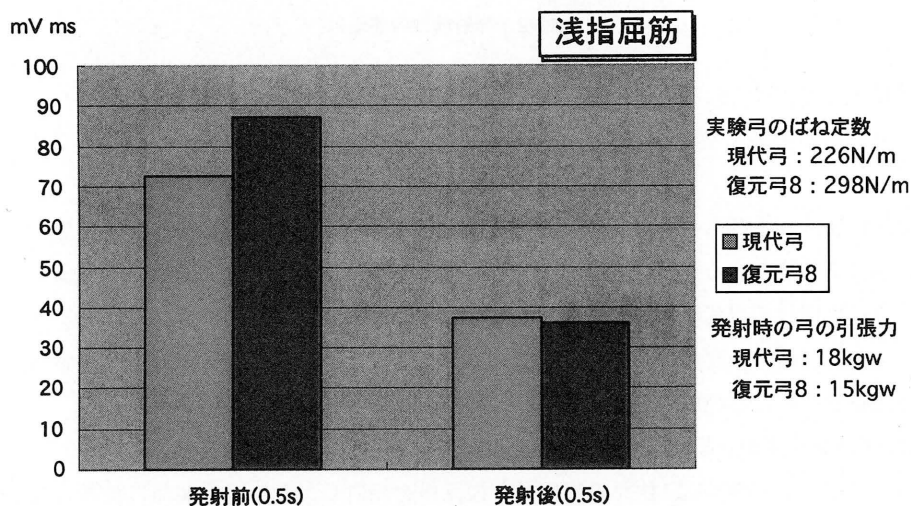
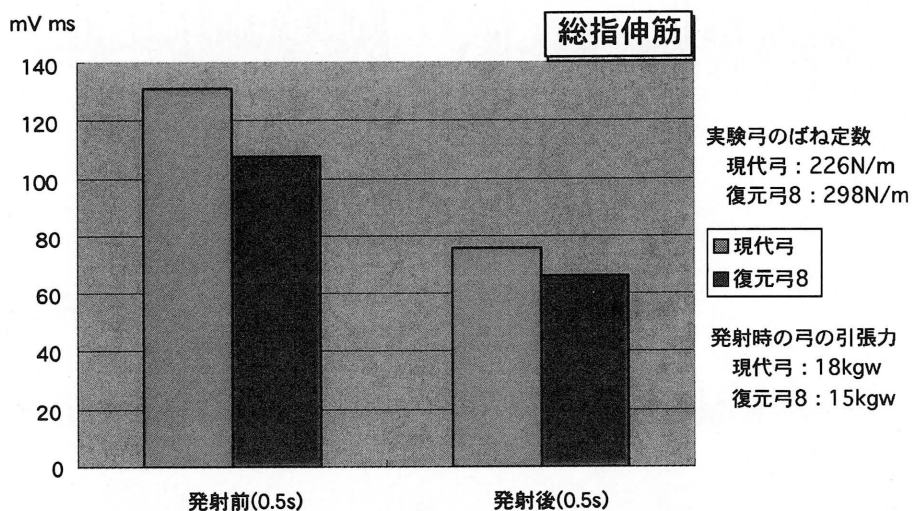


図2-3 発射前後の筋活動量

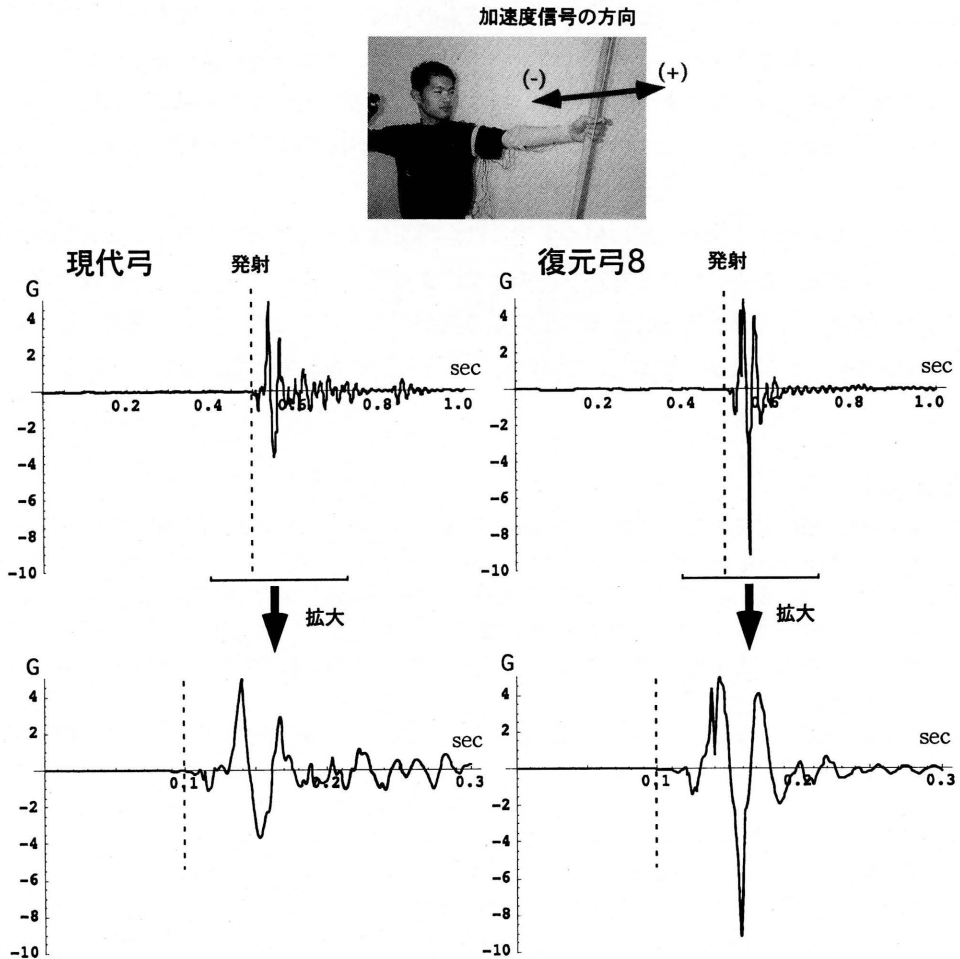


図2-4 発射前後の加速度信号

4) 生体工学的アプローチによる復元弓の解析

今回対象としたのは、復元弓8（丸木弓）のみである。計測を通して明らかになったことは、現代弓と比較して発射直後の衝撃が大きいことである。これは射手の左手関節に装着した加速度計からの信号から理解できる。同時に射手には弓の挙動を抑制するべくしっかり弓を握ることが要求されたため、その結果、浅指屈筋の活動が顕著に大きくなった。発射によって生じた主観的評価も、これらの計測結果と非常によく合致したものだった。

前節の結果と総合しても、現代弓は少なくとも単一材料から作られた丸木弓よりも優れた弓であることは間違いない。ただ、丸木弓と現代弓との比較結果だけが今回の研究の成果ではなく、生体工学的なアプローチが復元弓の解析に非常に有効だとわかったことが大きな収穫である。

和弓は日本の木材や竹などの植生，時代背景に応じた狩猟具・武器の必要性，時代時代の

製造技術・知識，特性に合わせた操作・発射技術の習得などさまざまな要素が絡み合って発展してきたことは疑う余地はない。江戸，明治期以降は，さまざまな価値観も加わり，和弓には武器以外の用途も出てきて。しかし，基本的に「武器」としての本質は，発展していないかもしれないが，消えることなく現在弓にも受けつがれていることも明らかであろう。

今後，被験者による発射実験に使用するには，手を加えるなければならない復元弓が多少ある。この問題をさらに解決しながら，モデルによるシミュレーション，その検証を含んだ工学的な実験を合わせて復元弓を調べていく必要がある。こうした中から，各時代における弓の特徴が明らかになり，武器としての和弓の発展の過程が詳細になると考えられる。

(参考文献)

- 1 東昭・渡部勲・宮紀雄・金子信也・野見山整：弓におけるエネルギーの貯蔵と開放－弓矢の力学 第1報－，第9回日本バイオメカニクス学会大会論集，204-211，1988.
- 2 細谷聡・小林一敏・宮地力：弓幹の多分節モデルによる静特性と動特性の研究，日本機械学会シンポジウム1990（スポーツ工学）講演論文集，74-77，1990.
- 3 細谷聡・森俊男・佐藤明：弓幹のねじりに関する力学的一考察，武道学研究，第24巻，第2号，153-154，1991.
- 4 細谷聡・森俊男：和弓のエネルギー伝達効率を用いた機械的性能の評価に関する力学的研究，武道学研究，第25巻，第2号，24-30，1992.
- 5 ジョンウルフ（大塚頼三・生嶋明訳）：機械的性質，岩波書店，23-40，1967.
- 6 稲垣源四郎：弓の技術3，新実技講座「弓道」，新体育，49-7，636-643，1979.
- 7 稲垣源四郎・入江康平・森俊男：日本の武道「弓道」，講談社，46-103，1983.
- 8 亀井俊雄：図解アーチェリー，雄山閣，改訂版，30-76，1973.
- 9 小林一敏：弓道における手の内の科学，数理科学，サイエンス社，Vol.7，10-15，1978.
- 10 小佐文雄・渋谷貞夫・入江康平・北克則：弾道振子装置による弓と矢との整合についての研究——スポーツ力学，学習の教材として——，東京教育大学スポーツ研究所報（最終号），87-99，1976.
- 11 宮地力・小林一敏・佐藤明：和弓の力学的特性に関する一考察，東京体育学研究，第7号，49-53，1980.
- 12 大橋義夫：材料力学，培風館，初版，186-199，1976.
- 13 佐藤明・小林一敏・大島義晴：和弓のねじり特性の力学的考察，東京体育学研究，第6号，85-89，1979.