

# 復元弓の工学実験

中島尚正・笠原智治

## はじめに

### a) 研究の目的

本研究の目的は、復元製作された縄文、弥生、古墳、奈良、平安時代の弓矢を用いて、弓の持つ工学的特性を調べることである。具体的には、発射力、発射時に矢が受ける加速度、的を射た時の破壊力、および、有限要素解析による復元弓の強度解析である。

このような工学的実験および解析によって、各時代の弓の特性を定量的に比較することができる。

これまでも、和弓に関する工学的研究の事例はある。すなわち、和弓をいくつかの要素からなるリンクモデルとみなし、弓幹の運動を計算して実験結果と比較すること、矢の速度から発射力を求めること、弓にひずみゲージを貼り付けて振動の減衰率を測定すること、等の研究である。

しかし、古代の復元弓を用いて工学的に弓矢の狩猟具・武器としての特性を研究した例はなく、従来は出土した弓の素材や形から特性を推定することに留まっていた。

なお本節の研究で使用した復元弓と鏃はそれぞれ表Aと表Bに示す。

表 A

復元弓 番 号	原型弓の発掘・保管場所	時 代	長さ (cm)	太さ (cm)	材 質	特 徴
1	福井県鳥浜貝塚	縄文前期	120	2	マユミ	丸木弓
2	東京都下宅部遺跡	縄文後期	150	3.2	イヌガヤ	飾り弓
3	東京都下宅部遺跡	縄文後期	120	2	イヌガヤ	丸木弓
4	東京都下宅部遺跡	縄文後期	150	3.2	イヌガヤ	飾り弓、弥生式弰（片側）
5	東京都下宅部遺跡	縄文後期	120	2	イヌガヤ	丸木弓、弥生式弰（片側）
6	大阪府鬼虎川遺跡	弥生中期	150	3	イヌガヤ	弥生式弰（両側）
7	佐賀県菜畑遺跡	弥生前期	80	2	シイ	弓の字の形
8	栃木県七廻り鏡塚古墳	古 墳	190	2.5	ケヤキ	弥生式弰（両側、傾斜付）
9	正倉院		166.5	2.9	ミズメ	
10	正倉院				ケヤキ	
11	正倉院		166.5	2.9	ハゼ＋竹	

表 B

名 称	素 材	最大長 cm	最大幅 cm	最大厚 cm	重量 g	備 考
縄文石鏃29番	隠岐黒曜石	2.0	1.9	0.55	1.62	凹基無茎式
弥生石鏃28番	二山上サヌカイト	3.4	2.0	0.5	3.26	凸基無茎式
弥生石鏃 7 番	二山上サヌカイト	4.4	2.0	0.9	8.25	平基式
磨製石鏃	頁岩	18.0	1.5	0.6	20.0	
弥生鉄鏃 1 番	鉄	3.0	2.0	0.1	3.0	
弥生鉄鏃 2 番	鉄	6.0	2.0	0.15	11.0	
弥生銅鏃	銅	3.5	1.0	0.5	7.0	
石墳鉄鏃 2 番	鉄	5.5	2.0	0.5	24.0	
石墳鉄鏃 3 番	鉄	19.0	1.2	0.4	33.0	

b) 弓の特性に関する工学的な理解

弓の狩猟具・武器としての特性を理解する上で有効と思われる工学的な概念を以下に整理してまとめておく。

速度と発射エネルギー

弓の特性を表わす指標の一つとして、発射した矢の速度がある。

また、矢が付与された発射エネルギーは、発射直後に矢が有する運動エネルギーと考えることができる。矢の発射エネルギーを $E_1$ とおくと、次式のとおり。

$$E_1 = \frac{1}{2}mv^2 \quad m: \text{矢の質量} \quad v: \text{矢の初速度}$$

引張り力と弾性エネルギー

弓を引くのに要する引張り力と引き幅の関係は、弓によりさまざまである。このとき、弓に貯えられる弾性エネルギーは、引き幅と引張り力の関係を示す曲線の下部の面積となる(図1)。

実際使用する際は、素手で引くので引張り力には使用者の腕力による限界値がある。引き幅と引張り力の関係がほぼ線形であることから、貯えられる弾性エネルギーは、引き幅の2乗にほぼ比例する。

よって、同じ引張り力を与えるなら、大きい引き幅を取ることのできる弓が有利であると言える。弓の場合、この曲線の形によって、引き幅をいっぱいにとったときに急激に重く感じる弓や、逆に最後は割と軽く感じる弓などに別れる。これにより、使用者の感覚は大きく変わってくる。



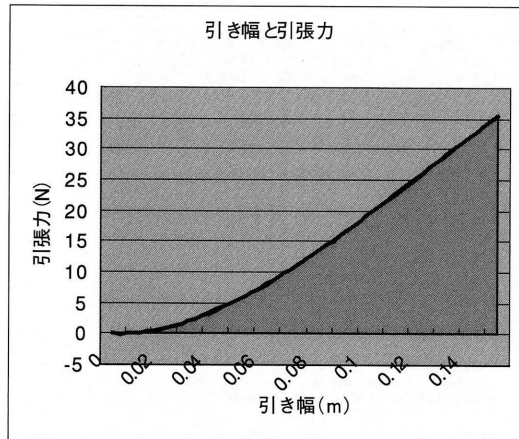


図1 引き幅と引張り力の関係

### エネルギー変換効率

エネルギー変換効率を、次の式で定義する。

$$\text{エネルギー変換効率} = \frac{E_1}{E_2} \times 100 (\%)$$

これは、弓の貯えた弾性エネルギー $E_2$ が、矢の発射エネルギー $E_1$ にどれだけ変換されたかを示す値である。弓の引き幅には無関係である。

### 弓にかかる荷重と応力

弓を細長い円柱形のモデルで考える。上下対称として、上半分を考えると、近似的には端に荷重がかかる片持ち梁と考えることができる。

弓の直径を $D$ 、長さを $L$ 、このときのたわみを $v$ とする。また、弓の材料は、ヤング率 $E$ の等方性物質とすると、荷重 $F$ と、曲げモーメントが最大になる点での曲げ応力は、

$$F = \frac{3\pi E v D^4}{64L^3}$$

$$\sigma = \frac{32FL}{\pi D^3}$$

となる。したがって、引張り力は、弓の直径の4乗に比例し、弓の長さの3乗に反比例すること、曲げ応力は、長さに比例し、直径の3乗に反比例することが分かる。

## 1 発射力の測定

### a) 測定の方法

まず、各復元弓について矢の初速度を測定した。引き幅、矢の重さを変化させ、実験を行った。

矢の重さは、再現された鏃の重さを基に、10 g から70 g まで10 g ずつ変化させて実験する予定であったが、10 g、20 g の矢については製作が難しく、この2つは外挿により推定することにした。

発射エネルギー $E_1$ は速度より求めた。

弓に貯えられた弾性エネルギー $E_2$ は、ばねばかりを用いて、弓の引き幅と引張り力との関係から求めた。

以下に測定結果を示す。なお、復元弓3号は、実験中に折れてしまい、測定ができなかった。

### b) 矢の初速度と発射エネルギー

#### 復元弓1号

この弓は、短くて細いため、引き幅を大きくすると破損の恐れがあるので、10cmを限界とした。

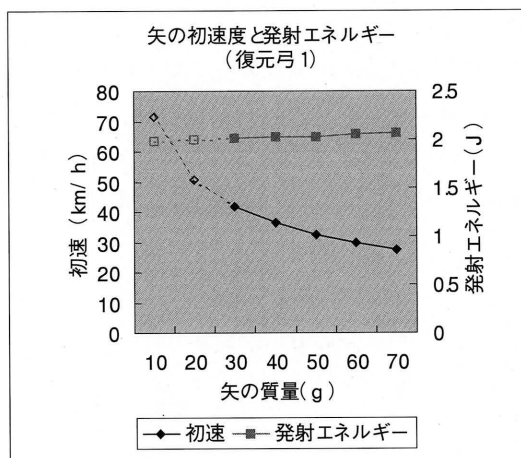


図2 復元弓1号の初速度と発射エネルギー (引き幅 10cm)

### 復元弓 2 号

この弓は、比較的長く、太い弓であったため、引き幅は比較的大きく取れると思われるが、引き幅を取るのには相当大きな力が必要であった。

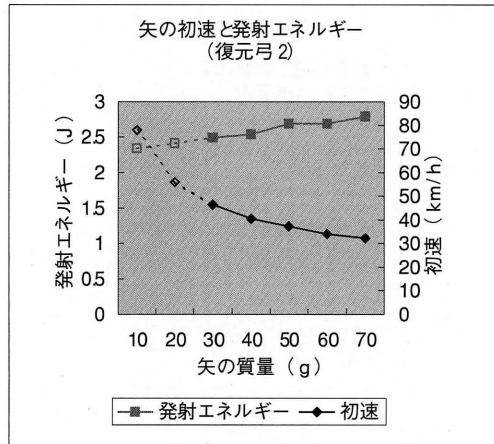


図3 復元弓 2 号の初速度と発射エネルギー (引き幅 11.5cm)

### 復元弓 4 号

この弓は、復元弓 2 号と同じ長さ、太さで、弓の両端の弰だけを弥生式にして、縄文時代の弰と弥生時代の弰との機能の違いを調べるために製作された。しかし、弓材の個体差や、若干の太さの違いがあり、厳密な比較はできなかった。

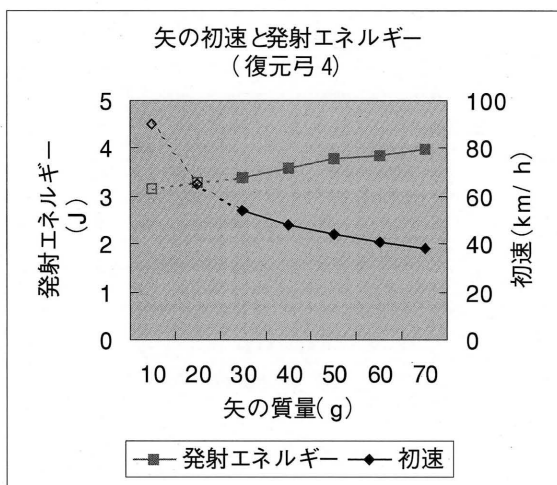


図4 復元弓 4 号の初速度と発射エネルギー (引き幅 11cm)

## 復元弓 5 号

この弓は、復元弓 3 号の弦を弥生式弦にしたものである。しかし、復元弓 3 号は実験中に折れてしまったため、比較はできなかった。短く、細い弓であったため、引き幅は10cm程度しか取れなかった。

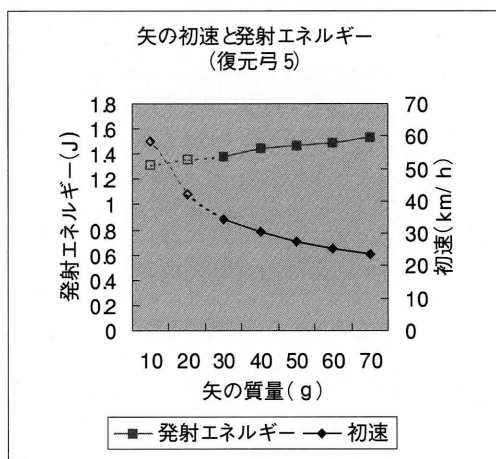


図 5 復元弓 5 号の初速度と発射エネルギー (引き幅 15cm)

## 復元弓 6 号

この弓は太いために、引き幅を取るのにかなりの力が必要であった。矢が暴れるように飛び出すので測定が困難であった。

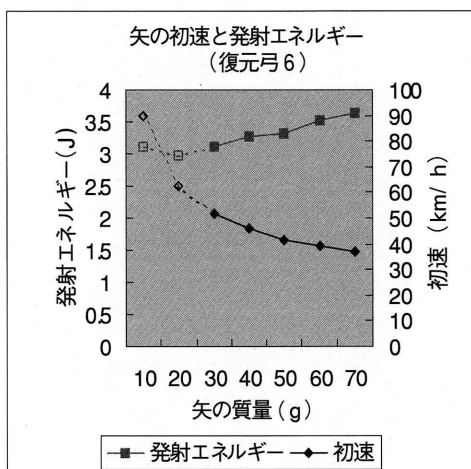


図 6 復元弓 6 号の初速度と発射エネルギー (引き幅 10.6cm)

## 復元弓 8 号

この弓は他の弓に比べて、軽い力で大きく引き幅を取ることができる。よって、引張力を一定にしたときの弓に貯えられる弾性エネルギーを他と比較すると、もっとも大きい値となった。

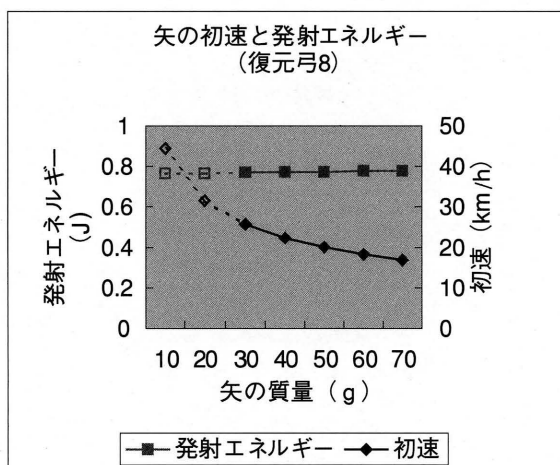


図7 復元弓 8 号の初速度と発射エネルギー (引き幅 10cm)

## 復元弓 9 号

この弓は、復元された弓の中で最も長い。矢の質量の変化に対して、発射エネルギーの変化が一番大きかったのもこの弓である。

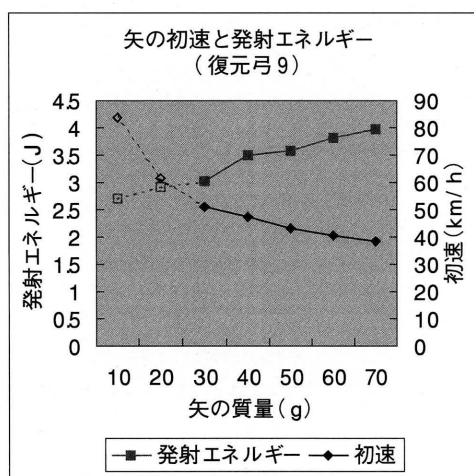


図8 復元弓 9 号の初速度と発射エネルギー (引き幅 14cm)

## 復元弓11号

引き幅を取るのに大変力の要る弓であるが、弓自体は細く、弓本体の重量は軽い。このことは、弓本体がしなってから元の形に戻るのに必要とするエネルギーが少ないことを意味する。効率が良いのはそのためと思われる。

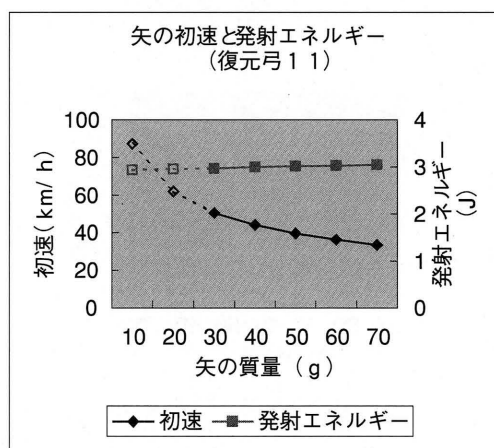


図9 復元弓11号の初速度と発射エネルギー (引き幅 9 cm)

## 考 察

以上の結果から、次のことが言える。

まず、発射エネルギー $E_1$ に関しては、矢の質量の増加に伴い多少の増加を見せるが、多くの弓はほぼ一定であるとみなせる。また、初速度は、矢の質量の $1/2$ 乗にはほぼ反比例している。つまり、矢の質量に関わらず、発射エネルギー $E_1$ は、弓の種類と引き幅のみで決まることが分かった。

次に、実際に測定して求めた引き幅と引張り力の関係のグラフを用いて、実験時の引き幅における弓に貯えられた弾性エネルギー $E_2$ を求め、エネルギー変換効率を算出した。

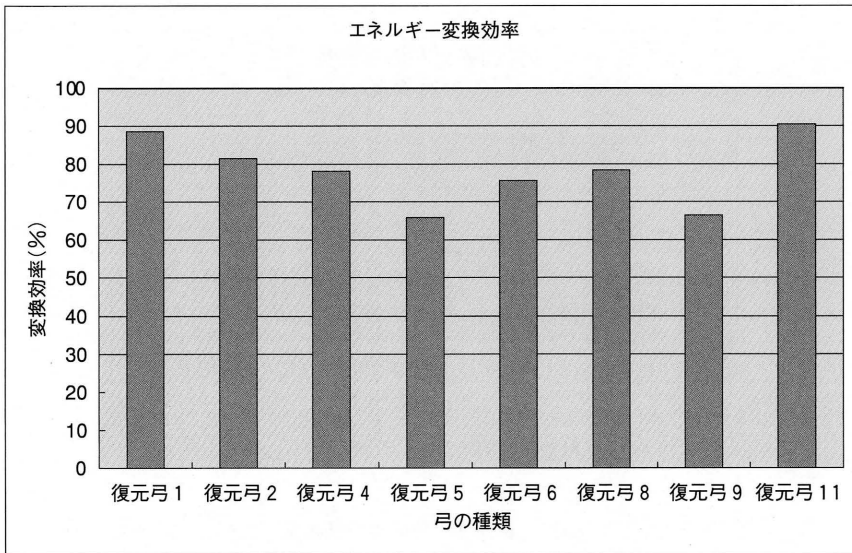


図10 復元弓のエネルギー変換効率の比較

この結果から、エネルギー変換効率は、細く、短く、軽い弓ほど大きくなることが分かる。これは、弓本体が元の形に戻る時にエネルギーが消費されにくいためと考えられる。このことから、引き幅を大きくして実験を行うと、エネルギー伝達効率の値は小さ目の値となることが予想される。

この実験において復元弓3号は、ほとんど引き幅を取らないうちに折れてしまった。このことから、他の復元弓においても引き幅を大きくすると折損の危険がある思われたので10cmから約15cmの間の引き幅に留めて実験を行った。

エネルギー変換効率が引き幅によらず一定であると近似すると、引き幅と推定初速度の関係を推定することができる。引き幅の限界値が分かれば、この関係を用いて、弓の最大初速度を推定することができる。

以下のグラフは、矢の質量を30gとした時の、引き幅と推定初速度の関係を示したものである。参考として、引張り力を20kgfとした時の推定初速度を示しておいた。現在の和弓で、20kgfの強さの弓は、成人男子の使用する弓の強さの平均以上であり、素手で引いたとすれば、このくらいが限界ではないかと思われる。復元された弓の中には、この引張り力に到達する前に破壊してしまうものも少くないと思われる。

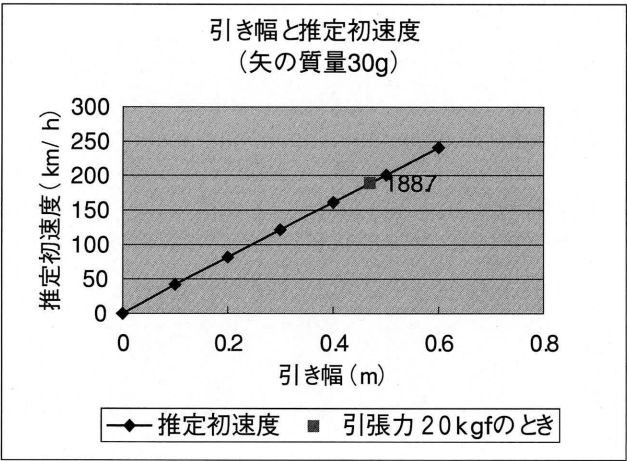


図11 復元弓 1 号の推定初速度

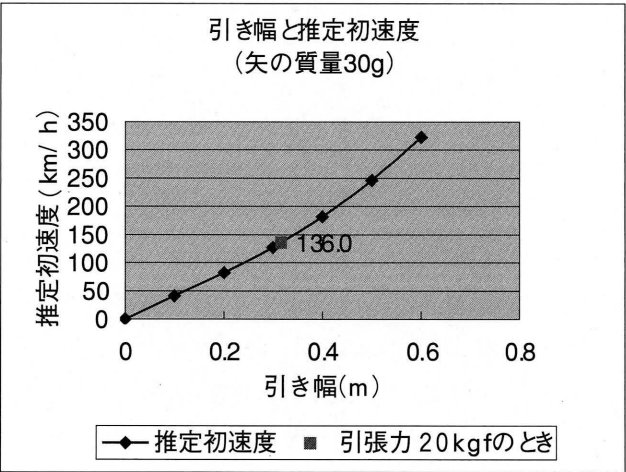


図12 復元弓 2 号の推定初速度



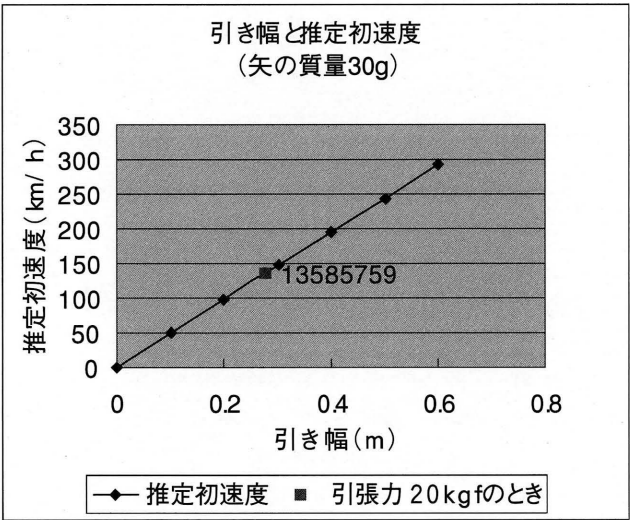


図13 復元弓 4 号の推定初速度

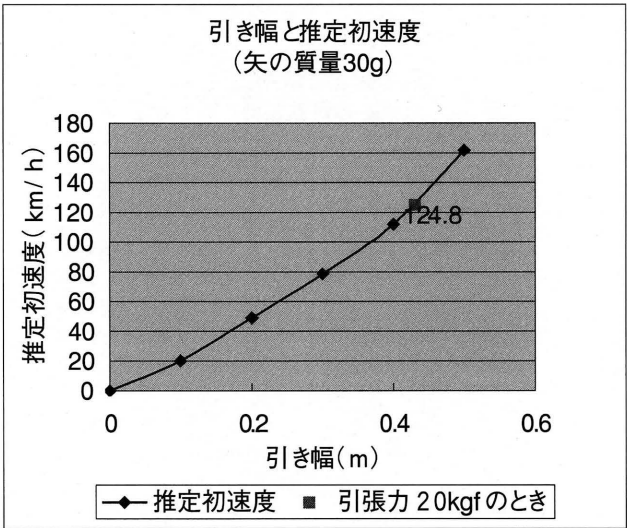


図14 復元弓 5 号の推定初速度

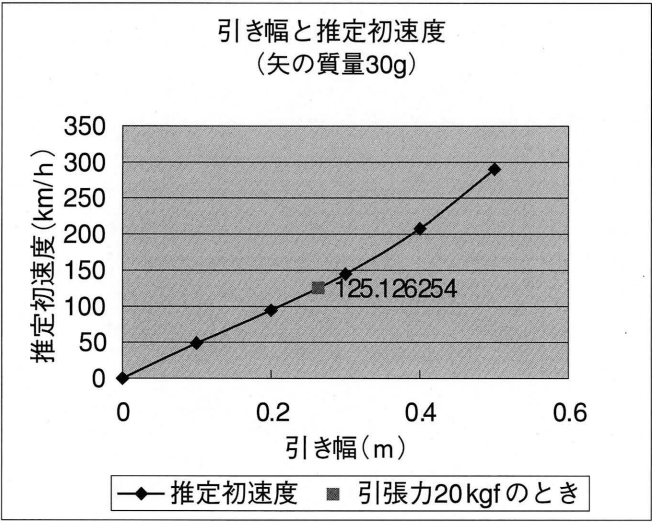


図15 復元弓 6 号の推定初速度

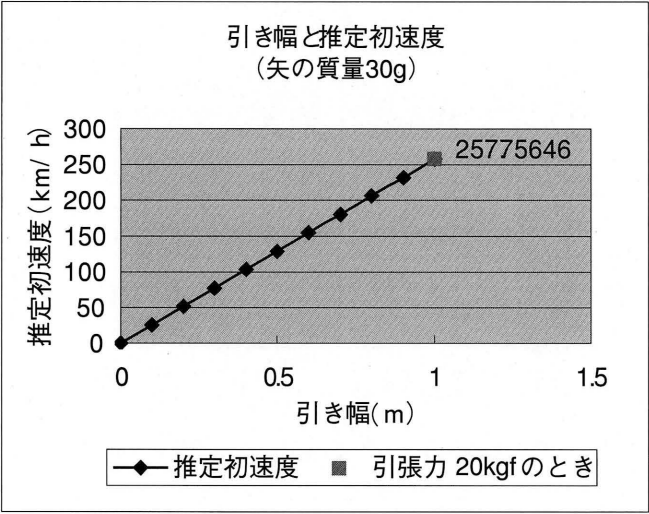


図16 復元弓 8 号の推定初速度

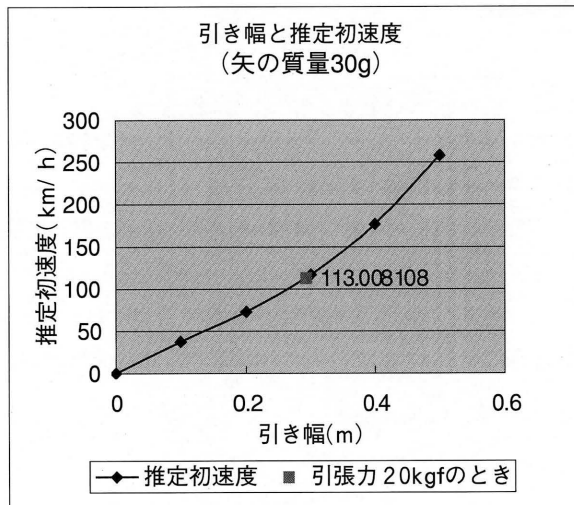


図17 復元弓 9号の推定初速度

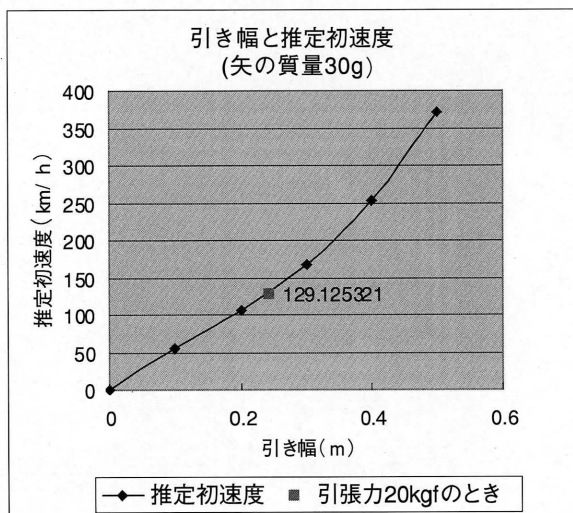


図18 復元弓 11号の推定初速度

## 2 発射時の加速度の測定

### a) 実験の方法

矢の先端に取り付けた加速度ピックアップを用いて、弦が矢を押している間の加速度の推移を測定して、オシロスコープの画面上に表示する。

各時代の弓を比較するため、復元弓1号、4号、8号、11号を用いて実験を行った。

### b) 結果と考察

以下の写真は測定結果のオシロスコープ出力画面であり、横軸が時間、縦軸が加速度を示している。

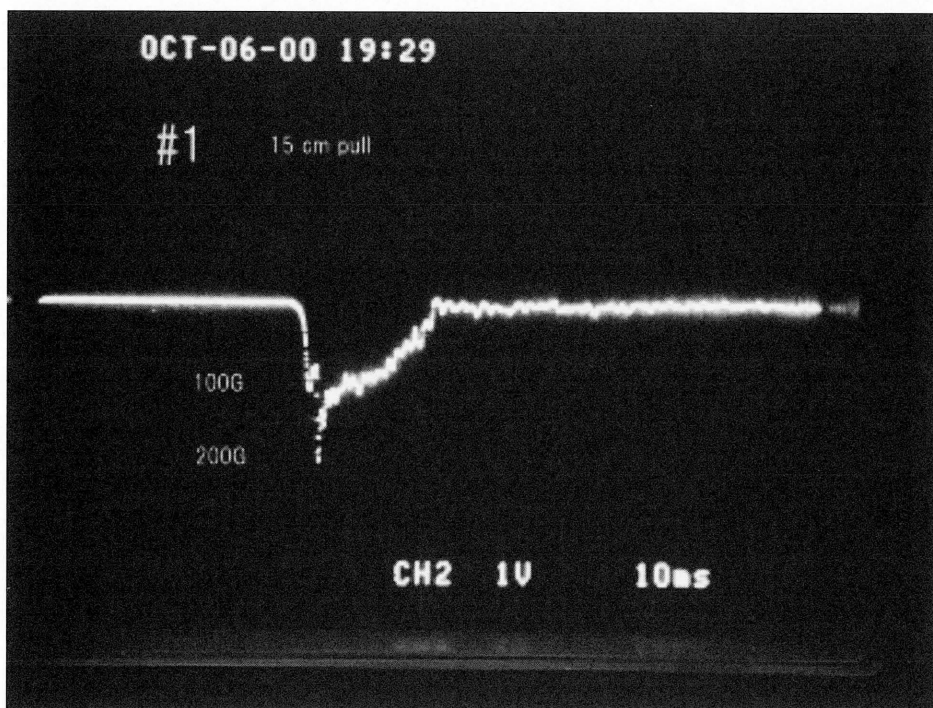


図19 復元弓1号の加速度の推移

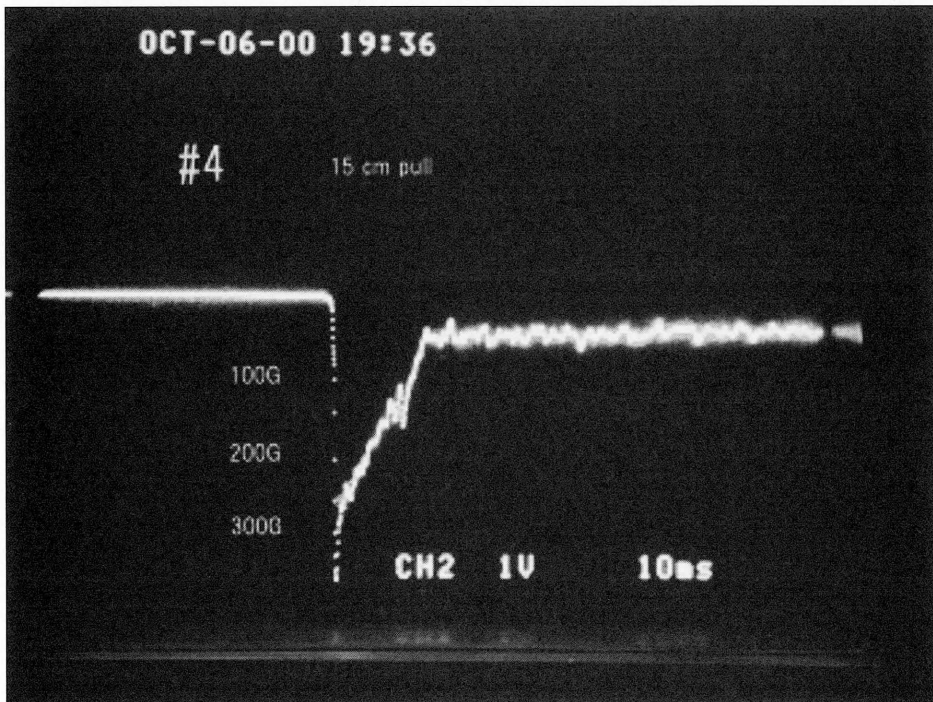


図20 復元弓 4 号の加速度の推移

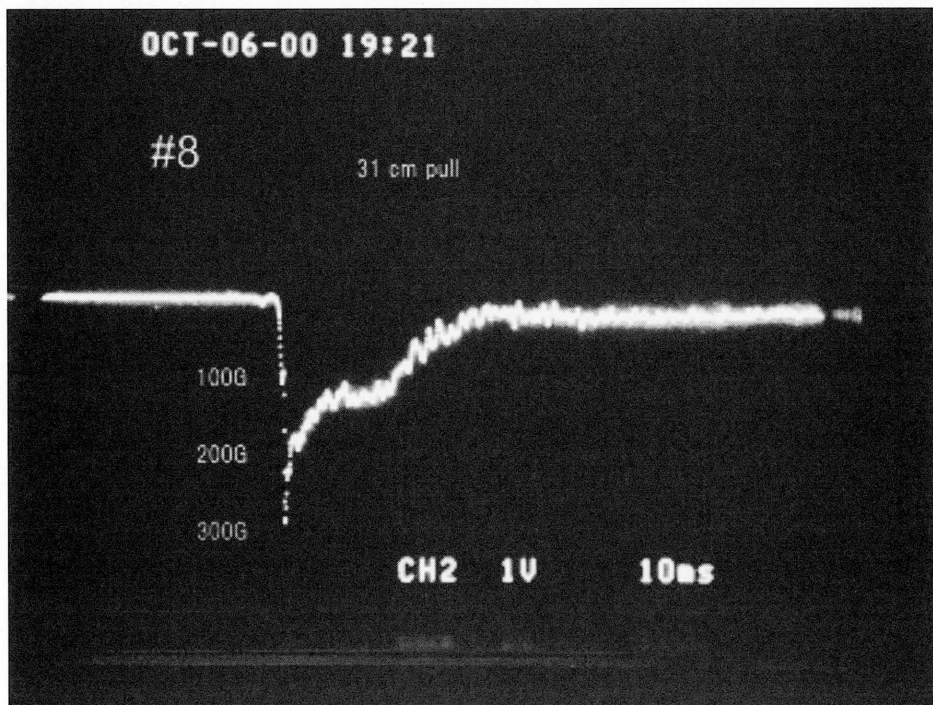


図21 復元弓 8 号の加速度の推移

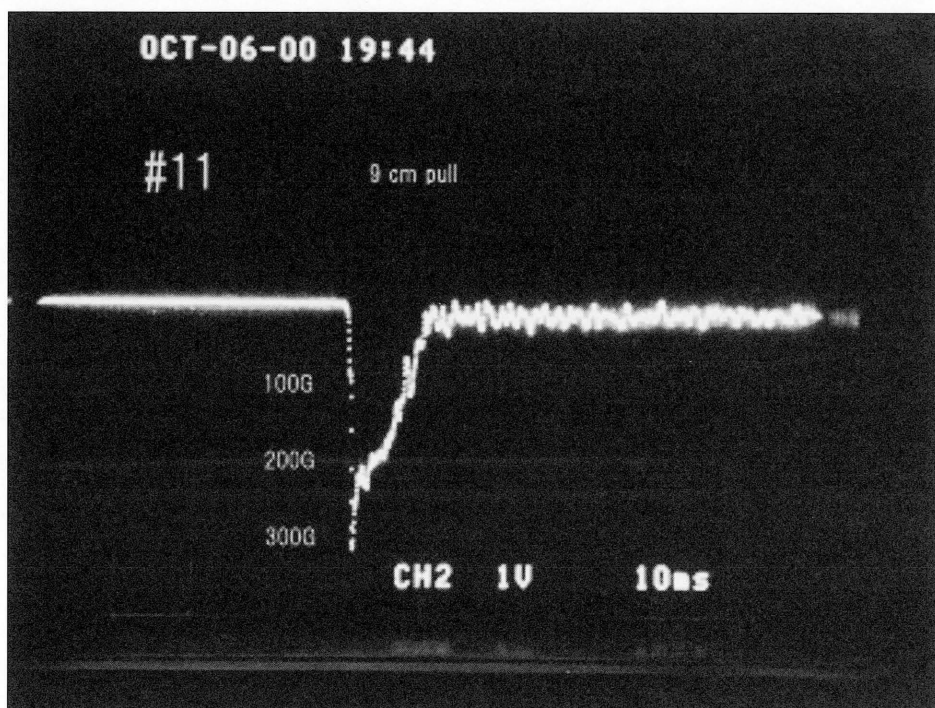


図22 復元弓11号の加速度の推移

## 考 察

加速度推移のグラフは、横軸が時間、縦軸が加速度を示しているの、横軸（加速度0）とグラフの曲線が囲む面積が、矢に与えた初速度となる。実際に求めた速度と、面積を計算したものがほぼ一致した。矢が弦によって押されている時間は約10～30ms、最大加速度が200～300Gほどであった。この値自体は、引き幅を変えて初速度の値を変えてやれば、変化してしまうので、弓同士の比較は難しい。グラフの形自体を比較すると、大きく2つに分けられる。一つは、復元弓4号や11号のように、鋭く尖がった形になるもの、もう一つは、復元弓1号や8号のように、比較的なだらかな形になるものである。

前者は、短時間で矢を押し出すので、一定の面積を稼ぐためには最大加速度を大きくする必要がある。後者は、時間をかけて押し出すので最大加速度は小さくてよい。最大加速度が大きいほど、矢にかかる負担が大きく、矢のしなりなどにつながり、道具としての寿命を縮めてしまうこと、運動エネルギーを損失すること、などの欠点が出てくると考えられる。



### 3 破壊力の測定実験

#### a) 測定の方法

矢を的に当てて、破壊の様子を調べる。的は、牛皮、猪皮、熊皮、板（厚さ1cm）の4種類である。鏃は、石鏃3種類、磨製石鏃1種類、金属鏃5種類の、計9種類である。

矢の速度は時速50kmと100kmの2通りに変えて的を射て、その時の様子を撮影した。

#### b) 結果と考察

ここでは、例として石鏃での実験の結果の写真を示す。その他の写真は、資料として、最後にまとめて示すことにする。

##### 時速50kmのとき

1. 牛皮の場合 矢は跳ね返り、跡が残った（図23～25）。

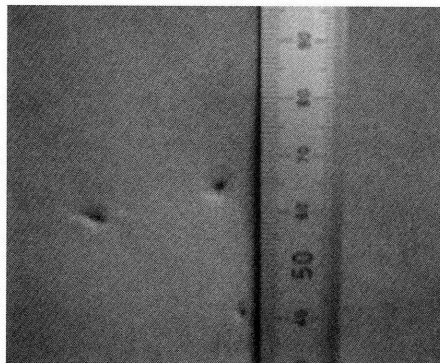


図23 縄文石鏃（29番）

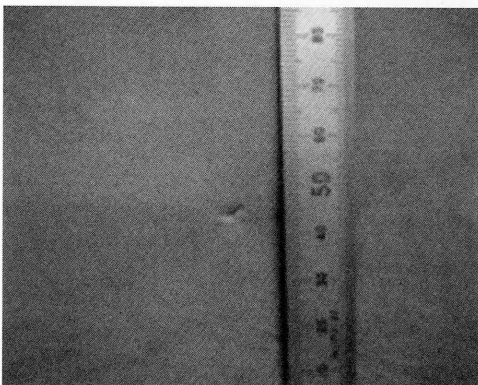


図24 弥生石鏃（28番）

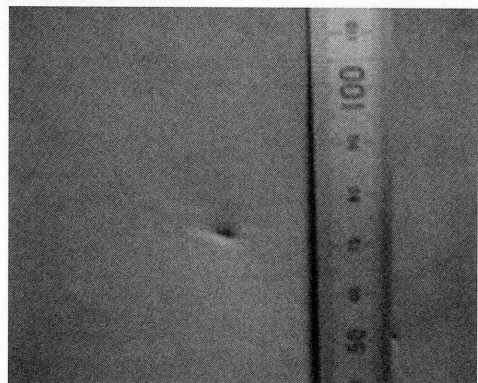


図25 弥生石鏃（7番）

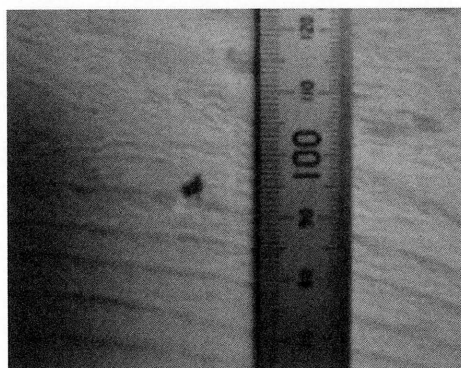


図26 縄文石鏃（29番）

2. 猪皮の場合 矢は跳ね返り、跡は全く付かなかった。

3. 熊皮の場合 矢は跳ね返り、跡は全く付かなかった。

4. 板（厚さ1 cm）の場合 矢は跳ね返り、跡が残った（図26～28）。

その他の鏃の場合も含め、結果を表1にまとめた。なお、斜線部は、鏃または矢のジョイント部の破損のために、測定できなかったところである。

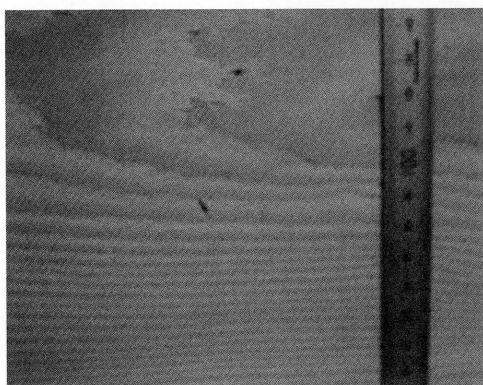


図27 弥生石鏃（28番）

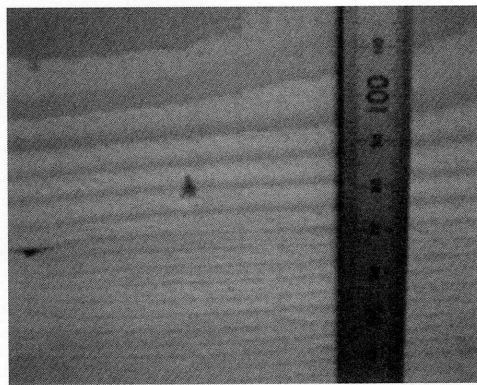


図28 弥生石鏃（7番）



表 1 破壊力実験結果（時速50km）

	熊皮	牛皮	猪皮	板（厚さ 1 cm）
縄文石鏃（29番）	跡なし	跡なし	跡なし	跡が残るのみ
弥生石鏃（28番）	跡なし	跡なし	跡なし	跡が残るのみ
弥生石鏃（7番）	跡なし	跡なし	跡なし	跡が残るのみ
磨製石鏃	貫通（5.0cm）	貫通（3.2cm）	貫通（3.0cm）	
弥生鉄鏃（1番）	跡なし	跡が残るのみ	跡なし	ささる（0.6cm）
弥生鉄鏃（2番）	貫通（3.8cm）	跡が残るのみ	貫通（1.7cm）	ささる（0.7cm）
弥生銅鏃	貫通（3.5cm）	跡が残るのみ	貫通（2.5cm）	跡が残るのみ
古墳鉄鏃（2番）		貫通（1.1cm）		
古墳鉄鏃（3番）	貫通（4.7cm）	貫通（1.0cm）	貫通（2.0cm）	跡が残るのみ

## 時速100kmのとき

## 1. 牛皮の場合

縄文石鏃（29番）は、跡が残るのみであったが、弥生石鏃（28番，7番）は、皮を貫通した（図29～31）。

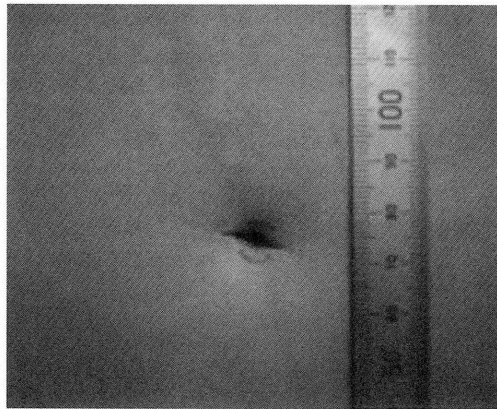


図29 縄文石鏃（29番）



図30 弥生石鏃（28番）

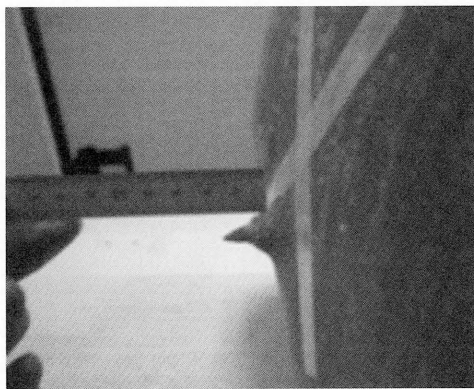
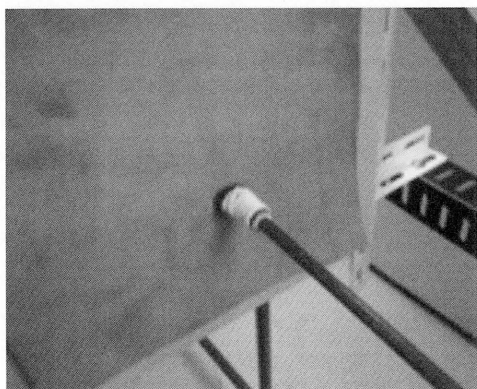


図31 弥生石鏃（7番）

2. 猪皮の場合

縄文石鏃（29番）は、跡も残らなかった。

弥生石鏃（28番，7番）は、皮を貫通した（図32，33）。

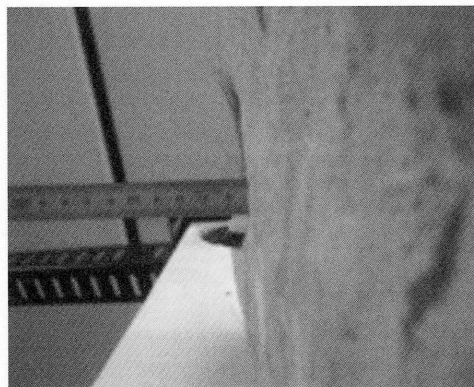
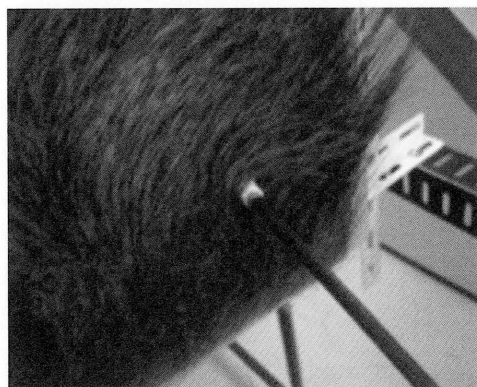


図32 弥生石鏃（28番）



図33 弥生石鏃（7番）

3. 熊皮の場合 縄文(29番), 弥生(28番, 7番)の石鏃すべてについて, 皮を貫通した(図34~36)。

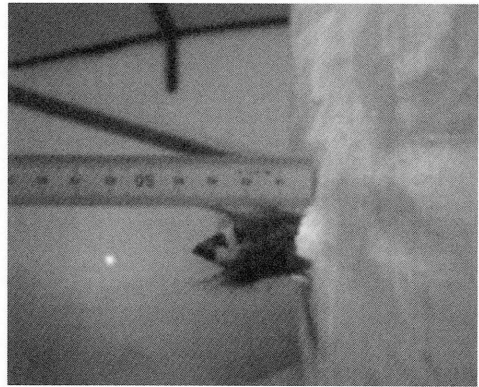
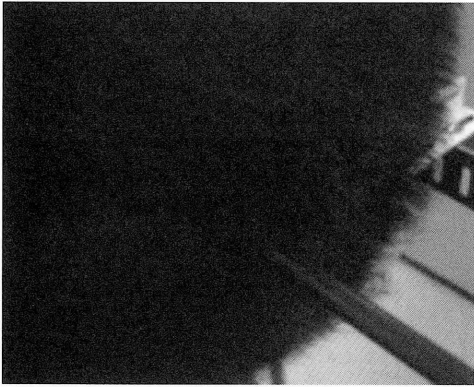


図34 縄文石鏃(29番)

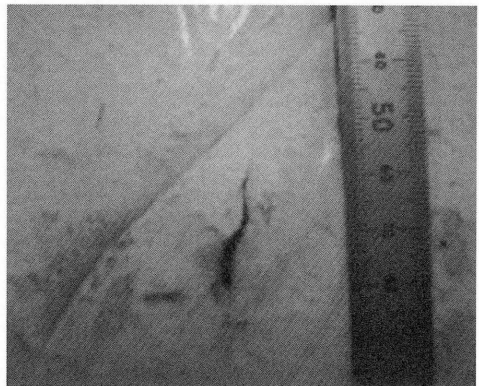
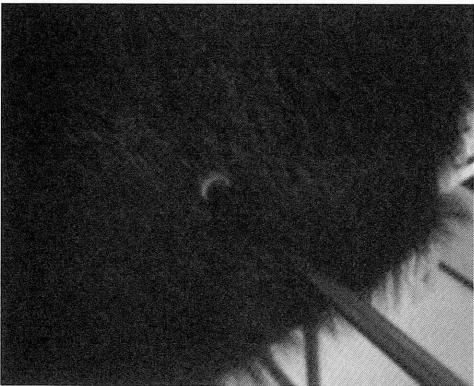


図35 弥生石鏃(28番)

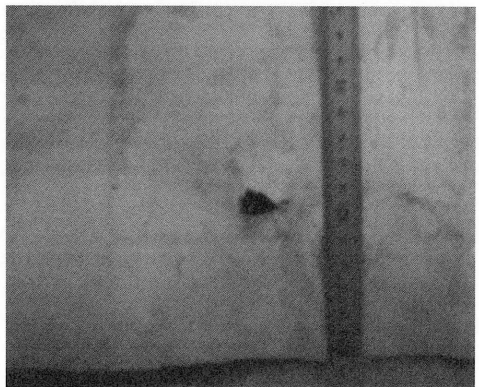
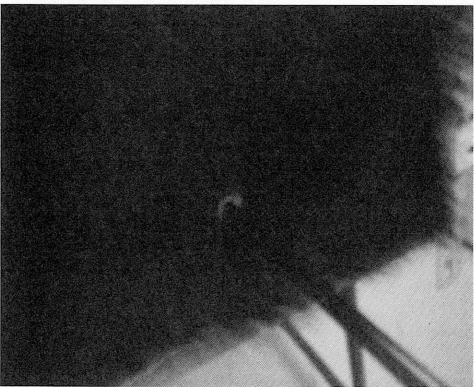


図36 弥生石鏃(7番)

4. 板（厚さ1 cm）の場合      縄文（29番）、弥生（28番，7番）の石鏃すべてについて，板は割れた（図37～39）。

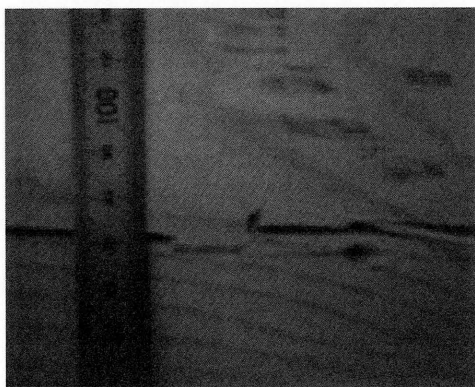


図37 縄文石鏃（29番）

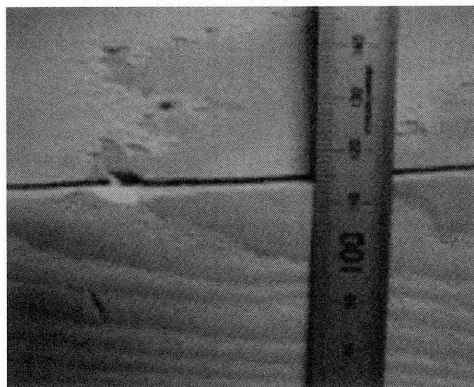


図38 弥生石鏃（28番）

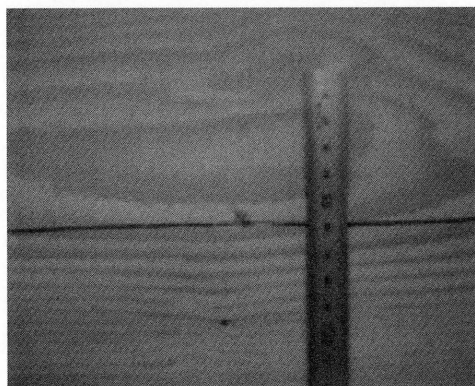


図39 弥生石鏃（7番）

その他の鏃の場合も含め，結果を表2にまとめた。

なお，斜線部は，鏃または鏃と矢のジョイント部分の破損のため，測定できなかったところである。

表2 破壊力実験結果（時速100km）

	熊皮	牛皮	猪皮	板（厚さ1cm）
縄文石鏃（29番）	貫通（3.9cm）	跡が残るのみ	跡なし	割れる
弥生石鏃（28番）	貫通（4.2cm）	貫通（1.2cm）	貫通（1.3cm）	割れる
弥生石鏃（7番）	貫通（6.3cm）	貫通（1.9cm）	貫通（2.7cm）	割れる
磨製石鏃	貫通（5.0cm）	貫通（3.2cm）	貫通（5.8cm）	
弥生鉄鏃（1番）	貫通（4.6cm）	貫通（5.1cm）	貫通（4.9cm）	割れる
弥生鉄鏃（2番）	貫通（5.7cm）	貫通（5.2cm）	貫通（4.4cm）	割れる
弥生銅鏃		貫通（4.2cm）	貫通（5.0cm）	割れる
古墳鉄鏃（2番）	貫通（6.4cm）	貫通（4.6cm）	貫通（4.9cm）	割れる
古墳鉄鏃（3番）	貫通（4.8cm）	貫通（4.0cm）	貫通（5.0cm）	割れる

## 考 察

工学的に言えば、同じ速度で的に当てた場合、矢の質量が大きいほど破壊力は増し、鏃先端が鋭いほど貫通量は増加すると考えられる。

実験では実際に近い模擬的に矢を当てたので、定量的な評価を求めるのは難しかった。鏃が的に貫通した距離は、的に当たる角度のわずかな違いや、皮の個体差の影響が大きく、正確な比較はできなかった。

しかし、おおまかな傾向を掴むことはできた。すなわち、時速50kmで的に当てた場合は、どの的でも、ほとんどは跡が付くのみであり、的として十分機能していることがわかった。一方、時速100kmで的に当てた場合は、板に関しては、すべての鏃に関して割れてしまったが、皮については、鏃によりさまざまな結果がとまった。

## 4 弓のモデルの有限要素解析

### a) 引き幅の限界値の解析

弓は、引き幅を増やしていくと、当然ある点で破壊を起す。実験中も、慎重に引き幅を増やしていったにも関わらず、復元弓3号は折れてしまった。弓の特性を知る上で、最大でどれだけの矢の初速度を出し得るかが重要であるので、引き幅の限界値を求める必要がある。

引き幅の限界値を求めるには、同じ条件で復元製作された弓を何本か用意し、実際に力をかけて折ってみる、という方法がまず考えられるが、弓の復元製作は容易ではなく、実際、実験用として提供されたのは、各弓について1本ずつである。

そこで、コンピュータを用いた有限要素解析により、引き幅の限界値を求めることにした。



## b) 解析の手順と方法

### 解析条件

縄文時代の弓である、復元弓1号を用いて解析を行った。

簡単のため、弓は上下対称であると仮定した。また、材料の物性値として必要な3方向の縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比が、弓の素材に基づいてすべてを揃えることができなかったため、復元弓1号にほぼ近い特性を持つ木材として、イチイの物性値を用いることにした。イチイを使った弓は、実際に発掘されている。

弓の形状をコンピュータ用に表現するためのソリッドモデルの作成に使用したソフトは、PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION社製「Pro/Engineering」、有限要素解析に使用したソフトは「Pro/Mechanica」である。

### 解析方法

弓の解析で問題となるのは、引き幅の変化に応じて、弓にかかる力（ベクトル）の方向が随時変わっていく点である。そのために、力の方向と向きを少しずつ変化させながら、弓の応力分布を見ていく必要がある。

解析は以下の手順で行った。

1. 弦を張った状態での、弓の上端点の変位を、復元弓を用いて実測し、同じ変位となるように弓のモデルに力を作用させて、弦を張った時の張力を求める。
2. 次に、垂直方向には、上の1で求めた張力に近い値の力をかけて、水平方向には適当な力をかけて、これらの成分の比が一定になるように力の大きさを変化させていき、応力分布を観察する。この時、弓が破壊する応力が生じる最小の力と、弓の上端点の変位を求める。
3. 上の2で求めた変位から、弦と水平方向のなす角度が求まる。
4. 上の2で与えた力の方向と、上の3の角度が一致するように、2，3を繰り返す。

以上の手順で、弓が破壊する寸前の弓に対する張力のかかり方が分かる。

## c) 結果と考察

イチイの曲げ強さは $700\text{kg}/\text{cm}^2$ である。この応力が生じた時の解析結果の様子を次に示す。このときの弓上端点の変位から、引き幅の限界値は、約15.8cmとなった。

解析に用いた弓は、実験中では10cm程度の引き幅しか取れなかった。それ以上引くと、今にも折れてしまいそうだったからである。解析結果の15.8cmは、実際の値に近いものと思われる。

また、図11で示した、引き幅と推定初速度の関係から、このとき、約64km/hの初速度を持つと推定される。

破壊力の測定実験結果を合わせて考えると、縄文時代の鏃と時速60km程度の速度の場合、近距離で発射しても、大きな動物に致命傷を与えるのは難しいと言えるだろう。



図40 弓のモデルの有限要素解析

## 5 結 論

復元製作された縄文、弥生、古墳、奈良、平安時代の弓に関して、発射力（初速度）、加速速度の推移、破壊力を測定するための装置を設計・製作し、それらの測定を行った。

発射エネルギーは、矢の質量に依らず、弓の種類と引き幅に大きく依存することが確認できた。エネルギー変換効率については細く短く軽い弓ほど高いという傾向が認められた。

発射時に矢が受ける加速度の変化を求めたところ、縄文前期の復元弓 1 や古墳時代の復元弓 8 は合理的な設計がされていることが分かった。

破壊力の測定については、牛皮、猪皮、熊皮、厚さ1cmの板に、各時代の代表的な鏃を用いて、時速50km、100kmで矢を当て、そのときの様子を調べたが、時速50kmではどの鏃を用いても破壊力は小さく、時速100kmの場合は、鏃によって破壊力に差があることが分かった。

復元弓のモデルの有限要素解析を行い、弓が破壊する限界の荷重を求めたところ、復元弓1の引き幅の限界値は15.8cmとなった。

## 6 資料1 実験装置

実験装置全体の概要を図41に示す。

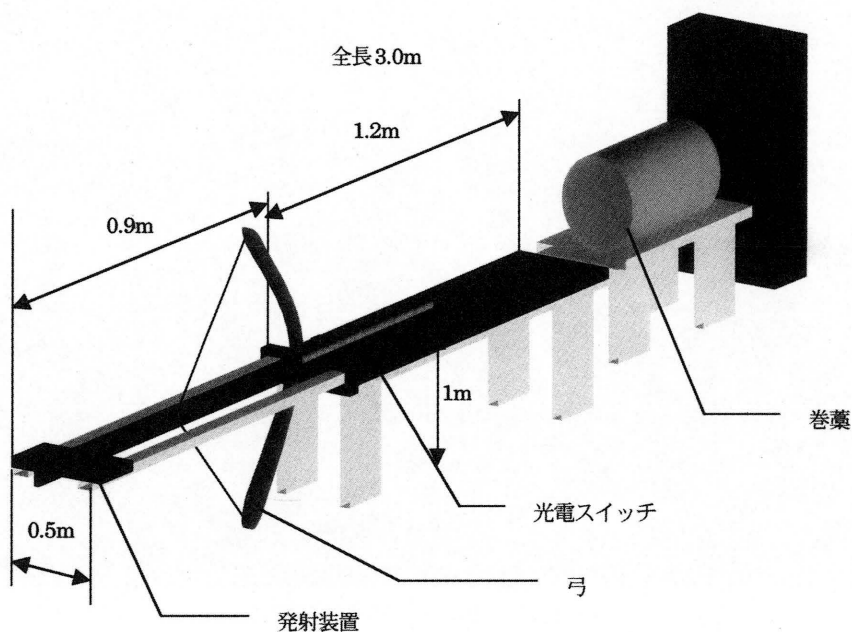


図41 実験装置の概観

### 速度の測定

矢の速度測定は、光電スイッチ（フォトトランジスタと赤色LED）を用いて行った。矢に10cm×8cmの紙を取りつけ、発射した際にその紙の部分だけが光電スイッチの間を通るようにすると、紙が光を遮る間に、センサが出力するので、この光を遮った時間をストレージ式のオシロスコープで読み取り、速度を求めることにした。



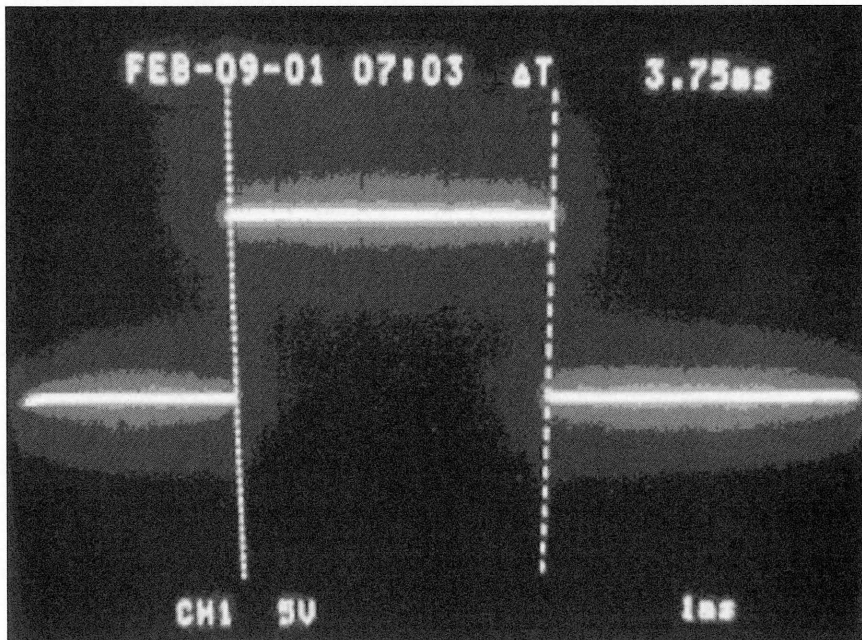


図42 速度の測定部

### 加速度の測定

弦が矢を押している間の加速度の推移を求める装置は、矢の先端に圧電式の加速度計を取り付けて、その出力をオシロスコープで観察することにした。使用したセンサは、(株)小野測器製「加速度ピックアップ NP-2110」および「振動計測チャージアンプ CH-1100」である。これらの仕様を表3および4に示す。

この際問題になったのが、的を何にするかであった。矢の先端に加速度ピックアップをつけているため、直接巻き藁にぶつけるわけにはいかず、また、加速時計から伸びているコードの部分が衝撃に弱いので、コードに負担がかからないように矢を減速させる必要があった。

そこで、浴槽用カーテンを天井から吊るし、そのカーテンに矢を当てて、減速させることにした。

表3 加速度計「加速度ピックアップ NP-2110」仕様

感 度	最 大 使 用 加 速 度	質 量
0.16C/ (m/s <sup>2</sup> )	10000m/s <sup>2</sup>	0.6g

表4 「振動計測チャージアンプ CH-1100」仕様

出力電圧	フィルタ	出力感度 (mV/EU)
± 5 V	LPF:Through,3Hz,5Hz	0.01, 0.0316, 0.10, 0.316, 1.00, 3.16, 10.0,
	LPF:Through,1kHz,10kHz	31.6, 100, 316, 1000

### 破壊力の測定

的として、牛皮、猪皮、熊皮、木の板(厚さ1cm)を用いた。まず、これらを固定する装置を、速度測定用装置の後方に作成した。板に関しては、ボルトとナットで直接固定した。

また、皮は、単体で張って使用すると、張ったときの張力が効いてきてしまうため、板に高衝撃吸収発泡樹脂マットを貼り付け、これに皮を貼り付けて用いた。

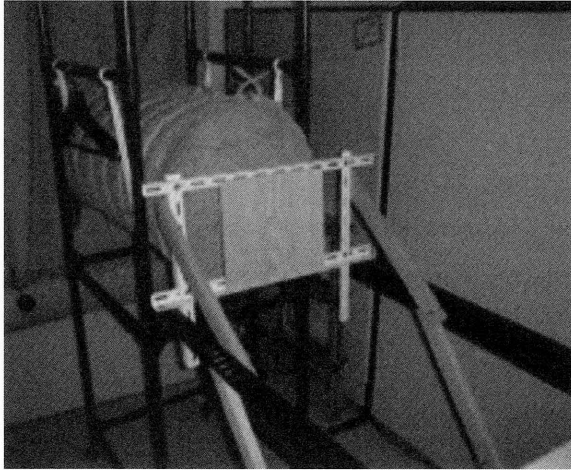


図43 破壊力の測定装置

## 7 資料2 破壊力の実験結果写真

### a) 時速50kmの場合

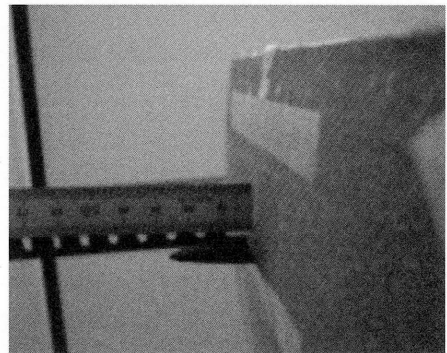
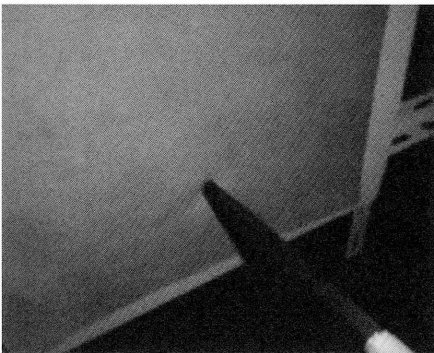


図44 磨製石鏃 (的：牛皮)

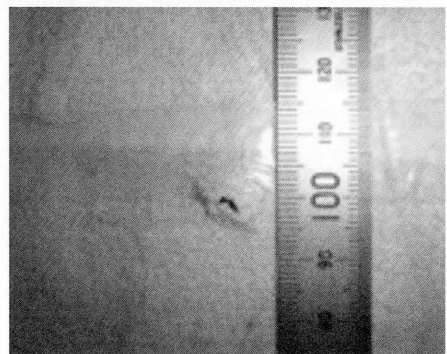


図45 磨製石鏃 (的：熊皮)

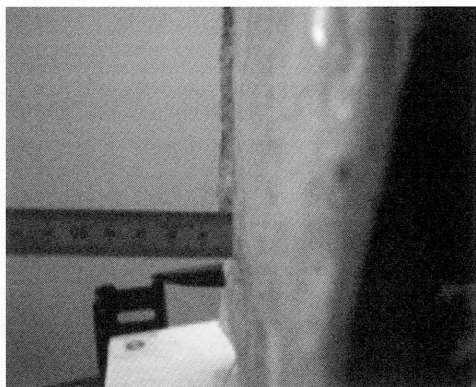


図46 磨製石鏝（的：猪皮）

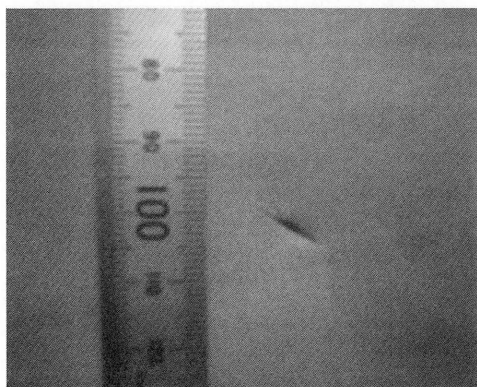


図47 弥生鉄鏝1番（的：牛皮）

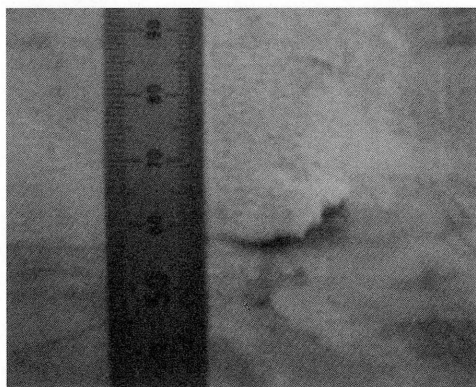
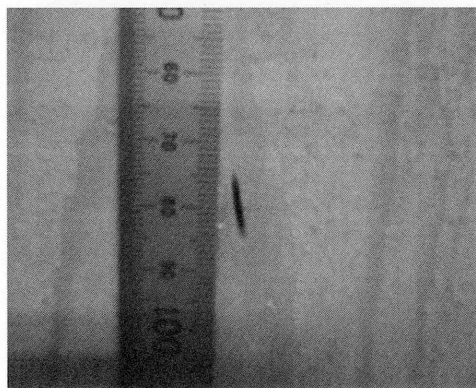


図48 弥生鉄鏝1番（的：熊皮）



図49 弥生鉄鏝1番（的：板）





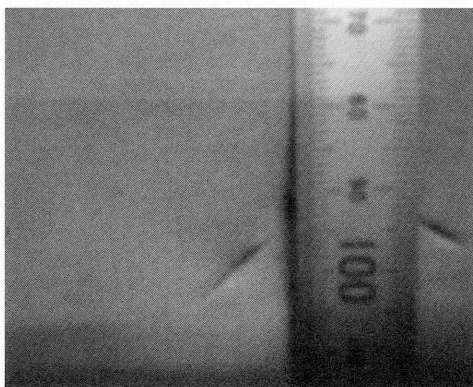


図50 弥生鉄鏃2番（的：牛皮）

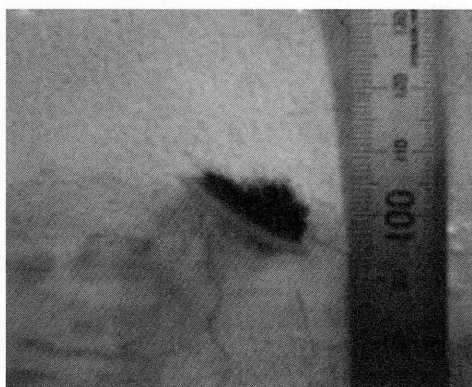
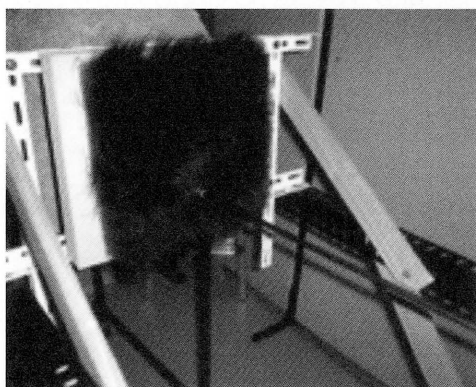


図51 弥生鉄鏃2番（的：熊皮）



図52 弥生鉄鏃2番（的：猪皮）

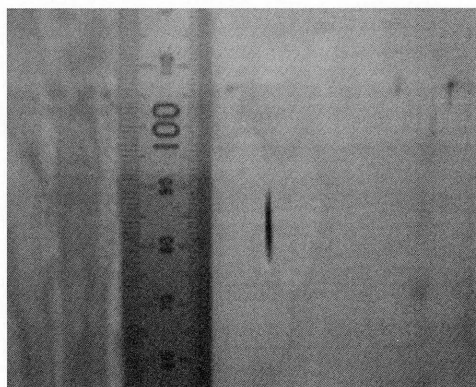


図53 弥生鉄鏝2番（の：板）



図54 弥生銅鏝（の：牛皮）

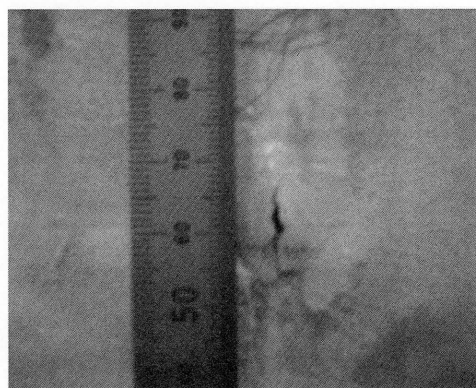
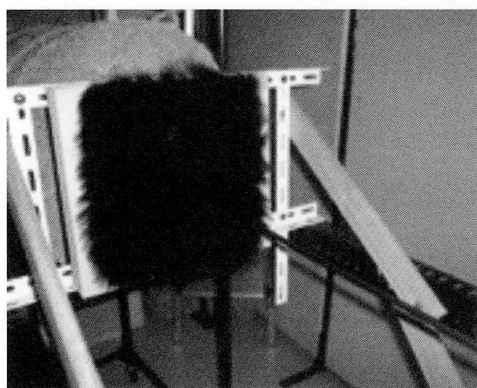


図55 弥生銅鏝（の：熊皮）

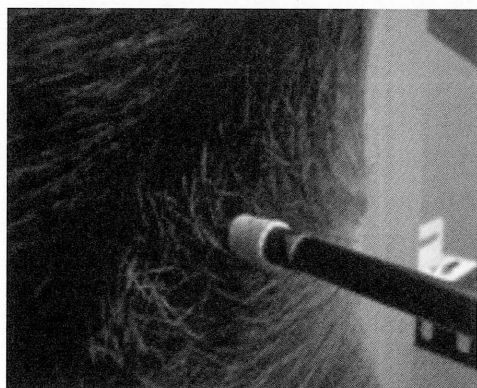


図56 弥生銅鏃（的：猪皮）

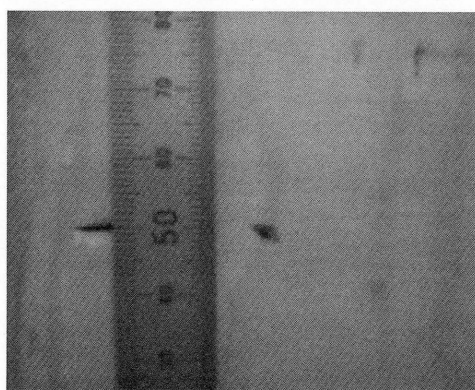


図57 弥生銅鏃（的：板）

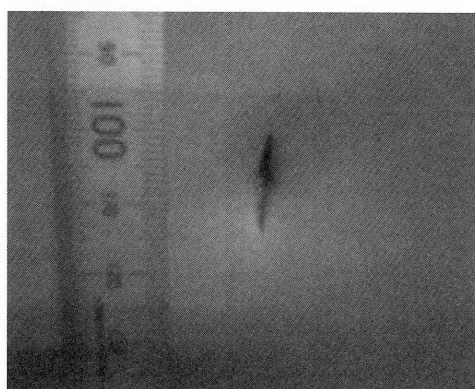
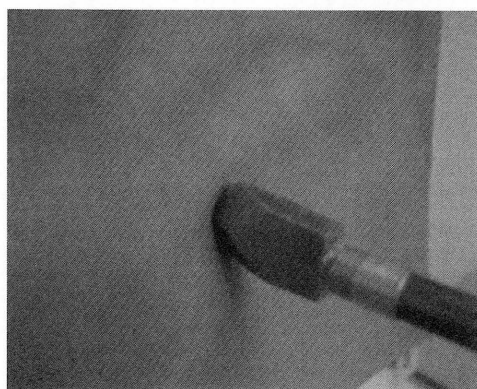


図58 古墳鉄鏃2番（的：牛皮）

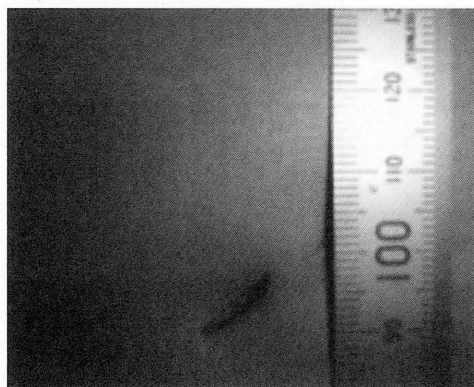


図59 古墳鉄鏃3番（的：牛皮）

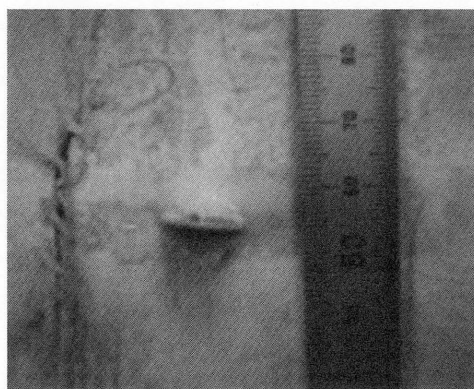


図60 古墳鉄鏃3番（的：熊皮）

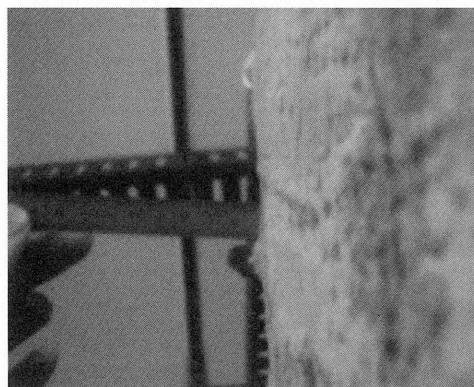
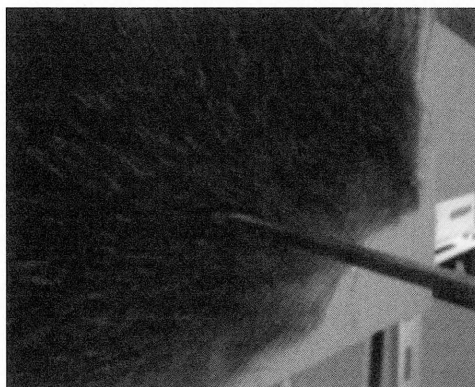


図61 古墳鉄鏃3番（的：猪皮）



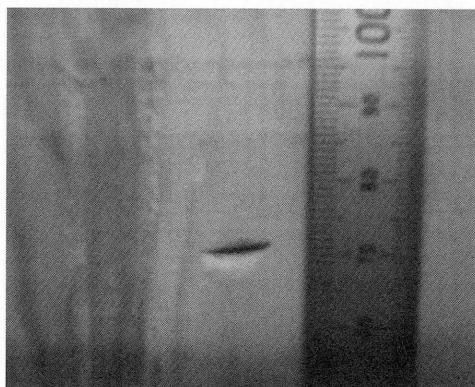


図62 古墳鉄鏃3番 (的：板)

b) 時速100kmの場合

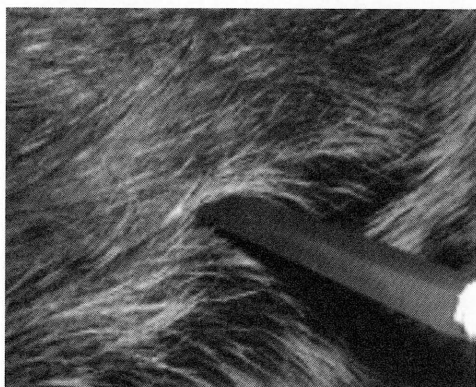


図63 磨製石鏃 (的：猪皮)

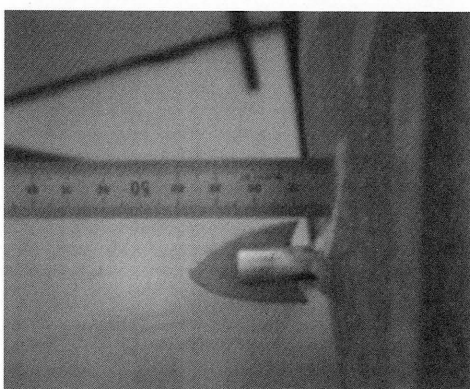


図64 弥生鉄鏃1号 (的：牛皮)

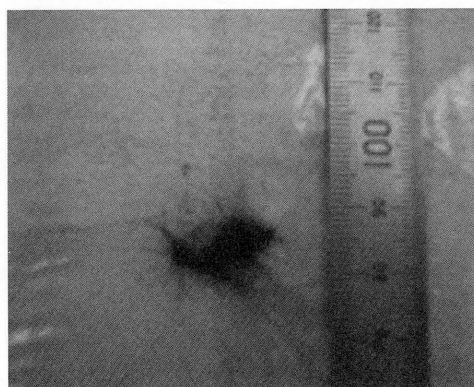


図65 弥生鉄鏃 1 番 (的：熊皮)

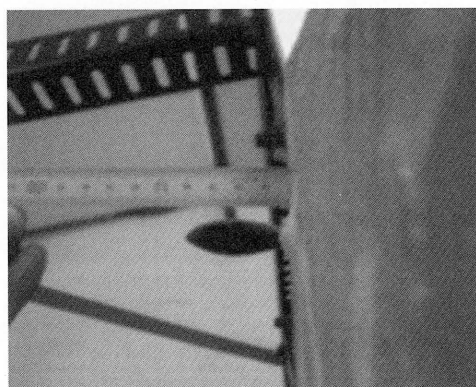
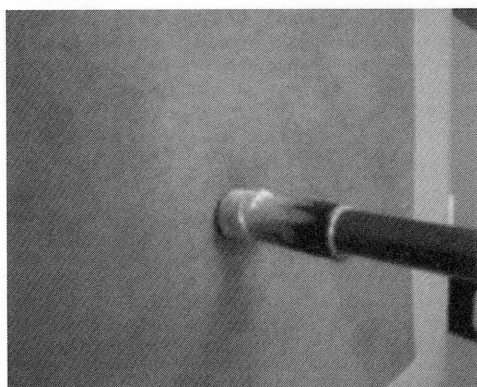


図66 弥生鉄鏃 2 番 (的：牛皮)

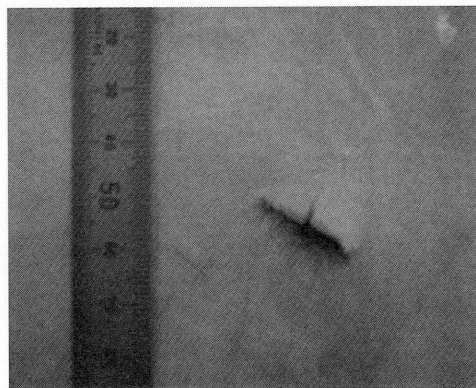


図67 弥生鉄鏃 2 番 (的：熊皮)



図68 弥生鉄鏝2番（的：猪皮）



図69 弥生鉄鏝2番（的：板）

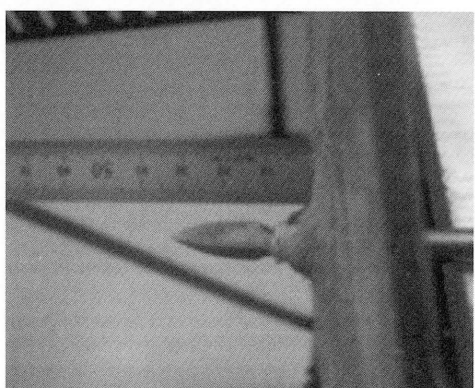
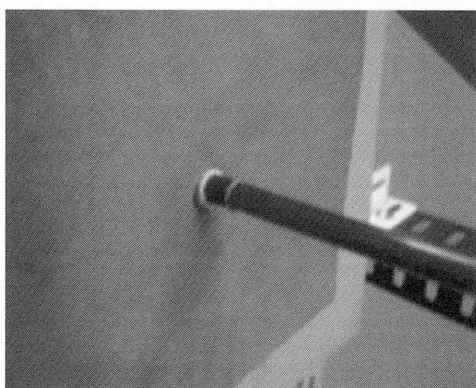


図70 弥生銅鏝（的：牛皮）

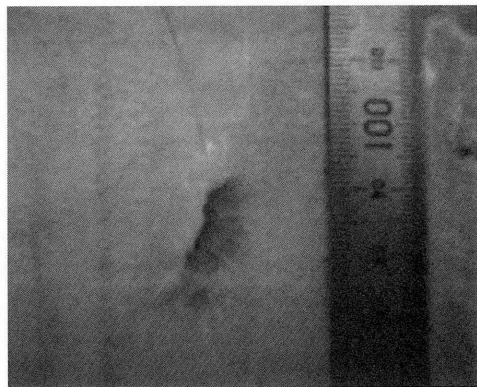
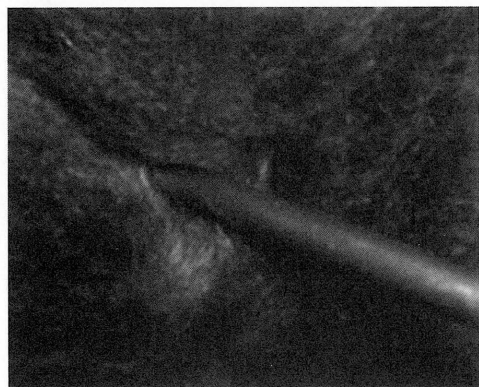


図71 弥生銅鏃（的：熊皮）



図72 弥生銅鏃（的：猪皮）

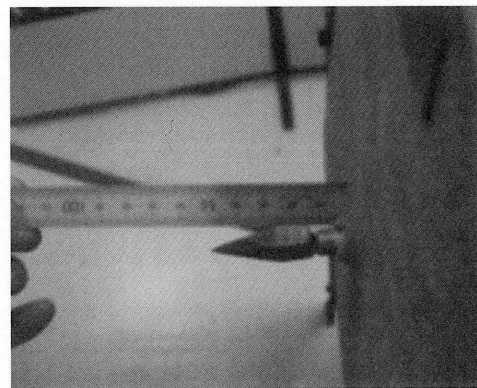
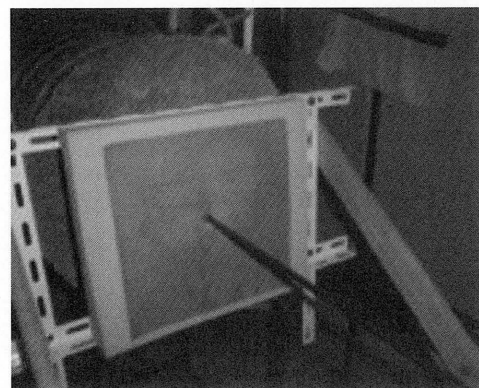


図73 古墳鉄鏃2番（的：牛皮）



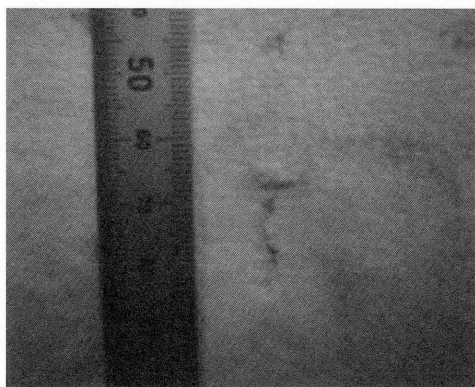


図74 古墳鉄鏃 2 番 (的：熊皮)

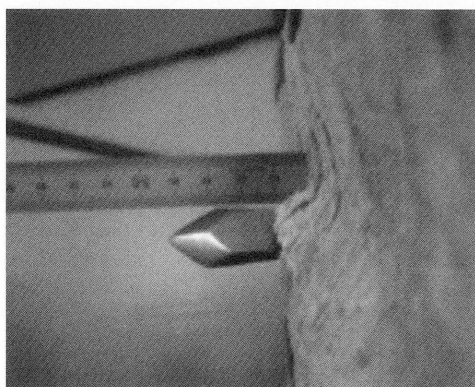
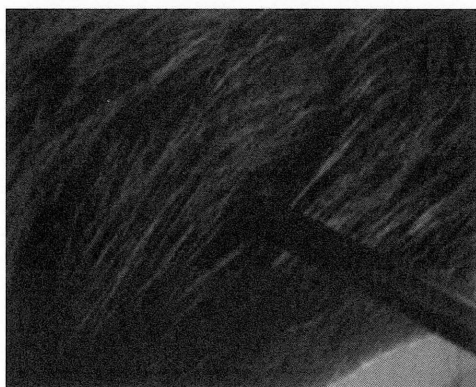


図75 古墳鉄鏃 2 番 (的：猪皮)

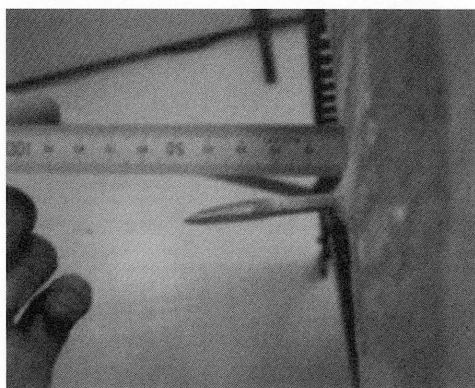
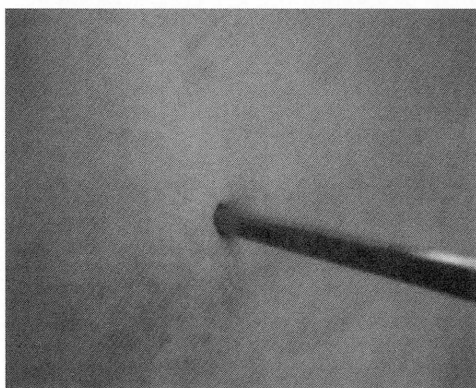


図76 古墳鉄鏃 3 番 (的：牛皮)

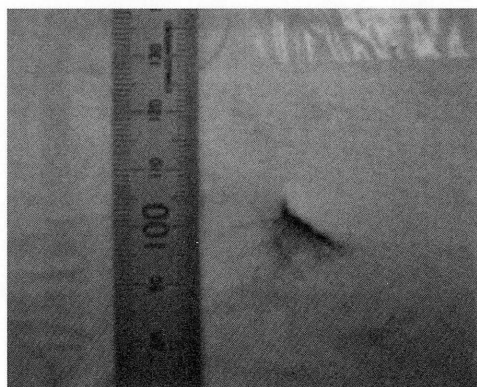


図77 古墳鉄鏃3番 (の：熊皮)

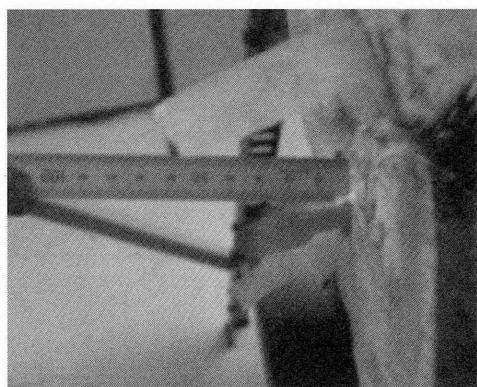
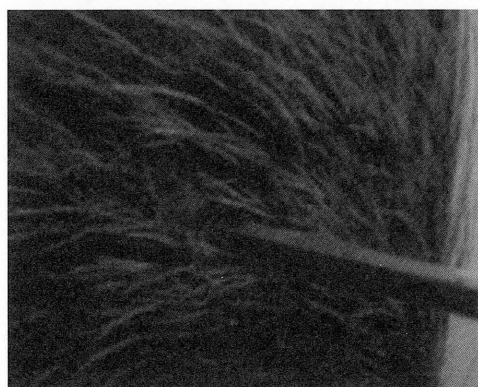


図78 古墳鉄鏃3番 (の：猪皮)



図79 古墳鉄鏃3番 (の：板)