弓と矢：アメリカにおけるアーチェリーの進化
A Chapter in the Evolution of Archery in America

1962 年スミソニアン協会レポートより、567-592 ページ

弓と矢：アメリカにおけるアーチェリーの進化に関する章
ポール・E・クロップステグ（ノースウェスタン大学名誉教授）
Paul E.Klopsteg

この記事は、最初に弓と矢を使ったスポーツやそれに類するスポーツについてのものである。驚くべきことかもしれないが、過去 30 年に渡ってアメリカにおける弓矢の使用は大きく増加した、この古来より伝わる道具に関する真剣な論理的かつ実験的な学説をいくつか提示する。二つ目に、これらの学説によってもたらされた近年の技術的な進歩をまとめる。技術の発達はそれ自体において興味深く、そしておそらくスポーツの歴史においても独特であるからだ。

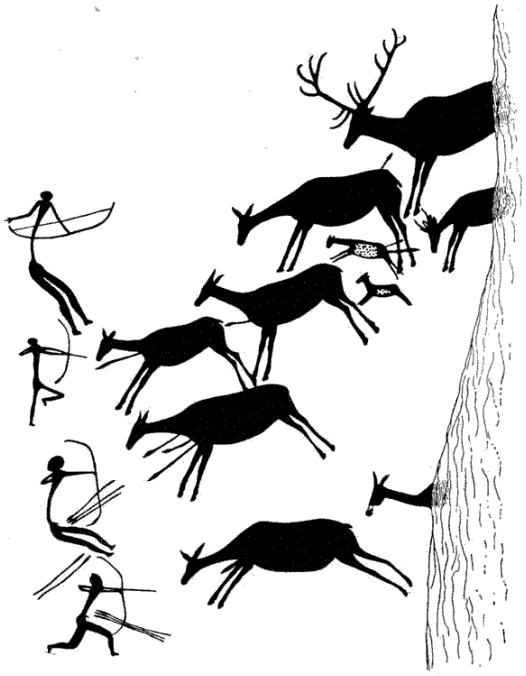
ここで言及されるスポーツは様々な弓の使い方からなっており、またそれぞれが熟練した扱いが必要である。このスポーツには古い書籍や印刷物の集積があり、それらは何世紀も以前のアーチェリーについての慣習だけでなく、当時の慣習そのものをも明らかにする。そしてさらに世界中から集められた弓や矢、その他の道具のコレクションも存在し、そして明らかにアーチェリーに関連している道具の数々も伝わっている。私と同様の興味を持っている人を、まるで何かの美味によって魅せられたように引き寄せる最も興味深いものは、矢の推進力の原理と、その飛行の特性を理解することを目的とした研究と進歩であろう。

ここでの主旨はアーチェリーの歴史について振り返ることではない。それはこの記事の扱う領域を遥かに超えてしまう。既に述べられた理由から、ここではアーチェリーの弓具のより技術的な側面が重点的に述べられる。それが私の最初の興味と注目の大半を占めている部分であり、また、そこがアメリカのアーチェリーの急速な進化の場所であるからだ。

私のアーチェリーに対する没頭は 1920 年代後半に始まった。それは飛行体に対する眠れる興味が、ある夏のターゲットに矢を飛ばすというアクティビティによって目覚めたからだ。第１次世界大戦の最中、私の研究は主に弾道についてのものだった。このことが矢の飛び方や弓のエネルギーの蓄え方、そしてその内蔵されたエネルギーがどのようにして矢に伝わるのかということを知りたい欲求につながる。弓と矢の物理法則に興味を持ったのだ。アーチェリーの最も魅力的なことの一つは、弓と矢のデザインや構造の中に科学やエンジニアリングの応用を見つけることができることだ。

その敬服すべき長い年月と伝統から、アーチェリーについて大量の文献が、特に英語で発表されている。英語圏の国々ではあまり知られていないが、アーチェリーに関する記述が豊富に残っているのはアラビア語、中国語、ペルシャ語、トルコ語、そしてその他のオリエンタルな言語のものが多い。その一方でドイツ語やフランス語の文献は非常に少ない。他のスポーツで古い書籍や印刷物、そして消耗品の道具のすべてが組み合わさって見つかる可能性は非常に低い。その古さ、各国の歴史における独特な役割、その科学と技術、そして職人の技術に対する魅力、これらすべてが組み合わさっているものをアーチェリー以外に見つけることも難しい。

信頼できる推計では、現在アメリカでは600万人以上の人がアーチェリーのいずれかの競技に対して真剣に取り組んでいると示している。何が原因でこれほどの人口が興味を持つのか推論すると、弓が人類によって初めて開発されたものを飛ばす道具だからだろう。先史時代において何が原因でそれが創造されたかははっきりとわからないが、何千年も前に獲物が弓によって狩られたことは、東スペインのクエバ・デ・ロス・カバジョス(the Cueva de los Caballos)の壁画によって証明されている。先史時代の民族にとって弓は家族を養う人、グループの守護者、あるいはその侵略者たちの忠実なパートナーであったに違いない。ただ疑いようもなく言えるのは、それが生存するための闘争に際して主だって使用された道具であるということだ。今日でもアフリカや南アメリカの先住民の間では不可欠な役割を果たしている。



したがって弓は本物のアンティークである。そして現代の弓の原理が太古から変化していない点は、特殊な道具を使ったスポーツの中でも、アーチェリーの際立った大きな魅力となっている。このこととその他の魅力的な原因について認識を持つと、その成長とその魅力についてもある程度説明がつくだろう。アーチェリーとは常に観客よりも参加するスポーツであり、それがその驚異的な成長をもたらしている。ただし、絶対数では常に野球やフットボールに熱狂的な観衆と比べたら絶対的に少ないのである。

「スポーツ界」のアーチェリーのランクがどれほど高まっているかは、道具の供給者からも知ることができる。例えば、アーチェリーのマーケットには近年、銃器や釣り具のメーカーも参入してきている。もう一つランクを決定する別の指標は、アーチェリーに特化した雑誌の急速な拡大、発行される書籍の数、そしてその分野の古書籍や他の刊行物の熱心な収集がある。

今日のアーチャーたちの数とわずか30年前のそれを比べると凄まじい変化になる。この5年の期間、1年毎に2倍ずつの数が増えていき、30年前と比べて60対1と言っても過言ではない。

1930 年以前、アメリカのアーチャーの数は統計で認識されるには少なすぎた。アウトドアスポーツに関する統計データでは、そのカテゴリーは「雑多なもの」や「その他」に分類されていた。新聞もアーチェリーをニュースとして取り上げることは皆無だった。

スポーツの人気が高まる原因の一つとして、道具の性能の向上がある。この変化は最近初めて見られた。それまでの間、弓矢の作り手たちは盲目にも、そして判断力もなく伝統を追い続けただけだった。

図 1.　1850 年代の弦を外したイングリッシュロングボウ。左の上リム、右の下リムの長さはそれぞれ 34 インチ。グリップのフィーリングをよくするために、コルクのパッドが弓のバック面に貼り付けられている。弓は 2 枚の木材を接着してできている。バック面はおそらくランスウッド、ベリー(Belly)は暗いハードウッドで判明はしていないが、おそらく濃い茶色に着色されたデガメ(レモンウッド)だろう。

原理は変わらずとも今日のアーチェリーの道具は細かい点においても、先史時代や前時代のプロトタイプと比べても大きく変化している。その変化は、現在使われているものと今世紀に入ってから数十年前の間は使われていたものと比べても驚異的と言えるほどの変化である。デザイン、素材、そして構造の変化が、パフォーマンスの精度に対して類いまれなる貢献をしたおかげで、熟練したユーザーの手にさらに精度を与えることができるようになった。かつて素晴らしいスキルを手にしていたロビンフッドやシャーウッドの森の彼の悪友たちですら、今日のアーチャーを超えることは難しいだろう。新たなデザインは、潜在的なアーチャーたちの隠れた興味を引き起こし、かつてとは異なる、大量生産方式による新たな弓の製造を促した。

矢を標準的なターゲットのブルズアイや「ゴールド」に当てることは肉体的な一定性と、可能な限り得られる精度を求めることで得られる。精度を上げるために、最初に求められる必要条件はより洗練された道具の使用による精度の向上である。シューティングに精度が求められる道具は弓と矢であり、それらの現行のデザインや構造は実に洗練されて来ている。道具から精度を最大限に引き出すために求められる項目は；

1. 成功したショットでは、均等な長さで引かれた弓に均等に蓄えられたエネルギーの差が最小になること。

2. 弓と矢を構成している素材に対する熱や湿度の影響が最小になること。

3. 矢のセットがそれぞれの寸法、素材、そして形状における差が最小になること。

4.弓対して適切なスパインの矢を使っていること。（スパインとは硬さや弾力性、重さやシャフト全体を通しての重さといった要因に関する矢の特性のこと）

5.アーチャーによってシューティングプロセスにおけるシーケンスのアクションが毎回完璧に再現されること。例えば弓のドローイングや矢の「離れ(loosing)」など。

アーチャーの身体の完全性と、矢を射つための難しいステップの実行を求めている項目 5 は、その他のすべての項目に依存している。必要なアクションを実行することができる自信は、これらの項目が正しく組み合わされていることを認識することによって、より大きくすることができる。

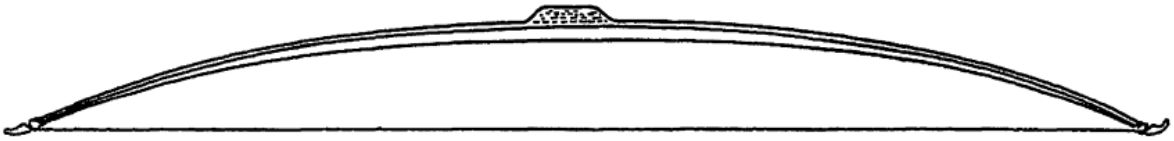


図 2.　図 1 の弓を、シューティングのためにストリングを張った（ブレースした:Braced）状態。

アメリカでは弓矢のスポーツ全体は 5 つのカテゴリーに分類される。最も古い形で、幅広く実行されているものは、かつてイギリスで長期間にわたって実践されてきたターゲットシューティングの一種である。試合形式でおこなわれ、それぞれヨークやアメリカン、ナショナルなどの名前がつけられた。各ラウンドは「エンド」と呼ばれる 6 本 1 セットの矢を複数回、特定の距離で射つことで構成される。例えば、ヨークラウンドは 100 ヤード(91m)で 12 エンド、80 ヤード(73m)で 8 エンド、そして 60 ヤード(54m)で 4 エンドとなり、合計 144 射で競技される。分厚い稾畳に貼られる標準的なターゲットは直径 4 フィート(122cm)である。金のブルズアイは直径 0.8 フィート(24cm)、その周囲には同心の 4 種類のリングが 0.4 フィート(12cm)間隔で描かれ、それぞれ金から順番に赤、青、黒、白と色付けされている。金に当たれば 9 点、そこから外の輪になるに連れて 7 点、5 点、3 点、1 点となっていく。

クラウト(Clout)とワンド(Wand)シューティングは習慣的な競技の一種である。前者のクラウトは標準的なターゲットの 12 倍の大きさ、つまり 48 フィート(1463cm)のターゲットを、シューティングラインから 180 ヤード(164m)先の地面に平たく置いて狙うものだった。矢は急な角度で放たれ、そしてターゲットに向かって急降下し、地面に突き刺さる。一方ワンドシューティングでは幅 2 インチ(5cm)の垂直なラス（木の板）が 100 ヤード先に設置され、それに当たった回数がカウントされた。

次のカテゴリーはフライトシューティングと呼ばれ、最長飛行距離を競う競技だ。弓と矢はこの競技に特化した形に作られている。またフィールドアーチェリーは、アップヒル、ダウンヒルなど様々な位置に設置された 14 つのターゲットのあるコースを巡り、距離をあらかじめ知

らされずに、シューティングスタンドまでの距離とターゲットの直径との比例で距離を推測して射つ。自然の障害物、あるいは人工物が設置された勾配のある地形の林が競技場所として望ましい。

もう一つの弓矢のスポーツは、ゴルフのコースでおこなわれるアーチェリーゴルフだ。弓矢がクラブとボールの代わりとなり、カップは直径の同じ円形のディスクを垂直に立てたものになる。スポーツの歴史家の推測によると、「古代の由緒正しいゲーム」であるゴルフは、一説によると古いアーチェリーのゲームであるローバー（遠的）から来ているという。この形式の試合では、参加者は田舎をゆっくりと歩き回り、その中でいくつかのマークを選択し、そしてそれに当たるまで射った矢の本数を数え、それが低い者が勝利するというシステムだった。アーチェリーゴルフとは実際は「復刻版ローバー」として現代風にアレンジされたものなのかもしれない。

最後のメジャーなカテゴリーであり、いま最も急速に成長しているのは弓矢で野生の動物を狩るゲームである。多くの州では、ライフルによるシカのハンティングシーズンに先立って、ボウハンティングに限った長いオープンシーズンがある。シカのハンティングは最も人気のある形式である。毎年何百というシカが弓矢の前に倒れるが、それはライフルによって狩られるものと比べたら、未だに小さな数にすぎない。ここで使われている「未だに」というのは、今日のアーチャーは明日のライフルマンになっているかもしれないからだ。弓によって狩られる他の大きな獲物はボブキャット、クーガー、ジャベリナ、エルクやムースなどが多く、他にもブラックベアーやブラウンベアーなどもある。小さい獲物の代表としてはウサギやリス、高地に生息する鳥などが挙げられる。また最近では弓と特殊な矢を使ったコイやガーのフィッシングが人気を集めている。

マークされた場所に物体を当てる精確なシューティングに求められる要求はすでにいくつも挙げられた。これらすべての弓矢に言えることである。したがって 6 本の矢のターゲット上におけるバラつきとは、各々のショットにおいてパフォーマンスに差異があるというアーチャーの技術的問題が原因なのである。変化しやすい突風などもバラつきに影響するが、一定した風であれば、矢をその流れに乗せることができれば影響は最小限に抑えられる。これらの要因すべてを考慮に入れても、今日のトップアーチャーたちのスコアを 35 年前のスコアと比較することによって、その間に起こった道具の進歩の度合いを測ることは適切であると言える。進化した弓矢が手に入る以前は、より高い点数を追い求めていたアーチャーにとって、持っている弓で矢を繰り返し射つことやバラつきのパターンを読むこと、そしてそれぞれ数字が振られている矢のそれぞれの距離のターゲットに対する的中の偏差を頭に入れておくことは標準的なプロセスであった。また温度と湿度が道具のパフォーマンスにどのように影響するかも考え、その変化も考える必要性があった。これらの戦略を取り入れることによって、エキスパートたちは、初めて高いスコアを得ることができたのだ。

弓矢がどのようにして科学者やエンジニアたちの研究の対象になったか、そして新しいデザインへの進化は1920年代に始まる。技術の向上を目指し、研究のパイオニアとなった人々のリーダーの一人として、C.N.ヒックマン(Hickman *1)がいる。彼が物理学の博士号を取得しようとしたクラーク大学で、彼は現代ロケット科学の父と呼ばれたロバート・H.ゴダードとともに研究をした。最初の世界大戦が勃発した直後、ヒックマンは米国標準局で雇用され、そのあとはワシントンネイビーヤードにリサーチエンジニアとして派遣された。彼はアーチェリーへの興味を遺伝的に持っていたようである。彼の祖父がインディアンからそれを学び、父は19世紀末期と20世紀初頭の数十年においては珍しいアメリカンアーチャーの一人だった。キャリアを通して、ヒックマンは機械に関して具体的かつ実用的な視野を持った経験主義者であり、そして特殊メカニカルなパフォーマンス測定のための機械やシステムの発明や構築に関して類いまれなる才能を発揮した人物だった。

彼の弓の機械学に関する探検は、手の動き(リリース)をより精確にシミュレートできるシューティングマシンのデザインや構築にも及んだ。彼はそこに空気圧で作動するリリーサーを装備させたが、それはピアノオルガンにも使われている送風器を改造したものであった。このデバイスは手でおこなうリリースを、差異を最小限に抑えた状態で再現することができる。このマシンと、私が第1次世界大戦中にフィラデルフィアのアバディーンプルービンググラウンドで開発に携わり、彼の修正したアバディーンクロノグラフ(矢速計)が弓から放たれる矢の加速度と矢速を正確に計測した。データは弓と矢のコンビネーションの「砲外弾道学(ノックが弦から離れるまでの状態)」について、そしてミサイルの「砲内弾道学(矢が飛んでいる間の状態)」に含まれる速度と遅延についての理解があるとより分かりやすい。

これらに対する私の興味は1929年の夏に始まった。その原因は、家族旅行における娯楽が初心者用のアーチェリーセットと手作りのターゲットであったからだ。最初の努力はスキルと点数の向上を目指したものだった。実践方法はセットに付属していた解説書を参考した。私たちはテクニックについて全く理解がなかったので、まさにゼロレベルから上達を始めた。「弓を射つ」という技巧ついて独学で学ぶ際、物理に親しかったことが、弓を使って矢を推進させることの機械的な原理や問題について理解する手助けになった。

努力を実らせるために、私は調達可能なアーチェリーについての最新の本をいくつか買って読み、当時唯一発行されていたアーチェリーマガジン「イー・シルバン・アーチャー」と呼ばれる雑誌も購読していた。このタイトルはアマチュアによるアマチュアのために奮闘していたジャーナルで、ロマンあふれ、古くからの伝統を味わわせてくれた。

この雑誌に登場するヒックマンによるいくつかの記事が私たちの認識を改めることにつながった。そこではアーチェリーの物理やエンジニアリングの側面についての生き生きと意見の交わし合いが繰り広げられていた。私のアバディーンクロノグラフとプロショップの道具が、シューティングマシンやその他の特殊な器具を作り上げるための屋根裏のラボのコアとなった。後者はハイスピードのフラッシュ器具を備え、弓によって矢が加速される時の瞬間的な写真を

捉えるためや、写真によって弓のフォースドロー特性を計測するために利用された。こうしてかくして私は、実験の世界に進んだ。1929 年の大恐慌は深刻な問題を多く引き起こしたが、私にとっては逆に実験の世界に集中できる環境が整備された。多くの側面において、私の道具はヒックマンのそれと近く、それによってお互いに測定値を比較し確認することが容易にでき、協力的かつ相補的に努力することができたのだろう。

これらの実験を報告する出版物は 1931 年に始まり、最初は「イー・シルバン・アーチャー」に、後に新たに創設された小さな報道紙である「アーチェリー・レビュー」に掲載された。参考文献一覧を見れば分かるが、ヒックマンと私を除く何人かの工学者たちもいくつか論文を発行し、その内のいくつかはフランクリン学会のジャーナルにも登場していた。それらの著者はイングリッシュ(English)、ヒギンス(Higgins)、ネグラー(Nagler)、そしてレインガンズ(Rheingans)だ。

下記に並べられたリストは研究や発達の努力の際に直面した興味深い問題を思い起こすだろう。しかし、多くの疑問は部分的にしか解明できなかった。しかし、自分のスキルを問題の解決に役立てたいという人には、未だに十分すぎるほどのお楽しみの時間が残されている。

1. 弓が引かれることによって発生する静的なフォースドロー関係と、矢が加速する時に発生する動的なフォースディスプレースメントの関係に対するリムの形状や寸法、相対的なセッティングや角度による影響

2. 弓が引かれるときに発生する静的なエネルギードローの関係性

3. 発射される矢の速度と、引かれた弓のエネルギーから発生する動的エネルギー

4. 同じ弓から射たれるそれぞれ重さの違う矢の、各々の重さー速度の関係性とそれに対応する重さーエネルギーの関係性

5. 矢のエネルギーと初速に対するストリングの重さの影響

6. 弓と矢のコンビネーションの効率性。e.g.弓の内蔵エネルギーの一部分が矢の動的エネルギーとして表れる。

7. 弓の「実質的な重さ」

8. 矢のパフォーマンスに直接影響する要因；それらの精度や一定性、飛行距離に対する影響

9. エイミングの形状と方法

10. シューティングにおける心理的要素

上記のリストは答えを見つけることに対して真剣で目ざとく、分析力のあるアーチャーの代表的な疑問である。もし同じ問題意識を持っているならそうであれば、彼はアーチャー自身と道具の上達の両方のパフォーマンスを向上させるための潜在的な能力を持ち合わせ、こういった疑問の答えを探すことは、探究することに楽しみを見出す人にとって心地よい時間となるだろう。そして、私たちのこれらの問題に対する議論は、その解答であるよりもむしろ説明として役立つだろう。

現在では数多くの弓の種類が知られている。長いリム、短いリム、均等なリム、不均一なリム。そしてリムの断面の形状も様々である。素材は自作の弓であればある 1 種の木、あるいは複数の異なる種類が接着剤でくっつけられているかもしれない。また複数の有機体の素材の層や、最近では木のラミネーションと合成プラスチックに補強のためのファイバーグラスを重ねて作るコンポジットボウもある。

現在一般的に使われている弓の原形となった 2 つの代表的な弓の種類は、何世紀もの歴史と伝統を持つロングボウと、オリエンタルな、主にトルコのコンポジットボウである。後者の前身(プロトタイプ)はサラセン人や侵略の大群を率いたチンギス・ハンによって使われていた弓である。トルコ弓については 15 世紀まで遡った確かな情報が残されている。その後に続く何世紀もの間、基本的に形が変わることはなかった。しかし、19 世紀半ば、スルタン・モハメッド 2 世による統治が終わると同時にアーチェリーに対する興味は失われ、以降トルコでは弓が作られることはめっきり減ってしまった。

図 3.　トラディショナル(イングリッシュ)ロングボウのリムの典型的なリムの断面図。

イギリスのロングボウはリラックスさせた状態、すなわちストリングを外すとまっすぐなリムとなるが、繰り返し引かれることによって形状が変化してしまうことがある。リムは溝（グルーブ）のある角のリムチップを先端に持ち、そこにストリングのループを取りかけた。またグリップからチップにかけてリムはテーパー状に加工された。あらゆる断面においてリムはベリー面がストリングに近づくに連れて丸くなり、その反対のバック面では平たくなっている。引かれた弓ではベリーが圧迫され、バックにはテンションがかけられる。図 3 でいくつか断面の図が示されている。このようなリムは肉付きが良いと形容される。

グリップはテーパリングされたリムが合わさり、弓の全体で曲がりが起きるポイントを決める。このためか、あるいは他の理由で、矢をリリースしたときに不快な反動が弓の押し手に感じられる。ロングボウの特徴である肉付きの良いリムは正しい力学的原理に反し、リムに使われている木材の可能性を正しく利用できていなかった。その一方で、その問題は木材に全く必要ないほどの負荷をかけることにつながっていた。実にそういった弓たちはストレスを最小限に抑え、破損を防ぐために長くしなければならず、それが由来でロングボウと呼ばれたのだ。ロングボウにあるその安全(破損を防ぐため)のマージンは、弓の不安定さを物語っており、弓をフルドローすると実に 10 分の 9 の確率で破損してしまっていた。ただし、現代のロングボウにおいてはこれほどひどくない。ロングボウのもう一つの特徴は上リムと比較して下リムの方が 2 インチほど短く、堅いことである。これは弓職人たちの弓全体の長さを耐久可能な限界の長さに保ちながらも、矢をストリングの中心に保ちたいという欲求による工夫であったようだ。その両方の条件は、グリップを下リムの方へ数インチずらすことで満たされた。

1930 年代までのロングボウの歴史を振り返ると、デザインで唯一変更があったのは前述の押し手に対する反動を軽減するためのものだろう。その変化は、ハンドルにより多くの木材を使い、グリップ部分をより堅く、曲がりにくくすることであった。一方リムは緩やかにグリップに接するデザインから、急なカーブで重く厚みのあるハンドルに接合するデザインとなり、ハンドルとリム別々に作られ、最後で接着された。こうしてリムはその長さを明確に定義することができるようになった。他の箇所についてのデザインはそのまま凍結されていた。

私とヒックマンの研究に対するもともとの動機は、ロングボウに関する理論的欠点の認識と、そのパフォーマンスを向上させたい、もっと良い弓が作れるはずだという欲求と信念に基づくものだ。これらの研究によって得られた進歩は、伝統に執着してしまうことによる停滞と対比することで、科学や工学の有用性を実証することになった。ここ数年に起きた進歩とは対照的なのが、イギリスやアメリカの弓職人の何世紀も固着してきたデザインへの執着である。というのも、なぜか彼らはこれを改善することはできないと「知っていた」からだ。彼らはなせか商品の改善が失敗へと運命づけられていると確信していた。1930 年代以前の弓職人たちは、誇張し過ぎかもしれないが、完璧な弓を作るためのイチイを選ぶ目を持っていたことを誇り高く語っていた思い出がある。しかし、彼らがどれだけ高品質の木材を選ぶことに長けていようと、どれだけうまく乾燥できていようと、100 ヤード先のターゲットに矢を当てるには、例え最高の木でできた弓でも高い弾道を描かなければならなかった。そして、高い矢速とより平たい弾道を得たとしても、高得点には貢献しなかった。

どのようにアーチェリーは進歩と改善がおこなわれたのか、主要なステップを追うことは読者にとって興味深いかもしれない。私たちの出発点は、ロングボウが 1930 年代初期以前にこの国で使われていた、堅いグリップを使ったイングリッシュパターンのモデルに端を発する。

静的、動的な力を扱う物理学の一部分である工学やそれに付随する運動力学、そして負荷がかけられる素材の特性によって、弾性のある梁が曲げられたとき、凸面が伸びる引張(テンション)がかかり、凹面には縮む圧(コンプレッション)がかかる。その間のどこかに厚さがゼロの幾何学的な「層」があり、梁が曲がった状態でも伸び縮みしない部分がある。このニュートラル・レイヤー(中立軸)では伸びている断面と圧縮されている断面のずれこむ力は最大になり、これによって梁の表面に向かって直角に外側に移動することでゼロになる。

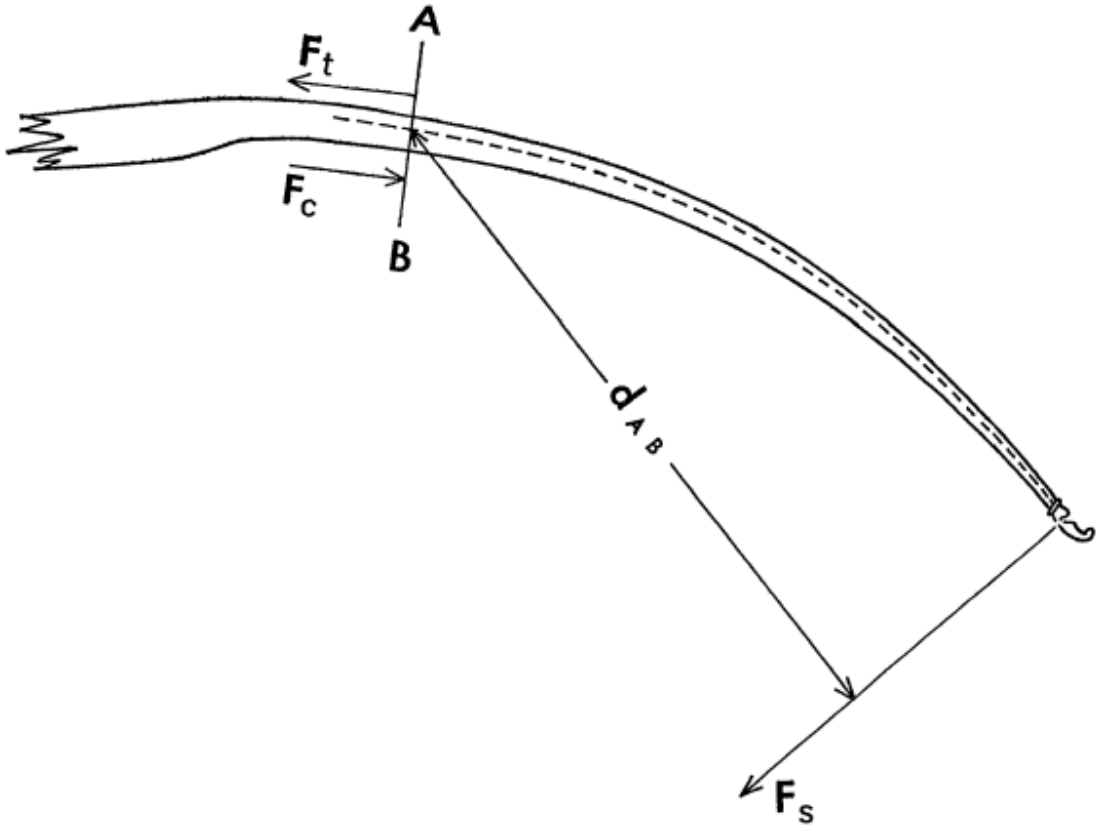


図 4.　曲がったリムの側面の図式。点線がニュートラルレイヤーの位置を示す。

これを説明するには、ロングボウのリムを考えると良い（図 4)。力 Fs がストリングを通してチップにかかり、その力の量やリムの形状、寸法、含まれる弾力材によってリムを曲げる。AB の曲面の範囲のどの切断面においても、引張力は Ft であり、圧縮力は Fc である。これらの力はニュートラルレイヤーから外側へ進むに連れてゼロから最大へと増加していく。この断面における曲げモーメントは、ニュートラルレイヤーのそれぞれの領域における張力と圧力の合計であり、その結果としてめいめいの合成的な張力と圧力を発生させる。これら二つの力のそれぞれの合計に、力点から中立軸までの距離をかけると、この切断面における曲げモーメントとなる。このモーメントはストリングにかかる力に対して、AB からストリングまでの直角な距離をかけたものと同等である：すなわち Fs x dAB。

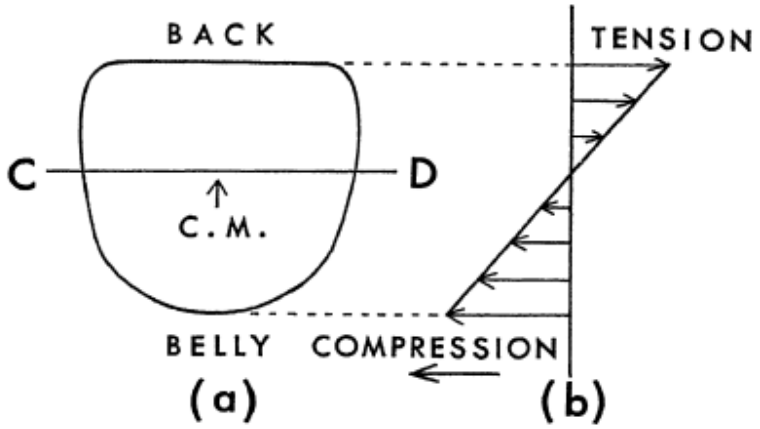


図 5.　(a) 積み重ねられたリムの部位。CD はニュートラル・レイヤー(中心軸)であり、その部分の質量の中心である CM を含む。(b) 負荷がかけられた状態のリムのこの部分でのフォーズダイアグラム。ファイバーにかかる負荷と中心軸からの距離を比例させたもの。

図 5 は、典型的なロングボウの図 4 のリムの AB に当たる部を示している。質量の中心を通る辺 CD が中心軸を示している。すべての断面の中心軸がニュートラルレイヤーを指す；言い換えればニュートラルレイヤーはすべての中心軸の集合体なのである。図解されている切断面では、中心軸からリムのバック面の外表面への距離が、対応するベリー(フェイス)面への距離よりも短いことが分かる。最大の引張力(Tension)と圧縮力(Compression)は外表面で発生するので、バックにおけるテンションはベリーのコンプレッションと比べて最大値が小さくなるのだ。本質的な強度と欠損点の両方において木の基本的な特性であるのが、圧力よりもより大きい張力には耐えられるということだ。したがって、積み重ねられたリムは、木材にかかる負荷と、木材の強度の特性は合致しないのである。このことからロングボウは原材料の木の特質を正しく利用していないことが証明される。工学的な側面から考察すると、バック面を凸面に、ベリー面を平たくしてリムの形状を反転させた方が効果的だと考えられる。これでロングボウが使用の際の負荷に耐えうるよう耐久性を上げるために長くなければならないことの理由が解明された。

適切な弾力材を含んだ木材でできた実用的な弓において、曲げられたリムの内部のエネルギーは、弓が引かれることによって発生する負荷によって蓄積されていく。矢が放たれると同時に、ウッドは負荷がかかっていない状態へと一気に跳ね戻ろうとする。ウッドや弾力性のある素材の力を最大限に発揮させるためには、リム全体を通して均等に最大張力と最大圧力がかかり、かつあらゆる部位の各切断面において一定の曲げモーメントが与えられていることが重要だ。条件はリムの一定した厚さ、断面の直角性、そして円弧状に曲がることなどの条件で推測できる。工学のハンドブックでは、一端が固定されている厚みが一定の梁で、(有限な)幅を持つ固定端から、自由端に向かって幅がゼロに収縮していくとき、自由端に軽い負荷(軽く引く)をかけると梁はきれいな円弧状に曲がる。ヒックマンはこの単純な事実を指摘し、切断面が直角、かつ厚さが一定しテーパー状になっているリムの方が効果的に、ロングボウよりもウッドの弾力性を利用することができるのだ。30 年ほど前にヒックマンと私によっておこなわれた実

験は見事にそのポイントを実証した。しかし、弓をフルドローまで引いてきた場合、各エリアの曲げモーメントはリム全体を通して均一ではなくなっていく。曲げモーメントの均一性を取り戻すためには、各ポイントでの梁の幅を微妙に調整する必要がある。

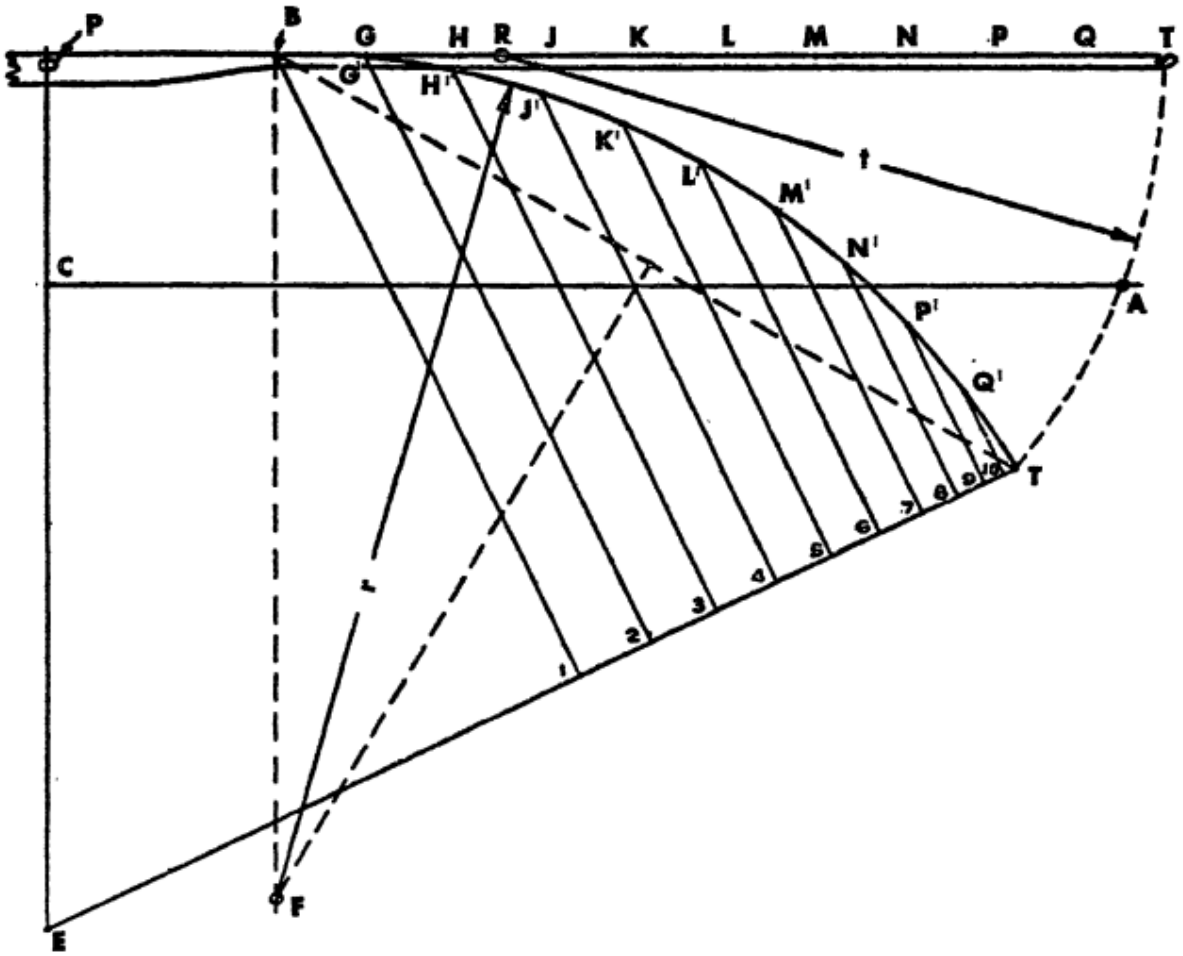


図 6.　弓をデザインするための図解方法。リムを指す BT は 10 個の均等な部位に分けられる。曲がっているチップは R を中心とした、長さが BT の 3/4 の半径 t とした軌跡 TT'をなぞる。矢の長さは EP である。CA は張られた弓のストリングの長さを、そして CP は「ブレースハイト」を指す。ET'はフルドローのときのストリングを表す。弧 BT'は半径 r で屈折するリムを表し、BF と BT の直交点、そして BT' の二等分点を中心とする。ET'に対して直角に、屈折したリム上に落とされていく 10 等分の点をそれぞれ B'、G'、H'...Q'とする。垂直線の長さは 10 個それぞれの点からリムの幅に比例する。

図 6 は均一な厚さのリムの、曲げモーメントを一定にするための正しい幅とそれに対応する長さを決定するための図式を描写している。リムの断面が直角で均一に負荷をかけられているリムを作るためのデザインの基盤である。

ヒックマンはリムが円弧状に曲げられていく際、そのチップの軌跡はリムいずれかの点を中心とした、その長さの 3/4 の半径の円をなぞるようになる。このシンプルな構造があらゆる長さのリムを表象する円弧状に引くことを可能とする。リムの根元の最大幅に対する相対的な幅を決定する作業は図 6 に描写されている。

もちろん、リムの幅をチップ部分でゼロにすることは現実には不可能である。こうしてしまうとストリングをとりかける部分がなくなってしまい、さらにその幅の狭さ故リムの最後の数インチが不安定になり、捩じれに耐えられなくなってしまう。それゆえ、リムを構築する際は適切な弦の取り付けと安定性を確保するために、最後の 3～4 インチにはある程度幅に余裕を持たせることが必要である。理想よりも広くなった幅によって発生する余分な堅さに対応するためには、リムの先端の厚さを薄くし、この部分の曲がりが他のリムの部分と同じ弧を描くように調節する。またチップ付近の曲げモーメントは非常に小さいので、薄くしても理想値に近づけることはできない。またリムの長方形の断面は負荷の集中を軽減するために、角を面取りする必要がある。

写真 3 にある、リムに均一に負荷をかけ、それによって弾力材の性能を最大限に発揮させる新たなデザインが、その長さを 10～15%短縮することと、それに合わせて破損の軽減にも成功した。これによって得られたメリットは、ロングボウのように下リムが 2 インチ短いリムではなく、均等な長さのリムを作れるかもしれないという可能性である。これは堅い中心部（ハンドル）を十分に長くすることによって、矢の下のハンドル部分だけでなく、矢の上の部分にも堅い断面を残すことで、矢をストリングの丁度真ん中にノッキングした状態で、矢の軸に対して弓を上下対称に保つことができたからである。これでリムは上下で硬さも寸法も同じである。そういったリムは、二つの弓に同じフルドローの静的エネルギーをかけたとき、性能の同じロングボウのリムと比べて振動の持続時間がかなり短くなる。したがって新しいリムはより速く跳ね戻り、矢によりスピードを与えるので、エネルギーをより効率的に矢に伝達することができる。

こうして試作した弓による実験は、ロングボウよりも効率性において遥かに優れていることを証明した。後者が内蔵エネルギーの 40%しか矢に伝達することができないのに対して、新しい弓は、私のヒックマンの計測に基づくと、75%も伝達することに成功していた。ロングボウと比較して 2 倍ほどの効率性を持つことによって、矢の初速もロングボウと比べて 40%ほど速くなっている。

このタイミングで、ワシントンに住んでいる優れた科学者である私の友人に弓を送りつけ、その返信として受け取った手紙からの抜粋を紹介するのがいいだろう。彼は軍部の調査と発展のための激しい責任感から解放を求めて、ロングボウを使ってポトマックアーチャーズと共に定期的にアーチェリーを練習している。そして新しい弓を受け取り、それを試したのち、彼は以下のようなコメントを送ってくれた；

あれは僕がいままで見た中で、もしくはポトマックアーチャーズの中でも最高の弓だ。昨日初めて取り出した。丁度クラブで非公式のシューティングをしていたから端に寄って矢をつがえて、前の弓と同じ感覚である点を狙ってリリースしたんだ。それ以来その矢は見つかっていない。誰かをぶち抜いていないかだけが心配だ...みんなが 100 ヤードを射ち始めたとき、_____さんが私の所に来て、矢を試すのを手伝ってくれた。彼は引き尺が 26 インチしかなかったから、パワーはあまりないはずだ。でも彼の 100 ヤードのエイミングラインは、以前の 40 ヤードのものと同じくらいだった。1 エンド射っている途中で止めなければならなくなった。その平たい弾道を見たみんなが集まってきてしまったからね...

1930 年代に発行された新たな弓のデザインやパフォーマンスについてのいくつかの記事はトラディショナルに縛られたアーチャーたちから疑いの目で見られたが、と同時に幅広く受け入れられた。新たなデザインの弓を受け入れるアーチャーが増えるに連れ、そのパフォーマンスについて正しく述べている文書も確実に増加し、トラディショナルロングボウがトーナメントのシューティングラインから姿を消すのに、ほんの数年しかかからなかった。

科学的なデザインの弓の広まりと平行して、弓の進歩に強く影響を与えた一つのものがある。1930 年代初期、私はアーチェリーに関する本の収集を始めた。それらは主にイギリスのものであり、16 世紀以降に発行されたものである。そのコレクションの中に 1864 年から 1915 年までの年次報告書をすべて収めた「アーチャーズレジスター(Archer's register)」というものがあった。この中には本当のように見える情報もあれば、15 世紀以降のトルコのアーチェリーの練習など、憶測にすぎないような情報も混じっていた。ある主張では驚くべきことに、トルコ人は半マイル(800m)もの先に矢を飛ばせたとの記述もある。これは、ロングボウの本当の限られた射程距離を知っている人にとっては非常に驚異的であった。しかし、私の工学に関する関心がうずきだし、この記述が本当なのか、またどうやったらこの結果を得ることができるかを確かめたくなった。

トルコ弓についての探求では、幸運にもムスタファ・カニによって書かれたアラビアーペルシャ文字の古いトルコ語の本を手に入れることができた。この本は 1847 年にコンスタンチノープルで発行され、「アーチャーに関する文書の抜粋(Excerpts from the Writings of the Archers)」というタイトルを冠していた。ここでレポートされていた項目はトルコ弓の構造と、そのシューティング方法についてだった。

私はトルコ語を読めなかったのだが、幸運にも後に内容のほとんどをカニによって書かれたものを元とした、トルコ弓についての書物に見つけることができた。最初の研究書はフライハー・ハマー・ピュールグスタル博士による「弓矢についての考察;その使用方法とアラブ人とトルコ人によるその構築方法(Concerning Bows and Arrows : Their Use and Construction by the Arabs and Turks)」である。これはオーストリア・ハンガリー・インペリアル科学アカデミーにて発表され、そのアカデミーの監修のもと発行された。二つ目はホアキム・ハインによる「オスマントルコにおける弓の作成とアーチェリー(Bowyery and Archery among the Osmanli

Turks)」である。こちらは 1921–22 年のドイツ語の「ダー・イスラム (Der Islam)」という季刊誌の 3 つに連続して掲載された。これらの二つのドイツ語の情報源は、私にも読むことができ、そのままにしていたら、把握できなかったカニについての見識を私に十二分に与えてくれた。

図 7. 19 世紀初期のトルコ人アーチャーがコンポジットボウをフルドローで保ち、矢を飛ばす準備が万端の状態。このとき弓が数インチ分引かれ、矢の先端は押し手にくくり付けられているガイド（siper）に乗っている。(「トルコアーチェリーとコンポジットボウ」より)

この二つの研究結果が私の書籍、「トルコアーチェリーとコンポジットボウ(Turkish Archery and the Composite Bow)」の1934年の発行につながった。そこで私は二つのドイツ語資料から学んだことを、私自身のシューティングの実戦的経験と、研究と発展を組み合わせて報告した。限定版として発行された書籍は、予想よりも多くの需要があったようで、発行した初日にコレクターズアイテムとなってしまった。大幅な見直しをおこない、拡大された版が1947年に発行されたが、その年はムスタファ・カニの書籍の発行100周年の年だった。私のこの本はもっぱらトルコの弓、矢、シューティングアクセサリー、シューティングと練習の方法、距離の記録など、その他の関連した核心に迫る情報について述べられている。

トルコのコンポジットボウは従来のイギリスのそれとはまったく異なるものだった。ロングボウがすべて木材からできていたのに対して、トルコ弓は「コンポジット」、つまりリムが素材の層によっての張力と圧力を調節し、曲がったリムの内部のそれらの素材のズレがそれぞれの力に耐えうるように調整されているものだった。コンポジットボウのフォームと構造は武器としての利用を通して進化したものであり、過去の弓職人やアーチャーたちの何世代にも渡る貢献の中で試行錯誤をした結果得られたものである。

トルコアーチェリーの本で報告されているトルコの弓矢の研究と、それらの長距離シューティングにおける利用の記録によると、トルコ弓の射程距離はロングボウのそれと比べてはるかに長いことは疑い用もなくなった。その優越性の理由は下記のようだと考えられる；

1. 適切な素材を確実な判断を持って利用し、弓の形状によってコンポジットボウのリムに蓄えられる単位量当たりの内蔵エネルギーが大きいため。

2. トルコ弓のプレースした状態でのデザイン特性、短いリム、強いリフレックス。加えてセットバック – リムの先端に「耳*」があることが挙げられる。

*チップが長いので弓の長さが 30 インチでも、チップからのセットバックで、弦はさらに短いものとなる。

3. トルコ弓の矢の特性である、軽くありながら高い衝撃によるねじれをふせぐのに十分な強度と硬さ；安定させるためのヴェインも風による抵抗を最小限におさえるために面積を小さくしている。

4. 風の抵抗を少なくするために、比較的短い矢の利用。押し手につけられる特殊なガイディングデバイスによって、弓の中で数インチしか引かなくても済む機構になったため。

5. リリース中、そしてリリース直後の矢の激しいパラドックスを最小限に抑えるためのサムリリース。

トルコアーチェリーの本にアクセスがあり、フライトシューティングに興味のあった多くのアメリカ人アーチャーは、彼らの前に立ちはだかるトルコ弓の記録に挑戦し、その記録とそれよりもずっと射程距離の短いロングボウやウッドのストレートボウの間のギャップを可能な限り埋めようと努力した。書籍の発行に先立って、既にいくつかの変更がロングボウに起こっていた。断面図が直角のリムを作り、安全範囲ぎりぎりまで長さを短くし、耳をつけた。これが進化の始まりだった。

フライトボウの作成のために最もよく使われた木材はオーセージオレンジだった。この木は非常に強く、堅く、弾力のある南アメリカの木材である。フランスの探検家が発見したとき、多くのインディアンの部族に使われていたことから「ボア・デ・ラルク」と名付けられた。品質の良い乾燥したオーセージオレンジは角(ホーン)のような工学特性をもち、圧縮にとても強い素材だった。一方(動物の)腱繊維は、バッキングや木材の不具合によるリムの破損を防ぐためや、短い半径で曲げたときに発生する高い負荷に耐えられるように使われた。彼らはトルコの弓職人たちがどのようにして腱繊維や接着剤を準備し、そして繊維をどうやって弓の接着基盤に組み込んだかを本から学んだ。そういった弓のデザインの変遷を経て、射程距離は 400 ヤード台から 500 ヤード(460m)台前半まで伸びた。

戦時中、また戦後の調査や発展によって、確実にエネルギーを蓄積・解放できるような素晴らしい特性を持ったプラスチックが開発された。また低コストでのグラスファイバーの量産にも成功し、長いパラレルファイバーグラスの入手も容易になった。特殊な構造の弓に独占されているものをのぞき、強度の高いプラスチックにファイバーグラスの補強という構造はもはや一般的になっていた。特定の性能に特化したカスタムボウを除いて、腱繊維、ホーン、そしてオーセージオレンジは新たな素材に取って代わられた。1960 年代の弓はトルコの伝統を受け継いだコンポジットを現代風にアレンジしたものであると同時に、デザインはロングボウの研究に影響を受けた形となっている。

写真 4 と 5 は現代の商業用の弓のストリングを張った状態、弛めた状態、そしてフルドローまで引いた状態で撮ったものだ。見た目やコンポジットの構造においてトルコ弓のそれと類似しているのは明らかであるが、直角なリムの断面図を持つストレートリムの弓は、発展の最中にあったロングボウの影響を大きく受けている。リムは断面が直角であり、弓を引いてきたときにねじれに対する耐性を確保するために必要な幅を持たせている。加えて、デザインはエネルギーを蓄えるために、カーブエンドも含めたリム全体を利用することを前提としている。円弧状に曲がる、直角のリム断面を持つ弓から学んだことは、それぞれのリムが曲がったとき、エリアごとの単位量当たりの内蔵エネルギーの値が大体同じ値で「作用」しているということである。トルコ弓では、弓を引いてきたときにそれぞれのリムの大体半分ぐらいまでしか負荷はかからない。そのトルコ弓と同じコンポジットの現代の弓はでは、引張力よるストレスは、強力なプラスチックを基盤としたグラスファイバー、圧縮力によるストレスはグラスファイバーが埋め込まれ、補強されているプラスチックによって蓄えられます。リムは細いウッドコアの両側に先ほどのグラスファイバーを埋め込んだプラスチックを付けて構築され、ウッドコア

の多くはハードメイプルである。トルコのコンポジットボウの構造も大体同じであるが、もう一度振り返ると、圧力を蓄えるのは動物の角(ホーン)で、張力を蓄えるのは動物の腱繊維であった。

新たな構造がその前身と比較して得た驚くべき効果は、直角断面のリムを持つ弓は通常の温度や湿度の変化に対して比較的強いということだ。加えて、現代のコンポジットはストリングの影響をあまり、あるいはまったく受けない、つまり永久的に張ったり、弛めたりできるのだ。そのため長期間に渡ってストリングを張っておくことができ、弛められると元の形状に戻ることができた。そのような弓の象徴的なテストとして 260,000 回引いたり弛めたりを繰り返すものがある。このように「酷使」したあとでも、フルドローのときのポンド数は、新品と比べても数オンス(1 オンス=28 グラム)しか違わなかった。

現代の弓は前にも述べたように長く、堅牢な中心部を持っている。それによって均等な長さの短いリムを使うことができ、矢を軸としたドローイングラインを、弓の上下の対照線として使うことができる。新たな特徴として、写真 4 と 5 に見られるように彫り込まれたグリップであり、手の輪郭をなぞるようにできているだけでなく、押し手にかかる負荷が常に同じ場所(ピボットポイント)にあるようにする機能も持ち合わせていた。アローレストとストリングにマーキングされたノッキングポイントはすべての矢が毎回同じ場所にあり、そして毎回同じ衝撃が矢にかかるようにするためにある。これらの特徴は精確でない的中を引き起こす誤差を最小限に抑えるために使われる。精確性に同じようにして関連するもう一つの重要な特性は、リムの素材に発生する工学的履歴効果や内部摩擦によるエネルギーロスの軽減である。この特性は多くのウッドの弓に言えることである。さらに前述のリムの恒久性(寿命)にも関連している。

現代の矢もまた精確性に貢献している。多くの場合、精確な矢は、精確に製造された強固なアルミニウムのアロイチュービングでできており、硬さや各直径の長さ毎の重さ、厚みといった物理的な特性が一定している。アルミシャフトに取って代われてしまった木製のシャフトは、その木の性質上回避できない均質性の欠如に苦しんだ。製造やウッドの選択と乾燥、その他均一性を増すためにおこなったことすべてに工夫にもかかわらず、1 ダースの矢の完璧なスペックは推測の域を出ることができなかった。そしてそれらの矢を最終的に完璧なダースにするには、とてつもない数の計測やテストをおこなう必要があった。

もう一つ長距離、例えばヨークラウンドの 100 ヤードなどを射つにあたって重要な点は、すべてに言えるが矢の抵抗を少なくすることだ。抵抗の発生する様々な条件の中で主なものはターキーの羽でできたフェザーだ。この羽は機械的な接触で簡単に痛んでしまい、濡れたときに形状や均一性を失ってしまう。新しいデザインでは、簡単により優れた均一性が得られるプラスチックのヴェインが利用されている。時には通常の 3 枚のヴェインよりも多い 4 枚や 6 枚のヴェインの実験や製造がおこなわれることもあったが、唯一の利点は、同じスタビライジングの面積(羽の総面積)ならば、枚数が多い方が羽を小さくでき、これによって矢がリリースされたときの弓との接触を軽減できるかもしれないという点のみだった。

ここ 30 年ほどの間に起きた弓矢の劇的な変化は、極めて神聖なロビンフッドの伝説を信じ続け、また変革に耐えられなかった昔からのアーチャーたちに感情的な拒否反応をもたらした。彼らはロングボウと「古いマツ」でできた矢ともに、古いイギリスの伝統の中に住んでいた。彼らは高い点数とより良いシューティングを追い求めた調査と発展を嘲った。彼らは明らかにロビンフッド的なアーチェリーのイメージに愛情を持っていた。しかし、彼らが直感した奇をてらっただけの新たな道具によるアーチェリーの衰退は、まったく間違っていた。アーチャーの人口も何千から何十万に増えた。新たな弓と矢はこのスポーツに計り知れない楽しみを与えたのである。

この芸術の進歩に含まれたいくつかの技術的な考察の簡潔な集積が、いずれ多くの読者たちを楽しませることを私は望んでいる。以下に述べるリサーチと理論は、今後の発展に役立つはずだ。

フォースドローの関係性

あらゆる弓において明らかな特性は、力とストリング上の矢のノッキングポイントの位置の関係性である。図解すると、この関係性は fx 曲線として表される。矢が加速するときに、あらゆる地点に弓から発生するエネルギーの伝わり具合が表されている。

図 8 はこのレポートで議論されているいくつかの弓の fx 曲線である。これらはすべて同じドローレングスで得られる最高ポンドが同じになるように調節されている。

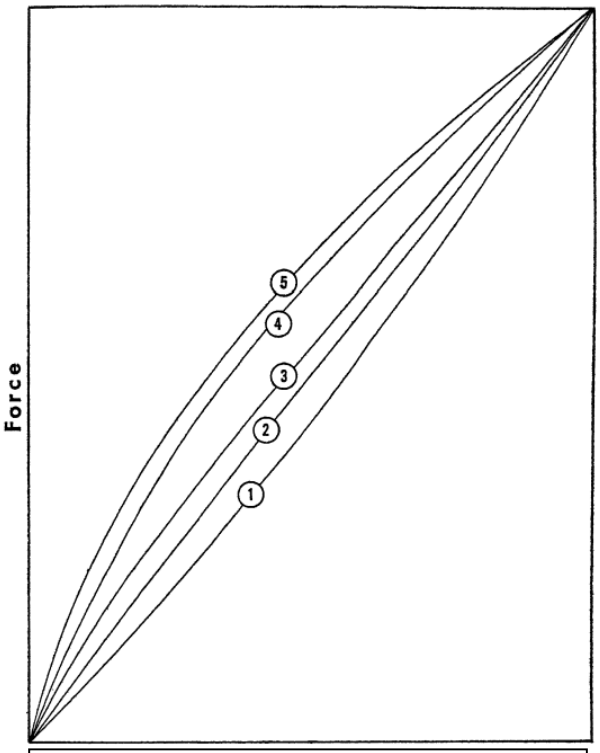


図 8.　異なるタイプの弓のそれぞれの fx 曲線。
(1) ストレートリムの短い弓
(2) ロングボウ
(3) ストレートリムで後方に屈折したチップ（耳）を持つ短い弓
(4) 現代のコンポジットボウ。写真 5 より。
(5) 写真 2d のトルコのコンポジットボウ。

これらの研究において fx 曲線の持つ意味合いは、引かれた弓のエネルギー量が分かるという一点である。エネルギーの総量はグラフ内の領域であり、X 軸はゼロフォース、縦の軸が最大の力を指す。ロングボウの fx 曲線はほぼまっすぐである。ストレートの短いリムは、ロングボウのものと比べて僅かに下に曲がっている。チップが後ろに反っている弓は、トルコ弓のような強いリフレックスがかかっているため凸面が上を向き、現代の弓の中にもこのような構造を持つリムを使用していることがある。よってフルドローの時点でのエネルギーはリフレックスしているものやチップや耳が後ろに反っているものよりも

ストレートリムの方が少ないと言える。したがって、同じポンドを持つものでも、ストレートリムよりも実質的なエネルギー量が多い修正されたトルコ弓や後ろに反っている(リカーブ)リムを持った弓の使用が好まれる。この選択は矢へのエネルギーの伝達量が同等なのであれば正しいと言える。

特定の弓から放たれる矢の速度 - 質量の関係

アーチャーは自分の弓で経験を積む中で、異なる質量の矢を試していくに連れて、質量の軽い矢の方が重いものよりも速く飛ぶことを発見するだろう。そこである疑問が浮かぶ。まず、矢の質量と特定の弓から与えられる速度に体系的な関係性を持たせることができるのだろうか。次に、矢の質量と弓から伝達されるエネルギーにも関係性を見いだすことができるのだろうか。これらの二つの疑問とその答えの探求が、また新しい疑問につながる考察を与えてくれるだろう。

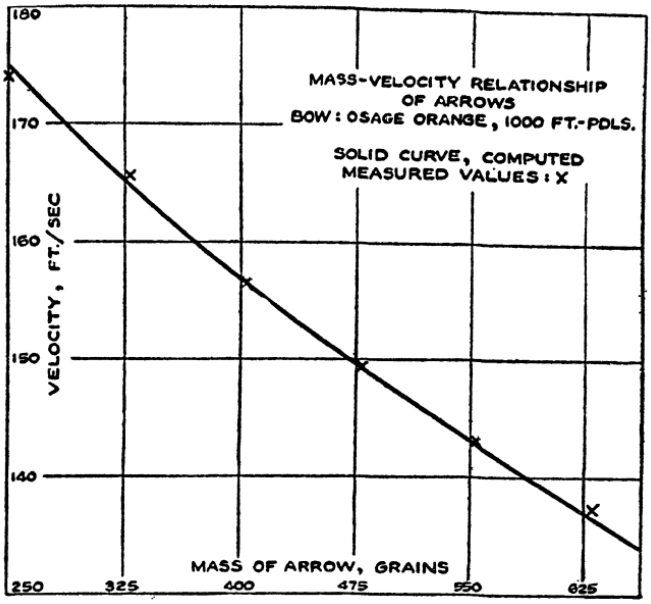


図9. 矢の質量とフルドローで1000フィートポンドのエネルギーを持つ弓から放たれた矢の速度の関係性を表したグラフ。グラフ内:弓;オーセージオレンジ、1000ftーポンド。実線、コンピュータ測定された値:X

図9は、フルドローで特定のエネルギーを持つ弓から、それぞれ質量の異なる矢を放ったときの矢速を計測し、質量 - 速度としてグラフ化したものである。直線はコンピュータで計算された値vとmから描かれたものであり、その式は;

$$E=\frac{mv^2}{2}+\frac{Kv^2}{2},$$

簡略化すると $E=\frac{1}{2}(m+K)v^2$

この公式は引かれた弓のエネルギーEは、矢の動的エネルギー1/2mv2を占め、もう一つのエネルギー値である1/2Kv2は、弓から矢への伝達に失敗したエネルギー量を示す。これは矢が弓から離れる際にストリング上に残ってしまうエネルギー量でもある。この用例において、矢の速さであるv、そして数量Kは質量の次元である。私はKを付加質量(Virtual Mass)と呼んでいる。

付加質量の物理的理解は次のように描かれる。例えば、まったく質量のない弓とストリング、そして矢がストリングを離れる瞬間までに矢を載せて運ぶ(ピギーバック輸送)するのに必要な質量Kを想像してみてほしい。エネルギーEに相当する動的エネルギーは、速度vと質量(m+

K)へと転化される。矢によって運ばれるエネルギー量は 1/2mv2 なので、残されるエネルギー量は 1/2Kv2 である。付加質量 K は多くの実験で、弓の独特の特性として発見されてきた。効率性の高い弓、つまりエネルギー転送効率の高い弓では K は小さく、逆もまた然りである。対照的にロングボウの付加質量は大きい。現代の「科学的」な弓ではその値は非常に小さい。このことは弓のリムそのものが内部の内蔵エネルギーによって加速し、それが矢を加速させるという点を考慮するとより理解しやすいだろう。ロングボウのような長く、重いリムは、結果として短く、軽いリムと比べて動作が鈍い。仮にすべてのエネルギーを矢に伝達することができたら、弓の付加質量はゼロになる。これは、リムが矢を放つときブレース状態になった瞬間に速度をゼロにするような弓をデザインすることができれば、理論上は可能である。到達不可能な理想郷であるが、それに向かって 10%ほどは前進できただろうか。

この議論を終えるにあたって、最初に設定された目標が達成されたことを願う。デザインや構造、弓矢の利用に関してより詳細な技術的考察について述べることはこのレポートの範囲を大きく超えてしまうだろう。しかし最後に付け加えられた参考文献表が、数多くのそういった技術的課題について、答えを導く道標になってくれるだろう。

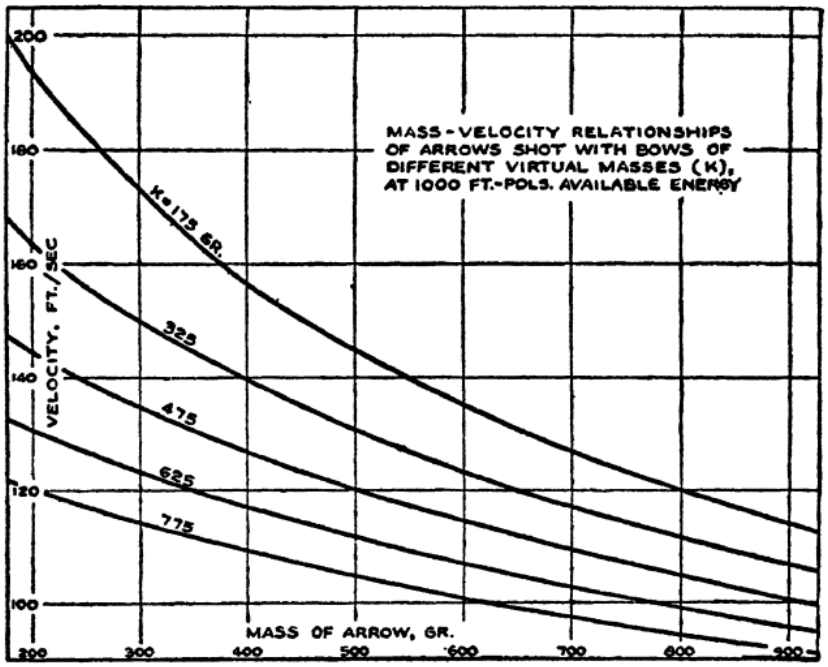


図 10. 矢の質量と、同じエネルギーを持ちながら、付加質量が異なる弓から放たれた矢の速度の関係性を表した曲線。グラフ内：1000ft － ポンドのエネルギー値で、付加質量が異なる弓（K）と、それから放たれた矢の矢速の関係性。

*1. Clarence N. Hickman (1889-1981) 1937 に初めてアーチェリーパラドックスの撮影に成功し、代表的な著書に”ARCHERY: The Technical Side.(1947)”なとがある。

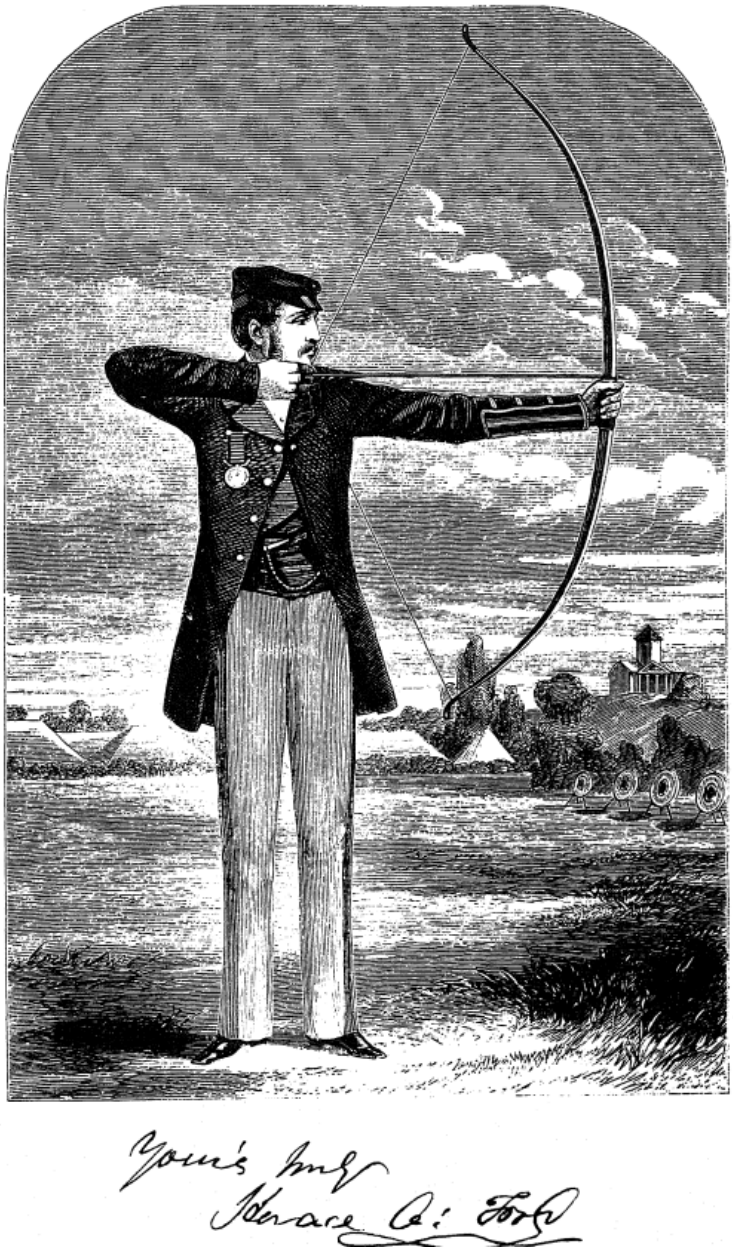


写真1. 図1や2に示されている1850年代のイギリスのロングボウをフルドローまで引いた状態。Horace A. Fordの「アーチェリーの理論と実践」より。Fordはイギリスで11回国内チャンピオンに輝いた。

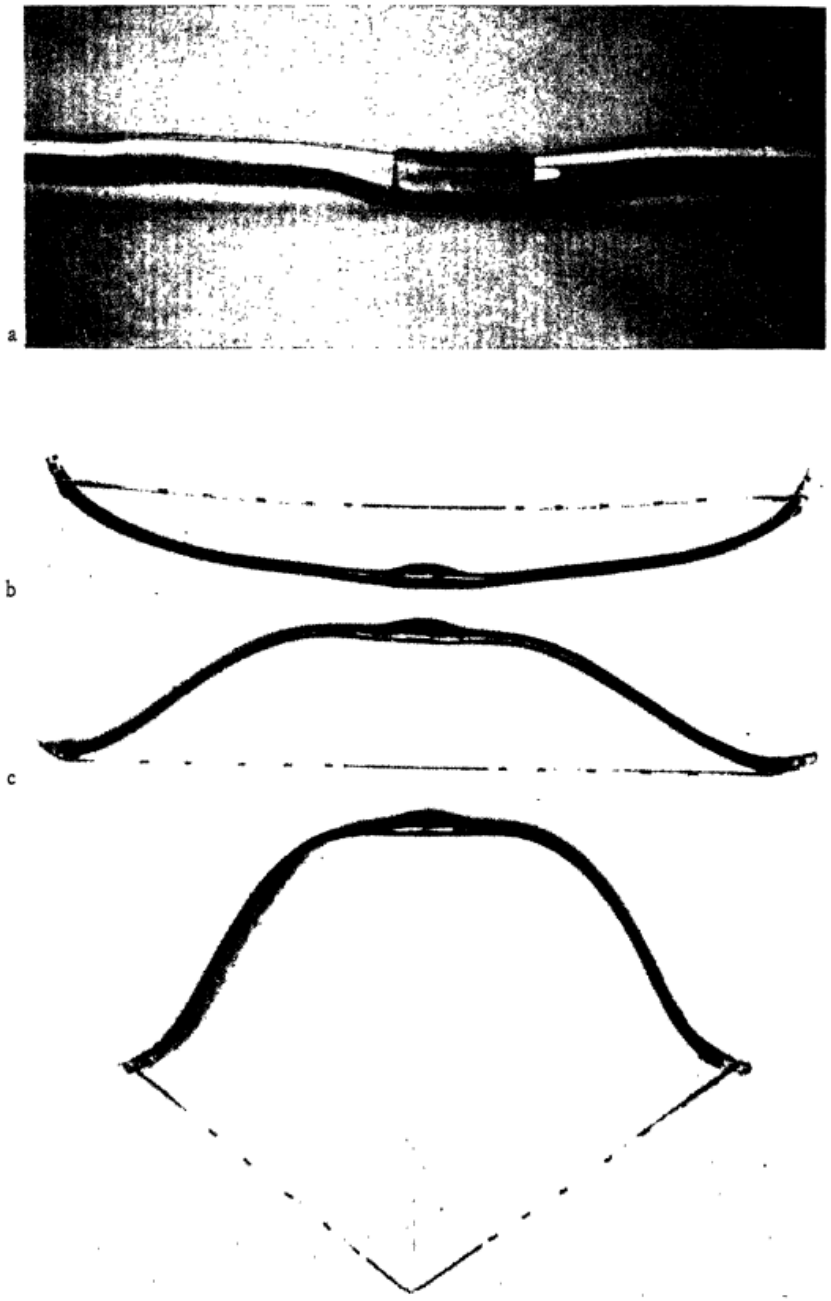


写真 2.　(a) イギリスのロングボウからどのように変化していったかを示す、改良されたアメリカ製のロングボウのグリップ。中心部は硬く、リムとグリップが合体する「溝」があった。(b~d) トルコのコンポジットボウを (b) 弛めた状態 (c) 張った状態 (d) フルドローの状態（「トルコのアーチェリーとコンポジットボウ」より）。

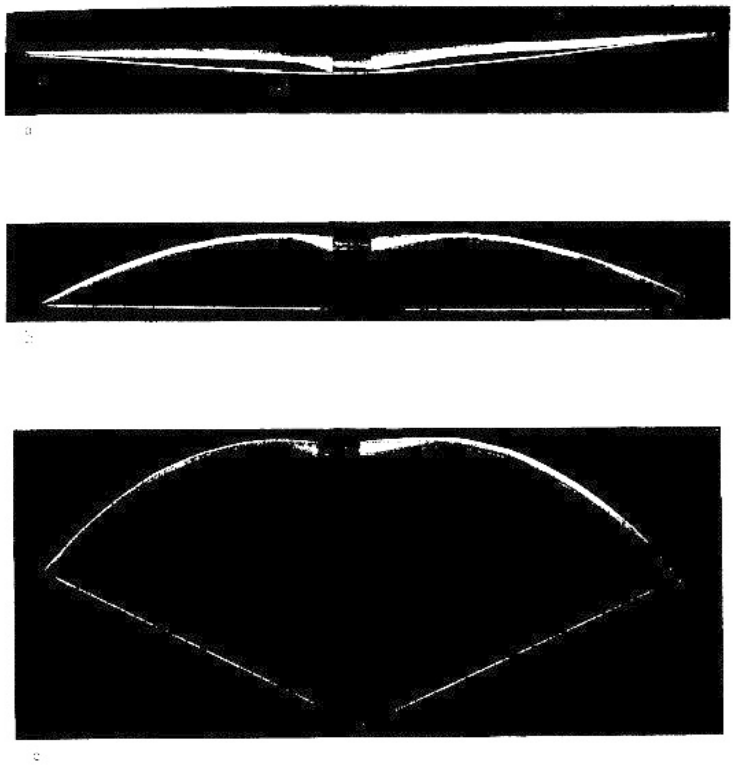


写真 3. 図 6 のデザインを元に作られたイチイのウッドボウの (a) 弛めた状態 (b) 張った状態 (c) フルドローの状態。リムはまっすぐで、引いてきたときに円弧状に曲がる。弓職人が、木目に沿って切れないように、ウッドの僅かに波打った木目をなぞるようにして作った点に注目して欲しい。またリムの長さは均等であり (28″)、中心部は硬く (15″)、曲がったリムの線対称の中心線は矢のポジションとなる。

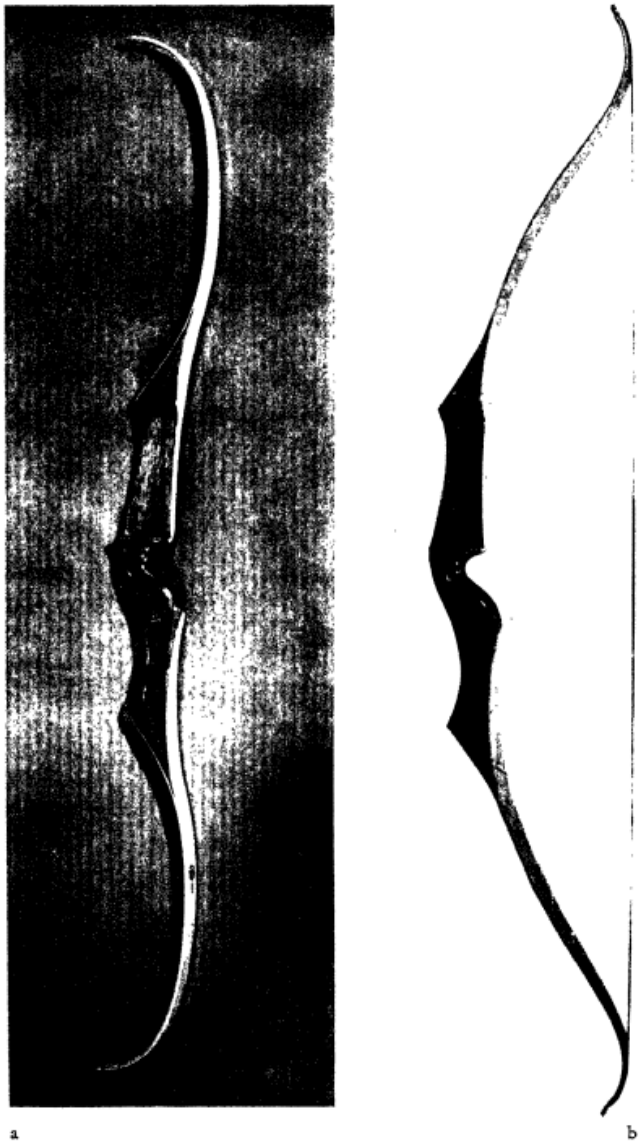


写真 4. 現代のコンポジットボウ(1960 年代の)、(a) 弛めた状態 (b) 張った状態、そして写真 5 はフルドローの状態。均等な長さのリム (20″) と、図 1 の上リムが 34″、下リムが 32″の不均等なイギリスのロングボウの比較に着目して欲しい。また長さ 27″の堅牢な中心部と、イギリスのそれの完璧な欠如にも注目して欲しい。(ベアアーチェリーより)

(See plate 4 for explanation.)