原著論文

筋電図計測を利用した和弓における発射技術の分析†

細 谷 聡* 岡 田 守 彦** 宮 地 力***
大 山 圭 悟****

**Analysis of Release Technique of Japanese-style
Bow by Using Electromyogram**

Satoshi HOSOYA*, Morihiko OKADA**, Chikara MIYAJI***
and Keigo OHYAMA****

Abstract

Since the Japanese-style bow is very complicated in shape and structure, torques in horizontal and sagittal planes about the grip must be applied to hit the target. The purpose of this study was to investigate the relationship between left forearm muscle activities and torques in horizontal and sagittal planes about the grip. Surface EMGs of four muscles (extensor carpi radialis longus, extensor digitorum, extensor carpi ulnaris, flexor carpi ulnaris) and torques were collected for ten male subjects shooting arrows. Crosstalks between EMGs obtained from adjacent recording muscles were evaluated by using cross-correlation function. Absolute values of less than 0.3 of cross-correlation coefficient were considered as a criterion for specific EMG signals. As a result of statistic analysis. Extensor digitorum and extensor carpi ulnaris muscles had positive relationships to the torque in the horizontal plane. On the other hand, extensor carpi ulnaris, flexor carpi ulnaris and flexor carpi ulnaris muscles had positive relationships to the torque in the sagittal plane. It is found that extensor carpi ulnaris is a bifunctional muscle in release technique (TENOUCHI) of Japanese-style bow.

Key words : Electromyogram, Crosstalk, Japanese-style Bow, TENOUCHI

†原稿受付 2001年10月26日

*信州大学繊維学部

〒386-8567 長野県上田市常田3-15-1

**筑波大学

〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1

***国立スポーツ科学センター

〒115-0056 東京都北区西が丘3-15-1

****筑波大学体育科学系

〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1

*Shinshu University, Faculty of Textile Science and Technology, 3-15-1, Tokida, Ueda, Nagano, Japan (386-8567)

**University of Tsukuba, 1-1-1, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, Japan (305-8574)

***Japan Institute of Sports Science, 3-15-1, Nishigaoka, Kita, Tokyo, Japan (115-0056)

****University of Tsukuba, Health Physical Education and Sports Sciences, 1-1-1, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, Japan (305-8574)

1. はじめに

筋電図計測は、医療分野やリハビリ分野、体育・スポーツ分野等において、筋の機能解析や運動機能解析、動作解析を目的に広く利用されている計測技術である。その中でも表面筋電図法は、皮膚表面上に電極を貼付すれば装着部皮下の筋収縮情報が得られるという計測の簡便さから、最も一般的である。スポーツ指導やスポーツ工学分野においても筋電図計測は、身体動作や技術の解析¹⁾²⁾、筋活動量からの関節角度や関節トルク、発揮パワーの推定などを行なう場合³⁾⁴⁾⁵⁾、有効な解析手法の一つといえる。筋電図による弓射動作の研究は、いくつか行われているが、弓射動作の開始から終了まで概括的に扱っており、発射技術に焦点をあてた研究は見当たらない⁶⁾⁷⁾。

本稿の対象となる和弓の発射現象は、弦が射手の右手から離れて弦と矢が分離するまでが約100分の3秒という、ごく短い時間で終始する。さらに、弓幹と矢の位置関係や握り部の位置などの構造上の理由から、矢を単に射放せば狙った地点よりも右上方へ逸れるという特徴である。従って、この現象を補正するため発射の瞬間に弓幹の長軸周りにはねじりモーメントを、さらには弓幹の上部を的の方へ倒すような力のモーメントを同時に加えるという発射技術が要求されるのである(図1)。発射の瞬間にこのような力のモーメントを加えることを、弓道の指導書では「手の内」あるいは「手の内の働き」と称して非常に重要視している。

発射の瞬間、握り部に作用する力のモーメントの原動力は左上肢の筋活動である。ごく短い復元時間中に力のモーメントを作用させるため

図1 和弓の発射技術「手の内」

には、発射の準備期から連続的な制御がなされていることが考えられる。従って、筋活動にも動作に対応した変化が生じる可能性が高い。このような技術の分析には、表面筋図法による計測が非常に適していると考えられる。しかしながら、ヒトの上肢には複数の表在筋が入り組んでおり、表面電極で目的の筋活動を計測する場合、近接する筋の収縮情報（活動電位）が混入する可能性がある。これは、クロストークと呼ばれる現象で、表面筋電図計測では注意しなければならないことの一つである。

本研究では、弓幹に対して力のモーメントを作用させるのに重要な役割を果たす左前腕の筋活動について表面筋電図を用いて分析していく。ここでの目的は、計測時にクロストークをチェックする方法を導入し、左前腕の筋群の活動と「手の内の働き」との関係性を明らかにすることである。

2. 方 法

2. 1 被験者

被験者は日置流印西派弓術を学ぶ健康な男性10名とした。被験者の経験年数は1~25年で、普段的中率は65~80%である。被験者の特徴を表1に示す。

2. 2 実験装置

2. 2. 1 実験弓と力のモーメントの計測

実験には、被験者が普段稽古で使っている弓

と強さ183N/mのカーボンファイバー製弓の2張を使用した。「手の内の働き」によって弓幹に作用する力のモーメント等を計測するため、後者の実験弓にのみ弓幹の握り部付近の前面と背面にひずみゲージを接着した。計測項目は長軸まわりに作用するねじりモーメント、弓幹の上部を的側に倒すようにして作用させる力のモーメント（以後上押しモーメントとする）、弓幹の曲がり具合（以後曲げとする）の3つである。解析において復元時間中（弦が右手より離れてから矢と弦が分離するまでの時間）の力のモーメントの積分値を算出するために、右手の弦を保持する部分に電極をつけ発射の信号を検出した。また、弦を弓に張った初期状態付近で弦と矢は分離することが報告されていることから⁸⁾、弓幹が初期状態まで復元した時期は曲げ信号によって判断した。

2. 2. 2 被験筋と表面筋電図の計測

左前腕の筋活動を調べるために、長橈側手根伸筋、指伸筋、尺側手根伸筋、尺側手根屈筋の4つの筋を被験筋とした(図2)。表面筋電図は導出部の直径が2mmの表面電極を用い表面双極導出法にて計測した。電極の中心から中心までの距離を約1cmにして、各筋の筋腹中央部に両面粘着カラーによって貼付した。皮膚抵抗を減らし粘着をよくするために、電極の貼付に先立ちエチルアルコールによる脱脂と消毒を行ない、電極中央部に対応する表皮（角質層）のごく一部を針によって剥離した。検出した発射準備期

表1 被験者

被験者	年齢	経験年数	的中率	普段の使用弓
1	19	8	80%	209N/m
2	21	9	80%	261N/m
3	20	5	80%	222N/m
4	19	4	80%	209N/m
5	22	6	70%	216N/m
6	20	8	60%	189N/m
7	19	1	70%	196N/m
8	21	7	60%	196N/m
9	19	3	65%	196N/m
10	46	25	75%	209N/m

図2 筋電図計測した前腕の筋群

から発射時の筋電位はマルチテレメータシステムを介して力のモーメント信号と合わせてデータレコーダに記録した。

2. 3 実験試技

実験室内に設置した巻藁を標的として、2張の弓についてそれぞれ10射ずつの発射実験を行った。実験の概要を図3に示す。各被験者の筋電位信号の規格化とクロストークのチェックを行なうため、各被験者には発射実験後に徒手筋力測定法によって左手関節の背屈および尺側偏位(尺屈)の最大随意収縮(Maximum Voluntary Contraction; MVC)を約3秒間ずつ行なってもらい、筋電位信号を記録した。「手の内の働き」は先にも述べたように、ねじりモーメントと上押しモーメントで記述することができる。このねじりモーメントを作用させるとき、左手関節は結果として背屈位をとる。また、上押しモーメントを作用させるとすれば、左手関節は尺側偏位をとることから、このような解剖学的な姿勢で最大随意収縮(MVC)を計測した。

2. 4 データ処理

データレコーダに記録されたデータは、A/D変換しパーソナルコンピュータで解析した。力のモーメント信号のサンプリングタイムは0.1ms(10KHz)、筋電位信号の場合は0.5ms(2KHz)とした。

「手の内の働き」を定量化するため、弓に作用したねじりモーメントおよび上押しモーメン

トについて復元時間中の積分値を算出した。

クロストークは、隣接する筋の電位信号の類似性を相互相関関数によって評価することにした。つまり、ある時点での相互相関係数が高ければ筋電位信号に類似性がありクロストークの可能性が高いということになる。相互相関関数は次式で与えられる。

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t+\tau) dt$$

$x(t)$, $y(t)$: 隣接する筋の電位信号

T : データの時間的長さ

τ : ずらし時間 ($0 \leq \tau \leq T$)

また、相互相関関数を-1から+1にするための規格化は次のとおりである。

$$R'_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{R_{xx}(0) R_{yy}(0)}}$$

$R_{xx}(0)$: $\tau=0$ における $x(t)$ の自己相関

$R_{yy}(0)$: $\tau=0$ における $y(t)$ の自己相関

相互相関関数を用いたクロストークの評価について Vink ら⁹⁾は、筋電位信号における相互相関係数の負の値は合理的な説明がないと報告している。しかし、運動神経から筋にパルスが伝えられた後、活動電位は神経と筋接合部を挟んで対照的な伝播パターンをとり、接合部を挟んだ場合の筋電位波形は同型で逆相となることがわかっており¹⁰⁾、波形の類似具合を示す相互相関係数が負の値をとることは十分考えられる。また一方で、Winter ら¹¹⁾は相互相関関数によるクロストークの評価を正の値で行なっているが、本研究においては正負両方の可能性を考慮して相互相関係数の絶対値をとり、その中の最大値で評価することにした。ここで最大値を評価に用いるのは、クロストークの可能性に関する上限を示すためである。なお、相互相関関数の算出には2秒間の最大随意収縮時のデータを使用した。発射準備期から発射時の筋電位信号は整流した後に単位時間あたりの積分値を求め、最大随意収縮時における単位時間あたりの積分値を100%として規格化し被験筋の活動の大きさを表わすことにした(以後% MVC とする)。

図3 実験構成図

3. 結果および考察

3. 1 表面筋電位信号のクロストークについて

徒手筋力測定によって計測した最大随意収縮時における隣接する筋の電位信号の一例を図4に、また各被験者における相互相関関数の最大値の平均を表2に示す。背屈試技では主に長橈側手根伸筋、指伸筋、尺側手根伸筋が活動しており、尺屈試技では指伸筋、尺側手根伸筋、尺側手根屈筋が主として活動していることがわかる。ほとんどの組み合わせにおいて、相互相関関数の最大値の平均が0.3より小さい値を示している。

図4 徒手筋力測定による最大随意収縮時の筋活動
(被験者1)
右列：背屈試技，左列：尺屈試技

Vink ら⁹⁾は腰部の筋に関するクロストークの研究で、2つの計測部位の距離を3 cm以上離して配置すると相互相関係数は0.3を下回ることを示し、0~0.3の範囲であれば検出される筋電位信号は十分信頼できると結論づけている。これに関連した研究では、Winter ら¹¹⁾が2つの信号源を設定した理論モデルを用いて、2つの計測箇所の変位を調整してクロストークの影響を計算した結果、距離2 cmでクロストークが13%、距離3 cmで4%になると報告している。これらのことから、隣接する計測部位の距離が3 cm以上の場合にはクロストークの影響を考慮しなくても問題ないと考えられるが、今回の場合のように3 cm未満になるときはクロストークについて相互相関関数を用いるなどしてチェックすることが重要だと考えられる。

今回の計測では、尺屈試技における長橈側手根伸筋と指伸筋間において相互相関係数が 0.39 ± 0.23 (平均値 $\pm$ S.D.) という比較的高い値を示した(表2)。これは、長橈側手根伸筋の活動電位レベルが指伸筋に比べて著しく低いため、指伸筋から不可避免的な信号の混入が相対的に多く反映され、筋電位信号の類似性が高まったものと推察される。同じような状況が背屈試技における尺側手根伸筋と尺側手根屈筋との間にも当てはまるが、この2つの筋に装着した電極が3 cm以上離れているため信号の混入がほとんどなく、結果として相互相関係数が比較的小さい値だったと考えられる。

表2に示したこの他の組合せでは、相互相関係数が0.3未満になっている。図4に示す各筋の活動をみると、背屈試技における尺側手根屈筋の活動を除き、個々の筋の活動レベルが高いことがわかる。従って、表在筋が多く複雑に入り

表2 隣接する筋の相互相関係数

	長橈側手根伸筋 — 指伸筋	指伸筋— 尺側手根伸筋	尺側手根伸筋 — 尺側手根屈筋
背屈試技	0.22 ± 0.09	0.16 ± 0.04	0.19 ± 0.08
尺屈試技	0.39 ± 0.23	0.21 ± 0.11	0.11 ± 0.01
平均値 $\pm$ S.D.			

組んでいる前腕で計測部位の距離が3 cm未満となる場合でも、表面電極によって検出する活動電位レベルが隣接する筋で互いに高ければ、クロストークの影響はほとんどないことも示唆された。

以上のことから、計測部位の距離が3 cm未満の場合や、隣接する筋の活動電位レベルが著しく異なる場合（一方の活動が高く、他方が低い場合）には、クロストークの影響をある程度考慮しなければならない。しかし、計測部位の距離が3 cm未満の場合でも検出される活動電位レベルが相互に高ければ、クロストークの可能性は低いと考えられる。次節以降で示すように本稿では着目する運動に応じた筋の活動レベルは比較的高いことから、計測部位の距離が3 cm未満であってもクロストークの影響は実験結果の解釈に影響をおよぼさないと判断した。

筋電図計測におけるクロストークは、考慮されなければならない重要な問題の一つである。特に、計測部位の距離が3 cm未満となるような近接する筋を対象に表面筋電図を計測する場合には、相互相関関数などを導入することによってチェックすることが重要だと考えられる。表面筋電図を利用する各分野でも計測時に留意されるべきであり、筋電図計測の結果を有効に活用するためにも必要である。

3. 2 発射前における左前腕の筋活動の特徴について

図5は、発射前0.5秒間の活動量を各筋の%MVCで示した一例である。被験筋の中では尺側手根伸筋の%MVCが高い傾向は、すべての被験者で共通であった。また、引張力が弱い弓になると各筋の%MVCは一様に低くなるが、長橈側手根伸筋と尺側手根屈筋の減少の割合よりも指伸筋と尺側手根伸筋の減少の割合の方が顕著なことも各被験者において認められた。3.1で長橈側手根伸筋と指伸筋間のクロストークの影響を考慮すべき場合があることを示したが、筋活動の減少の割合が異なることから活動量に対するクロストークの影響は無視できると考えられる。

また、この引張力の強い弓から弱い弓になると指伸筋と尺側手根伸筋の活動が比較的顕著に減少することは、これらの筋がねじりモーメントと関係していることから引張力が小さくなることよりも弓幹のねじり剛性が弱くなることによる影響が大きいのではないかと考えられる。

次に図6は、発射直前における左前腕の筋活動の一例である。長橈側手根伸筋、指伸筋、尺側手根伸筋の3つと尺側手根屈筋とでは活動の様相が異なり、この3つの伸筋においては発射の直前に活動（波形の振幅）が増加していくが、尺側手根屈筋では減少していくことが読み取れ

図5 発射前0.5秒間における各筋の%MVC (被験者10)

左：普段使っている弓 (209N/m)

右：実験で用意した弓 (183N/m)

る。この傾向は、ほとんどの被験者で認められた。そこで、この発射直前の活動を定量化しより詳細に調べるため、発射前0.5秒間を0.1秒間ごとに分割して各区間の% MVCを表わした一例が図7である。特徴的な点としては、長橈側手根伸筋、指伸筋、尺側手根伸筋では発射直前の0.1~0.2秒間に筋活動が顕著に増大していくのに対して、尺側手根屈筋では逆に顕著に減少

していることである。この現象は、ほとんどの被験者において確認された。これらのことから、左前腕の筋活動は目的の動作を遂行するために、選択的に制御されていることが明らかとなった。

3.3 発射前の筋活動と「手の内の働き」の関係について

左前腕の筋活動と復元時間中の弓幹に作用するねじりモーメントおよび上押しモーメントとの関係を調べるために、発射前の各筋の% MVCと各モーメントの積分値について相関係数を求めた。ここで発射前の筋の% MVCを取り上げたのは、表面筋電図に現われる筋活動は結果として生じる筋張力よりも早い時点で認められるからである。

表3は発射前0.5秒間の% MVCと復元時間中のねじりモーメントの力積値の相関係数を示したものである。ねじりモーメントの増大に関わっているのは指伸筋と尺側手根伸筋であることが明らかとなった。また、尺側手根屈筋の活動が減少するとねじりモーメントが増加する傾向があることもわかった。このことから主動筋

図6 発射前後の各筋の表面筋電位の一例
(被験者10)

図7 発射前0.1秒区間ごとの各筋の% MVC
(被験者10)

表3 発射前0.5秒間の筋活動と復元時間中のねじりモーメントの力積の相関

	総和	局面 1	局面 2	局面 3	局面 4	局面 5
長橈側手根伸筋	-0.07	-0.12	-0.19	-0.15	-0.03	0.24*
指伸筋	0.44***	0.30**	0.27**	0.35**	0.54***	0.70***
尺側手根伸筋	0.35**	0.26**	0.25**	0.31**	0.44***	0.44***
尺側手根屈筋	-0.29**	-0.13	-0.15	-0.24*	-0.38***	-0.55***

* $P < 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$

表4 発射前0.5秒間の筋活動と復元時間中の上押しモーメントの力積の相関

	総和	局面 1	局面 2	局面 3	局面 4	局面 5
長橈側手根伸筋	-0.34**	-0.34***	-0.31**	-0.29**	-0.35**	-0.32**
指伸筋	-0.34***	-0.49***	-0.51***	-0.42***	-0.28**	0.08
尺側手根伸筋	0.35**	0.43***	0.51***	0.43***	0.19*	0.02
尺側手根屈筋	0.26**	0.35**	0.39***	0.29**	0.13	0.06

* $P < 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$

の活動の増大と同時に拮抗作用のある筋の活動の減少が起こり、結果としてねじりモーメントが弓幹に作用するような動作を実現していると考えられる。手関節の背屈に主に関わる筋は指伸筋と尺側手根伸筋であることから、以上の結果は解剖学的にも合致している。さらに、指伸筋と尺側手根伸筋の発射前の活動と復元時間終盤のねじりモーメントの力積値とが比較的高い正の相関を示している。復元時間後半のねじりモーメントの力積値の増大は発射される矢の速度の増大と関係していることが細谷ら¹²⁾によって報告されている。このことから、発射前の指伸筋と尺側手根伸筋の使われ方は「手の内の働き」を評価する上で一つの指標になると考えられる。

一方、表4の各筋の%MVCと上押しモーメントとの関係をみると、尺側手根伸筋と尺側手根屈筋について正の相関を示し、長橈側手根伸筋と指伸筋では負の相関を示した。尺側手根屈筋の活動の促進と長橈側手根伸筋の活動の抑制によって収縮力の差を生み出し上押しモーメントに反映する力が発揮されていると推測される。また、尺側手根伸筋の活動の増加はねじりモーメントの増加と関係するとともに、上押しモーメントの増加にも関係するという複合的な機能を担っていると考えられる。さらに、ねじりモーメントを増加させるために指伸筋の活動が増加すると、逆に上押しモーメントは減少するという対照的な関係があることが明らかになった。

4. ま と め

本研究では、和弓の発射技術である「手の内の働き」に注目し、弓幹へ作用させる力のモーメントの計測と左前腕の表面筋電図を用いて解析した。計測された筋電図を解析するにあたって、クロストークをチェックする方法を導入し筋電図の有効性を確認しながら、左前腕の筋群の活動と「手の内の働き」との関係について検討した。以下に結論を示す。

(1)計測部位の距離が3 cm未満の場合や、隣接する筋の活動電位レベルが著しく異なる場合（一方の活動が高く、他方が低い場合）には、クロ

ストークの影響をある程度考慮しなければならない。しかし、計測部位の距離が3 cm未満の場合でも検出される活動電位レベルが相互に高ければ、クロストークの可能性は低いと考えられる。本研究では、筋活動量はそれぞれ比較的高いことから、クロストークの影響は少なく実験で得られたデータは実験結果の解釈に影響をおよぼさないと判断した。

(2)引張力が強い弓から弱いものになると各筋の%MVCは一樣に低くなるが、長橈側手根伸筋と尺側手根屈筋における減少の割合よりも指伸筋と尺側手根伸筋における減少の割合の方が顕著に大きいことが認められた。また、発射直前の0.1~0.2秒間に筋活動については、長橈側手根伸筋、指伸筋、尺側手根伸筋では顕著に増大していくのに対して、尺側手根屈筋では逆に顕著に減少していた。このように、左前腕の筋活動は「手の内の働き」を遂行するために、選択的に制御されていることが明らかとなった。

(3)「手の内の働き」のうち、ねじりモーメントの増大に関わっているのは、指伸筋と尺側手根伸筋であることが明らかとなった。一方、上押しモーメントに関わっているのは、尺側手根伸筋と尺側手根屈筋であった。尺側手根伸筋の活動の増加は、ねじりモーメントと上押しモーメントの増加に関係しており、複合的な機能を担っていることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 川島一明；ゴルフのキネテックスな指導システムの開発, J.J. Sports Sci., Vol.11, No.9, pp.524-535, 1992.
- 2) 室増男, 他；筋放電パターンからみた投球指導のポイント, J.J. Sports Sci., Vol.11, No.9, pp.550-557, 1992.
- 3) 内山孝憲, 他；静的な位置制御における関節角度・筋活動度・トルクの関係, 医用電子と生体工学, Vol. 34, pp.119-126, 1996.
- 4) 内山孝憲, 赤澤堅造；ヒト肘関節伸筋の筋活動度-角度-等尺性トルク関係と-負荷トルク-速度関係, バイオメカニズム14, pp.27-37, 1998.

- 5) 篠原稔, 他: 筋電図と発揮パワー, J.J. Sports Sci., Vol.11, No.3, pp.167-175, 1992.
- 6) 亀井貞次: 弓(和弓)の筋電図, J.J. Sports Sci., Vol.7, No.11, pp.727-730, 1988.
- 7) 水野忠文, 他: 呼吸, 筋活動からみた弓道技術の研究, 体育学研究, Vol.10, No.1, p.204, 1964.
- 8) 稲垣源四郎: 弓の技術3, 新体育, Vol.49, No.7, pp.636-643, 1979.
- 9) Vink, P., et. al.: Specificity of surface-EMG on the intrinsic lumbar back muscles, Human Movement Science, Vol.8, pp.67-78, 1989.
- 10) Masuda, T. and Sadoyama, T.: Skeletal muscle from which the propagation of motor unit action potentials is detectable with a surface electrode array: Electroenceph. Clin. Neurophysiol., Vol. 67, pp.421-427, 1987.
- 11) Winter, D., et. al.: Crosstalk in surface electromyography: Theoretical and practical estimates, Journal of Electromyography and Kinesiology, Vol.4, No.1, pp.15-26, 1994.
- 12) 細谷聡, 他: 和弓における手の内の「ねじり」技術に関する力学的研究-コンピュータシミュレーションによる分析-, 武道学研究, Vol.26, No.3, pp. 31-40, 1994.