

# 剣道の引き面及び引き小手動作における上肢の反応時間と筋活動様式

與谷謙吾<sup>\*</sup>, 田巻弘之<sup>\*\*</sup>, 荻田 太<sup>\*\*</sup>, 桐本 光<sup>\*\*\*</sup>, 北田耕司<sup>\*\*\*\*</sup>, 竹倉宏明<sup>\*\*</sup>

## Electromyographic patterns during kendo strikes and upper limb reaction time in response to light signal

Kengo YOTANI<sup>\*</sup>, Hiroyuki TAMAKI<sup>\*\*</sup>, Futoshi OGITA<sup>\*\*</sup>,  
Hikari KIRIMOTO<sup>\*\*\*</sup>, Koji KITADA<sup>\*\*\*\*</sup>, Hiroaki TAKEKURA<sup>\*\*</sup>

### Abstract

We examined muscle activity patterns in the upper limbs during Kendo strikes using electromyographic (EMG) reaction time.

Fourteen males (7 kendo athletes and 7 non-kendo athletes) were asked to perform Kendo strikes in response to visual stimulation from a flashing light signal. The strikes, *Hiki-Men* (HM) to the frontal region of head and *Hiki-kote* (HK) to the right wrist, were performed as quickly as possible with a bamboo sword (*Shinai*), using the upper limbs. The EMG signals from the right (R) and left (L) biceps brachii, the R and L triceps brachii, and the R flexor carpi ulnaris muscles were recorded along with the elbow joint angle and hitting shock signals. Muscle activity patterns, total task time (TTT), pre-motor time (PMT), motor time (MT), and action time (AT) were also measured. Results were as follows:

- 1) No significant difference was observed between kendo and non-kendo athletes for TTT, PMT, MT and AT in HM and HK tasks.
- 2) Kendo athletes altered the timing of the recruitment of muscle in accordance with the different striking tasks, *i.e.*, HM and HK tasks.
- 3) Non-kendo athletes altered the average EMG amplitude in accordance with the different striking tasks.

These results suggest that there is no difference in time factor on neuromuscular function for HM and HK tasks between kendo and non-kendo athletes. However, differences were observed in muscle activity; kendo athletes displayed timing-dependent modulation of muscle activity, while non-kendo athletes displayed activity level-dependent modulation of muscle activity.

**KEY WORDS** : electromyogram, reaction time, muscle activity pattern, kendo

### I. 緒言

気・剣・体の一致が強調されている剣道指導において、神経・筋機能に関する体カトレーニングは重要なポイントである<sup>11) 14) 15)</sup>。それは、競技中での時々刻々と変化する対戦相手に応じて瞬時に

自身の身体を制御し、より素早く有効打突を得るためである。そのため、俊敏性や巧緻性といった能力を反応時間を用いて評価することは重要であると考えられる。

近年、剣道は世界中で約200万人の競技人口を有し、各国で実施される中、競技性が強くなって

<sup>\*</sup>鹿屋体育大学大学院 体育学研究科

<sup>\*\*</sup>鹿屋体育大学

<sup>\*\*\*</sup>新潟医療福祉大学

<sup>\*\*\*\*</sup>石川工業高等専門学校

きた。試合中でのあらゆる場面で技を仕掛ける機会がうかがわれるようになり、対戦時に頻発する鏝競り合いから離れる場面も有効打突を得ようとする対象となり、「引き技」は競技場において多用される欠かせない技の一つとなっている。これまでに剣道に関する研究は多く、正面打突に関する報告<sup>5) 7) 8)</sup>がされてきたが、引き技における研究は希少であり<sup>20) 21)</sup>、また、筋電図を用いた引き技動作の研究はなされていない。

今回、研究対象とする引き技はまず対戦相手と接近した状態（鏝競り合い）から一步後方へ移動し、対戦相手から離れる。その時、打突可能な部位（面、小手など）を素早く打つ技である<sup>13)</sup>。一方、正面打突では、上肢における竹刀の振り上げから振り下ろしまでの上下動作に加え、前方移動するために下肢との協調性が重要になってくる<sup>6)</sup>。このように上肢下肢の一連の動作が多く要求される正面打突に比べ、引き技は比較的上肢のみを中心とした単純な試技であり、実験を行うにあたって適した動作課題であると考えられる。

この打突課題動作に対して筋電図反応時間の計測を行うことにより、神経系や筋系の機能的特徴を如実に反映し中枢（pre-motor time）と末梢（motor time）との両過程に分けて評価することができ、打突時点を同定することで関節運動の開始から終了までの動作時間（action time）を知ることが可能になる。そこで、剣道競技者と非剣道競技者を比較することは、異なったトレーニングや鍛錬によるパフォーマンスの差異を明らかにすると同時に、引き技動作における筋電図学的傾向を見出すことができると考えられる。

そこで本研究は、上肢にフォーカスを当て光刺激に対して剣道の引き面及び引き小動作を素早く行う課題を設定し、筋電図反応時間を用いて剣道競技者及び非剣道競技者を対象に打突課題動作における反応時間を検討するとともに、上肢における筋活動様式を比較することを目的とした。

## II. 実験方法

### II-A. 被験者及びプロトコール

被験者は、健康な男子体育学専攻学生計14名（年齢： $21.7 \pm 1.0$ 歳，身長： $169.7 \pm 7.0$ cm，体重： $67.5 \pm 7.2$ kg）とし、このうち剣道を専攻する男子学生（剣道競技暦： $13.6 \pm 2.4$ 年）の7名、および剣道経験のない男子学生（非剣道競技者）の7名とし、剣道競技者は、剣道3段以上であった。被験者には本研究の目的及び実験実施内容を説明し、実験参加の同意を得た。また、本研究の内容はヘルシンキ宣言に基づき、鹿屋体育大学研究倫理指針を遵守して実施された。

人体を模した剣道の打ち込み台には、前頭部と右手関節部に相当する位置に加速度計（TA-513G, 日本光電）を、また、打ち込み台の前頭部側方に発光装置を設置した。被験者の肘関節にはエレクトロゴニオメータ（Model-MLTS 700, Delsys, USA）を装着し、左右の上腕二頭筋、左右の上腕三頭筋、右尺側手根屈筋に筋電図用表面電極を置いた。被験者は打ち込み台の前頭部及び右手関節部の位置から1m離れた場所に立ち、肘関節角度を一定（ $90^\circ$ ）にした状態から光刺激を合図に出来る限り素早く竹刀（3尺9寸： $1\text{m}20\text{cm}$ ，重さ510g）で引き面（HM）及び引き小手（HK）の2種類の打突動作をそれぞれ10回行った。光刺激の提示は、被験者が準備姿勢を保ってからランダムな時間間隔（2～6秒）で行った。このとき、光刺激信号、筋電図、肘関節角度、打突衝撃信号を記録し、A/D変換機でパーソナルコンピュータに取り込んだ。また、実験実施中には被験者の右側方よりビデオカメラで動作を撮影した。

実験室の環境は、温度 $21.9 \pm 1.2$ ，湿度 $51.0 \pm 12.1\%$ ，音レベル $33.0 \pm 0.6\text{dB}$ ，明るさ $298.3 \pm 22.2$  Lux であり、静寂かつ薄明な環境にてすべての実験を実施した。

### II-B. 筋電図の記録

左右上腕二頭筋（L-BB, R-BB），左右上腕三頭

筋 (L-TB, R-TB), 右尺側手根屈筋 (R-FCU) の各筋腹中央にプリアンプ付表面電極を置き, 表面電極導出法により打突課題遂行時の筋放電活動を記録した。電極には銀製の平行バー電極 (DE-2.1, DELSYS, USA; 長さ10mm直径1mm, 電極間距離1cm) を使用し, 皮膚抵抗を出来るだけ小さくするために電極設置箇所の周りの体毛を剃り, 消毒用のエタノールで脱脂した。アース電極は前腕の上腕骨内側上顆の皮膚上に置いた。筋電図記録において, 近接の機器からの干渉波などのノイズが混入しないかをモニター及び記録紙上で確認し実験を開始した。導出された電気信号は筋電図記録システム (Bagnoli-8 EMG System, Delsys) を通してデータレコーダ (RD-135T, TEAC) に保存され, また, アナログ/デジタル (A/D) 変換機 (16bit, PowerLab/8sp, ADInstruments, Japan) を介してパーソナルコンピュータ (PC) にサンプリング周波数1000Hzで取り込まれ, 波形表示解析ソフト (Chart5.4, ADInstruments) を用いて解析を行った。

## II-C. ビデオ撮影

打突課題遂行前の姿勢や肘関節角度に着目して, 右側方からの被験者をビデオカメラ (NV-DJ100, Panasonic, Japan) で撮影した。得られた映像から課題遂行前の姿勢や関節角度をモニターし, 各試行において姿勢や肘関節角度が一定になるよう確認に用いた。実験開始前には毎回空間座標のキャリブレーションを行った。

## II-D. データ分析及び統計処理

光刺激時点は発光装置のスイッチ信号により, 筋放電開始時点は各筋の表面筋電図の信号により, 肘関節伸展開始時点はエレクトロゴニオメータの信号により, 打突衝撃時点は打ち込み台に設置された加速度計からの衝撃反応信号によりそれぞれ同定された。筋放電開始時点の計測には DiFabio *et al*<sup>11)</sup> の方法に基づいて実施した。各筋放電信号を全波整流 (time constant : 0.05s) し, 次に光刺

激シグナルが発生してから手前50msの範囲をサンプリングし, 平均値と標準偏差 (SD) を求め各々の動作前基準値とした。そしてこの基準値から +3SDの閾値レベルを設定し, そのレベルを連続25ポイント越えたとき筋活動が生じたと判断した。筋活動イベントと判断された場合, さらに +3SD閾値時点から戻り, +1.5SD閾値レベルを越えたときの時間を返して, 筋放電開始時点とした。この筋放電開始時点を基に, 各筋の活動参加順序を求めた。

光刺激開始時点から打突衝撃発生時点までの時間を, 引き面及び引き小手における打突課題遂行時間 (total task time : TTT) として計測した。また, この課題遂行時間の内, 光刺激開始時点から筋放電開始時点までの時間を pre-motor time (PMT), 筋放電開始時点から肘関節が伸展し始めるまでの時間を motor time (MT), 肘関節伸展開始時点から打突衝撃発生時点までの時間を打突動作時間 (action time : AT) と3つに区分した。

また, 各筋における筋放電活動を定量化するために, MT 及び AT 期間における筋電図平均振幅を計測した。各打突課題10試行の計測データについて, 剣道競技者群, 非剣道競技者群並びに全被験者の平均値と標準偏差を算出した。算出されたデータを基に, 課題動作様式の差異や剣道経験の有無について比較検討した。

2群間の平均値の差の検定において, 剣道競技者と非剣道競技者の比較については対応のない *t* 検定を, HM と HK の動作様式の差異の比較については対応のある *t* 検定を行った。有意水準は5%未満とした。

## III. 結果

### III-A. 筋活動開始順序

引き面及び引き小手動作における打突課題遂行時間 (HM-TTT, HK-TTT) 並びに pre-motor time (PMT), motor time (MT), 打突動作時間 (AT) について全被験者の平均値並びに標準偏差を Table 1

に示した。引き面と引き小手との異なった動作による比較では、TTTとATにおいて引き小手動作の方がそれぞれ約38ms、約28msと有意に(p<0.01)長く、PMT並びにMTにおいては有意な差は認められなかった。剣道競技者と非剣道競技者の剣道経験の有無による比較では、TTT、PMT、MT、AT並びにATのいずれにおいても有意な差は見られなかった。そこで、剣道競技者と非剣道競技者による各打突課題遂行時の各筋の活動開始順序をFig. 1に示した。非剣道競技者は引き面及び引き小手のいずれの動作においても変化なく、同様の活動開始順序を示したのに対し、競技者は課題動作様式の違いによって順序が変化することが観察された。

Ⅲ-B. 竹刀の回転と止めに関わる筋活動開始時間

各課題の打突動作において、右手の押しと左手の引きの同期的な作用は竹刀を回転する方向へ働く。そこで、引き面及び引き小手動作における竹刀の回転方向に働く右上腕三頭筋と左上腕二頭筋の活動開始時間の差を検討した(Fig. 2)。剣道競技者及び非剣道競技者ともに、右上腕三頭筋に続いて左上腕二頭筋が活動開始し、その時間差は引き面では両者とも約27.0msであり、引き小手では剣道競技者が59.2ms、非剣道競技者が30.7msと、剣道競技者においては引き面のときよりも有意に(p<0.05)長くなった。

また、打突直前に竹刀を止める方向に働く右上腕二頭筋の筋活動開始のタイミングについて検討した(Fig. 3)。打突衝撃時点を基準点とし、その

Table 1 HM 及び HK における課題遂行時間 (TTT), PMT, MT, AT による比較並びに剣道経験の有無による比較

		TTT (ms)	PMT (ms)	MT (ms)	AT (ms)
Mean (n=14)	HM	320.9 ± 37.3	159.1 ± 29.9	66.3 ± 13.4	95.5 ± 21.0
	HK	358.9 ± 50.6**	159.7 ± 39.9	75.5 ± 19.1	123.6 ± 24.6**
Kendo athlete (n=7)	HM	324.1 ± 48.6	165.1 ± 34.5	63.4 ± 18.0	95.6 ± 25.3
	HK	359.8 ± 65.0*	160.8 ± 46.0	82.6 ± 20.4**	116.3 ± 29.8**
Non-kendo athlete (n=7)	HM	317.6 ± 25.1	153.1 ± 25.8	69.1 ± 6.7	95.4 ± 17.7
	HK	358.0 ± 36.2**	158.6 ± 36.4	68.4 ± 15.9	130.9 ± 17.3**

HM vs HK, \*: p<0.05, \*\*: p<0.01

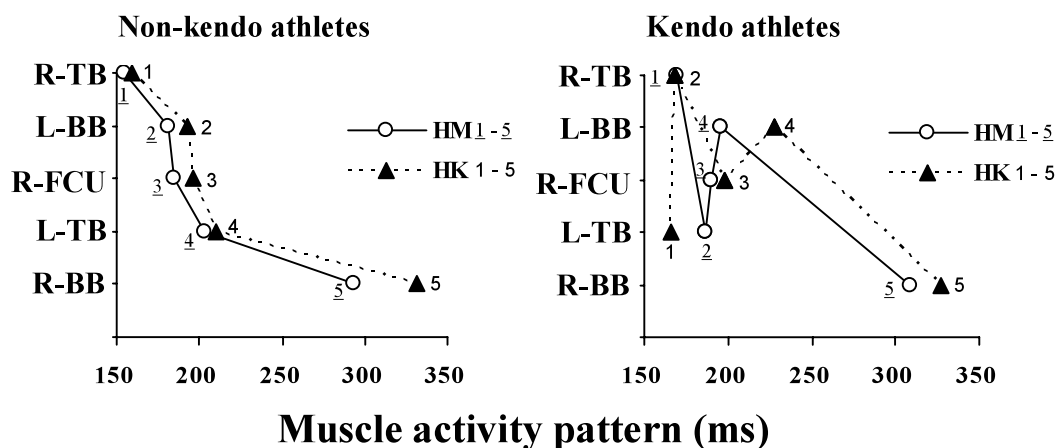


Fig. 1 引き面(HM)及び引き小手(HK)動作における剣道競技者及び非剣道競技者の上肢の筋活動開始順序

直前に開始される筋放電活動の時間を計測した。非剣道競技者では、引き面及び引き小手ともに打突直前の約28msで放電を開始するのに対し、剣道競技者では、引き面の場合15msで、引き小手の場合38msで活動を開始しており、引き面よりも引き小手は有意に ( $p < 0.05$ ) 早く活動した。

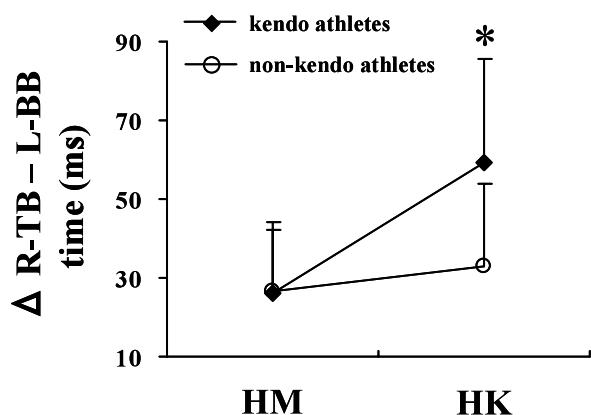


Fig. 2 竹刀の回転方向に働く右上腕三頭筋と左上腕二頭筋との活動開始時間の差

### III-C. 竹刀の回転と止めに関わる筋活動量

竹刀の回転方向に働く右上腕三頭筋及び左上腕二頭筋の筋放電活動に関して、動作様式の違いによる変化について検討した (Fig. 4A, B)。右上腕三頭筋と左上腕二頭筋のMT期間の筋放電活動では、剣道競技者において平均筋電図に有意な差は

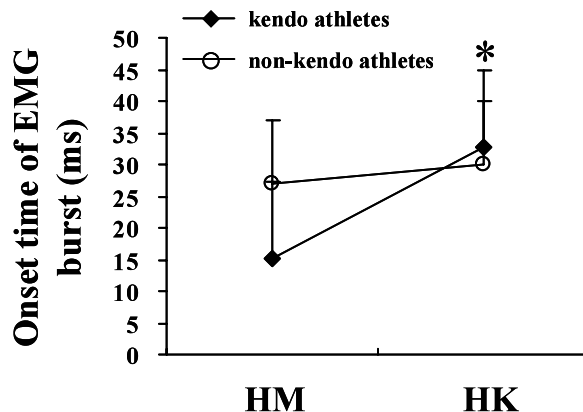


Fig. 3 HM 及び HK における右上腕二頭筋の活動開始時間

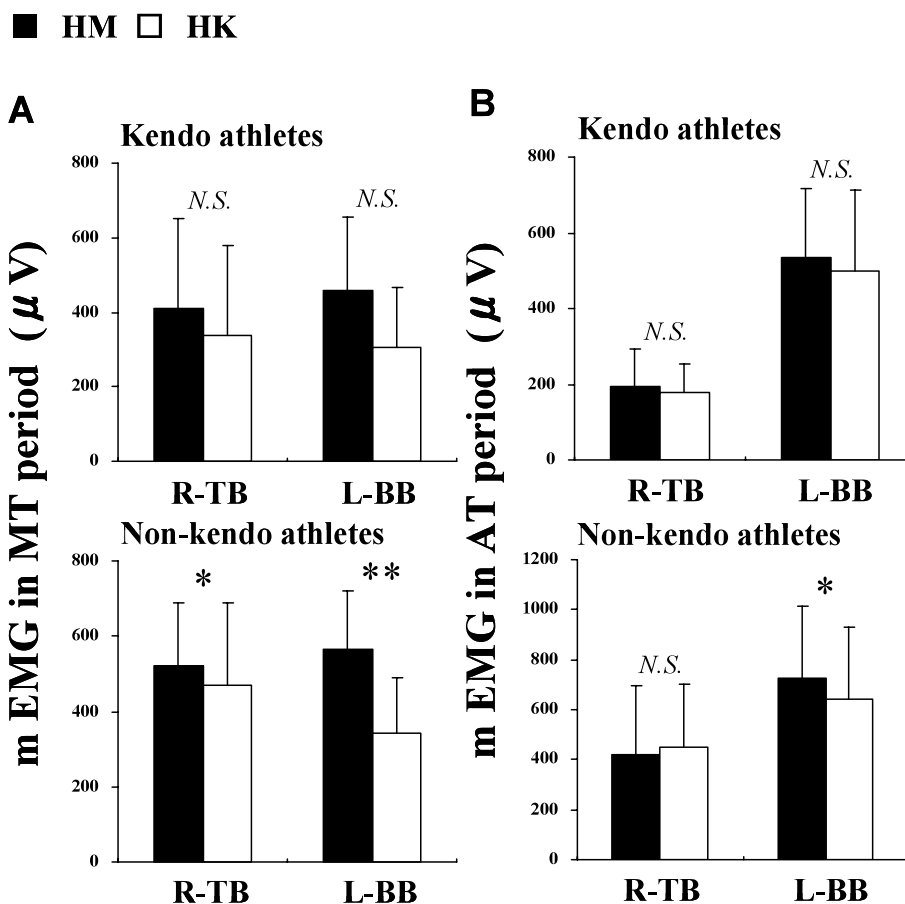


Fig. 4 MT (A) 及び AT (B) 期間における右上腕三頭筋と左上腕二頭筋のHMとHKとの関係

## ■ HM □ HK

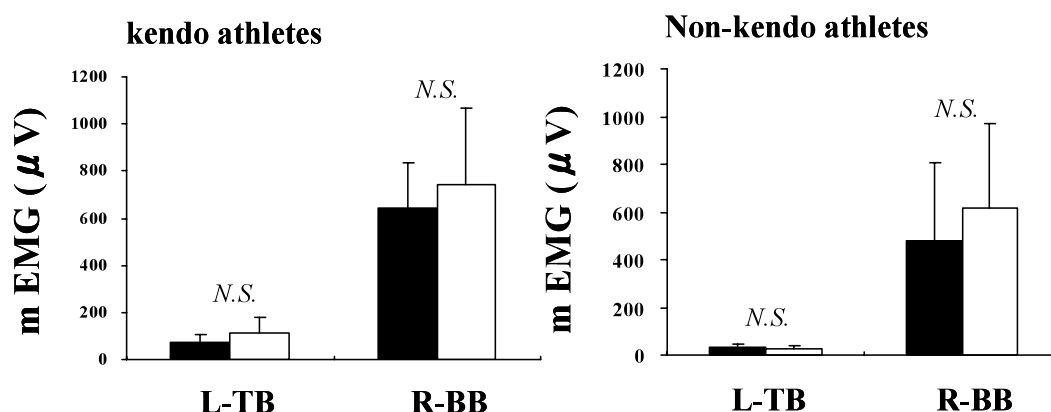


Fig. 5 竹刀の止める方向へ働く右上腕二頭筋及び左上腕三頭筋の筋電図平均振幅のHMとHKとの比較

見られなかったが、非剣道競技者では右上腕三頭筋と左上腕二頭筋で引き小手よりも引き面のときの方が有意に（右上腕三頭筋： $p < 0.05$ ，左上腕二頭筋： $p < 0.01$ ）大きな値を示した（Fig. 4A）。また，AT 期間での剣道競技者において，平均筋電図に有意な差は見られず，非剣道競技者では左上腕二頭筋において有意な（ $p < 0.05$ ）差が見られた（Fig. 4B）。一方，打突直前に竹刀の止め方向へ働く左上腕三頭筋と右上腕二頭筋の平均筋電図について，引き面と引き小手動作時を比較したが，剣道競技者及び非剣道競技者ともに有意な差は見られなかった（Fig. 5）。

#### IV. 考察

##### IV-A. 剣道競技者と非剣道競技者における筋の活動開始順序

引き面や引き小手といった異なる動作様式での各筋の活動開始順序において，剣道競技者と非剣道競技者とは異なった筋活動開始順序を示した。非剣道競技者は引き面でも引き小手でも筋活動順序が変化せず，ステレオタイプなパターンを示した。一方，剣道競技者は非剣道競技者とも異なる筋活動開始順序であっただけでなく，動作様式の違いによって活動開始順序が変化した。

これまでの筋電図を用いた研究において，各競

技種目における競技者と非競技者の比較ではいずれも筋活動パターンが異なることが報告されており<sup>1) 3) 9) 17) 18) 19)</sup>，これらは長期にわたる特異的な動作トレーニングによって神経-筋系の適応が反映しているものと考えられる。従って，本研究の剣道競技者に見られる打突様式依存性の筋活動開始パターンの変化は，竹刀を用いた打突動作において，合目的な運動制御様式が獲得されたことを意味している。打突動作の効率や合目的性といった習熟特性を表現しており，それらを理解するうえでも重要な特徴であろうと思われる。

##### IV-B. 打突課題遂行時間とその構成要素

本研究における引き面及び引き小手打突課題遂行時間並びにその時間要素において，剣道競技者と非剣道競技者との間には有意な差は見られなかった。このことは，本研究における被験者においては剣道経験の有無に関係なく，視覚刺激による反応時間に関する神経-筋機能水準が同等であったことが理解される。剣道と空手の競技者によるPMT, MT, RTを比較した研究では，それらに有意な差は見られず，同年代の非鍛錬者と比較すると短いことが報告されている<sup>12)</sup>。これらは武道におけるトレーニングに限らず，日常的に反応の速さや素早い力発揮が要求されるパリスティックな運動トレーニング実施による反応時間短縮への効

果の普遍性を反映する<sup>4) 12) 16)</sup>ものと思われる。また、本実験での課題動作は多関節を用いた複雑な組み合わせ動作ではなく、比較的シンプルな動作であり、神経-筋機能の時間要素をより反映しやすい条件であったことも含め、剣道競技者並びに非剣道競技者に差が見られなかったものと考えられる。

従って、本研究による各打突反応時間が剣道経験の有無に関らず同等であり、かつ打突動作時の筋活動様式における剣道経験の有無による差異は、反応時間の遅速に関連する神経-筋機能水準の違いによるものではなく、剣道の打突動作を日々反復してきたことによる適応、すなわち神経系の調節機能を反映するものとして考察できよう。

#### IV-C. 竹刀の回転並びに止める方向に働く筋活動様式

一般に剣道競技において、短時間内での竹刀の回転（移動）と止め（制止）を打突時に必要とするのが特徴であり、繰り返される打突動作をより円滑にするための重要な活動様式である<sup>10)</sup>。また、これらは剣道競技における打突技術の習得状況が強く反映されるものと考えられ、これまでの正面打突に関する先行研究では、剣道競技者と非剣道競技者の比較において両群で活動様式が異なることが報告されている<sup>10) 19)</sup>。

本研究において、引き面及び引き小手における竹刀の回転並びに止め方向に働く筋の活動様式 (Fig.2, 3, 4, 5) を通覧し、特筆すべき成績について検討すると、Fig.2, 3 に示された竹刀の回転並びに止めに関する時間（タイミング）では、剣道競技者は動作様式の違いに応じてタイミングが変化するのに対し、非剣道競技者では変化が見られなかった。また、その時の各筋活動様式における筋活動量を検討するため筋電図を定量化したところ、Fig. 4 に示されたように竹刀の回転において、剣道競技者では各動作間での平均筋電図に有意な差は見られなかったが、非剣道競技者では打突動作の違いに応じて活動量が有意に変化した。

竹刀の回転及び止める方向に働く筋の活動様式において、剣道競技者は主として活動時間（タイミング）を変化させて異なる打突動作様式に対応しているのに対して（時間調節型）、非剣道競技者では主として筋活動量を変化させて異なる打突動作様式に対応している（活動量調節型）ものと推察された。これらは繰り返してトレーニングされる打突動作特異性の適応を介した神経系の調節機能による違いを反映しているものと考えられた。

## V. 総括

本研究では剣道の引き面及び引き小手動作を用いて、光刺激の合図から打突終了までの各打突課題遂行時間を筋電図の記録から観察し、剣道競技者と非剣道競技者の反応時間並びに上肢の筋活動様式を比較検討した。

引き面及び引き小手打突動作において、両群の比較では各打突課題遂行時間並びに時間要素に差は見られず、日常的にバリエーション豊富な運動トレーニングを実施している成人男性に対して本研究における比較的シンプルな運動課題では差異がないことが明らかとなった。一方、筋活動開始順序は両群で異なり、ステレオタイプの非剣道競技者に対して、剣道競技者では各打突課題動作に応じて変化するのが見られた。また、各課題動作中における竹刀の回転並びに止める方向に働く筋活動様式では、時間調節型の剣道競技者に対して、活動量調節型の非剣道競技者との両群での差異が明らかになった。

以上のことより、日常的にバリエーション豊富な運動トレーニングを実施している成人男性では、打突課題遂行時間や時間要素による反応時間において差はないが、各動作様式において剣道競技者と非剣道競技者にそれぞれ特有の筋活動調節様式が存在することが示唆された。

## 文献

- 1) Clarys, J. P., Cabri, J. (1993) Electromyography and

- the study of sports movements: a review. *J Sports Sci.* 11 : 379-448.
- 2) DiFabio, R. P. (1987) Reliability of Computerized Surface Electromyography for Determining the Onset of Muscle Activity. *Phys. Ther.* 67 : 43-48.
- 3) Girard, O., Micallef, J. P., Millet, G. P. (2005) Lower-limb activity during the power serve in tennis: effects of performance level. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37 : 1021-1029.
- 4) Harbin, G., Durst, L., Harbin, D. (1989) Evaluation of oculomotor response in relationship to sports performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 21 : 258-262.
- 5) 福本修二, 辰沼広吉, 中野八十二, 坪井三郎 (1970) 剣道打撃動作に関する上肢の作用について. *体育学研究* 14 : 145.
- 6) 福本修二, 中野八十二, 坪井三郎 (1971) 剣道の打撃動作における一考察 : 上肢と下肢との協調について. *日本体力学大会号* 22 : 264.
- 7) 福本修二, 坪井三郎 (1975) 剣道の上肢作用による身体への影響. *武道学研究* 10 : 9-18.
- 8) 福本修二, 坪井三郎 (1975) 剣道の打突時における筋電図学的研究 : 打突時の手首の作用による前腕の筋電図. *日本体力医学会* 36 : 749.
- 9) Illyes, A., Kiss, R. M. (2005) Shoulder muscle activity during pushing, pulling, elevation and overhead throw. *J. Electromyogr. Kinesiol.* 15 : 282-289.
- 10) 小林一敏 (1966) 剣道における打撃について. *体育の科学* 16 : 656-660.
- 11) 倉田博, 柳本昭人, 小野三嗣 (1968) 剣道選手における神経筋協応能の特徴について. *体力科学* 17 : 132-133.
- 12) Lee, J. B., Matsumoto, T., Othman, T., Yamauchi, M., Taimura, A., Kaneda, E., Ohwatari, N., Kosaka, M. (1999) Coactivation of the flexor muscles as a synergist with the extensors during ballistic finger extension movement in trained kendo and karate athletes. *Int. J. Sports Med.* 20 : 7-11.
- 13) 松延市次, 山崎士, 野島哲二 (1995) 図解コーチ 剣道 : 第3章 剣道の技. 成美堂出版 : 東京, pp. 36-128.
- 14) 小野三嗣, 尾谷良行, 高橋泰光, 坪田修三, 倉田博 (1968) 剣道における神経筋協応能について. *体力科学* 17 : 1-13.
- 15) 小野三嗣, 柳本昭人, 山下富士男, 倉田博 (1969) 剣道選手における神経筋協応能について第2報. *体力科学* 18 : 72-82.
- 16) Taimela, S. (1992) Information processing and accidental injuries. *Sports Med.* 14 : 366-375.
- 17) 丹羽昇, 猪飼道夫 (1966) 剣道における基本打撃動作の筋電図学的分析. *体育学研究* 10 : 232.
- 18) 坪井三郎 (1968) 剣道打撃動作の筋電図学的研究. *体力科学* 17 : 155.
- 19) 坪井三郎 (1973) 剣道に関する動的姿勢の研究 : 基本打撃動作の姿勢分析. *体育学研究* 18 : 71-81.
- 20) 山神眞一, 百鬼史訓, 大矢稔, 横山直也, 田中幸夫, 田中秀幸 (1993) 剣道における「引き面」の打撃力に関するバイオメカニクス的研究. *日本体育学会大会号* 44 : 397.
- 21) Yamagami, S., Nakiri, F., Okada, Y., Ae, M. (1994) Impact forces of the TOBIKOMI-MEN and HIKI-MEN striking in kendo. *J. Biomech.* 27 : 697.