

剣道の打突動作時における生体への影響

八重樫 正彦・宮脇 和人

The effect of kendo strike-movement within the body

Masahiko YAEGASHI and Kazuto MIYAWAKI

(平成22年11月26日受理)

Kendo is a Japanese bamboo sword-fighting sport where protective armours are used. When you make a strike, you have to strongly step forward with the right foot after kicking the ground strongly with the left foot. For this action to be successful, muscular strength and lower limbs-muscle power is required. So far in the research of the Kendo competition, the measurement of floor reaction force which uses force plate was too much.

1. 緒言

最近ではスポーツトレーニング科学などでさまざまなスポーツが科学的に分析されている。その中から剣道を選んだのは、私が剣道の経験者であり、剣道の動作を計測し科学的に分析することに興味を持ったからである。

剣道とは剣道具を装具し、竹刀を用いて刃筋正しく有効となる相手の体の部位を打突する対人競技である。剣道競技では相手を実際に打突する上半身が注目されがちだが、それ以上に下半身の使い方が非常に重要である。剣道を始めた初心者は、素振りなどの練習に加え、すり足と呼ばれる独特の足運びも練習する。相手より速く打突するには、腕の振りの速さも重要だが、相手により速く接近するために、蹴り足と、踏み込み足が重要となる。腕の振りが速くても相手まで届かなければ打突することが出来ない。このように下肢の筋力に重要さを感じた。

剣道では、図1のように右足前、左足後ろの半身の体勢で構え、左足で床を強く蹴り、右足で強く踏

み込む。

これまでの剣道競技の研究は、竹刀による打突力の測定やフォースプレートを用いた床反力の測定、および下肢の筋力の測定などがほとんどであり、剣道の動作における人間の体にかかるモーメントの評価はほとんど行われていない⁽¹⁾⁽²⁾。そのため、蹴り動作、踏み込み動作時の下肢の動作を評価するために、床反力、各関節の軌跡を計測し、逆動力学的手法を用いて関節モーメントについて検討した。

2. 人体解析モデル

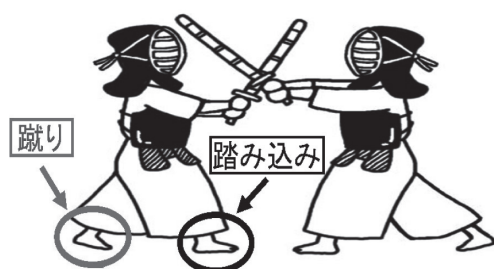


図1 剣道の打突動作

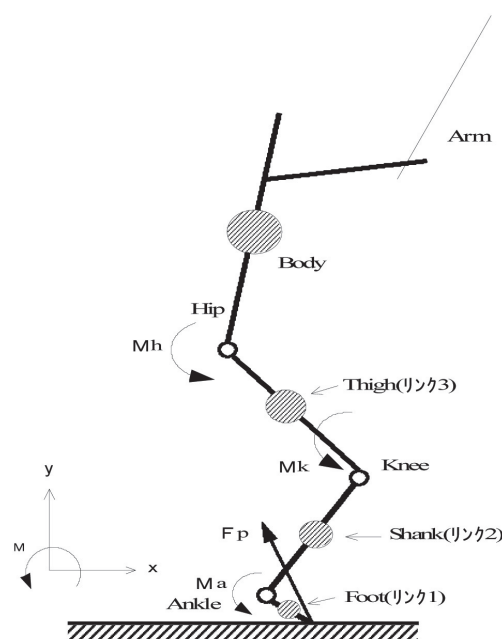


図2 リンクモデル

人が打突の動作を行っている状態を図2のような2次元の剛体リンクモデルで表す。各リンクは、足部 (Foot), 下腿部 (Shank), 大腿部 (Thigh), 胴体部 (Body), 腕部 (Arm) で構成されている。

人体のモデル化においては、以下の様な仮定を設けた。

- (1) 剣道の動作に伴う身体各部の運動は、進行方向の面内で起こる。
- (2) 各節は剛体リンクと考え、重心は関節間の軸上に位置する。
- (3) 各関節は1軸の回転関節とする。

重力や加速度を考慮して各関節に作用する水平方向の力と鉛直方向の力とモーメントの釣り合いから動学的に足関節、膝関節、股関節の関節モーメント M_a , M_k , M_h を評価した。

足部、下腿部、大腿部に関する各関節モーメントの関係式を以下に示す。

2-1 足部 (Foot)

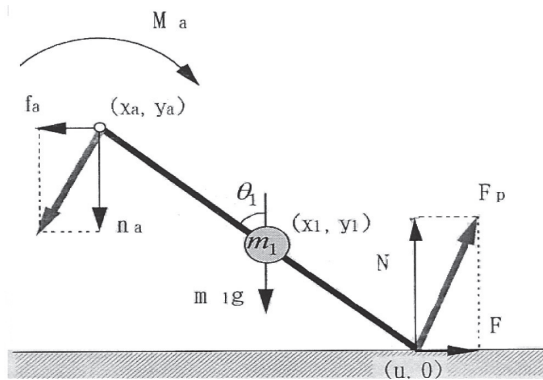


図3 リンク1 (Foot)

- ・ X 軸方向の並進運動

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3 + m_4 \ddot{x}_4 = F$$

$$f_a = m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3 + m_4 \ddot{x}_4$$

とおけば、

$$m_1 \ddot{x}_1 + f_a = F$$

$$\therefore f_a = F - m_1 \ddot{x}_1$$

- ・ Y 軸方向の並進運動

$$m_1 \ddot{y}_1 + m_2 \ddot{y}_2 + m_3 \ddot{y}_3 + m_4 \ddot{y}_4 = N - (m_1 g + m_2 g + m_3 g + m_4 g)$$

$$n_a = m_2 (\ddot{y}_2 + g) + m_3 (\ddot{y}_3 + g) + m_4 (\ddot{y}_4 + g)$$

とおけば、

$$m_1 (\ddot{y}_1 + g) + n_a = N$$

$$\therefore n_a = N - m_1 (\ddot{y}_1 + g)$$

- ・ 重心まわりの回転運動

$$I_1 \ddot{\theta}_1 = F(y_1 - 0) + f_a(y_a - y_1) + N(u - x_1) + n_a(x_1 - x_a) - M_a = F(y_1 - 0)(F - m_1 \ddot{x}_1)(y_a - y_1) + N(u - x_1)(N - m_1(\ddot{y}_1 + g))(x_1 - x_a) - M_a$$

したがって、足関節が発生している関節モーメント M_a は

$$M_a = -I_a \ddot{\theta}_a + F(y_1 - 0) + (F - m_1 \ddot{x}_1)(y_a - y_1) + N(u - x_1)(N - m_1(\ddot{y}_1 + g))(x_1 - x_a)$$

2-2 下腿部 (Shank)

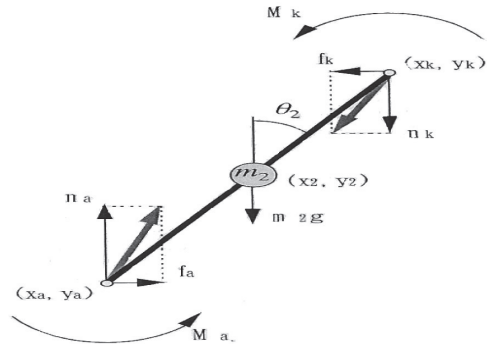


図4 リンク2 (Shank)

- ・ X 軸方向の並進運動

$$f_k = m_3 \ddot{x}_3 + m_4 \ddot{x}_4$$

とおけば、

$$m_2 \ddot{x}_2 + f_k = (F - m_1 \ddot{x}_1)$$

$$\therefore f_k = F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2$$

- ・ Y 軸方向の並進運動

$$m_2 \ddot{y}_2 + m_3 \ddot{y}_3 + m_4 \ddot{y}_4 = (N - m_1(\ddot{y}_1 + g)) + n_s - (m_2 g + m_3 g + m_4 g) \\ n_k = m_3 (\ddot{y}_3 + g) + m_4 (\ddot{y}_4 + g) - n_s$$

とおけば、

$$m_2 (\ddot{y}_2 + g) + n_k = (N - m_1(\ddot{y}_1 + g))$$

$$\therefore n_k = N - m_1(\ddot{y}_1 + g) - m_2(\ddot{y}_2 + g)$$

- ・ 重心まわりの回転運動

$$I_2 \ddot{\theta}_2 = (F - m_1 \ddot{x}_1)(y_2 - y_a) + f_k(y_k - y_2) - (N - m_1(\ddot{y}_1 + g))(x_2 - x_a) - n_k(x_k - x_2) + M_a + M_k$$

$$\begin{aligned}
 &= (F - m_1 \ddot{x}_1) (y_2 - y_a) \\
 &+ (F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2) (y_k - y_2) \\
 &- (N - m_1 (\dot{y}_1 + g)) (x_2 - x_a) - (N - m_1 (\dot{y}_1 + g)) \\
 &- m_2 (\dot{y}_2 + g) (x_k - x_2) + M_a + M_k
 \end{aligned}$$

したがって、膝関節が発生している関節モーメント M_k は、

$$\begin{aligned}
 M_k &= -I_2 \ddot{\theta}_2 + (F - m_1 \ddot{x}_1) (y_2 - y_a) \\
 &+ (F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2) (y_k - y_2) \\
 &- (N - m_1 (\dot{y}_1 + g)) (x_2 - x_a) \\
 &- (N - m_1 (\dot{y}_1 + g) - m_2 (\dot{y}_2 + g)) (x_k - x_2) + M_a
 \end{aligned}$$

2-3 大腿部 (Thigh)

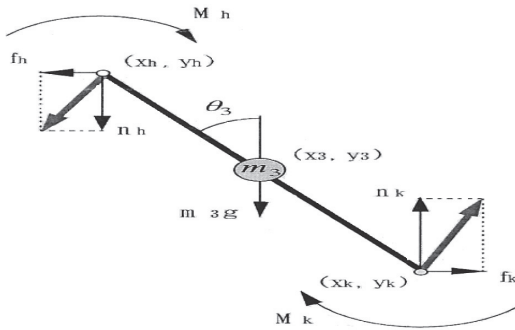


図5 リンク3 (Thigh)

・ X 軸方向の並進運動

$$\begin{aligned}
 m_3 \ddot{x}_3 + m_4 \ddot{x}_4 &= (F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2) \\
 f_h &= m_4 \ddot{x}_4
 \end{aligned}$$

とおけば、

$$\begin{aligned}
 m_3 \ddot{x}_3 + f_h &= (F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2) \\
 \therefore f_h &= F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2 - m_3 \ddot{x}_3
 \end{aligned}$$

・ Y 軸方向の並進運動

$$\begin{aligned}
 m_3 \ddot{y}_3 + m_4 \ddot{y}_4 &= (N - m_1 (\dot{y}_1 + g) - m_2 (\dot{y}_2 + g)) - (m_3 g + m_4 g) \\
 n_h &= m_4 (\ddot{y}_4 + g)
 \end{aligned}$$

とおけば、

$$\begin{aligned}
 m_3 (\dot{y}_3 + g) + n_h &= (N - m_1 (\dot{y}_1 + g) - m_2 (\dot{y}_2 + g)) \\
 \therefore n_h &= N - m_1 (\dot{y}_1 + g) \\
 &- m_2 (\dot{y}_2 + g) - m_3 (\dot{y}_3 + g)
 \end{aligned}$$

・ 重心まわりの回転運動

$$\begin{aligned}
 I_3 \ddot{\theta}_3 &= (F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2) (y_3 - y_k) + f_h (y_h - y_3) \\
 &+ (N - m_1 (\dot{y}_1 + g) - m_2 (\dot{y}_2 + g)) (x_k - x_3) + n_h (x_3 - x_h) \\
 &- M_k - M_h
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2) (y_3 - y_k) \\
 &+ (F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2 - m_3 \ddot{x}_3) (y_h - y_3) \\
 &+ (N - m_1 (\dot{y}_1 + g) - m_2 (\dot{y}_2 + g)) (x_k - x_3) \\
 &+ (N - m_1 (\dot{y}_1 + g) - m_2 (\dot{y}_2 + g)) \\
 &- m_3 (\dot{y}_3 + g) (x_3 - x_h) \\
 &- M_k + M_h
 \end{aligned}$$

したがって、股関節が発生している関節モーメント M_h は、

$$\begin{aligned}
 M_h &= -I_3 \ddot{\theta}_3 + (F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2) (y_3 - y_k) \\
 &+ (F - m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2 - m_3 \ddot{x}_3) (y_h - y_3) \\
 &+ (N - m_1 (\dot{y}_1 + g) - m_2 (\dot{y}_2 + g)) (x_k - x_3) \\
 &+ (N - m_1 (\dot{y}_1 + g) - m_2 (\dot{y}_2 + g)) \\
 &- m_3 (\dot{y}_3 + g) (x_3 - x_h) - M_k
 \end{aligned}$$

運動方程式を構成している物理量を以下に示す。

- f : X 軸方向関節間力
 - n : Y 軸方向関節間力
 - F : X 軸方向床反力
 - N : Y 軸方向床反力
 - x : リンク重心および関節の X 方向変位
 - \ddot{x} : リンク重心および関節の x 方向加速度
 - y : リンク重心および関節の Y 方向変位
 - \ddot{y} : リンク重心および関節の y 方向加速度
 - g : 重力加速度
 - m : リンク質量
 - M : 関節モーメント
 - I : 重心まわりのリンク慣性モーメント
 - θ : Y 軸に対するリンク角度
 - $\ddot{\theta}$: Y 軸に対するリンク角加速度
 - u : 床反力作用点 X 座標
- 添え字 a : 足関節,
 k : 膝関節, h : 股関節
 1 : 足部, 2 : 下腿部,
 3 : 大腿部, 4 : 上体

3. 実験

3-1 実験装置

実験評価のため被験者の動作測定には、標点の空間座標を計測する 3 次元解析装置 (Vicon140 : OXFORD METRICS Limited) と、床面に加わる力を測定する床反力装置 (9286 : KISTLER) を組み合わせたシステムを用いた。空間座標における測定精度は $\pm 1.5\text{mm}$ 以内、床反力の測定精度は $\pm 3\text{N}$ 以内である。5m \times 5m のフロアに赤外線カメラを設置した (図 6)。この時 3 次元の画像と床反力の

データはともに60Hzのサンプリング周波数で測定した。

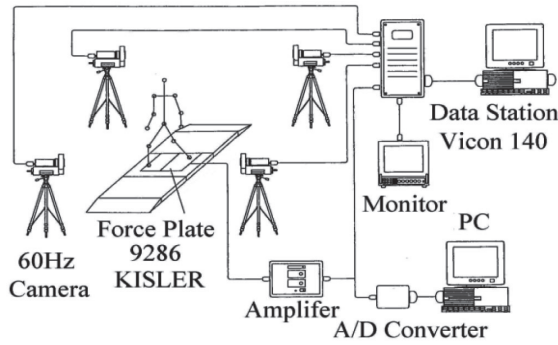


図6 実験装置

(1) 床反力装置

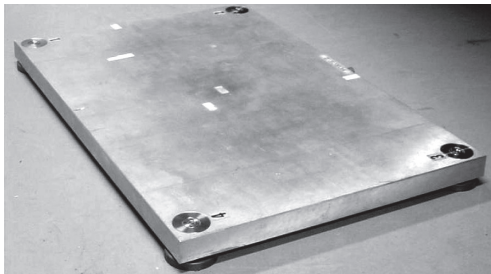


図7 床反力装置 フォースプレート9286

床反力を測定するために、今回は日本キスラー社のフォースプレート9286を使用した⁽³⁾。大きさは縦400×横600×厚さ35mmであり、搬送性に優れ、設置する際に場所をとらないという利点がある。他にも特徴として、

- ① 負荷許容範囲が-1.5kN~1.5kNのため、幅広い荷重の測定が可能である。
- ② 剛性が高いため300kHzと高く、短時間の衝撃力などの測定が可能である。

これらのことをふまえバイオメカニクス、整形外科、リハビリテーション、スポーツ工学等の研究に用いることができる。

(2) 3次元解析装置

剣道の踏み込み動作、蹴り動作を解析するために図8の装置を使用した。この装置は人間の様々な動きを三次元の座標データとして計測可能である。計測する際には、人体の主要な関節に目印となる反射マーカを取り付ける。そのマーカの動きを複数のカメラで追跡することで、3次元空間内での位置座標を特定し、コンピュータ上で動作を再現し、動作範

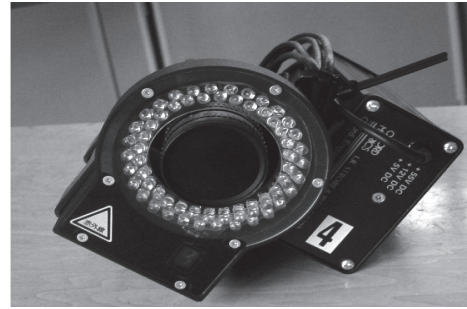


図8 3次元動作解析装置

囲や特性を把握することができる。なお、この位置座標データから2章人体解析モデルで示した手法で各関節の移動速度や角度、角速度、角加速度、関節モーメントなどが計算できる。

3-2 実験方法

被験者は20歳（有段者三段：身長171cm、体重70kg）と48歳（未経験者：身長170cm、体重65kg）の健常者2名で行った。被験者に対して実験の目的・内容を説明し十分なインフォームドコンセントが得られた後に実験を行った。打突動作の軌跡を測定するために標点は第五中足骨・足関節・膝関節・大転子・肩峰の5カ所に張り付けた。有段者・未経験者は共に、面の打突時の蹴り動作、踏み込み動作をそれぞれ3回測定した。

4. 実験結果と考察

4-1 実験結果

本研究においては、各動作において3回の測定を行ったところほぼ同様な傾向が得られたので、その代表的なデータを結果として、以下の図9~14に示す。

(1) 蹴り動作時の比較

図9に面の打突動作時における蹴り動作の床反力の鉛直方向成分を示す。ここでグラフの横軸が時間、縦軸が床反力であり、青線が有段者、赤線が未経験者である。有段者と未経験者の蹴り動作時の鉛直成分を比較した場合、有段者の場合は緩やかなタメの動作がみられ、瞬間的に大きな力が掛かっている。それに対し、未経験者はタメ動作などは見られず、瞬間的に力が発生している。ここでのタメ動作とは有段者の0.2secから1.3secの間に見られる約600Nの力のことである。

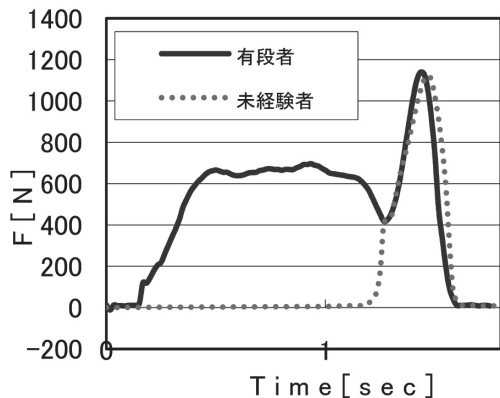


図9 蹴り動作時の鉛直成分

図10に面の打突動作時における蹴り動作の水平方向成分を示す。有段者と未経験者の蹴り動作時の水平成分を比較した場合、有段者は図10に示すようにマイナス方向への力（摩擦力）が発生し、その後、瞬間的な力が発生している。未経験者には有段者に見られた摩擦力は確認出来ず、瞬間的な力だけが発生している。ここでの摩擦力とは有段者の0.2secから0.9secの間にみられるマイナス方向に働いている力のことである。

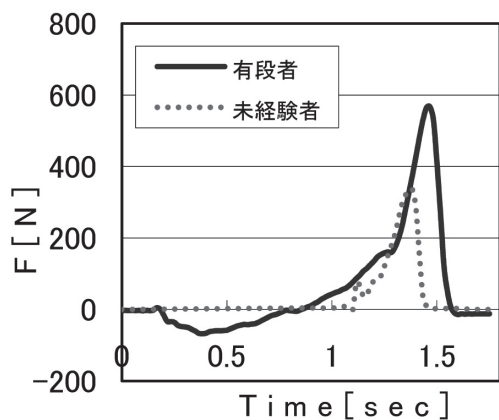


図10 蹴り動作時の水平成分

(2) 踏み込み動作時の比較

図11に踏み込み動作時の床反力の鉛直方向成分を示す。有段者と未経験者の踏み込み動作時の鉛直成分を比較した場合、有段者は早い段階でピークに達し、その後緩やかに下がっているが、未経験者は有段者と比較すると緩やかな曲線になっていた。

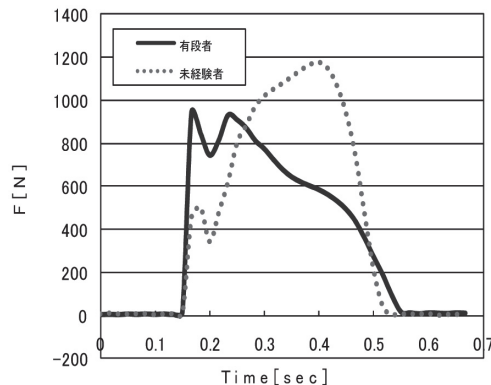


図11 踏み込み動作時の鉛直成分

図12に面の踏み込み動作時における床反力の水平方向成分を示す。有段者と未経験者の踏み込み動作時の水平成分を比較した場合、有段者は大きな摩擦力が発生しているのがわかる。未経験も摩擦力は発生しているが、有段者ほど大きな値ではなかった。

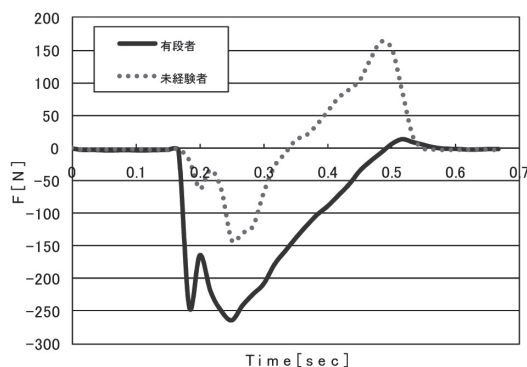


図12 踏み込み動作時の水平成分

(3) 関節モーメントの比較

図13, 14に有段者と未経験者の蹴り動作時の関節モーメントを示す。横軸が時間、縦軸がモーメントである。青線は足関節モーメント、赤線は膝関節モーメント、水色線は股関節モーメントである。

二つのグラフを比較した場合、有段者にはタメ動作があり、瞬間的に力が働いているのがわかる。未経験者の場合、タメ動作は見られず、すぐに力が働いているのがわかる。また、股関節モーメントが有段者とは逆向きを示した。

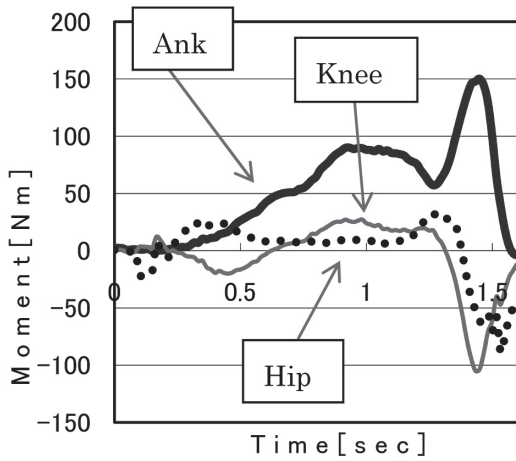


図13 有段者の関節モーメント

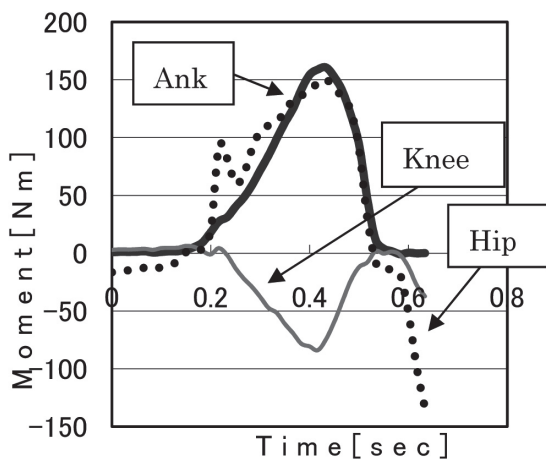


図14 未経験者の関節モーメント

4-2 考察

本研究で有段者と未経験者を比較して、面の蹴り動作で目立ったのはタメ動作の有無である。未経験者の場合には飛ぶ瞬間にのみ床に対して力が掛かるが、有段者の場合にはいつでも打突出来るように常に床にある程度の力が掛かっている。これがグラフにも現れたタメ動作と呼ばれるものだと考えられる。初心者がこのタメ動作を身につける場合には、ただ立っているのではなく、いつでも蹴り動作に移れるように、床に力を伝えた状態で足運びをする練習の必要があると考える。

踏み込み動作でみられた摩擦力は、有段者の場合に強く蹴り、強く踏み込む際ブレーキの役割として働いた力と考えられる。未経験者は床を蹴り目的地まで飛び着地した時点で動作は終了するが、有段者の場合、打突動作時に踏み込んだ後のすり足動作が体に身につけているため、その後の動作をスムーズに行うために自然に踏み込み足でブレーキをかけ

ていると考えられる。未経験者にもこのような摩擦力がみられるようになるには踏み込んだ後の動作も考えた足運びや体重移動を練習する必要がある。

関節モーメントのグラフで股関節モーメントが逆の値を示したが、これは有段者と未経験者において、構えてから打突動作が完了するまでの間の姿勢の違いによるものと考えられる。有段者は背筋を伸ばした姿勢をとるのに対し、未経験者は腰をまるめた猫背の様な姿勢で打突動作を行ったためと考えられる。これに関しては姿勢に気をつけ練習するしかないと考える。

5. 結言

本研究の剣道における有段者と未経験者の踏み込み動作、蹴り動作時の床反力、および、関節モーメントの評価により、以下のことが明らかになった。

- (1) 蹴り動作時、有段者にはタメの動作が見られたが、未経験者には見られなかった。また、有段者にはタメの動作時にわずかに摩擦力が発生していることも同時に確認した。
- (2) 踏み込み動作時、有段者は早い段階でピークに到達し、大きな摩擦力の発生も確認した。対して未経験者は緩やかな値を示し、摩擦力の発生も確認できなかった。
- (3) 関節モーメントでは、有段者にはタメ動作がみられ、どちらも床から足が離れる直後に大きなモーメントがかかっていることがわかった。

今後の課題としては、被験者の人数を増やし、より多くのデータを基に解析を行い、データの信用性を向上する。また、下肢の評価だけでなく、上肢の評価も同時に行い、打突の速さ等に下肢がどのように関係するか評価する。

参考文献

- (1) 政岡貴幸 他, 高校剣道選手の能力向上に関する研究, スポーツトレーニング科学 8, (2007), pp.73-79.
- (2) 西谷広大 他, 床反力-脚筋力-競技能力からみた剣道選手における打突動作の特性, スポーツトレーニング科学 6, (2005), pp.5-13.
- (3) 多成分フォースプレート9286取扱説明書キスラー社, pp.9-11