

テコンドローの前回し蹴りにおける力学的エネルギーフロー

木下 まどか^{1†}, 藤井 範久²¹筑波大学人間総合科学研究科, ²筑波大学体育系

要旨: 本研究の目的は WTF テコンドー競技の「はやい」前回し蹴り動作における力学的エネルギーに着目し分析することで、現在用いられている指導用語を再検討することであった。様々な競技レベルの男子テコンドー選手 13 名を被験者とし、中段前回し蹴りを行わせた。三次元動作分析装置および地面反力計を用いて動作を計測した。インパクトのキックスピードおよび試技時間により群分けを行った。結果は以下の通りである。1. 両群間で LEG UP 局面における力学的エネルギーの生成量は同程度であった。2. 両群間で力学的エネルギーの伝達の効率性が異なっていた。したがって、「はやい」蹴り動作を行うために、力学的エネルギーを蹴り脚足部に効率よく伝達するための動きを身に付けることが重要であると考えられる。また、相手選手に蹴り動作を予測されないように蹴る指導は、「はやい」蹴り動作に必要とされる動きの妨げになり、キックスピードの「速さ」、試技時間の「短さ」に関する技術の低下に繋がると推察された。

キーワード: 格闘技, エナジェティクス, スイング動作, 運動の連鎖, 指導用語の検討

1. はじめに

World Taekwondo Federation (世界テコンドー連盟) におけるテコンドー競技 (以下, テコンドー) は, 「はやい」蹴り動作が特徴的な競技である。試合に勝利するためには, 相手選手よりも多くのポイントを獲得する必要がある。そのためには, スピードが「速い」蹴りに加え, 相手に到達する時間が「短い」蹴り, 相手の動作への「早い」反応, 姿勢の「早い」立て直しなどが求められる。

これまでの研究¹⁻³⁾では, 試合における獲得ポイントの多くが前回し蹴りであることや, 前回し蹴りは初心者が最初に習得すべき基本的な技であることなど, 前回し蹴りの重要性が報告されている。しかし, 前回し蹴りを含め, テコンドーの競技力向上のためのバイオメカニクス研究はほとんどなく, また日本語で書かれた指導書も存在しない。したがって, 日本国内においては指導者の経験にもとづいた指導が行われているのが現状である。

木下と藤井⁴⁾は, テコンドー特有の「はやい」蹴り動作について, インパクト時の蹴り脚のキックスピードは蹴り脚股関節屈曲角速度および下胴左回旋角速度の急激な変化により生成される蹴り脚膝関節伸展角速度によって獲得されていることを明らかにした。また, インパクト時に「速い」スピード, 「短い」試技時間で蹴ることのできる上位群において, 蹴り脚大腿から下腿に作用する膝関節力モーメント

によって蹴り脚大腿が蹴り出し方向に回転することが蹴り脚膝関節伸展動作の主要因であることも明らかにした。しかし, 「はやい」蹴り動作の達成のために必要な力学的エネルギーの生成 (筋力的要因) や, 生成した力学的エネルギーを効果的に伝達するための姿勢やタイミング (技術的要因) については詳細に検討していない。

力学的エネルギーに関する研究は, 歩行や走動作に関するものが多い。Winter and Robertson⁵⁾は, 通常歩行について, 力学的エネルギーや力学的エネルギーの流れの観点から検討した結果, 歩行中は上半身に比べて下肢では大きな力学的エネルギーの変化があると報告している。また, 近年, 力学的エネルギーを評価指標としてスポーツ動作に応用した研究もみられる。島田ら⁶⁾は, 野球のピッチング動作のバイオメカニクス研究やピッチング動作に関する指導書の多くでは, 「エネルギー伝達」「エネルギーの流れ」という表現が概念的に用いられており, その重要性が指摘されているにも関わらず, ピッチング動作中の全身の力学的エネルギーの流れを検討した研究はないと報告している。そして, 力学的エネルギーの流れを検討することで, 指導書の記述の裏付けにつながり, 効果的な指導法を工夫するための基礎的知見を提供し得ると述べている。

そこで, 本研究の目的はテコンドーの前回し蹴りの三次元動作分析を行い, スピードが「速い」かつ試技時間が「短い」蹴り動作を「はやい」蹴り動作と定義し, その力学的メカニズムを関節トルクによる力学的エネルギーの生成と関節トルクおよび関節力による力学的エネルギーの流れに着目することで, 有用な筋力トレーニングや技術練習への示唆を引き出し, 現在用いられている指導用語を再検討することとした。

2014年5月26日受付 2014年10月1日受理

† 〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1

筑波大学スポーツバイオメカニクス研究室

木下 まどか

Tel: 029-853-5654

E-mail: madoka0319@lasbim.taiiku.tsukuba.ac.jp

2. 方法

2.1 被験者

全日本選手権大会入賞選手から顕著な競技成績のない選手まで様々な競技レベルの男子テコンドー選手 13 名 (年齢 21.7 ± 3.3 [yr], 身長 1.72 ± 0.05 [m], 身体質量 65.2 ± 11.4 [kg], 経験年数 6.3 ± 5.3 [yr]) を被験者とした。被験者には事前の実験説明を行い, 口頭および書面にて参加の同意を得た。なお, 本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て行われた。

2.2 実験試技

全ての実験設定は先行研究⁴⁾と同様であった。実験試技は, 利き脚側での中段前回り蹴りであり, 最大努力での蹴り動作を行うよう被験者に指示をした。最大努力の動作について, 被験者は「ミットまで早い到達時間かつ速いスピードを蹴り脚が持つことである」という共通の意識を持っていた。先行研究⁷⁾を参考に軸脚側のつま先からミットの中心までの水平距離が脚長と等しくなるように設定した試技と, 被験者が水平距離を任意に設定した試技を 3 試技ずつ無作為な順序で行わせ, 6 試技の中でインパクト時の蹴り脚のキックスピードが最も大きかった試技を分析対象試技とした。なお, 実験の際には, 被験者と身長が同程度の相手選手の中段に前回り蹴りを行うことを想定して, テコンドー経験者が被験者の体幹部の高さでミットを保持した。

2.3 データ収集およびデータ処理

光学式自動動作分析装置 (VICON MX+, 250 [Hz]) により, 被験者の身体各部およびミットに貼付した専用反射マーカー (53 点) の三次元座標値を収集した。また, 各脚の地面反力をフォースプラットフォーム (Kistler, 1000 [Hz]) により計測した。

収集した三次元座標値に対して, Wells and Winter⁸⁾の方法により最適遮断周波数 (12.5 [Hz]-25.0 [Hz]) を決定し, Butterworth digital filter を用いて平滑化処理を行った。なお, 左脚側で試技を行った被験者については, 座標変換を行うことで, 右脚側で試技を行ったものとして算出した (以下, 右脚を蹴り脚, 左脚を軸脚と呼ぶ)。またテコンドー特有の「はやい」蹴り動作を分析するために, 木下と藤井⁴⁾の方法と同様にインパクトのキックスピードが「速い」かつ試技時間が「短い」被験者 4 名を上位群 (キックスピード 19.28 ± 0.26 [m/s], 試技時間 0.184 ± 0.005 [s]), インパクトのキックスピードが「遅い」かつ試技時間が「長い」被験者 3 名を下位群 (キックスピード 15.21 ± 0.47 [m/s], 試技時間 0.233 ± 0.009 [s]) とした。

2.4 算出項目

本研究では, 人体を手部, 前腕, 上腕, 足部, 下腿, 大腿, 頭部, 上胴および下胴の計 15 セグメントが 14 の関節で連結されている剛体リンクモデルとして扱った。なお, 上胴と下胴の間は仮想的な関節 (以下, 体幹関節) で連結されてい

るものとした。算出した身体代表点の座標値およびフォースプラットフォームによって測定した被験者の体重から, 阿江⁹⁾の身体部分慣性係数を用いて, 身体セグメントおよび全身の重心座標値, 身体セグメントの慣性パラメータを算出した。

Winter¹⁰⁾の方法をもとに, 頭部と上肢, 上胴, 下胴, 蹴り脚および軸脚の足部, 下腿, 大腿の身体 9 セグメントの力学的エネルギー, 上胴, 下胴および蹴り脚および軸脚の下肢セグメント, 並びに体幹および蹴り脚および軸脚の下肢各関節において身体セグメントに伝達される力学的エネルギーのうち, 関節トルクによるものをセグメントトルクパワー (以下 STP), 関節力によるものを関節力パワー (以下 JFP), さらに体幹関節および下肢関節におけるパワー発揮を関節トルクパワー (以下 JTP) とし, 以下の式で算出した。

(1) 身体セグメントの力学的エネルギー (E_s)

$$E_s = m_s g h_{scg} + \frac{1}{2} m_s |V_{scg}|^2 + \frac{1}{2} (I'_{scgx} \omega_{scgx}^2 + I'_{scgy} \omega_{scgy}^2 + I'_{scgz} \omega_{scgz}^2) \quad (1)$$

ここで, m_s , h_{scg} , V_{scg} はそれぞれ, 身体セグメントの質量, 静止座標系における身体セグメント重心の座標データの Z 軸成分, 並進速度ベクトルを示す。また, I'_{scgx} , I'_{scgy} , および I'_{scgz} は身体セグメント重心まわりの主慣性モーメント I_{scg} の成分, ω'_{scgx} , ω'_{scgy} , および ω'_{scgz} は身体セグメントの移動座標系における各軸まわりの角速度を示す。

(2) 関節トルクにより発揮される力学的パワー (JTP_j)

$$JTP_j = T_j \cdot \omega_j \quad (2)$$

(3) 関節トルクによりセグメントに伝達される力学的パワー (STP_s)

$$STP_s = T_j \cdot \omega_s \quad (3)$$

(4) 関節力によりセグメントに伝達される力学的パワー (JFP_j)

$$JFP_j = F_j \cdot V_j \quad (4)$$

ここで, T_j , ω_j , ω_s , F_j , V_j は, 静止座標系における関節トルク, 関節角速度, 身体セグメント角速度, 関節力, 関節並進速度をそれぞれ示す。

(5) 力学的仕事と力学的エネルギー

力学的パワーとして算出した JTP, STP, JFP を動作局面 (後述) ごとに時間積分した値を力学的仕事または力学的エネルギーとし, JTP による力学的エネルギーの生成 (正の力学的仕事) と吸収 (負の力学的仕事), STP と JFP による力学的エネルギーの伝達を示すエナジェティクスのパラメータとした。また, 算出したデータを各被験者の体重でそれぞれ除すことによって規格化した。

2.5 分析区間

図 1 に示すように, 全身の重心スピードが急激に上昇す

る前の極小時を「蹴り動作開始」(Start; 以下, STR), 蹴り脚のつま先が地面から離れる瞬間を「つま先足離地」(Toe rises off the floor; 以下, TOF), 蹴り脚膝関節の屈曲が最大になる瞬間を「膝関節最大屈曲」(Maximum knee flexion; 以下, MKF), 蹴り脚足部がミットと接触する瞬間を「インパクト」(Impact to target; 以下, IMP) と定義した. STR から TOF までを READY 局面, TOF から MKF までを LEG UP 局面, MKF から IMP までを STRIKE 局面と定義した. また STR から IMP までの時間を 100[%] とし, 得られた時系列データの時間軸を規格化した. この際, 全被験者が READY 局面,

LEG UP 局面, STRIKE 局面に要した時間の平均値にもとづき, 各局面時間をそれぞれ 50[%], 30[%], 20[%] に規格化した. なお, 本研究では, 蹴り動作の主要な範囲として TOF から IMP までを詳細な分析範囲とした.

3. 結果

3.1 身体セグメントの力学的エネルギー

図2は, 上位群と下位群の頭部と上肢, 上腕, 下腕および蹴り脚, 軸脚の大腿, 下腿, 足部の力学的エネルギーの平均値をそれぞれ示している. 図上部の□, △, ○記号は, 規格

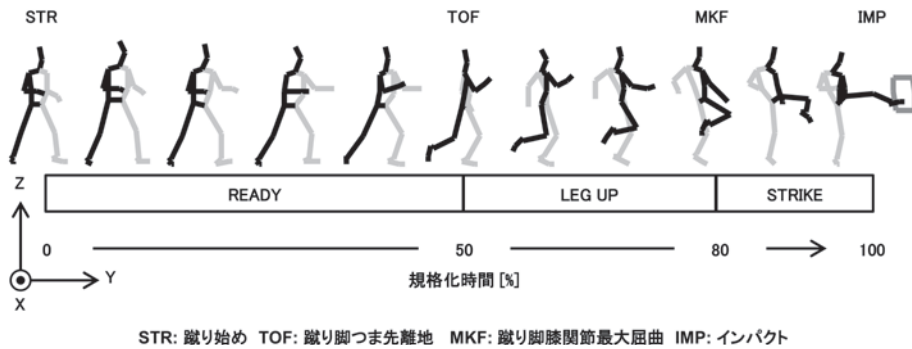


図1 実験試技および局面定義

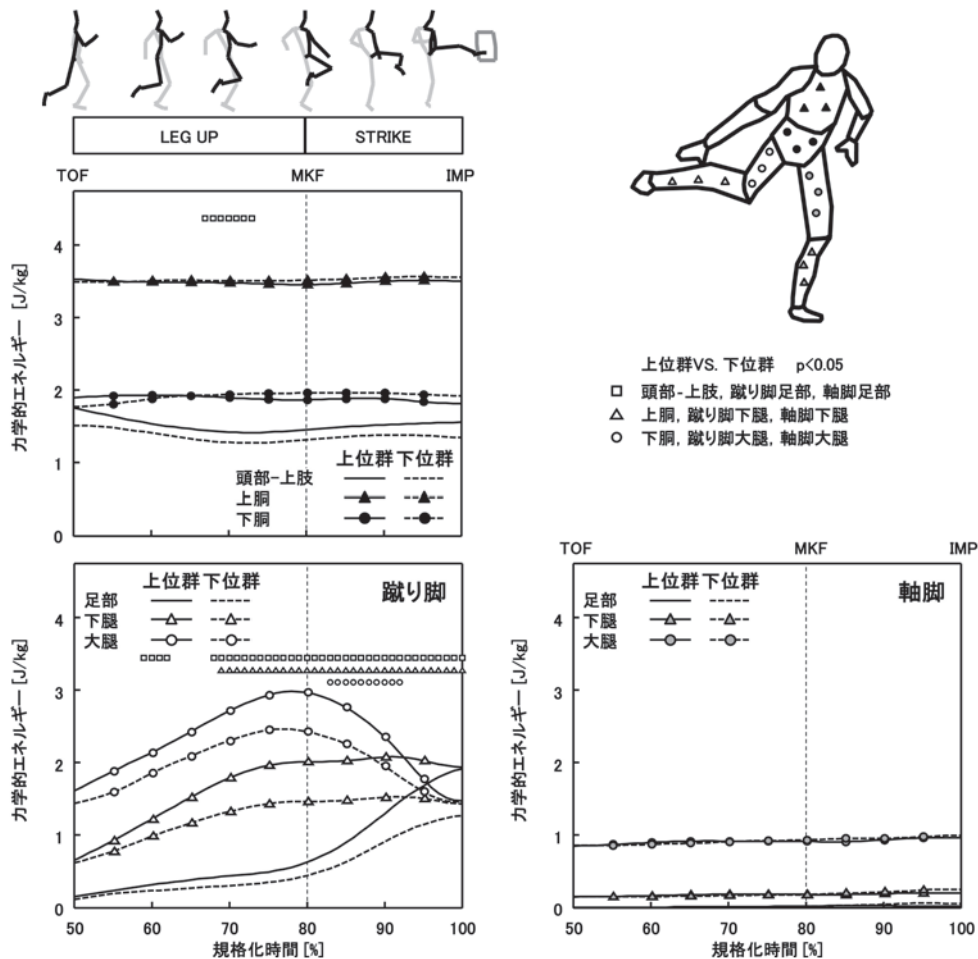


図2 身体各部の力学的エネルギー

化時間 1[%] ごとに上位群と下位群のデータを T-test し, 有意差がみられた時点を示している. 有意水準は 5[%] とした.

(1) 頭部と上肢, 上腕, 下腕

両群間で力学的エネルギーの値および時間経過にともなう増減パターン (以下, 変化パターン) は, 頭部と上肢では TOF から IMP まで概ね一定であったが, 70[%] 前後において有意差がみられた. 力学的エネルギーの大きさは TOF から IMP を通して上腕, 下腕, 頭部と上肢の順に大きかった.

(2) 蹴り脚大腿

蹴り脚大腿の力学的エネルギーの変化パターンは, 両群ともに約 80[%] まで増加傾向を示し, その後 IMP にむけて減少した. 蹴り脚大腿の力学的エネルギーがピーク値をむかえるタイミングは, 蹴り脚下腿の力学的エネルギーの増加が約 70[%] 以降に停滞し始めるのとほぼ同じであった. また約 80[%] から約 90[%] では上位群の方が下位群より有意に大きかったが, IMP では有意な差はみられなかった.

(3) 蹴り脚下腿

蹴り脚下腿の力学的エネルギーの変化パターンは, 両群ともに約 70[%] まで増加傾向を示し, それ以降は大きな増減はみられなかった. TOF では有意な差はみられなかったが, 約 70[%] 以降は上位群の方が下位群より有意に大きかった.

(4) 蹴り脚足部

蹴り脚足部の力学的エネルギーの変化パターンは, 両群ともに LEG UP 局面では漸増し, STRIKE 局面で急激に増加した. TOF では有意な差はみられなかったが, 約 70[%] 以降は上位群の方が下位群より有意に大きかった.

(5) 軸脚大腿, 下腿, 足部

軸脚大腿, 下腿, 足部の力学的エネルギーの変化パターンは, 両群ともに TOF から IMP まで概ね一定であった. 力学的エネルギーの大きさは TOF から IMP を通して大腿, 下腿, 足部の順に大きかった.

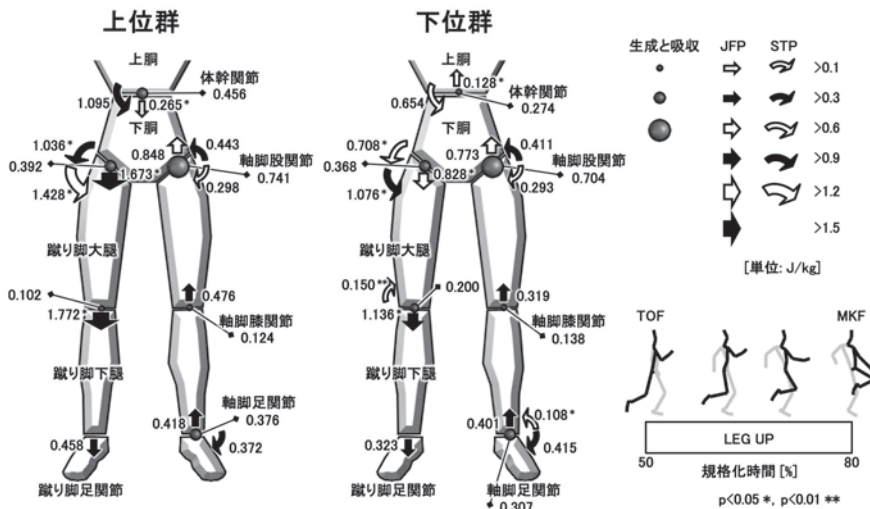


図3 LEG UP 局面における力学的エネルギーの生成と吸収および力学的エネルギーの流れ

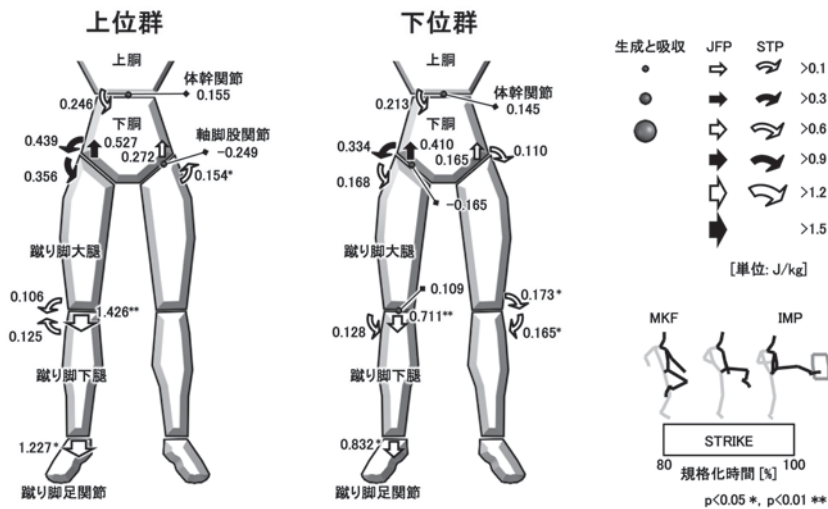


図4 STRIKE 局面における力学的エネルギーの生成と吸収および力学的エネルギーの流れ

3. 2 体幹関節および下肢関節の力学的エネルギーの生成と吸収および力学的エネルギーの流れ

図3は、LEG UP 局面、図4は STRIKE 局面の JTP による体幹および下肢関節の力学的エネルギーの生成と吸収および JFP, STP による上胴, 下胴, 蹴り脚, 軸脚下肢セグメントにおける力学的エネルギーの流れをそれぞれ示している。また、TOF から IMP まで地面と接している左足部圧力中心点に関して、摩擦による力学的エネルギーの吸収が行われるが、その値は小さかったため本研究では省略した。数字右上の*記号は、上位群と下位群のデータを T-test し、有意差がみられた時点を示している。有意水準は 5[%] とした。

両群間で蹴り脚股関節、軸脚足関節、軸脚股関節、体幹関節で大きな力学的エネルギーを生成している傾向は同様であり、両群ともに軸脚股関節での力学的エネルギー生成が最も大きかった。両群間で体幹および下肢関節の力学的エネルギー生成の合計は同程度であった。しかし、体幹関節による力学的エネルギーの生成は、上位群の方が下位群より大きかったが有意な差はみられなかった。一方で、蹴り脚膝関節による力学的エネルギーの生成は、下位群の方が上位群より大きかったが有意な差はみられなかった。

(1) LEG UP 局面

両群ともに力学的エネルギーの流れは、JFP による流れの方が STP による流れより大きく、JFP によって伝達される大きな力学的エネルギーは、蹴り脚大腿から蹴り脚下腿、下胴

から蹴り脚大腿、軸脚下腿から軸脚大腿方向であった。また STP による力学的エネルギーは、主に下胴から蹴り脚大腿に伝達されていた。両群ともに JFP によって伝達される力学的エネルギーは、軸脚足関節から軸脚下腿、軸脚下腿から軸脚大腿、軸脚大腿から下胴、下胴から蹴り脚大腿、蹴り脚大腿から蹴り脚下腿、蹴り脚下腿から蹴り脚足部方向であった。しかし、上胴と下胴に関して、上位群の力学的エネルギーは上胴から下胴方向に伝達されていたのに対して下位群の力学的エネルギーは下胴から上胴へと逆方向に伝達されていた。上胴から下胴、下胴から蹴り脚大腿、蹴り脚大腿から蹴り脚下腿への力学的エネルギーの伝達は、上位群の方が下位群より有意に大きかった。STP による下胴から蹴り脚大腿への力学的エネルギーの伝達も、上位群の方が下位群より有意に大きかった。STP による上胴から下胴への力学的エネルギーの伝達は、上位群の方が下位群より大きかったが有意な差はみられなかった。

(2) STRIKE 局面

両群ともに力学的エネルギーの流れは、LEG UP 局面と同様に JFP による流れの方が STP による流れより大きく、JFP によって伝達される大きな力学的エネルギーは、蹴り脚大腿から蹴り脚下腿、蹴り脚下腿から蹴り脚足部方向であった。また、蹴り脚大腿から下胴へも伝達されていた。JFP による蹴り脚大腿から蹴り脚下腿、蹴り脚下腿から蹴り脚足部への力学的エネルギーの伝達は、上位群の方が下位群より有意に

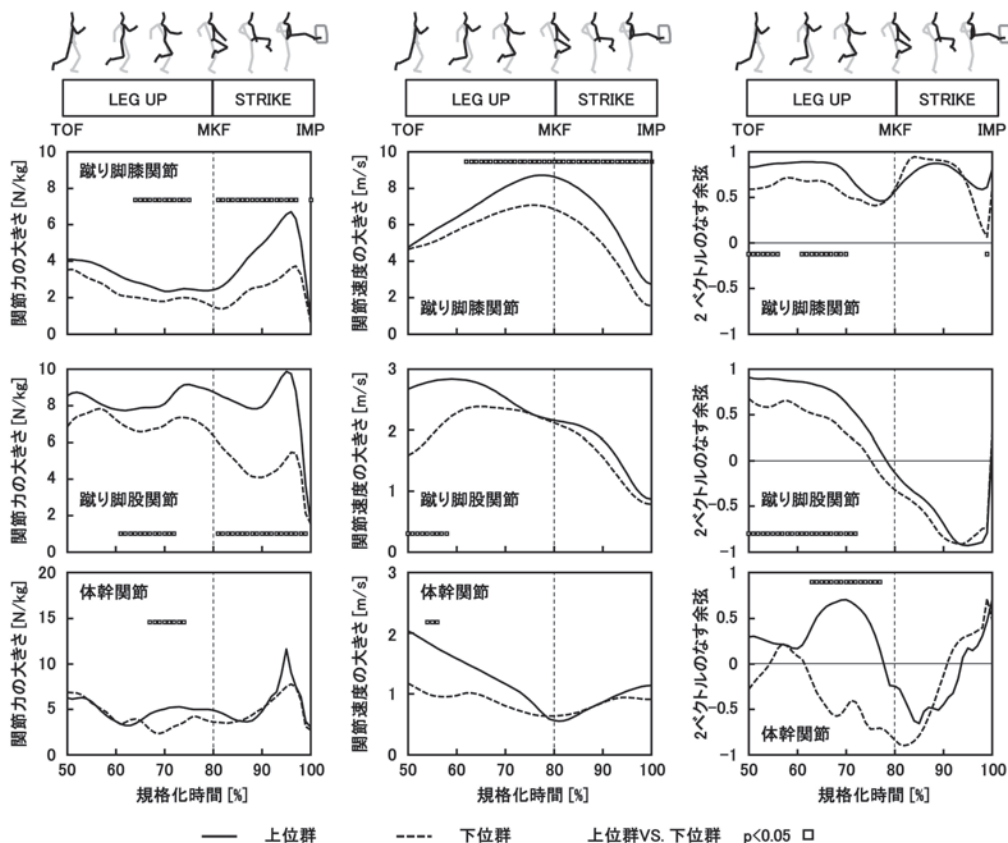


図5 蹴り脚膝関節、蹴り脚股関節、体幹関節の関節力の大きさ、関節速度の大きさおよび関節力ベクトルと関節速度ベクトルのなす角度の余弦

表1 力学的エネルギーのまとめ

群	力学的エネルギーの生成 [J/kg]		IMPにおける蹴り脚足部の 力学的エネルギー [J/kg]	IMPにおける身体の 力学的エネルギーのうち 蹴り脚足部が占める割合 [%]
	LEG UP	STRIKE		
上位群	2.179±0.214	-0.195±0.277	1.907±0.261	13.10±0.02
下位群	1.983±0.239	0.061±0.211	1.262±0.078	9.44±0.01
上位群-下位群	0.196	-0.256	0.645	3.66

p<0.05 *, p<0.01 **

大きかった。蹴り脚大腿から下胴への力学的エネルギーの伝達は、上位群の方が下位群より大きかったが有意な差はみられなかった。両群ともにSTPによる顕著な力学的エネルギーの伝達はみられなかった。

3. 4 力学的エネルギー

表1は、上位群と下位群のそれぞれの局面における力学的エネルギー生成、IMPにおける蹴り脚足部の力学的エネルギー、IMPにおける身体全体の力学的エネルギーに対するIMPにおける蹴り脚足部の力学的エネルギーの割合、そして、それぞれのパラメータにおける上位群と下位群の差（上位群-下位群）を示している。表中の数値の右にある*記号は、上位群と下位群のデータをT-testし、有意差がみられた時点を示している。有意水準は5[%]とした。力学的エネルギーの生成に関して、両群間でLEG UP局面とSTRIKE局面において同程度であり、IMPにおける蹴り脚足部の力学的エネルギー量は上位群の方が下位群より有意に大きかった。IMPにおける全体の力学的エネルギーに対する蹴り脚足部の力学的エネルギーの割合は上位群の方が下位群より有意に大きかった。

4. 考察

4. 1 テコンドーの前回し蹴りに関する基本動作メカニズム

両群ともに蹴り脚下肢以外の身体各部のセグメントの力学的エネルギーの値や変化パターンは、TOFからIMPまで概ね一定であった。テコンドーでは限られた間合い（試技距離）や時間のなかでキックスピードを生成し、蹴り動作を行うことが要求されるため、前回し蹴りに関して蹴り脚以外を大きく動かすことはしない。そのため、頭部と上肢、上胴、下胴、軸脚大腿、下腿、足部の力学的エネルギーは並進および回転の運動エネルギーに比べて、位置エネルギーに大きく依存し、特に軸脚足部は位置エネルギーが小さいためセグメントの力学的エネルギーがその他のセグメントに比べて小さかったと考えられる。蹴り脚下肢セグメントにおいて、近位セグメントである蹴り脚大腿の力学的エネルギーの減少とともに遠位セグメントである蹴り脚足部の力学的エネルギーが増加する傾向は、投球におけるスイング動作の先行研究^{6,11)}と一致しており、スイング動作に特徴的な力学的エネルギーの変化パターンである「運動の連鎖」が行われていたと考えられる。しかし、野球のピッチング動作といった投球腕のスイング動作のように、上腕、前腕、手部の順に力学

的エネルギーのピーク値が出現するのではなく、テコンドーでは蹴り脚下肢、大腿、足部の順で出現し、蹴り脚下肢の力学的エネルギーは約70[%]で増加率が小さくなるとIMPまでその値を維持していた。このような力学的エネルギーの変化パターンは、STRIKE局面において蹴り脚股関節屈曲のみならず、内旋角速度が大きくなる（木下と藤井⁴⁾）ことにより、蹴り脚下肢の重心位置を大きく変化させることなく蹴り脚足部重心の位置を大きく変化させることができるため、約70[%]以降に蹴り脚下肢の力学的エネルギー（主に並進運動エネルギー）を一定に維持しながら、蹴り脚足部の力学的エネルギー（主に並進運動エネルギー）を急激に増加させることができたためと推察される。また、スピード獲得のための蹴り脚足関節の可動域が手関節に比べ狭く、投球腕上肢のスイング動作ほど遠位セグメントの役割が大きくないことを示していると考えられる。テコンドーにおける中段前回し蹴り動作を行う際には、相手選手の体幹部の高さまで蹴り脚足部を上げ、蹴り脚足部の甲でターゲットに当てなければならないという制約条件の中で動作を行うと、蹴り動作のはやさに関係なくこのような力学的エネルギー変化パターンが出現すると考えられる。

力学的エネルギー生成、吸収および伝達に関して、LEG UP局面において、両群ともに最も大きな力学的エネルギーの生成源は大きなトルクを発揮することのできる軸脚股関節であった。蹴り動作を行う際に、蹴り脚足部はTOFからIMPまで物体と接触することはないため、蹴り脚足部には外力は作用しない。一方で、軸脚は前回し蹴り動作中に常に地面と接触し、軸脚足部を介して外力を得ることができる。また下肢関節の中でも股関節は、慣性の大きな下胴と大腿で構成され、動かすための筋群も大きい。したがって、軸脚股関節が最も大きな力学的エネルギーの生成源となり得たと考えられる。また、STPに比べてJFPによって大きな力学的エネルギーが軸脚下肢から下胴へ、下胴から蹴り脚下肢へと伝達されていた。STRIKE局面において、両群ともに力学的エネルギーの生成はほとんどなく、JFPによって大きな力学的エネルギーが蹴り脚大腿から下腿、足部の順に伝達されていることも投球におけるスイング動作の特徴と一致していた。すなわち、テコンドーの前回し蹴りは、大きな関節力を利用して蹴り脚足部に力学的エネルギーを伝達し、蹴り動作を行っていると考えられる。

4. 2 上位群と下位群における力学的エネルギーの比較

表1から、上位群と下位群の差は、力学的エネルギー生成の大きさではなく、力学的エネルギーを蹴り脚足部へ伝達する技術の差によって生じると考えられる。言い換えると、「はやい」蹴り動作を行うために、力学的エネルギーを蹴り脚足部に伝達するための身体の動かし方のタイミングを高める技術トレーニングをすることは筋力トレーニングをすることに比べて効果的であると考えられる。したがって、「はやい」蹴り動作を行うための技術が存在すると推察される（力学的

エネルギー伝達の技術については後述)。

図3から、上位群はLEG UP局面において蹴り脚大腿から下腿へとJFPによる力学的エネルギーの伝達が大きく、下腿から蹴り脚大腿へJFP, STPによってさらに大きな力学的エネルギーが伝達するため、下位群に比べて蹴り脚大腿に大きな力学的エネルギーが保持される。また、上位群は、下腿から蹴り脚大腿へJFPによって力学的エネルギーを伝達しているが、一方で、下位群は下腿から上腿へと力学的エネルギーを伝達している。さらに、MKF以降、JTPによって新たに大きな力学的エネルギーが生成されていないことを考慮すると、MKFまでに大きな力学的エネルギーを蹴り脚大腿に保持することが、「はやい」蹴り動作を行うための一要因であると考えられる。

4.3 力学的エネルギー伝達の技術

これまでの結果から、上位群はLEG UP局面において蹴り脚大腿から下腿へとJFPによる力学的エネルギー、下腿から蹴り脚大腿へJFP, STPによってさらに大きな力学的エネルギーを伝達することができたことが示された。JFPによる力学的エネルギーの伝達を大きくするためには、式(4)から、関節力ベクトルもしくは関節の速度ベクトルの大きさを大きくすることまたは、関節力ベクトルと関節の速度ベクトルのなす角度を小さくすることで両ベクトルのなす角度の余弦を大きくすることが必要である。そこで、上位群はどのような方略で力学的エネルギーを伝達させていたのかについて図5を用いて考察を進める。

図5は、蹴り脚膝関節、蹴り脚股関節、体幹関節の関節力の大きさ、関節速度の大きさおよび関節力ベクトルと関節速度ベクトルのなす角度の余弦を示している。図中の□記号は、規格化時間1[%]ごとに上位群と下位群のデータをT-testし、有意差がみられた時点を示している。有意水準は5[%]とした。

蹴り脚股関節における関節力ベクトルと関節速度ベクトルのなす角度の余弦はTOFから約70[%]まで、上位群の方が下位群より有意に大きかった。また、関節速度もTOFから約60[%]まで、上位群の方が下位群より有意に大きかった。上位群は、TOFにおいて軸脚を動かす(軸脚股関節の伸展および内転動作)ことで下腿並進速度を生成し、MKFまでに下腿左傾を大きくすることで右股関節速度の方向を蹴りだし方向に近づけ、関節力ベクトルと速度ベクトルのなす角度を小さくし、JFPによる力学的エネルギーの伝達を大きくしていた。また、TOFにおける下腿並進速度を高めることは、キックスピードに対する正の貢献が大きくなる(木下と藤井⁴⁾)ことにつながり、キネマティクスとエナジェティクスの両観点から、キックスピードを大きくするための大きな役割を担っていると考えられる。体幹関節における関節力ベクトルと関節速度ベクトルのなす角度の余弦は、上位群の方が下位群より有意に大きかった。上位群は上腿から下腿に作用する関節力がLEG UP局面を通して静止座標系Z成分が正(上腿が下腿を引っ張り上げる)であり、下位群は負(上腿が下

腿を押し下げる)であることに上位群と下位群の体幹関節における力学的エネルギーの流れの違いの主な要因があると考えられる。上位群は本研究では詳細な分析をしていない上半身の動き(上肢の振り上げ動作など)を利用し、上半身の重心位置を60[%]までに急激に引き上げようとするのが体幹関節力ベクトルと体幹関節速度ベクトルのなす角度を小さくする動作であると考えられる。

これまでのキネマティクス、キネティクスの分析のみでは、LEG UP局面に比べてSTRIKE局面において上位群と下位群の様々なパラメータの変化パターンが異なり、分析に関してもLEG UP局面に比べてSTRIKE局面に着目した分析がより多く行われてきた。また実際の指導現場においても、キネマティクスのパラメータの違いから変化を捉え指導するため、STRIKE局面の重要性を指導する指導者も多い。しかし、エナジェティクスの観点から分析すると、LEG UP局面における動作がその後のSTRIKE局面に大きく影響しているため、STRIKE局面のみの変化を改善することは難しいことが推察される。

4.4 指導用語の再考

現在、テコンドーにおける詳細な日本語の指導書は存在しない。指導の現場では、相手選手に蹴りだしのタイミングを計らせないような蹴り動作をさせるための指導として「身体を上を持ち上げないように」や「身体を一枚の板のように」といった用語が複数の指導者によって用いられている。以下では、これらの用語に対して本研究の結果から力学的な考察を行う。

(1) 「身体を上を持ち上げないように」

「LEG UP局面において身体重心を鉛直上向きに持ち上げることなく、蹴りだし方向へ重心を移動させることで、相手選手に蹴りだしのタイミングを計らせないことや蹴りだし方向にキックスピードを獲得する」ことを意識づけするために使用されていると考えられる。しかし、本研究において、キックスピードを生成するためには、軸脚下肢の力学的エネルギーや下腿の力学的エネルギーをJFPによって蹴り脚下肢へと伝達する必要があるが、JFPによって大きな力学的エネルギーを伝達するために、関節力、関節速度を大きくする、もしくは関節力ベクトルと関節速度ベクトルの方向を近づける必要があることが示された。「身体を上を持ち上げないように」という指導によって、体幹関節が鉛直上向きに速度を持たなくなり、軸脚股関節速度や体幹関節の速度を生成することが制限されると推察される。また、上半身の動きが制限され、上腿から下腿に作用する体幹関節力ベクトルの方向が鉛直下向きになると、体幹関節力ベクトルと体幹関節速度ベクトルのなす角度が大きくなってしまふ可能性がある。したがって、「身体を上を持ち上げないように」意識することで、軸脚下肢や下腿から蹴り脚下肢にJFPによって大きな力学的エネルギーを伝達し難くなり、キックスピードが大きくなり可能性が示唆される。しかし、上半身の動きを過度に行

うと、力学的エネルギーは大きく伝達できるが、試技時間がかかることや、相手選手に反応されやすくなる恐れもあるため、選手がどのような蹴り動作のパフォーマンスを向上させたいかによって指導を変化させるべきである。

(2)「身体を一枚の板のように」

「前回し蹴り動作を通して上胴、下胴、蹴り脚下肢を一枚の板のように同時に動かすことで相手選手に対して蹴り始めをわかりにくくし、相手選手の反応を遅らせる」という考えのもと指導を行っていることが多い。ここで、LEG UP 局面において下胴から蹴り脚大腿への関節力パワーによる大きな力学的エネルギーの伝達が「はやい」蹴り動作の達成には必要であった。また、関節力パワーの大きさは、関節速度と関節力の大きさ、さらに2つのベクトルのなす角度によって決定される。「はやい」蹴り動作を行っていた上位群は、軸脚下肢を動かし、下胴の並進速度を生成するとともに、上胴、下胴、蹴り脚下肢を連鎖的に動かすことで、蹴り脚股関節速度ベクトルと蹴り脚股関節力ベクトルのなす角度を小さくしていた。一方下位群は、「一枚の板」を意識し、上胴、下胴、蹴り脚下肢を同時に動かすことで蹴り脚股関節速度ベクトルが大きな軌跡を描き、2つのベクトルのなす角度を小さくし難くなっていた。したがって、「一枚の板のように」と指導することで下胴から蹴り脚大腿へ関節力パワーによって大きな力学的エネルギーを伝達することが難しい動きを促していると考えられ、「はやい」蹴り動作の達成を目指す際には、「一枚の板のように」という言葉を用いた指導法は不向きであることが示される。したがって、指導者は軸脚下肢による、下胴スピード生成動作（軸脚股関節伸展や内転動作）に着目し、蹴り方向に下胴が速度を持つことで、蹴り脚股関節の軌道がどのように制御されているかについて考える必要がある。

5. 結論

エナジェティクス的分析からテコンドーの「はやい」蹴り動作メカニズムは以下のように示された。

(1)「はやい」蹴り動作を行うために、軸脚股関節で大きな力学的エネルギーを生成し、READY 局面では蹴り脚大腿に大きな力学的エネルギーを保持しておくことが必要である。さらに、STRIKE 局面では関節力によりセグメントに伝達される力学的パワーを大きくして、蹴り脚足部に力学的エネルギーを伝達する必要がある。

(2)「はやい」蹴り動作を行うために、力学的エネルギーを蹴り脚足部に伝達するための身体の動かし方のタイミングを高める技術トレーニングをすることは筋力トレーニングをすることに比べて効果的であると考えられる。

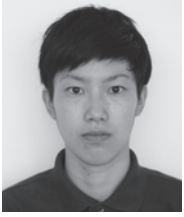
(3) 効率的に力学的エネルギーを蹴り脚足部に伝達するために、下胴の並進速度を持ち、下胴を左傾させることで、蹴り脚股関節力ベクトルと蹴り脚股関節速度ベクトルのなす角を小さくする必要がある。

(4)「一枚の板のように」と相手選手に蹴り動作を予測されないように蹴る指導は、「はやい」蹴り動作に必要とされ

る動きの妨げになり、前回し蹴り動作の「速さ」、試技時間の「短さ」に関する技術の低下に繋がると考えられる。

参考文献

- 1) Luk, T. C., Hong, Y. and Chu, D. P. K.: Analysis of strategy used in Taekwondo competition, Proceedings of Biomechanics Symposia, 166-169, (2001).
- 2) Kim, Y. K. and Hintichs, R. N.: Biomechanical classification of Taekwondo kicks, Proceedings of American Society of Biomechanics Annual Conference, (2006).
- 3) Falco, C., Landeo, R., Menescardi, C., Bermejo, J. L. and Estevan, I.: Match analysis in a University Taekwondo Championship, Advances Physical Education, 2(1), 28-31, (2012).
- 4) 木下まどか, 藤井範久: テコンドーの前回し蹴りにおけるバイオメカニクス, バイオメカニズム, 22, 143-154, (2014).
- 5) Winter, D. A. and Robertson, D. G.: Joint torque and energy patterns in normal gait, Biological Cybernetics, 29, 137-142, (1978).
- 6) 島田一志, 阿江通良, 藤井範久, 川村卓, 高橋佳三: 野球のピッチング動作における力学的エネルギーの流れ, バイオメカニクス研究, 8(1), 12-26, (2004).
- 7) Falco, C., Alvarez, O., Castillo, I., Estevan, I., Martos, J., Mugarra, F. and Iradi, A.: Influence of the distance in a roundhouse kick's execution time and impact force in Taekwondo, Journal of Biomechanics, 42, 242-248, (2009).
- 8) Wells, R. P. and Winter, D. A.: Assessment of signal noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits, Proceedings of the Special Conference of the Canadian Society for Biomechanics, Human locomotion, 1, 92-93, (1980).
- 9) 阿江通良: 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数, Japanese Journal of Sports Sciences, 15(3), 155-162, (1996).
- 10) Winter, D. A.: Biomechanics and motor control of human movement, 4th edition, Wiley, (2011).
- 11) 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦: 野球の投球動作における体幹および投球腕の力学的エネルギー・フローに関する3次元解析, 体力科学, 46(1), 55-68, (1997).



木下 まどか (きのした まどか)

2014年 筑波大学大学院人間総合科学研究科博士前期課程体育学専攻修了, 修士(体育学). 同年, 筑波大学大学院人間総合科学研究科博士後期課程体育科学専攻入学, 現在, 在学中. 主として, WTF テコンドー

のバイオメカニクス的研究に従事. 専門競技は WTF テコンドー. 国際バイオメカニクス学会, 日本体育学会, 日本バイオメカニクス学会の会員. (バイオメカニズム学会学生会員)

Biomechanical Analysis of Taekwondo Roundhouse Kick Focused on Mechanical Energy Flow

Madoka KINOSHITA^{1 †}, Norihisa FUJII²

¹ Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba

² Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

Abstract : The purposes of this study were to clarify the mechanism of biomechanical taekwondo roundhouse kick (RHK) for producing faster kicking speed and shorter kicking time with focus on mechanical energy flow and to reconsider the RHK coaching instructions. Thirteen male taekwondo athletes participated in this study as subjects. The experiment trial consisted of RHK to a target with a preferred leg. The target height was same as the subject's torso. We captured the 3D coordinates of the reflective markers on the body segments and the target by a motion capture system and calculated the energetics data such as the mechanical energy generation and energy flow. The following results were obtained. i) the amount of the mechanical energy generation in the first half of kicking motion was almost same among GOOD group and POOR group, ii) the larger mechanical energy was transferred by the joint force power in the second half of kicking motion for GOOD group. Taken together, our data suggest that there was difference of transmission efficiency between two groups, and that it is critical to acquire the motion technique to flow the mechanical energy to the kick leg in order to improve the timing of motion. It is also inferred that the coaching terms "kick with opponent's less prediction" prevent the improvement of the players' kicking technique for kicking fast and quick.

Key Words : Martial arts, Energetics, Swing, Kinematic chain, Coaching approach

Received May. 26, 2014 Accepted Oct. 1, 2014

[†]Madoka KINOSHITA

Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574 JAPAN, University of Tsukuba, Laboratory for Sport Biomechanics

Tel: 029-853-5654

E-mail: madoka0319@lasbim.taiiku.tsukuba.ac.jp