

## サッカーのキック動作における蹴り足についての一考案

浅井 武・小林 一敏・森岡 理右・松本 光弘

### A study of kicking motion in Soccer

Takeshi ASAI, Kazutoshi KOBAYASHI, Riu MORIOKA,  
and Mitsuhiro MATSUMOTO

A few investigators have analyzed the motive torque in the actual kicking motion in soccer. As for untrained players, however, there are few researches about the motive torque in the kicking motion.

In this study, based on the coordinates of LED type marker which fixed to greater trochanter, knee- and ankle-joint, the motive torque of hip- and knee- joint is calculated by the biomechanical model and is compared between trained and untrained players. And the mechanism of the kicking motion is cleared.

The results obtained are summerized as follows.

- 1) The torque at both hip- and knee-joints of the untrained players are smaller than that of the trained players, and so is angular velocity at thigh and shank.
- 2) Trained players translate the angular kinetic energy from thigh to shank by means of the breaking action by the negative torque at hip-joint in the latter half during forward-swing phase.
- 3) In the case of trained player, as the angular velocity at shank increased, the negative torque at knee-joint become larger. This breaking motion of thigh during forward-swing phase can be one of the aims in the soccer training process.

#### I 緒 言

これまで、サッカーにおけるキック動作について浅見<sup>(2)</sup>、Roberts<sup>(4)</sup>、渋川<sup>(6)</sup>、をはじめ幾つかの報告がなされている。しかし、実際のキック動作中における動的関節トルクを分析した研究は少なく、未熟練者についてはほとんど報告されていない。

そこで本研究では、被験者の下肢に装着したポジションセンサーから得られる大転子、膝関節、足関節の座標値をもとに、蹴り足の力学モデルより股関節、及び膝関節トルクを算出し、熟練者と未熟練者について比較分析するとともに、コン

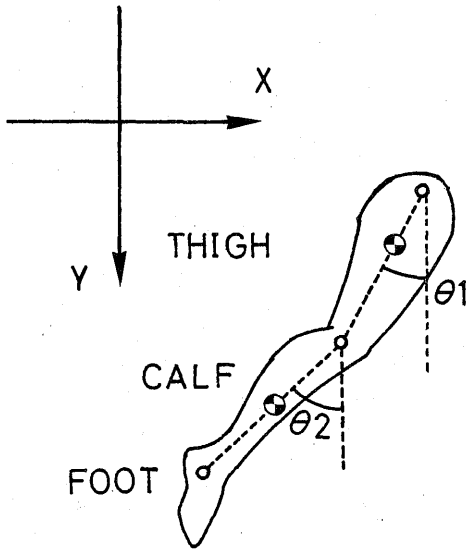
ピュータシミュレーションによってキック動作の力学的メカニズムを明らかにしようとした。

#### II 実験方法

被験者は熟練者として筑波大学サッカー部員、サッカー歴10年以上の者3名、及び未熟練者として筑波大学大学院生、サッカー歴1年以下の者3名の計6名を対象とした。

蹴り足の転子、膝関節、及び足関節の座標値を測定するために各関節にポジションセンサーを装着し、足の踵部にはインパクトポイントを検出するためのピエゾ型加速度計（新日本測器社製、圧電型加速度計540—M、定格100G）をセットし

各試技を行なわせた。ポジションセンサーと加速度計からの信号は、サンプリングタイム 2 msec. でデジタルメモリーを介した後、マイクロコンピュータに収録した。本実験におけるインステップキックは、1歩助走とし、全力でキックするように指示した。



図一 蹴り足の力学モデル

図1にキック動作中の関節トルクを求めるために用いた蹴り足の力学モデルを示す。キック動作は本来3次元的運動であるが、各関節のトルクと角速度の関係が明らかでない事や、運動方程式の自由度を少なくする事より本研究では、キック動作に伴う下肢の運動は垂直面内で起こり腰の回転は無視できるとし、関節は一軸ジョイントであると仮定する。鉛直線の傾角  $\theta_1, \theta_2$ 、及び大転子の  $x, y$  座標を一般化座標に選び、 $L$  をラグランジアンとすると(1)式が得られる。 $\theta_1, \theta_2$  を一般化座標としたので一般化力  $Q_1, Q_2$  は各関節トルクということになる。(具体的な式は付録に記す)

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \right) \dots\dots\dots(1)$$

$$(L = f(\theta_i, x, y) \quad i = 1, 2)$$

関節トルクを算出するために必要なパラメータを表1に示す。各被験者の身体部分質量、慣性モーメントはChandler<sup>(3)</sup>の値、及び平行軸の定理より求めた。

系の運動方程式である(1)式より、角加速度についての連立微分方程式が得られ、その数値解をRunge-Kutta<sup>(6)</sup>法によって求めることにより、キック動作のコンピュータシミュレーションを行なった。系の入力要素や出力要素の取り方により、いろいろな場合のシミュレーションが可能であるが、本研究では主に各関節トルクの増減が蹴り足の速度に及ぼす影響について分析した。

表一 各被験者の部分質量と慣性モーメント及びインパクト直前の下腿角速度

Sub.	a (m)	b (m)	c (m)	m1 (kg)	m2 (kg)	J1 (kgm <sup>2</sup> )	J2 (kgm <sup>2</sup> )	$\theta_2$ (rad/s)
A	0.163	0.273	0.419	6.88	3.65	0.122	0.134	12.85
B	0.144	0.258	0.371	7.64	3.93	0.134	0.136	24.42
C	0.146	0.247	0.376	6.88	3.65	0.122	0.121	26.40
D	0.146	0.264	0.375	7.89	4.02	0.139	0.142	28.62
E	0.144	0.258	0.360	6.88	3.65	0.122	0.134	30.61
F	0.154	0.235	0.385	7.01	3.70	0.124	0.137	30.93

- a : 大転子から大腿部分重心までの距離
- b : 膝関節から下腿部分重心までの距離
- c : 大転子から膝関節までの距離
- m1 : 大腿部分質量
- m2 : 下腿部分質量
- J1 : 大腿の部分重心回りの慣性モーメント
- J2 : 下腿の部分重心回りの慣性モーメント
- $\theta_2$  : インパクト直前の下腿角速度

### III 結果及び考察

#### III-1 熟練者と未熟練者との比較

浅見, 戸苅<sup>(2)</sup>あるいは浅井<sup>(1)</sup>らは, インステップキックにおけるインパクト直前の足関節速度や下腿角速度と, ボールスピードとの間に高い相関が見られた事を報告している。そこで本研究では, インパクト直前の下腿角速度 ( $\theta_2$ ) をキック動作におけるパフォーマンスの指標の一つとしてとらえ分析を行なった。

表1に各被験者のインパクト直前の下腿角速度を示す。被験者A, B, Cは未熟練者であり, 被験者D, E, Fは熟練者である。熟練者と未熟練者とを比較してみると, 未熟練者よりも熟練者の方が大きな値を示している。特に被験者Aは12.85 rad/sと未熟練者の中でも最も低い値を示している。これは, 被験者B, Cが体育専門学群卒業であるのに対して, 被験者Aは他学群卒業で, サッカー経験がほとんど無い事も関係していると思われる。

図2及び図3は未熟練者である被験者Aと被験

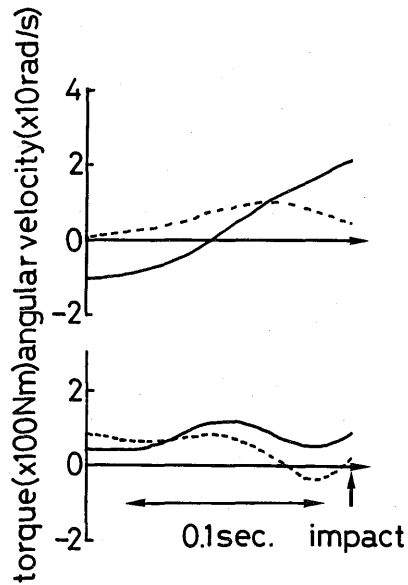


図-3 被験者Bの大腿角速度(破線)と下腿角速度(実線)、及び股関節トルク(破線)と膝関節トルク(実線)

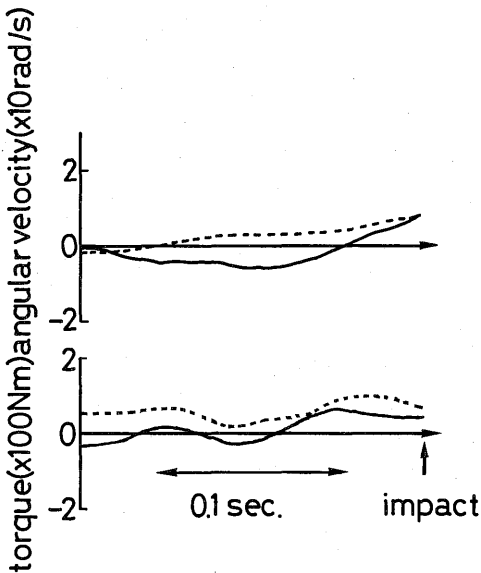


図-2 被験者Aの大腿角速度(破線)と下腿角速度(実線)、及び股関節トルク(破線)と膝関節トルク(実線)

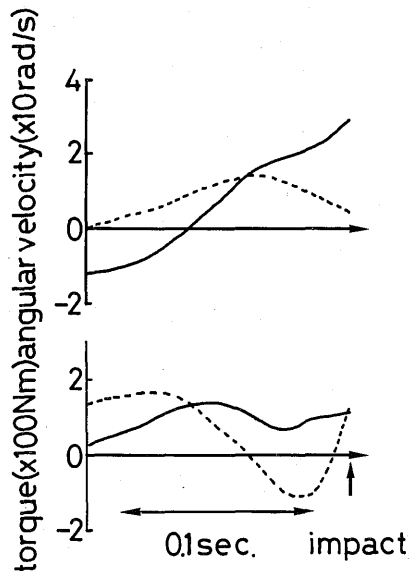


図-4 被験者Dの大腿角速度(破線)と下腿角速度(実線)、及び股関節トルク(破線)と膝関節トルク(実線)

者Bの大腿及び下腿角速度と股関節及び膝関節トルクを示したものである。また、図4は熟練者である被験者Dの各角速度と各関節トルクを示したものである。

まず、膝関節トルクを比較してみると、被験者Aは最大値が68.6Nmであるのに対して被験者Dは143.7Nmであり、フォワードスイング期全体に渡って大きなトルク値を示している。また、下腿角速度をみると、被験者Aは被験者Dと比較して速度の変化が小さく、被験者Dのインパクト直前の下腿角速度が28.62rad/sであるのに対して、被験者Aはその半分以下である12.85rad/sとなっている。そして、被験者Bは被験者Aと被験者Dとの中間的パターンを示していると思われる。一方、股関節トルクを比較してみると、被験者Aはフォワードスイング期全体に渡って正の値となっているが、被験者Dの場合フォワードスイング期後半に負の値が出現している。そして、それに対応して大腿角速度も、被験者Aはフォワードスイング期全体に渡って増加しているのに対して、被験者Dはフォワードスイング期の後半に減速しているのがわかる。この傾向は他の熟練者である被験者E、Fにも見られた。このことから、未熟練者である被験者Aは、フォワードスイング期における大腿と下腿の振り出しを同時的に行ない、股関節を軸とした一本の棒のような状態でキック動作を行なっているのに対して、熟練者である被験者Dは、フォワードスイング期後半における負の股関節トルクによるいわばブレーキ的作用（かならずしも適当な言葉ではないが、大腿の角速度が正の値をとりつつ減少しているという意味で本研究ではブレーキ作用と呼ぶ）によって、大腿から下腿への角運動エネルギーの移行を効果的に行なっていると考えられる。また、この面からも被験者Bは被験者Aと被験者Dとの中間的パターンを示しており、大腿の振り出し動作はインステップキックのパフォーマンスに大きな影響を与える一つの要素であると思われる。

### III-2 キック動作のコンピュータシミュレーション

身体運動のコンピュータシミュレーションを行う場合、変位を入力として算出される力を分析する場合と、力を入力として算出される

変位を分析する場合とに大別できると思われる。そして、微分方程式の数値解法によって力より変位を求める場合、従来より多くの方法が示されているが、本研究では、比較的簡単な計算式でありながら離散化誤差が小さく、かつ、回数不定の反復を含まないRunge-Kutta法を用いた。図5は下腿角速度の測定値とRunge-Kutta法によって得られた数値解を示したものである。測定値に対する誤差の百分率の平均値は約3%であり、妥当な精度の数値解が得られたと思われる。(R=0.9998)

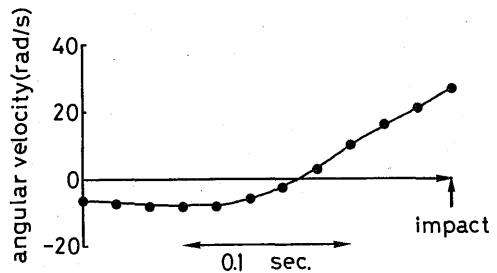


図-5 実験測定値(実線)と積分による数値解

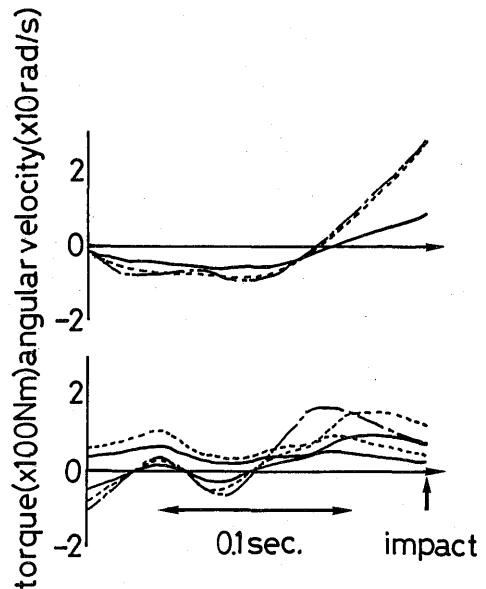
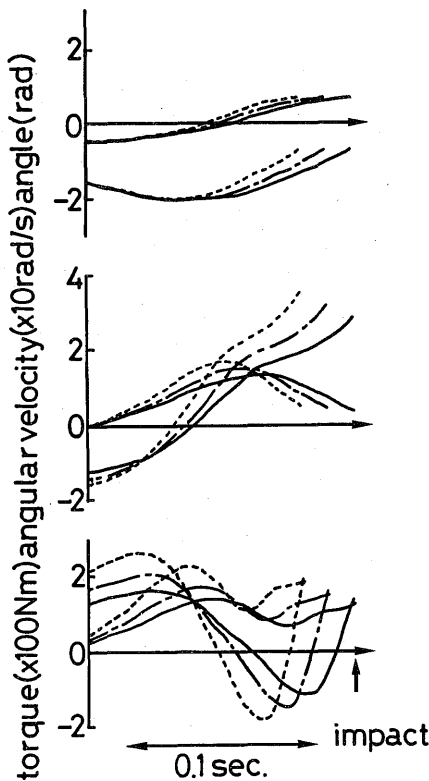


図-6 被験者Aにおける関節トルクを変化させた場合のコンピュータシミュレーション(実線は実験測定値)

図6は被験者Aのキック動作の動特性を示したものである。実線は実験測定値を示している。被験者Aが膝関節トルクのみを増加させて被験者Dと同程度の下腿角速度を得ようとした場合、一点鎖線で示すように、膝関節トルクを実験値の2.7倍にすることによって下腿角速度は28.9rad/sとなる。しかし、股関節トルクと膝関節トルクの両方を増加させた場合、実験値の1.7倍によって下腿角速度は28.3rad/sとなる。このことから、インステップキックにおけるいわゆる「キック力」を向上させるためには、単に膝関節を中心とした脚伸展トルクを増加させるだけでなく、股関節及び膝関節の両方のトルクを、動的な状態より大きく発揮することが重要な要素であると考えられる。そして熟練者である被験者Dのキック動作の動特性を示したのが図7である。このシミュレシ



図一七 被験者Dにおける角変位を変化させた場合のコンピュータシミュレーション (実線は実験測定値)

ョンの場合、変位を入力としてトルクを算出している。図の上段に示してある角変位を見てもわかるように、各曲線の右端がインパクトポイントとなっている。膝関節トルクの最大値が、143.7 Nm, 179.6Nm, 229.8Nmと増加するに従って、インパクト直前の下腿角速度も28.6rad/s, 31.8 rad/s, 35.8rad/sと増加している。一方、股関節トルクも膝関節トルクに対応して増加しており、フォワードスイング期後半に見られる負のトルクによる大腿の振り出し動作に対するブレーキ作用も増大しているのがわかる。以上の事から、インステップキックにおけるフォワードスイングは、膝関節トルクによる脚伸展動作と、股関節トルクによる大腿の振り出し動作との相互的総合作用によって行なわれると考えられ、フォワードスイングの後半における股関節の負のトルクによるブレーキ作用によって、大腿から下腿への角運動エネルギーの移行が効果的に行なわれると推定される。そして、下腿角速度の増加に伴って股関節の負のトルクも増大すると推定されることから、この大腿の振り出しのブレーキ動作はインステップキックのパフォーマンスの向上のための一つのトレーニング目標となると考えられる。

#### IV 要 約

サッカーにおける技術分析的研究において実際のキック動作中における動的トルクを分析した研究は少く、未熟練者についての報告はほとんどない。

そこで本研究では、被験者の下肢に装着したポジションセンサーから得られる大転子、膝関節、足関節の座標値をもとに、力学モデルより股関節、及び膝関節トルクを算出し、熟練者と未熟練者について比較分析するとともに、コンピュータシミュレーションによってキック動作の力学的メカニズムを明らかにしようとした。

結果を以下に要約する。

- 1) 未熟練者は熟練者と比較して、股関節及び膝関節トルクの両方とも小さな値を示しそれに対応して大腿及び下腿角速度も小さな値を示した。
- 2) 熟練者はフォワードスイング期後半における負の股関節トルクによるブレーキ作用によって、大腿から下腿への角運動エネルギーの移行を効果的に行なっていると考えられる。

3) 熟練者の場合, 下腿角速度の増加に伴って, 股関節の負のトルクも増大すると推定される事から, この大腿の振り出しにおけるブレーキ動作は, 一つのトレーニング目標となると思われる。

V 付 録

$$Q_1 = (J_1 + m_1 a^2 + m_2 c^2) \ddot{\theta}_1 + m_2 b c \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2 c b \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_1 (a \cos \theta_1 \ddot{x} + a \sin \theta_1 \ddot{y}) + m_2 (c \cos \theta_1 \ddot{x} - c \sin \theta_1 \ddot{y}) + m_1 g a \sin \theta_1 + m_2 g c \sin \theta_1$$

$$Q_2 = (J_2 + m_2 b^2) \ddot{\theta}_2 + m_2 b c \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - m_2 c b \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_2 (b \cos \theta_2 \ddot{x} - b \sin \theta_2 \ddot{y}) + m_2 g b \sin \theta_2$$

引 用 文 献

1) 浅井武ほか「サッカーのインステップキックにつ

いての力学的考察 (第2報)], 日本体育学会第33回大会号, P450, 1982.  
 2) 浅見俊雄・戸苅晴彦「サッカーのキック力に関する研究」, 体育学研究, 12-4:267-72, 1968.  
 3) Chandler, R.F., Clauser, C.E., McConville, J. T., heyholds, H.M., and Young, J.W., Investigation of inertia properties of the human body, Aerospace Medical Laboratory, National Technical Information Service: Springfield, 1975.  
 4) E.M.Roberts, R.F. Zernicke, Y. Youm and T. C. Huang kinetic parameters of kicking, International Series on Sport Sciences Vol. 1 Biomechanics IV, University park press, 1973.  
 5) 渋川侃二「ボールキックの際の関節固定の効果」東京教育大学スポーツ研究所報, 11:81-83, 1973。  
 6) 戸川隼人「数値計算入門」, P116, オーム社, 1970。