

サッカーのインステップキックについての力学的考察

浅井 武・小林 一敏・榎原 潔

A Biomechanical Study of Instep-kicking in Soccer

Takeshi ASAI, Kazutoshi KOBAYASHI, and Kiyoshi SAKAKIBARA*

In-step kicking is one of the most important and fundamental techniques in soccer. Biomechanical analyses of ball kicking were done by some investigators, but there were few researches analysing the torques in kicking movement.

In this study, measuring the positions of L.E.D. type marker which fixed to thigh, calf and foot, the torque of knee-joint was calculated on the basis of the kinetic model, and some kinetic relation between the torque of knee-joint and the velocity of kicked ball was cleared.

The results were as follows :

- 1) As the angular velocity of knee-joint was higher, the velocity of kicked ball also became higher.
- 2) The torque of knee-joint reached the maximum value after that of hip-joint reached the maximum, in other words there was a time lag between them, and the torque value of knee-joint showed a tendency of continuous decreasing to the time of impact.
- 3) The maximum torque of knee-joint appeared at the minimum angle of knee-joint, and there was significant correlation between the maximum torque value of knee-joint and the velocity of kicked ball.

緒言

サッカーにおけるインステップキックは、重要かつ最も基本的技術の一つである。これまで、キック動作については Roberts⁽³⁾, 浅見ら⁽¹⁾, 渋川⁽⁴⁾, 高木ら⁽⁵⁾をはじめ幾つかの報告がなされているが、実際のキック動作中における動的筋力を分析した研究は少ない。

そこで本研究では、被験者の下肢に緒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、3段階のボール速度の試技に対する股関節、及び膝関節トルクを力学モデルより算出し、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。

実験方法

被験者は筑波大学サッカー部員、サッカー歴10年以上の者5名を対象とした。

図1は実験装置の構成を示したものである。蹴り足の太転子、膝関節、及び足関節の座標値を測定する為に各関節にポジションセンサーを装着し、また、足の甲部にはインパクトポイントを検出するための導電性ゴム板フットスイッチをセットし各試技を行なわせた。ポジションセンサーとフットスイッチからの信号は、サンプリングタイム0.01 sec.でA/Dコンバーターを介して、マイクロコンピュータに収録した。各試技のボール速度は、ロータリーシャッターカメラによって撮影したVTRより、ビデオポジションアナライザーを用いて算出した。また、本実験では3段階のボー

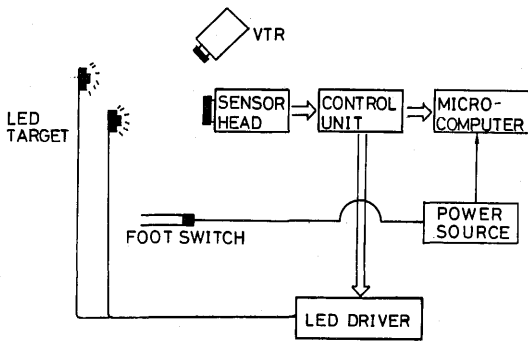


図-1 実験装置の構成

ル速度を得るために、試技 A を「弱く」、試技 B を「やや強く」、試技 C を「全力で」という指示を被験者に与え、すべて一步助走のキックで各試技を行なわせた。

図 2 にキック動作中の関節トルクを求める為に用いた蹴り足の力学モデルを示す。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 θ_1 、 θ_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。 θ_1 、 θ_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事になる。(具体的な式は付録に記す。)

表 1 に示す各関節トルクを算出する為に必要な被験者の部分質量と慣性モーメントは Chandler⁽²⁾ の値、及び平行軸の定理によって求めた。

結果と考察

図 3 は被験者 A の試技 B における大腿と下腿の角速度、及び股関節と膝関節のトルクを示したものである。大腿の角速度 θ_1 はインパクト約 0.07 sec. 前にピークとなり、その後は減少しているのに対して、下腿の角速度 θ_2 はフォワードスイング期において連続的に増加している。

また、股関節、及び膝関節トルクをみみると、膝関節トルクのピークは股関節トルクのピークより約 0.04 sec. 遅れて出現し、その後インパクトに渡って減少している。

そして、股関節トルクはフォワードスイング後期においてマイナスの値となっている。このインパクト前における股関節の負のトルクは、股関節を固定しようとする働きを表していると思われ、

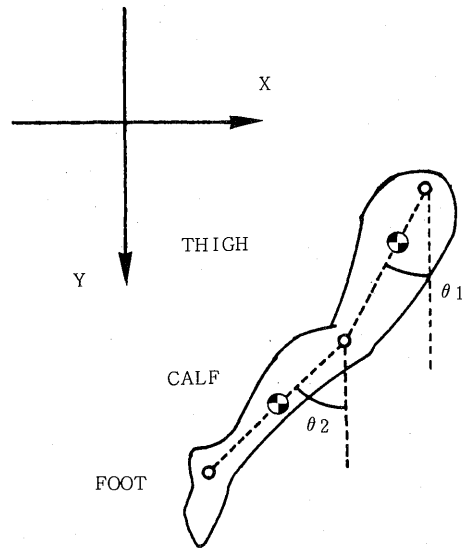


図-2 蹴り足の力学モデル

高木ら⁽⁵⁾の筋電図学的研究による「熟練者に於ては、股関節の固定が強く行なわれている」という報告と合致すると考えられる。

また、膝関節トルクは、フォワードスイング期全体に渡って単峰性の波形ではほぼ正の値となっている。この事は、高木ら⁽⁵⁾の「フォワードスイング期において大腿四頭筋群に大きな筋放電が観察される。」という報告に対応していると思われ、キック動作のフォワードスイング期においては、膝関節伸展トルクが主動的働きをしていると考えられる。

そして、他の被験者にも同様の位相差が股関節トルクと膝関節トルクの間に見られた。しかし、その位相差の時間間隔については、一定の傾向はみられなかった。

図 4 は被験者 A の各試技における膝関節角速度（大転子、膝関節、及び足関節のなす角度の角速度）と膝関節トルクを示したものである。各試技のボール速度は表 2 に示すように試技 A が 12.04 m/s、試技 B が 18.86 m/s、試技 C が 23.20 m/s となっており、試技 A より順にボール速度が大きな試技となっている。

また、インパクト直前の膝関節角速度も、試技 A が 16.39 rad/s、試技 B が 25.46 rad/s、試技 C が 27.55 rad/s となっており、下腿角速度同様、ボール速度が大きな試技ほど大きな値となってい

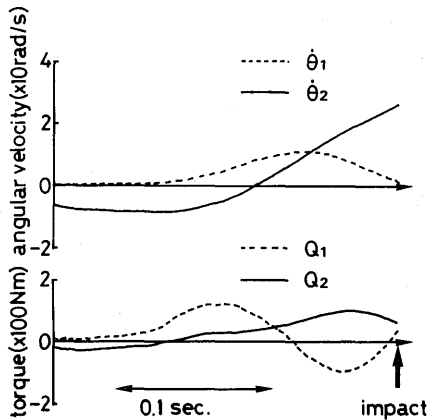


図-3 被験者Aの試技Bにおける大腿と下腿の角速度, 及び股関節と膝関節のトルク

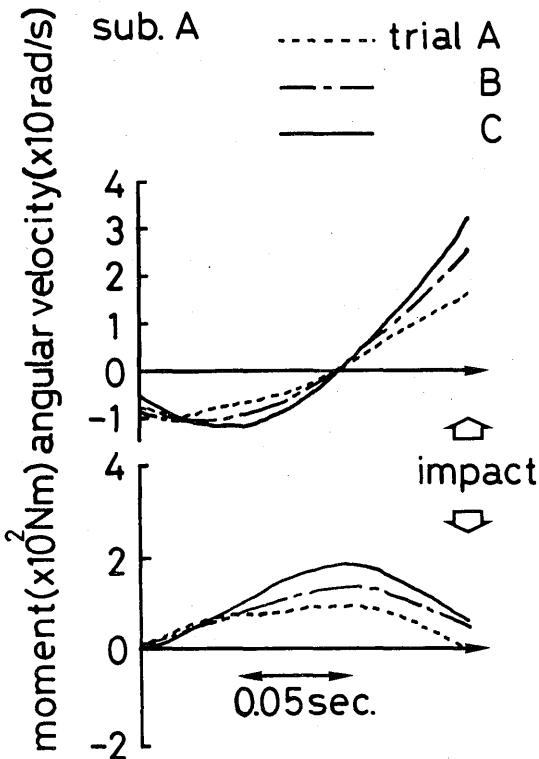


図-4 被験者Aの各試技における膝関節角速度と膝関節トルク

る。

そして、各試技の膝関節トルクをみると、トルクのピークは膝関節角速度が負から正に変わる時点、つまり膝関節の最大屈曲時に出現しており、その後インパクトに渡って減少している。この膝関節角速度が増加するに従ってみられる膝関節トルクの減少は、脚伸展に関与している筋自体の出力特性と関係があるのではないかと推定される。

また、膝関節トルクのピーク値は試技Aが93.17 Nm, 試技Bが131.08 Nm, 試技Cが182.39 Nmとなっており、ボール速度の大きな試技ほど膝関節トルクのピーク値も大きな値となっている。そして、各被験者のボール速度、インパクト直前の下腿角速度、及び膝関節トルクのピーク値を表2に示す。

他の被験者も被験者A同様、ボール速度が大きな試技ほどインパクト直前の下腿角速度が大きな値となっており、それに対応して、下腿角速度が大きな試技ほど膝関節トルクのピーク値も大きな値となっている。

表1に各被験者のアイソメトリックな状態での最大脚伸展トルクを示す。本実験で算出した動的トルクと、このアイソメトリックな状態でのトルク値とを直接比較する事は出来ないが、一応の目安として試技の膝関節トルクのピーク値と最大脚伸展トルクの比率を計算してみると、被験者Aの場合、試技Aが最大トルクの41.9%, 試技Bが58.9%, 試技Cが82.0%となっている。この値は、「試技Aは弱く、試技Bはやや強く、試技Cは全力で」という実験条件の指示による被験者の努力感と、ある程度、妥当な対応をしていると思われる。

以上の事から、キック動作のフォワードスイングにおける膝関節トルクのピークは、膝関節最大屈曲時に出現し、そのトルク値はボール速度の制御に関与しているものと考えられる。

また、浅見ら⁽⁴⁾はキックのボールスピードと慣性車輪による脚伸展パワーを測定し、両者の相関が高い事を報告している。本実験における全力による試技の動的トルクのピーク値は、比較的大きな値を示した事から、キック動作時に発生する脚伸展パワーは大きなトルクの発現を伴うパワーであると考えられる。

表1 各被験者の部分質量と慣性モーメント及び最大脚伸展トルク

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
 Fmax: 最大脚伸展トルク

Sub.	a (m)	b (m)	c (m)	m2 (kg)	m2 (kg)	J1 (kgm ²)	J2 (kgm ²)	Fmax (Nm)
A	0.147	0.239	0.368	7.89	4.02	0.139	0.122	222.4
B	0.134	0.236	0.335	5.87	3.28	0.105	0.097	196.7
C	0.154	0.235	0.385	7.01	3.70	0.124	0.110	173.1
D	0.144	0.258	0.360	6.88	3.65	0.122	0.128	240.1
E	0.152	0.243	0.380	5.87	3.28	0.105	0.100	237.4

要 約

サッカーにおけるインステップキックは、重要かつ最も基本的技術の一つである。そして実際のキック動作中における動的筋力を分析した研究は少ない。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各関節の座標値をもとに、股関節、及び膝関節トルクを力学モデルより算出し、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) 各被験者において、下腿角速度が大きな試技ほどボール速度も大きな値となった。
- 2) 膝関節トルクのピークは股関節トルクのピークよりやや遅れて出現し、その後インパクトに渡って減少する傾向がみられた。
- 3) フォワードスイングにおける膝関節トルクのピークは、膝関節最大屈曲時に出現し、そのトルク値はボール速度の制御に関与しているものと考えられる。
- 4) キック動作時に発生する脚伸展パワーは、大きな脚伸展トルクの発現を伴うパワーであると考えられる。

付 録

$$L = \frac{1}{2} \left\{ J_1 \dot{\theta}_1^2 + J_2 \dot{\theta}_2^2 \right.$$

表2 各被験者、各試技のボール速度、インパクト直前の下腿角速度および、膝関節トルク

被験者	試技	ボール速度 (m/s)	下腿角速度 (rad/s)	膝関節ピークトルク値 (Nm)
A	A	12.04	18.74	93.17
	B	18.86	26.81	131.08
	C	23.20	28.91	182.39
B	A	13.34	24.23	93.22
	B	15.50	25.29	104.69
	C	22.50	31.63	170.01
C	A	13.68	18.32	88.12
	B	17.92	22.64	123.14
	C	21.60	30.93	162.25
D	A	11.92	18.27	105.10
	B	16.70	24.32	155.63
	C	17.32	30.61	194.78
E	A	11.94	22.22	82.58
	B	16.32	25.78	125.03
	C	19.70	16.90	175.48

$$\begin{aligned}
 &+ m_1 (a^2 \dot{\theta}_1^2 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + 2 a \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \dot{x} + 2 a \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \dot{y}) \\
 &+ m_2 (c^2 \dot{\theta}_1^2 + b^2 \dot{\theta}_2^2 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + 2 bc \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos (\theta_1 - \theta_2) \\
 &+ 2 b \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \dot{x} + 2 c \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \dot{x} - 2 b \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \dot{y} - 2 c \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \dot{y}) \} \\
 &- m_1 g \left\{ a(1 - \cos \theta_1) + y \right\} \\
 &- m_2 g \left\{ c(1 - \cos \theta_1) + b(1 - \cos \theta_2) + y \right\}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 Q_2 = & (J_2 + m_2 b^2) \ddot{\theta}_2 + m_2 bc \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\
 & - m_2 cb \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 - \theta_2) \\
 & - m_2 (b \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \dot{x} - b \cos \theta_2 \ddot{x} + b \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \dot{y} + b \sin \theta_2 \\
 & \ddot{y})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - m_2 (cb \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - b \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \dot{x} - b \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \\
 & \dot{y}) + m_2 g b \sin \theta_2
 \end{aligned}$$

引用文献

- 1) 浅見俊雄・戸莉晴彦「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.
- 2) Chandler, R.F., Clauser, C.E., McConville, J.T., Heynolds, H.M., and Young, J.W., Investigation of inertia properties of the human body, Aerospace Medical Laboratory, National Technical Information Service: Springfield, 1975.
- 3) 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.
- 4) 渋谷侃二「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.
- 5) 高木公三郎ほか「Kickの筋電図学的研究(第一報)」体育学研究, 5-3: 79-83, 1961.