

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年4月26日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23700744

 研究課題名（和文） 有限要素解析を用いたカーブおよび無回転キックにおける  
ボール挙動シミュレーション

 研究課題名（英文） Ball behavior simulation in impact of curve and non-spinning kicks  
using a finite element analysis

研究代表者

石井 秀幸（ISHII HIDEYUKI）

立教大学・コミュニティ福祉学部・助教

研究者番号：40534730

研究成果の概要（和文）：本研究では、足部とボールの有限要素モデルを構築し、カーブキックにおけるボール挙動に影響を及ぼす要因について調べた。有限要素解析結果を実験結果と比較することによって、有限要素モデルの妥当性を検証した。この有限要素モデルを用い、インパクトにおけるボール挙動のシミュレーションを行なった。その結果、ボール速度は、インパクト直前の足部速度に大きく影響を及ぼされるが、シューズアッパー部のヤング率と摩擦係数にはほとんど影響を及ぼされないことが示された。ボール回転は、インパクト直前の足部速度と摩擦係数に影響を及ぼされるが、その影響は大きくないことが示唆された。

研究成果の概要（英文）：This study constructed finite element models of the foot and soccer ball, and examined the factors affecting the ball behavior in curve kick. The models were validated by comparing the results of the finite element analysis to those of the experiment. Simulations of the ball behavior were conducted using the finite element models. The simulation results indicated the following. The ball velocity is largely affected by the foot velocity immediately before impact but barely affected by the Young's modulus of the shoe upper and the coefficient of friction. The ball rotation is affected by the foot velocity immediately before impact and the coefficient of friction; however, these factors had no significant effect.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：スポーツバイオメカニクス

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：バイオメカニクス、有限要素解析、サッカー、キック、インパクト、ボール挙動

## 1. 研究開始当初の背景

南アフリカで開催された2010 FIFAワールドカップにおいても、フリーキックなどからカーブキックや無回転キックによるゴールがみられ、これらのキック技術が試合を決定づける重要な要素の一つであることが示された。

これまで、インステップキックやインサイドキックについては、実験計測および単純なモデルを用いた数値計算によって、インパ

クトのパターンとボール挙動の関係が報告されている（石井ら，2007；石井と丸山，2008；Ishii et al., 2009）。カーブキックや無回転キックのインパクトのパターンは多様であることから、インパクトのパターンとボール挙動の関係について検討するためには、足部におけるボール接触部位の形状を考慮する必要があると考えられる。Asai et al. (2002, 2004, 2005) は、有限要素法を用いてカーブキックのインパクト中に生じる現

象とボール挙動について検討している。大森ら(2005)は、ボール速度とボールコントロール性を向上させるサッカーシューズの開発を目的とし、有限要素解析によってシューズのアップパー構造とソール剛性について検討している。しかしながら、ボール挙動を3次元的に、すなわちボール発射角、ボール速度、ボール回転の各成分について、実測と比較して有限要素モデルの妥当性を検証し、ボール挙動をシミュレーションした研究はみられない。ボール挙動を3次元的に精度よくシミュレーションできれば、競技力向上や製品開発のために活用することも可能であると考えられる。

有限要素解析においては、過剰に複雑なモデルではなく、課題を解決する上で必要十分なモデルとすることが重要である。キックのインパクトのパターンとボール挙動の関係について検討するための有限要素モデルを作成する場合、足部におけるボール接触部位の形状を考慮する必要はあるが、足部内の骨形状や靭帯などの内部構造は詳細に考慮する必要はなく、ある程度単純化することが可能であると考えた。本研究においては、このような単純化した有限要素モデルを用いて、ボール挙動を3次元的に精度よくシミュレーションすることを可能とすることを目指す。

## 2. 研究の目的

本研究では、カーブおよび無回転キックのインパクトにおける3次元的なボール挙動(ボール発射角、ボール速度、ボール回転)に影響を及ぼす要因を明らかにすることを目的とした。

足部とボールの有限要素モデルを構築し、有限要素解析結果と実験結果を比較することによって、有限要素モデルの妥当性を検討した。さらに、インパクトにおけるボール挙動のシミュレーションを行ない、ボール挙動に影響を及ぼす要因について検討した。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験

被験者はサッカー経験年数10年以上の大学男子選手5名(年齢 $22.6 \pm 2.1$ 歳、身長 $1.722 \pm 0.054$ m、体重 $59.4 \pm 6.3$ kg)とした。いずれの被験者も利き脚は右脚であった。サッカーボールはFIFA公認5号球(質量432g、空気圧9.7psi)を使用した。

被験者に、自由助走によるカーブキックを1試技行なわせた。被験者に対して、具体的なインパクトのパターンに関する指示は与えなかった。

キック動作を、各撮影フィールドを同期させた2台の高速度カメラ(nac社、MEMRECAM

fx-K4)によって、撮影速度2,500fps、露光時間 $1/5,000$ sで撮影した。カメラはターゲット方向に対して右側方(被験者の蹴り脚側)と右後方に設置した。

直径10mmの球形マーカーを、被験者の蹴り脚のつま先、踵、外果、内果に加え、足部外側に3箇所(第5中足骨骨頭、踵骨外側部、距骨外側部)、下腿前面に3箇所(脛骨下部、脛骨外側部、脛骨上部)の計10箇所に貼付した。このうち踵と内果の2箇所は、キック試技中に2台の高速度カメラの両方から同時に撮影することができない。そこで踵の位置を算出するために、キック試技前に足部外側の3箇所のマーカーに対する踵マーカーの位置を静止状態で撮影した。また内果の位置を算出するために、下腿前面の3箇所のマーカーに対する内果マーカーの位置を静止状態で撮影した。これらの位置関係の撮影後に、キック試技を行なった。なお、ボール表面上の撮影されるエリアには、約50mm間隔で多数のシール(直径10mm)をマーカーとして貼付した。

### (2) データ処理

高速度カメラによる映像からビデオ動作解析システム(DKH社、Frame-DIAS IV)を用いてデジタイズを行なった。身体のデジタイズ位置はキック試技時にマーカーを貼付した、つま先、外果、足部外側(3点)、下腿前面(3点)の計8点とした。ボールのデジタイズ位置はボール表面に貼付したマーカーのうちの3点(各点の間隔は約80mm)とした。デジタイズ位置の3次元座標を3次元DLT法により得た。

キック試技前に撮影した足部外側の3点と踵マーカーの位置関係を用いて、キック試技中における踵の位置座標を算出した。同様に、キック試技前に撮影した下腿前面の3点と内果マーカーの位置関係を用いて、キック試技中における内果の位置座標を算出した。さらに、足関節中心は外果と内果の中点として算出した。また、阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて、つま先と踵の位置から足部質量中心(つま先から踵方向へ足部長の59.5%の位置)を算出した。デジタイズしたボール表面上の3点からボール半径110mmの距離にある点としてボール中心の位置を算出した(石井と丸山, 2007)。ただし、算出される「ボール中心」は、インパクト中のボール変形によって変動せず、変形のない状態のボールの中心に固定される点である。

つま先、踵、足部質量中心、外果、内果、足関節中心、足部外側(3点)、ボール表面(3点)、ボール中心の計13点の位置座標各成分について、残差分析により最適な遮断周波数を決定し、4次のButterworth型デジタルローパスフィルターによる平滑化を行なった。

インパクト直前の足部質量中心速度の各成分を、各変位に関する回帰式の1次導関数から求め、各成分の値を合成して速度ベクトルの大きさを算出した。また、インパクト直前の足部角速度を算出した。インパクト直前における足部配置を、インパクト直前の足部質量中心速度ベクトルと足部移動座標系の関係から定量的に求めた。

### (3) 有限要素モデルの構築

キックのインパクトとボール挙動の関係について検討する上では、有限要素モデルの足部形状は一般化形状を用いることが可能であると考え、単一の足部形状を用いることとした。まず3次元形状スキャナ INFOOT (I-Ware Laboratory 社) を用いて、裸足およびシューズを着用した状態で形状を計測した。裸足での形状計測の際は、後に足部内関節を作成するために、足根中足関節(第1, 第2, 第5中足骨粗面の3箇所)と横足根関節(舟状骨粗面, 移行点, 立方骨粗面の3箇所)にマーカーを貼付した。

裸足およびシューズの形状データを有限要素ソフトウェア Abaqus/CAE (SIMULIA 社) にインポートし、裸足とシューズの境界を保持して融合した。さらに、拡大または縮小し、各被験者の足部長に合わせた。この足部モデルは、4節点ソリッド要素で構成した。裸足部、足部内関節部、シューズアッパー部、シューズアウトソール部は、線形弾性体とし、それぞれ個別の材料特性を割り当てた。足関節には、関節間力と関節トルク(一定値)を3次的に荷重した。

ボールは中空としてモデル化し、4節点シェル要素で構成した。シェル要素はパネルと空気袋からなる複合材とし、パネルには粘弾性体の材料特性を、空気袋(ゴム)には超弾性体の材料特性を割り当てた。ボール内部には、空気の入った流体空洞を定義した。

実験のインパクト直前における足部の位置に、足部モデルを配置した(図1)。初期条件として、足部モデル全体に、実験のインパクト直前における足部質量中心速度をY軸方向へ与えた。また、実験のインパクト直前における足部角速度を与えた。足部モデルとボールモデルとの摩擦はクーロン摩擦で表現した。インパクト局面の有限要素解析を行ない、踵、外果、足部外側(第5中足骨骨頭, 踵骨外側部, 距骨外側部の3節点)、ボール表面(3節点)の計8節点の位置座標を実験と同じ0.0004 sごとの頻度で出力した。なお、本研究における解析ソルバーには、Abaqus/Explicit (SIMULIA 社) を使用した。

有限要素解析と実験の両方において、インパクト中の足部およびボール中心の軌跡を求めた。有限要素解析におけるボール中心の位置は、実験と同様の方法で算出した。なお、

比較できるように、実験データについて、インパクト直前におけるボール中心位置を原点とし、インパクト直前における足部質量中心速度ベクトル方向をY軸とする座標系(図1)に変換した。有限要素解析における踵、外果、足部外側(3点)の計5点の軌跡が実験データと一致するように、足関節に荷重する関節間力と関節トルクの値を決定した。

再度解析を行ない、有限要素解析と実験の両方において、インパクト直後のボール挙動を求めた。ボール中心の位置を用い、インパクト直前の足部(質量中心)速度ベクトル(Y軸)に対して左右方向および上下方向のボール発射角を算出した。ボール速度の各成分は、各変位に関する回帰式の1次導関数から求めた。ボール表面上の3点を用いて、静止座標系の各軸回りのボール回転を算出した。有限要素解析におけるボール発射角、ボール速度およびボール回転が実験結果に近づくように、シューズアッパー部のヤング率と摩擦係数の値を決定した。

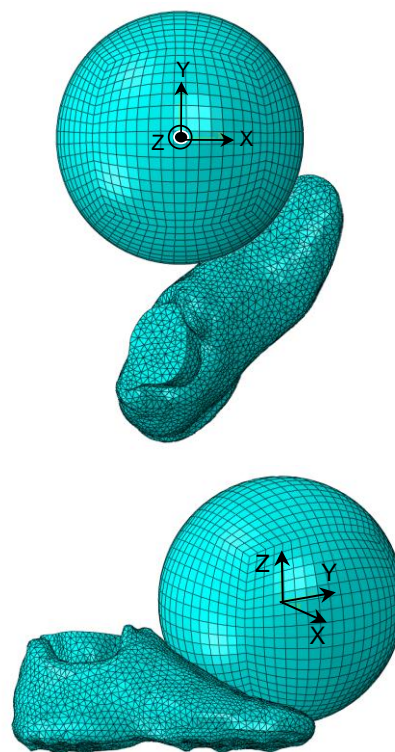


図1 有限要素モデルの配置

### (4) 有限要素モデルの妥当性検証

上述の過程の後に改めて解析を行なった。各試技(各被験者)について、インパクト中においては、踵、外果、足部外側(3点)、ボール中心の計6点の軌跡を有限要素解析結果と実験結果で比較し、インパクト直後においては、ボール発射角、ボール速度およびボール回転を比較することによって、有限要素モデルの妥当性を検討した。

(5) ボール挙動シミュレーション

インパクト直前の足部速度，シューズアッパー部のヤング率，摩擦係数を変化させてインパクトにおけるボール挙動のシミュレーションを行ない，これらの要因がボール発射角，ボール速度およびボール回転に及ぼす影響について検討した。

4. 研究成果

被験者Aの試技について，有限要素解析のインパクト中における足部とボールの接触状態を図2に示した。有限要素解析のアニメーションから，足部の接触部位がボールに食い込み，ボールには足部が接触する周辺のみに変形が生じることが観察された。この点は，実験の映像と類似していた。さらに，ボールが発射する方向，ボール回転が生じる様子が観察された。なお，有限要素解析におけるインパクト時間は約10msであり，実験結果とのよい対応がみられた。

被験者Aの試技におけるインパクト中の足部およびボールの軌跡の結果を図3に示した。座標系は図1中の座標系と対応している。図中の丸印はインパクト直前における各点の位置を表しており，インパクト直前においてボール中心は原点に位置している。足部の各点およびボール中心の軌跡について，インパクト中，有限要素解析結果が実験結果とよく一致していた。

表1は，全被験者におけるインパクト直後のボール発射角，ボール速度およびボール回転の結果を示したものである。ボール速度およびボール回転のXYZ各成分は，図1中の座標系と対応している。インパクト直後におけるボール発射角，ボール速度およびボール回転のいずれも，有限要素解析結果が実験結果と概ね一致する傾向となった。

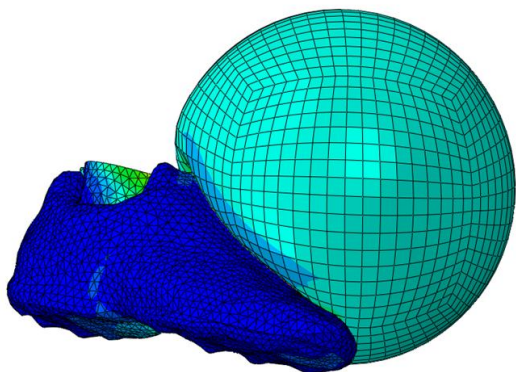


図2 有限要素解析におけるカーブキックのインパクト

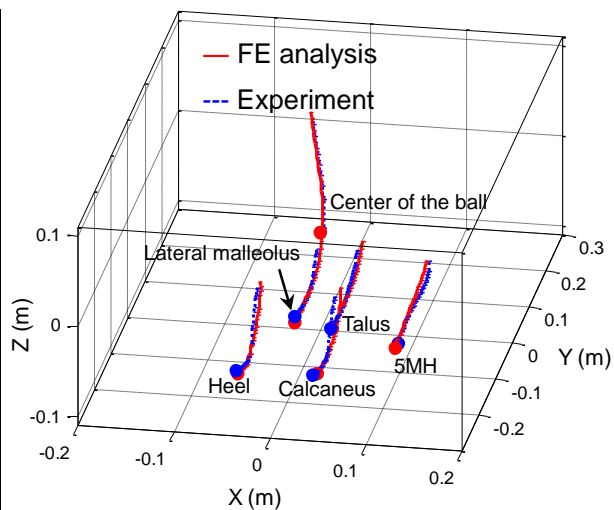


図3 インパクト中の足部およびボールの軌跡における有限要素解析結果と実験結果の比較

表1 インパクト直後のボール挙動における有限要素解析結果と実験結果の比較

Subject ID	Launch angle (deg)		Ball velocity (m/s)				Ball rotation (rps)				
	Left/Right	Up/Down	X	Y	Z	Magnitude	X	Y	Z	Magnitude	
A	FE analysis	17.0	29.8	-5.2	17.2	10.3	20.7	5.1	-2.5	5.1	7.6
	Experiment	17.6	29.5	-5.2	16.4	9.8	19.8	6.0	-1.7	5.8	8.5
B	FE analysis	25.3	10.3	-9.9	20.9	4.2	23.5	1.4	-3.1	7.1	7.8
	Experiment	23.6	10.9	-9.6	21.8	4.6	24.3	0.9	-2.3	6.4	6.9
C	FE analysis	25.7	5.3	-9.4	19.7	2.0	21.9	-0.3	-2.8	7.4	7.9
	Experiment	24.3	7.5	-9.3	20.6	3.0	22.8	-1.3	-3.4	7.8	8.6
D	FE analysis	27.5	9.3	-9.1	17.5	3.2	20.0	-2.3	-4.9	10.1	11.5
	Experiment	28.5	8.3	-9.4	17.4	2.9	20.0	-3.3	-5.7	10.6	12.5
E	FE analysis	13.5	3.3	-4.9	20.6	1.2	21.2	-1.9	-1.0	3.0	3.7
	Experiment	13.4	3.5	-5.2	21.8	1.4	22.5	-2.4	-1.4	1.8	3.4

有限要素解析結果と実験結果の間の差は、有限要素モデルの足部の内部構造を単純化していること、足関節に荷重した関節間力と関節トルクを一定値としていること、単一の足部形状を用いていること、実測値の誤差などに起因するものと考えられる。しかしながら、有限要素解析におけるボール挙動（ボール発射角、ボール速度、ボール回転）は、実験結果の傾向を3次的によく表していたことから、有限要素モデルは、カーブキックのインパクトとボール挙動の関係の傾向を表す上では妥当であると考えられた。この有限要素モデルを用い、カーブキックにおけるボール挙動に影響を及ぼす要因について検討するために、インパクトにおけるボール挙動のシミュレーションを行なった。

ボール挙動に及ぼす影響については、いずれの被験者のシミュレーションにおいても類似した傾向がみられた。表2は、被験者Aについて、インパクト直前の足部速度、シューズアッパー部のヤング率、摩擦係数を変化させてボール挙動のシミュレーションをした結果を示したものである。

インパクト直前の足部速度を実測値±1.0 m/s で変化させてシミュレーションした結果、インパクト直前の足部速度は、ボール発射角にはほとんど影響を及ぼさなかったが、足部速度を大きくするとボール速度が大きくなり、その影響は大きかった。また、インパクト直前の足部速度を大きくするとボール回転が大きくなる傾向がみられた。

各被験者について構築した有限要素モデルのシューズアッパー部のヤング率を基準として、シューズアッパー部のヤング率を1～20 MPa (1, 3, 5, 10, 20 MPa) で変化させてシミュレーションした。その結果、シューズアッパー部のヤング率が、ボール発射角、ボール速度およびボール回転に及ぼす影響は大きくないことが示唆された。

各被験者について構築した有限要素モデルの摩擦係数を基準として、摩擦係数を0.2～0.6 (0.1刻み) で変化させてシミュレーションした。摩擦係数は、ボール発射角とボール速度にはほとんど影響を及ぼさなかった。また、摩擦係数が大きくなるとボール回転が大きくなる傾向がみられたが、その影響は大きくないことが示唆された。

本研究では、シューズに関するパラメータのうち、まずアッパー部のヤング率と摩擦係数について、インパクト直後のボール発射角、ボール速度およびボール回転に及ぼす影響を調べたが、本研究で構築した有限要素モデルを用いて、その他の材料特性についてもボール挙動に及ぼす影響を調べることが可能である。また、インパクトのパターンを変化させたカーブキックおよび無回転キックのインパクトにおけるボール挙動のシミュレ

ーションに応用することで、インパクトのパターンとボール挙動の関係を明らかにすることも可能であると考えられる。これらの結果は、競技力向上や製品開発のために活用できるものだろう。

表2 インパクト直前の足部速度、シューズアッパー部のヤング率、摩擦係数を変化させた場合におけるインパクト直後のボール挙動のシミュレーション結果(被験者A)

	Launch angle (deg)			Ball velocity (m/s)			Ball rotation (rpm)				
	Left/Right	Up/Down	Magnitude	X	Y	Z	X	Y	Z		
Foot velocity immediately before impact (m/s)	17.0	17.2	29.9	-5.1	16.5	9.9	19.9	4.7	-2.5	5.0	7.3
	18.0	17.0	29.8	-5.2	17.2	10.3	20.7	5.1	-2.5	5.1	7.6
	19.0	16.8	29.8	-5.4	17.9	10.7	21.5	5.6	-2.5	5.3	8.1
Young's modulus of shoe upper (MPa)	1	16.9	29.1	-5.3	17.5	10.2	20.9	5.3	-1.6	5.3	7.7
	3	17.0	29.8	-5.2	17.2	10.3	20.7	5.1	-2.5	5.1	7.6
	5	16.8	30.3	-5.1	17.0	10.4	20.6	4.9	-2.8	5.1	7.6
	10	16.8	29.6	-5.2	17.1	10.1	20.6	5.3	-2.6	5.2	7.9
	20	16.8	29.7	-5.1	17.0	10.2	20.5	5.1	-2.6	5.3	7.8
Coefficient of friction	0.2	17.4	30.0	-5.4	17.1	10.4	20.7	4.9	-2.2	5.1	7.4
	0.3	16.9	29.7	-5.2	17.2	10.3	20.7	5.1	-2.4	5.1	7.7
	0.4	17.0	29.8	-5.2	17.2	10.3	20.7	5.1	-2.5	5.1	7.6
	0.5	16.8	29.9	-5.2	17.2	10.3	20.7	5.1	-2.7	5.1	7.7
	0.6	16.5	30.0	-5.1	17.1	10.3	20.7	5.2	-3.0	5.1	7.9

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

(1) 石井秀幸, 丸山剛生: 有限要素解析によるカーブキックのインパクトにおけるボール挙動シミュレーション. 日本機械学会シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集, 査読無, No. 12-39: 486-490, 2012

〔学会発表〕（計 1 件）

(1) 石井秀幸, 丸山剛生：有限要素解析によるカーブキックのインパクトにおけるボール挙動シミュレーション. シンポジウム：スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012, 2012 年 11 月 17 日, 愛知大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石井 秀幸 (ISHII HIDEYUKI)  
立教大学・コミュニティ福祉学部・助教  
研究者番号：40534730

### (2) 研究協力者

丸山 剛生 (MARUYAMA TAKEO)  
東京工業大学・大学院社会理工学研究科・  
准教授  
研究者番号：90181833