原著論文

インサイドキックにおけるインパクト中のボール変形量と衝撃力の解析[†]

石井 秀幸* 丸山 剛生**

Measurements of Ball Deformation and Impact Force during the Ball Impact Phase in Side-foot Soccer Kicking[†]

Hideyuki ISHII* and Takeo MARUYAMA**

Abstract

The objective of this study was to measure ball deformation and impact force during the ball impact phase in side-foot soccer kicking, using a three-dimensional analysis technique.

Firstly, to examine the method for measuring the three-dimensional position of the center of the ball while the kicking foot contacted the ball, the motion of ball rolling on the ground was captured three-dimensionally at 250fps. The position of the center of the ball was calculated as the point located at 11cm (=radius of the ball) from three markers fixed on the ball surface. It was suggested that in cases when the distances between each marker were more than 8cm, the position of the center of the ball was validly calculated.

Also, five experienced male university soccer players performed side-foot kicks using a one-step approach. The kicking motions were captured three-dimensionally by two high-speed cameras at 250fps. The contact point between the kicking foot and ball was calculated as the intersection point of the perpendicular line dropped from the center of the ball to the medial aspect of the kicking foot. The ball deformation was calculated by subtracting the distance between the center of the ball and the contact point from the radius of the ball. Furthermore, the impact force was calculated from the ball deformation, based on the Hertz contact theory. It was considered that the ball deformation and the impact force measured with these approaches were valid.

Key words : Side-foot Soccer Kicking, Ball Impact, Center of the Ball, Ball Deformation, Impact Force

1. 緒 言

ボールの打撃動作を含むスポーツ種目において、打撃後のボールの運動を最終的に決定するのはインパクトであるため、各場面での目的や

状況に応じた効果的なボールの運動を生み出す上でインパクト局面は重要であると考えられる。スポーツ用具の開発・設計などのスポーツ工学の分野においては、ボールおよび打具の機能性とともな耐久性も考慮する必要がある。こ

[†]原稿受付 2007 年 4 月 16 日

*東京工業大学大学院社会理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

**東京工業大学 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

[†]Graduate School of Decision Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, O-okayama, Meguro, Tokyo, Japan (152-8552)

**Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, O-okayama, Meguro, Tokyo, Japan (152-8552)

のような理由から、打具でのインパクト中あるいは地面との衝突中に生じるボール変形量や衝撃力に関する研究は、ゴルフ¹⁾²⁾、テニス³⁾、バスケットボール⁴⁾などの多くの種目で見られる。ただし、これらの種目において生じるボール変形は、ボールが板のような平面と衝突する場合のような平面的な変形である。また実験の映像解析の多くは、2次元的に行われたものであった。

しかしながら、サッカーのキックにおいては、足部の接触部位がボールに食い込むようにボールが変形するものと考えられる。また、約1/100sというインパクト中には3次元的に足部の角度変位が生じ得るため、インパクト中に生じる現象を2次元的に映像解析することは非常に困難であると推察される。これらの理由により、サッカーのキックのインパクト中に生じるボール変形量や衝撃力に関する研究は非常に少ない。

Tsaousidis and Zatsiorsky⁵⁾はトゥーキックの2次元的な映像解析において、シューズをインパクト中にも変形を生じないものと仮定した幾何学モデルで表現し、モデルのつま先とボールの位置関係からボール変形量の時間変化を算出した。Asai et al.⁶⁾は映像解析によって得た運動学的データを基に、有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションを行い、インステップキックおよびカーブキックのインパクト中に生じる力学現象について検討している。しかしながら、キックのインパクト中に生じるボール変形量や衝撃力を映像解析によって3次元的に分析した研究は見られない。

また、衝突物体の形状を考慮できるHertzの接触理論⁷⁾⁸⁾では、ボール変形量から衝撃力を算出することができ、これを用いてゴルフのインパクト¹⁾、野球のデッドボール⁹⁾、サッカーのヘディング¹⁰⁾などで生じる衝撃力を算出した報告が見られる。このHertzの接触理論では、平面的なボール変形だけでなく、曲面がボールに食い込むような変形も考慮できる。

以上のことから、本研究の目的は、2次元の

な映像解析が困難であると思われるインサイドキック（足の内側面をボールに当ててキックする）動作を3次元的に映像解析することによって、インパクト中のボール変形量を算出し、さらにHertzの接触理論を用いてボール変形量から衝撃力を解析することである。

なお、本研究において3次元的にボール変形量を算出するためには、ボール中心の位置が既知である必要がある。しかし、3次元的にボール中心の位置を算出する方法について述べられた研究は見当たらない。本研究では3次元的な映像解析によってボール中心の位置を算出する方法の妥当性についても検討した。

2. 方 法

2.1 ボール中心の算出に関する予備研究

2.1.1 実験

3次元的にボール変形量を算出するためには、ボール中心の位置が既知である必要がある。そのため、まず3次元的にボール中心の位置を算出する方法を検証するための予備実験を行った。実験は実験室内で実施し、サッカーボールはFIFA公認5号球を使用した。

サッカーボールを1~2m/s程度（キック実験の1/10）の速度で床の上を転がした。ボールの運動を、各撮影フィールドを同期させた2台の高速ビデオカメラ（Photron社製、FASTCAM-PCI500C）によって、撮影速度250fps（キック実験の1/10）、露光時間1/1,000sで撮影した。カメラはボール進行方向に対して右側方と右後方に設置した。試技前に、3次元DLT法のキャリブレーションのため、キャリブレーションボールを9箇所に鉛直に立て、分析空間内に54個のコントロールポイントを撮影した。ボール表面上の撮影されるエリアには、約5cm間隔で多数のシール（直径1cm）をマーカーとして貼付した。

2.1.2 データ処理

高速ビデオカメラによる映像からビデオ動作解析システム（DKH社製、Frame-DIAS II）

を用いてデジタイズを行った。デジタイズはまず自動追尾により行ったが、自動追尾が困難だった場合は手動で行った。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、ボールが約 1/2 回転する間に両カメラから撮影できた 8 点とした。デジタイズ位置の 3 次元座標を 3 次元 DLT 法により得た。本研究では、分析空間内の水平かつボール進行方向を Y 軸、鉛直上方向を Z 軸、Y 軸と Z 軸に垂直な方向を X 軸とした右手直交座標系を静止座標系として地面に設定した。キャリブレーション範囲は 0.6m (X 軸) × 0.8m (Y 軸) × 0.5m (Z 軸) の空間であり、Frame-DIAS II のキャリブレーションでのコントロールポイントの実座標と 3 次元 DLT 法による算出座標の誤差は 1 ~ 2mm の範囲であった。

2. 1. 3 ボール中心

デジタイズしたボール表面上の点のうち、各点の間隔が約 8cm となる 3 点を 2 組（それぞれの 3 点は重複しない）、さらに各点の間隔が約 10cm となる 3 点を 1 組つくった。ここで、それぞれの 3 点の組において、ボール表面上のある点 (X_n, Y_n, Z_n) ($n = 1, 2, 3$) とボール中心 (X_0, Y_0, Z_0) の距離はボール半径 11cm (0.11m) であるため

$$(X_n - X_0)^2 + (Y_n - Y_0)^2 + (Z_n - Z_0)^2 = 0.11^2 \quad (1)$$

が成り立つ。これを満たす 3 つ ($n=1, 2, 3$) の式からなる連立方程式を解くことによって、それぞれの 3 点の組におけるボール中心の位置座標 (X_0, Y_0, Z_0) を算出した。

各組で算出することにより 3 通りで得たボール中心の位置座標各成分について、Winter¹¹⁾が示した残差分析により最適な遮断周波数 (3 ~ 8Hz) 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った。

2. 2 インサイドキック実験

2. 2. 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 23.4 ± 0.5 歳, 身長 171.4

± 5.2 cm, 体重 57.6 ± 3.9 kg) とした。被験者には事前に実験の目的や内容などを説明し、実験協力への同意署名を得た。いずれの被験者も利き脚は右脚であった。実験は人工芝を敷いた屋内で実施し、被験者はインドア用シューズを着用した。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。

被験者には、1 歩助走によるインサイドキックを行って、ミニゴールのネットに設置したターゲットを狙うように指示した。ターゲットは幅 1m, 地面からの高さ 0.5m の長方形であり、ボール設置位置からの距離は 4m とした。また被験者には、試技間のスイング速度を統一するように指示した。各被験者はウォーミングアップ後に、指示に従ったキックを練習した後、3 試技実施した。

キック動作を、各撮影フィールドを同期させた 2 台の超高速ビデオカメラ (nac 社製, MEMRECAM fx-K4) によって、撮影速度 2,500fps, 露光時間 1/5,000s で撮影した。カメラはターゲット方向に対して右側方と右後方に設置した。キック試技前に、3 次元 DLT 法のキャリブレーションのため、キャリブレーションボールを 9 箇所に鉛直に立て、分析空間内に 54 個のコントロールポイントを撮影した。また、キック試技におけるボールの軌道を確認するため、被験者後方にデジタルビデオカメラを設置した。

直径 1cm 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、足部外側でキック試技中に変形を生じないエリアに 3 箇所 (第 5 中足骨骨頭、踵骨外側部、距骨外側部)、下腿前面でキック試技中に変形を生じないエリアに 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 台の超高速ビデオ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 (踵との位置関係が不変) 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、キック試技前に下腿前面の3箇所のマーカー（内果との位置関係が不変）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、踵と内果のマーカーを取り外し、キック試技を行った。なお、ボール表面上の撮影されるエリアには、約5cm間隔で多数のシール（直径1cm）をマーカーとして貼付した。

2. 2. 2 データ処理

超高速度ビデオカメラによる映像からビデオ動作解析システム（DKH 社製、Frame-DIAS II）を用いてデジタイズを行った。デジタイズはまず自動追尾により行ったが、自動追尾が困難だった場合は手動で行った。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（Fig.1）。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、足部の接触やボールの回転があっても両カメラから撮影でき、かつインパクト中に変形を生じないエリアの3点（各点の間隔は約10cm）とした（Fig.1）。本研究ではインパクト開始前10フレームからインパクト終了後10フレームまでを分析に用いるが、フィルターによるデータ端点の歪みの影響を考慮してインパクト開始前の約30フレームからインパクト終了後の約30フレームまでの範囲をデジタイズした。デジタイズ位置の3次元座標を3次元DLT法により得た。本研究では、分析空間内の水平かつターゲット方向をY軸、鉛直上方向をZ軸、Y軸とZ軸に垂直な方向をX軸とした右手直交座標系を静止座標系として地面に設定した。キャリブレーション範囲は0.9m(X軸)×0.9m(Y軸)×0.5m(Z軸)の空間であり、Frame-DIAS IIのキャリブレーションでのコントロールポイントの実座標と3次元DLT法による算出座標の誤差は1～2mmの範囲であった。

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

Fig.1 Digitizing points on the leg, foot and ball.

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、試技中における内果の位置座標を算出した。さらに、足部質量中心は、つま先と踵の位置から阿江¹²⁾の身体部分慣性係数を用いて算出した。足関節中心は、外果と内果の中点として算出した。また、デジタイズしたボール表面上の3点からボール半径11cmの距離にある点としてボール中心の位置座標を算出した。ただし、本研究における「ボール中心」の位置は、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ものとした。

つま先、踵、足部質量中心、外果、内果、足関節中心、ボール中心の計7点の位置座標各成分について、Winter¹¹⁾が示した残差分析により最適な遮断周波数（25～121Hz）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った。

これまで、インパクト局面を含む打動作を250fps程度の速度で撮影して分析する場合、信号の周波数特性が急激に変化することによって、最適な遮断周波数を決定することが困難であることが知られている¹³⁾。しかしながら、本研究では2,500fpsという超高速度でキック動作を撮影したために、約25フレームに渡るインパクト局面は瞬間的なスパイク信号という程の急激な信号の変化とはならない。さらに本研究ではインパクト開始前10フレームからインパ

クト終了後 10 フレームまでのデータを用いて残差分析を行ったため、インパクト局面のローデータと平滑化後のデータのフィット（残差）をかなり反映した最適な遮断周波数が決定されることが考えられる。これらのことから、本研究において残差分析により決定した最適な遮断周波数で Butterworth 型デジタルローパスフィルターによる平滑化を行っても、インパクト局面のピークやインパクト前後の信号を著しく歪める可能性は低いと考えられる。実際にローデータと平滑化後のデータのそれぞれの位置座標を微分して得た速度および加速度について比較したところ、平滑化によって信号の本来の変化の特徴を歪めている様子は見られなかった。

2. 2. 3 足部質量中心速度およびボール初速度

インパクト直前の足部質量中心速度の各成分は、インパクト開始前 10 フレームの各変位に関する 2 次回帰式の 1 次導関数から求めた。各成分の値を合成することによって、各試技のインパクト直前の足部質量中心速度の大きさ（絶対値）を算出した。ボール初速度の水平成分は、ボール中心のインパクト終了後 10 フレームの水平方向変位に関する 1 次回帰式の 1 次導関数として算出した。ボール初速度の鉛直成分は、ボール中心のインパクト終了後 10 フレームの鉛直方向変位に関する 2 次回帰式（この 2 次回帰式の 2 次導関数は重力加速度 -9.81m/s^2 に等しい）の 1 次導関数から求めた。各成分の値を合成することによって、各試技のボール初速度の大きさ（絶対値）を算出した。

2. 3 ボール変形量の算出方法

蹴り脚の足部質量中心に単位ベクトルを用いて右手系の足部移動座標系を定義した。つま先から踵へ向かうベクトルを z 軸、踵から足関節中心へ向かうベクトルを補助ベクトルとし、補助ベクトルと z 軸の外積により x 軸を、 z 軸と x 軸の外積により y 軸を定義した。

インサイドキックにおいてボールと接触し、インパクト中にボールに最も深くまで食い込む

Fig.2 Definitions of the contact point and the ball deformation.

部分を定義するため、足部移動座標系の yz 面に平行で内果を通る平面を接触面とした。ボール中心からこの接触面に下ろした垂線の交点をボール接触点として算出した (Fig.2)。接触面はボール接触点を算出するために設定したものであり、足部をボールに平面的な変形を生じさせるような平面と仮定するものではない。また、ボール中心と接触面（ボール接触点）の距離が、ボール半径 (11cm) より小さいときを「インパクト中」と定義した。

インパクト中に足部の内側部はボールに食い込み、ボールには変形が生じる。足部の接触面に対して法線方向のボール変形量は、ボール中心と接触面（ボール接触点）の距離をボール半径 (11cm) から減じた量として算出した (Fig.2)。

2. 4 衝撃力の算出方法

衝突物体の形状を考慮できる Hertz の接触理論⁷⁾⁸⁾を用いて、ボール変形量から衝撃力を算出する。Hertz の接触理論では、ボールが地面に衝突する場合に生じるような平面的な変形だけでなく、キックのインパクトのように 2 次曲面 (3 元 2 次方程式で表される曲面) が球体に食い込むような変形も考慮できる。また Hertz の接触理論の中では、法線方向の衝撃力は変形量の $3/2$ 乗に比例することが示されている。Queen et al.¹⁰⁾ は、Hertz の接触理論を用いてヘディング時に生じる法線方向の衝撃力を推定している。

インサイドキックのインパクト後のボールが

完全に無回転であることは少ないことから、多くの場合インパクト中のボールには Fig.3 に示すように足部の接触面に対して法線方向の衝撃力 F_n だけでなく、接線方向の衝撃力（摩擦力） F_t も生じていると考えられる。足部の接触面に対して法線方向のボール変形量を β としたときの法線方向の衝撃力 F_n は、Hertz の接触理論を用いると

$$F_n = k\beta^{3/2} \quad (2)$$

と表される。ここで k は、ボールおよび足部の接触面形状（半径など）、縦弾性係数、ポアソン比によって決定される定数であるが、これらの値を得ることは困難であるため、本研究ではこれらの値から定数 k を求めることはしない。一方、接線方向の衝撃力（摩擦力） F_t をクーロン摩擦で表現すると

$$F_t = \mu F_n \quad (3)$$

となる。ここでは μ 摩擦係数であり、各試技のインパクト中においては一定であると仮定する。(2)、(3) 式を用いるとボールに作用する衝撃力の絶対値 $|F_b|$ は

$$\begin{aligned} |F_b| &= \sqrt{F_n^2 + F_t^2} = \sqrt{F_n^2 + (\mu F_n)^2} = \sqrt{(1 + \mu^2) F_n^2} \\ &= \sqrt{1 + \mu^2} k \beta^{3/2} \end{aligned} \quad (4)$$

と表され、 $\sqrt{1 + \mu^2} k$ は定数となるため、これを N とおくと

$$|F_b| = N \beta^{3/2} \quad (5)$$

となる。インパクトによるボールの運動量の変化とボールに作用する衝撃力の力積の関係から、定数 N は

$$N = \frac{m_b V_{b1}}{\int_0^{t_i} \beta^{3/2} dt} \quad (6)$$

で表される。ここで m_b はボールの質量、 V_{b1} はボール初速度、 t_i は足部とボールの接触時間である。(6) 式からもわかるように、この定数 N は試技ごとに異なる値となる。(5)、(6) 式より、ボールに作用する衝撃力の絶対値 $|F_b|$ は

$$|F_b| = \frac{m_b V_{b1}}{\int_0^{t_i} \beta^{3/2} dt} \beta^{3/2} \quad (7)$$

Fig.3 Definition of the impact force.

となり、この(7)式を用いて各試技における衝撃力の絶対値の時間変化を算出した。

3. 結果と考察

3.1 ボール中心

床の上を約 1/2 回転しているサッカーボールについて、3 通りで算出したボール中心の位置座標各成分を Fig.4 に示した。

ボール表面上の各点の間隔が約 8cm の一方の 3 点（「8cm ①」とする）を用いて算出したボール中心の位置は、同じく間隔が約 8cm の全く異なる 3 点（「8cm ②」とする）、あるいは各点の間隔が約 10cm の 3 点（「10cm」とする）を用いて算出したボール中心の位置とよく一致していた。また、ボール中心は直線的に移動し、位置座標 Z 成分（鉛直成分）はボール半径である 11cm の高さを推移するデータが示された。「8cm ①」、「8cm ②」、「10cm」の 3 通りで算出したボール中心の Z 成分の約 1/2 回転中の平均値は、それぞれ 10.96cm, 10.93cm, 10.99cm であり、標準偏差は 0.03cm, 0.02cm, 0.05cm であった。また平均値に対するばらつきの最大値は 0.10cm, 0.03cm, 0.09cm であった。以上のことから、ボール表面上の各点の間隔が 8cm 以上の 3 点からボール半径 11cm の距離にある点としてボール中心の位置を算出する方法は、妥当であると考えられた。

なお、キック試技においては、足部の接触やボールの回転があっても両カメラから撮影でき、かつインパクト中に変形を生じないエリアの 3 点を用いる必要がある。この条件を満た

Fig.4 Calculated position of the center of the ball rolling on the ground.

し、各点の間隔が約 10cm の 3 点を用いてキック試技におけるボール中心を算出した。いずれのキック試技においても、インパクト中の 3 点の各 2 点間距離のばらつきは標準偏差で 1mm 以下（ローデータを用いるためノイズによる影響が含まれる）であり、インパクト中の変形を無視できるエリアの 3 点を用いていたことが示唆された。ボールが地面に接地した状態にあるインパクト開始前においては、ボール中心の Z 成分はおよそ 11cm と算出され、キック試技に

Fig.5 Time changes of the ball deformation during the ball impact phase for Subject A and B.

おいても妥当に算出されることが示唆された。

3.2 ボール変形量

被験者 A と B の各 3 試技（計 6 試技）について、足部の接触面に対して法線方向のボール変形量の時間変化を Fig.5 に示した。また Table 1 は、インパクト直前の足部質量中心速度、ボール初速度、ボール変形量のピーク値および衝撃力のピーク値について、被験者別に平均値±標準偏差を示したものである。

これまで、インサイドキックにおけるボール変形量に関する報告は見られない。Tsaousidis and Zatsiorsky⁵⁾はトゥーキックの 2 次元分析において、シューズをインパクト中も変形を生じないものと仮定した幾何学モデルで表現し、モデルのつま先とボール下端点の水平方向における位置関係からボール変形量の時間変化を算出した。本研究ではインサイドキックにおける足部の接触面に対して法線方向のボール変形量を算出する必要がある。しかし、先行研究の方法のように足部の位置を表す固定点（トゥーキックにおけるつま先など）とボールの位置を表す点（ボール下端点やボール中心点など）との位置関係からボール変形量を算出すると、必ずしも接触面に対して法線方向のボール変形量とはならない。インサイドキックでは各試技のインパクト開始時における足部の接触面の角度は必ずしも同一ではなく、またインパクト中には足部（接触面）の角度変位を生じ得る（本研究の

Table 1 Mean and standard deviation of foot velocity, ball velocity, peak ball deformation and peak impact force.

Subject ID	Trial n	Foot velocity (m/s)	Ball velocity (m/s)	Peak ball deformation (m)	Peak impact force (N)
		Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD
A	3	11.1 $\pm$ 0.2	15.0 $\pm$ 0.4	0.035 $\pm$ 0.001	1090 $\pm$ 46
B	3	8.7 $\pm$ 0.1	12.3 $\pm$ 0.2	0.028 $\pm$ 0.001	818 $\pm$ 22
C	3	10.4 $\pm$ 0.8	13.8 $\pm$ 0.9	0.032 $\pm$ 0.002	881 $\pm$ 51
D	3	11.1 $\pm$ 0.1	15.3 $\pm$ 0.4	0.036 $\pm$ 0.001	1096 $\pm$ 71
E	3	11.4 $\pm$ 0.1	15.2 $\pm$ 0.2	0.037 $\pm$ 0.003	1080 $\pm$ 27

映像でも確認された)。そのため、インサイドキックにおける足部の接触面に対して法線方向のボール変形量を2次元分析によって算出することはほぼ不可能であると推察される。そこで、本研究では3次元分析において足部の接触面の位置を定義し、接触面上のボール接触点とボール中心との位置関係からインサイドキックにおけるボール変形量の時間変化を3次的に算出した。

サッカーのキックにおいて、インパクト直前の足部質量中心速度（スイング速度）は、ボール変形量に影響を及ぼすと考えられる。本研究におけるインパクト直前の足部質量中心速度は、各被験者内ではほぼ類似していたものの、被験者間では違いが見られた（被験者A：11.1m/s、被験者B：8.7m/s）。ボール変形量のピーク値（Fig.5, Table 1）も同様に、各被験者内では類似していたが、被験者間では違いが見られた（被験者A：3.5cm、被験者B：2.8cm）。このことから、本研究において算出されたボール変形量は、インパクト直前の足部質量中心速度の影響を反映できていることが示唆された。ただし、インパクト位置、足部の角度、足関節の固定、足部の慣性などの違いもボール変形量に影響を及ぼすものと推察される。

ボール圧縮過程では、足部とボールの接触が始まったインパクト開始直後からボール変形が生じ、ボール変形量は直線的に増加していた。ボール圧縮速度は徐々に小さくなり、接触時間の1/2付近においてボール変形量はピーク値に達していた。ボール復元過程では、徐々に復元速度が大きくなった後、ボール変形量は直線的

に減少していた。

本研究では、ボール中心と接触面（ボール接触点）の距離が、ボール半径（11cm）より小さいときを「インパクト中」と定義した。この定義によって決定したインパクト開始および終了の前後各1フレームについて、右側方に設置したカメラで撮影した画像を、ボール中心と接触面の距離の時間変化と併せて Fig.6 に示した。これを見ると、ボール中心と接触面の距離から定義したインパクトの開始および終了が、足部とボールの接触状態と一致しているものと思われた。また、足部とボールの接触が終了するときには、ボールが復元していることが示されている。この点に関しては Tsousidis and Zatsiorsky⁵⁾のボール変形量のデータと一致していた。

本研究のインサイドキックにおけるボール変形量のピーク値の平均値は2.8～3.7cm（Table 1）であり、Tsousidis and Zatsiorsky⁵⁾のトゥーキックにおけるピーク値の平均値8.0～10.0cmと比較すると半分以下であった。この違いの要因として以下の3点が考えられる。まず、インサイドキックよりもトゥーキックの方が足部とボールの接触面積が小さいために、トゥーキックの方が接触面の圧力が大きくなりボール変形量が大きくなるものと考えられる。次に、トゥーキックのインパクト中にはシューズのつま先から中足骨付近に大きな変形が生じると考えられるが、彼らはインパクト中のシューズには変形が生じないものと仮定してボール変形量を算出している。さらに、本研究のインパクト直前の足部質量中心速度（平均値8.7～11.4m/s）は、

Fig.6 Definition of the ball impact phase and high-speed photographs of contact between foot and ball.

彼らのインパクト直前の足部の速度（平均値 19.6 ~ 20.1m/s）の半分程度であったことが挙げられる。

インパクトの衝撃により、蹴り脚に貼付したマーカーには振動が生じると予想され、これは算出されたボール変形量の誤差の要因になり得ると考えられる。しかしながら、マーカーの振動は微小であり、ボール変形量に及ぼす影響は限られた程度であると推察される。先に述べたインパクト直前の足部質量中心速度との関係、算出されたインパクト開始および終了の映像との一致、先行研究⁵⁾との比較から、本研究において用いたボール変形量の算出方法は妥当であると考えられた。

3.3 衝撃力

ボール変形量と同様に、被験者 A と B の各 3 試技（計 6 試技）について、衝撃力の時間変化を Fig.7 に示した。本研究では、インパクトによるボールの運動量の変化とボールに作用する衝撃力の力積が等しいという関係から、(6) 式における定数 N を求めたため、衝撃力の時

Fig.7 Time changes of the impact force during the ball impact phase for Subject A and B.

間変化曲線の積分値（力積）がインパクト直後のボールの運動量と一致するように算出されるものである。

本研究では、ボール変形量の時間変化のデータを用いて衝撃力の絶対値の時間変化を算出した。サッカーのキックにおいて、インパクト直前の足部質量中心速度（スイング速度）は、ボール変形量と同様に、衝撃力にも影響を及ぼすと考えられる。本研究における衝撃力のピーク値 (Fig.7, Table 1) は、各被験者内では類似して

いたが、被験者間では違いが見られ（被験者 A: 1,090N, 被験者 B: 818N）、算出された衝撃力はインパクト直前の足部質量中心速度の影響を反映できていることが示唆された。ただし、インパクト位置、足部の角度、足関節の固定、足部の慣性などの違いも衝撃力に影響を及ぼすものと推察される。

衝撃力は、インパクト直後にはゆるやかに増加していた。増加する割合は大きくなった後、徐々に小さくなり、接触時間の 1/2 付近において衝撃力はピーク値に達していた。衝撃力の減少する割合が徐々に大きくなった後、再びゆるやかに減少していた。

本研究のインサイドキックにおける衝撃力のピーク値の平均値は 818 ~ 1,096N (Table 1) であった。これに対して、Asai et al.⁶⁾が有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションによって計算したインステップキックおよびカーブキックにおける衝撃力の絶対値のピーク値は約 2,500N と報告され、本研究のピーク値は小さい傾向にある。その理由として、インパクト直前の足部の速度の違いが挙げられる。本研究ではインパクト直前の足部質量中心速度が 8.7 ~ 11.4m/s であったのに対して、Asai et al.⁶⁾はインパクト直前の足部の速度を 25m/s としていた。また、キックの種類により、ボールと接触する足部の部位が異なるため、足部とボールの接触部の圧力に違いが生じるためであると考えられる。

ただし、本研究が行った衝撃力の算出方法には、以下に挙げるような仮定をおいているため、実際の衝撃力を推定するには限界がある。まず第 1 に、足部の接触面に対して法線方向の衝撃力を表す際に用いた Hertz の接触理論は、弾性体の静的な接触問題を扱う理論として導かれたものである。Hertz の接触理論を衝突問題へ適用⁷⁾⁸⁾するために、本研究ではキックのインパクトにおいて、衝突の継続時間は系の最低次の固有振動周期と比較して長く、振動は無視できると仮定している。さらに、ボールと足部のインパクトにおける粘性はないものと仮定し

ているが、ボールと足部のインパクトにおける粘性が高いとは考えにくく、衝撃力に及ぼす影響は小さいと考えられる。先行研究においても Queen et al.¹⁰⁾はこれらの仮定に基づき、Hertz の接触理論を用いてヘディング時に生じる法線方向の衝撃力を算出している。

また第 2 に、接線方向の衝撃力（摩擦力）をクーロン摩擦で表現している、すなわち摩擦係数を一定としている。そのため、本研究では各試技のインパクト中に摩擦係数あるいは摩擦の種類に変化が生じないものと仮定している。しかし、本研究ではデータとして示していないが、ボール初速度ベクトルは接線方向よりも法線方向に近かったことから、衝撃力の法線成分と比較して接線成分は小さいものと推察される。このことに加え、本研究では接線成分のみを算出してその増減動態を議論するのではなく、(7) 式を用いて衝撃力の絶対値を算出することを考慮すると、摩擦係数を一定とする影響は小さいと予想される。先行研究においても Asai et al.⁶⁾は摩擦係数を一定値で設定し、有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションを行っている。以上のことを踏まえると、これらの限界が衝撃力の増減動態に及ぼす影響は小さく、今後のインパクト中の運動力学的分析の基礎とする上では算出された衝撃力は妥当な範囲であると考えられる。

4. ま と め

2 台の高速度ビデオカメラ (250fps) を用いて、地面を転がっているサッカーボールの運動を撮影し、3 次元的にボール中心の位置を算出する方法について検討した。

その結果、ボール表面上にあり、各点の間隔が 8cm 以上の 3 点からボール半径 11cm の距離にある点としてボール中心の位置を算出できることが示唆された。

また、2 台の超高速度ビデオカメラ (2,500fps) を用いて、サッカーのインサイドキック動作を撮影し、インパクト中に生じるボール変形量および衝撃力を 3 次元的に算出する方法について

検討した。

その結果, 足部の接触面の位置を定義し, 接触面上のボール接触点とボール中心との位置関係からボール変形量を算出できることが示唆された。さらに衝突物体の形状を考慮できるHertzの接触理論を用いて, ボール変形量から衝撃力を算出できることが示唆された。

参 考 文 献

- 1) 本江哲行 他; ゴルフボールと弾性支持された板の衝突特性, スポーツ工学シンポジウム2004 講演論文集, pp.162-167, 2004.
- 2) 佐藤房子 他; ゴルフ・ボールの有限要素モデルの構築と衝突シミュレーション, スポーツ工学シンポジウム2005 講演論文集, pp.51-56, 2005.
- 3) Goodwill,S.R., et al. ; Experimental and finite element analysis of a tennis ball impact on a rigid surface, Sports Engineering, Vol.8, No.3, pp.145-158, 2005.
- 4) Stronge,W.J. and Ashcroft,A.D.C. ; Oblique impact of inflated balls at large deflections, Int. J. Impact Eng., Vol.34, No.6, pp.1003-1019, 2007.
- 5) Tsaousidis,N. and Zatsiorsky,V. ; Two types of ball-effector interaction and their relative contribution to soccer kicking, Human Movement Science, Vol.15, No.6, pp.861-876, 1996.
- 6) Asai,T., et al.; The curve kick of a football I : impact with the foot, Sports Engineering, Vol.5, No.4, pp.183-192, 2002.
- 7) Timoshenko,S.P. and Goodier,J.N. ; 弾性論, 金多潔 (監訳), コロナ社, 東京, pp.423-436, 1973.
- 8) Greszczuk,L.B. ; Damage in composite materials due to low velocity impact, In:Impact Dynamics, Zukas JA et al. (eds), John Wiley & Sons, New York, pp.55-94, 1982.
- 9) Crisco,J.J., et al. ; The influence of baseball modulus and mass on head and chest impacts : a theoretical study, Med. Sci. Sports Exerc., Vol.29, No.1, pp.26-36, 1997.
- 10) Queen,R.M., et al. ; Theoretical study of the effect of ball properties on impact force in soccer heading, Med. Sci. Sports Exerc., Vol.35, No.12, pp.2069-2076, 2003.
- 11) Winter,D.A. ; Biomechanics and motor control of human movement, 2nd ed, John Wiley & Sons, New York, pp.41-43, 1990.
- 12) 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, Jpn. J. Sports Sci., Vol.15, No.3, pp.155-162, 1996.
- 13) Nunome,H., et al. ; Impact phase kinematics of instep kicking in soccer, J. Sports Sci., Vol.24, No.1, pp.11-22, 2006.