

2013年度 修士論文

サッカーのボレーキックにおける足部の速度
およびインパクト位置がボール速度に及ぼす影響

The effect of foot velocity and impact point on
kicked ball velocity in soccer volley kick

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科

スポーツ科学専攻 身体運動科学研究領域

5012A038-3

谷 茂樹

Shigeki TANI

研究指導教員： 矢内 利政 教授

目次

第 1 章 緒言	・・・ 1
1・1 インステップキック	
1・2 インパクト後のボール速度に影響を及ぼす要因	
1・2・1 足部の速度	
1・2・2 インパクト位置	
1・3 ボレーキック	
1・4 意義・目的	
第 2 章 実験方法	・・・ 12
2・1 被験者	
2・2 実験試技	
2・3 データ収集	
2・4 データ処理	
2・5 分析項目	
2・6 統計処理	
第 3 章 結果・考察	・・・ 24
3・1 ボール中心の推定	
3・2 発射されたボールの特徴	
3・3 速度条件間における比較	
3・3・1 足部およびボールの速度	
3・3・2 インパクト位置	
3・4 被験者間分析	
3・4・1 足部の速さ	
3・4・2 インパクト位置の長軸成分	
3・4・3 インパクト位置の短軸成分	
3・4・4 足部の速度の水平角	
3・4・5 力積水平角	
3・5 被験者内分析	
第 4 章 結論	・・・ 48
参考文献	
謝辞	

第 1 章 緒言

1・1 インステップキック

サッカーは、獲得した得点の多さを対戦相手と競うスポーツである。そのため、サッカーにおける様々なプレーの中で、得点する技術であるシュートは重要なプレーの 1 つである。シュートに用いるキックには、ボールを足部の甲で蹴るインステップキック、足部の内側面で蹴るインサイドキックなどがある。それぞれのキックには特徴があり、選手はシュートをする状況に応じてそれぞれのキックを使い分けている。インステップキックはインパクト後に大きなボール速度を得ることができる (Nunome et al. 2002)。一方、インサイドキックは狙ったシュートコースに正確にキックすることができる (大橋ら 1997)。試合で得点するためには、相手ゴールキーパーのセービング動作時間を短縮できるような、ボール速度が大きなシュートを放つことが求められる。そのため、インステップキックはシュートに最適なキックであると考えられ、シュート場面での使用頻度は 45% とすべてのキックの種類の中で最も多いとされている (大橋ら 1997)。以上のことから、サッカーにおいて得点するためにはインステップキックを用い、インパクト後に大きなボール速度を得ることが重要である。

1・2 インパクト後のボール速度に影響を及ぼす要因

これまでに、インステップキックにおいてインパクト後のボール速度に影響を及ぼす様々な要因が明らかにされている (Isokawa & Lees 1988、Barfield et al. 1995、Cabri et al. 1988、石井ら 2007、戸刈ら 1972)。インパクト後のボールの挙動を最終的に決定する足部とボールのインパクト局面に着目すると、蹴り足の足部の速度、足部とボールの質量、シューズとボールの材質、インパクト位置 (足部とボールの接触位置) などがインパ

クト後のボール速度に影響を及ぼす要因として考えられる。その中で選手自身が試合においてコントロールすることができる要因は足部の速度とインパクト位置であることから、この 2 点についてもこれまでに数多くの研究が行われてきた。

1・2・1 足部の速度

戸荻ら（1972）は、3 名の被験者に対して様々なボール速度の大きさをプレースキック（静止しているボールへのキック）におけるインステップキックを行わせた。そして、足部の速度の大きさとボール速度の大きさとの関係を検討した結果、すべての被験者において足部の速度の大きさとボール速度の大きさとの間に高い相関関係が認められ（ $r=0.856, 0.898, 0.942$ ）、足部の速度が大きい試技ほどインパクト後のボール速度が大きかったと報告している。Asami & Nolte（1983）は、複数の被験者に対してプレースキックにおける全力のインステップキックを行わせた結果、足部の速度の大きさとボール速度の大きさとの間には高い相関関係が認められ（ $r=0.738$ ）、インパクト後に大きなボール速度を得るためには足部の速度を大きくすることが重要であると報告している。

また、Zernicke & Roberts（1978）は 5 人の被験者に対してボール速度の大きさを 3 段階（低速： $15.2 \pm 1.5 \text{ m/s}$ 、中速： $21.3 \pm 1.5 \text{ m/s}$ 、高速： 27.4 m/s 以上）に調整させてプレースキックにおけるインステップキックを行わせ、全 45 試技における足部の速度の大きさとボール速度の大きさとの関係を検討した。そして、足部の速度の大きさとボール速度の大きさとの関係を以下のような近似式で表した（式①）。

$$v_b = 1.23 \cdot v_f + 2.72 \quad (r^2=0.92, p<0.005) \text{ — 式①}$$

このとき、 v_b はインパクト後のボール速度の大きさ、 v_f は足部の速度の大きさを表している。また、この式から算出されるボール速度の大きさは、実測値との誤差が平均で 1.37m/s であり、精度の高いものであると報告している。このことから、インパクト後のボール速度の大きさは足部の速度の大きさによって概ね説明することができると考えられる。

Plagenhoef (1971) は、インステップキックを図 1-1 のような足部とボールの衝突と考え、運動量保存の法則と反発係数の式を利用し、インパクト後のボール速度の大きさを以下のように記述している (式②)。

$$v_b = \frac{(1+e)m_f}{(m_f+m_b)} v_f \quad \text{— 式②}$$

このとき、 m_f は脚の有効質量、 m_b はボールの質量、 e は反発係数を表している。Lees & Nolan (1998) は、上記の式②における $m_f/(m_f+m_b)$ を足部とボールの質量の現実的なデータをもとに約 0.8、 $(1+e)$ を約 1.5 と推定し、インステップキックにおけるインパクト後のボール速度の大きさと足部の速度の大きさとの関係を下記のような簡略的な式で表した (式③)。

$$v_b = 1.2 \cdot v_f \quad \text{— 式③}$$

式③は、Zernicke & Roberts (1978) が報告している式①と概ね一致することから、この式が足部の速度の大きさとボール速度の大きさとの関係を表す妥当な式である可能性を示唆している。このように、プレースキックにおけるインステップキックではインパクト後のボール速度の大きさは足部の速度の大きさのみによって概ね説明することができることから、足部の

速度の大きさはインパクト後のボール速度の大きさを決定する大きな要因であると考えられる。

また、Ishii et al. (2012) はインパクト後のボール速度の大きさに影響を及ぼす要因を、足部とボールの鉛直方向への動きを考慮しない衝突モデル（図 1 - 2）を用いて動力的に検討した。まず、足部についての運動量と力積の関係を

$$\int_{t_0}^{t_1} R_{ax} dt + \int_{t_0}^{t_1} F_f dt = m_f(v_{f1} - v_{f0}) \quad \text{— 式④}$$

と表した。このとき、 t_0 と t_1 はインパクト開始およびインパクト終了の時間、 R_{ax} は水平方向における足関節間力、 F_f はボール反力、 v_{f0} と v_{f1} は t_0 および t_1 における足部の速度の大きさを表している。足部についての角運動量と角力積の関係を

$$\int_{t_0}^{t_1} T_a dt - k \int_{t_0}^{t_1} R_{ax} dt - l \int_{t_0}^{t_1} F_f dt = I_f(\omega_{f1} - \omega_{f0}) \quad \text{— 式⑤}$$

と表した。このとき、 T_a は足関節トルク、 k は足部質量中心（COM）から足関節までの距離、 l は足背面におけるインパクト位置から足部質量中心までの距離、 I_f は足部の慣性モーメント、 ω_{f0} と ω_{f1} は t_0 および t_1 における足部の角速度を表している。ボールについての運動量と力積の関係を

$$-\int_{t_0}^{t_1} F_f dt = m_b v_{b1} \quad \text{— 式⑥}$$

と表した。このとき、 v_{b1} は t_1 におけるボール速度の大きさを表している。反発係数を

$$e = -\frac{v_{b1} - (v_{f1} - l\omega_{f1})}{-(v_{f0} - l\omega_{f0})} \quad \text{— 式 ⑦}$$

と表した。そして、式④～式⑦よりインパクト後のボール速度の大きさを以下の式⑧で表した。

$$V_{b1} = \frac{(I_f k + I_f) \int_{t_0}^{t_1} R_{ax} dt - I_f \int_{t_0}^{t_1} T_a dt + (1 + e) I_f m_f (v_{f0} - l\omega_{f0})}{l^2 m_f m_b + I_f (m_f + m_b)} \quad \text{— 式 ⑧}$$

そして、インパクト後のボール速度の大きさに足部の質量、足部の長さ、足部の速度の大きさ、水平方向における足関節の関節間力、足関節トルクが及ぼす影響を検討し、足部の速度の大きさがインパクト後のボール速度の大きさに最も影響を及ぼす要因であると報告している。

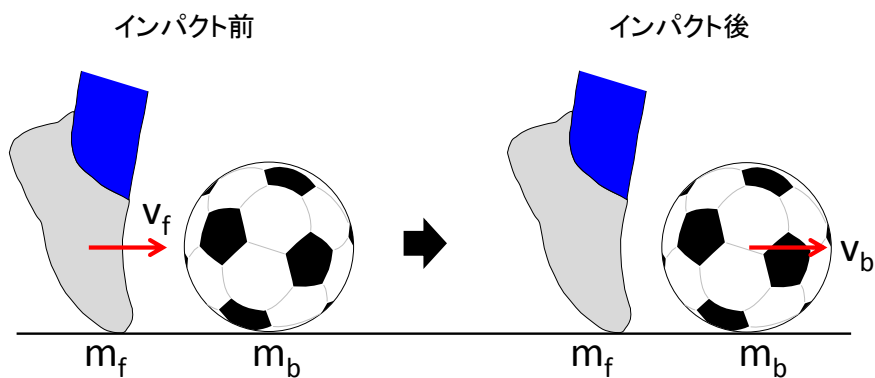


図 1 - 1 足部とボールの衝突モデル（Plagenhoef 1971 で用いられているモデルを模式的に作図）

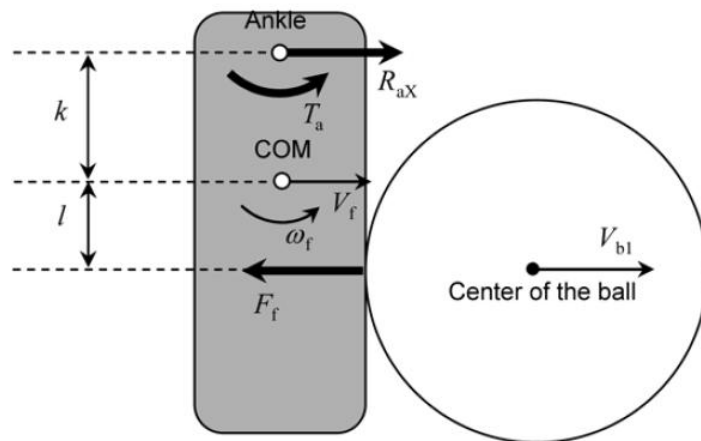


図 1 - 2 動力学的な足部とボールの衝突モデル（Ishii et al. 2012 の図を引用）

1・2・2 インパクト位置

磯川ら（1997）は、足部長軸方向におけるインパクト位置とボール速度の大きさとの関係を検討し、インパクト後に大きなボール速度を得るためには足関節付近でインパクトすることが重要であると報告している。しかしながら、磯川ら（1997）は地面に静止しているボールをインステップキックさせたため、全 30 試技（被験者 6 名×5 試技）において足関節付近でインパクトした試技はなく、インパクト位置は前足部付近の範囲（足関節中心からつま先方向へ約 9～17cm の範囲）に限られていた。そこで、石井ら（2007）はインパクト後に最大のボール速度を得ることができるインパクト位置を明らかにするために、ボール設置の高さを変化させ（0～12cm まで 2cm 刻み）、同じスイング軌道でインステップキックを行わせ、中足骨遠位端付近から足関節付近にわたる多様なインパクト位置でインパクトを計測した。その結果、インパクト後に大きなボール速度を得るためには足部質量中心付近（つま先から踵方向へ 59.5% の位置）でインパクトすることが重要であると報告している。また、Asai et al.（2002）は有限要素法

を用いたコンピュータシミュレーションによって、足部長軸方向におけるインパクト位置とボール速度の大きさとの関係を検討し、ボール速度はインパクト位置がボール中心からわずかに下部であったときに最大となり、その位置からの距離が大きくなるにつれて小さくなることを報告している（図 1 - 3）。

また、Asai et al.（2005）は Asai et al.（2002）と同様の方法を用いて足部左右方向におけるインパクト位置とボール速度の大きさとの関係を検討し、ボール速度はインパクト位置がボール中心付近であったときに最大となり、ボール中心からの距離が大きくなるにつれて小さくなることを報告している（図 1 - 4）。

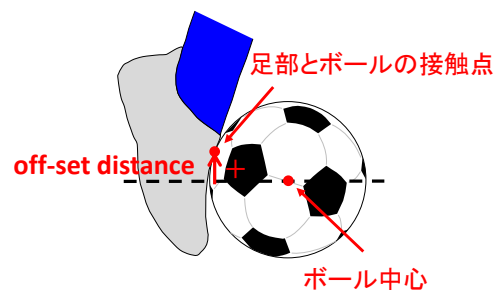
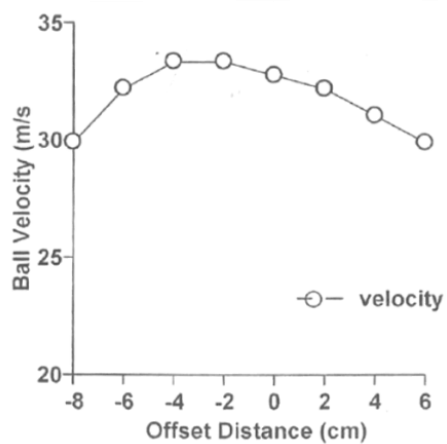


図 1-3 足部長軸方向のインパクト位置とボール速度の大きさとの関係

（左図：Asai et al. 2002 より引用、右図：インパクト位置の定義）

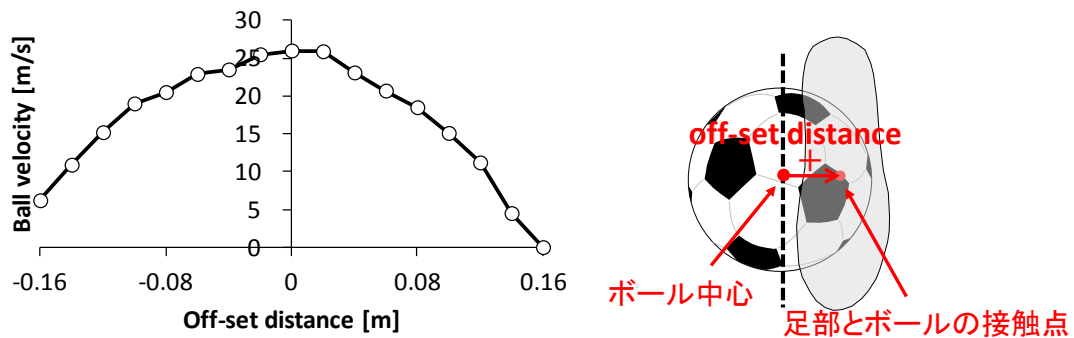


図 1 - 4 足部左右方向のインパクト位置とボール速度の大きさとの関係

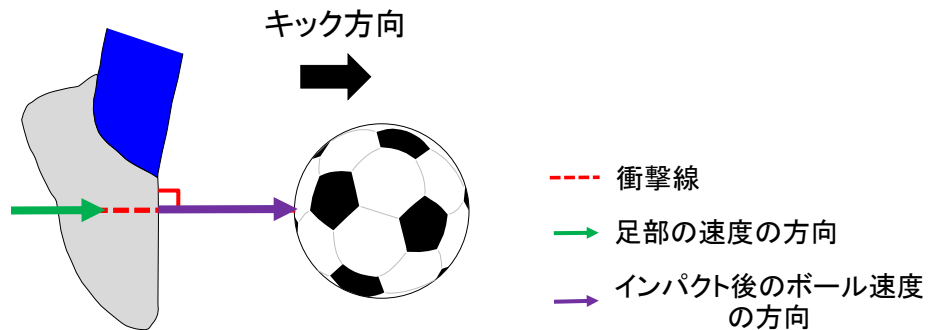
(左図:Asai et al. 2005 より改変、右図:インパクト位置の定義)

1・3 ボレーキック

これまで行われてきたサッカーのキック動作に関する研究は静止しているボールをキックする技術を対象としている。そのため、先行研究で得られた知見が試合で活用される局面はペナルティーキックやフリーキックなどのプレースキックに限られている。2010 年南アフリカワールドカップにおいてプレースキックから直接ゴールになった得点は、全 145 ゴールのうち 14 得点（ペナルティーキック：11 得点、フリーキック：3 得点）だけであり、全ゴール数の 10%程度であった。また、田中（1987）は、1986 年メキシコワールドカップの全 132 ゴールを分析し、全ゴールの約 60%がグラウンダーのボール（静止または地面を転がっているボール）をキックしたものであり、約 20%がボレーキックによるものであったと報告している。このように、相手ゴール前では選手が密集しプレーエリアが狭められ時間的にも制限されるため、飛来するボールをキック(ボレーキック)しなければならない場面も比較的多い。

ボレーキックは、飛来するボールに合わせて予測したインパクト位置にタイミングよく足部を高速度で移動させて行うキックである。そのため、試合でゴールの枠を大きく外すことも多く、プレースキックに比べて正確なインパクトが困難であると考えられる。そのため、ボレーキック後のボール速度に及ぼす影響は、プレースキックに比べて足部の速度による要因が小さくなり、インパクト位置による要因が大きくなると推察される。さらに、インパクト前のボール速度が大きくなるにつれて正確なインパクトが困難になるため、この傾向はより顕著になると推察される。また、プレースキックとボレーキックではインパクト時の足部とボールの衝突の仕方が異なると考えられる。プレースキックでは、インパクト時に足部の速度が衝撃線（足部とボールとの間に摩擦が生じないと仮定した場合、足部がボールに与える力積の方向）に沿って向いているため、足部とボールの衝突は直衝突になると考えられる（図 1 - 5 上）。一方ボレーキックでは、飛来するボールを元来た方向に蹴り返すことは少なく、様々な方向に蹴ることが多い。これは、足部に対するボールの相対速度と衝撃線とを一致させないようにインパクトすることによって可能となる。そのため、ボレーキックでは足部とボールの衝突は斜衝突になると考えられる（図 1 - 5 下）。斜衝突は直衝突と比較してインパクト後に得られるボール速度が小さくなり、衝撃線と相対速度のなす角度が大きくなるにつれてインパクト後に得られるボール速度が小さくなる。Asai et al. (2004) は、プレースキックにおいて足部の速度と足部の甲の法線（衝撃線）とのなす角度が大きくなるにつれて、インパクト後のボール速度が小さくなることを報告している。このように、足部の速度・ボール速度・衝撃線の方法は、インパクト後のボール速度の大きさに影響を及ぼす要因であり、足部とボールの衝突が斜衝突となるボレーキックにおいては重要な観点であると考えられる。

プレースキックにおける足部とボールの衝突（直衝突）



ボレーキックにおける足部とボールの衝突（斜衝突）

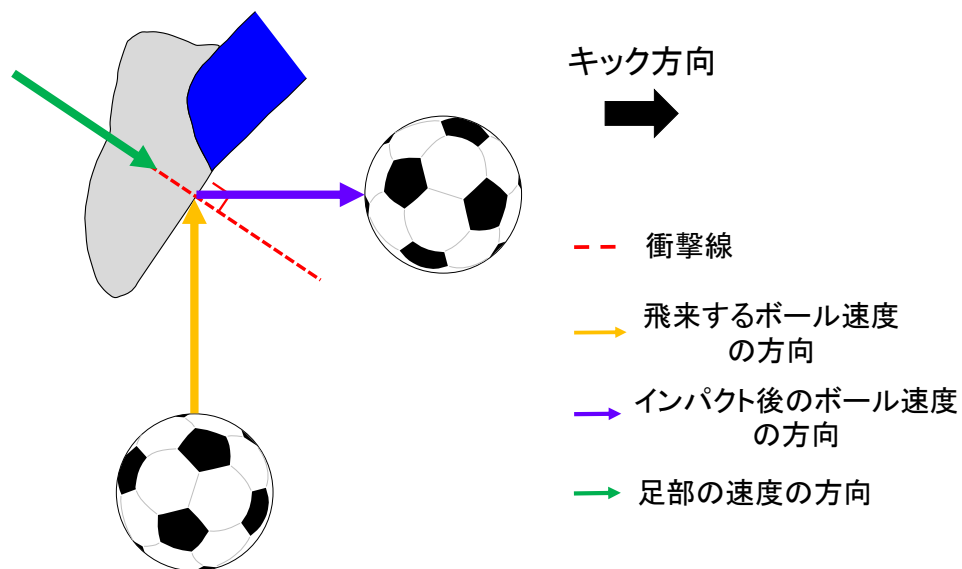


図 1-5 プレースキックとボレーキックにおける足部とボールの衝突

1・4 意義・目的

これまで行われてきたキック動作に関する研究はすべてプレースキックにおけるインステップキックを対象としていた。そのため、ボレーキックにおいてインパクト後に大きなボール速度を得ることができるインパクト

特性を明らかにすることは、指導方法に新たな知見を加えることができ、キックパフォーマンスの向上につながると考えられる。しかし、ボレーキックにおいて足部の速度やインパクト位置がインパクト後のボール速度に及ぼす影響は明らかにされていない。そこで本研究の目的は、①ボレーキックにおける足部の速度およびインパクト位置がインパクト後のボール速度に及ぼす影響、②インパクト前のボール速度の違いによるインパクト後のボール速度に影響を及ぼす要因の変化を検討し、ボレーキックにおいて大きなボール速度を得ることのできるインパクト特性を明らかにすることとした。

第 2 章 実験方法

2・1 被験者

被験者は、サッカー競技歴が 6 年以上、かつ週 1 回程度サッカーを行っている男子大学生 7 名と大学院生 2 名の計 9 名（身長 0.1725 ± 0.049 m、体重 65.9 ± 7.8 kg、競技歴 13.0 ± 3.5 年、年齢 22.1 ± 1.4 歳）であった。なお、すべての被験者の利き脚（蹴り脚）は右脚であった。本実験の実施にあたり、早稲田大学の「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を得た。また、被験者には本研究の目的や実験方法などを事前に説明し、実験参加への書面による同意を得た。

2・2 実験試技

被験者には十分なウォーミングアップを行わせた後、屋内練習場にて被験者の蹴り足の側方に設置したサッカーボール発射マシン（JUGS 社製、M1800）より発射されたボールを、4m 前方のフットサルゴールの中央に設置したターゲット（ 1.3×1.3 m）を狙い、インステップキックを用いたボレーキックをさせた（図 2 - 1）。この時、被験者にはできるだけ大きな速度のシュートをターゲットに当てるように指示を与えた。ボレーキックするボールの速さは、 9.0 m/s（低速条件）、 11.5 m/s（中速条件）、 15.0 m/s（高速条件）の 3 種類とした。サッカーボール発射マシンは、被験者がボールの発射を確認してからボレーキック動作を行えるようにするため、試技位置から 10m（低速条件）、15m（中速条件）、22m（高速条件）の位置に設置し、試技位置（地面からの高さが 0.5m）へのボールの入射角度が各速度条件間において一定となるように設定した。また、発射するボールは、センタリング（右サイドからゴール前へキックされたボール）を想定できるようなサイドスピンで発射させた。本研究では、足部に貼付したマーカから足部

座標系を定義した。そのため、シューズの形状の違いによる足部座標系への影響を考慮し、被験者間において統一された足部座標系を定義するために、試技中に使用するシューズはすべての被験者において同一のモデル(ミズノ社製、12KF-20662、質量 0.25kg)とした。使用したシューズのサイズは、26.0~27.5cmであった。フットサルゴールの幅 3m の範囲内をボールが通過した試技を成功試技とし、各速度条件につき 8 本、計 24 本のデータを収集した。なお、成功試技のうちターゲットに当たった試技を各速度条件につき 2 本以上収集できるまで試技を継続した。このとき、成功試技が 8 本を超えた場合は、行った試技の順番に、始めに収集した成功試技 8 本のみを記録した。収集したデータは、各速度条件につき 72 本 (= 8 本/被験者 × 9 被験者)、計 216 本であった。

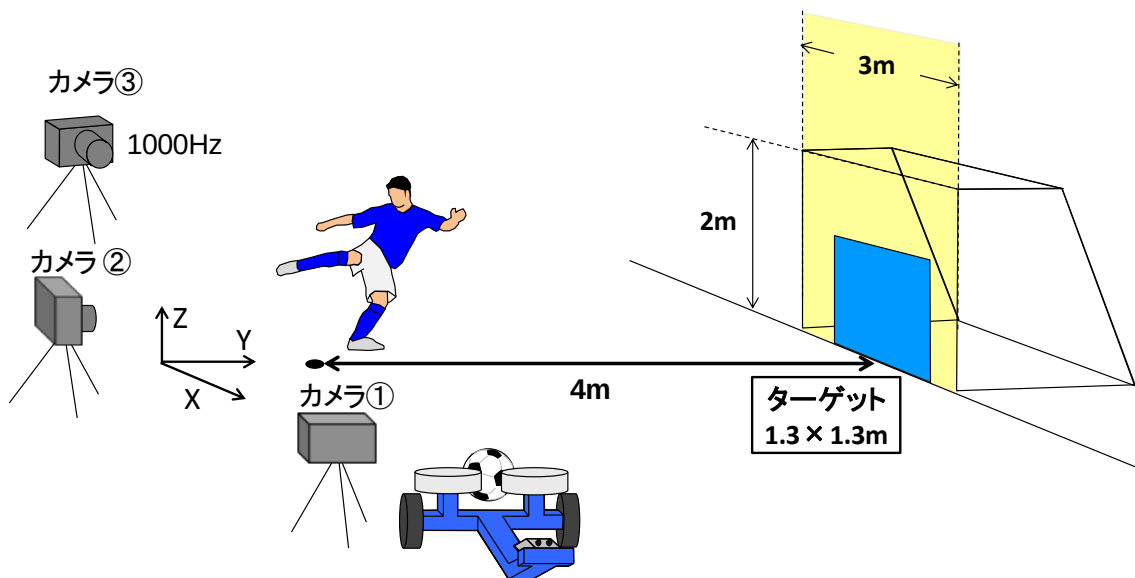


図 2-1 実験設定

2・3 データ収集

試技の撮影は、高速度カメラ 3 台（Vision Research 社製、Phantom Miro）を用いて、撮影速度 1000Hz で行った。カメラは、インパクト前後の局面で蹴り足の足部が明瞭に撮影できるように設置した（図 2 - 1）。ボレーキック動作中の蹴り足とボールの挙動を分析するために、被験者の蹴り脚のつま先、第 5 中足骨骨頭、踵の計 3 箇所直径 1cm のマーカを貼付した。また、サッカーボール（アディダス社製、AS565、質量 0.426kg、空気圧 9.7 psi）にはボール表面上に複数のマーク（直径約 1cm）を印した。

3 次元空間を構築するために、図 2 - 2 のような各点の間隔が 30cm である 4 点の校正点を取り付けた 17 本のポール、計 68 点の校正点を取り付けた放射状の校正器（スプートニック）を用いてキャリブレーションを行った。このとき、デジタイズ精度を高めるに撮影エリアを足部とボールのインパクト局面のみとしたため、撮影した校正点は計 48 点であった。

3 台のカメラからより多くの校正点が確認できるよう、スプートニックは任意の方向に回転させた状態で設置した。そのため、スプートニック座標系は、グローバル座標系へ置き換える必要があった。そこで、グローバル座標系を定義するための 3 点（高さ 50cm の同一水平面上の①試技位置（原点）、②原点からターゲットへ向かう方向（Y 軸）へ 1m の地点、③Y 軸上以外の任意の点）を用いてキャリブレーションを行った。

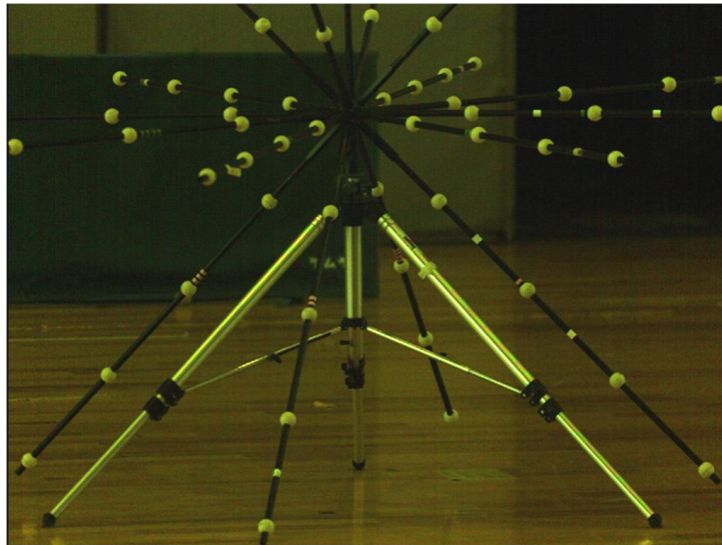


図 2 - 2 放射状の較正器（スプリントニック）

2・4 データ処理

全成功試技のうち、3次元分析に必要なデジタイズ点が明瞭に確認できる映像のみを分析対象とした。その結果、分析対象は低速条件が 72 試技、中速条件が 72 試技、高速条件が 69 試技、計 213 試技となった。撮影した映像をもとに画像解析ソフトウェア（DKH 社製、Frame-DIAS IV）を用いて蹴り脚とボールの挙動を分析した。まず、3 台のカメラで撮影したスプリントニック上の各較正点をデジタイズし、3 次元空間を構築した。デジタイズによる既知座標との標準誤差は X 軸成分 0.97mm、Y 軸成分 0.98mm、Z 軸成分 0.99mm であった。次に、グローバル座標系を定義するための 3 点をデジタイズし、スプリントニック座標系に対する 3 点の座標値を算出した。グローバル座標系は、①から②へ向かうベクトル $\underline{R}_y$ を Y 軸、 $\underline{R}_y$ と①から②へ向かうベクトルの外積により得られるベクトル $\underline{R}_z$ を Z 軸、 $\underline{R}_y$ と $\underline{R}_z$ の外積によって得られるベクトル $\underline{R}_x$ を X 軸として定義した。スプリントニック座標系からグローバル座標系への変換は、スプリントニック座標系の

原点をグローバル座標系の原点へ平行移動し、その後回転行列を用いて座標値を変換した。蹴り脚のデジタイズ位置は、上記の標認点とした（図 2 - 3）。ボールのデジタイズ位置は、ボール表面上に印したマークのうち 3 点（各点の間隔は約 8cm 以上）とした。ボール中心の座標は、石井と丸山（2007）と同様に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、以下の方法で推定した（式⑨）。

$$\begin{cases} (X_1 - X_c)^2 + (Y_1 - Y_c)^2 + (Z_1 - Z_c)^2 = 11^2 \\ (X_2 - X_c)^2 + (Y_2 - Y_c)^2 + (Z_2 - Z_c)^2 = 11^2 \\ (X_3 - X_c)^2 + (Y_3 - Y_c)^2 + (Z_3 - Z_c)^2 = 11^2 \end{cases} \quad \text{— 式⑨}$$

このとき、ボール中心の座標を (X_c, Y_c, Z_c) 、ボール表面上の 3 点の座標を (X_n, Y_n, Z_n) ($n=1, 2, 3$) とした。上記の 3 つの式からなる連立方程式を解くことによって、ボール中心の座標 (X_c, Y_c, Z_c) を推定した。

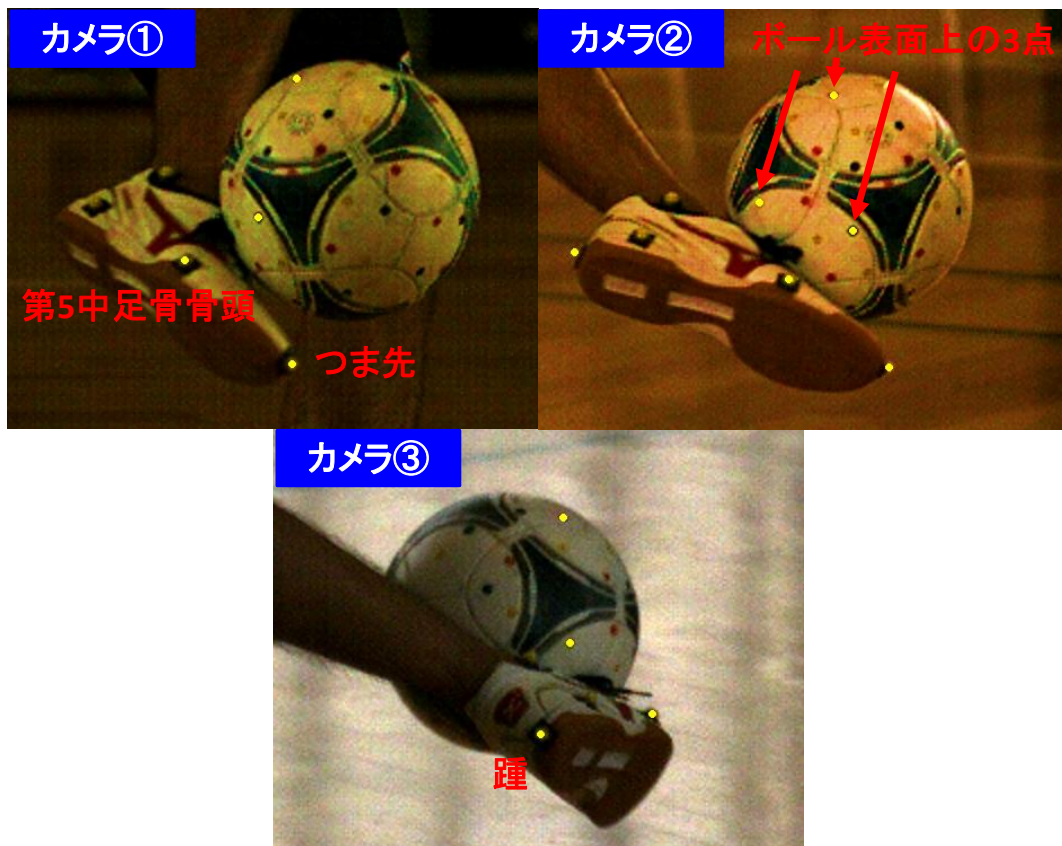


図 2 - 3 撮影した映像およびデジタイズ位置

2・5 分析項目

足部には、踵からつま先に向かうベクトルを $\underline{f_y}$ （長軸）、 $\underline{f_y}$ と踵から第 5 中足骨骨頭に向かうベクトルの外積により得られるベクトルを $\underline{f_z}$ 、 $\underline{f_y}$ と $\underline{f_z}$ の外積により得られるベクトルを $\underline{f_x}$ （短軸）とする足部座標系を定義した（図 2 - 4）。なお、足部座標系の原点は、阿江（1996）の身体部分慣性係数（踵からつま先方向へ 59.5%の位置）を用いて、つま先と踵の座標から算出した足部質量中心とした。

インパクト前のボール速度と足部の速度は、インパクトの 6 フレーム前からインパクト開始フレーム（0.006s）までにおけるボール中心と足部質

量中心の変位から算出した。インパクト後のボールの速度はインパクト終了フレームからインパクトの 6 フレーム後までにおけるボール中心の変位から算出した。

インパクト前およびインパクト後のボール速度の方向を表すため、ボール速度ベクトル $\underline{V}_{ball}$ を水平面に投影したベクトル $\underline{V}'_{ball}$ と Y 軸とのなす角の大きさを水平角、 $\underline{V}_{ball}$ と $\underline{V}'_{ball}$ がなす角の大きさを鉛直角として算出した（図 2-5）。このとき、水平角は $\underline{V}_{ball}$ が被験者の蹴り脚の方向（X 軸）であったときを正とし、鉛直角は $\underline{V}_{ball}$ が鉛直上向き方向であったときを正とした。また、足部の速度の方向もインパクト前のボール速度の方向と同様の方法で算出した。

水平面における衝撃線の方法（足部がボールに与えた力積の方法）を表すため、インパクト前後でボールが有する運動量の差から算出された足部がボールに与えた力積の方向をベクトル $\underline{I}$ とし、 $\underline{I}$ を水平面に投影したベクトル $\underline{I}'$ と Y 軸のなす角の大きさを力積水平角として算出した（図 2-6）。このとき、力積水平角は $\underline{I}$ が被験者の蹴り脚の方向（X 軸）であったときを正とした。

インパクト後のボール速度とインパクト位置との関係を検討するためには、本研究におけるインパクト位置を定義する必要がある。磯川ら（1997）や石井ら（2007）は、インステップキックを矢状面上における運動として 2 次元的に分析を行い、足部長軸方向におけるインパクト位置を算出している。磯川ら（1997）は、足関節の外果から外果と中足骨近位端を結んだ直線上にボール中心から垂直に下ろした点までの距離をインパクト位置として算出している（図 2-7 左）。また、石井ら（2007）はつま先から足背部（足部の甲）を結ぶ直線上に足部とボールの接触面があるものとし、ボール中心から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て

いる。そして、足部背面における足部質量中心からボール接触点までの距離をインパクト位置として算出している(図 2 - 7 右)。また Asai et al.(2002) や Asai et al. (2005) は、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推定した足部とボールの接触点をインパクト位置として推定している。インステップキックを用いたボレーキックは、プレースキックに比べて正確なインパクトが困難な技術であることから、多様なインパクト位置でインパクトされることが推察され、足部長軸方向と足部左右方向におけるインパクト位置を同時に評価する必要があると考えられる。そのため、ボレーキックにおける足部とボールのインパクトは、磯川ら (1997) や石井ら (2007) のような 2 次元ではなく、3 次元で分析する必要がある。

足部とボールの形状を 3 次元的に考えると、ボールが半径 11cm の球体であるのに対して、足部は 26 個の骨によって構成されることから複雑な形状をしている。そのため、足部とボールがインパクトした際に生じるボールの変形は、インパクトの仕方によって多様である。このことから、3 次元的に足部とボールの接触面を定義し、接触点をインパクト位置として算出することは困難である。そこで、本研究では足部に定義した座標系に対するボール中心の位置をインパクト位置と定義した。そのため、本研究におけるインパクト位置は足部とボールの接触点ではなく、ボール中心の位置を表すものである。インパクト位置は、インパクト中における足部の変形が足部座標系へ及ぼす影響を考慮して、インパクト開始フレームにおける位置とインパクト終了フレームにおける位置の midpoint とした。また、被験者間におけるシューズのサイズの違いが足部座標系で定義した座標値に及ぼす影響を考慮し、すべての被験者が同じサイズ (26.5cm) のシューズを履いていたと仮定したインパクト位置に正規化するために、足部座標系の大きさを拡大または縮小した。なお、インパクト位置は足部座標系に対

するボール中心の座標の長軸方向をインパクト位置の長軸成分、短軸方向をインパクト位置の短軸成分と定義した（図 2 - 8）。

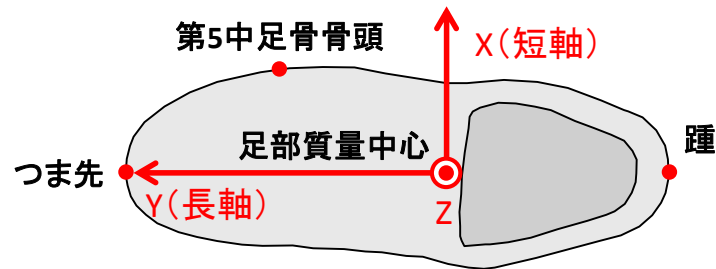


図 2 - 4 足部座標系の定義

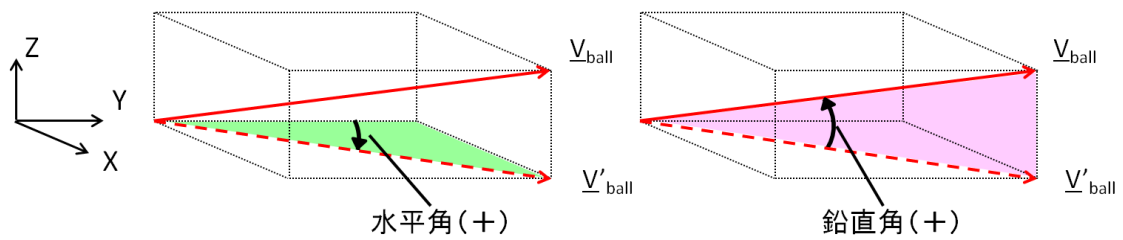


図 2 - 5 インパクト前におけるボール速度の水平角および鉛直角の定義

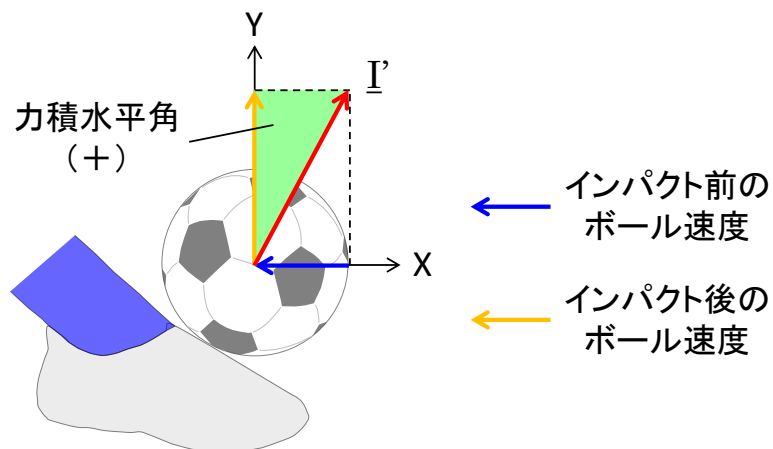


図 2-6 力積水平角の定義

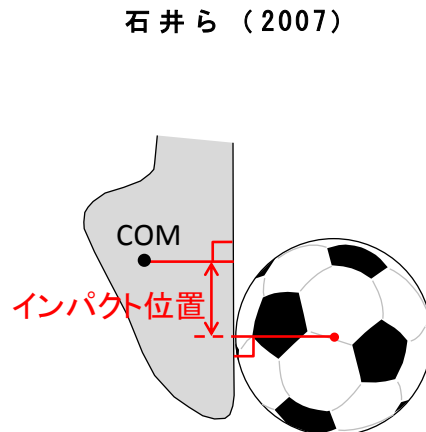
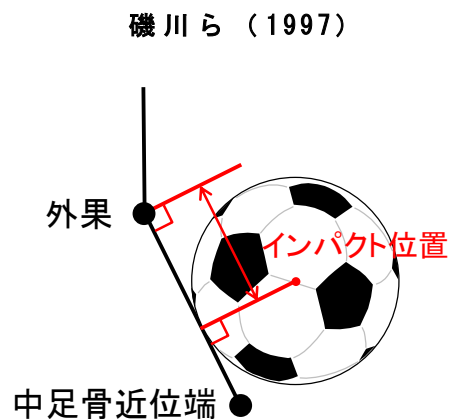


図 2-7 先行研究におけるインパクト位置の定義

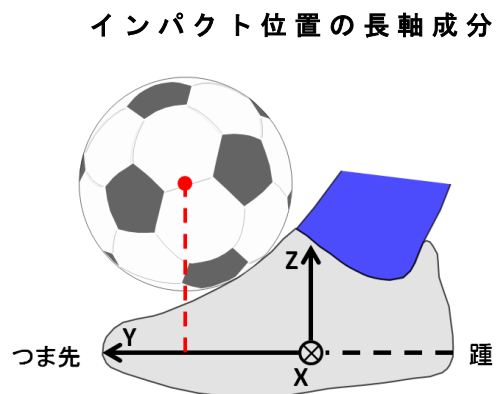
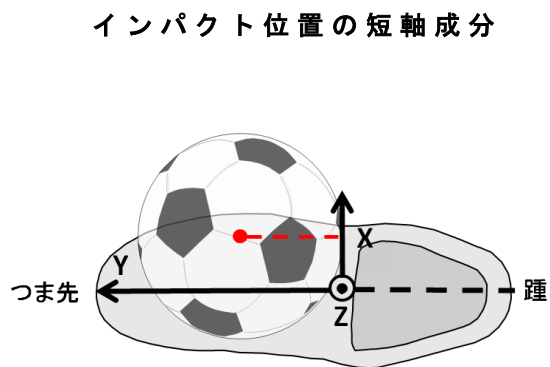


図 2 - 8 インパクト位置の 2 成分

2・6 統計処理

インパクト前のボールの速さ、インパクト前のボール速度の水平角および鉛直角、インパクトした瞬間のボールの高さ、足部の速さ、足部の速度の水平角、力積水平角、インパクト後のボールの速さ、インパクト時間、インパクト位置の 2 成分（長軸成分、短軸成分）の範囲（最大値と最小値の差）における各速度条件間の差を分析するために、速度条件ごとの 8 試

技の平均値を各被験者の代表値とし、対応ありの一元配置の分散分析を行った。

ターゲットに当たり、かつインパクト後のボールの速さが最も大きかった試技を各被験者について選択し、足部の速さ、足部の速度の水平角、力積水平角とインパクト後のボールの速さとの関連を Pearson の相関係数を用いて分析した。また、インパクト位置の 2 成分とインパクト後のボールの速さとの関連については、以下の理由から 2 次の曲線回帰分析を用いて分析した。磯川ら（1997）は、インパクト位置の長軸成分とインパクト後のボールの速さとの関係を直線的なものとして考え、回帰直線を用いて分析を行っている。なお、このときのインパクト位置の長軸成分の範囲は、前足部付近（足関節からつま先方向へ約 9～17cm の範囲）に限定されていた。一方、Asai et al.（2002）はインパクト位置の長軸成分とボールの速さとの間に 2 次曲線のような関係があることを示唆している（図 1 - 3）。さらに、石井ら（2007）はインパクト後に最も大きなボールの速さを得ることができるインパクト位置の長軸成分を明らかにするために、前足部から足関節付近までの 10cm を超える幅広いインパクト位置の長軸成分の範囲を計測している。そして、インパクト位置の長軸成分とボールの速さとの関係を、2 次の曲線回帰分析を用いて分析を行っている。また、Asai et al.（2005）はコンピュータシミュレーションを用いて分析を行い、インパクト位置の短軸成分とインパクト後のボールの速さとの間に図 1 - 4 のようなインパクト位置の短軸成分が 0cm 付近で頂点となる 2 次曲線の関係があることを示唆している。

さらに、各被験者における全試技を対象に、足部の速さ、足部の速度の水平角、力積水平角とインパクト後のボールの速さとの関連を Pearson の相関係数を用いて分析した。また、インパクト位置の 2 成分とインパクト

後のボールの速さとの関連については、上記と同様に 2 次の曲線回帰分析を用いて分析した。なお、いずれの分析も有意水準は 5%未満とした。

第 3 章 結果・考察

3・1 ボール中心の推定の妥当性

本研究では、各点の間隔が約 8cm 以上であるボール表面上の 3 点からボール半径 11cm の距離にある点をボール中心の座標として推定した。インパクト開始フレームおよびインパクト終了フレームでは足部とボールが接触しているため、接触面付近においてボールが変形している可能性があり、推定される座標に誤差が生じる可能性が考えられる。そこで、この方法によって推定されるボール中心の座標の妥当性を検証するために、インパクト開始 6 フレーム前からインパクト開始フレームまで (0.006s) とインパクト終了フレームからインパクト終了 6 フレーム後までの区間において、2 組の 3 点 (それぞれ異なる 3 点) から推定したボール中心の座標の誤差を検討した (図 3 - 1)。

2 組における各点の間隔の長さの誤差は 0.8mm、0.4mm、0.8mm および 0.5mm、0.6mm、0.7mm であった。すべての間隔の長さの誤差は各間隔の長さに対して 1%未満と小さいものであった。また石井ら (2007) は、足部の接触面に対して法線方向のボール変形量はインパクト開始直後から直線的に増加し、接触時間 (約 0.01s) の 1/2 付近でピーク値に達し、直線的に減少する (図 3 - 2)。そして、インパクト終了フレームには、ボールはほぼ完全に復元すると報告している。以上のことから、本研究における分析区間においてボールの変形は非常に小さいものと考えられる。

また、本研究の分析区間における 2 組の 3 点から推定したボール中心の座標の差の平均値は 2.2mm であった。ボールの直径 22cm に対する誤差の割合が 1%程度であったことから、本研究で用いた方法によって生じるボール中心座標の計測誤差は小さいものと考えられる。以上のことから、各点の間隔が約 8cm 以上であるボール表面上の 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を推定する方法は妥当であると考えられる。

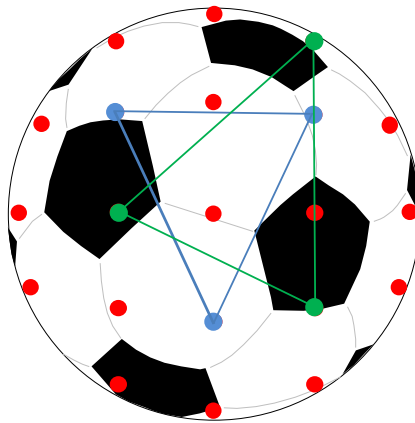


図 3 - 1 ボール表面上の異なる 2 組の 3 点

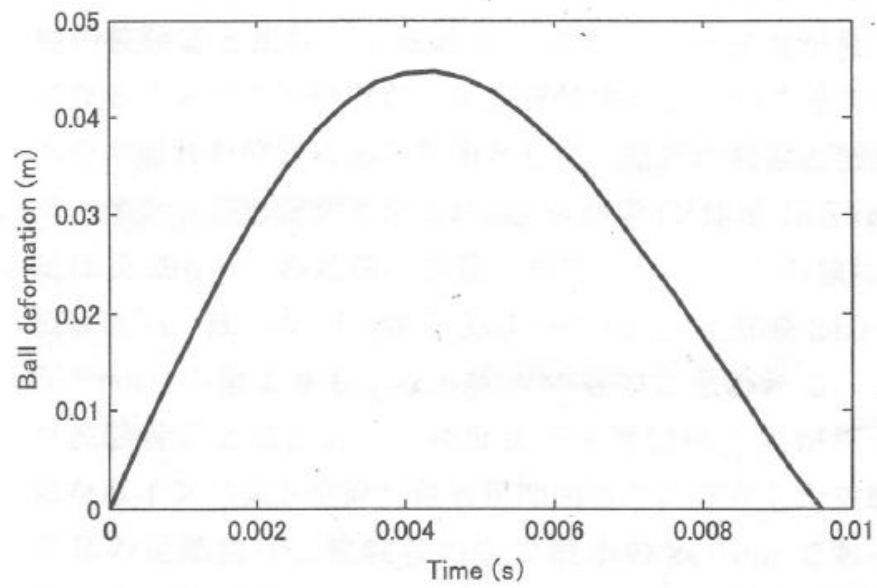


図 3 - 2 インパクト中におけるボールの変形量(石井ら 2007より引用)

3・2 発射したボールの特徴

各速度条件の成功試技におけるインパクト前のボールの速さ、ボール速度の方向、インパクト時のボールの高さの平均値±標準偏差を図 3-3 に示した。インパクト前におけるボールの速さの平均値は、低速条件で 9.0m/s、中速条件で 11.5m/s、高速条件で 15.0m/s であり、各速度条件間において有意な差が認められた ($p<0.01$)。また、各速度条件における変動係数(標準偏差/平均値)は 2.0~3.3%であった。以上のことから、本研究におけるインパクト前のボールの速さは設定通りの 3 条件に分類できており、各速度条件において再現性が高いものであったことが示された。

インパクト前におけるボール速度の水平角の平均値は、低速条件で -91.1° 、中速条件で -93.1° 、高速条件で -94.6° であり、低速条件と中速条件、低速条件と高速条件との間に有意な差が認められた(それぞれ $p<0.05$ 、 $p<0.01$)。しかしながら、各速度条件間におけるボール速度の水平角の差は最大で 3.5° であり(高速-低速)、インパクト前のキック動作やインパクト後のボールの挙動に大きな影響を及ぼすほどのものではなかったと考えられる。また、インパクト前におけるボール速度の鉛直角は、低速条件で -33.4° 、中速条件で -36.5° 、高速条件で -30.0° であり、各速度条件間において有意な差が認められ ($p<0.01$)、中速条件と高速条件では 6.5° の差があった。これは、すべての速度条件におけるボールの軌道を試合でのセンタリングを想定したものにするために、高速条件のみサッカーボール発射マシンの発射角度を調整したことによって生じたものであると考えられる。インパクト前のボール速度の鉛直角の違い (6.5°) によって、中速条件では高速条件に比較して被験者が足部の速度の方向を鉛直上方向に傾ける可能性が考えられた。しかし、足部の速度の鉛直角は中速条件で -2.9° 、高速条件で 0.5° であり、中速条件と高速条件との間に有意な差は認められな

かった。以上のことから、インパクト前のボール速度の鉛直角は速度条件間で最大 6.5° の差があったものの、被験者が足部の速度の方向を調整するほどの差ではなかったと考えられる。

インパクト時のボールの高さの平均値は、低速条件で 0.50m 、中速条件で 0.45m 、高速条件で 0.51m であり、各速度条件間において有意な差は認められなかった。しかし、各速度条件において標準偏差が $0.06\sim 0.10\text{m}$ であり、ボール半径分程度のばらつきがあった。本研究は試合でのボレーキックを想定していたため、被験者に対して数歩の助走および指定した試技位置から数歩移動することを認めていた。そのため、概ね被験者は被験者にとってインパクトしやすいボールの高さでインパクトしていたものと考えられる。したがって、インパクト時のボールの高さにばらつきが示された本結果は、インパクトしやすいボールの高さが被験者によって異なる可能性を示すものと考えられる。

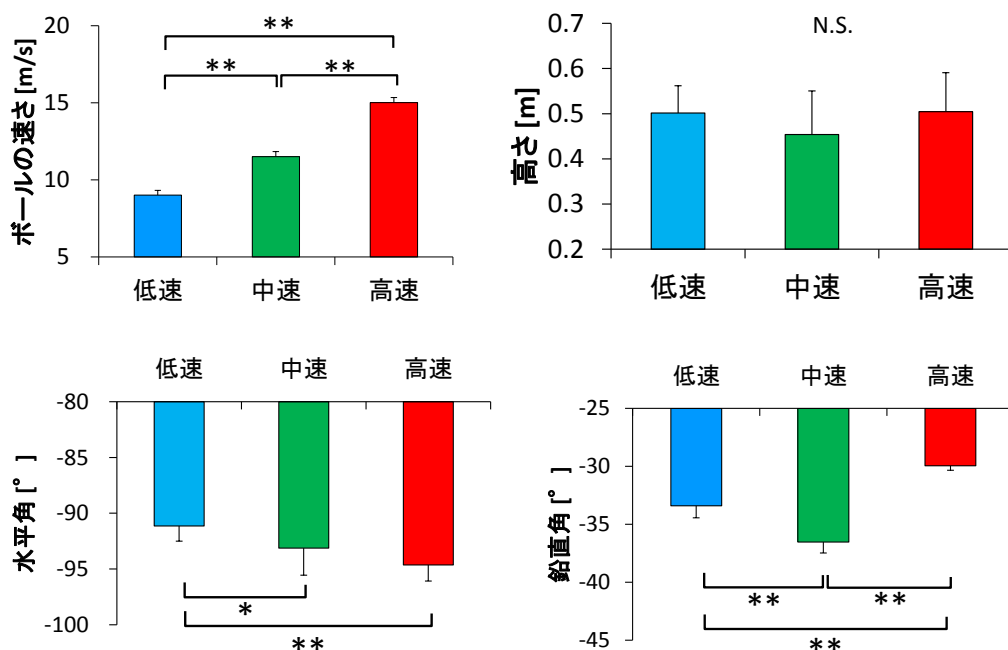


図 3 - 3 発射されたボールの各パラメータ (* : $p<0.05$ 、* * : $p<0.01$)

3・3 速度条件間における比較

3・3・1 足部およびボールの速度

各速度条件の成功試技における足部の速さ、足部の速度の水平角、力積水平角、インパクト後のボールの速さ、インパクト時間の平均値±標準偏差を図 3-4 に示した。足部の速さの平均値は、低速条件で 16.9m/s、中速条件で 17.0m/s、高速条件で 16.4m/s であった。各速度条件における足部の速さは、同程度の競技レベルの選手を対象とした石井ら（2007）が報告した 13.7～17.1m/s（経験年数 10 年以上の男子大学選手）、磯川ら（1997）が報告した 18.6m/s（経験年数 5 年以上の大学サッカー選手）と類似しており、ボールインパクト時の足部の速さは、ボレーキックとプレースキックとの間に大差がないことが示された。また、各速度条件間において有意な差は認められなかった。以上のことから、インパクト前のボールの速さによらず、被験者は足部の速さを調整することなくボレーキックを行うことが示された。

力積水平角の平均値は、低速条件で 19.3°、中速条件で 22.8°、高速条件で 28.5° であった。プレースキックの場合、足部がボールに与える力積の方向はターゲットの方向と概ね一致すると考えられる。しかし、ボレーキックでは蹴り足側方から飛来するボールの方向を約 90° 変化させて蹴り返さなくてはならなかった。そのため、足部がボールに与える力積の方向を飛来するボールの方向ではなく、その方向からターゲット方向へ約 65° 近づく方向に向けてインパクトさせていたものと考えられる（図 3-5）。また、低速条件と高速条件、中速条件と高速条件との間に有意な差が認められた（それぞれ $p<0.01$ 、 $p<0.05$ ）。蹴り足の側方から飛来するボールの方向をターゲット方向へ向けるためには、インパクト後にボール速度の X 軸成分を 0m/s に近づける必要がある。そのため、インパクト前に X 軸

に沿って飛来するボールの速さが大きくなるにつれて、足部がボールに与える力積の方向をより飛来するボールを蹴り返す方向に近づけてインパクトしていたものと考えられる。以上のことから、ボレーキックでは飛来するボールの速さに応じて、足部がボールに与える力積の方向を変化させてインパクトすること、及び飛来するボールの速さ大きいときほど、足部がボールに与える力積の方向をより飛来するボールの方向に近づけることが示された。

足部の速度の水平角の平均値は、低速条件で 21.5° 、中速条件で 25.4° 、高速条件で 28.4° であり、低速条件と高速条件との間に有意な差が認められた ($p<0.01$)。これは、インパクト前のボールの速さが大きくなるにつれて、足部の速度の方向が飛来するボールの方向へ近づくことを示しており、力積水平角と同様の傾向であった。このことから、被験者は足部を高速度で移動させる中で足部の速度の方向を調節することによって、足部がボールに与える力積の方向を変化させている可能性が考えられる。

インパクト後のボールの速さの平均値は、低速条件で 21.5m/s 、中速条件で 22.2m/s 、高速条件で 22.7m/s であり、各速度条件間において有意な差は認められなかった。インパクト後のボールの速さの差(最大値－最小値)は低速条件で 8.6m/s 、中速条件で 7.4m/s 、高速条件で 6.9m/s であり、被験者間で大きな差があった。そのため、インパクト前のボールの速さが大きくなるにつれてインパクト後のボールの速さは大きくなったものの、統計的な差は認められなかったものと考えられる。

インパクト時間の平均値は、低速条件で 9.3ms 、中速条件で 9.1ms 、高速条件で 8.7ms であった。高速条件と低速条件および中速条件との間に有意な差が認められ ($p<0.01$)、低速条件と中速条件に比較して高速条件はインパクト時間が短かった。また、すべての速度条件においてインパクト時間

は、石井ら（2007）が報告した足部の速度が類似したプレースキックにおける約 10ms よりも短かった。インパクト時間は、インパクト前のボール速度と足部の速度の相対速度に依存すると考えられる。そのため、各速度条件間の足部の速さに有意な差が認められなかったことから、インパクト前のボールの速さが大きくなるにつれて相対速度も大きくなり、インパクト時間が短くなったものと考えられる。

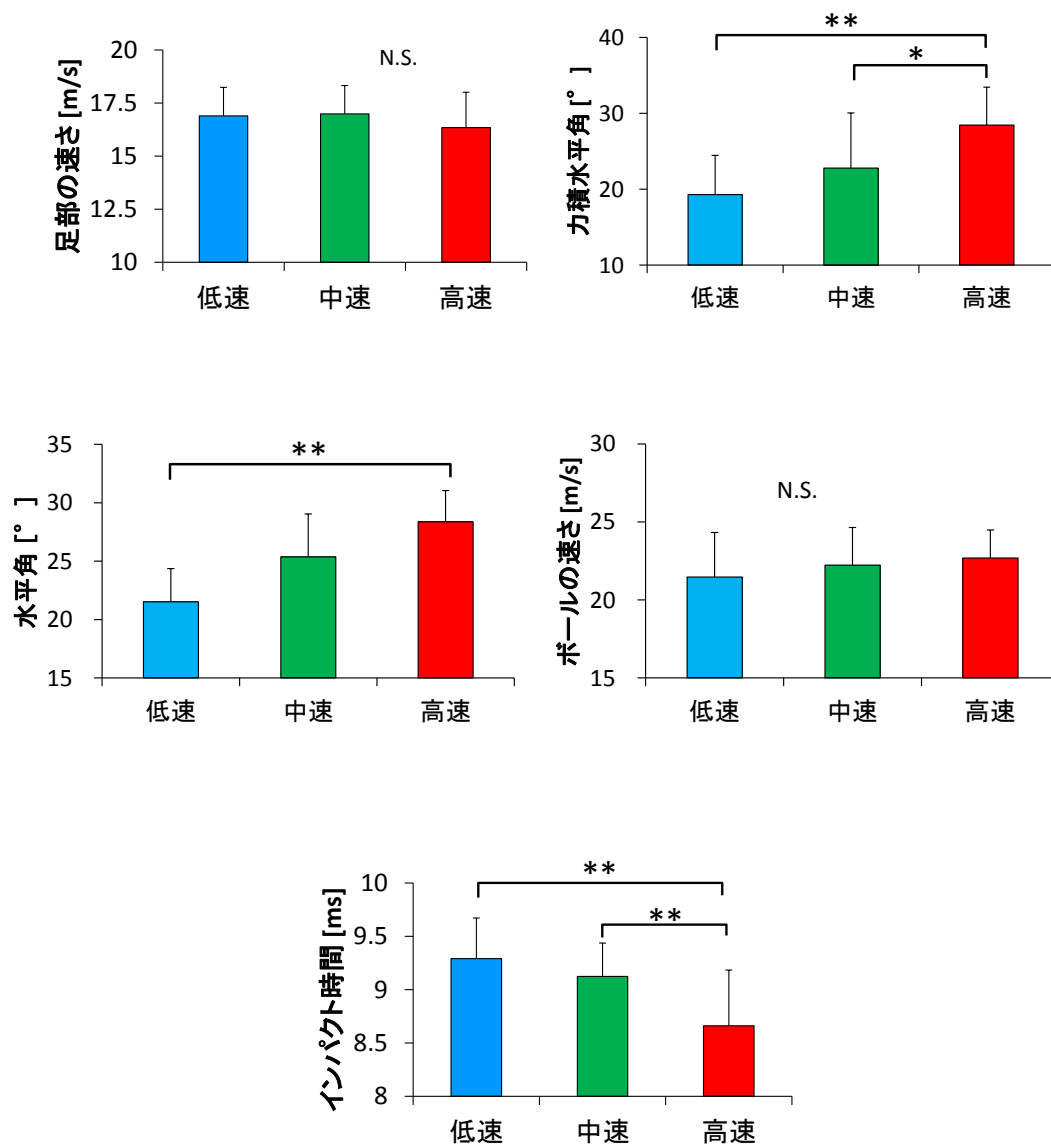


図 3 - 4 インパクト特性 (* : $p < 0.05$ 、* * : $p < 0.01$)

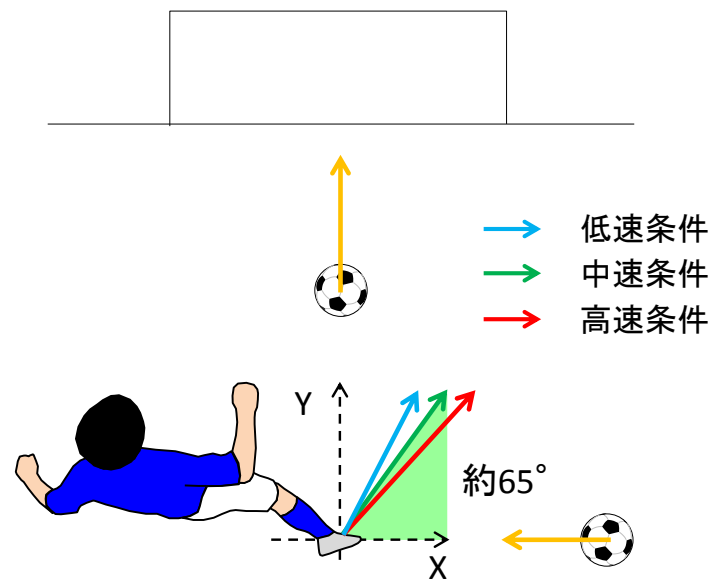


図 3-5 各速度条件における力積水平角

3・3・2 インパクト位置

各速度条件の成功試技におけるインパクト位置の2成分の範囲（最大値－最小値）の平均値±標準偏差を図3-6に示した。インパクト位置の長軸成分の範囲の平均値は、低速条件で0.071m、中速条件で0.071m、高速条件で0.073mであった。プレースキックにおけるインステップキックはサッカーにおいて基礎的な技術であるため、インパクト位置の範囲はある程度一定になると考えられる。磯川ら（1997）はインステップキックの足部長軸方向のインパクト位置の範囲は約0.03mであったことを示しており、本研究と比較して狭い範囲であった。また、インパクト位置の短軸成分の範囲の平均値は、低速条件で0.115m、中速条件で0.105m、高速条件で0.123mであった。使用したシューズの短軸方向の幅は約0.1mであり、すべての速度条件におけるインパクト位置の短軸成分の範囲はシューズの幅よりも広がった。以上のことから、ボレーキックはインパクト位置が広い範囲に

わたり、プレースキックに比べて正確なインパクトが困難な技術であると考えられる。またインパクト位置の2成分の範囲は、各速度条件間において有意な差が認められなかった。これは、インパクト前のボールの速さによらず、被験者が同程度のインパクト位置の範囲でボールをインパクトできていたことを示すものである。

さらに、インパクト位置の2成分の範囲を比較すると、インパクト位置の短軸成分の範囲の方が低速条件で0.043m、中速条件で0.034m、高速条件で0.050m広がった。これは、インパクト位置の長軸成分に比較してインパクト位置の短軸成分の方が多様なインパクト位置でインパクトしていることを示している。以上のことから、試合でボレーキックを行う際は、足部長軸方向のインパクト位置よりもインパクト位置のばらつきが大きい足部左右方向のインパクト位置の正確性を高める意識をすることが重要であると考えられる。

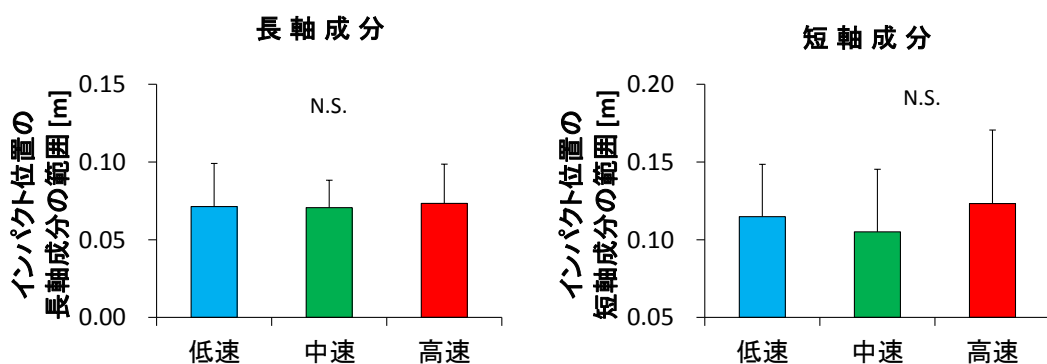


図 3 - 6 各速度条件におけるインパクト位置の2成分
(長軸成分、短軸成分)の範囲

3・4 被験者間分析

3・4・1 足部の速さ

各被験者、各速度条件についてターゲットに当たり、かつインパクト後のボールの速さが最も大きかった試技を選択して分析した結果（足部の速さとインパクト後のボールの速さとの関係）を図 3 - 7 に示した。すべての速度条件において足部の速さとインパクト後のボールの速さとの間には、相関係数の値がすべて 0.75 以上の有意な相関関係が認められた ($p < 0.01$)。これは、各被験者が最大速度でターゲットに命中させた試技において、足部の速さの大きい被験者ほどインパクト後のボールの速さが大きいことを示すものである。

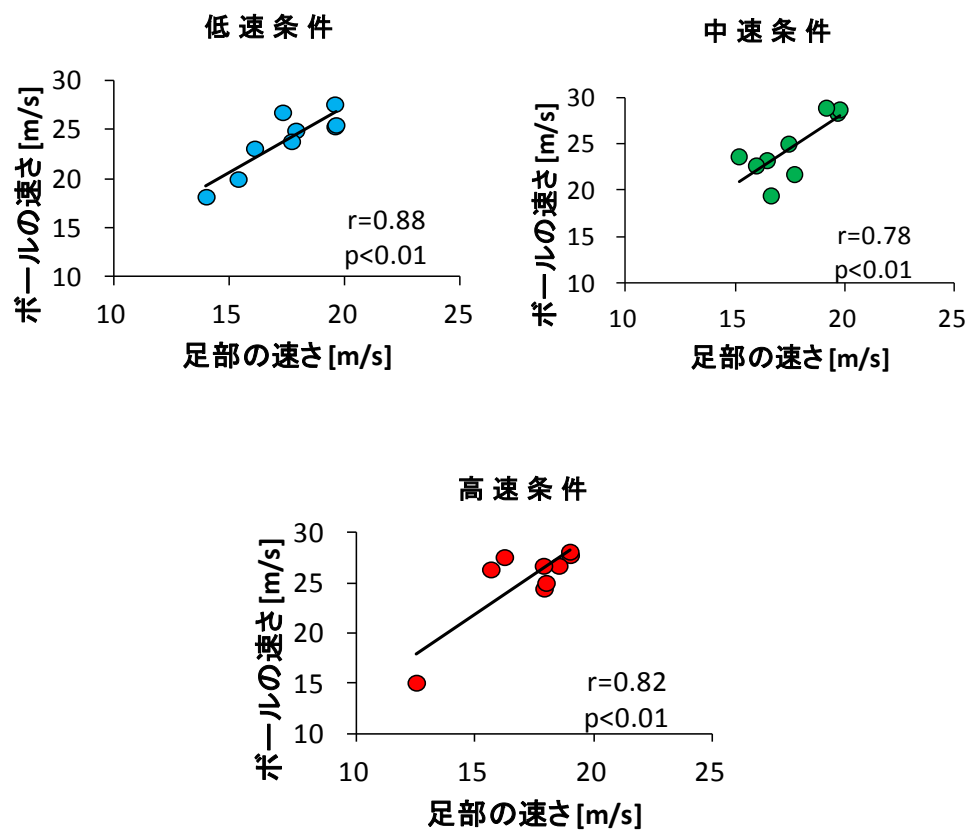


図 3 - 7 足部の速さとインパクト後のボールの速さとの関係

3・4・2 インパクト位置の長軸成分

各被験者、各速度条件についてターゲットに当たり、かつインパクト後のボールの速さが最も大きかった試技を選択して分析した結果（インパクト位置の長軸成分とインパクト後のボールの速さとの関係）を図 3-8 に示した。すべての速度条件においてインパクト位置の長軸成分とインパクト後のボールの速さとの間には有意な 2 次式の関係が認められなかった。これは、各被験者が最高速度でターゲットに命中させた試技において、インパクト位置の長軸成分がインパクト後のボールの速さに影響を及ぼさないことを示すものである。本研究の結果は、足部長軸方向のインパクト位置とインパクト後のボールの速さとの間に有意な 2 次式の関係を示した石井ら（2007）と異なるものであった。本研究の各被験者が最高速度でターゲットに命中させた試技におけるインパクト位置の長軸成分の範囲は、低速条件で 0.048m、中速条件で 0.074m、高速条件で 0.056m であり、石井ら（2007）が報告している 0.1m に比較して狭い範囲であった。2 次の曲線回帰分析は、説明変数（インパクト位置の長軸成分）の範囲が大きいほど説明変数と従属変数（ボールの速さ）との間に有意な関係が認められやすく、小さいほど有意な関係が認められにくい傾向がある。また石井ら（2007）は、最大のボールの速さを得ることができる足部長軸方向のインパクト位置は足部の質量と慣性モーメントの影響によって被験者間で数 cm の違いが生じる可能性を示唆している。さらに Ishii et al.（2012）は、インパクト後に最大のボールの速さを得ることができる足部長軸方向のインパクト位置は足関節反力や足関節トルクの影響によって、被験者間や試技間で正確に一致することはないと報告している。以上のことから、本研究ではインパクト位置の長軸成分の範囲が狭く、かつその狭い範囲において最大のボールの速さを得ることができるインパクト位置に被験者間や試技間で違いが生じ

たため、インパクト位置の長軸成分とインパクト後のボールの速さとの間に有意な関係が認められなかったものと考えられる。

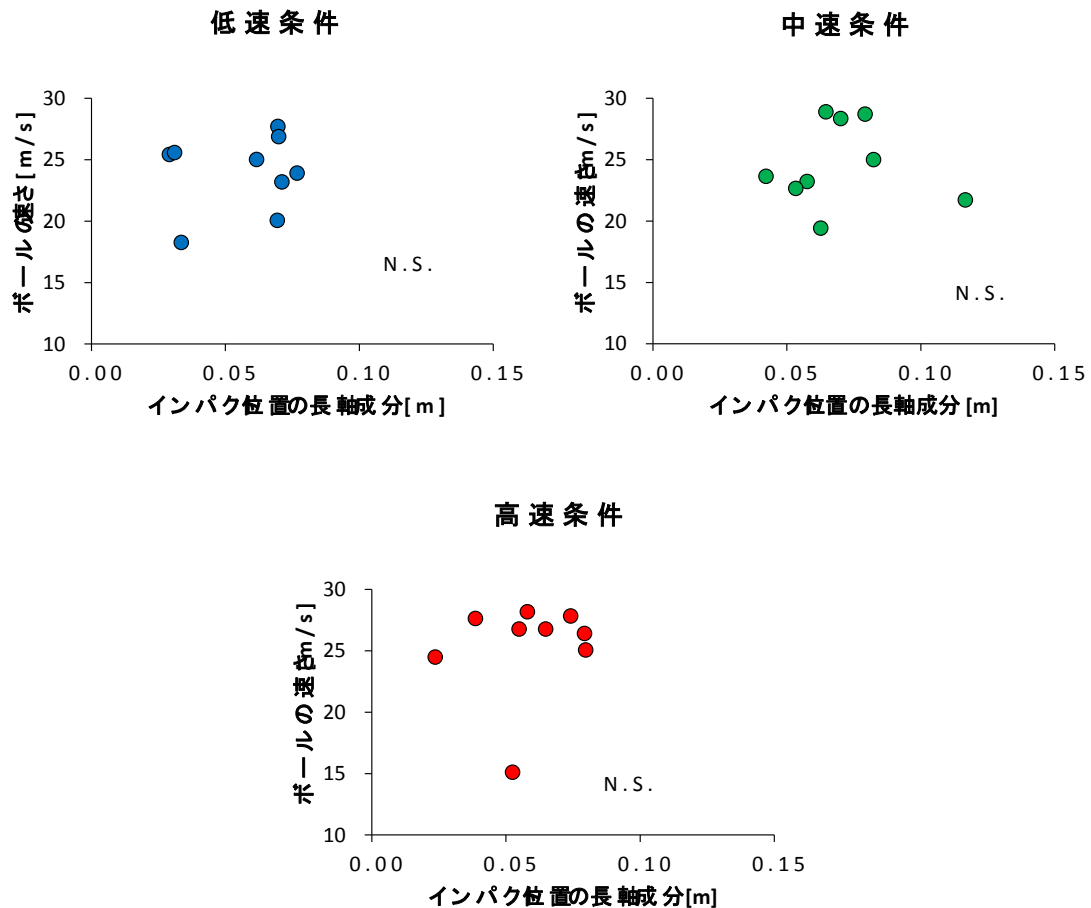


図 3 - 8 インパクト位置の長軸成分とインパクト後のボールの速さとの関係

3・4・3 インパクト位置の短軸成分

各被験者、各速度条件についてターゲットに当たり、かつインパクト後のボールの速さが最も大きかった試技を選択して分析した結果（インパクト位置の短軸成分とインパクト後のボールの速さとの関係）を図 3 - 9 に示

した。低速条件と高速条件においてインパクト位置の短軸成分とインパクト後のボールの速さとの間に有意な2次式の関係が認められた(それぞれ、 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$)。これは、各被験者が最高速度でターゲットに命中させた試技において、インパクト後のボールの速さが大きかった被験者ほど足部の甲の左右中心付近でインパクトしていることを示すものである。このことから、インパクト後に大きなボールの速さを得るためには足部の甲の左右中心付近でインパクトすることが重要であると考えられる。

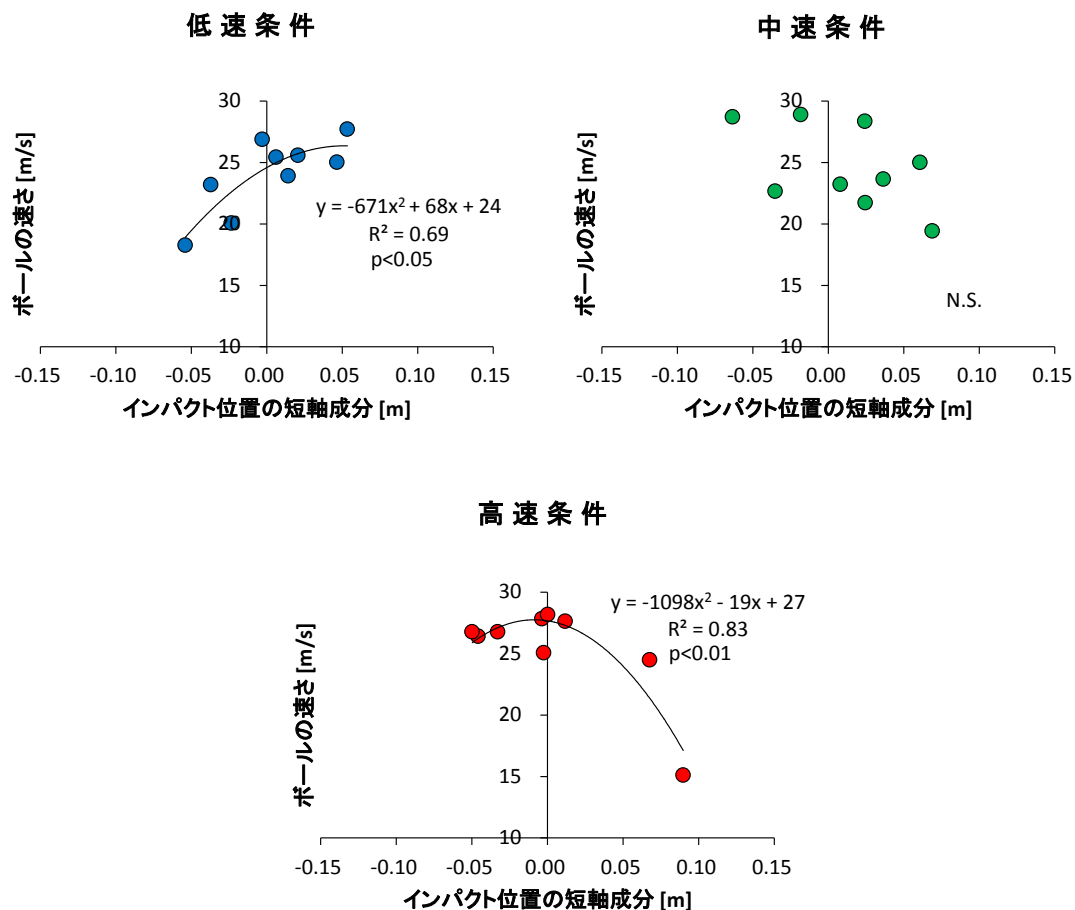


図 3 - 9 インパクト位置の短軸成分とインパクト後のボールの速さ
との関係

3・4・4 足部の速度の水平角

各被験者、各速度条件についてターゲットに当たり、かつインパクト後のボールの速さが最も大きかった試技を選択して分析した結果（足部の速度の水平角とインパクト後のボールの速さとの関係）を図 3 - 10 に示した。すべての速度条件において足部の速度の水平角とインパクト後のボールの速さとの間には有意な相関関係は認められなかった。これは、各被験者が最高速度でターゲットに命中させた試技において、足部の速度の水平角がインパクト後のボールの速さに影響を及ぼさないことを示すものである。このことから、水平面上における足部の速度の方向はボレーキックにおいてインパクト後のボールの速さを大きくするために重要な要因ではないと考えられる。

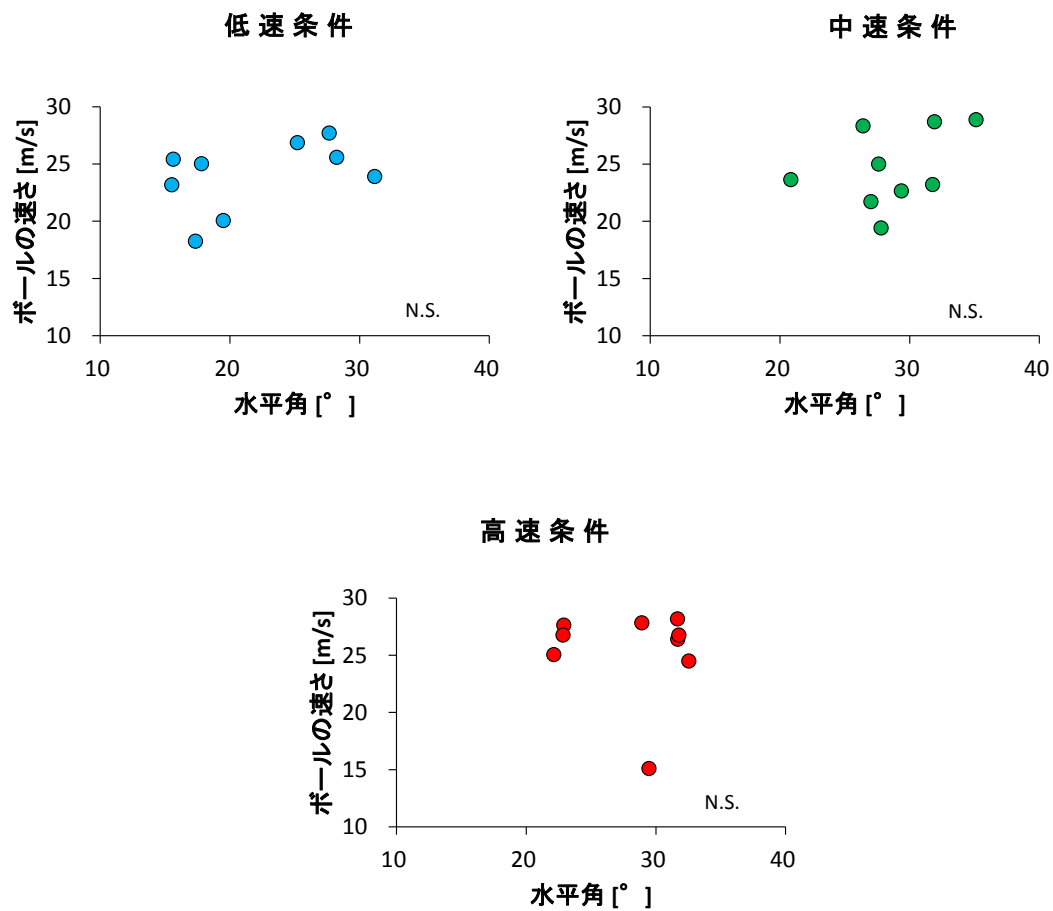


図 3-10 各速度条件における足部の速度の水平角とインパクト後の
ボールの速さとの関係

3・4・5 力積水平角

各被験者、各速度条件についてターゲットに当たり、かつインパクト後のボールの速さが最も大きかった試技を選択して分析した結果（力積水平角とインパクト後のボールの速さとの関係）を図 3 - 11 に示した。中速条件と高速条件において力積水平角とインパクト後のボールの速さとの間に有意な相関関係が認められた（ $p<0.01$ ）。これは、各被験者が最高速度でターゲットに命中させた試技において、足部がボールに与える力積の方向が

飛来するボールの方向からターゲット方向へ近づくにつれて、インパクト後のボールの速さが大きくなることを示すものである。このことから、ボレーキックにおいてインパクト後に大きなボールの速さを得るためには、足部がボールに与える力積の方向をターゲット方向へ近づけてインパクトすることが重要であると考えられる。インパクト後に大きなボールの速さを得るためには、インパクト前のボールの速さが大きくなるにつれて、飛来するボールを蹴り返す方向にも大きな力積を与え、かつターゲットの方向により大きな力積を与える必要がある。以上のことから、ボレーキックは飛来するボールの速さが大きくなるにつれて、インパクト後に大きなボールの速さを得ることが困難になると考えられる。

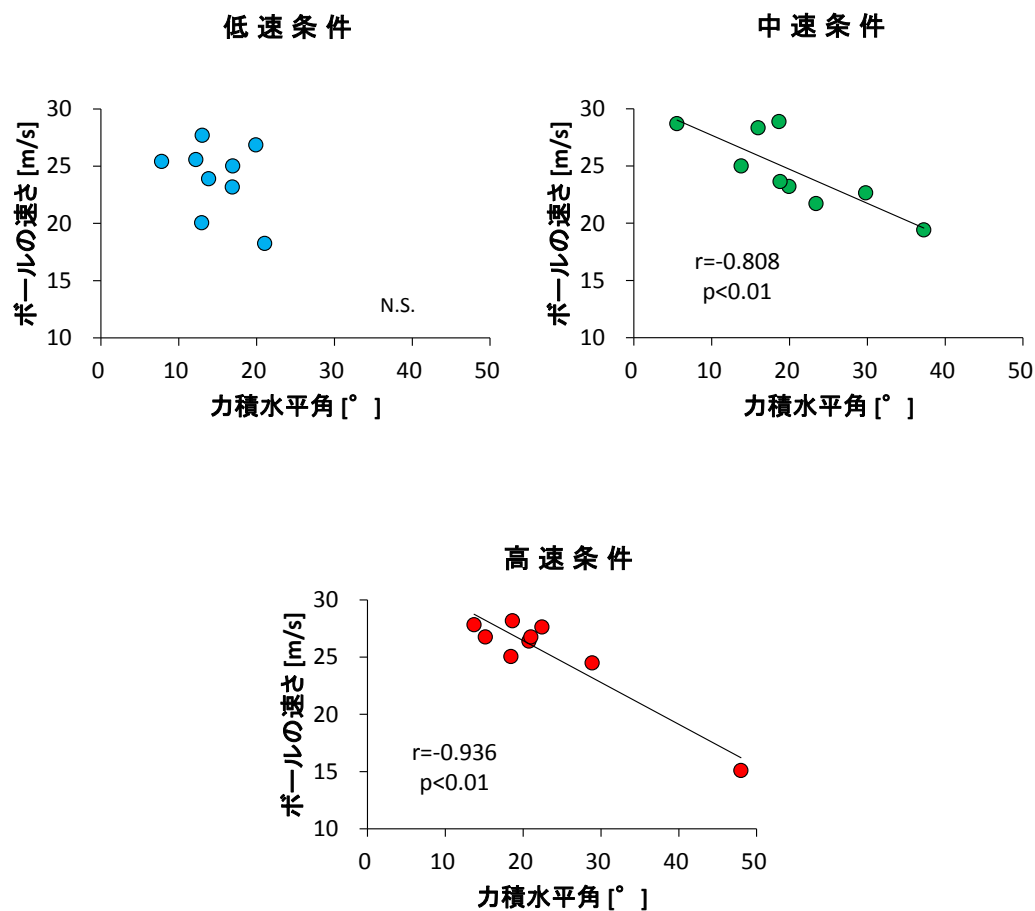


図 3 - 11 力積水平角とインパクト後のボールの速さとの関係

3・5 被験者内分析

各被験者の速度条件ごとに足部の速さとインパクト後のボールの速さとの関係を検討した。被験者 9 名中、低速条件で 4 名、中速条件で 3 名、高速条件で 3 名において図 3 - 12 のような有意な相関関係が認められ（表 3 - 1 の橙色）、当該被験者については足部の速さが大きいほどインパクト後のボールの速さが大きいことが示された。各被験者の速度条件ごとにインパクト位置の短軸成分とインパクト後のボールの速さとの関係を検討した結果、低速条件で 3 名、中速条件で 3 名、高速条件で 1 名において図 3 -

13のような有意な2次式の関係が認められた(表3-1の青色)。このとき、2次式の頂点はインパクト位置の短軸成分が0mとなる付近と概ね一致していた。各被験者の速度条件ごとにインパクト位置の長軸成分とインパクト後のボールの速さとの関係を検討した結果、低速条件で1名、中速条件で1名、高速条件で3名において図3-14のような有意な2次式の関係が認められた(表3-1の赤色)。このとき、2次式の頂点はインパクト位置の長軸成分が0.06mとなる付近と一致していた。2次式の頂点の位置については、インパクト位置の長軸成分が0mとなる付近であると報告した石井ら(2007)と本研究では一致していなかった。これは、石井ら(2007)が足部とボールの接触点をインパクト位置と定義したのに対して、本研究が足部座標系に対するボール中心の位置をインパクト位置と定義したことによって生じたものと考えられる(図3-15)。各被験者の速度条件ごとに足部の速度の水平角とインパクト後のボールの速さとの関係を検討した結果、sub Gの低速条件において図3-16のような有意な相関関係が認められ(表3-1の紫色)、足部の速度の方向が飛来するボールの方向へ近づくにつれてインパクト後のボールの速さは大きくなった。各被験者の速度条件ごとに力積水平角とインパクト後のボールの速さとの関係を検討した結果、低速条件で4名、中速条件で4名、高速条件で1名において図3-17のような有意な相関関係が認められ(表3-1の水色)、当該被験者においては足部がボールに与える力積がターゲット方向へ近づくほどインパクト後のボールの速さが大きいことが示された。以上のことから、約70%の各被験者の速度条件についてはインパクト後のボールの速さと足部の速さ、インパクト位置の2成分、足部の速度の水平角、力積水平角との間に関連があることが示された。しかし、約30%の各被験者の速度条件においてインパクト後のボールの速さと足部の速さ、インパクト位置の2成分、足部

の速度の水平角、力積水平角の 5 つの変数との間に有意な関係が認められなかった（表 3 - 1 の緑色）。これは、衝撃線と足部の速度とボール速度の相対速度の方向が影響していたものと考えられる。各速度条件の成功試技における相対速度の水平角と力積水平角の差の範囲（最大値－最小値）の平均値は、低速条件で 26.5° 、中速条件で 25.9° 、高速条件で 25.8° であり、すべての速度条件において 25° を超える大きな値であった。これは、衝撃線と相対速度のなす角度が各被験者の速度条件内において大きくばらついていたことを示すものである。Asai et al. (2004) は、プレースキックにおいて足部の速度と足部の甲の法線（衝撃線）とのなす角度がインパクト後のボールの速さに影響を及ぼすことを報告している。以上のことから、ボレーキックは衝撃線と相対速度のなす角度がばらつきやすく、その影響により約 30% の被験者の速度条件においてインパクト後のボールの速さと 5 つの変数との間に有意な関係が認められなかったものと考えられる。また、インパクト後のボールの速さに足部の速さ、インパクト位置の 2 成分の 3 つの変数が相互に影響を及ぼし合っていたことも、3 つの変数とインパクト後のボールの速さに有意な関係が認められなかった原因の 1 つとして考えられる。

また、各被験者の特徴を個々に検討してみると、sub B はすべての速度条件において足部の速さとインパクト後のボールの速さとの間に有意な相関関係が認められ、足部の速さが大きい試技ほどインパクト後のボールの速さが大きかった。このことから、sub B にとっては正確にインパクトすることよりも足部の速さを大きくすることがインパクト後のボールの速さを大きくするために重要であると考えられる。一方 sub G は、すべての速度条件においてインパクト位置の長軸成分またはインパクト位置の短軸成分とインパクト後のボールの速さとの間に有意な 2 次式の関係が認められ

た。このことから、sub G にとっては足部の速さを大きくすることよりも正確にインパクトすることがインパクト後に大きなボールの速さを得るために重要であると考えられる。このように、sub B と sub G ではインパクト後に大きなボールの速さを得るために必要な技術が異なると考えられる。これらのことから、ボレーキックにおいてインパクト後に大きなボールの速さを得るためには、それぞれの選手にとって必要な技術を習得することが重要であると考えられる。

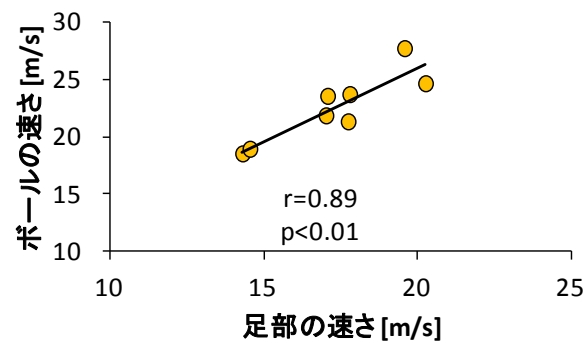


図 3 - 12 速度条件ごとの成功試技において足部の速さとボールの速さとの間に有意な相関関係が認められた典型例

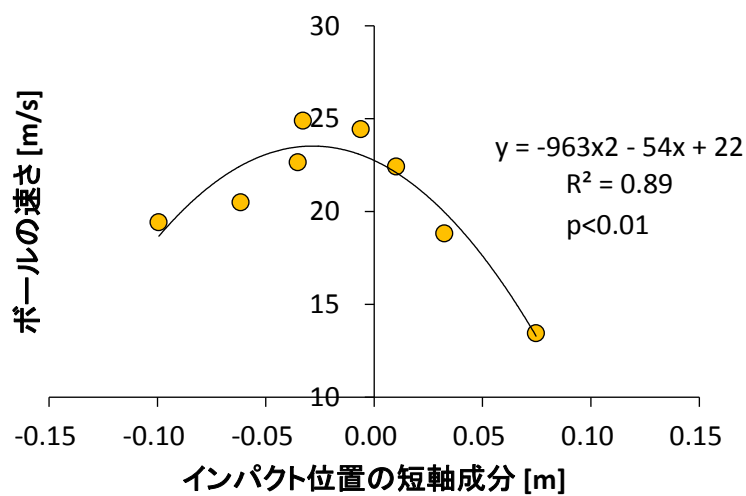


図 3 - 13 速度条件ごとの成功試技においてインパクト位置の短軸成分とボールの速さとの間に有意な 2 次式の関係が認められた典型例

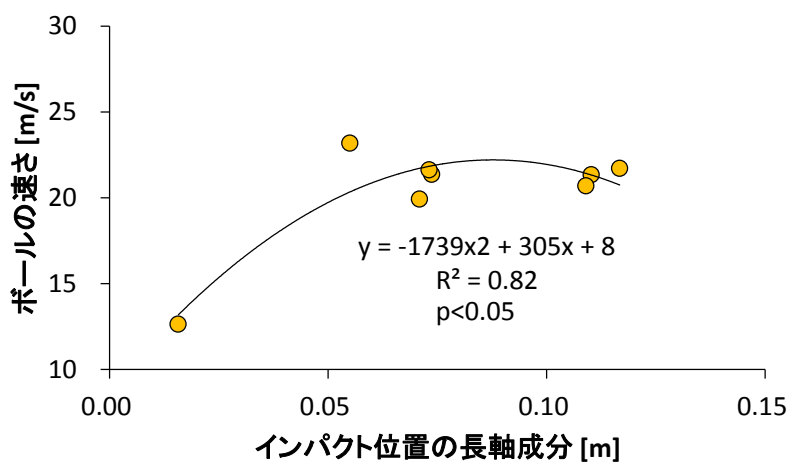


図 3 - 14 速度条件ごとの成功試技においてインパクト位置の長軸成分とボールの速さとの間に有意な 2 次式の関係が認められた典型例

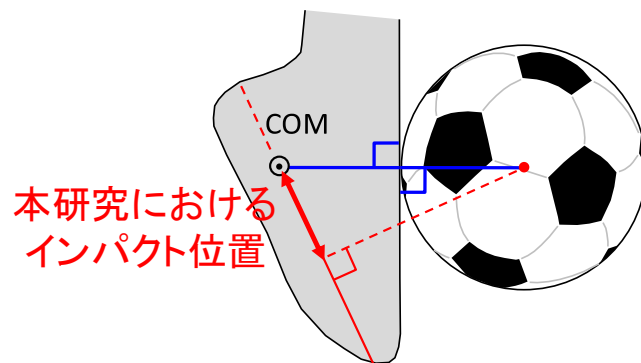


図 3 - 15 石井ら（2007）が定義したインパクト位置が 0m であった
ときの本研究におけるインパクト位置の長軸成分

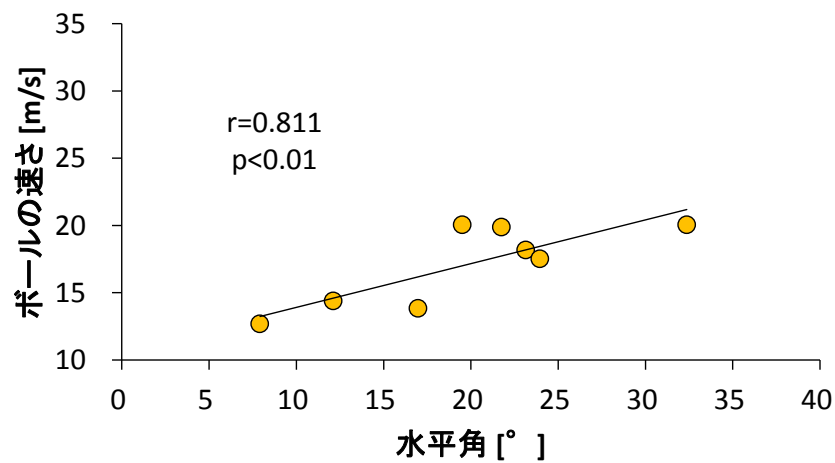


図 3 - 16 sub G の低速条件における足部の速度の水平角とインパクト後の
ボールの速さとの関係

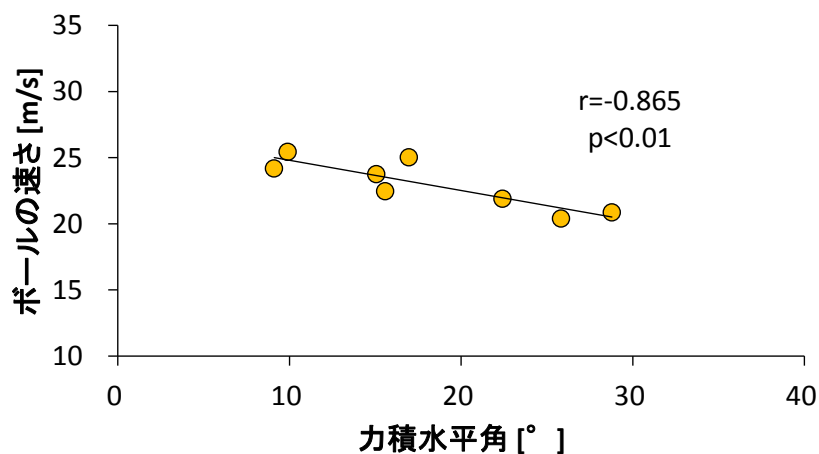


図 3 - 17 速度条件ごとの成功試技において力積水平角と足部の速さとの間に有意な相関関係が認められた典型例

表 3 - 1 各変数とボールの速さとの間に有意な関係が認められた被験者の速度条件

	sub A					sub B					sub C					sub D					sub E				
	速	短	長	足	力	速	短	長	足	力	速	短	長	足	力	速	短	長	足	力	速	短	長	足	力
低速																									
中速																									
高速																									

	sub F					sub G					sub H					sub I				
	速	短	長	足	力	速	短	長	足	力	速	短	長	足	力	速	短	長	足	力
低速																				
中速																				
高速																				

速: 足部の速さ
短: インパクト位置の短軸成分
長: インパクト位置の長軸成分
足: 足部の速度の水平角
力: 力積水平角

: 足部の速さとインパクト後のボールの速さに有意な関係が認められた各被験者の速度条件
: インパクト位置の短軸成分とインパクト後のボールの速さに有意な関係が認められた各被験者の速度条件
: インパクト位置の長軸成分とインパクト後のボールの速さに有意な関係が認められた各被験者の速度条件
: 足部の速度の水平角とインパクト後のボールの速さに有意な関係が認められた各被験者の速度条件
: 力積水平角とインパクト後のボールの速さに有意な関係が認められた各被験者の速度条件

第 4 章 結 論

本研究の目的は、① ボレーキックにおける足部の速度およびインパクト位置がインパクト後のボール速度に及ぼす影響、② インパクト前のボール速度の違いによるインパクト後のボール速度に影響を及ぼす要因の変化を検討し、ボレーキックにおいて大きなボール速度を得ることのできるインパクト特性を明らかにすることであった。

被験者間においてターゲットに命中させ、かつインパクト後に大きなボールの速さを得るためには、

- ① インパクト時の足部の速度を大きくすることが重要であると示された。
- ② 足部の甲の左右中心付近でインパクトすることが重要であると示された。
- ③ 足部がボールに与える力積の方向をターゲット方向へ近づけてインパクトすることが重要であると示された。

被験者内においてインパクト後に大きなボールの速さを得るためには、被験者ごとに異なる技術が重要であり、

- ① インパクト時の足部の速度を大きくすることが重要であると示された。
- ② 正確にインパクトすることが重要であると示された。

インパクト前のボールの速さによらず、

- ① 足部の速さ、インパクト位置の範囲、インパクト後のボールの速さは変化しないことが示された。

また、インパクト前のボールの速さが大きくなるにつれて、

- ② 足部の速度の方向を飛来するボールの方向へ近づけることで、足部がボールに与える力積の方向を飛来するボールの方向へ近づけてインパクトすることが示された。
- ③ インパクト後に大きなボールの速さを得ることが困難になると示された。

参考文献

- 阿江通良. (1996). 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, 15, 3, 155-162.
- Asai, T., Carre, M., Akatsuka, T., Haake, S. (2002) The curve kick of a football I: impact with the foot. Sports Engineering, 5, 183-192.
- Asai, T., Nunome, H., Maeda, A., Matsubara, S., Lake, M. (2005). Computer simulation of ball kicking using the finite element skeletal foot model. Science and football, 5, Relly, T., Cabri, J., Araujo, D. (Eds.), 77-82.
- Asai, T., Takano, S., Carre, M. J., Haake, S. J. (2004). A fundamental study of an infront curve kick in football. The engineering of sport, 5, M. Hubbard, R. D. Mehta, J. M. Pallis. (Eds.), 290-295.
- Asami, T., Nolte, V. (1983). Analysis of powerful ball kicking, Biomechanics. 8, B, Matsui, H., Kobayashi, K. (Eds.), 695-700. Champaign, IL: Human Kinetics.
- 浅見俊雄, 戸荏晴彦. (1968). サッカーのキック力に関する研究. 体育学研究, 12, 4, 267-272.
- Barfield, W. R. (1995). Effects of selected kinematic and kinetic variables on instep kicking with dominant and non-dominant limbs. Journal of Human Movement Study, 29, 251-272.
- Cabri, J., Deproft, E., Dufour, W., Clarys, J. P. (1988). The relationship between muscular strength and kick performance. Science and Football, T. Relly, Lees, A., Davids, K., Murphy, W. (Eds.). London: E & FN spon. 186-193.
- 石井秀幸, 磯川正教, 丸山剛生. (2007). インステップキックにおけるインパクト位置がボール速度に及ぼす影響とインパクト中の衝撃力の解析. バイオメカニクス研究, 11, 3, 170-182.

- 石井秀幸, 丸山剛生. (2007). 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. スポーツ産業学研究, 17, 2, 13-23.
- Ishii, H., Yanagiya, T., Naito, H., Katamoto, S., Maruyama, T. (2012). Theoretical study of factors affecting ball velocity in instep soccer kicking. Journal of Applied Biomechanics, 28, 258-270.
- 磯川正教, 小嶋武次. (1997). インステップキックにおけるインパクトの力学的分析. 東京都立大学体育学研究, 22, 13-17.
- Isokawa, M., Lees, A. (1988). A biomechanical analysis of the instep kick motion in soccer. Science and Football, Reilly, T., Lees, A., Davids, K. and Murphy, W. J. London (Eds.). London: E & FN spon. 449-455.
- Lees, A., Nolan, L. (1998). The biomechanics of soccer: A review. Journal of Sports Science, 16, 211-234.
- Nunome, H., Asai, T., Ikegami, Y., and Sakurai, S. (2002). Three-dimensional kinetic analysis of side-foot and instep soccer kicks, Medicine and Science in Sports and Exercise, 34, 2028-2036.
- 大橋二郎, 田嶋幸三, 掛水隆, 赤木真司. (1997). サッカーゴールへの科学—科学的分析に基づいた確率の高いシュート. 東京電機大学出版局.
- Plagenhoef, S. (1971) Patterns of human motion. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- 田中和久. (1987). MEXICO'86 全 132 得点の傾向分析. サッカー医・科学研究会報告書, 7, 47-56.
- 戸刈晴彦, 浅見俊雄, 菊池武道. (1971). サッカーのキネオロジー的研究(1), Research of physical education, 16, 5, 259-264.

Zernicke, R., Roberts, E.M. (1978) Lower extremity forces and touques during systematic variation of non-weight bearing motion. *Medicine and Science in Sports*, 10, 21-26.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始適切な助言をいただき、また、熱心かつ丁寧な指導をしてくださった矢内利政教授に感謝の意を表します。学部 2 年のゼミから 4 年間本当にありがとうございました。川上泰雄教授、広瀬統一教授には副査のお願いをした際に快諾していただき、励ましのお言葉をいただきました。心より感謝申し上げます。

研究に関する全てのことをサポートして頂いた城所収二さんがいなければ、本研究を完成させることはできませんでした。卒業論文に始まり 3 年間、ご多忙にも関わらず丁寧な指導をしていただき、本当にありがとうございました。森下義隆さん、谷中拓哉さんにはどんな些細な疑問に対しても親切に回答していただけたおかげで、快適な研究活動が行えたと感じています。本当にありがとうございました。2 年間ともに切磋琢磨した同期に感謝致します。特に、木村康宏くん、菱川啓太くんとはこの 2 年間常とともに過ごし、苦しい時を励まし合い乗り越えられたことを嬉しく思います。これからもこの素晴らしい出会いを大切にしていきたいと感じています。バイオメカニクス研究室のみなさんには、本当にお世話になりました。優秀な先輩方に指導していただける環境で研究活動を行えたことに幸せを感じています。実験に快く参加してくれたサークルの後輩がいなければ、実験を実施することはできませんでした。本当にありがとうございました。

最後に、大学院へ進学し、サッカーに関する研究を行う貴重な機会をくれた両親には感謝しています。25 年間本当にありがとうございます。この 2 年間で得た経験が無駄ではなかったことを、今後証明できるよう精進していきたいと思っています。

2014 年 2 月 谷 茂 樹