

博士論文 要約

サッカーのボールコントロールにおけるバイオメカニクス研究

名古屋大学大学院 教育発達科学研究科
教育科学専攻 生涯スポーツ科学講座
伊賀 崇人

サッカーのゲームを構成する主要な技術として、キック技術とボールコントロール技術が挙げられる。キック技術は、シュートやパスなど様々な場面で使用される技術であり、初心者が最初に習得する基本技術である。対して、ボールコントロール技術は、一般にトラップと呼ばれ、パスされたボールを適切に止める技術のことを指し、キック技術と対照関係にある基本技術である。

スポーツバイオメカニクスにおけるサッカーの先行研究では、キック技術を対象に多く行われており、動作の力学的メカニズムが解明されている。また、近年の撮影速度の高速化によって、約 10ms とされているインパクト局面を分析することが可能になってきており、ボールと足部の力学相互作用の解明がなされ、パフォーマンスの向上の一助となっている。しかしながら、これまでボールコントロール技術を対象とした研究は、実験設定や測定機器における限界から、非常に少ない。そのため、一般的なボールコントロール技術の指導において、指導者の経験則に沿った指導が多く、効率の良い練習方法や体系的な練習プログラムは確立されていないのが現状である。

ボールコントロールを力学的に捉えると、キック技術のインパクトと同様にボールと足部の衝突現象であるといえる。キック技術が足部の運動量（運動エネルギー）をより多くボールに与えようとする動作であるのに対し、ボールコントロール技術はボールの持つ運動量（運動エネルギー）を足部で吸収し、できるだけ 0 に近づける動作であるといえる。このとき、足部はボールから大きな反力（ボール反力）を受けており、このボール反力の影響から、選手が能動的（意図的）に行っている動作なのか、衝突時のボール反力の影響により受動的に発生している動作なのか、ボールコントロール動作の力学的要因を特定することを困難にしている。そのため、ボールコントロール技術におけるボールストップのメカニズムを解明するには、ボールコントロール中のボールと足部間の力学的相互作用を明らかにすることが必要であると考えられる。そして、ボールから足部に加わる力を外力とした剛体リンクセグメントモデルを用いて逆動力学を解くことにより、ボールの衝撃力をどのような力発揮メカニズムによって緩衝しているのか、解明できると考えられる。さらには、これらの動作における力学的メカニズムを用いて具体的な指導のポイントや練習方法を確立することにより、サッカーの実践や指導現場に有益な科学的知見を提供することが期待される。

以上のことから、本研究では、サッカーのボールコントロール技術におけるボールストップのメカニズムをバイオメカニクスの観点から明らかにすることとし、ボールと足部との間に作用する力を推定するボール反力推定モデルを確立し、その推定モデルを用いてボールコントロールにおけるボールと足部の挙動に関する運動学的特性および運動力学的特性を明らかにすることを目的とした。なお、本研究は、研究1(第3,4章)「ボールコンタクト中にボールと足部間に作用する力を推定するボール反力推定モデルの確立」、研究2(第5,6章)「ボールコントロール技術の運動学および運動力学的メカニズムの解明」の大きく2つの研究から構成されている。

研究1では、衝突中におけるボールから足部へ伝達する力の推定方法の検討および新たなモデルの開発を試みた(第3,4章)。既存の測定機器では、実際のボールコンタクトの特性を保ち、力を直接測定することは不可能であることから、本研究では、画像データから得られた運動学パラメータを用いてボール反力を推測する方法について検討した。

力学的に動いている物体がボールに衝突することと、固定されている物体にボールが衝突することは、相対速度の関係から同一現象であるという仮定にともない、垂直に固定したフォースプレート(サンプリング周波数:10kHz)にボールを衝突させ、サッカーのボールコンタクトを実験的に再現した。様々なボール速度のコンタクトに対応すべく、一定の速度と軌跡のボールを供給できるボール配球マシンを使い、ボール投射速度を5段階(約9~19 m/s)に設定した。ボール投射方向に対して側方より超高速ビデオカメラを用いて側方から見たボールの挙動を撮影した(5kHz)、撮影された2次元座標データを基に、3次元空間におけるボールの運動学パラメータを算出した。この実験設定を考案したことにより、リファレンスのボール反力データの測定に成功し、モデルの妥当性の検証が可能となった。このリファレンス波形と先行研究で用いられているボール反力を推定する4つのモデル;1)幾何学中心モデル:CBモデル,2)ボール重心モデル:CGBモデル(Shinkai et al., 2009),3)Hertzの接触理論モデル:Hertzモデル(石井と丸山, 2007),4)正弦波モデル:SWモデル(Tol et al., 2002)を比較することによって、それぞれのモデルの特徴と算出過程による問題点を明らかにした。ボール幾何学中心モデル(CBモデル)、ボール重心モデル(CGBモデル)は実測値より過大評価過され、正弦波モデル(SW)は過小評価されており、これらのモデルから算出された力波形(力の時系列データ)はリファレンス波形と差があり、ボール反力を十分に反映していないことが明かとなった。また、Hertzモデルは、力波形が全体的に後方にシフトした波形となり、最大ボール反力は速度が上がるにつれて過大評価されて算出されることが明かとなった。これらのことから、コンタクト中のボール反力を詳細に推定するには、新たなモデルの開発が必要であると考えられた。

そこで、先行研究におけるモデルの問題点を改善することによって、以前のモデルと比較してボール反力を精度高く推定することが可能な新たなモデルを開発することを試みた。先行研究におけるボール重心モデルを基に、ボールの膨張に伴う表面密度の変化を考慮した球体重心モデル(S-CGBモデル)と、さらに一般化した表面密度の変化と楕円体への変形を考慮した楕円体重心モデル(E-CGBモデル)の2つのモデルを作成し、リファレンス

データと比較、検討した。その結果、球体重心モデル (S-CGB モデル) は低速度条件では実測値と近い値が算出されたが、速度が上がるにつれて過大評価されること、楕円体重心モデル (E-CGB モデル) は低速度から高速度条件まで実測値と近い値を算出することができることが明かとなった。

研究 2 では、研究 1 で開発したボール反力推定モデルを用いて、ボールコントロールの運動学および運動力学的な特徴を解明することを試みた。

被検者は熟練男性サッカー選手 11 名とし、対象動作は前方からボール配球マシンによって投射された「浮き球」を、右足内側部 (インサイド) でコントロールしてボールを止めることとした。10 台のカメラで構成されたモーションキャプチャシステムを使用して、ボールと接触するコントロール脚の大腿部、下腿、足部およびボールの挙動を記録した (500Hz)。第 5 章では、コントロール脚の各関節変位 (足関節: 底屈/背屈, 膝関節: 伸展/屈曲, 外旋/内旋, 股関節: 伸展/屈曲, 外旋/内旋, 外転/内転) および足部とボールの挙動から運動学的データについて検討した。第 6 章では、それらの関節角度変位における関節トルクおよび関節トルクパワーを算出し、運動力学的データについて検討した。

実験の結果、インサイドボールコントロールは、足部を前方に振りだした後、足部内側をボールに向けながら足部を引く動作が観察され、股関節伸展/屈曲, 外旋/内旋, 膝関節伸展/屈曲の調整によって行われていることが明かになった。これらのコンタクト前の能動的な動作に加え、コンタクト直後に膝関節 (下腿) の急激な外旋が観られ、ボールの衝撃によって発生する受動的動作があることが示唆された。また、ボール運度方向に対する足部の角度を約 70 度にし、支持脚に対してコントロール脚前方の位置で、足部重心よりややつま先側の位置でボールとコンタクトするという、基礎的知見を得ることができた。これらの指標は、コンタクト前の準備動作およびコンタクト後のフォロースルー動作を行い易くし、ボールコントロールの精度を高める一要因であると考えられた。

一方、運動力学データにおいて、コンタクト前の足部を引く動作は、主に股関節の伸展トルクによって行われており、その大腿部の動作 (股関節の伸展/屈曲) による動作依存トルクの影響を受け、膝関節伸展/屈曲トルクはその動作を抑制するように相反して発生していた。また、コンタクト中およびコンタクト後の動作は、ボールの運動量の伝搬によって発生しており、その関節周りの筋群は、それらの動作を抑制すべく、逆方向 (膝関節の伸展, 内旋, 股関節屈曲) へトルク発揮していた。この際に、アイソメトリックな活動として発揮される股関節の内転トルクは、ボール反力の影響で大腿部が外転方向へ動かされるのを防ぎ、膝関節の内旋トルクを発揮しやすくしていることが示唆された。

以上 2 つの研究から、サッカーのボールコンタクトおよびボールコントロール技術がバイオメカニクスの観点から精査され、パフォーマンスとの関連が明らかとなった。研究 1 では、コンタクト中のボールと足部との間に生じる力の推定方法を検討し、リファレンスデータとの比較から、より精度高く定量化するモデルの作成に成功した。このデータは、サッカーのボールコンタクトの力学的理解を促進する新たな知見であり、キック技術およびボールコントロール技術のパフォーマンス向上に寄与することが期待される。また、足

関節への負荷を定量化することにより，サッカー選手特有の慢性障害のメカニズムの解明およびその予防方法の検討などスポーツ医学，さらには，安全に配慮した指導法や用具の開発など，様々な分野にとって有益な知見となることが期待される．

さらに，研究 2 では，研究 1 の成果を応用することによって，サッカーのボールコントロール技術の運動力学的メカニズムを初めて定量的に示すことに成功した．この研究 2 の結果は，ボールコントロールの指導における定説を覆す結果であり，観察される動作とは異なる力学的機序を明らかにした．これらの成果は，学校体育から競技までの様々なレベルにおけるサッカーの指導において，重要な新知見として，有効に利用されることが期待される．