

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目

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

氏 名

伊賀 崇人

論 文 内 容 の 要 旨

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重要な技術である。

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なわれており、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、足部とボール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捉えると、キック技術のインパクトと同様に足部とボール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。このことから、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重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、これらの運動における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、足部とボール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）「インパクト中に足部とボール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）。現存の測定機器では、実際のボールインパクトの特性を保ち、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にボールを衝突させ、サッカーのボールインパクトを実験的に再現した。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。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、フォースプレートの中心に真直ぐ当たるようにボールを投射した。ボール反力の測定に用いるフォースプレート（サンプリング周波数：10kHz）は、特殊な台座に垂直に設置した後、さらに台座が動かないように重りで固定した。ボール投射速度は5段階（約9~19 m/s）に設定し、各速度で5回測定した。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（5000Hz）。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的パラメータを算出した。

まず初めに、それらの運動学パラメータを用いて、先行研究で用いられている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）のボール反力を算出し、比較・検討した。

実験の結果、リファレンス波形との比較により、それぞれのモデルの特徴と算出過程による問題点が明らかとなった。先行研究で用いられているモデルの推定方法では、いくつかの仮定を用いるため、算出過程で誤差が生じてしまい、ボール反力、力波形が過大・過小評価されることが示唆された。そのため、先行研究のモデルで

はボール反力を精度高く算出することは難しく、インパクト中のボール反力を明らかにするには、新たなモデルの開発が必要であることが示唆された。

そこで、第3章で明らかとなった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、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の開発を試みた(第4章)。

超高速カメラによるボールインパクト中の映像観察から、インパクト中のボールは膨張している様相がみられ、非接触部分でも変形が起きていることが考えられた。さらに、衝突時のボール反力が大きくなるにつれて、ボール部分は、球から接触面に垂直な軸を短軸に回転させた回転楕円体に近い形へと変形しているように観察された。そこで、本研究では、先行研究におけるボール重心モデル(CGBモデル: Shinkai et al., 2009)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の2点を考慮した楕円体重心モデル(E-CGBモデル)の2つのモデルを開発し、リファレンスのボール反力と比較・検討した。

その結果、ボールの速度変化が小さい場合は球体重心モデル(S-CGBモデル)と楕円体重心モデル(E-CGBモデル)の両モデル、速度変化が大きい場合はE-CGBモデルにおいてリファレンスデータと近いボール反力を推定できることが示唆され、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に成功した。このモデルは、画像データから得られるボール周辺座標データのみを用いて、ボールの周径、変形量、質量、重心速度、重心加速度の変化を算出し、ボール反力が推定される。そのため、ボールとのインパクトが観察されるバレーボールやラグビーなど、他のスポーツへの応用が期待される。

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(第5, 6章)。

被検者は熟練男性サッカー選手11名とし、対象動作はボール配球マシンによって前方から投射された「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、ボールに対する足部の角度を約70度にし、支持脚に対して右前方(前方: $0.26 \pm 0.10\text{m}$, 右方: $0.37 \pm 0.08\text{m}$)の位置で、足部重心よりややつま先側で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。

また、運動力学データにおいて、コンタクト前のコントロール脚の動作は、股関節の伸展／屈曲トルクを主動としおり、他の観察される動作は、微量のトルク発揮や他の関節変位の影響による外力によって動作が構成されていることが考えられた。コンタクト時のコントロール脚の動作を構成する主要な関節変位は（膝関節の伸展／屈曲，外旋／内旋，股関節伸展／屈曲動作），関節角速度，関節トルクともに同方向（膝関節屈曲，外旋，股関節伸展方向）への増加を示し，正のパワーを発揮していた。一方，コンタクト後は一転して関節トルクは角速度と逆方向へ減少を続け，負のパワーが発揮されていたことが明らかになった。そして，コンタクト後のフォロースルーにおいて観察されるコントロール脚の動作は，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，股関節伸展方向）へトルク発揮を行っていることが明らかとなった。

以上2つの研究から，サッカーのボールインパ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，インパ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，サッカーのボールインパ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。