

別紙1-1

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 井上 功一郎

論 文 題 目

サッカーのインステップキックにおける腰部・支持脚のダイナミクス

論文審査担当者

主 査

名古屋大学総合保健体育科学センター教授 秋間 広

名古屋大学総合保健体育科学センター教授 蛭田秀一

名古屋大学総合保健体育科学センター教授 佐々木 康

福岡大学スポーツ科学部教授 布目寛幸

論文審査の結果の要旨

サッカーのインステップキック動作に関する先行研究は、直接ボールを蹴る側の脚である蹴り脚のスイング動作に着目した研究が多く見られる (Luhtanen, 1988; Levanon and Dapena, 1998; Dörge et al. 2002; Nunome et al., 2002) . それに対して、直接ボールを蹴らず、身体を支える側の脚である支持脚の動作に焦点を当てた研究は少なく、その3次元的な力学動態についてはこれまで十分に明らかにされていない。インステップキックの動作中における支持脚には、地面と接地することによって体重の2倍を超える力が作用すると報告されている (Katis and Kellis, 2010; Kellis et al., 2004) . このような大きな力に対して支持脚の各関節がどのように振る舞うのかを明らかにすることは、インステップキック動作の詳細を力学的に理解するために極めて重要であると考えられる。また、支持脚と蹴り脚を連結する腰部の動作も同様に力学的に重要な意味を持つと考えられる。一般にサッカーのキックのようなスイング動作には、近位から遠位に向けて段階的に速度を加速させる運動連鎖が起こることが知られている。したがって、身体の近位にある腰部の回旋動作は蹴り脚末端部を加速するための運動連鎖の起点になると考えられる。しかしながら、その回旋動作の発生に寄与する力学的な要因については明らかにされていないのが現状である。さらに先行研究の大多数は、任意の助走から特定の一方方向に向けて最大努力でボールを蹴るという試技を対象としている。しかしながら、実際の試合中の競技者は様々な方向へボールを蹴ったり、速度をコントロールしてボールを蹴ったりする必要があり、その動作は一様ではないと考えられる。このような実践的なインステップキック動作の力学的な理解についてもこれまで十分になされていない。

従って、本論文の目的はサッカーのインステップキック中の支持脚各関節と腰部の力学動態を定量化し、その役割を力学的に明らかにすること、さらに、より実践的なインステップキック動作を対象を拡大し、異なる方向へのインステップキックとボール速度をコントロールしたインステップキックにおいて支持脚各関節と腰部の動作の振る舞いを力学的な観点から明らかにすることとした。

最初に、基礎的な状況におけるインステップキック中の支持脚各関節の動作及び腰部の回旋動作の力学的なメカニズムを3次元動作解析によって明らかにする研究を行った(第3章)。男子大学生サッカー競技者12名が、任意の助走から特定の一方方向に向けて最大努力で行うインステップキックを対象とした。モーションキャプチャシステム及びフォースプレートによって身体各部の3次元座標と支持脚に作用する地面反力をそれぞれ記録し、分析を行った。支持脚の足関節では関節トルクの発揮を伴わない急激な底屈、内外反動作が支持脚接地直後に見られた。これらの動作は、接地によって支持脚足部に地面反力が作用することで受動的に生じることがわかった。先行研究と合わせて考察すると、ボールインパクト直前に見られるこの膝関節の伸展動作が身体を上方へ加速させ、蹴り脚の下腿部に作用する動作依存トルクを生み出すことに貢献することが考えられた。また、支持脚の股関節における腰部との相互作用は腰部の回旋動作において重要な役割を担うことも明らかとなった。腰部の回旋は、股関節周辺の筋の収縮力ではなく、地面反力に起因する支持脚側の股関節の関節間力が腰部に作用することで生じることが分かった。基礎的な状況におけるインステップキックに限られるが、これまで全く知られてこなかった支持脚各関節の動作及び腰部の回旋動作の力学的な役割が本研究により明らかとなった。

第3章における研究から支持脚の膝関節の伸展動作が蹴り脚の下腿部に作用する動作依存トルクの発生に貢献し、蹴り脚のスイングを加速させることが示唆された。これを受け、先の実験データに対して、さらに数値的に解析を進めることで、支持脚がどの程度この動作依存トルクの発生に貢献するのかを定量

論文審査の結果の要旨

的に明らかにすることを試みた(第 4 章). 蹴り脚の下腿部に立てた運動方程式の動作依存トルクの項を, 相対的な加速度によって幾何学的に分解する手法を用いた. これにより, 蹴り脚の下腿部に作用し蹴り脚のスイングを加速させる動作依存トルクを, 蹴り脚の動作に依存して生じるものと, 支持脚の動作に依存して生じるものに分解して示すことが可能となった. その結果, 蹴り脚の下腿部に作用する動作依存トルクのおよそ 70 %が支持脚の動作に起因することが明らかとなった. さらに, この支持脚による動作依存トルクの発生には, 支持脚の股関節の鉛直上方向への加速度の貢献が他の方向(前後方向, 左右方向)と比較して顕著であることが分かった. これらのことから, ボールインパクト直前の局面における支持脚の膝関節回りの筋の短縮性収縮による積極的な膝関節伸展動作が支持脚側の股関節中心の上方への加速度を生じさせること, そして, それが間接的に蹴り脚の下腿部に作用する動作依存トルクを生み出すことで, 蹴り脚のスイングが加速されるといふ一連の力学的つながりが定量的に解明された.

次に, より実践的な状況におけるインステップキック動作へと研究対象を拡大した. まず, 実際の試合において競技者が様々な方向にボールを蹴る場面を想定し, 異なる方向へボールを蹴る際のインステップキック動作における支持脚及び腰部について力学的な観点から明らかにする研究を行った.(第 5 章). 男子大学生サッカー競技者 9 名に, 標的とボールを結ぶ直線に対して 15 度, 45 度, 75 度の方向からの助走を経て最大努力でインステップキックをする試技を行わせた. モーションキャプチャシステム及びフォースプレートを用いて動作を記録し, 分析を行った. 助走に対してボールを蹴り出す角度が大きくなるほど水平面内における腰部の回旋量は増加し, 腰部をキック方向に対して正対させるようにすることが明らかとなった. また, この腰部の回旋動作は, 支持脚の大腿部に対する腰部の動き(支持脚股関節の動き)と, 床面に対する支持脚足部の動きによって主に構成されることが分かった. これらのことから, キック方向に応じた腰部の回旋量は, 支持脚の中でも主に股関節と足部の動きを変化させることでもたらされることが解明された.

2 つ目の実践的な状況でのインステップキックとして, ボール速度をコントロールしたキック, いわゆる最大下努力でのキックにおける支持脚及び腰部について力学的な観点から明らかにする研究を行った(第 6 章). 男子大学生サッカー競技者 15 名による最大努力と最大下努力でのインステップキック動作をモーションキャプチャシステム及びフォースプレートを用いて記録し, 比較検討した. 最大下努力のインステップキックにおいてボール速度を低下させる一つの要因として, 蹴り脚のスイング速度が低下することが明らかとなった. ここまでの研究(第 4 章)によって, 支持脚の膝関節の伸展動作が間接的に蹴り脚のスイングを加速させることが明らかとなっている. 一方で, 最大下努力でのインステップキックにおけるこの伸展動作は, 最大努力でのそれと比較して顕著に小さかった. また, この伸展動作を生み出す関節トルクパワーによる正の仕事も最大下努力において小さかった. これらのことから, 蹴り脚のスイング速度をコントロールする要因として, 支持脚の膝関節の伸展動作を抑えることで, 蹴り脚の下腿部に作用する動作依存トルクの発生を抑制することが

論文審査の結果の要旨

考えられた。また腰部の回旋は蹴り脚のスイングへと続く運動連鎖の起点となる動作である。最大下努力でのインステップキックにみられた腰部の回旋角速度の低下が、その後連鎖的に続く蹴り脚のスイング動作の速度を招いていることが考えられた。

本論文における一連の研究によって、まず、基本的な状況におけるインステップキック動作の支持脚と腰部について力学的な観点から定量的に測定した。そして、これまで知られていなかった支持脚各関節の力学的な役割や腰部の回旋動作の発生要因が解明された。さらに、より実践的な状況におけるインステップキック動作についても分析・精査したことで、基礎的な状況とは異なる力学的な要因について知ることとなった。したがって、基礎的な状況と同等の画一的な指導ではなく、力学的な側面の違いを踏まえた上で、それぞれの状況に応じたインステップキック動作の指導を行う必要があると言える。例えばその一端として、角度がついた方向にボールを蹴り出すような技術の指導においては、支持脚の股関節によって腰部を回転させるような積極的な力発揮を意識させる必要があることや、ボール速度をコントロールしたキック技術の指導では、フォロースルーに向けた支持脚の膝関節及び股関節の伸展動作を抑制させることなどが挙げられる。

本研究はサッカーのインステップキック動作に関する新しい科学的な知見を示すことができた。これらは、より合理的な指導法の開発などに応用可能な、サッカー指導の現場にとって有益な知見になると考えられる。

以上の研究内容から、博士学位請求者が博士論文で取り上げたサッカーインステップキックの腰部・支持脚における力学的観察から得られた特筆すべき知見は以下の4点である。

第一点目は最大下努力でのインステップキックは支持脚膝関節において負のパワーを発揮し、最大努力でのインステップキックと同程度のエネルギーを吸収していたことを明らかにした点。

第二点目は最大下努力でのインステップキックでは支持脚股関節と膝関節における正のパワー発揮が制御され、蹴り脚の足部速度が低くなったことを明らかにした点。

第三点目はキック方向に応じた腰部の回旋量の違いが、支持脚の股関節と足部の動きを変化させることに起因していることを明らかにした点。

第四点目は、最大下努力でのインステップキックでは助走速度の影響を受け、支持脚股関節の関節間力によって腰部に流入するエネルギーが少なくなり、腰部の回旋が遅くなることを明らかにした点。

論文審査の結果の要旨

一方、本論文に対して審査委員からは以下のような疑問点、問題点や助言が出された。

- 1) 平均化することで被検者個別のキックの特徴が見えにくくなるのではないかと？
- 2) グラフにおける各パラメータのピークに達する時間などが個人間で異なるのか？
- 3) 成功例だけを報告しているが、失敗例の分析も現場での指導では重要な意味があるのではないかと？

これらの指摘に対して、博士学位請求者はよく認識しており、今後のさらなる研究によって補うことが可能であると判断した。質疑に対する応答も具体的で適切なものであった。

以上を総合して、本論文はスポーツバイオメカニクスの基礎研究と応用研究の両面において重要な示唆を提示するものであり、関連領域の研究分野においても重要な知見を与え得る内容であること、また学術的価値も極めて高いものと評価できる。

よって、審査員は全員一致して、本論文を博士（教育学）の学位に値するものと判断し、論文審査の結果を「可」と判断した。