

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

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

氏 名

井上 功一郎

論 文 内 容 の 要 旨

体育・スポーツの分野では一定の経験がある者が後進の指導に当たる場合が多く、競技者の動作を観察し、それを自身の経験から理解している良い動作と照合することで、改善のための助言を行う指導法が一般的である。つまり、スポーツの指導は指導者の経験的な知識に頼る部分が多いと言える。しかし、このような指導方法は、時として動作に対する客観的理解を欠く場合があり、競技者の速やかな上達を妨げるなどの危険性ははらむ可能性がある。スポーツ科学的な知識を指導者の経験的な知識と融合させることで、より合理的な指導法が開発できると考えられる。本論文は、サッカーのインステップキック動作をスポーツバイオメカニクスの分析手法を用いて力学（ダイナミクス）の観点から精査することで、その合理的な指導方法に寄与する知見を得ようとするものである。

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（Dörge et al., 2002; Levanon and Dapena, 1998; Luhtanen, 1988; 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、その力学的な役割について明らかにした研究はこれまで十分に行われていない。インステップキックの一連の動きの中で支持脚には、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な力を発揮するのかを明らかにすることは、インステップキック動作の力学的な発生機序を理解するために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。よって、身体の近位にある腰部の回旋動作は蹴り脚末端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要因については著者が知る限り明らかにされていない。さらに先行研究の大多数は、任意の助走から特定の方向に向けて最大努力でボールを蹴るといった試技に対して分析を行ったものであった。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における支持脚各関節の力発揮の様相や腰部の回旋動作を発生させる力学的要因

は十分に解明されていない。

したがって、本論文における研究目的は、サッカーのインステップキック動作中の支持脚各関節と腰部の動きに対して運動力学的な分析を行い、その動きが発生する力学的な仕組みについて明らかにすること、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、各種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ける支持脚各関節と腰部の動きの特徴を力学的に明らかにすることとした。

始めに、基礎的な状況におけるインステップキックの支持脚各関節の動作及び腰部の回旋動作を生む力学的要因につい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ものであることが明らかとなった。支持脚の膝関節においても地面反力が作用することで生じると考えられる屈曲動作が見られた一方で、それに抵抗するような伸展トルクの発揮が見られた。つまり、支持脚膝関節の腱を含む伸筋群が伸張されながら張力を発揮することで、接地による衝撃を緩衝していると考えられた。その後、支持脚の膝関節におけるこの伸展トルクの発揮はボールインパクトまで継続し、ボールインパクト直前の局面では、それまでの屈曲動作から伸展動作へと転じた。先行研究によって、ボールインパクト直前の局面においては、蹴り脚の下腿部に作用する動作依存トルクが蹴り脚のスイングの加速に貢献すること(Nunome et al., 2006)や、この動作依存トルクは主に身体を上方へ加速させる動きによって発生すること(Nunome and Ikegami., 2005)が知られている。これらの結果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支持脚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可能性が考えられた。また、支持脚の股関節における腰部と支持脚の相互作用は腰部の回旋動作において重要な役割を持つことも明らかとなった。腰部の回旋は、支持脚股関節における関節トルク発揮ではなく、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明らかとなった。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、これまで知られていなかった支持脚各関節の動作の力学的な役割や腰部の回旋動作を生む力学的要因が明らかとなった。

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的に明らかにすることを試みた(第4章)。蹴り脚下腿部の運動方程式の動作依存トルク項を、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 %が支持脚の動作に由来しており、直接ボールを蹴らない支持脚の動作も蹴り脚のスイングの加速に貢献することが定量的に明らかとなった。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)と比較して高いことが示された。これらことから、ボールインパクト直前の局面における支持脚膝関節の伸展トルクの発揮に伴う伸展動作によって、支持脚側の股関節の上方への加速度を生じさせること、そして、それが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一連の力学的な動作の仕組みが解明された。

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た各種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の動きを力学的に分析し、異なる方向へのキックを成立させる力学的要因を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、助走に対して 15 度, 45 度, 75 度の方向へ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を増加させ、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、すなわち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。さらに、これらの動作を生む力学的要因として、角度がついた方向にボールを蹴るときほど支持脚股関節の関節トルクの発揮を増大させることや、支持脚足部をフラットに床面に接地させ、助走による慣性によって後足部をスライドさせ足部の方向を変えることが明らかとなった。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、いわゆる最大下努力でのインステップキックにおける支持脚及び腰部の動きの特徴を力学的に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た。そして、これらの動作を分析し、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が低下す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蹴り脚のスイングを加速させることが示されている。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支持脚膝関節の伸展動作は、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ために、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考えられた。さらに、腰部の回旋角速度についても 2 条件間で比較すると最大下努力で低くなった。そして、この違いは最大下努力のインステップキックにおいて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小さくなるために起こることが示された。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では、腰部の回旋角速度が低下することに影響を受け、その後、連鎖的に続く蹴り脚のスイング動作の速度が遅くな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の動きに関わる力やトルクを定量的に記述した。そして、これまで知られていなかった支持脚各関節の役割や腰部の回旋動作の発生要因を解明した。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運動力学的分析し、精査したことで、基礎的な状況とは異なる力学的要因によって動作が成立していることが示された。よって、基礎的な状況と同等の画一的な指導ではなく、動作の力学的な特徴を踏まえた上で、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、大きく角度がついた方向へのキック技術の指導では、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、蹴り脚のスイング速度を制限するためにボールインパクトに向けた支持脚の膝関節の伸展動作を抑制させることなどが挙げられる。

本研究により、これまで十分に明らかにされていなかったサッカーのインステップキックにおける支持脚各関節の動作の力学的な役割や、腰部の回旋動作が生じる力学的要因を明らかにすることができた。そして、インステップキックをする競技者にどのような力が作用しているのか、その様相について定量的に示すことができた。これらの知見は、動作を観察することのみでは知ることができないため、サッカーのキック技術指導において、有益な情報になると考えられる。