

# 博士論文

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

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

井上 功一郎

# 目次

第1章	序論	1
1.1	本論文の研究背景	1
1.2	本論文の研究目的	5
第2章	文献考証	6
2.1	インステップキックにおける蹴り脚の動作	6
2.1.1	蹴り脚の足部速度とボール速度	6
2.1.2	蹴り脚のスイング動作	6
2.2	インステップキックにおける支持脚の動作	9
2.3	インステップキックにおける腰部の回旋動作	10
2.4	実践的なインステップキック動作	11
2.4.1	キック方向に関する研究	11
2.4.2	最大下努力のキックに関する研究	14
2.5	文献的総括	16
第3章	インステップキック動作における腰部・支持脚の運動力学的分析	17
3.1	緒言	17
3.1.1	研究背景	17
3.1.2	目的	18
3.2	方法	19
3.2.1	被験者	19
3.2.2	実験手続き	19
3.2.3	関節中心	21
3.2.4	支持脚に関する運動学的及び運動力学的変数	21

3.2.5	腰部に関する運動学的及び運動力学的変数	26
3.2.6	データの平滑化	28
3.2.7	動作の局面分けと標準化	28
3.2.8	ボール中心とボール速度	29
3.2.9	統計処理	31
3.3	結果	32
3.3.1	ボール速度	32
3.3.2	支持脚足関節関節トルク及び関節角速度	32
3.3.3	支持脚膝関節関節トルク及び関節角速度	32
3.3.4	支持脚股関節関節トルク及び関節角速度	35
3.3.5	支持脚に作用する地面反力	35
3.3.6	腰部の回旋に関わるトルク及び腰部の回旋角速度	35
3.4	考察	40
3.4.1	支持脚の力学的な役割	40
3.4.2	支持脚と腰部の力学的な相互作用	44
3.5	結言	46
第4章	インステップキックにおける蹴り脚のスイングに対する支持脚の貢献	47
4.1	緒言	47
4.1.1	研究背景	47
4.1.2	目的	48
4.2	方法	49
4.2.1	データサンプリング	49
4.2.2	蹴り脚のスイングに関わる角速度及びトルク	49
4.2.3	支持脚の貢献度	52
4.2.4	データ処理(平滑化と標準化)	53

4.2.5	統計処理	53
4.3	結果	54
4.3.1	蹴り脚下腿部の角速度と蹴り脚下腿部に作用する正味のトルク	54
4.3.2	関節トルク及び動作依存トルク	54
4.3.3	蹴り脚由来の動作依存トルクと支持脚由来の動作依存トルク	54
4.3.4	支持脚由来の動作依存トルクの各成分	59
4.3.5	各トルクによる角力積と貢献度	59
4.4	考察	62
4.4.1	蹴り脚のスイングの加速に作用するトルク	62
4.4.2	蹴り脚のスイングの加速に貢献する支持脚の動作	62
4.5	結言	65
第5章	異なる方向へのインステップキック動作における腰部・支持脚の運動力学的分析	66
5.1	緒言	66
5.1.1	研究背景	66
5.1.2	目的	67
5.2	方法	68
5.2.1	被験者	68
5.2.2	実験手続き	68
5.2.3	助走角度の実測値	69
5.2.4	足部速度とボール速度	71
5.2.5	キック時間	71
5.2.6	関節角速度ベクトル及び関節トルクベクトル	71
5.2.7	関節における屈曲/伸展角速度及びトルク	71
5.2.8	水平面内における回旋角速度及び回旋トルク	72
5.2.9	データ処理(平滑化と標準化)	73

5.2.10	角度変化量及び回旋量と角力積	73
5.2.11	水平面内におけるボールインパクト時点の腰部の向き	73
5.2.12	支持脚接地時点の支持脚足部の傾き	74
5.2.13	統計処理	74
5.3	結果	75
5.3.1	助走角度の実測値	75
5.3.2	足部速度とボール速度	75
5.3.3	キック時間	75
5.3.4	支持脚各関節における屈曲/伸展(背屈/底屈)軸回りの運動	75
5.3.5	支持脚における水平面内(鉛直軸回り)の回旋	80
5.4	考察	89
5.4.1	キック方向の変化に伴う腰部の回旋動作の変容	89
5.4.2	腰部の回旋動作を構成する支持脚の動作	89
5.4.3	腰部の回旋動作と支持脚におけるトルク発揮	91
5.4.4	キック方向の変化に伴う屈曲/伸展動作の変容とトルク発揮	94
5.5	結言	98
第6章 最大下努力でのインステップキック動作における腰部・支持脚の運動力学的分析		
6.1	緒言	99
6.1.1	研究背景	99
6.1.2	目的	100
6.2	方法	101
6.2.1	被験者	101
6.2.2	実験手続き	101
6.2.3	身体重心速度, 足部速度, ボール速度とキック時間	102
6.2.4	支持脚における各関節の関節角速度と腰部の回旋角速度	103

6.2.5	支持脚の各関節における関節トルクパワー	103
6.2.6	腰部の回旋に関わる関節トルク由来及び関節間力由来のパワー	103
6.2.7	データ処理(平滑化と標準化)	105
6.2.8	統計処理	105
6.3	結果	107
6.3.1	身体重心速度, 足部速度, ボール速度とキック時間	107
6.3.2	支持脚に作用する地面反力	107
6.3.3	支持脚各関節の関節角速度と関節トルクパワー	107
6.3.4	腰部の回旋角速度と腰部の回旋に寄与するパワー	115
6.4	考察	119
6.4.1	最大下努力における試技	119
6.4.2	足部速度とボール速度	119
6.4.3	助走速度と地面反力	120
6.4.4	支持脚の接地における支持脚各関節の動作とエネルギー	120
6.4.5	蹴り脚の足部速度に寄与する支持脚の動作	122
6.4.6	腰部の回旋動作と支持脚から腰部に流入するエネルギー	123
6.5	結言	125
第7章	総合考察	127
第8章	総括	133
	謝辞	136
	参考文献	137

本博士論文は、以下の原著論文を参考論文としている。

1. 井上功一郎, 布目寛幸, 新海宏成, 池上康男(2013): キック方向の変化がサッカーのインステップキックのキネマティクスに及ぼす影響. バイオメカニクス研究 17: 110-125
2. Inoue K, Nunome H, Shinkai H, Sterzing T, Ikegami Y (2014): Dynamics of the support leg on soccer instep kicking. Journal of Sports Sciences 33: 1023-1032

# 第1章 序論

## 1.1 本論文の研究背景

体育・スポーツの分野では、該当の競技・種目において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、指導者の経験に基づく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たり、スポーツ障害のリスクを助長したりする危険性をはらんでいる。よって、運動に関する客観的な知識、とりわけ、スポーツ科学的な知識を指導現場に取り入れ、指導者の経験的な知識と融合させることで、より合理的で、安全性の高い指導法が開発できると考えられる。本研究はサッカーのキック技術を取り上げ、それらをスポーツバイオメカニクスにおける分析手法によって力学（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や競技パフォーマンスの向上に寄与する知見を得ようとするものである。

サッカーは世界で最も人気が高いスポーツのひとつで、国際サッカー連盟（FIFA : Fédération Internationale de Football Association）には国連加盟国を上回る 209 もの国と地域が加盟している（FIFA, n.d.）。サッカーは世界でおよそ 2 億 6500 万人、日本でおよそ 480 万人の人々にプレーされており、性別、年齢を問わず多くの人々に親しまれている（FIFA, 2007）。日本サッカー協会への選手登録者数も年々増加し、現在ではおよそ 96 万人が選手として登録している（日本サッカー協会, 2014）。

サッカーの最も大きな競技特性は、手以外の部分を用いてボールを扱う点にある。そのため、ゴールキーパーを除く競技者は、主に脚を用いてボールを操作し競技を行う。脚でボールを扱う技術には、ボールを蹴るキック、ボールを止める

トラッピング，ボールを運ぶドリブルなどが挙げられる．中でもキックはパスやシュートなどの主要なプレーを担うサッカーの根幹となる技術である．

サッカーのキック技術は，ボールと接触する足部の部位によって分けられ，インステップキック，インサイドキック，アウトサイドキック，インフロントキック，アウトフロントキック，トゥーキック，ヒールキックなどの名称が付けられている．これらのうち，足の甲の部分でボールを打ち出すインステップキックは，高いボール速度のシュートや長い距離のパスに用いられる技術で，試合中の使用頻度が高い重要な技術である（Nunome et al., 2002）．また，このインステップキックは初心者が最初に練習をする基本技術のひとつであることも指導現場では広く知られている．

これまで，スポーツバイオメカニクスの分野では，主に映像解析によってキック動作の分析が行われてきた．特に現在では，複数台のビデオカメラで撮影した2次元映像を組み合わせることで3次元的に動作を記録する手法が主流となっている．最も一般的なデータの分析方法は，身体を変形しない仮想的な物体である剛体の集合体としてみなし，さらにそれらが摩擦のないピンジョイントで連結されていると仮定したリンクセグメントモデルを定義し，運動方程式に基づいて身体動作の分析を行うものである．このモデルでは，身体の運動は関節やセグメントに力やトルクが作用した結果として生じる．この手法を用いることで，運動中の各関節の動きに加え，力やトルクが関節及びセグメントに作用して動作が発生する仕組み（力学的なメカニズム）を定量的に示すことができる．

運動中の身体に関する研究分野としてのバイオメカニクスにおいて行われる動作の分析は，主に運動学（キネマティクス）的方法と運動力学（キネティクス）的方法を用いて行われる．運動学は，動作のフォーム，動きの変化を研究することを指し，運動を位置，速度，加速度，角度，角速度，角加速度などの変数によって定量的に示すもので，対象とする動作の詳細な理解を促進することができる．

一方、運動力学は、その動作を引き起こす力学的要因を明らかにするもので、動作の観察のみでは知り得ない競技者に作用する力やトルクについて定量的に示すことができる。

これまでにサッカーのインステップキック動作に対して分析を行った先行研究をみると、先述の運動学と運動力学どちらの観点からも分析が行われている。Lees and Nolan (1998) のレビューによって知られているように、ボールに接触する直前の蹴り脚（直接ボールを蹴る側の脚）の足部の速度と蹴り出されたボールの速度には、概して高い正の相関関係がある。したがって、速いボールを供給するための蹴り脚のスイング動作に着目した研究が多くみられる (Dörge et al., 2002; Luhtanen, 1988; Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2002, 2006b)。それに対して、支持脚（直接ボールを蹴らず、身体を支える側の脚）の動作に焦点を当てた先行研究はいくつかみられるものの (Clagg et al., 2009; Kellis et al., 2004; Lees et al., 2009)、3次元での運動学的な分析は、膝関節に対するものに限られている。さらに、支持脚各関節の関節トルクを3次元的に示し、運動力学的な分析を行った研究は著者の知る限り報告されていない。サッカーのキック動作における支持脚は、助走で得た全身の運動エネルギーを吸収し、且つ効果的に蹴り脚へと伝達する役割を持つと考えられる。さらに、支持脚には接地によって体重の2倍を超える力が作用することが報告されている (Katis and Kellis, 2010; Kellis et al., 2004)。このような大きな力に対して支持脚がどのように振る舞うかを明らかにすることは、効果的なキック動作を力学的に理解するために重要であると考えられる。同様に、蹴り脚と支持脚を連結する腰部は、効果的なキック動作の観点から、力学的に重要なリンクとなっていることが考えられる。腰部の動作について言及した先行研究 (浅井と布目, 2002; Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2002) から、キックの比較的早い段階で腰部の水平回旋動作が起こることが示されている。この動作は蹴り脚のスイング動作へと

続く運動連鎖の起点となる重要な動作であることが考えられるが、その回旋を発生させる力学的要因は著者の知る限り明らかにされていない。これらのことから、インステップキック動作に関する研究は蹴り脚を対象としたものに集中しており、腰部や支持脚の動作の役割に関しては、力学的な解明が十分に進んでいないのが現状であると言える。

一方、これまでに示したインステップキックに関する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、状況に応じて様々な方向にボールをキックする必要があり、その動作は先行研究で分析されているような一律な動作ではないと考えられる。また、キックの強さに関して常にも最大努力でボールを蹴るのではなく、速度や飛距離をコントロールしてボールを蹴ることが試合中には求められる。各種方向へボールをキックする際の動作分析を行った先行研究（池田と磯川, 1993; 磯川, 1983; Isokawa and Lees, 1988; Kellis et al., 2004; Scurr and Hall, 2009）や、最大努力ではないコントロールされたキックの動作分析を行った先行研究（Andersen and Dörge, 2011; Lees and Nolan, 2002; Teixeira, 1999）はこれまでに存在するが、運動力学的な分析は行われておらず、キックの方向や速度を考慮した実践的なインステップキックにおける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、キックの方向や速度を考慮した応用条件におけるインステップキック動作を成立させる支持脚各関節の動作と腰部の回旋動作について力学的に明らかにすることで、サッカーのインステップキック動作に関する理解が深まり、実践や指導に有効な新しい知見を供給できることが期待される。

## 1.2 本論文の研究目的

本研究は、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、その動きの発生の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に対象を拡大し、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作の動きの特徴を力学的に明らかにすることを目的とした。

## 第2章 文献考証

### 2.1 インステップキックにおける蹴り脚の動作

#### 2.1.1 蹴り脚の足部速度とボール速度

助走の条件や対象とする競技者のレベルは異なるもののボールインパクト直前の蹴り脚の足部速度とボール速度の関係は多数報告されている。Kellis and Katis (2007) のレビューでは、通常のインステップキックを行った際のボール速度は、アマチュアレベルの競技者で 25 m/s から 30 m/s 程度、プロ選手を含む競技レベルの高い選手で 30 m/s 以上になることが示されている。また、これまでの先行研究によって報告されているボールインパクト直前の蹴り脚の足部速度とボール速度の相関係数は 0.94 から 0.47 であり、多くの研究によって高い正の相関関係が認められている (Apriantono et al., 2006; Asami and Nolte, 1983; 磯川と小嶋, 1996, 1998; Isokawa and Lees, 1988; Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2006b; 戸苺, 1983; 戸苺ら, 1972)。つまり、ボールに直接運動量を与える蹴り脚の足部速度を蹴り脚のスイングによって十分に高めておくことが、高いボール速度を得るための重要な要素となると考えられている (Lees and Nolan, 1998)。

#### 2.1.2 蹴り脚のスイング動作

ボールに直接運動量を与える役割を担う蹴り脚の動作に関する研究は非常に多い。これらのうち、初期の研究では、蹴り脚の動作を矢状面内に近似する 2 次元の映像解析が主として用いられてきた (Bloomfield et al., 1979; Luhtanen, 1988)。

Levanon and Dapena (1998) は、大学サッカー競技者 6 名による最大努力でのインステップキックと、足部の内側でボールを蹴るインサイドキックの動作を比較した。この研究によって、インステップキックにおける蹴り脚の関節角度の経時的な変化が初めて 3 次元的に定量化された。彼らは、蹴り脚の 7 自由度 (股

関節：屈曲/伸展，内転/外転，内旋/外旋，膝関節：屈曲/伸展，足関節：背屈/底屈，内転/外転，外反/内反) に対してその関節角度変化を記述し，インステップキックの足部速度は，主に股関節と膝関節の屈曲/伸展動作によって生み出されていることを明らかにした．また，それ以外の関節角度についてはキック中，大きな変化がないことを示した．

Nunome et al. (2002) は 3 次元的な関節角速度及び関節トルクの分析を行っている．高校生サッカー競技者 5 名の右脚でのインステップキックとインサイドキックの動作を比較した研究の中で Levanon and Dapena (1998) と同様にインステップキックの蹴り脚の 7 自由度に対して時系列データを算出した．そして，股関節では最大で  $249\pm 31\text{Nm}$  におよぶ大きな屈曲トルクが発揮され，屈曲角速度 ( $739\pm 172\text{deg/s}$ ) も同様に他の股関節の動作 (内転/外転，内旋/外旋) に比べて顕著に大きくなることを示した．また，股関節の内転トルクは最大で  $115\pm 17\text{Nm}$  と比較的大きな値となるものの，これに伴う顕著な内転動作がみられなかったことから，内転トルクの発揮にはスイングによって生じる受動的な外転動作を抑制する働きがあることを示した．膝関節では最大で  $98\pm 27\text{Nm}$  の伸展トルクが発揮され，伸展角速度はボールインパクト時点において  $1364\pm 298\text{deg/s}$  に達することを示した．その他の関節動作に関しては，蹴り脚のスイング動作に本質的に貢献すると考えられるほどの関節トルクや角速度がみられなかったことを報告した．

さらに，インステップキック動作に関しては膝関節を支配する筋群の作用によって生じる関節トルクと，隣接するセグメントから作用する関節間力によって生じる動作依存トルクの観点から力学的な分析が行われている．Dörge et al. (2002) は蹴り脚下腿部のセグメント角速度を高めることに，動作依存トルクによる仕事量が貢献すると報告した．また，Nunome et al. (2006a) は蹴り脚のスイング中の動作依存トルクの時系列変化を初めて示した．そして，ボールインパクト直前の局面からの急激な下腿部のセグメント角速度の増大は動作依存トルクにより引

き起こされることを明らかにすると同時に、関節トルクの発揮はこの伸展動作の抵抗になることを指摘した。

布目（2006）は先の研究を受けて、蹴り脚の下腿部に作用する動作依存トルクを蹴り脚股関節の加速度に起因するもの、蹴り脚大腿部のスイングに起因するもの、蹴り脚下腿部のスイングに起因するものの3つに分解して各部位の影響について検討した。そして、下腿部のセグメント角速度の増大はとりわけキックの最終局面における蹴り脚の股関節の上方への加速度に起因して生じる動作依存トルクによって行われることを明らかにした。そして、ボールインパクト直前の局面からフォロースルーに向けて支持脚の動作で上方へ伸び上がることが、蹴り脚のスイングの加速に貢献することを示唆した。

以上の研究から、任意の助走から最大努力でプレースキックを行う基本的なインステップキックに限られるが、蹴り脚のスイングの動作を生む力やトルクについてその詳細が明らかにされてきたと言える。

## 2.2 インステップキックにおける支持脚の動作

Kellis et al. (2004) は支持脚を含む下肢に対して運動学的な分析を行い、助走に対するキック方向の影響について検討した。膝関節に 3 自由度を定義して 3 次元的な分析を行い、ボールに対して大きく角度のある助走でボールを蹴る条件で、外旋角度の増加がみられたことを報告した。

Clagg et al. (2009) は、支持脚の各関節の力発揮に焦点を当て、関節トルクの最大値を算出した。そして、左から助走し右脚で蹴る通常のキックよりも、右側から助走し右脚で蹴る通常とは逆方向からの助走をとったキックでは、股関節、膝関節、足関節の各関節における最大屈曲トルクが増加する傾向にあることを示した。そして、このトルク発揮は無理な姿勢から体を前方に起こす役割があると示唆した。

Lees et al. (2009) は、支持脚の各関節における 2 次元的な運動（股関節と膝関節の屈曲/伸展、及び足関節の背屈/底屈）に対して運動力学的な分析を行った。そして、支持脚接地後の膝関節によって接地の衝撃を吸収し、身体を支えることを示した。

インステップキックにおける支持脚の動作に着目したこれまでの研究によって、支持脚各関節の 2 次元的な関節トルクや、膝関節に限った 3 次元的な角速度については示されている。しかしながら、運動力学的な分析を行い、支持脚各関節におけるトルク発揮を 3 次元的に明らかにした研究は著者の知る限りでは報告されていない。したがって、インステップキック動作中の支持脚の各関節における力発揮の様相は、十分に解明されているとは言えない。

### 2.3 インステップキックにおける腰部の回旋動作

これまで、インステップキック動作中の腰部の回旋動作を定量的に明らかにした研究は数例みられる。Levanon and Dapena (1998) と、Nunome et al. (2002) は右脚でボールを蹴った場合、腰部は上方からの視点で反時計回りに回旋すること、つまり腰部をキック方向に正対させる方向に向ける回旋が起こることを示した。また、Nunome et al. (2002) と、浅井と布目 (2002) は蹴り脚の大腿部と下腿部で作られる面から水平面内における膝の向きを算出し、インステップキックではボールインパクト時に前膝部をキック方向に向けるようにすることを報告している。さらに、Levanon and Dapena (1998) は、腰部に対する蹴り脚大腿部の向きはキック動作中一貫していることから、腰部の回旋動作が蹴り脚大腿部の前面をキック方向に正対させる役割を果たすと示唆している。このように腰部の回旋の必要性が報告されているものの、その回旋を発生させる力学的要因については著者の知る限り明らかにされていない。

## 2.4 実践的なインステップキック動作

### 2.4.1 キック方向に関する研究

サッカーの試合では状況に応じて各種方向にボールを蹴る技術が求められる。サッカーのインステップキック動作に関する先行研究では様々な分析が行われてきたが、分析対象とされているキック動作のほとんどは特定の一方方向にボールを蹴る実験設定であり、キック方向の変化がその動作に与える影響を直接的に検討した先行研究はみられない。しかし、キック方向は助走方向に対してどちらの方向にボールを蹴り出すかという相対的な方向、つまりは、助走方向とキック方向の成す角度で決定されるため、ある特定の一方方向から助走し、異なる方向へボールをキックすることは、異なる助走角度から同一方向へボールをキックすることと同義と捉えることができる。よって、ここでは助走角度とキック動作に関する先行研究について挙げる。なお、本論文では図 2-1 に示すように、助走方向とキック方向の成す角度を助走角度と定義する。

磯川（1983）は、助走角度を 0 度、15 度、30 度、45 度、60 度、90 度、助走距離を 1 歩とした右脚でのインステップキック動作を 2 次元的に分析した。その結果、被験者による個人差はみられるが、平均値では助走角度 15 度の時に蹴り脚の足部（つま先）の速度が、45 度の時にボール速度がそれぞれ最大になることを示した。そして、蹴り脚足部の速度とボール速度が最大となる助走角度は一致しないことを報告している。

Isokawa and Lees（1988）は、助走角度を 0 度、15 度、30 度、45 度、60 度、90 度、助走距離を 1 歩とした右脚でのインステップキック動作を 2 次元的に分析した。その結果、統計的な検定は行っていないものの、つま先の速度と外果の速度は助走角度 30 度で最大、ボール速度は助走角度 45 度で最大となることを示した。また、0 度から 30 度までの助走角度におけるボール速度とスイング速度には有意な正の相関関係がみられるが、45 度以上においては相関関係がみられない

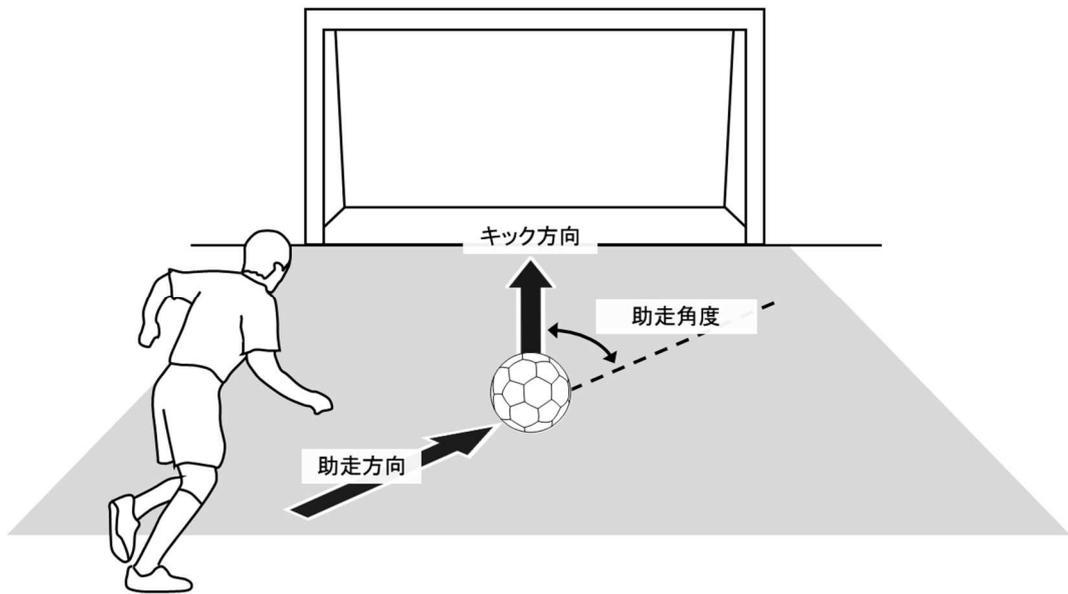


図 2-1 右脚でキックする際の助走角度の定義

ことを報告した。

池田と磯川（1993）は、日本トップレベルのプロ選手 3 名による助走角度を 0 度、30 度、45 度、60 度、90 度とした右脚でのキック動作を 3 次的に分析した。その結果、3 名とも異なる助走角度（30 度、45 度、60 度、各 1 名）でボール速度が最大となったと報告した。また、この研究ではボールインパクト時点におけるキック方向の蹴り脚の足部速度だけでなく、水平面内でキック方向に対して直角となる成分の蹴り脚の足部速度も算出している。この速度は、助走角度が大きくなるにつれて増加する傾向がみられたことが報告されている。また、蹴り脚の股関節屈曲/伸展、膝関節屈曲/伸展、足関節背屈/底屈角度を算出し、助走角度の条件ごとで大きな違いがないことを示した。さらに腰部の回旋動作を、水平面に投影した左右大転子間のベクトルから定性的に検討し、助走角度が大きくなるに従い腰部の回旋が大きくなること、いずれの助走角度からのキックにおいてもボールインパクト時には腰部がキック方向にほぼ正対することを示した。

Kellis et al. (2004) は、助走角度を 0 度、45 度、90 度、助走距離を 1 歩とした右脚でのインステップキックにおける支持脚の下肢の動作を運動学的に分析した。特に支持脚の膝関節について詳細な分析が行われ、屈曲/伸展、内転/外転、内旋/外旋の 3 自由度の角度及び角速度がそれぞれ算出されている。支持脚膝関節の屈曲/伸展、内転/外転角度には、助走角度による大きな違いがなかった一方で、内旋/外旋角度には違いがみられ、キックの前半と支持脚接地中の局面において助走角度 0 度の外旋角度が 45 度、90 度に比べ有意に小さくなったと報告した。そしてこれは、蹴り脚のスイングをキック方向に向けるための動作であることを示唆した。また、ボール速度に関しては 3 条件間で有意差がなかったことを示した。

Scurr and Hall (2009) はレクリエーション競技レベルの成人男性による助走角度 30 度、45 度、60 度と任意の助走角度の 4 条件におけるキック動作を 3 次的に分析した。その結果、ボール速度には助走角度の条件間で有意差がなかった

ことを報告した。また、キック動作中の腰部の回旋、及び蹴り脚の膝関節屈曲/伸展方向の動作範囲（ROM：Range of Motion）を算出し、腰部の回旋の ROM には助走角度が大きくなるにつれて増大する傾向がみられ、任意の助走角度と助走角度 45 度、60 度との間に有意差が認められたことを報告した。さらに、下肢の各セグメントを静止座標系の各面に投影することでボールインパクト時の下肢の角度、及び支持脚足部の接地位置を算出し、任意の助走角度と助走角度 30 度における下肢の外転角度は、助走角度 60 度のそれと比較して有意に小さかったこと、支持脚足部の接地位置には助走角度による違いがみられなかったことを報告した。そしてこれらのことから、助走角度 45 度と 60 度からキックする場合には任意の助走角度からのキックと異なる技術が必要になることを示唆した。

サッカーのキックの助走角度、言い換えればキック方向に関する研究はこれまでに散見され、ボール速度や下肢の動作を中心に分析が行われている。しかしながら、運動力学的な分析は十分に行われておらず、支持脚や腰部に作用する力やトルクに関する情報は断片的なものに留まっている。

#### 2.4.2 最大下努力のキックに関する研究

運動制御の観点から身体運動をみると、一般にヒトが行う動作の速さとその正確性にはトレードオフの関係があり、正確性を重視することで動作の速度が遅くなることが知られている（Schmidt and Lee, 2005）。正確性を重視し、ボール速度をコントロールしたインステップキック動作を分析した研究はこれまでに数例みられる。

Teixeira（1999）は、インステップキックを行う際に、標的の有無が動作に与える影響を検討した。そして、標的を設けることによって蹴り脚下肢の動作速度が低下し、キックに要する時間が増加することを明らかにした。

Lees and Nolan（2002）は、2 人のプロサッカー選手を対象とし、スピードを

重視したインステップキック動作と正確性を重視したインステップキック動作を運動学的に比較した。その結果、正確性を重視してキックをすることで、蹴り脚の動作速度や、ボール速度が低下することを報告した。また、この速度低下には腰部の回旋と蹴り脚各関節の屈曲/伸展方向の ROM の違いが関与した可能性を示した。

Andersen and Dörge (2011) は、正確性を重視したインステップキックのボール速度は最大努力の場合と比較して、およそ 80% から 90% に低下することを報告している。

サッカーのインステップキックにおいても運動制御分野の理解と同様で、正確なキックを試みる場合には動作速度及びボール速度が低下することが明らかにされており、この点については先行研究における見解が一致している。

正確性を重視し、ボール速度をコントロールしたインサイドキックにおいては、これまでに蹴り脚に対する運動力学的な分析が試みられており、蹴り脚の足部速度を制限するために蹴り脚股関節の屈曲トルクの発揮を抑えることが明らかにされている (川本ら, 2005)。しかしながら、ボール速度をコントロールして正確性を重視した最大下努力のインステップキック動作に対して運動力学的な分析を行い、各関節の力発揮やその調整について議論した研究は、著者の知る限り報告されていない。

## 2.5 文献的総括

基礎的なインステップキック動作に関する先行研究では、蹴り脚の動作を中心に運動力学的な分析が行われ、スイング動作を生む力やトルクについて明らかにされてきた。一方で、支持脚と腰部の動作の運動力学的な分析は十分に行われておらず、支持脚や腰部の動作が発生する力学的な仕組みについては、十分に理解が進んでいないのが現状である。インステップキック動作をより正確に理解するためには、蹴り脚のみならず、支持脚、腰部の動作も精査していく必要があると考えられる。また、キック方向やボール速度を考慮した実践的なインステップキックに関する研究は、断片的にしか行われていない。運動学、運動力学の両方の観点からそれらの動作の特徴を示すことができれば、指導現場に直結する有益な知見の獲得が期待できるであろう。

## 第3章 インステップキック動作における腰部・支持脚の運動力学的分析

### 3.1 緒言

#### 3.1.1 研究背景

サッカーのインステップキックは、インサイドキックなどの他の技術と比較して、高いボール速度を生み出すことができる特徴があることから (Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2002) , シュート, ロングパスやクリアなどに多用される最も重要かつ基本的な技術のひとつである. このインステップキックにおいて, ボールの初速度とボールに衝突する直前の蹴り脚の足部速度の間に高い正の相関関係があることが多く報告されている (Apriantono et al., 2006; Asami and Nolte, 1983; 磯川と小嶋, 1996, 1998; Isokawa and Lees, 1988; Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2006b; 戸蒔, 1983; 戸蒔ら, 1972) . つまり, インステップキックによって獲得できる高いボール速度は, その足部の速度に大きく依存していると考えられる. このような理由から, これまでの研究の焦点は, より高い速度でボールを蹴り出すためのスイング動作の仕組みを蹴り脚各関節に作用する力やトルクから明らかにすること, ひいては, 如何にして蹴り脚の末端である足部及び下腿部の速度を加速させるかに当てられてきた (Barfield et al., 2002; Dörge et al., 2002; Levanon and Dapena, 1998; Luhtanen, 1988; Nunome et al., 2002; Nunome et al., 2006a; Rodano and Tavana, 1993) . そして, 蹴り脚のスイングに関して, 大腿部と下腿部の間にみられる運動連鎖の仕組みや, 蹴り脚足部の最終的な加速は関節トルクではなく動作依存トルクによって生じることが解明されてきた (Lees et al., 2010; Nunome et al., 2006a) . これにより, 蹴り脚の高いスイング速度の獲得には, 筋や腱の直接的な関節駆動力 (トルク) のみではなく, 蹴り脚におけるセグメント間の相互作用によって生じるトルクを的

確に作用させることが非常に重要であることが定説となりつつある。

このように、蹴り脚の動作の力学的な仕組みの理解が深まってきている一方で、支持脚の動作に関する理解は十分とは言えない状態である。支持脚膝関節の3次元的な関節運動 (Kellis et al., 2004) や、各関節における関節トルクのピーク値 (Clagg et al., 2009) , 及び屈曲/伸展方向に限定された単軸回りの関節トルク (Lees et al., 2009) についてはこれまでに調べられているが、支持脚各関節の関節トルクについて3次元的に明らかにした研究はみられない。したがって、キック動作中、体重の2倍以上の地面反力が作用する支持脚 (Kellis et al., 2004; Orloff et al., 2008; Katis and Kellis, 2010) が、この力をどのように受け止め、どのように利用するかということは、未だ明らかにされていない。さらに、支持脚は腰部を介して蹴り脚と連結しているため、支持脚と腰部、腰部と蹴り脚の間には何らかの力学的な相互作用があると考えられる。また、一般に熟練したサッカー競技者のキック動作には、腰部回旋を起点とし、体幹部から末端部へと段階的に速度を漸増させることで最終的に末端部の高い速度を獲得する運動連鎖と呼ばれる現象がみられる。これまでのところ、この運動連鎖の起点となる腰部の動作について言及した先行研究 (Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2002; Scurr and Hall, 2009) は数例あるものの、その腰部の回旋がどのような力学的な作用によって生じるのかについて解明した研究は報告されていない。

### 3.1.2 目的

本研究の目的は、サッカーのインステップキックにおける支持脚の各関節動作、及び腰部の回旋動作を引き起こす力学的要因を3次元動作解析によって明らかにすることとした。

## 3.2 方法

### 3.2.1 被験者

被験者は、大学の地域リーグ1部に所属し、日常的にサッカーを行っている男子大学生サッカー競技者12名（年齢 $20.9 \pm 0.5$ 歳；身長 $170.8 \pm 5.3$ cm；体重 $69.0 \pm 7.3$ kg）であった。また、これらの被験者の競技経験年数は平均 $14.6 \pm 1.3$ 年、少なくとも12年であった。なお、被験者が好んでキック動作に用いる脚は全員右脚であった。本研究は名古屋大学総合保健体育科学センターにおけるヒトを対象とする研究審査委員会の承認を受けるとともに、被験者からは実験の内容を十分に説明した上で、参加の同意を書面にて得た。

### 3.2.2 実験手続き

実験は体育館内で実施した。キック動作は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（Vicon T20; Vicon Motion Systems, Oxford, UK）を用いて500Hzで記録した。また同時に、支持脚に作用する地面反力をフロアと同じ高さに埋設したフォースプレート（Type 9281E; Kistler Instruments, Winterthur, Switzerland）を用いて1000Hzで計測した。なお、モーションキャプチャとフォースプレートは完全同期した。空間の静止座標系は床面上の固定点に原点を置いた右手系直交座標系とし、Z軸を鉛直上方向、Y軸をボールキック方向、X軸をY軸とZ軸に直交する方向として定義した。また、フォースプレートの座標系もこの座標系と一致するよう変換した。

サッカーボールはFIFA公認の5号球を使用し、その内圧は実験を通して900hPaに保った。被験者はサイズのみが異なる同型のトレーニング用シューズ（Del Mundo Wide TT; PUMA, Herzogenaurach, Germany）、ショートソックス、スパッツ、コンプレッションシャツ、スイミングキャップを着用した。被験者の身体のランドマークである左右両脚のつま先（蹴り脚は第5中側骨遠位端）、踵骨後

面，外果，内果，大腿骨外側上顆，大腿骨内側上顆，大腿骨大転子，上前腸骨棘，左右上後腸骨棘の midpoint，胸骨上端，両腕の肩峰，肘頭，尺骨茎状突起，第3中手骨遠位端，左右耳珠点，頭頂には，モーションキャプチャシステムで座標を計測するための直径14mmの反射マーカを両面テープにより貼付した．また，下腿部の移動座標系を定義するために左右下腿部前面の任意の点を計測点に加え，同様のマーカを貼付した．よって，身体の計測点は計31カ所であった．実験試技の前に，被験者の立位姿勢を撮影することでスタンディングキャリブレーションを実施し，貼付したマーカ間の相対的な位置関係を記録した．その後，キック動作中に記録し続けることが困難な身体の内側部に貼付した左右内果と大腿骨内側上顆のマーカを取り外した．ボールには直径10mmの反射マーカを足部が衝突しないボールの進行方向側の半球面の8カ所に両面テープ及び粘着テープで固定した．

被験者は十分なウォーミングアップの後，日ごろ好んでキック動作に用いる脚によって，静止したボールを6m前方のフットサルゴール（高さ2m，幅3m）に向けて3歩の助走をとった後に蹴る実験試技を行った．被験者には「可能な限り速いボールをインステップキックによって蹴ること」を指示した．なお，被験者は試技に先立ち，数回の練習試技を実施した．また，その間に検者は被験者の接地を観察し，ボール位置を調節することで支持脚がフォースプレート上面の計測可能範囲に接地するようにした．フットサルゴールの位置もそのボールの位置に合うように微調整した．

全ての被験者は10回の試技を行った．指示通り行われた試技のうち，蹴り出されたボールがゴールの中心付近を捉え，支持脚の足底全体がフォースプレートの計測可能範囲内に接地していた2試技を成功試技として分析した．

### 3.2.3 関節中心

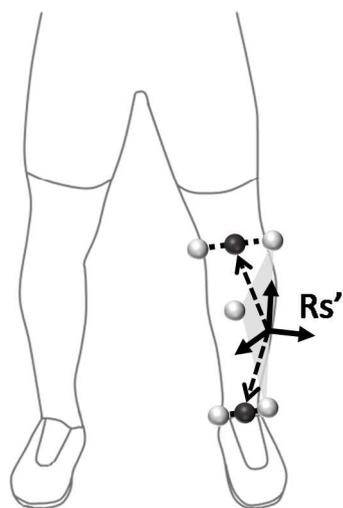
各種変数を算出するためにまず体表に貼付したマーカークの位置から股関節，膝関節，足関節の関節中心の位置座標を推定した．股関節中心の位置座標は Davis et al. (1991) が脚長と骨盤の X 線画像を用いて実測したデータから導出した推定式に，左右上後腸骨棘の midpoint と左右上前腸骨棘に貼付した反射マーカークの位置座標，及び被験者の脚長を代入することで求めた．さらに，膝関節中心の位置座標は，大腿骨外側上顆と内側上顆の midpoint として，足関節中心の位置座標は，外果と内果の midpoint として算出した．なお，先述のように試技中の大腿骨内側上顆と内果の位置は記録していない．そのため，予めスタンディングキャリブレーションから算出した膝関節中心と足関節中心それぞれの位置座標が下腿部に固定された移動座標系 ( $R_s'$ ) からみて相対的に変化しないものと仮定し，座標変換をすることで，それぞれの関節中心を推定した (図 3-1)． $R_s'$  は下腿部のセグメント内に配置される 3 点，外果，下腿部前面の任意の点，大腿骨外側上顆の座標値を用いて外積演算を 2 回繰り返すことにより求めた．

### 3.2.4 支持脚に関する運動学的及び運動力学的変数

腰部を含む下肢の各セグメントの角速度ベクトル及び角加速度ベクトルを Feltner and Nelson (1996) が用いた移動座標系の単位ベクトルを微分する方法によって計算するために，腰部と大腿部，下腿部，足部に右手系直交座標系の移動座標系  $R_p$ ， $R_t$ ， $R_s$ ， $R_f$  をそれぞれ定義した．これらの移動座標系は一直線上に配置されない 3 点の座標を用いて 2 回の外積演算を行い算出したベクトルを単位ベクトルにすることで求めた． $R_f$  は踵骨後面，つま先，足関節中心， $R_s$  と  $R_t$  は足関節中心，膝関節中心，股関節中心，そして  $R_p$  は左右上後腸骨棘の midpoint と左右の股関節中心の座標をそれぞれ用いた (図 3-2)．

逆動力学的な演算によって支持脚各関節における関節トルクベクトルを算出す

スタンディングキャリブレーション



試技

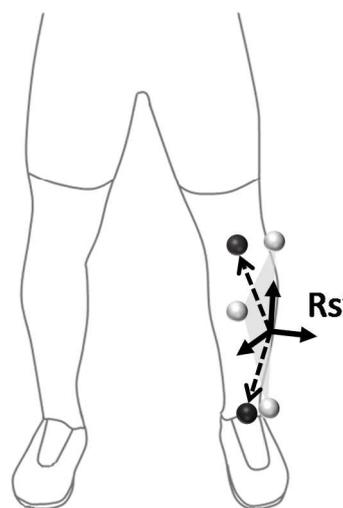


図3-1 試技中の膝関節中心と足関節中心の推定

試技中は大腿骨内側上顆と内果の位置を記録していない

スタンディングキャリブレーションから得た下腿部の移動座標系 $Rs'$ に対する膝関節中心と足関節中心の相対的な位置を用いて推定した



図 3-2 支持脚の各セグメントと腰部に定義した移動座標系

るために、足部、下腿部、大腿部、腰部の各セグメントが順にピンジョイントで連結される剛体リンクセグメントモデルを仮定した (Winter, 2009). この演算に必要な各セグメントの質量比, 質量中心比, 慣性能率は阿江ら (1992) によって報告されているデータを用いた. シューズの質量に関しては各被験者が選択したサイズに相当する質量 (282-326g) を足部のセグメントの質量に加えることで考慮した. また, 支持脚末端に作用する地面反力とその作用点 (圧力中心) の座標, さらに圧力中心を通過する鉛直軸回りのトルク (フリーモーメント) はフォースプレートで計測された圧力データから算出した. また, フォースプレートのデータは1000Hzで記録されているため, 500Hzにリサンプリングすることでモーションキャプチャから得られた座標データと同期させて処理した.

Sprigings et al. (1992) が上肢の動作分析に使用した方法を下肢に適用することで, 各関節の関節角速度ベクトルを算出した. 隣り合う遠位のセグメントの角速度ベクトルから近位のセグメントのそれを減じ, 2つのセグメントの相対的な角速度ベクトルを算出し, これをもって当該の2つのセグメントで作られる関節の関節角速度ベクトルとした. それぞれの関節における関節角速度ベクトルと先述の関節トルクベクトルから支持脚各関節の移動座標系の3軸に平行な成分を求めることで, 解剖学的な回転軸回りの関節角速度及び関節トルクを算出した. 支持脚各関節の移動座標系は, Nunome et al. (2002) による蹴り脚の分析と同様の方法で右手系直交座標系として定義した (図3-3). 足関節の移動座標系 ( $R_a$ ) のZ軸 ( $Z_a$ ) は, 膝関節中心から足関節中心に向かうベクトルとし, 足関節内転 (+) /外転 (-) の回転軸とした. また, この $Z_a$ と踵骨後面からつま先に向かうベクトルの外積によって作られるベクトルをX軸 ( $X_a$ ) とし, 背屈 (+) /底屈 (-) の回転軸とした. さらにY軸 ( $Y_a$ ) は $Z_a$ と $X_a$ の外積によって求め, これを内反 (+) /外反 (-) の回転軸とした. 膝関節の移動座標系 ( $R_k$ ) については, Z軸 ( $Z_k$ ) を足関節中心から膝関節中心に向かうベクトルとし, X軸 ( $X_k$ ) を $Z_k$ と膝関節中心

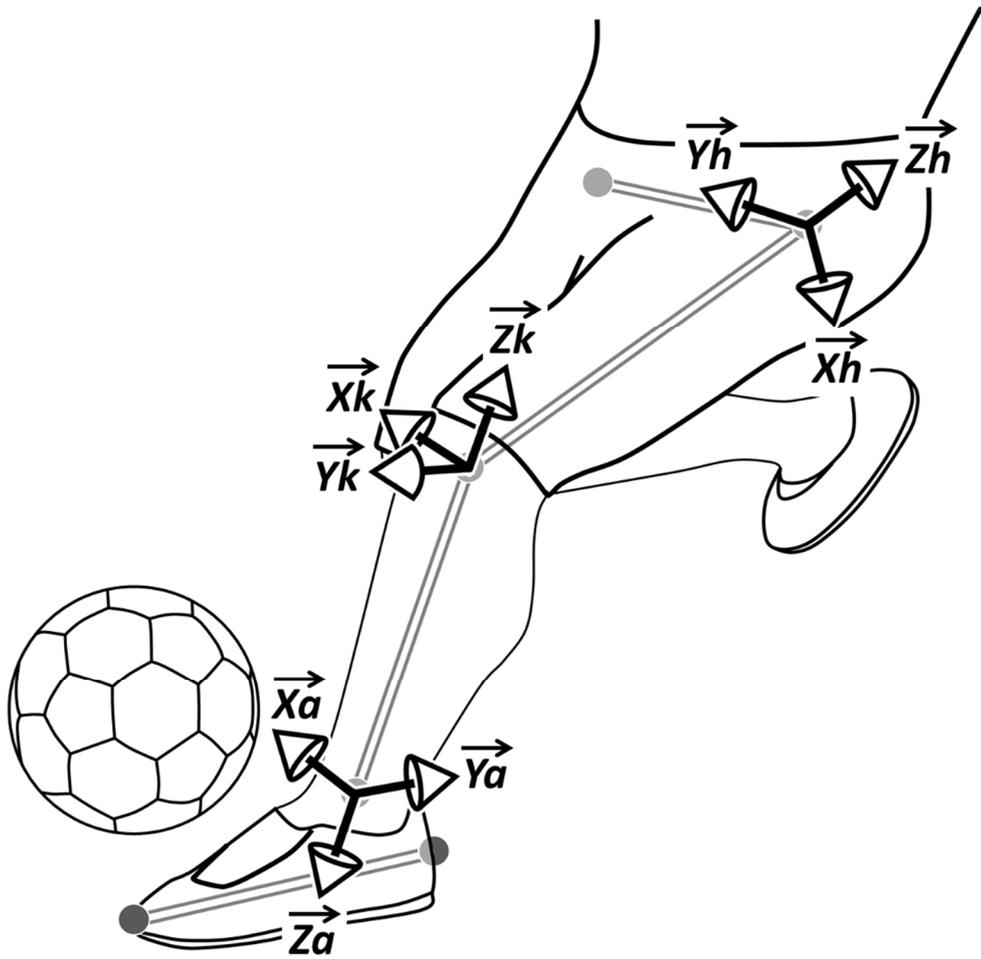


図 3-3 支持脚の各関節に定義した移動座標

から股関節中心に向かうベクトルを外積してできるベクトル，Y軸（ $Y_k$ ）をZ軸（ $Z_k$ ）とX軸（ $X_k$ ）を外積してできるベクトルとした。そして，これらの $X_k$ ， $Y_k$ ， $Z_k$ をそれぞれ，膝関節伸展（+）/屈曲（-），外転（+）/内転（-），外旋（+）/内旋（-）の回転軸とした。股関節の移動座標系（ $R_h$ ）は，Z軸（ $Z_h$ ）として膝関節中心から股関節中心に向かうベクトル，X軸（ $X_h$ ）として支持脚側の股関節中心から蹴り脚側の股関節中心に向かうベクトルと $Z_h$ を外積してできるベクトル，Y軸（ $Y_h$ ）として $Z_h$ と $X_h$ を外積してできるベクトルを持つものとした。そして，これらの $X_h$ ， $Y_h$ ， $Z_h$ をそれぞれ，内転（+）/外転（-），屈曲（+）/伸展（-），外旋（+）/内旋（-）の回転軸とした。各関節における移動座標系の3軸は方向を決定した後にそれぞれ単位ベクトルに変換した。なお，膝関節はその運動方向の特性から屈曲/伸展動作のみを行うヒンジジョイントと仮定し， $X_k$ 回りにのみ自由度を持つものとして分析することとした。つまり，本研究では，足関節に3自由度，膝関節に1自由度，股関節に3自由度の計7自由度のモデルを支持脚に適用した。

### 3.2.5 腰部に関する運動学的及び運動力学的変数

腰部の動作を記述するため，支持脚側から股関節を通して腰部に作用する股関節トルクベクトルと，腰部に作用する関節間力によるトルクベクトルを算出した。前者は，股関節関節トルクベクトルの反作用，すなわち先述の股関節の関節トルクベクトルと同じ大きさで方向のみが逆向きのベクトルとした。後者は，両股関節中心の midpoint から支持脚側の股関節中心に向かうベクトルをモーメントアームとし，そのベクトルと支持脚側の股関節中心から腰部のセグメントに作用する関節間力ベクトルを外積して算出した（図 3-4）。また，蹴り脚側から腰部に作用するトルクについても精査するために，蹴り脚側においても支持脚側と同様に，先述した2種類のトルクベクトルを算出した。最終的にここで求めた腰部に両脚から作用する4つのトルクベクトルは，骨盤の移動座標系（ $R_p$ ）のZ軸（ $Z_p$ ）に平行

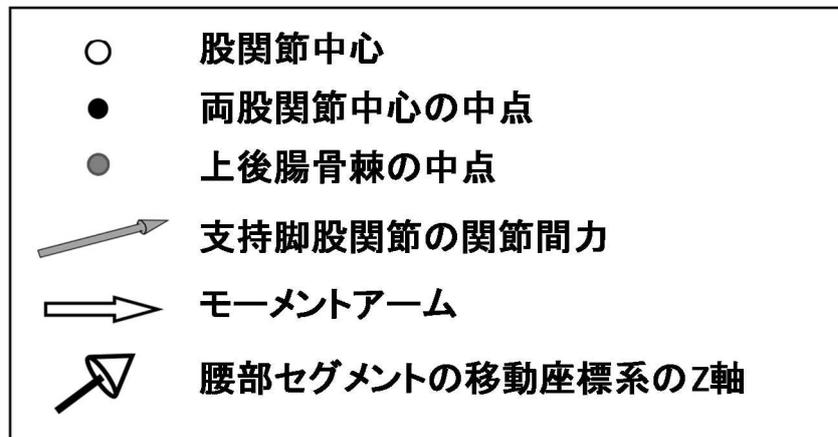


図 3-4 支持脚側の股関節を通して腰部に作用する関節間力によって生じるトルクの算出に用いた変数

な成分を求めることで、骨盤に対して鉛直上向きの軸回りの成分を抽出した（図 3-2）。腰部の回旋角速度はトルクと同じ軸（ $Z_p$ ）回りの腰部のセグメント角速度とした。腰部に作用する 4 つのトルク及び角速度の方向は、上方からの視点で反時計回りを正として示した。

### 3.2.6 データの平滑化

全てのトルクのデータは 4 次のバターワース型のローパスフィルタを用いて遮断周波数 25Hz で平滑化した。先行研究（布目, 2004; Nunome et al., 2006a）によって、蹴り脚側の遠位の座標値を用いて数値微分を行うとボールインパクトによって生じる急激な足部の減速を受けてデータに歪みが生じることが報告されている。本研究において先行研究と同じようにノイズの影響を受けるデータには、蹴り脚側から股関節を通して腰部に作用する股関節関節トルクと、蹴り脚側股関節の関節間力によるトルクが該当する。よって、これらについては、ボールインパクト後のデータを除去した後に、新たにデータを外挿した上で平滑化をし、最後に外挿部分を取り除く方法（Nunome et al., 2006a）を用いることで、ボールインパクトによる歪みの影響も合わせて排除できるよう処理した。一方、角速度と地面反力のデータについては、ノイズの影響が小さく、平滑化を施さなくとも十分にその傾向が理解できるものとし、生データを使用した。すなわち、全てのトルクと角速度、地面反力は身体各部の 3 次元座標とフォースプレートの生データから計算し、トルクデータのみに対して平滑化を施した。

### 3.2.7 動作の局面分けと標準化

Lees et al. (2009) の定めた基準を用い、地面反力の鉛直成分が 20N を越えた時点を支持脚の接地時点とした。また、ボールインパクトの瞬間の同定は、超高速度ビデオカメラを用いてボールインパクトを捉えた Shinkai et al. (2009) の

研究によるボールの進行方向側の端は足部とボールが接触してから約0.002s遅れて動き出すという報告を受けて行った。計測した3次元座標データからモーションキャプチャのソフトウェア上でアニメーションを構成し、その映像からボールのマーカが前方に移動した最初のコマを特定した。そして、その1コマ (0.002s) 前をボールインパクトとした。

時系列データは、まず支持脚接地からボールインパクトまでの期間を100%に標準化した。さらに、支持脚接地前のデータについても記述するため、支持脚接地からボールインパクトまでと同じスケールで-50%の時点から0%までのデータを加えた。例えば、支持脚接地からボールインパクトまでの時間が0.100sであった場合、データのスタート (-50%) 時点は、支持脚接地の0.050s前となる。このような方法をとることにより、支持脚接地からボールインパクトまでの時刻を被験者間で標準化した上で、支持脚の接地前後におけるデータを示し、時間軸のスケールを一致させることができた。データのスタート (-50%) から支持脚接地 (0%) までを空中局面、そして、この支持脚接地からボールインパクト (100%) までを支持局面と定義した (図3-5)。

### 3.2.8 ボール中心とボール速度

ボールの幾何学中心は、ボール表面に貼り付けた8つの反射マーカ的位置から同一距離にある点として算出した。中心の位置座標を未知数とした球の方程式に各マーカ的位置座標を代入し、それによって得られた連立方程式から最小二乗法によりその最適解を求めた。サッカーのインステップキックの足部とボールの接触時間はおよそ0.010sである (Nunome et al., 2006b; Shinkai et al., 2009)。よって、ボールと足部が離れているとみることができる0.010s以降のボール中心座標を用いてボール速度の各成分を算出した。ボール速度の静止座標系におけるX, Y成分は、時間とそれぞれの座標の一次回帰直線の傾きとして求めた。Z成分

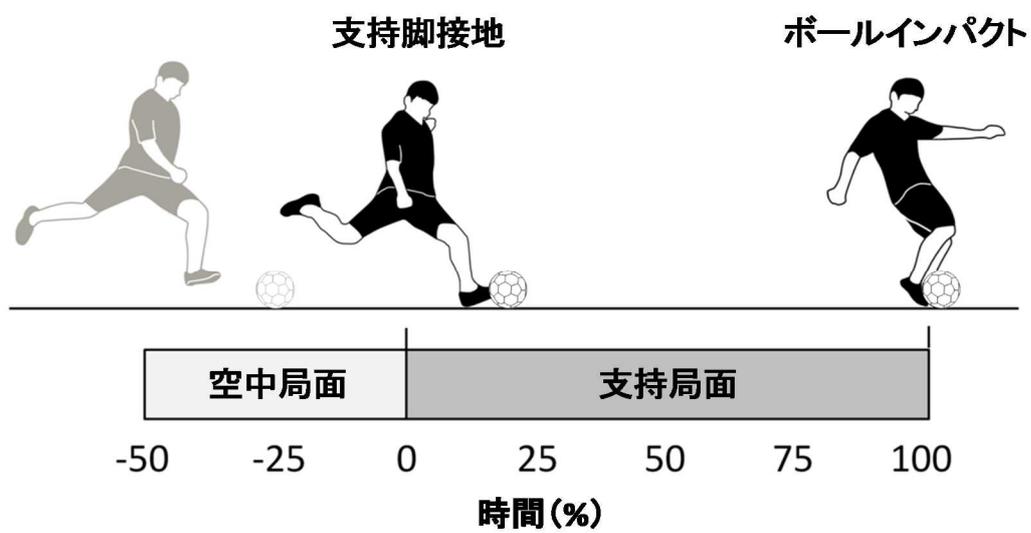


図 3-5 キック動作の局面分け  
 0%が支持脚接地を，100%がボールインパクトを表す  
 -50%から 0%を空中局面，0%から 100%を支持局面とした

は、二階微分した値が重力加速度である $-g$  ( $-9.81\text{m/s}^2$ ) になるよう2次の係数を定数 $-\frac{1}{2}g$ に定めた自由落下の方程式を用いて水平成分と同様の方法で算出した。 $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ 方向の3成分を合成した値をボール速度とした。

### 3.2.9 統計処理

本研究における時系列データを含む各変数は、それぞれ平均値及び標準偏差で示した。2種類のデータの算出方法の比較は対応のある  $t$  検定によって行った。なお、有意水準は 5 %未満とした。統計処理には、Matlab Statistics Toolbox (R2011a, MathWorks, Massachusetts, USA) を用いた。

### 3.3 結果

#### 3.3.1 ボール速度

被験者12名のボール速度は $26.6 \pm 1.5 \text{m/s}$ であった。

#### 3.3.2 支持脚足関節関節トルク及び関節角速度

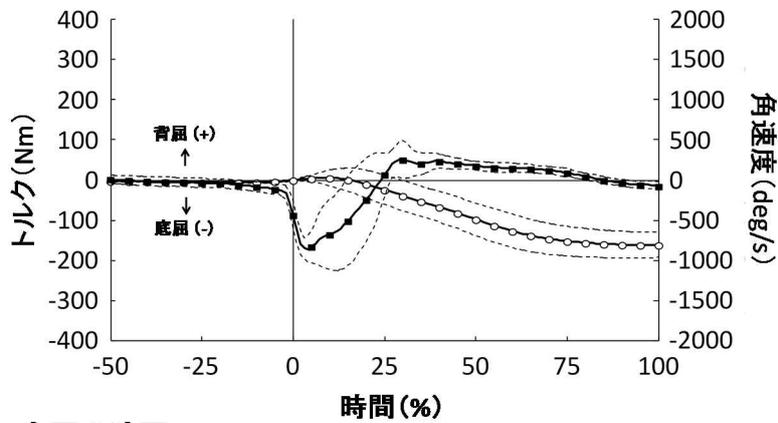
図3-6に支持脚足関節関節トルクと関節角速度を示した。足関節には関節トルクの発揮を伴わない急激な動作がみられた。空中局面においては足関節に目立った動作がほとんどなかったものの、支持脚接地を契機に急激な底屈動作及び内反動作がみられた。また、支持局面の30%時点付近までに内反動作は外反動作に急転した。一方、これらの動作が起こっている間、関節トルクはその動作と逆方向に作用するか、低い値を示した。

その後の局面においては、接地直後に生じた大きな角速度がボールインパクトに向けて収束していった。この局面で最も大きく発揮されている関節トルクは、底屈トルクであった。しかしながら、このトルクが発揮され始めるおよそ25%時点以降から、足関節は背屈の角速度を示していた。

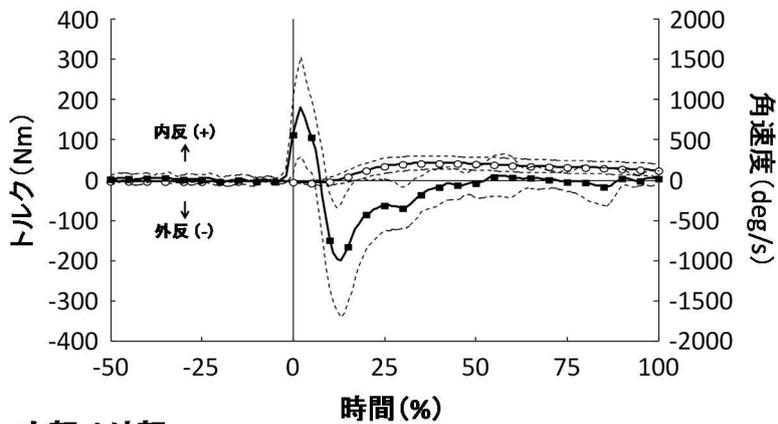
#### 3.3.3 支持脚膝関節関節トルク及び関節角速度

図3-7に支持脚膝関節関節トルクと関節角速度を示した。膝関節の関節トルクはボールインパクトの直前のおよそ75%時点以降を除いて、動作とは逆方向に作用した。空中局面中、支持脚接地に向けて膝関節は伸展したが、関節トルクは屈曲方向に発揮されていた。支持脚接地直後からは、角速度は屈曲方向に、トルクは伸展方向に転じた。ボールインパクト直前の局面ではこの伸展トルクの発揮を維持しながら、膝関節は再び伸展した。

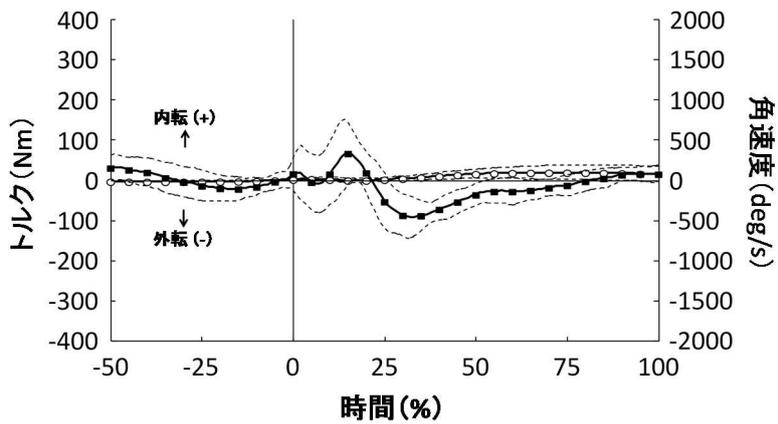
**足関節**  
**背屈 / 底屈**



**内反 / 外反**



**内転 / 外転**



○—○— 関節トルク    ■—■— 関節角速度

図3-6 支持脚足関節における関節トルク及び関節角速度  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 実線は平均値を，破線は標準偏差を示す  
 実線を識別するために標準化時間 5%毎にマークを付した

## 膝関節 伸展 / 屈曲

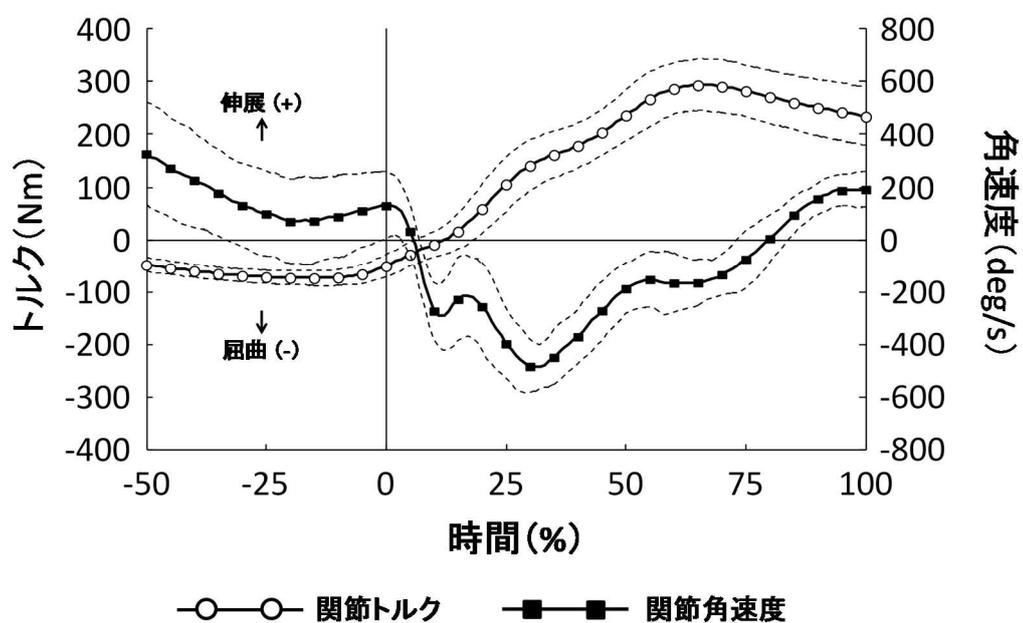


図3-7 支持脚膝関節における関節トルク及び関節角速度  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 実線は平均値を，破線は標準偏差を示す  
 実線を識別するために標準化時間 5%毎にマークを付した

### 3.3.4 支持脚股関節関節トルク及び関節角速度

図3-8に支持脚股関節関節トルクと関節角速度を示した。支持局面の30%時点付近で一端減速する以外は一貫して伸展角速度が生じていた。また、分析したほぼ全ての区間で伸展トルクが発揮され続けていた。支持局面の60%時点付近に顕著な内転動作がみられたが、それに伴う内転トルク発揮はみられなかった。支持脚接地直後の局面ではわずかな内旋トルクが発揮されながら、急激な外旋動作がみられた。その後、股関節は内旋したが、それに伴うトルクはほとんど発揮されていなかった。

### 3.3.5 支持脚に作用する地面反力

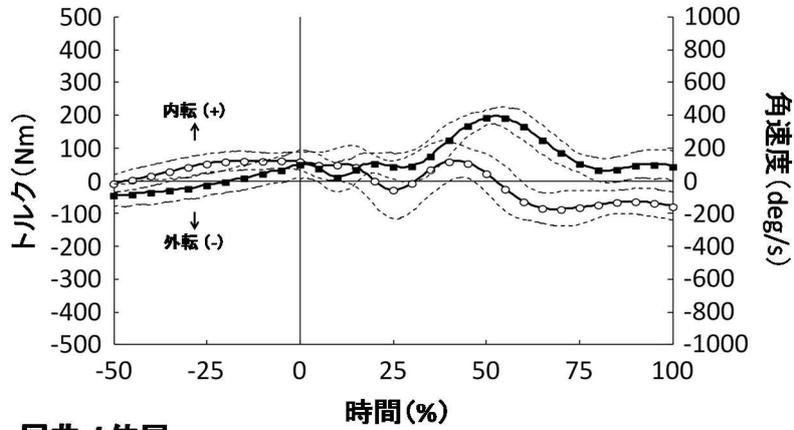
支持脚に作用する地面反力の静止座標系における各成分を図3-9に示した。キック方向に正対して左方向、後ろ方向、鉛直上方向への地面反力が支持脚接地から同時に立ち上がった。これらの3方向のうち、鉛直上方向の値が最も大きく、さらにその力の立ち上がりが急峻で、およそ10%時点付近でピーク値に達した。横方向と後ろ方向の力の立ち上がりは鉛直上方向と比べ緩やかであった。

### 3.3.6 腰部の回旋に関わるトルク及び腰部の回旋角速度

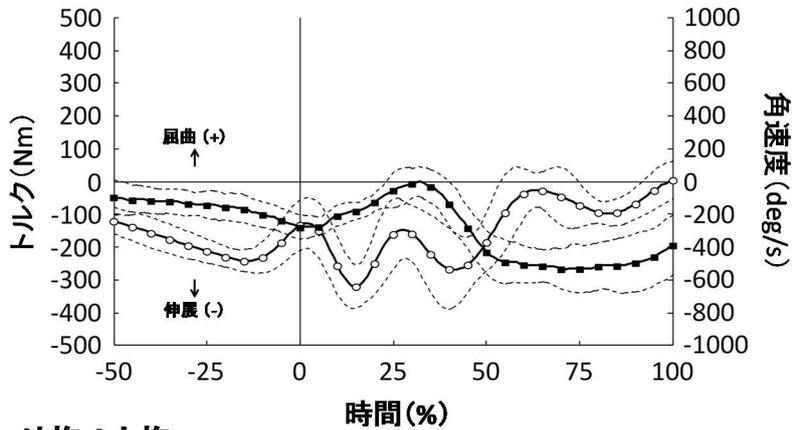
図 3-10 に腰部の回旋角速度と、腰部の回旋に関わる 4 つのトルクを示した。回旋角速度の結果から腰部は空中局面ではほとんど回旋しないことが理解できるが、その後、支持脚接地直後から上方からの視点で反時計回りの回旋が顕在化することがみてとれた。この反時計回りの回旋角速度は、支持局面の中盤にピークを迎え、ボールインパクトに向けて減少した。支持脚側の腰部に作用する 2 つのトルクに関しては、まず、関節間力によるトルクの作用が支持脚接地から顕著になり、支持局面を通して反時計回りの方向に作用した。一方、股関節関節トルクは、支持局面の中盤まで、反時計回り方向に作用し、その後はボールインパクト

**股関節**

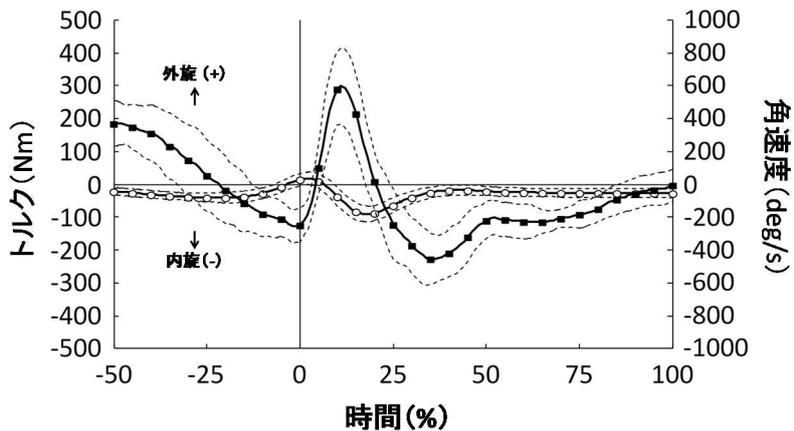
**内転 / 外転**



**屈曲 / 伸展**



**外旋 / 内旋**



○—○— 関節トルク    ■—■— 関節角速度

図 3-8 支持脚股関節における関節トルク及び関節角速度  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 実線は平均値を，破線は標準偏差を示す  
 実線を識別するために標準化時間 5%毎にマークを付した

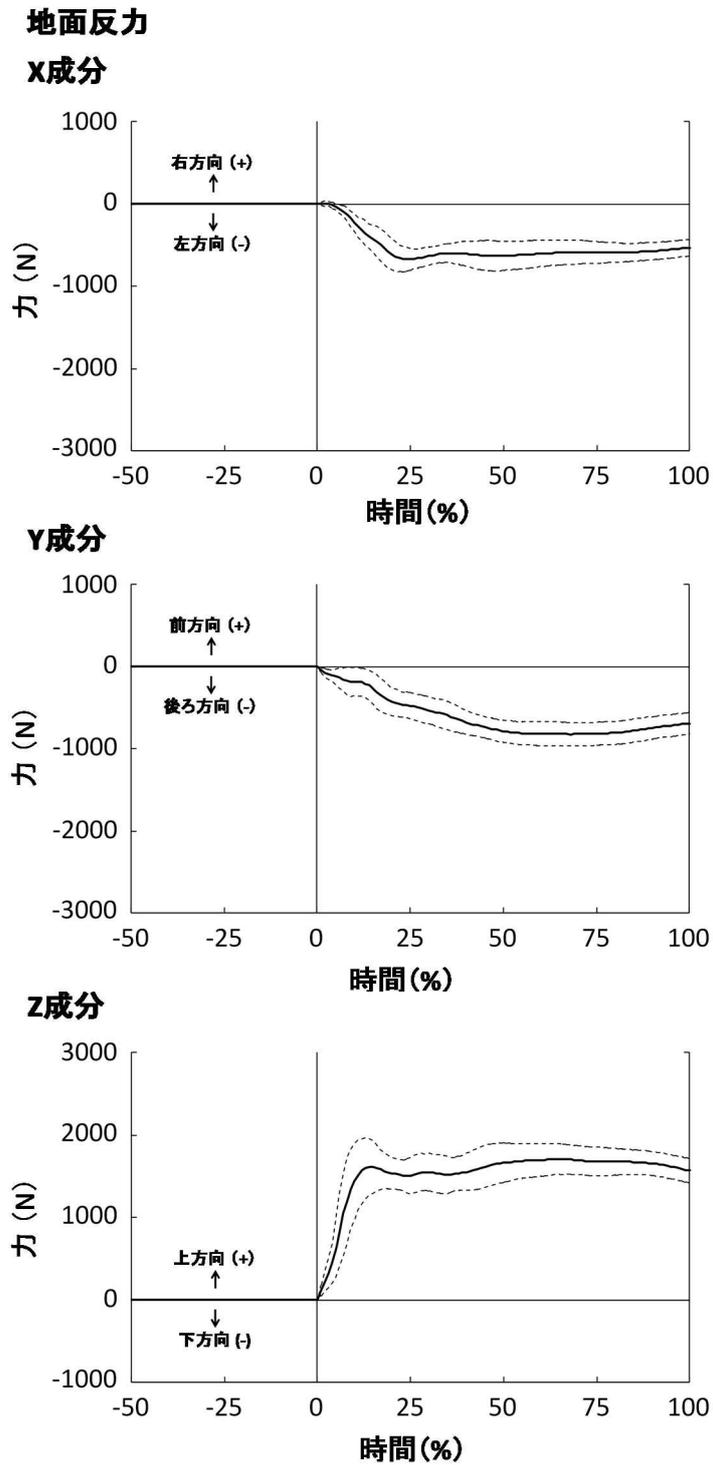


図 3-9 支持脚に作用する地面反力  
キック方向に正対して左右 (X 成分), 前後 (Y 成分), 上下 (Z 成分) 支持脚接地を 0%, ボールインパクトを 100%とし, 時間を標準化した実線は平均値を, 破線は標準偏差を示す

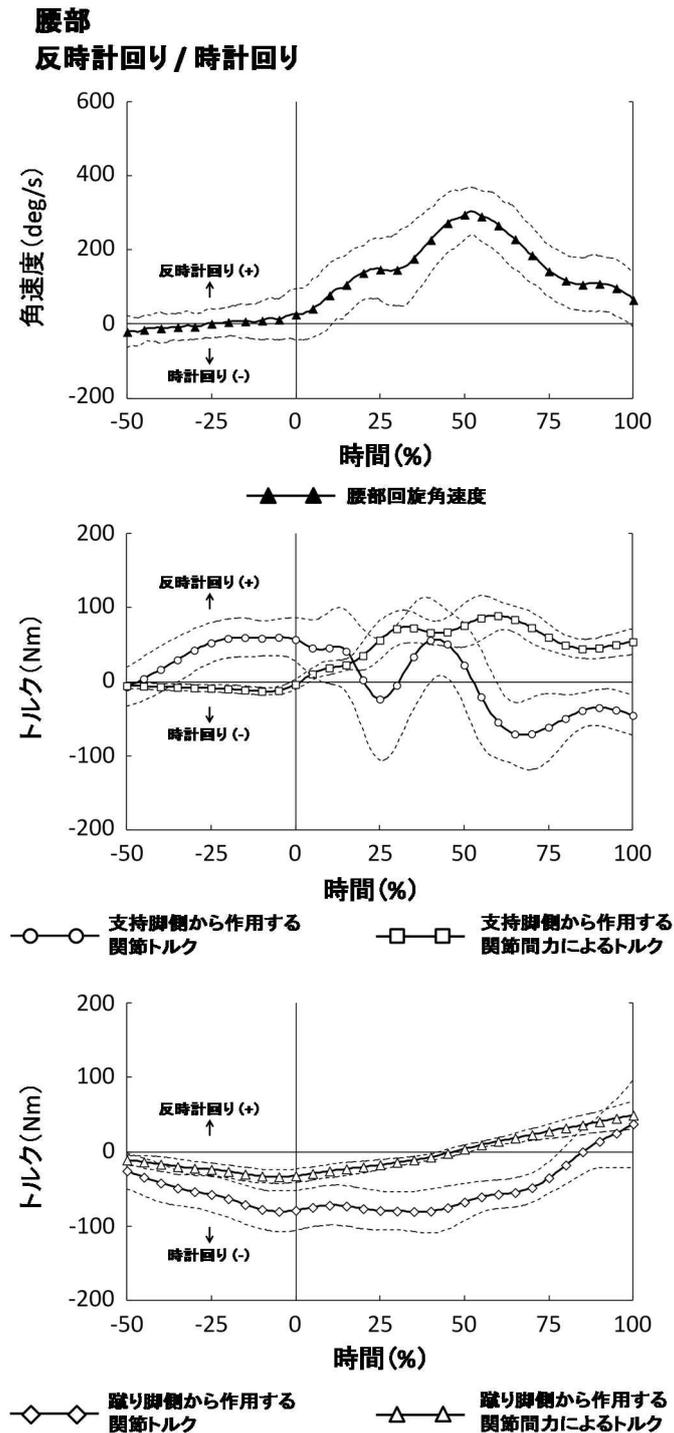


図 3-10 腰部の回旋角速度と両脚から腰部に作用する股関節関節トルク及び関節間力によるトルク

支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
実線は平均値を，破線は標準偏差を示す

実線を識別するために標準化時間 5%毎にマークを付した

に向けて時計回り方向に転じた。蹴り脚側の腰部に作用する 2 つのトルクについては、空中局面と支持局面の中盤、またはそれ以降まで時計回りに作用し、その後、反時計回りに転じた。

## 3.4 考察

### 3.4.1 支持脚の力学的な役割

今日までにサッカーのインステップキックにおける支持脚の動作を運動力学的に分析した研究は本研究の他に 1 編 (Lees et al., 2009) あるが, この先行研究は, 3 次元的な分析ではなく単軸回りの 2 次元的な運動 (股関節と膝関節の屈曲/伸展, 及び足関節の背屈/底屈) のみの分析に留まっている. 比較可能な一部のデータは概して同様のパターンを示していたものの, 足関節の底屈において差異がみられた. Lees et al. (2009) のデータには支持脚接地に先立つ底屈動作がみられたことから, いわゆる予備動作として, 支持脚接地に向けて支持脚足関節を底屈することが示唆されている. それに対して本研究では, そのような予備動作はみられず, 支持脚接地を契機とした急激な底屈動作が生じていた. このような差異が生じた理由として, データの平滑化の問題が考えられた. そこで, 本研究における座標及び地面反力のデータを 250Hz でリサンプリングし, バタワース型のローパスフィルタ (遮断周波数 12Hz) で平滑化することで, 先行研究と同じ手順でデータを算出し直した. 図 3-11 には, 先行研究と同じ手順で算出したデータ (サンプリング:250Hz, 平滑化:あり) と本研究のデータ (サンプリング:500Hz, 平滑化:なし) を並記した. 接地前後において違いがみられ, 先行研究の方法で算出した底屈角速度のピーク値 ( $-470.8 \pm 180.5 \text{deg/s}$ ) と本研究の底屈角速度のピーク値 ( $-1009.0 \pm 187.4 \text{deg/s}$ ) との間には有意差がみられた ( $p < 0.05$ ). したがって, 先行研究で示されていた支持脚接地前後の足関節底屈動作は実際の動作ではなく, 過度の平滑化によって生じたデータの歪みの可能性が高いと考えられた. つまり, 本研究によって支持脚足関節における予備動作は存在せず, 支持脚の接地により急激な底屈動作が生じることが分かった.

本研究で算出した関節トルクは, それぞれの関節を支配する腱を含む筋群が力発揮をすることで生じた見かけのトルクであると考えられることができる. したがっ

## 足関節 背屈 / 底屈

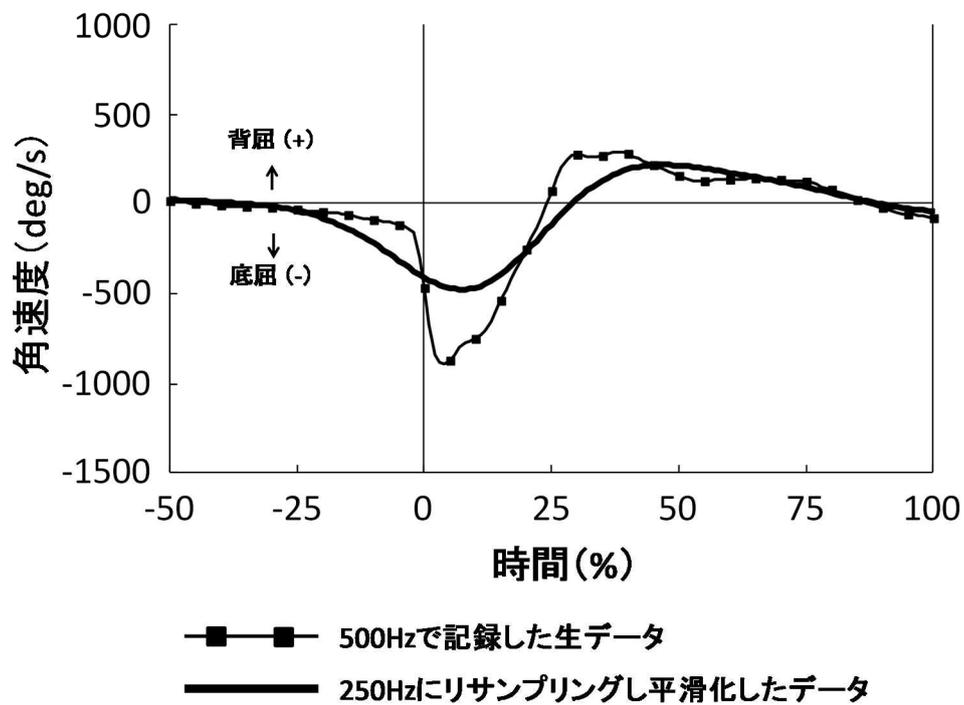


図 3-11 先行研究と同様に算出した足関節背屈/底屈のデータ（サンプリング：250Hz，平滑化：あり）と本研究のデータ（サンプリング：500Hz，平滑化：なし）の比較

て、関節角速度と関節トルクの符号が一致しているときは筋や腱が短縮しながら張力を発揮することで正のパワーが、逆に、符号が相反するときは伸張しながら張力を発揮することで負のパワーが発揮されていると考えることができる。さらに関節トルクが発揮が極めて小さい状態で角速度が生じている場合は、筋や腱以外から作用する外力によって生じる受動的な動作であると考えられる。

支持脚足関節における関節トルク及び関節角速度のデータ（図3-6）から、空中局面においては足関節に目立った動作がみられないが、支持脚接地を契機に急激な底屈動作、及び内反動作がみられることが確認できた。また、支持局面の30%付近までに内反動作は外反動作に急転した。この接地直後の局面での関節トルクは、ほとんど発揮されていなかった（図3-6）。一方で、足部に作用する地面反力の特に鉛直成分が、接地直後から急激に立ち上がり、先行研究（Kellis et al., 2004; Orloff et al., 2008; Katis and Kellis, 2010）と同様に、被験者の体重の2倍程度の大きさに達していた（図3-9）。足関節は最も遠位の関節であるため、この急激な地面反力の立ち上がりの影響を強く受けられていると考えられた。したがって、接地直後の局面で顕著にみられる足関節の3次元的な動作は、足関節の関節トルク発揮によって積極的に行われるものではなく、地面反力の作用、つまりは接地時の大きな衝撃力によって受動的に引き起こされるものであると考えられた。その後の局面においては、足関節底屈トルクがボールインパクトに向けて顕著に増大したが、このトルクが発揮され始めるおよそ25%時点以降から、足関節は背屈の角速度を示しており、そのパワーは負であった（図3-6）。したがって、足関節周りの腱を含む底屈筋群が伸張されながら張力を発揮することは、地面反力を緩衝し、足関節を構成する足部と下腿部の姿勢の安定を図ることに寄与していると考えられた。

支持脚膝関節における屈曲/伸展の関節角速度のデータ（図3-7）から、膝関節は伸展しながら接地するが、その後、屈曲することが確認できた。一方で、関節

トルクのデータ (図3-7) によって、接地直後には伸展トルクが発揮されることが示された。したがって、接地の後の局面では伸展トルクによる負のパワーが発揮されていた。すなわち、膝関節周りの腱を含む伸筋群が伸張しながら張力を発揮したと考えることができる。このような膝関節における伸展トルク発揮は、接地によって作用する地面反力に抵抗しながら衝撃を緩衝し、身体を積極的に支持する役割を果たすと考えられた。また、支持局面の後半以降には、伸展トルク発揮が継続されたまま、関節の動きが伸展に転じる現象がみられた。これは、ボールインパクト直前の局面で膝関節は、伸展トルクによって正のパワーを発揮したことを示している。蹴り脚のスイング、とりわけボールインパクト直前の局面における蹴り脚下腿部のスイング速度の増大には、動作依存トルクが主要な役割を果たすことが示されており (Nunome et al., 2006a)、さらに、この動作依存トルクは、主に蹴り脚の股関節を上方へ加速させることで発生すると報告されている (Nunome and Ikegami, 2005)。本研究でみられたボールインパクト直前の支持脚膝関節の伸展トルクによる正のパワー発揮は、膝関節の伸展によって身体を上方に押し上げることで、支持脚側の股関節だけでなく蹴り脚側の股関節も上方へ加速させることにつながると考えられる。したがって、この局面における支持脚膝関節の伸展動作が、蹴り脚のスイングを加速させる役割を担う動作依存トルクの発生に寄与していること、すなわち支持脚の動作が力学的なリンクを介し間接的に蹴り脚のスイングの加速に貢献することが示唆された。

支持脚股関節における屈曲/伸展の関節角速度のデータ (図3-8) から、股関節の伸展角速度は、支持局面の30%時点付近で一時的に減速するものの、支持局面でおよそ一貫して生じていることが分かった。また、関節トルクのデータから空中局面を含むほぼ全ての分析区間で股関節伸展トルクが発揮され続けることが示された (図3-8)。したがって、股関節では伸筋群が短縮しながら張力を発揮していたと考えられた。これらのことから、支持脚は膝関節の伸展動作と同時に能動

的な股関節の伸展動作を伴いながら接地を迎えると考えられた。また、接地後に股関節を積極的に伸展させる動作は、ランニング動作の支持期における動作（馬場ら，2000）と同様に、接地した足部を支点に身体を前方に移動させる動きとなる。助走によって得たボールキック方向への身体重心速度は、支持脚の接地によって少なからず減速すると考えられるが、その際、支持脚の股関節を伸展させることで身体を前方に進め、身体重心速度の損失を補う作用があるのではないかと考えられた。一方、股関節では伸展動作以外にも支持局面の中盤（60%時点付近）において内転動作と内旋動作がみられた（図3-8）。上方からの視点で反時計回りの腰部の回旋動作は、これらの関節運動によって生成されると考えられる。例えば、支持脚足部が接地し、地面に対して動かないとき、支持脚の大腿部が地面に対して垂直になるほど股関節の内旋によって、平行に近づくほど股関節の内転によって腰部の回旋動作を生成することができる。したがって、本研究でみられたこれらの内転と内旋が同時に起こる複合的な動作は、腰部の回旋動作を構成していると考えられた。しかしながら、内転、内旋動作を引き起こすような明らかな関節トルクの発揮はみられなかった（図3-8）。すなわち、これらの動作は、支持脚の股関節周りの筋や腱による積極的な力発揮によって生じるものではないと考えられた。

### 3.4.2 支持脚と腰部の力学的な相互作用

キック動作中に腰部は3軸回りに回転する（Lees et al., 2009; Levanon and Dapena, 1998）。中でも腰部の回旋動作と呼ばれる水平面内での回転の動作の重要性は古くから述べられている（Roberts and Metcalf, 1968; Wickstrom, 1975）。支持脚を軸にして生じる腰部の回旋動作は、運動連鎖の起点となるもので、蹴り脚のスイングに先立って起こることが確認されている。しかしながら、この回旋がどのような力やトルクによって生じているかについては、これまで分かっていな

い。したがって本研究は、腰部の回旋に寄与する力学的な作用を初めて明らかにしたものと言える。

腰部の回旋角速度の変化（図 3-10）から、空中局面では明らかな回旋動作はみられないことが確認できた。その後、腰部は、支持脚接地から上方からの視点で反時計回りに回旋し始め、支持局面の前半でその角速度を増加させた。腰部の回旋に関わる各トルクをみると、支持脚側の股関節関節間力によるトルクのみが、腰部の回旋の加速と同時に同一方向に立ち上がっており、この局面においてその他のトルクに目立った変化はみられなかった。支持脚接地のタイミングで腰部の回旋が顕在化していたことから、地面反力が支持脚を介して支持脚側の股関節関節間力として腰部に加わり、支持脚側の腰部を減速させることで先述の股関節関節間力によるトルクが生じ、回旋動作が生起されると考えられた。一方、支持局面の後半では、支持脚側の股関節関節間力によるトルクの作用が維持されているにもかかわらず、腰部の回旋角速度が減速した。この腰部の回旋の減速の開始と同様のタイミングで支持脚側の股関節関節トルクが上方からの視点で時計回りに作用し始めた。よって、腰部の回旋の減速は、支持脚側から腰部に作用する股関節関節トルク、つまりは一般的な股関節関節トルクの反作用によって引き起こされると考えられた。これらのことから、まず、腰部の回旋動作の開始は支持脚の股関節を支配する筋群の作用よりもむしろ、地面反力を効果的に腰部に作用させることによって生み出されると考えられた。また、支持脚側の股関節に生じる筋や腱由来の関節トルクの反作用により腰部の回旋が減速されることで、腰部、蹴り脚大腿部、蹴り脚下腿部と段階的に速度を加速させる運動連鎖の起点を形成し、最終的に蹴り脚足部の速度を増大させることに貢献することが示唆された。

### 3.5 結言

本章では，サッカーのインステップキックに対して3次元動作解析を行い，支持脚各関節における関節角速度とトルク，及び腰部の回旋角速度とそれに関わるトルクを明らかにした．

その結果，以下のことが示された．

1. 支持脚接地を契機に生じる支持脚足関節の急激な底屈，内外反動作は，地面反力が作用することによって受動的に引き起こされている．
2. 支持脚接地後，支持脚膝関節の伸展トルクによって負のパワー発揮をすることで，接地の衝撃を緩衝し，身体を支える役割を果たしている．その後，ボールインパクト直前ではこの伸展トルクによるパワー発揮が正に転ずることで，蹴り脚のスイングの加速に貢献する可能性がある．
3. 腰部の回旋は，地面反力に起因する支持脚側の股関節関節間力が腰部に作用することによって生じている．
4. 支持脚側の股関節関節トルクの反作用による腰部の回旋の減速が，蹴り脚末端へと繋がる運動連鎖の起点となっている．

以上のことから，支持脚の動作には接地の衝撃を緩衝し，身体を支持する役割があること，さらに，蹴り脚のスイングを加速させる役割がある可能性があることが考えられた．また，腰部の回旋動作は，地面反力に起因する支持脚側の股関節関節間力によって加速し，支持脚側の股関節関節トルクの反作用によって減速することが示された．

## 第4章 インステップキックにおける蹴り脚のスイングに対する支持脚の貢献

### 4.1 緒言

#### 4.1.1 研究背景

サッカーのインステップキックに関する先行研究によって、ボール速度と蹴り脚の足部速度の間には高い正の相関関係があることが報告されている (Apriantono et al., 2006; Asami and Nolte, 1983; 磯川と小嶋, 1996, 1998; Isokawa and Lees, 1988; Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2006b; 戸莉, 1983; 戸莉ら, 1972). そのため、高いボール速度を獲得するためには、高い足部速度を得ることが必須となる。蹴り脚の足部速度は、主に股関節の屈曲動作とそれに続く膝関節の伸展動作、つまりは蹴り脚のスイングによって高められると考えられる (Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2002). したがって、最終的には蹴り脚の膝関節の伸展動作によって下腿部を前方へ振り出すフォワードスイングを如何に速くするかが重要になると言える。

Luhtanen (1988) や Nunome et al. (2002) は、インステップキック動作中の蹴り脚の関節トルクについて明らかにし、蹴り脚の膝関節を支配する筋群によって伸展トルクが発揮され、蹴り脚下腿部のフォワードスイングが生じると報告しているが、同時に、ボールインパクト直前の局面になると膝関節には、屈曲トルク、すなわちフォワードスイングを止める方向へのトルクが作用することを示した。Putnam (1991) は、関節トルク以外の作用として、サッカーのパントキックを含む各種動作において動作依存トルクの影響を定量的に明らかにした。さらに、Dörge et al. (2002) は、キック動作中に動作依存トルクによってもたらされる力学的な仕事量が蹴り脚下腿部のフォワードスイング速度の増大に貢献することを明らかにした。また、動作依存トルクと関節トルクを時系列データとして示

した研究 (Nunome et al., 2006a) では, キックの最終局面に起こる急激な蹴り脚下腿部のスイング速度の増大は関節トルクではなく, 動作依存トルクによって引き起こされることが明らかにされている. さらに, この動作依存トルクの発生要因を探った研究 (布目, 2002; Nunome and Ikegami, 2005) では, Putnam (1991) の手法を応用して動作依存トルクを幾何学的に分解することで, このトルクの発生は蹴り脚側の股関節の上方への加速度によるところが大きいことが明らかにされている. 第 3 章の研究の結果から, 先行研究で言及されている蹴り脚側の股関節の上方への加速度は, 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正のパワー発揮によってもたらされる可能性が考えられ, 直接ボールを蹴らない支持脚の動作であっても蹴り脚のスイングの加速に貢献することが示唆された. しかしながら, 第 3 章の研究では, その貢献を定量的に明らかにするまでには至らなかった.

#### 4.1.2 目的

本研究の目的は, サッカーのインステップキックにおいて, 蹴り脚のスイング速度の増大に対する支持脚の貢献を, 定量的に明らかにすることとした.

## 4.2 方法

### 4.2.1 データサンプリング

本研究では、第3章における実験によって得られた身体各部の3次元座標と地面反力のデータを用いた。両脚における足関節、膝関節、股関節中心も第3章と同様の方法で求めた後、後述の計算手法によって数値的に解析を加えた。

### 4.2.2 蹴り脚のスイングに関わる角速度及びトルク

蹴り脚下腿部と足部が1セグメントで構成されるものと仮定した。そしてこのセグメントの移動座標系を右手系直交座標系によって  $R1$  と定義した (図 4-1)。この  $R1$  の Z 軸 ( $Z1$ ) は、膝関節中心から足関節中心へ向かうベクトルとした。また、X 軸 ( $X1$ ) は、 $Z1$  と股関節中心から膝関節中心へ向かうベクトルの外積によってできるベクトルとした。さらに、Y 軸 ( $Y1$ ) は、 $Z1$  と  $X1$  の外積によってできるベクトルとした。これらの各軸は単位ベクトルに変換した。各セグメントの質量比、質量中心比、慣性能率は、阿江ら (1992) によって示されているデータを用いた。下腿部の質量とシューズを加えた足部の質量の比から2つのセグメントの質量中心間の内分点を求めることにより、下腿部と足部を合成したセグメントの合成質量中心の位置座標を算出した。また、慣性能率は各セグメントの慣性能率の値を平行軸の定理によって合成して求めた。なお、以下、この章では下腿部という用語を、下腿部に足部を含めたセグメントの総称として用いる。

第3章の研究と同様に Feltner and Nelson (1996) の方法を用いて移動座標系の各軸を数値微分することで蹴り脚下腿部のセグメント角速度と角加速度ベクトルを算出した。蹴り脚下腿部のスイングに関する運動学的変数として、 $X1$  回り、すなわち蹴り脚の下腿と大腿で作られる平面内の蹴り脚下腿部のセグメント角速度を抽出した。この角速度における正の値をフォワードスイング、負の値をバックスイングと定義した。

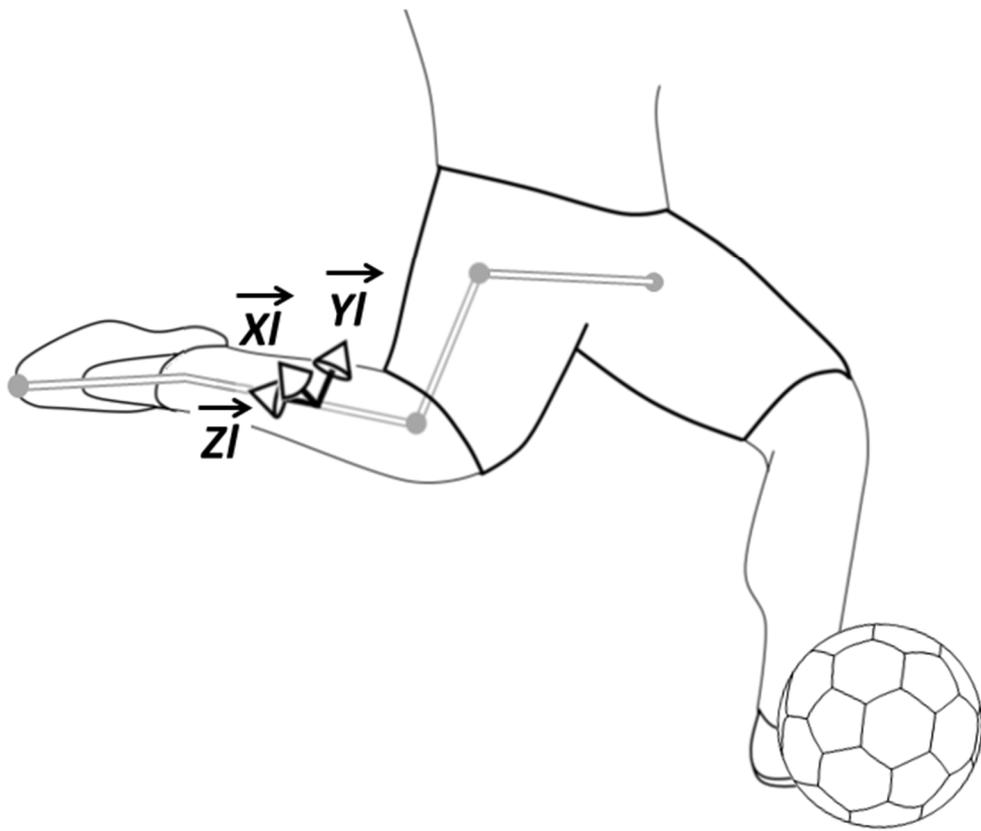


図 4-1 蹴り脚の下腿部に定義した移動座標系

蹴り脚の下腿部に膝関節を通して作用するトルクから支持脚による作用を定量化するため、加速度の相対値を用いて幾何学的にトルクを分解する Putnam (1991) の手法を応用した。本研究では蹴り脚下腿部、大腿部、腰部の 3 セグメントで作られる剛体リンクセグメントモデルを適用した。蹴り脚末端（下腿部の遠位端）を自由端とし、蹴り脚下腿部のセグメントに対して一般的な逆動力学的な演算で用いる Newton-Euler の運動方程式の立式、及び座標変換を行うと以下の式[4-1], [4-2]が得られる。

$$m_1 \mathbf{a}_1 = \mathbf{F}_p + m_1 \mathbf{g} \quad [4-1]$$

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{T}_k + \mathbf{r}_p \times \mathbf{F}_p \quad [4-2]$$

これらの式において、 $m_1$  は足部を含む蹴り脚下腿部のセグメントの質量、 $\mathbf{a}_1$  は質量中心の並進加速度、 $\mathbf{F}_p$  はセグメントの近位端である膝関節から作用する関節間力、 $\mathbf{g}$  は重力加速度、 $\mathbf{r}_p$  は質量中心から蹴り脚膝関節中心に向かうモーメントアームとなるベクトル、 $\mathbf{T}_k$  は膝関節関節トルク、 $\mathbf{M}_1$  は下腿部のセグメント角速度と角加速度及び慣性能率から算出される下腿部のセグメントに加わる全トルク（正味のトルク）である。なお、座標変換をし、 $\mathbf{M}_1$  は静止座標系におけるものとして算出した。式[4-2]から、 $\mathbf{M}_1$  は $\mathbf{T}_k$ と $\mathbf{r}_p \times \mathbf{F}_p$ 、つまりは、筋や腱による作用を表す関節トルクと関節間力による作用を表す動作依存トルクの 2 つに分解できる。

前出の加速度 $\mathbf{a}_1$ を支持脚の股関節中心の加速度を用いて書き下すと、以下の式[4-3]の様を示すことができる。

$$\mathbf{a}_1 = (\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_{hs}) + \mathbf{a}_{hs} \quad [4-3]$$

ここで $\mathbf{a}_{hs}$ は、支持脚の股関節中心の並進加速度であり、 $\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_{hs}$ は支持脚の股関節中心からみた相対的な蹴り脚下腿部の質量中心の並進加速度となる。式[4-2]に、式[4-1]及び[4-3]を代入し変形すると、蹴り脚下腿部のセグメントに作用する正味のトルクは、以下の式[4-4]として表すことができる。

$$M_l = \mathbf{T}_k + \mathbf{r}_p \times m_l(\mathbf{a}_l - \mathbf{a}_{hs} - \mathbf{g}) + \mathbf{r}_p \times m_l \mathbf{a}_{hs} \quad [4-4]$$

式[4-2]における関節トルクが式[4-4]の第1項の $\mathbf{T}_k$ として残り、式[4-2]における動作依存トルク $\mathbf{r}_p \times \mathbf{F}_p$ が、第2項である $\mathbf{r}_p \times m_l(\mathbf{a}_l - \mathbf{a}_{hs} - \mathbf{g})$ と、第3項である $\mathbf{r}_p \times m_l \mathbf{a}_{hs}$ に分解できた。これらの分解した動作依存トルクのうち、前者は腰部を含む蹴り脚の動作に依存して生じるトルク（以下、蹴り脚由来の動作依存トルク）、後者は支持脚の動作に依存して生じるトルク（以下、支持脚由来の動作依存トルク）とみることができる。

以上のような手順で、下腿部のセグメントに作用する正味のトルクを、蹴り脚膝関節の関節トルク、蹴り脚由来の動作依存トルク、支持脚由来の動作依存トルクに分解することで、支持脚による作用を抽出した。さらに、支持脚の動作に由来する動作依存トルクを Nunome and Ikegami (2005) が蹴り脚に対して行った分析法を支持脚に応用することで、式[4-5]のように加速度 $\mathbf{a}_{hs}$ の静止座標系における各成分に分解した。そして、それぞれの方向の加速度成分に由来するトルクを求めた。

$$\mathbf{r}_p \times m_l \mathbf{a}_{hs} = \mathbf{r}_p \times m_l \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{hsx} \\ \mathbf{a}_{hsy} \\ \mathbf{a}_{hsz} \end{bmatrix} \quad [4-5]$$

なお、ここまでに示したトルクも角速度と同様、X1 回り、すなわち蹴り脚の下腿と大腿で作られる平面内のトルクとして求めた。よって、正の値はフォワードスイング方向への作用を、負の値はバックスイング方向への作用をそれぞれ表す。

### 4.2.3 支持脚の貢献度

本研究では分解前の角力積に対する分解後の角力積の割合を貢献度とした。角力積は蹴り脚下腿部がフォワードスイングする局面を時間積分することで試技ごとに求めた。したがって、分解前のトルクを $M$ としたとき、分解後の当該のトルク $M_x$ の貢献度 $C_x$ は、フォワードスイングの開始時点を $t_1$ 、ボールインパクトの時

点を $t_2$ とすると以下の式[4-6]で算出できるものとした。

$$C_x = \frac{\int_{t_1}^{t_2} M_x(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} M(t) dt} \times 100 \quad [4-6]$$

#### 4.2.4 データ処理（平滑化と標準化）

平滑化は第3章に示した手順で行った。角速度については、ノイズの影響が小さく、平滑化を施さなくとも十分にその傾向が理解できるものとし、生データを使用した。トルクについては、4次のバターワース型のローパスフィルタを用いて遮断周波数25Hzで平滑化した。なお、ボールインパクトによるデータの歪みは、データに外挿を施す第3章に示した方法を用いて取り除いた。また、動作の局面分けと標準化は、第3章と同様に空中局面と支持局面を定義し、-50%から100%で行った。

#### 4.2.5 統計処理

本研究のそれぞれの角速度、トルクに関する時系列データ、貢献度は、平均値及び標準偏差で示した。静止座標系における各成分に分解した支持脚に由来するトルクの角力積を比較するため、各成分を要因とする対応のある因子の一元配置分散分析を行い、post-hocテストとしてボンフェローニ法を用いて多重比較した。なお、有意水準は5%未満とした。統計処理には、Matlab Statistics Toolbox (R2011a, MathWorks, Massachusetts, USA) を用いた。

## 4.3 結果

### 4.3.1 蹴り脚下腿部の角速度と蹴り脚下腿部に作用する正味のトルク

図4-2に、蹴り脚下腿部のセグメント角速度を示した。この角速度から支持脚接地直後のおよそ25%時点を境にバックスイングからフォワードスイングに切り替わることが示された。また、ボールインパクト時にこの角速度はピーク ( $2094 \pm 199 \text{ deg/s}$ ) を迎えた。図4-3には、蹴り脚下腿部に作用する正味のトルクを示した。このトルクはフォワードスイング方向へ下腿部が加速し始める支持脚接地直前からフォワードスイング方向に作用し、ボールインパクトまでそれが維持された。フォワードスイング中における正味のトルクによる角力積は  $4.0 \pm 0.8 \text{ Nms}$  であった。

### 4.3.2 関節トルク及び動作依存トルク

図 4-4 に、蹴り脚の膝関節から下腿部に作用するトルクである膝関節関節トルク及び動作依存トルクを示した。関節トルクは、始めフォワードスイング方向に作用したが、その後、ボールインパクト直前の局面においてバックスイング方向に作用した。一方、動作依存トルクは支持局面の中盤を境にバックスイング方向への作用から、フォワードスイング方向への作用に変化した。フォワードスイング中における関節トルクと動作依存トルクの角力積はそれぞれ  $1.9 \pm 1.4 \text{ Nms}$  と  $2.1 \pm 1.0 \text{ Nms}$  であった。

### 4.3.3 蹴り脚由来の動作依存トルクと支持脚由来の動作依存トルク

図 4-5 に、蹴り脚由来の動作依存トルクと支持脚由来の動作依存トルクを示した。蹴り脚由来の動作依存トルクはその値を増減させながらボールインパクトに向けてフォワードスイング方向への作用を増大させた。支持脚由来の動作依存トルクも同様に増減を繰り返し、支持局面の前半と後半にそれぞれフォワードス

## 蹴り脚下腿部のセグメント角速度

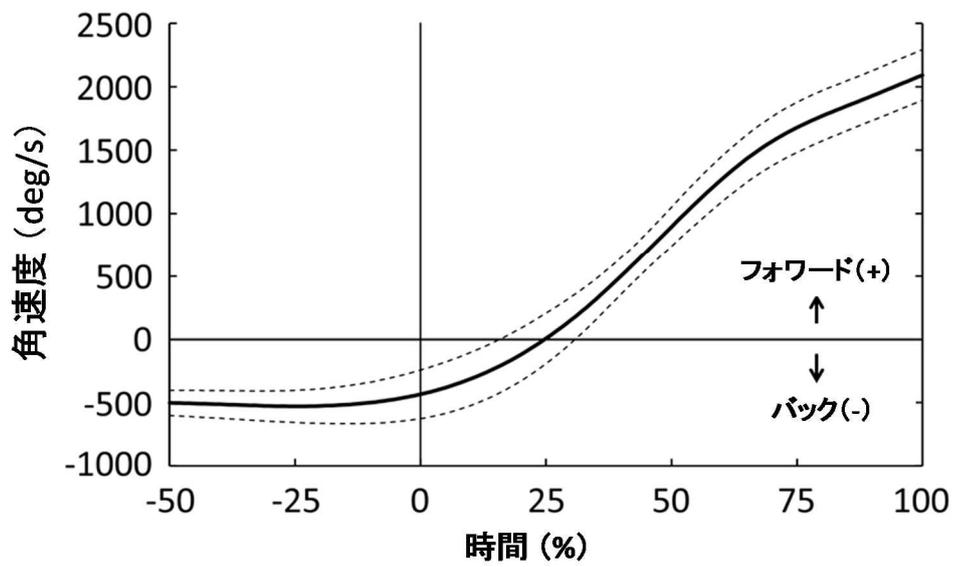


図 4-2 蹴り脚下腿部のセグメント角速度

支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
実線は平均値を，破線は標準偏差を示す

### 蹴り脚下腿部に作用する正味のトルク

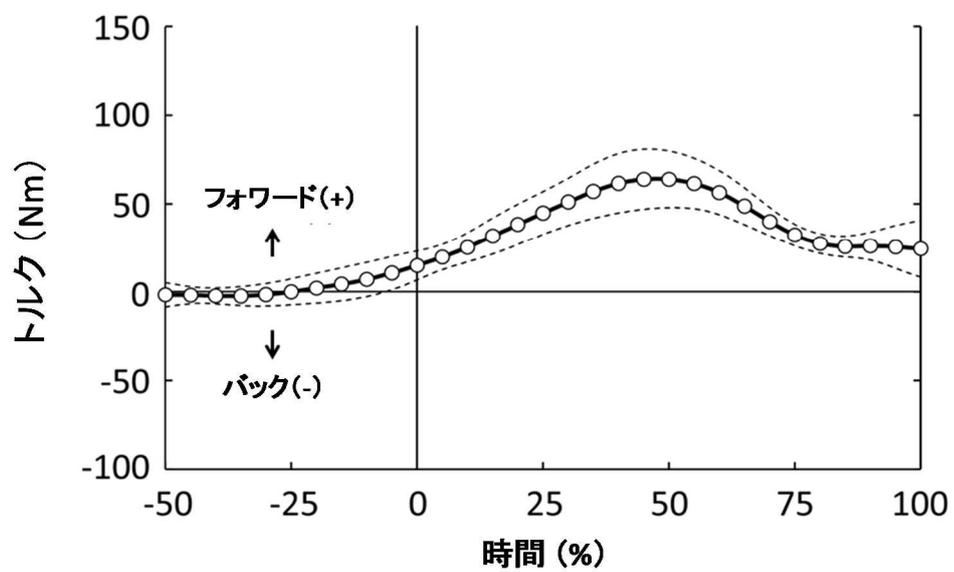
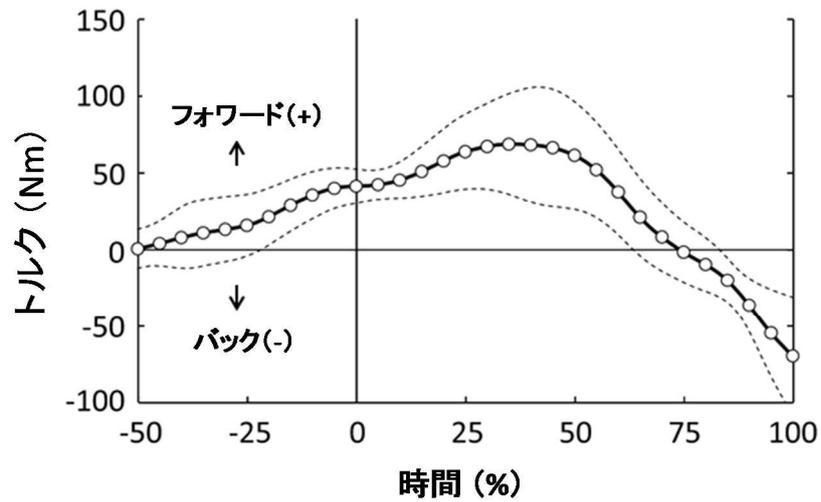


図 4-3 蹴り脚下腿部に作用する正味のトルク

支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
実線は平均値を，破線は標準偏差を示す

## 関節トルク



## 動作依存トルク

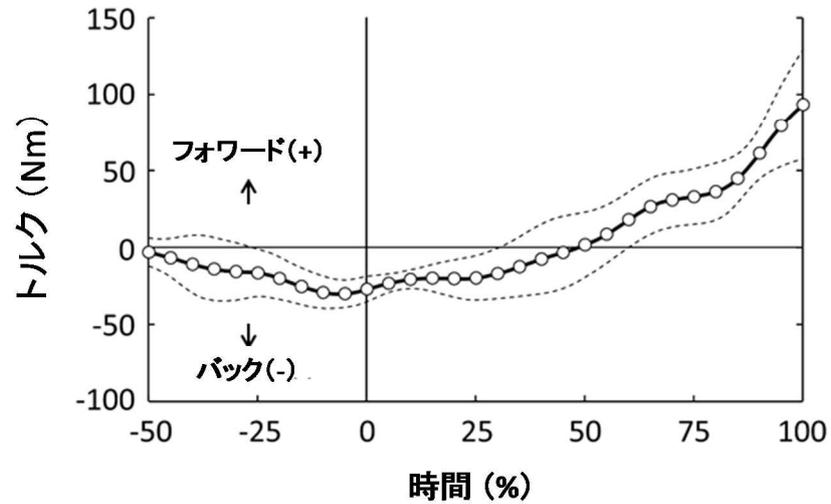
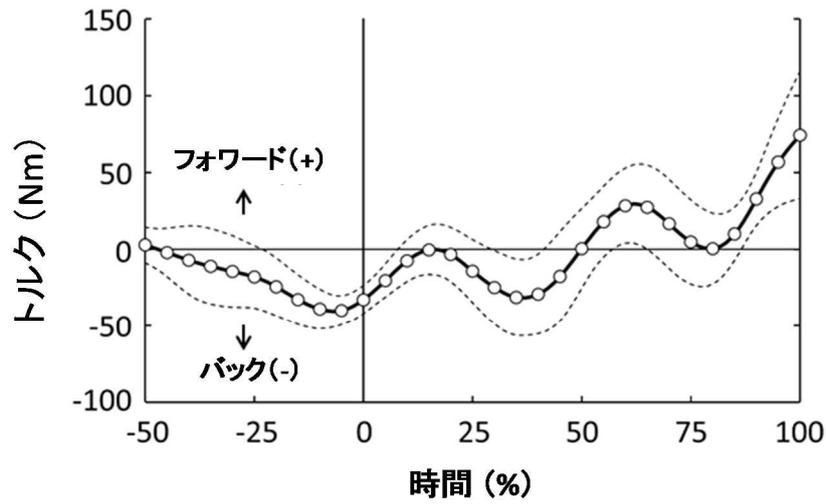


図 4-4 蹴り脚下腿部に作用する関節トルクと動作依存トルク  
支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
実線は平均値を，破線は標準偏差を示す

### 蹴り脚由来の動作依存トルク



### 支持脚由来の動作依存トルク

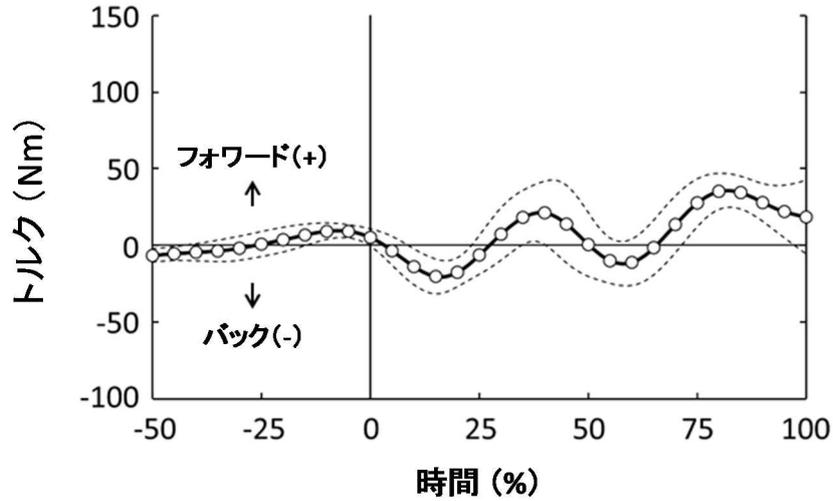


図 4-5 蹴り脚由来の動作依存トルクと支持脚由来の動作依存トルク  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 実線は平均値を，破線は標準偏差を示す

ング方向への作用が顕著になった。フォワードスイング中のそれぞれのトルクの角力積は、蹴り脚由来の動作依存トルクで  $0.9\pm 1.3\text{Nms}$ 、支持脚由来の動作依存トルクで  $1.2\pm 0.5\text{Nms}$  であった。

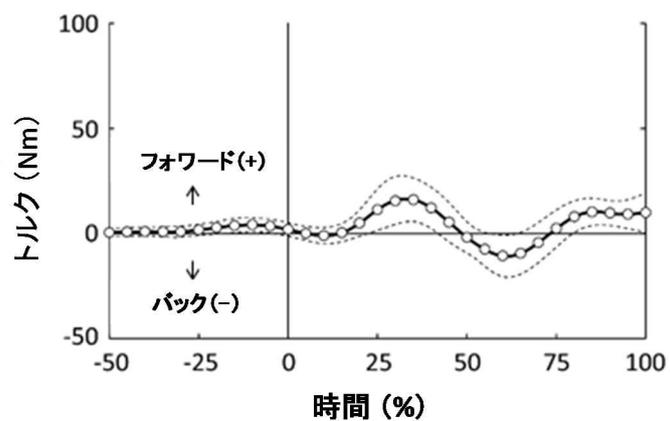
#### 4.3.4 支持脚由来の動作依存トルクの各成分

図 4-6 には、静止座標系における加速度  $\mathbf{a}_{hs}$  の方向をもとに X, Y, Z 軸方向の各成分に分解した支持脚由来の動作依存トルクを示した。Z 成分は支持局面ではほぼ一貫してフォワードスイング方向に作用したが、X 成分は支持局面の中盤で、Y 成分は支持局面の前半でそれぞれバックスイング方向に作用した。フォワードスイング中の各成分のトルクの角力積は X 成分  $0.4\pm 0.2\text{Nms}$ , Y 成分  $-0.3\pm 0.3\text{Nms}$ , Z 成分  $1.1\pm 0.2\text{Nms}$  であり、全ての成分間で有意差が認められた ( $p<0.05$ )。

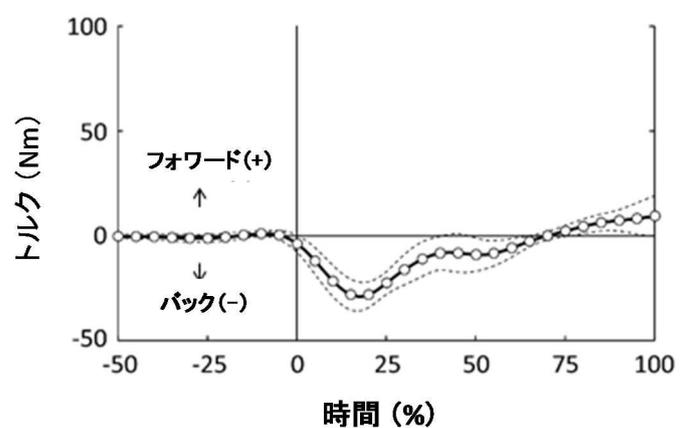
#### 4.3.5 各トルクによる角力積と貢献度

各トルクによる角力積から求めた貢献度を図 4-7 に示した。下腿部に作用する正味のトルクに対する動作依存トルクの貢献度は  $55.4\pm 29.2\%$  であった。さらに、動作依存トルク全体に対する支持脚由来の動作依存トルクの貢献度は  $72.8\pm 47.5\%$  であった。

### X成分



### Y成分



### Z成分

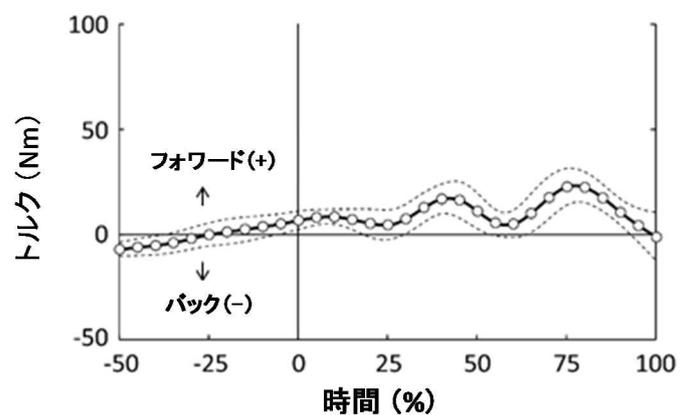


図 4-6 静止座標系における X 軸, Y 軸, Z 軸方向の各成分に分解した支持脚由来の動作依存トルク  
支持脚接地を 0%, ボールインパクトを 100%とし, 時間を標準化した  
実線は平均値を, 破線は標準偏差を示す

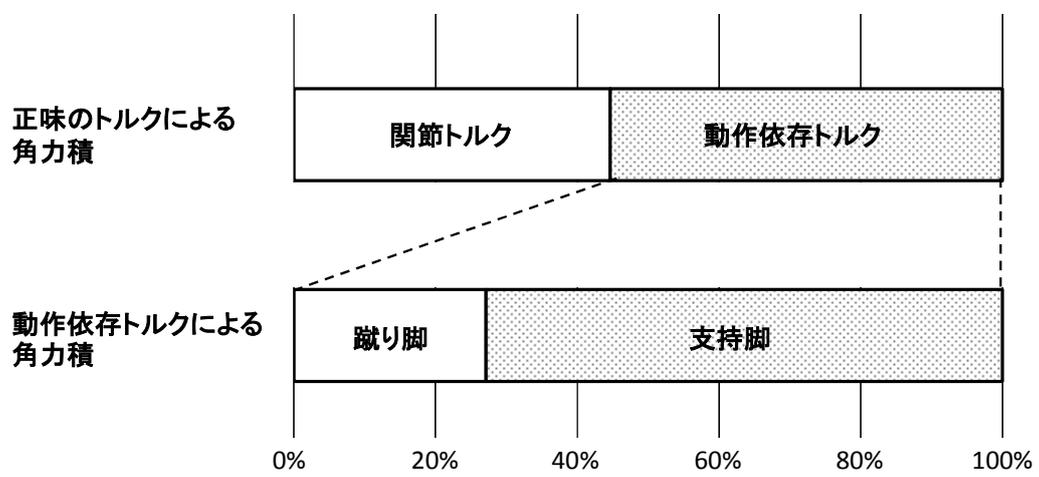


図 4-7 分解したトルクによる角力積から算出した貢献度  
 分解前の角力積に対する分解後の角力積の平均値の割合を表す

## 4.4 考察

### 4.4.1 蹴り脚のスイングの加速に作用するトルク

先行研究 (Putnam,1991; Dörge et al., 2002) によって動作依存トルクは、蹴り脚のフォワードスイングを加速する重要な要素であると報告されている。さらに Nunome et al. (2006a) によって、動作依存トルクはとりわけボールインパクト直前の局面において関節トルクよりもフォワードスイングの加速に対して優位になることが示されている。本研究においても先行研究と同様の結果が得られ、図 4-4 にみられるように支持局面の後半において関節トルクはバックスイング方向に作用し、その反対に動作依存トルクはフォワードスイング方向に作用した。このことから、ボールインパクト直前の局面においては蹴り脚膝関節の腱を含む伸展筋群による張力ではなく、支持脚の動作による作用を含む関節間力によって蹴り脚の下腿部のフォワードスイングが加速されることが確認できた。

### 4.4.2 蹴り脚のスイングの加速に貢献する支持脚の動作

本研究では、第 3 章で示唆された支持脚の役割のひとつである蹴り脚の下腿部のスイング速度の加速への貢献について定量的に明らかにするため、Putnam (1991) の手法を発展させ、蹴り脚の下腿部に作用する動作依存トルクから支持脚由来のトルクを抽出した。図 4-5 に示されるように、値の増減はあるものの支持脚由来のトルクと蹴り脚由来のトルクはともに、支持局面の特に後半においてフォワードスイングを加速させる方向に作用していた。このことから、蹴り脚に加えて支持脚も動作依存トルクの発生に寄与していることが定量的に明らかとなった。

さらに、実際に支持脚の動作がどの程度この動作依存トルクの発生に貢献しているのかについて精査するため、本研究ではフォワードスイング中の角力積から貢献度を算出した。動作依存トルク全体に対する支持脚由来の動作依存トルクの

貢献度は平均でおよそ 70%であり、蹴り脚よりもむしろ大きいことが明らかとなった。また、この支持脚由来の動作依存トルクは式[4-4]の第 3 項  $\mathbf{r}_p \times m_1 \mathbf{a}_{hs}$  で表される。この項を構成する  $\mathbf{r}_p$  は蹴り脚下腿部の質量中心から蹴り脚膝関節中心までのベクトルであるため、その大きさは一定であると仮定できる。また、 $m_1$  は下腿部の質量であるため定数である。よって、この支持脚の動作によるトルクの発生には支持脚の股関節中心の加速度  $\mathbf{a}_{hs}$  の大きさが強く影響すると考えられる。本研究では、この加速度をもとに静止座標系における 3 成分にトルクを分配し、フォワードスイング中の角力積を算出した。ボールインパクト直前の局面におけるフォワードスイング方向への動作依存トルクの発生には、鉛直上向き (Z 軸方向) 成分の貢献が比較的大きいことがみてとれた (図 4-6)。さらに、これらの 3 成分の角力積の間には有意差がみられ、Z 成分が最も高い値を示した。すなわち支持脚側の股関節を鉛直上方向に加速する動作の貢献が高かったことが示された。第 3 章の研究によって、ボールインパクト直前では、支持脚膝関節における伸展トルクの発揮によって伸展動作が生じることが明らかとなっている。この結果と合わせて検討すると、本章における分析により、ボールインパクト直前の局面におけるこの伸展動作が、支持脚側の股関節の上方への加速度を生み、蹴り脚下腿部に作用する動作依存トルクを生み出し、フォワードスイングが加速されるという一連の力学的な動作の仕組みが解明されたと言える。そして、これまでに Nunome and Ikegami (2005) の報告によって示されていた動作依存トルクの発生に貢献する蹴り脚側の股関節の上方への加速は、支持脚の動作によるところが大きいと考えられた。つまり、支持脚の膝関節伸展動作によって蹴り脚と支持脚の双方の股関節を含んだ身体全体を上方へ加速させる動きが蹴り脚の高いスイング速度を獲得するために重要になると考えられた。

第 3 章の研究によって、ボールインパクト直前の支持脚膝関節の伸展動作の前には、支持脚の接地から屈曲動作が起こることが示されている。また、この間、

支持脚膝関節は伸展トルクを発揮し続けていた。したがって、膝関節周りの腱を含む伸筋群が伸張しながら張力を発揮した後に、伸展動作が生じたと考えることができる。つまり、支持脚が接地した際に、支持脚膝関節が屈曲することで膝関節の伸展に作用する筋腱複合体に弾性エネルギーが蓄えられる。ボールインパクト直前の支持脚膝関節の伸展動作は、このエネルギーを利用して生じる可能性が考えられた。

## 4.5 結言

本章では、蹴り脚の下腿部に作用するトルクから支持脚の動作に由来するトルクを抽出し、蹴り脚のスイング速度の増大に対する支持脚の貢献について定量的に明らかにした。

その結果、以下のことが示された。

1. ボールインパクト直前の局面において、蹴り脚下腿の加速は動作依存トルクによって生じ、その動作依存トルクによる角力積のおよそ 70%は支持脚の動作によって生み出される。
2. 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、支持脚の股関節に上方への加速度を生じさせることで、蹴り脚の下腿部に動作依存トルクを作用させていることが考えられた。

以上のことから、蹴り脚の動作だけでなく、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。

## 第5章 異なる方向へのインステップキック動作における腰部・支持脚の運動力学的分析

### 5.1 緒言

#### 5.1.1 研究背景

これまで述べてきたように、インステップキック動作に関しては数多くの研究が試されてきた (Dörge et al., 2002; Lees et al., 2009; Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2002, 2006a). しかしながら、これらの先行研究では、任意の助走から特定の1方向にボールを蹴るインステップキック技術に対象を限定して分析が行われている.

一方、試合中の競技者は変化する状況に応じて様々な方向にボールを蹴る技術が求められるため、実践で必要となるインステップキック技術は先行研究で扱われているような画一的なものではないと考えられる. よって、より実践的な知見を得るためには、様々な方向にボールを蹴り出すためのインステップキック動作について明らかにすることが必要である.

助走の方向とボールを蹴り出す方向の角度を相対的にみれば、静止しているボールを蹴るプレースキックの場合、特定の一方向から助走し、異なる方向へ蹴ることと、異なる助走角度から同一方向へ蹴ることは、動作としては同等である. ボールを蹴り出す方向を直接変え、それぞれのキック動作を検討した先行研究は著者の知る限りではこれまでに報告されていないが、異なる助走角度から同一方向にボールをキックする動作について検討した研究はいくつかみられる. Isokawa and Lees (1988) は、2次元的な分析ながらボールをキックした際のボール速度と足部速度との関係を示し、ボール速度と足部速度はそれぞれ、助走角度45度と30度で最大となることを報告した. Kellis et al. (2004) や Scurr and Hall (2009) は同様のキック動作について3次元的な分析を試み、助走角度が大

きいほどキック動作中の支持脚膝関節外旋や、腰部回旋、蹴り脚大腿部外転の角度が大きくなることを明らかにした。

このように、異なる助走角度から同一方向へボールをキックする動作を分析した幾つかの先行研究によって、ボール速度と足部速度の関係や、姿勢の変化などが報告されてきた。しかしながら、異なる方向へボールを蹴る場合の支持脚の各関節の動作については未だ断片的に明らかにされるに留まっており、さらに支持脚各関節における力発揮の様相や腰部の回旋に違いが生じる力学的な背景については未だ解明されていない。

### **5.1.2 目的**

本研究の目的は、各種方向へボールを蹴り出すインステップキックにおける支持脚と腰部の動きを分析し、異なる方向へのキック動作を成立させる力学的要因を明らかにすることとした。

## 5.2 方法

### 5.2.1 被験者

被験者は、大学の地域リーグ1部に所属し、日常的にサッカーを行っている男子大学生サッカー競技者9名(年齢 $20.1 \pm 0.8$ 歳;身長 $176.7 \pm 4.8$ cm;体重 $66.8 \pm 6.9$ kg)であった。また、これらの被験者の競技経験年数は平均 $12.7 \pm 2.1$ 年、少なくとも9年であった。なお、被験者が好んでキック動作に用いる脚は8名が右脚、1名が左脚であった。本研究は名古屋大学総合保健体育科学センターにおけるヒトを対象とする研究審査委員会の承認を受けるとともに、被験者からは実験の内容を十分に説明した上で、参加の同意を書面にて得た。

### 5.2.2 実験手続き

実験は屋内実験室で実施した。ボールはFIFA公認の5号球を使用し、その内圧は実験を通して900hPaに保った。第3章の研究と同様に、被験者はサイズのみが異なる同型のトレーニング用シューズ (Del Mundo Wide TT; PUMA, Herzogenaurach, Germany) , ショートソックス, スパッツ, コンプレッションシャツ, スイミングキャップを着用した。身体及びボールに対する反射マーカの貼付位置は、第3章と同様であった。

被験者は十分なウォーミングアップを実験前に実施した。そして、第3章と同様の方法によって支持脚各関節の関節中心を算出するためのスタンディングキャリブレーションを行った。その後、指定された助走から、床面に垂直に立てた3m前方の標的(高さ0.8m, 幅0.8m)に向かってボールをインステップキックする試技を行った。キック動作に用いる脚は、日ごろ好んで用いる脚とした。本研究でも先行研究(Isokawa and Lees, 1988; Kellis et al., 2004; Scurr and Hall, 2009)のように、異なる助走角度から同一方向にボールを蹴り出す条件を設け、助走方向に対するキック方向に相対的な変化をつけるための試技を設定した。第2章の

図 2-1 で示したように、助走方向とキック方向の成す角度を助走角度とし、この助走角度が 15 度、45 度、75 度（以下、D15、D45、D75 とそれぞれ示す）となる 3 つの条件を設けた（図 5-1）。被験者はフロアに引いた助走角度のラインを目印とし、試技を行った。被験者には、「指定された助走角度のライン上を 3 歩助走すること」、「2 歩目のステップ（蹴り脚）において助走角度のラインを踏むこと」、「可能な限り速いボールを蹴ること」、「助走角度に関係なくインステップキックをすること」を指示した。上述の指示を満たし、蹴られたボールが標的の中心付近に的中し、支持脚の足底全体がフォースプレートの計測可能範囲内に接地していたものを成功試技とした。数回の練習試技の後、被験者は各条件 3 回の試技を行った。成功試技が得られなかった場合は、成功試技 2 試技が得られるまで繰り返し行った。各条件における試技の順序はランダムに行い、試技の間には適宜休息をとり、疲労の影響が出ないように配慮した。

インステップキック動作は、完全同期したモーションキャプチャ（Vicon T20; Vicon Motion Systems, Oxford, UK）と、フォースプレート（Type 9287C; Kistler Instruments, Winterthur, Switzerland）を用いて 500Hz で計測した。空間及びフォースプレートの座標系となる静止座標系は床上に原点を置いた右手系直交座標系とし、Z 軸を鉛直上方向、Y 軸をボールキック方向、X 軸を Y 軸と Z 軸に直交する方向として定義した。なお、本研究では好んでキック動作に用いる脚が左脚の被験者が 1 名いたが、キャプチャした座標を鏡映し、原点を平行移動することで、右脚で蹴ったものと同等に変換した。よって、以降に示す変数は全て右脚でボールを蹴った試技のものとみなすことができる。

### 5.2.3 助走角度の実測値

実際の試技における助走方向とボールの蹴り出し方向の成す角度から助走角度の実測値を求めた。まず、支持脚接地直前 10 コマの身体重心の X、Y、Z 座標の

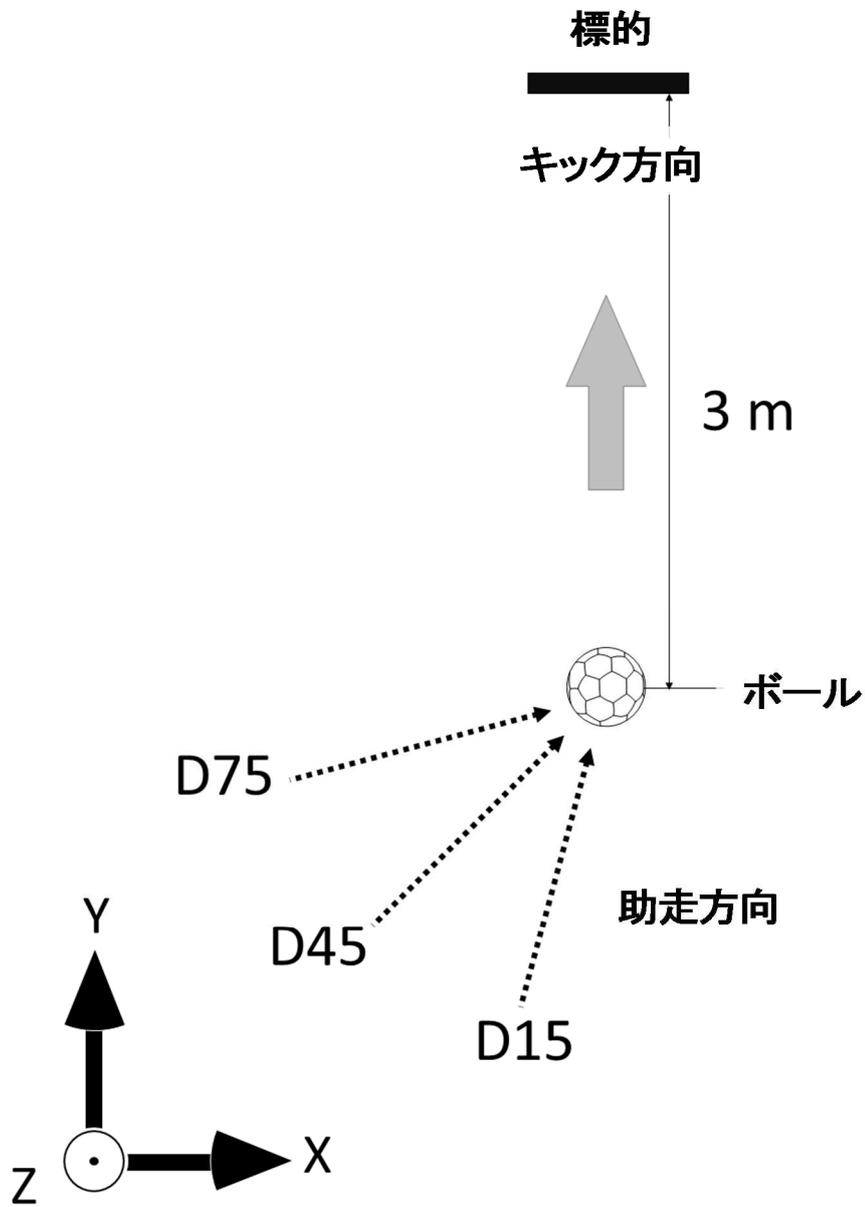


図5-1 助走方向とキック方向  
 D15, D45, D75の3つの条件を設定した  
 右脚でボールを蹴る場合を上方からの視点で示した

時間変化からそれぞれの一次回帰直線の傾きを算出し、身体重心の速度ベクトルを算出した。そして、この速度ベクトルを水平面（XY 平面）に投影したベクトルとキック方向である Y 軸の成す角度を助走角度の実測値とした。なお、身体重心位置の算出には阿江ら（1992）によって報告されている身体重心係数を用いた。

#### 5.2.4 足部速度とボール速度

蹴り脚の足部速度は、蹴り脚足部の重心の X, Y, Z 軸方向の合成速度として求めた。ボールと蹴り脚足部が接触する 1 コマ前までの 10 コマの位置データを用い、X, Y, Z 座標それぞれにおいて時間との一次回帰直線を求め、その傾きから 3 成分の速度を算出した。ボール速度は、最小二乗法によって求めたボールの幾何学中心の位置の時間変化から第 3 章と同様の方法で算出した。

#### 5.2.5 キック時間

キックに要した時間の目安として支持脚接地からボールインパクトまでの時間、すなわち第 3 章と同様に定義した支持局面の時間をキック時間として求めた。

#### 5.2.6 関節角速度ベクトル及び関節トルクベクトル

身体に貼付した反射マーカの位置座標及び支持脚に作用する地面反力のデータから支持脚各関節の関節角速度ベクトル及び関節トルクベクトルをそれぞれ算出した。これらは、各セグメントに移動座標系を定義し、数値微分や逆動力学的な演算を行う第 3 章と同様の手順によって求めた。

#### 5.2.7 関節における屈曲/伸展角速度及びトルク

前項の関節角速度ベクトルと関節トルクベクトルから支持脚各関節の屈曲/伸展または背屈/底屈の関節角速度及び関節トルクを算出した。これらは、第 3 章の

図 3-3 のように定義した屈曲/伸展または背屈/底屈の回転軸となるベクトル ( $X_a$ ,  $X_k$ ,  $Y_h$ ) に平行な成分を求めることで算出した。

### 5.2.8 水平面内における回旋角速度及び回旋トルク

水平面内における腰部のセグメントの回旋とそれを構成する支持脚の各セグメントの動きを以降に示す手続きにより定量化した。まず、第 3 章にならって、腰部を含む支持脚の各セグメントの角速度ベクトルを算出した。そして、腰部のセグメント角速度ベクトルの静止座標系の鉛直軸 ( $Z$  軸) に平行な成分を求めることで水平面内における腰部のセグメント角速度を算出した。次に、この腰部の回旋を構成する動作として、支持脚各関節と支持脚足部セグメントの回旋角速度を求めた。それぞれの関節における角速度は、足部に対する下腿部の相対角速度ベクトル、下腿部に対する大腿部の相対角速度ベクトル、大腿部に対する腰部の相対角速度ベクトルとし、それぞれ近位のセグメント角速度から遠位のセグメント角速度を減ずることにより算出した。これらの相対角速度ベクトルは、先述の関節角速度ベクトルの逆向きのベクトルに相当する。そして、これらの相対角速度ベクトルの静止座標系の鉛直軸 ( $Z$  軸) に平行な成分を求め、各関節における遠位のセグメントに対する近位のセグメントの水平面内における回旋角速度を算出した。同様に、水平面内における足部の回旋角速度は、足部のセグメント角速度ベクトルの静止座標系の鉛直軸 ( $Z$  軸) に平行な成分を求めることで算出した。

これらの回旋角速度に対応する水平面内における回旋トルクについても定量化した。床面から足部に作用する鉛直軸 ( $Z$  軸) 回りのトルク、すなわちフリーモーメントをフォースプレートにより計測した。また、支持脚各関節における回旋トルクは、角速度と同様、下腿部の遠位端に作用する足関節トルクベクトル、大腿部の遠位端に作用する膝関節トルクベクトル、支持脚側の腰部に作用する股関節トルクベクトルそれぞれにおいて、静止座標系の鉛直軸 ( $Z$  軸) に平行な成分

を求めることで算出した。

ここで算出した角速度，トルクの両変数は静止座標系の鉛直軸（Z 軸）に平行な成分として求めているため，上方からの視点で水平面（XY 平面）をみた場合，反時計回りが正となる。

### 5.2.9 データ処理（平滑化と標準化）

第3章と同様，角速度については，ノイズの影響が小さく，平滑化を施さなくとも十分にその傾向が理解できるものとし，生データを使用し，トルクについては，4次のバターワース型のローパスフィルタによって遮断周波数25Hzで平滑化した。また，動作の局面分けと標準化は，第3章と同様に空中局面と支持局面を定義し，-50%から100%で行った。

### 5.2.10 角度変化量及び回旋量と角力積

特定の局面において前項までに求めた角速度データを時間積分することにより，この局面における角度変化量または回旋量を算出した。また，対応する局面のトルクを時間積分することにより角力積を算出した。

### 5.2.11 水平面内におけるボールインパクト時点の腰部の向き

第3章の図3-2のように定義した腰部の移動座標系（Rp）の向きから，ボールインパクト時点の静止座標系に対する腰部の角度を算出した。この角度は水平面内における角度に変換し，腰部がキック方向に正対している場合が0度，蹴り脚側の腰部が支持脚側の腰部より前方（キック方向側）にある場合が正の角度となるように定義した。また，この角度は前項に示した腰部のセグメント角速度に対する積分時の積分定数としても用いた。

### 5.2.12 支持脚接地時点の支持脚足部の傾き

支持脚の接地時点における足部の姿勢を表す変数として、床面に対する支持脚の足部セグメントの傾きを求めた。この傾きは、支持脚の踵骨後面からつま先に向かうベクトルとそれを水平面に投影したベクトルの成す角度として算出した。足部セグメントが床面と平行になっている場合を 0 度とし、つま先が踵より高い位置にあるときの角度が正となるように定義した。

### 5.2.13 統計処理

本研究における各変数は条件ごとに被験者 9 名の平均値及び標準偏差で表した。また、ボールを蹴り出す方向が変化したことでキック動作が変容したかを検討するため、各条件を要因とする対応のある因子の一元配置分散分析を行い、post-hoc テストとしてボンフェローニ法を用いて D15, D45, D75 の 3 条件の全ての組み合わせに対する多重比較を行った。時系列データに対しては、同様の検定を標準化時間 1% 毎に行った。なお、有意水準は 5% 未満とした。統計処理には、Matlab Statistics Toolbox (R2011a, MathWorks, Massachusetts, USA) を用いた。

## 5.3 結果

### 5.3.1 助走角度の実測値

3条件における助走角度の実測値は、それぞれ D15:  $8.5 \pm 1.3 \text{deg}$ , D45:  $39.5 \pm 2.6 \text{deg}$ , D75:  $73.3 \pm 2.6 \text{deg}$  であり、すべての条件間で有意差が認められた ( $p < 0.05$ ) .

### 5.3.2 足部速度とボール速度

3条件における蹴り脚の足部速度は、D15:  $18.0 \pm 1.1 \text{m/s}$ , D45:  $18.7 \pm 0.8 \text{m/s}$ , D75:  $18.5 \pm 1.0 \text{m/s}$  であり、D15 がその他の2条件と比較して有意に低い値であった ( $p < 0.05$ ) . また、ボール速度は、D15:  $25.8 \pm 1.7 \text{m/s}$ , D45:  $26.1 \pm 1.2 \text{m/s}$ , D75:  $23.9 \pm 1.5 \text{m/s}$  であり、D75 がその他の2条件と比較して有意に低い値であった ( $p < 0.05$ ) .

### 5.3.3 キック時間

支持局面の時間として定義したキック時間は、D15:  $0.120 \pm 0.007 \text{s}$ , D45:  $0.129 \pm 0.008 \text{s}$ , D75:  $0.135 \pm 0.008 \text{s}$  であった. この時間はD15, D45, D75の順に長くなり、全ての条件間で有意差が認められた ( $p < 0.05$ ) .

### 5.3.4 支持脚各関節における屈曲/伸展（背屈/底屈）軸回りの運動

図5-2には各条件における支持脚足関節の背屈/底屈の角速度とトルクを示した. いずれの条件においても角速度、トルクともに支持脚接地前には際立った変化はみられなかった. 支持脚接地を契機に足関節は底屈し、その後、背屈した. 支持脚接地直後からおよそ10%時点まで、全ての条件間で有意差がみられた (図5-2) ( $p < 0.05$ ) . この間に生じる底屈角速度のピーク値は絶対値でD15, D45, D75の順に小さく、接地直後の底屈角度変化量 (0%時点から50%時点までの底屈角速度の積分値) は D15:  $-11.3 \pm 3.8 \text{deg}$ , D45:  $-6.8 \pm 4.2 \text{deg}$ , D75:  $-2.6 \pm 2.5 \text{deg}$

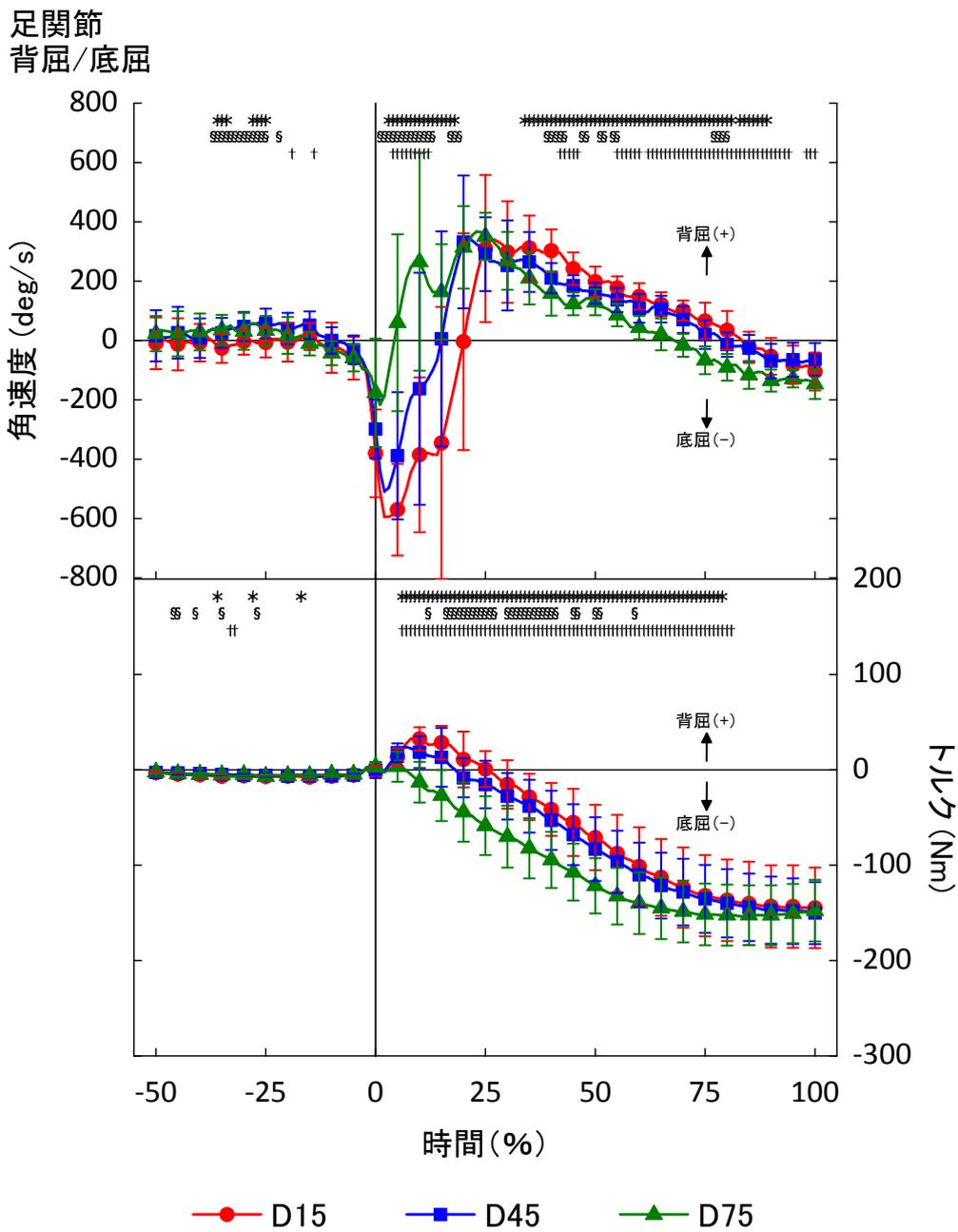


図 5-2 支持脚足関節背屈/底屈の関節角速度及び関節トルク  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した  
 \*: D15 vs D75 ( $p < 0.05$ ) §: D15 vs D45 ( $p < 0.05$ ) †: D45 vs D75  
 ( $p < 0.05$ )

となり全ての条件間に有意差がみられた ( $p<0.05$ ). 一方, この局面において D15, D45 では一旦, 背屈トルクが発揮された後に, 底屈トルクが発揮されたのに対して, D75 は支持脚の接地直後から底屈トルクが発揮され, およそ 5%時点から 80%時点まで D75 とその他の 2 条件間には有意差がみられた ( $p<0.05$ ) (図 5-2). また, 支持脚接地時点における支持脚足部の傾きは D15 :  $24.2\pm 4.6\text{deg}$ , D45 :  $20.1\pm 3.9\text{deg}$ , D75 :  $11.0\pm 6.2\text{deg}$  と助走角度が大きいほど有意に小さかった ( $p<0.05$ ).

図 5-3 には各条件における支持脚膝関節の屈曲/伸展の角速度とトルクをそれぞれ示した. いずれの条件においても支持脚接地から屈曲角速度が増大し支持局面のおよそ 30%時点でピークを迎えた. その後, 支持局面の 70%時点以降から, 膝関節は伸展した. 支持脚接地後の屈曲角度変化量 (D15 :  $-23.0\pm 6.8\text{deg}$ , D45 :  $-22.8\pm 5.5\text{deg}$ , D75 :  $-21.5\pm 4.1\text{deg}$ ) には各条件間で有意差はなく, ボールインパクト直前の伸展の角度変化量 (D15 :  $4.8\pm 3.3\text{deg}$ , D45 :  $4.3\pm 1.9\text{deg}$ , D75 :  $6.3\pm 2.0\text{deg}$ ) には D45 と D75 の間に有意差がみられた ( $p<0.05$ ). 関節トルクは, いずれの条件においても屈曲方向に作用しながら支持脚の接地を迎え, その直後に伸展に転じ, ボールインパクトまで伸展トルクが発揮された. また, この伸展トルクによる角力積 (D15 :  $17.8\pm 4.4\text{Nms}$ , D45 :  $19.3\pm 4.2\text{Nms}$ , D75 :  $18.0\pm 4.2\text{Nms}$ ) には, 条件間での有意差は認められなかった.

図5-4には各条件における股関節屈曲/伸展の角速度とトルクをそれぞれ示した. いずれの条件においても支持脚接地から一時的に伸展角速度が小さくなるものの, 股関節はキック動作中おおよそ一貫して伸展していた. また, およそ60%時点以降からボールインパクトまでの伸展角速度には, 全ての条件間で有意差がみられた ( $p<0.05$ ) (図5-4). 支持局面の屈曲/伸展の角度変化量は, D15 :  $-39.1\pm 5.3\text{deg}$ , D45 :  $-34.5\pm 5.0\text{deg}$ , D75 :  $-28.7\pm 5.3\text{deg}$ となり, 全ての条件間に有意差がみられた ( $p<0.05$ ). 関節トルクは, いずれの条件においても一貫して伸展トルクの発揮

膝関節  
伸展/屈曲

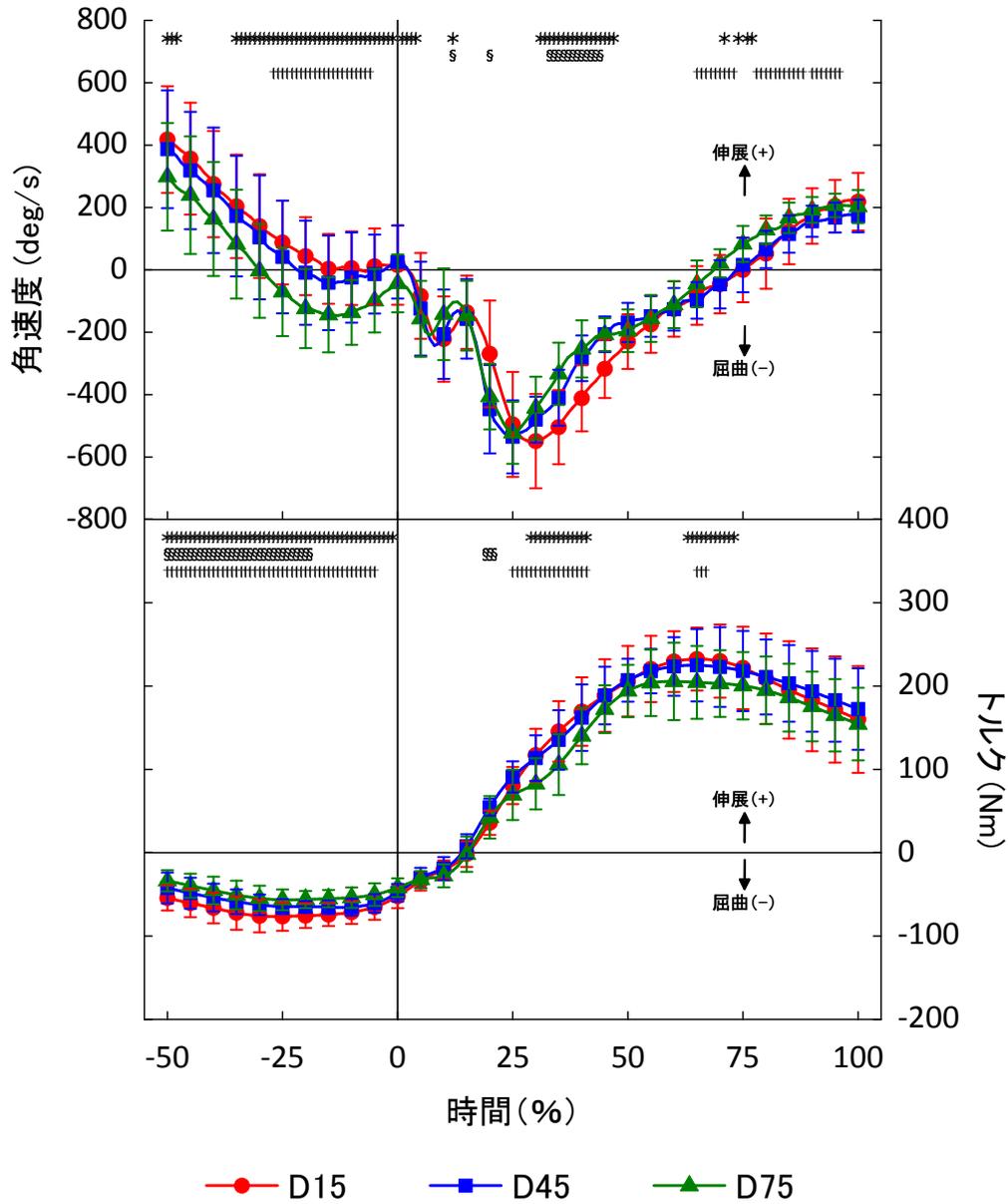


図 5-3 支持脚膝関節屈曲/伸展の関節角速度及び関節トルク  
 支持脚接地を 0%, ボールインパクトを 100%とし, 時間を標準化した  
 値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し, 標準偏差を示した  
 \*: D15 vs D75 ( $p < 0.05$ )   §: D15 vs D45 ( $p < 0.05$ )   †: D45 vs D75  
 ( $p < 0.05$ )

股関節  
屈曲/伸展

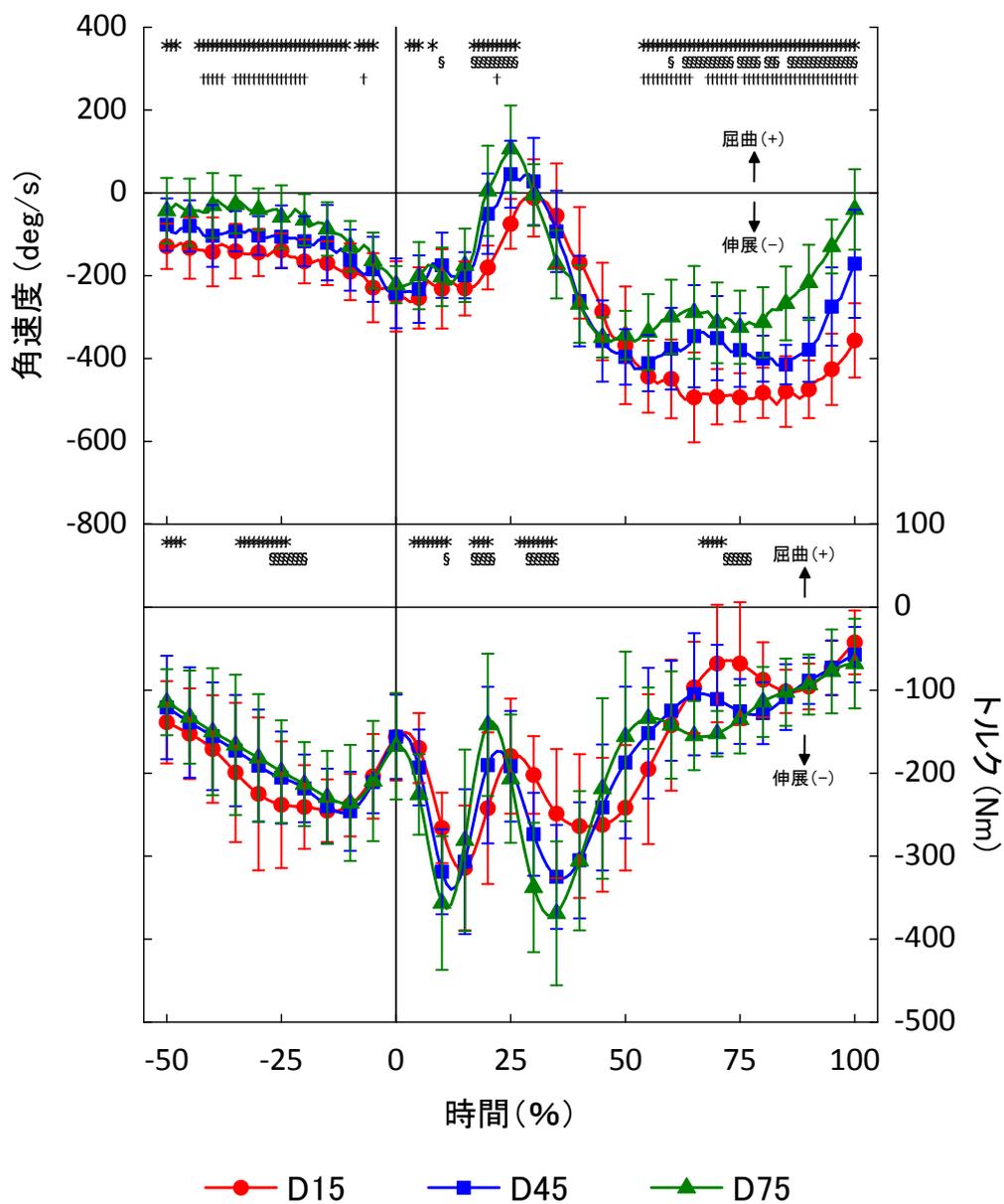


図 5-4 支持脚股関節屈曲/伸展の関節角速度及び関節トルク  
 支持脚接地を 0%, ボールインパクトを 100%とし, 時間を標準化した  
 値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し, 標準偏差を示した  
 \*: D15 vs D75 ( $p < 0.05$ ) §: D15 vs D45 ( $p < 0.05$ ) †: D45 vs D75  
 ( $p < 0.05$ )

を示した。支持局面の角力積はD15：-20.8±3.7Nms，D45：-23.8±3.8Nms，D75：-26.1±5.0Nmsとなり，全ての条件間に有意差が認められた ( $p<0.05$ )。

### 5.3.5 支持脚における水平面内（鉛直軸回り）の回旋

腰部の水平回旋，及びそれらを構成する支持脚の動作に関わる角速度及びトルクを図 5-5 から図 5-9 にそれぞれ示した。なお，これらの図における角速度とトルクのスケールは，それぞれ同等になるように統一して示した。また，これらの角速度とトルクをそれぞれ積分することで算出した回旋量と角力積を表 5-1 にまとめた。

水平面内における腰部の回旋角速度から，支持局面における上方からの視点で反時計回りの回旋が顕著であることがみてとれた (図 5-5)。D15 と D75 にはおよそ10%時点から，D15 と D45，D45 と D75 には 0%時点以降から有意差がみられ，支持局面の大部分で全ての条件間に有意差がみられた ( $p<0.05$ ) (図 5-5)。また，支持局面中の回旋量は，全ての条件間で有意差が認められた ( $p<0.05$ ) (表 5-1)。さらに，支持局面中の回旋角速度のピーク値は D15：325.6±66.6deg/s，D45：426.6±80.6deg/s，D75：519.2±88.2deg/s であり，全ての条件間で有意差が認められた ( $p<0.05$ )。水平面におけるボールインパクト時点の腰部の向きは，D15：0.1±4.4 deg，D45：-8.8±5.3deg，D75：-18.9±5.0deg であった。

床面に対する支持脚足部の回旋角速度と，床面から足部に作用するトルクであるフリーモーメントを図 5-6 に示した。足部はいずれの条件においても支持脚接地から支持局面の前半にかけて上方からの視点で反時計回りの回旋角速度を持っていた。D75 の角速度は顕著な二峰性になっており，2 つ目のピークがみられる 20%時点から 25%時点において，D75 とその他の 2 条件間に有意差がみられた ( $p<0.05$ ) (図 5-6)。また，支持局面の後半においてこの角速度は収束した。支持局面中の支持脚足部の回旋量には，全ての条件間で有意差が認められた

表 5-1 水平面内における支持局面中の回旋量と角力積

	回旋量 (deg)			角力積 (Nms)		
	D15	D45	D75	D15	D45	D75
腰部	20.3 (5.0) *§	32.1 (7.9) †	39.7 (4.7)			
足部	-2.4 (3.5) *§	5.7 (8.3) †	12.7 (7.4)	0.2 (0.2) *§	0.0 (0.2) †	-0.8 (0.4)
足関節	-10.1 (7.4)	-10.7 (9.6)	-8.6 (9.3)	4.1 (1.3) *	4.5 (1.4)	5.0 (1.5)
膝関節	8.7 (5.1)	9.7 (4.2)	8.0 (3.2)	-6.2 (2.1) *§	-7.5 (2.1)	-7.2 (1.7)
股関節	24.1 (5.8) §	27.4 (6.2)	27.6 (4.1)	2.2 (1.4) *§	5.0 (1.4) †	6.9 (1.9)

値は平均値と標準偏差で示した

各条件において、足部、足関節、膝関節、股関節の回旋量の和は、腰部の回旋量となる

\*: D15 vs D75 ( $p<0.05$ ) §: D15 vs D45 ( $p<0.05$ ) †: D45 vs D75 ( $p<0.05$ )

腰部  
反時計回り/時計回り

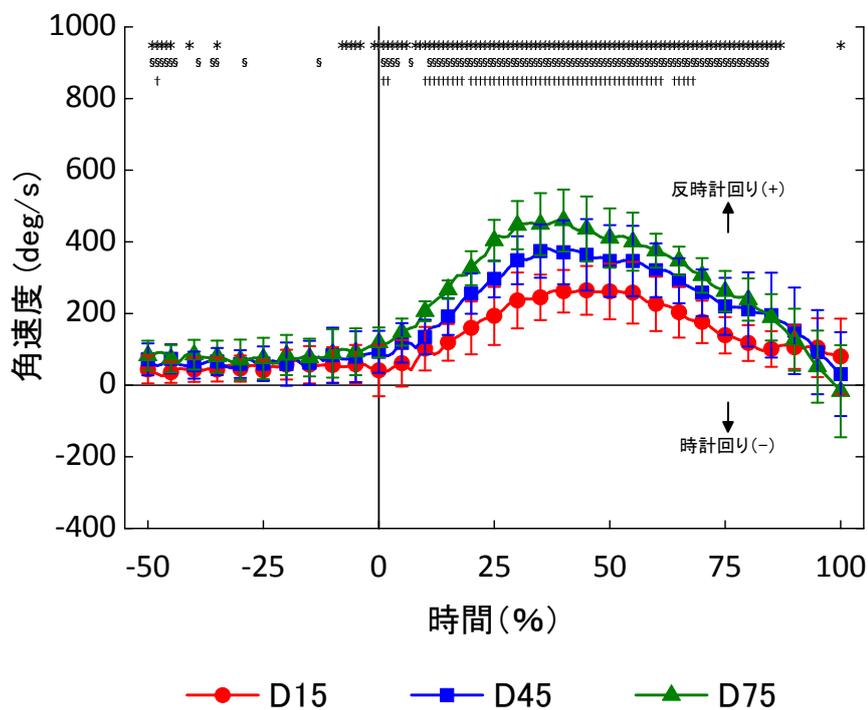


図 5-5 水平面内における腰部の回旋角速度

支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した値は平均値で示した

標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した

\*: D15 vs D75 ( $p < 0.05$ ) §: D15 vs D45 ( $p < 0.05$ ) †: D45 vs D75 ( $p < 0.05$ )

足部  
反時計回り/時計回り

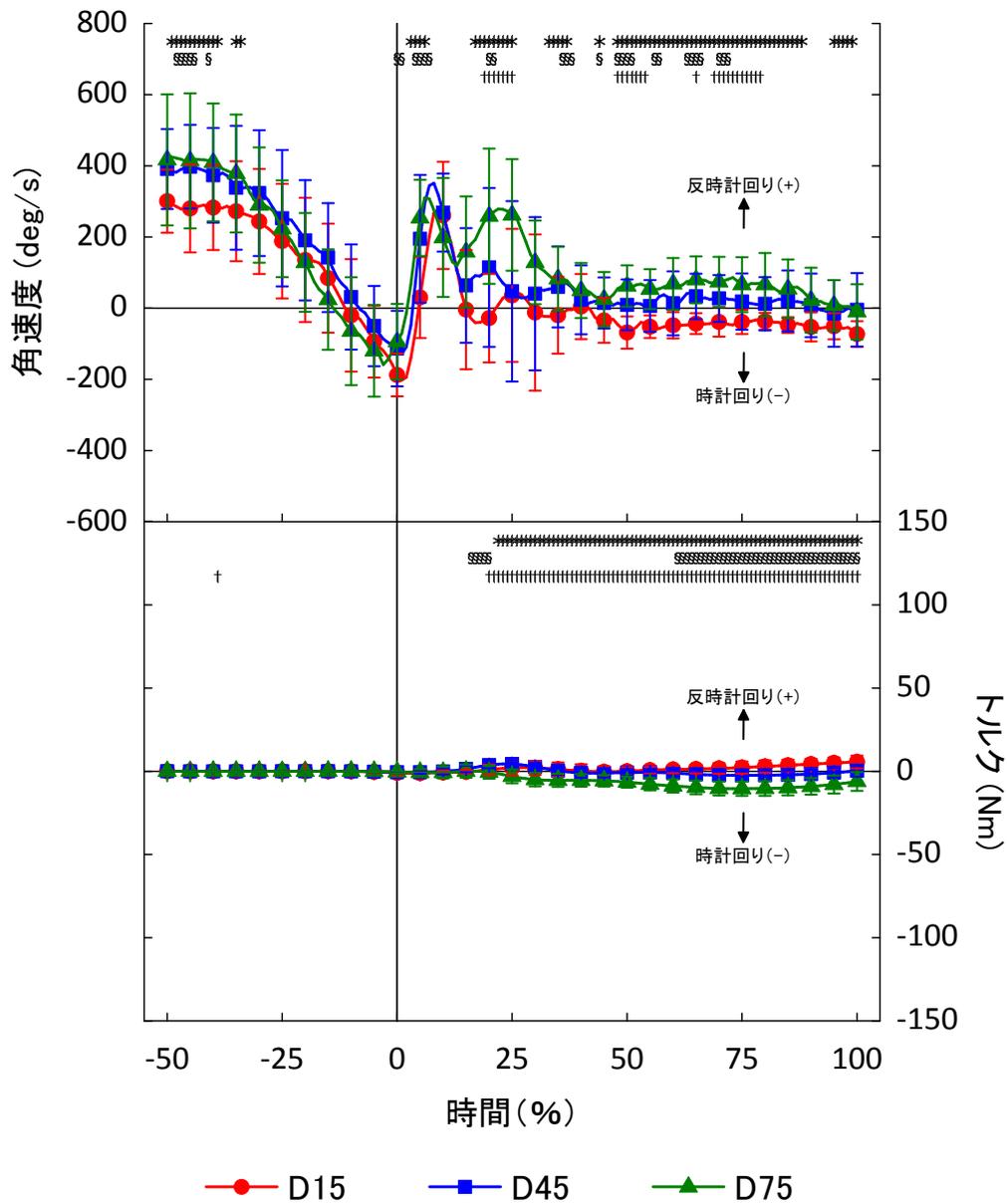


図 5-6 水平面内における支持脚足部の回旋角速度と床面から足部に作用するトルク

支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した値は平均値で示した

標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した

\*: D15 vs D75 ( $p < 0.05$ )    ‡: D15 vs D45 ( $p < 0.05$ )    †: D45 vs D75 ( $p < 0.05$ )

( $p<0.05$ ) (表 5-1). 一方, 床面から足部に作用するフリーモーメントは条件間で異なり, 支持局面中の角力積は, 全ての条件の間で有意差がみられた ( $p<0.05$ ) (表 5-1).

水平面内, すなわち静止座標系の Z 軸回りにおける支持脚足部に対する下腿部の回旋として算出した足関節の回旋角速度と, 下腿部に作用する足関節関節トルクを図 5-7 に示した. いずれの条件も支持局面中には上方からの視点で下腿部が足部に対して時計回りに回旋する角速度が主に生じていた. この局面における回旋量には, いずれの条件間においても有意差はみられなかった (表 5-1). 支持脚足関節から下腿部に作用する足関節トルクは支持脚接地から顕著に増大し, いずれの条件においても上方からの視点で反時計回りに下腿部を回旋させる方向に作用した. 支持局面中における角力積には, D15 と D75 の間に有意差がみられた ( $p<0.05$ ) (表 5-1).

水平面内, すなわち静止座標系の Z 軸回りにおける支持脚下腿に対する大腿部の回旋として算出した膝関節の回旋角速度と, 大腿部に作用する膝関節関節トルクを図 5-8 に示した. いずれの条件においても支持局面中には上方からの視点で支持脚大腿部が下腿部に対して反時計回りに回旋する角速度が主に生じていた. この局面における回旋量には, いずれの条件間においても有意差はみられなかった (表 5-1). 膝関節から大腿部に作用する膝関節関節トルクは, まず上方からの視点で反時計回りに作用し, 支持脚接地後に時計回りの作用に転じた. 支持局面中の角力積には, D15 と他の 2 条件の間で有意差がみられた ( $p<0.05$ ) (表 5-1).

水平面内, すなわち静止座標系の Z 軸回りにおける支持脚大腿部に対する腰部の回旋として算出した股関節の回旋角速度と, 腰部に作用する股関節関節トルクを図 5-9 に示した. いずれの条件においても支持脚接地直後に急激な上方からの視点で時計回りの回旋が示された後, 反時計回りの回旋に転じた. 支持局面中の回旋角度変化量は, D15 と D45 の間に有意差が認められた ( $p<0.05$ ) (表 5-1).

足関節  
反時計回り/時計回り

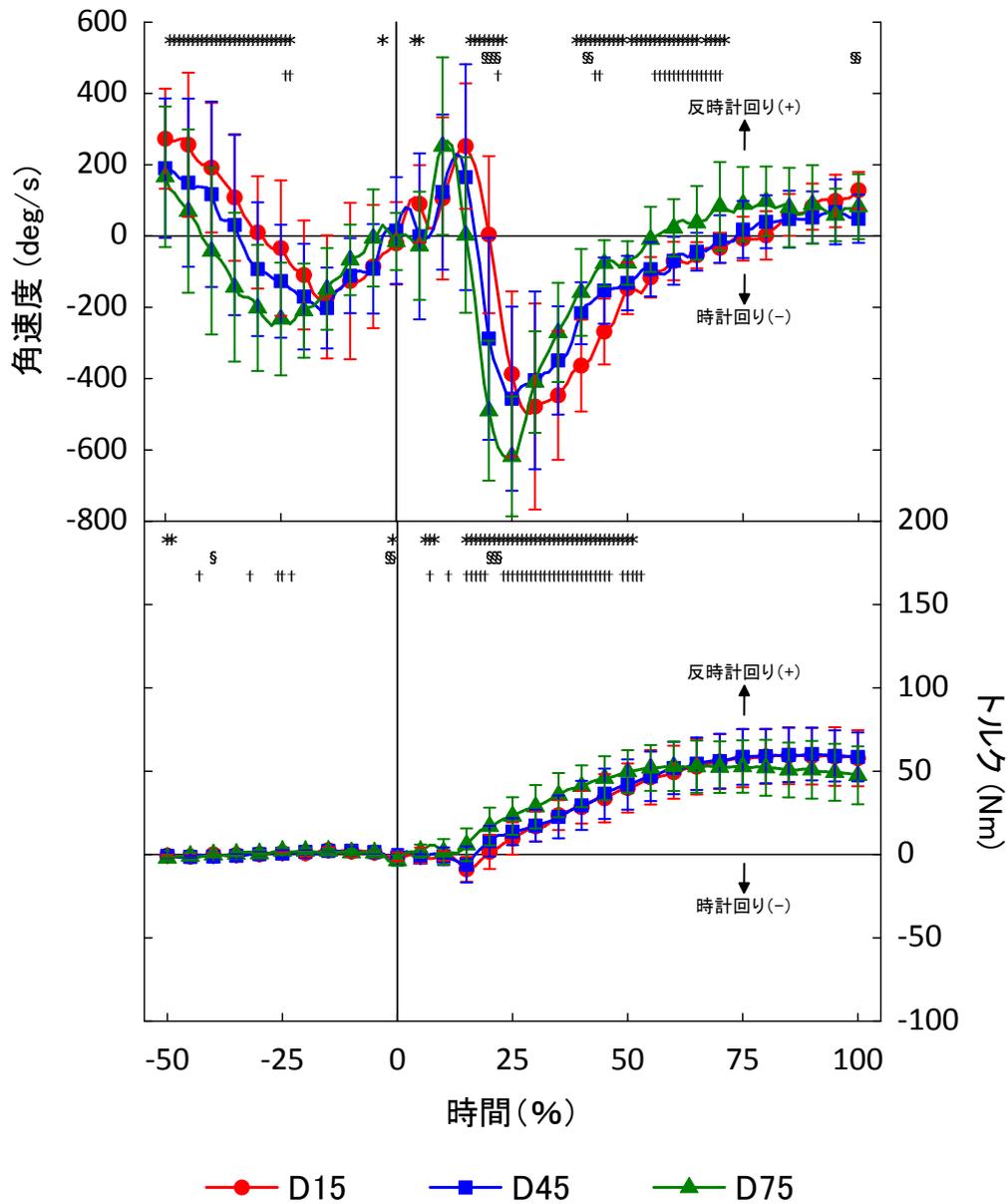


図 5-7 水平面内における支持脚足関節の回旋角速度と下腿部に作用する足関節関節トルク

支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した値は平均値で示した

標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した

\*: D15 vs D75 ( $p < 0.05$ ) §: D15 vs D45 ( $p < 0.05$ ) †: D45 vs D75 ( $p < 0.05$ )

膝関節  
反時計回り/時計回り

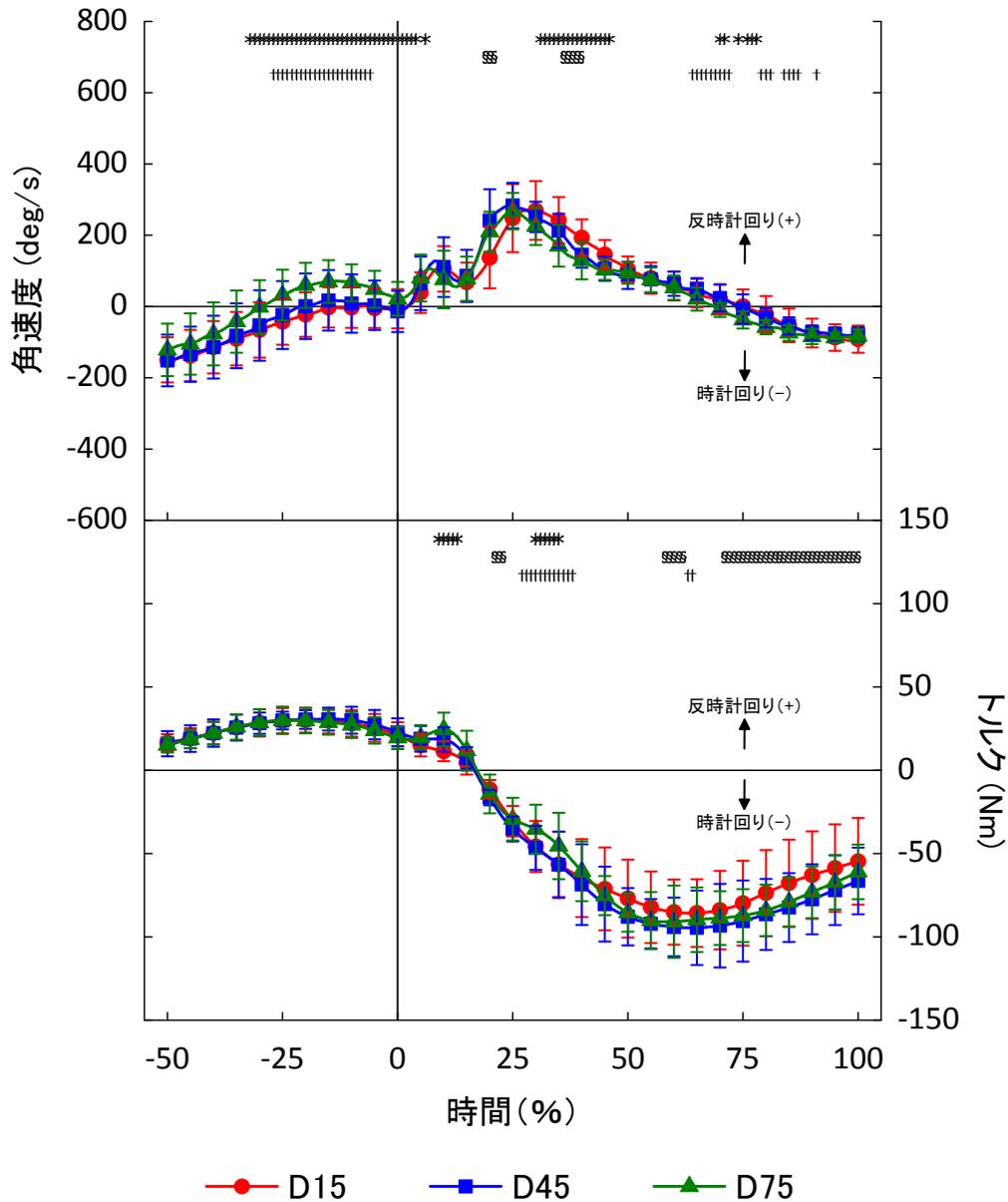


図 5-8 水平面内における支持脚膝関節の回旋角速度と大腿部に作用する膝関節関節トルク

支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した値は平均値で示した

標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した

\*: D15 vs D75 ( $p < 0.05$ )    ‡: D15 vs D45 ( $p < 0.05$ )    †: D45 vs D75 ( $p < 0.05$ )

股関節  
反時計回り/時計回り

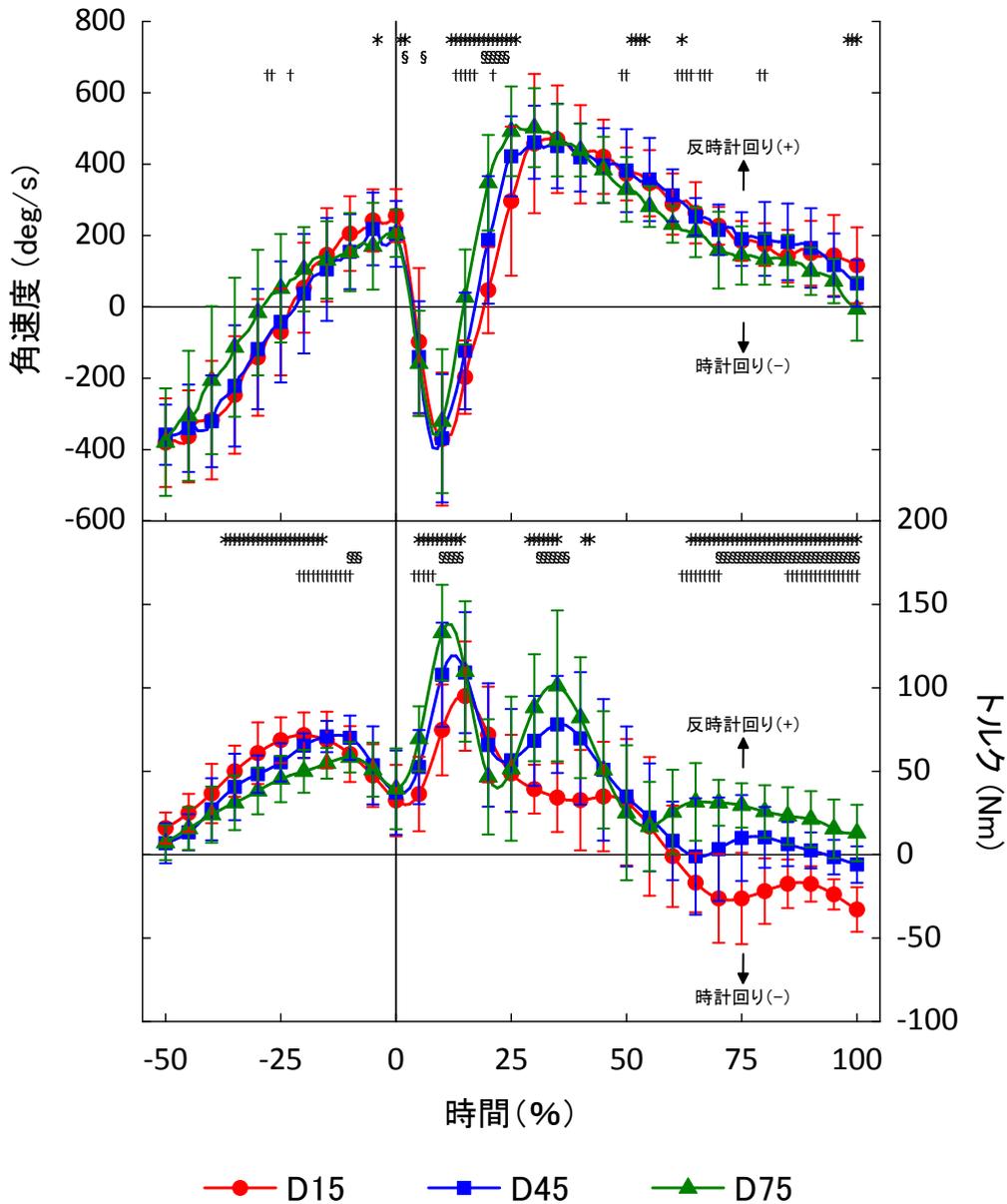


図 5-9 水平面内における支持脚股関節の回旋角速度と腰部に作用する股関節  
関節トルク

支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
値は平均値で示した

標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した

\*: D15 vs D75 ( $p < 0.05$ ) §: D15 vs D45 ( $p < 0.05$ ) †: D45 vs D75  
( $p < 0.05$ )

一方、支持脚大腿部から腰部に作用する股関節関節トルクはいずれの条件においても上方からの視点で反時計回りに作用しながら支持脚接地を迎えた。接地後にみられる反時計回りのトルクのピーク値（D15：99.7±32.6 Nm，D45：130.0±28.9Nm，D75：154.5±25.8Nm）は，D15よりも他の2条件が有意に大きかった（ $p<0.05$ ）。その後，支持局面の後半以降においてD15は時計回りのトルクを，D45は比較的0 Nmに近い値を，D75は反時計回りのトルクを示しており，およそ60%時点からボールインパクトにかけての大部分において，全ての条件間で有意差が認められた（ $p<0.05$ ）（図5-9）。支持局面中の角力積は助走角度の増加に伴って大きくなり，全ての条件間で有意差が認められた（ $p<0.05$ ）（表5-1）。

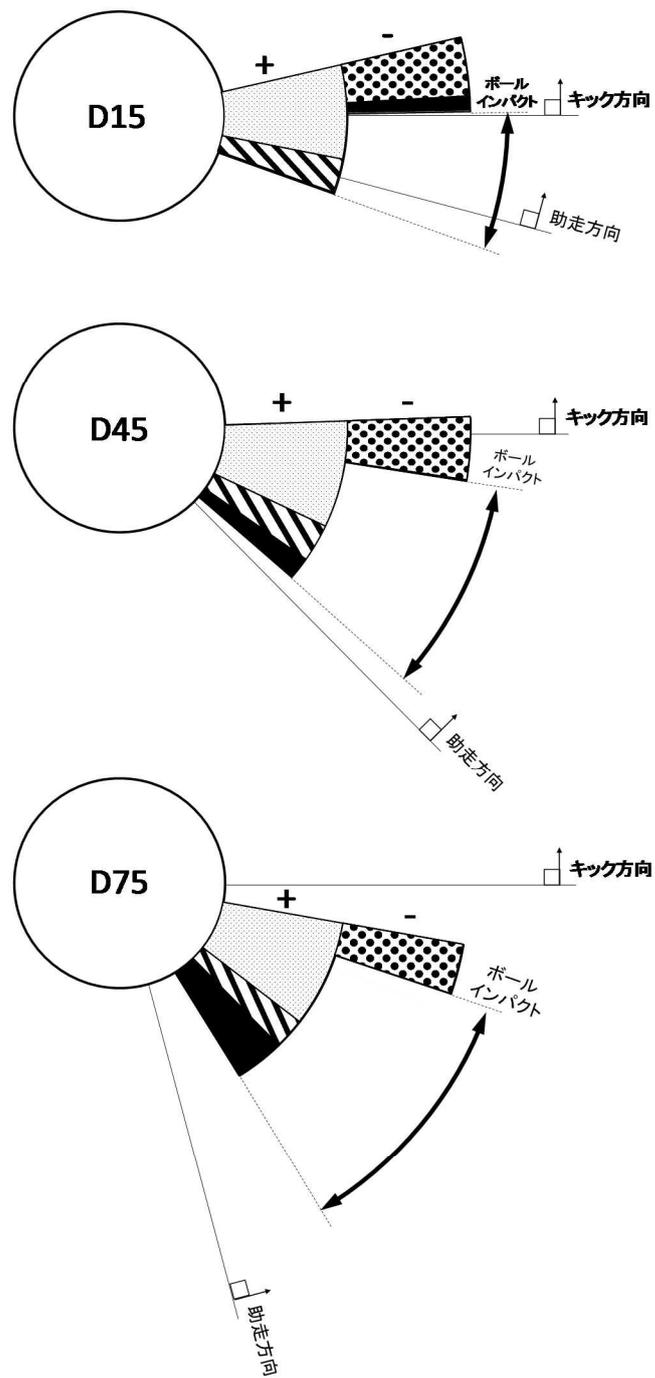
## 5.4 考察

### 5.4.1 キック方向の変化に伴う腰部の回旋動作の変容

Scurr and Hall (2009) は助走角度が増加すると腰部の回旋量 (角度) が増加することを示している。本研究においても、腰部の回旋量には全ての条件間で有意差があり、ボールの蹴り出し方向に対して助走の角度が大きいほど、上方からの視点で反時計回りの回旋量は大きくなることが確認できた (表 5-1)。このような回旋動作は、腰部 (骨盤前面) をキック方向に正対させる動きであり、結果として、蹴り脚の大腿部前面をキック方向に向け、蹴り脚各関節の屈曲/伸展の向きをキック方向に合わせることにつながる (Levanon and Dapena, 1998)。つまり、助走角度の増加に伴い腰部の回旋量を増加させることは、目的となる方向に蹴り脚をスイングすることに貢献すると考えられた。また、この腰部の回旋量は、角速度の時間積分で決定される。本研究では支持局面に要する時間であるキック時間が助走角度の増加に伴い有意に長くなった。さらに、腰部の回旋角速度の時系列データの比較から、条件間における腰部の回旋角速度の違いの大部分は支持局面中にみられること (図 5-5)、そして、回旋の角速度のピーク値は助走角度が大きいほど有意に高くなることが示された。よって、ボールの蹴り出し方向に対して助走の角度が大きい場合は、主に支持局面における腰部の回旋動作の速さとそれを行う時間の両方を増大させることによって、大きな回旋量を確保する必要があることが明らかとなった。

### 5.4.2 腰部の回旋動作を構成する支持脚の動作

上述の腰部の回旋は、静止座標系の Z 軸回りの腰部の回旋動作を示すものであった。この腰部の回旋は、支持脚自体が床面に対して静止座標系の Z 軸回りに回転する動作と支持脚の各関節が静止座標系の Z 軸回りにそれぞれ捻転する動作によって生じる。図 5-10 は支持局面における腰部の回旋量がこれらのうち、どの動



足部
  足関節
  膝関節
  股関節

図 5-10 支持局面における腰部の回旋量とその構成要素  
 円の中心側が上方からの視点で反時計回りの回旋量 (+) を表す  
 両矢印で示した角度が腰部の回旋量を表す  
 助走方向とキック方向，ボールインパクト時の腰部の向きを示した

作によって確保されているかを、ボールインパクト時点の腰部の向きを積分定数とし、表 5-1 に示した支持局面におけるそれぞれの回旋量の平均値をもとに、上方からの視点で図示したものである。円の中心に近い方に正の値、すなわち上方からの視点で反時計回りの回旋を示した。また、その外側に負の値、すなわち上方からの視点で時計回りの回旋を示した。よって、両矢印で示したこれらの差となる角度が前項の腰部の回旋量を表している。また、条件ごとの助走方向とキック方向も矢印によって表した。

全ての条件において支持脚股関節と膝関節の動作が腰部の上方からの視点で反時計回りの回旋動作を作っていた。このうち股関節による回旋量が多く割合を占めていた。また、この股関節の回旋量は D15 よりも D45 が有意に大きかった。一方、足関節はいずれの条件においてもこれらと逆方向の回旋動作を作っており、腰部を時計回りに回旋させる動きをしていた。床面に対する足部の回旋は全ての条件間で有意差がみられ、D15 においてはわずかに時計回りの回旋をし、D45、D75 の順に反時計回りの回旋が増加していた。これらのことから、助走角度にかかわらず支持脚股関節の動作が腰部の反時計回りの回旋の主構成要素であり、さらに、助走角度の増加に伴い大きくなる腰部の回旋量の違いは、支持脚股関節の回旋量のみならず、支持脚の足部の床面に対する回旋量にも依存すると考えられた。機能解剖的に膝関節の内旋や足関節の内転の可動域は小さく、水平面内において捻る方向への可動域は十分に大きいとは言えない。したがって、股関節の内旋や、床面に対する支持脚自体の回転により、キック方向に応じて必要な腰部の回旋量を確保していると考えられた。

#### 5.4.3 腰部の回旋動作と支持脚におけるトルク発揮

先述のように助走角度の増加に伴い支持局面における腰部の回旋量が増加することが明らかとなった。また、前項により、腰部の回旋を主に担う動作が明ら

かとなった。さらに、その背景にあるトルク発揮の様相について明らかにする必要がある。図 5-11 には表 5-1 をもとに水平面内の回旋に関わる支持局面の角力積を図示した。上方からの視点で反時計回りの回旋トルクによる角力積を正として示している。

前項に示すように、股関節の回旋量は、腰部の回旋量の多くを占めていた。これに対応する股関節の角力積も反時計回りに作用し、助走角度の増加に伴い有意に増加した。水平面内における支持脚股関節トルクは、支持脚接地直後に反時計回りのピーク値が出現し（図 5-9）、そのピーク値は D15 よりも他の 2 条件の方が有意に大きかった。また、このトルクは、およそ 60%時点からボールインパクトまでの大部分で助走角度が大きいほど有意に高値を示しており、助走角度が大きい場合、支持局面の後半においても反時計回りのトルク発揮が維持されていた。第 3 章の結果から、腰部の回旋動作は支持脚股関節から作用する関節間力によって生じ、さらに、支持脚股関節から腰部に作用する関節トルクは支持局面の後半に時計回りに作用することから、腰部の回旋の減速は支持脚股関節の関節トルクの反作用によって引き起こされることが明らかとなっている。本章においても助走角度が小さい場合はこれと同様のパターンがみられたが、助走角度が大きい場合は支持局面全体を通して反時計回りのトルクが発揮され続けていた。よって、助走に対して大きく角度がついた方向にボールを蹴る状況では、支持脚股関節周りの筋群の作用によって腰部を反時計回りに回旋させる方向へのトルク発揮を増加させ、腰部の回旋を促進しようとするものと考えられた。

前項に示すように、床面に対する足部の反時計回りの回旋は、助走角度の増加に伴い有意に増加し、腰部の反時計回りの回旋量の増加に寄与していた。また、いずれの条件においても急峻な足部の反時計回りの回旋が接地直後にみられた（図 5-6）が、床面から足部に作用するトルクによる角力積の全角力積に占める割合は、極わずかであった（図 5-11）。したがって、支持脚の足部はこのトルクを

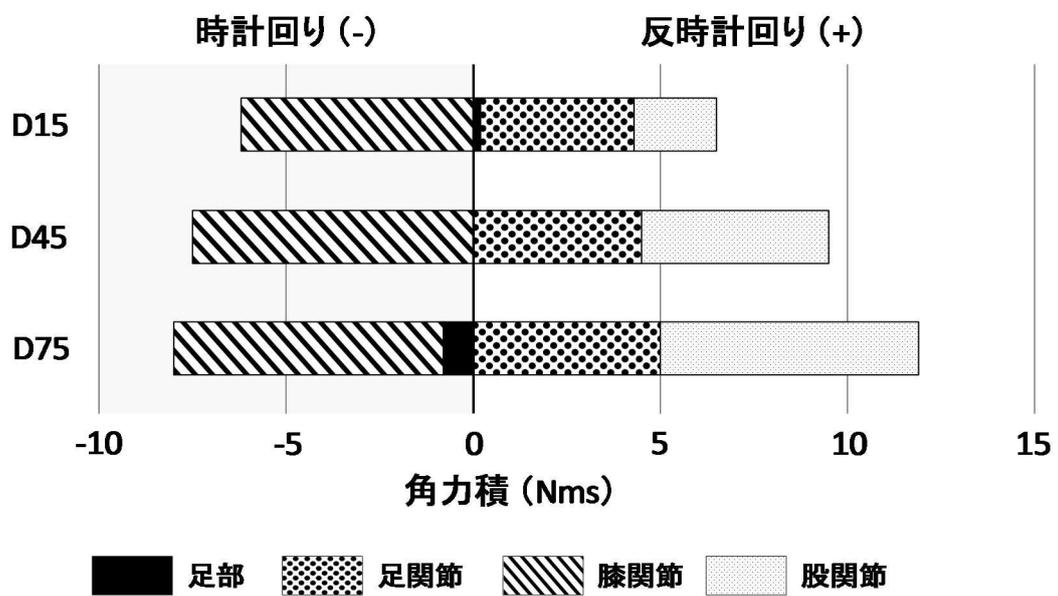


図 5-11 水平面内の回旋に関わる支持局面の角力積  
 正の値が上方からの視点で反時計回りのトルクによる角力積を表す

受けて回旋するものでないと言える。支持脚と床面との摩擦力と考えられる地面反力のXY成分の合成値を図5-12に示した。この力は接地から立ち上がりおよそ20%時点までにピークに達していた。よって、支持脚足部の回旋動作は摩擦力が小さい接地直後の局面において、助走の慣性により足部がスライドすることで生じるものであると考えられた。

#### 5.4.4 キック方向の変化に伴う屈曲/伸展動作の変容とトルク発揮

Kellis et al. (2004) の研究により、助走角度0度、45度、90度から1歩の助走によるキック動作において、支持脚足関節の背屈/底屈角度には、助走角度による違いはないことが報告されている。本研究ではこの動作における角速度とトルクについて求めた。接地直前の足関節の角速度にはいずれの条件間においても有意差は認められなかったが、支持脚の接地を契機に底屈角速度が生じ、全ての条件間で有意差がみられた(図5-2)。そして、それによって生じる接地直後の底屈角度変化量は助走角度が大きい条件ほど有意に低い値を示した。一方、支持脚接地直後における足関節トルクはD15とD45がD75と比較して有意に高い値を示し、背屈方向に作用していた(図5-2)。したがって、関節トルクが底屈角度の違いを生じさせるものではないと考えられた。支持脚接地時点における支持脚足部の傾きは、助走角度が大きい条件ほど有意に小さかった。つまり、助走角度が大きいほど支持脚足部を床面に対して平行に近い状態で(フラットに)接地するため、接地後の支持脚足関節底屈角度変化が小さくなったと考えられた。助走角度が大きい場合にみられるこのような動作は前足部が床面に接地するまでの時間を短くする。地面反力の作用点と方向を考えると、足部が反時計回りに回旋するためには図5-13のように外側に向かう力の作用点、すなわち圧力中心の位置が足部重心よりもつま先側にある必要がある。前項において、支持脚足部の回旋動作は助走がもたらす慣性により足部がスライドすることで生じるものであると考えられた。

地面反力の水平成分(XY成分の合成値)

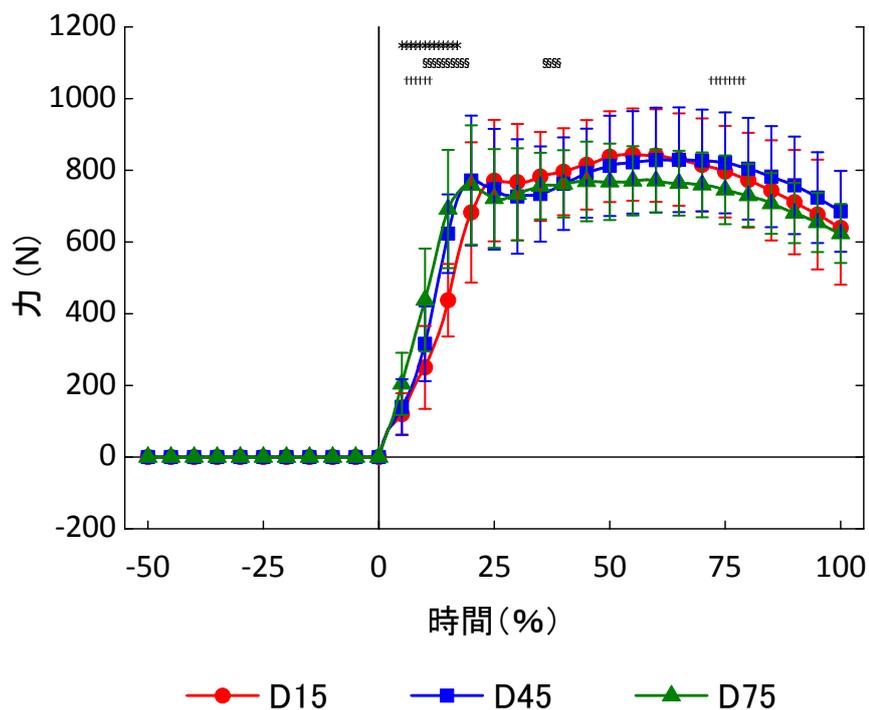


図 5-12 地面反力の XY 成分の合成値 (支持脚足部と床面との間の摩擦力)  
 支持脚接地を 0%, ボールインパクトを 100%とし, 時間を標準化した  
 値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し, 標準偏差を示した  
 \*: D15 vs D75 ( $p < 0.05$ )   ‡: D15 vs D45 ( $p < 0.05$ )   †: D45 vs D75  
 ( $p < 0.05$ )

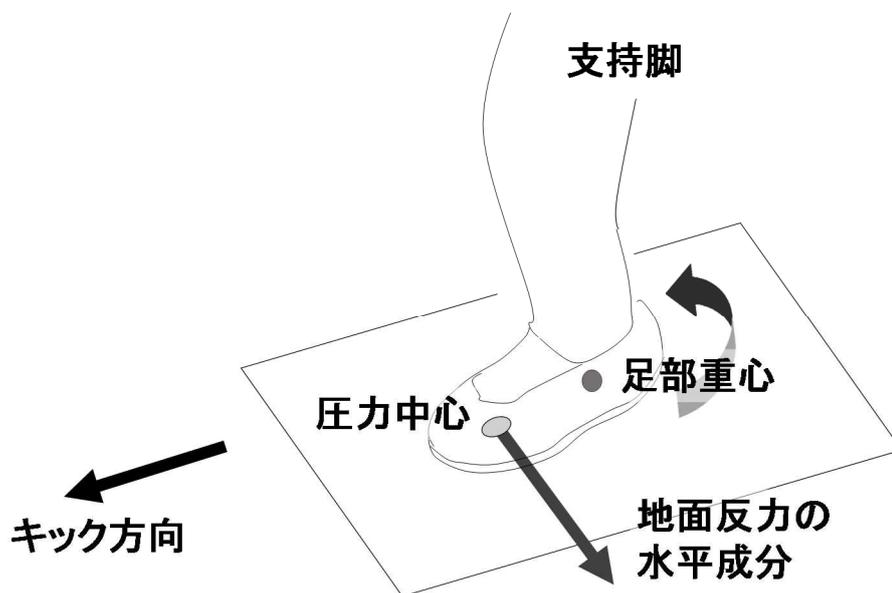


図 5-13 地面反力によって生じる支持脚足部の回旋の模式図

支持脚の前足部に外側に向かう地面反力が作用することで後足部が上方からの視点で反時計回りに回旋する

これに加え、D75のように特に助走角度が大きい条件では支持脚足部の接地の仕方を変え、前足部に地面反力を受けることで踵をスライドさせるように足部を上方からの視点で反時計回りに回旋する動作を行っている可能性が考えられた。

支持脚の膝関節屈曲/伸展動作については、助走角度の影響を受けたと思われる系統的な違いはみられなかった。第3章で示した任意の助走角度からのキック動作と同様にいずれの助走角度においても、支持脚接地後から膝関節屈曲に抗するように伸展トルクが発揮され、ボールインパクト直前において蹴り脚のスイングの加速に貢献すると考えられる伸展動作が生じていた(図5-3)。実際にD45とD75の足部速度に有意差はみられず、助走に対してボールを蹴り出す角度が大きい状況においても、支持脚の膝関節は接地の衝撃を緩衝し、蹴り脚のスイング速度を加速させる役割を果たすと考えられた。

支持脚の股関節屈曲/伸展動作では、60%時点付近からボールインパクトまでの伸展角速度の大部分に、全ての条件間で有意差がみられた(図5-4)。また、助走角度が大きい条件ほど支持局面中の伸展角度変化量が有意に小さかった。支持脚足部が接地した状態で支持脚股関節の伸展動作を抑制することは、支持脚側の腰部の前方向(キック方向)への移動を抑制することにつながる。このような動きが、相対的に逆側の蹴り脚側の腰部の前方向への移動を促進させ、腰部の回旋を助長する役割を担う可能性が考えられた。よって、大きく角度がついた方向へボールを蹴る状況では、このような支持脚股関節の屈曲/伸展軸回りの運動も含めた複合的な動作によって腰部の回旋を補助することが示唆された。一方で、屈曲/伸展トルク発揮はこの動作に対応しておらず、むしろ伸展の角力積は助走角度の増加に伴い有意に大きくなった。よって、股関節における伸展動作の違いは、支持脚の大腿部遠位端に作用する膝関節トルクの反作用や動作依存トルクなど、股関節周りの筋群の作用以外によって生じると考えられた。

## 5.5 結言

本章では、3種類の異なる方向へボールをインステップキックする際の支持脚及び腰部の動きを運動力学的に分析し、各軸回りの運動を記述することで、各種方向へのインステップキック動作の特徴を明らかにした。

その結果、以下のことが示された。

1. 助走に対してボールを蹴り出す角度が大きくなるにつれて腰部をキック方向に対して正対させる方向への回旋量が増加し、さらにこの腰部の回旋動作の違いは支持脚接地後に顕在化した。
2. ボールを蹴り出す角度の増加に伴い、腰部の回旋に作用する支持脚股関節の関節トルクの発揮を増大させ、股関節における回旋量を確保する。
3. ボールを蹴り出す角度が大きくなることで生じる床面に対する支持脚足部の回旋量の増加は、支持脚接地直後に助走の慣性を用い、足部をスライドさせることと、支持脚足部の接地の仕方を変え、前足部に地面反力を作用させることによって生み出されると考えられた。
4. ボールを蹴り出す角度が大きくなる場合、ボールインパクト直前における支持脚股関節の伸展動作を抑制し、支持脚側の股関節の前方への移動を制限することで腰部の回旋動作を促進すると考えられた。

以上のことから、助走に対するボール蹴り出し角度が増加するほど、支持脚接地後の腰部の回旋量が増加することが明らかとなった。また、キック方向に応じた腰部の回旋量は、支持脚股関節の動きと床面に対する支持脚足部の動きを変化させることでもたらされることが示された。

## 第6章 最大下努力でのインステップキック動作における腰部・支持脚の運動力学的分析

### 6.1 緒言

#### 6.1.1 研究背景

前章までの研究を含め、インステップキックに関する先行研究の大多数は、最大努力下でボールを蹴る試技に対して分析を行ったものであった。しかしながら、実際の試合ではボールスピードを重視するばかりでなく、主に正確性を増す目的で状況に応じて速度や飛距離をコントロールしてボールを蹴る技術が求められる。以下、本研究では、このようなコントロールされたキックを最大下努力下でのキックと呼ぶこととする。

先行研究 (Andersen and Dörge, 2011; Lees and Nolan, 2002; Teixeira, 1999) により、正確性を重視するようなキックではスピードを重視したキックよりもボール速度や蹴り脚の足部速度が低下することが報告されている。すなわち、正確性を重視する場合は最大下努力下でのキックになることが知られている。さらに、このような最大下努力下のキックを最大努力下のキックと運動学的に比較することも行われており、最大下努力下のキックでは助走速度が遅くなることや腰部の回旋、及び蹴り脚の股関節、膝関節の屈曲/伸展の動作範囲が低下すること、ボール速度・足部速度比には違いがみられないこと (Lees and Nolan, 2002)、キック動作に要する時間が長くなること (Teixeira, 1999) が報告されている。

第3章では、最大努力下におけるインステップキック動作の分析を行った。そして、支持脚には接地の衝撃を緩衝する役割があることや、腰部の回旋の発生には支持脚に作用する地面反力が寄与することが示された。先述の先行研究 (Lees and Nolan, 2002) が明らかにしているように、最大下努力下のキックにおいて助走速度が低下すれば、助走によって得られる身体の運動量は小さくなると考えられ

る。そして、その結果として支持脚による緩衝動作に違いがみられることや、地面反力に影響を受ける腰部の回旋動作に違いが生じることが予想される。また、第4章では支持脚膝関節の伸展動作が蹴り脚のスイングの加速に貢献することが明らかとなった。よって、先述の先行研究 (Lees and Nolan, 2002; Teixeira, 1999) が示すように最大下努力のキックにおいて蹴り脚の足部速度が低下する背景には、支持脚の動作に起因する何らかの力学的な調整が行われている可能性がある。しかしながら、最大下努力でのキックに関する先行研究はボールや蹴り脚の動きについて検討したのみで、支持脚各関節や腰部の動作の運動力学的な分析は著者の知る限り行われていない。

### 6.1.2 目的

本研究の目的は、運動力学的な分析によって最大下努力でのインステップキック動作を、最大努力でのインステップキック動作と比較することで、コントロールされたインステップキックにおける支持脚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。

## 6.2 方法

### 6.2.1 被験者

被験者は、大学の地域リーグ1部に所属し、日常的にサッカーを行っている男子大学生サッカー競技者15名(年齢 $20.9 \pm 0.5$ 歳, 身長 $170.2 \pm 4.9$ cm, 体重 $67.9 \pm 7.6$ kg)であった。また、これらの被験者の競技経験年数は平均 $14.1 \pm 1.9$ 年、少なくとも10年であった。なお、被験者が好んでキック動作に用いる脚は12名が右脚、3名が左脚であった。本研究は名古屋大学総合保健体育科学センターにおけるヒトを対象とする研究審査委員会の承認を受けるとともに、被験者からは実験の内容を十分に説明した上で、参加の同意を書面にて得た。

### 6.2.2 実験手続き

実験は体育館内で実施した。ボールはFIFA公認の5号球を使用し、その内圧は実験を通して900hPaに保った。前章までの研究と同様に、被験者はサイズのみが異なる同型のトレーニング用シューズ (Del Mundo Wide TT; PUMA, Herzogenaurach, Germany), ショートソックス, スパッツ, コンプレッションシャツ, スイミングキャップを着用した。身体及びボールに対する反射マーカの貼付は、前章までの研究と同様であった。

被験者は十分なウォーミングアップを行った。そして、第3章と同様の方法によって支持脚各関節の関節中心を算出するためのスタンディングキャリブレーションを行った。その後、被験者は日ごろ好んでキック動作に用いる脚によって静止したボールを3歩の助走の後、6m前方に設置したフットサルゴール(高さ2m, 幅3m)に向けてインステップキックした。本研究では、ボール速度をコントロールし、最大下努力のインステップキックをする最大下条件を設定した。先行研究 (Andersen and Dörge, 2011; Lees and Nolan, 2002) では、正確性を重視してボールを蹴ることでボール速度が低下することが報告されている。よって、最大

下条件を満たすインステップキック動作を実現するために、被験者には「正確性を重視し、ゴールの中心に配置した的を狙って蹴ること」を指示した。一方、最大下条件との比較対象としてボールスピードを重視し、最大努力でインステップキックをする最大条件を設けた。最大条件では被験者に「可能な限り速いボールを蹴ること」を指示した。被験者はこれら2つの条件において数回の練習試技を行った後、各条件10回ずつの試技を行った。そのうち上述の指示を満たし、蹴り出されたボールがゴールの中心付近を捉え、支持脚の足底全体がフォースプレートの計測可能範囲内に接地していた2試技を成功試技として分析した。なお、最大下条件と最大条件における試技の実施順はランダムに決定した。また、実験中は十分な休息を適宜とり、疲労の影響が出ないように配慮した。

キック動作は、同期したモーションキャプチャシステム（Vicon T20; Vicon Motion Systems, Oxford, UK）とフォースプレート（Type 9281E; Kistler Instruments, Winterthur, Switzerland）を用いて500Hzで計測した。空間及びフォースプレートの座標系となる静止座標系は、床上に原点を置いた右手系直交座標系とし、Z軸を鉛直上方向、Y軸をボールキック方向、X軸をY軸とZ軸に直交する方向として定義した。なお、本研究では好んでキック動作に用いる脚が左脚の被験者が3名いたが、キャプチャした身体各部の座標を鏡映し、原点を平行移動することで、右脚で蹴ったものと同等になるよう変換した。よって、以降に示す変数は全て右脚でボールを蹴った試技のもののみなすことができる。

### 6.2.3 身体重心速度，足部速度，ボール速度とキック時間

各条件における支持脚接地直前 10 コマの身体重心の X, Y, Z 座標と時間の一次回帰直線の傾きから身体重心の速度ベクトルを算出し、その大きさを助走速度と定義した。さらに、ボールインパクト直前 10 コマの身体重心座標に対しても同様の計算を行い、ボールインパクト時点における身体重心速度を算出した。な

お、重心の位置座標は阿江ら（1992）によって報告されている身体重心係数を用いて算出した。蹴り脚の足部速度とボール速度は第3章と第5章でそれぞれ示した方法によって算出した。また、本研究ではボール速度を足部速度で除することによりボール速度-足部速度比も算出した。キック時間は、前章までと同様に支持脚接地からボールインパクトまでを支持局面と定義し、その局面の時間とした。

#### 6.2.4 支持脚における各関節の関節角速度と腰部の回旋角速度

最大条件、最大下条件それぞれにおける支持脚足関節（背屈/底屈，内反/外反，内転/外転），膝関節（屈曲/伸展），股関節（内転/外転，屈曲/伸展，内旋/外旋）の関節角速度を算出した。これらの算出にはセグメント角速度の差分を取った後，解剖学的な軸回りに変換を行う第3章の方法を用いた。また，腰部の回旋角速度も第3章の図3-2に示した腰部のセグメントに垂直な軸（ $Z_p$ ）回りの腰部のセグメント角速度と定義し，算出した。さらに，特定の局面における関節角速度及び回旋角速度のピーク値も求めた。

#### 6.2.5 支持脚の各関節における関節トルクパワー

各条件における支持脚の足関節（背屈/底屈，内反/外反，内転/外転），膝関節（屈曲/伸展），股関節（内転/外転，屈曲/伸展，内旋/外旋）における関節トルクパワーを算出した。これらは第3章で示した方法により算出した関節トルクと前項の関節角速度の積をとることで求めた。また，支持局面の関節トルクパワーを時間積分し，正と負それぞれの仕事量を求めることで，各関節周りの筋や腱の作用によって発生（+）または吸収（-）されるエネルギーを推定した。

#### 6.2.6 腰部の回旋に関わる関節トルク由来及び関節間力由来のパワー

本研究では支持脚股関節の関節トルクと関節間力が行う仕事量が，腰部の回転

運動エネルギーの増減にどの程度寄与しているかを条件間で比較するため、それぞれに由来するパワーを算出した。まず、関節トルクに由来するパワーは腰部に作用する支持脚股関節の関節トルクと腰部の回旋角速度の積、いわゆるセグメントトルクパワーとして算出した。このパワーは全て腰部の回転運動エネルギーの増減に寄与する。一方、関節間力に由来するパワーは、一般に関節間力とその作用点の並進速度の積として算出される。よって、ここでは、支持脚から腰部に作用する関節間力と支持脚股関節中心の並進速度の積となる。しかしながら、この関節間力によるパワーは腰部の回転運動エネルギーと並進運動エネルギーの両方の増減に寄与する。すなわち、関節間力に由来するパワーは腰部のセグメントを回転させることの他に、腰部のセグメントの並進運動にも影響を及ぼす。そこで本研究では、村田ら（2015）の方法に基づく以下の手順によって関節間力に由来するパワーの中から回転運動エネルギーに影響する要素を抽出した。まず、関節間力に由来するパワーを***JFP***とし、式で表すと以下の式[6-1]のようになる。

$$\mathbf{JFP} = \mathbf{F}_{ps} \cdot \mathbf{v}_{hs} \quad [6-1]$$

この式において $\mathbf{F}_{ps}$ は支持脚股関節中心から腰部に作用する関節間力、 $\mathbf{v}_{hs}$ は支持脚股関節中心の並進速度である。この $\mathbf{v}_{hs}$ は次の式[6-2]のように、腰部の回転中心（本研究では両股関節中心の midpoint）の並進速度 $\mathbf{v}_{pc}$ と腰部のセグメントが回転することで生じる並進速度 $\boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{r}_{ps}$ の和としてみる事ができる。

$$\mathbf{v}_{hs} = \mathbf{v}_{pc} + \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{r}_{ps} \quad [6-2]$$

ここで $\boldsymbol{\omega}_p$ は腰部の回旋角速度、 $\mathbf{r}_{ps}$ は腰部の回転中心に対する支持脚股関節中心の位置を示す。式[6-2]を式[6-1]に代入した後に、関節間力 $\mathbf{F}_{ps}$ を括弧内の各項に分配する。さらに第2項のスカラー3重積は順番によらないので並び替えると以下の式[6-3]が得られ、***JFP***を2つに分けることができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{JFP} &= \mathbf{F}_{ps} \cdot (\mathbf{v}_{hc} + \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{r}_{ps}) \\ &= \mathbf{F}_{ps} \cdot \mathbf{v}_{hc} + \mathbf{F}_{ps} \cdot (\boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{r}_{ps}) \end{aligned}$$

$$= \mathbf{F}_{ps} \cdot \mathbf{v}_{hc} + (\mathbf{r}_{ps} \times \mathbf{F}_{ps}) \cdot \boldsymbol{\omega}_p \quad [6-3]$$

式[6-3]の第1項で表されるパワーは関節間力と回転中心の並進速度との内積であることから腰部の並進運動エネルギーの変化を、第2項で表されるパワーは関節間力によって生じるトルクとセグメント角速度との内積であることから回転運動エネルギーの変化を表している。このように支持脚股関節から作用する関節間力に由来するパワーの中から、腰部の回転運動エネルギーに関わる要素を抽出した。本研究ではここで抽出したパワーと先述のセグメントトルクパワーの2つを腰部の回転運動エネルギーに寄与するパワーとした。また、支持局面中のこれらのパワーを時間積分し、正と負それぞれの仕事量を求めることで、支持脚から腰部に流入 (+) 及び流出 (-) するエネルギーを推定した。

なお、この項におけるそれぞれのパワーの算出には、腰部のセグメントに垂直な軸 ( $Z_p$ ) 回りの角速度とトルク、そしてこの軸に垂直な平面内に投影した並進速度と関節間力を用いた。すなわち、ここで求められたパワーや仕事量は腰部の回旋運動のみに寄与するもので前後傾、側屈は含まない。

### 6.2.7 データ処理 (平滑化と標準化)

第3章に示したように時系列データの標準化と平滑化を行った。パワーについては第3章におけるトルクと同様に4次のバターワース型のローパスフィルタを用いて遮断周波数 25Hz で平滑化した。角速度については、ノイズの影響が小さく、平滑化を施さなくとも十分にその傾向が理解できるものとし、生データを使用した。また、動作の局面分けと標準化は、第3章と同様に空中局面と支持局面を定義し、-50%から100%で行った。

### 6.2.8 統計処理

本研究における時系列データを含む各変数は最大条件と最大下条件それぞれの

条件ごとに被験者 15 名の平均値及び標準偏差で表した。また，最大下努力のインステップキック動作が最大努力のそれに対して変容したかを検討するため，対応のある t 検定を行った。時系列データに対しては，この検定を標準化時間 1%毎に行った。なお，有意水準は 5 %未満とした。統計処理には，**Matlab Statistics Toolbox** (R2011a, MathWorks, Massachusetts, USA) を用いた。

## 6.3 結果

### 6.3.1 身体重心速度，足部速度，ボール速度とキック時間

表 6-1 には両条件における助走速度，ボールインパクト時点における身体重心速度，蹴り脚の足部速度，ボール速度，ボール速度-足部速度比，キック時間をそれぞれ示した．速度に関する全ての変数において最大条件と比較して最大下条件が有意に低い値を示した ( $p<0.05$ )．ボール速度-足部速度比は，最大条件よりも最大下条件の値が有意に小さくなった ( $p<0.05$ )．キック時間は，最大条件と比較して最大下条件が有意に長くなった ( $p<0.05$ )．

### 6.3.2 支持脚に作用する地面反力

図 6-1 に支持脚に作用する地面反力の絶対値を示した．支持局面の大部分で最大下条件が最大条件よりも有意に低い値を示した ( $p<0.05$ ) (図 6-1)．また，最大下条件と最大条件の地面反力のピーク値 (最大条件：2172.1±282.3N，最大下条件：1811.0±163.1N) と力積 (最大条件：203±25.9Ns，最大下条件：188.8±31.1Ns) には有意差がみられた ( $p<0.05$ )．

### 6.3.3 支持脚各関節の関節角速度と関節トルクパワー

図 6-2，図 6-3，図 6-4 には両条件における支持脚各関節の関節角速度と関節トルクパワーをそれぞれ示した．また，表 6-2 には関節トルクパワーを積分することで算出した正の仕事量と負の仕事量をそれぞれ示した．

最大下条件における支持脚足関節の関節角速度のパターンは 3 軸いずれの方向においても最大条件と類似していた (図 6-2)．しかしながら，接地直後の底屈角速度 (最大条件：-1040.8±214.6deg/s，最大下条件：-811.1±214.6deg/s) と内反角速度 (最大条件：806.7±341.5deg/s，最大下条件：546.2±202.8deg/s)，外反角速度 (最大条件：-1320.0±376.8deg/s，最大下条件：-981.8±370.3deg/s) のピ

表 6-1 各条件における身体重心速度，蹴り脚の足部速度，ボール速度，キック時間

	最大条件	最大下条件
支持脚接地時点の身体重心速度 (m/s) (助走速度)	3.1 (0.2)*	2.8 (0.3)
ボールインパクト時点の身体重心速度 (m/s)	2.2 (0.2)*	1.9 (0.3)
ボールインパクト時点の蹴り脚の足部速度 (m/s)	17.5 (0.9)*	14.6 (1.6)
ボール速度 (m/s)	26.2 (1.4)*	20.6 (3.0)
ボール速度-足部速度比	1.50 (0.05)*	1.40 (0.07)
キック時間 (s)	0.117 (0.009)*	0.131 (0.012)

値は平均値と標準偏差で示した

\* : 最大条件 vs 最大下条件 ( $p < 0.05$ )

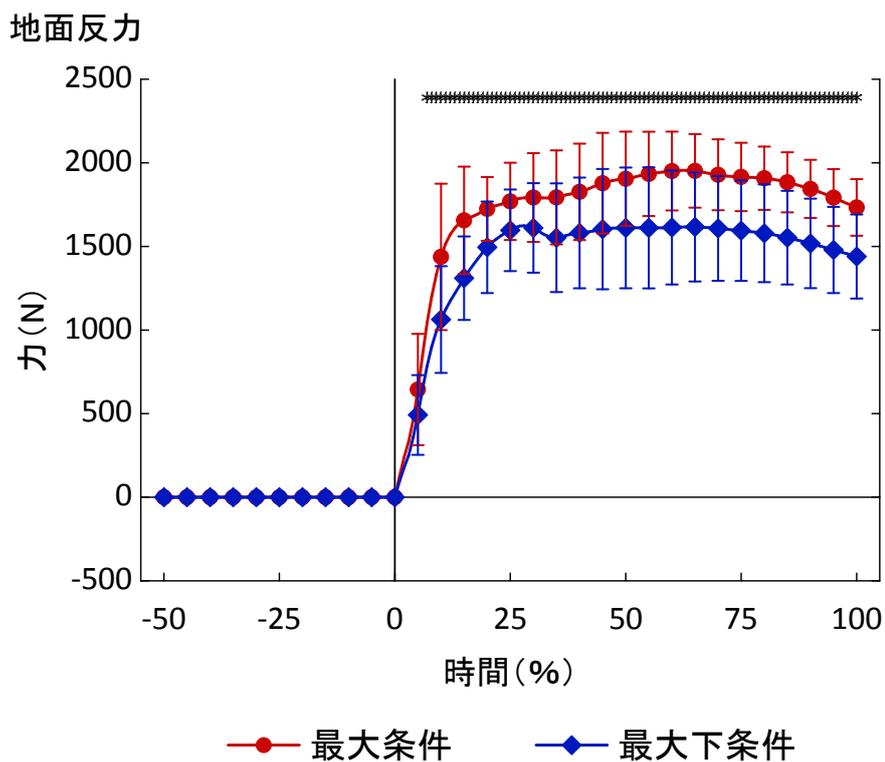


図 6-1 各条件において支持脚に作用する地面反力  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した  
 \* : 最大条件 vs 最大下条件 ( $p < 0.05$ )

表 6-2 各条件における支持局面中の支持脚各関節の関節トルクパワーによる正の仕事量と負の仕事量

		正の仕事(J)		負の仕事(J)	
		最大条件	最大下条件	最大条件	最大下条件
足関節	背屈 / 底屈	2.6 (2.0)*	0.7 (1.0)	-21.2 (6.8)	-22.0 (8.2)
	内反 / 外反	2.0 (0.9)*	1.5 (1.0)	-7.1 (2.7)*	-5.3 (2.6)
	内転 / 外転	0.8 (0.8)*	0.6 (0.7)	-3.9 (3.0)*	-2.2 (1.7)
膝関節	伸展 / 屈曲	16.0 (8.0)*	7.0 (5.9)	-60.3 (16.7)	-64.7 (16.4)
股関節	内転 / 外転	8.2 (6.2)	6.1 (4.9)	-13.6 (7.7)*	-7.7 (5.6)
	屈曲 / 伸展	70.8 (16.3)*	50.0 (22.7)	-4.9 (3.4)	-4.0 (3.4)
	外旋 / 内旋	7.5 (3.4)*	3.2 (2.0)	-7.9 (4.6)*	-5.0 (2.8)

値は平均値と標準偏差で示した

\* : 最大条件 vs 最大下条件 ( $p < 0.05$ )

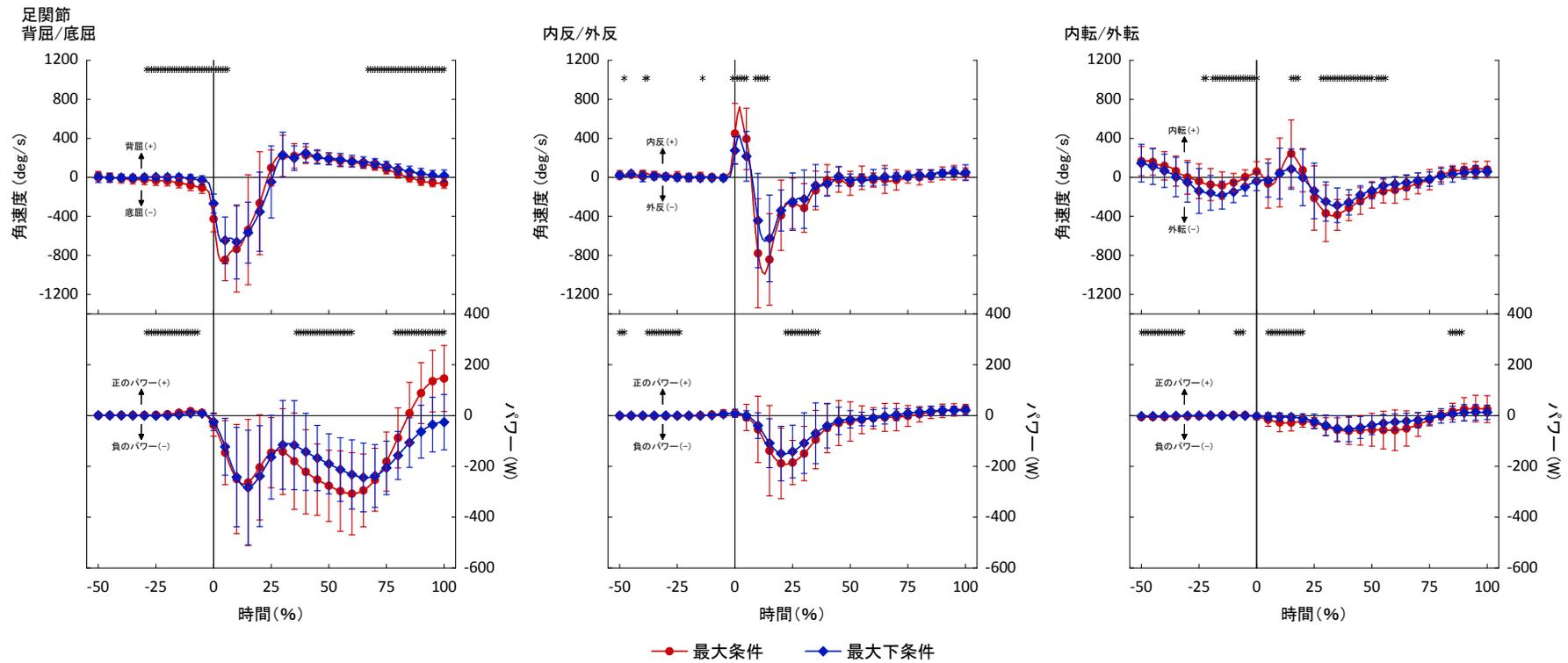


図 6-2 各条件における支持脚足関節の関節角速度と関節トルクパワー  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した  
 \*：最大条件 vs 最大下条件 ( $p < 0.05$ )

ーク値は、絶対値でみると最大下条件が有意に小さかった ( $p<0.05$ )。足関節の関節トルクパワーはいずれの動きにおいても両条件ともに空中局面中、一貫して 0W に近く、その後の支持局面の開始から負のパワー発揮がなされた (図 6-2)。足関節内ではいずれの条件においても背屈/底屈による負の仕事量が最も大きかった (表 6-2)。

支持脚膝関節では両条件とも接地からの屈曲角速度が顕著であった (図6-3)。時系列データから30%時点付近で条件間に有意差があることが示されたが ( $p<0.05$ ) (図 6-3)，支持局面中の屈曲角速度のピーク値 (最大条件： $-579.8\pm90.5\text{deg/s}$ ，最大下条件： $-629.5\pm78.7\text{deg/s}$ ) には条件間で有意差はみられなかった。また、およそ75%時点以降に生じる伸展角速度には条件間で有意差があり ( $p<0.05$ ) (図6-3)，そのピーク値 (最大条件： $201.6\pm58.3\text{deg/s}$ ，最大下条件： $86.4\pm77.2\text{deg/s}$ ) は最大下条件の方が有意に低かった ( $p<0.05$ )。膝関節の関節トルクパワーは、いずれの条件においても支持脚接地後から負のパワーが発揮された。また、支持局面中の負の仕事量に有意差はみられなかった (表6-2)。その後、支持局面の後半のおよそ75%以降において、両条件とも正のパワー発揮に転じた (図6-3)。また、この正のパワー発揮は最大下条件が有意に低く ( $p<0.05$ ) (図6-3)，支持局面中の正の仕事量は最大下条件が最大条件より有意に小さかった (表6-2)。

各条件における股関節の関節角速度のパターンは、いずれの軸回りの動きにおいても類似していた (図 6-4)。しかしながら、そのピーク値には条件間で差がみられた。内転角速度のピーク値 (最大条件： $418.3\pm61.5\text{deg/s}$ ，最大下条件： $307.9\pm76.7\text{deg/s}$ ) は支持局面の中盤に出現し、最大条件と比較して最大下条件が有意に低かった ( $p<0.05$ )。また、キック中ほぼ一貫して生じていた伸展の角速度は、40%時点付近を除いて有意差がみられた ( $p<0.05$ ) (図 6-4)。支持局面の後半に示される伸展角速度のピーク値 (最大条件： $-656.7\pm114.3\text{deg/s}$ ，最大下条件： $-434.6\pm128.2\text{deg/s}$ ) は絶対値でみると最大下条件が最大条件より有意に小さかった ( $p<0.05$ )。内旋と外旋においても、支持局面中の外旋角速度のピーク値 (最大条件： $657.2\pm229.9\text{deg/s}$ ，最

膝関節  
伸展/屈曲

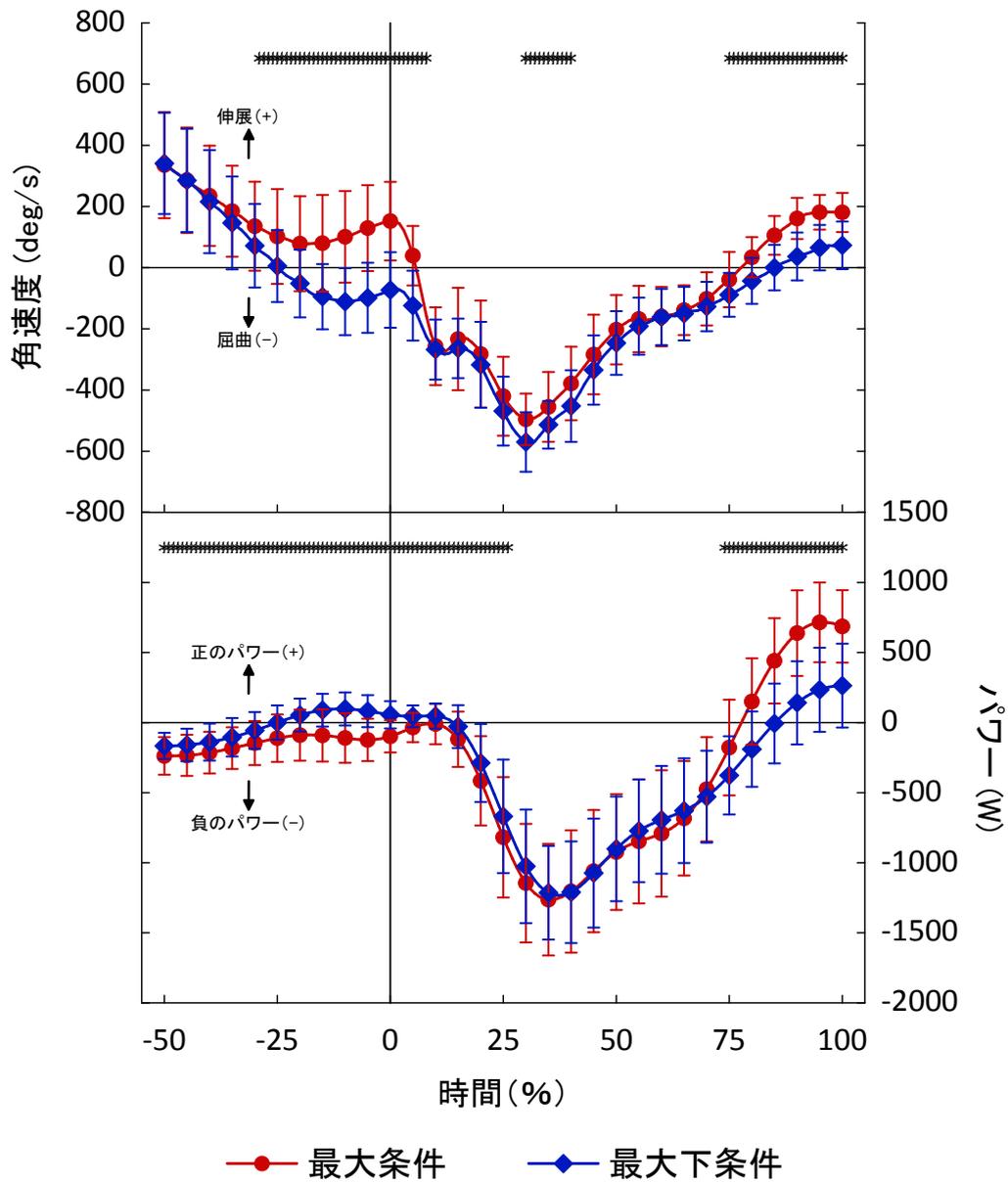


図 6-3 各条件における支持脚膝関節の関節角速度と関節トルクパワー  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した  
 \*：最大条件 vs 最大下条件 ( $p < 0.05$ )

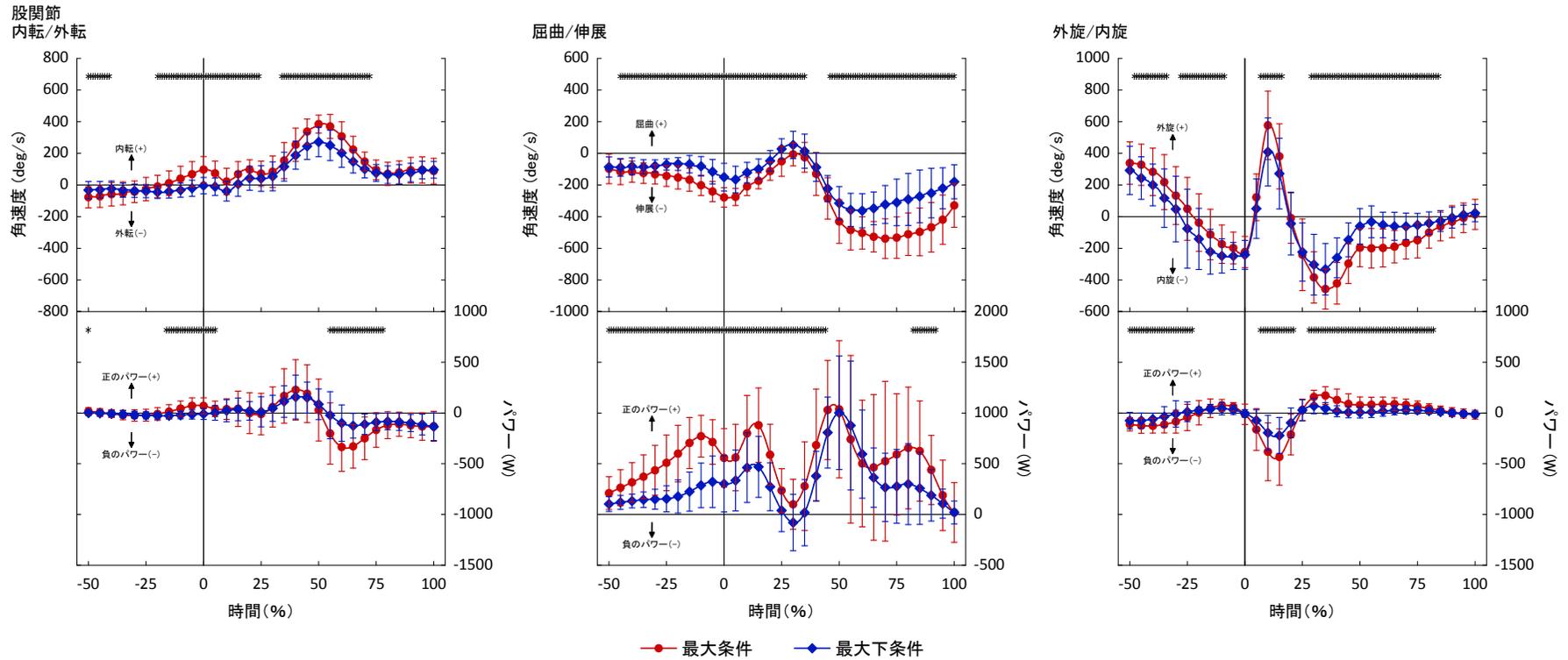


図 6-4 各条件における支持脚股関節の関節角速度と関節トルクパワー  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した  
 \*：最大条件 vs 最大下条件 ( $p < 0.05$ )

最大下条件：497.4±213.2deg/s)と内旋角速度のピーク値(最大条件：-547.5±134.6 deg/s, 最大下条件：-435.9 ±108.7deg/s)の絶対値はともに最大下条件が最大条件よりも小さく、有意差がみられた( $p<0.05$ )。股関節の関節トルクパワーにおいては両条件とも屈曲/伸展による正のパワー発揮が最も顕著であった(図6-4)。そして、この正のパワー発揮は、およそ40%時点から75%を除いて、最大下条件が最大条件より有意に低い値を示した( $p<0.05$ ) (図6-4)。さらに、このパワーによる正の仕事量にも有意差がみられ、最大下条件が最大条件より有意に小さかった(表6-2)。

#### 6.3.4 腰部の回旋角速度と腰部の回旋に寄与するパワー

図 6-5 には各条件における腰部の回旋角速度を、図 6-6 には支持脚側から腰部の回転運動エネルギーの増減に寄与する2つのパワーとして、関節トルクに由来するパワーと関節間力に由来するパワーをそれぞれ示した。いずれの条件においても支持局面において上方からの視点で反時計回りの腰部の回旋角速度が顕著になった。また、空中局面であるおよそ-20%時点からボールインパクトの直前まで、この回旋角速度は、最大下条件が最大条件より有意に低い値を示した( $p<0.05$ ) (図 6-5)。回旋角速度のピーク値(最大条件：317.7±62.9deg/s, 最大下条件：210.4±79.7deg/s)も、最大下条件が最大条件より有意に小さかった( $p<0.05$ )。関節トルクに由来し腰部の回転運動エネルギーに寄与するパワーは支持脚接地から支持局面の中盤までは一定の傾向がみられなかったが、中盤以降は負のパワーが発揮され、条件間で有意差がみられた( $p<0.05$ ) (図 6-6)。また、支持局面中の正の仕事量(最大条件：7.0±5.0J, 最大下条件：5.0±3.7J)には、有意差はみられなかったが、負の仕事量(最大条件：-9.6±4.8 J, 最大下条件：-4.2±4.0J)は絶対値でみると最大下条件が最大条件よりも有意に小さかった( $p<0.05$ )。関節間力に由来し腰部の回転運動エネルギーに寄与するパワーは両条件ともに支持局面に

腰部の回旋角速度

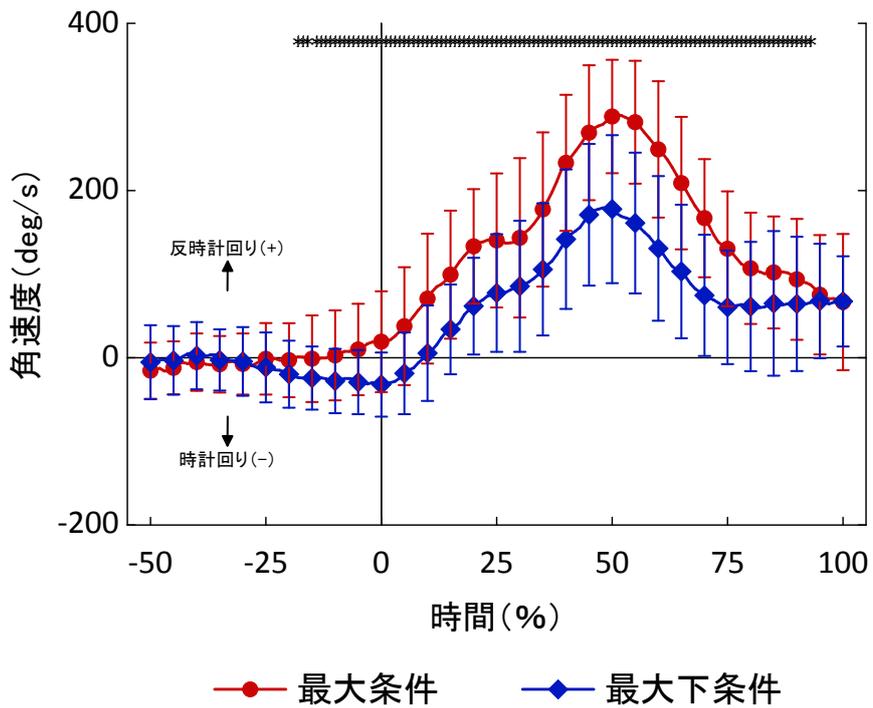
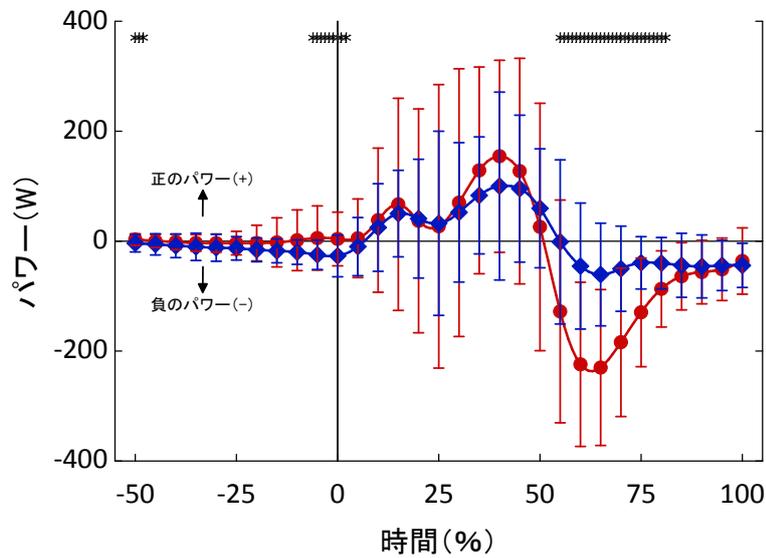
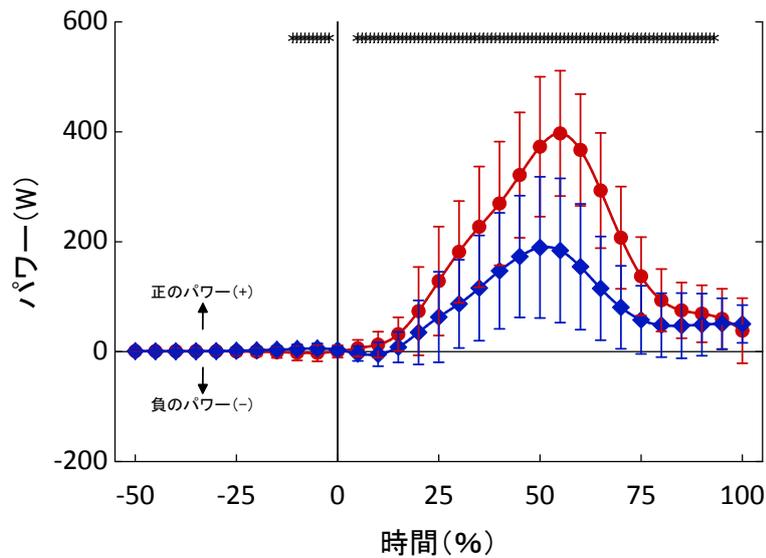


図 6-5 各条件における腰部の回旋角速度  
 支持脚接地を 0%，ボールインパクトを 100%とし，時間を標準化した  
 値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し，標準偏差を示した  
 \* : 最大条件 vs 最大下条件 ( $p < 0.05$ )

関節トルク由来のパワー



関節間力由来のパワー



—●— 最大条件      —◆— 最大下条件

図 6-6 腰部の回転運動エネルギーの増減に寄与する支持脚股関節トルク由来のパワーと関節間力由来のパワー  
 支持脚接地を 0%, ボールインパクトを 100%とし、時間を標準化した値は平均値で示した  
 標準化時間 5%毎にマークを付し、標準偏差を示した  
 \* : 最大条件 vs 最大下条件 ( $p < 0.05$ )

において顕在化した。そして、この関節間力に由来するパワーはいずれの条件においても支持局面を通しておよそ正の値を示した。また、このパワーは、支持局面の大部分において最大下条件が最大条件よりも有意に低い値を示した（図 6-6）（ $p<0.05$ ）。支持局面における正の仕事量は最大条件： $19.9\pm 6.1\text{ J}$ ，最大下条件： $11.0\pm 7.7\text{ J}$  となり，最大下条件が最大条件よりも有意に小さかった（ $p<0.05$ ）。

## 6.4 考察

### 6.4.1 最大下努力における試技

本研究のように正確性を重視した最大下努力でのキックとスピードを重視した最大努力でのキックを比較した先行研究 (Andersen and Dörge, 2011; Lees and Nolan, 2002) は、正確性を重視することでボール速度が低下することを示しており、その低下率は 7.3% から 25.5% であった。本研究においても、全ての被験者のボール速度が最大下努力 (最大下条件) のキックにおいて低くなり、条件間には有意差がみられた (表 6-1)。また、その低下率は 7.1% から 39.7% であった。先行研究と比較して低下率が大きい被験者は存在するものの、全ての被験者が最大下努力でのインステップキックを行うことができていた。

### 6.4.2 足部速度とボール速度

本研究における最大下条件のボールインパクト直前の蹴り脚の足部速度は最大条件と比較して有意に低かった (表 6-1)。この足部速度は身体重心の並進速度と身体重心に対する相対的な蹴り脚足部の並進速度の和としてみることができる。ボールインパクト直前の重心速度は、最大下条件が最大条件より有意に低い値であった (表 6-1)。また、ボールインパクト時点における重心に対する蹴り脚の足部速度を算出したところ最大条件 :  $15.8 \pm 0.9 \text{ m/s}$ , 最大下条件 :  $13.1 \pm 1.5 \text{ m/s}$  となり最大下条件が最大条件より有意に低かった ( $p < 0.05$ )。重心に対する蹴り脚の足部速度は重心から蹴り脚足部までの部分の動き、すなわち蹴り脚のスイング動作で得られた速度と言い換えることができる。これらのことから、最大下努力でのインステップキックでは、身体重心の移動速度と蹴り脚のスイング速度の両方が低いことで、蹴り脚の足部速度が低くなり、ボール速度が抑制されるものであると考えられた。

ボールインパクトの効率を表すボール速度・足部速度比についてはプロサッカー

一選手 2 名を対象とした Lees and Nolan (2002) の研究によって、最大下努力と最大努力のインステップキックの間に差はみられないことが報告されている。しかしながら、本研究ではボール速度-足部速度比にも条件間で有意差が認められた (表 6-1)。これらのことから本研究の結果では、先行研究とは異なり、蹴り脚の足部速度だけでなく、ボールインパクトの仕方、例えば足部とボールの接触位置を変えることなども、ボール速度を制御することに関わることが明らかとなった。

#### 6.4.3 助走速度と地面反力

支持脚に作用する地面反力の大きさは、支持局面の大部分で最大下条件が最大条件よりも有意に低い値を示した (図 6-1)。そして、ピーク値と支持局面中の力積は、最大下条件が最大条件より有意に小さかった。助走速度 (支持脚接地直前の身体重心速度) においても最大下条件が最大条件と比較して有意に低かった (表 6-1)。身体が持つ運動量は身体質量と身体重心速度の積で得られる。よって、助走することで身体が獲得した支持脚接地直前の運動量は最大下努力におけるキックの方が小さくなると言える。この運動量の差が接地時の地面反力の大きさに違いを生じさせると考えられた。実際に、ランニングに関する研究では、走速度の増加に伴い、地面反力が増加することが報告されている (Keller et al., 1996)。

#### 6.4.4 支持脚の接地における支持脚各関節の動作とエネルギー

最大努力でのインステップキックを分析した第3章の結果から、最も遠位の関節である支持脚の足関節には接地によって立ち上がる地面反力の影響を受けて、急激な動作が受動的に引き起こされることが分かった。また、支持脚の膝関節は屈曲しながら伸展トルクを発揮することで、地面反力を緩衝しながら身体を支持する役割を果たすことが明らかとなった。本章の結果から、最大下努力でのキック

クにおいても支持脚の足関節には支持脚接地後、角速度の急上昇がみられ、さらに、足関節の背屈/底屈、内反/外反、内転/外転のすべてにおいて負の関節トルクパワーの発揮がされていた（図6-2）。すなわち、足関節では、筋や腱によってエネルギー吸収がなされていた。したがって、足関節の動きは最大下努力のキックにおいても最大努力と同様、関節トルク発揮ではなく地面反力によって受動的に引き起こされると考えられた。さらに、先述のように接地によって作用する地面反力の大きさは最大下条件が最大条件よりも有意に小さかった。足関節の動きの速さは、それに対応するように条件間で違いがみられ、接地直後に出現する底屈と内反、外反それぞれの角速度のピーク値は最大下条件が最大条件より有意に低くなっていた。これも、支持脚足関節の動きは地面反力の影響を受けるという結果を支持するものであると考えられる。

支持脚膝関節においても、足関節と同様に両条件ともに支持脚接地からボールインパクト直前まで負の関節トルクパワーが発揮されていた。また、この支持脚接地後の局面においてはいずれの条件においても、屈曲動作が行われていた（図6-3）。しかしながら、この屈曲角速度のピーク値と支持局面中の負の仕事量には、条件間で有意差がみられなかった（表6-2）。これらのことから、最大下努力と最大努力のキックにおいて接地後、支持脚の膝関節で吸収されるエネルギーに差はなく、両条件とも同程度のエネルギーが膝関節の緩衝動作によって吸収されていたと言える。

支持脚股関節では足関節、膝関節とは異なり、両条件とも屈曲/伸展における正の関節トルクパワーの発揮が支持脚接地の前後で顕著であった（図6-4）。股関節の角速度をみると、いずれの条件においても伸展角速度を増大させながら接地した後に、伸展角速度が低下していた（図6-4）。これらのことから、この局面における正の関節トルクパワーの発揮は、接地によって受ける外力に抵抗しながら支持脚股関節の伸展トルクを発揮し伸展動作を維持することで身体を積極的に支え

る役割を担っていると考えられた。また、この正のパワー発揮は、接地を示す0%時点を越えて最大下条件が最大条件より有意に低い値を示した(図6-4)。同様に、股関節の屈曲/伸展角速度においても、0%時点を越えて両条件間に有意差がみられ、最大下条件の伸展角速度が最大条件のそれよりも有意に低かった(図6-4)。ランニング動作や、走り幅跳びの助走動作では、接地後、伸展トルク発揮によって股関節を伸展させることが知られている(馬場ら, 2000; Muraki et al., 2008)。サッカーのキックにおける助走でも同様のトルク発揮が行われていたと考えられる。先述のように本研究では最大下条件の助走速度が最大条件より有意に低かった。これらのことから、最大下努力でのインステップキックにおいて、支持脚接地前後の局面で股関節周りの伸筋群によるエネルギー発生が小さく、股関節の伸展動作が遅いことは、助走による走速度が低いことに関連があると考えられた。

#### 6.4.5 蹴り脚の足部速度に寄与する支持脚の動作

第3章、第4章の結果から最大努力でのインステップキックでは、ボールインパクト直前の局面にみられる支持脚膝関節の伸展トルク発揮に伴う伸展動作が蹴り脚のスイングを加速させると考えられた。本章で焦点を当てた最大下努力のインステップキックにおいても、ボールインパクト直前の局面では支持脚膝関節は伸展し、正の関節トルクパワーが発揮されていた(図6-3)。しかしながら、この伸展角速度と正の関節トルクパワーには条件間で有意差があり(図6-3)、伸展角速度のピーク値と正の仕事量も、最大下条件が最大条件より有意に低い値を示した(表6-2)。先述のようにボールインパクト時点における身体重心に対する相対的な蹴り脚の足部速度、すなわち、蹴り脚のスイングによって獲得する足部速度は最大下条件で有意に低くなっていた。これらのことから、最大下努力でのインステップキック動作では、支持脚膝関節周りの筋や腱によるエネルギーの発生が小さくなり、蹴り脚のスイングの加速に寄与する支持脚膝関節の伸展動作の発

現が抑えられたと考えられる。そして、最大努力でのインステップキックのように蹴り脚のスイングの加速が行われず、結果として蹴り脚の足部速度が低くなることが示唆された。

ボールインパクト前の局面では、支持脚股関節においても正のパワー発揮を伴う伸展動作が生じており、接地を契機に一旦は低下した伸展角速度が 30% 時点付近からボールインパクトに向けて再び増加していた (図 6-4)。また、このボールインパクト前の局面において、伸展角速度と正のパワー発揮の大きさは、最大下条件が最大条件と比較して有意に低くなった (図 6-4)。この局面における股関節の伸展動作は接地した足部を支点とし身体全体を前方に動かすことに作用する。したがって、最大下努力でのキックではこの伸展動作を抑制することで、ボールインパクト時の身体重心の移動速度が低く保たれたと考えられる。そして、このことは、ボールインパクト時の蹴り脚の足部速度を抑えることにつながると考えられた。

#### 6.4.6 腰部の回旋動作と支持脚から腰部に流入するエネルギー

腰部の回旋角速度は接地前からボールインパクトの直前まで、最大下条件が最大条件より有意に低く (図 6-5)、支持局面における上方からの視点で反時計回りの腰部の回旋角速度が顕著であった。また、この角速度のピーク値は、最大下条件が最大条件より有意に低かった。つまり、最大下努力でのインステップキックでは特に支持局面において、腰部の上方からの視点で反時計回りの回旋角速度が低下していた。ここでは、腰部の回転運動エネルギーの増減に寄与する 2 つのパワーである関節トルクに由来するパワーと関節間力に由来するパワーからこの腰部の回旋角速度に違いを生じさせる要因について検討する。

関節トルクに由来するパワーは、支持局面の前半においては一定の傾向はみられず、後半で負の値を示した (図 6-6)。ここでの正の仕事量は、股関節における

関節トルクの発揮によって腰部に流入するエネルギーを表す。この正の仕事量を 2 つの条件間で比較すると有意差はなく、最大下努力においても最大努力と同程度であった。したがって、条件間にみられる腰部の回転運動エネルギーの差、ひいては、腰部の反時計回りの回旋角速度の差に結びついているとは考えにくい。一方、支持脚股関節の関節間力に由来し腰部の回転運動エネルギーに寄与するパワーは、支持局面を通して正の値を示しており（図 6-6）、そのパワーによる正の仕事量は最大下条件が最大条件より有意に小さかった。よって、最大下努力のインステップキックにみられる腰部の回旋角速度の低下は、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ることで起こると考えられた。

第 3 章の結果によって、腰部の回旋は地面反力が支持脚を介して支持脚股関節の関節間力として腰部に作用することで引き起こされることが示された。先述のように、最大下努力でのキックにおける助走速度は最大努力のそれと比較して低く、支持脚に作用する地面反力が小さくなっていた。よって、最大下努力のインステップキックにおいて腰部の回旋角速度が遅くなった背景には、助走速度が抑制されることにより地面反力が小さくなり、その結果、支持脚股関節の関節間力が腰部に対して行う正の仕事量が減少したことが考えられる。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り、Lees and Nolan (2002) は腰部の回旋量の低下が、蹴り脚の動作速度の低下に関与することを示唆している。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腰部の回旋が遅くなることが一因となり、その後続く一連のスイング動作が遅くなる可能性が考えられた。助走速度の違いは単にボールインパクト時の身体の並進速度の違いを生み、蹴り脚の足部速度を低くするだけでなく、腰部の回旋を通して蹴り脚のスイング動作自体を遅くすることにも作用することが示唆された。

## 6.5 結言

本章では、関節トルクパワーや仕事量から最大下努力でのインステップキック動作を、最大努力でのインステップキック動作と比較することで、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と腰部の動きの特徴を力学的に明らかにした。

その結果、以下のことが示された。

1. 最大下努力のインステップキックでは助走速度と蹴り脚のスイング速度、ボールインパクトの効率が低下することでボール速度が低くなった。
2. 最大下努力のインステップキックでは助走速度が低くなったことで、支持脚に作用する地面反力が小さくなった。
3. 最大下努力のインステップキックでも支持脚足関節には地面反力による受動的な動作が生じたが、その角速度は最大努力のインステップキックと比較して低かった。
4. 最大下努力のインステップキックにおいても支持脚膝関節は負のパワー発揮をし、最大努力のインステップキックと同程度のエネルギーを吸収した。
5. 最大下努力のインステップキックではボールインパクト直前の支持脚股関節と膝関節における正のパワー発揮が抑制され、蹴り脚の足部速度が低くなることが考えられた。
6. 最大下努力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と考えられた。

以上のことから、最大下努力のインステップキックでは、助走速度が低下することを受け、地面反力が低下し、支持脚足関節の受動的な動きや腰部の回旋速度が抑制さ

れることが考えられた。また，最大下努力のインステップキックにおいて蹴り脚のスイング速度が低下する要因として，支持脚の膝関節の伸展動作を抑え，蹴り脚のスイングの加速を制限することが考えられた。

## 第7章 総合考察

本論文における研究の趣旨は、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における分析手法によって力学（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や競技パフォーマンスの向上に寄与する知見を得ようとするものであった。これまでの先行研究では、インステップキック動作に対して運動力学的な分析が行われ、その動作を発生させる力学的要因が詳細に明らかにされてきた。そして、ボールを蹴る際、競技者がどこにどのような力を作用させているかといった力発揮の感覚につながる知見が積み上げられてきた。しかしながら、これらの先行研究は蹴り脚の動作に着眼したものが多く、支持脚や腰部の動きに対しては十分に議論されていなかった。よって本論文では、サッカーの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発生の力学的な仕組みについて明らかにすること目的として研究を進めてきた。さらに本研究ではより実践的な状況におけるインステップキックにまで対象を広げ、様々な方向にボールを蹴り出す場合や、ボール速度をコントロールする場合において支持脚と腰部の動きの力学的な特徴を解明することも試みた。

本研究で定義している両脚が地面から離れている空中局面と支持脚が接地している支持局面は、外力として地面反力が作用するか否かの違いがある。すなわち、これらの局面を分ける支持脚の接地は力学的に大きな意味を持つ。本研究では各種インステップキック動作の支持脚各関節の関節角速度と関節トルク、関節トルクパワーを求めたことで、この接地が支持脚の振る舞いに強く影響を与えることが分かった。まず、任意の助走から特定の1方向に向けて最大努力でボールを蹴る基本的なインステップキックを分析した第3章の研究において、支持脚の足関節には接地を契機とする急激な底屈、及び内外反動作が生じていた。この際、目立った関節トルクの発揮はなく地面反力の作用開始がこれらの動作の引き金とな

っていたことから、支持脚足関節の動作は地面反力によって受動的に生じたと考えられた。さらに、第6章において、最大下努力でのキックでは最大努力のキックと比較して支持脚足部に作用する地面反力が小さく、足関節の底屈、及び内外反角速度も低くなっていた。このことから、支持脚足関節の動作が地面反力の影響を強く受けるものであると考えることが妥当であった。したがって、接地後の足関節や足部自体の挙動は足部を地面に対してどのように接地させるのかによって決まると言える。実際に、様々な方向へボールをインステップキックする動作を分析した第5章の研究から、競技者は、ボールを蹴り出す方向によって足部の接地の仕方を変化させることが分かった。助走角度が大きいキック試技では、支持脚足部を床面に対して平行に近い状態で接地し、接地後の足関節底屈角度変化を小さくしていた。そしてこの動作の違いが、接地直後の足部の水平面内における回旋動作を引き起こし、結果として腰部の回旋量の増加に寄与することも明らかとなった。接地直後の支持脚の足関節、及び足部の動きは地面反力に支配され、足関節におけるトルク発揮では制御できないため、接地前の局面における足部の姿勢が重要になると言え、本研究の結果からは、通常キックでは踵から接地するが、とりわけ助走に対して角度がついた方向にボールを蹴る場合は、足底全面でフラットに接地する方が良いと考えられた。

支持脚の膝関節においても、足関節と同様に支持脚接地を契機とする動作がみられた。支持脚の膝関節は、接地後の局面において屈曲しながらも伸展トルクを作用させ、負のパワー発揮をしていた。このパワー発揮は、接地の衝撃を緩衝する役割があると考えられた。このような緩衝動作は、基本的なインステップキック（第3章）のみならず、様々な方向へのキック（第5章）や最大下努力でのキック（第6章）にも共通してみられた。インステップキック動作中、支持脚によって十分に身体を支えるためには、接地によって作用する地面反力に抵抗しながら支持脚の膝関節を伸展させる力を作用させることが必要になると言える。

一方、接地後の局面では衝撃を緩衝する役割をしていた支持脚の膝関節はボールインパクト直前においては蹴り脚のスイングの加速に貢献することが明らかとなった。過去の研究により、蹴り脚の下腿の近位端に作用する動作依存トルクがボールインパクト直前の局面において蹴り脚の下腿のスイングを加速させることが解明されている (Nunome et al., 2006a)。また、この動作依存トルクは蹴り脚側の股関節を上方へ加速させることで生じるため、支持脚の動作が重要になることが示唆されている (布目, 2004; Nunome and Ikegami, 2005)。本研究の第 4 章では、蹴り脚のスイング動作に対する支持脚の貢献を定量的に示し、蹴り脚の下腿のスイングの加速の要となる動作依存トルクのうちのおよそ 70% が支持脚の作用によって生じていることを明らかにした。さらに、このトルクの発生には支持脚側の股関節の上方への加速が貢献することを示した。つまり、支持脚側の股関節が上方に加速されることによって、蹴り脚の高いスイング速度を獲得でき、インステップキックのパフォーマンスが改善されると考えられる。

基本的なインステップキックだけでなく、各種方向へのインステップキックも含め、最大努力で行うインステップキック (第 3 章, 第 5 章) では、支持局面における支持脚膝関節の一貫した伸展トルクの発揮がみられた。また、支持脚膝関節は接地後に屈曲し、ボールインパクトの直前において伸展した。したがって、膝関節周りの腱を含む伸筋群が伸張しながら張力を発揮した後に、伸展動作が生じたと考えることができる。つまり、ボールインパクト直前の膝関節伸展動作は筋腱複合体に蓄えられる弾性エネルギーを利用して生じた可能性が考えられた。支持脚足部を接地して支持脚の膝関節を伸展させることは、身体全体を上方へ押し上げることに繋がる。最大努力でのインステップキックにおいて共通してみられる支持脚の膝関節の正のパワー発揮による伸展動作が、蹴り脚の下腿に作用する動作依存トルクを生じさせると考えられた。よって、高い速度のボールを蹴り出すためには、支持脚の膝関節を使い上方へ飛び上がるようにインステップキ

ックをするように指導することが効果的であると考えられる。一方、最大下努力でのインステップキックを分析した第 6 章の結果から、ボール速度を制限するような場合にはこの支持脚膝関節の伸展動作が抑制されることが明らかとなった。ボール速度をコントロールするような状況では、最大努力でのキックとは反対に、動作依存トルクによる蹴り脚下腿の加速を制限するために、支持脚の膝関節による上方への飛び上がりを抑えてキックする必要があると考えられた。

本論文の研究では、腰部の回旋動作においても新たな知見を示すことができた。腰部の回旋の発生には、支持脚と腰部を連結する支持脚股関節における力学的な相互作用が重要であることが明らかとなった。通常のインステップキック（第 3 章）における腰部の回旋は、支持脚股関節での関節トルク発揮よりもむしろ支持脚側の股関節を通して関節間力として作用する地面反力によって生じることが分かった。つまり、腰部の回旋には地面反力の作用が重要であり、筋の作用によって積極的に支持脚の股関節を捻転させて腰部を回旋させる必要はないと考えられた。したがって、インステップキックにおける腰部の回旋動作を改善するためには、地面反力が関節間力として腰部に有効に働くよう支持脚の接地位置とその際の腰部の姿勢を指導することなどが効果的だろう。

しかしながら、より実践的なインステップキック（第 5 章、第 6 章）では、通常のインステップキック動作と異なる力発揮が行われていた。助走に対してボールを蹴り出す角度が大きくなるほど、関節間力だけでなく支持脚股関節での関節トルクの発揮を大きくし腰部を回旋させていることが分かった。一方で、最大下努力でコントロールされたボールを蹴ろうとするときは、腰部の回旋動作を抑えるために、助走を制限し、地面反力を小さくすることで、腰部への関節間力によるエネルギー流入を減らしていた。これらのことから、大きく角度のある助走を伴うボールキック動作というような高度な技術指導においては、支持脚股関節によって積極的に腰部を回転させるような力発揮を意識させる必要があると言える。

また、ボール速度をコントロールしてボールを蹴る際には、ボールヘアプローチする速度を制御させることで、腰部の回旋動作を制限することが必要になると言える。つまり、腰部の回旋を生む作用は状況によって異なるため、画一的な指導ではなく、その状況に合わせた応用的な指導を行う必要がある。

ここまで示したように、サッカーの実践や指導の現場におけるインステップキック技術指導に有効なバイオメカニクスの知見が新たに明らかになった。しかしながら、さらにこの分野における研究を発展させるには、本研究の限界を理解し、次段階に研究を進める必要があると考えられる。まず、本研究では両脚から腰部に作用するトルクを求めているが、上胴から腰部に作用するトルクについては検討していない。より速いボールをキックする場合には上半身を動かす必要があることが先行研究によって指摘されており (Shan and Westerhoff, 2005)、上胴からの何らかの力学的な作用が腰部の動作に影響を及ぼすことが考えられる。腰部のセグメントの質量や慣性能率を精度良く推定する必要があるなど研究上の課題も多いが、頭部や上肢を含めて身体の運動方程式を解くことで、上胴からの力学的な作用が腰部に与える影響についても今後検討する必要があるだろう。

本研究で用いたリンクセグメントモデルによる運動力学的な分析は、関節トルクと関節角速度を算出し、力発揮の方向と運動の方向について検討することで筋または腱によるパワー発揮について推定できる。しかしながら、このモデルから算出される関節トルクは、セグメントに作用する正味の駆動力から見積もったものであるため、特定の筋や腱の振る舞いについては記述することができない。これはリンクセグメントモデルによる力学的分析が持つ限界である。したがって、今後は、リンクセグメントモデルだけではなく、筋腱複合体のバイオメカニクスに関する知見と合わせて考察を行う必要もあるだろう。

本研究では、これまでの先行研究よりも実践的なインステップキック動作を対象を拡張し分析を試みてはいるが、実験実施上の制約から対象となる動作は、静

止したボールを蹴る動作に限られたものであった。実際のゲーム中はプレスキックを除き、ほとんどの場合で動いているボールを蹴る必要がある。よって、より実践的な知見を得るためには、動いているボールに対するキック動作について研究することを避けて通れないだろう。

本研究では、特定のレベルのサッカー競技者を対象とし、平均的なインステップキック動作について議論した。したがって、本研究で得られた結果は熟練したサッカー競技者に共通する基本的な動作の特徴であると考えられるべきであろう。今後は異なる技術レベルのサッカー競技者の動作の比較に関する研究や、個々の競技者の動作の特徴や個人差に関する研究も行う必要があるだろう。

上述のような今後の課題もあるが、本論文における研究によってこれまで知られていなかった支持脚各関節の力発揮の様相や腰部の回旋動作の力学的な発生要因が解明された。そして、サッカーのキック動作に関するバイオメカニクス的な研究が前進したと言える。本研究で明らかとなったサッカーのインステップキック動作の力学的な発生機序に関する知見が応用され、サッカー指導の現場に生かされることが期待される。

## 第8章 総括

本研究では，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うことで，その動きの発生の仕組みや蹴り脚への貢献について明らかにした．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した．

得られた知見を以下に示す．

### 1. インステップキック動作における腰部・支持脚の運動力学的分析(第3章)

支持脚の足関節には，関節トルクの発揮を伴わない動作が支持脚の接地を受けて受動的に生じていた．また，支持脚膝関節の伸展トルクの発揮は接地の衝撃を緩衝する役割を果たしていた．さらに，右脚でのキックでみられる上方からの視点で反時計回りの腰部の回旋動作は，地面反力に起因する支持脚股関節の関節間力によって加速し，支持脚股関節の関節トルクによって減速していた．

### 2. インステップキックにおける蹴り脚のスイングに対する支持脚の貢献(第4章)

蹴り脚の下腿に作用しスイングを加速させる動作依存トルクの発生には，蹴り脚だけでなく支持脚の動作も貢献していた．

### 3. 異なる方向へのインステップキック動作における腰部・支持脚の運動力学的分析(第5章)

助走方向に対し，より異なる方向にボールをキックするほど，支持脚接地後の腰部の回旋量が増加した．また，この腰部の回旋量の増加は，支持脚股関節の関節ト

ルク発揮を増大させること、助走の慣性によって支持脚足部を床面に対してスライドさせることによってもたらされた。

#### 4. 最大下努力でのインステップキック動作における腰部・支持脚の運動力学的分析 (第6章)

最大下努力のインステップキックでは、支持脚に作用する地面反力が低下し、支持脚足部の受動的な動作が小さくなった。また、最大下努力のインステップキックでは、ボールインパクト直前における支持脚膝関節の正のパワー発揮による伸展動作が抑制された。さらに、最大下努力のインステップキックでは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減少し、腰部の回旋角速度が低下した。

本博士論文では、基礎的なインステップキック動作と2つの実践的なインステップキック動作の腰部と支持脚に対する運動力学的な分析を行い、これらの動作が生じる力学的要因について明らかにした。支持脚足関節の動作は関節トルクのパワー発揮ではなく、接地時に作用する地面反力によって受動的に生じることが示された一方で、支持脚膝関節は伸展トルクによって負のパワー発揮をすることで地面反力による衝撃を吸収していた。また、ボールインパクト直前の局面における支持脚膝関節の正のパワー発揮による伸展動作は、蹴り脚の下腿のスイング動作に影響を及ぼすと考えられた。腰部の回旋動作の発生には支持脚の股関節から腰部に作用する関節トルクと関節間力が関わっており、状況に応じこれらの作用の大きさを変化させることで、腰部の回旋量を制御していることが示された。

以上のように、本博士論文によって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動作における支持脚各関節の役割や腰部の回旋動作の発生の力学的要因について明らかにすることができた。つまり、インステッ

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、キック技術上達のポイントを力学的な観点から示すことや、競技者と指導者がキック動作における力発揮の感覚を共有することなど、サッカーのキック技術指導において有効な情報になることが期待される。

## 謝辞

本博士論文を作成するに際し、名古屋大学総合保健体育科学センター 布目寛幸 准教授（現 福岡大学スポーツ科学部 教授）、池上康男 教授（現 愛知淑徳大学健康医療科学部 教授）には懇切丁寧な御指導と的確な御助言を賜りました。心より感謝の意を表します。また、名古屋大学総合保健体育科学センター 秋間広教授には寛大な御心で御指導，御鞭撻を賜りました。深く感謝し，御礼申し上げます。

名古屋大学総合保健体育科学センター 蛭田秀一 教授，佐々木康 教授には審査の過程においてご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。また，名古屋大学総合保健体育科学センター 石田浩司 教授，片山敬章 准教授には定例研究会などにおいて研究分野を超えた貴重な御助言や激励を賜りました。深く感謝申し上げます。

新海宏成 氏をはじめ，スポーツバイオメカニクス研究室関係者の佐藤菜穂子 氏，辻本典央 氏，伊賀崇人 氏，佐野真也 氏，水藤弘吏 氏には，実験の実施やデータの分析にあたって多くのご協力やアドバイスを頂きました。心より御礼申し上げます。

最後に，実験に被験者として御協力下さった方々，院生生活でお世話になりました名古屋大学総合保健体育科学センターの方々に感謝致します。

## 参考文献

阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志 (1992): 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. バイオメカニズム 11: 23-33

Andersen TB, Dörge HC (2011): The influence of speed of approach and accuracy constrain on the maximal speed of the ball in soccer kicking. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 21: 79-84

Apriantono T, Nunome H, Ikegami Y, Sano S (2006): The effect of fatigue on instep kicking kinetics and kinematics in association football. *Journal of Sports Sciences* 24: 951-960

浅井武, 布目寛幸 (2002): 見方が変わるサッカーサイエンス., pp. 73-104, 岩波書店, 東京, 日本

Asami T, Nolte V (1983): Analysis of powerful ball kicking. In: *Biomechanics VIII-B*. Matsui H, Kobayashi K (eds.), pp. 695-700, Human Kinetics, Champaign, IL, USA

馬場崇豪, 和田幸洋, 伊藤章 (2000): 短距離走の筋活動様式. *体育学研究* 45: 186-200

Barfield WR (2000): Biomechanics of kick. In: *Exercise and Sport Science*. Garret WE, Kirkendall DT (eds.), pp. 551-562, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA, USA

Clagg SE, Warnock A, Thomas JS (2009): Kinetic analyses of maximal effort soccer kicks in female collegiate athletes. *Sports Biomechanics* 8: 141-153

Davis R, Ounpuu S, Tyburski D, Gage J (1991): A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science* 10: 575-587

Dörge HC, Andersen TB, Sørensen H, Simonsen EB (2002): Biomechanical differences in soccer kicking with the preferred and the non-preferred leg. *Journal of Sports Sciences* 20: 293-299

Fédération Internationale de Football Association (n.d.): About FIFA, FIFA.com. <http://www.fifa.com/about-fifa/who-we-are/index.html> (Accessed May 1, 2016)

Fédération Internationale de Football Association (2007): FIFA Big Count 2006. [http://www.fifa.com/mm/document/fifafacts/bcoffsurv/bigcount.statspackage\\_7024.pdf](http://www.fifa.com/mm/document/fifafacts/bcoffsurv/bigcount.statspackage_7024.pdf) (Accessed May 1, 2016)

Feltner ME, Dapena J (1986): Dynamics of the shoulder and elbow joint of the throwing arm during baseball pitch. *Journal of Sports Biomechanics* 2: 235-259

池田晃一, 磯川正教 (1993): キック動作の三次元分析 - 助走角度の違いからみたインステップキックについて -. 第13回サッカー医・科学研究会報告書: 85-94

磯川正教 (1983): サッカーのインステップキックにおける運動学的な分析. 東京都立大学体育学研究 2: 75-81

磯川正教, 小嶋武次 (1996): インステップキックにおける超高速撮影によるインパクトの解析. 第16回サッカー医・科学研究会報告書: 1-4

磯川正教, 小嶋武次 (1998): インステップキックにおけるスイング速度は脚の長さによって決定される. 第 18 回サッカー医・科学研究会報告書: 189-191

Isokawa M, Lees A (1988): A biomechanical analysis of the instep kick motion in soccer. In: Science and Football. Reilly T, Lees A, Davids K, Murphy WJ (eds.), pp. 449-455, E & FN Spon, London, UK

Katis A, Kellis E (2010): Three-dimensional kinematics and ground reaction forces during the instep and outstep soccer kicks in pubertal players. *Journal of Sports Sciences* 28: 1233-1241

川本竜史, 宮城修, 大橋二郎, 深代千之 (2006): サッカーのインサイドキックにおける speed-accuracy trade off のメカニズム. *バイオメカニクス研究* 10: 235-244

Keller TS, Weisberger AM, Ray JL, Hasan SS, Shiavi RG, Spengler DM (1996): Relationship between vertical ground reaction force and speed during walking, slow jogging, and running. *Clinical Biomechanics* 11: 253-259

Kellis E, Katis A (2007): Biomechanical characteristics and determinants of instep soccer kick. *Journal of Sports Science and Medicine* 6: 154-165

Kellis E, Katis A, Gissis I (2004): Knee biomechanics of the support leg in soccer kicks from three angle of approach. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36: 1017-1028

Lees A, Asai T, Andersen TB, Nunome H, Sterzing T (2010): The biomechanics of kicking

in soccer: A review. *Journal of Sports Sciences* 28: 805-817

Lees A, Nolan L (1998): The biomechanics of soccer: A review. *Journal of Sports Sciences* 16: 211-234

Lees A, Nolan L (2002): Three-dimensional kinematic analysis of the instep kick under speed and accuracy conditions. In: *Science and Football IV*. Spinks W, Reilly T, Murphy A (eds.), pp.16-21, E & FN Spon, London, UK

Lees A, Steward I, Rahmana N, Barton G (2009): Lower limb function in the maximal instep kick in soccer. In: *Contemporary sport, leisure and ergonomics*. Reilly T, Atkinson G (eds.), pp.149-159, Routledge, London, UK

Levanon J, Dapena J (1998): Comparison of the kinematics of the full-instep and pass kicks in soccer. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 30: 917-927

Luhtanen P (1988): Kinematics and Kinetics of maximal instep kicking in junior soccer players. In: *Science and Football*. Reilly T, Lees A, Davids K, Murphy WJ (eds.), pp. 441-448, E & FN Spon, London, UK

Muraki Y, Ae M, Koyama H, Yokozawa T (2008): Joint torque and power of the takeoff leg in the long jump. *International Journal of Sport and Health Science* 6: 21-32

村田宗紀, 藤井範久, 鈴木雄太 (2015): 硬式テニスサーブにおけるエネルギー形態に着目したラケット保持腕の力学的エネルギーフロー. *体育学研究* 60: 177-195

日本サッカー協会 (2014): サッカー選手登録者数, JFA.jp. [http://www.jfa.jp/about\\_jfa/organization/databox/player.html#year1](http://www.jfa.jp/about_jfa/organization/databox/player.html#year1) (Accessed May 1, 2016)

布目寛幸 (2002): キック動作中のトルク, パワーを算出する～サッカーセネガル代表エルアジ・ディウフ選手のキック動作～. 体育の科学 52: 721-726

布目寛幸 (2004): データの平滑化に関する新たな試み. Japanese Journal of Sports Science 8: 172-178

布目寛幸 (2006): 蹴りにおける支持脚の役割. 体育の科学 56: 187-192

Nunome H, Asai T, Ikegami Y, Sakurai S (2002): Three-dimensional kinetic analysis of side-foot and instep soccer kicks. Medicine and Science in Sports and Exercise 34: 2028-2036

Nunome H, Ikegami Y (2005): The effect of hip linear motion on lower leg angular velocity during soccer instep kicking. In: Proceedings of the XXIIIrd Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports. Wang Q (ed.), pp. 770-772, The People Sports Press, Beijing, China

Nunome H, Ikegami Y, Kozakai R, Apriantono T, Sano S (2006a): Segmental dynamics of soccer instep kicking with the preferred and non-preferred leg. Journal of Sports Sciences 24: 529-541

Nunome H, Lake M, Georgakis A, Stergioulas LK (2006b): Impact phase kinematics of

instep kicking in soccer. *Journal of Sports Sciences* 24: 11-22

Orloff H, Sumida B, Chow J, Habibi L, Fujino A, Kramer B (2008): Ground reaction forces and kinematics of plant leg position during instep kicking in male and female collegiate soccer players. *Sports Biomechanics* 7: 238-247

Putnam CA (1991): A segment interaction analysis of proximal-to-distal sequential segment motion patterns. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 23: 130-144

Roberts EM, Metcalf A (1968): Mechanical analysis of kicking. In: *Biomechanics I*. Wartenweiller J, Jokl E, Hebbelink M (eds.), pp. 315-319, Karger, Basel, France

Rodano R, Tavana R (1993): Three-dimensional analysis of instep kick in professional soccer players. In: *Science and Football II*. Reilly T, Clarys J, Stibbe A (eds.), pp. 357-361, E & FN Spon, London, UK

Schmidt RA, Lee TD (2011): *Motor control and learning: A behavioral emphasis* 5<sup>th</sup> ed., pp. 223-261, Human Kinetics Publisher, Champaign, IL, USA

Scurr J, Hall B (2009): The effect of approach angle on penalty kicking accuracy and kick kinematics with recreational soccer player. *Journal of Sports and Medicine* 8: 230-234

Shan G, Westerhoff F (2005): Full-body kinematic characteristics of the maximal instep soccer kick by male soccer players and parameters related to kick quality. *Sports Biomechanics* 4: 59-72

Shinkai H, Nunome H, Isokawa M, Ikegami Y (2009): Ball impact dynamics of instep soccer kicking. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 41: 889-897

Sprigings E, Marshall R, Elliot B, Jennings L (1994): A three-dimensional kinematic method for determining the effective of arm segment rotations in producing racquet-head speed. *Journal of Biomechanics* 27: 245-254

Teixeira LA (1999): Kinematics of kicking as a function of different sources of constraint on accuracy. *Perceptual and Motor Skills* 88: 785-789

戸苅晴彦 (1983): サッカーのバイオメカニクス インステップキックの研究レビュー. *Japanese Journal of Sports Science* 2: 763-773

戸苅晴彦, 浅見俊雄, 菊池武道 (1972): サッカーのキネシオロジー的研究 (1) . *体育学研究* 16: 259-264

Wickstrom RL (1975): Developmental kinesiology. *Exercise and Sports Science Reviews* 3: 163-192

Winter DA (2009): *Biomechanics and motor control of human movement* 4<sup>th</sup> ed., pp. 176-199, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA