博士論文

女子サッカー選手におけるキック動作の特性

平成 26 年度 筑波大学大学院人間総合科学研究科 コーチング学専攻

坂本 慶子

目次

図のタイ	、トル	ン一覧	· · · i	
第1章	序論			
	1.1	研究背景と目的	• • • 2	
	1.2	研究課題	• • • 5	
第2章	文献	状研究	• • • 6	
	2.1	ボール速度をパフォーマンスとしたキック動作に関す	- る研究 ・・・7	
		2.1.1 インパクト直前の蹴り脚足部の速度とボール速	度の関係・・・7	
		2.1.2 筋力及びパワーとボール速度の関係	• • • 7	
		2.1.3 助走角度とボール速度の関係	• • • 8	
		2.1.4 疲労とボール速度の関係	• • • 9	
		2.1.5 キック動作における運動連鎖	• • • 9	
		2.1.6 キック動作における骨盤動態	• • • 11	
		2.1.7 インサイドキック動作に関する研究	• • • 12	
	2.2	ボールインパクトに関する研究	• • • 13	
		2.2.1 蹴り脚の換算質量とボール速度の関係	• • • 13	
		2.2.2 足関節の固定とインパクト直前の足部速度の関	係 ・・・14	
		2.2.3 インパクト時における足部動態	• • • 15	
		2.2.4 足部-ボール速度比 (反発比) 及び反発係数	• • • 16	
	2.3	女子選手のキック動作に関する研究	• • • 17	
笙 3音	+r-7	ー ニサッカー選手のキック動作におけるインパクト特性	• • • 21	
71 2 +	3.1	緒言	• • • 22	
		方法	• • • 23	
	5.2	3.2.1 被験者	• • • 23	
		3.2.2 実験設定	• • • 23	
		3.2.3 デジタイズマーカー位置	• • • 26	
		3.2.4 分析方法	• • • 26	
	3.3		• • • 31	
		考察	• • • 38	
		まとめ	• • • 41	
第4章	女子	² サッカー選手のインステップキックにおけるスイング	動作特性・・・44	
	4.1	緒言	• • • 45	

	4.2	方法		 • 46
		4.2.1	被験者	 • 46
		4.2.2	実験試技	 • 46
		4.2.3	測定方法及び測定項目	 • 47
		4.2.4	分析方法	 • 47
	4.3	結果		 • 52
	4.4	考察		 • 73
	4.5	まとる	め	 • 79
第5章	総括	1	 • 82	
	5.1	結論		 • 83
	5.2	実践	現場への示唆	 • 86
謝辞				 • 88
参考文献				 • 89

図のタイトル一覧

Figure 1. Two types of kick: (a) instep kick; and (b) inside kick.	• • • 24	4
Figure 2. Experimental setup.	• • • 25	5
Figure 3. Definition of impact point distance: (a) instep kick; and (b) inside kick.	• • • 28	8
Figure 4. Definition of angular displacement of the foot joint (posture): (∠a) angular d	_	nt
for dorsi-plantar flexion; (\angle b) external rotation-internal rotation; and (\angle c) inversion-ev		
	• • • 30	O
Figure 5. Gender differences in (a) ball velocity, (b) foot velocity, (c) striking ma	ss, and (d)
ball-to-foot velocity ratio for instep and inside kicks.	• • • 32	2
Figure 6. Gender differences in (a) angular displacement for dorsi-plantar flexion, ((b) extern	ıal
rotation-internal rotation, (c) and inversion-eversion of the foot joint for instep and inside	e kicks.	
	• • • 35	5
Figure 7. Relationship between impact distance and ball-to-foot velocity ratio: (a) inste	ep kicks l	ру
females; (b) instep kicks by males; (c) inside kicks by females; and (d) inside kicks by ma	ıles.	
	• • • 30	6
Figure 8. Relationship between the impact distance and angular displacement: (a) extension	on angle f	or

instep kicks by females; (b) extension angle for instep kicks by males; (c) external rotation angle for

inside kicks by females; and (d) external rotation angle for inside kicks by males. ••• 37

Figure 9. Definition of the joint coordinate systems fixed at the centre of the hip, knee and ankle joints to express the anatomical joint rotations.

• • • 49

Figure 10. Two dimensional double pendulum model. • • • 51

Figure 11. Comparison of mean ball velocity and foot velocity before impact for female and male players.

• • • 53

Figure 12. Plots a, b, and c represent typical/standard values for joint horizontal velocities of the kicking leg for female and male players: (a) ankle velocity; (b) knee velocity; (c) hip velocity. Plots d, e, and f represent the average values obtained for joint horizontal velocities of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) ankle velocity; (e) knee velocity; (f) hip velocity.

Figure 13. Plots a, b, and c represent typical/standard values for joint vertical velocities of the kicking leg for female and male players: (a) ankle velocity; (b) knee velocity; (c) hip velocity. Plots d, e, and f represent the average values obtained for joint vertical velocities of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) ankle velocity; (e) knee velocity; (f) hip velocity.

Figure 14. Plots a and b represent typical/standard values for hip velocities of the support leg for female and male players: (a) = horizontal velocity; (b) = vertical velocity. Plots c and d represent the average values obtained for hip velocities of the support leg among the female and male players in

the current study: (c) horizontal velocity; (d) vertical velocity. ••• 58

Figure 15. Comparison of peak vertical hip velocity of kicking and support leg for female and male players.

• • • 59

Figure 16. Plots a and b represent typical/standard values of hip displacement for female and male players: (a) = kicking leg; (b) = support leg. Plots c and d represent the average values obtained for joint angles of kicking leg among the female and male players in the current study: (a) = hip angle; (b) = knee angle.

• • • 62

Figure 17. Plots a, b, and c represent typical/standard values for pelvic angle for female and male players: (a) posterior/anterior lean; (b) medial/lateral lean; (c) external/internal rotation. Plots d, e, and f represent the average values obtained for joint vertical velocities of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) posterior/anterior lean; (e) medial/lateral lean; (f) external/internal rotation.

Figure 18. Plots a, b, and c represent typical/standard values for knee joint torque of the kicking leg for female and male players: (a) flexion/extension; (b) adduction/abduction; (c) internal/external rotation. Plots d, e, and f represent the average values obtained for knee joint torque of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) flexion/extension; (e) adduction/abduction; (f) internal/external rotation.

Figure 19. Plots a, b, and c represent typical/standard values for hip joint torque of the kicking leg for female and male players: (a) flexion/extension; (b) adduction/abduction; (c) internal/external rotation. Plots d, e, and f represent the average values obtained for hip joint torque of the kicking leg

among the female and male players in the current study: (d) flexion/extension; (e) adduction/abduction; (f) internal/external rotation.

Figure 20. Comparison of peak knee and hip joint torque of kicking leg for female and male players:

(a) knee joint torque; (b) hip joint torque.

• • 67

Figure 21. Plots a and b represent typical/standard values for thigh and shank energy of the kicking leg for female and male players: (a) thigh energy; (b) shank energy. Plots c and d represent the average values obtained for thigh and shank energy of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) thigh energy; (e) shank energy.

• • • 68

Figure 22. Comparison of mean thigh-to-shank energy ratios between female and male players.

• • • 69

Figure 23. Simulation data for female and male players: (a) hip joint vertical force for female player; (b) foot velocity for female player; (c) foot velocity for female player (80 -100 %); (d) hip joint vertical force for male player; (e) foot velocity for male player; (f) foot velocity for male player (80 -100 %).

第1章

序論

1.1 研究背景と目的

サッカーは、200ヵ国を上回る国や地域で、2億6千万人以上の人がプレーする最も魅す るスポーツの一つである (Federation International Football Association, 2007). 女子サッカーは, 全世界で約2千6百万人の女性がプレーし、年々人気が高まっている.現在、日本の女子 サッカーでは、協会登録人口が約4万6千人に達しており、様々な年代でプレーしている. これまで、サッカーは、男性のスポーツとされており、女子サッカーは 1970 年代まで組織 化されておらず、健康上や倫理上の問題があるとされ、ルールや用具も男性とは異なるも のを用いていた. 長い期間の議論を乗り越え, 1991年に中国で第1回 FIFA 女子世界選手権 (現 FIFA 女子ワールドカップ) が開催され、1995 年アトランタ五輪からは、正式種目に採 用されるようになり,女子サッカーは世界で幅広く認知されるようになった (公益財団法人 日本サッカー協会). 近年では、競技人口の増加に伴い、競技力も高まっており、女子選手 の技術特性とそれに応じた指導法を明らかにすることが求められている. しかし, 女子サ ッカーの指導者は、男性指導者に比べ少なく、トレーニングやコーチングもまた男子選手 のものをそのまま引用する場合が多い、そのため、女子選手の技術は、男子選手の技術と 類似している部分も多いが、男女間で違いも少なくない、したがって、男女の類似性を理 解した上で違いを検討することは、非常に重要であると考えられる、指導現場では、この 性別の違いを考慮していないため、適切なトレーニングが行われていない可能性がある. また、男女では骨格や筋力等の形態・機能的特性が異なるため (多賀谷、1989: 石田ほか、 1992; 村松ほか, 2010), 怪我の種類や発症メカニズムが異なるとされている (櫻井ほか, 2012; Giza et al., 2013; Melvin et al., 2006; 中尾ら, 2004). そのため, パフォーマンスの向上 のみならず、傷害を予防の観点からも女子選手の動作特性を理解することは非常に重要で ある. 女子選手と男子選手における性差は, 動作や技術に違いを及ぼす可能性があり, 女 子選手の特性に合った適切なトレーニングやコーチングを提供することにより、効果的に 競技力を高めることができると考えられる.

サッカーのプレーに関する技術には、キック、トラップ、ドリブル、ヘディング、タックル、ゴールキーピングがあるが、とりわけキックは、ゲームにおいて目的を達成するための最も重要な技術の一つであり、選手は目的に応じて適切なスイング及びインパクトを行っていると考えられる.

キック技術は、一般的にボール速度、飛距離、正確性等の要素から評価されており (浅見 と戸苅、1968)、実際のゲームにおいて、より速いボールや飛距離のあるボールを要する場 面が多いこと、また、正確性とボール速度におけるトレードオフの観点から強いキックを 行うことが重要視されてきたことから、これまでのキック動作の研究では、最大努力での インステップキック (足の甲でボールを捉えるキック技術) に関する研究が数多く報告さ れている (Lees and Nolan, 1998; Kellis and Katis, 2007; Lees et al., 2010). キック動作を力学的 モデルで考えると、蹴り脚の足部とボールの衝突現象であると捉えることができる.その ため、高いボール速度を得るためには、より高いインパクト前の足部速度を生成する技術 (Dörge et al., 2002; Luhtanen, 1988; Nunome et al., 2002, 2006b) と運動エネルギーのロスを最 小限に抑え、より高い反発比を得るためのインパクト技術が求められる. また、インステ ップ同様に重要視されるキック技術としてインサイドキックがあげられる.インサイドキ ックは、足の内側部でボールを捉えるキック技術であり、比較的広い面積でボールを捉え ることができることから、正確性を高めるためには有効なキックとされてきた. それゆえ、 短いパスに特化したキックと考えられてきたが、戦術の高度化に伴い、インサイドキック での速いシュートやパスが求められるようになってきており、インサイドキック動作のメ カニズムの解明が希求されている.これらのキック技術に関する力学的研究は、ほとんど 男子サッカー選手を対象としたものであり、女子サッカー選手の力学的な検討が不十分で ある、現在の女子サッカーのゲームでは、戦術の多様化且つ高度化に伴い、高いパフォー マンスが求められており、とりわけ、より速度の高いボールを蹴ることは、相手選手の時 間的余裕を減少させ、ゴールを奪うために効果的な役割を果たすと考えられる.したがっ て、女子選手の競技力を高めるためには、高いボール速度を習得することが重要であると

考えられる.

そこで本研究では、インステップ及びインサイドキックにおける女子サッカー選手の足部速度、換算質量、反発比を男子選手と比較検討することにより、ボールインパクトの力学的及び技術的特性を明らかにする。また、インステップキック動作における女子選手のフォワードスイングにおける関節トルク、運動連鎖におけるエネルギー比、蹴り脚股関節鉛直力を男女間で比較検討することにより、スイングメカニズム及び高いボール速度を生成するためのスイング動作の技術的特性を明らかにし、女子選手におけるキック技術を高めるための知見を得ることを目的とする。

1.2 研究課題

研究目的を達成するために、以下の2つの研究課題を設定した.

【研究課題1】

インステップ及びインサイドキックにおける女子サッカー選手のボールインパクトの力学 的及び技術的特性を明らかにすること (第3章).

第 1 の研究課題は、女子サッカー選手のインステップキックとインサイドキックにおけるボールインパクトを対象に、高速度カメラを用い、ボール速度を高めるための重要な要素とされる足部速度、換算質量、反発比を中心に男子選手と比較検討することにより、男女間の類似性や差異を明らかにすることとした。

【研究課題2】

インステップキック動作における女子サッカー選手のスイングメカニズム及び高いボール 速度を生成するためのスイング動作の技術的特性を明らかにすること (第4章).

第 2 の研究課題は、女子サッカー選手のインステップキックにおけるスイング動作を対象に、フォワードスイングにおける関節トルク、運動連鎖におけるエネルギー比、蹴り脚股関節鉛直力を男女間で比較検討することにより、女子選手がボール速度を高めるための技術的要因を明らかにすることとした。さらに、順動力学によるフォワードスイングの数値シミュレーションを実施し、蹴り脚股関節鉛直力がスイング速度に及ぼす影響を定量的に検討した。

第2章 文献研究 サッカーにおけるキック動作は、支持脚の踏み込み、蹴り脚のバックスイング及びフォワードスイング、ボールインパクト、フォロースルーから構成される動作である。キック動作におけるボールインパクトは、蹴り脚の足部とボールの衝突現象と捉えることができ、ボール速度は、インパクト前の足部速度と蹴り脚の質量及び硬度によって決まると考えられる。これまでサッカーのキック動作における研究では、蹴り脚のスイング動作やボールインパクトに関するものが報告されている。

2.1 ボール速度をパフォーマンスとしたキック動作に関する研究

2.1.1 インパクト直前の蹴り脚足部の速度とボール速度の関係

これまで多くの研究において、ボール速度とインパクト直前の足部速度には、高い正の相関関係があることが認められている (Andersen et al., 1999; Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2006b). 高いボール速度を生み出すためには、高いスイング速度を得ることが不可欠である。そのため、蹴り脚のスイング動作に焦点を当てた研究が多く報告されている。

2.1.2 筋力及びパワーとボール速度の関係

体力的な要素がパフォーマンスに及ぼす影響については、これまで多くの研究報告がある.主に蹴り脚を中心とした筋力やパワーとボール速度との間には高い相関関係が認められているものが多い.

浅見と戸苅 (1968) は、大学生サッカー選手 46 名を対象に、慣性車輪を用いて、重い負荷と軽い負荷の 2 種類の負荷をかけた際の膝伸展パワーを検討した。その結果、重い負荷と軽い負荷共に、ボール速度と膝伸展パワーとの間に有意な正の相関関係が認められたことを報告している。

Narci et al. (1988) は,3名の熟練者と8名の未熟練を対象に,等速性の筋力測定 (股関節: 180,膝関節:300 deg/s)で測定し,フィールドにおけるキックパフォーマンを行い,股関節

屈曲及び膝関節伸展トルクと全力でのキックにおけるボール速度との関係を検討している. その結果,股関節屈曲及び膝関節伸展トルクとボール速度との間に正の相関関係がみられたことを報告している.

Poulmedis (1988) は、異なる角度条件による等速性の筋力測定を行い、股関節屈曲伸展及び内外転トルク、膝関節屈曲伸展及び内外旋トルクを測定し、最大努力下でのキックにおけるボール速度との関係を検討した。それぞれの筋トルクとボール速度の間には高い相関が認められたとしており、筋トルクを高めることは、高い蹴り脚の加速を得るのに重要な要素であると述べている。

また, Capranica et al. (1992) と Luhtanen (1988) は、成長とともに最大ボール速度と膝の角速度は高くなると報告し、それは、筋の質量やキック技術が高くなることが原因の一つであると指摘している.

2.1.3 助走角度とボール速度の関係

ゲーム中,選手は状況に応じて多様な方向へボールを蹴っていることから,実践に即して異なる助走角度におけるキック動作についての研究が行われている.

Isokawa and Lees (1988) は、異なる助走角度 (0, 15, 30, 45, 60, 90 deg.) でのキック動作においてキネマティクスとキネティクスの特徴を検討している。その結果、ボール速度は、助走角度が 45 deg.でのキック動作時最大となり、足部速度は、助走角度が 30 deg.の時最大となったことを報告している。このことは、インパクト時の換算質量の違いであるとし、ボール速度は、スイング速度によってのみ決定されるものではないと述べている。

井上ほか (2013) は、助走角度 (15, 45, 75 deg.) の変化がインステップキックのキネマティクスに及ぼす影響を検討している。その結果、助走角度による足部速度に違いはみられなかったが、助走角度の増加に伴い、ボール速度が低下することを示しており、要因として、インパクト時における蹴り脚の足部ベクトルの向きが影響していると報告している。

これらのことから、高いボール速度を算出するためには、ボールへのアプローチも重要

な要素の一つであると考えられる.

2.1.4 疲労とボール速度の関係

サッカーの試合時間は、90 分と長時間であり、試合の終盤において、選手は疲労を伴う 状況下でパフォーマンスを行わなくてはならない.この疲労の蓄積は、パフォーマンスの 低下だけでなく、様々な障害を招く原因となるから、疲労とパフォーマンスの関係を検討 したものがいくつか報告されている.

Apriantono et al. (2006) は、インステップキックを対象に、筋疲労が及ぼす影響をキネマティクス及びキネマティクス的に検討している。疲労後のボール速度及びインパクト前の足部速度は、インパクト前の速度に比べ、有意に低い値を示したことを報告している。また、疲労後のボール速度と足部速度の間には有意な相関関係が認められなかったと述べており、疲労の影響で正確なインパクトが保てなくなったことが原因であるとしている。このことから、ボール速度の低下は、足部速度の減少とインパクトの質の低下が要因であると報告している。

Kellis et al. (2006) は、同様の実験において、疲労によるアンモニアと乳酸値の増加に伴い、ボール速度と足部速度が有意に低下したことを報告している。また、疲労前に比べ、疲労後の下腿の角速度が低い値を示したと述べている。さらに、疲労後のボールー足部速度比(反発比)は、疲労前の値よりも小さかったとし、疲労により最適なインパクトができなくなったことを報告している。

2.1.5 キック動作における運動連鎖

キック動作において、より高いスイング速度を得るための近位部から遠位部への連続した動作が観察されている。これまで、蹴り脚の各関節の速度ピーク値において、はじめに 股関節速度のピークがあり、次に膝関節速度のピーク、最後に足関節速度のピークとなる 順序性が認められている (Isokawa and Lees, 1988; Rodano and Tavana, 1993). いくつかの関節 が連鎖的に動き、近位部のエネルギーを遠位部に伝達するメカニズムが働いていると考えられる. Ozaki et al. (2012) は、この蹴り脚の近位部から遠位部へのエネルギー伝達について、インステップキックを対象に、2重振り子モデルを用いて数理的解析を行っている. その結果、キック動作の終盤で、膝関節伸展トルクによって下腿速度を増大させ、その後、大腿のエネルギーを関節間力を用いて効率よく下腿に伝達していたと報告している. Naito et al. (2012) は、筋力・非筋力モーメントの相互モーメントにより生じる各セグメントの力学的エネルギーを多関節動的鎖動作により分解し、インステップキックにおけるエネルギー再分配のメカニズムに関して、蹴脚の動的エネルギーを生成するためのメカニズムを検討している. また、運動連鎖メカニズムは、大腿及び下腿の角速度のピーク値においても見られており、遠位のセグメントになるほど大きなピーク角速度を示すことが認められている (Luhtanen、1988; Putnam、1991; Dörge et al., 2002; Nunome et al., 2002; Nunome et al., 2006b).

Dörge et al. (2002) は、インステップキックにおける利き脚と非利き脚の違いを検討している。その結果、利き脚でのキックのボール速度は、非利き脚のボール速度よりも高い値を示しており、利き脚を用いたキックのインパクト直前の下腿の角速度が、非利き脚に比べ高かったためであると述べている。このことは、利き脚における大腿部の角速度に寄与する動作依存モーメントによって下腿部に働く仕事量が非利き脚よりも有意に大きかったことが要因であると示唆している。

Nunome et al. (2006a) は、下腿部が高い角速度を獲得するためには、動作依存モーメントの作用が重要な役割を担うと述べている。キック動作の運動連鎖における大腿部の減速は、股関節伸展筋モーメントの作用ではなく、膝伸展筋モーメントの反作用と下腿部の動作依存モーメントによって受動的に生じると報告している。

Apriantono et al. (2006) は、インステップキックを対象に、筋疲労がパフォーマンスに及ぼす影響を検討しており、疲労時におけるインパクト前の足部速度の減少は、下肢におけるコーディネーションの低下による動作依存モーメントの減少が原因であると示唆してい

る.

また, Nunome et al. (2005) は、インパクト直前に下腿部に作用する動作依存モーメントは、大部分が蹴り脚の動作ではなく、支持脚の動作によって生じていることを示唆している.

2.1.6 キック動作における骨盤動態

キック動作において、骨盤 (腰部) の動作は、蹴り脚及び支持脚と連動していることから 重要視されており、キック動作時の骨盤の動態に関する研究がいくつか報告されている.

骨盤前後傾角度変位について、Lees et al. (2009) は、全力でのインステップキック動作を対象に検討している。その結果、蹴り脚離地時から徐々に後傾し、骨盤前後傾角度はインパクト前に前傾から後傾に転じ、その後、インパクト時に安定し、フォロースルー時では股関節の屈曲によってわずかに前傾したことが示された。

Scurr and Hall. (2009) は,異なる助走角度 (自由助走, 30, 45, 60 deg.) でのインステップキックにおいて分析を行っている. その結果,助走の角度による前後傾角度変化量の有意な差はみられなかったと述べている.

骨盤回旋角度変位について、Nunome et al. (2002) は、インステップキックとインサイドキックを比較検討しており、腰部の角度変化を明らかにしている。その結果、インステップキックにおける腰部は、時計回りに回転していたのに対し、インサイドキックの腰部の動作は、一定の傾向がみられなかったことを報告している。Lees et al. (2009) のインステップキックにおける骨盤回旋角度も同様の傾向がみられている。

Browder et al. (1991) は、女子選手を対象に、インステップキックにおけるボール速度と 骨盤回旋角度の関係について検討しており、ボール速度の高いキックの骨盤回旋角度変化 は、ボール速度の低いキックの回旋角度変化よりも高い値であったことを報告している. また、Lees and Nolan (2002) は、より高い骨盤回旋角度に伴い、股関節及び膝関節の動作範囲も大きくなることから、より高い足部速度を得ることができると示唆している.

Scurr and Hall. (2009) は、助走角度の大きさに伴い、回旋角度変化量が高くなることを報告している.

Lees et al. (2009) は、支持脚接地からボールインパクト時まで、骨盤側方傾斜角度はほとんど変化がみられず、安定していたことを述べており、インパクトに向けた足部のインパクト位置調節において、骨盤の安定が要求されるためであると示唆している.

これらのことから、骨盤の回旋は、足部を加速させることを助ける可能性があると考えられ、キック動作において腰部の動作は、運動連鎖の一部を担う重要な動作であると考えられる.

2.1.7 インサイドキック動作に関する研究

インサイドキックは、ゲーム中において使用頻度が高く (Yamanaka et al., 1997)、正確性 の必要な場面のみならず、強さが求められるようになった. しかしながら、インステップ キックに比べ、インサイドキックの力学的研究は少ない.

インサイドキックにおけるボールインパクト直前の足部スイング速度とボール速度との関係についても、インステップキック同様に両者の間には強い正の相関関係が認められている (Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2002; Shinkai et al., 2009a).

Levanon and Dapena (1998) と Nunome et al. (2002) は、インサイドキックのボール速度は、インステップキックの速度よりも小さかったことを示しており、この原因は、インパクトの効率ではなく、インサイドキックのインパクト直前の蹴り脚速度がインステップキックの蹴り脚速度に比べ小さかったことであると述べている.

Levanon and Dapena (1998) と Nunome et al. (2002) は、インパクトの効率ではなく、ほぼインパクト直前の蹴り足の速度の小ささにあることを示唆している.

Kawamoto et al. (2007) は、サッカー経験者と非経験者のインサイドキックをキネティクス的に比較検討し、経験者群の股関節伸展トルクの平均ピーク値が、未経験者群のものより優位に高かったことを示した。

Levanon and Dapena (1998) は、インステップキックとインサイドキックを対象にキネマティック的特徴を比較検討し、インパクト時において、インサイドキックの骨盤及び大腿と下腿から成る平面は、インステップキックよりも右方向へ向いており、下腿と足部から成る平面は、大腿と下腿から成る平面に連動して外側へ向いていたことを報告している.

Nunome et al. (2002) は、インステップキックとインサイドキックを対象にキネティクス的に分析し、インサイドキックの股関節外転トルクはインステップキックよりも有意に高い値を示し、このことは、キック動作の後半における大腿と下腿から成る平面の時計回りの回転が要因であると報告している。インサイドキックは複雑な回転動作の連続.

Nunome et al. (2007) は、インサイドキックの内側方向角速度は、インパクトまで増加していることを示し、そのインパクト直前の値は、前方向角速度の値と同程度であったと報告している.

川本ほか (2006) は、サッカー経験者と非経験者のインサイドキックにおけるボール速度と正確性のトレードオフの機序をキネマティクス及びキネティクス的に分析し、高いボール速度のキックにおいて経験者の正確性は、非経験者よりも高い水準で維持していたことを述べている。また、正確性を重視したキックにおける経験者と非経験者のボール速度低下率は同程度であったことを報告している。

Brophy et al. (2007) は、筋電図検査法を用いてインステップキックとインサイドキックの筋活動を比較検討した。その結果、インサイドキックの腸骨筋、腓腹筋、内側広筋、股関筋内転筋の活動はインステップキックの活動よりも小さかったことを報告している。

2.2 ボールインパクト局面に関する研究

2.2.1 蹴り脚の換算質量とボール速度の関係

換算質量とは、運動量保存の法則を基に、足部速度、ボール速度、ボールの質量を実測 し、計算した打撃の際の足部の質量である。キック動作において、インパクト時における ボール速度に有効に働いた質量として、インパクト技術の指標の一つとして用いられてい る. 運動量保存則を用いて、以下の式から換算質量を求めることができる.

$$M = \frac{mV_{b1}}{V_{f0} - V_{f1}}$$

M は換算質量,m はボールの質量, V_{bl} はインパクト後のボール速度, V_{bl} はインパクト後のボール速度, V_{fl} はインパクト前の足部速度, V_{fl} はインパクト前の足部速度を示す.

Plagenhoef (1971) は、サイドアプローチ (15 deg.) とストレートアプローチ (30 deg.) の2 種類の助走角度からのインステップキックにおけるインパクト時の換算質量を比較検討している。 その結果、サイドアプローチは 3.9 kg、ストレートアプローチは 3.18 kg であったことを報告している。

同様に Asami and Nolte (1983) は、インステップキックにおける蹴り脚の換算質量を算出し、 1.02 ± 0.14 kg であったことを報告している。また、Plagenhoef (1971) の値との差は、主にインパクト時の足部の減速の違いに依存していると述べている。

Shinkai (2009b) は、育成年代の男子サッカー選手を対象に、身体の発育に伴うボールインパクト技術を横断的に検討している。その結果、換算質量は加齢とともに増大し、選手の体重及び足部-足部速度比と強い相関が認められたことを報告している。

足部の固定は、蹴り脚における換算質量や反発係数に増大に関与すると考えられている (Lees and Nolan 1998).

石井と丸山 (2007) は、インステップキックにおけるインパクト位置と換算質量の関係を検討しており、換算質量は、インパクト位置が足関節に近づくほど大きい値を示したと述べている.

2.2.2 足関節の固定とインパクト直前の足部速度の関係

ボールインパクト時には、ボールからの反作用力が足部にかかることから、足部の変形が認められている (石井と丸山、2007; Shinkai et al., 2009a). 蹴り脚の換算質量を高めるためには、足部の変形を最小限に抑え、より強い足部の固定が必要とされている.

戸苅 (1983) は、熟練者と未熟練者のパフォーマンスを比較し、熟練者におけるボール速度と足部速度の相関は、未熟練者の相関よりも高い値を示したことを報告している。その技術的な要因として、インパクト時における熟練者の足関節固定による足部の剛体化技術が未熟練者よりも優れていることを示唆している。

渋川 (1973) は、人体を股、膝、足の3つの関節に直列された剛体系とし、4つの関節固定パターンにおけるボールインパクト時の力学的現象を検討している。その結果、膝及び足関節を完全固定パターンにおいて、反発係数は最も高い値を示し、蹴り脚の関節を固定することはボール速度の増大に効果があると述べている。

一方で、Andersen et al. (1999) は、足部及び下腿の換算質量は、ボール速度に大きく影響しないと述べている。

2.2.3 インパクト時における足部動態

近年,高速度カメラの機能向上により,より高速度で測定可能となり,約 1/100 秒であるボールインパクト時の運動を詳細に分析できるようになった.

Tol et al. (2002) は、インステップキックにおけるインパクト直前 (26.1 deg.) からインパクトの終わり (47.6 deg.) までの足関節底屈角度変位を算出している。全 150 試技中 58 試技において、インパクト時の最大底屈角度変位は、静的最大底屈角度よりも高い値を示したことを報告している。

Asami and Nolte (1983) は、インパクト中における足関節及び足根中足関節の変形を定量化した。その結果、ボール速度と足関節の変形 (19.9 deg.) には有意な相関はみられなかったが (r = -0.41, n.s.)、ボール速度と足根中足関節の変形 (34.6 deg.) の間に高い相関が認められ (r = -0.81, p < 0.05)、この足根中足関節の受動的変形を小さく抑えることが重要であると示唆した。

Nunome et al. (2006a) は、異なる遮断周波数及び平滑化の手順を用いインパクト局面における下肢のキネマティクスについて比較検討している。その結果、インパクト時における

足関節角速度変化をみると、インパクト直後に受動的な底屈が生じることを報告している.

Asai et al. (1999) は、有限要素法を用いてシミュレーションを行い、インステップキック 及びカーブキックのインパクト中に生じる力学的現象を検討している.

インステップキックの研究に比べ少ないが、インサイドキックのインパクトについての 研究もいくつか報告されている.

石井と丸山 (2007) は、インステップキックにおいて最大のボール速度を得ることができるインパクト位置について検討しており、前足部から足関節付近まで広い範囲におけるインパクト位置と足関節角度の関係を示している。その結果、足部質量中心でインパクトした場合、足関節の角度変位は生じず、インパクト位置がつま先に近づくほど底屈方向への角度変位が大きくなり、反対に足関節に近づくほど背屈方向への角度変位が大きくなることを報告している。

石井と丸山 (2008) は、足部外転角度とインパクト位置がボール挙動に及ぼす影響を検討しており、迎え角を大きくし足部質量中心付近でインパクトすることは、足部における内転角度の変化を抑え、ボール速度を増大させることができると述べている。

Shinkai et al. (2009a) は、インステップキックとインサイドキックにおけるインパクト中の足部の挙動を分析し、インステップキックのインパクト中にみられる受動的な底屈が、インサイドキックでは非常に小さくなっていたことを報告している。

2.2.4 足部ーボール速度比 (反発比) 及び反発係数

これまで、インパクトの技術を評価するために、ボールー足部速度比 (反発比) 及び反発 係数が用いられている.

ボールー足部速度比は、インパクト前の速度とボール速度の比である.

Asami and Nolte (1983) は、インステップキックにおけるボールー足部速度比は、1.06 であったと述べている.

Nunome et al. (2006a) は、インステップキックにおける利き脚と非利き脚のボールー足部

速度比を算出しており、利き脚の速度比の平均値は、1.35 であり、非利き脚の平均値は、13.2 であり有意な差は認められなかったとしている.

石井と丸山 (2007) は、インステップキックの前足部から足関節付近まで広い範囲におけるインパクト位置のボールー足部速度比を示し、ボールー足部速度比最小値は 1.17~1.30 であり、最大値は 1.44~1.52 であったと報告している.

キック動作における反発係数とは、インパクト前後でのボールと足部の相対速度の比で あり、インパクトによるエネルギーのロスが少ないほど最大値である1に近い値となる.

ボールと足部の衝突メカニズムにおいて, Lees and Nolan (1998) は, ボール速度を以下の式で算出できるとしている.

$$V_{ball} = V_{foot} \cdot \frac{M \cdot (1+e)}{(M+m)}$$

 $V_{\rm ball}$ はボール速度, $V_{\rm foot}$ はインパクト直前の足部速度, M は蹴り脚の換算質量,m はボールの質量,e は反発係数を示す.

また, Dörge et al. (2002) は、以下の式を用いてボール速度を算出できるとしている.

$$V_{ball} = \frac{V_{ball} \cdot I_{all} \cdot (1+e)}{I_{all} + m \cdot r^2}$$

 V_{ball} はボール速度, I は慣性モーメント, m はボールの質量, r は膝から足部の重心の距離, e は反発係数を示す.

Andersen et al. (1999) は、反発係数を用いてインパクト技術を評価しており、反発係数はインパクト時のボール、シューズ、足首、足部の力学的特性に依存すると述べている.

Andersen et al. (2008) は、インステップキックとトゥーキックにおけるインパクト時の足部とボールの接触範囲の違いを反発係数を用いて検討している。その結果、トゥーキックの反発係数は、インステップキックの係数よりも高い値を示したことを報告している。

2.3 女子サッカー選手のキック動作に関する研究

これまで、キック技術に関する研究は、男子サッカー選手を対象としたものが多く、女子サッカー選手の研究は少ない、そのため、力学的な検討が不十分であり、女子選手における動作メカニズムの解明が求められている。

Browder et al. (1991) は、女子選手を対象として、インステップキックにおける蹴り脚セグメントの動作のタイミング、連続性、セグメント間の相互作用を検討し、骨盤回転の増加と股関節及び膝関節伸展の減少の連携は、動作時間を減少し、結果的にボール速度を高めていたと述べている。また、女子選手の骨盤の幅の増大は最大ボール速度を生み出すために有利に働くと示唆している。

Tant et al. (1991) は、大学女子及び男子選手を対象として、インステップキックをキネマティクス的分析を用いて比較している。その結果、男子選手は、より高い股関節及び膝関節の角度可動域を用いてキックしており、一方で、女子選手は、骨盤回転がより高く、体幹が大きく後傾している傾向を示していたと述べている。

Barfield et al. (2002) は、インステップキックの利き脚と非利き脚におけるキネマティクス的な男女間の違いを検討している。女子選手のインパクト時における膝の角速度は、男子選手の角速度よりも高い値を示しており、このことは、女子選手のボール速度の平均値が、男子選手の平均値よりも低い値を示していることの要因の一つとなる可能性を示している.

Orloff et al. (2008) は、インステップキックを対象にキネマティック及びキネティクスにおける女子選手と男子選手の比較を報告している。その結果、ボール速度に男女の差はみられなかったが、女子選手のボール速度と前後方向の地面反力は、反比例して高い相関 (-0.88) がみられたことを述べている。また、女子選手の体幹の傾きと下肢の傾斜角度は男子選手に比べ高かったとしており、このことは、解剖学的性差が反映していると示唆している.

男女で負う傷害の割合が異なることから、女子選手の障害予防を目的とした研究もいくつかみられる.

Clagg et al. (2009) は、最大努力下でのインステップキックにおける女子選手の支持脚に

着目し、キネティクス分析を用いて、アプローチ角度と脚の有意性が下肢の関節に及ぼす 影響を検討している。その結果、センターとオフアクシスのコンディションにおける利き 脚を用いたキックにおける支持脚の股関節及び足関節伸展トルクのピーク値は、非利き脚 のピーク値よりも高い値を示した。一方、蹴り脚の股関節及び膝関節屈曲トルクのピーク 値は、非利き脚のピーク値よりも高い値を示した。

Brophy et al. (2010) は、女子選手のキック動作時における下肢アラインメントと筋活動パターンを男子選手と比較した。女子選手の蹴り脚の腸骨に関与する筋活動の値は、男子選手と比べ、有意に小さかった。また、女子選手の支持脚の中臀筋および内側広筋の値は、男子選手よりも有意に小さかった。さらに、女子選手の支持脚接地時の支持脚股関節内転角度は、男子選手の値よりも大きい値を示した。これらの結果から、女子選手における支持脚股関節の外転筋活動減少とより大きな内転は、前十字靭帯損傷のリスクを高める可能性があるとしている。

Lyle et al. (2011) は、思春期前の女子選手と思春期後の女子選手のインステップキックをキネティクス及びキネマティクス的に検討している。思春期後の女子選手の蹴り脚足部速度は、思春期前の女子選手の足部速度よりも高い値を示しており、この要因として、思春期後の女子選手は、股関節屈筋の活動と股関節伸展をより発揮して足部速度を獲得していると述べている。

Alcock et al. (2012a) は、直接フリーキックの三次元キネマティクスとインステップキックとを光学式モーションキャプチャーを用いて比較検討した。2 試技におけるインパクト時の足部速度に有意な差はみられなかったが、インステップキックの股関節及び膝関節水平速度は、カーブキックの水平速度よりも高い値を示しており、カーブキックの膝の角速度はインステップキックよりも高い値を示していたと述べている。この要因は、最適なボールインパクトを行うための調節メカニズムの違いであるとしている。

ボール軌道を達成するために、大きいアプローチ角度を得、ターゲットの右方向に足部を 向け、ゴールの面に向かってクロスに蹴り脚をスイングするべきである. Alcock et al. (2012b) は、女子選手のカーブ及びインステップキックにおける初期のボール飛行特性を光学式モーションキャプチャーを用いて検討している.

カーブキックは、インステップキックに比べ、有意に高い水平及び垂直角度発射角度を示し、また、カーブキックにおける 3 軸の毎秒回転数は、インステップキックの毎秒回転数に比べ有意に高かったことを示している。これらの知見は、女子選手が得点を得るためやディフェンスの壁を避けるための特性を達成するために有益であると報告している。

第3章 女子サッカー選手のキック動作における インパクト特性

第3章 女子サッカー選手のキック動作におけるインパクト特性

3.1 緒言

これまで、サッカーのキック技術に関する研究では、多くの報告がなされている (Lees et al., 2010). なかでも、ボール運動を最終的に決定づけるボールインパクトに関する研究では、効率の良いインパクト技術の指標として、蹴り脚の換算質量 (Plagenhoef, 1971) やボール・ 足部速度比 (Kellis et al., 2007; Nunome et al., 2006a, b) が検討されている。また、Lees and Nolan (1998) は、足部と下腿の質量をボールに有効に働かせるためには、インパクトの時に 足関節を強く固定することが重要であると報告している。インパクトの技術的メカニズム を明らかにすることはパフォーマンスの改善に役立つと考えられる.

女子サッカー選手のキック技術を対象としたキネマティクス的研究において、女子選手の体幹角度は男子選手よりも大きく、横方向の地面反力のピーク値は男子選手のピーク値に比べ有意に大きかったことが報告されている (Barfield et al. 2002; Clagg et al., 2009). 女子選手のキネティクス的研究では、利き脚における股関節及び足関節の屈曲トルクは、非利き脚のトルクよりも大きかったことが示されている。また、女子選手におけるインパクト時の足部速度及びボール速度は、男子選手よりも小さいことが報告されている (Brophy et al., 2010; Shan, 2009). 生理学的研究では、女子選手の腸骨筋の活動は男子選手よりも小さいことが示されている (Orloff et al., 2008). しかし、ボールに直接的に力を伝え、最も基礎的かつ重要な技術の一つであるインパクトに関する研究はほとんどなされて無い.

そこで、本研究では、女子サッカー選手のインステップキックとインサイドキックにおけるボールインパクトを対象に、高速度カメラを用い、ボール速度を高めるための重要な要素とされる足部速度、換算質量、反発比を中心に男子選手と比較検討することにより、女子選手の技術的特性を明らかにしようとした。さらに、ボールインパクトからみた女子選手に適したトレーニングやコーチングを議論した。

3.2 方法

3.2.1 被験者

被験者は、サッカーを大学女子サッカー選手 17名 (stature: 161.4 ± 4.5 cm, weight: 56.0 ± 3.4 kg)、及び男子サッカー選手 17名 (stature: 172.0 ± 4.4 cm, weight: 65.7 ± 4.8 kg) を対象とした。全被験者の利き脚は、右脚であった。被験者には事前に実験の目的や内容を説明し、実験の協力への同意を得た。なお、これらの手順は、筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て行われた。

3.2.2 実験設定

各被験者には、プレイスしたサッカーボール(FIFA 公認 5 号球、アディダス社製、質量 430 g, 空気圧 900 hp) を, 利き足を用いて全力で 11 m 離れたサッカーゴール (高さ 2.44 m, 横 7.32 m) に向かってキックさせた。用いたキック技術は、インステップキック (Fig. 1a) とインサイドキック (Fig. 1b) の 2 種類とし、それぞれ 10 本ずつ計測した。撮影には、3 台の高速度ビデオカメラ (FASTCAM-1024PIC model 100KC、フォトロン社製)を使用し、撮影には、3 台の高速度ビデオカメラ (FASTCAM-1024PIC model 100KC、フォトロン社製)を使用し、撮影速度 1000 fps、露光速度 1/2000 s、解像度 1024×1024 pixel で各試技を撮影した。2 台のカメラは、キック方向に対して右側方(蹴り脚側)と右後方に設置し、同期させて撮影した(Fig. 2)、さらに、蹴り脚のスイング面の法線方向に 1 台のカメラをセットし、足部水平方向速度の計測に用いた。本研究では、DLT 法(Direct Linear Transformation method)を用いて足関節の 3 次元運動を計測した(Abdel-Aziz and Karara、1971)。分析対象試技は、ボールがゴール中心に的中したもので、験者と被験者が通常のスイング動作と判断したものを選出し、データの信頼性を高めるため、各被験者につき 6 つの試技(計 204 試技)を分析した.



(b)

Figure 1. Two types of kick: (a) instep kick; and (b) inside kick.

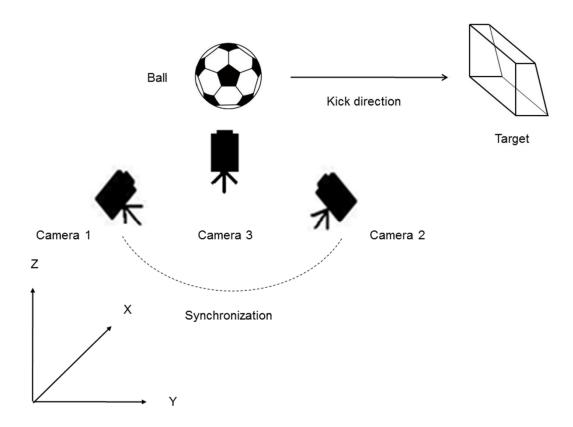


Figure 2. Experimental setup.

3.2.3 デジタイズマーカー位置

各被験者には、直径約 1cm の計測用半球体マーカーを、下腿 4 箇所 (膝, 外踝, 内踝, 膝と外踝の中点)、足部の側面 5 箇所 (つま先, 第 5 中足骨の頭, 第 5 中足骨の頭と第 5 中足骨の底の中間, 第 5 中足骨の底と踵の中間, 踵)、足部の甲 4 箇所 (つま先, 第 3 中足骨の頭, 第 3 中足骨の頭と第 3 中足骨の底の中間, 楔状骨) の計 13 箇所に貼付した. また,ボールの表面に 3 箇所に貼付した.

3.2.4 分析方法

計測した座標値には、Butterworth low-pass digital filter を用い、平滑化を行った。その際の最適遮断周波は、50–140 Hz であった (Winter, 2004)。生データと平滑化後のデータとの比較したところ、平滑化後の波形は生データの波形とよく一致している。したがって、本研究の各データにおける平滑化後の波形は、ボールインパクト中の本来の性質を忠実に表していると考えられる。したがって、本研究で用いた遮断周波数は適切であったと考えられる。

1) ボール及び足部速度

ボール中心は、慣性座標系におけるボールの頂点と底点から求め、その速度ベクトルを 算出した.なお、ボール速度は水平内外方向 (X 軸方向)、水平前後方向 (Y 軸方向)及び鉛 直上下方向のボール速度ベクトルを合成したものとした.足部速度は、画像からインパク トポイントの座標値を求め、その最も近い足部マーカーの座標値から、水平方向速度を求 めた.

2) インパクトポイントから足部重心までの距離

インパクトポイント (x_q, y_q) は、ボールインパクト時におけるボール中心の位置座標から、つま先と外果を結んだ直線に下ろした垂線の交点とした。また、インパクトポイント距離 (L) として、インパクトポイントと足部重心 $(x_{foot-cg}, y_{foot-cg})$ の距離を算出した (Eq.1) (Fig. 3).

$$L = \sqrt{(x_q - x_{foot-cg})^2 + (y_q - y_{foot-cg})^2}$$
 (1)

ここで, L はインパクトポイントと足部重心の距離を示す. 足部重心位置は, Ae et al. (1992) 及び Chandler et al. (1975) より, 幾何学的に求めた.

3) 換算質量

インパクト技術の指標として, 衝突の際に有効に働いた質量, つまり換算質量 (Plagenhoef, 1971) を算出した (Eq.2).

$$M = \frac{mV_{b1}}{V_{f0} - V_{f1}} \tag{2}$$

ここで、M は換算質量、m はボールの質量、 V_{b0} はインパクト前のボール速度、 V_{b1} はインパクト後のボール速度、 V_{f0} はインパクト前の足部速度、 V_{f1} はインパクト前の足部速度を示す。

4) 反発比

インパクト技術の指標の二つ目として,運動量伝達の効率としてもとらえられる,反発比 (Nunome et al., 2006b) を算出した (Eq.3).

$$R = V_{b1}/V_{f0} \tag{3}$$

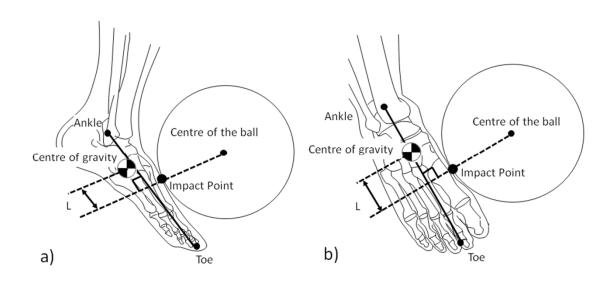


Figure 3. Definition of impact point distance: (a) instep kick; and (b) inside kick.

ここで、Rは反発比を示す.

5) 足関節角度

インパクト時における足部の底背屈,内外転,内外反を検討するため,足関節角度変位を求めた (Fig. 4).

底背屈角度は ($\angle a$), 外踝からつま先へ向かうベクトルと外踝から膝へ向かうベクトルとの成す角度とし、内外転角度 (慣性座標系における内外転角度) は ($\angle b$), 水平面内における外踝からつま先へ向かうベクトルと X 軸との成す角度とした。また、内外反角度は ($\angle c$), 下腿 (外踝から膝へ向かうベクトル) に対する、足部長軸 (踵からつま先へ向かうベクトル) 回りの回転角度とした (Nunome et al., 2006b; Shinkai et al., 2009a).

各回転をそれぞれ背屈 (-) / 底屈 (+), 内転 (+) / 外転 (-), 内反 (+) / 外反 (-) とした. インパクト中に生じる足関節角度変位の最大角度と最小角度の差を足関節角度変化量とした.

6) 統計処理

性差及び 2 種類のキックの差を検定するため、二元分散分析 (ANOVA) を用いた. 因子的二元分散分析は、経験が性別と無関係であることを確定した (p<0.05). 多重比較は、二元分散分析の有意差を評価するため Student-Newman-Keuls 法を用いて検定を行い、有意水準 5%未満について判定した.

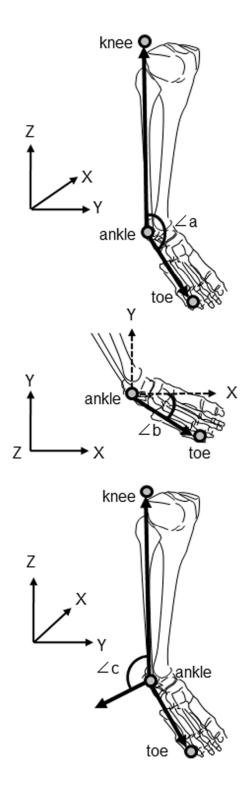


Figure 4. Definition of angular displacement of the foot joint (posture): (\angle a) angular displacement for dorsi-plantar flexion; (\angle b) external rotation-internal rotation; and (\angle c) inversion-eversion.

3.3 結果

3.3.1 ボール速度

女子選手のインステップキックのボール速度の平均値は 22.0 ± 2.6 m/s, インサイドキックは 19.0 ± 2.1 m/s であった (Fig. 5a). それに対して、男子選手のインステップキックの平均値は 26.6 ± 2.5 m/s, インサイドキックは 21.9 ± 2.0 m/s となっていた. インステップキック及びインサイドキックにおける女子選手の平均ボール速度は、男子選手よりも小さな値を示し、統計的にも有意な差がみられた (p < 0.05).

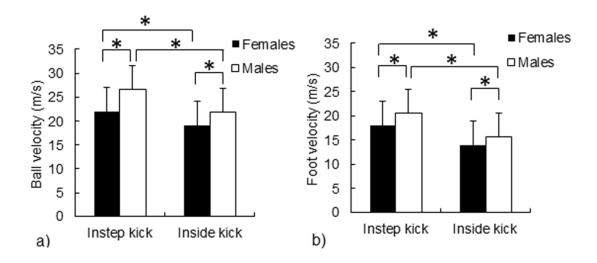
女子選手及び男子選手におけるインステップキックの平均ボール速度は、インサイドキックよりも高い値を示した (p<0.05).

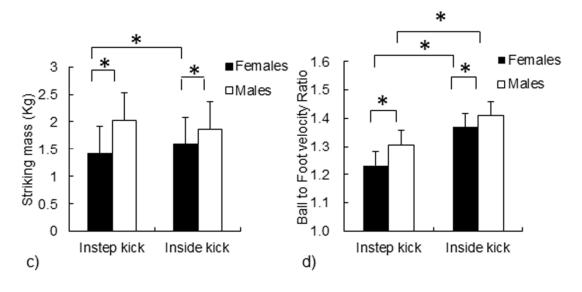
3.3.2 足部速度

Figure 5b は、インパクト直前の足部速度を平均したものである.女子選手のインステップキックにおけるインパクト直前の足部速度の平均値は $18.0 \pm 1.8 \text{ m/s}$ 、インサイドキックの平均値は $14.0 \pm 1.3 \text{ m/s}$ であった.一方,男子選手のインステップキックにおけるインパクト直前の足部速度の平均値は $20.5 \pm 2.2 \text{ m/s}$ 、インサイドキックの平均値は $15.6 \pm 1.4 \text{ m/s}$ であった.インステップキック及びインサイドキックにおける女子選手の足部速度は,男子選手よりも有意に小さな値を示した (p < 0.05).

3.3.3 換算質量

女子選手のインステップキックの換算質量の平均値は 1.42 ± 0.59 kg, インサイドキックは 1.59 ± 0.63 kg であった (Fig. 5c). それに対して、男子選手のインステップキックの平均値は 2.02 ± 1.20 kg, インサイドキックは 1.87 ± 0.96 kg となっていた。インステップキック及びインサイドキックにおける女子選手の平均換算質量は、男子選手よりも小さな値を示し、統計的にも有意な差がみられた (p < 0.05).





* Significantly different, P < 0.05

Figure 5. Gender differences in (a) ball velocity, (b) foot velocity, (c) striking mass, and (d) ball-to-foot velocity ratio for instep and inside kicks.

3.3.4 反発比

インステップキックにおける反発比の女子選手の平均値は、 1.23 ± 0.16 であるのに対して、男子選手の平均値は 1.31 ± 0.18 になっており、女子選手は男子選手より低い値を示した (Fig. 5d). 一方、インサイドキックにおける女子選手の平均値は 1.37 ± 0.14 であるのに対して、男子選手の平均値は、 1.41 ± 0.16 となっていた。インステップキック及びインサイドキックにおける女子選手の反発比は、男子選手よりも有意に小さな値を示した (p<0.05)。また、男女共に、インステップキックにおける反発比の平均値は、インサイドキックの平均値よりも高い値を示した (p<0.05)。

女子選手におけるインステップキック及びインサイドキックのインパクト直前の足部速度と反発比の関係をみると、やや高い正の相関がみられ (r=0.71, p<0.05; r=0.61, p<0.05)、男子選手においても同様の傾向がみられた (r=0.62, p<0.05; r=0.65, p<0.05). 女子選手におけるインステップキックのインパクト直前の足部速度と反発比の間には、やや高い負の相関がみられ (r=-0.64, p<0.05)、男子選手においても同様の傾向がみられた (r=-0.60, p<0.05).

3.3.5 足関節角度変化量

Figure 6a は女子選手及び男子選手の足関節底背屈角度変化量の平均値を示したものである。女子選手のインステップキックにおける足関節底背屈角度変化量の平均値は 14.3 ± 8.6 deg., インサイドキックは 5.2 ± 2.3 deg.であった。それに対して、男子選手のインステップキックにおける足関節底背屈角度変化量の平均値は 11.9 ± 8.3 deg., インサイドキックは 4.9 ± 2.1 deg.となっていた。

Figure 6b は女子選手及び男子選手の足関節内外転角度変化量の平均値を示したものである。女子選手のインステップキックの平均値は 7.3 ± 3.0 deg., インサイドキックは 16.1 ± 6.8 deg.であった。それに対して、男子選手のインステップキックの平均値は 5.4 ± 2.4 deg., インサイドキックは 14.9 ± 6.7 deg.となっていた。

Figure 6c は女子選手及び男子選手の足関節内外反角度変化量の平均値を示したものである。女子選手のインステップキックの平均値は 3.6 ± 1.3 deg., インサイドキックは 4.8 ± 2.0 deg.であった。それに対して、男子選手のインステップキックの平均値は 4.8 ± 3.2 deg., インサイドキックは 5.2 ± 3.3 deg.となっていた。

3.3.6 反発比,インパクトポイント及び関節角度変化量の関係

インステップキック及びインサイドキックにおけるインパクトポイントと, 反発比の関係を全体的にみると, 男女ともに, インパクトポイントが足部の部分重心から離れるにしたがって, 反発比が低下する傾向が見られた (Fig. 7a, b). また, インパクトポイントの分布は, 男女とも, インステップキックでは足部重心からつま先側に位置しているが, インサイドキックでは, 足部重心からつま先側と踵側の両方に分布していた.

インステップキックの女子選手における重心付近の反発比は約 1.35 であり,男子選手の約 1.45 より,やや小さい傾向を示した (Fig. 7a, b). また,女子選手の反発比の平均値は,男子選手より有意に小さかった (p < 0.05). さらに,女子選手の足関節変化量 (底屈) は,インパクトポイントが足部の部分重心から離れるにしたがって,男子選手より大きくなる傾向がみられた (Fig. 8a, b).

インサイドキックにおける女子選手の重心付近の反発比は約 1.14 であり、男子選手の約 1.15 より、やや小さい傾向を示した (Fig. 7c, d). また、男女とも、インパクトポイントが足部の部分重心から離れるにしたがって、反発比が低下しており、その傾向は同様であった。全体的な女子選手の反発比の平均値は、男子選手の平均値と有意な差はみられなかった。さらに、女子選手の足関節変化量 (外転) とインパクトポイントの関係は、男子選手のそれと同様の傾向を示し、男女間で大きな差はみられなかった (Fig. 8c, d). 女子選手のインステップキックおける反発比は、インサイドキックのそれより小さい傾向を示した。また、男子選手のインステップキックおける反発比も、同様にインサイドキックのそれより小さい傾向を示した。さらに、インステップキックおける反発比の平均値は、インサイドキック

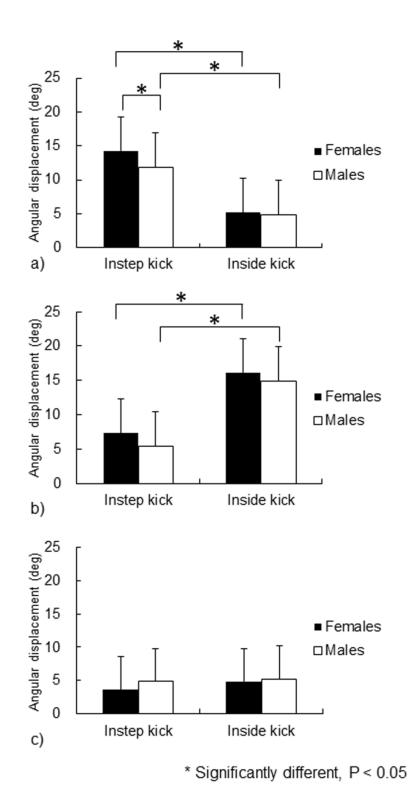


Figure 6. Gender differences in (a) angular displacement for dorsi-plantar flexion, (b) external rotation—internal rotation, (c) and inversion—eversion of the foot joint for instep and inside kicks.

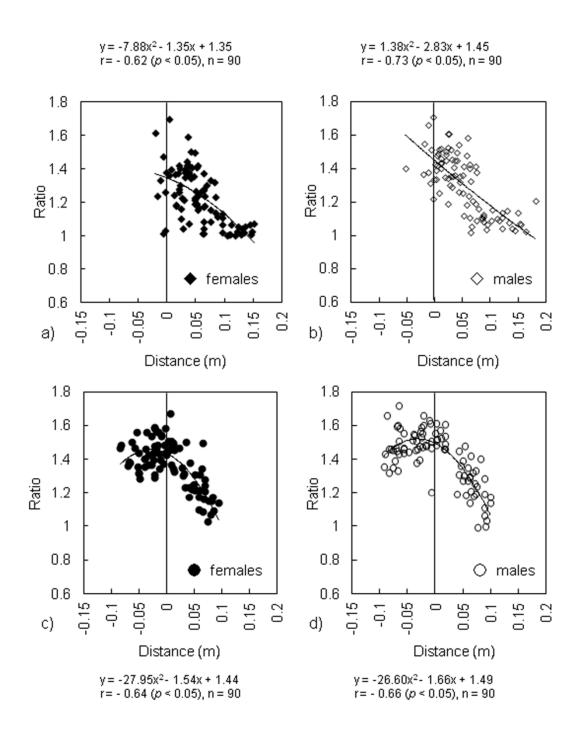


Figure 7. Relationship between impact distance and ball-to-foot velocity ratio: (a) instep kicks by females; (b) instep kicks by males; (c) inside kicks by females; and (d) inside kicks by males.

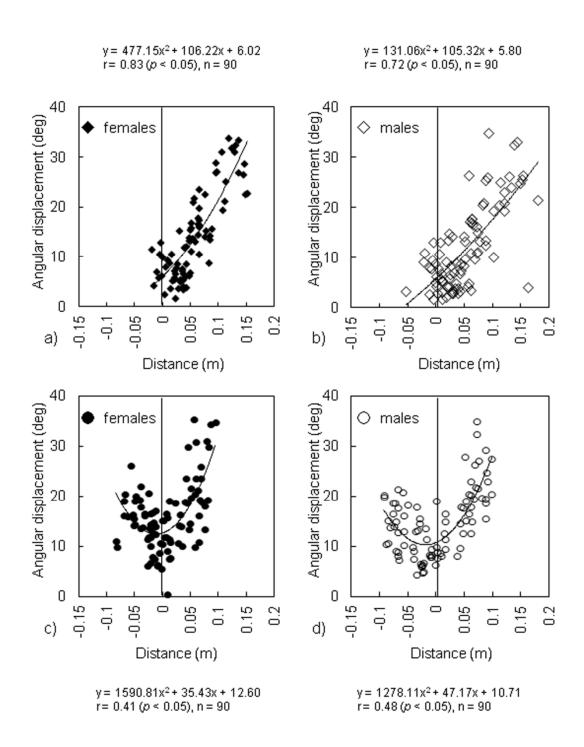


Figure 8. Relationship between the impact distance and angular displacement: (a) extension angle for instep kicks by females; (b) extension angle for instep kicks by males; (c) external rotation angle for inside kicks by females; and (d) external rotation angle for inside kicks by males.

のそれより有意に小さい値を示した (p<0.05). また, インサイドキックにおけるインパクトポイントの位置は, インステップキックより比較的足部の重心近くに集まっている傾向がみられた.

全体的に、男女のインステップキックとインサイドキックにおける、インパクト距離と 反発比の関係をみると、いずれの試技においても重心付近の反発比は高く、離れるにした がって減少する傾向がみられた。

3.4 考察

3.4.1 ボール速度への影響要因

本実験におけるボール速度は、インステップキックとインサイドキック共に、女子選手 の平均値の方が男子選手より小さな値を示している.この結果の大きな要因として、足部 速度、換算質量、反発比の違いが考えられる、本実験の女子選手におけるインステップキ ックのボール速度の平均値は、Shan et al. (2009) の女子選手のボール速度 (19.6 ± 2.6 m/s) よりも 2.4 m/s 高く, Barfield et al. (2002) の女子選手のボール速度の平均値 (21.5 ± 2.44 m/s) と同様の値を示した、本実験の男子選手におけるインステップキックのボール速度の平均 値は, Dörge et al. (2002) の男子選手のボール速度 (24.7 ± 2.5 m/s) よりも 1.9 m/s 高く, Nunome et al. (2002) の男子選手のボール速度の平均値 (23.4 ± 1.7 m/s) よりも 2.9 m/s 高か った. 本実験の女子選手におけるインステップキックのボール速度の平均値は, Barfield et al. (2002) の女子選手の足部速度 (16.2 ± 2.3 m/s) よりも高かった. 本実験の女子選手 (stature: 161.4 ± 4.5 cm, weight: 56.0 ± 3.4 kg) は, Barfield et al. (2002) の女子選手 (stature: 164.3 cm, weight: 60.1 kg) と比べ、体格的に小柄であるため、筋力及びパワーは小さいと推定される が、その影響はほとんどなかったと思われる. 本実験と Barfield et al. (2002) の女子選手に おけるボール速度の違いの要因として、ボールインパクトや運動技術の違いが考えられる. また, 本実験の男子選手におけるインステップキックの平均足部速度は, Dörge et al. (2002) の男子選手の平均値 (18.6 m/s) よりも 1.9 m/s 高い値を示した. 本実験の男子選手の身長の

平均値 (172.0 ± 4.4 cm) は、Dörge et al. (2002) の男子選手の身長の平均値 (181.0 ± 0.06 cm) よりも 9.0 cm 低かったにも関わらず、インステップキックにおける平均足部速度は大きな値を示した.男子選手のインサイドキックの平均値は、Nunome et al. (2002) の男子選手の平均足部速度 (19.1 ± 1.1 m/s) よりも約 1.4 m/s 高い値を示した.これらのことから、大学生年代における女子選手の足部速度は、男子選手より、やや小さい傾向にあると考えられる.Barfield et al. (2002) は、エリート女子サッカー選手を対象とした同様の実験結果に関する原因として、男子選手よりもインパクト前の膝の角速度が大きく、屈曲トルクが早い段階で発生することが足部の速度を減少させるとしており、本実験においてもそれが原因の一つになっている可能性がある.また、女子選手は男子選手より筋力、筋パワー等の身体資源が劣っている傾向にあり、それが足部速度の差に影響を及ぼしていると推測される(Robert et al, 2010).したがって、自明のことではあるが、女子選手の筋力、筋パワー等の身体資源を向上させることは、足部速度を増大させ、ボール速度の向上に貢献すると考えられる.

3.4.2 換算質量

本実験における女子選手の平均換算質量は、男子選手より、インステップキック、インサイドキック共に小さな値を示している (p<0.05). 本実験のインステップキックにおける男子選手の換算質量は、Asami and Nolte (1983) の値 (1.02±0.14 kg) よりやや大きな値を示している. これは、本実験の男子選手の足部速度が Asami and Nolte (1983) の値より小さいこと、インパクト計測部位が異なること、実験に用いられたボールが違うこと等が関係していると推測される. 大学生年代における女子選手の換算質量が男子選手より、やや小さい傾向にあると考えられる大きな原因として、身長、体重を代表とする体格や筋肉量の差が考えられる. また、換算質量は比較的抽象的な力学量であり、インパクト時の姿勢や関節固定の程度にも影響を受けると思われる. しかし、換算質量を増大させる技術的メカニズムは明らかではなく、今後の課題の一つであると考えられる.

3.4.3 インステップキックにおける反発比

本実験のインステップキックにおける女子選手の平均反発比は、男子選手より小さな値 を示している (p<0.05). 本実験における男子選手のインステップキックの反発比は、Kellis et al. (2006) の値 (1.40 ± 0.12) よりやや小さく, Nunome et al. (2006b) の値 (1.35 ± 0.09) と 同様の値を示し、ほぼ妥当な値であると考えられる、女子選手のインステップキックにお ける足関節底背屈角度変化量の平均値は男子選手より大きな値を示している (p < 0.05). ま た, 本実験における女子選手の平均値は, Shinkai et al. (2009a) の男子選手の平均値 (7.1±5.8 deg.) より大きい値であった. 女子選手のインステップキックにおけるインパクトポイント 距離と反発比の関係をみると、重心から離れるに従って反発比が低下する傾向がみられる. また、男子選手における同様の関係をみると、重心からつま先側へ直線的に低下する傾向 を示している.この関係の回帰曲線をみると,女子選手は男子選手より,重心付近を最大 値として、やや曲線的に低下しており、女子選手の方が男子選手より小さな値を示す傾向 がみられている.この原因の一つとして、男子選手は女子選手より、技術的に安定してお り、インパクトポイントを重心付近により集中させているためと考えられる. Ishii et al. (2009) は、コンピュータシミュレーションにより、足部質量中心付近でボールをインパク トをすると反発比が大きくなり、ボール速度が大きくなることを示唆している. 本実験の 結果は、これらのコンピュータシミュレーションの研究を支持するものとなった.

インステップキックのインパクトポイント距離と足関節底背屈角度変化量の関係をみると、男女ともに重心から離れるに従って足関節底背屈角度変化量が大きくなる傾向がみられる.しかしながら、この関係の回帰曲線をみると、女子選手は男子選手より、傾きが大きく、重心付近の値も男子選手よりも高い値を示している.これは一般的に、女子選手が男子選手に比べ、筋力が少なく、足関節の可動域が大きいことが原因である可能性がある(Soucie et al. 2011).

反発比と足関節底背屈角度変化量の間には、やや高い負の相関がみられ (r = -0.67, p < 0.05)、反発比が大きな試技ほど足関節底背屈角度変化量が小さい傾向を示している。足関

節底背屈角度変化量は、インパクト時における足関節の剛性の指標として用いられている (Asami and Nolte, 1983). これらことから、女子選手のインパクト時における足関節の動的 なスティフネスは、男子選手より小さいと考えられ、それが女子選手の反発比が男子選手の反発比より小さいことの大きな原因の一つになっていると考えられる.

3.4.4 インサイドキックにおける反発比

本実験のインサイドキックにおける女子選手の平均反発比は、男子選手より、小さな値を示している (p < 0.05)。反発比と足関節内外転角度変化量の間には、インステップキック同様、やや高い負の相関がみられ (r = -0.60, p < 0.05),反発比が大きな試技ほど足関節底背屈角度変化量が小さい傾向を示している。また、この関係の回帰曲線をみると、女子選手は男子選手より、重心付近の値は男子選手よりも高い値を示している。

これらのことから、インサイドキックにおける足関節内外転角度変化量に男女差はみられないものの、インパクト時における足関節内外転角度変化量を小さくすることが反発比を増大させることの原因の一つになると考えられる。それゆえ、高いボール速度を生成させるためには、足部重心付近でインパクトすることが重要であると推測される。これは、インステップキックとインサイドキック両方に適用すると思われる。以上のことから、女子選手にとって、いかなるアプローチアングルやプレー状況においても足関節重心付近でインパクトし、高反発を得る感覚を身につけることは重要であると示唆された。

3.5 まとめ

本研究では、インステップキックとインサイドキックを対象に、3台の高速度ビデオカメラを用いて、女子選手と男子選手のボールインパクト時における力学的及び技術的特性について比較検討した。主な結果を以下に要約する。

1) インステップキックとインサイドキックにおいて、女子選手のボール速度、インパクト 直前の足部速度、換算質量、反発比の平均値は、男子選手の平均値より小さな値を示し た.

- 2) インステップキック及びインサイドキックにおける女子選手の重心付近の反発比は、男子選手より、小さな値を示す傾向がみられ、重心から離れるに従って反発比が低下する傾向を示した。
- 3) インステップキックにおける女子選手の重心付近の足関節底背屈角度変化量は、男子選手と比べ大きな値を示す傾向を示し、重心から離れるに従って足関節底背屈角度変化量が大きくなる傾向がみられた.
- 4) 女子選手における反発比と足関節内外転角度変化量の間には、インステップキック同様、 やや高い負の相関がみられ (r = -0.60, p < 0.05), 反発比が大きな試技ほど足関節底背屈 角度変化量が小さい傾向を示した。女子選手のインパクト時における足関節の動的なス ティフネスは、男子選手より小さいと考えられ、それが女子選手の反発比が男子選手の 反発比より小さいことの大きな原因の一つになっていると考えられた。

これらのことから、インステップキック、インサイドキック共に、反発比を増大させる ためには、女子選手の方が男子選手より相対的に反発比は小さいものの、重心付近でボールをインパクトすることが有効な技術要素の一つであると考えられる。これらの知見は、強力なシュートやロングキックの達成のみならず、バランスを崩した状態における速いパスやキック時のボール速度を高めることにも役立つ。この効果は、インステップキックやインサイドキックだけでなく、アウトサイドキックやカーブキックを含む足関節を用いたすべてのキックに適応できると考えられる。また、この技術を改善し習得することは、トラップやドリブルのようなボールに触れる他の技術に有用であると推測される。さらに、この技術の改善は、足関節の不要なモーメントの発生を軽減させ、足部の障害予防につながると考えられる。

本研究はボールインパクト局面のみを対象とした分析であり、男女差をより詳細に検討 するためには、キック動作全体を分析する必要がある。また、男女差に関するキネマティ クス的研究のみならず、キネティクス的研究も今後の課題の一つである.

第4章 女子サッカー選手のインステップキックにおける スイング動作特性

第4章 女子サッカー選手のインステップキックにおけるスイング動作特性

4.1 緒言

近年、女子サッカーは競技人口の増加に伴って競技力が高まっており、ゲーム展開も高速化し、強いシュートを打つことや速いパスを送ることが求められてきている。したがって、女子サッカー選手が高いパフォーマンスを発揮するためには、ボール速度を増大させるキック技術が極めて重要となっていると考えられる。しかし、大きい速度のボールをキックすることをパフォーマンス目的としたいわゆるキック力は、依然として男女の間で差があり、女子サッカー選手は男子選手よりボール速度が低いとされている(Tant et al., 1991;Barfield et al., 2002)。女子選手のボール速度が低い要因として、形態や筋力等の体力的要因が第一義的に上げられるが、それ以外にも、スイング技術等の技術的要因がボール速度に影響を及ぼしている可能性があると考えられる。

これまで男子選手のスイング技術に関する研究では (Nunome et al., 2002; Kellis and Katis, 2007; Lees et al., 2010), 大腿と下腿の運動連鎖技術の重要性が指摘されており (Lees and Nolan, 1998), 身体セグメント間のエネルギー再分配のメカニズムについても検討されている (Naito et al., 2012). さらに, 蹴り脚の股関節の上方への加速度が動作依存モーメントに及ぼす影響や, 蹴り脚股関節の鉛直方向への運動が足部速度の増加に貢献する可能性が示されている (布目, 2006; Inoue et al., 2000).

しかし、女子サッカー選手を対象とした研究は少なく、関節トルクに関する研究や (Lyle et al., 2011)、スイング技術を検討した研究が散見されるが (Tant et al., 1991; Shan, 2009; Sakamoto and Asai, 2013)、男子選手と同一条件下で比較検討した研究はほとんどない. しかも、スイング動作における関節トルク、運動連鎖技術、股関節の鉛直方向への運動は、重要な技術要因として指摘されており、それらの技術要因に関して、女子選手と男子選手を比較検討することは、女子選手のスイング特性を分析するためには、極めて重要であると考えられる.

そこで本研究では、サッカーのインステップキック動作を対象に、フォワードスイングにおける関節トルク、運動連鎖におけるエネルギー比、蹴り脚股関節鉛直力を男女間で比較検討することにより、女子選手がボール速度を高めるための技術的要因を明らかにしようとした。 さらに、順動力学によるフォワードスイングの数値シミュレーションを実施し、蹴り脚股関節鉛直力がスイング速度に及ぼす影響を定量的に検討した。

4.2 方法

4.2.1 被験者

被験者は、サッカー経験が 10 年以上の大学女子サッカー選手 13 名 (stature, 160.4 ± 4.9 cm; body weight, 57.1 ± 5.7 kg)、男子サッカー選手 13 名 (stature, 174.3 ± 4.7 cm; body weight, 66.8 ± 4.9 kg) とした。被験者には、事前に実験の目的と内容、危険性について十分に説明し、書面で実験の参加への同意を得た。これらの手順は、筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て行われた。全被験者の利き脚は右脚であった。

4.2.2 実験試技

実験試技は、インステップ部分(足の甲を中心としたつま先から足首までの部分)でボールを捉えるキック動作(インステップキック)とした。被験者には、十分なウォーミングアップを行わせた後、プレイスしたサッカーボール(Adidas 社製、FIFA 公認 5 号球、質量 430g, 空気圧 900 hp)を自由助走から利き脚を用いて全力で 10 m 先の標的に向かってキックさせた。全試技(4-10 試技)のうちゴールの中心 2 m 四方の範囲にキックされたものを成功試技とし、各被験者から 2 試技ずつを抽出した。男女、それぞれ計 52 試技を分析対象とした。着用したサッカーシューズに起因するボールインパクト時の足部とボールの力学的相互作用への影響を最小限にするために、全ての被験者には、サイズが異なる同型の屋内用サッカーシューズ(Asics 社製、DESTAQUE 2 J)を着用させた。

4.2.3 測定方法及び測定項目

撮影は、赤外線カメラ 10 台 (Vicon Motion Systems 社製, Vicon MX, 250 Hz) を用いて行い、身体各部 (反射マーカーを両面テープにより身体計測点に 47 点貼付) 及びボール (反射マーカーを上下左右に4点貼付) の 3 次元座標データを 250 Hz で収集した (苅山ほか、2013). その際の静止座標系は、試技開始時のキック方向 (被験者前方) に直交する方向を X軸, 試技開始時のキック方向を Y軸, 鉛直上方向を Z軸とする右手座標系と定義した. キック動作の撮影と同時に、プレイスしたボールの左側方に埋設されたフォースプラットフォーム (Kistler 社製、Type9287) を用いて、支持脚によって発揮された地面反力をサンプリング周波数 1000 Hz で計測した.

4.2.4 分析方法

1) ボール速度

ボール中心を,ボール上下端の座標値及び左右端の座標値よりできる 2 本の弦の交点とし,その速度ベクトルを算出した. なお,ボール速度は水平内外方向 (X 軸方向),水平前後方向 (Y 軸方向)及び鉛直上下方向のボール速度ベクトルを合成したものとした.

2) 足部重心速度

足部の重心は、日本人アスリートの身体部分慣性係数 (阿江, 1996) を用いて幾何学的に 求め、その速度ベクトルを算出し、足部速度とした。

3) 股関節中心速度, 膝関節中心速度及び足関節中心速度

股関節の関節中心は、倉林ほか (2003) の推定法を用いて算出した。また、膝関節及び足関節中心は、それぞれの関節における内顆及び外顆に貼付したマーカーの中点とし、その速度ベクトルを算出した。なお、水平前後方向 (ボール飛翔方向) の速度を水平速度とした。

4) 骨盤角度及び下肢関節角度

本研究では、運動自由度を 3 とする 14 の関節により連結された 15 の剛体セグメントによって全身をモデル化した。また、身体各部位の 3 次元座標から運動自由度ごとに移動座

標系を設定し (苅山ほか, 2013), キック動作における骨盤及び下肢の各関節角度を算出した. 骨盤における運動は,前傾,右屈及び内旋を正,後傾,左屈及び外旋を負とした. また,フォワードスイング局面における骨盤角度の最大値と最小値の差分を角度変化量とした. 下肢の各関節における運動方向は,伸展,外転及び外旋を正,屈曲,内転及び内旋を負とした.

5) 下肢関節トルク

大腿,下腿,足部において,セグメントの長軸方向に対して,互いが直交する3軸のセグメント座標系を設定した(Fig. 9). セグメント角速度を小池ほか(2006)の方法により算出し,各セグメントの重心位置,質量,慣性モーメントは,阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて算出した.そして,得られた身体座標点の3次元座標値と,フォースプラットフォームにより計測された地面反力データを用いて逆動力学計算を行ない,下肢の関節トルクを求めた.

6) 蹴り脚のエネルギー

ボールキック時の蹴り脚における大腿から下腿へのエネルギー伝達を検討するため (Plagenhoef, 1971; Hof, 2001; Dörge et al., 2002; Kellis and Katis, 2007), 大腿-下肢エネルギー 比を算出した (Eq. 1). 支持脚接地時から蹴り脚のボール接触時までの局面において,支持 脚接地時から蹴り脚大腿の力学的エネルギーのピーク値までの期間をフォワードスイング前期, 蹴り脚大腿エネルギーのピーク値直後から蹴り脚のボールインパクト直前までを フォワードスイング後期とし, フォワードスイング後期における下腿の力学的エネルギー の積分値を後期の大腿の力学的エネルギーの積分値で除すことにより, 比率を算出した (Eq. 1).

$$\int E_{st} = \frac{E_s}{E_t} \tag{1}$$

 E_{st} は大腿-下腿エネルギー比, E_s は下腿における力学的エネルギーの積分値, E_t は大腿における力学的エネルギーの積分値を表す.

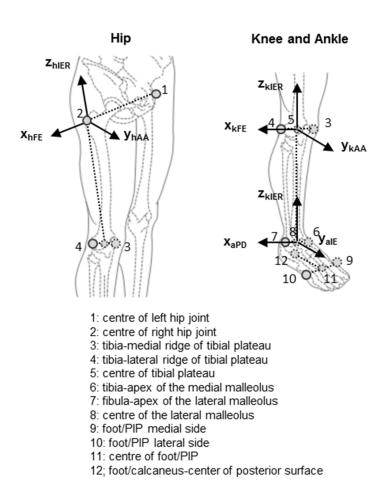


Figure 9. Definition of the joint coordinate systems fixed at the centre of the hip, knee and ankle joints to express the anatomical joint rotations.

7) 平滑化

各座標値は,ボールインパクト後のデータを直線回帰式 (角度:3次式,速度及び角速度:2次式,関節トルク:1次式) (Nunome et al., 2006a; 井上ほか, 2013) によって15点外挿した後,4次の位相ずれのない Butterworth low-pass digital filter を用いて平滑化を行った (Winter 2004). 本実験で用いた遮断周波数は,速度及び角速度,力学的エネルギーが20 Hz,関節トルクは12.5 Hz とした.

8) 動作の分析範囲 (フォワードスイング局面) 及びデータの規格化・平均化

本研究では、フォワードスイング局面を支持脚の接地から蹴り脚のボール接触時までとし、各被験者がフォワードスイング局面に要した時間を100%としてデータを規格化し、全被験者のデータを1%ごとに平均した。なお、支持脚の接地は、フォースプラットフォームにより鉛直力が20Nを得られた時点とした(Lees et al., 2009)。

9) 統計処理

本研究では、女子選手と男子選手の平均値の差を検定するために、対応のない t 検定を用いた. なお、有意性は危険率を 5 %未満で判定し、10 %未満を有意傾向として扱った.

10) 順動力学シミュレーション

本研究では、蹴り脚における股関節並進力の鉛直成分(鉛直力)がスイング速度に及ぼす影響について、順動力学シミュレーションによって検討した。運動の記述は、キック動作を行う右下肢のみとし、膝関節、股関節の2重振子としてモデリングを行った(Fig. 10)。ボールキックの運動は、矢状面に平行な2次元平面で生起するものとし、股関節(振子の支点)まわりの回転運動と共に股関節自体の並進運動も実現するように定義した(Eq. 2-5)。本シミュレーションでは、フォワードスイング局面における股関節鉛直力が0%の場合(計測基データ)、5%増大した場合(+5%ケース)、10%増大した場合(+10%ケース)、5%減少した場合(-5%ケース)、10%減少した場合(-10%ケース)のスイング速度を算出した。

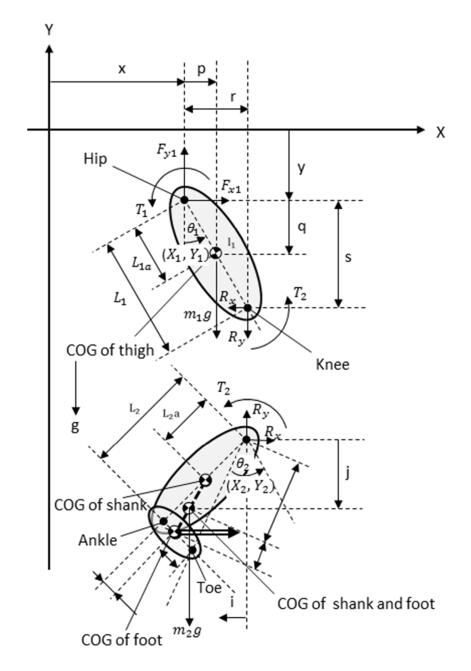


Figure 10. Two dimensional double pendulum model.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} = Fx_1 \tag{2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = F y_1 \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = T_1 \tag{4}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = T_2 \tag{5}$$

FX₁ は股関節の水平方向力,FY₁ は股関節の鉛直方向力,L はラグランジアン,T1 は股関節トルク,T2 は膝関節トルク, θ 1 は股関節の回転運動, θ 2 は膝関節の回転運動を示す.

4.3 結果

- 4.3.1 キック動作におけるボール速度と下肢関節運動
- 4.3.1.1 ボール速度およびボールインパクト直前の足部水平速度

女子選手の平均ボール速度は 22.0 ± 1.4 m/s であるのに対し、男子選手は 26.5 ± 2.0 m/s であった (Fig. 11). 女子選手は男子選手より平均値で約 17 %小さい値を示し、統計的にも有意な差がみられた (p < 0.05). また、女子選手のインパクト直前の足部速度は 18.3 ± 0.7 m/s であり、男子選手は 20.9 ± 1.3 m/s であった (Fig. 3). 女子選手は男子選手より平均値で約 12 %小さい値を示し、統計的に有意な差がみられた (p < 0.05).

3.1.2 蹴り脚の足関節、膝関節、股関節における水平速度および鉛直速度

女子及び男子選手の足関節水平速度例では、共にフォワードスイングの後半に大きく増 大していたが、フォワードスイング局面全体に渡って、女子は男子より小さい傾向を示し た (Fig. 12a). 膝関節水平速度は、男女共にフォワードスイングの中盤にピークを迎え、イ

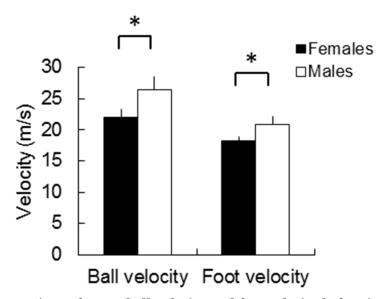


Figure 11. Comparison of mean ball velocity and foot velocity before impact for female and male players.

ンパクトに向かって減少していた (Fig. 12b). また, 女子選手のピーク値 (8.4 m/s) は, 支 持脚接地時から 0.06 秒後にみられており, 男子選手の値 (11.1 m/s; 0.052 後) よりも遅い時 間にみられた、女子選手のフォワードスイングの時間は、全体的に男子選手より長く、膝 関節水平速度が股関節水平速度を超えるタイミングも遅かった. この傾向は, 他の女子被 験者にも同様にみられ、スイング時間の平均値においても、男女間で有意な差が認められ た (p < 0.05) (Fig. 12a-c).股関節水平速度は,男女共にインパクトに向かって漸減したが, 足関節や膝関節と比較して値の変化は小さかった (Fig. 12c). 足関節, 膝関節, 股関節の水 平速度の平均値においても同様の傾向がみられた (Fig. 12d-f). また, 女子選手における足 関節, 膝関節, 股関節の水平速度の平均ピーク値は, それぞれ 16.0±0.6 m/s, 8.8±0.6 m/s, 3.8 ± 0.3 m/s であり (Fig. 12d-f), 鉛直速度の平均ピーク値は, 0.6 ± 1.0 m/s, 1.8 ± 0.6 m/s, 1.1 ± 0.4 m/s であった (Fig. 13d-f). また,男子選手における足関節,膝関節,股関節の水平 速度の平均ピーク値は, 18.2 ± 1.1 m/s, 10.3 ± 0.9 m/s, 4.4 ± 0.6 m/s であり, 鉛直速度の平均 ピーク値は、 0.3 ± 1.3 m/s、 2.2 ± 0.9 m/s、 1.5 ± 0.4 m/s であった。女子及び男子選手における 蹴り脚の足関節鉛直速度例では、フォワードスイング全体に渡って負の値を示した (Fig. 13a). また, 膝関節鉛直速度例では, 女子選手の支持脚接地時の値 (-1.2 m/s) は男子選手の 値 (-2.2 m/s) よりも高かったが、女子選手のピーク値 (1.3 m/s) は、男子選手のピーク値 (1.9 m/s) よりも低かった (Fig. 13b). さらに, 股関節鉛直速度例は, フォワードスイング 中盤において負から正に切り替わり,局面全体を通して増加した (Fig. 13c).これは足関節, 膝関節,股関節の鉛直速度の平均値においてもまた同様の傾向がみられた (Fig. 13d-f).

4.3.1.3 支持脚の股関節における水平及び鉛直速度

女子及び男子選手のフォワードスイング局面における支持脚の股関節水平速度例では, 支持脚接地時から約 0.03 秒まで急激に減少し, その後は減少の度合いを緩めた (Fig. 14a). これらの傾向は, 他の被験者においても同様にみられた (Fig. 14d). 女子及び男子選手のフォワードスイング局面における支持脚の股関節鉛直速度例では, 男女共にフォワードスイ

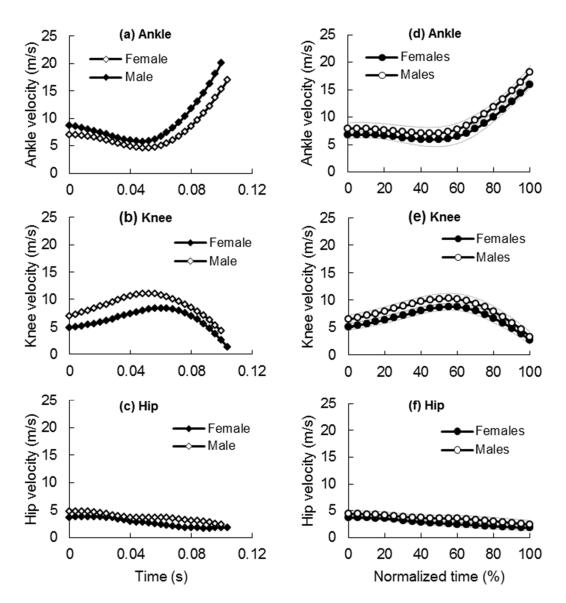


Figure 12. Plots a, b, and c represent typical/standard values for joint horizontal velocities of the kicking leg for female and male players: (a) ankle velocity; (b) knee velocity; (c) hip velocity. Plots d, e, and f represent the average values obtained for joint horizontal velocities of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) ankle velocity; (e) knee velocity; (f) hip velocity.

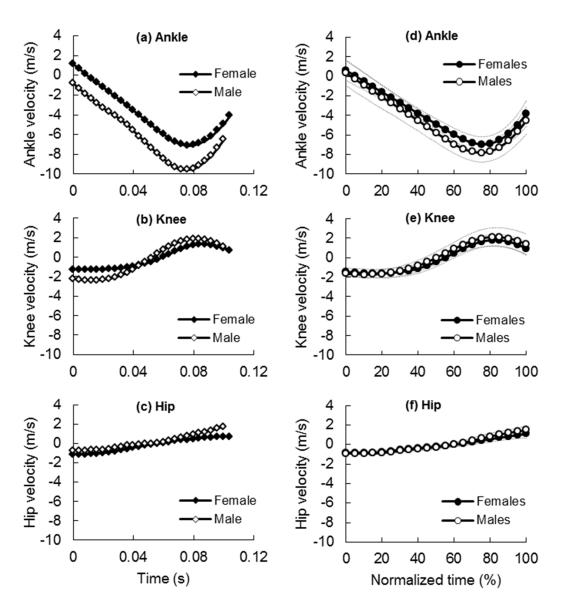


Figure 13. Plots a, b, and c represent typical/standard values for joint vertical velocities of the kicking leg for female and male players: (a) ankle velocity; (b) knee velocity; (c) hip velocity. Plots d, e, and f represent the average values obtained for joint vertical velocities of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) ankle velocity; (e) knee velocity; (f) hip velocity.

ング中盤において値が負から正に切り替わり、局面全体を通して直線的に増加していた (Fig. 14b). 支持脚の股関節鉛直速度が負から正に切り替わるタイミングは、女子選手の方が男子選手に比べ早い傾向を示した. また、男女共に支持脚の股関節鉛直速度が負から正に切り替わるタイミングは、蹴り脚の股関節鉛直速度のそれより早かった. これらの傾向は、他の被験者においても同様にみられた (Fig. 14d). 女子選手における支持脚股関節鉛直速度の平均ピーク値は約 1.0 ± 0.3 m/s であり、男子選手の平均ピーク値は約 1.3 ± 0.4 m/s であった (Fig. 15).

4.3.1.4 蹴り脚及び支持脚における股関節の変位と骨盤角度

女子及び男子選手の蹴り脚の股関節鉛直変位例では、支持脚接地時(女子選手; 0.75 m, 男子選手; 0.78 m) からボールインパクト時(女子選手; 0.69 m, 男子選手; 0.77 m) までわずかに減少しており、その後、フォロースルー時において増大し、ピークに達する傾向がみられた (Fig. 16a). 女子選手の蹴り脚の股関節鉛直変位におけるピーク値 (0.85 m) は、男子選手のピーク値 (1.13 m) よりも小さく、支持脚接地時からピーク値に達するまでの期間において、女子選手の蹴り脚における股関節鉛直変位変化量は、男子選手の変化量よりも小さい値を示した。また、女子選手の蹴り脚の変化量の平均値は (0.20 ± 0.06 m)、男子選手の平均値 (0.26 ± 0.07 m) よりも有意に小さかった (p<0.05). 女子選手の支持脚接地時からボールインパクトまでにかかる時間は、0.13 秒であり、男子選手 (0.12 秒) の時間よりも長くかかっている。また、女子選手の股関節鉛直変位例におけるインパクトからピークに達するまでの時間 (0.36 秒) は、男子選手 (0.33 秒) と比較して長かった。

女子及び男子選手の支持脚の股関節鉛直変位例は、蹴り脚の変位例同様に、支持脚接地時からボールインパクト時までわずかに減少し、インパクト時からフォロースルー終了時まで漸増していく傾向がみられた (Fig. 16a). 女子選手の支持脚のピーク値 (0.82 m) は、インパクト時から 0.34 秒後にみられており、男子選手の値 (1.10 m; 0.37 秒後) よりも遅い時間にみられた。女子選手の支持脚の変化量の平均値は (0.21 ± 0.05 m)、男子選手の平均値

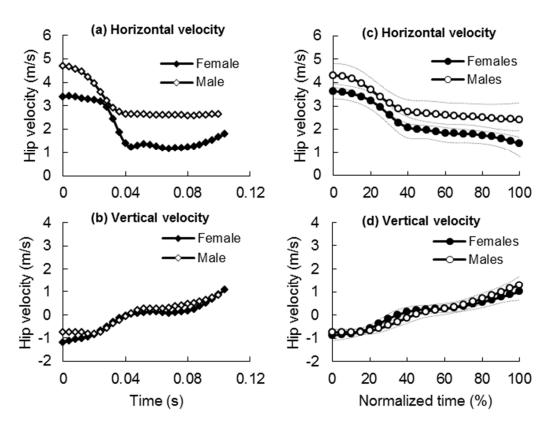


Figure 14. Plots a and b represent typical/standard values for hip velocities of the support leg for female and male players: (a) = horizontal velocity; (b) = vertical velocity. Plots c and d represent the average values obtained for hip velocities of the support leg among the female and male players in the current study: (c) horizontal velocity; (d) vertical velocity.

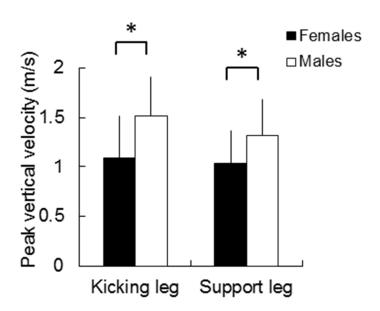


Figure 15. Comparison of peak vertical hip velocity of kicking and support leg for female and male players.

 $(0.28 \pm 0.07 \,\mathrm{m})$ よりも有意に小さかった (p < 0.05). また、男女共に、支持脚がピークに達した時間は、蹴り脚の時間よりも遅くにみられた.

4.3.1.5 蹴り脚股関節及び膝関節の角度と骨盤角度

女子及び男子選手のフォワードスイング局面における蹴り脚股関節角度の平均値は、共にインパクト時からフォロースルー終了時まで増加していく傾向がみられた (Fig. 16e). また、女子選手の蹴り脚股関節角度は、全期間において男子選手よりも小さい値を示しており、支持脚接地時の股関節角度 (女子選手; -29.3 \pm 8.0, 男子選手; -22.8 \pm 7.8) は、男女間で有意な差がみられた (Fig. 16c) (p < 0.05).

女子及び男子選手の蹴り脚膝関節角度の平均値では、共に支持脚接地時から中盤まで減少し、ピークを迎えると、その後インパクトまで増加する傾向を示した (Fig. 16f). また、女子選手の支持脚接地時の膝関節角度 (96.5 \pm 13.3) は、男子選手の角度 (89.6 \pm 8.0) よりも有意に大きかった (Fig. 16d) (p < 0.05).

女子及び男子選手のフォワードスイング局面における骨盤前後傾角度例では、共に支持脚接地時から中盤までは前傾を保持し、その後インパクトまで後傾を示した (Fig. 17a). この傾向は他の被験者にもみられ、全期間において男子選手よりも高い値を示した (p<0.05) (Fig. 17d). また、前後傾角度の平均値は、男女共に中盤で前傾から後傾に転じており、その前傾から後傾に切り替わるタイミングは、女子選手のタイミングの方が男子選手のタイミングに比べ遅かった (Fig. 17d). 女子のフォワードスイング局面における骨盤の左右屈角度例では、左屈位で推移していたが、支持脚接地からインパクト時まで右屈していく傾向がみられた (Fig. 17b). 一方、男子選手の骨盤の左右屈角度例では、左屈位で推移していたが、インパクト時までほぼ一定の角度を維持していた。また、他の被験者においても左屈位で推移している傾向がみられた (Fig. 17e). 女子選手の骨盤側方傾斜角度変化量の平均値 (8.3 ± 2.8 deg.) は、男子選手の変化量の平均値 (6.4 ± 2.9 deg.) よりも大きい傾向を示した (p<0.05). フォワードスイング局面における女子及び男子選手の骨盤回旋角度例では、男女

共に支持脚接地時からボールインパクト時まで増大する傾向を示した (Fig. 17c). また,他の被験者にも同様の傾向が示された (Fig. 17f). フォワードスイング局面における女子選手の回旋角度変化量の平均値 (18.7 \pm 6.0 deg.) は,男子選手の変化量の平均値 (21.7 \pm 6.8 deg.) よりもわずかに小さい傾向を示したが,有意な差はみられなかった (Fig. 17f).

3.2 蹴り脚の膝関節および股関節トルク

女子及び男子選手の膝関節屈曲伸展トルク例では、フォワードスイング局面前半から中盤にかけて伸展トルクを示し、ピーク (51.2 Nm) を迎えると、インパクトに向けて減少していた (Fig. 18a). 女子選手の膝関節屈曲伸展トルク例は、男子選手の例のようなピーク値 (86.9 Nm) からインパクトまでの著しい減少はみられなかった。膝関節内外転トルクは、男女共にフォワードスイング局面全体に渡って内転トルクを示したが、その値は屈曲伸展トルクより小さかった (Fig. 18b). 膝関節内外旋トルクは、男女ともに内外転トルクよりさらに小さい値を示した (Fig. 18c). これらの傾向は他の被験者にもみられた (Fig. 18d-f). また、全ての膝関節トルクの平均値は、女子選手よりも男子選手の方が大きかった (p<0.05).

女子選手のフォワードスイング局面における膝関節伸展トルクの平均ピーク値は,54.4±18.1 Nm, 内外転トルクの平均ピーク値は23.0±7.8 Nm, 内外旋トルクの平均ピーク値は2.1±1.5 Nmであった (Fig. 20a). 一方, 男子選手の膝関節伸展トルクの平均ピーク値は76.0±18.8 Nm, 外転トルクの平均ピーク値は31.7±7.3 Nm, 外旋トルクの平均ピーク値は2.7±2.4 Nmであった. 女子選手の股関節屈曲伸展トルクの平均ピーク値は男子選手よりも約28%, 外転トルクでは約28%小さい値を示した (p<0.05). 外旋トルクでは男女で有意な差がみられなかった (n. s.).

女子及び男子選手の股関節屈曲伸展トルク例では、共にフォワードスイング局面全体に渡って屈曲トルクを示し、インパクトに向かって減少していた (Fig. 19a). また、股関節内外転トルク及び内外旋トルクは、屈曲伸展トルクより小さい値を示した (Fig. 19b, c). これらの傾向は他の被験者にもみられた (Fig. 19d-f). また、女子選手のフォワードスイング局

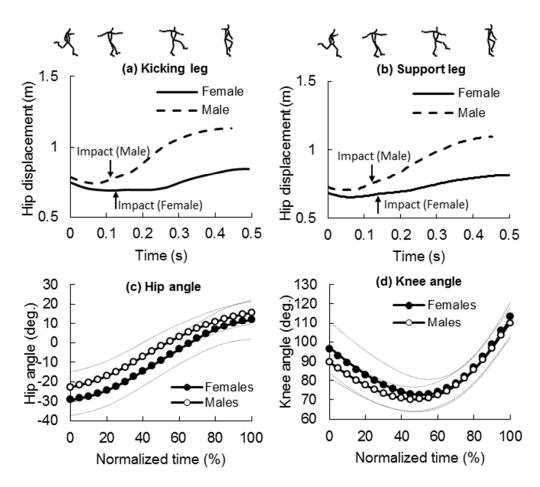


Figure 16. Plots a and b represent typical/standard values for hip displacements for female and male players: (a) = kicking leg; (b) = support leg. Plots c and d represent the average values obtained for joint angles of kicking leg among the female and male players in the current study: (c) = hip angle; (d) = knee angle.

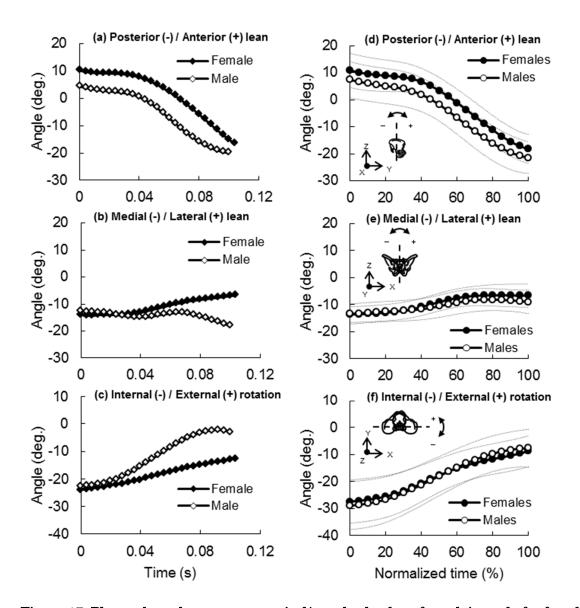


Figure 17. Plots a, b, and c represent typical/standard values for pelvic angle for female and male players: (a) posterior/anterior lean; (b) medial/lateral lean; (c) external/internal rotation. Plots d, e, and f represent the average values obtained for joint vertical velocities of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) posterior/anterior lean; (e) medial/lateral lean; (f) external/internal rotation.

面における股関節屈曲トルクの平均ピーク値は 168.5 ± 24.7 Nm, 外転トルクは 68.0 ± 13.8 Nm, 内旋トルクは- 9.5 ± 7.5 Nm であった (Fig. 20b). また, 男子選手の股関節屈曲トルクの平均ピーク値は 236.2 ± 38.9 Nm, 外転トルクの平均ピーク値は 90.5 ± 13.0 Nm, 内旋トルクの平均ピーク値は- 15.9 ± 10.3 Nm であった. 女子選手の股関節屈曲トルクの平均ピーク値は 男子選手よりも約 29 %, 外転トルクの平均ピーク値は約 25 %, 内旋トルクの平均ピーク値は は約 41 %小さい値を示した (p < 0.05).

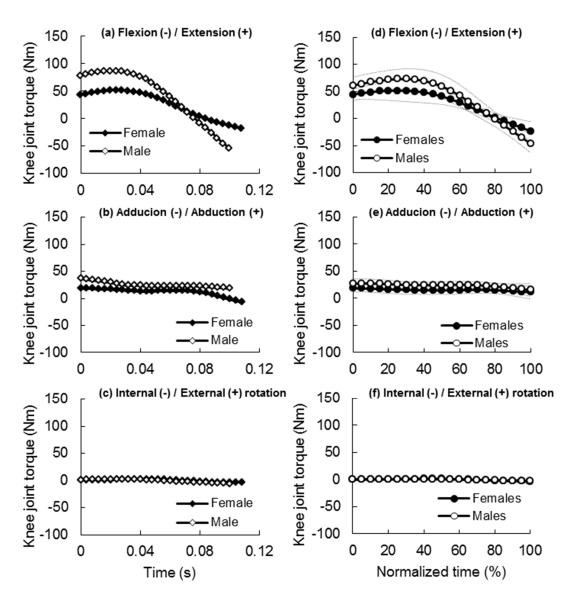


Figure 18 Plots a, b, and c represent typical/standard values for knee joint torque of the kicking leg for female and male players: (a) flexion/extension; (b) adduction/abduction; (c) internal/external rotation. Plots d, e, and f represent the average values obtained for knee joint torque of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) flexion/extension; (e) adduction/abduction; (f) internal/external rotation.

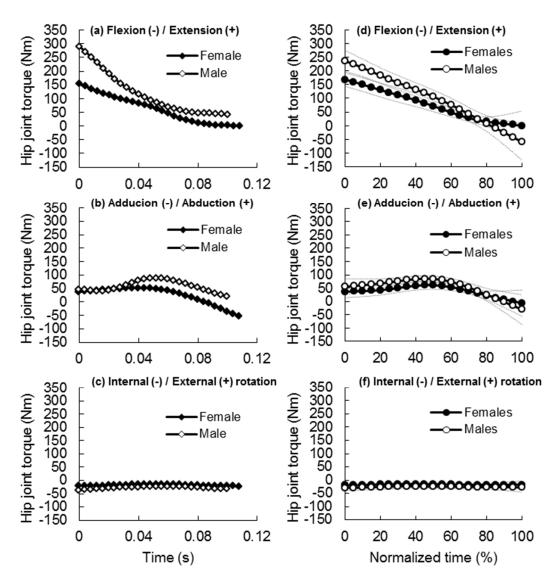


Figure 19. Plots a, b, and c represent typical/standard values for hip joint torque of the kicking leg for female and male players: (a) flexion/extension; (b) adduction/abduction; (c) internal/external rotation. Plots d, e, and f represent the average values obtained for hip joint torque of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) flexion/extension; (e) adduction/abduction; (f) internal/external rotation.

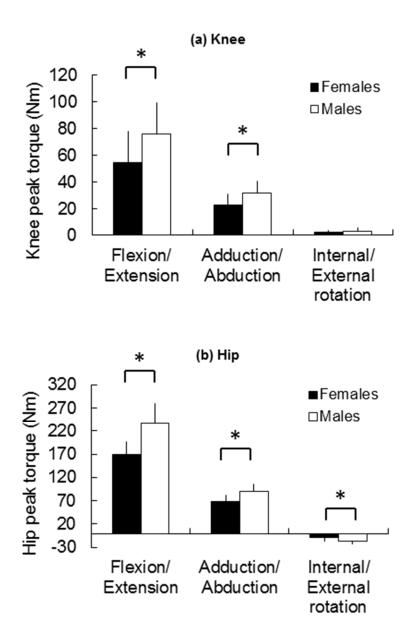


Figure 20. Comparison of peak knee and hip joint torque of kicking leg for female and male players: (a) knee joint torque; (b) hip joint torque.

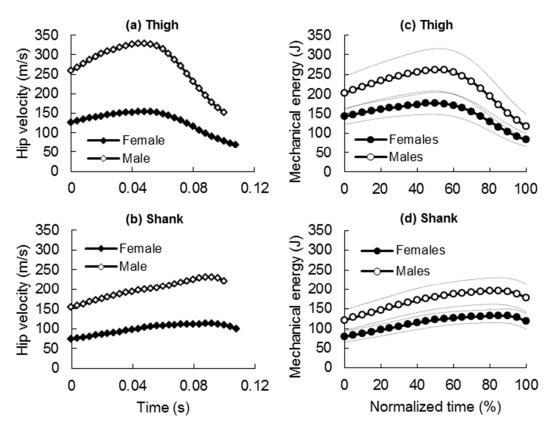


Figure 21. Plots a and b represent typical/standard values for thigh and shank energy of the kicking leg for female and male players: (a) thigh energy; (b) shank energy. Plots c and d represent the average values obtained for thigh and shank energy of the kicking leg among the female and male players in the current study: (d) thigh energy; (e) shank energy.

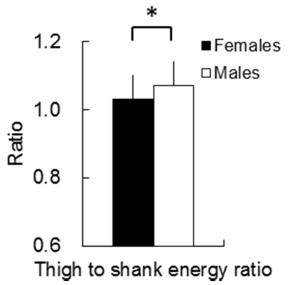


Figure 22. Comparison of mean thigh-to-shank energy ratios between female and male players.

4.3.3 蹴り脚における大腿および下腿の力学的エネルギー

女子及び男子選手の大腿力学的エネルギー例では、共に支持脚接地時から増大し、フォワードスイングの約50%時付近でピークを迎えた後、ボールインパクト直前まで減少する傾向を示した (Fig. 21a). 一方、下腿の力学的エネルギーは、男女共に大腿の力学的エネルギーとは逆にボールインパクトに向けて増加した (Fig. 21b). 同様の傾向が他の被験者にもみられており、女子選手の大腿及び下腿の力学的エネルギーは、フォワードスイング局面全体に渡って男子選手より小さい値を示した (Fig. 21c, d). また、女子選手の大腿の力学的エネルギーの平均ピーク値は177.0 ± 27.9 J であった (Fig. 21c). 一方、男子選手の大腿の力学的サースルギーの平均ピーク値は262.8 ± 53.6 J であり、女子選手の平均ピーク値は男子選手の平均ピーク値は134.0 ± 17.5 J、男子選手は197.4 ± 35.0 J であり、女子選手は男子選手より有意に小さい値を示した (p < 0.05) (Fig. 8d). 女子選手の大腿 (Et) - 下腿(Es) エネルギー比 (Est = Es / Et) は 1.05 ± 0.07、男子選手は 1.10 ± 0.07 であり、女子選手は 男子選手よりも統計的に有意に小さかった (p < 0.05) (Fig. 22).

4.3.4 順動力学シミュレーションにおける蹴り脚の股関節鉛直力および足部水平速度

女子選手の股関節鉛直力 0 %ケース (計測基データ) における鉛直力のピーク値は、1481.1 Nであったのに対し、+5 %ケースの鉛直力は1555.2 N、+10 %ケースの鉛直力は1629.3 N、-5 %ケースの鉛直力は1407.1 N、-10 %ケースの鉛直力は1333.0 Nであった (Fig. 23a). 順動力学シミュレーションにおける女子選手の 0 %ケースのインパクト直前の足部水平速度は19.2 m/s であったのに対し、+5 %ケースの足部水平速度は19.4 m/s、+10 %ケースの足部水平速度は19.5 m/s、-5 %ケースの足部水平速度は19.1 m/s、-10 %ケースの足部水平速度は19.0 m/s であった (Fig. 23b, c).

一方, 男子選手の股関節鉛直力 0 %ケース (計測基データ) における鉛直力のピーク値は 2131.0 N であったのに対し, +5 %ケースの鉛直力は 2237.6 N, +10 %ケースの鉛直力は 2344.1

N, -5%ケースの鉛直力は 2024.5 N, -10%ケースの鉛直力は 1917.9 N であった (Fig. 23d). シミュレーションにおける男子選手の 0%ケースのインパクト直前の足部水平速度は, 21.9 m/s であったのに対し, +5%ケースの足部水平速度は 22.1 m/s, +10%ケースの足部水平速度は 22.2 m/s, -5%ケースの足部水平速度は 21.7 m/s, -10%ケースの足部水平速度は 21.5 m/s であった (Fig. 23e, f).

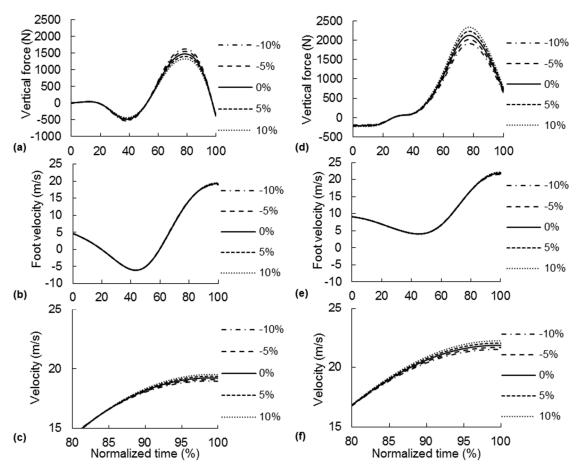


Figure 23. Simulation data for female and male players: (a) hip joint vertical force for female player; (b) foot velocity for female player; (c) foot velocity for female player (80 – 100 %); (d) hip joint vertical force for male player; (e) foot velocity for male player; (f) foot velocity for male player (80 – 100 %).

4.4 考察

4.4.1 ボール速度及びインパクト直前の足部速度

女子選手のボール速度の平均値は (22.0 ± 1.4 m/s), Shan (2009) の女子選手 (19.6 ± 2.6 m/s) よりも約 2.4 m/s 高い値を示し、Barfield et al. (2002) (21.5 ± 2.4 m/s)、Orloff et al. (2008) (21.9 ± 3.5 m/s) とほぼ同様の値を示した. また, 男子選手のボール速度 (26.5 ± 2.0 m/s) は, Nunome et al. (2002) (28.6 ± 2.1 m/s) より約 2.1 m/s 小さい値を示し、Shan (2009) の男子選手 (24.2 ± 3.1 m/s) よりも約 2.3 m/s 高い値を示した. さらに, Barfield et al. (2002) (25.3 ± 1.51 m/s) よりも約 1.2 m/s, Orloff et al. (2008) (22.7 ± 3.1 m/s) よりも約 3.8 m/s 高い値を示した. 本研究における男女のボール速度の値は、それらの先行研究と同程度であり、ボール速度 の算出方法は妥当であったと判断される.一方,女子選手のインパクト前における足部速 度の平均値 (18.3±0.7 m/s) は,男子選手 (20.9±1.3 m/s) よりも小さい値となっている (p< 0.05) (Fig. 11). これまで多くの研究において, ボール速度とインパクト直前の足部速度には, 強い正の相関関係があることが報告されている (Andersen et al., 1999; Levanon and Dapena, 1998; Nunome et al., 2006b). 実験における女子選手の平均足部速度は, Barfield et al. (2002) の 女子選手 (16.2 ± 2.3 m/s) よりも約 2.1 m/s 高い値を示しており, 男子選手の平均足部速度 は、Barfield et al. (2002) の男子選手 (18.9 ± 1.6 m/s) よりも約 2.0 m/s 高い値を示している. 以上のことから,女子選手のボール速度が男子選手より小さい原因の一つとして (p<0.05), 女子選手のインパクト前足部速度が男子選手のそれより小さいことが考えられる (p<0.05). この要因として、脚筋力等の体力的性差が考えられるが、それ以外の蹴り脚のスイング動 作や支持脚の動作等の技術的要因も推測される.

4.4.2 蹴り脚の関節トルク

女子選手の膝関節伸展トルクは、フォワードスイングにおける正規化時間の約 40 %付近でピークを向かえる単峰性のカーブを示しており、男子選手のトルクと同様の傾向を示すが、平均ピーク値は、女子選手 (54.4 ± 18.1 Nm) の方が、男子選手 (76.0 ± 18.8 Nm) より小

さな値となっている (p<0.05) (Fig. 19a). 本実験の女子選手の膝関節伸展トルクは, Lyle et al. (2011) の報告 (0.39±0.10 Nm/kg/m) と比較すると,大きな値 (0.59±0.18 Nm/kg/m) を示しているものの,本実験における男子選手とは差が大きいと思われる。また,Shan (2009) はインステップキックを対象に男女における筋電図を比較し,女子選手の大腿四頭筋の最大筋活動が男子選手よりも小さかったことを報告している。これらのことから,容易に推測可能なことではあるが,女子選手の膝関節伸展トルクは,男子選手のトルクより小さい傾向を示していると考えられる。そして,キック動作における膝関節伸展トルクは,膝関節伸展角加速度に直接的に影響を与えていると考えられ,女子選手の膝関節伸展トルクが男子選手より小さいことが,女子選手の足部速度が男子選手より小さくなっていた大きな要因と考えられる。一方,本実験における女子選手の膝関節外転トルク,外旋トルクは,男子選手より小さい傾向を示しているが,伸展トルクと比較すると男女間の差が小さく,スイング動作に対する影響は伸展トルクより小さいと思われる。

女子選手の股関節屈曲伸展トルクの平均ピーク値 (168.5 ± 24.7 Nm) は、男子選手のピーク値 (236.2 ± 38.9 Nm) より小さな値を示している (p < 0.05). また、女子選手の外転トルク、内旋トルクも、男子選手のそれらより、小さい傾向を示している (Fig. 19b). 女子選手の支持脚接地時からインパクトまでのフォワードスイング平均時間は、男子選手の平均時間よりも 0.008 秒長くかかっている。また、女子選手の膝関節及び股関節のトルクは、男子選手の関節トルクより、それぞれ膝関節伸展トルクで約 28%、股関節屈曲トルクで約 29 小さい傾向を示している。これらのことから、女子選手は、男子選手より関節トルクが小さいため、より長い時間をかけて加速することによって、蹴り脚のピーク速度を得ていると考えられる。

女子選手のスイング動作時に発揮された膝関節, 股関節トルクは, 男子選手のそれらより小さく, それが女子選手の足部速度が男子選手より小さくなっていることの原因の一つになっていると考えられる. したがって, 女子選手のスイング時における膝関節, 股関節トルクを増大させることは, スイング速度を高め, キック力を向上させることに貢献する

と推測される.

4.3.3 運動連鎖と大腿-下腿エネルギー比

フォワードスイング時の足関節, 膝関節, 股関節水平速度は, 男女ともに, はじめに股 関節速度がピークを迎え、次に膝関節速度、最後に足関節速度の順にピークを示している (Fig. 12). 女子及び男子選手の足関節水平速度例における女子選手のフォワードスイングの 時間は、全体的に男子選手より長く、膝関節水平速度が股関節水平速度を超えるタイミン グも遅かった. この傾向は、他の女子被験者にも同様にみられ、スイング時間の平均値に おいても, 男女間で有意な差が認められた (p<0.05). したがって, これは女子選手の一つ の特徴であると思われ、このフォワードスイング時間を短くすると共に、それに対応して、 膝関節を振り出すタイミングを早めることは、フォワードスイング速度を高めることに有 効であると考えられる. また,支持脚接地時における女子選手の股関節角度 (-29.3 ± 8.0) は、男子選手の角度 (-22.8 \pm 7.8) よりも有意に小さかった (Fig. 16c) (p < 0.05). 一方、女 子選手の支持脚接地時の膝関節角度 (96.5 ± 13.3) は, 男子選手の角度 (89.6 ± 8.0) より も有意に大きかった (Fig. 16d) (p < 0.05). 支持脚接地時おいて膝関節角度が大きいことは, 女子選手の特徴の一つであると考えられる.さらに,大腿エネルギーは,支持脚接地時か ら 50 %付近まで増加し、ピークに達すると、ボールインパクト時まで減少していく傾向を 示したのに対し、下腿エネルギーは、支持脚接地時からボールインパクトまで増加する傾 向がみられている (Fig. 20c, d). これまでサッカー選手のキック動作では、フォワードスイ ング時に運動連鎖を用いてキックを行っていることが指摘されている (Rodano and Tayana, 1993; Isokawa and Lees, 1988). また, この運動連鎖に筋モーメントと動作依存モーメントが 寄与していることが報告されている (Dörge et al., 2002; Nunome et al., 2002; Naito et al., 2012). 本研究におけるフォワードスイング時の足関節、膝関節、股関節水平速度には順序性がみ られており、キック動作には男女ともに近位部のエネルギーを遠位部に伝達するメカニズ ムが働いていたと考えられる、本実験における下腿及び大腿のエネルギーの絶対値は、局

面全体において女子選手の方が男子選手より小さく、これは身体部分質量や関節トルクが大きく影響を及ぼしていると推定される. しかし、下腿エネルギーの男女差はフォワードスイング局面後半に増大傾向であり、運動連鎖技術そのものにも差がある可能性がある. 島田ほか (2004) は、投動作においてボール速度と末端部に伝達される力学的エネルギーには高い相関がみられたことを報告しており、キック動作においても高いボール速度を得るためには、より大きなエネルギーを根幹部 (大腿) から末端部 (下腿) へ伝達することが重要となる. そこで、この運動連鎖技術の簡便な指標として大腿 (Et) -下腿 (Es) エネルギー比 (Est = Es / Et) を考え、本実験における女子選手と男子選手を比較すると、女子選手の大腿・下腿エネルギー比は、男子選手に比べ有意に小さい値となっていた (p < 0.05). これは、女子選手の方が男子選手より、大腿から下腿へのエネルギー伝達の割合が低いことを示していると考えられる. これらのことから、フォワードスイング局面における女子選手の大腿から下腿へのエネルギー伝達に関する運動連鎖技術は、男子選手のそれよりも低いと推測される. 逆に女子選手がこの運動連鎖技術を向上させることにより、足部速度を高めることが可能となり、結果的にボール速度を増大させることができると考えられる.

4.3.4 蹴り脚の股関節鉛直力及び足部速度

女子選手のフォワードスイング局面における蹴り脚の股関節鉛直平均速度は、男子選手よりも小さい値を示しており (p < 0.05) (Fig. 13f)、女子選手の蹴り脚股関節の鉛直速度の平均ピーク値は、男子選手よりも統計的に有意に小さかった (Fig. 15). また、女子選手の支持脚における股関節鉛直平均速度も、男子選手より小さな値を示しており (p < 0.05) (Fig. 14d)、女子選手の支持脚股関節の鉛直速度の平均ピーク値は、男子選手よりも統計的に有意に小さかった (Fig. 15). これはフォワードスイング局面において、女子選手よりも男子選手の方が、上方にジャンプをするような支持脚の伸展運動を伴っていることが原因の一つであると推測される (Fig. 16) (Shan, 2009; Ball, 2013; Inoue et al., 2014). これらのことから、女子選手の支持脚の運動は、着地衝撃を受動的に受ける働きが大きく、フォワードスイン

グに連動した鉛直方向運動に関する技術発揮が、男子選手と比べて劣っていると推測される.

Miura (2001) はゴルフのスイング動作において, クラブを一つの振り子として, インパク ト前に振り子の支点をスイング面に対して鉛直方向へ引くことは、クラブヘッドの速度を 増加するとしている、本実験のフォワードスイング局面においても、支持脚の膝関節伸展 動作に伴う股関節鉛直速度の増加がみられた (Fig. 14b, d).このフォワードスイング局面に おける股関節鉛直方向の運動が、足部速度を大きくすることに貢献する可能性は推測され るが (Inoue et al., 2000), より定量的に分析するためには運動方程式を通して検討する必要 がある. そこで, 力を入力パラメータとした順動力学シミュレーションにより, 女子選手 の股関節鉛直力が足部速度に及ぼす影響をみると、+5%ケースの足部速度は約0.7%増加し、 +10%ケースは約1.5%増加しており,逆に鉛直力が-5%ケースの足部速度は約0.7%低下し, -10%ケースは約1.4%低下している (Fig. 23a, b, c). また, 男子選手の股関節鉛直力が足部 速度に及ぼす影響をみると、+5 %ケースの足部速度は約 0.8 %増加し、+10 %ケースは約 1.7 %増加しており,一方,鉛直力が-5 %ケースの足部速度は約 0.8 %低下し,-10 %ケース は約 1.6 %低下している (Fig. 14d, e, f). この上方向の股関節鉛直力は, 大腿を通してフォワ ードスイング後半における下腿の回転モーメントを増大させ、結果的に足部速度を増大さ せる効果があると考えられる.これらのことから、キック動作時に支持脚を伸展し、蹴り 脚の股関節を上方に加速することは、足部速度を増大させ、ボール速度を増加させる一つ の技術要素になると考えられる。したがって、女子選手にとっては、このフォワードスイ ング局面における蹴り脚の股関節鉛直力を活用する技術を向上させることにより足部速度 が増大し、ボール速度を増加させることが可能であると思われる.

4.3.5 骨盤の動態と足部速度

女子及び男子選手のフォワードスイング局面における骨盤前後傾角度の平均値は、中盤 で前傾から後傾に転じており、女子選手の前傾から後傾に切り替わるタイミングは、男子 選手のタイミングに比べ遅かった (Fig. 17d). 前傾から後傾への骨盤の運動は、フォワードスイング局面における蹴り脚の回転と連携しており、蹴り脚に先行して起こるため、より早いタイミングで後傾へ切り替えることはインパクト前の足部速度の加速に貢献する可能性がある.

フォワードスイング局面における女子及び男子選手の骨盤回旋角度は、男女共に支持脚接地時からボールインパクト時まで内旋する傾向を示している (Fig. 17f). フォワードスイング局面における女子選手の回旋角度変化量の平均値 (18.7±6.0 deg.) は、男子選手の変化量の平均値 (21.7±6.8 deg.) よりもわずかに小さい傾向を示した (n.s.) (Fig. 17f). Browder et al. (1991) は、ボール速度の高いキックの骨盤回旋角度変化は、ボール速度の低いキックの回旋角度変化よりも高い値であったことを報告している。また、Lees and Nolan (2002) は、より高い骨盤角度に伴い、股関節及び膝関節の動作範囲も大きくなることから、より高い足部速度を得ることができるとしている。これらのことから、本実験における回旋角度変化量は、女子選手の方が男子選手より小さい傾向にあり、これを大きくすることは、筋力の小さい女子選手にとって足部を加速させることを助ける可能性があると思われる。

女子及び男子選手のフォワードスイング局面における骨盤側方傾斜角度の平均値は、全体的に左屈していた (Fig. 17e). これは、支持脚をボールの近くに踏み込み、ボールをインパクトするために、蹴り脚及び支持脚の傾きに連動して生じた運動であると考えられ、先行研究の報告と同様の傾向を示している (Levanon and Dapena, 1998; Lees et al., 2009). 本実験における女子選手のインパクト時の骨盤側方傾斜角度の平均値 (-6.7 ± 4.3 deg.) は、Alcock et al. (2012) の女子選手 (-8.2 ± 10.3 deg.) や本実験の男子選手の平均値 (-9.0 ± 4.4 deg.) よりもわずかに高い値となっていた (Fig. 17e). また、女子選手の骨盤側方傾斜角度変化量の平均値 (8.3 ± 2.8 deg.) は、男子選手の変化量の平均値 (6.4 ± 2.9 deg.) よりも大きい傾向を示した (p < 0.05). また、Lees et al. (2009) の男子選手の変化量 (2 deg.以下) よりも大きな値となっていた。これは、女子選手が男子選手に比べ、蹴り脚のフォワードスイングに伴い生じる遠心力の影響を大きく受け、女子選手の骨盤の受動的右屈運動が、男子選

手よりも大きくなっていることが考えられる.このわずかな骨盤の右屈運動は、女子選手の多くにみられる特徴の一つであると考えられ、蹴り脚股関節の上方への運動を抑制させる働きがあると思われる.本研究の順動力学シミュレーションでは、フォワードスイング時の股関節鉛直力の増大は、インパクト前の足部速度を増加させることを示している (Fig. 23).以上のことから、この遠心力による骨盤の右屈運動を低減させることは、股関節鉛直力の増加に貢献し、足部速度の増大に結びつくと考えられる.

4.3.6 今後の課題と展望

指導現場において女子選手の技術課題を理解することは、女子選手に適した技術指導及びトレーニングの発展に貢献すると考えられる。本研究の結果から、女子選手は男子選手に比べ、大腿から下腿への運動連鎖を活用したエネルギー伝達技術が低い可能性が示唆された。したがって、女子選手がより蹴り脚の足部速度を高めるためには、大腿から下腿への運動連鎖技術を高めることが重要であると考えられる。また、フォワードスイングにおいて蹴り脚の股関節を上方に加速することは、スイング速度を増大させると考えられ、ボール速度を増加させる上での一つの重要な技術的要素になると考えられる。男子と比べて筋力に劣る女子選手にとって、膝関節及び股関節トルクを増大させることに加え、大腿から下腿への運動連鎖技術、及び蹴り脚の股関節を上方に加速する技術の習得は、高いボール速度を生み出すために重要な課題であると考えられる。本研究で用いた順動力学シミュレーションは、2次元2重振り子モデルに基づくものであり、実際のキックが3次元的な動作であることを踏まえ、3次元に拡張することは今後の研究課題の一つである。

4.5 まとめ

本研究では、女子選手及び男子選手のインステップキック動作を比較検討し、女子サッカー選手のキック動作における技術特性を明らかにすると共に、ボール速度を増大させるための技術的要因を検討した、主な結果を以下に要約する.

- 1) 女子選手のフォワードスイング局面における膝関節 (54.4 ± 18.1 Nm), 股関節トルク (168.5 ± 24.7 Nm) は、男子選手のそれら (76.0 ± 18.8 Nm, 236.2 ± 38.9 Nm) より小さく, それが女子選手の足部速度が男子選手より小さくなっていることの原因の一つになっていると考えられた. 女子選手のスイング時における膝関節, 股関節トルクを増大させることは、スイング速度を高めることに貢献すると推測された.
- 2) 女子選手のフォワードスイングの時間は、全体的に男子選手より長く、膝関節水平速度が股関節水平速度を超えるタイミングも遅かった。これは女子選手の一つの特徴であると思われ、このフォワードスイング時間を短くすると共に、それに対応して膝関節を振り出すタイミングを早めることは、フォワードスイング速度を高めることに有効であると考えられる。
- 3) 女子選手の大腿 下腿エネルギー比 (1.05 ± 0.07) は, 男子選手のエネルギー比 (1.10 ± 0.07) よりも有意に小さかった. このことから, フォワードスイング局面における女子選手の大腿から下腿へのエネルギー伝達に関する運動連鎖技術は, 男子選手の技術よりも低い可能性が示唆された. 女子選手は, 運動連鎖技術を向上させることにより足部速度を高めることが可能となり, 結果的にボール速度を増大させることができると考えられた.
- 4) 女子選手の蹴り脚の股関節鉛直力が足部速度に及ぼす影響について、順動力学的シミュレーションを用いて検討した結果、+5%ケースの足部速度は約0.7%増加し、+10%ケースは約1.5%増加しており、股関節鉛直関節力が大きくなるとともにスイング速度も増加する傾向を示した。このことから、上方向の股関節鉛直力は、大腿を通してフォワードスイング後半における下腿の回転モーメントを増大させ、結果的に足部速度を増大させる効果があると考えられた。
- 5) 女子選手の骨盤側方傾斜角度変化量 (8.3 ± 2.8 deg.) は, 男子選手の変化量 (6.4 ± 2.9 deg.) よりも大きい傾向を示した. これは, 女子選手が男子選手に比べ, 蹴り脚のフォワードスイングに伴い生じる遠心力の影響を大きく受け, 女子選手の骨盤の受動的右

屈運動(蹴り脚側への回転)が男子選手よりも大きくなっていることが要因であると考えられた.この受動的な右屈運動を低減させることは、股関節鉛直力の増加に貢献し、結果的にボール速度を増大させる可能性があると推測された.

第 5 章 総括

5.1 結論

現在、日本女子サッカーでは、タレント発掘、トレセン制度、なでしこチャレンジプロジェクト等の選手育成の強化が行われており、女子選手の競技力は高まっている。今後、女子サッカーが更なる飛躍を遂げ、世界の上位であり続けるためには、選手に適した指導体制に加え、競技力向上に貢献するための技術分析が求められている。しかしながら、女子サッカー選手の技術に関する研究は少なく、女子選手のメカニズムは不明瞭であり、指導現場において、科学的根拠のないトレーニングやコーチングが行われている可能性がある。そこで本研究では、キック技術を高めるために求められる要素や、女子選手の形態及び特徴を包括的に明らかにし、実践現場に資する知見を得ることを目的とした。ここでは、それぞれの研究課題に対して得られた本研究の結論を以下に示す。

研究課題 1 女子サッカー選手のキック動作におけるインパクト特性

第 1 の研究課題は、女子サッカー選手のインステップキックとインサイドキックにおけるボールインパクトを対象に、高速度カメラを用い、ボール速度を高めるための重要な要素とされる足部速度、換算質量、反発比を中心に男子選手と比較検討することにより、男女間の類似性や差異を明らかにすることとした(第3章)。主な結果を以下に要約する.

- 1) インステップキックとインサイドキックにおいて、女子選手のボール速度、インパクト 直前の足部速度、換算質量、反発比の平均値は、男子選手の平均値より小さな値を示し た.
- 2) インステップキック及びインサイドキックにおける女子選手の重心付近の反発比は、男子選手より、小さな値を示す傾向がみられ、重心から離れるに従って反発比が低下する傾向を示した.
- 3) インステップキックにおける女子選手の重心付近の足関節底背屈角度変化量は、男子選手と比べ大きな値を示す傾向を示し、重心から離れるに従って足関節底背屈角度変化量が大きくなる傾向がみられた。

4) インサイドキックにおける女子選手の反発比と足関節内外転角度変化量の間には、インステップキック同様、やや高い負の相関がみられ (r=-0.60, p<0.05)、反発比が大きな試技ほど足関節底背屈角度変化量が小さい傾向を示した。女子選手のインパクト時における足関節の動的なスティフネスは、男子選手より小さいと考えられ、それが女子選手の反発比が男子選手の反発比より小さいことの大きな原因の一つになっていると考えられた。

研究課題 2 女子サッカー選手のインステップキックにおけるスイング動作特性

インステップキック動作における女子サッカー選手のスイングメカニズム及び高いボール速度を生成するためのスイング動作の技術的特性を明らかにすること.

第 2 の研究課題は、女子サッカー選手のインステップキックにおけるスイング動作を対象に、フォワードスイングにおける関節トルク、運動連鎖におけるエネルギー比、蹴り脚股関節鉛直力を男女間で比較検討することにより、女子選手がボール速度を高めるための技術的要因を明らかにすることとした。さらに、順動力学によるフォワードスイングの数値シミュレーションを実施し、蹴り脚股関節鉛直力がスイング速度に及ぼす影響を定量的に検討した(第4章)。主な結果を以下に要約する。

- 1) 女子選手のフォワードスイング局面における膝関節 (54.4 ± 18.1 Nm), 股関節トルク (168.5 ± 24.7 Nm) は、男子選手のそれら (76.0 ± 18.8 Nm, 236.2 ± 38.9 Nm) より小さく, それが女子選手の足部速度が男子選手より小さくなっていることの原因の一つになって いると考えられた. 女子選手のスイング時における膝関節, 股関節トルクを増大させる ことは、スイング速度を高めることに貢献すると推測された.
- 2) 女子選手のフォワードスイングの時間は、全体的に男子選手より長く、膝関節水平速度 が股関節水平速度を超えるタイミングも遅かった。これは女子選手の一つの特徴である と思われ、このフォワードスイング時間を短くすると共に、それに対応して膝関節を振 り出すタイミングを早めることは、フォワードスイング速度を高めることに有効である

と考えられる.

- 3) 女子選手の大腿 下腿エネルギー比 (1.05 ± 0.07) は, 男子選手のエネルギー比 (1.10 ± 0.07) よりも有意に小さかった. このことから, フォワードスイング局面における女子選手の大腿から下腿へのエネルギー伝達に関する運動連鎖技術は, 男子選手の技術よりも低い可能性が示唆された. 女子選手は, 運動連鎖技術を向上させることにより足部速度を高めることが可能となり, 結果的にボール速度を増大させることができると考えられた.
- 4) 女子選手の蹴り脚の股関節鉛直力が足部速度に及ぼす影響について、順動力学的シミュレーションを用いて検討した結果、+5%ケースの足部速度は約0.7%増加し、+10%ケースは約1.5%増加しており、股関節鉛直関節力が大きくなるとともにスイング速度も増加する傾向を示した。このことから、上方向の股関節鉛直力は、大腿を通してフォワードスイング後半における下腿の回転モーメントを増大させ、結果的に足部速度を増大させる効果があると考えられた。
- 5) 女子選手の骨盤側方傾斜角度変化量 (8.3 ± 2.8 deg.) は, 男子選手の変化量 (6.4 ± 2.9 deg.) よりも大きい傾向を示した. これは, 女子選手が男子選手に比べ, 蹴り脚のフォワードスイングに伴い生じる遠心力の影響を大きく受け, 女子選手の骨盤の受動的右屈運動 (蹴り脚側への回転) が男子選手よりも大きくなっていることが要因であると考えられた. この受動的な右屈運動を低減させることは, 股関節鉛直力の増加に貢献し, 結果的にボール速度を増大させる可能性があると推測された.

5.2 実践現場への示唆

インステップキック及びインサイドキックのインパクトにおいて、女子選手の反発比は、 男子選手の反発比よりも相対的に小さく、重心から離れた際の女子選手の足関節角度変形 量は、男子選手よりも大きくなっており、重心付近でボールをインパクトすることはボー ル速度を高めるために有効な技術要素の一つであると考えられる。女子選手のインパクト 技術におけるトレーニングにおいて、指導者は、足部重心付近でボールをインパクトし、 高反発を得る感覚を身につけさせる事が重要である。そして、多様なアプローチ角度や強 い相手プレッシャー下、疲労時等の様々な状況においても、足部重心付近でボールインパクトし、 クトすることが実現できるよう指導していくことが必要である。

女子選手のフォワードスイング局面における膝関節,股関節トルクは,男子選手のそれらより小さく,それが女子選手の足部速度が男子選手より小さくなっていることの原因の一つになっていると考えられ,女子選手のスイング時における膝関節,股関節トルクを増大させることは,スイング速度を高め,キック力を向上させることに貢献すると推測される.したがって,基本的なことではあるが,女子選手にとって,技術トレーニングに加えて筋力トレーニングを行うことは,必須且つ重要な課題であると考えられる.特に,膝関節伸展トルクは,直接的に下腿の回転運動に影響を与えていると考えられることから,膝伸展に寄与する大腿四頭筋や大腿筋膜張筋における筋力を高めることは重要であると考えられる.また,股関節屈曲に貢献する大腿直筋及び腸腰筋の筋力を高めることもスイング速度の増大に効果的であると推測される.

女子選手の大腿・下腿エネルギー比は、男子選手のエネルギー比によりも小さな値を示しており、女子選手は男子選手に比べ、大腿から下腿への運動連鎖を活用したエネルギー伝達技術が低い可能性が示唆される。また、女子選手のフォワードスイングの時間は、男子選手の時間よりも長くかかっている。これは、女子選手の支持脚接地時の股関節及び膝関節の角度が大きいことが原因の一つであると考えられる。女子選手が高いインパクト前の

足部速度を得るためには、支持脚接地時にコンパクトに蹴り脚をスイングし、フォワードスイングの時間を短くすることが効果的であると考えられる。このスイング動作をコンパクトに行う技術の習得は、大腿から下腿へのエネルギー伝達技術を高める可能性があると推測される。

フォワードスイングにおいて、蹴り脚の股関節を上方に加速することは、スイング速度を増大させると考えられ、ボール速度を増加させる一つの技術要素になると考えられる. しかしながら、女子選手の多くにみられる特徴の一つであるわずかな骨盤の右屈運動は、蹴り脚股関節の上方への運動を抑制させる働きがあると考えられる. 指導者は、このフォワードスイングに伴う骨盤の右屈運動を低減させるように指導していくことが重要である. また、蹴り脚の股関節を上方に加速するためには、フォワードスイングに連動して支持脚の鉛直方向運動 (膝関節の伸展運動) を行うことが必要であるため、蹴り脚の動作のみならず支持脚の動作も指導をあわせて行うことが求められる.

謝辞

本論文の遂行ならびに執筆にあたり、浅井武教授には終始懇切丁寧なご指導とご鞭撻を 賜りました.心より感謝の意を表します.

佐野淳教授,香田邦秀教授にはアドバイザリーコミッティーにおいて,建設的な助言を 賜りました.心より厚く御礼申し上げます.

バイオメカニクス研究室の小池関也准教授には、予備審査会より献身的なご指導をいた だきました. お忙しい中、貴重なお時間を割いてご指導を賜りましたことを心より感謝の 意を表します.

サッカー方法論研究室及びバイオメカニクス研究室の皆様には、博士論文に関するデータ収集や解析についてご助力・ご助言をいただきました、深く御礼申し上げます.

さらに、本研究を行うにあたりご協力をいただきました女子サッカー部及び蹴球部の皆様、ご支援いただきました方々に心より感謝の意を表します.

2015年3月 坂本 慶子

参考文献

- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分係数. Japanese Journal of Sports Sciences, 15: 155–162.
- Abdel-Aziz, Y.I. and Karara, H.M. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, 1: 1–18.
- Ae, M., Tang, H. and Yokoi, T. (1992) Estimation of inertial properties of the body segments in Japanese athletes. In: The Society of Biomechanisms (Ed.), Biomechanisms 11: Form, Motion, and Function in Humans. The University of Tokyo Press: Tokyo, pp. 23–33.
- Alcock, A.M., Gilleard, W., Hunter, A.B., Baker, J., and Brown, N. (2012) Curve and instep kick kinematics in elite female footballers. Journal of Sports Sciences, 30: 387–394.
- Alcock, A., Gilleard, W., Brown, N.A., Baker, J., and Hunter, A. (2012) Initial ball flight characteristics of curve and instep kicks in elite women's football. Journal of applied biomechanics, 28: 70–77.
- Andersen, T.B., Dorge, H.C., and Thomsen, F.I. (1999) Collisions in soccer kicking. Sports Engineering, 2: 121–125.
- Andersen, T.B., Kristensen, L.B., and Sorensen, H. (2008) Biomechanical differences between toe and instep kicking Influence of contact area on the coefficient of restitution. Football Science, 5: 45–50.
- 浅井武 (1999) サッカーにおけるインステップキックとカーブキックの比較. Japanese Journal of Biomechanics in Sports and Exercise, 3: 111–118.
- Asami, T. and Nolte, V., Analysis of Powerful Ball Kicking. In: H. Matsui, and K. Kobayashi (Eds.), Biomechanics VIII-B. Human Kinetics: Illinois, pp. 695–700.
- 浅見俊雄, 戸苅晴彦 (1968) サッカーのキック力に関する研究. 体育学研究, 12: 267-272.

- Apriantono, T., Nunome, H., Ikegami, Y., and Sano, S. (2006) The effect of muscle fatigue on instep kicking kinetics and kinematics in association football. Journal of Sports Sciences, 24: 951–960.
- Ball, K. (2013) Loading and performance of the support leg in kicking. Journal of Science and Medicine in Sport, 16; 455–462.
- Barfield, W.R., Kirkendall, D.T., and Yu, B. (2002) Kinematics Instep Kicking Differences between Elite Female and Male Soccer Players. Journal of Sports Science and Medicine, 1: 72–79.
- Brophy, R.H., Backus, S., Kraszewski, A.P., Steele, B.C., Ma, Y., Osei, D., and Williams, R.J. (2010) Differences between sexes in lower extremity alignment and muscle activation during soccer kick. The Journal of Bone and Joint Surgery, 92: 2050–2058.
- Brophy, R.H., Backus, S.I., Pansy, B.S., Lyman, S. and Williams, R.J. (2007) Lower extremity muscle activation and alignment during the soccer instep and side-foot kicks. Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy, 37; 260–268.
- Browder, K.D., Tant, C.L. and Wilkerson J.D. (1991) A three dimensional kinematic analysis of three kicking techniques in female players. In: C.L. Tant, P.E. Patterson, and S.L. York (Eds.), Proceedings of the IX-th Congress of the International Society on Biomechanics in Sports. The Iowa State University Press: Ames, pp. 95–100.
- Capranica, L., Cama, G., Fanton, F., Tessitore, A. and Figura, F. (1992) Force and power of preferred and non-preferred leg in young soccer players. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 32: 358–363.
- Chandler, R.F., Clauser, C.E., McConville, J.T., Reynolds, H.M. and Young, J.W. (1975) Investigation of Inertial Properties of the Human Body (Aerospace Medical Research Laboratory Technical Report. No. 74-137), Wright-Patterson Air Force Base: Ohio.
- Clagg, S.E., Warnock, A. and Thomas, J.S. (2009) Kinetic analyses of maximal effort soccer kicks in female collegiate athletes. Sports Biomechanics, 8: 141–153.
- Dörge, H.C., Bull-Andersen, T.B., Sørensen, H. and Simonsen, E.B. (2002) Biomechanical

differences in soccer kicking with the preferred and the non-preferred leg. Journal of Sports Sciences, 20: 293–299.

Giza, E., Mithöfer, K., Farrell, L., Zarins, B., and Gill, T. (2013) Injuries in women's professional soccer. British Journal of Sports Medicine, 39: 212–216.

Hof, A.L. (2001) The force resulting from the action of mono-and biarticular muscles in a limb. Journal of Biomechanics, 34: 1085–1089.

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.

Inoue, K., Nunome, H., Sterzing, T., Shinkai, H., and Ikegami, Y. (2014) Dynamics of the support leg in soccer instep kicking. Journal of Sports Sciences, 32: 1023–1032.

Inoue, S., Ito, T., Sueyoshi, Y., O'Donoghue, R.K. and Mochinaga, M. (2000) The effects of lifting the rotational axis in swing speed of the instep. In: Y. Hong, D.P. Johns, and R. Sanders (Eds.), Proceedings of the XVIII-th Congress of the International Society on Biomechanics in Sports. The Chinese University Press: Hong Kong, pp. 39–46.

International Federation of Association Football, FIFA Big Count 2006: Statistical Summary Report by Association, retrieved from http://www.fifa.com/mm/document/fifafacts/bcoffsurv/statsumrepassoc%5f10342.pdf, (Accessed January 2009).

石田良恵,金久博昭,福永哲夫 (1992) 日本人一流競技選手の筋厚における性差. 体力科学, 41: 233-240.

石井秀幸,丸山剛生 (2007a) インステップキックにおけるインパクト位置がボール速度に 及ぼす影響とインパクト中の衝撃力の解析. バイオメカニクス研, 11: 170-182.

Ishii, H., Yanagiya, T., Naito, H., Katamoto, S. and Maruyama, T. (2009) Numerical Study of Ball Behavior in Inside-Foot Soccer Kick Based on Impact Dynamic Theory. Journal of Biomechanics, 42: 2712–2720.

- Isokawa, M., and Lees, A. (1988) A biomechanical analysis of the instep kick motion in soccer. In: T. Reilly, A. Lees, K. Davids, and W. J. Murphy (Eds.), Science and Football. E and FN Spon: London, pp. 449–455.
- 苅山 靖・藤井宏明・森 健一・図子浩二 (2013) 片脚および両脚リバウンドジャンプにおける 3 次元的な力発揮特性の相違. 体育学研究, 58:91-109.
- Kellis, E., and Katis, A. (2007) Biomechanical Characteristics and Determinants of Instep Soccer Kick. Journal of Sports Science and Medicine, 6: 154–165.
- Kellis, E., Katis, A. and Vrabas, I.S. (2006) Effects of an intermittent exercise fatigue protocol on biomechanics of soccer kick performance. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports, 16: 334–344.
- 小池関也・森 洋人・阿江通良 (2006) 多体系の運動方程式に基づく跳躍動作の動力学的分析:身体重心鉛直速度に対する下肢関節トルクの貢献度. ジョイント・シンポジウム講演論文集, 17-22.
- 倉林 準・持丸正明・河内まき子 (2003) 股関節中心推定方法の比較・検討. バイオメカニ ズム学会誌, 27: 29-36.
- Lees, A. and Nolan, L. (1998) The biomechanics of soccer: A review. Journal of Sports Sciences, 16: 211–234.
- Lees, A., and Nolan, L. (2002) Three-dimensional kinematic analysis of the instep kick under speed and accuracy conditions. In: W. Spinks, T. Reilly, and A. Murphy (Eds.), Science and football IV. E and FN Spon: London, pp.16–21.
- Lees, A., Asai, T., Andersen, T.B. (2010) Nunome, H. and Sterzing, T., The Biomechanics of Kicking in Soccer: A Review. Journal of Sports Sciences, 28: 805–817.
- Lees, A., Steward, I., Rahnama, N., and Barton, G. (2009) Lower limb function in the maximal instep kick in soccer. In: T. Reilly, and G. Atkinson (Eds.), Contemporary Sport, Leisure and Ergonomics. E and FN Spon: London, pp. 149–160.

- Levanon, J., and 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: Reilly, T., Lees, A., Davids, K. and Murphy, W. J. (Eds.) Science and Football. E and FN Spon: London, pp. 441–448.
- Lyle, M.A., Sigward, S.M., Tsai, L.C., Pollard, C.D. and Powers, C.M. (2011) Influence of maturation on instep kick biomechanics in female soccer athletes. Medicine and Science in Sports and Exercise, 43: 1948–1954.
- Manning, M.R., and Levy, R.S. (2006). Soccer. Physical medicine and rehabilitation clinics of North America, 17; 677–695.
- Miura, K. (2001) Parametric acceleration—the effect of inward pull of the golf club at impact stage. Sports Engineering, 4: 75–86.
- 村松正隆・星川佳広・飯田朝美・井伊希美・中嶋由晴 (2010) 高校生スポーツ選手の体幹筋 群の筋サイズ―性差と競技種目差の検討―. 体育学研究, 55: 577-590.
- Naito, K., Fukui, Y. and Maruyama, T. (2012) Energy redistribution analysis of dynamic mechanisms of multi-body, multi-joint kinetic chain movement during soccer instep kicks. Human Movement Science, 31: 161–181.
- 中尾陽光・平沼憲治・芦原正紀・森田英夫・武田寧・中里浩一・中嶋寛之 (2004) 大学男子 サッカー選手との比較による。体力科学, 53:493-502.
- Narici, M., Sirtori, M. and Mognoni, P. (1988) Maximal ball velocity and peak torques of hip flexor and knee extensor muscles. In: Reilly, T., Lees, A., Davids, K. and Murphy, W.J. (Eds.) Science and Football. E and FN Spon: London, pp. 429–433.
- Nunome, H., Asai, T., Ikegami, Y. and 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., Kozakai, R., Apriantono, T. and 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. and Stergioulas, L.K. (2006b) Impact phase kinematics of instep kicking in soccer. Journal of Sports Sciences, 24: 11–22.

Nunome, H., Georgakis, A., Shinkai, H., Suito, H., Tsujimoto, N., Ikegami, Y. (2007) Impact phase kinematics of side-foot and instep soccer kick. Journal of Biomechanics, 40: S214.

布目寛幸 (2004) 蹴りにおける支持脚の役割. 体育の科学, 56: 187-192.

布目寛幸 (2006) サッカーのキックにみられるムチ動作のダイナミクス. 体育の科学, 61: 509-513.

Orloff. H., Sumida, B., Chow, J., Habibi, L., Fujino, A. and 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.

Ozaki, H., Ohta, K., and Jinji, T. (2012) Multi-body power analysis of kicking motion based on a double pendulum. Procedia Engineering, 34; 218–223.

Plagenhoef, S. (1971) Patterns of Human Motion: A Cinematographic Analysis, Prentice Hall: Englewood Cliffs.

Poulmedis, P., Rondoyannis, G., Mitsou, A. and Tsarouchas, E. (1988) The influence of isokinetic muscle torque exterted in various speeds on soccer ball velocity. Journal of Orthopaedics and Sports Physical Therapy, 10: 93–96.

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

Rodano, R., and Tavana, R. (1993) Three-dimensional analysis of the instep kick in professional soccer players. In: T. Reilly, J. Clarys, and A. Stibbe (Eds.), Science and Football II. E and FN Spon: London, pp. 357–363.

- Sakamoto, K., Asai, T. (2013) Comparison of Kicking Motion Characteristics at Ball Impact between Female and Male Soccer Players. International Journal of Sports Science and Coaching, 8: 63–76.
- 櫻井好美・石井慎一郎・前田眞冶 (2012) 両脚着地動作における膝関節角度の男女差と前十字靭帯損傷. 理学療法科学, 27:461-464.
- Sedano, S., Vaeyens, R., Philippaerts, R.M., Redondo, J.C., and Cuadrado, G. (2009)

 Anthropometric and anaerobic fitness profile of elite and non-elite female soccer players. The

 Journal of sports medicine and physical fitness, 49: 387–394.
- Shan, G. (2009) Influence of gender and experience on the maximal instep soccer kick. European Journal of Sport Science, 9: 107–114.
- 渋川侃二 (1973) ボールキックの際の関節固定の効果. 東京教育大学体育学部スポーツ研究所報, 11:81-83.
- Shinkai, H., Nunome, H., Isokawa, M. and Ikegami, Y. (2009a) Ball Impact Dynamics of Instep Soccer Kicking. Medicine and Science in Sports and Exercise, 41: 889–897.
- Shinkai, H., Nunome, H., Suzuki, H., Suito, H., Tsujimoto, N., Kumagai, T., and Ikegami, Y. (2009b)

 Change of ball impact technique in instep kicking with physical growth. In: D. Drust, T. Reilly, J.

 Crlarys, and A.M. Williams (Eds.), International Research in Science and Soccer. Routledge:

 Oxford, pp.55–61.
- Soucie, J.M., Wang, C., Forsyth, A., Funk, S., Denny, M., Roach, K.E., Boone, D. and The Hemophilia Treatment Center Network (2011) Range of Motion Measurements: Reference Values and a Database for Comparison Studies. Haemophilia, 17: 500–507.
- Scurr, J., and Hall, B. (2009) The effects of approach angle on penalty kicking accuracy and kick kinematics with recreational soccer players. Journal of sports science and medicine, 8; 230–234.

 多賀谷昭 (1989) 人骨の性差. バイオメカニズム学会誌, 13: 121–126.

Tant, C.L., Browder, K.D. and Wilkerson, J.D. (1991) A three dimensional kinematic comparison of kicking techniques between male and female soccer players. In: C.L. Tant, P.E. Patterson, and S.L. York (Eds.), Proceedings of the IX-th Congress of the International Society on Biomechanics in Sports. The Iowa State University Press: Ames, pp. 101–105.

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.

Tol, J., Slim, E., van Soest, A. and van Dijk, C. (2002) The relationship of the kicking action in soccer and anterior ankle impingement syndrome. American Journal of Sports Medicine, 30: 45–50.

Winter, D.A. (2004) Biomechanics and motor control of human movement (3rd ed.). John Wiley and Sons: Hoboken.

Yamanaka, K., Liang, D.Y., and Hughes, M. (1997) Analysis of the playing patterns of the Japan national team in the 1994 World Cup qualifying match for Asia. In: T. Reilly, J. Bangsbo, and M. Hughes (Eds.), Science and football III. E and FN Spon: London, pp. 221–228.