

中京大学博士審査学位論文
大学院体育学研究科

短距離走の最大速度局面におけるピッチとストライドとの
トレードオフの克服に関するバイオメカニクスの要因

The biomechanical factors to overcome trade-off relationship between step
frequency and step length during top speed phase in sprint running

2017年3月19日 学位授与
豊嶋 陵司

目次

用語の定義	i
関連論文	iv
第1章 緒言	1
第1節 研究の背景	1
第2節 文献研究	4
第3節 本研究の目的, 課題, 限界.....	13
第2章 短距離走の最大速度局面における同一個人のピッチとストライドとのトレードオフ発生機序 (研究課題1)	15
第1節 本章の目的	15
第2節 方法	17
第3節 結果	20
第4節 考察	28
第5節 本章のまとめ.....	35
第3章 短距離走の最大速度局面におけるピッチが高い選手およびストライドが大きい選手の運動学的特徴 (研究課題2)	36
第1節 本章の目的	36
第2節 方法	37
第3節 結果	41
第4節 考察	45
第5節 本章のまとめ.....	51
第4章 短距離走の最大速度局面における遊脚キネティクスとピッチおよびストライドとの関係 (研究課題3)	52
第1節 本章の目的	52
第2節 方法	53

第3節 結果	56
第4節 考察	65
第5節 本章のまとめ.....	71
第5章 総合考察.....	72
第1節 高いピッチで疾走するために必要な要因.....	72
第2節 大きいストライドで疾走するために必要な要因.....	75
第3節 トレーニング現場への示唆.....	78
第4節 今後の研究課題.....	80
第6章 総括.....	81
参考文献.....	83
謝辞.....	89

用語の定義

本研究の用語の定義は、以下の通りである。

- 選手：
陸上競技の短距離種目のトレーニングを日常的に行い、競技会に出場している高校生、大学生および社会人のことを示す。
- 接地 (TD: touchdown) : 足部が地面に接触した瞬間を示す。
- 離地 (TO: take-off) : 足部が地面から完全に離れた瞬間を示す。
- ステップ (step) :
片側の足の接地から、次の逆側の足の接地までを示す。
- サイクル (cycle) :
片側の足の接地から、次の同側の足の接地まで (2 ステップ) を示す。
- ピッチ (SF: step frequency) :
1 秒間あたりの歩数を示す値であり、1 ステップの所要時間の逆数として算出される [Hz]。
- ストライド (SL: step length) :
1 ステップにおける身体重心の進行方向への移動距離[m] を示す。身体重心の算出が困難な場合は、接地した足先の位置をもとに算出される。
- 疾走速度 (velocity, speed) :
1 秒間あたりの疾走方向への移動距離であり、ピッチとストライドとの積によって求められる [m/sec]。

- ピッチストライド比 (SF/SL) :
疾走速度に対するピッチ或はストライドの優位性を比較する指標であり、ピッチを、そのステップにおけるストライドで除した値である (杉林ほか, 2003).
- ピッチ型 (SF type), ストライド型 (SL type) :
ステップのタイプを相対的に分類する際、ピッチストライド比が高い方をピッチ型, 低い方をストライド型とする.
- ピッチおよびストライドの個別性 :
同程度の疾走速度を有する選手であっても、ピッチの高さおよびストライドの大きさの異なる組み合わせが存在していることを示す.
- 支持期 (stance phase) :
地面に左右いずれかの足部が接触している局面を示す.
- 滞空期 (flight phase) :
身体のどの部分も地面に接触していない局面を示す.
- 遊脚期 (swing phase) :
片側の脚について、地面に接していない局面を示す. 遊脚期には、逆側の足の支持期が含まれる.
- 回復 :
離地した脚を前方にスイングし、再び接地に向かう一連の下肢動作のことを示す.
- 支持時間 (ST: stance time) :
支持期の所要時間 [sec] を示す.
- 滞空時間 (FT: flight time) :
滞空期の所要時間 [sec] を示す.

- 支持距離 (SD: stance distance) :
支持期に身体重心が疾走方向に移動した距離 [m] を示す. 身体重心の算出が困難な場合は, 大転子の移動距離として算出される.
- 滞空距離 (FD: flight distance) :
滞空期に身体重心が疾走方向に移動した距離 [m]. 身体重心の算出が困難な場合は, 大転子の移動距離として算出される.
- 支持脚 (stance leg) :
特に説明がない場合は, 支持期に地面に接している脚のことを示す.
- 遊脚 (swing leg) :
特に説明しない場合は, 支持期に地面に接していない側の脚のことを示す.
- 脚セグメント
大転子と脚の質量中心とを結ぶ線分

関連論文

本論文は、以下の主論文、未発表論文および学会発表をもとに構成されている。

【学術論文】

豊嶋 陵司・田内 健二・遠藤 俊典・磯 繁雄・桜井 伸二 (2015) スプリント走におけるピッチおよびストライドの個人内変動に影響を与えるバイオメカニクスの要因. 体育学研究, 60: 197-208. (主に第 2 章を構成)

Toyoshima, R. and Sakurai, S. (2016). Kinematic Characteristics of High Step Frequency Sprinters and Long Step Length Sprinters at Top Speed Phase. Int. J. Sports Health Sci., 14: 41-50. (主に第 3 章を構成)

豊嶋 陵司・桜井 伸二. 短距離走の最大速度局面におけるピッチおよびストライドと遊脚キネティクスとの関係. 投稿準備中. (主に第 4 章を構成)

【学会発表】

豊嶋陵司・桜井伸二 (2014). 短距離走におけるピッチ・ストライドのトレードオフ関係を克服する動作要因の検討. 日本コーチング学会第 25 回大会 (兼) 日本体育学会体育方法専門領域研究会第 7 回大会. 2014 年 3 月, 筑波大学.

豊嶋陵司・桜井伸二 (2014). ピッチおよびストライドの個人内変動と疾走動作との関係. 日本体育学会第 65 回大会体育方法領域. 2014 年 8 月, 岩手大学.

豊嶋陵司・桜井伸二 (2015). 短距離走におけるピッチおよびストライドとスイング脚のキネティクスとの関係. 日本体育学会第 66 回大会バイオメカニクス領域. 2015 年 8 月, 国土舘大学.

第1章 緒言

第1節 研究の背景

走運動は、人間の基本的な運動の1つである。走動作は、日常生活、遊び、スポーツなどの様々な場面で発生し、さらに、スポーツ場面における走運動は、競争としての走、準備運動やコンディショニングとしての走など、様々な動作様式に分類される（小林，1990）。中でも、人間としての最高速度を競う競争の歴史は非常に古く、古代ギリシア時代における第1回オリンピア祭（紀元前776年）においては1スタディオン走（192.27m）が行われ、これが唯一の開催競技であった（小林，1990）。これを起源として、近代オリンピックでは100m走が行われている。男子100mの世界記録は、1912年では10秒6であったが、2016年8月現在では、9秒58まで短縮された。この世界記録の変遷は、人類の走る速さの進歩を示しており、競技時間はわずか10秒程度でありながら、オリンピックの花形種目とされている。

近年の日本国内における100m走のパフォーマンス向上には、バイオメカニクス的研究が貢献してきた。特に、世界陸上競技選手権大会に出場した、世界一流選手の疾走動作を分析した研究（伊藤ほか，1994；伊藤ほか，1998）は、「大腿部を高く上げる」「キック後半に膝を伸ばす」という様な、それまで一般的とされてきた疾走動作の指導法を再考させるきっかけとなった。さらに、1991年に東京で開催された第3回世界陸上競技選手権大会および2007年に大阪で開催された第11回世界陸上競技選手権大会における世界一流選手と日本人選手との比較によって、日本人選手の疾走動作が、世界一流選手の動作に近づいていることも示されている（福田ほか，2008）。この成果に代表されるように、短距離走のバイオメカニクス的研究は、100m走における日本の国際競技力の向上や、競技レベルの底上げに有用なものであると考えられ、更なる発展が期待される。

100m走は、加速局面、最大速度局面、減速局面に分けられる（Delecluse et al., 1995; Mackala, 2007; Schiffer, 2009）。その中でも、最大速度局面において出現する最大疾走速度は、加速局面や減速局面における疾走速度と比較して、100m走のゴールタイムとの関係が非常に強いことが報告されている（Mackala, 2007；松尾ほか，2010）。よって、最大速度局面における疾走動態についての研究からは、100m走の競技記録を短縮するための有用な知見が得られると考えられる。一方で、最大疾走速度は加速局面を経て到達することから、

第1章 緒言

どのように高い疾走速度が獲得されるかを明らかにするために、加速局面の疾走動態を1歩ごとに調査した研究も、近年多くみられている（金高ほか，2005；Morin et al., 2012；内藤ほか，2013；Nagahara et al. 2014a；Nagahara et al. 2014b）。このような加速局面に関する研究は、最大速度局面で到達すべき疾走動態が理解された上で行われることにより、その獲得過程を理解するものとしてより有用なものになる。つまり、まずは最大速度局面についての詳細な理解が重要であると考えられる。

高い疾走速度の要因を理解するためには、まず、疾走速度の構成要素についての検討が重要である。疾走速度は、ピッチとストライドとの積であるため、疾走速度が高いことは、ピッチ或はストライドのうち、少なくとも一方が高いことを意味する。最大速度局面における疾走速度が異なる選手のピッチおよびストライドを比較した際に、疾走速度が高い選手は、ピッチが高かったことを示している研究（Ae et al., 1992; Mann and Herman, 1985; 福田ほか，2010），および、ストライドが大きかったことを示している研究（阿江ほか，1994；Gajer et al., 1999；Mackala, 2007; 矢田ほか，2011）の両方が存在する。また、同程度の疾走速度であっても、ピッチが高くストライドが小さい「ピッチ型」、および、ピッチが低くストライドが大きい「ストライド型」の選手が存在することが報告されてきている（阿江ほか，1994；宮下ほか，1986；内藤ほか，2013）。さらに、レースタイムの個人内変動（Salo et al., 2011）や加速局面終盤の疾走速度増加（Nagahara et al., 2014a）と、ピッチおよびストライドそれぞれとの関係には、個別性があることが報告されている。これらの報告を踏まえると、最大速度局面において、疾走速度が高い選手のピッチおよびストライドの特徴は一樣ではなく、「どちらが重要か」というピッチとストライドとの相対的な重要性は、一概に決まるものではないと考えられる。

ピッチおよびストライドに影響する要因として、形態的要因が挙げられる。これまでの研究では、身長が高いほどストライドが大きく、ピッチは低くなりやすいとされてきた（宮丸，1971；Paruzel-Dyja, 2006; 内藤ほか，2013）。このことから、宮代ほか（2013）は、競技レベルに対応した、ピッチおよびストライドの目標値を、身長を加味して提示している。しかし、これには誤差範囲も示されており、身長および競技レベル以外の技術的要因や体力的要因によっても、ピッチおよびストライドは変化すると述べられている。つまり、同程度の身長および競技レベルであっても、ピッチおよびストライドの値は一定とは言えず、疾走速度を高めることを目指す上で、ピッチの向上に焦点を当てるべき選手と、ストライドの増大に焦点を当てるべき選手との両方が存在すると考えられる。よって、トレーニングにおいて

第1章 緒言

は、個人のピッチの高さやストライドの大きさに応じて、どちらかの改善に焦点があてられることが多い（中田ほか，2003；土江，2004）。

ピッチまたはストライドを改善する上では、両者の間に存在する負の相互作用（Hunter et al., 2004）に留意しなければならない。これは、ピッチが高ければストライドが小さく、ストライドが大きければピッチが低い傾向にあるという関係である。さらに、疾走能力の縦断的な変化を分析した研究（稲葉ほか，2002）においても、ピッチとストライドとの間には、一方を高めようとするとも他方は小さくなるという関係が存在していることが示されている。つまり、ピッチとストライドとの間には、トレードオフ関係が存在していると考えられる。よって、疾走速度を高めるためのトレーニングにおいて、ピッチおよびストライドのうち、いずれか一方の改善を目指す場合であっても、他方の維持にも努めなければならない。

ピッチとストライドの個別性の存在を考慮すると、疾走動作などの機能的な課題にも個別性があると考えられる。選手の課題に応じた、より効率的な疾走速度を高めるトレーニングに取り組むためには、ストライドを維持しながらピッチを高めること、および、ピッチを維持しながらストライドを増大させることのそれぞれに関係する要因を明らかにすることは、重要な研究課題であると考えられる。

第2節 文献研究

短距離走の歴史は非常に古いことから、疾走能力に焦点を当てた研究は数多く行われてきた。ここでは、100m 走の最大速度局面のパフォーマンスに関する研究を概観し、ピッチおよびストライドの個別性の観点から、問題点および課題を整理する。

第1項 最大疾走速度の出現地点に関する研究

松尾ほか (2010) は、100m 走においては、加速局面における疾走速度やゴール前の疾走速度逡減よりも、最大疾走速度がゴールタイムに強く関係することを報告している。よって、最大疾走速度がどの辺りで出現するかを理解しておくことは、パフォーマンスを評価したり、トレーニング内容を組み立てたりする上で、有意義である。

最大疾走速度の出現地点の調査は、世界大会を含めて幅広く行われてきている。阿江ほか (1994) は、第3回世界陸上競技選手権大会の男子100mに出場した選手を対象に、VTRカメラで撮影した映像から10mごとの平均速度を算出し、延べ83名のうち、33名が50-60m区間で、19名が40-50m区間で最高速度に達したことを報告している。Mackala (2007) は、最大疾走速度の出現区間は、100mの記録が11秒前後の選手では40-60mの区間であったのに対し、世界トップレベルの選手では、70-80mであったことを報告している。松尾ほか (2010) は、第11回世界陸上競技選手権大会の男女100mにおける選手の疾走速度を計測し、男女ともに、最大速度到達区間の最頻値は50-60mであったことを報告している。

世界大会におけるレース分析に加え、国内の選手を対象とした調査も行われている。男子学生短距離選手の100m走において、10mごとの疾走速度を示した研究では、森丘ほか (1997) は40-50mの区間において、羽田ほか (2003) は、50m地点で最大疾走速度に達したと報告している。また、スタートから1歩ごとの疾走速度を測定した研究も存在しており、金高ほか (2005) は、日本人選手の100m走の加速区間の局面区分を検討し、スタートからおおよそ30歩目あたりとなる50-60m付近で加速が終了し、最大疾走速度が獲得されると述べている。Nagahara et al. (2014a) は、男子学生短距離選手を対象に、60mの全力疾走における1歩ごとの疾走速度変化を調査し、最大疾走速度に到達するのは、22-25歩目であったと報告している。これは、上述した金高ほか (2005) の報告を踏まえると、おおよそ50m付近であったと推測できる。

以上のことから、100m走における最大疾走速度は、世界トップレベルの選手の中には70m以降に出現する例がみられるものの、大半の選手は40-60mの区間で出現していると

第1章 緒言

捉えられる。また、加速局面終盤では、疾走速度や疾走動作の変化が小さい (Nagahara et al., 2014b) と考えられることから、40-60m における疾走動態は、最大疾走速度出現時とほぼ同等のものであると考えられる。

第2項 疾走速度、ピッチ、ストライドの関係

前項において、100m 走では 40-60m における疾走速度を高めることが最も重要であることが示された。疾走速度は、ピッチとストライドとの積である。つまり、疾走速度を高めるには、ピッチまたはストライドのうち、少なくとも一方を高めることが必要である。本項では、疾走速度、ピッチ、ストライドの関係を検討する。

Mann and Hermann (1985) は、1984 年のオリンピックの男子 200m 決勝の 125m 地点において、1 位、2 位、および 8 位の選手を比較し、上位の選手ほどピッチが高かったことを報告している。これを支持するように、1991 年の世界陸上の男子 100m でも、1 位の選手は 2 位の選手よりもピッチが高かったことが報告されている (Ae et al., 1992)。しかし、同大会において、決勝進出者、準決勝進出者、および日本人選手を比較したところ、ピッチに差はみられず、疾走速度が高い群ほどストライドが大きかったことが示されている (阿江ほか, 1994)。さらに、Gajer et al. (1999) は、1996 年フランス選手権の男子 100m 出場者 22 名のうち、上位 6 名と下位 6 名とを比較し、上位選手ほどストライドが大きく、ピッチの差は小さかったことを報告している。ここまで示した報告をまとめると、世界上位選手間の疾走速度の差はピッチによるものであるのに対し、疾走速度の差が大きい場合は、ストライドの差が影響しているように捉えられる。しかしながら、Morin et al. (2012) は、7.80-11.2m/s という、比較的幅広い最大疾走速度の差が、ピッチの高さと関係しており、ストライドの大きさとは無関係であったことを示している。これらのことから、対象とした選手の疾走速度の幅が一定であっても、選手間の疾走速度の違いが、ピッチの差およびストライドの差のいずれに依存しているかは、一概に決まらなると考えられる。

疾走速度とピッチおよびストライドとの関係が一様でない理由として、類似した疾走速度でも、異なるピッチとストライドを有する選手が存在すること (ピッチおよびストライドの個別性) が挙げられる。実際に、宮下ほか (1986) および阿江ほか (1994) は、世界一流選手の中も、ピッチが高くストライドが小さいタイプ (以下「ピッチ型」)、および、ピッチが低くストライドが大きいタイプ (以下「ストライド型」) に大別できることを示している。内藤ほか (2013) は、男子学生選手の 100m 走におけるパフォーマンスを分析し、ピ

ッチをストライドで除した値であるピッチストライド比 (杉林ほか, 2003) を用いて, 選手をピッチ型, ストライド型, 中間型に分類している. さらに, Salo et al. (2011) は, 11名の選手それぞれの, 複数レースにおける 100m 全体の平均ピッチおよび平均ストライドを映像から算出し, レースタイムがピッチの高さに依存する選手と, ストライドの大きさに依存する選手との両方が存在することを報告している. 以上のことから, 疾走速度が同程度であっても, ピッチおよびストライドは同程度とは限らず, 様々な値の組み合わせが存在していることは明らかである.

第3項 ピッチおよびストライドの決定要素およびトレードオフの要因

前項において示された, ピッチおよびストライドの個別性の存在を考慮すると, 疾走速度を高めるために, ピッチの向上もしくはストライドの増大のいずれに焦点を当てるべきか, という問いに対する答えは, 選手によって異なると考えられる. よって, 高いピッチおよび大きいストライドのそれぞれに関係する要因を把握しておくことは, 選手自身が, 課題に応じた適切なトレーニングを行うために重要であると考えられる. しかし, ピッチとストライドの間には, 一方が高ければ他方が小さいという負の相互作用が存在し (Hunter et al., 2004), 縦断的な変化においても, 一方を高めると他方が低下しやすいという, トレードオフ関係の存在が示されている (稲葉ほか, 2002). 疾走速度を高めるためには, 一方を高めながらも他方を維持するという, トレードオフの克服が必要となる. 本項では, ピッチおよびストライドそれぞれがどのような要素によって決定されるのかをまとめ, さらに, ピッチとストライドとの間のトレードオフ関係を引き起こす要因についての研究を概観する.

(1) ピッチおよびストライドの決定要素

ピッチおよびストライドの決定要素は, Hay (1993) によって説明されており, それを Hunter et al. (2004) が拡張して説明している. それらは, Fig. 1-1 のようにまとめられる. 疾走速度はピッチとストライドとの積であるが, そのピッチは, 1ステップの所要時間の逆数と定義されることから, 支持時間および滞空時間の長さによって決定される. さらに, 支持時間は, 支持距離および支持期における身体重心の水平速度によって, 滞空時間は, 離地時の身体重心の高さ, 鉛直速度, 空気抵抗によって決定される. ストライドは, 支持距離と滞空距離との和であり, 支持距離は接地時および離地時の足先と重心との距離などによって, 滞空距離は離地時の身体重心合成速度や, その速度ベクトルの角度, および重心高など

によって決定される。これらのピッチおよびストライドの決定要因はさらには、地面反力による力積や、身体の運動学的要因によって決定される。

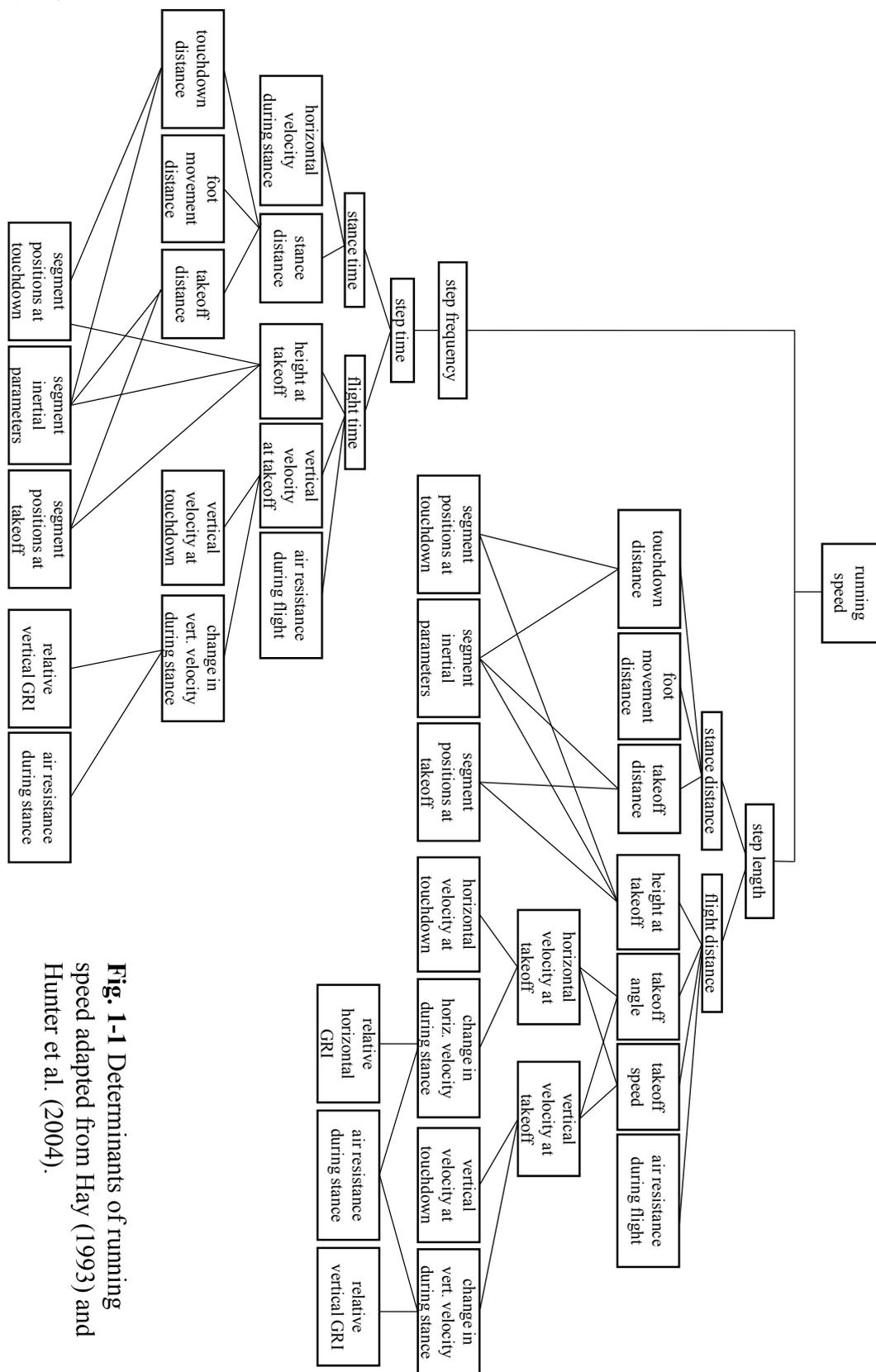


Fig. 1-1 Determinants of running speed adapted from Hay (1993) and Hunter et al. (2004).

(2) ピッチとストライドとのトレードオフを引き起こす要因

ピッチとストライドのトレードオフ関係の要因の1つとして、形態的要因が挙げられる。宮丸(1971)は女子選手の全力疾走を分析し、身長に対する下肢長の割合が高い選手ほど、ストライドが大きい一方でピッチが低かったことを報告している。Paruzel-Dyja et al.(2006)は、第9回世界陸上競技選手権大会の100mに出場した男子および女子選手を分析し、男女ともに、身長が高いほどストライドが大きくピッチが低かったことを報告している。内藤ほか(2013)は、学生短距離選手59名を、100m走の30-60mにおけるピッチストライド比を基に、ピッチ型、中間型、ストライド型に分類している。その結果、ストライド型は、ピッチ型および中間型と比較して身長が高かったが、ゴールタイムに差はみられなかったことを報告している。これらの研究から、身長や脚長は、ピッチの高さおよびストライドの大きさに影響し、ピッチとストライドとのトレードオフ関係を生み出す要因の1つであると考えられる。これは、接地時および離地時の姿勢が同じ場合でも、脚長が長ければ支持距離が大きくなる一方で、その分1ステップに時間を要することなどによって説明できる。また、Astrand and Rodahl(1977)は、ディメンション論によって、身体の長さ、ピッチ、ストライドおよび疾走速度の関係を理論的に説明している。つまり、同じ種類の動物が疾走する際、身体の長さは、ストライドに比例する一方でピッチには反比例し、結果として疾走速度には影響しないとされている。

ここまで示したように、ピッチおよびストライドは身長の影響を受けることから、宮代ほか(2013)は、公認競技会の100m走において、122名のステップ数や通過タイムなどを測定し、競技レベルに対応したピッチおよびストライドの目標値を、身長を加味して算出している。例えば、競技記録が11.00秒、身長が1.80mであれば、30-60mの平均のピッチ×ストライドは、 $4.65\text{Hz} \times 2.22\text{m}$ と示されている。しかしこのモデルには、疾走動作や筋力などの影響による誤差範囲も示されており、前述の例における誤差範囲は、 $4.92\text{Hz} \times 2.10\text{m}$ から、 $4.38\text{Hz} \times 2.36\text{m}$ となっている。これらのピッチストライド比は、2.34および1.86である。内藤ほか(2013)は、ピッチストライド比が2.39以上であればピッチ型、2.09以下であればストライド型であると判断できることを示唆している。この基準を考慮すると、ピッチストライド比2.34は中間型であるがピッチ型に近く、1.86はストライド型である。つまり、宮代ほか(2013)の報告は、競技記録および身長が等しい場合であっても、ピッチ型とストライド型との両方が存在する可能性を示していると捉えることもできる。また、Hunter et al.(2004)は、身長や脚長に差がない場合であっても、ピッチとストライドとの

第1章 緒言

間に負の相関関係が成り立ち、その要因は、離地時の身体重心の鉛直速度であることを示している。つまり、鉛直速度が高い場合、滞空時間が長くなることによってピッチは低くなるが、滞空距離が増大することによってストライドは増大し、鉛直速度が低い場合は、逆の過程によって、ピッチは高く、ストライドは小さくなる。そして、この離地時の身体重心の鉛直速度は、支持期における鉛直力積に影響される。しかしながら、このトレードオフが、どのような動作要因によって引き起こされているのかは、明らかにされていない(問題点1)。

第4項 疾走速度と下肢の動作および力学的要素との関係

前項において、身長が同程度の場合であっても、ピッチとストライドとのトレードオフ関係は成り立ち、それらは、疾走動作などの機能的な要因に影響を受けていることが示された。このトレードオフ関係を克服し、疾走速度を高めるためにも、疾走動作の改善が必要であると考えられる。実際に、短距離走のトレーニング現場において、選手はピッチやストライドを向上させるために、疾走動作や力発揮の改善に意識を向ける(稲葉ほか, 2002)。また、上述したように、100m走においては最大疾走速度を高めることが最も重要な課題であることから、本項では、最大速度局面における疾走速度に関係する動作や力学的要因についての研究を概観する。

(1) 最大速度局面における疾走速度が異なる選手の下肢動作の比較

Kunz and Kaufmann (1981) は、70m 地点の疾走動作を、十種競技選手と世界トップレベルの短距離選手とで比較し、短距離選手は疾走速度が高く、接地時に左右大腿部の成す角度が小さかったこと、より重心の真下近くに支持脚を接地していたこと、支持期における遊脚大腿部の平均角加速度が高かったことを報告している。Mann and Hermann (1985) は、1984年のロサンゼルスオリンピックにおいて、男子200m決勝に出場した3選手を比較し、上位の選手は、重心と接地点との水平距離が短かったこと、接地時に足部や下腿部の後方への速度が高かったこと、支持期における大腿部の後方への角速度が高かったこと、離地時における大腿部の後方角変位が小さかったことを報告している。宮下ほか(1986) は、第三回8ヶ国対抗陸上競技大会に出場した世界一流選手と日本選手との58m 地点における疾走動作を比較し、世界一流選手は、大腿部の後方への振幅が小さく、腰を基準に大腿部が前方で大きく動かされており、膝関節は離地時にあまり伸展されていなかったことを報告している。伊藤ほか(1994) は、第三回世界陸上競技選手権大会に出場した世界の一流選手および

第1章 緒言

日本代表選手のレース中の疾走動作、および実験的条件下における学生選手の疾走動作を分析し、高い疾走速度は、接地直前から支持期中盤まで、脚全体（大転子から足関節を結ぶベクトル）の後方スイング速度が高いことと強く関係しており、その動作を獲得するには、支持期において膝関節をあまり伸展させない方が効果的であることを示唆している。さらに、伊藤ほか（1998）は、世界トップレベル選手から学生選手までを対象に、疾走速度と下肢動作との関係を分析し、伊藤ほか（1994）と同様の結果に加え、疾走速度が高い選手は支持期に足関節を固定することで、股関節伸筋群によって発揮されたキック力を短い支持時間で地面に伝達するように対応していたことを示唆している。Ae et al. (2007) は、動作改善パターンを提示したり、評価したりするために、動作を身長および動作時間で規格化し、複数の選手の動作を平均化した標準動作モデルを用いることを提案している。この標準動作モデルを用いて、矢田ほか（2011）は、世界一流選手と学生短距離選手との疾走動作を比較した。その結果、世界一流選手は、支持期における膝関節の屈伸や足関節の底背屈が小さいこと、離地時に支持脚大腿部の後方への変位が小さいこと、接地時に遊脚大腿部がより前方まで回復されていたことなどを報告している。

これらの研究をまとめると、脚の後方スイングが速いこと、支持期における膝関節の伸展や足関節の底屈変位が小さいこと、大腿部の後方変位が小さいこと、脚の前方への回復が早いことは、高い疾走速度に関係していると考えられる。しかしながら、これらの動作要因が、どのようにピッチおよびストライドを介して疾走速度に影響しているのかは、明らかにはされていない。ピッチを高めることおよびストライドを増大させることには、異なる要素が関係すると考えられるが、これまでの研究では、疾走速度に関係する動作要因は一括りにされており、トレードオフ関係の克服を、ストライドを維持しながら高いピッチを獲得することと、ピッチを維持しながら高いピッチを獲得することに分け、それぞれに関係する動作要因を明らかにした研究はみあたらない（問題点2）。

(2) 疾走能力と下肢の力学的要素との関係

疾走動作は、身体の関節まわりで発揮される力によって生み出される。よって、短距離走における関節トルクやパワーなどの力学的要因についての研究は数多く行われてきた。

Mann (1981) は、最大速度局面の1サイクルにおいて、肩関節、肘関節、および下肢三関節のトルクの時系列変化を分析し、上肢関節トルクの貢献は小さいこと、接地前の股関節伸展トルクや膝関節屈曲トルクは、接地直後の減速を抑制するために働くことを示唆して

第1章 緒言

いる。Vardaxis and Hoshizaki (1989) は、4名の短距離選手を、上級選手および中級選手2名ずつに分けて、遊脚期の関節トルクやパワーの変化を比較した。その結果、トルクやパワーの変化パターンは類似しているが、股関節および膝関節のピークパワーは、上級選手が高かったことを報告している。渡邊ほか (2003a) は、男子学生短距離選手に60mの全力疾走を行わせ、50m地点の疾走速度と関節トルクとの関係を分析した。その結果、支持期の膝関節伸展トルクおよび足関節の底屈トルク、遊脚期の股関節屈曲トルクおよび伸展トルクの大きさが、高い疾走速度に関係していたことを報告している。そして、伊藤・石川 (2000) は、支持期の大きい足関節底屈トルクは、支持期前半の着地衝撃による背屈を抑制するためのものであり、足関節の底屈動作を意味するものではないことを示唆している。Bezodis et al. (2008) は、60mの全力疾走中の45m付近において、下肢関節のトルクおよびパワーを分析し、支持期前半は股関節が、後半は足関節が大きなパワーを発生させているのに対し、膝関節はパワーの生成にあまり貢献しなかったことを報告している。矢田ほか (2012) は、世界一流選手と学生選手との最大速度局面における遊脚の関節トルクおよびパワーを比較し、世界一流選手は、離地後から大きな股関節屈曲トルクを発揮し、遊脚の前方への引きつけを早めていること、学生選手は、遊脚期後半において、股関節伸展トルクに対して膝関節屈曲トルクの発揮される割合が大きかったために、股関節伸展角速度が停滞していたことを報告している。

以上の研究は、短距離走の最大速度局面を対象としたものであり、その疾走速度には、遊脚期における股関節屈曲および伸展トルク、支持期における膝関節伸展および足関節底屈トルクが関係しているとまとめられる。しかし、疾走動作に関する研究と同様に、高いピッチおよび大きいストライドそれぞれとの関係は、明確に示されていない。

一方、疾走速度をジョギング程度の速度から全力疾走まで増加させた際に、ピッチおよびストライドの変化と、下肢の力学的要素との関係を検討した研究が存在している。阿江ほか (1986) は、約3m/sから全力疾走(9.59±0.38m/s)までの異なる5種類の速度で疾走させた際の相関分析から、足関節底屈トルクの発揮が、支持期前半ではストライドを増大させることに、遊脚期後半の接地に先立つ局面ではピッチを高めることに貢献することを示唆している。また、股関節や膝関節まわりの筋群は、ピッチおよびストライドの両方に貢献することを示唆している。Schache et al. (2011) は、およそ3.5, 5.0, 7.0, 9.0m/sの4段階の疾走速度で疾走した場合、5.0m/s以上の疾走速度の増加はピッチによるものであり、その際に遊脚期における股関節まわりの正の仕事および膝関節まわりの負の仕事が顕著に増

第1章 緒言

大することを報告している。Dorn et al. (2012) は、異なる4種類の速度で疾走させた際の筋の働きを筋骨格モデルを用いて調査し、7m/sまでの疾走速度の増加はストライドの増大によるものであり、その要因はヒラメ筋や腓腹筋などの足関節底屈筋群の活動が、鉛直地面反力の増大に貢献することであることを示唆している。また、7m/s以上の疾走速度の増加は、腸腰筋、大殿筋、ハムストリングスなどの股関節まわりの筋群が、股関節や膝関節を大きく加速させることによって生じる、ピッチの増加によるものであることも示唆されている。これらの研究では、ピッチおよびストライドと力学的要素との関係に言及しているものの、低い速度から全力疾走までの個人内変化を対象としているものであり、最大速度局面における高いピッチや大きいストライドとも関係しているかは不明である。

ここまで示したように、下肢の力学的要素についても、短距離走の最大速度局面において、ストライドを維持しながらピッチを高めること、および、ピッチを維持しながらストライドを増大させること、それぞれに関係する要因は明らかにされていない（問題点3）。

第5項 短距離走の最大速度局面における既存研究の問題点

ここまで示した文献研究より、短距離走の最大速度局面に関する研究の問題点は、以下の様にまとめられる。

- (1) ピッチとストライドとのトレードオフ関係を生じさせる動作要因は不明である。
- (2) 疾走速度が異なる選手の比較において、ピッチが異なる選手およびストライドが異なる選手が混在しており、ストライドを維持しながらピッチを高めること、および、ピッチを維持しながらストライドを増大させること、それぞれに関係する動作要因は不明である。
- (3) ピッチおよびストライドのそれぞれと、下肢の力学的要因との関係は不明である。

第3節 本研究の目的, 課題, 限界

第1項 本研究の目的

本研究の目的は、短距離走の最大速度局面におけるピッチとストライドとのトレードオフ関係について、その発生および克服に係るバイオメカニクスの要因を明らかにし、疾走速度を高めるために、ピッチの向上が課題である選手およびストライドの増大が課題である選手それぞれに対して、パフォーマンス改善のために有用な観点を示すことである。

第2項 本研究の課題

上記の目的を達成するため、本研究では、以下の3つの研究課題を設定した。

【研究課題1】

短距離走の最大速度局面において、同一個人内におけるピッチ型の疾走試技とストライド型の疾走試技とを比較し、ピッチとストライドとのトレードオフの発生機序を明らかにする。

【研究課題2】

短距離走の最大速度局面において、ストライドが類似した選手間での高いピッチ、および、ピッチが類似した選手間での大きいストライドに係る運動学的要因を明らかにする。

【研究課題3】

短距離走の最大速度局面における遊脚キネティクスと高いピッチおよび大きいストライドそれぞれとの関係を明らかにする。

疾走速度を高めるためには、ピッチとストライドとのトレードオフ発生は避けなければならない。そのためにはまず、トレードオフがどの様に発生しているかを明らかにする必要がある。そこで研究課題1では、同程度の疾走速度であった試技を、ピッチ型およびストライド型に分けて比較することにより、ピッチとストライドとの間のトレードオフ関係を引き起こす要因を検討する。その際、個人内での比較を行うことによって、形態的要因の影響は排除できると考えられる。

第1章 緒言

ピッチとストライドとのトレードオフ発生機序を明らかにした上で、次に、研究課題2では、トレードオフ関係を克服する2つの手段それぞれに関する運動学的要因を検討する。ストライドが類似した選手間のピッチ、および、ピッチが類似した選手間のストライドそれぞれに関する要因を明らかにすることにより、ピッチの向上およびストライドの増大というそれぞれの課題に応じた疾走動作改善に対する知見が得られると考えられる。

疾走動作は、様々な関節まわりでトルクやパワーが発揮された結果として生じるものである。よって、疾走動作を分析するのみでは、疾走速度を高めるための知見としては不十分である。そこで、研究課題3では、研究課題2で示された運動学的要因を踏まえ、高いピッチおよび大きいストライドのそれぞれについて、下肢関節トルクやパワーなどの力学的要因との関係を検討する。

第3項 本研究の限界

(1) 分析対象の限界

本研究において収集されたデータは、公認競技会における100mの記録が、およそ10秒台中盤から12秒台までの男性選手のものである。よって、本研究の知見を、世界一流選手や日本代表選手、および女性選手に適用することには限界がある。

(2) 方法による限界

本研究は、短距離走の最大速度局面を対象としたものである。よって、疾走速度、ピッチ、およびストライドについて、静止状態からの獲得過程における因果関係までは明らかにできない。

(3) 作業上の仮定

- 1) 人間の身体は、剛体リンクセグメントとしてモデル化でき、各セグメントの質量中心や慣性モーメントは、身体部分慣性係数（阿江ほか、1992）によって推定できる。
- 2) 疾走動作における左右差は、無視できる程度である。
- 3) 全力疾走において、40-60mの間での疾走動態は、最大疾走速度出現時とほぼ同等のものである。

第2章 短距離走の最大速度局面における同一個人のピッチとストライドとの トレードオフ発生機序（研究課題1）

第1節 本章の目的

疾走速度を高めるには、ピッチおよびストライドのうち、少なくとも一方を高める必要がある。しかし、ピッチとストライドの間には、トレードオフ関係が存在する。つまり、ピッチおよびストライドのうち、一方を高めようとするとも他方が低下しやすい。疾走速度を高めるためには、一方を高めながらも他方を維持するという、トレードオフの克服が必要となるが、そのためにはまず、トレードオフ関係の発生機序を把握しておくことが重要であると考えられる。

ピッチおよびストライドに影響を与える要因として、身長などの形態的要因、および、疾走動作などの機能的要因が挙げられる。これまでの研究において、身長が高ければ、ストライドが大きく、ピッチが低い傾向にあることが示されている（宮丸，1971；Paruzel-Dyja，2006；内藤ほか，2013）。一方，Hunter et al. (2004) は，同程度の身長であっても，ピッチとストライドとのトレードオフ関係は成り立ち，その主な要因は，離地時の身体重心の鉛直速度であったことを報告している。しかし，このトレードオフ発生に関する動作要因は明らかにされていない。離地時の身体重心の鉛直速度は，支持期の鉛直力積が大きな決定要素であり，鉛直力積は，鉛直地面反力の大きさと支持時間で決定する。よって，支持脚の動作要因が，ピッチとストライドとのトレードオフに関係している可能性が考えられる。一方，走高跳を分析した先行研究（奥山ほか，2003）においては，地面と接していない振上げ脚の動作要因が，鉛直地面反力に影響することが示唆されている。走高跳に関する報告を短距離走にそのまま適用することはできないが，短距離走においても遊脚の動作要因が鉛直地面反力に影響している可能性は考えられる。この観点から，本章においては，支持脚だけでなく，遊脚の動作要因とピッチおよびストライドとの関係を検討する必要があると考えられる。

ピッチとストライドとのトレードオフ発生機序を明らかにするための手段の1つとして，疾走速度が同程度であるピッチ型の選手とストライド型の選手とを比較することが挙げられる。しかし，このような選手間のパフォーマンス比較を行った場合，その違いが身体特性によるものであるのか，技術的な要因によるものであるのかを明確にすることは困難である。一方，同一個人内においてピッチおよびストライドが異なった疾走を比較する場合は，

第2章 研究課題1

比較対象の身体特性がほぼ同一であるとみなせるため、ピッチおよびストライドに影響を及ぼす動作要因を検討することに適していると考えられる。個人内における疾走速度および疾走動作の変動を調査した研究は複数存在しているが(稲葉ほか, 2002;加藤ほか, 2011), ピッチおよびストライドの個人内変動と疾走動作との関係を検討した研究はあまりみられない。

以上のことから本章では, 同一個人において, ピッチ型であった疾走試技とストライド型であった疾走試技とを比較し, ピッチとストライドとのトレードオフ関係の発生機序を明らかにすることを目的とした。

第2節 方法

第1項 被験者

被験者は、陸上競技の男子短距離選手1名（身長 1.76m, 体重 70kg, 100m の自己最高記録 10.33sec）であった。被験者には、実験前に本研究の趣旨を詳細に説明し、本研究への参加の同意を得た。

第2項 実験試技

実験試技は、スタンディングスタートからの 60m 全力疾走を、直線約 100m の全天候型陸上競技走路で行わせた。試技開始前に、被験者の左右大転子、左右膝関節、左右外踝、左右踵、左右足先、左右肩峰、左右肘関節、左右手首、左右手先の 18 点に反射マーカを貼付した。複数回の試技を行う実験を約 1 年間で 5 回実施し、全 14 試技を分析の対象とした。疲労の影響を排除するため、試技間には十分な休息をとらせた。

第3項 測定方法

12 台の 3 次元光学式位置測定装置(VICON システム: VICON Motion Systems 社製)を用い、サンプリング周波数 120Hz で 50m 付近における疾走動作中の反射マーカを位置を測定した。また、走路に埋設された 6 枚のフォースプレート(Kistler-9287A: Kistler 社製)を用い、サンプリング周波数 600Hz で支持期の地面反力を測定した。各データは、同期信号により同期させた。

第4項 データ処理

座標データは、4 次のバターワース型ローパスフィルタにより、遮断周波数 8Hz で平滑化した。座標データおよび地面反力は矢状面上に投影し、2 次元平面上で分析を行った。

分析局面は、被験者の左右どちらかの足部が最初にフォースプレートに接地(ON1)してからの 1 ステップとした。接地および離地は、地面反力の 0N を基準として判断した。なお、本研究においては、ON1 で接地した側を支持脚、他方を遊脚と表現した。

第5項 算出および分析項目

収集したデータから、ピッチ、ストライド、ピッチストライド比、疾走速度、支持時間、滞空時間、支持距離および滞空距離を算出した。ストライドの算出には、身体重心の座標を

用いた。また、地面反力は、前後成分の負の値、正の値、および鉛直成分それぞれについて、ピーク値および力積を算出した。下肢キネマティクスとして、大腿部、下腿部、股関節、膝関節、足関節それぞれの角度および角速度を算出した。各セグメントおよび関節角度定義は、Fig. 2-1に示した。大腿部の角度は、大転子から膝関節を結ぶ線分と、鉛直線との成す角とした。下腿部の角度は、膝関節から足関節を結ぶ線分と、鉛直線との成す角とした。また、大腿部および下腿部の角度は、鉛直線を基準に前方にスイングされている場合を正、後方にスイングされている場合を負の値とした。股関節角度は、体幹と大腿部の成す角、膝関節角度は大腿部と下腿部の成す角、足関節角度は、下腿部と足部（踵から足先を結ぶ線分）の成す角とした。

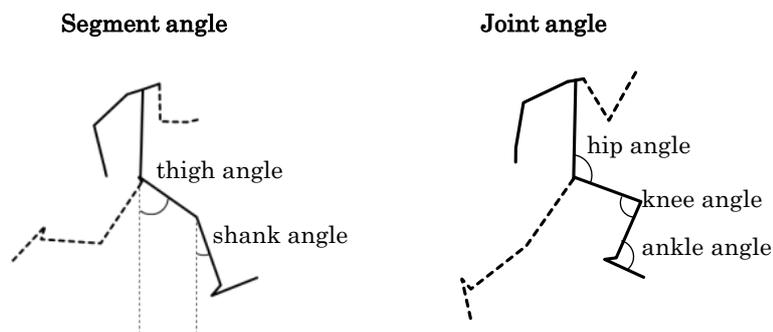


Fig. 2-1 Definitions of segment angle and joint angles.

第6項 統計処理

各試技のピッチストライド比の結果を比較し、値の高かった7試技をピッチ型(=SF type)、値の低かった7試技をストライド型(=SL type)とした。各分析項目について、ピッチ型およびストライド型の値を、対応のないt検定を用いて比較した。ピッチストライド比の平均値および標準偏差は、ピッチ型が 2.15 ± 0.05 、ストライド型が 1.89 ± 0.06 であり、ピッチ型が有意に高値を示した($p < 0.001$)。Fig. 2-2には、ピッチとストライドの関係を、疾走タイプ別に示した。ピッチ型は、ピッチが4.58-4.88Hz、ストライドが2.14-2.25mであった。ストライド型は、ピッチが4.29-4.58Hz、ストライドが2.27-2.41mであった。ピッチ型とストライド型とでピッチが同じ試技が1組みられたが、ストライドには0.15mの差がみられた。

第2章 研究課題1

下肢キネマティクスに関しては、支持期および滞空期それぞれの時間を規格化し、5%毎に比較した。その際、後述する支持時間と滞空時間の比が、ピッチ型、ストライド型ともにおよそ 2:3 であったことから、支持期を 0-40%、滞空期を 40-60%として規格化した。有意水準は 5%未満とした。

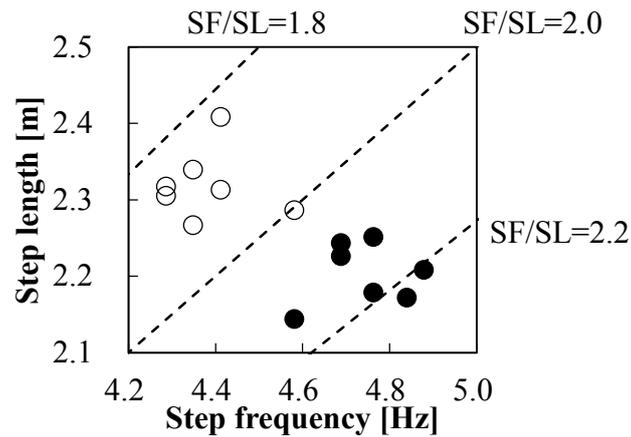


Fig. 2-2 The relationship between step frequency and step length.

SF/SL: Step frequency/Step length

●: SF type (high step frequency type), ○: SL type (long step length type).

第3節 結果

第1項 ピッチ型とストライド型とのパフォーマンス比較

分析対象の14試技において、支持脚が右脚となる試技と左脚となる試技が含まれた。支持脚の左右の数は、ピッチ型は右が2試技、左が5試技であるのに対し、ストライド型は右が3試技、左が4試技であった。この結果を、 χ^2 乗検定を用いて分析したところ、ピッチ型とストライド型との間で、左右の数の分布に有意差は認められなかった ($\chi^2 = 0.311$, $df = 1$, $p = 0.577$)。よって、ピッチ型とストライド型とでは、左右脚の内訳が異なるが、その差は、本研究においては無視できるものとした。

Table2-1には、ピッチ、ストライド、疾走速度の平均値および標準偏差を示した。ピッチはピッチ型が有意に高く、ストライドはストライド型が有意に大きく、疾走速度に有意な差はみられなかった。

Fig. 2-3には、支持時間および滞空時間を、Fig. 2-4には、支持距離および滞空距離の結果を示した。支持時間および支持距離に有意な差はみられず、滞空時間および滞空距離は、ともにストライド型が有意に高値を示した。

第2項 地面反力および力積

Fig. 2-5には、支持期における地面反力について、SF type および SL type それぞれの平均の時系列変化（上段）、ピーク値（中段）および力積（下段）を、減速、推進および鉛直の成分ごとに示した。時系列変化は、支持期を0-40%に規格化して示した。前後方向の成分である減速成分、推進成分は、時系列変化に大きな差はみられず（Fig. 2-5 左上）、ピーク値および力積ともに、疾走タイプ間に有意な差は認められなかった（Fig. 2-5 左中および左下）。鉛直成分は、ピークを迎えるやや手前から、ストライド型が高い値を示す傾向がみられ（Fig. 2-5 右上）、ピーク値および力積ともに、ストライド型が有意に高値を示した（Fig. 2-5 右中および右下）。

Table 2-1 Comparison of performance between SF type and SL type.

	SF(Hz)	SL(m)	SV(m/sec)
SF type	4.74 ± 0.10	2.20 ± 0.04	10.45 ± 0.31
SL type	4.38 ± 0.10	2.32 ± 0.05	10.16 ± 0.30
t test	***	***	N. S.

***: $p < 0.001$, SF: step frequency, SL: step length, SV: sprint velocity, SF type: high step frequency type, SL type: long step length type.

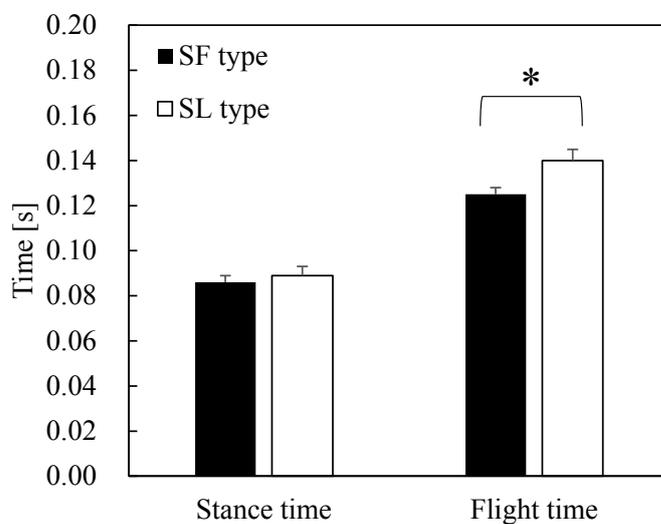


Fig. 2-3 The comparison of stance time and flight time between SF type and SL type. SF type: step frequency type, SL type: step length type, *: $p < 0.05$

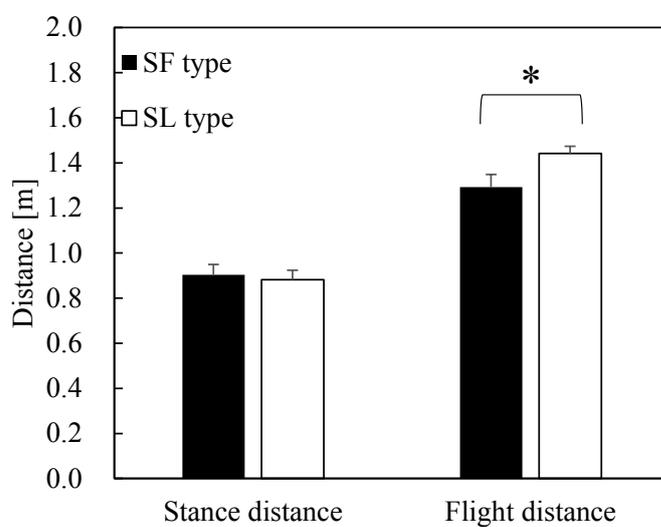


Fig. 2-4 The comparison of stance distance and flight distance between SF type and SL type. SF type: step frequency type, SL type: step length type, *: $p < 0.05$.

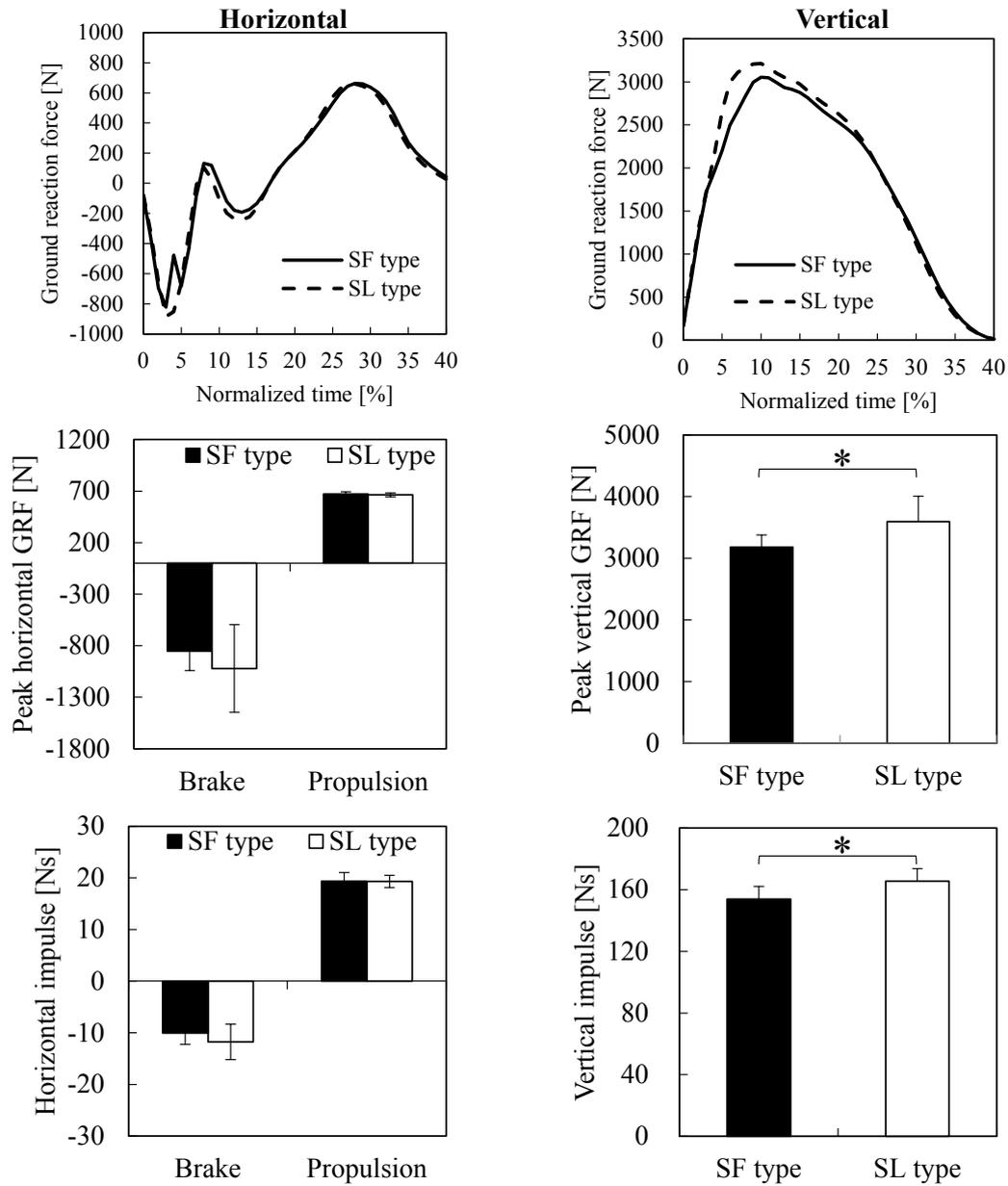


Fig. 2-5 The comparison of ground reaction force and impulse between SF type and SL type. SF type: step frequency type, SL type: step length type, GRF: ground reaction force. *: $p < 0.05$.

第3項 セグメントおよび関節の角度および角速度

(1) セグメント角度および角速度

Fig. 2-6 には、大腿部の角度および角速度の時系列変化を示した。大腿部の角度について、支持脚は、5-30%および95-100%においてストライド型が有意に高値を示し (Fig. 2-6 左上)、遊脚は0-85%においてストライド型が有意に高値を示した (Fig. 2-6 右上)。大腿部の角速度は、支持脚 (Fig. 2-6 左下) および遊脚 (Fig. 2-6 右下) とともに、有意差がみられた局面はなかった。

Fig. 2-7 には、下腿部の角度および角速度の時系列変化を示した。下腿部の角度について、支持脚は有意な差はみられず (Fig. 2-7 左上)、遊脚は、55-70%においてストライド型が有意に高値を示した (Fig. 2-7 右上)。下腿部の角速度は、支持脚では30-75%および95-100%において、ピッチ型が有意に低値を示した (Fig. 2-7 左下)。遊脚は、80-90%においてストライド型が有意に低値を示した (Fig. 2-7 右下)。

(2) 関節角度および角速度

Fig. 2-8 には各関節角度、Fig. 2-9 には各関節角速度の時系列変化を示した。股関節角度について、支持脚 (Fig. 2-8 左上) の100%、および、遊脚 (Fig. 2-8 右上) の10-65%においてピッチ型が有意に伸展位であった。股関節角速度は、支持脚 (Fig. 2-9 左上) および遊脚 (Fig. 2-9 右上) とともに、両群間に有意な差はみられなかった。

膝関節角度について、支持脚 (Fig. 2-8 左中) の0-25%および90-100%、遊脚 (Fig. 2-8 右中) の0-10%および20-45%において、ピッチ型が有意に伸展位であった。膝関節角速度は、支持脚 (Fig. 2-9 左中) の35、40、60-100%においてはピッチ型が有意に低値を示し、遊脚 (Fig. 2-9 右中) の80-95%においては、ピッチ型が有意に高値を示した。

足関節角度は、支持脚 (Fig. 2-8 左下) および遊脚 (Fig. 2-8 右下) とともに有意な差はみられなかった。足関節角速度は、支持脚 (Fig. 2-9 左下) の75および80%において、ピッチ型が有意に低値を示し、遊脚 (Fig. 2-9 右下) の60および65%においては、ピッチ型が有意に高値を示した。

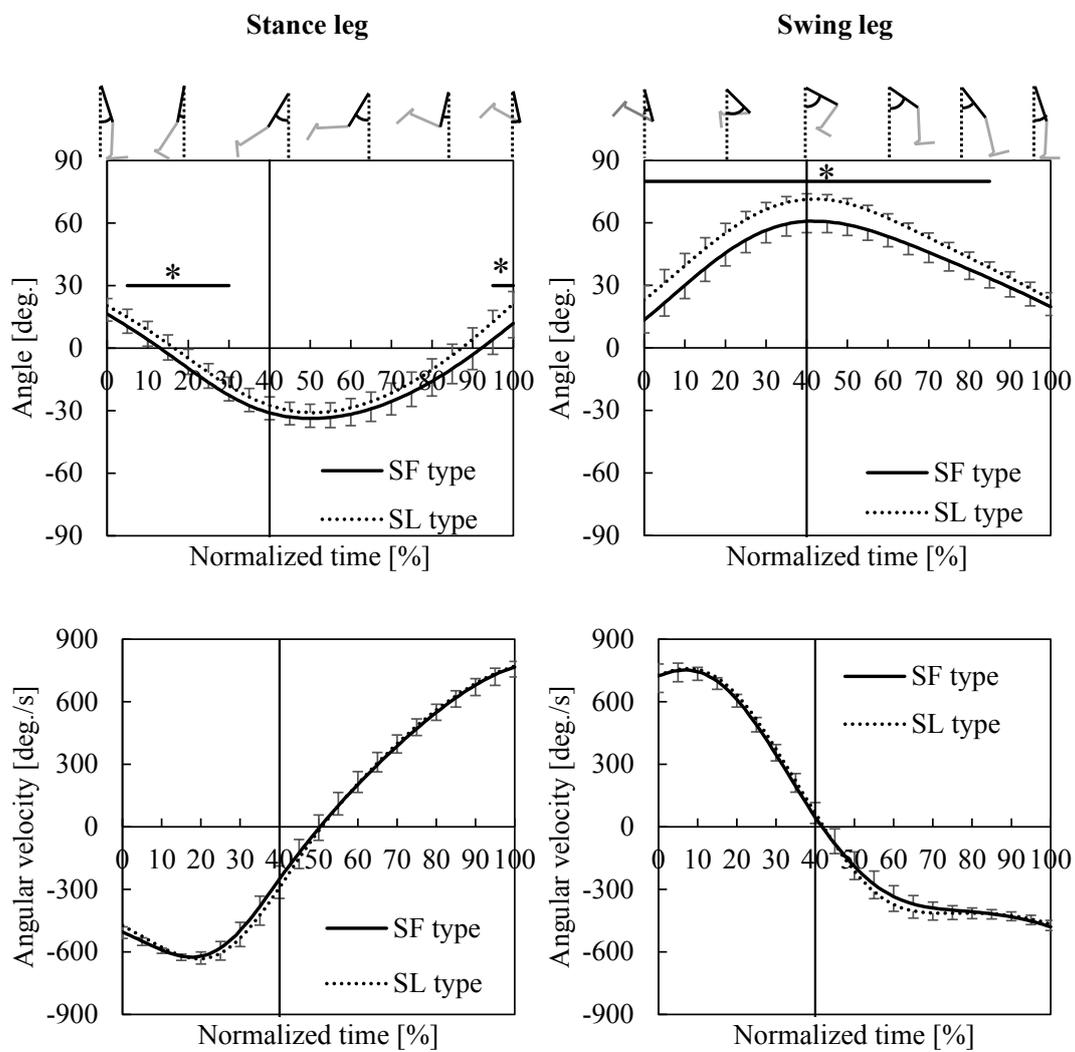


Fig. 2-6 Time series of thigh angle (above) and angular velocity (below). SF type: step frequency type, SL type: step length type, *: $p < 0.05$.

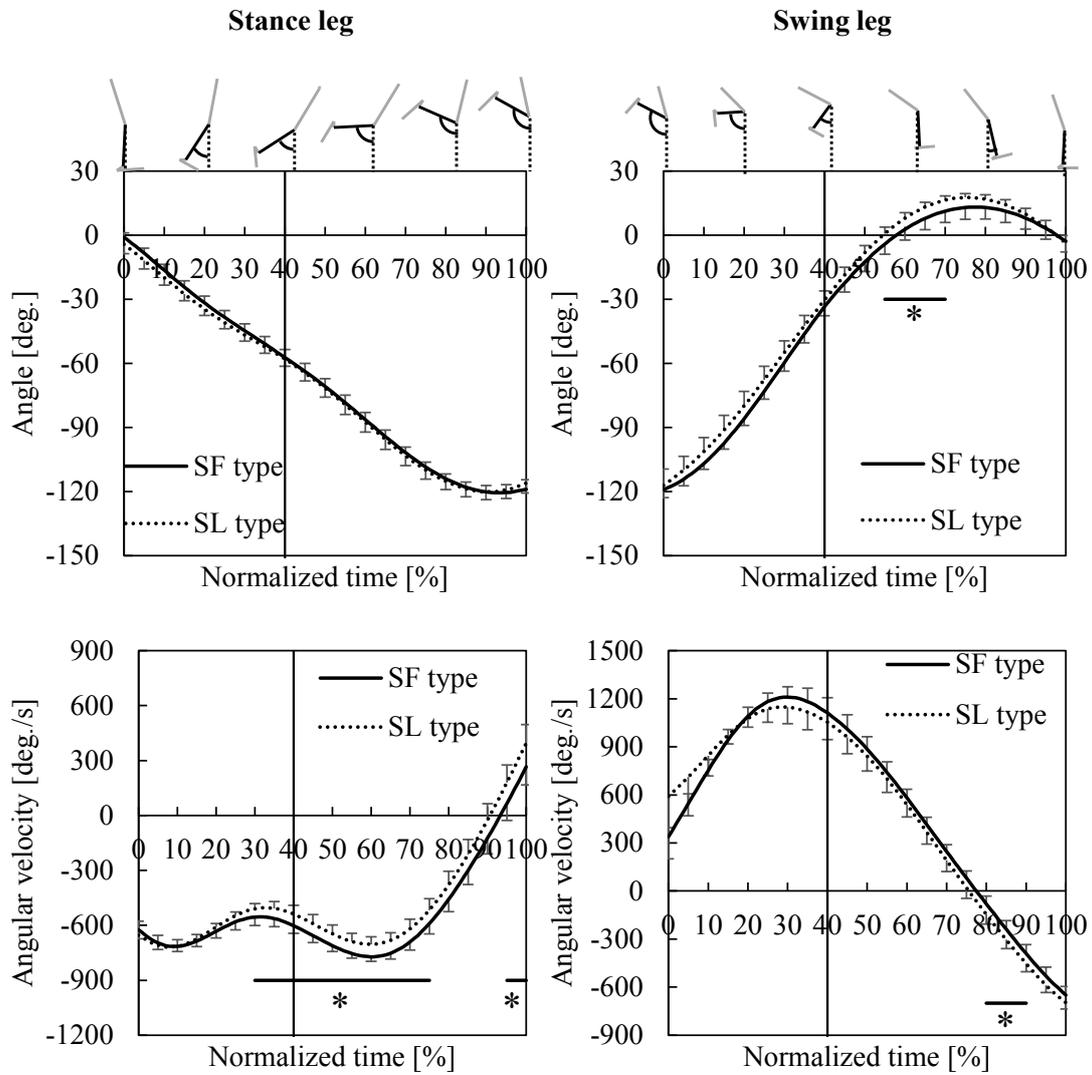


Fig. 2-7 The time series of the shank angle and angular velocity.
 SF type: step frequency type, SL type: step length type, *: $p < 0.05$.

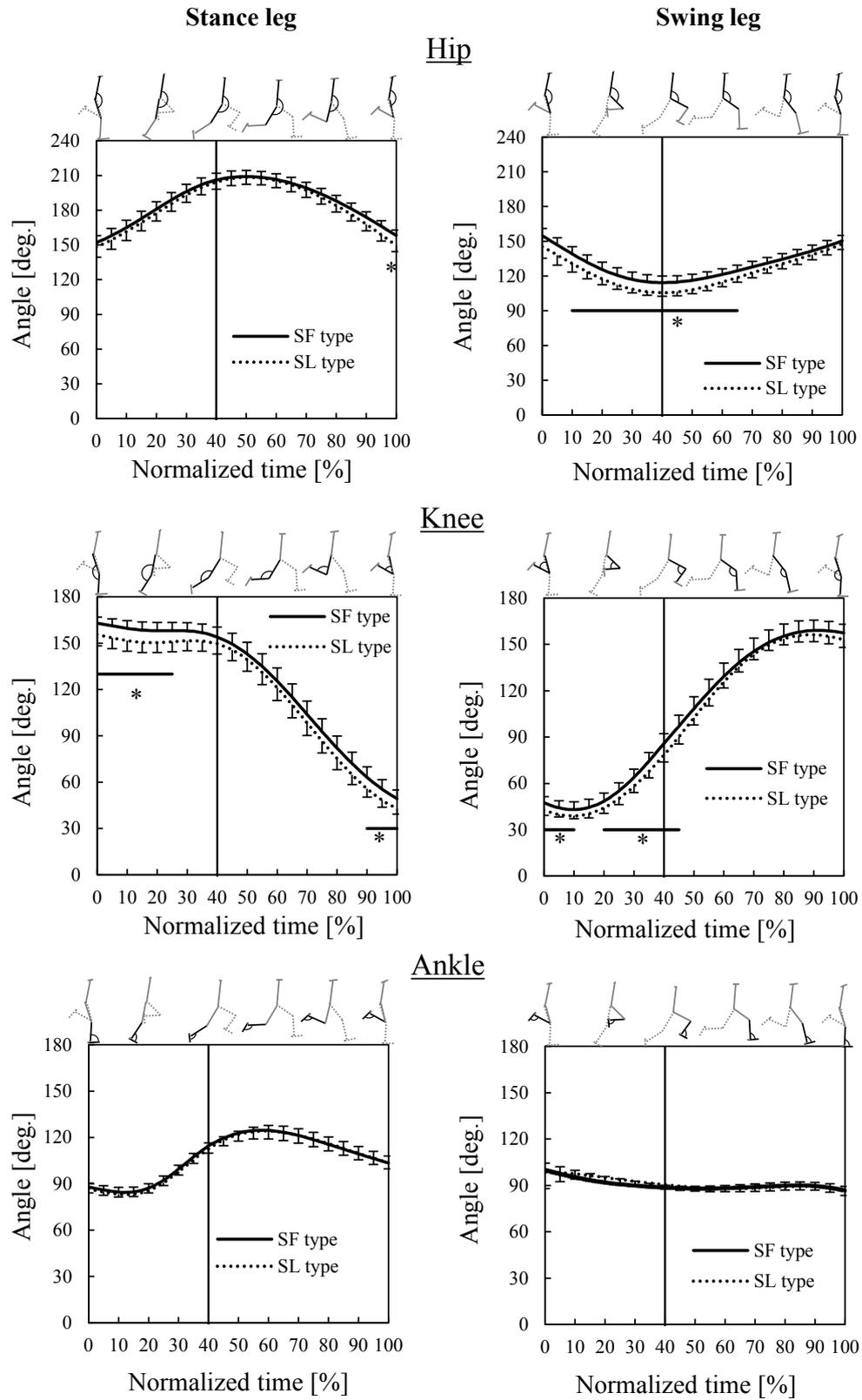


Fig. 2-8 The time series of the joint angle.
 SF type: step frequency type, SL type: step length type, *: $p < 0.05$

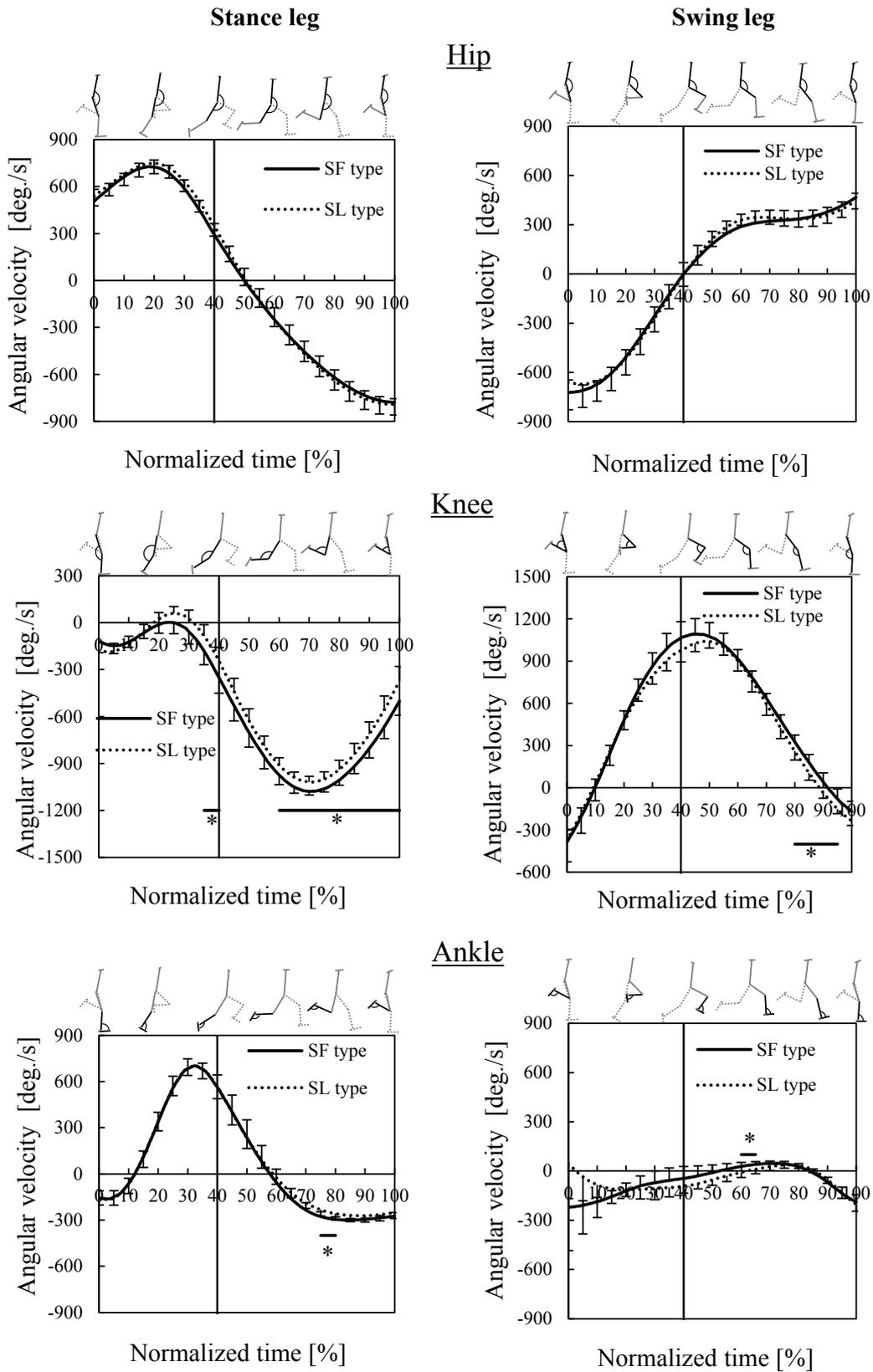


Fig. 2-9 The time series of the joint angular velocity.
 SF type: step frequency type, SL type: step length type, *: $p < 0.05$

第4節 考察

本研究では、同一被験者の最大努力での疾走パフォーマンスを複数回測定し、14 試技のデータを収集した。その結果から、ピッチストライド比を基に、7 試技ずつピッチ型とストライド型に分類した。ピッチストライド比は、ピッチ型が有意に高値を示した。ピッチストライド比の幅は、ピッチ型が 2.09-2.23、ストライド型が 1.83-2.00 であった。本研究のピッチ型は、内藤ほか (2013) の基準に当てはめると、中間型となる。しかし、ピッチはピッチ型が有意に高値であり、ストライドはストライド型が有意に高値であったことから、本研究の分類は、ピッチとストライドとの間のトレードオフ関係に影響を及ぼすバイオメカニク的要因を検討する上で妥当であったと考えられる。

第1項 支持・滞空時間、支持・滞空距離および地面反力

支持時間および支持距離は両群間に有意な差は認められず、滞空時間と滞空距離はストライド型が有意に長かった (Fig. 2-3 および Fig. 2-4)。福田・伊藤 (2004) は、疾走速度が高い選手ほど、支持時間が短かったことを報告している。本研究では、ピッチ型とストライド型とで疾走速度に大きな違いがなかったため、支持時間にも大きな違いがなかったものと考えられる。Hunter et al. (2004) は、滞空時間が長くなると滞空距離の増大を介してストライドが増大する一方で、ピッチが低下することを報告しており、本研究の結果はこれと一致するものであった。

滞空時間に影響する要因の 1 つとしては、地面反力が挙げられる。地面反力のピーク値および力積に関して、水平方向の成分である減速成分および推進成分は、いずれの項目においても両群間に有意な差は認められなかった (Fig. 2-5 左)。鉛直成分は、地面反力最大値および力積ともに、ストライド型が有意に大きかった (Fig. 2-5 右)。これらのことから、ストライド型は、ピッチ型と同程度の支持時間であっても、地面に対して鉛直方向により大きな力を加えることで大きな鉛直力積を獲得し、離地時に重心がより高い鉛直速度をもつことによって、滞空時間が長くなったと考えられる。

福田ほか (2013) は、日本トップクラスの選手において、疾走速度が高い選手ほど支持時間が短い一方で滞空時間が長く、ストライドが大きかったことを報告している。土江 (2004) は、鉛直方向の地面反力を大きくし、短時間で大きな力積を獲得することが、ストライドの拡大による疾走速度向上につながることを、理論的に説明している。また、Weyand et al. (2000) は、鉛直地面反力を大きくすることによって短い支持時間で力積を獲得でき、疾走

速度が高まると述べている。本研究のストライド型は、鉛直地面反力、鉛直力積、滞空時間およびストライドが有意に高値であったにもかかわらず、疾走速度はピッチ型と同程度であった (Table 2-1)。この先行研究との矛盾は、ストライド型はピッチ型よりも滞空時間が増加した一方で、支持時間が短縮されなかったことによってピッチが低下したことが理由であろう。

上述の通り、ピッチ型とストライド型との間の、ピッチおよびストライドの差異は、滞空時間が大きく影響していると考えられる。この考えを基に、以下では、ピッチおよびストライドを制御する下肢キネマティクスについて考察する。

第2項 ピッチ型とストライド型との下肢キネマティクスの違い

Fig. 2-10 に、ピッチ型およびストライド型のスティックピクチャを、ON1 における大転子中心を重ねて示した。両タイプのキネマティクスの相違点は、以下のようにまとめられる。

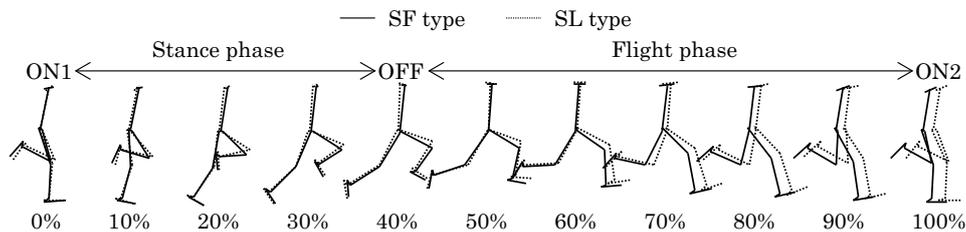


Fig. 2-10 Stick picture of SF type and SL type.

ON1: The touchdown of the stance leg. OFF: The take-off of the stance leg. ON2: The touchdown of the swing leg.

(1) 支持期から遊脚期前半について

支持期において、支持脚の下肢キネマティクスに大きな違いがみられたのは、大腿角度および膝関節角度であった。大腿角度は、ストライド型の方がより大きかった (Fig. 2-6 左上)。つまり、大転子を基準に膝がより前方に位置していた。大腿角度の大きさは、大腿部と体幹部の成す角度である股関節角度に関係すると考えられるが、ピッチ型とストライド型の股関節角度に大きな違いはみられなかった (Fig. 2-8 左上)。このことから、体幹部はピッチ型がより前傾しており、ストライド型がより直立に近い状態であったと考えられる。そこで、

体幹角度を大転子中点と胸骨上縁を結ぶ線分と矢状面上の水平線との成す角と定義し, Fig. 2-11 に結果を示した. 25-90%において SL type が有意に高値を示し, SF type は SL type よりも体幹が前傾していたことが明らかとなった. 膝関節は, 接地時から支持期中盤にかけて, ストライド型がより屈曲位であった (Fig. 2-8 左中). Hunter et al. (2005) は, 重心をより前方に接地するほど, 力積の減速成分が大きくなることを報告している. ストライド型は接地時の大腿角度が大きい (Fig. 2-6 左上), 膝関節がより屈曲している (Fig. 2-8 左中) ことにより, 重心から接地位置までの水平距離がピッチ型と大きく変わらず, よって力積の減速成分もピッチ型と同程度になった (Fig. 2-5 左) と推察される.

支持脚の 40-60%は, 離地から逆側の足が接地するまでの滞空期, つまり遊脚期の前半を表している. この局面の逆足接地前 (95-100%時) において, ストライド型はピッチ型より大腿角度が大きかった (Fig. 2-6 左上). 離地時 (40%時) においては大腿角度に差はみられず, 大腿部の角速度の変化もピッチ型とストライド型とで極めて類似していた (Fig. 2-6 左下). これらのことから, 逆側の足の接地前においてストライド型の大腿角度が大きい理由は, 高い角速度よりも, 滞空時間が長いことによる角変位量の増大が関係していると考えられる. また, 逆側の足の接地前 (90-100%) においては, ストライド型の方が, 膝関節が屈曲していた (Fig. 2-8 左中). 膝関節の屈曲角速度は滞空期全体を通してピッチ型の方が速かった (Fig. 2-8 右中). ストライド型は屈曲角速度が遅いにもかかわらず, 滞空時間が長いために屈曲変位が大きくなり, 逆側の足が接地する時にはピッチ型よりも屈曲していたと考えられる.

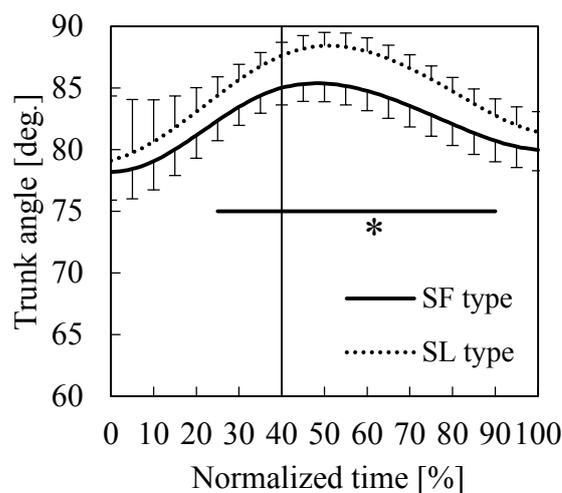


Fig. 2-11 The time series of the trunk angle.
SF type: step frequency type, SL type: step length type, *: $p < 0.05$

(2) 遊脚期後半について

ストライド型は、逆側の脚の支持期における遊脚の大腿角度がより大きく (Fig. 2-6 右上)、股関節および膝関節がより屈曲していた (Fig. 2-8 右上および右中)。その後の滞空期は、遊脚は大腿角度がほぼ最大になった後に接地地に向かう局面である。この局面においても、大腿角度と股関節角度は、支持期と同様の違いがみられた。しかし、遊脚の大腿角速度 (Fig. 2-6 右下) および股関節角速度 (Fig. 2-9 右上) は、分析局面全体を通してピッチ型とストライド型で類似していた。これらのことから、ピッチ型とストライド型の遊脚大腿部は、同程度の角速度であるが、ストライド型はピッチ型に比べ、前方への角変位が大きい状態、所謂「ももが上がった状態」で変位していたと考えられる。

宮下ほか (1986) は、日本人選手よりもストライドの大きい外国選手は、大腿がより高く上がっていることを報告している。また、志賀ほか (2009) は、選手の疾走動作を縦断的に測定し、ストライドの増大とともに、滞空期の脚動作がより前方で行われるようになったことを報告している。本研究の結果は、これらと一致するものであった。よって、遊脚大腿部の接地時における角度および支持期における角変位が、ピッチおよびストライドに影響していると考えられる。接地時における下肢の角度とピッチおよびストライドとの関係については、末松ほか (2008) が小学生を対象に分析し、接地時に遊脚の大腿部が前方にあるほどピッチが高くなり、逆に後方にある場合はストライドが大きくなることを示唆している。これは本研究とは逆の結果であるが、その理由としては、小学生と成人とでは疾走速度に関係する動作要因が異なっており (加藤ほか, 2001)、よってピッチやストライドと疾走動作との関係も異なるという可能性が挙げられる。

以上のことから、ストライド型とピッチ型とを比較した時の大きな特徴として、大腿部が同程度の角速度でありながらもストライド型の方がより前方で回転しており、それには体幹部をより直立に近い状態に保つことが貢献しているとまとめられる。

第3項 ピッチおよびストライドと疾走動作との関係

上述したように、ストライド型はピッチ型に比べ、支持期の鉛直地面反力が大きく、鉛直力積が大きい (Fig. 2-5 右) ことから滞空時間 (Fig. 2-3) および滞空距離 (Fig. 2-4) が長かった。ストライド型およびピッチ型は同一被験者の試技であり、筋力等の身体資源はほぼ同一であるとみなせる。よって、地面反力や力積の大きさは、下肢キネマティクスの相違から生じたものであると考えられる。下肢キネマティクスの主な相違点は、ストライド型の

腿部がより前方で回転している (Fig. 2-6 上) ことであった。また、体幹部はより直立に近かった (Fig. 2-11)。以下より、これらキネマティクスの相違点と地面反力との関係から、ピッチおよびストライドがどのように変化していたのかを考察する。

奥山ほか (2003) は、走高跳の踏切動作を分析し、踏切脚接地前の早い段階から振り上げ脚の振り上げを開始した場合、接地時に振り上げ脚の股関節に鉛直上向きの股関節間力が働き、その反作用として踏切脚の股関節が鉛直下向きに押されることで、鉛直地面反力が大きくなることを示唆している。そこで、本研究の支持期における遊脚大腿部に作用する鉛直股関節間力を、逆動力学的手法によって算出し、他の変数と同様に、時間を 0-40% として規格化した (Fig. 2-12)。その際、各セグメントの質量中心位置や質量は、日本人のアスリートの身体部分慣性係数 (阿江ほか, 1992) を用いて算出した。その結果、0-10%、つまり、支持期の序盤においてストライド型が有意に高値を示した。また、最大値もストライド型が有意に大きく (ストライド型: $263.9 \pm 29.0\text{N}$, ピッチ型: $200.9 \pm 45.8\text{N}$, $p < 0.01$)、その出現もストライド型が有意に早期であった (ストライド型: $5 \pm 2.5\%$, ピッチ型: $8.3 \pm 2.4\%$, $p < 0.05$)。このことから、支持期序盤においては、ストライド型はピッチ型と比較して、遊脚大腿部に働く鉛直股関節間力が大きく、その反作用として鉛直下向きの大きな力が骨盤を介して支持脚に働き、鉛直地面反力が大きくなったと考えられる。支持期序盤における鉛直地面反力は、身体重心の鉛直下向きの運動量を低下させることに作用していると考えられる。よって、鉛直上向きの身体重心速度に直接貢献する支持期後半の鉛直地面反力は、支持脚や上肢など、遊脚以外の要因によって差が生じていた可能性がある。しかし、支持期序盤における鉛直地面反力が小さくなると、身体重心の下降を止めるまでに長い時間を要することになる。この場合、一定の支持時間においては、身体重心を鉛直上向きに加速させるための力積を獲得することができる時間が短くなり、結果的に滞空時間が短縮される。よって、0-10%における鉛直股関節間力 (Fig. 2-12) は、間接的に離地時におけるピッチ型とストライド型との身体重心の鉛直速度の差に影響し、結果的に滞空時間の差に関係していたと考えられる。ピッチ型とストライド型との鉛直股関節間力の差は、奥山ほか (2003) が走高跳について述べているのと同様に、遊脚の角度に影響を受けている可能性がある。以下、この可能性について検討する。

鉛直股関節間力が高いことは、遊脚の質量中心における鉛直加速度が高いことを意味する。短距離走における遊脚の質量中心の動きは、大転子の周りを回転する運動であるが、その半径は膝関節の屈曲等によって時々刻々と変化する。この時、大転子に対する遊脚質量中

心の鉛直加速度(A_z)は、以下の(1)式によって算出される。

$$A_z = \omega^2 r \cos \theta + \alpha r \sin \theta + 2\omega \dot{r} \sin \theta - \ddot{r} \cos \theta \quad (1)$$

ただし、 ω は大転子から遊脚質量中心を結ぶベクトル（以下、「脚セグメント」）の角速度、 r は脚セグメントの長さ、 θ は脚セグメントと鉛直線との成す角度（大転子の真下より前方にスイングされている場合を正の値とする）、 α は脚セグメントの角加速度を示し（Fig. 2-13）、 \dot{r} および \ddot{r} はそれぞれ、 r の1階微分および2階微分、つまり、回転半径が伸長する速度および加速度を表している。この式から、大転子に対する遊脚の鉛直加速度は様々な要因によって変化することが明らかであり、その1つとして、脚セグメントの角度が挙げられる。脚セグメントの角度と大転子に対する遊脚の鉛直加速度との関係をさらに詳細に検討するため、(1)式について、右辺の θ 以外の値を一定とし（規格化時刻0%における全試技の平均値を代入）、 θ を-90度から90度まで変化させながら A_z を算出した。その結果（Fig. 2-14）、 θ が55度までの範囲では、 θ が増加するに従って A_z は増加した。また、本研究における規格化時刻0%における θ を算出したところ、ピッチ型は -0.9 ± 5.7 度、ストライド型は 9.6 ± 8.2 度であり、ストライド型が有意に高値を示した（ $p < 0.05$ ）。これは、遊脚大腿部の角度の差（Fig. 2-6 右上）に影響されたものと考えられる。以上のことから、ストライド型は支持脚接地時における遊脚大腿部角度が大きい影響で脚セグメントの角度も大きかったことが、遊脚の鉛直股関節間力を大きくすることに貢献し、骨盤を介して鉛直地面反力がピッチ型より大きくなっていたと考えられる。

短距離走における支持期の鉛直地面反力は、遊脚以外によっても変化し、特に、支持脚の動作による影響（Hunter et al., 2005）は強いと考えられる。しかし、中田ほか（2003）は、短距離において、遊脚は支持脚に比べて動作の修正が容易であると報告している。よって、動作を能動的に制御するのが容易ではない全力疾走において、遊脚の動作の反作用によって支持脚が受動的に力を発揮し、地面反力を増大させることは、ストライドを獲得するために非常に有効であると考えられる。一方、ピッチの獲得は、上記のストライドを獲得するための手段とは逆の動作によって達成されると考えられる。つまり、接地前から支持期において、遊脚大腿部の前方への角変位を抑制することによって、支持期において獲得される鉛直力積が小さくなり、滞空時間が減少してピッチが獲得されると考えられる。また、このことは体幹部をより前傾させることによって容易になると推察される。上述した遊脚大腿部の

角度を変化させることによって、鉛直地面反力が実際にどの程度変化するかを短距離走において定量化することは、今後の課題である。

以上のことから、ピッチとストライドとの間のトレードオフは、身体資源が同じ場合であっても滞空時間の増減によって発生し、それらは鉛直力積の増減に起因するものであり、その鉛直力積には、支持脚接地時における遊脚大腿部の角度とその角変位が大きな影響を及ぼしていると考えられるであろう。

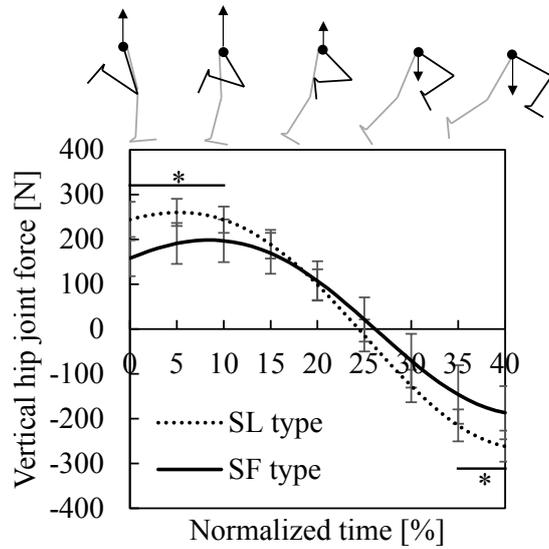


Fig. 2-12 The time series of the vertical hip joint force working at thigh of the swing leg during the stance phase. *: $p < 0.05$.

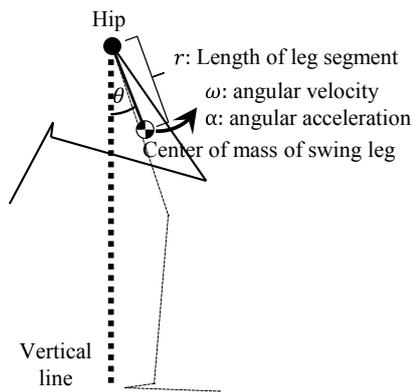


Fig. 2-13 Typical stick figure of lower limbs at touchdown, and parameters related to the vertical acceleration of the center of mass of swing leg.

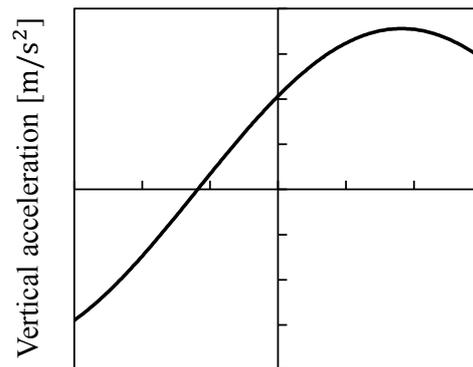


Fig. 2-14 Simulation of relationship between angle and vertical acceleration based on the equation (1).

第5節 本章のまとめ

本研究では、同一被験者におけるピッチ型とストライド型とのバイオメカニクスの要因を比較した。その結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 疾走速度および支持時間は同程度であり、滞空時間および滞空距離は、ストライド型が有意に長かった。
- (2) 地面反力ピーク値および力積は、水平成分には有意な差がみられず、鉛直成分はストライド型が有意に高値であった。
- (3) 大腿角度は支持脚の離地前後を除いて、ストライド型の方がより大きな値であった。下腿角度には、顕著な違いはみられなかった。
- (4) 股関節角度は、遊脚においてストライド型の方がより屈曲位であり、膝関節角度は、支持脚および遊脚ともに、支持期においてストライド型がより屈曲位であった。足関節角度には、顕著な違いはみられなかった。
- (5) 体幹部は、ピッチ型がストライド型よりも前傾していた。
- (6) セグメント角速度、および関節角速度には、ピッチやストライドに影響を及ぼすような顕著な違いはみられなかった。

以上のことから、短距離走の最大速度局面におけるピッチとストライドのトレードオフの発生機序は、接地時における遊脚大腿部の角度が、その接地から始まる支持期の鉛直力積に影響することによって滞空時間が変化し、その結果としてピッチとストライドが増減することであるとまとめられる。

第3章 短距離走の最大速度局面におけるピッチが高い選手およびストライドが大きい選手の運動学的特徴（研究課題2）

第1節 本章の目的

第2章において、同一個人内におけるピッチとストライドとのトレードオフの発生機序を検討した。その結果、支持期における遊脚大腿部の角度が、鉛直地面反力を介して滞空時間の長さに影響し、トレードオフを発生させる要因となっていることが明らかとなった。つまり、遊脚大腿部の角度を変化させることだけでは、ピッチおよびストライドのうち、一方を高めることは可能であっても、同時に他方の低下も招き、疾走速度を向上させることはできない。

疾走速度を高めるには、一方を高めながらも他方を維持するという、トレードオフの克服が必要となる。そして、ピッチを高めながらストライドを維持するか、ストライドを増大させながらピッチを維持するかでは、関係する動作要因は異なると考えられる。これまで、疾走速度向上に関する要因を明らかにするため、疾走速度の異なる選手の疾走動作を比較した研究は数多く行われてきた。しかし、それらの報告では、ピッチが異なる選手やストライドが異なる選手が混在しており、ピッチおよびストライドのそれぞれと疾走動作との関係は明らかにされておらず、ピッチを高めたい場合およびストライドを高めたい場合の、それぞれに必要な運動学的課題は不明である。

第2章においては、遊脚大腿部に働く鉛直股関節間力の大きさが、地面反力の鉛直成分の大きさに影響し、その結果としてピッチおよびストライドが変化することを示した。よって、ピッチが類似している場合およびストライドが類似している場合についても、支持脚に加え、遊脚の影響を詳細に分析する必要があると考えられる。

以上のことから、本章の目的は、短距離走の最大速度局面において、ストライドが類似した選手間でピッチが高い選手、および、ピッチが類似した選手間でストライドが大きい選手、それぞれの運動学的特徴を明らかにすることとした。

第2節 方法

第1項 対象

対象は、競技会における100m走に出場した男性選手54名とした。そのレースの平均記録および標準偏差は 11.71 ± 0.48 sであり、記録の幅は10.80-12.76sであった。対象選手の年齢、身長および体重は不明であった。Otsuka et al. (2016) は、短距離選手は、トレーニング中よりもレース中に、より高い疾走速度を発揮することを報告している。さらに、競技会においては、幅広い競技レベルの選手のデータを収集することが可能である。よって、競技会のレース中のパフォーマンスを分析対象とした。なお、データの収集は、研究目的、研究方法およびデータの処理について、対象競技会の主催者に対し、書面にて説明し、許可を得た上で実施した。

第2項 データ収集

ハイスピードカメラ (EX-F1: CASIO 社) を、60m地点の右側方に、光軸が走路と垂直になるように設置し、固定撮影を行った。その際、全レーンの55.5-64.0mが撮影できるように画角を設定した。サンプリング周波数は300fpsであった。レースの撮影に先立ち、各レーンの55.5、60.0および64.0m地点のレーン中央に、長さ2mのまっすぐな棒を鉛直に立て、キャリブレーション用の画像を撮影した。

第3項 データ処理

分析範囲は、撮影範囲内の右足接地からの1サイクルとした。撮影した映像をコンピュータに取り込み、Frame DIAS V (DKH 社) を用いて、右の大転子、膝関節、外踝、踵、および足先の位置をデジタル化した。各レーンにおいて、疾走方向をX軸、鉛直方向をY軸とし、2次元DLT法を用いて実座標値を得た。各レーン（1レーンから8レーン）のキャリブレーション誤差は、X軸方向が0.006、0.008、0.004、0.009、0.000、0.001、0.004および0.005mであり、Y軸方向が0.007、0.005、0.006、0.008、0.009、0.009、0.009および0.006mであった。座標値は、バターワース型ローパスデジタルフィルタを用い、遮断周波数7Hzで平滑化した。

各選手の接地瞬間および離地瞬間のフレームは、映像から目視で判定した。得られた座標値から、疾走速度、ピッチ、ストライド、支持時間、滞空時間、支持距離および滞空距離を算出した。これらの変数は1ステップごとに算出し、連続する2ステップの平均値を、各

選手の代表値として分析に用いた。なお、本研究では、ストライドは足先の座標を用いて、支持距離および滞空距離は大転子の座標を用いて算出した。この支持距離と滞空距離との和は、ストライドと高い正の相関があったことから ($r = 0.983$, $p < 0.001$, 平均絶対誤差: 0.02m)、本研究でも、支持距離および滞空距離はストライドを構成する要素とみなした。さらに、右下肢のキネマティクス変数として、大腿部、下腿部、膝関節および足関節の角度および角速度を、右足接地時、右足離地時、および左足離地時において算出した。大腿部の角度は、大腿部と大転子を通る鉛直線との成す角であり、膝関節が大転子より前方にある場合を正の値、後方にある場合を負の値とした。下腿部の角度も同様に、下腿部と鉛直線が成す角と定義した (Fig. 3-1)。関節角速度は、伸展 (底屈) を正の値、屈曲 (背屈) を負の値とした。

第2章においては、遊脚大腿部に働く鉛直股関節間力の大きさが、鉛直地面反力の大きさを介してピッチおよびストライドに影響していた。よって、ピッチおよびストライドのうち、一方が類似している場合を分析する本章においても、遊脚についての詳細な検討が必要であると考えた。そこで、左足接地時において、右大転子に対する右脚質量中心の相対加速度 (以下、「右脚相対加速度」と略す) を算出した。その際、質量中心位置の算出には、日本人アスリートの身体部分慣性係数 (阿江ほか, 1992) を用いた。本章では、対象選手の体重が不明であったため、第2章と同様の鉛直股関節間力を算出することができなかったが、右脚相対加速度は、遊脚に働く質量あたりの力の鉛直成分の指標と考えることが出来る。

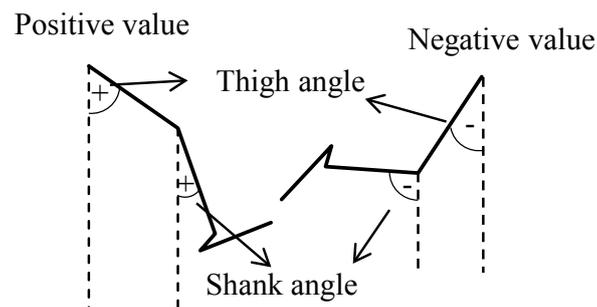


Fig. 3-1 Definitions of thigh and shank angles.

第4項 グループ化およびその妥当性

Fig. 3-2 は、ピッチおよびストライドに基づくグループ化を示している。ストライドが、選手全体の平均値 $\pm 0.5SD$ 以内に含まれる選手を、ストライドが類似している選手として抽出し、SL 類似群 (= SL similar group) とした。SL 類似群におけるストライドの範囲は、

2.07-2.15m であった。同様に、ピッチが全体の平均値±0.5SD 以内に含まれる選手を SF 類似群 (= SF similar group) とした。SF 類似群におけるピッチの範囲は、4.51-4.72Hz であった。両群ともに、選手数は 22 名であった。このグループ化の妥当性を検証するため、各群において、疾走速度、ピッチ、ストライドの間の相関係数を算出した (Table 3-1)。SL 類似群においては、ピッチおよびストライドのうち、ピッチのみが疾走速度に強く依存しており、SF 類似群においては、ストライドのみが疾走速度に強く依存していた。疾走速度はピッチとストライドとの積であるため、ピッチおよびストライドのうち、一方のみが疾走速度に非常に強く関係していることは、他方が選手間で類似していることを意味する。また、両群ともに、ピッチとストライドとの間には有意な相関はみられなかった。これらのことから、SL 類似群内ではストライドが、SF 類似群内ではピッチが選手間で類似しており、このグループ化が、トレードオフ関係を引き起こさない高いピッチおよび大きいストライドに 関係する要因を明らかにする上で、妥当であったと考えられる。

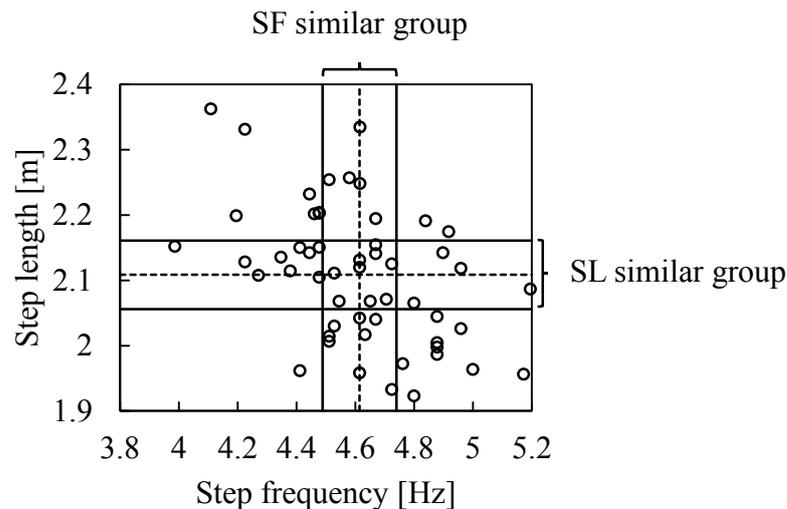


Fig. 3-2 Relationship between step frequency and step length in all participants, and the grouping for the analysis. The dotted lines and solid lines show mean and $\pm 0.5SD$, respectively.

Table 3-1. Correlation coefficients of between sprint speed, step frequency and step length

	SL similar group	SF similar group
Sprint speed – Step frequency	0.970***	0.231 (N. S.)
Sprint speed – Step length	-0.120 (N. S.)	0.957***
Step frequency – Step length	-0.356 (N. S.)	-0.061 (N. S.)

***: $p < 0.001$, N. S.: non-significant

第5項 統計処理

ピアソンの積率相関係数を用いて、SL 類似群においてはピッチと、SF 類似群においてはストライドと他の運動学的要因との関係を検討した。ただし、ピッチおよびストライドは、選手の身長に影響されると考えられる (Paruzel-Dyja et al., 2006)。そこで、大腿長と下腿長との和として算出した脚長が、各群において、ピッチまたはストライドと有意な相関関係にあった場合は、脚長を制御する偏相関分析を用いた。有意水準は5%未満とした。

第3節 結果

第1項 支持・滞空時間および支持・滞空距離

Fig. 3-3 には、支持時間、滞空時間、支持距離および滞空距離について、SL 類似群のピッチ (左列), SF 類似群のストライド (右列) との関係を示した。SL 類似群におけるピッチは、支持時間 (左上: $r=-0.899, p<0.001$), 滞空時間 (左上: $r=-0.669, p<0.01$), および支持距離 (左下: $r=-0.693, p<0.001$) との間に有意な負の相関が認められた。滞空距離との相関は有意ではなかった (左下: $r=0.358, p=0.102$)。SF 類似群におけるストライドは、支持時間 (右上: $r=-0.406, p=0.061$) および支持距離 (右下: $r=0.323, p=0.142$) とは有意な相関がみられず、滞空時間 (右上: $r=0.465, p<0.05$) および滞空距離 (右下: $r=0.847, p<0.001$) との間には、有意な正の相関が認められた。

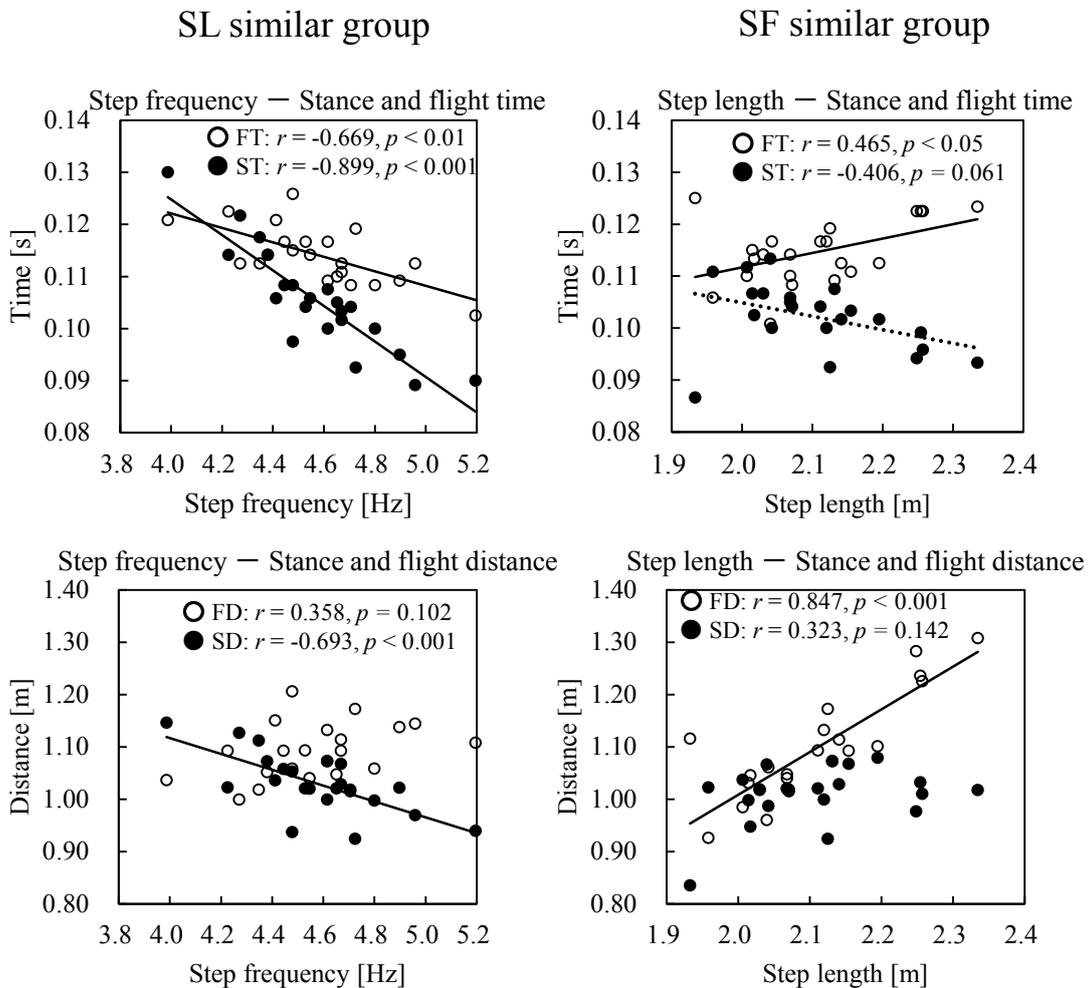


Fig. 3-3 Relationships between step frequency or step length and stance time, flight time, stance hip distance and flight hip distance. ST: Stance time, FT: Flight time, SD: Stance distance, FD: Flight distance. Solid line: $p < 0.05$, Dotted line: $p < 0.10$.

第2項 脚キネマティクス

脚長は、SL類似群のピッチとの間に有意な相関はみられなかったが($r=-0.099, p=0.661$), SF類似群のストライドとの間には、有意な正の相関が認められた($r=0.682, p<0.001$). よって、SF類似群においては、脚長を制御する偏相関分析を用いた.

Table 3-2 には、右足接地時、右足離地時および左足離地時における、下肢のキネマティクス変数について、各平均値および標準偏差と、SL類似群におけるピッチとの相関係数、SF類似群におけるストライドとの偏相関係数を示した. SL類似群のピッチは、右足接地時 (At right touchdown) の大腿部および下腿部それぞれの角速度との間に負の相関が認められた ($r=-0.626, p<0.01$; $r=-0.701, p<0.001$). また、右足離地時 (At right take-off) の大腿部の角度との間には正の相関 ($r=0.623, p<0.01$), 膝関節角度との間には負の相関が認められた ($r=-0.638, p<0.01$). さらに、左足接地時 (At left touchdown) における大腿部の角度 ($r=0.576, p<0.01$) および角速度 ($r=0.524, p<0.05$), 下腿部の角度との間には正の相関が認められた ($r=0.461, p<0.05$).

SF類似群のストライドは、右足接地時 (At right touchdown) における下腿部および膝関節角速度との間に有意な負の偏相関が認められた ($r=-0.603, p<0.01$; $r=-0.517, p<0.05$). また、右足離地時 (At right take-off) の下腿部の角度 ($r=-0.452, p<0.05$), 下腿部の角速度 ($r=-0.463, p<0.05$), および足関節の角速度 ($r=-0.467, p<0.05$) との間に有意な負の偏相関が認められた. さらに、左足接地時 (At left touchdown) における膝関節角度とは有意な負の偏相関が認められた ($r=-0.500, p<0.05$).

Table 3-3 には、左足接地時における右脚相対加速度と、SL類似群におけるピッチとの相関係数、SF類似群におけるストライドとの偏相関係数を示した. SL類似群におけるピッチとは、右脚相対加速度の水平および鉛直成分ともに有意な相関はみられなかった. 一方、SF類似群におけるストライドは、鉛直成分との間に有意な正の偏相関が認められた ($r=0.438, p<0.05$).

Table 3-2. Mean and standard deviation values of each kinematic variables of right leg, and the correlation coefficients between the SL-similar group and between the SF-similar group.

	Step frequency [Hz] in the SL similar group			Step length [m] in the SF similar group (Partial correlation analysis)		
	At right touchdown	At right take-off	At left touchdown	At right touchdown	At right take-off	At left touchdown
Thigh angle	34(4) -0.338	-30(5) 0.623**	-1(7) 0.576**	33(4) -0.031	-28(4) 0.125	2(8) 0.087
Shank angle	4(4) -0.415	-56(2) -0.352	-134(8) 0.461*	2(5) 0.082	-56(2) -0.452*	-130(7) -0.405
Knee angle	150(6) -0.055	153(6) -0.638**	48(5) -0.126	149(6) 0.082	151(5) -0.290	48(8) -0.500**
Ankle angle	94(6) 0.024	118(3) 0.130	120(7) 0.099	92(6) -0.042	116(5) -0.133	119(7) -0.264
Thigh angular velocity	-462(60) -0.626**	-422(75) -0.087	703(102) 0.524*	-491(47) 0.040	-379(91) -0.222	690(91) 0.277
Shank angular velocity	-595(94) -0.701***	-475(69) -0.253	-138(150) 0.407	-597(87) -0.603**	-495(65) -0.463*	-41(214) 0.119
Knee angular velocity	-133(78) -0.356	-53(110) -0.101	-841(96) 0.081	-106(106) -0.517*	-116(107) -0.108	-731(181) 0.002
Ankle angular velocity	-275(116) -0.350	862(220) 0.280	-226(99) 0.330	-331(99) -0.242	872(204) -0.467*	-211(127) -0.026

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$. Mean (SD) and Pearson's correlation coefficients (partial correlation coefficients in the SF-similar group) are shown in the upper and lower rows, respectively. Units of angles and angular velocities are degree and degree/s, respectively. At right touchdown and right take-off, right leg is stance leg. At left touchdown, right leg is forward swing leg.

Table 3-3 Mean and standard deviation values of relative acceleration of the right leg at left touchdown, and the correlation coefficients between the SL-similar group and between the SF-similar group.

		Horizontal	Vertical
Step frequency [Hz] in the SL-similar group	mean (SD)	14.4 (7.3)	2.6 (12.2)
	<i>r</i>	-0.181	0.101
Step length [m] in the SF-similar group (Partial correlation analysis)	mean (SD)	10.9 (12.8)	4.4 (13.2)
	<i>r</i>	-0.043	0.438*

* $p < 0.05$. Mean (SD) and Pearson's correlation coefficients (partial correlation coefficients in the SF-similar group) are shown in the upper and lower rows, respectively. Unit of the acceleration is m/s^2 .

第4節 考察

第1項 SL類似群におけるピッチが高い選手の特徴

ピッチは支持時間および滞空時間で構成されるため、ピッチが高いことは、支持時間および滞空時間のうち、少なくとも一方が短いことを意味する。第2章では、疾走速度が一定の場合のピッチの違いは、支持時間ではなく滞空時間の違いによるものであることを示した。一方、本研究のSL類似群では、高いピッチは短い滞空時間に加えて、短い支持時間とも関係していた (Fig. 3-3 左上)。ピッチと支持時間との関係は、選手間の疾走速度の違いによって生じたと考えられる。高い速度で疾走することは、接地点が身体に対して相対的に高速で後方へ移動することを意味するため、短い支持時間が引き起こされる。実際に、先行研究では、最大速度局面における高い疾走速度と短い支持時間との関係が報告されている (福田・伊藤, 2004; Kunz and Kaufmann, 1981; 宮代, 2012; Morin et al., 2012)。SL類似群においては、ピッチが高いことは疾走速度が高いことを意味する。この高い速度が、SL類似群における高いピッチが、短い滞空時間だけでなく短い支持時間とも関係していた理由であろう。

SL類似群において高いピッチを持つ選手は、支持距離が短かった (Fig. 3-3 左下)。短い支持距離は、短いストライドを引き起こす要因に成り得るが、実際にはストライドは類似していた。そこで、ストライドを構成するもう1つの要因である滞空距離と支持距離との相関関係を分析したところ、有意な負の相関が認められた (Fig. 3-4)。つまり、SL類似群におけるピッチが高い選手の短い支持距離は、長い滞空距離によって補われていたと考えられる。SL類似群においてピッチが高い選手は、滞空時間が短いにもかかわらず滞空距離が短くならなかったのは、滞空期における進行方向への速度が高かったためであると考えられる。

ここまで示した、時間および距離に関する変数は、下肢の動作に影響されていると考えられる。先行研究において、短い支持時間は、離地時に大腿部の後方伸展が小さいことや (Mann and Hermann, 1985)、接地時に遊脚の大腿部がより前方まで回復されていること (Kunz and Kaufmann, 1981; 木越ほか, 2015) などと関係していると報告されている。Table 3-2 左側に示したSL類似群における相関分析の結果より、SL類似群におけるピッチが高い選手はピッチが低い選手と比較して、右大腿部が、右足離地時においては鉛直線に対する後方への角変位が小さく、左足接地時においては前方への角変位が大きいことを示していた。上述の先行研究の結果を踏まえると、これらの動作的特徴が短い支持時間に関係し

第3章 研究課題2

ていたと考えられる。第2章では、接地時に遊脚大腿部がより前方に位置していることは、股関節に対する遊脚の鉛直加速度を高める1つの要因となることを示唆した。しかし、本章におけるピッチが高い選手は、左足接地時において右大腿部の角度が大きかったが、右脚相対鉛直加速度が大きいという傾向はみられなかった (Table 3-3)。本章における鉛直地面反力の大きさは不明であるが、ピッチが高い選手の遊脚大腿部の回復が早いことは、第2章におけるストライド型とは異なり、鉛直地面反力を増大する作用を有していなかったことが推察される。また、ピッチが高い選手は支持時間が短いことで鉛直力積は大きくならず、結果として滞空時間が短くなったと考えられる。

ここまで示した大腿部の特徴に加え、SL類似群におけるピッチが高い選手は、ピッチが低い選手と比較して、右足接地時に右大腿部および下腿部の後方スイング角速度が高く、右足離地時においては、右膝関節角度が小さい傾向にあった (Table 3-2)。支持期の後半において、膝関節をあまり伸展させないことは、脚全体 (大転子から足関節を結ぶベクトル) の後方スイング角速度を効率良く高める動作であるとされている (伊藤ほか, 1998; Ito et al., 2008)。つまり、右足接地時および右足離地時のキネマティクスの結果から、最大速度局面においてストライドが類似している場合は、支持期における脚の高い後方スイング角速度が、高いピッチに関係していることが示唆された。この脚の高い後方スイング角速度は、短い支持時間を介して高いピッチに影響すると考えられる。

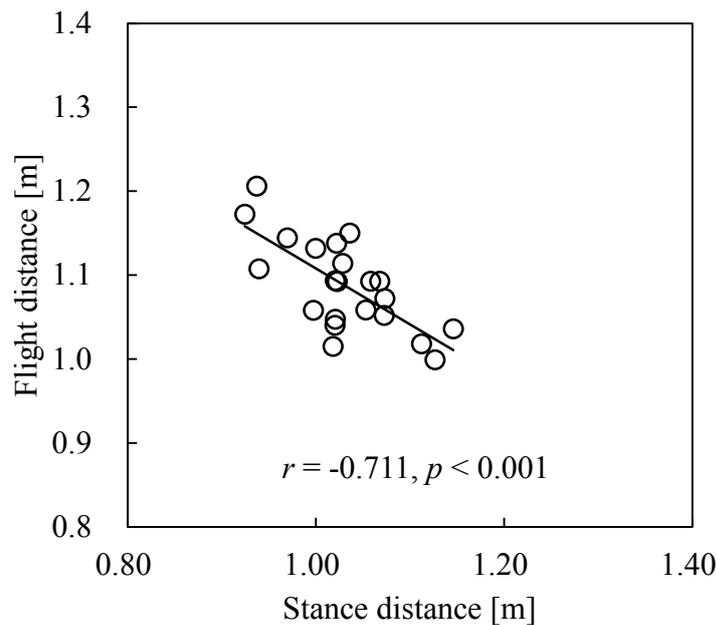


Fig. 3-4 The relationship between the stance distance and the flight distance in the SL similar group.

第2項 SF類似群におけるストライドが大きい選手の特徴

SF類似群においては、ストライドと支持距離との間に有意な相関はなく、ストライドの差は、滞空距離の差に強く依存していた (Fig. 3-3 右下)。Weyand et al. (2000) は、最大疾走速度は、ストライドの大きさと関係している一方で、支持期における重心の水平変位から推定した支持距離とは無関係であったことを報告しており、本研究の結果は、これを支持するものであった。Weyand et al. (2000) は、不自然に長い支持距離は、地面に力を加える上では不利な要因であると述べている。つまり、それは短い滞空距離を引き起こし、ストライドが増大されない要因になる可能性がある。このことは、ピッチが類似している場合のストライドが大きい選手が、長い支持距離を有しているわけではない理由であると考えられる。

Fig. 3-3 右上に示したように、SF類似群におけるストライドが大きい選手は、ストライドが小さい選手と比較して、滞空時間が長い傾向にあった。この関係は、最大速度局面において、同一個人内でのストライドが大きくピッチが低い疾走試行の特徴を示した第2章の結果と一致するものであった。これらのことから、ピッチが他の選手と同程度であるか低いかに関わらず、最大速度局面における大きいストライドは、長い滞空時間と関係していることが示唆された。この長い滞空時間は、長い滞空距離を生み出す要因であったと考えられる。

SF 類似群において、ストライドと支持時間との関係は有意ではなかったが、大きいストライドが短い支持時間に関係する傾向にあった (Fig. 3-3 右上, $r=-0.406$, $p=0.061$). そこで、ピッチを構成するもう1つの要素である滞空時間と支持時間との相関関係を分析したところ、有意な負の相関が認められた (Fig. 3-5). つまり、SF 類似群においては、ストライドが異なる選手間における滞空時間の差と支持時間の差とが相殺された結果、ピッチが類似したと考えられる。

短い支持時間と長い滞空時間の両方を達成するためには、大きな鉛直地面反力を働かせることによって、短い支持時間でも大きな鉛直力積を獲得する必要がある。この能力に関係すると考えられる要因の1つとして、支持期における脚の短縮量あたりの鉛直地面反力の大きさである、脚スティフネスが高いことが考えられる。Morin et al. (2005) は、走運動における高い脚スティフネスは短い支持時間に関係していることを示しており、Kuitunen et al. (2002) は、短距離走の最大速度時における高い足関節スティフネスは、短い支持時間に関係していることを報告している。伊藤ほか (1998) や伊藤・石川 (2000) は、支持期においてできるだけ足関節の角変位を小さくすることは、短い支持時間で効果的に地面に力を伝えることに貢献すると述べている。これらの報告を踏まえると、支持期における高い足関節スティフネスによって足関節を固定し、脚スティフネスを高めることは、短い支持時間で大きな鉛直力積を獲得することに貢献する可能性がある。Table 3-2 右側に示した SF 類似群における偏相関分析の結果より、SF 類似群においてストライドが大きい選手は、ストライドが小さい選手と比較して、右足離地時に右足関節の底屈角速度が低かった。本研究においては、支持期前半の足関節スティフネスを定量化することはできないが、接地直後の高い足関節スティフネスによって着地衝撃による背屈が抑制された結果として、支持期後半における底屈角速度が高まらなかったことが推察される。

大きな鉛直地面反力は、支持脚だけでなく、前方にスイングされる遊脚にも影響され得る。SF 類似群においてストライドが大きい選手は、ストライドが小さい選手と比較して、左足接地時における右脚相対加速度の鉛直成分が高い傾向にあった (Table 3-3). 木越ほか (2015) は、重心に対する遊脚の相対水平加速度が地面反力に影響することを示唆している。本章の結果は、この報告を鉛直成分の観点から支持するものであった。第2章でも示したように、SF 類似群におけるストライドが大きい選手の右脚相対加速度の鉛直成分が高いことは、右脚に大きな鉛直方向への力が作用していることを意味しており、その反作用として鉛直下向きの大きい力が骨盤を介して支持脚である左脚に働いた結果、鉛直地面反力が大きくな

ったと推察される。第2章では、接地時に遊脚大腿部がより前方に位置していることが、遊脚に大きな鉛直股関節間力を生じさせ、鉛直地面反力の増大に貢献することを示唆した。しかし、本章のSF類似群においては、ストライドの大きさと左足接地時の右大腿部の角度とは有意な相関はみられなかった (Table 3-2)。そこで、遊脚大腿部の角度の影響をより詳細に分析するため、左足接地時において、右足大腿部の角度と右脚相対鉛直加速度との関係について、脚長を制御した偏相関分析を行った。その結果、この2変数間には有意な正の偏相関が認められた (Fig. 3-6)。つまり、遊脚大腿部の角度がより前方に位置していることは、遊脚の相対鉛直加速度を介してストライドの大きさに影響し得るものである。しかし、ピッチが類似している場合は、その遊脚大腿部の角度のみがストライドの決定的な要因ではなく、上述した足関節のキネマティクスなども影響するため、SF類似群におけるストライドは、左足接地時における右大腿部の角度との有意な相関が検出されなかったと考えられる。

短距離走における下肢動作の中には、高いピッチと大きいストライドとの両方に関係する要因も存在していると考えられる。SF類似群においてストライドが大きい選手は、ストライドが小さい選手と比較して、右足接地時における右下腿部の後方スイング角速度が高かった (Table 3-2 右側)。これは、SL類似群におけるピッチが高い選手の特徴 (Table 3-2 左側) と共通したものである。ピッチが高い選手とストライドが大きい選手の他の共通した特徴は、短い支持時間であった。よって、接地時における脚の高い後方スイング角速度は短い支持時間に関係し、高い速度で疾走する上では必須の条件であると考えられる。

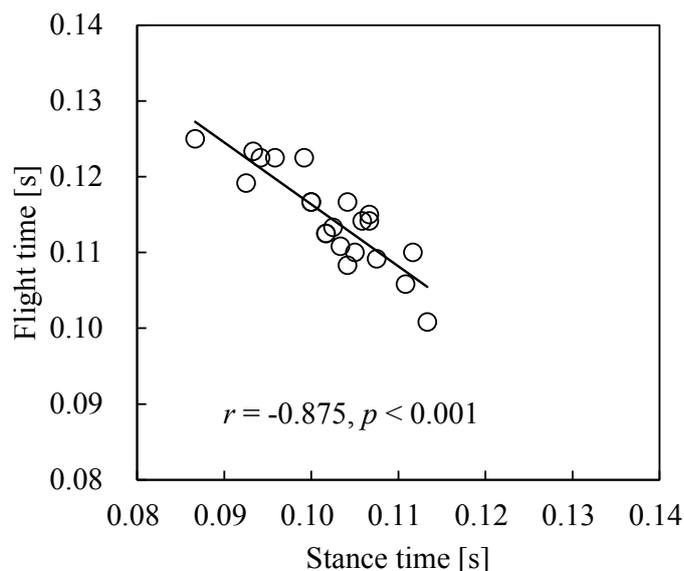


Fig. 3-5 The relationship between the stance time and the flight time in the SF similar group.

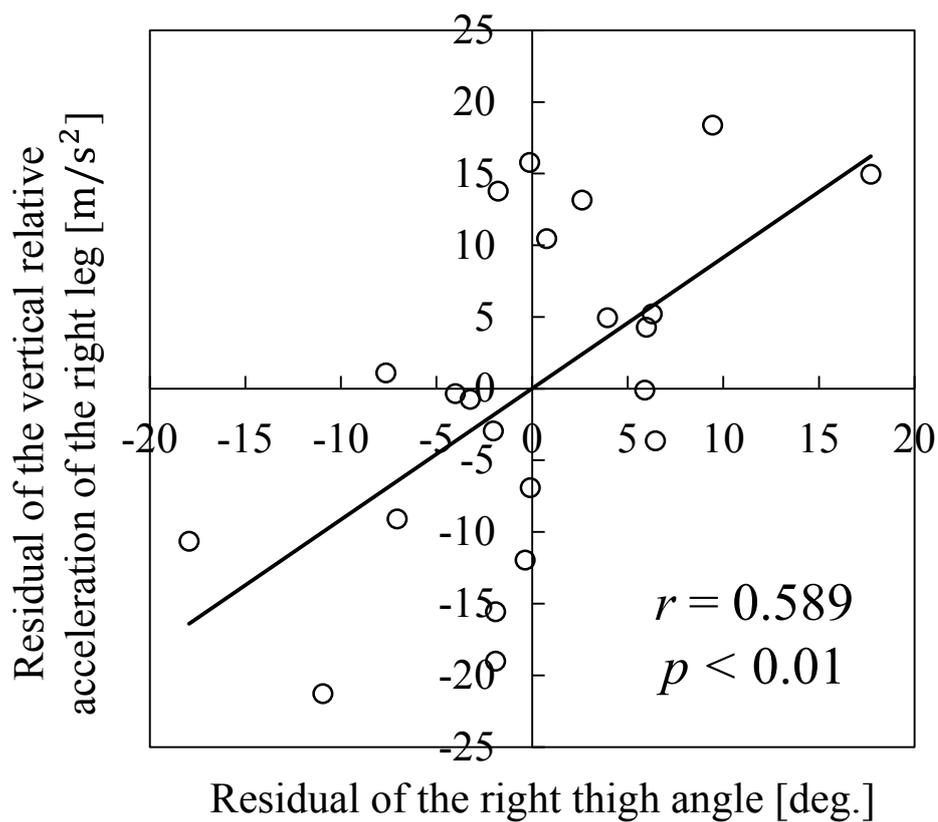


Fig. 3-6 The relationship between the right thigh angle and the vertical acceleration of the right leg relative to the right hip at left touchdown in the SF similar group.

第5節 本章のまとめ

本研究の目的は、100m 走の最大速度局面において、ストライドが類似した選手間のピッチの高さ、および、ピッチが類似した選手間のストライドの大きさ、それぞれに関する運動学的要因を明らかにすることであった。

ストライドが類似した選手間での高いピッチは、短い支持時間および滞空時間、短い支持距離と関係していた。類似したストライドは、短い支持距離が長い滞空距離によって補われた結果であった。さらに、支持期における脚の後方スイング角速度が高いこと、および、支持期に大腿部を後方に伸展しすぎないことが、短い支持時間での疾走を可能にしたと考えられる。

ピッチが類似した選手間での大きいストライドは、長い滞空距離によるものであり、それは、長い滞空時間によって生まれていた。長い滞空時間は、短い支持時間と相殺することによって、ピッチが類似した。短い支持時間で大きい滞空時間を獲得するには、大きな鉛直地面反力が必要であり、それには、支持期に足関節をできるだけ固定することや、接地時に遊脚の相対鉛直加速度が高いことが貢献すると考えられる。

第4章 短距離走の最大速度局面における遊脚キネティクスとピッチおよびストライドとの関係 (研究課題3)

第1節 本章の目的

第3章では、短距離走の最大速度局面において、ストライドが類似した選手間でピッチが高い選手、ピッチが類似した選手間でストライドが大きい選手の運動学的特徴を明らかにした。しかし、疾走動作は、様々な関節まわりの力発揮の複合的な結果として生じるものである。よって、関節角度や角速度の分析のみでは、それらがどの身体部位の力発揮によるものであるかを明らかにすることはできない。よって、実践場面により有用な知見を与えるためには、関節トルクやパワー等のキネティクスの分析によって、疾走動作を生み出す力学的要因を明らかにする必要がある。これまで、疾走速度が異なる選手の下肢キネティクスを比較した研究は存在しているが (Vardaxis and Hoshizaki, 1989; 渡邊ほか, 2003a; Bezodis et al., 2008; 矢田ほか, 2012), ピッチおよびストライドそれぞれの向上に関するキネティクスの要因は、明らかにされていない。

疾走速度は地面反力によって変化し、身体が地面反力を受けるのは支持期のみであることから、支持期の下肢キネティクスの分析は重要である。しかし、中田ほか (2003) は、支持脚より遊脚の方が、動作の改善が容易であることを示しており、遊脚のキネティクスは疾走速度との関係が強いことが報告されてきている (Vardaxis and Hoshizaki, 1989; 矢田ほか, 2012)。さらに、第2章において、支持期における遊脚の角度によって鉛直地面反力が変化し、結果としてピッチおよびストライドが変化することを示した。また、第3章においては、接地時の遊脚は、角度によって鉛直加速度が変化し、それらはストライドの大きさに影響することを示した。つまり、第2章および第3章において、遊脚の角度がピッチおよびストライドに影響することが明らかとなったことから、その遊脚の角度に影響する力学的要因を明らかにすることによって、高いピッチおよび大きいストライドで疾走するための、さらに有用な知見が得られると考えられる。

以上のことから本章では、短距離走の最大速度局面において、ピッチとストライドとの間の相互作用および身長の影響を除いた上で、遊脚キネティクスとピッチおよびストライドのそれぞれとの関係を明らかにすることを目的とした。

第2節 方法

第1項 被験者および実験試技

男子学生短距離選手16名(身長 $1.74 \pm 0.06\text{m}$, 体重 $66.1 \pm 5.2\text{kg}$, 競技会における100mの自己最高記録 $11.06 \pm 0.45\text{s}$)を対象とした。実験は, 中京大学大学院体育学研究科倫理委員会の承認を得た上で実施した。被験者には, 研究の目的や実験手順などを事前に説明し, 書面で実験参加の同意を得た。

被験者には, 十分なウォーミングアップを行わせた後, 全天候型走路における60mの全力疾走を2回行わせた。試技間には, 十分な休憩をとらせた。2回の試技のうち, 後述する疾走速度が高かった方の試技を, 分析試技とした。

第2項 データ収集および処理

2台のハイスピードカメラ(EX-F1, CASIO社製)を用いて, 試技中の42.5–50m区間を固定撮影した(300fps)。1台はスタート後方に, 光軸が疾走方向と平行になるように設置し, 他の1台は, 46.5m地点の右側方に, 光軸が疾走方向と垂直になるように設置した。分析の際, 2台のカメラの映像は, 被験者の足部が地面に接触する瞬間を基準に, 時間的に同期した。試技の撮影に先立ち, 0.5mごとにマークが付けられた長さ2mのまっすぐな棒を, 走路の両側に2.5mごとに垂直に立てて撮影した。

撮影した映像をPCに取り込み, Frame DIAS V(DKH社製)を用いて, 右足接地からの1サイクルおよびその前後20コマにおける, 身体特徴点24点の位置をデジタイズし, 3次元DLT法によって実座標値を得た。得られた座標データは, 4次のバターワース型ローパスフィルタによって, 遮断周波数6Hzで平滑化された。座標データは矢状面に投影し, 2次元平面上で分析した。

第3項 算出項目

収集したデータから, 以下に示す項目を算出し, 分析した。なお, (1)–(3)に示す項目は, 1歩ごとに算出し, 連続する2歩の平均値を, 各被験者の代表値とした。

(1) ピッチ, ストライド, 疾走速度

(2) ピッチ指数, ストライド指数

身長の影響を排除して分析するため, ピッチ指数およびストライド指数(以下, それぞ

れを「SF index」「SL index」と略す) を, Alexander (1977) を参考に, 以下の式によって算出した.

$$\text{SF index} = \text{SF} \cdot \sqrt{h/g} \quad \text{SL index} = \text{SL}/h$$

ここで, SF はピッチ, h は各被験者の身長, g は重力加速度 (9.8m/s²), SL はストライドを意味している. SF index および SL index はそれぞれ, 伸長の影響を排除した上で, 高いピッチおよび大きいストライドを発揮する能力を表すものである.

(3) 支持時間, 滞空時間, 支持距離, 滞空距離

支持距離および滞空距離は, 身体重心の座標を用いて算出した.

(4) 遊脚期における股関節および膝関節のキネマティクスおよびキネティクス変数

遊脚期における股関節, 膝関節および足関節の, 角度, 角速度, 関節トルク, および関節トルクによるパワー (以下, 「トルクパワー」と略す) を算出した. 関節トルクは, 脚を足部, 下腿部および大腿部からなる剛体リンクにモデル化し, 逆動力学的手法を用いて算出した. なお, 関節角速度およびトルクは, 伸展を正の値, 屈曲を負の値とした. トルクパワーは, 関節トルクと関節角速度との内積とした. 関節トルクおよびトルクパワーは, 各被験者の体重で除した値を分析に用いた.

第4項 時間の規格化

遊脚期における下肢関節のキネマティクスおよびキネティクスデータは, 時間で規格化した. 規格化は, 右足の離地から左足の接地までを 0-100%, 左足の接地から離地までを 100-200%, 左足の離地から右足の接地までを 200-300%として行った (Fig. 4-1). なお, 0-100%, 100-200%, 200-300%の実時間の平均値±標準偏差はそれぞれ, 0.115±0.007s, 0.103±0.008s, 0.114±0.008s であった.

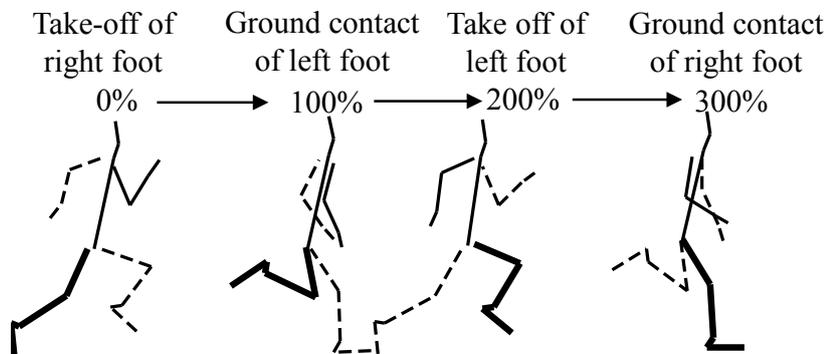


Fig. 4-1 The definition of the normalizing of the swing phase.

第5項 統計処理

本研究においては、SF index および SL index のそれぞれと、他の算出項目との間の偏相関係数を算出した。SF index について検討する際は SL index を、SL index について検討する際は SF index を制御変数とした。規格化した時系列データにおいては、5%ごとに偏相関係数を算出した。有意水準は $p < 0.05$ とした。

第3節 結果

第1項 支持・滞空時間，支持・滞空距離

Table 4-1 に，SF index および SL index と，支持時間，滞空時間，支持距離および滞空距離との偏相関係数を示した．SF index は，支持時間，滞空時間および支持距離との間に有意な負の相関が認められ，滞空距離との間には有意な相関は認められなかった．一方，SL index は，支持時間とは有意な負の相関，滞空時間および滞空距離とは有意な正の相関が認められた．支持距離との間には，有意な相関は認められなかった．

Table 4-1 Partial correlation coefficients among spatiotemporal parameters.

	Control variable	Stance time	Flight time	Stance distance	Flight distance
SF index	SL index	-.855***	-.689**	-.540*	.004 (N. S.)
SL index	SF index	-.742**	.694**	-.335 (N. S.)	.787***

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$, N. S.: Non-significant.

第2項 時系列変化における偏相関分析

Fig. 4-2 には，股関節の角度，角速度，関節トルクおよびトルクパワーの平均値の時系列変化および，有意な相関が認められた局面を示した．股関節角度 (Fig. 4-2 左上) は，SF index とは有意な相関がみられず，SL index とは 55–150%において有意な負の相関が認められた．股関節角速度 (Fig. 4-2 左下) は，SF index とは有意な相関はみられず，SL index とは，30–75%において有意な負の相関，135–150%においては有意な正の相関が認められた．股関節トルク (Fig. 4-2 右上) は，SF index とは 10–60%において有意な負の相関，250–280%においては有意な正の相関が認められた．SL index とは，20–30%において有意な負の相関，60–100%において有意な正の相関が認められた．股関節トルクパワー (Fig. 4-2 右下) は，SF index とは 45–70%において有意な正の相関が認められた．SL index とは，30–50%において有意な正の相関，85–100%および 255–260%において有意な負の相関が認められた．

Fig. 4-3 には，膝関節角度，角速度，関節トルクおよびパワーの平均値の時系列変化および，有意な相関が認められた局面を示した．膝関節角度 (Fig. 4-3 左上) は，SF index との有意な相関はみられず，SL index とは，10–110%において有意な負の相関が認められた．

膝関節角速度 (Fig. 4-3 左下) は, SF index とは, 55-65%において有意な負の相関が認められ, SLindex とは 90-155%において有意な正の相関, 260%においては有意な負の相関が認められた. 膝関節トルク (Fig. 4-3 右上) は, SF index とは有意な相関はみられず, SL index とは 80-85%において有意な正の相関が認められた. 膝関節トルクパワー (Fig. 4-3 右下) は, SF index とは有意な相関はみられず, SL index とは 115-140%において有意な正の相関が認められた.

Fig. 4-4 には, 足関節角度, 角速度, 関節トルクおよびパワーピッチの平均値の時系列変化および, 有意な相関が認められた局面を示した. 足関節角度 (Fig. 4-4 左上) は, SF index とは有意な相関は認められず, SL index とは, 170-250%において有意な正の相関が認められた. 足関節角速度 (Fig. 4-4 左下) は, SF index とは有意な相関が認められず, SL index とは, 55-85%において有意な正の相関が, 280-300%においては有意な負の相関が認められた. 足関節トルク (Fig. 4-4 右上) は, SF index とは, 45-90%において有意な負の相関が認められ, SL index とは, 0-10%において有意な負の相関が認められた. 足関節トルクパワー (Fig. 4-4 右下) は, SF index とは, 290-295%において有意な負の相関が認められ, SLindex とは, 0-5%, 60-80%, 155-160%, および, 275-285%において有意な負の相関が認められた.

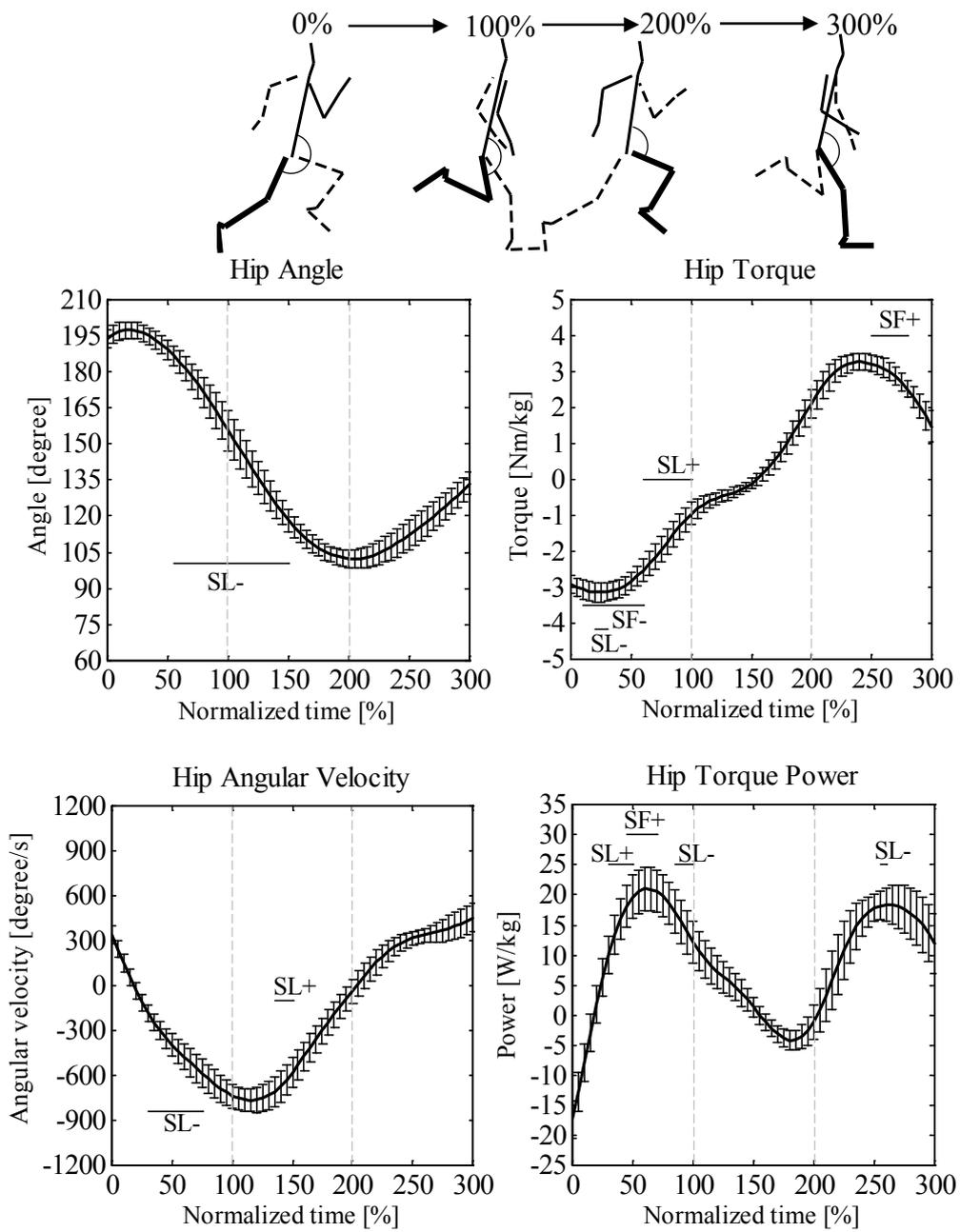


Fig. 4-2 The time series of mean value of the hip parameter.
 SF+: significant positive partial correlation with SF index.
 SF-: significant negative partial correlation with SF index.
 SL+: significant positive partial correlation with SL index.
 SL-: significant negative partial correlation with SL index.

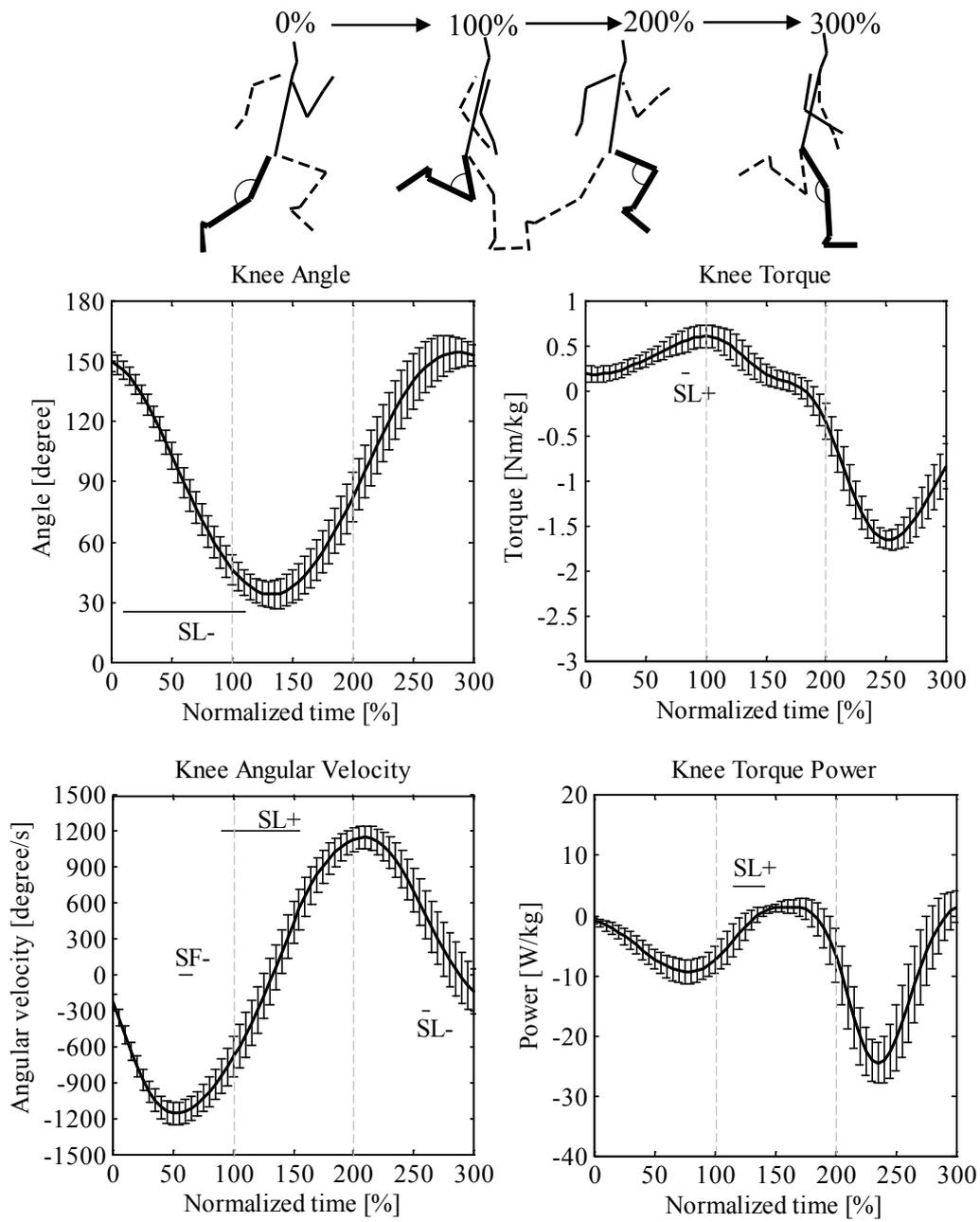


Fig. 4-3 The time series of mean value of the knee parameter.
 SF+: significant positive partial correlation with SF index.
 SF-: significant negative partial correlation with SF index.
 SL+: significant positive partial correlation with SL index.
 SL-: significant negative partial correlation with SL index.

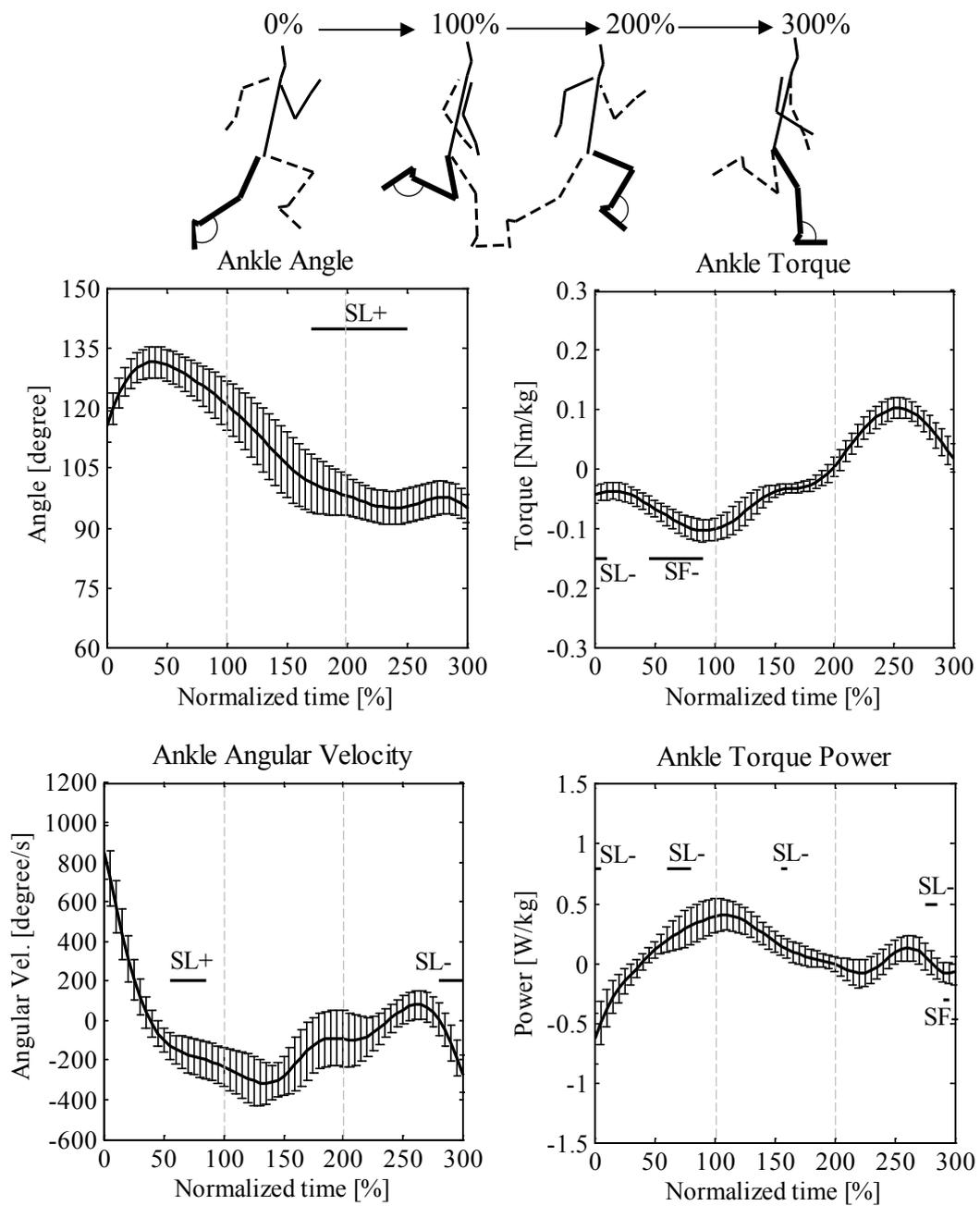


Fig. 4-4 The time series of mean value of the ankle parameter.
 SF+: significant positive partial correlation with SF index.
 SF-: significant negative partial correlation with SF index.
 SL+: significant positive partial correlation with SL index.
 SL-: significant negative partial correlation with SL index.

第3項 遊脚に関する変数のピーク値の偏相関分析

Table 4-2 には、Fig. 4-2 に示した股関節に関する変数の時系列変化において、明確に表れたピーク値（角度の最大値および最小値、角速度の最小値、トルクの最小値および最大値、トルクパワーの正の第1ピーク値と第2ピーク値）と、SF index および SL index との偏相関分析の結果を示した。また、Table 4-3 には、これらの股関節のピーク値が出現した規格化時刻と、SF index および SL index との偏相関分析の結果を示した。SF index は、股関節トルクの最小値との間に有意な負の相関、股関節トルクパワーの第1ピークとの間に有意な正の相関が認められたが、各ピーク値の出現時刻との間には、有意な相関はみられなかった。SL index は、各ピーク値との間には有意な相関はみられず、股関節角速度の最小値および股関節トルクパワーの第1ピークそれぞれの出現時刻との間に、有意な負の相関が認められた。

股関節と同様に、膝関節に関するピーク値（角度の最小値、角速度およびトルクの最小および最大値、トルクパワーの第1ピーク値と第2ピーク）の偏相関分析の結果を Table 4-4 に、それらの出現時刻の偏相関分析の結果を Table 4-5 に示した。SF index は、各ピーク値およびその出現時刻ともに、有意な相関はみられなかった。SL index は、各ピーク値との間には有意な相関はみられなかったが、膝関節角度の最小値の出現時刻との間には、有意な負の相関が認められた。

Table 4-6 には、足関節に関する変数の時系列変化におけるピーク値（角度、角速度、トルクそれぞれの正および負のピーク値、トルクパワーの最大値）と、SF index および SL index との偏相関分析の結果を示した。また、Table 4-7 には、これらのピーク値が出現した規格化時刻と、SF index および SL index との偏相関分析の結果を示した。SF index と各ピーク値との間には有意な相関は認められず (Table 4-6 左)、足関節角速度の正のピーク値の出現時刻との間には、有意な正の相関が認められた (Table 4-7 左)。SL index は、足関節角度の最小値との間に有意な正の相関が認められた。また、足関節トルクの正のピーク値の出現時刻との間には有意な負の相関が、足関節トルクパワーの正のピーク値の出現時刻との間には有意な正の相関が認められた。

Table 4-2 Partial correlation coefficient between peak value of the hip parameter and SF index, SL index.

		Partial correlation coefficient	
		SF index	SL index
Angle [degree]	Max (Extension peak)	-0.319 (N. S.)	-0.135 (N. S.)
	Min (Flexion peak)	0.045 (N. S.)	0.054 (N. S.)
Angular velocity [degree/s]	Min (Flexion peak)	-0.312 (N. S.)	0.229 (N. S.)
Torque [Nm/kg]	Min (Flexion peak)	-0.718 ($p < 0.01$)	-0.381 (N. S.)
	Max (Extension peak)	0.153 (N. S.)	-0.216 (N. S.)
Power [W/kg]	1st peak (positive)	0.531 ($p < 0.05$)	0.162 (N. S.)
	2nd peak (positive)	0.147 (N. S.)	-0.295 (N. S.)

N. S.: Non-significant.

Table 4-3 Partial correlation coefficient between peak appearance time of the hip parameter and SF index, SL index.

		Partial correlation coefficient	
		SF index	SL index
Angle [degree]	Extension (positive) peak	0.252 (N. S.)	-0.240 (N. S.)
	Flexion (negative) peak	0.220 (N. S.)	-0.342 (N. S.)
Angular velocity [degree/s]	Flexion (negative) peak	-0.081 (N. S.)	-0.519 ($p < 0.05$)
Torque [Nm/kg]	Flexion (negative) peak	-0.064 (N. S.)	0.181 (N. S.)
	Extension (positive) peak	0.241 (N. S.)	-0.390 (N. S.)
Power [W/kg]	1st peak (positive)	-0.124 (N. S.)	-0.759 ($p < 0.01$)
	2nd peak (positive)	0.231 (N. S.)	-0.113 (N. S.)

N. S.: Non-significant.

Table 4-4 Partial correlation coefficient between peak value of the knee parameter and SF index, SL index.

		Partial correlation coefficient	
		SF index	SL index
Angle [degree]	Flexion peak (negative)	0.061 (N. S.)	-0.108 (N. S.)
Angular velocity [degree/s]	Flexion (negative) peak	-0.459 (N. S.)	-0.078 (N. S.)
	Extension (positive) peak	0.141 (N. S.)	0.301 (N. S.)
Torque [Nm/kg]	Flexion (negative) peak	0.165 (N. S.)	0.134 (N. S.)
	Extension (positive) peak	-0.0047 (N. S.)	-0.015 (N. S.)
Power [W/kg]	1st peak (negative)	-0.380 (N. S.)	-0.134 (N. S.)
	2nd peak (negative)	0.001 (N. S.)	-0.083 (N. S.)

N. S.: Non-significant.

Table 4-5 Partial correlation coefficient between peak appearance time of the knee parameter and SF index, SL index.

		Partial correlation coefficient	
		SF index	SL index
Angle [degree]	Flexion (negative) peak	-0.008 (N. S.)	-0.627 ($p < 0.05$)
Angular velocity [degree/s]	Flexion (negative) peak	0.058 (N. S.)	-0.419 (N. S.)
	Extension (positive) peak	0.315 (N. S.)	-0.219 (N. S.)
Torque [Nm/kg]	Flexion (negative) peak	0.348 (N. S.)	-0.409 (N. S.)
	Extension (positive) peak	-0.055 (N. S.)	0.168 (N. S.)
Power [W/kg]	1st peak (negative)	-0.111 (N. S.)	-0.225 (N. S.)
	2nd peak (negative)	0.202 (N. S.)	-0.401 (N. S.)

N. S.: Non-significant.

Table 4-6 Partial correlation coefficient between peak value of the ankle parameter and SF index, SL index.

		Partial correlation coefficient	
		SF index	SL index
Angle [degree]	Extension (positive) peak	-0.217 (N. S.)	-0.093 (N. S.)
	Flexion (negative) peak	0.250 (N. S.)	0.526 ($p < 0.05$)
Angular velocity [degree/s]	Flexion (negative) peak	0.310 (N. S.)	0.064 (N. S.)
	Extension peak before 300%	-0.371 (N. S.)	-0.140 (N. S.)
Torque [Nm/kg]	Flexion (negative) peak	-0.435 (N. S.)	-0.145 (N. S.)
	Extension (positive) peak	0.259 (N. S.)	0.312 (N. S.)
Power [W/kg]	1st peak (positive)	-0.004 (N. S.)	-0.226 (N. S.)

N. S.: Non-significant.

Table 4-7 Partial correlation coefficient between peak appearance time of the ankle parameter and SF index, SL index.

		Partial correlation coefficient	
		SF index	SL index
Angle [degree]	Extension (positive) peak	0.261 (N. S.)	0.019 (N. S.)
	Flexion (negative) peak	0.530 ($p < 0.05$)	0.447 (N. S.)
Angular velocity [degree/s]	Flexion (negative) peak	0.168 (N. S.)	0.218 (N. S.)
	Extension peak before 300%	0.580 ($p < 0.05$)	-0.302 (N. S.)
Torque [Nm/kg]	Flexion (negative) peak	-0.179 (N. S.)	-0.423 (N. S.)
	Extension (positive) peak	0.191 (N. S.)	-0.540 ($p < 0.05$)
Power [W/kg]	1st peak (positive)	-0.014 (N. S.)	0.539 ($p < 0.05$)

N. S.: Non-significant.

第4節 考察

本研究では、短距離走の最大速度局面におけるピッチおよびストライドそれぞれと、遊脚の動作およびキネティクスとの関係を明らかにすることを目的とした。その際、身長の影響を排除するため、SF index および SL index を算出した。さらに、SF index と SL index の相互作用を排除するため、それぞれを制御要因とする偏相関分析を行った。その結果、SF index と SL index には、異なった要因が関係していた。以下、それぞれに関係する要因を考察する。

第1項 SF index に関係する要因

(1) 時空間変数について

ピッチは、支持時間と滞空時間で構成されるが (Hay, 1993), Table 4-1 上段に示したように、SF index が高いほど、支持時間および滞空時間も短いという結果であった。さらに、SF index が高いほど、ストライドの構成要素である支持距離は短かった。これらの結果は、第3章において示された、ストライドが同程度の選手間でのピッチとの関係を支持するものであった。

(2) 遊脚の動作およびキネティクスについて

SF index は、股関節角度および角速度の時系列変化やピーク値との関係はみられなかった (Table 4-2 左上および左下)。第3章では、ストライドが類似した選手間でピッチが高い選手の大腿部について、接地時に後方スイング角速度が高く、離地時の後方変位が小さかったことを示した。本章において、SF index が高い選手にこのような特徴がみられなかった理由の1つとして、選手間の疾走速度やピッチの幅が小さかったことが挙げられる。

規格化された時系列変化の分析では、股関節の動作と SF index との関係がみられなかったが、SF index が高い選手は、支持時間と滞空時間がともに短かった。これらのことは、SF index が高い選手は、SF index が低い選手と比較して、1サイクルの動作が同様の変化パターンであっても、それらをより短時間で完了していることを示している。この観点から、SF index と股関節キネティクスとの関係を考察する。

SF index が高いほど、離地後に出現する股関節屈曲トルクのピークが大きく、この屈曲トルクによる正のトルクパワーのピークも大きかった (Table 4-2 左)。離地後の股関節屈曲

トルクは、大腿部の前方への角加速度を高めることに作用する。よって、SF indexが高い被験者は、大きな股関節屈曲トルクやトルクパワーを発揮することによって、遊脚期の時間が短くても、脚の回復が遅れることを防ぐことが可能であったと考えられる。一方、股関節伸展トルクは、ピーク値とSF indexとの関係はみられなかったが (Table 4-2 左), SF indexが高いほど接地前に高い値を示す局面がみられた (Fig. 4-2 右上)。この高い股関節伸展トルクも、接地までに短時間で股関節の伸展動作を行うことに関係していたと考えられる。

膝関節については、SF indexが高いほど、離地後の滞空期に屈曲角速度が高くなる局面がわずかにみられたのみであり (Fig. 4-3 左下), その他の膝関節に関する項目とSF indexとの間に有意な関係はみられなかった。Schache et al. (2011) は、約7m/sから9m/sまで疾走速度を増加させた際、ピッチとともに、遊脚期における膝関節まわりの負のパワーが増大したことを報告している。しかし、本章の結果から、全力疾走においては、遊脚期における膝関節の力学的要因はピッチの向上にあまり影響しないことが示唆された。

足関節トルクは、逆側の脚が接地する直前の局面において (Fig. 4-4 右上), 足関節トルクパワーは、遊脚期終盤のわずかな局面において (Fig. 4-4 右下) SF indexとの間に有意な負の相関が認められたが、足関節のトルクおよびトルクパワーは、股関節および膝関節のものと比較して非常に小さい値であった。足関節角度の負のピーク値および角速度の正のピーク値それぞれの出現時刻とSF indexとの間に有意な正の相関がみられたが (Table 4-7), 足関節のキネマティクス変数の時系列変化の分析においては、SF indexとの有意な相関はみられなかった。以上のことから、遊脚期における足関節まわりで発揮されるトルクおよびトルクパワーは、股関節および膝関節に比べて小さく、その結果として、遊脚期における足関節の力学的要因はピッチの向上にはあまり影響しないと考えられる。

第2項 SL index に関する要因

(1) 時空間変数について

Table 4-1 下段に示したように、SL indexが高いほど滞空距離が長く、SL indexは支持距離との関係はみられなかった。また、SL indexが高いほど、支持時間が短く滞空時間が長かった。これは、第3章において示した、ピッチが同程度の選手間におけるストライドが高い選手の特徴と一致するものであった。つまり、長い滞空時間によって獲得される長い滞空距離が大きなSL indexを生み出し、長い滞空時間は短い支持時間に相殺されることによって、SF indexに差は生まれなかったと考えられる。支持時間が短く、滞空時間が長いこ

とは、鉛直地面反力が大きいことを意味していると考えられる。このことを踏まえ、以下では、SL index と下肢キネティクスとの関係を考察する。

(2) 遊脚の動作およびキネティクスについて

SL index が高いほど、右足離地後の滞空期中盤から、左脚支持期中盤まで、右股関節角度が小さかった (Fig. 4-2 左上)。第2章では、最大速度局面において、接地時に遊脚大腿部がより前方に位置していることで鉛直地面反力が大きくなり、その結果として滞空時間が長くなる可能性を示した。この結果を踏まえると、本研究においても、SL index が高い選手は SL index が低い選手に比べ、左脚の接地時までには右股関節をより屈曲させていたことが鉛直地面反力の増大に貢献し、滞空時間を長くするために必要となる大きな鉛直力積を、短い支持時間で獲得していたと推察される。

SL index と股関節角度に有意な相関がみられた局面に先立って、SL index が高いほど股関節屈曲角速度が高いという関係がみられた (Fig. 4-2 左下)。さらに、股関節屈曲角速度のピークは、SL index が高いほど早期に出現した (Table 4-3 右)。股関節屈曲角速度のピーク値は SL index との関係がみられなかったが (Table 4-2 右)、離地後の滞空期において、より早いタイミングで股関節の屈曲角速度を高めることで、股関節が早期に屈曲したと考えられる。そこで、股関節屈曲角速度が早期に高まる要因を明らかにするため、股関節のキネティクスについて検討した。

SL index と股関節角速度との間に有意な偏相関が発生した時点 (30%) の直前である 20-30%において、SL index が高いほど股関節屈曲トルクが大きいという関係がみられた (Fig. 4-2 右上)。よって、大きな股関節屈曲トルクが、その後の屈曲角速度の増大に貢献していると考えられる。しかし、股関節屈曲トルクのピーク値は、SL index とは無関係であった (Table 4-2 右)。股関節屈曲トルクの発生時刻の平均値は 23%であったが、最も早かった選手は 4%、最も遅かった選手は 41%と、選手間に大きな幅がみられた。このタイミングと SL index との間に直線的な関係はみられなかったが (Table 4-3)、規格化時間 20-30%における大きな股関節屈曲トルクが大きな SL index に関係していたことも考慮すると、股関節屈曲トルクのピーク出現に適切なタイミングが存在する可能性がある。このことを詳細に検討するため、Fig. 4-5 には、股関節屈曲ピークトルクが出現したタイミングと SL index との関係を示し、SF index を制御した場合の関係 (SF index とそれぞれ変数との残差の関係) を Fig. 4-6 に示した。股関節屈曲トルクのピークが、規格化時間のおよそ 20%

を越えた辺りで出現した場合に **SL index** が最も高くなるという 2 次曲線の関係が有意であり (Fig. 4-5), この関係は, **SF index** を制御しても有意であった (Fig. 4-6). さらに, 股関節がどのような動作をしている時に屈曲トルクのピークが出現しているかを検討するため, Fig. 4-7 には, 股関節屈曲トルクのピーク出現時における股関節角速度と **SL index** との関係を示した. また, これらの関係から **SF index** を制御した関係 (**SF index** とそれぞれ変数との残差の関係) を, Fig. 4-8 に示した. これらは, ともに有意な 2 次曲線の関係が認められ, 股関節屈曲角速度がおよそ 100 deg./sec の時に屈曲トルクのピーク値が出現した場合に, **SL index** が最も高かった. 矢田ほか (2012) は, 世界一流選手と学生短距離選手とを比較した結果, 世界一流選手はストライドが大きく, 離地時から股関節屈曲開始直後まで, 遊脚の股関節屈曲トルクが大きかったことを報告している. 以上のことから, 離地後の股関節屈曲開始直後に, 大きな股関節屈曲トルクが発揮されていることが, 股関節の早期屈曲を介して, 大きな **SL index** に関係していることが示唆された. また, 大きな股関節屈曲トルクを発揮している場合であっても, その低下が早すぎたり, 発揮が遅すぎたりする場合は, 股関節の早期屈曲を生み出すことが困難であると考えられる.

股関節屈曲トルクパワーは, **SL index** が高いほど, 正のピークが早く出現していた (Table 4-3 右). 時系列データ (Fig. 4-2 右下) の 30-50%における正の相関, および 85-100%における負の相関は, ピーク出現のタイミングの違いを反映した結果であり, この股関節トルクパワーの早期増大は, 股関節屈曲角速度の増大をさらに促進したものと考えられる.

股関節屈曲トルク (Fig. 4-2 右上) およびトルクパワー (Fig. 4-2 右下) は, 離地後の滞空期後半において, **SL index** が大きいほど小さくなっていた. これは, 股関節が早期に屈曲した結果として, 股関節屈曲に作用する力の必要性が低下したものであり, 早期に伸展動作の準備をすることが可能になったと考えられる.

膝関節については, 離地後から逆足の接地後まで, **SL index** が高いほどより屈曲しており (Fig. 4-3 左上), 逆足接地後, より早く伸展し始めていた (Fig. 4-3 左下). 一方, 膝関節のトルクやパワーは, **SL index** との関係はあまりみられず, 逆足接地前に膝関節トルクと (Fig. 4-3 右上), 逆足接地後に膝関節トルクパワー (Fig. 4-3 右下) との正の相関が, わずかにみられたのみであった. 馬場ほか (2000) は, 遊脚期前半の膝関節屈曲角速度は, 股関節屈曲トルクとともに発生する膝関節間力によるものであることを報告しており, Huang et al. (2013) は, 遊脚期前半は運動依存トルクが膝関節を屈曲させる方向に働くことを示している. 関ほか (2016) は, 小学生の疾走動作を分析した結果, 遊脚期における膝

関節の屈曲は、大腿部の前方スイングによって受動的に生じるものであることを示唆している。これらの報告を踏まえると、本研究における **SL index** と膝関節角度および角速度との関係は、**SL index** と股関節との関係に伴って受動的に生じたものであり、膝関節のトルクおよびトルクパワーは、**SL index** の高さとはあまり関係がないと考えられる。また、**SL index** と膝関節角度との有意な関係 (Fig. 4-3 左上) は、遊脚期開始直後からみられていたことから、支持期後半の力発揮にも影響されている可能性があるが、本研究では明らかにすることはできない。

足関節トルクは、離地直後に **SL index** との有意な負の相関が認められ、足関節トルクパワーは遊脚期において断片的に **SL index** との有意な相関がみられたが、前項で述べたように、足関節は股関節および膝関節に比べ、トルクおよびトルクパワーの値は非常に小さかった。第3章においては、ピッチが類似している場合、ストライドが大きい選手ほど、離地時の足関節底屈角速度が低いことを示したが、本章においてはそのような結果は得られなかった (Fig. 4-4 左上の0%)。しかし、離地直後の足関節トルクの結果は、**SL index** が大きいほど背屈トルクが大きいことを示していた (Fig. 4-4 右上)。この力学的特徴がどの様に **SL index** に影響しているかは不明であるが、第3章におけるストライドが大きい選手の低い足関節底屈角速度は、支持期後半から高い背屈トルクを発揮していたことによるものである可能性が考えられる。

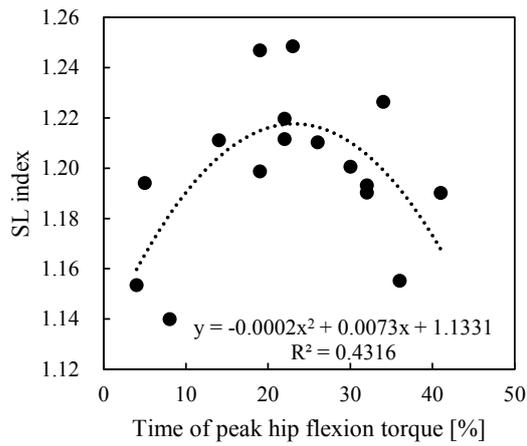


Fig. 4-5 The relationship between the time of peak hip flexion torque and SL index.

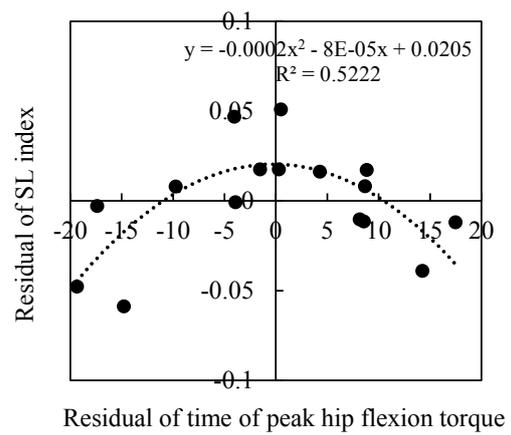


Fig. 4-6 The relationship between the time of peak hip flexion torque and SL index that controlled SF index.

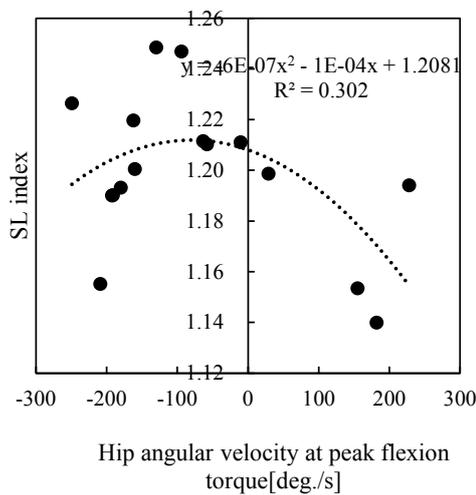


Fig. 4-7 The relationship between the hip angular velocity at peak flexion torque and SL index.

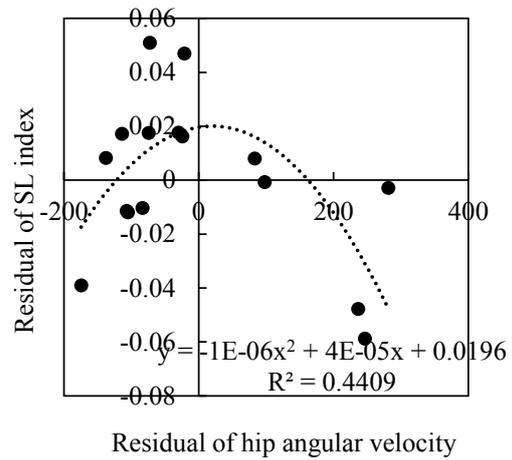


Fig. 4-8 The relationship between the hip angular velocity at peak flexion torque and SL index that controlled SF index..

第5節 本章のまとめ

本研究では、短距離走の最大速度局面における遊脚キネティクスについて、SL index を制御した場合の SF index の高さ、および、SF index を制御した場合の SL index の高さとの関係を分析した。その結果は、以下の様にまとめられる。

- (1) SF index が高いほど、支持時間および滞空時間が短かった。
- (2) SF index が高いほど、股関節屈曲トルクの最大値および、股関節屈曲トルクによる正のパワーのピーク値が大きかった。
- (3) SL index が高いほど、支持時間が短く、滞空時間が長かった。
- (4) SL index が高いほど、股関節屈曲開始時における股関節屈曲トルクが大きかった。
- (5) SL index が高いほど、股関節屈曲トルクによる正のパワーのピークが早期に出現した。

以上のことから、短距離走の最大速度局面において、高い SF index で疾走するためには、股関節屈曲に作用する大きな力やパワーによって脚を加速させ、短い遊脚期の時間に対応することが必要であることが示唆された。また、高い SL index で疾走するには、トルクやパワーの大きさよりも、それらの発揮のタイミングが重要であり、遊脚股関節について、屈曲開始時に大きな屈曲トルクを発揮し、正のトルクパワーを早期に高めることで、逆足接地時までにより屈曲位にすることが必要であることが示唆された。

第5章 総合考察

本研究では、短距離走の最大速度局面におけるピッチとストライドのトレードオフ関係について、その発生および克服に關係するバイオメカニクスの要因を明らかにすることを目的とし、3つの研究を行った。本章では、これらの研究結果を総合的に考察し、疾走速度を向上させるための主な課題が、ピッチの向上である選手およびストライドの増大である選手それぞれに対して、疾走パフォーマンス改善のための有用な知見を示す。

第1節 高いピッチで疾走するために必要な要因

ピッチは、支持時間と滞空時間との和の逆数である。つまり、高いピッチで疾走するためには、支持時間または滞空時間の少なくとも一方が短縮されなければならない。第2章の結果から、滞空時間のみが短縮された場合、ピッチの向上とともにストライドが減少し、疾走速度の向上にはつながらないと考えられる。また、この滞空時間の短縮には、接地時に遊脚の大腿部の前方変位が小さいことなどによって、鉛直地面反力が小さくなることが影響していた。ピッチの向上によって疾走速度を高めるためには、このストライド減少を抑制しなければならない。

第3章および第4章では、ストライドの減少を招かない高いピッチに關係するバイオメカニクスの要因を検討した。その結果は、Fig. 5-1のようにまとめられる。ストライドが同程度の場合、高いピッチは、短い滞空時間だけでなく、短い支持時間も関係していたが、滞空距離との関係はみられなかった。ピッチが高い選手は、滞空時間が短いにも関わらず、ピッチが低い選手と同程度の滞空距離を獲得できたのは、滞空期における進行方向への速度が高かったことが要因であると考えられる。また、高いピッチは短い支持距離とも関係していたが、長い滞空距離などによって相殺することが、ストライドを維持する手段であることが示唆された。

第2章において、高いピッチかつ短いストライドに關係する短い滞空時間は、遊脚大腿部の回復が遅れることによって生じる小さい鉛直地面反力が、要因の1つとして示された。一方、ストライドが類似している場合のピッチが高い選手は（第3章、第4章）、滞空時間が短い傾向にあるにも関わらず、遊脚大腿部の回復が遅れているという特徴はみられず、むしろ、より早く回復されている場合もみられた（第3章）。つまり、ストライドが類似している場合のピッチが高い選手は、遊脚大腿部の回復を遅らせることで鉛直力積を小さくし

第5章 総合考察

ていた訳ではなかった。これらの選手の滞空時間が短かった理由として、支持脚において発揮される力が小さかったことや、鉛直地面反力は大きい支持時間が短かったことなどにより、鉛直力積が小さくなっていた可能性が考えられる。この可能性を本研究で証明することはできないが、少なくとも、遊脚大腿部の回復を遅らせることによるピッチの向上は、ストライドの低下というトレードオフを発生させるため、疾走速度の向上に貢献しないと考えられる。

ストライドが類似している場合の高いピッチは、接地時における脚の後方スイング角速度が高いこと、離地時の大腿部の後方伸展角度が小さいこと、離地時の膝関節伸展角速度が低いことと関係していた。これらは、第3章で示したように、短い支持時間に対応するための動作であったと考えられる。つまり、トレードオフ関係を引き起こす高いピッチには、小さい鉛直力積を介して短い滞空時間に影響する遊脚の動作が関係していたのに対し、ストライドが類似している場合の高いピッチには、短い支持時間に影響する接地時および離地時における支持脚の動作が関係していたとまとめられる。

第4章では、遊脚の力学的要因について検討した。その結果、高いピッチは、大きな股関節の屈曲トルク、伸展トルク、および股関節屈曲トルクによる正のパワーと関係していた。しかし、ピッチと動作要因との関係については、第3章と同様の結果は得られなかった。これは、対象とした選手数や競技レベルの幅が異なっていたことが影響したと考えられる。一方、上述したように、短い支持時間および滞空時間と高いピッチとの関係は、第3章および第4章で共通しており、この短い時間に対応するために、大きな股関節トルクやパワーによって、股関節の角加速度を高める必要があったと考えられる。

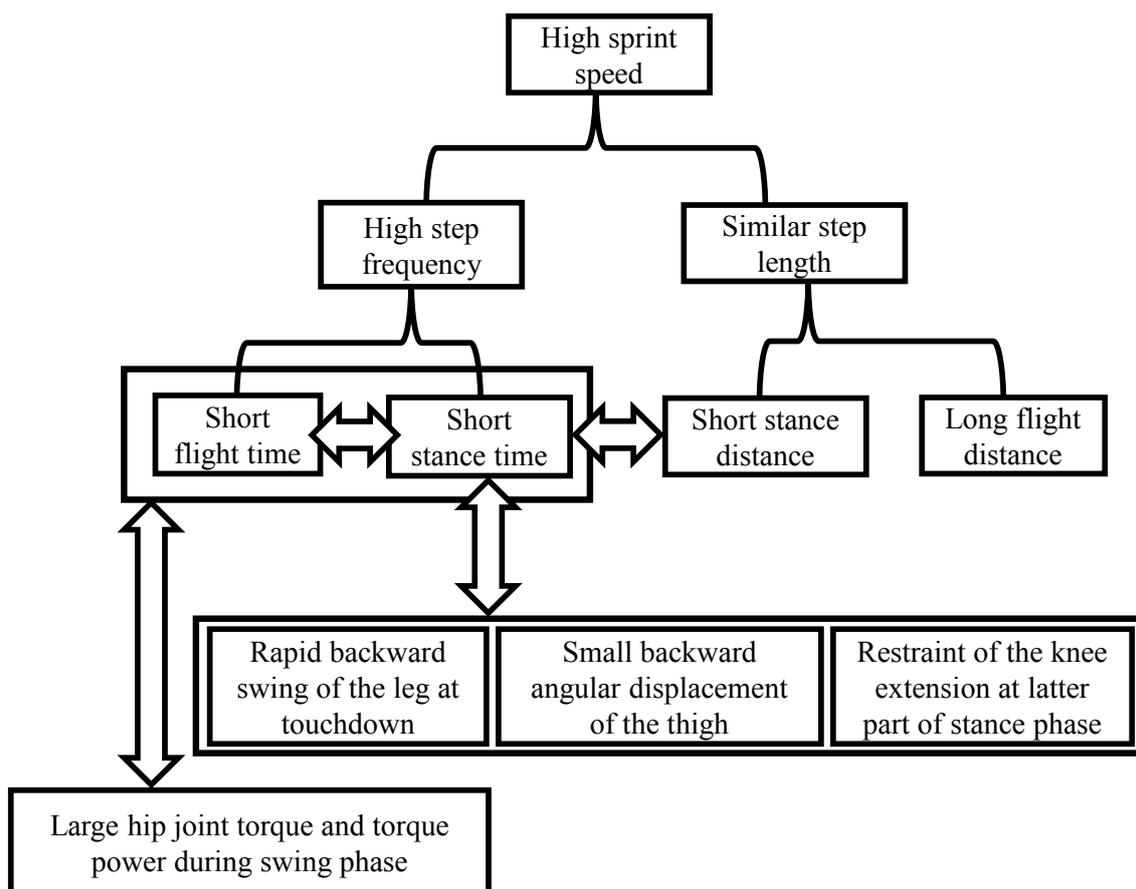


Fig.5-1 The structure of high step frequency among similar step length athletes. Two-way arrows mean possibility of relevant.

第2節 大きいストライドで疾走するために必要な要因

ピッチの低下を招かない大きいストライドに関係する要因は、Fig. 5-2のようにまとめられる。ストライドは、支持距離と滞空距離との和であるが、第2, 3, および4章の全てにおいて、大きいストライドは長い滞空距離と関係しており、支持距離の長さとの関係は認められなかった。この長い滞空距離は、長い滞空時間によって獲得されたと考えられる。つまり、大きいストライドは、ピッチの低下を伴うか否かにかかわらず、長い滞空時間によって獲得されることが示唆された。

Hunter et al. (2004) は、滞空時間はピッチとストライドとのトレードオフの発生要因であることを示している。これは、本研究の第2章においても同様であった。一方、ピッチが類似している場合について検討した第3章および第4章では、大きいストライドは長い滞空時間だけでなく、短い支持時間とも関係していた。このことから、長い滞空距離を獲得するために滞空時間を長くしながらも、支持時間を短縮することで1ステップの所要時間を延長させないことが、ピッチを維持しながらストライドを増大させるというトレードオフの克服手段であると考えられる。

理論的には、長い滞空時間を獲得するためには大きな鉛直力積が必要である。鉛直力積は支持時間の長さとの鉛直地面反力の大きさで決定される。第2章において、ストライド型はピッチ型に比べ、鉛直地面反力が大きく、支持時間は同程度であった。ピッチが類似した場合について検討した第3章および第4章では、地面反力を測定していないが、ストライドが大きい選手は、支持時間が短かった。これらのことから、ピッチを維持しながらのストライドの増大は、ピッチの低下を伴うストライドの増大と比較して、より大きな鉛直地面反力の獲得が必要であると考えられる。

第2章において、ピッチ型と比較してストライド型は鉛直地面反力が大きかったが、その支持期序盤の差の要因の1つとして、遊脚に働く鉛直方向の大きな力が影響していることが示された。第3章においても、大きいストライドは、接地時の遊脚に働く大きい鉛直加速度が関係しており、加速度は質量あたりの力であることから、遊脚に働く鉛直方向の大きな力が、骨盤を介して大きい鉛直地面反力に貢献していたと推察される。また、第2章および第3章において、遊脚に働く鉛直方向の力が大きくなる要因の1つとして、接地時に遊脚大腿部がより前方まで回復されていることが示された。よって、第4章では、大腿部の早期回復（股関節の早期屈曲）を生み出す力学的要因について検討した。その結果、股関節の屈曲開始直後に股関節屈曲トルクが大きいこと、股関節の屈曲トルクによる正のピークパ

第5章 総合考察

ワーが早期に出現することで、股関節の早期屈曲が生じることが示唆された。つまり、大きいストライドで疾走するためには、股関節まわりで発揮されるトルクやパワーの発揮のタイミングが重要であり、これは、高いピッチで疾走するために必要な大きな股関節トルクやパワーを発揮することとは異なる課題であると捉えられる。

第3章において、ピッチが類似している場合の大きいストライドは、離地時の足関節底屈角速度が低いことと関係していた。本研究では、支持期における足関節キネティクスの分析を行っていないが、離地時における低い足関節底屈角速度は、接地直後の高い足関節ステイフネスの結果として生じたものである可能性がある。これらの特徴は、短い支持時間で大きな鉛直力積を獲得することに貢献していたと推察される（伊藤ほか, 1998 ; 伊藤・石川, 2000）。つまり、遊脚に大きな鉛直方向の力を働かせることでストライドを増大できる可能性はあるが、その際にピッチを維持するためには、足関節のステイフネスなどの支持脚の機能改善も重要になると考えられる。

大きいストライドに関係する要因のうち、第3章において示された、接地時における下肢セグメントの高い後方スイング角速度は、高いピッチに関係する要因と共通したものであった。この動作は、これまでの研究においても、高い疾走速度との関係が報告されてきている（Mann and Hermann, 1985 ; 伊藤ほか, 1994 ; 伊藤ほか, 1998）。疾走速度の向上を目指す上で、下肢の後方スイング角速度を高めることは、ピッチおよびストライドのどちらを高めるかに関わらず、必要な動作であると考えられる。

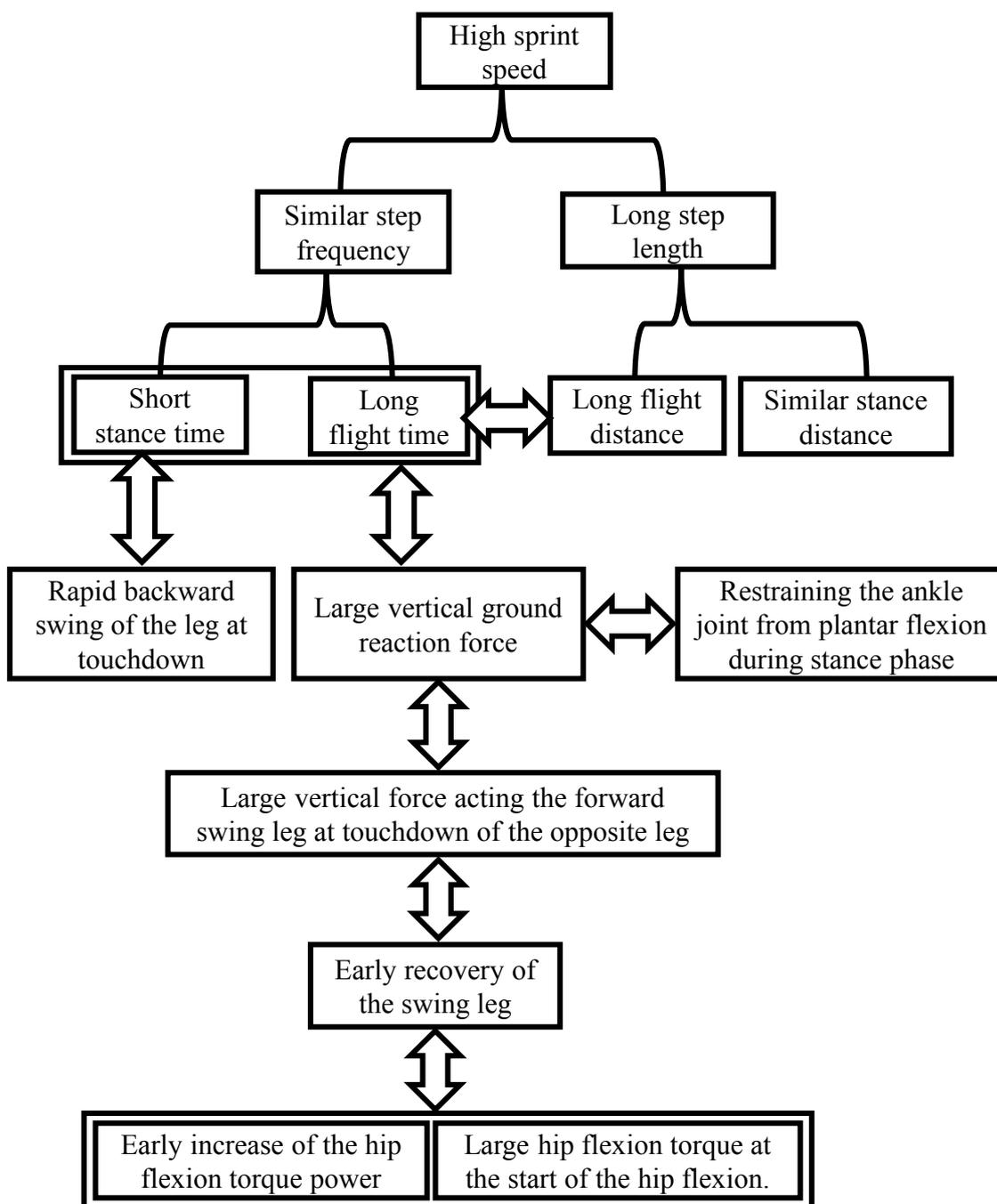


Fig.5-2 The structure of long step length among similar step frequency athletes. Two-way arrows mean possibility of relevant.

第3節 トレーニング現場への示唆

ここまでに示した考察から、疾走速度を高めることを目指すトレーニング現場に対して、実践的な提言を示す。

第1項 ピッチの向上による疾走速度向上を目指す場合

ピッチの改善には、神経系の機能が影響するという考え (Salo et al., 2011) から、脚を速く動かすドリル (Cissik, 2005) や、坂下り走 (小池, 2013) などが提案されている。一方、本研究において、ピッチの高さは、遊脚の股関節屈曲トルクおよびパワーの最大値や、股関節伸展トルクの大きさと関係していた。渡邊ほか (2003b) は、最大速度局面における遊脚の股関節屈曲トルクのピーク値と大腰筋横断面積との間、および、股関節伸展トルクのピーク値とハムストリングスおよび内転筋群の横断面積との間に有意な相関がみられたことを報告している。これらを考慮すると、ピッチを高めるためのトレーニングとしては、神経系の機能改善に加え、股関節屈曲および伸展筋群の肥大を狙った筋力トレーニングも実施するべきであると考えられる。また、離地時に股関節や膝関節の伸展が抑えられているかが、動作を評価する観点になるであろう。ピッチは高まったがストライドが小さくなり、疾走速度が増加しないという場合には、接地時に遊脚大腿部の回復が遅れていないかを確認するべきであろう。

第2項 ストライドの増大による疾走速度向上を目指す場合

ストライド増大に向けたトレーニングとして、Cissik (2005) は、通常疾走時のストライドよりもやや広い間隔でマークを並べて疾走するドリルを提案している。この方法は、本研究の結果を踏まえると、あまり推奨されない。ストライドの増大は、鉛直地面反力の増大による滞空時間の延長によってなされるべきである。これらが達成されずに上述したドリルを行った場合、身体の前方に接地することになり、支持距離が増大する。本研究においては、支持距離の増大がストライドを増大させ、疾走速度向上に寄与する可能性は示されなかった。Weyand et al. (2000) が述べているように、支持距離の増大は、地面に対する力発揮を阻害する可能性があり、疾走速度を高めることには貢献しにくいと考えられる。

本研究では、大きいストライドによる高い疾走速度は、短い支持時間で大きな鉛直地面反力を獲得することによる長い滞空時間と関係していることが示された。このことには、支持期前半の高い足関節スティフネスが関係している可能性がある。Kariyama and Zushi

(2016) は、短距離走とリバウンドジャンプそれぞれの支持期前半において発揮された足関節底屈トルクの大きさには、有意な正の相関がみられたことを報告している。また、Nagahara et al. (2014c) は、足関節底屈のみを用いる連続ジャンプ (Fig. 5-3) における、跳躍高を支持時間で除した値 (AJ-index) は、短距離走の 14 歩目から 19 歩目における身体の加速度の高さと関係していたことを報告している。この局面は、身体の加速度がストライドの増加率に影響される局面である (Nagahara et al., 2014a)。これらのことから、足関節に焦点を当てたリバウンドジャンプトレーニングは、ピッチを低下させずにストライドを増大することを目指す上で、短い支持時間で長い滞空時間を獲得するという類似性から、有効なトレーニングであると考えられる。さらに、Belli et al. (2002) が示唆しているように、接地直前に腓腹筋の活動を高めることも、支持期前半の足関節スティフネスに貢献し得るであろう。

足関節の機能改善に加え、遊脚の回復動作を早めることも重要である。これは、股関節屈筋群の肥大によって改善される可能性もあるが、本研究の結果からは、股関節屈曲トルクの最大値とストライドの大きさとの関係は示されなかった。よって、身体資源の改善よりも、股関節の屈曲が開始される時に大きな力を発揮し早期にパワーを高めるという、力発揮のタイミングに対する意識の改善が重要であると考えられる。そして、接地時に遊脚の大腿部がより前方まで回復されているかどうか、動作を評価する指標となるであろう。

第4節 今後の研究課題

本研究では、最大速度局面における疾走速度、ピッチおよびストライドに至る過程（加速局面）を分析することはできなかった。よって、本研究の結果からは、疾走速度の向上を導く要因と、疾走速度が高かったことに起因する結果とを、明確に区別することには限界がある。さらに、ピッチとストライドとのトレードオフ克服に関係し得る要因は、横断的な比較から考察したものである。よって、実践場面に対してさらに有用な示唆を与えるには、加速局面を含め、選手の縦断的な変化を分析することが必要である。

本研究の分析項目は、下肢を中心としたものであり、キネティクスの要因については、遊脚期の分析のみに留まっている。よって、上肢の動作や、支持期の下肢キネティクスの要因がピッチとストライドに及ぼす影響についても、今後検討していく必要があると考えられる。

第6章 総括

本研究は、短距離走の最大速度局面におけるピッチとストライドとのトレードオフ関係について、その発生および克服に関するバイオメカニク的要因を明らかにすることを目的とし、同一個人のピッチ型試技とストライド型試技との比較、ピッチが同程度でストライドが異なる選手の比較、および、ストライドが同程度でピッチが異なる選手の比較を行った。それらの結果は、以下のようにまとめられる。

(1) トレードオフの発生要因

支持時間が同じで滞空時間のみが異なることが、ピッチとストライドとのトレードオフを生み出した。その滞空時間の差は、鉛直地面反力の大きさに由来していた。鉛直地面反力は、接地時における遊脚大腿部の角度によって変化し、前方への角変位が大きいほど鉛直地面反力は大きくなった。

(2) ストライドが類似した場合のピッチが高い選手の特徴

ストライドが類似している場合のピッチが高い選手は、支持時間および滞空時間がともに短かった。また、支持距離も短かったが、それは長い滞空距離によって相殺された。

下肢については、接地時の下肢後方スイング角速度が高く、離地時の股関節および膝関節角度が小さかった。さらに、遊脚期における股関節屈曲トルクおよびパワーが大きかった。

(3) ピッチが類似した場合のストライドが大きい選手の特徴

ピッチが類似した場合のストライドが大きい選手は、滞空距離が長かった。また、滞空時間も長いですが、それは、短い支持時間によって相殺された。

下肢については、接地時の下肢後方スイング角速度が高く、離地時の足関節底屈角速度が低かった。また、接地時に遊脚の大転子に対する質量中心の相対鉛直加速度が高く、これは、大腿部の早期回復が関係していた。この大腿部の早期回復には、遊脚の前方スイングが開始された際に、股関節屈曲トルクが大きく、パワーが早期に増大することが関係していた。

以上の結果から、疾走速度を高める上で、主にピッチの向上を目指す場合は、支持期に下肢関節の伸展動作を小さくすることや、股関節まわりの筋群を強化することが必要であり、

第6章 総括

ストライドの増大を目指す場合は、足関節スティフネスを高めるトレーニングに加え、股関節の早期屈曲を促すために、股関節を屈曲させる力発揮のタイミングを改善する必要があると考えられる。また、接地時に下肢の後方スイング速度を高めて短い支持時間に対応することは、ピッチとストライドのどちらの改善を目指す場合であっても、必要なことであるだろう。

以上のように、疾走速度を高めるために、主な課題がピッチの向上である場合およびストライドの増大である場合それぞれに対して、有用な知見が示された。これらは、陸上競技短距離種目において、選手の疾走タイプに応じたトレーニングや指導を行うための一助となるであろう。さらに、短距離走は、陸上競技の短距離種目に限らず、サッカーなどのゴール型種目、野球などのベースボール型種目など、多くのスポーツにおいて用いられる運動であることから、本研究から得られた知見は、幅広いスポーツの競技パフォーマンス向上に貢献するものであると考えられる。

参考文献

- Ae, M., Ito, A. and Suzuki, M. (1992). The men's 100 metres. *New Stud. Athlet.*, 7: 47-52.
- 阿江 通良・宮下 憲・横井 孝志・大木 昭一郎・渋谷 侃二 (1986) 機械的パワーからみた疾走における下肢筋群の機能および貢献度. 筑波大学体育科学系紀要, 9: 229-239.
- Ae, M., Muraki, Y., Koyama, H. and Fujii, N. (2007). A biomechanical method to establish a standard motion and identify critical motion by motion variability: with examples of high jump and sprint running. *Bull. Inst. Health Sport Sci., Univ. Tsukuba*, 30: 5-12.
- 阿江 通良・鈴木 美佐緒・宮西 智久・岡田 英孝・平野 敬靖 (1994) 世界一流スプリンターの 100m レースパターンの分析—男子を中心に—. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス班編, 世界一流競技者の技術. 第 3 回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス班報告書. ベースボールマガジン社, pp. 14-28.
- 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 (1 部 形態と運動の計測) . *バイオメカニズム*, 11: 23-33.
- Alexander, R. McN. (1977). Terrestrial locomotion, In: Alexander, R. McN. and Goldspink, G. (Eds) *Mechanics and energetics of animal locomotion*. Chapman and Hall: pp. 168-203.
- Astrand, P. O. and Rodahl, K. (1977). Body dimensions and muscular work. In: *Textbook of Work Physiology, Physiological Bases of Exercise* (2nd ed.). McGraw-Hill Book Company: pp. 367-388.
- 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.
- Belli, A., Kyrolainen, H. and Komi, P. V. (2002). Moment and power of lower limb joints in running. *Int. J. Sports Med.*, 23: 136-141.
- Bezodis, I. N., Kerwin, D. G. and Salo, A. I. (2008). Lower-limb mechanics during the support phase of maximum-velocity sprint running. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 40: 707-715.
- Cissik, J. K. (2005). Means and methods of speed training, part II. *Strength Cond. J.*, 27:

18-25.

Delecluse, C. H., Coppinolle, H. V., Willems, E., Diels, R., Goris, M., Leemputte, M. V. and Vuylsteke, M. (1995). Analysis of 100 meter sprint performance as a multi-dimensional skill. *J. Hum. Mov. Stud.*, 28: 87-101.

Dorn, T. W., Schache, A. G. and Pandy, M. G. (2012). Muscular strategy shift in human running: dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *J. Exp. Bio.*, 215: 1944-1956.

福田 厚治・伊藤 章・貴嶋 孝太 (2008) 男子一流スプリンターの疾走動作の特徴—世界陸上東京大会との比較から—。 *バイオメカニクス研究*, 12: 91-97.

福田 厚治・伊藤 章 (2004) 最高疾走速度と接地期の身体重心の水平速度の減速・加速：接地による減速を減らすことで最高疾走速度は高められるか。 *体育学研究*, 49: 29-39.

福田 厚治・貴嶋 孝太・伊藤 章・堀 尚・川端 浩一・末松 大喜・大宮 真一・山田 彩・村木 有也・淵本 隆文・田邊 智 (2010) 一流短距離選手の疾走動作の特徴 —第11回世界陸上競技選手権大阪大会出場選手について—。澤木 啓祐編, *世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術*. 財団法人日本陸上競技連盟: 東京, pp. 39-50.

福田 厚治・貴嶋 孝太・浦田 達也・中村 力・山本 篤・八木 一平・伊藤 章 (2013) 一流短距離選手の接地期および滞空期における身体移動に関する分析。 *陸上競技研究紀要*, 9: 56-60.

Gajer, B., Thepaut-Mathieu, C. and Lehenaff, D. (1999). Evolution of stride and amplitude during course of the 100 m event in athletics. *New Stud. Athlet.*, 14: 43-50.

羽田 雄一・阿江 通良・榎本 靖士 (2003) 100m 走における疾走スピードと下肢関節のキネティクスの変化。 *バイオメカニクス研究*, 7: 193-205.

Hay, J. G. (1993) *Track and field: running. The biomechanics of sports techniques* (4th ed.). Prentice Hall, pp. 396-411.

Huang, L., Liu, Y., Wei, S., Li, L., Fu, W., Sun, Y. and Feng, Y. (2013). Segment-interaction and its relevance to the control of movement during sprinting. *J. Bio.*, 46: 2018-2023.

Hunter, J. P., Marshall, R. N., and McNair, P. J. (2004) Interaction of step length and step rate during sprint running. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36: 261-271.

Hunter, J. P., Marshall, R. N., and McNair, P. J. (2005) Relationships between ground

- reaction force impulse and kinematics of sprint-running acceleration. *J. Appl. Biomech.*, 21: 31-43.
- 稲葉 恭子・加藤 謙一・宮丸 凱史・久野 譜也・尾縣 貢・狩野 豊 (2002) 女子スプリンターにおける疾走能力の向上に関する事例研究. *体育学研究*, 47: 463-472.
- Ito, A., Fukuda, K. and Kijima, K. (2008). Mid-phase movements of Tyson Gay and Asafa Powell in the 100 metres at the 2007 World Championships in Athletics. *New Stud. Athlet.*, 23: 39-43.
- 伊藤 章・市川 博啓・斎藤 昌久・佐川 和則・伊藤 道郎・小林 寛道 (1998) 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係. *体育学研究*, 43: 260-273.
- 伊藤 章・石川 昌紀 (2000) 短距離走におけるスナップの意味. *バイオメカニクス研究*, 4: 159-163.
- 伊藤 章・斎藤 昌久・佐川 和則・加藤 謙一・森田 正利・小木曾 一之 (1994) 世界一流スプリンターの技術分析. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス班編, 世界一流競技者の技術. 第 3 回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス班報告書. ベースボールマガジン社, pp. 31-49.
- Kariyama, Y. and Zushi, K. (2016). Relationships between lower-limb joint kinetic parameters of sprint running and rebound jump during the support phases. *J. Phys. Fitness Sports Med.*, 5: 187-193.
- 加藤 彰浩・鵜飼 興平・木越 清信 (2011) 100m 走における疾走速度および疾走動作の個人内変動. *陸上競技研究*, 2011: 12-22.
- 加藤 謙一・宮丸 凱史・松元 剛 (2001) 優れた小学生スプリンターにおける疾走動作の特徴. *体育学研究*, 46: 179-194.
- 木越 清信・山元 康平・関 慶太郎・中野 美沙・尾縣 貢 (2015) 短距離走における疾走速度と回復脚の動作との関係. *陸上競技学会誌*, 13: 45-52.
- 金高 宏文・松村 勲・瓜田 吉久 (2005) 100m 走の加速区間における局面区分の検討—疾走速度, ストライド及びピッチの 1 歩毎の連続変化を手がかりにして—. *スプリント研究*, 15: 89-99.
- 小林 寛道 (1990) 走る科学. 大修館書店.
- 小池 弘文 (2013) 短距離. 日本陸上競技連盟編, 陸上競技指導教本アンダー16・19 [上級編] レベルアップの陸上競技. 大修館書店, pp. 2-9.

- Kuitunen, S., Komi, P. V. and Kyrolainen, H. (2002). Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34: 166-173.
- Kunz, H. and Kaufmann, D. A. (1981). Biomechanical analysis of sprinting, Decathletes versus champions. *Brit. J. Sports Med.*, 15: 177-181.
- Mackala, K. (2007). Optimisation of performance through kinematic analysis of the different phases of the 100 metres. *New Stud. Athlet.*, 22: 7-16.
- Mann, R. V. (1981). A kinetic analysis of sprinting. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 13: 325-328.
- Mann, R. and Herman, J. (1985). Kinematic analysis of Olympic sprint performance, Men's 200 meters. *Int. J. Sport Biomech.*, 1: 151-162.
- 松尾 彰文・広川 龍太郎・柳谷 登志雄・杉田 正明・土江 寛裕・阿江 通良 (2010) 100m のレース分析. 澤木 啓祐編, 世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術. 財団法人日本陸上競技連盟, pp. 5-17.
- 宮丸 凱史 (1971). 短距離疾走フォームに関する実験的研究—脚長と疾走フォームについての考察—. 東京女子体育大学紀要, 6: 22-33.
- 宮代 賢治 (2012) 100m レースのピッチ, ストライド, 接地時間, 空中時間および滞空比. 宮下 憲編, スプリント&ハードル. 陸上競技社, pp. 47-49.
- 宮代 賢治・山元 康平・内藤 景・谷川 聡・西嶋 尚彦 (2013) 男子 100m 走における身長別モデルステップ変数. スプリント研究, 22: 57-76.
- 宮下 憲・阿江 通良・横井 孝志・橋原 孝博・大木 昭一郎 (1986) 世界一流スプリンターの疾走フォームの分析. *Jpn. J. Sports Sci.*, 5: 892-898.
- Morin, J. B., Bourdin, M., Edouard, P., Peyrot, N., Samozino, P. and Lacour, J. R. (2012). Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 112: 3921-3930.
- Morin, J. B., Dalleau, G., Kyrolainen, H., Jeannin, T. and Belli, A. (2005). A simple method for measuring stiffness during running. *J. Appl. Biomech.*, 21: 167-180.
- 森丘 保典・阿江 通良・岡田 英孝・高松 潤二・宮下 憲 (1997) 100m 疾走における下肢動作の変化の分析—下肢動作検出装置の開発と応用—. *Jpn. J. Sports Sci.*, 16: 111-118.
- Nagahara, R., Matsubayashi, T., Matsuo, A. and Zushi, K. (2014b). Kinematics of transition during human accelerated sprinting. *Biol. Open*, 3: 689-699.

- Nagahara, R., Naito, H., Miyashiro, K., Morin, J. B. and Zushi, K. (2014c). Traditional and ankle-specific vertical jumps as strength-power indicators for maximal sprint acceleration. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 54: 691-699.
- Nagahara, R., Naito, H., Morin, J. B. and Zushi, K. (2014a). Association of acceleration with spatiotemporal variables in maximal sprinting. *Int. J. Sports Med.*, 35: 755-761.
- 内藤 景・荻山 靖・宮代 賢治・山元 康平・尾縣 貢・谷川 聡 (2013) 短距離走競技者のステップタイプに応じた 100m レース中の加速局面の疾走動態. *体育学研究*, 58: 523-538.
- 中田 和寿・阿江 通良・宮下 憲・横澤 俊治 (2003) バイオメカニクスデータを活用した短距離疾走動作の改善. *陸上競技学会誌*, 1: 30-38.
- 奥山 良樹・横澤 俊治・村木 有也・小山 宏之・藤井 範久・阿江 通良 (2003) 走高跳の振上脚の効果に関するバイオメカニクス的研究. *日本体育学会大会号*, (54): 371.
- Otsuka, M., Kawahara, T. and Isaka, T. (2016). Acute response of well-trained sprinters to a 100-m race: Higher sprinting velocity achieved with increased step rate compared with speed training. *J. Strength Cond. Res.*, 30: 635-642.
- Paruzel-Dyja, M., Walaszczyk, A. and Iskra, J. (2006). Elite male and female sprinters' body build, stride length and stride frequency. *Stud. Physic. Culture Tourism*, 13: 33-37.
- Salo, A. I. T., Bezodis, I. N., Batterham, A. M., and Kerwin, D. G. (2011) Elite sprinting: are athletes individually step-frequency or step-length reliant?. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 43: 1055-1062.
- Schache, A. G., Blanch, P. D., Dorn, T. W., Brown, N. A. T., Rosemond, D. and Pandy, M. G. (2011). Effect of running speed on lower limb joint kinetics. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 43: 1260-1271.
- Schiffer, J. (2009). *The Sprints*. *New Stud. Athlet.*, 24: 7-17.
- 関 慶太郎, 鈴木 一成, 山元 康平, 加藤 彰浩, 中野 美沙, 青山 清英, 尾縣 貢, 木越 清信 (2016) 小学校 5, 6 年生男子児童における短距離走の回復脚の動作と疾走速度との関係: 回復脚の積極的な回復と膝関節の屈曲はどちらを優先して習得すべきか. *体育学研究*, doi: <http://doi.org/10.5432/jjpehss.15078>.
- 志賀 充・高橋 佳三・望月 聡・豊田 則成・渋谷 俊浩 (2009) 陸上競技の短距離選手

- に対するコーチング実践-縦断的な動作測定・筋力測定・動作意識からトレーニングの方向性を探る-. びわこ成蹊スポーツ大学研究紀要, 6: 121-131.
- 末松 大喜・西嶋 尚彦・尾縣 貢 (2008) 男子小学生における疾走能力の指数と疾走中の接地時点の動作との因果構造. 体育学研究, 53: 363-373.
- 杉林 孝法・村木 征人・伊藤 浩志 (2003) 全力疾走反復条件下におけるパフォーマンス動態. スポーツ方法学研究, 16: 27-37.
- 土江 寛裕 (2004) アテネオリンピックに向けての「走りの改革」の取り組み. スポーツ科学研究, 1: 10-17.
- Vardaxis, V. and Hoshizaki, T. B. (1989). Power patterns of the leg during the recovery phase of the sprinting stride for advanced and intermediate sprinters. *Int. J. Sport Bio.*, 5: 332-349.
- Weyand, P. G., Sternlight, D. B., Bellizzi, M. J., and Wright, S. (2000). Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *J. Appl. Physiol.*, 89: 1991-1999.
- 矢田 恵大・阿江 通良・谷川 聡・伊藤 章・福田 厚治・貴嶋 孝太 (2011) 標準動作モデルによる世界一流および学生短距離選手の疾走動作の比較. 陸上競技研究, 2011: 10-16.
- 矢田 恵大・阿江 通良・谷川 聡 (2012) 世界一流および学生短距離選手の回復脚におけるキネティクスの相違. 陸上競技研究, 2012: 9-16.
- 渡邊 信晃・榎本 靖士・大山卞圭吾・宮下 憲・尾縣 貢・勝田 茂 (2003a) スプリント走時の疾走動作および関節トルクと等速性最大筋力との関係. 体育学研究, 48: 405-419.
- 渡邊 信晃・榎本 靖士・高橋 英幸・宮下 憲・勝田 茂・尾縣 貢 (2003b) スプリント走時の下肢関節トルクと筋横断面積との関係. 陸上競技研究, 52: 2-11.

謝辞

本博士論文は、中京大学スポーツ科学部の桜井伸二教授の御指導のもとで作成されました。桜井先生には、研究計画に対する助言から論文の文章添削に至るまで、終始多大なる御指導と御厚情を賜りました。研究指導に限らず、大学院生としての在り方をもご教授いただきました。博士課程入学直後には、「大学院生は恵まれた存在である。同年代の多くは、社会に出て働いている。大学院生も1日に8時間は研究のことを考えて働きなさい。」というお言葉をいただき、それは、学生という立場に甘えそうな時にいつも思い出され、その姿勢を正すように導いてくださるものでした。学位論文をゴールと捉えるのではなく、その先も見据えたご指導により、博士論文を作成し、次に向けてのスタートを切ることができました。ここに、厚く御礼申し上げます。

田内健二先生（中京大学スポーツ科学部准教授）には、データ収集にお力添えをいただいたことは言うまでもなく、さらに、いつも厳しくも的確な御助言をいただきました。「現場に生かせる研究をしたい」という思いを抱いて中京大学に進学した私に対し、「基礎的なことを理解できていなければ、研究を現場に応用することはできない」と、理想論の前にまず研究者としてやるべきことを教えていただき、力学や身体のメカニズムなどを学ぶ重要性を説いてくださいました。この考えは、博士論文の作成、さらには今後の研究活動に向けての大きな糧となりました。田内先生がいらっしゃらなければ、私の博士論文の作成は、さらに数年を要していたことと思います。心より御礼申し上げます。

山田憲政先生（中京大学スポーツ科学部教授）には、博士論文の中間報告会および査読において、大変貴重な御指導を賜りました。バイオメカニクスの論文がどうあるべきかを改めて考えるきっかけとなり、博士論文の内容の先に、まだまだ追究しなければならないことがあることを気づかせてくださいました。ここに厚く御礼申し上げます。

湯浅景元教授、高橋繁浩教授をはじめとする、中京大学大学院体育学研究科の諸先生方には、研究活動および博士課程学生としての生活全般に関わる御指導、御助言および激励をいただきました。陸上競技以外の競技、およびバイオメカニクス以外の分野から観た御指導は、大変貴重なものでした。厚く御礼申し上げます。

早稲田大学スポーツ科学学術院の磯繁雄教授、青山学院大学社会情報学部の遠藤俊典准教授には、論文を投稿するにあたり、大変貴重なお力添えを賜りましたことに、厚く御礼申し上げます。

木村健二氏，塚田卓巳氏，石村和博氏には，中京大学大学院体育学研究科の先輩としての御助言を多々いただき，相談にも乗っていただきました．他大学の修士課程から進学してきた私にとって，博士課程の諸先輩方の御指導や経験談は貴重なものでした．大変お世話になりましたことを，心より感謝申し上げます．

中京大学陸上競技部の皆様には，データを収集するにあたって，多大なるお力添えをいただきました．本田陽部長，青戸慎司監督には，競技会における映像撮影へのご理解，および，被験者の募集へのご協力を賜りました．短距離選手の皆様には，データ収集のための実験に被験者として参加していただきました．皆様の御理解および御協力がなくては，本博士論文は開始することさえも不可能でした．ここに厚く御礼申し上げますとともに，陸上競技部の今後の御活躍を祈念致します．

名古屋大学保健体育センターの山本裕二先生，および山本研究室の皆様には，博士後期課程入学直後から，週 1 回の研究会で大変お世話になりました．運動学習や認知行動学に関する研究会でありながら，バイオメカニクスが専門で，他大学所属の私を快く受け入れてくださり，研究経過報告をするたびに，バイオメカニクス分野の研究者とは異なる視点で，大変貴重な御意見をくださいました．研究内容に限らず，研究者として生きる上での様々なお話を聞かせてくださり，皆様と過ごした時間は，大変重要な時間となりました．皆様には，心より感謝申し上げます．

同級生として博士課程を過ごした吉永竜斗志氏をはじめとする，中京大学大学院体育学研究科応用スポーツ科学系同級生および後輩には，実験にご尽力いただいた他，それぞれの研究のデータ処理，解釈，研究成果のプレゼンテーション資料の作成，その他研究活動や将来のことなどに対する議論を日々行い，非常に多くの時間をともに費やしてきました．皆様それぞれの研究内容や取り組む姿勢から学ぶことも多々ありました．教育学部，教育学研究科出身の私にとって，体育・スポーツ系学部出身の皆様と過ごす時間は新鮮であり，新たな観点を示してくれるものでした．本当にありがとうございました．

2013 年 4 月の中京大学入学以来，博士論文の完成に向けて，大変多くの方々にお世話になってきました．その研究活動の原点は，大阪教育大学の生田ゼミに他なりません．大阪教育大学教育学部教養学科スポーツ専攻，生田泰志教授には，大学 3 回生になる 2009 年 4 月にゼミに加入させていただいて以来，修士課程を修了するまで大変お世話になりました．みんなで議論を重ねる「部活的なゼミ」や，「研究とは？を！に変えること」という考えは，研究者としての私の礎です．中京大学に入学してからも，度々御助言や激励のお言葉をいた

できました。その度に、生田ゼミで学んだことを思い起こし、OBとして恥じないように頑張ろうと、前を向くことができました。心より、御礼申し上げます。

私の短距離走の研究は、「どうすればもっと速く走ることができるのか」という、選手時代の想いの延長上にあります。陸上競技を始めて以来、中学、高校、大学、大学院と、速く走ることを一緒に追求してきたチームメイトや他校のライバルとの時間は、今の私の糧になっています。関わってくださった皆様に、感謝申し上げます。

最後に、大学院での生活を支援し、静かに温かく見守ってくれた家族に、心より感謝します。ありがとうございました。

2017年3月

豊嶋 陵司