

100m 走の加速能力を決定する技術・体力および形態の究明

永原 隆

目 次

要約	1
第 1 章 緒言	2
第 2 章 研究課題 I	3
第 3 章 研究課題 II	6
第 4 章 研究課題 III	9
第 5 章 研究課題 IV	12
第 6 章 総合考察	19

謝辞

参考文献

100m 走の加速能力を決定する技術・体力および形態の究明

永原 隆 内藤 景 宮代賢治

要約

本研究では、100m 走のパフォーマンス向上のために、加速局面全体にわたる加速度と spatiotemporal 変数、体力特性、身体形態的特徴、疾走動作との間の関係について検討し、多角的な側面から加速能力向上のための実践的示唆を得ることを目的とし、4 つの研究課題を設定した。

研究課題 I では、加速能力とステップ長変化率、ステップ頻度変化率との間の関係について 1 歩ごとに検証し、スタート直後の加速では、ステップ頻度を高め、5 歩目から 15 歩目ではステップ長を増加させることが効果的な加速に必要であることがわかった。また、16 歩目以降においては、加速能力のステップ長あるいはステップ頻度への依存性は、個人ごとに異なることが示された。研究課題 I の結果から、本研究では加速局面全体を加速能力がステップ頻度を高める能力に依存する第 1 加速区間、ステップ長を増加させる能力に依存する第 2 加速区間、依存性が個人ごとに異なる第 3 加速区間に区分した。

研究課題 II から IV で得られた結果から、第 1 加速区間では支持期において下腿を素早く前傾させることで下腿の平均水平獲得速度をより大きく増加させ、身体重心高を低く維持しながら疾走することが効果的な加速に重要であることがわかった。また、この区間における不安定な姿勢に起因して加速能力とステップ頻度を高める能力との間の関係性が生じたと考えられる。第 2 加速区間の前半では、体幹の前傾を維持し、大腿および下腿の前方への倒しこみを素早く行うことで、大腿および下腿の水平獲得速度を大きく増加させ、脚全体の角速度を大きく増加させること、第 2 加速区間の後半では、股関節や膝関節の伸展角速度を増加させず、足関節において大きな底屈力を発揮し、足部と下腿を連動させて前方へ素早く回転させることが加速に対して有効であることが明らかとなった。また、第 2 加速区間の後半では、足部を身体重心に近い水平位置に接地し、その際に両膝関節間の水平距離を短くすることが効果的な加速に対して重要であることが示された。さらに、第 2 加速区間では大きな鉛直力積を発揮する能力や長い足長が加速能力に対して有利に働くことがわかった。異なる区間が生じた要因としては、4 歩目前後においてステップ頻度の増加が頭打ち状態になることで、支持期における脚の振る舞わせ方を変化させる必要性が生じたことと考えられ、支持期において大きな加速力積、鉛直力積を獲得できる者が、疾走速度を大きく増加させられ、加速度とステップ長変化率との間に関係性が生じたと考えられる。第 3 加速区間では、姿勢の大きな変化が終息し、再び加速能力のステップ長やステップ頻度への依存性が変化した。この区間の前半では、大腿の水平獲得速度を減少させ、足部と下腿による速度の獲得を優先的に増加させることが、脚全体の後方スイング速度を大きく増加させ、効果的に加速することにつながる。また、第 2 加速区間に引き続き、足部を身体重心に近い水平位置に接地し、その際に両膝関節間の水平距離を小さくすることが効果的な加速に対して重要であることがわかった。

代表者所属:筑波大学大学院人間総合科学研究科コーチング学専攻

第 1 章

緒言

陸上競技の 100m 走は、屋外で行われる競走種目のなかで、最も距離の短い種目であるが、レース中の疾走速度はクレアチンリン酸による ATP の再合成サイクルが破綻することによって、スタート後 6 秒前後で最高値に達し (Hirovonen et al. 1987), その後ゴールまで減少する。また、100m 走における最高速度は、ゴールタイムとの間に非常に高い相関がある (Mackala 2007)。したがって、100m 走においてパフォーマンスを向上させるための最も優先すべき課題は、限られた時間内に遂行できる加速の能力を高めることである (Doolittle & Tellez 1984)。本研究では、100m 走のパフォーマンス向上に対して優先度の高い加速局面に着目し、効果的な加速を実現するために必要となる要素を多角的に検討する。なお、本研究では、100m 走の加速局面をスタート後 1 歩目から疾走速度が最高値に達するまでと定義した。

疾走は、ヒトの最も基本的な移動運動の一つであることから、これまで数多くの研究において対象とされてきた。100m 走に代表されるスプリント走を対象として、疾走能力との関係について論じた研究では、疾走中の spatiotemporal 変数 (Ae et al. 1992, Debaere et al. 2013, Gajer et al. 1997, Hunter et al. 2004, Ito et al. 2006, Mackala 2007, Mann & Herman 1985, Salo et al. 2011) や動作 (Hunter et al. 2004; 2005, Ito et al. 1993, Jacobs & van Ingen Schenau 1992, Krell & Stefanyshyn 2006, Mero et al. 1983), 下肢の力、パワー発揮特性に着目したもの (Bezodis et al. 2008, Chapman & Caldwell 1983, Dorn et al. 2012, Kuitunen et al. 2002, Stefanyshyn et al. 2008, Weyand et al. 2000), 疾走以外の動作で評価した筋力やパワーに着目したもの (Bissas & Havenetidis 2008, Kale et al. 2009, Smirniotou et al. 2008, Young 1995), 形態的特性について評価したものなどがある (Baumann 1976, Baxter et al. 2012, Karamanidis et al. 2011, Lee & Piazza 2009, Volkov & Lapin 1979)。しかし、加速局面を対象とした疾走能力に関する先行研究の問題点として、1) 疾走速度を疾走能力の評価指標としていること、2) 特定の局面の 1 歩、あるいは区間の平均を値として用いていることが挙げられる。これらの問題点の背景について以下に示す。

100m 走の記録は、100m を平均速度で除したものであり、速度は疾走能力を評価する指標として有効ではあるが、100m 走の加速局面におけるある地点の疾走速度は、それに達するまでの各歩の支持期における加速量を足し合わせたものであるため (ここでは空気抵抗は無視する)、最高速度を重要なパフォーマンスの指標とした場合、それに達するまでの 1 歩ごとの加速量がパフォーマンスを構成する要素であると捉えることができる。また、ある地点において、疾走速度と何らかの変数との間に有意な相関があると、それ以降の局面において、加速量とその変数との間に相関がみられない場合でも、継続して有意な相関が現れることがある。この場合、実際にはその変数は速度の増加に対してある地点以前にのみ影響を持つにも関わらず、ある地点から最高速度までの区間において疾走能力に何らかの影響を持つと判断されてしまい、疾走のどの局面における加速能力に対してその変数が重要性を持つのかといった評価が適切に行われないことになる。

100m 走の加速局面において、疾走速度は時々刻々と変化する (Morin et al. 2010, Volkov & Lapin 1979)。また、疾走中の各変数には左右差があり (Carpes et al. 2010), ヒトが本来的に持つ変動性の影響も加わることで (van Emmerik & van Wegn 2000, Hamill et al. 2012, Wilson et al. 2008), 疾走速度は、ばらつきを伴って変化していく

(Morin et al. 2010). したがって、特定の局面のみの評価や平均値を用いた評価は、疾走能力と各変数との間の関係を適切に評価できていない可能性がある。

これらの問題点に対して、本研究では、加速局面全体にわたる 1 歩ごとの加速度を算出し、その加速度と spatiotemporal 変数、体力特性、形態特性、疾走動作との間の関係について検討することで対処し、効果的な加速を実現するために重要性の高い要素について検討する。加速局面における疾走能力(加速能力)と spatiotemporal 変数、体力特性、身体形態特性、疾走動作との関係を適切に評価し、加速に対して重要な要素に関する知見を得ることは、レースの組み立てやトレーニングの方向性を決定する際に有用であると考えられる。

研究目的

本研究では、100m 走のパフォーマンス向上のために、加速局面全体にわたる加速度と spatiotemporal 変数、体力特性、身体形態的特徴、疾走動作との間の関係について検討し、多角的な側面から加速能力向上のための実践的示唆を得ることを目的として、以下の 4 つの研究課題を設定した。

《研究課題 I》

全力疾走の加速局面における加速能力と Spatiotemporal 変数との関係

《研究課題 II》

全力疾走の加速局面における加速能力と脚の力発揮能力との関係

《研究課題 III》

全力疾走の加速局面における加速能力と身体各部分長との関係

《研究課題 IV》

全力疾走の加速局面における加速能力と疾走動作との関係

第 2 章

研究課題 I 全力疾走の加速局面における加速能力と spatiotemporal 変数との関係

1. 背景と目的

ステップ長とステップ頻度(spatiotemporal 変数)は、その積が疾走速度であることから、疾走技術の基礎的な指標として実践的に用いられてきた(Ae et al. 1992, Debaere et al. 2013, Gajer et al. 1997, Hunter et al. 2004, Ito et al. 2006, Mackala 2007, Mann & Herman 1985, Salo et al. 2011)。疾走速度を高めるためには、ステップ長およびステップ頻度を高める必要があるが、ステップ長とステップ頻度の間には負の相互作用があり、最大努力による疾走条件下では意図的にどちらか一方を高めることは、他方の低下を伴う(Hunter et al. 2004)。したがって、100m 走のパフォーマンス改善を目指す際に、ステップ長とステップ頻度を同時に高めようと試みることは、有効ではない可能性がある。ステップ長、ステップ頻度の相対的な重要度(どちらがパフォーマンスの差に対して大きく影響するか)に関しては、ステップ長(Gajer et al. 1997, Ito et al. 2006)、ステップ頻度(Mann & Herman 1985)それぞれに主張がなされている。

Hunter et al. (2004)は、対象としたグループにおいて、個人間では疾走速度とステップ長との間にのみ有意な相関がみられたが、個人内では最も疾走速度が低かった試技のステップ頻度に対して、最も疾走速度が高かった試技のステップ頻度が有意に高かったことを示し、長期にわたる疾走能力の向上にはステップ長を増加させる必要があり、短期間での疾走速度の変化にはステップ頻度が大きく影響すると推察している。一方、近年の研究では、世界一流選手を対象として(研究対象としたレースにおける個人内の 100m 走平均記録 10.02s から 10.18s)、100m 走記録のステップ長、ステップ頻度への依存性が、個人毎に異なることや(Salo et al. 2011)、国内一流選手を対象として(対象者の 60m 走記録 6.82s から 7.19s)、スタートから 10m、10-30m、30-60m の各区分における疾走速度とステップ長、ステップ頻度との間には有意な関係がみられなかったことが報告されている(Debaere et al. 2013)。これらの研究は、対象とするグループにおける被験者間の疾走能力に大きな差がない場合、スプリントのパフォーマンスがステップ長、ステップ頻度のどちらにも依存性を持たず、ステップ長、ステップ頻度のどちらを優先して高めるかは、各個人の特性を見極める必要があることを示している。しかし、緒言で述べたように、これまでの研究では疾走能力の評価指標として速度を用いており、加速局面において高い疾走速度に達するための能力を適切に評価するためには加速度を用い、1 歩ごとに詳細に関係を検討することが有効であると考えられる。

本課題では、加速能力と spatiotemporal 変数との間の関係について検討し、効果的な加速を実現するための加速技術(spatiotemporal 変数)について明らかにすることを目的とした。

2. 方法

1) 被験者

被験者は、大学陸上競技部に所属する男子短距離選手 21 名(年齢 20.1 ± 1.2 yr, 身長 1.75 ± 0.04 m, 体重 66.2 ± 4.0 kg, 100m 走自己最高記録 11.19 ± 0.32 s)とした。実験に先立ち、実験の要旨、内容および危険性について被験者へ説明し、実験参加の同意を得た。

2) 加速能力の評価と Spatiotemporal 変数の算出

ウォーミングアップの後、各被験者にスターティングブロックから 60m の全力走を行わせた。本課題の被験者の競技レベルでは、最高速度が 60m 以内に発現することから(Letzelter 2006, Mackala 2007)、実験試技の距離を 60m に設定した。被験者は、各自のスパイクシューズを着用して試技を行った。60m 走のタイムは、スタートピストルに接続した光電管システムを用いて計測した(Sprint System, Brower Timing Systems, Draper, UT, USA)。また、走路の 5m、15m、25m、35m、45m、55m 地点と直交する右側方約 45m 地点に設置した 6 台の高速度カメラ(EX-F1, Casio, Tokyo, Japan, 300fps)を用いて、60m にわたる被験者の疾走をパニング撮影した。その際の、カメラ画角は約 4.2m であった。試技の際には、実長換算のために、スタートラインの 1m 前から 60m に至るまで、走路の両側白線上に 1m 間隔で 124 個の校正マークを設置し、疾走中の被験者と同時に撮影した。

被験者の接地時点を目視で判断し、1 歩に要した時間の逆数としてステップ頻度を算出した。なお、被験者がスタート後、ブロックを離れて次に接地した瞬間を 1 歩目の接地とし、各歩は接地から逆足の接地直前までと定義した。支持期の足部の位置を算出するために、Frame-DIAS system(DKH Co., Tokyo, Japan)を用いて支持期の 50-70%時のつ

ま先をデジタイズし、接地した足の前後左右の 4 つの較正マークを用いて実座標に換算した。得られた連続するつま先位置の走路方向の差分をステップ長として算出した。

疾走速度は、ステップ長とステップ頻度の積として求めた。得られた各 spatiotemporal 変数は、左右差やヒトが本来的に持つ変動性の影響を排除するために、4 次の多項式で近似した。その後、各変数の一次導関数を求め、1 歩ごとの変化率を得た。その際、ゴール直前の数歩にみられたフィニッシュ動作等起因する特異的な変化の影響を排除するためにゴール直前 3 歩のデータは除いて計算を行った。また、本研究では、60m の疾走に要した歩数が最も少なかった被験者の歩数が 28 歩であったため、それに従い全被験者の各変数について 25 歩分のデータを計算に用いた。

3) 統計処理

1 歩ごとの加速度と spatiotemporal 変数との間の関係について検定するために、ピアソンの積率相関係数を算出した。なお、有意水準は 5%未満とした。

3. 結果

60m 走の記録は、 7.54 ± 0.26 s であった。図 1 は、近似した疾走速度、ステップ長、ステップ頻度とそれらの変化率の平均と標準偏差の変化を示したものである。疾走速度は、スタート直後急激に増加し、その後増加の度合いが緩まり、24 歩目において最高速度 ($9.51 \pm 0.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) に達した。ステップ長は、疾走速度と同様にスタート直後急激に増加し、その後緩やかに 25 歩目まで増加した ($2.12 \pm 0.10 \text{ m}$)。ステップ頻度は、スタート直後急激に増加したが、10m 以降においては大きく変化せず、20 歩目において最高値に達した ($4.53 \pm 0.20 \text{ Hz}$)。

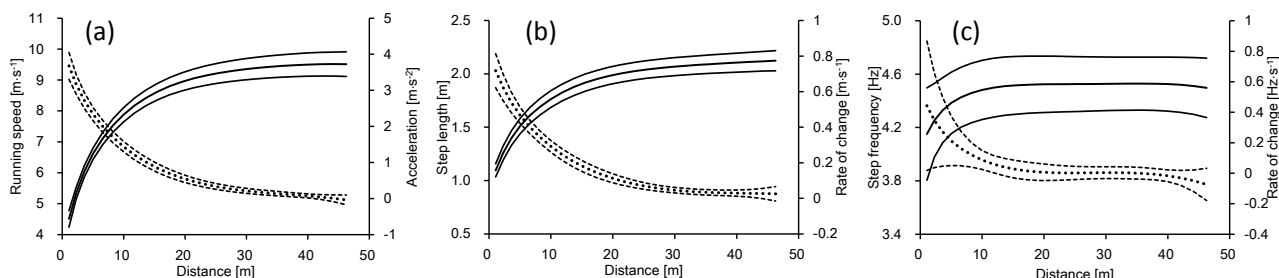


図 1 疾走速度(a)、ステップ長(b)、ステップ頻度(c)(黒線)とそれらの変化率(点線)の変化

図 2 は、1 歩ごとの加速度と 60m 走中の最高速度との間の相関係数の変化を示したものである。加速度と 60m 走中の最高速度との間には、4 から 24 歩目まで有意な正の相関がみられた。

図 3 は、1 歩ごとの加速度とステップ長(RSL)、ステップ頻度(RSF)変化率との間の相関係数の変化を示したものである。加速度とステップ長変化率の間には、5 から 15 歩目まで、および 20、21 歩目において有意な正の相関がみられた。加速度とステップ頻度変化率の間には、1、2 歩目、17 歩目、23 から 25 歩目において有意な正の相関がみられた。また、ステップ長変化率とステップ頻度変化率の間には、全歩にわたって有意な負の相関があった ($r = -0.64$ — -0.79)。

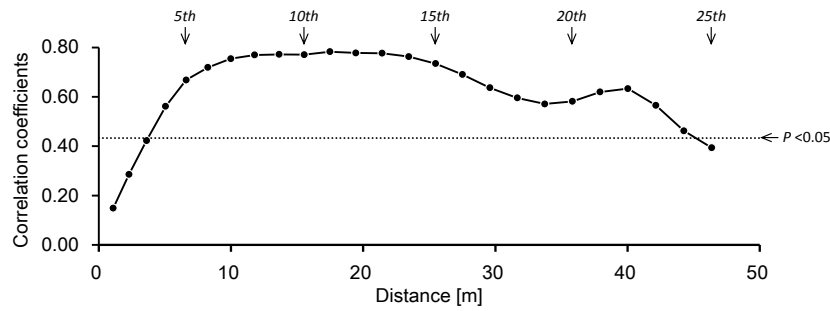


図 2 加速度と最高速度との間の 1 歩ごとの相関係数の変化

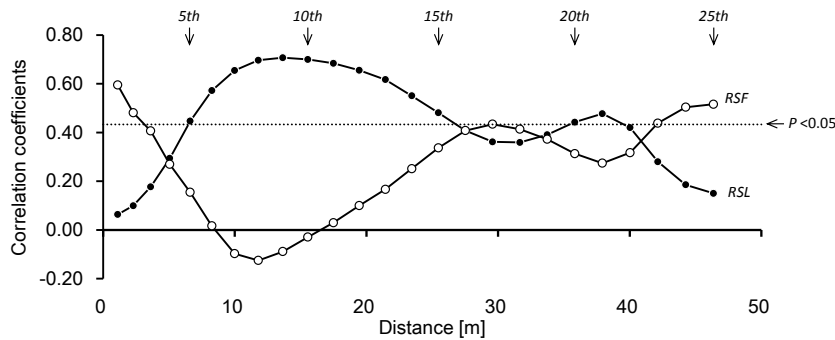


図 3 加速度とステップ長変化率(RSL)、ステップ頻度変化率(RSF)との間の 1 歩ごとの相関係数の変化

第 3 章

研究課題 II 全力疾走の加速局面における加速能力と脚の力発揮能力との関係

1. 背景と目的

100m 走において高いパフォーマンスを達成するためには、非常に大きな力やパワーの発揮が必要とされることから (Bosch & Klomp 2005), それらの能力を間接的かつ簡便に評価するために種々の鉛直ジャンプ (Squat Jump: SJ, Counter Movement Jump: CMJ, Rebound Jump: RJ, Drop Jump: DJ) が用いられてきた (Bissas & Havenetidis 2008, Kale et al. 2009, Smirniotou et al. 2008, Young 1995). 100m 走のスタート直後と最高速度局面では、スプリンターの姿勢や地面に対して力を発揮できる時間が大きく異なり、必要とされる体力要素も異なると考えられる (Bosch & Klomp 2005, Delecluse 1997, Mero 1988, Mero & Komi 1986, Weyand et al. 2000). 先に述べた種々の鉛直ジャンプは、異なる力-パワー発揮能力を評価できることから (Bobbett et al. 1986b, Fukashiro & Komi 1987, Komi & Bosco 1978), それらを用いて加速局面の異なる区間における疾走能力が間接的に評価されている (Bret et al. 2002, Bissas & Havenetidis 2008, Kale et al. 2009, Smirniotou et al. 2008, Young et al. 1995). SJ や CMJ は加速局面の初期における疾走能力を評価するのに有用であるとされ (Bret et al. 2002, Smirniotou et al. 2008), RJ や DJ はより最高速度に近い区間の疾走能力を評価できるとされている (Bret et al. 2002, Bissas & Havenetidis 2008). これらの鉛直ジャンプは、主に股関節、膝関節、足関節の伸展および底屈によって遂行される。また、これらの鉛直ジャンプ遂行における足関

節の貢献は小さくないが(下肢三関節においてなされる総仕事の 35—40%) (Bobbert et al. 1986b, Bobbert et al. 1987, Jacobs et al. 1996), 膝関節において発揮されるパワーが二関節筋である腓腹筋の働きによって足関節へ流入する(足底屈によってなされる仕事の 25%) (Bobbert et al. 1986a, Jacobs et al. 1996). さらに, CMJ の跳躍高は股関節および膝関節の等張性最大伸展力との間に有意な関係がみられたが, 足関節の等張性最大底屈力との間には有意な関係がみられなかったことが報告されている (Jaric et al. 1989). したがって, これら先行研究の結果は, これまで用いられてきた鉛直ジャンプの遂行能力が主に股関節および膝関節の伸展筋力に依存していることを示唆しており, それらの鉛直ジャンプのパフォーマンスが足関節における力の発揮能力を直接的に反映していない可能性がある. しかし, 足底屈筋群は, スプリント走における長いストライドや高い最高速度を獲得するための, 大きな鉛直力の発揮に対して重要な役割を果たす (Bezodis et al. 2008, Dorn et al. 2012, Stefanyshyn & Nigg 1998). 足底屈筋群の力発揮能力を直接評価する鉛直ジャンプとして, 股関節および膝関節を伸展位で固定して行う足底屈ジャンプが用いられているが (Bosco et al. 1982, Fukashiro et al. 2005, Yamazaki et al. 1989), このような足底屈のみで遂行する鉛直ジャンプの能力と疾走能力との関係は明らかではない. したがって, これまで用いられてきた鉛直ジャンプに加えて, 足関節の力発揮能力が反映される鉛直ジャンプテストを用いて, 下肢の力-パワー発揮能力を評価することで, 鉛直ジャンプによる加速局面の疾走能力の間接的推定をより適切に行えると考えられる. これらの背景に加えて, 諸言で述べたように, これまでの研究では, 疾走能力を評価指標とし加速局面全体にわたる詳細な分析は行われていない. したがって, 1 歩ごとの加速能力と鉛直ジャンプ能力との間の関係を検討することは, 疾走能力に影響する体力的な特性をより実践的に評価できるだろう.

本課題では, 加速能力と鉛直ジャンプ能力との間の関係について検討し, 効果的な加速を実現するための下肢の力発揮特性について明らかにすることを目的とした.

2. 方法

研究課題 II の実験は, 研究課題 I の実験に引き続いて行ったため, 研究課題 I と重複する方法については割愛する.

1) 被験者

被験者は, 大学陸上競技部に所属する男子短距離選手 19 名 (年齢 20.1 ± 1.2 yr, 身長 1.75 ± 0.04 m, 体重 66.1 ± 4.0 kg, 100m 走自己最高記録 11.19 ± 0.34 s) とした.

2) 加速能力の評価

研究課題 I において算出した 1 歩ごとの加速度を加速能力の評価指標として用いた.

3) 鉛直ジャンプ能力の評価

被験者は, 60m 走試技の後, 十分な休息をとり, 4 つの鉛直ジャンプ試技 (SJ, CMJ, RJ, Ankle Jump: AJ) を行った. 全ての鉛直ジャンプは, 腰に手を当てた状態で行わせ, 上肢の動作による影響を排除した. SJ, CMJ は全力で 2 試技ずつ行わせ, 記録 (跳躍高) の良かった試技を採用した. RJ では, 6 回の連続跳躍 (短い支持時間で高く跳ぶように指

示)を行わせ、後述するインデックスの値が最も高かった跳躍の値を採用した。AJ では、股関節、膝関節を伸展位で固定するように指示し、足関節と中足趾関節の底屈のみで 6 回の連続跳躍を行わせ、RJ と同じくインデックスの値が最も高かった跳躍の値を採用した。各試技に際しては、測定者が被験者のジャンプを目視で評価し、適切に遂行されていないと判断した場合は再度試技を行わせた。各鉛直ジャンプの滞空時間および接地時間は、マットスイッチ (Multi Jump Tester; DKH Co., Tokyo, Japan) を用いて計測した。また、滞空時間から Bosco et al. (1983) の方法により跳躍高を求めた。SJ, CMJ は跳躍高をジャンプ能力の変数とし、RJ および AJ に関しては、跳躍高、接地時間、さらに跳躍高を接地時間で除したインデックスを変数とした。

4) 統計処理

1 歩ごとの加速度と鉛直ジャンプの記録との間の関係について検定するために、ピアソンの積率相関係数を算出した。なお、有意水準は 5%未満とした。

3. 結果

表 1 は、60m 走のタイムと各鉛直ジャンプの記録および変数間の相関係数を示したものである。60m 走タイムと、SJ の跳躍高、CMJ の跳躍高、AJ のインデックスと跳躍高との間に有意な負の相関がみられた。鉛直ジャンプ変数間においては、SJ の跳躍高と CMJ の跳躍高および RJ のインデックスとの間、CMJ の跳躍高と RJ のインデックスとの間に有意な相関がみられた。また、RJ のインデックスは接地時間および跳躍高との間に有意な相関がみられたが、AJ においては跳躍高との間にのみ有意な相関がみられた。AJ の各変数とその他の鉛直ジャンプの変数との間には、RJ の接地時間と AJ の接地時間の間にのみ有意な正の相関がみられた。

表 1 60m 走タイムと鉛直ジャンプ記録

		n=19							
Variables [unit]	Mean $\pm$ SD	Correlation coefficients							
		60 m sprint	SJ	CMJ	RJ	RJCT	RJH	AJI	AJCT
Time of 60 m sprint test (60 m sprint) [s]	7.54 $\pm$ 0.27								
Squat jump (SJ) [m]	0.44 $\pm$ 0.04	-0.55*							
Counter movement jump (CMJ) [m]	0.50 $\pm$ 0.05	-0.52*	0.83*						
Index (RJI) [m/s]	2.634 $\pm$ 0.373	-0.07	0.42	0.36					
Rebound jump									
Contact time (RJCT) [s]	0.149 $\pm$ 0.010	-0.20	0.05	0.19	-0.56*				
Height (RJH) [m]	0.39 $\pm$ 0.05	-0.22	0.53*	0.56*	0.88*	-0.11			
Index (AJI) [m/s]	1.132 $\pm$ 0.268	-0.49*	0.29	0.17	0.13	-0.14	0.10		
Ankle Jump									
Contact time (AJCT) [s]	0.132 $\pm$ 0.008	-0.10	-0.03	-0.01	-0.21	0.52*	0.02	-0.20	
Height (AJH) [m]	0.15 $\pm$ 0.03	-0.53*	0.29	0.17	0.08	0.00	0.11	0.97*	0.05

*: $P < 0.05$

図 4 は、1 歩ごとの加速度と SJ, CMJ の跳躍高、RJ, AJ のインデックスとの間の相関係数の変化を示したものである。加速度と SJ の跳躍高との間には、6 から 10 歩目において有意な正の相関がみられた。加速度と CMJ の跳躍高との間には、5 から 11 歩目において有意な正の相関がみられた。加速度と RJ のインデックスとの間には、有意な相関はみられなかった。加速度と AJ のインデックスとの間には、14 から 19 歩目において有意な正の相関がみられた。

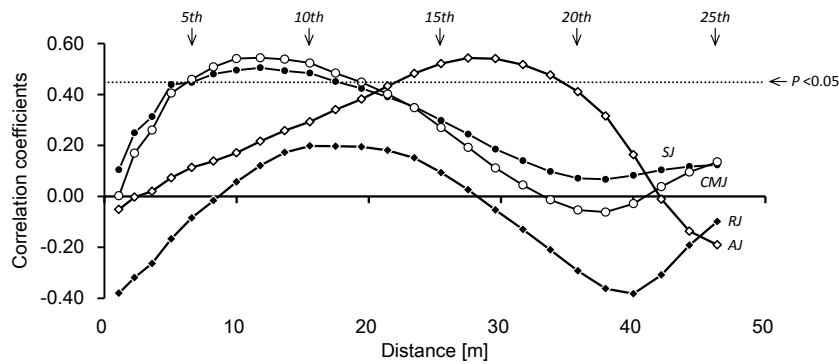


図 4 加速度と鉛直ジャンプ変数との間の 1 歩ごとの相関係数の変化

第 4 章

研究課題 III 全力疾走の加速局面における加速能力と身体部分長との関係

1. 背景と目的

これまで、計測が容易な形態的特性として、身長や身体各部の長軸方向の長さが計測されている。特に、下肢の各部分長は、それが短いことにより素早く動かすことができ、ステップ頻度を高めるのに有利であると考えられ、それが長いことにより支持距離を長くすることができ、ステップ長を伸ばすのに有利であると考えられている。このように、高い疾走能力の獲得に対して、下肢の部分長の長短がトレードオフの関係にあると考えられていることから (Watts et al. 2012)、議論の対象とされてきた。ところが、身長と 100m 走のタイムや競技レベルとの間や、下肢長と競技レベルの間には関係性がないことが報告されている (Baumann 1976, Volkov & Lapin 1979)。また、下肢長とステップ長およびステップ頻度どちらとの間にも有意な相関がなかったことも報告されている (Debaere et al. 2013)。一方、近年の研究では、一般人との比較においてスプリンターはより長い足趾を有し、下腿が短いこと (Lee & Piazza 2009)、同様に一般人との比較においてスプリンターは、より長い前足部長を有していることが報告されている (Baxter et al. 2012)。スプリンターのみを対象とした研究では競技レベルと足長に関係性がみられなかったという報告があるものの (Karamanidis et al. 2011)、シミュレーションによって足趾を長くした場合、加速疾走中の支持期において発揮される加速力積が増加する結果が示されており (Lee & Piazza 2009)、より長い前足部や足趾が疾走に有利である蓋然性は高い。しかし、これまでの研究において、身体各部の部分長を包括的に計測し、疾走能力との関係について明らかにした研究は見当たらない。また、諸言で述べたように、加速局面における疾走能力との関係を適切に評価するためには、加速度を疾走能力の指標として用いることが有効であろう。

本課題では、加速能力と身体部分長との間の関係について検討し、効果的な加速に有利となる身体特性について明らかにすることを目的とした。

2. 方法

研究課題 III の実験は、研究課題 I の実験に引き続いて行ったため、研究課題 I と重複する方法については割愛する。

1) 被験者

被験者および手続きに関しては研究課題Ⅰと同様であった。

2) 加速能力の評価

研究課題Ⅰにおいて算出した 1 歩ごとの加速度を加速能力の評価指標として用いた。

3) 身体部分長の評価

60m 走試技の翌日、被験者の身体部分長の計測を行った。図 5 は、本課題において計測された身体部分長を示したものである。肩峰高、転子高については、アントロポメータを用いて計測した。大腿長は、転子高から脛骨外側顆上縁高を減じることで求めた。下腿長は、脛骨外側顆上縁高から外果最突出部高を減じることで求めた。下腿大腿比は、下腿長を大腿長で除することで求めた。足部の各部分長を計測するために、被験者を測定用紙上に静止立位させ、足部の輪郭を水平面に投影するように測定用紙に描き、同時に第 1 中足骨頭と第 5 中足骨頭、内果最突出部、外果最突出部を水平面に投影した点を記録した。得られた記録用紙から、物差しを用いて足長、前足長、中足長、後足長を図 5 に示したように計測した。なお、計測者に起因する誤差を排除するために、1 名の計測者が全ての被験者の計測を担当した。

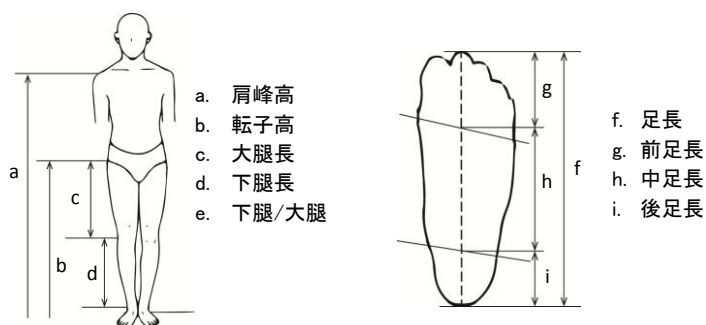


図 5 計測した身体部分の一覧

4) 統計処理

1 歩ごとの加速度と各部分長との間の関係について検定するために、ピアソンの積率相関係数を算出した。なお、有意水準は 5%未満とした。

3. 結果

表 2 は、計測した身体各部分長の記録および 60m 走タイムとの間の相関係数を示したものである。60m 走タイムは足長および前足長との間に有意な負の相関がみられたが、その他の変数との間には有意な相関はみられなかった。

図 6 は、1 歩ごとの加速度と肩峰高、転子高、大腿長、下腿長、下腿/大腿比との間の相関係数の変化を示したものである。加速度と肩峰高および大腿/下腿比との間には、有意な相関関係はみられなかった。加速度と転子高との間には、6 から 8 歩目および 22 から 25 歩目において有意な負の相関がみられた。加速度と大腿長との間には、7 から

10 歩目および 23 から 25 歩目において有意な負の相関がみられた。加速度と下腿長との間には、22 から 23 歩目において有意な負の相関がみられた。

表 2 身体部分長

Variables [unit]	Mean $\pm$ SD	Correlation coefficients
		60 m sprint
肩峰高 [mm]	1399 $\pm$ 33	-0.02
転子高 [mm]	887 $\pm$ 22	-0.07
大腿長 [mm]	432 $\pm$ 13	-0.06
下腿長 [mm]	398 $\pm$ 14	-0.09
下腿/大腿比 [%]	92 $\pm$ 4	-0.04
足長 [mm]	257 $\pm$ 8	-0.57*
前足長 [mm]	79 $\pm$ 5	-0.55*
中足長 [mm]	119 $\pm$ 4	-0.29
後足長 [mm]	58 $\pm$ 3	-0.16

*: $P < 0.05$

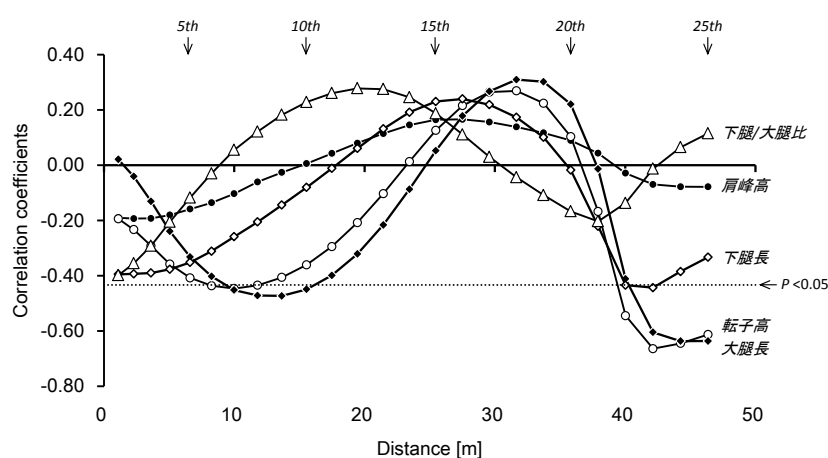


図 6 加速度と身体部分長(肩峰高, 転子高, 大腿長, 下腿長, 下腿/大腿比)との間の 1 歩ごとの相関係数の変化

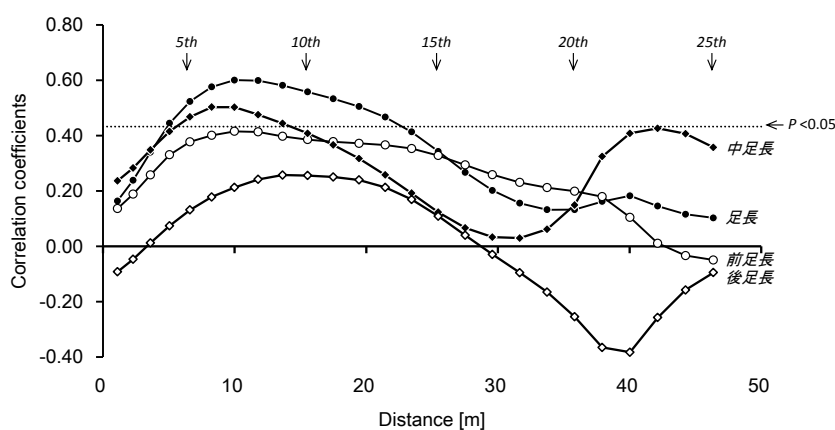


図 7 加速度と身体部分長(足長, 前足長, 中足長, 後足長)との間の 1 歩ごとの相関係数の変化

図 7 は、1 歩ごとの加速度と足長, 前足長, 中足長, 後足長との間の相関係数の変化を示したものである。加速度と足長との間には、4 から 13 歩目において有意な正の相関がみられた。加速度と中足長との間には、5 から 9 歩目にお

いて有意な負の相関がみられた。加速度と前足長および後足長との間には、有意な相関関係はみられなかった。

第 5 章

研究課題 IV 全力疾走の加速局面における加速能力と疾走動作との関係

1. 背景と目的

ヒトは、身体質量の大きな割合を占め、長軸方向に長い頭部および体幹部を有しているので、その他の二足で移動運動を遂行する走鳥類などの動物に比べ、立位時に身体重心が股関節に対して高い場所に位置する (Hutchinson 2004)。このようなヒトが持つ形態的特性により、100m 走のように静止した状態から大きな加速度を発揮して疾走するためには、上体を大きく前傾させることが必要となる (Bosch & Klomp 2005, Debaere et al. 2012, Mero et al. 1992)。一方で、一定速度での疾走は、垂直に近い身体姿勢を保持して遂行される (Bosch & Klomp 2005, Mero et al. 1992, Schache et al. 1999)。また、支持時間や支持期における減速時間、加速時間の割合は、スタート直後と高速条件下では大きく異なる (Bosch & Klomp 2005, Dillman 1975, Mero et al. 1992)。したがって、100m 走の加速局面のように全力に近い加速から速度の変化が終息に近づく最高速度局面へ移行する連続運動において、転倒せずに効率的に加速するためには、時々刻々と連続して姿勢を変化させ、脚の振舞わせ方も変化させていかなければならない (Bosch & Klomp 2005, Delecluse 1997, Dillman 1975, 羽田ほか 2003, Mero et al. 1992, 森丘ほか 1997, 村木と宮川 1973, 小木曾ほか 1998)。加速局面の初期においては、支持期における膝関節伸展のタイミングを遅らせることや (Jacobs & van Ingen Schenau 1992)、支持点と身体重心を結んだ線分がより前傾していること (Kugler 2006)、下肢三関節の伸展、底屈角速度を大きくすること (Baumann et al. 1976)、離地時の体幹前傾が大きいこと (Mann 2011) などが効果的に加速するための技術として挙げられている。一方、最高速度付近において高い疾走速度を獲得するためには、支持脚股関節の伸展や大腿の後方へのスイング速度を大きくすることや (Kunz & Kaufman 1981, 伊藤ほか 1998, Mann 2011, Mann & Herman 1985)、脚全体のスイング速度を大きくすること (伊藤ほか 1998)、接地時のつま先と身体重心の水平距離を短くすること (Deshon & Nelson 1964, Mero et al. 1992, Novacheck 1998)、接地時の両膝関節間の水平距離を短くすること (Bushnell & Hunter 2007)、離地時の膝関節角度が大きくなるようにすること (Mann 2011, Mann & Hermann 1985) などが重要と指摘されている。このように、スタート直後および最高速度付近における高い疾走能力獲得のための疾走動作に関する示唆は数多く存在するものの、スタートから最高速度に至る過程である加速局面における疾走動作と疾走能力の関係について論じた研究は非常に少ない (Hunter et al. 2005, Johnson & Buckley 2001, Stefanyshyn & Nigg 1998)。また、これらの先行研究は特定の 1 歩や区間における疾走動作と疾走能力の関係について論じているのみである。スタートから最高速度に達するまでの疾走動作の変化に関する研究は行われてきたが (馬場ほか 2000, Cavagna et al. 1971, Fukunaga et al. 1981, 羽田ほか 2003, 伊藤ほか 1997, 金子と北村 1975, 森丘ほか 1997, 村木と宮川 1973, 小木曾ほか 1998, 高木と田口 1994)、連続的に変化する 1 歩ごとの疾走動作と疾走能力の関係について論じた研究は見当たらない。加速能力を向上させるために、どの区間でどのような疾走動作に留意するべきか、また加速にともない留意すべき動作がどのように遷移していくのかを明らかにすることは、100m レースの組み立てや効果的なトレーニングプログラムの構築、適切なトレーニング手段の選択に寄与

できると考えられる.

したがって、本課題では、加速能力と疾走動作との間の関係について検討し、効果的な加速に重要となる疾走動作について明らかにすることを目的とした.

2. 方法

1) 被験者

被験者は、陸上競技 100m を専門とする男子短距離選手 12 名 (年齢 21.6 ± 2.6 yr, 身長 1.74 ± 0.04 m, 体重 68.1 ± 4.2 kg, 100m 走自己最高記録 10.71 ± 0.33 s) とした. 実験に先立ち, 実験の要旨, 内容および危険性について被験者へ説明し, 実験参加の同意を得た.

2) 疾走動作の測定

ウォーミングアップの後, 各被験者にスターティングブロックから 60m の全力走を行わせた. 被験者は, 各自のスパイクシューズを着用して試技を行った. 60m 走のタイムは, スタートピストルに接続した光電管システムを用いて計測した. 60 台の赤外線カメラによって構成された Vicon システム (Vicon Motion Systems, Oxford, UK) を用いて, 60m 走中の疾走動作をスタート直後から 50m 付近まで計測した. なお, ブロッククリアランス局面は計測の対象外とした. 60m 走に先立ち, 被験者の身体各部に 47 個の反射マーカを貼付した (Marquez et al. 2009). 測定によって得られた各マーカの座標は, Wells and Winter (1980) の方法により最適遮断周波数を決定し, Butterworth low-pass filter を用いて平滑化を行った. 実際の遮断周波数は, 17.5 から 25Hz であった.

平滑化した座標データから, 阿江 (1996) の身体部分慣性係数を用いて部分および全身の重心位置, 部分の慣性モーメントを算出した.

3) 変数の抽出

疾走速度は, 一歩ごとの身体重心平均水平速度として求めた, 疾走動作に関する変数は, 表 3 に示した先行研究を参考とし, 高い疾走速度や加速度獲得のために重要と考えられるものを抽出した. 実際に独立変数として抽出し, 算出した変数は, 支持期における大腿, 下腿, 足部の平均水平獲得速度, 支持期における身体重心高 (身長比) の平均, 支持期における支持脚全体の平均角速度, 支持期における股関節, 膝関節, 足関節の最大伸展および最大底屈角速度, 離地時の足部接地点と身体重心を結んだ線分の角度, 接地時の足部接地点と身体重心の水平距離, 離地時の膝関節角度, 離地時の体幹角度, 接地時の両膝関節間の水平距離, スイング脚股関節の最大屈曲角速度であった. 算出した疾走速度を含む各変数は, 左右差や変動性の影響を排除するために, 4 次の多項式で近似し, 変数の変化率に関しては一次導関数として求めた. 実際に算出できた全被験者の各変数は, 24 歩目 (スイング脚の変数は 23 歩目) までであった.

4) 統計処理

1 歩ごとの速度および加速度と各変数およびその変化率との間の関係について検定するために, ピアソンの積率

相関係数を算出した。なお、有意水準は 5%未満とした。

表 3 疾走能力向上に重要とされる疾走動作

Sprint phase	Authors	Important technical characteristics for high performance sprinting
Start & initial acceleration	Baumann (1976)	下肢三関節の伸展, 底屈角速度を大きく
	Kugler & Janshen (2010)	離地時の足部接地点と身体重心を結んだ線分がより前傾
	Mann (2011) 1, 2 歩目	接地時の足部接地点と身体重心の水平距離が小さい(マイナス) 離地時の支持脚膝関節角度が小さい 離地時の体幹前傾が大きい
14m	Johnson & Buckley (2001)	支持期後半の膝関節伸展角速度を大きく 離地直前の足関節の底屈角速度を大きく
16m	Hunter et al. (2005)	支持脚股関節伸展角速度が大きい
Maximal speed sprinting	Bushnell & Hunter (2007)	接地時の両膝関節間の水平距離が短い
	Deshon & Nelson (1964)	接地時の足部接地点と身体重心の水平距離が小さい
	Kunz & Kaufman (1981)	支持脚大腿の平均角速度が大きい
	Mann (2011)	接地時の両膝関節間の水平距離が短い 離地時の膝関節角度が小さい
	Mero et al. (1992)	接地時の足部接地点と身体重心の水平距離が小さい
	Novacheck (1998)	接地時の足部接地点と身体重心の水平距離が小さい
	伊藤ほか(1998) (男子選手の結果に基づく)	支持脚股関節最大伸展角速度が大きい 支持脚全体の後方への最大角速度が大きい

3. 結果

60m 走の記録は, 7.24 ± 0.16 s であった。図 8 は, 近似した疾走速度と加速度の変化を示したものである。疾走速度は, スタート直後急激に増加し, その後は緩やかに増加した。最高速度は, $10.04 \pm 0.30 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (24 歩目) であった。

図 9 は, 支持期における大腿(a), 下腿(b), 足部(c)の平均水平獲得速度とその変化率の変化を示したものである。大腿の平均水平獲得速度は, スタート直後急激に増加した後, 18 歩目において最高値 ($4.55 \pm 0.23 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) に達し, その後は緩やかに減少した。下腿の平均水平獲得速度は, スタート後大きく増加した後, 増加の度合いは弱まるが 24 歩目まで増加した ($3.49 \pm 0.21 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。足部の平均水平獲得速度は, スタート後増加の度合いが弱まりながら 24 歩目まで増加した ($2.31 \pm 0.18 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

図 10 は, 支持期における平均身体重心高(身長比)の変化を示したものである。支持期における平均身体重心高(身長比)は, スタート直後急激に増加し, 19 歩目において最高値 ($54.8 \pm 0.9\%$) に達し, その後わずかに減少して 24 歩目に達した。

図 11 は, 支持期における脚全体の平均角速度とその変化率の変化を示したものである。支持期における脚全体の平均角速度は, スタート直後急激に増加し, その後増加の度合いが緩やかになり, 24 歩目 ($617 \pm 30 \text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$) まで増加した。

図 12 は, 支持期における股関節(a), 膝関節(b), 足関節(c)の最大伸展, 底屈角速度とその変化率の変化を示したものである。支持期における股関節の最大伸展角速度は, スタート後急激に増加し, 14 歩目で最高値 ($1008 \pm 63 \text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$) に達した後, 24 歩目まで減少した。支持期における膝関節の最大伸展角速度は, スタート後緩

やかに増加し, 13 歩目で最高値 ($727 \pm 71 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-1}$) に達した後, 23 歩目までわずかに減少した. 支持期における足関節の最大底屈角速度は, スタート直後から大きな値を示し, その後緩やかに増加し, 19 歩目で最高値 ($1441 \pm 159 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-1}$) に達した後に, わずかに減少した.

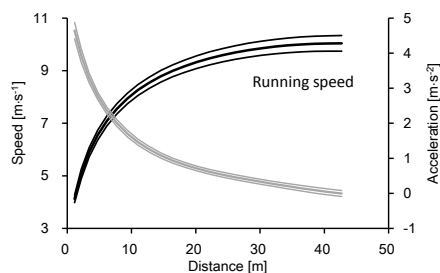


図 8 疾走速度(黒)と加速度(灰)の変化

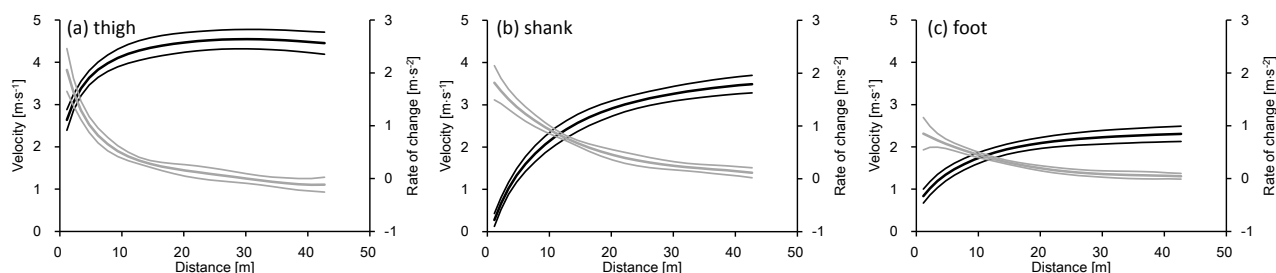


図 9 支持期における大腿(a), 下腿(b), 足部(c)の平均水平獲得速度(黒)とその変化率(灰)の変化

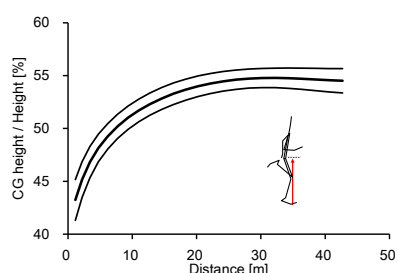


図 10 支持期における平均身体重心高(身長比)の変化

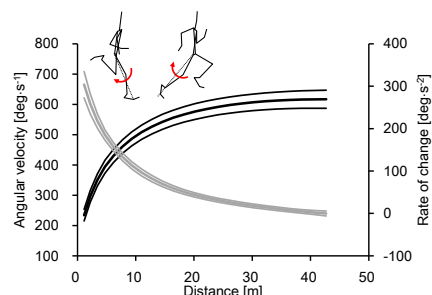


図 11 支持期における脚全体の平均角速度(黒)とその変化率(灰)の変化

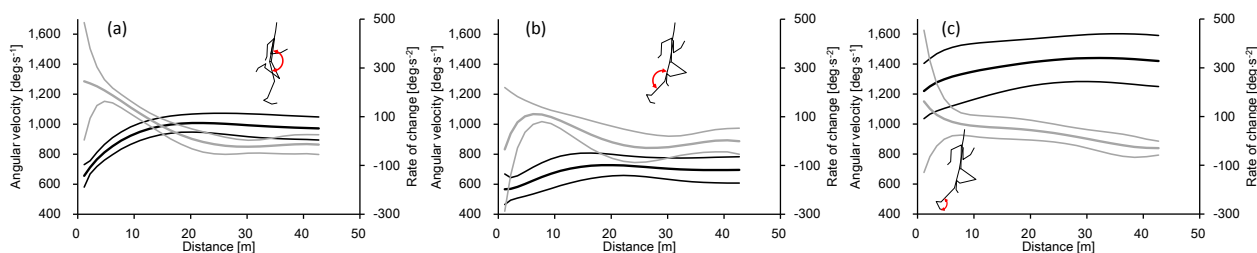


図 12 支持期における股関節(a), 膝関節(b), 足関節(c)の最大伸展, 底屈角速度(黒)とその変化率(灰)の変化

図 13 は, 離地時の足部接地点と身体重心を結んだ線分の角度(a), 接地時の足部接地点と身体重心の水平距離(b), 離地時の膝関節角度(c), 離地時の体幹角度(d), 接地時の両膝関節間の水平距離(e)の変化を示したものである. 離地時の足部接地点と身体重心を結んだ線分の角度は, スタート直後急激に増加し, 5 歩目以降は増加が緩

やかになり, 24 歩目まで増加した ($56.8 \pm 1.3 \text{deg}$). 接地時の足部接地点と身体重心の水平距離は, スタート直後急激に増加し, 4 歩目以降は値が正に転じ, 6 歩目以降は増加が緩やかになり, 24 歩目まで増加した ($0.26 \pm 0.04 \text{m}$). 離地時の膝関節角度は, スタート後 3 歩目まで増加し ($161.6 \pm 4.9 \text{deg}$), その後緩やかに 24 歩目まで減少した ($156.0 \pm 6.3 \text{deg}$). 離地時の体幹角度は, スタート後大きく増加し, 11 歩目前後から増加が緩やかになり, 24 歩目まで増加した ($77.8 \pm 4.7 \text{deg}$). 接地時の両膝関節間の水平距離は, スタート直後急激に減少し, 3 歩目以降は減少が緩やかになり, 19 歩目において最小値 ($0.17 \pm 0.05 \text{m}$) になった後に, 24 歩目まで増加した ($0.19 \pm 0.05 \text{m}$).

図 14 は, スイング脚股関節の最大屈曲角速度とその変化率の変化を示したものである. スイング脚股関節の最大屈曲角速度は, スタート直後急激に増加し, 8 歩目において最大値 ($818 \pm 55 \text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$) に達し, その後減少したが, 17 歩目以降に増加に転じ, 23 歩目まで増加した.

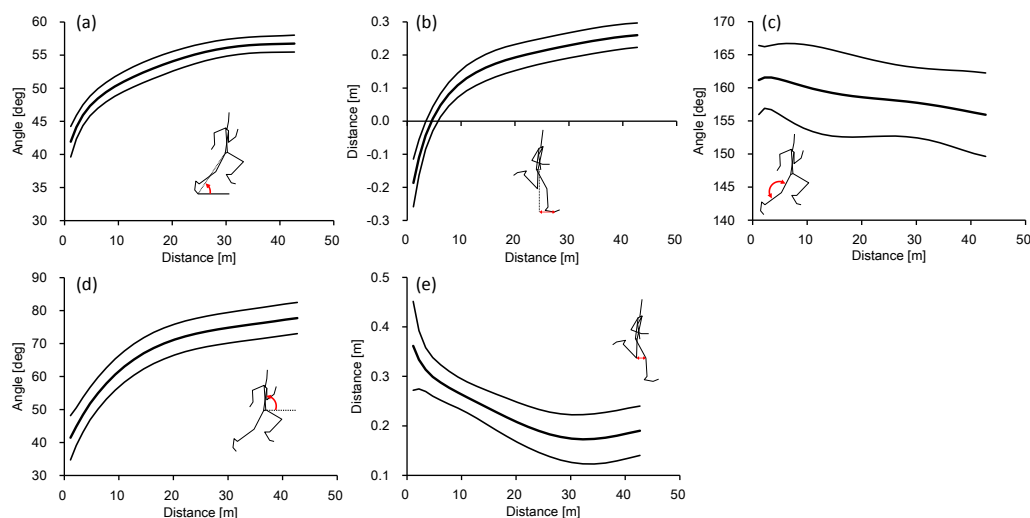


図 13 離地時の足部接地点と身体重心を結んだ線分の角度(a), 接地時の足部接地点と身体重心の水平距離(b), 離地時の膝関節角度(c), 離地時の体幹角度(d), 接地時の両膝関節間の水平距離(e)の変化

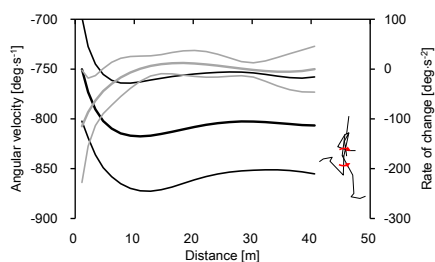


図 14 スイング脚股関節の最大屈曲角速度(黒)とその変化率(灰)の変化

図 15 は, 加速度と支持期における大腿, 下腿, 足部の平均水平獲得速度の変化率との間の相関係数の変化を示したものである. 加速度と大腿の平均水平獲得速度の変化率との間には, 8 歩目から 10 歩目において有意な正の相関があり, 18 歩目においては有意な負の相関を示した. 加速度と下腿の平均水平獲得速度の変化率との間には, 3 歩目と 8 から 20 歩目において有意な正の相関がみられた. 足部の平均水平獲得速度の変化率は, 13 歩目から 20 歩目において加速度との間に有意な正の相関を示した.

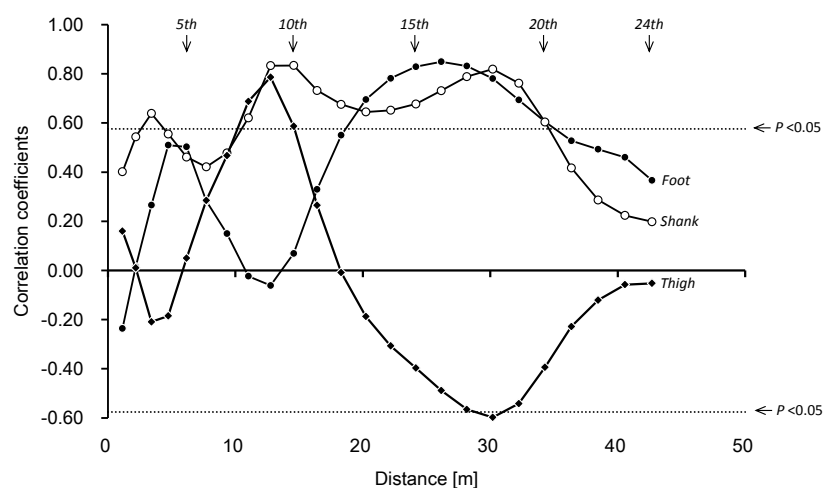


図 15 加速度と支持期における大腿, 下腿, 足部の平均水平獲得速度の変化率との間の 1 歩ごとの相関係数の変化

図 16 は, 加速度と支持期における平均身体重心高(身長比)との間の相関係数の変化を示したものである. 加速度と平均身体重心高(身長比)との間には, 3 歩目および 4 歩目において有意な負の相関があった.

図 17 は, 加速度と支持期における脚全体の平均角速度の変化率との間の相関係数の変化を示したものである. 加速度と支持期における脚全体の平均角速度の変化率との間には常に有意な正の相関があった.

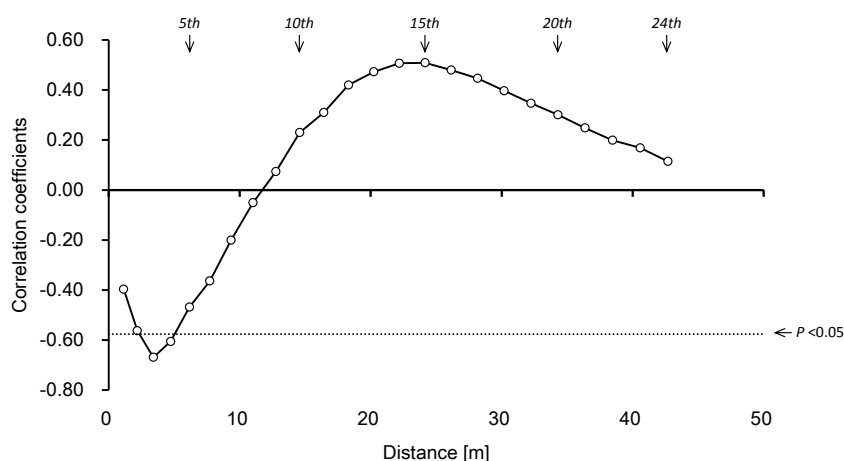


図 16 加速度と支持期における平均身体重心高(身長比)との間の 1 歩ごとの相関係数の変化

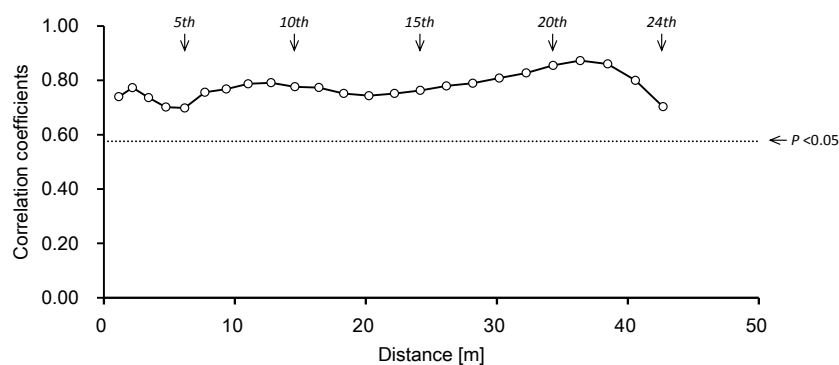


図 17 加速度と支持期における脚全体の平均角速度の変化率との間の 1 歩毎の相関係数の変化

図 18 は、加速度と支持期における股関節、膝関節、足関節の最大伸展、底屈角速度の変化率との間の相関係数の変化を示したものである。加速度と支持期における股関節の最大伸展角速度の変化率との間には、15 歩目と16 歩目において有意な負の相関がみられ、加速度と支持期における膝関節の最大伸展角速度の変化率との間には、14 歩目から17 歩目において有意な負の相関がみられた。加速度と支持期における足関節の最大底屈角速度の変化率との間には、有意な相関関係は示されなかった。

図 19 は、加速度と離地時の足部接地点と身体重心を結んだ線分の角度(a)、接地時の足部接地点と身体重心の水平距離(b)、離地時の膝関節角度(c)、離地時の体幹角度(d)、接地時の両膝関節間の水平距離(e)との間の相関係数の変化を示したものである。加速度と接地時の足部接地点と身体重心の水平距離との間には、10 歩目から24 歩目まで有意な負の相関があった。加速度と離地時の体幹角度との間には、4 歩目から7 歩目まで有意な負の相関がみられた。接地時の両膝関節間の水平距離は、9 歩目から16 歩目および21 歩目から23 歩目において加速度との間に有意な負の相関があった。加速度とその他の変数との間には有意な相関関係はみられなかった。

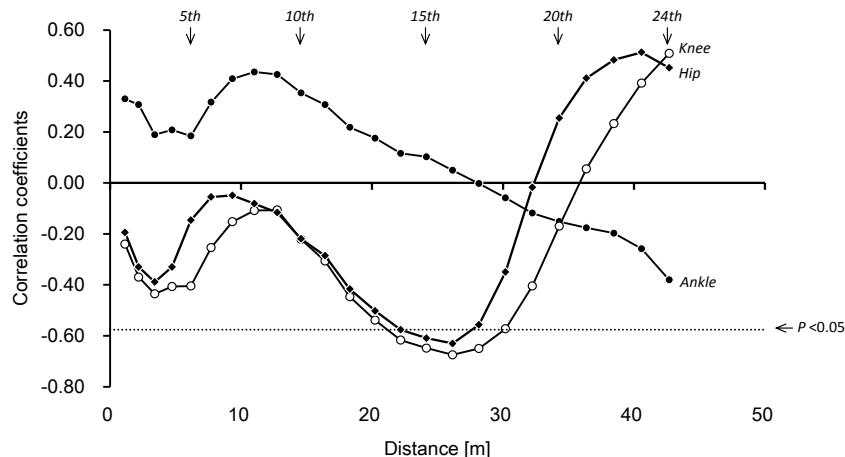


図 18 加速度と支持期における股関節、膝関節、足関節の最大伸展、底屈角速度の変化率との間の1 歩ごとの相関係数の変化

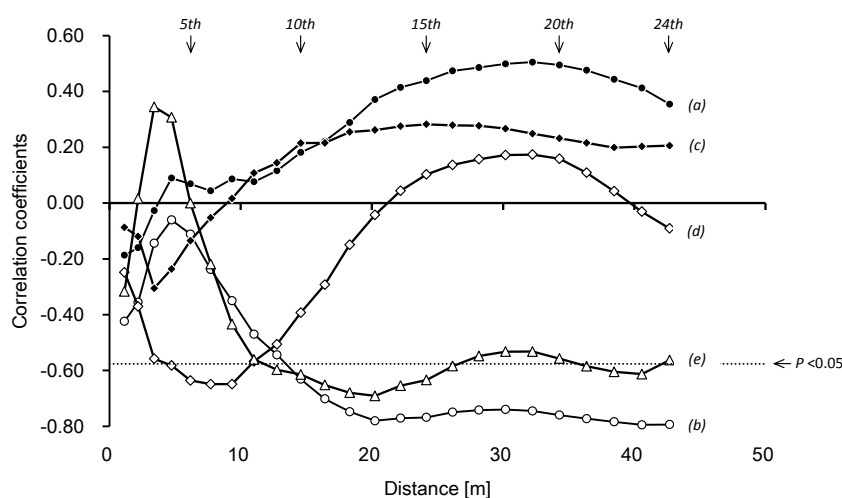


図 19 加速度と離地時の足部接地点と身体重心を結んだ線分の角度(a)、接地時の足部接地点と身体重心の水平距離(b)、離地時の膝関節角度(c)、離地時の体幹角度(d)、接地時の両膝関節間の水平距離(e)との間の1 歩ごとの相関係数の変化

図 20 は、加速度とスイング脚股関節最大屈曲角速度の変化率との間の相関係数の変化を示したものである。加速度とスイング脚股関節最大屈曲角速度の変化率との間には有意な相関関係はみられなかった。

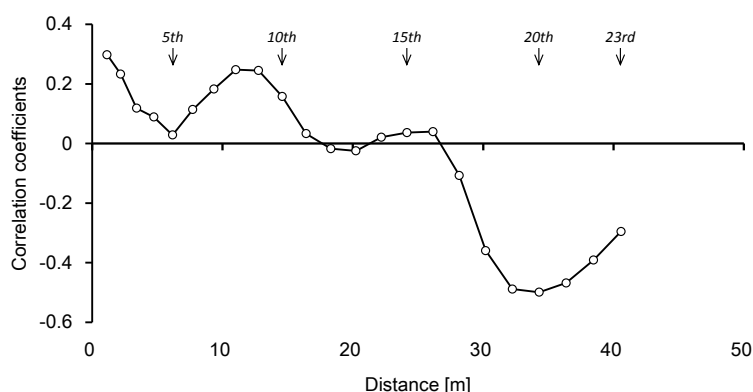


図 20 加速度とスイング脚股関節最大屈曲角速度変化率との間の 1 歩ごとの相関係数の変化

第 6 章

総合考察

本研究では、100m 走のパフォーマンス向上のために加速局面全体にわたる加速度と spatiotemporal 変数、体力特性、身体の形態的特徴、疾走動作との間の関係について検討し、多角的な側面から加速能力向上のための実践的示唆を得ることを目的とした。研究課題 I から III と IV では、異なる被験者のグループを対象として実験を行ったが、ここでは研究課題 I から III の結果に研究課題 IV の結果をあてはめる形で考察を進める。

本研究では、これまで疾走能力の指標として一般的に用いられてきた疾走速度ではなく、加速度を評価の指標とした。図 21 は、疾走速度と支持期における大腿、下腿、足部の平均水平獲得速度との間の相関係数の変化を示したものであるが、加速度とそれらの変数の変化率との間の相関係数の変化(図 15)と比較すると大きく異なることがわかる。疾走速度と下肢各部の獲得速度の関係をみると、疾走速度と大腿の平均水平獲得速度との間には 5 歩目から 20 歩目まで有意な相関関係があるが、加速度と大腿の平均水平獲得速度の変化率との間には 8, 9 歩目以外に有意な正の相関はみられなかった(図 15)。この場合、スタート直後と最高速度付近以外の局面において大腿が獲得する水平速度は高い疾走速度に必要であるが、大腿が獲得する水平速度を大きく増加させることは効果的な加速に正の作用を持たないと解釈することができる。以下では、効果的な加速に必要な特性を明らかにするという観点から、加速度と各変数との関係について考察を加えるが、上記の点について留意する必要がある。

本研究では、加速度を評価の指標としたが、研究課題 I の 60m 走において、最高疾走速度と 1 歩ごとの加速度の間には、4 歩目から 24 歩目まで有意な正の相関があり(図 2)、スタート直後の加速を除く加速局面全体にわたる加速能力が高い最高速度に到達するために重要であることが示された。また、スタート直後の加速にはステップ頻度の増加、5 歩目から 15 歩目においてはステップ長を増加させることが効果的な加速のために重要であることがわかった(図 3)。16 歩目以降においては、ステップ長変化率、ステップ頻度変化率ともに加速度に対して比較的高い相関係数を示し(図 3)、ステップ長変化率とステップ頻度変化率との間に常に負の相関があったことから、ステップ長あるいはス

テップ頻度への依存性は個人ごとに異なると推察される。また、ステップ頻度の平均は、20 歩目において最高値に達しており、16 歩目以降においてステップ頻度への依存性を有する者は、ステップ長の増加が比較的小さいものの、ステップ頻度を維持することで加速していたと考えられる。このように効果的な加速を実現するためには、ステップ長あるいはステップ頻度への依存性を変化させて疾走する必要がある。しかし、スタート直後の加速能力は高い最高速度の獲得に対して重要性が示されなかったことから、スタート直後における加速のステップ頻度に対する依存性に関しては、高い最高速度の獲得が必要となる 100m 走における重要性は低い可能性がある。先行研究では、対象とするグループの被験者のパフォーマンスレベルにばらつきが小さい場合には、疾走能力(疾走速度あるいは記録)がステップ長、ステップ頻度のどちらにも依存性を持たないと報告されている(Debaere et al. 2013, Salo et al. 2011)。本研究の被験者グループのパフォーマンスレベルのばらつきは先行研究よりもやや大きい、加速能力が異なる局面においてステップ長、ステップ頻度への異なる依存性を示した。このような結果は、主に本研究において 1 歩ごとの加速度を疾走能力の評価指標として用いたことに起因すると考えられ、これはレース全体や特定の区間の疾走速度ではなく 1 歩ごとの加速度を評価指標とすることの利点であろう。

加速度とステップ長変化率、ステップ頻度変化率との間の相関関係が有意であるか否かを基準として(図 3)、加速局面全体を加速能力がステップ頻度を高める能力に依存する第 1 加速区間、ステップ長を増加させる能力に依存する第 2 加速区間、依存性が個人ごとに異なる第 3 加速区間に区分することができる。100m 走の加速局面は、これまでもスタートから 60m までの局面を 3 つの区間に分けることが行われ(Debaere et al. 2013, Delecluse 1997, Delecluse et al. 1995a, Delecluse et al. 1995b, 金高ほか 2005)、最高速度に達するまでの加速局面を区分し、それらの区間を意識してレースを組み立て、トレーニングを行うことが実践的に重要であると指摘されている(Debaere et al. 2013, Delecluse 1997, Delecluse et al. 1995a, Delecluse et al. 1995b)。また、それぞれの区間においては、求められる技術や体力が異なるとされ、その区間に必要となる体力特性を向上させ、技術を磨く必要がある(Debaere et al. 2013, Delecluse 1997, Delecluse et al. 1995a)。以下では、高い疾走速度に達するために重要となる疾走動作、必要とされる体力特性、有利となる形態的特徴について、研究課題 I の結果に基づいて区分した 3 つの区間ごとに議論する。

全力疾走における加速中に後方へ発揮できる加速力積は、疾走速度の増加とともに減少するため(Bosch & Klomp 2005)、転倒せずに加速を続けるためには姿勢を直立状態に近づけていくか、次に接地する足を素早く前方へ移動させる必要がある。加速局面において姿勢を直立へ近づけることは、加速力積を減少させ、滞空時間を増加させる蓋然性が高く(Kugler & Janshen 2010)、加速に対して負の作用を及ぼす。したがって、スタート直後の区間(3 歩目まで)においてステップ頻度を大きく高めることができた者の方が、疾走速度を大きく増加させられたと考えることができ、加速度とステップ頻度との間に関係性が生じたと思われる。また、この区間では支持期において下腿を素早く前傾させることで下腿の平均水平獲得速度を大きく増加させ(図 15)、身体重心高を低く維持しながら(図 16)疾走することが効果的な加速に重要であると考えられる。第 1 加速区間においては、加速度と形態的特性との間には有意な相関関係はみられなかった(図 6 および図 7)。長い脚長は大きな慣性モーメントを有することになり、ステップ頻度を高めることに対して不利に働くが、スタート直後の疾走動作では足部が直線的に移動するように脚を動かすので、最高速度付近における疾走時と比較してそれほど大きな慣性力が作用しないと考えられ、加速度との間に関係性が生じなかったと推察される。また、加速度と鉛直ジャンプパフォーマンスとの間にも有意な相関関係はみられなかったが

(図 4), 本研究の鉛直ジャンプテストは全て下肢関節の伸展あるいは底屈筋力を評価しており, 高いステップ頻度の発揮に重要である股関節屈筋群の筋力を評価していない. したがって, ステップ頻度に対して依存性を持つ第 1 加速区間の加速能力と本研究の鉛直ジャンプパフォーマンスとの間には関係性が生じなかったと考えられる.

疾走速度の増加にともなうステップ頻度の増加は, 次第に頭打ち状態になる(図 1). したがって, 連続的な疾走を維持するためには, 次に接地する足を前方へ移動させるための滞空時間を増加させなければならず, 地面反力の鉛直力積を獲得しやすい直立姿勢に近づけていく必要が生じる. 全力疾走では, スタートの後に疾走速度が $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 前後に達すると, 支持期における膝の屈曲が始まり, 支持期前半における減速が大きくなることで弾性エネルギーを蓄積し, 支持期後半に再利用することが始まる(Cavagna et al. 1971, Fukunaga et al. 1981). 本研究では, 4 歩目において $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ を上回り, 4 歩目から接地時の足部接地点と身体重心の水平距離が正(身体重心に対して前方で接地)に転じており(図 13), 4 歩目前後で支持期における膝関節の振る舞いや加速の機序が変化し, その後の区間では弾性エネルギーの再利用により支持期において大きな加速力積, 鉛直力積を獲得できる者が, 疾走速度を大きく増加させられ, 加速度とステップ長変化率との間に関係性が生じたと考えられる. また, 4 歩目前後におけるステップ頻度増加の頭打ちが加速能力のステップ頻度を高める能力への依存をステップ長を増加させる能力への依存に変化させた要因であることが示唆された. この区間の前半では, 体幹の前傾を維持し(図 19), 大腿および下腿の前方への倒しこみを素早く行うことで, 大腿および下腿の平均水平獲得速度を大きく増加させ(図 15), 脚全体の角速度を大きく増加させることで(図 17), 効果的に加速できると考えられる. 第 2 加速区間の後半では, 股関節や膝関節の伸展角速度を増加させず(図 18), 足関節において大きな底屈力を発揮し(図 4), 足部と下腿を連動させて前方へ素早く回転させることで, 効果的に加速できることが推察される. また, この区間においては, 足部を身体重心に近い水平位置に接地し, その際に両膝関節間の水平距離を小さくすることが効果的な加速に対して重要となる(図 19). 第 2 加速区間では, 支持期において膝関節が屈曲した後に伸展する. また, この区間における支持時間は最高速度での疾走時に対して比較的長い. したがって, このような支持時間と支持期における膝関節の振る舞いが, 第 2 加速区間の前半における加速度と SJ や CMJ との間の正の相関を生じさせたと考えられ, 比較的長い支持時間によって大きな鉛直力積を発揮する能力を向上させることで, 第 2 加速区間の前半における加速能力を向上させられる可能性が示された. 一方, 第 2 加速区間の後半においては加速度と AJ との間に有意な正の相関があった. AJ は, 直立した姿勢によって, 足関節の底屈のみによって遂行される接地時間の短いジャンプである(表 1). 第 2 加速区間の後半においては, 疾走時の姿勢が直立に近づき, 支持時間は短くなる. また, 支持期における膝関節の伸展角速度は第 2 加速区間の後半において減少していた(図 12). さらに, 第 2 加速局面の後半においては加速に対する足部の重要性が高まった(図 15). したがって, 身体姿勢の変化, 支持時間の減少, 支持期におけるキック動作の変化によって, 第 2 加速区間の後半において加速度と AJ との間の相関関係が生じたと考えられ, 膝関節の伸展を関与させないで大きな足底屈力を発揮する能力を向上させることで, 第 2 加速区間の後半における加速能力を向上させられるであろう. 第 2 加速区間においては, 加速度と足長との間に有意な正の相関, 転子高および大腿長との間に有意な負の相関があった(図 6 および図 7). 加速局面において足趾や足部が長いことは, 大きな加速力積を獲得するために有利であると報告されており(Lee & Piazza 2009, Baxter et al. 2012), 第 2 加速区間においてステップ長をより大きく増加させ, 高い加速度を得ることに適していると考えられる. 加速度と転子高および大腿長との間の負の相関については, 有意な相関が第 2 加速

区間の前半に生じていることから、脚や大腿が長いことが、疾走動作を変化させていくことに対して負の作用を持つ可能性がある。

第3加速区間である16歩目(26.2±1.2m)付近では、体幹角度の急激な増加は終息しており(図13)、体幹が垂直に近い安定した姿勢になる(Debaere et al. 2013)。このような姿勢は、身体前面の筋(腸腰筋など)の張力を高めることにつながり(Bosch & Klomp 2005)、スプリンターは脚の前方へのスイングを行いやすくなると考えられる(Dorn et al. 2012)(図14)。したがって、このような姿勢の変化の終息が依存性を変化させる要因になった可能性がある。第3加速区間の前半では、支持期における股関節および膝関節の最大伸展角速度はピークに達するが(図12)、股関節の伸展と膝関節の伸展が相殺されてしまうことで、股関節と膝関節が大きな伸展角速度を発揮しているにも関わらず、効果的なキック動作につながっていなかった。この区間では、大腿の平均水平獲得速度を減少させ(図9および図15)、足部と下腿による速度の獲得を優先的に増加させること(図9および図15)が脚全体の後方スイング速度を大きく増加させ(図16)、効果的に加速することにつながる。また、第3加速区間においては、第2加速区間に引き続き、足部を身体重心に近い水平位置に接地し、その際に両膝関節間の水平距離を小さくすることが効果的な加速に対して重要となる(図19)。ステップ頻度への依存性を持つ者もいた第3加速区間においては、第1加速区間とは異なり、加速度と下腿長や大腿長、転子高との間に有意な負の相関があった。有意な負の相関があった第3加速区間の終盤においては、疾走速度が減少している者もあり、ステップ頻度に関しては平均値が減少していた(図1)。したがって、第3加速区間の終盤においては、ステップ頻度を維持できないものが減速していると解釈することができ、このステップ頻度の維持に対して、長い脚長や下肢の各部分長が不利に働くと推察される。第3加速区間の前半においては、第2加速区間に引き続き加速度とAJの間に有意な相関があり、この区間の前半においても膝関節の伸展を関与させないで大きな足底屈力を発揮する能力が疾走速度を効果的に高めることに重要である。第3加速区間の後半において、加速度と鉛直ジャンプパフォーマンスとの間に有意な相関はみられなかった(図4)。先にも述べたように、本研究の鉛直ジャンプテストは、全て下肢関節の伸展あるいは底屈筋力を評価しており、高いステップ頻度を高めることにつながる脚の前方へのスイングに対して重要である股関節屈筋群の筋力を評価していない。第3加速区間の後半においては加速度とステップ頻度変化率との間の相関係数が高かったことから、本研究で評価した鉛直ジャンプ能力と第3加速区間の後半の加速能力との間には関係性が生じなかったと考えられる。

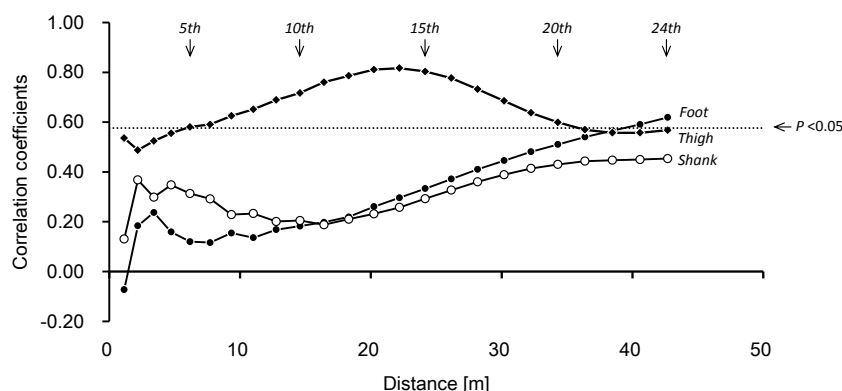


図21 速度と支持期における大腿、下腿、足部の平均水平獲得速度との間の1歩ごとの相関係数の変化

本研究の結果から, 100m 走のパフォーマンス向上に取り組む場合, 加速局面を 3 つに区分し, それぞれの区間において効果的に加速できるように, ステップ長やステップ頻度への意識を変化させるとともに, 重要となる動作や姿勢を参考として高い最高速度に達することができる効果的な加速を養成することが有効と考えられる. また, 加速区間ごとに必要な体力特性が異なることを認識し, 改善すべき加速区間に即したトレーニング手段を選択する必要がある. 形態的特徴(部分長)を変えることは容易ではないが, 本研究で加速能力に対して重要性が示された長い足長などの特徴はソールの固いスパイクを使用するといった策を講じることで対応できる可能性がある. また, 最高速度付近における長い脚長の加速に対する負の作用は, 股関節屈曲伸展筋群を強化することなどによって対応できるであろう.

謝辞

本研究の一部(疾走動作)については, 国立スポーツ科学センタープロジェクト研究の一環として行われた測定におけるデータを使用させていただきました. 被験者の方々には, 快く実験へ参加していただきました. なお, 共同研究者の内藤 景氏には, 助成期間の中途から代表者として研究の遂行を担って頂きました. ここに感謝の意を表します.

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慣性係数. JJ Sports Sci 15:155-161

Ae M, Ito A, Suzuki M (1992) The men's 100 metres. N Stud Athletics 7:47-52

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

Baumann W (1976) Kinematic and dynamic characteristics of the sprint start. In PV Komi (Ed.), Biomechanics V-B (pp.194-199). Baltimore, University park press

Baxter JR, Novack TA, Van Wierkhoven H, Pennell DR, Piazza SJ (2012) Ankle joint mechanics and foot proportions differ between human sprinters and non-sprinters. Proc Biol Sci 279:2018-2024

Bezodis IN, Kerwin DG, Salo AI (2008) Lower-limb mechanics during the support phase of maximum-velocity sprint running. Med Sci Sports Exerc 40:707-715

Bissas AI, Havenetidis K (2008) The use of various strength-power tests as predictors of sprint running performance. J Sports Med Phys Fitness 48:49-54

Bobbert MF, Huijing PA, van Ingen Schenau GJ (1986a) An estimation of power output and work done by the human triceps surae muscle-tendon complex in jumping. J Biomech 19:899-906

- Bobbert MF, Huijting PA, van Ingen Schenau GJ (1987) Drop jumping. II. The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping. *Med Sci Sports Exerc* 19:339–346
- Bobbert MF, Mackay M, Schinkelshoek D, Huijting PA, van Ingen Schenau GJ (1986b) Biomechanical analysis of drop and countermovement jumps. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 54:566–573
- Bosch F, Klomp R. Running (2005) *Biomechanics and Exercise Physiology Applied in Practice*. (Boer–Stallman DW, Trans.). Philadelphia: Elsevier (Original work published 2001); pp. 119–88.
- Bosco C, Luhtanen P, Komi PV (1983) A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 50:273–282
- Bosco C, Tarkka I, Komi PV (1982) Effect of elastic energy and myoelectrical potentiation of triceps surae during stretch–shortening cycle exercise. *Int J Sports Med* 3:137–140
- Bret C, Rahmani A, Dufour AB, Messonnier L, Lacour JR (2002) Leg strength and stiffness as ability factors in 100 m sprint running. *J Sports Med Phys Fitness* 42:274–281
- Bushnell T, Hunter I (2007) Differences in technique between sprinters and distance runners at equal and maximal speeds. *Sports Biomech* 6:261–268
- Carpes FP, Mota CB, Faria IE (2010) On the bilateral asymmetry during running and cycling – a review considering leg preference. *Phys Ther Sport* 11:136–142
- Cavagna GA, Komarek L, Mazzoleni S (1971) The mechanics of sprint running. *J Physiol* 217:709–721
- Chapman AE, Caldwell GE (1983) Kinetic limitations of maximal sprinting speed. *J Biomech* 16:79–83
- Chelly SM, Denis C (2001) Leg power and hopping stiffness: relationship with sprint running performance. *Med Sci Sports Exerc* 33:326–333
- Debaere S, Delecluse C, Aerenhouts D, Hagman F, Jonkers I (2012) From block clearance to sprint running: Characteristics underlying an effective transition. *J Sports Sci*. 2012 Sep :13 [Epub ahead of print]
- Debaere S, Jonkers I, Delecluse C (2013) The contribution of step characteristics to sprint running performance in high-level male and female athletes. *J Strength Cond Res* 27:116–124
- Delecluse C (1997) Influence of strength training on sprint running performance. Current findings and implications for training. *Sports Med* 24:147–156
- Delecluse CH, van Coppenolle H, Willems E, Diels R, Goris M, van Leemputte M, Vuylsteke M (1995a) Analysis of 100 meter sprint performance as a multi-dimensional skill. *J Hum Mov Stud* 28:87–101
- Delecluse C, Van Coppenolle H, Willems E, Van Leemputte M, Diels R, Goris M (1995b) Influence of high-resistance

- and high-velocity training on sprint performance. *Med Sci Sports Exerc* 27:1203–1209
- Deshon DE, Nelson RC (1964) A cinematographical analysis of sprint running. *Res Q* 35:451–455
- Dillman CJ (1975) Kinematic analyses of running. *Exerc Sport Sci Rev* 3:193–218
- Doolittle D, Tellez T (1984) Sprinting – from start to finish. *Track Field Q Rev* 84:5–8
- Dorn TW, Schache AG, Pandy MG (2012) Muscular strategy shift in human running: dependence of running speed on hip and ankle muscle performance. *J Exp Biol* 215:1944–1956
- van Emmerik REA, van Wegen EEH (2000) On variability and stability in human movement. *J Appl Biomech* 16:394–406
- Fukashiro S, Komi PV (1987) Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. *Int J Sports Med* 8 Suppl 1:15–21
- Fukashiro S, Kurokawa S, Hay DC, Nagano A (2005) Comparison of muscle-tendon interaction of human M. Gastrocnemius between ankle- and drop-jumping. *Int J Sport Health Sci* 3:253–263
- Fukunaga T, Matsuo A, Ichikawa M (1981) Mechanical energy output and joint movements in sprint running. *Ergonomics* 24:765–772
- Gajer B, Thepaut-Mathieu C, Lehenaff D (1999) Evolution of stride and amplitude during course of the 100 m event in athletics. *N Stud Athletics* 14:43–50
- Hamill J, Palmer C, Van Emmerik RE (2012) Coordinative variability and overuse injury. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol* 4:45
- 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
- Hirvonen J, Rehnunen S, Rusko H, Harkonen M (1987) Breakdown of high-energy phosphate compounds and lactate accumulation during short supramaximal exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 56:253–259
- Hunter JP, Marshall RN, McNair PJ (2004) Interaction of step length and step rate during sprint running. *Med Sci Sports Exerc* 36:261–271
- Hunter JP, Marshall RN, McNair PJ (2005) Relationships between ground reaction force impulse and kinematics of sprint-running acceleration. *J Appl Biomech* 21:31–43
- Hutchinson JR (2004) Biomechanical modeling and sensitivity analysis of bipedal running ability. I. Extant taxa. *J Morphol* 262:421–440

Ito A, Ishikawa M, Isolehto J, Komi PV (2006) Changes in the step width, step length, and step frequency of the world's top sprinters during the 100 metres. *N Stud Athletics* 21:35–39

伊藤 章, 市川博啓, 斉藤昌久, 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. *体育學研究* 43:260–273

伊藤 章, 斉藤昌久, 淵本隆文 (1997) スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー, および筋放電パターンの変化. *体育學研究* 42:71–83

Ito A, Saito M, Sagawa K, Kato K, Ae M, Kobayashi K (1993) Leg movement analysis of gold and silver medalists in men's 100m at the III world championships in athletics. *Proceedings of International Society of Biomechanics XIVth congress, Pris*, 1:624–625

Jacobs R, Bobbert MF, van Ingen Schenau GJ (1996) Mechanical output from individual muscles during explosive leg extensions: the role of biarticular muscles. *J Biomech* 29:513–523

Jacobs R, van Ingen Schenau GJ (1992) Control of an external force in leg extensions in humans. *J Physiol* 457:611–626

Jaric S, Ristanovic D, Corcos DM (1989) The relationship between muscle kinetic parameters and kinematic variables in a complex movement. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 59:370–376

Johnson MD, Buckley JG (2002) Muscle power patterns in the mid-acceleration phase of sprinting. *J Sports Sci* 19:263–272

Kale M, Asci A, Bayrak C, Acikada C (2009) Relationships among jumping performances and sprint parameters during maximum speed phase in sprinters. *J Strength Cond Res* 23:2272–2279

金子公宥, 北村潔和 (1975) 100m 疾走中のスピード変化に関係する要因のキネシオロジー的分析. *体育の科学* 25:109–115

Karamanidis K, Albracht K, Braunstein B, Catala MM, Goldmann JP, Bruggemann GP (2011) Lower leg musculoskeletal geometry and sprint performance. *Gait Posture* 34:138–141

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

Komi PV, Bosco C (1978) Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Med Sci Sports* 10:261–265

Krell JB, Stefanyshyn DJ (2006) The relationship between extension of the metatarsophalangeal joint and sprint time for 100 m Olympic athletes. *J Sports Sci* 24:175–180

- Kugler F, Janshen L (2010) Body position determines propulsive forces in accelerated running. *J Biomech* 43:343–348
- Kuitunen S, Komi PV, Kyrolainen H (2002) Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Med Sci Sports Exerc* 34:166–173
- Kunz H, Kaufmann DA (1981) Biomechanical analysis of sprinting: decathletes versus champions. *Br J Sports Med* 15:177–181
- Lee SS, Piazza SJ (2009) Built for speed: musculoskeletal structure and sprinting ability. *J Exp Biol* 212:3700–3707
- Letzelter S (2006) The development of velocity and acceleration in sprints A comparison of elite and juvenile female sprinters *N Stud Athletics* 21:15–22
- Mackala K (2007) Optimisation of performance through kinematic analysis of the different phases of the 100 metres. *N Stud Athletics* 22:7–16
- Mann R (2011) *The Mechanics of Sprinting and Hurdling*. CreateSpace, 2011
- Mann R, Herman J (1985) Kinematic analysis of olympic sprint performance: Men's 200 meters. *Int J Sport Biomech* 1:151–162
- Margaria R, Cavagna GA (1964) Human locomotion in subgravity. *Aerosp Med* 35:1140–1146
- Marquez WQ, Masumura M, Ae M (2009) The effects of jumping distance on the landing mechanics after a volleyball spike. *Sports Biomech* 8:154–166
- Mero A (1988) Force–time characteristics and running velocity of male sprinters during the acceleration phase of sprinting. *Res Q Exerc Sport* 59:94–98
- Mero A, Komi PV (1986) Force–, EMG–, and elasticity–velocity relationships at submaximal, maximal and supramaximal running speeds in sprinters. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 55:553–561
- Mero A, Komi PV, Gregor RJ (1992) Biomechanics of sprint running. A review. *Sports Med* 13:376–392
- Mero A, Luhtanen P, Komi PV (1983) A biomechanical study of the sprint start. *Scand J Sports Sci* 5:20–28
- Morin JB, Samozino P, Bonnefoy R, Edouard P, Belli A (2010) Direct measurement of power during one single sprint on treadmill. *J Biomech* 43:1970–1975
- 森丘保典, 阿江通良, 岡田 英孝 (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. *JJ Sports Sci* 16:111–118
- 村木征人, 宮川千秋 (1973) 短距離疾走の加速局面における運動の変化—歩幅, サイクル数, 上体の前傾, および下肢関節群を中心として—. *東海大学紀要体育学部* 3:55–72

Novacheck TF (1998) The biomechanics of running. *Gait Posture* 7:77–95

小木曾一之, 安井年文, 青山清英, 渡辺健二 (1998) 全力疾走時の速度変化に伴う支持脚各部の機能の変化. *体力科学* 47:143–154

Salo AI, Bezodis IN, Batterham AM, Kerwin DG (2011) Elite sprinting: are athletes individually step-frequency or step-length reliant? *Med Sci Sports Exerc* 43:1055–1062

Schache AG, Bennell KL, Blanch PD, Wrigley TV (1999) The coordinated movement of the lumbo-pelvic-hip complex during running: a literature review. *Gait Posture* 10:30–47

Smirniotou A, Katsikas C, Paradisis G, Argeitaki P, Zacharogiannis E, Tziortzis S (2008) Strength-power parameters as predictors of sprinting performance. *J Sports Med Phys Fitness* 48:447–454

Stefanyshyn DJ, Nigg BM (1998) Dynamic angular stiffness of the ankle joint during running and sprinting. *J Appl Biomech* 14:292–299

高木浩信, 田口正公 (1994) 短距離走の加速局面と全速局面における膝関節の動きと下肢筋力について. *陸上競技研究* 19:2–8

Volkov NI, Lapin VI (1979) Analysis of the velocity curve in sprint running. *Med Sci Sports* 11:332–337

Watts AS, Coleman I, Nevill A (2012) The changing shape characteristics associated with success in world-class sprinters. *J Sports Sci* 30:1085–1095

Wells RP, Winter DA (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. *Hum Locomotion* 1:92–93

Weyand PG, Sternlight DB, Bellizzi MJ, Wright S (2000) Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *J Appl Physiol* 89:1991–1999

Wilson C, Simpson SE, van Emmerik RE, Hamill J (2008) Coordination variability and skill development in expert triple jumpers. *Sports Biomech* 7:2–9

Yamazaki Y, Suzuki M, Mano T (1989) Performance of noncountermovement jump with both knee and hip joints fully extended. *J Appl Physiol* 66:1976–1983

Young W (1995) Laboratory strength assessment of athletes. *N Stud Athletics* 10:89–96

Young W, McLean B, Ardagna J (1995) Relationship between strength qualities and sprinting performance. *J Sports Med Phys Fitness* 35:13–19