

スプリント走の加速局面における一流短距離選手のキネティクスに関する研究
**The study on kinetics in the acceleration phase of sprint running
in elite sprinters**

小林海¹⁾, 土江寛裕²⁾, 松尾彰文³⁾, 彼末一之⁴⁾, 磯繁雄⁴⁾, 矢内利政⁴⁾,
金久博昭⁵⁾, 福永哲夫⁶⁾, 川上泰雄⁴⁾

Kai KOBAYASHI¹⁾, Hiroyasu TSUCHIE²⁾, Akifumi MATSUO³⁾,
Kazuyuki KANOSUE⁴⁾, Shigeo ISO⁴⁾, Toshimasa YANAI⁴⁾, Hiroaki KANEHISA⁵⁾,
Tetsuo FUKUNAGA⁶⁾, Yasuo KAWAKAMI⁴⁾

¹⁾早稲田大学大学院スポーツ科学研究科

²⁾城西大学経営学部

³⁾国立スポーツ科学センター

⁴⁾早稲田大学スポーツ科学学術院

⁵⁾東京大学大学院総合文化研究科

⁶⁾鹿屋体育大学

¹⁾Graduate School of Sport Sciences, Waseda University

²⁾Faculty of Business Administration, Josai University

³⁾Japan Institute of Sports Sciences

⁴⁾Faculty of Sport Sciences, Waseda University

⁵⁾Department of Life Sciences (Sports Sciences), Graduate School of Arts and Sciences,
The University of Tokyo

⁶⁾National Institute of Fitness and Sports in KANOYA

キーワード: ストライド, 地面反力, 力積, 接地時間

Key words: stride length, ground reaction force, Impulse, contact time

Abstract

The present study aimed to describe the changing pattern of the running velocity and kinetics, and to discuss the factors that determine the running velocity during the acceleration phase of the sprint running in elite sprinters. Five elite sprinters [100m best time: 10.23 ± 0.14 sec] (elite group) and five non-elite sprinters [100m best time: 11.38 ± 0.19 sec] (control group) repeated 50-m sprints from a crouching position on a starting block. Each sprint was recorded with 12 infrared cameras (120Hz), and the ground reaction force was obtained from six force platforms (600Hz). The reflective markers were placed on the lateral surfaces of selected joint centers. As the running velocity and the stride length increased throughout the distance, the stride frequency remained constant. After the 10th step, the elite group attained a higher running velocity and a longer stride length than the control group did. The changing pattern of the running velocity and the stride length was similar in both groups. In addition, the impulse of the ground reaction force recorded for the elite group was significantly greater than that

for the control group, although the contact time was significantly shorter in elite group than in control group. The present results indicate that elite sprinters have ability to exert a force against the ground in short contact time to obtain higher running velocity.

スポーツ科学研究, 6, 119-130, 2009 年, 受付日: 2009 年 9 月 10 日, 受理日: 2009 年 12 月 24 日

連絡先: 小林海 〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15 早稲田大学スポーツ科学研究科

Tel & Fax: 04-2947-6932, E-mail: k-kai@toki.waseda.jp

I. 緒言

短距離走は加速局面, 中間疾走局面, および減速局面の 3 局面に分類され (Delecluse et al. 1995), その中で, 加速局面はスタートから, 疾走速度が最高疾走速度に至るまでの局面を示す. 最高疾走速度が高い短距離選手ほど 100m タイムが短い (阿江ら 1994, 杉田 2003, 渡木 2000) ことを考慮すると, 最高疾走速度に至るまでの加速局面における疾走速度の増加量が, 100m タイムの短縮につながる一因となる. 阿江ら (1994) によると, 加速局面ではスタート直後にピッチはほぼ最大に達するのに対して, ストライドは距離が進むにつれて増加する傾向にあることが 100m のレースパターンから明らかになっている. これまでの加速局面におけるキネマティクスに関する研究によると, 疾走速度の増加には, 股関節伸展が関係する (伊藤ら 1994) ことが報告されている. また, キネティクスに関する研究において, 疾走速度が 3m/s から 5m/s に加速した際には, 地面反力のブレーキ成分と推進成分の両成分が増加する (Munro et al. 1987) ことや, 疾走速度の高い選手ほど, 加速局面において, 短い接地時間に大きな地面反力を受ける (福田と伊藤 2004) ことが明らかにされてきた.

水平速度 (疾走速度) は主に接地期において選手が受ける地面反力の水平成分 (推進方向) の力積により決定される (Hunter et al. 2004). しかし, ヒトの走運動は接地期と滞空期を繰り返し, バウンドしながら前方に進む運動であるため (Cavagna & Kaneko 1977), 地面反力の水平成分の力積だけでなく, 鉛直成分の力積も水平速度の獲得に重要

な役割を担うと考えられる. 接地期に獲得しなければならない力積の鉛直成分は, 重力と 1 ステップに要する時間によって決定される (Hay 1993). 加速局面における接地時間は, スタート直後であっても 150-220ms であることから (Mero 1988, Mero & Komi 1990), その間に大きな地面反力の鉛直成分を獲得することが力積の鉛直成分を高めるためには重要であろう. しかしながら, 実際の短距離走中の加速局面における地面反力の鉛直成分に着目した研究は少なく (土江ら 2005), 加速局面の各ステップにおける, 地面反力や力積の鉛直成分といったキネティクスの変化については不明な点が多い.

そこで, 本研究では, スプリント走の加速局面における疾走速度やキネティクスの変化パターンを説明するとともに, 疾走速度の異なる選手間にみられる地面反力の力積から検討することを目的とした.

II. 方法

1. 被検者

被検者は, オリンピック出場経験者 3 名を含む国内の一流短距離選手 5 名 [身長: 175.4 ± 2.9cm, 身体質量 70.7 ± 3.2kg, 100m ベストタイム: 10.23 ± 0.14 秒] (一流選手群) と, 大学陸上競技同好会に所属する短距離選手 5 名 [身長: 168.9 ± 3.0cm, 身体質量 60.4 ± 3.2kg, 100m ベストタイム: 11.38 ± 0.19 秒] (対照群) であった. 身長, 身体質量および 100m ベストタイムにはそれぞれ両群間に有意差がみられた. 各被検者には実験の目的, 内容,

測定中に起こりうる危険性に関する説明を行った後に、書面による同意を得た。また、本実験は早稲田大学スポーツ科学学術院倫理委員会の承認を得てから行った。

2. 実験方法

実験は屋内の直線 100m の陸上競技走路で実施した。被検者には反射マーカを貼付し(頭部:4点, 上肢:11点, 体幹:9点, 下肢:12点), スタートイングブロックを用いたクラウチングスタートから 50m までのスタートダッシュを行わせた。本研究では、直線走路の中間付近に分析区間(約 5.4 m)を設定した。加速局面における各ステップのデータを分析区間内で取得するために、被検者には分析区間の後方 0m から 50m まで 5m ごとにスタート位置をずらし、それぞれの位置から全力で分析区間を走り抜けるスタートダッシュを合計 11 本行わせた。各試行間の休息は 2 分以上とし、疲労の影響を排除するように配慮した。

実験には 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)を用いて、サンプリング周波数 120 Hz で分析区間内の疾走動作を撮影した。また、走路に直列に埋設した 6 枚の床反力計測装置(90cm×60cm, Kistler-9287A; Kistler 社製)より、サンプリング周波数 600 Hz で接地期の地面反力を測定した。疾走中の身体座標および地面反力のデータは、VICON システム内で、同期信号により同期させた。

3. 分析方法

VICON システムによって得られた身体マーカの位置より、各関節および重心の座標を求めた。それらの座標、地面反力および圧力中心を矢状面上に投影し、2 次元データとして分析を行った。120 Hz の座標データは、4 次のローパスデジタルフィルタ(Winter 2004)により、遮断周波数 8 Hz (Arampatizis et al. 1999)で平滑化した後、600 Hz

(土江ら 2005)にスプライン補間した。分析は、滞空期における重心の鉛直方向の最高点から、接地後の次の滞空期の重心最高点までとし、1 ステップごとに分析した。その際に床反力計測装置から外れて接地したステップ、あるいは 2 枚の床反力計測装置にまたがって接地したステップは分析対象から除外した。

4. 分析項目

疾走速度はピッチ(SF)とストライド(SL)の積により算出した。ピッチ、ストライドは以下の式を用いて算出した。

$$SF = \{1 / (T_{air1} + T_{cont} + T_{air2})\}$$

$$SL = AL_1 + CL + AL_2$$

ここで、 T_{air1} は滞空期に重心が最高点に達してから接地するまでの時間、 T_{cont} は接地時間、 T_{air2} は離地から滞空期に重心が最高点に達するまでの時間、 AL_1 は滞空期に重心が最高点に達してから接地するまでの重心水平移動距離、 CL は接地期の重心水平移動距離、 AL_2 は離地から滞空期に重心が最高点に達するまでの重心水平移動距離をそれぞれ表す。また、各ステップの疾走速度とその前のステップの疾走速度の差分から疾走速度の変化量を算出した。同様に、各ステップのピッチ、ストライドとその前のステップのピッチ、ストライドの差分からピッチ、ストライドそれぞれの変化量を算出した。

測定した地面反力から、以下の式を用いて地面反力の力積(Impulse)とその水平成分(Impulse_x)、鉛直成分(Impulse_y)をそれぞれ算出した。

$$Impulse = \int_0^{T_{contact}} \mathbf{F} \cdot dt$$

$$Impulse_x = \int_0^{T_{contact}} F_x \cdot dt$$

$$Impulse_y = \int_0^{T_{contact}} F_y \cdot dt$$

接地開始の時間をゼロ, 接地の終わりを $T_{contact}$ とした. ここで, F_x は接地期の水平地面反力を, F_y は鉛直地面反力をそれぞれ表す. また, 地面反力の力積を接地時間で除すことで, 接地時の平均地面反力を算出した. さらに, 図 1 の通り, 逆正接関数を用いて接地時の地面反力の作用方向 (θ) を算出した.

本研究では, 24 ステップ目 (一流選手群: $38.8 \pm 1.6\text{m}$, 対照群: $42.2 \pm 1.8\text{m}$) 以降のステップにおいて走速度が低下する被検者が認められたため, 24 ステップ目までを分析の対象とした. 各分析項目は 3 ステップごとに平均値を求め, それらを代表値とした. 例えば, 1 から 3 ステップまでは 1-3 ステップとし, 22-24 ステップ目までを分析対象とした.

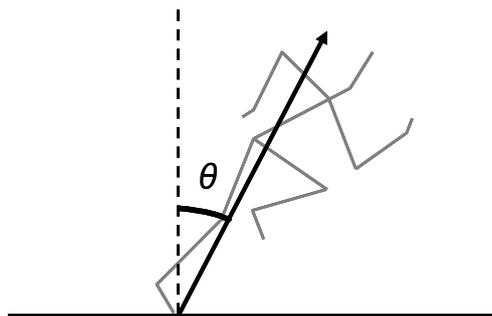


図 1. 接地時の地面反力の作用方向 (θ = 鉛直軸に対する地面反力のベクトルの成す角度)

5. 統計処理

一流選手群と対照群の群間差の検定には, 二元配置の反復測定 (一流選手群, 対照群 \times 各ステップ) による分散分析を用いた. 交互作用が認められた際の各ステップにおける両群間の平均値の差の検定は, 対応のない t 検定を行った. 各群のステップ間の差の検定は対応のある一元配置の分散分析を行った. 一元配置の分散分析の結果, F 値が有意と認められた場合, 平均値の差の検定には Tukey の多重比較検定を用いた. 2 変数間の相関関係の算出にはピアソンの積率相関分析を用いた. すべての検定は危険率 5% 未満 ($p < 0.05$) を有意とした.

Ⅲ. 結果

疾走速度, ピッチ, スライドの結果を図 2 に示した. 一流選手群の疾走速度は 7-9 ステップまで有意に増加し, 対照群の疾走速度は 10-12 ステップまで有意に増加した. 両群の疾走速度を比較すると, 10-12 ステップ以降で一流選手群が対照群より

も有意に高値を示した. ピッチは両群ともにステップの増加に伴う有意な変化はみられず, 両群間のピッチに有意差はなかった. スライドは両群ともに 7-9 ステップまで有意な増加を示した. 一流選手群のスライドは 10-12 から 13-15, 22-24 ステップにおいて, それぞれ対照群よりも有意に高値を示した. 疾走速度の変化量は両群ともに 1-3 ステップが最も大きく, ステップの増加に伴い減少した (図 3). ピッチの変化量は両群ともに 1-3 ステップが最大で, その後の変化量はほぼゼロであった. スライドの変化量は疾走速度と同様で, 両群ともに 1-3 ステップが最も大きく, ステップの増加に伴い減少した.

一流選手群, 対照群ともに, 群内の地面反力の力積およびその鉛直成分にはステップ間で有意差は認められず, 両群の力積および力積の鉛直成分にも交互作用は認められなかったが, 群に主効果 (一流選手群 $>$ 対照群) が認められた (図 4, 5). 一方で, 力積の水平成分は両群ともに 7-9 ステップまで有意に減少し, 4-6 ステップにおいて一流選手群の方が対照群よりも有意に高値を示した (図 5).

地面反力の平均値は両群ともにステップ間で有意差は認められず, 両群の地面反力の平均値にも交互作用は認められなかったが, 群に主効果(一流選手群 > 対照群)が認められた(図 6). 身体質量あたりの力積の水平成分は, 1-9 ステップまでの平均値が一流選手群では 0.67 ± 0.04 Ns/kg, 対照群では 0.60 ± 0.07 Ns/kg, 10-24 ステップまでの平均値が一流選手群では 0.32 ± 0.01 Ns/kg, 対照群では 0.32 ± 0.01 Ns/kg であり, 身体質量あたりの力積の水平成分には, 各ステップにおける両群間の有意差は認められなかった. また, 身体質量あたりの力積の鉛直成分は, 1-9 ステップまでの平均値が一流選手群では 2.24 ± 0.06 Ns/kg, 対照群では

2.25 ± 0.02 Ns/kg, 10-24 ステップまでの平均値が一流選手群では 2.16 ± 0.03 Ns/kg, 対照群では 2.12 ± 0.05 Ns/kg であり, 身体質量あたりの力積の鉛直成分にも, 各ステップにおける両群間の有意差は認められなかった. 接地時間は一流選手群では 7-9 ステップまで, 対照群では 4-6 ステップまで有意に減少し, 16-18 から 19-21 ステップにおいて, 両群間に有意差が認められた(図 7). 地面反力の作用方向は, 両群ともに 7-9 ステップまで有意に鉛直方向に近づき, 4-6 ステップで一流選手群の方が対照群よりも有意に進行方向に傾いていた(図 8).

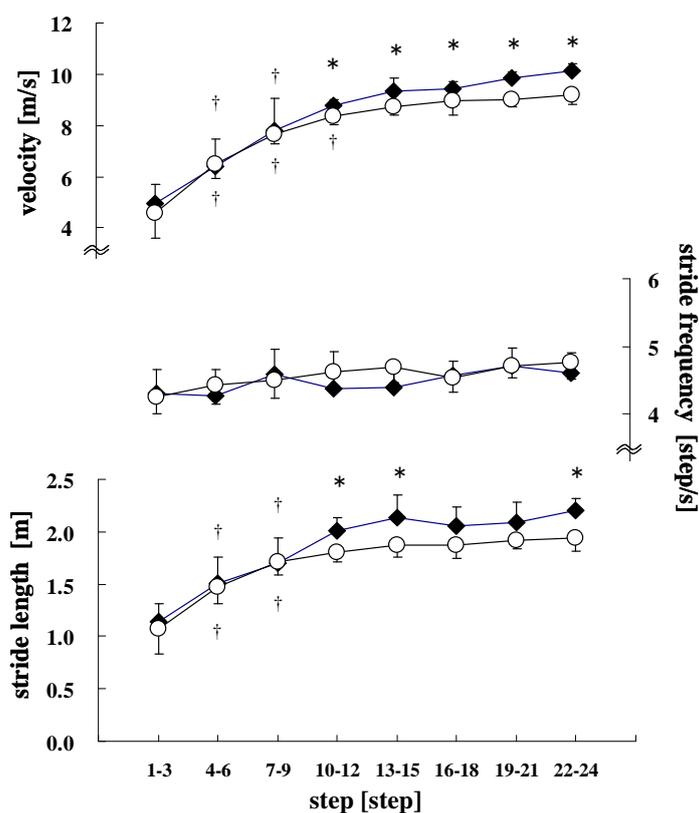


図 2. 加速局面における疾走速度, ピッチ, ストライドの変化 (◆:一流選手群; ○:対照群)
 *: 一流選手群と対照群の群間差 ($p < 0.05$)
 †: 一流選手群, 対照群それぞれの群内における直前のステップに対する有意差 ($p < 0.05$)

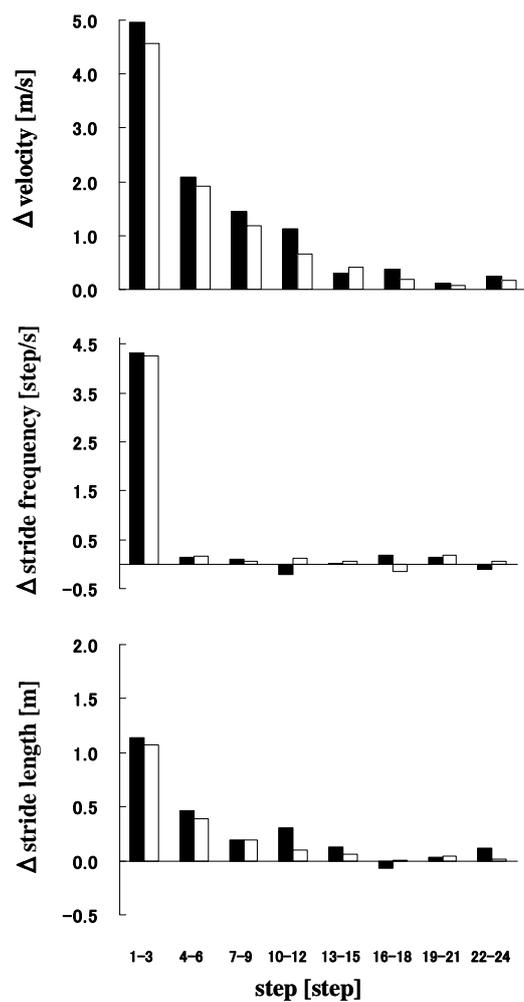


図 3. 加速局面における疾走速度, ピッチ, ストライドそれぞれの直前の 3 ステップに対する変化量
(■:一流選手群; □:対照群)

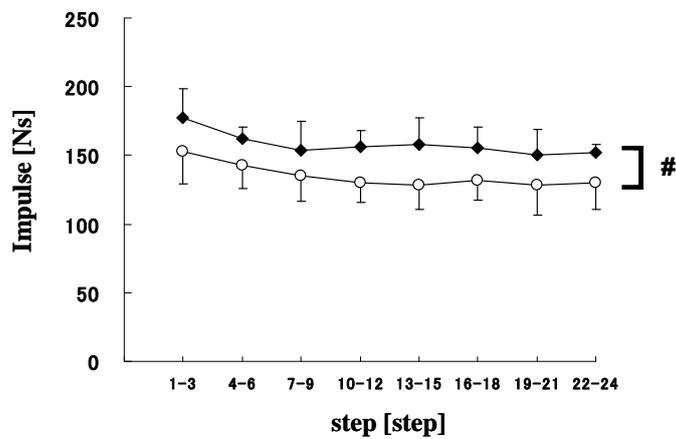


図 4. 加速局面における力積の変化(◆:一流選手群; ○:対照群)
#: 一流選手群と対照群との力積には交互作用は認められなかったが, 群に主効果
(一流選手群 > 対照群)が認められた.

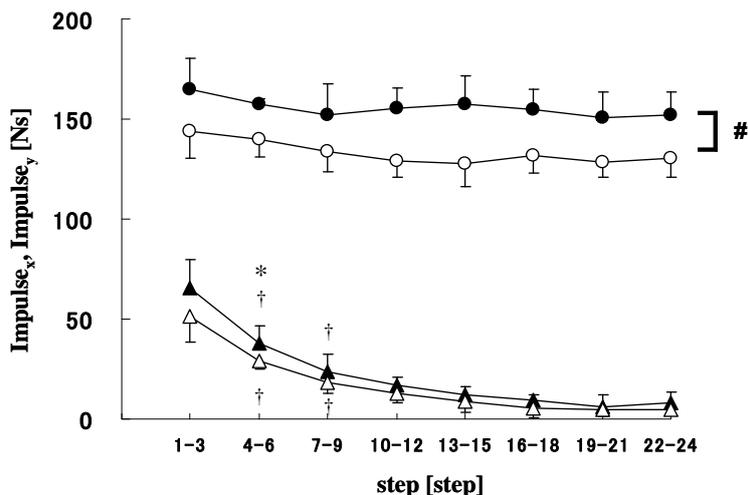


図 5. 加速局面における力積の水平成分

(▲: 一流選手群; △: 対照群)と鉛直成分(●: 一流選手群; ○: 対照群)の変化

*: 一流選手群と対照群の群間差 ($p < 0.05$)

†: 一流選手群, 対照群それぞれの群内における直前のステップに対する有意差 ($p < 0.05$)

#: 一流選手群と対照群との力積の鉛直成分には交互作用は認められなかったが, 群に主効果 (一流選手群 > 対照群) が認められた.

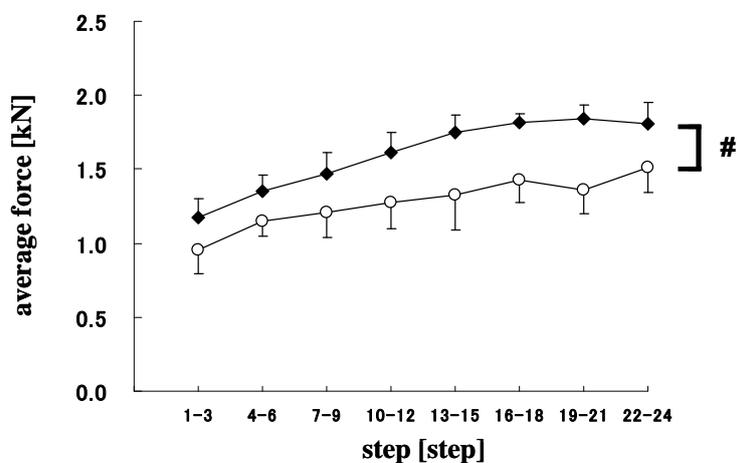


図 6. 加速局面における地面反力の平均値の変化 (◆: 一流選手群; ○: 対照群)

#: 一流選手群と対照群との地面反力の平均値には交互作用は認められなかったが, 群に主効果 (一流選手群 > 対照群) が認められた.

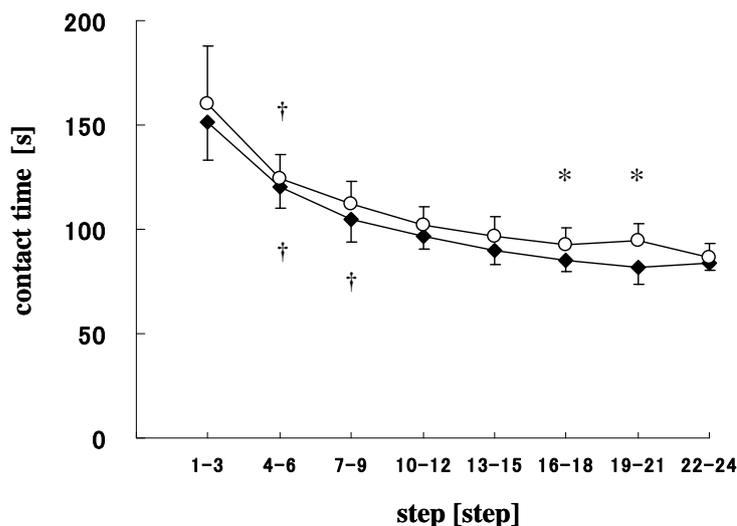


図 7. 加速局面における接地時間の変化(◆:一流選手群; ○:対照群)
 *: 一流選手群と対照群の群間差 ($p < 0.05$)
 †: 一流選手群, 対照群それぞれの群内における直前のステップに対する有意差 ($p < 0.05$)

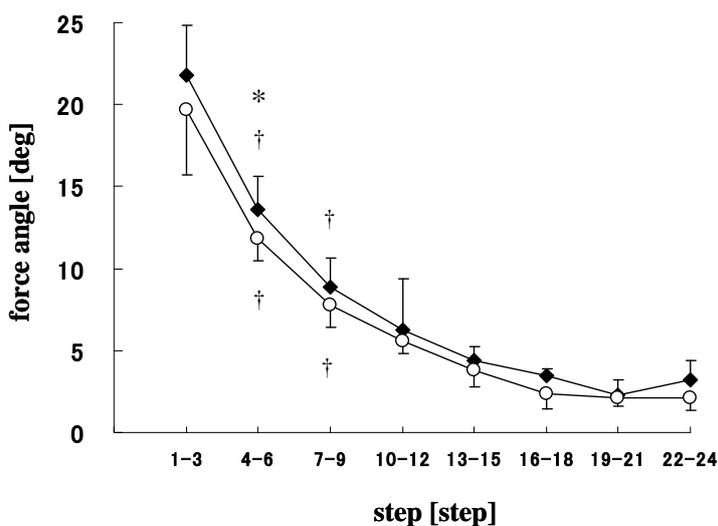


図 8. 加速局面における鉛直軸に対する地面反力のベクトルの成す角度の変化(◆:一流選手群; ○:対照群)
 *: 一流選手群と対照群の群間差 ($p < 0.05$)
 †: 一流選手群, 対照群それぞれの群内における直前のステップに対する有意差 ($p < 0.05$)

図 9 には, 疾走速度の変化量とピッチおよびストライドの変化量との相関関係を示した. 一流選手群, 対照群ともに疾走速度の変化量とストライドの変化量との間には有意な正の相関関係が認められたが,

ピッチとの間には有意な相関関係は認められなかった. また, 力積の水平成分とストライドの変化量との間には有意な正の相関関係が認められた(図 10).

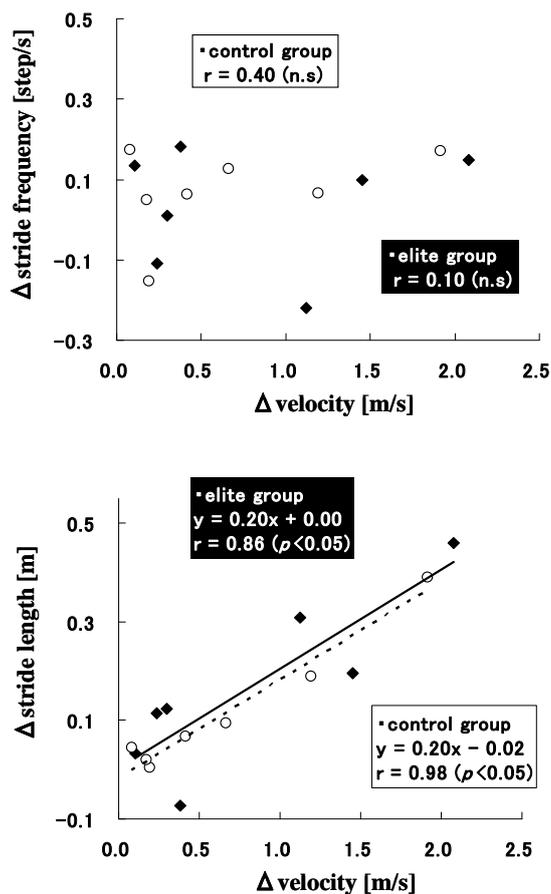


図 9. 各ステップにおける疾走速度の変化量とピッチの変化量(上図), 疾走速度の変化量とストライド(下図)との関係(◆:一流選手群; ○:対照群)

プロットは, 加速局面における疾走速度, ピッチ, ストライドそれぞれの変化量を 3 ステップごとに平均した値を示し, 回帰直線は実線が一流選手群, 破線が対照群をそれぞれ示す. ストライドの変化量が大きいステップほど疾走速度の変化量は大きかったが, ピッチの変化量と疾走速度の間には有意な相関関係は認められなかった.

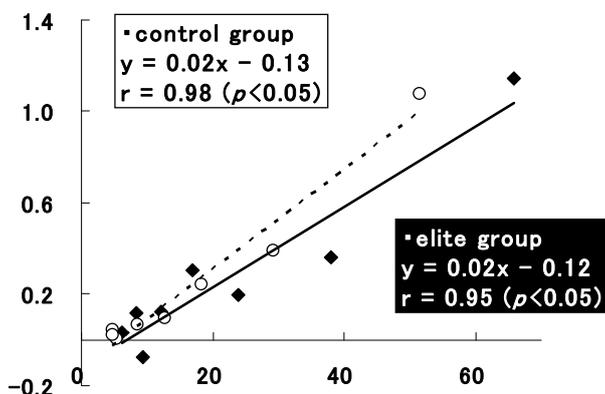


図 10. 各ステップにおける力積の水平成分とストライドの変化量との関係(◆:一流選手群; ○:対照群)

プロットは, 加速局面における力積の水平成分およびストライドの変化量を 3 ステップごとに平均した値を示し, 回帰直線は実線が一流選手群, 破線が対照群をそれぞれ示す. 力積の水平成分が大きいステップほどストライドの変化量が大きかった.

IV. 考察

本研究の目的は、スプリント走の加速局面における疾走速度やキネティクスの変化パターンを説明するとともに、疾走速度の異なる選手間にみられる地面反力の力積から検討することであった。その結果として、(a)スプリント走の加速局面における疾走速度の増加はピッチの増加ではなく、ストライドの増加が影響すること、(b)一流選手群は対照群との疾走速度に有意差が認められなかったスタート直後から9ステップまでにおいて、対照群よりも大きな力積の水平成分を獲得し、10ステップ以降では対照群よりも有意に高い疾走速度で疾走しているにも関わらず、対照群と同量の力積の水平成分を獲得すること、(c)一流選手群は加速局面におけるすべてのステップで対照群よりも有意に大きな力積の鉛直成分を獲得すること、を示した。これらの結果から、考察では加速局面における一流選手群の特徴について、1から9ステップを加速局面前半、10から24ステップを加速局面後半として議論する。

本研究では、両群ともに加速局面前半における疾走速度とストライドに有意な増加が認められたが、ピッチにはステップ間に有意な変化は認められなかった。また、疾走速度の変化量とストライドの変化量との間には有意な正の相関関係が認められたが、ピッチの変化量との間には有意な相関関係は認められなかった。これらの結果から、100 m のスプリントレベルに関係なく、スプリント走の加速局面における疾走速度の増加の説明要因の1つとして、ストライドの増加が影響すると考えられる。この一流選手群および対照群のピッチとストライドの変化パターンは、国際大会の100 m 走を対象に分析した結果(阿江ら 1994)と同様なものであったことから、競技レベルの異なる短距離選手において、加速局面のピッチおよびストライドの変化パターンには大きな差異はないといえる。

ストライドを規定する要因の1つは地面反力の力積の大きさである(Hunter et al. 2004)。本研究で

は、両群ともに、力積の水平成分がストライドの変化量と有意な正の相関関係を示したことから、競技レベルに関係なく、力積の水平成分が大きいステップほどストライドの変化量が大きかったといえる。スプリント走の加速局面における地面反力の水平成分の重要性について、福田と伊藤(2004)は最高疾走速度の高い選手ほど、加速局面において短い接地時間により大きな推進力(地面反力の水平成分)を獲得していたことを報告している。本研究においても、加速局面前半に一流選手群が獲得した力積の水平成分は対照群のそれよりも有意に高値を示し、また、一流選手群の地面反力の作用方向は4-6ステップで両群間に有意差が認められた。力積は疾走速度の変化量と身体質量との積に等しいため、一流選手群は加速局面前半に地面反力の作用方向を進行方向へ傾斜させ、対照群よりも大きな力積の水平成分を獲得することで、身体の数値増加分の累積が加速局面後半の疾走速度の両群間差につながり、大きなストライドでの疾走を可能にした要因の1つであると考えられる。さらに、加速局面後半の疾走速度や接地時間には両群間に有意差が認められたにも関わらず、加速局面後半の力積の水平成分にもその身体質量あたりの量にも両群間差は認められなかったことから、一流選手群は対照群より高い疾走速度下においても、対照群と同量の力積の水平成分を獲得する能力を有していることが明らかになった。これらの結果は、加速局面前半において、一流選手群の方が対照群よりも大きな力積を獲得する能力を有することが、加速局面前半における優れた加速および加速局面後半の対照群より高い疾走速度の達成につながったこと、また、一流選手群の力積獲得能力が加速局面後半においても対照群と同程度の加速を可能にした要因となることを示している。

一方、常に鉛直の下方にはたらく重力に抗して身体重心の鉛直方向の周期的な上下運動を維持させるためには、接地期において重心の下向きの

速度を減速させ、上向きの速度を生じさせる鉛直上向きの力積を獲得する必要がある。選手が獲得しなければならない力積の鉛直成分は、重力と1ステップに要する時間の積によって決定される(Hay 1993)。よって、一定のピッチを保とうとした場合、1ステップあたりに獲得しなければならない力積の鉛直成分は一定である。しかしながら、接地期における股関節の可動域は解剖学的に制限され、遊脚の股関節が最大屈曲した際に、接地脚の股関節が最大伸展することができる範囲は限られるため、接地脚が地面に対して力を加え続けることが可能な重心の水平移動距離には限界が生じる(Yanai & Hay 2004)。実際、本研究の接地期の重心水平移動距離の最大値は、一流選手群では 0.85 ± 0.04 m (22-24 ステップ)、対照群では 0.85 ± 0.05 m (19-21 ステップ)であり、疾走速度が増加する加速局面全体を通じて接地期の重心水平移動距離は両群ともにほぼ同一であった。また、疾走速度が増加すると、力を加え続けることができる重心の水平移動に要する時間は短縮するため、結果的に接地時間は短縮する。つまり、加速局面後半に選手が加速を続けるためには、短縮する接地時間内に必要な力積の鉛直成分を獲得することが必要不可欠といえる。本研究では、両群ともに疾走速度の増加に伴い短縮する接地時間内であっても、一定の力積の鉛直成分を獲得していたが、一流選手群の接地時間は疾走速度が高かったために対照群のそれよりも短かったにも関わらず、すべてのステップにおいて身体質量あたりの力積の鉛直成分に両群間の有意差は認められなかった。これらの結果を考え合わせると、一流選手群は加速局面後半の高い疾走速度下において、対照群よりも短い接地時間内に必要不可欠な力積の鉛直成分を獲得することを可能にしており、これが高い疾走速度においても加速していた要因の1つであったと考えられる。

V. まとめ

加速局面において、一流短距離選手の疾走速度とストライドは対照群よりも有意に高く、疾走速度の変化量とストライドの変化量との間には有意な正の相関関係が認められた。これらの結果から、スプリント走の加速局面における疾走速度の増加は、ストライドの増加に起因すると考えられる。また、一流選手群は加速局面前半に対照群よりも大きな力積の水平成分を獲得する能力を有しており、そのことがその後の疾走速度の増加に貢献する要因の1つであることが明らかになった。さらに、一流選手群は加速局面後半における短い接地時間の中で、対照群と同量の力積を獲得する能力を有しており、それが対照群よりも高い疾走速度を維持することに貢献していたと考えられる。

参考文献

- 阿江通良, 鈴木美佐緒, 宮西智久, 岡田英孝, 平野敬晴 (1994) 世界一流スプリンターの 100m レースパターン分析—男子を中心に—. 佐々木秀幸・小林寛道・阿江通良監修, 世界一流陸上競技者の技術, ベースボールマガジン社, 東京, pp. 14-28
- Arampatzis A, Brüggemann GP, Metzler V (1999) The effect of speed on leg stiffness and joint kinetics in human running, *J Biomech*, 32 (12), 1349-1353
- Cavagna GA, Kaneko M (1977) Mechanical work and efficiency in level walking and running. *J Physiol* 268(2): 467-481
- Delecluse CH, Van Coppenolle H, Willems E, Van Leemputte M, Diels R, Goris M (1995) Influence of high resistance and high velocity training on sprint performance, *Med and Sci in Sports and Exercise*, 27(8), 1203-1209
- 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
- Hay JG (1993) The biomechanics of sports techniques, 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey, pp. 396-412
 - Hunter J, Marshall R, McNair P (2004) Interaction of step length and step rate during sprint running, *Med Sci Sports Exerc*, 36(2), 261-271
 - 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. 佐々木秀幸・小林寛道・阿江通良監修 世界一流陸上競技者の技術, ベースボールマガジン社, 東京, pp. 31-49
 - 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 (1990) Reaction time and electromyographic activity during a sprint start, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 61, 73-80
 - Munro CF, Miller DI, Fuglevand AJ (1987) Ground reaction forces in running: a reexamination, *J Biomech*, 20(2), 147-155
 - 杉田正明 (2003) 陸上競技・トラックレースの分析について, *バイオメカニクス研究*, 7(1): 82-88
 - 土江寛裕, 松尾彰文, 磯繁雄, 福永哲夫 (2005) 陸上競技短距離選手にみられる加速走中の下肢スティフネスの変化, *東京体育学研究*, 2005 年度報告, 29-32
 - Yanai T, Hay JG (2004) Combinations of cycle rate and length for minimizing the muscle power requirement in human running, *J Appl Biomech*, 20(1), 51-70
 - 渡木正光, 秋田真介, 金高宏文 (2000) 100m 走における疾走速度曲線の縦断的分析— 最大疾走速度に影響する加速区間はどこか?, *日本スプリント学会*, 第 11 回大会発表資料
 - Winter DA (2004), *Biomechanics And Motor Control of Human Movement*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.75-102