

平成 26 年度

順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科 修士論文

110m ハードル走における 下肢スティフネスの特性

氏 名 和田 純弥

論文指導教員 青木 和浩

合格年月日 平成 27 年 2 月 23 日

論文審査員

主査

佐久間 和彦

副査

柳谷 登志雄

副査

青木 和浩

第1章 諸言.....	4
第2章 関連文献の考証.....	6
第1節 110mHの競技特性.....	6
第2節 下肢スティフネスと疾走能力.....	7
第3章 目的.....	9
第1節 対象者.....	10
第2節 対象レース.....	10
第3節 撮影方法.....	10
(1) レースの撮影.....	10
(2) カメラの撮影位置.....	10
第4節 映像によるレース分析.....	11
(1) データの収集.....	11
(2) 映像分析.....	11
(3) 下肢スティフネスの推定.....	12
第5節 本論文における用語の定義.....	14
第6節 統計処理.....	14
第5章 結果.....	16
第1節 疾走時における各変数のインターバル毎の比較.....	16
(1) 疾走時における K_{vert} のインターバル毎の比較.....	16
(2) 疾走時における K_{leg} のインターバル毎の比較.....	16
(3) 疾走時における各変数のインターバル毎の比較.....	16
(4) 疾走時におけるピッチのインターバル毎の比較.....	17
(5) 疾走時におけるストライドのインターバル毎の比較.....	18
(6) 疾走時における速度のインターバル毎の比較.....	18
第2節 ハードリング踏切時における各変数のハードル毎の比較.....	18
(1) ハードリング踏切時における K_{vert} のハードル毎の比較.....	18
(2) ハードリング踏切時における K_{leg} のハードル毎の比較.....	18
(3) ハードリング踏切時における各変数のハードル毎の比較.....	19
第3節 着地時における各変数のハードル毎の比較.....	19
(1) ハードリング着地時における K_{vert} のハードル毎の比較.....	19

(2) ハードリング着地時における K_{leg} のハードル毎の比較.....	20
(3) ハードリング着地時における各変数のハードル毎の比較.....	20
第4節 下肢スティフネスと各変数との関係	21
(1) 疾走時における下肢スティフネスと各変数との関係.....	21
(2) ハードリング踏切時における下肢スティフネスと各変数との関係	21
(3) ハードリング着地時における下肢スティフネスと各変数との関係	21
第5節 下肢スティフネスとピッチ、ストライドおよび疾走速度との関係	21
(1) 疾走時における最大速度区間の K_{vert} および K_{leg} の値とピッチ、ストライドおよび疾走速度との関係.....	21
(2) 疾走時における最大速度区間のピッチ、ストライドおよび疾走速度の値と、それぞれの相互関係.....	22
第6章 考察.....	23
第1節 疾走時における K_{vert} および K_{leg} のインターバル毎の比較	23
(1) 疾走時における K_{vert}	23
(2) 疾走時における K_{leg}	25
第2節 ハードリング踏切時における K_{vert} および K_{leg} のハードル毎の比較.....	26
(1) ハードリング踏切時における K_{vert}	26
(2) ハードリング踏切時における K_{leg}	27
第3節 ハードリング着地時における K_{vert} および K_{leg} のハードル毎の比較.....	27
(1) ハードリング着地時における K_{vert}	27
(2) ハードリング着地時における K_{leg}	28
第4節 下肢スティフネスと各変数との関係	29
(1) K_{vert} と各変数との関係	29
(2) K_{leg} と各変数との関係.....	29
第5節 下肢スティフネスとピッチ、ストライドおよび疾走速度との関係	29
第6節 トレーニング現場への示唆.....	30
(1) 身長別でみた最大速度区間と速度遞減区間における K_{vert} および各変数の値とその変化率	30
(2) 競技力別でみた最大速度区間と速度遞減区間における K_{vert} および各変数の値とその変化率.....	31

第 7 章 結論.....	35
第 8 章 要約.....	36
謝辭.....	38
引用文献一覧.....	39
欧文要約.....	44
図表一覧.....	46

第1章 諸言

陸上競技における110メートルハードル競走(以下110mH)は、疾走中に9.14 m 間隔で配置された1.067 m ある高さのハードルを、疾走フォームやリズムをできる限り小さな変化で走り越えていく競技である³⁹⁾。短距離種目はアフリカ系競技者が遺伝的に優位とされるなか²⁰⁾、2004年夏季オリンピックアテネ大会の110mHにおいて、中国の劉翔選手がアジアで初めて金メダルを獲得し、さらに2006年のローザンヌ国際大会では世界記録を更新して、大きな話題となった。

ハードルをまたぐ動作(ハードリング)は、ランニングとは異なって見えるが、疾走が変容したものである¹⁰⁾³⁹⁾。したがって、110mHのタイムを縮める要因は疾走速度³⁷⁾、特に最大疾走速度が大きく関与し⁴⁰⁾、なかでもハードル間の連続する3歩における高い疾走速度の獲得と維持は極めて重要である。

100メートル競走(以下100m)における疾走速度の増加は、主にストライドの増加に大きく影響されるが²⁰⁾、110mHはハードル間の距離が9.14 m と決まっており、限られたストライドのなかで疾走速度を増加させなければならない。したがって、ピッチを高め²⁰⁾、短い接地時間で疾走することが重要となる⁵¹⁾。

110mHにおけるハードリングにおいて、より高いパフォーマンスを発揮するためには、ハードリングを可能な限りランニング動作に近づける必要がある。つまり、水平速度の減少を最小限に抑えるための、効率の良いハードルクリアランス動作が必要となる。ハードルクリアランス動作における疾走速度の低下は、主にハードリングの踏切時に生じる²¹⁾。高い競技力を有する競技者は、ハードリング踏切時の接地時間が短く、水平速度の減少を最小限に抑えていると報告されている³¹⁾。また、ハードリングの着地時においても、接地時間が短いほど競技力向上につながる⁴⁾ことから、高い競技力を有する競技者は、疾走時、ハードリング踏切時および着地時といったどの局面においても短い接地時間で疾走していると考えられる。つまり、競技力向上には、スタートからゴールまで一貫して、短い接地時間で疾走することが極めて重要となる。

ヒトの代表的な身体運動であるランニングにおいて、脚はバネの働きを担い、バウンドを繰り返しながら前方に進む⁷⁾¹⁰⁾。また、疾走速度の増加に伴い、下肢の弾性要素は重要となる⁶⁾。下肢の力学的な弾性要素の特性は、身体を質点と下肢長による一本の線形スプリングとみなしたSpring-mass modelを用いて、下肢スティフネスを算出することで評価されてきた⁴⁾。下肢スティフネスは下肢のバネの硬さをあらわし、バネ的指標の一つとし

て、立脚中期における地面反力の最大値とバネの長さの変化の比から定量化することができる⁴⁾¹²⁾。その際、地面反力の最大値と身体重心の変位の比から鉛直スティフネス（以下 K_{vert} ）、地面反力の最大値と脚の長さの変化量の比から脚スティフネス（以下 K_{leg} ）がそれぞれ求められる。 K_{vert} と疾走能力の関係を検討した先行研究では、疾走速度の増加に伴う K_{vert} の増加が報告されている¹¹⁾³⁰⁾。しかし、 K_{leg} と疾走能力の関係を検討した先行研究では、疾走速度の増加に伴う K_{leg} の増加は認められず、 K_{leg} は走速度下において一定の値を保持すると報告されている¹³⁾⁴²⁾。

これまで 110mH に関する研究は、主にトップレベルの競技者を対象とし、レース分析やハードリング技術に関する動作分析が検討され⁵⁴⁾、ハードル走速度を決定する要因が明らかにされてきた。また、下肢のバネ的要素に着目し、下肢スティフネスを Spring-mass model の解析から検討した研究は 100m や 400 メートル競走に関しては報告されているものの¹⁶⁾⁴³⁾、110mH に関しては研究対象として扱われていない。110mH において、 K_{vert} や K_{leg} に経時的な変化が確認され、その要因が明らかにされれば、競技力向上やそれに向けてのトレーニングおよびコーチングに極めて有用であると考えられる。

したがって、本研究は 110mH における下肢のバネ的要素に着目し、疾走、ハードリング踏切および着地の局面から K_{vert} および K_{leg} のバネ的特性を明らかにすることを目的とする。

第2章 関連文献の考証

第1節 110mHの競技特性

110mHにおけるインターバルは、インターバルラン局面およびハードリング局面から構成される(図1)。Singh(1985)が「Hurdling is Sprinting」と題したように、110mHはスプリントハードル種目として位置づけられ、100mと同様に、最大疾走速度の増加は高いパフォーマンスを発揮する上で重要で³⁷⁾⁴⁰⁾、特にインターバル3歩におけるインターバルランニングの重要性も指摘されている⁵¹⁾。100mにおける疾走速度の増加は、ストライドの増加に大きく影響する²⁶⁾⁵²⁾。一方、110mHは、ハードル間の距離が9.14mと一定であるため、競技者のレベルに関わらずスタートからゴールまでの歩数に差が見られず、限られたストライドで疾走速度を高めることが重要となる。したがって、疾走速度の増加には、ピッチを向上させ²⁰⁾、短い接地時間で疾走することが求められる⁵¹⁾。

110mHにおける速度推移は100mと類似した傾向を示すが、100mと比較すると疾走速度の低下が顕著にあらわれる⁴⁶⁾。110mHは、ランニングとハードリングが組み合わさった技術性の高い種目として位置づけられ、1.067mというハードルの高さが競技力に影響することから⁵³⁾、世界のトップレベルに近づくほどハードリング技術は重要となる²⁹⁾³⁶⁾。宮下(1991)は「ハードリングとは疾走中に規則的に配置されたある高さのハードルを疾走フォームやリズムをできる限り小さな変化で走り越えていく技術」と定義しているが、ハードリングによる身体重心の変位や水平速度の損失をできる限り抑えたハードルクリアランス動作は極めて重要である。

110mHに関するこれまでの研究は、日本国内や世界各国の競技会のレース分析を中心としたものが多く、ハードル走速度を決定する要因も明らかにされてきた¹⁹⁾²³⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁸⁾³²⁾³³⁾³⁴⁾⁴⁰⁾⁴⁸⁾⁵²⁾。ハードルを跳び越える時間(ハードリングタイム)はレースタイムに影響せず、どの競技力においてもほとんど差がないことも報告されている⁴⁴⁾⁴⁸⁾。しかし、ハードリング局面は、インターバルラン局面につながる重要な局面であるため、トップレベル者と互角に疾走するためには、ロスの少ないハードリング技術が必要となる。ハードリング動作を解析した研究で、ハードル走における疾走速度の低下は、主としてハードリング踏切時および着地時に生じると報告されている²¹⁾³⁶⁾。また、高い競技力を有する競技者ほど、ハードリング踏切時、短い接地時間で疾走速度の低下を最小限に抑え³¹⁾⁵⁹⁾、ハードリング着地時においても接地時間が短いほど、競技力向上につながることも報告されている⁸⁾。つまり、高い競技力を有する競技者ほど、疾走時、ハードリング踏切時およ

び着地時どの局面においても、短い接地時間で疾走していることになる。したがって、110mHにおける疾走速度の増加には、全体を通して高いピッチの獲得とその維持、短い接地時間での疾走が重要となる。

競技力向上に有用な110mHのレースパターンやハードリング動作に関する研究がこれまで多くなされてきた。動的・バネ的筋力を高め、動きづくりと姿勢の改善をおこなう必要性も示唆されている⁹²⁾。したがって、110mHの競技特性に関する新たな知見を得る手掛かりとして、バネ的要素を明らかにする必要があると考えられる。

第2節 下肢スティフネスと疾走能力

ヒトのランニングにおいて、脚は地面に接地する際の立脚期前半で弾性エネルギーを蓄積し、立脚期後半で同エネルギーを放出させ、バウンドを繰り返しながら前方へ進むとされている¹⁴⁾。また、疾走速度の増加に伴う下肢の弾性要素の重要性が指摘されている⁶⁾。ランニングにおける下肢の力学的な弾性要素の特性は、身体を、質点と下肢長による一本の線形スプリングとみなしたSpring-mass modelと定義し、脚全体を一つのパネとして捉えてモデル化することで、定量的に評価することができる⁴⁵⁾⁹⁾¹⁰⁾¹²⁾¹³⁾¹⁵⁾¹⁶⁾⁵⁵⁾。Spring-mass modelは、立脚中期における地面反力の鉛直成分の最大値とパネの長さの変化量の比から推定することが可能である。この際、地面反力の鉛直成分の最大値と身体重心の変位との比から鉛直スティフネス (K_{vert})、地面反力の鉛直成分の最大値と伸張圧縮された脚の長さの変化量との比から脚スティフネス (K_{leg}) がそれぞれ求められる (図2)。

K_{vert} や K_{leg} の算出にはフォースプラットフォーム(地面反力計)を用いることが多いが、接地時間、滞空時間、疾走速度、身長および質量から K_{vert} 、 K_{leg} の下肢スティフネスを推定することも可能である⁴²⁾⁴³⁾。

下肢スティフネスと疾走能力の関係において、疾走速度の増加に伴う K_{vert} の増加が明らかにされたが⁹⁾⁴⁾¹¹⁾¹⁵⁾²⁷⁾³⁰⁾⁵⁰⁾⁵⁵⁾、 K_{leg} は疾走速度に関わらず一定の値を保つことが報告されている¹¹⁾¹³⁾⁴²⁾⁴³⁾。

宮下(2006)が、青年男子の身体重心高が身長55%の場合、110mHのハードルの高さ1.067mは、身長にして1.89mに相当すると報告しているように、競技者は、自らの身体重心高より高いハードルを跳び越えていることになるため、ハードル毎に跳躍運動を繰り返しながら疾走していることとなり、バネ的要素の重要性がうかがえる。また、疾走速度およびピッチの獲得や維持に、 K_{vert} の増加が重要であることも報告されている¹⁰⁾¹⁶⁾

ことから、110mHにおいても Spring-mass model の解析から、下肢スティフネスの経時的な変化を検証することが重要であると考えられる。110mHにおいて、ハードルの踏切脚は競技者個々によって左右片方の脚で統一されるが、下肢のバネ的要素に左右脚差がないことが報告されていることから¹⁷⁾、両方の脚を包含する下肢スティフネスの推定が可能であると考えられる。

以上のことから、110mHにおける疾走速度の増加が下肢スティフネスに及ぼす影響を明らかにする必要があると考えられる。

第3章 目的

本研究は、110mH における下肢スティフネスの特性を疾走、ハードリング踏切および着地の局面から明らかにすることを目的とした。

第4章 方法

第1節 対象者

2013年から2014年に開催された公認競技会の110mHレースに参加した男子競技者38名を対象とした。その内訳は、関東学生選手権優勝者や日本学生選手権入賞者から一般競技者までの幅広い競技者レベルである。表1に、対象者の身体特性およびレースタイムを示した。身長、体重、年齢、自己最高記録の平均値±標準偏差は、それぞれ 1.79 ± 0.04 m、 68.9 ± 4.2 kg、 21.5 ± 3.5 yrs、 14.64 ± 0.74 secであった。

なお、レース終了後、対象者に研究の主旨、内容などを口頭および文書によって説明し、実験データとして使用することを依頼し、実験協力への同意を得た。また、本研究は、順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科における倫理委員会により認可を受け実施した。

第2節 対象レース

公認競技会における110mHレースを対象とし測定した。表2に、競技会名、日程、開催場所およびレース時のグラウンドコンディションを示した。

分析対象レースは対象者1名につき1本とし、公式記録を分析した。追風参考記録となった場合や、対象者が途中で明らかに速度を緩めるようなレース展開となった場合は分析対象外とした。また、ハードル区間歩数がレース途中で変化した場合も除外した。ハードル区間歩数は、ハードル間に要した歩数であり、通常は4歩（インターバルラン2歩、踏切、着地）である。

第3節 撮影方法

(1) レースの撮影

図3に、各競技会のレース時の撮影設定を示した。レーン側方からデジタルビデオカメラ（EX-F1, CASIO社製およびGC-PX1, Victor社製）を用いて、レース全体をパンニング撮影した。その際、スタートのピストルの閃光と対象者の足元の接地瞬間および離地瞬間が画角に正確に映るようにした。フレームレートは、300 fpsに設定した。

(2) カメラの撮影位置

カメラの撮影設定は以下の通りである。

平成25年11月2日に開催されたJ大学陸上競技記録会については、3rd地点および8th地点

から撮影した。

平成26年5月3日に開催されたJ大学陸上競技記録会については、2nd地点、5th地点および8th地点から撮影した。

平成26年6月7日に開催されたJ大学陸上競技記録会については、2nd地点、4th地点、6th地点、9th地点および10th地点から撮影した。

平成26年7月19日に開催された第27回六大学対校陸上競技大会については、1st地点、2nd地点、4th地点、6th地点、8th地点、10th地点およびゴール地点から撮影した。

第4節 映像によるレース分析

(1) データの収集

画像ソフト (Quick Time Pro, Apple社製) を用いて、スタート時のピストルの閃光もしくは煙の瞬間から、各区間の所要時間を求めた。また、スタートからゴールまでの疾走時一步毎の接地瞬間および離地瞬間のコマ数をそれぞれ読み取り、そのコマ数をフレーム数で除すことにより算出した。

(2) 映像分析

一步毎の接地時間は、同じ脚が地面に接地した瞬間から離地した瞬間までと定義し、その値を算出した。

一步毎の滞空時間は、片脚が地面から離地した瞬間から逆脚が接地した瞬間までと定義し、その値を算出した。

インターバルタイムは、各ハードル地点のハードルクリアランス直後の着地瞬間の通過時間を読み取り、通過時間の差分により、その値を算出した。

ランインタイムは、レースタイムから10th地点のハードルクリアランス直後の着地瞬間までの通過時間の差分により、その値を算出した。

区間平均速度は、尾縣 (1999) の方法を用いて、ハードル区間距離 (Start-1st : 13.72 m、1st-2ndから9th-10thまで : 9.14 m、10th-Goal : 14.02 m) をインターバルタイムで除すことにより、その値を算出した。

ピッチは、一步 (ストライド) に要した時間の逆数とし、その値を算出した。

ストライドは、得られた各インターバル速度からピッチを除すことにより、その値を算出した。

(3) 下肢スティフネスの推定

下肢スティフネスの算出は、フォースプラットフォーム（地面反力計）の測定による方法が一般的であるが、接地時間および滞空時間から算出することも可能である。したがって、本研究は、Morin et al. (2005) およびMorin et al. (2006) の推定式を用いて、接地時間、滞空時間、疾走速度、対象者の身長および質量から、鉛直スティフネス (K_{vert}) および脚スティフネス (K_{leg}) の2種類の下肢スティフネスを推定した。

本研究で算出した下肢スティフネスの項目は以下のとおりである。

- ・ インターバル毎における疾走時の下肢スティフネス
(各インターバルの一步毎の下肢スティフネスを算出した後、その値を平均したものをその区間のスティフネスとした。)
- ・ ハードル毎におけるハードリング踏切時の下肢スティフネス
(1st地点から10th地点までの各ハードルの下肢スティフネスを算出し、その値をその地点のスティフネスとした。)
- ・ ハードル毎におけるハードリング着地時の下肢スティフネス
(1st地点から10th地点までの各ハードルの下肢スティフネスを算出し、その値をその地点のスティフネスとした。)

それぞれのスティフネスはSpring-mass modelに基づき、以下の式で推定した。

(a) 鉛直スティフネス (K_{vert} : kN/m)

$$K_{vert} = F_{max} \cdot \Delta y_c^{-1}$$

ここでは、 K_{vert} 、 F_{max} 、 Δy_c はそれぞれ鉛直スティフネス (kN/m)、地面反力鉛直成分最大値 (kN)、身体重心変位 (m) をあらわす。

各々の値は以下の推定式を用いて算出した。

$$F_{\max} = \frac{mg\pi(t_f/t_c + 1)}{2}$$

$$\Delta y_c = F_{\max} \cdot \frac{t_c^2}{m(\pi^2)} + g \frac{t_c^2}{8}$$

ここでは、 m 、 g 、 t_c 、 t_f はそれぞれ対象者の質量 (kg)、重力加速度 (m/s^2)、一歩毎の接地時間 (sec)、一歩毎の滞空時間 (sec) をあらわす。このとき、 t_c は接地瞬間から離地瞬間までとした。 t_f は離地瞬間から接地瞬間までとした。

上記の手法⁴²⁾⁴³⁾を用いて、インターバル毎に K_{vert} の値を算出した。

(b) 脚スティフネス (K_{leg} : kN/m)

$$K_{\text{leg}} = F_{\max} \cdot \Delta L^{-1}$$

ここでは、 K_{leg} 、 F_{\max} 、 ΔL はそれぞれ脚スティフネス (kN/m)、地面反力の鉛直成分最大値 (kN)、脚の長さの変化量 (m) をあらわす。

各々の値は、以下の推定式を用いて算出した。

$$\Delta L = L - \sqrt{L^2 - \left(\frac{vt_c}{2}\right)^2} + \Delta y_c$$

ここでは、 v 、 t_c はそれぞれ疾走速度 (m/sec)、一歩毎の接地時間 (sec) をあらわす。

Morin et al. (2005) および Morin et al. (2006) の推定式に基づき、対象者の脚長は以下の推定式を用いて算出した。

$$L = 0.53h$$

h は対象者の身長 (m) をあらわす。なお、この推定式はWinter (1990) の人体測定的

パラメータに基づいており、脚の長さが身長53%に相当するものとした。

第5節 本論文における用語の定義

ここで、本論文における用語の定義を以下に示す。

アプローチ：Start-1st区間における加速局面をあらわす。

インターバル：前のハードルクリアランス直後の着地脚が接地した瞬間から次のハードルクリアランス直後の着地脚が接地した瞬間までの局面をあらわす。

インターバルラン：1st-2nd区間から9th-10th区間における前のハードルクリアランス直後の着地脚が接地した瞬間から次のハードル踏切脚が離地した瞬間までの局面をあらわす。

ハードリング：踏切脚が離地した瞬間からハードルクリアランス直後の着地脚が接地した瞬間までの一連の動作局面をあらわす。

ハードルクリアランス：ハードルを跳び越えること。

ランイン：10th-Goal区間における終盤の疾走局面をあらわす。

ピッチ (Step frequency)：1秒間あたりの歩数をあらわす。

ストライド (Step length)：1歩あたりの距離をあらわす。

第6節 統計処理

各変数のデータは、すべて平均値 (Mean) 土標準偏差 (SD) にて表記した。各変数の有効数字は、 t_c 、 t_f 、 K_{vert} 、 K_{leg} は一の位、 Δy_c は少数第3位、その他の変数は少数第2位とした。

インターバル毎およびハードル毎の各変数における平均値の差の比較には一元配置の

分散分析を行い、F値が有意と認められた場合、Tukeyの多重比較検定を行った。

また、それぞれの下肢スティフネスと各変数との相関関係は、Pearsonの積率相関係数を用いた。なお、すべての検定において統計的有意水準は5%未満 ($p < 0.05$) とした。

第5章 結果

対象者の公認競技会での110mHのレースタイムの平均値±標準偏差は 15.14 ± 0.73 secであった(表1)。この記録は、対象者の自己最高記録に対して96.8%の達成率であった。

第1節 疾走時における各変数のインターバル毎の比較

表3に、疾走時における K_{vert} 、 K_{leg} および各変数の平均値±標準偏差を示した。また、表4に、ピッチ、ストライドおよび疾走速度の平均値±標準偏差を示した。

(1) 疾走時における K_{vert} のインターバル毎の比較

図4-1に、疾走時における K_{vert} をインターバル毎に示した。S-1st区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められた。1st-2nd区間から7th-8th区間においては、いずれの区間との間にも有意差は認められなかった。8th-9th区間および9th-10th区間において、10th-G区間との間に有意差が認められた。

(2) 疾走時における K_{leg} のインターバル毎の比較

図4-2に、疾走時における K_{leg} をインターバル毎に示した。S-1st区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められた。1st-2nd区間から9th-10th区間において、10th-G区間との間に有意差が認められた。

(3) 疾走時における各変数のインターバル毎の比較

図4-3に、疾走時における t_c をインターバル毎に示した。S-1st区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められた。1st-2nd区間においては、いずれの区間との間にも有意差は認められなかった。2nd-3rd区間および3rd-4th区間において、8th-9th区間および9th-10th区間との間に有意差が認められた。4th-5th区間において、9th-10th区間との間に有意差が認められた。5th-6th区間から9th-10th区間においては、いずれの区間との間にも有意差は認められなかった。

図4-4に、疾走時における t_f をインターバル毎に示した。S-1st区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められた。1st-2nd区間において、6th-7th区間から

10th-G 区間との間に有意差が認められた。2nd-3rd 区間および 3rd-4th 区間において、7th-8th 区間、9th-10th 区間、10th-G 区間との間に有意差が認められた。4th-5th 区間において、9th-10th 区間および 10th-G 区間との間に有意差が認められた。5th-6th 区間から 9th-10th 区間において、10th-G 区間との間に有意差が認められた。

図 4-5 に、疾走時における F_{max} をインターバル毎に示した。S-1st 区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められた。1st-2nd 区間から 9th-10th 区間において、10th-G 区間との間に有意差が認められた。

図 4-6 に、疾走時における Δy_c をインターバル毎に示した。S-1st 区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められた。1st-2nd 区間においては、いずれの区間との間にも有意差は認められなかった。2nd-3rd 区間では、9th-10th 区間との間に有意差が認められた。3rd-4th 区間において、8th-9th 区間および 9th-10th 区間との間に有意差が認められた。4th-5th 区間において、9th-10th 区間との間に有意差が認められた。5th-6th 区間から 9th-10th 区間においては、いずれの区間との間にも有意差は認められなかった。

図 4-7 に、疾走時における ΔL をインターバル毎に示した。S-1st 区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められた。1st-2nd 区間から 9th-10th 区間において、10th-G 区間との間に有意差が認められた。

(4) 疾走時におけるピッチのインターバル毎の比較

図 4-8 に、疾走時におけるピッチをインターバル毎に示した。S-1st 区間において、9th-10th 区間および 10th-G 区間との間に有意差が認められた。1st-2nd 区間において、6th-7th 区間から 10th-G 区間との間に有意差が認められた。2nd-3rd 区間および 3rd-4th 区間において、7th-8th 区間から 10th-G 区間との間に有意差が認められた。4th-5th 区間において、8th-9th 区間、9th-10th 区間および 10th-G 区間との間に有意差が認められた。5th-6th 区間において、9th-10th 区間および 10th-G 区間との間に有意差が認められた。6th-7th 区間から 9th-10th 区間において、10th-G 区間との間に有意差が認められた。

(5) 疾走時におけるストライドのインターバル毎の比較

図 4-9 に、疾走時におけるストライドをインターバル毎に示した。S-1st 区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められた。1st-2nd 区間において、8th-9th 区間、9th-10th 区間および 10th-G 区間との間に有意差が認められた。2nd-3rd 区間において、10th-G 区間との間に有意差が認められた。3rd-4th 区間において、9th-10th 区間および 10th-G 区間との間に有意差が認められた。4th-5th 区間から 9th-10th 区間においては、いずれの区間との間にも有意差は認められなかった。

(6) 疾走時における速度のインターバル毎の比較

図 4-10 に、疾走時における速度をインターバル毎に示した。S-1st 区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められた。1st-2nd 区間において、9th-10th 区間および 10th-G 区間との間に有意差が認められた。2nd-3rd 区間および 3rd-4th 区間において、8th-9th 区間、9th-10th 区間および 10th-G 区間との間に有意差が認められた。4th-5th 区間から 9th-10th 区間において、10th-G 区間との間に有意差が認められた。

第 2 節 ハードリング踏切時における各変数のハードル毎の比較

表 5 に、ハードリング踏切時の K_{vert} 、 K_{leg} および各変数の平均値±標準偏差を示した。

(1) ハードリング踏切時における K_{vert} のハードル毎の比較

図 5-1 に、ハードリング踏切時における K_{vert} をハードル毎に示した。1st 地点および 2nd 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。3rd 地点および 4th 地点において、10th 地点との間に有意差が認められた。5th 地点から 9th 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

(2) ハードリング踏切時における K_{leg} のハードル毎の比較

図 5-2 に、ハードリング踏切時における K_{leg} をハードル毎に示した。1st 地点において、その後のすべての地点との間に有意差が認められた。2nd から 9th 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

(3) ハードリング踏切時における各変数のハードル毎の比較

図 5-3 に、ハードリング踏切時における t_c をハードル毎に示した。1st 地点において、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。2nd 地点および 3rd 地点において、10th 地点との間に有意差が認められた。4th 地点において、9th 地点 10th 地点との間に有意差が認められた。5th 地点において、10th 地点との間に有意差が認められた。6th 地点から 9th 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

図 5-4 に、ハードリング踏切時における t_f をハードル毎に示した。1st 地点から 9th 地点のすべての地点において、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

図 5-5 に、ハードリング踏切時における F_{max} をハードル毎に示した。1st 地点から 9th 地点のすべての地点において、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

図 5-6 に、ハードリング踏切時における Δy_c をハードル毎に示した。1st 地点において、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。2nd 地点において、10th 地点との間に有意差が認められた。3rd 地点において、9th 地点および 10th 地点との間に有意差が認められた。4th 地点において、9th 地点との間に有意差が認められた。5th 地点において、10th 地点との間に有意差が認められた。6th 地点から 9th 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

図 5-7 に、ハードリング踏切時における ΔL をハードル毎に示した。1st 地点において、その後のすべての地点との間に有意差が認められた。2nd 地点から 9th 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

第 3 節 着地時における各変数のハードル毎の比較

表 6 に、 K_{vert} 、 K_{leg} および各変数の平均値 ± 標準偏差を示した。

(1) ハードリング着地時における K_{vert} のハードル毎の比較

図 6-1 に、ハードリング着地時における K_{vert} をハードル毎に示した。1st 地点において、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。2nd 地点において、10th 地点と

の間に有意差が認められた。3rd 地点および 4th 地点において、9th 地点および 10th 地点との間に有意差が認められた。5th 地点において、10th 地点との間に有意差が認められた。6th 地点から 9th 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

(2) ハードリング着地時における K_{leg} のハードル毎の比較

図 6-2 に、ハードリング着地時における K_{leg} をハードル毎に示した。1st 地点および 2nd 地点において、10th 地点との間に有意差が認められた。3rd 地点において、9th 地点および 10th 地点との間に有意差が認められた。3rd 地点から 9th 地点において、10th 地点との間に有意差が認められた。

(3) ハードリング着地時における各変数のハードル毎の比較

図 6-3 に、ハードリング着地時における t_c をハードル毎に示した。1st 地点および 2nd 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。3rd 地点、4th 地点および 5th 地点において、9th 地点、10th 地点との間に有意差が認められた。6th 地点から 9th 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

図 6-4 に、ハードリング着地時における t_f をハードル毎に示した。1st 地点から 9th 地点のすべての地点において、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

図 6-5 に、ハードリング着地時における F_{max} をハードル毎に示した。1st 地点から 9th 地点のすべての地点において、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

図 6-6 に、ハードリング着地時における Δy_c をハードル毎に示した。1st 地点および 2nd 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。3rd 地点から 5th 地点において、9th 地点、10th 地点との間に有意差が認められた。6th 地点から 9th 地点においては、いずれの地点との間にも有意差は認められなかった。

図 6-7 に、ハードリング着地時における ΔL をハードル毎に示した。1st 地点から 9th 地点において、10th 地点との間に有意差が認められた。

第4節 下肢スティフネスと各変数との関係

(1) 疾走時における下肢スティフネスと各変数との関係

表7に、疾走時における最大速度区間の K_{vert} の値と各変数との関係を相関係数により示した。 K_{vert} は、 t_c ($r=-0.932$, $p<0.001$)、 t_f ($r=0.445$, $p<0.01$)、 F_{max} ($r=0.828$, $p<0.001$) および Δy_c ($r=-0.922$, $p<0.001$) との間に有意な相関関係が認められた。

表8に、疾走時における最大速度区間の K_{leg} の値と各変数との関係を相関係数により示した。 K_{leg} は、 t_c ($r=-0.716$, $p<0.001$)、 t_f ($r=0.630$, $p<0.001$)、 F_{max} ($r=0.875$, $p<0.001$) および ΔL ($r=-0.932$, $p<0.001$) との間に有意な相関関係が認められた。

(2) ハードリング踏切時における下肢スティフネスと各変数との関係

表9に、ハードリング踏切時における最大速度地点の K_{vert} の値と各変数との関係を相関係数により示した。 K_{vert} は、 t_c ($r=-0.892$, $p<0.001$)、 F_{max} ($r=0.833$, $p<0.001$) および Δy_c ($r=-0.884$, $p<0.001$) との間に有意な相関関係が認められた。

表10に、ハードリング踏切時における最大速度地点の K_{leg} の値と各変数との関係を相関係数により示した。 K_{leg} は、 t_c ($r=-0.682$)、 F_{max} ($r=0.927$, $p<0.01$) および ΔL ($r=-0.918$, $p<0.001$) との間に有意な相関関係が認められた。

(3) ハードリング着地時における下肢スティフネスと各変数との関係

表11に、ハードリング着地時における最大速度地点の K_{vert} の値と各変数との関係を相関係数により示した。 K_{vert} は、 t_c ($r=-0.893$, $p<0.001$)、 F_{max} ($r=0.687$, $p<0.001$) および Δy_c ($r=-0.880$, $p<0.001$) との間に有意な相関関係が認められた。

表12に、ハードリング着地時における全ハードル地点の K_{leg} の値と各変数との関係を相関係数により示した。 K_{leg} は、 t_c ($r=-0.821$, $p<0.001$)、 F_{max} ($r=0.727$, $p<0.001$) および ΔL ($r=-0.853$, $p<0.001$) との間に有意な相関関係が認められた。

第5節 下肢スティフネスとピッチ、ストライドおよび疾走速度との関係

(1) 疾走時における最大速度区間の K_{vert} および K_{leg} の値とピッチ、ストライドおよび疾走速度との関係

表13に、疾走時における最大速度区間の K_{vert} および K_{leg} の値と、ピッチ、ストライドおよび疾走速度との関係を相関係数により示した。

K_{vert} は、ピッチ ($r=0.591$, $p<0.001$) および疾走速度 ($r=0.582$, $p<0.001$) との間に有意な相関関係が認められた。

K_{leg} は、ピッチ ($r=0.348$, $p<0.05$) との間に有意な相関関係が認められた。

(2) 疾走時における最大速度区間のピッチ、ストライドおよび疾走速度の値と、それぞれの相互関係

表 14 に、疾走時における最大速度区間のピッチ、ストライドおよび疾走速度の値とそれぞれの相互関係を相関係数により示した。

疾走速度は、ピッチ ($r=0.760$, $p<0.001$) およびストライド ($r=0.435$, $p<0.01$) との間に有意な相関関係が認められた。

第6章 考察

第1節 疾走時における K_{vert} および K_{leg} のインターバル毎の比較

(1) 疾走時における K_{vert}

疾走時における K_{vert} は、S-1st 区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められ、有意に低値を示した。 t_c および Δy_c は、S-1st 区間において、その後すべての区間との間に有意差が認められ、有意に高値を示し、 t_f は低値を示した。

100m 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大きく影響する²⁰⁾ため、スプリントハードル種目として位置づけられる 110mH においても、加速局面に相当する S-1st 区間のアプローチ局面で、疾走速度の獲得にストライドを増加させることが重要となる。したがって、一步一步のストライドを大きくするために、地面を強く押しながら大きな水平成分の力積を獲得し、疾走することが重要であると考えられる。大きな力積を獲得するために t_c が長くなったから、ストライドが増加したと考えられる。

また、加速局面では、身体を前傾しながら推進力を得る。大きなストライドを獲得するためには t_f を長くしながら疾走することが重要となる。低い身体重心を維持しながら前傾姿勢をとりストライドを大きくしようとする、身体の上下動が大きくなると考えられる。そのため、 Δy_c は S-1st 区間において、その後のすべての区間と比較して有意に大きくなったと考えられる。身体重心の上下動は、得られた身体重心の鉛直方向の変位によってあらわされ、 Δy_c は t_c に大きく影響されると考えられる。 t_c が、S-1st 区間において、その後のすべての区間と比較して長かったことも、 Δy_c が大きくなった要因と考えられる。

F_{max} は、S-1st 区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められ、有意に低値を示した。110mH は、S-1st 区間で最高速度に近い疾走速度まで達する。地面反力の鉛直成分は疾走速度の増加に伴い増加する²¹⁾が、S-1st 区間における疾走速度はその後の区間より有意に低値を示したため、 F_{max} が S-1st 区間で有意に低値を示したと考えられる。以上のことから、 K_{vert} が S-1st 区間において、その後の区間と比較して有意に低値を示したのは、 F_{max} が小さく、 t_c および Δy_c が大きかった影響によると考えられる。

全インターバルラン区間における K_{vert} は、1st-2nd 区間から 9th-10th 区間までのすべての区間において有意差は認められなかった。 t_c は、2nd-3rd 区間および 3rd-4th 区間において、8th-9th 区間および 9th-10th 区間との間に有意差が認められた。また、4th-5th 区間においても、9th-10th 区間との間に有意差が認められた。 t_f は、1st-2nd 区間において 6th-7th 区間から 9th-10th 区間との間に、2nd-3rd 区間および 3rd-4th 区間においては

7th-8th 区間および 9th-10th 区間との間に、さらに 4th-5th 区間においても 9th-10th 区間との間に有意差が認められた。

110mH は、ハードル間を限られたストライドで疾走速度を高めることが求められ、高い疾走速度の獲得とその維持が重要となるため³⁷⁾⁴⁴⁾ピッチの向上が大きく関与する²⁰⁾。本研究において、疾走速度の増加に伴うピッチの増加が確認されたが、 t_c と t_f の短縮の影響によると考えられる。

Δy_c は、2nd-3rd 区間において 9th-10th 区間との間に、3rd-4th 区間において 8th-9th 区間および 9th-10th 区間との間に、4th-5th 区間において 9th-10th 区間との間にそれぞれ有意差が認められ、有意に低値を示した。 t_c が短くなったことで、身体重心の上下動を抑えた疾走ができ、 Δy_c が減少し、そのため疾走速度が増加したと考えられる。しかし、疾走速度の低下に伴い t_c や t_f が長くなったことから、ピッチが低下し、ストライドが増加したことで、身体重心の上下動を抑えることが困難になったと推測される。

K_{vert} は、すべてのインターバルラン区間において、有意差は認められなかった。その要因として、 F_{max} がインターバルラン区間において、ほぼ一定の値を保持したことが挙げられる。また、疾走速度の増加に伴って、 t_c は短く Δy_c も小さくなったが、それぞれの変化量がごくわずかであったことも関与していると考えられる。

K_{vert} は、S-1st 区間において、10th-G 区間との間に有意差が認められたが、同様に、8th-9th 区間および 9th-10th 区間においても、10th-G 区間との間に有意差が認められ、有意に低値を示した。10th-G 区間のランイン局面では、ハードリングによる疾走速度の低下が生じないため、疾走速度が再び大きく増加したことによると考えられる。レース分析を通じて 110mH は、10th-G 区間で最大疾走速度に達することが明らかにされている⁴⁴⁾。本研究においても、疾走速度が 10th-G 区間で最高値を示すことが確認されたが、それは t_c および Δy_c が 10th-G 区間において最低値を示した影響によると考えられる。 F_{max} は、S-1st 区間から 9th-10th 区間において、10th-G 区間との間に有意差が認められ、有意に低値を示した。100m において、疾走速度の増加に伴う地面反力の鉛直成分の増加が確認された²⁾が、本研究においても同様の結果が得られた。 K_{vert} が 10th-G 区間において有意に増加したのは、疾走速度の増加に伴い F_{max} が増大し、 t_c および Δy_c が減少した影響によると考えられる。

(2) 疾走時における K_{leg}

疾走時における K_{leg} は、S-1st 区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められ、有意に高値を示した。 K_{leg} と同様に ΔL も、S-1st区間において、その後のすべての区間との間に有意差が認められ、有意に高値を示した。 ΔL は疾走速度を用いて算出されるが、S-1st区間は疾走速度が最も低い区間であった。Morin et al. (2006) は、 K_{leg} は100mの走速度下において一定の値を保持することを明らかにしたが、加速局面である0-20m区間を分析対象としなかった。100mの0-20m区間および110mHのS-1st区間は、加速局面として位置づけられ、走速度を獲得する区間であるため、その他の区間と比較して疾走速度が低いことは明らかである。よって、 K_{leg} がS-1st区間において最高値を示したのは、 F_{max} および ΔL がその後のインターバルと比較して低値を示した影響によると考えられる。

全インターバルラン区間における K_{leg} は、1st-2nd区間から9th-10th区間までのすべての区間において、有意差は認められなかった。Morin et al. (2006) は短距離種目を専門としない健常者を対象に、100mの下肢スティフネスの経時的な変化を検証し、疾走速度の増加や減少に関係なく K_{leg} は一定の値を保持することを明らかにした。その際、被験者の平均疾走速度は8.10 m/secであった。本研究において、インターバルラン区間における最大速度区間は2nd-3rd区間および3rd-4th区間の7.83 m/sec、最小速度区間は9th-10th区間の7.42 m/secであり、Morin et al. (2006) の研究と比較しても低い速度下での疾走であったが、 K_{leg} に差は見られなかった。したがって、本研究はMorin et al. (2006) の主張を支持し、走速度下では K_{leg} の増加が疾走速度の増加に及ぼす影響は少ないことが示唆された。

Farley et al. (1996) は、ピッチの増加に伴い K_{leg} が増加すること、また、 K_{leg} が3.0 Hzまで直線的に増加することを明らかにした。また、渡辺 (2009) は、連続した跳躍運動において、3.0 Hzと3.5 Hzのピッチ下では、脚スティフネスの差が認められないことを報告している。本研究におけるピッチ範囲は3.98-4.66 Hzを示したが、上記の研究のピッチと比較しても高いピッチ下での疾走であった。したがって、本研究も渡辺 (2009) の主張を支持し、跳躍運動と同様に、3.5 Hz以上の走運動においても、 K_{leg} に差が見られないことが示唆された。

K_{leg} は、1st-2nd区間から9th-10th区間において、10th-G区間との間に有意差が認められ、有意に高値を示した。 K_{leg} と同様に、 ΔL も、1st-2nd区間から9th-10th区間において、10th-G区間との間に有意差が認められ、有意に高値を示した。インターバルラン局面では

ストライドは限定されるが、10th-G区間のランイン局面においては、ストライドを大きくしながら疾走速度を増加させることが可能となるため、インターバルラン時の疾走と比較して、脚を大きく動かすための屈曲や伸展が積極的に起こると推測される。したがって、 ΔL が10th-G区間において有意に増加したのは、疾走速度が大きく増加した影響によると考えられる。以上のことから、 K_{leg} が10th-G区間において有意に減少したのは、疾走速度の増加に伴い F_{max} が増大したものの、それ以上に ΔL が大きく増加した影響によると考えられる。

第2節 ハードリング踏切時における K_{vert} および K_{leg} のハードル毎の比較

(1) ハードリング踏切時における K_{vert}

ハードリング踏切時における K_{vert} は 3rd 地点および 4th 地点において、10th 地点との間に有意差が認められ、有意に高値を示した。 t_e は、2nd および 3rd 地点において 10th 地点との間に、4th 地点において 9th 地点および 10th 地点との間に、5th 地点において 10th 地点との間にそれぞれ有意差が認められ、有意に低値を示した。 Δy_c は、2nd 地点において 10th 地点との間に、3rd 地点において 9th 地点および 10th 地点との間に、4th 地点において 9th 地点との間に、5th 地点において 10th 地点との間にそれぞれ有意差が認められ、有意に低値を示した。

110mH における疾走速度の低下は、主にハードリング踏切時に生じると報告されている²¹⁾。踏切位置からハードルまでの踏切側距離と、ハードルから着地位置までの着地側距離の比は、個々の競技者によって異なるが、1991 年第 3 回世界陸上競技選手権東京大会で優勝したフォスター選手の 60 : 40 が理想的であると指摘されている⁴⁴⁾。実際、踏切側距離が着地側距離に対して長くなることも報告されている²⁵⁾。また、宮下ら (1997) は、記録短縮の要因として踏切側距離の増大を挙げているが、「遠くから踏切る」ことでディップ (前傾姿勢) がかけやすくなり、小さな踏切角度からハードルを低く跳び越えることが可能となる³⁸⁾。ハードル走は、ハードルを跳び越える際、身体重心を高く引き上げるが、より高い走速度下では、遠くから踏切り、ハードルの手前で身体重心が最高点に達し、重心の軌跡が起きるハードルクリアランス動作となる。一方、低い走速度下ではピッチが低下し、ストライドが増加することで踏切側距離が短くなり、「近くから踏切る」ことによりブレーキがかかる。そのため、ハードルクリアランス動作は高くハードルを跳び越えるものとなり、ハードルの真上で身体重心は最高点に達し、重心の軌跡が起きる¹⁰⁾。110mH

において、最大速度区間は、第 3 インターバル(4th 地点)、速度遅減区間は第 9 インターバル(10th 地点)であることが明らかにされている。その両区間を比較し検討した研究²⁸⁾では、4th 地点と比較して 10th 地点では t_c が長くなることが報告されている。本研究においても上記の研究と同様に、 t_c の増加は 4th 地点以降ハードル毎に確認されたが、 Δy_c にも大きく関与したと考えられる。

以上のことから、 K_{vert} が 3rd 地点および 4th 地点において、10th 地点との間に有意差が認められたのは、 F_{max} がハードル間で有意差が認められなかったものの、 t_c および Δy_c が 5th 地点以降ハードル毎に減少した影響によると考えられる。

(2) ハードリング踏切時における K_{leg}

ハードリング踏切時における K_{leg} は、スタートして 1st 地点で最高値を示し、その後はハードル毎に一定の値を保ち続ける傾向がみられた。そして、1st 地点において、その後すべての地点との間に有意差が認められ、有意に高値を示した。 K_{leg} が 1st 地点で最高値を示した要因として、S-1st 区間における疾走速度および 1st 地点において、 ΔL がその後のインターバル区間と比較して有意に低値を示したことが挙げられる。 K_{leg} は、2nd 地点以降すべてのハードル間において有意差は認められなかった。

以上の結果から、ハードリング踏切時における K_{leg} の増加は、疾走時と同様に、疾走速度の増加に及ぼす影響は少ないと言える。これは、Morin et al. (2005) および Morin et al. (2006) の主張と一致する。

第 3 節 ハードリング着地時における K_{vert} および K_{leg} のハードル毎の比較

(1) ハードリング着地時における K_{vert}

ハードリング着地時における K_{vert} は、2nd 地点において 10th 地点との間に、3rd 地点および 4th 地点において 9th 地点および 10th 地点との間に、5th 地点において 10th 地点との間にそれぞれ有意差が認められ、有意に高値を示した。 t_c は、3rd 地点、4th 地点および 5th 地点において、9th 地点および 10th 地点との間に有意差が認められ、有意に低値を示した。 Δy_c は、 t_c と同じ地点との間に有意差が認められた。

ハードリング着地時における K_{vert} は、ハードリング踏切時と同様に、4th 地点以降ハードル毎に有意な低下がみられた。疾走速度の増加に伴い t_c および Δy_c が減少したことから、高い走速度下では、身体重心を高くした姿勢で着地動作ができていると考えられる。

Munro et al. (1985) は、疾走速度の増加に伴うハードリング着地中の鉛直方向の速度の増加、および着地直後の地面反力の鉛直成分の増加を指摘した。本研究において、 F_{max} はすべての地点で有意差は認められなかったものの、3rd 地点まで増加し、その後ハードル毎に減少する傾向がみられた。ハードリング踏切時において、 t_c が 4th 地点以降ハードル毎に有意に増加したことで、身体の上下動が大きくなり、その結果ハードル毎に高く跳び越えたハードルクリアランス動作を行っていたと推測される。また、ハードリング踏切時において、 t_f はすべての地点で有意差は認められなかったものの、3rd 地点まで減少し、その後ハードル毎に増加する傾向がみられた。これは、長い t_f によって脚が着地時に衝撃に耐えられないため身体が沈み、身体重心が低くなったことで t_c が長くなり、 Δy_c の増大に影響したことによると考えられる。ハードリング着地時における K_{vert} が 3rd 地点および 4th 地点以降ハードル毎に減少したのは、 F_{max} が 5th 地点以降ハードル毎にわずかながらも減少し、 t_c および Δy_c が 5th 地点以降ハードル毎に有意に増加した影響によると考えられる。

(2) ハードリング着地時における K_{leg}

ハードリング着地時における K_{leg} は、スタートして 1st 地点から 3rd 地点まではわずかに増加した。その後はハードル毎にわずかに減少し、10th 地点で最低値を示す傾向がみられた。 K_{leg} は、1st 地点から 9th 地点において 10th 地点との間に有意差が認められ、また 3rd 地点において 9th 地点との間にも有意差が認められ、有意に高値を示した。 F_{max} は疾走速度の増加や減少に伴い、ハードル毎でわずかな変化はみられたものの、すべての地点において有意差は認められなかった。また、10th-G 区間のランイン局面において、疾走速度は再び増加し、最高値を示した。その結果、 ΔL が 10th 地点において、その前の地点と比較して有意に高くなったと考えられる。したがって、 K_{leg} が 1st 地点から 9th 地点において 10th 地点との間に有意差が認められたのは、 ΔL が 10th 地点において有意に高値を示した影響によると考えられる。

また、 K_{leg} が 3rd 地点において、9th 地点との間に有意差が認められたのは、長い t_f のなかでのハードルクリアランス動作において、脚が着地による衝撃に耐えられず、屈曲し、「つぶれた」着地動作が行われた結果、 ΔL が有意に増加したと考えられる。したがって、 K_{leg} が 3rd 地点と 9th 地点との間に有意差が認められたのは、 F_{max} が 4th 地点以降ハードル毎にわずかに減少し、 ΔL が 4th 地点以降ハードル毎にわずかに増加した影響によると

考えられる。本研究において、 K_{leg} は、ハードリング着地時において、高い走速度下と低い速度下で変化することが確認された。しかし、 K_{leg} の増加は、ハードル着地時においても疾走速度の増加に及ぼす影響は少ないと考えられる。

第4節 下肢スティフネスと各変数との関係

(1) K_{vert} と各変数との関係

表7から、疾走時において、 K_{vert} と最も相関がみられた変数は t_c であることが明らかとなった。最大速度区間において、 K_{vert} は t_c との間に負の相関関係 ($r=-0.932$, $p<0.001$) が認められた。以上のことから、 K_{vert} の増加には、短い t_c で Δy_c を小さくし、 F_{max} を増大させることが重要だと考えられる。なお、表9および11から、ハードリング踏切時、および着地時においても、 K_{vert} と最も相関がみられた変数は t_c であることが明らかとなった。したがって、疾走時と同様に、ハードルクリアランス動作における K_{vert} の増加には、短い t_c で Δy_c を小さくし F_{max} を増大させることが重要だと考えられる。疾走速度の低下は、ハードリング踏切時、および着地時の t_c が最大速度区間から速度減速区間にかけて有意に長くなった影響によると考えられる。したがって、 t_c を短くした高い K_{vert} の獲得とその維持が重要であるといえる。

(2) K_{leg} と各変数との関係

表8、10、12から、 K_{leg} と最も相関がみられた変数は疾走時およびハードリング着地時では ΔL 、踏切時では F_{max} であることが明らかとなった。また、 K_{leg} は、 t_c および F_{max} との間に有意な相関関係が認められた。したがって、 K_{leg} の増加には、短い t_c で脚の屈曲を抑えた疾走およびハードルクリアランス動作の重要性が示唆された。

第5節 下肢スティフネスとピッチ、ストライドおよび疾走速度との関係

表14から、最大速度区間において、疾走速度はピッチ ($r=0.760$, $p<0.001$)、ストライド ($r=0.435$, $p<0.01$) との間に有意な正の相関関係が認められた。したがって、インターバルラン局面における疾走速度の増加には、ストライドを調整しながらより高いピッチを獲得することが重要であると考えられる²⁰⁾。

表13から、最大速度区間において、 K_{vert} はピッチおよび疾走速度との間に有意な正の相関関係 ($r=0.591$; 0.582 , $p<0.001$) が認められたが、ストライドとの間には有意な相

関関係は認められなかった。したがって、インターバルラン局面における疾走速度の増加には、高い K_{vert} を獲得しピッチを高めていくことが重要であると考えられる。

表 13 から、最大速度区間において、 K_{leg} はピッチ ($r=0.348$, $p<0.05$) との間に有意な正の相関関係が認められたものの、疾走速度との間には有意な相関関係は認められなかった。したがって、110mH においても 100m と同様に、疾走速度の増加と K_{leg} の間には有意な相関は認められないことが確認され、Farley et al. (1993) の主張を支持する見解が示された。

以上のことから、 K_{leg} の増加が疾走速度の増加にほとんど影響を及ぼさず、レース分析の指標として、 K_{leg} をインターバル毎に検証していく必要性はあまりみられないと考えられる。

第 6 節 トレーニング現場への示唆

110mH において、高いパフォーマンスを発揮するためには疾走速度の増加が重要で、そのために高い K_{vert} の獲得と維持が必要となる。宮下 (1991) は、「世界のトップクラスは、男女とも第 3 インターバルで最大速度に達し、その後第 9 インターバル (最終区間) まで速度低下は続く。」ことを明らかにした。また、それぞれの区間の動作を比較し、検討した研究も報告されている²⁹⁾。これらの先行研究から得られた知見を基にし、本研究は、疾走時における最大速度区間の 3rd-4th 区間と速度逡減区間の 9th-10th 区間、ハードリング踏切時および着地時における最大速度区間の 4th 地点と速度逡減区間の 10th 地点で K_{vert} および各変数をそれぞれ比較し検討を試みた。

(1) 身長別でみた最大速度区間と速度逡減区間における K_{vert} および各変数の値とその変化率

表 15-1、15-2、15-3、15-4 に全インターバルラン区間の疾走時、表 16-1、16-2、16-3、16-4 にハードリング踏切時、表 17-1、17-2、17-3、17-4 にハードリング着地時における K_{vert} および各変数の値を、同じ競技力を有する競技者を対象とし身長別に示した。また、最大速度区間と速度逡減区間における K_{vert} および各変数の値とその変化率も示した。対象者については、1.85 m 以上を高身長競技者、1.80 m 以下を低身長競技者とした。低身長競技者 E は高身長競技者 A と比較して、疾走、ハードリング踏切および着地のすべての局面で、各変数の多くを上回り、高い K_{vert} を発揮していることが確認された。宮下 (1991)

は「どの競技者も同じ高さのハードルを越えなければならないために、身長特に脚長に優れていることが非常に有利となる」と述べているが、高身長競技者は、小さな踏切角度からハードルを跳び越えることが可能である。一方、低身長競技者は、身体重心が低いために大きな踏切角度からハードルを跳び越えなければならない⁴⁰⁾。したがって、競技者 E は、踏切準備動作を積極的に行うために大きな F_{max} を獲得する必要があると考えられる。また、高い走速度下で疾走する競技者は、ハードリング着地時の身体重心高が高いことや⁵⁰⁾、脚長が長い競技者は、身体重心高が高いことが報告されている⁴⁰⁾。競技者 E が競技者 A を各変数および K_{vert} で上回っていたことから、低身長競技者は、高身長競技者以上に高い K_{vert} を獲得する必要があると考えられる。宮下 (2006) は、青年男子の身体重心高が身長⁵¹⁾の 55 % の場合、110mH のハードルの高さ 1.067 m は身長にして 1.89 m に相当すると報告している。したがって、競技者 A を含め多くの競技者は、自らの身体重心高より高いハードルを跳び越えていることになるため、高い K_{vert} の獲得とその維持が極めて重要となる。特に、ハードリング着地時における K_{vert} は、疾走時やハードリング踏切時と比較して最大速度区間と速度逓減区間の変化率が大きく、競技者 A、E ともに顕著な低下がみられた。以上のことから、ハードリング着地時における K_{vert} の低下の抑制は、疾走速度の増加に大いに影響を及ぼすと考えられる。

(2) 競技力別でみた最大速度区間と速度逓減区間における K_{vert} および各変数の値とその変化率

表 18-1、18-2、18-3、18-4 に全インターバルラン区間の疾走時、表 19-1、19-2、19-3、19-4 にハードリング踏切時、表 20-1、20-2、20-3、20-4 にハードリング着地時における K_{vert} および各変数の値を、低身長競技者を対象とし競技力別に示した。また、最大速度区間と速度逓減区間における K_{vert} および各変数の値とその変化率を示した。それぞれの競技者の分析対象タイムは、13 秒台、14 秒台、15 秒台であった。13 秒台競技者 E は、14 秒台競技者 T や 15 秒台競技者 AA と比較して、疾走、ハードリング踏切および着地のすべての局面で、最大速度区間と速度逓減区間の各変数を上回る傾向がみられた。競技者 E は K_{vert} が高いことから、短い t_c で Δy_c を小さくし F_{max} を増大させていると考えられる。したがって、低身長競技者においては、より高い K_{vert} の獲得とその維持が疾走速度の増加に大きく影響し、高いパフォーマンスを発揮するために重要であると考えられる。一方、競技者 T や競技者 AA は長い t_c と短い t_c による疾走、いわゆる「つぶれた」疾走動作を行って

いたと考えられる。また、ハードリング着地時における K_{vert} および各変数は、疾走時やハードリング踏切時と比較して、最大速度区間と速度通減区間の変化率が大きく、すべての競技者に顕著な低下がみられた。低身長競技者は、高身長競技者と比較して、ハードルクリアランス時に脚が着地するまでの t_f が長くなることから、ハードリング着地時に脚が受ける衝撃は大きくなると考えられる。したがって、着地による衝撃に耐えるために硬いバネを有することが競技力向上のために必要で、そのためのスプリント能力も重要であると考えられる⁴⁷⁾⁵²⁾。

表 21-1、21-2、21-3、21-4 に全インターバルラン区間の疾走時、表 22-1、22-2、22-3、22-4 にハードリング踏切時、表 23-1、23-2、23-3、23-4 にハードリング着地時における K_{vert} および各変数の値を、高身長競技者を対象とし競技力別に示した。また、最大速度区間と速度通減区間における K_{vert} および各変数の値とその変化率も示した。それぞれの競技者の分析タイムは、13 秒台、14 秒台、15 秒台であった。疾走時の最大速度区間および速度通減区間における K_{vert} に着目すると、高い競技力を有する競技者ほど高い K_{vert} を発揮する傾向はみられなかった。高身長競技者は、低身長競技者と比較して脚長が長いことから、ハードル間を効率よく疾走するためのストライドを獲得しやすいことが考えられる。しかし、低身長競技者以上に、ストライドを狭めながらピッチを高め疾走速度を増加させる必要がある。競技者 A が高い走速度下で疾走しているのは、短い t_c と短い t_f から高いピッチを獲得していることが大きく影響していると考えられる。また、競技者 A は、 F_{max} において最も低値を示す傾向がみられた。競技者 C や競技者 Z の F_{max} が高値を示したのは、長い t_f の影響によると考えられる。競技者 A は、小さな F_{max} で高いパフォーマンスを発揮できているが、短い t_f であったことが影響していると考えられる。したがって、疾走速度の増加には、長い t_f から大きな F_{max} を獲得するのではなく、短い t_c から大きな F_{max} を獲得することが重要であると考えられる。ハードリング踏切時の K_{vert} においても疾走時と同様の傾向が示され、高い競技力を有する競技者に関しては、 K_{vert} は高値を示さなかった。また、いずれの競技者においても、 t_c に大きな差はみられなかったが、すべての高身長競技者は、低身長競技者 E と比較して t_c が長い傾向がみられた。ハードリングは、疾走とは異なり特別のロングストライドを有することから、高身長競技者ほど、大きなストライドでハードルをより前に跳び越えるための t_c が必要となる。競技者 A は、競技者 C や競技者 Z と比較して F_{max} が低値を示し、疾走時と同様の傾向がみられた。競技者 C や競

技者 Z の F_{max} が高値を示したのは、疾走時同様長い t_f の影響によると考えられる。高身長競技者は身長が高い利点を生かし、小さな踏切角度から低くハードルを跳び越えることが可能である。つまり、競技者 A は、小さな踏切角度からハードルを越えていく「またぎ」動作ができていると考えられる。一方、競技者 C および競技者 Z は、 t_c 、 t_f ともに長いことから、「間延びした」ハードルクリアランス動作を行っていたと推測される。したがって、疾走時におけるピッチの低下を抑制し、踏切時においてブレーキをかけないハードルクリアランス動作が必要となる。

最後に、ハードリング着地時の最大速度区間および速度逡減区間における K_{vert} は、競技者 A は競技者 C や競技者 Z と比較して、各変数の多くを上回り、高い K_{vert} の発揮が確認された。競技者 A は競技者 C や競技者 Z と比較して、疾走時、ハードリング踏切時と同様に、最大速度区間および速度逡減区間で F_{max} は低値を示したものの、短い t_c で Δy_c を小さくしていた。競技者 C や競技者 Z は、 t_c が長く Δy_c が大きかったことから、先述したように、ハードリング踏切時の「間延びした」ハードリングクリアランス動作により、脚が着地による衝撃に耐えられず、「つぶれた」着地動作を行っていたと考えられる。ハードリング着地時の最大速度区間および速度逡減区間における K_{vert} の変化率については、すべての競技者において顕著な低下がみられた。ハードリング着地局面はインターバルラン局面につながる重要な局面であり、疾走速度の増加に重要であると考えられる。そのため、ハードリング着地時においては短い t_c でインターバルラン局面の疾走に移行させるハードルクリアランス動作が、高いパフォーマンスを発揮するために求められる。

本研究において、ハードリング着地時の K_{vert} は、高身長競技者、低身長競技者ともに最大速度区間および速度逡減区間において最も変化率が大きく、顕著な低下がみられた。以上のことから、ハードリング着地時にみられる K_{vert} の低下を抑制することが重要で、トレーニング現場においてこの結果を生かすことが示唆された。

下肢スティフネスの変化をインターバル毎およびハードル毎に検証した結果、疾走速度の増加に伴い K_{vert} が増加し、高い K_{vert} を獲得することが疾走速度に大いに影響を及ぼしていることが確認された。また、身体的特性が下肢スティフネスに及ぼす影響もみられ、指導現場においてそれぞれの競技者の身体的特性に合わせたパフォーマンス発揮の重要性が示唆された。高い K_{vert} の獲得手段としては、跳躍系トレーニングおよび筋力系トレーニングを日常的に行うことが挙げられるが¹⁸⁾、跳躍系トレーニングにおいては、より短い t_c を繰り返した跳躍による硬いバネの獲得が望ましい。そして、硬いバネを疾走動作に移行

させ、スプリント能力の向上を図ることが重要であると考えられる⁴⁹⁾。

本研究は、関東学生選手権優勝者や日本学生選手権入賞者から一般競技者までの幅広いレベルの競技者を対象に下肢スティフネスを検証した。しかし、身長別や競技力別でみた下肢スティフネスの特性は事例的であり、今後身長別や競技力別に、下肢スティフネスを比較し検討する必要があると考えられる。また、跳躍系トレーニングおよび筋力系トレーニングが下肢スティフネスに及ぼす影響は、未だ明らかにされていない。したがって、これらの問題点を今後の課題としたい。

第7章 結論

疾走、ハードリング踏切および着地のすべての局面において、疾走速度の増加に伴う鉛直スティフネス (K_{vert}) の増加が確認された。特に、ハードリング踏切時および着地時において、最大速度区間 (3rd 地点) から速度遞減区間 (10th 地点) にかけて有意な減少が確認された。しかし、すべての局面で、疾走速度の増加に伴う脚スティフネス (K_{leg}) の増加は認められなかった。

下肢スティフネスに最も影響を及ぼす変数は、 K_{vert} はすべての局面において接地時間、 K_{leg} は疾走およびハードリング着地局面では脚長変化量、踏切局面では F_{max} であることが明らかにされた。 K_{vert} は、疾走速度およびピッチとの間に有意な正の相関関係が認められた。一方、 K_{leg} はピッチとの間に有意な正の相関関係が認められたものの、疾走速度との間に有意な相関関係は認められなかった。

以上の結果から、接地時間を短くした疾走が高い K_{vert} の獲得に大きな影響を及ぼし、疾走速度を増加させるために高い K_{vert} を獲得することの重要性が明らかにされた。

第8章 要約

110mHにおける競技力向上には、スタートからゴールまでの全体を通して、短い接地時間で疾走することが重要であると言われている。下肢のバネの硬さをあらかず下肢スティフネスは、疾走時における接地時間および滞空時間から推定できると報告されている。下肢のバネ的要素に着目し、下肢スティフネスを Spring-mass model の解析から検討した研究は 100m や 400 メートル競走に関しては報告されているものの、110mH に関しては研究対象として扱われていない。110mH における下肢のバネ的要素を明らかにすることで、110mH の競技特性に関して新たな知見が得られると思われる。

本研究は、男子 110mH における下肢スティフネスの特性を、疾走、ハードリング踏切および着地の局面から明らかにすることを目的とした。公認競技会における 110mH のレースから、男子競技者 38 名（身長： 1.79 ± 0.04 m、体重： 68.9 ± 4.2 kg、年齢： 21.5 ± 3.5 yrs、自己記録： 14.64 ± 0.74 sec）を対象とした。レーン側方から 300 fps に設定したデジタルビデオカメラを用いてレース全体をパニング撮影し、公式記録を分析した。分析項目を、疾走速度、ピッチ、ストライド、一步毎の接地時間および滞空時間とした。Morin et al. (2005) および Morin et al. (2006) の推定式に基づき、鉛直スティフネス (K_{vert}) と脚スティフネス (K_{leg}) の 2 種類の下肢スティフネスを推定し、分析を行った。

結果は以下の通りである。

- 1) 疾走、ハードリング踏切および着地のすべての局面において、疾走速度の増加に伴う K_{vert} の増加が認められた。特に、ハードリング踏切時および着地時において、最大速度区間 (3rd地点) から速度減速区間 (10th地点) にかけて有意な減少がみられた。
- 2) すべての局面において、疾走速度の増加に伴う K_{leg} の増加は認められなかった。
- 3) 下肢スティフネスと各変数との関係において、下肢スティフネスに最も影響を及ぼす変数は、 K_{vert} は疾走、ハードリング踏切および着地のすべての局面で接地時間、 K_{leg} は疾走およびハードリング着地局面では脚長変化量、踏切局面では F_{max} であった。
- 4) 下肢スティフネスとピッチ、ストライドおよび疾走速度との関係において、 K_{vert} は疾走速度およびピッチとの間に有意な正の相関関係が認められた。
- 5) K_{leg} は、ピッチとの間に有意な正の相関関係が認められたものの、疾走速度との間に有意な相関関係は認められなかった。

以上の結果から、110mH の疾走はレース全体を通して、短い接地時間が高い K_{vert} の獲得に大きな影響を及ぼし、疾走速度を増加させるために高い K_{vert} を獲得することの重要性

が明らかにされた。

謝辞

本論文を作成するにあたり、実験に協力してくださった本学陸上競技部障害ブロックの皆様およびコーチの山崎一彦先生に深く感謝申し上げます。また、本論文の作成にあたり、適切にご指導を頂いた柳谷登志雄先生には多大なる感謝を申し上げます。佐久間和彦先生にはお忙しい中、拙論の審査をしていただき、多くのご指導を頂きました。深く感謝申し上げます。最後になりましたが、実験および論文の作成に際し、最後まで支えていただいた吉木和浩先生、大学院生の方々に心より感謝の意を表します。

引用文献一覧

- 1) A. Seyfarth, A. Friedrichs, V.Wank, R.Blickhan (1999) : Dynamics of the long jump, *Journal of Biomechanics* Volume 32, Issue 12, 1259-1267.
- 2) 阿江通良, 横井孝志, 宮下憲, 大木昭一郎, 渋川侃二, 橋原孝博 (1984) : 疾走中の地面反力の変化 : 疾走速度の増大による影響, *日本体育学会大会号*, 35, 381.
- 3) Arampatzis A., Brüggemann G.P., Metzler V. (1999) : The effect of speed on leg stiffness and joint kinetics in human running, *Journal of Biomechanics*, 32 (12), 1349-1353.
- 4) Blickhan R. (1989) : The spring-mass model for running and hopping, *Journal of Biomechanics*, 22, 1217-1227.
- 5) Bret C., Rahmani A., Dufour A.B.Messonnier L., Lacour J.R. (2002) : Leg strength and stiffness as ability factors in 100m sprint running, *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 42, 274-281.
- 6) Cavagna G.A., Komarek L., Mazzoleni S. (1971) : The mechanics of sprint running, *Journal of physiology*, 217, 709-721.
- 7) Cavagna G.A., Saibene F.P., Margaria R. (1964) : Mechanical work in running, *Journal of Applied physiology*, 19, 249-256.
- 8) Coh M. (2003) : Colin Jackson's hurdle clearance technique. *Track Coach*, 162, 5161-5167.
- 9) Dutto D.J., Smith G.A. (2002) : Changes in spring-mass characteristics during treadmill running to exhaustion, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 (8), 1324-1331.
- 10) Dyson H.G., 金原勇, 渋川侃二, 古藤高良 共訳 (1972) : 陸上競技の力学, 大修館, 137-150.
- 11) Farley C.T. and Gonzalez O. (1996) : Leg stiffness and stride frequency in human running, *Journal of Biomechanics*, 29 (2), 181-186.
- 12) Farley C.T., Ferris D.P. (1998) : Biomechanics of walking and running: center of mass movement to muscle action, *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 26, 253-285.
- 13) Farley C.T., Glasheen J., Macmahon T.A. (1993) : Running springs : speed and

- animal size, *Journal of Experimental Biology*, 185, 71-86.
- 14) Farley C.T., Glasheen J., Saito J., Taylor C.R (1991) .: Hopping frequency in humans : a test of how springs set stride frequency in bouncing gaits, *Journal of Applied physiology*, 71, 2127-2132.
 - 15) He J.P., Kram R., Macmahon T.A. (1991) : Mechanics of running under simulated low gravity, *Journal of Applied physiology*, 71 (3), 863-870.
 - 16) 保原浩明, 五味宏生, 彼末一之 (2010) : 400m 走における下肢スティフネスの継時変化, *東京体育学研究*, 1, 93-96.
 - 17) 保原浩明, 井上恒, 彼末一之 (2010) : ランニングによるピッチ変化が下肢バネ特性の左右脚差に及ぼす影響, *東京体育学研究*, 2, 41-44.
 - 18) Hobara H., Kimura K., Omuro K., Gomi K., Muraoka T., Iso S., Kanosue K. (2008) : Determinants of difference in leg stiffness between endurance- and power-trained athletes, *Journal of Biomechanics*, 41, 506-514.
 - 19) 一川大輔, 安井年文, 谷川聡, 流郷吐夢, 上野祐紀子 (2004) : 100m ハードル走における競技的相違についての事例的研究, *陸上競技研究*, 59, 27-36.
 - 20) 磯繁雄, 榎本靖士, 中田一寿, 羽田雄一, 阿江通良 (2002) : 一流 110m ハードル選手のインターバル走に関するキネマティクスの研究, *陸上競技研究*, 49, 11-17.
 - 21) 伊藤章, 富樫勝 (1997) : ハードル走のバイオメカニクスの研究: スプリントと比較, *体育学研究*, 42(4), 246-260.
 - 22) Jon Entine (2000) : *Why black athlete dominate sports and why we're afraid to talk about it*, A member of Preseus Publishing, New York.
 - 23) 金子公宏 (1991) : タッチダウンタイムを用いたスプリントハードルのレース分析に関する研究 (第3回世界競技選手権大会の分析を通して), 平成3年度筑波大学卒業論文.
 - 24) 苅部俊二 (2013) : 2012年日本選手権における男子 110m ハードル走の時間分析, *法政大学体育・スポーツ研究センター紀要*, 31, 7-12.
 - 25) 苅部俊二 (2013) : 学生トップ選手における男子 110mH 走のハードリングおよびインターバル分析, *法政大学スポーツ健康学研究*, 4, 19-28.
 - 26) 小林海, 土江寛裕, 松尾彰文, 彼末一之, 磯繁雄, 矢内利政, 金久博昭, 福永哲夫, 川上泰雄 (2009) : スプリントの加速局面における一流短距離選手のキネマティクス

- に関する研究, スポーツ科学研究, 6, 119-130.
- 27) Kuitunen S., Komi P.V., Kyrolainen H. (2002) : Knee and ankle joint stiffness in sprint running, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 (1), 166-173.
 - 28) 串間敦郎, 小木曾一之, 金高宏文, 安井年文, 青山清英, 小倉幸雄 (1996) : ハードル走の最大速度区間と速度減速区間における踏切脚と先導脚の動作の検討, *陸上競技研究*, 25, 10-17.
 - 29) Letzelter, H. (1991) : Speed and technique in the 110m hurdles, *The hurdles Contemporary theory, technique and training*. 2nd ed. Mountain View Calif, Track and Field News, 56-59.
 - 30) Macmahon T.A., Cheng G.C. (1990) : The mechanics of running : How does stiffness couple with speed?, *Journal of Biomechanics*, 23 (1), 65-78.
 - 31) Mann, R. and Herman, J. (1985) : Kinematic analysis of Olympic hurdle performance : women's 100 meters, *Journal of Applied Biomechanics* 1, 163-173.
 - 32) 松尾彰文, 広川龍太郎, 杉田正明, 阿江通良 (2007) : レーザー方式による 100m およびハードルのスピード分析, *陸上競技研究紀要*, 3, 59-64.
 - 33) 松尾彰文, 広川龍太郎, 柳谷登志雄, 杉田正明 (2009) : 2008 年男女 100m, 110m ハードルおよび 100m ハードルのレース分析, *陸上競技研究紀要*, 5, 50-62.
 - 34) 松尾彰文, 広川龍太郎, 柳谷登志雄, 十江寛裕, 杉田正明 (2008) : 2007 年男女 100m, 110m ハードルおよび 100m ハードルのスピード分析報告, *陸上競技研究紀要*, 4, 48-55.
 - 35) McDonald, C. (2002) : Hurdling Is Not Sprinting, *Track Coach*, 161, 5137-5143.
 - 36) McDonald, C. and Dapena, J. (1991) : Linear kinematics of the men's 110-m and women's 100-m hurdles races, *Medicine and science in sports and exercise* 23, 1382-1391.
 - 37) McFarlane, B. (1976) : Correct high hurdle technique, *Track Technique*, 63, 2014-2016.
 - 38) 宮丸凱史, 宮丸郁子 (1976) : 陸上競技のコーチング I、トラック編, 金原勇 (編), 大修館書店, 299-381.
 - 39) 宮下憲 (1991) : ハードル, ベースボールマガジン社, 21-59.
 - 40) 宮下憲 (1993) : 110m ハードルレースに於けるモデルタッチダウンタイムに関する研

- 究, 陸上競技研究, 14, 10-20.
- 41) 宮下憲(2006):100m ハードルのトレーニングに向けて, スプリント研究, 16, 44-50.
 - 42) Morin J.B., Dalleau G., Kyrolainen H., Jeannin T., Belli A. (2005) : A simple method for measuring stiffness during running, *Journal of Applied Biomech*, 21(2), 167-180.
 - 43) Morin J.B., Jeannin T., Chevallier B., Belli A. (2006) : Spring-mass model characteristics during sprint running: Correlation with Performance and Fatigue-Induced Changes., *International Journal of Sports Medicine*, 7(2), 158-65.
 - 44) 森田正利, 伊藤章, 沼澤秀雄, 小木曾一之, 安井年文 (1994) : スプリントハードル (110mH.100mH) および男女 400mH のレース分析, 世界一流競技者の技術 (小林寛道・佐々木秀幸・阿江通良監修), ベースボールマガジン社, 東京, 66-87.
 - 45) Munro C.F., Miller D.I. and Fuglevand A.J (1985) : Ground reaction forces in running : A reexamination, *Journal of Biomechanics*, 20(2), 147-155.
 - 46) 尾縣貢 (1999) : T&F サイエンス講座 ハードルレース中のスピード変化, 陸上競技マガジン 12月号, 196-197.
 - 47) 柴山一仁, 藤井範久, 阿江通良 (2011) : 一流 110m ハードル選手の 1 サイクル動作に関するキネマティクスの研究: 疾走速度および脚長と動作の関連から, *体育学研究*, 56, 75-88.
 - 48) 柴山一仁, 川上小百合, 谷川聡 (2010) : :2007 年世界陸上競技選手権大阪大会における男子 110m ハードル走および女子 100m ハードル走レースの時間分析 世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術, 日本陸上競技連名バイオメカニクス研究班 (編) 日本陸上競技連盟, 76-85.
 - 49) Singh.Jagmohan. (1985) : *Hurdling Is Sprinting*, *Track and field quarterly review*, 47.
 - 50) Slawinski J.,Heubert R.,Quievre J.,Billat V.,Hanon C. (2008) : Changes in spring-mass model parameters and energy cost during track running to exhaustion, *Journal of Strength and Conditioning Research*,22,930-936.
 - 51) 谷川聡, 宮下憲, 高松潤二, 安井年文, 金子公宏 (2002) : ハイハードル走のインターバルランニングに関する研究, *スプリント研究*, 12, 43-53.
 - 52) 谷川聡 (2006) : スプリント走&スプリント走ハードルパフォーマンスの向上のため

- のトレーニングの研究と実践, 陸上競技学会誌 4-1, 19-24.
- 53) 谷川聡(2007):世界トップの男子 110m および女子 100m ハードル競走の競技特性, 陸上競技学会誌, 46-54.
- 54) 谷川聡(2008):世界一流競技者のレースタイムおよび動作特性の検討, JJBSE, 12-2, 101-108.
- 55) Taylor M.J.D. and Beneke R. (2012) : Spring mass characteristics of the fastest men on earth., International journal of sports medicine, 33(8), 667-670.
- 56) 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見られる加速走中の下肢スティフネスの変化, 日本体育学会東京支部, 29-32.
- 57) 渡辺圭佑 (2009) : 連続した跳躍運動におけるテンポが下肢のスティフネスに及ぼす影響, 平成 21 年度順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科修士論文.
- 58) Winter D.A. (1990) : Biomechanics and motor of human movement, 2nded. Wiley Inter Science, 75-102.
- 59) 山田憲政, 宮下憲 (1990) : ハードル走における踏切時間を短縮する要因, 体育学研究, 35, 53-61.

Abstract

Characteristics of vertical stiffness and leg stiffness in 110m hurdles

Junya Wada

The shortest ground contact time is said to play an important role in the improvement of 110m hurdles. It was reported that leg spring stiffness can be calculated by the ground contact time and the flight time. The previous studies dealt with only 100m and 400m on the basis of a spring-mass model, but not with 110m hurdles.

The purpose of the present study was to prove the characteristics of vertical stiffness (K_{vert}) and leg stiffness (K_{leg}) in 110m hurdles by utilizing the simple spring-mass model. The whole race can be divided into three phases such as running between hurdles, takeoffs and landings.

Thirty-eight well-trained 110m male hurdlers (age: 21.5 ± 3.5 yrs, height: 1.79 ± 0.04 m, body mass: 68.9 ± 4.0 kg, personal best time: 14.64 ± 0.74 sec, mean \pm SD) performed in the official race. The movements in each race were recorded with digital video cameras at 300 frames per second, panning from start to finish. The leg spring stiffness of each step was calculated using each subject's height, body mass, ground contact time and flight time with the method suggested by Morin et al.(2005) and Morin et al.(2006). K_{vert} was calculated from the ratio between the maximum of the vertical ground reaction force and the vertical displacement of the center of mass. K_{leg} was calculated from the ratio between the maximum vertical ground reaction force and the displacement of the leg spring. This study analyzed the interdependence between K_{vert} and parameters such as running velocity, step frequency, step length and each step's ground contact time and flight time. It also analyzed the interdependence between K_{leg} and the same parameters as mentioned above.

The results are summarized as follows: K_{vert} increased with an increase in the running velocity in every phase. K_{vert} significantly decreased, especially in takeoffs and landings during the intervals between the 3rd and the 10th hurdle as the running

velocity is decreasing. On the other hand, K_{leg} didn't increase with an increase in the running velocity. The ground contact time had the greatest influence on K_{vert} in every phase. The displacement of the leg spring had the greatest influence on K_{leg} both in running between hurdles and in landing. F_{max} had the greatest influence on K_{vert} in takeoff. K_{vert} had a significant positive interdependence with the running velocity and step frequency. K_{leg} had a significant positive interdependence with step frequency, but not with the running velocity.

This study proved that in the 110m hurdles, the shortest ground contact time greatly influenced the increase of K_{vert} and the higher K_{vert} increased the running velocity.

図表一覧

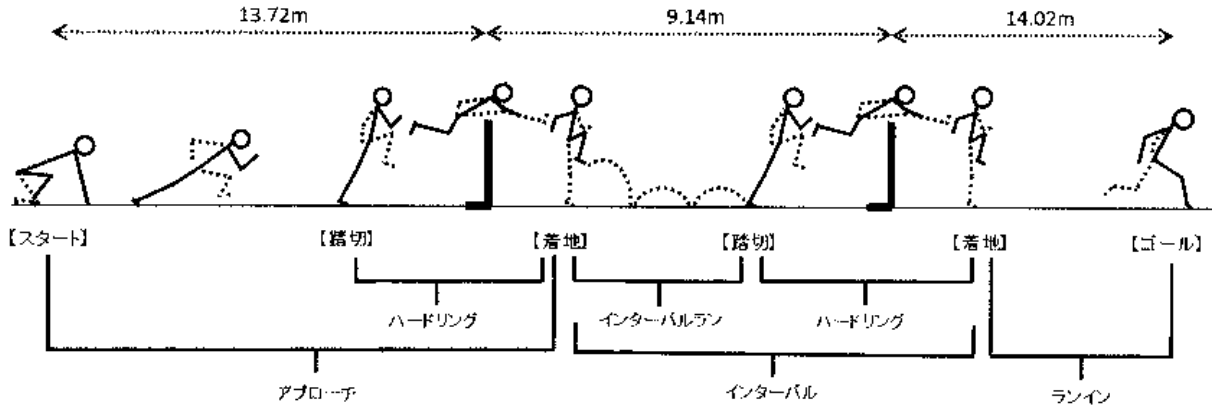


図 1-1. 110mH における全ハードル区間の局面定義図

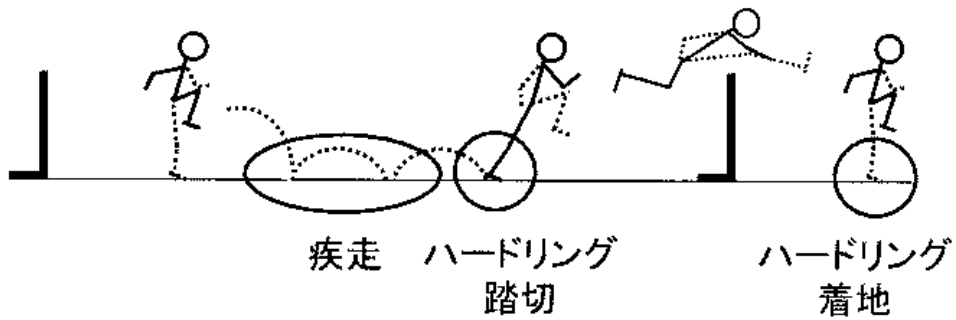


図 1-2. 110mH における分析対象局面定義図

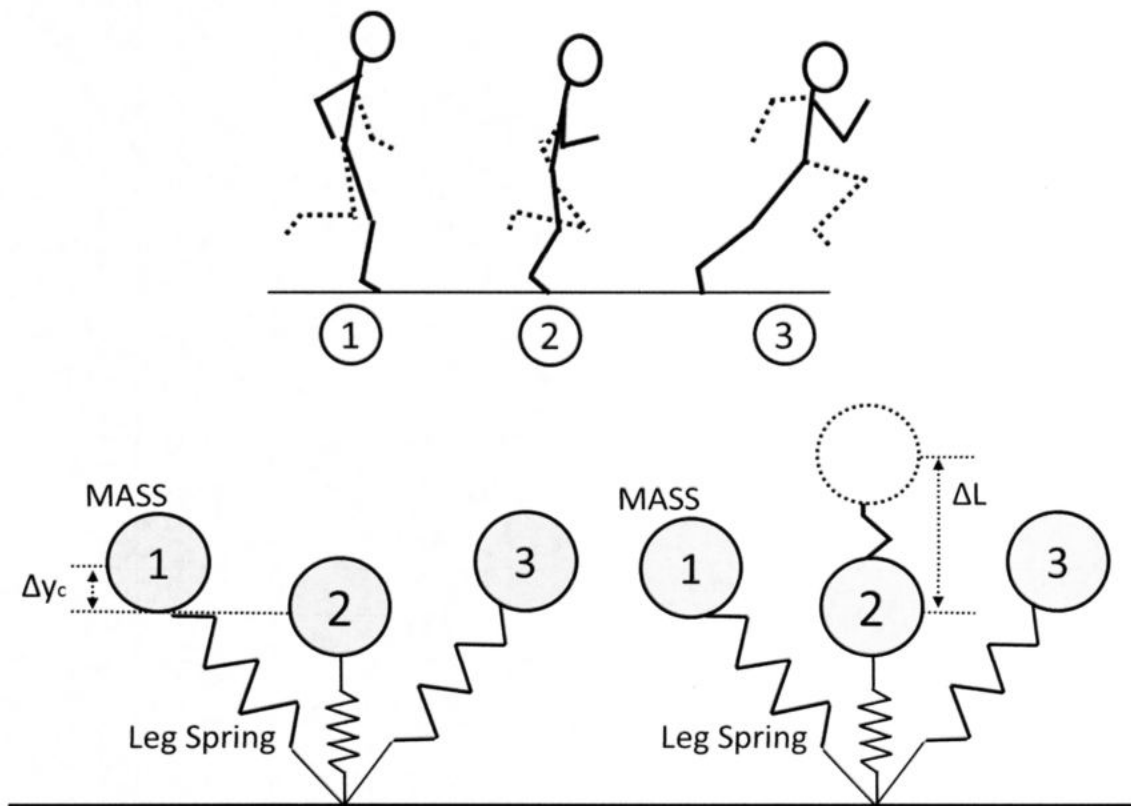


図 2. Spring-mass model 概念図

疾走時における下肢の弾性要素の力学的な特徴は、身体を質点と下肢長による一本の線形スプリングとみなした **Spring-mass model** と定義し、脚全体を一つのバネとして捉えてモデル化することができる (Farley, 1993)。このとき、①は接地期、②は接地期中間、③は離地期をあらわす。**Spring-mass model** は、立脚中期における地面反力の鉛直成分の最大値とバネの長さの変化量の比から推定することが可能である。その際、地面反力の鉛直成分の最大値と身体重心の変位 (Δy_c) との比から鉛直スティフネス (K_{vert})、地面反力の鉛直成分の最大値と伸張圧縮された脚の長さの変化量 (ΔL) との比から脚スティフネス (K_{leg}) がそれぞれ求められる。

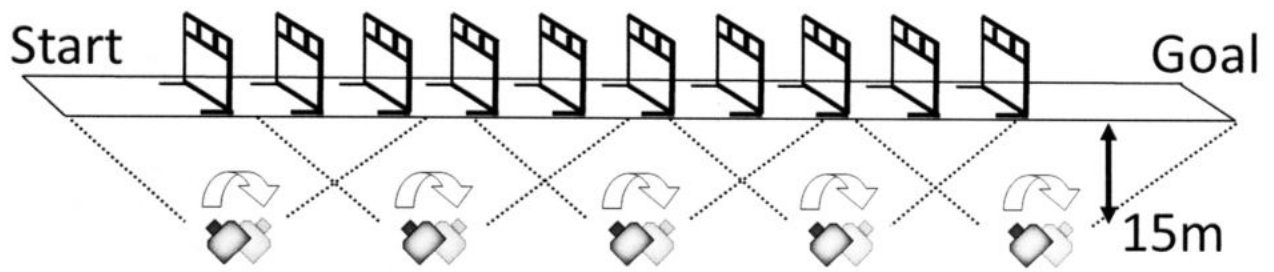


図3. レース時の撮影位置

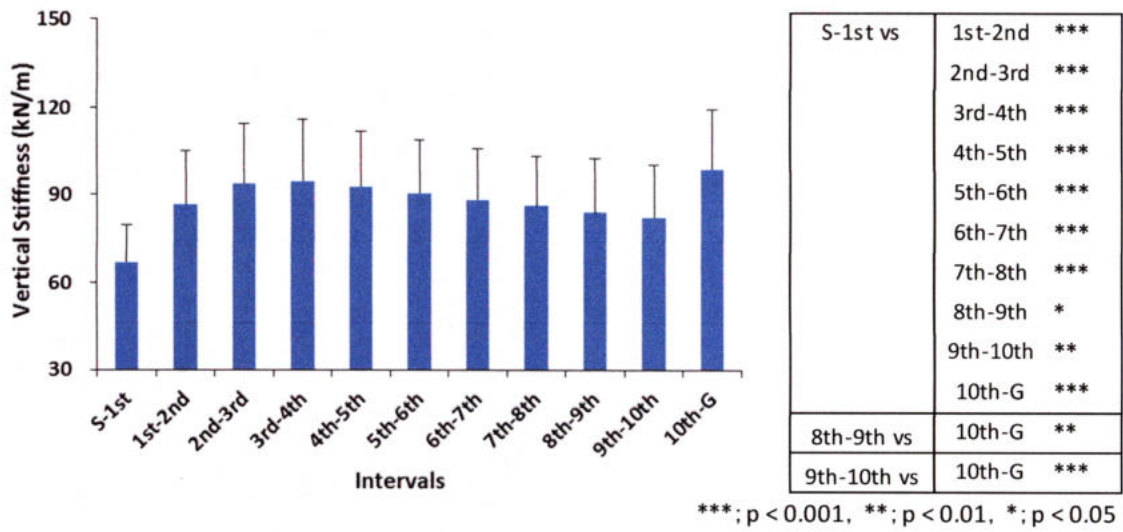


図 4-1. 疾走時における鉛直スティフネスのインターバル毎の変化

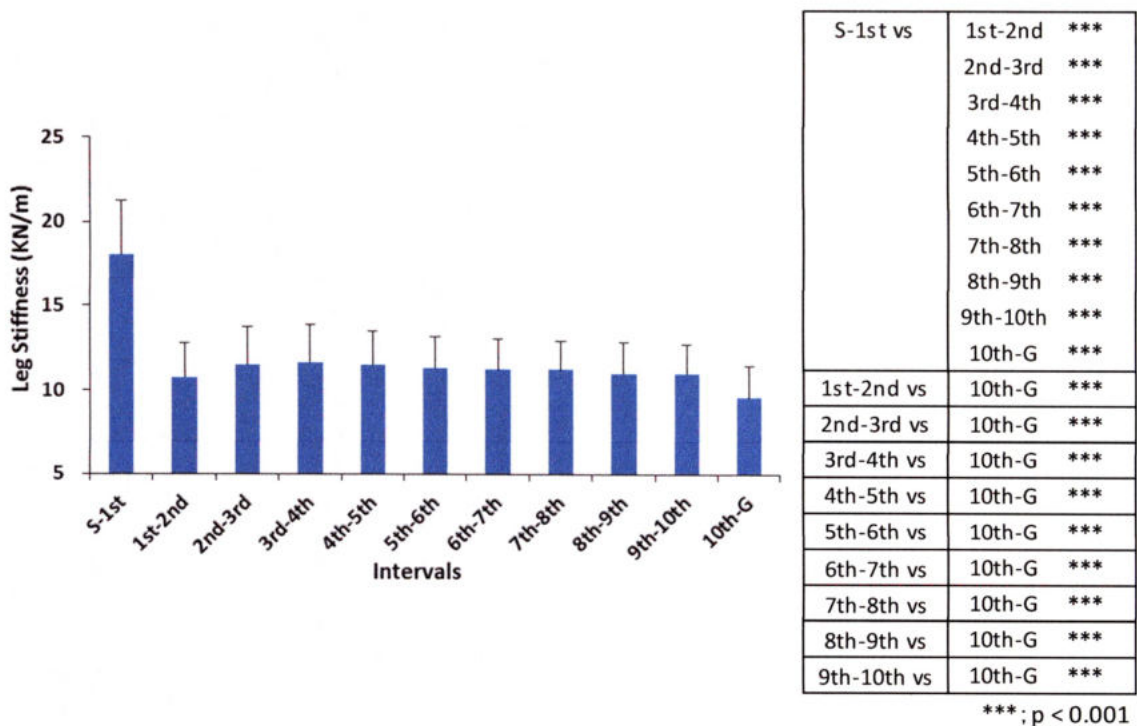


図 4-2. 疾走時における脚スティフネスのインターバル毎の変化

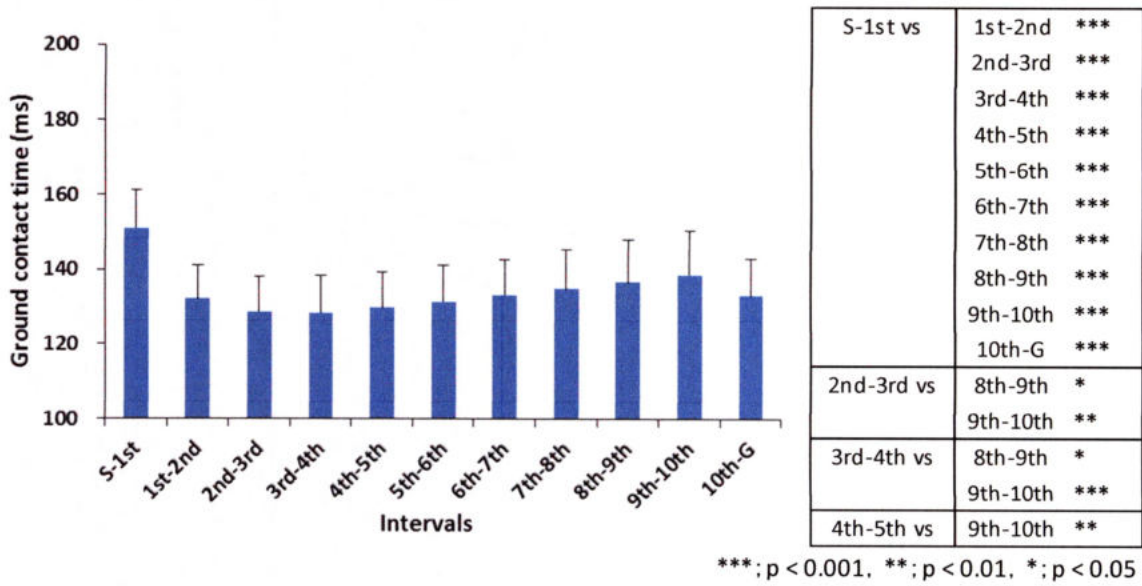
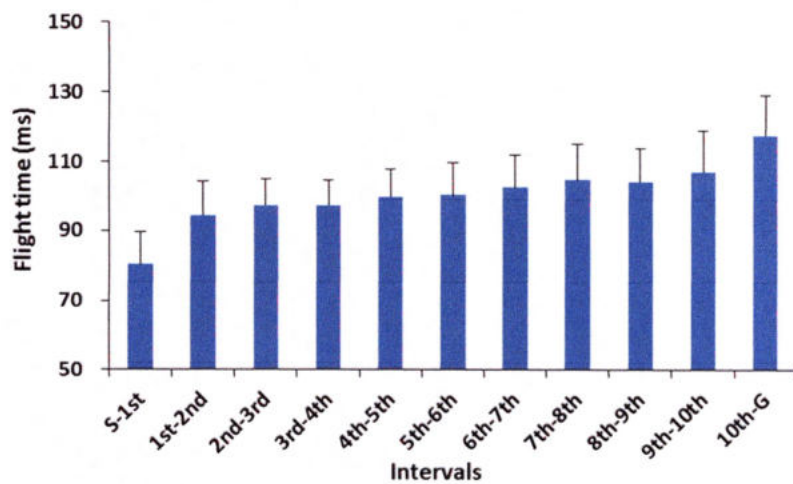


図 4-3. 疾走時における接地時間のインターバル毎の変化



S-1st vs	1st-2nd	***
	2nd-3rd	***
	3rd-4th	***
	4th-5th	***
	5th-6th	***
	6th-7th	***
	7th-8th	***
	8th-9th	***
	9th-10th	***
	10th-G	***
1st-2nd vs	6th-7th	**
	7th-8th	***
	8th-9th	***
	9th-10th	***
	10th-G	***
2nd-3rd vs	7th-8th	*
	9th-10th	***
	10th-G	***
3rd-4th vs	7th-8th	*
	9th-10th	***
	10th-G	***
4th-5th vs	9th-10th	*
	10th-G	***
5th-6th vs	10th-G	***
6th-7th vs	10th-G	***
7th-8th vs	10th-G	***
8th-9th vs	10th-G	***
9th-10th vs	10th-G	***

***; p < 0.001, **; p < 0.01, *; p < 0.05

図 4-4. 疾走時における滞空時間のインターバル毎の変化

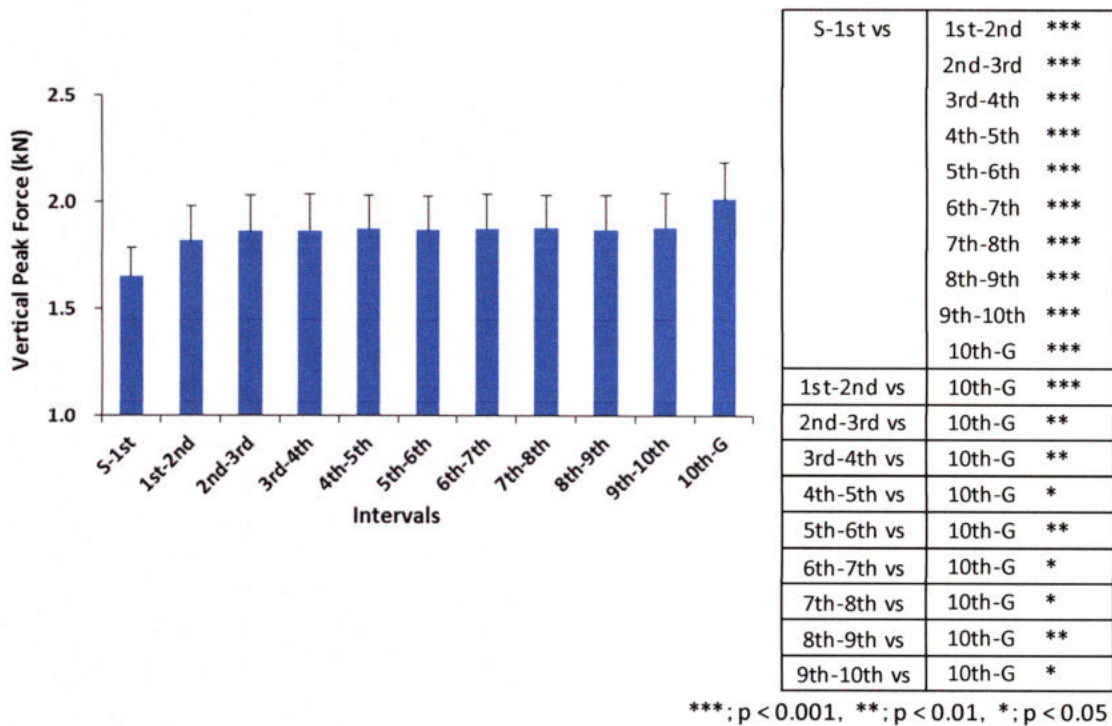


図 4-5. 疾走時における地面反力鉛直成分最大値のインターバル毎の変化

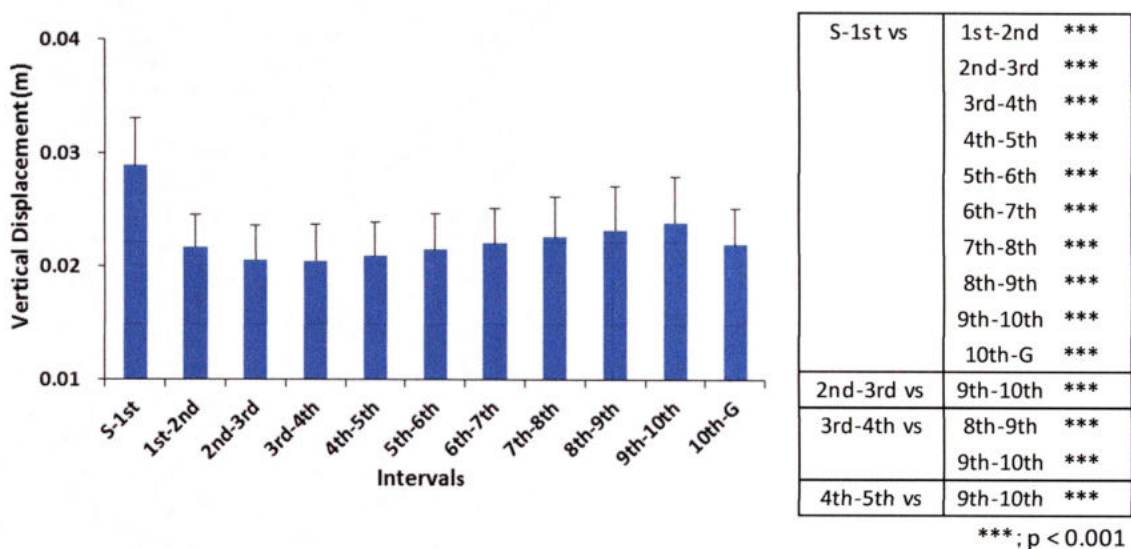
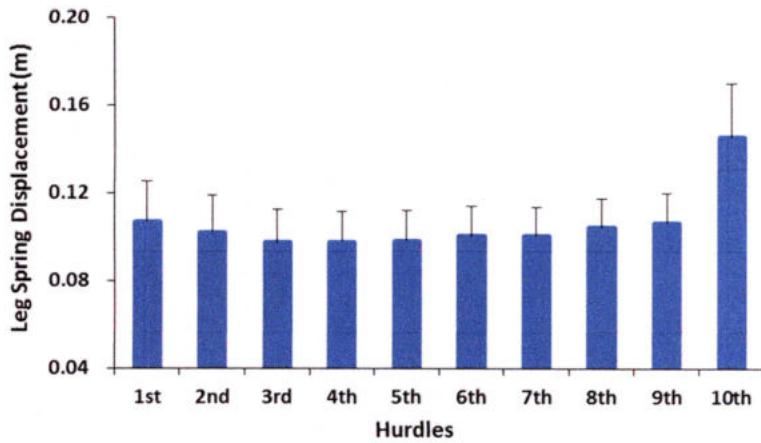


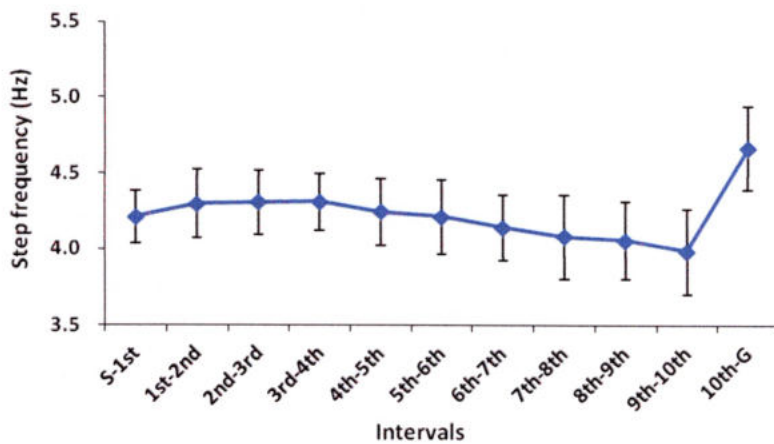
図 4-6. 疾走時における身体重心変位のインターバル毎の変化



S-1st vs	1st-2nd	***
	2nd-3rd	***
	3rd-4th	***
	4th-5th	***
	5th-6th	***
	6th-7th	***
	7th-8th	***
	8th-9th	***
	9th-10th	***
	10th-G	***
1st-2nd vs	10th-G	***
2nd-3rd vs	10th-G	***
3rd-4th vs	10th-G	***
4th-5th vs	10th-G	***
5th-6th vs	10th-G	***
6th-7th vs	10th-G	***
7th-8th vs	10th-G	***
8th-9th vs	10th-G	***
9th-10th vs	10th-G	***

***; p < 0.001

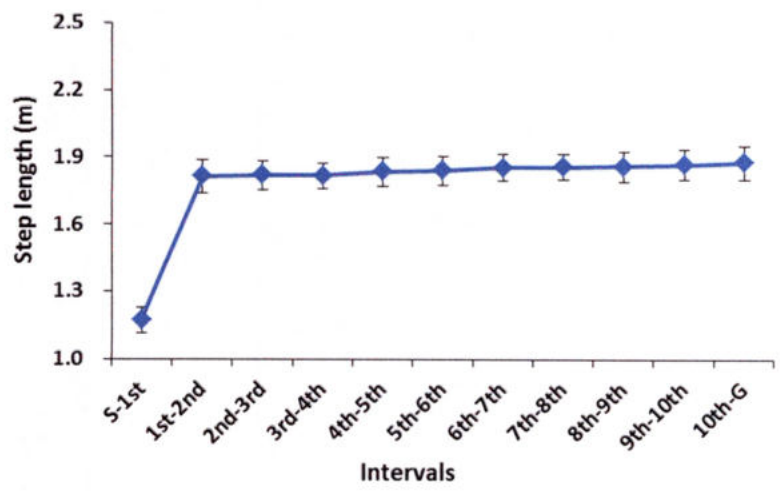
図 4-7. 疾走時における脚長変化量のインターバル毎の変化



S-1st vs	9th-10th	**
	10th-G	***
1st-2nd vs	6th-7th	*
	7th-8th	***
	8th-9th	***
	9th-10th	***
	10th-G	***
2nd-3rd vs	7th-8th	**
	8th-9th	***
	9th-10th	***
	10th-G	***
3rd-4th vs	7th-8th	***
	8th-9th	***
	9th-10th	***
	10th-G	***
4th-5th vs	8th-9th	*
	9th-10th	***
	10th-G	***
5th-6th vs	9th-10th	**
	10th-G	***
6th-7th vs	10th-G	***
7th-8th vs	10th-G	***
8th-9th vs	10th-G	***
9th-10th vs	10th-G	***

***; p < 0.001, **; p < 0.01, *; p < 0.05

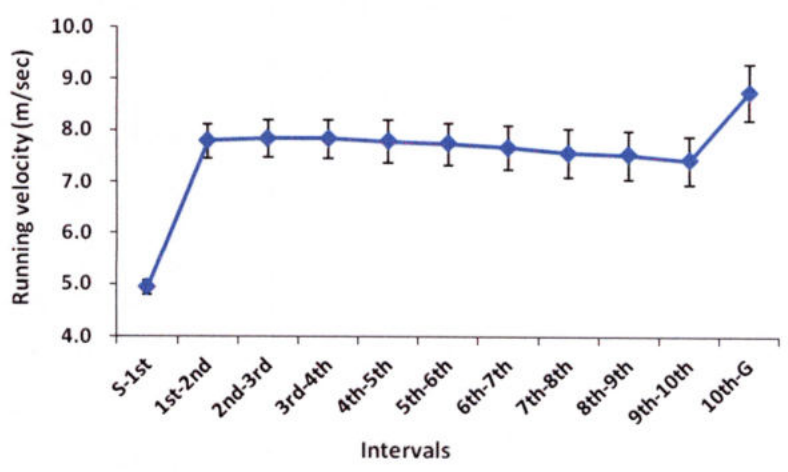
図 4-8. 疾走時におけるピッチのインターバル毎の変化



S-1st vs	1st-2nd	***
	2nd-3rd	***
	3rd-4th	***
	4th-5th	***
	5th-6th	***
	6th-7th	***
	7th-8th	***
	8th-9th	***
	9th-10th	***
	10th-G	***
1st-2nd vs	8th-9th	*
	9th-10th	**
	10th-G	***
2nd-3rd vs	10th-G	*
3rd-4th vs	9th-10th	*
	10th-G	**

***; p < 0.001, **; p < 0.01, *; p < 0.05

図 4-9. 疾走時におけるストライドのインターバル毎の変化



S-1st vs	1st-2nd	***
	2nd-3rd	***
	3rd-4th	***
	4th-5th	***
	5th-6th	***
	6th-7th	***
	7th-8th	***
	8th-9th	***
	9th-10th	***
	10th-G	***
1st-2nd vs	9th-10th	*
	10th-G	***
2nd-3rd vs	8th-9th	*
	9th-10th	**
	10th-G	***
3rd-4th vs	8th-9th	*
	9th-10th	**
	10th-G	***
4th-5th vs	9th-10th	**
	10th-G	***
5th-6th vs	9th-10th	*
	10th-G	***
6th-7th vs	10th-G	***
7th-8th vs	10th-G	***
8th-9th vs	10th-G	***
9th-10th vs	10th-G	***

***; p < 0.001, **; p < 0.01, *; p < 0.05

図 4-10. 疾走時における疾走速度のインターバル毎の変化

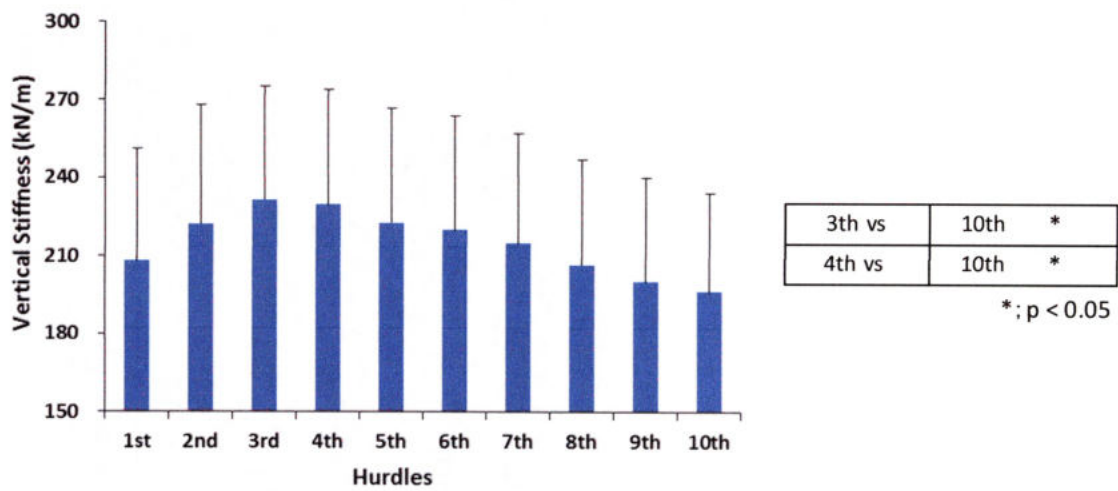


図 5-1. ハードリング踏切時における鉛直スティフネスのハードル毎の変化

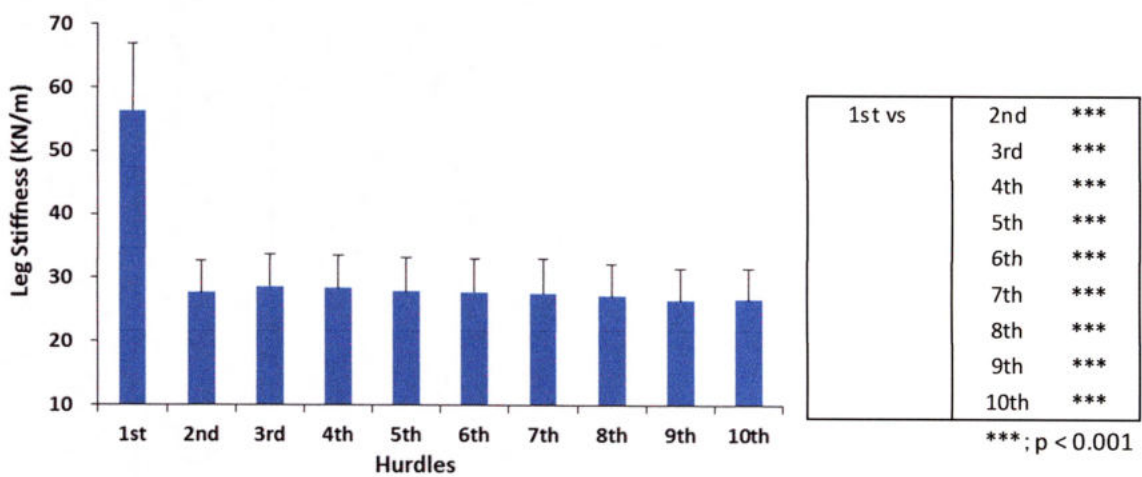


図 5-2. ハードリング踏切時における脚スティフネスのハードル毎の変化

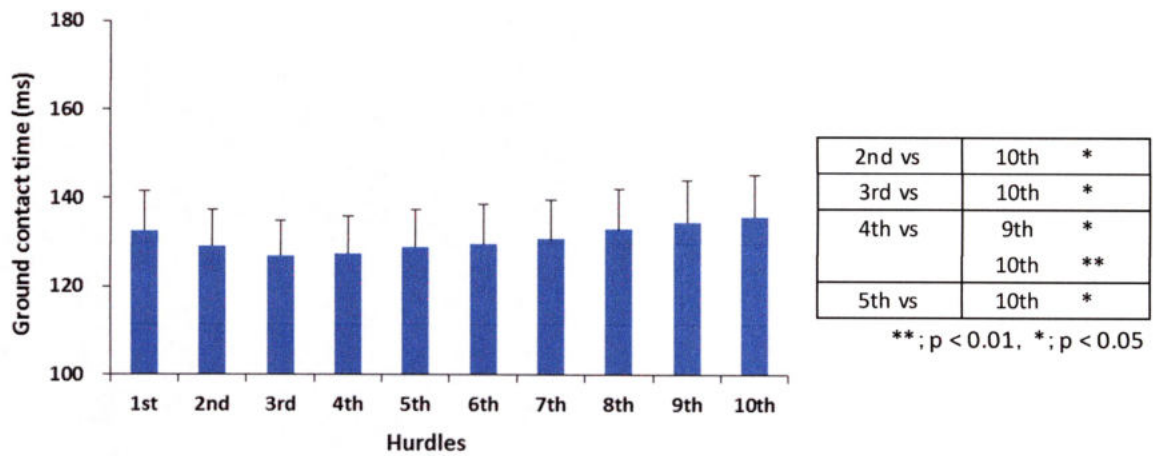


図 5-3. ハードリング踏切時における接地時間のハードル毎の変化

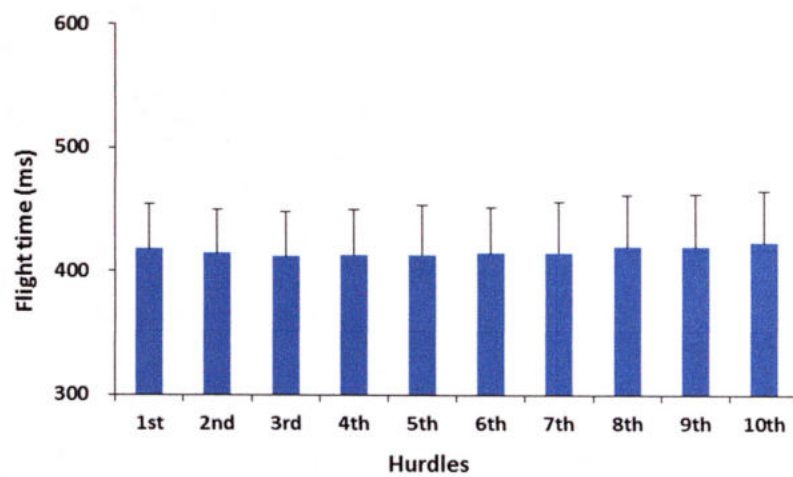


図 5-4. ハードリング踏切時における滞空時間のハードル毎の変化

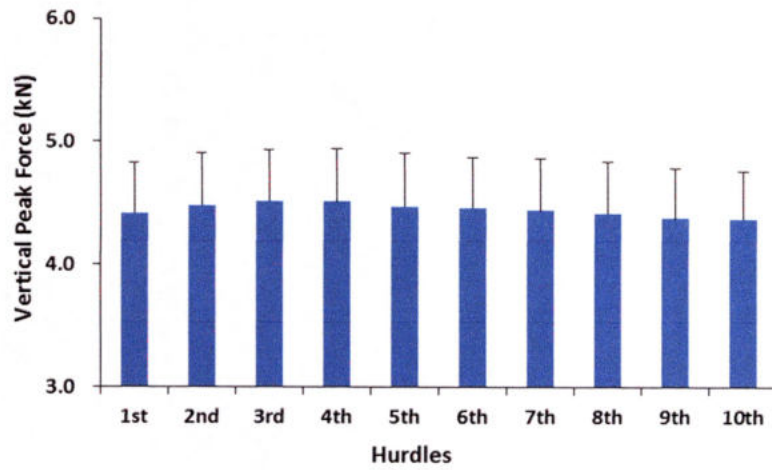


図 5-5. ハードリング踏切時における地面反力鉛直成分最大値のハードル毎の変化

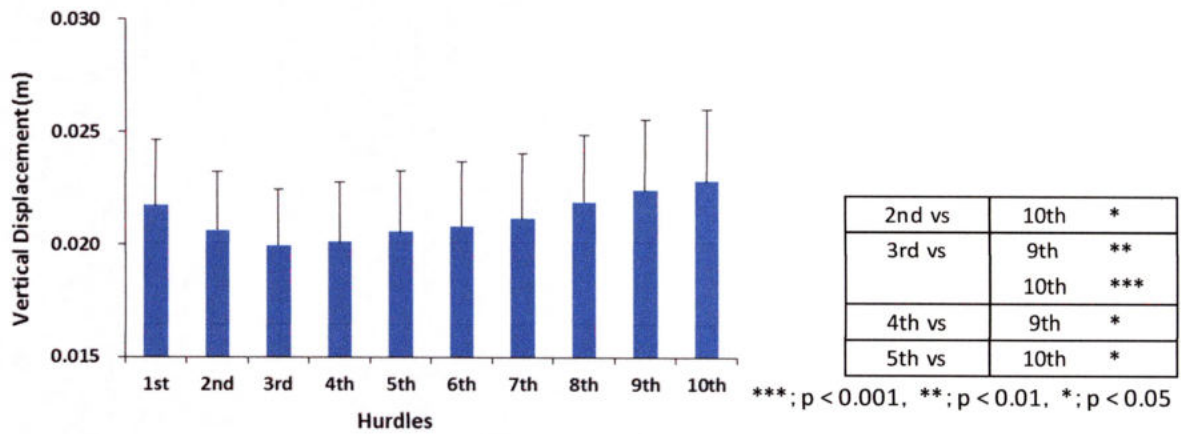


図 5-6. ハードリング踏切時における身体重心変位のハードル毎の変化

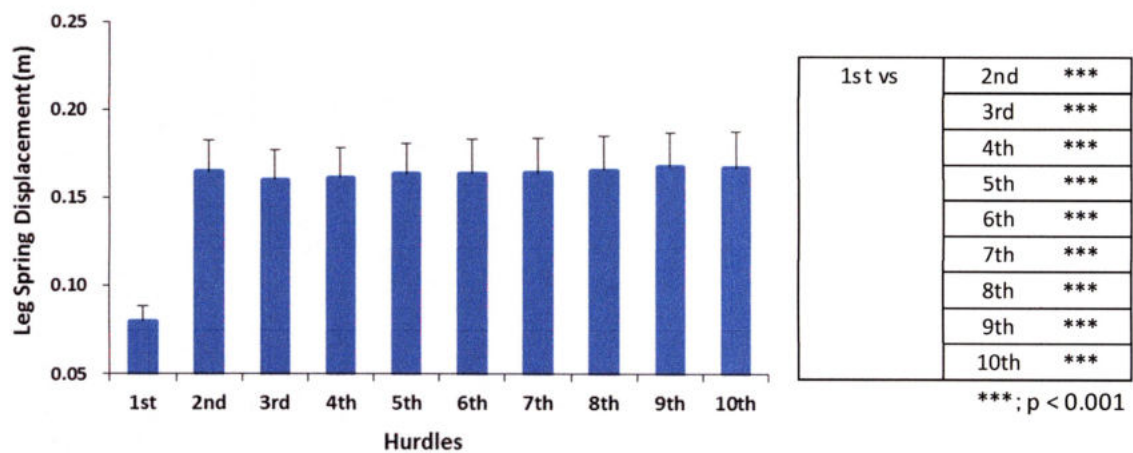


図 5-7. ハードリング踏切時における脚長変化量のハードル毎の変化

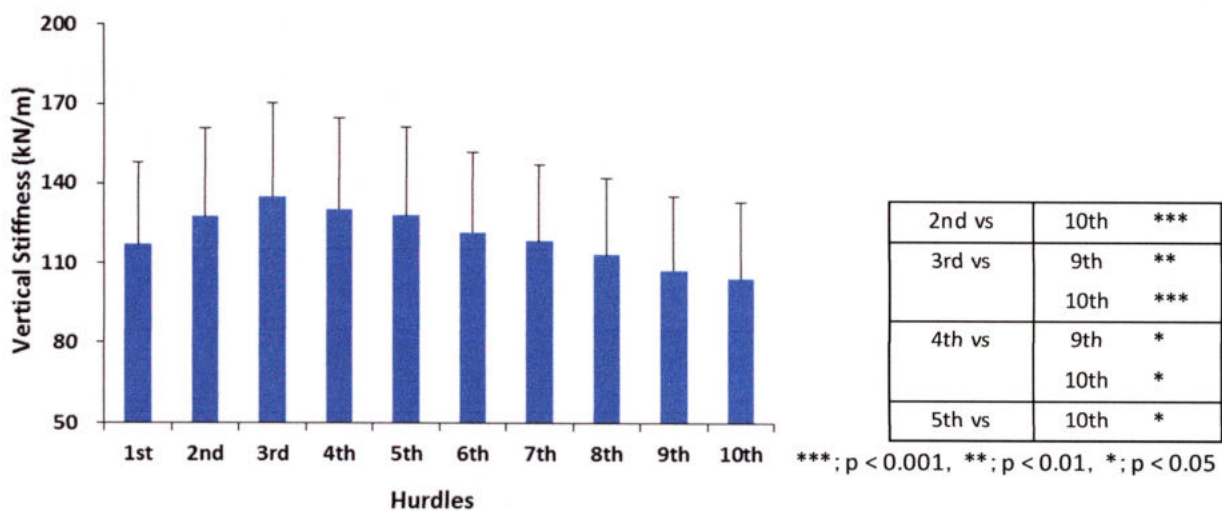


図 6-1. ハードリング着地時における鉛直スティフネスのハードル毎の変化

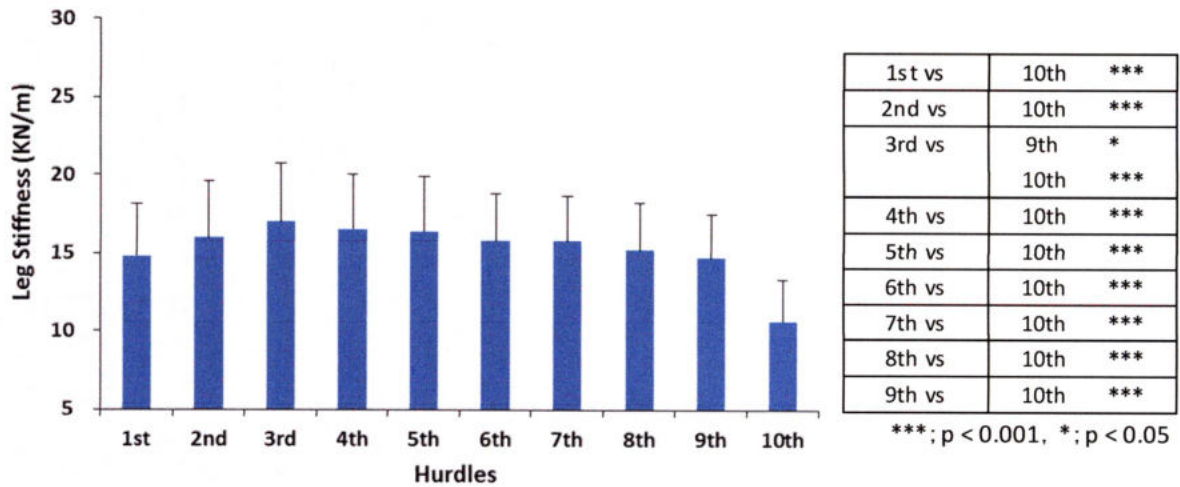


図 6-2. ハードリング着地時における脚スティフネスのハードル毎の変化

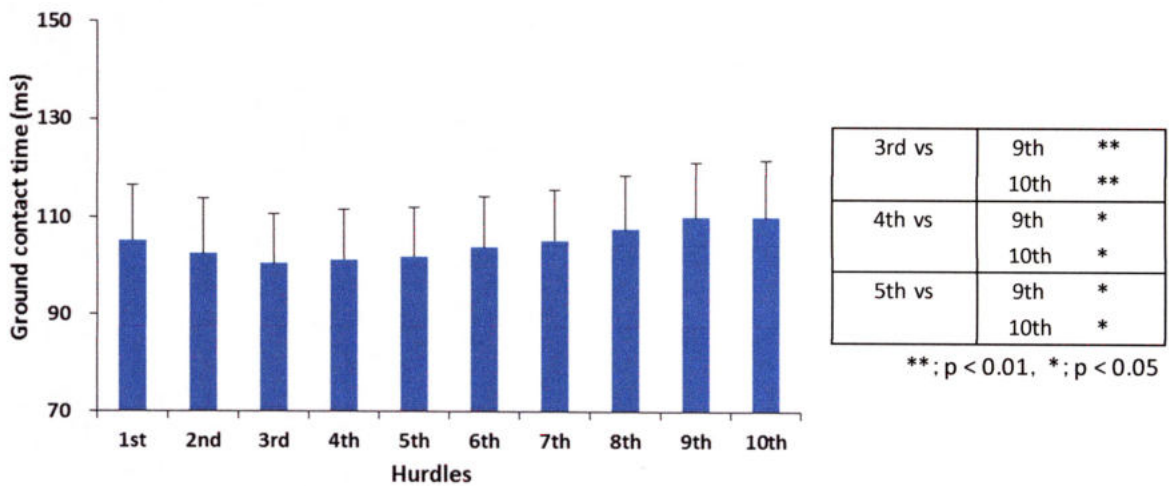


図 6-3. ハードリング着地時における接地時間のハードル毎の変化

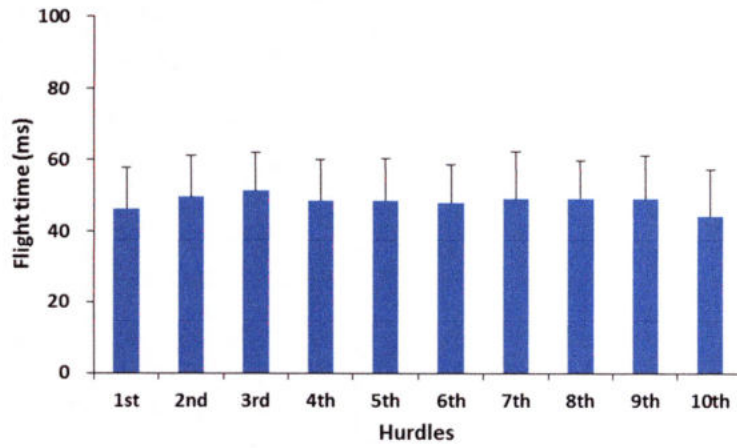


図 6-4. ハードリング着地時における滞空時間のハードル毎の変化

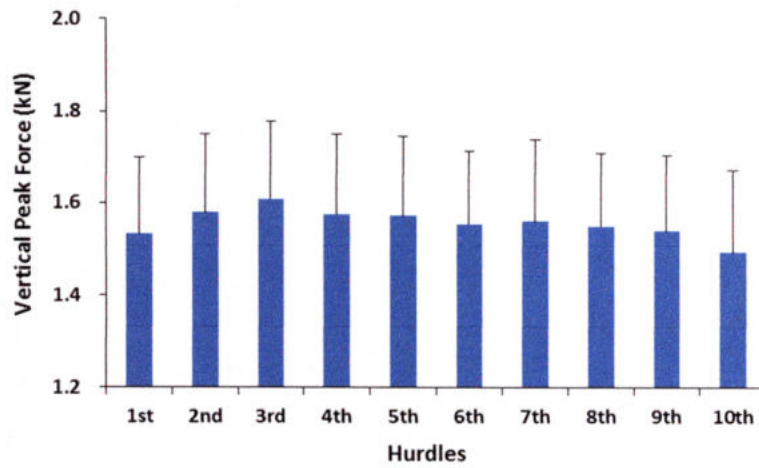


図 6-5. ハードリング着地時における地面反力鉛直成分最大値のハードル毎の変化

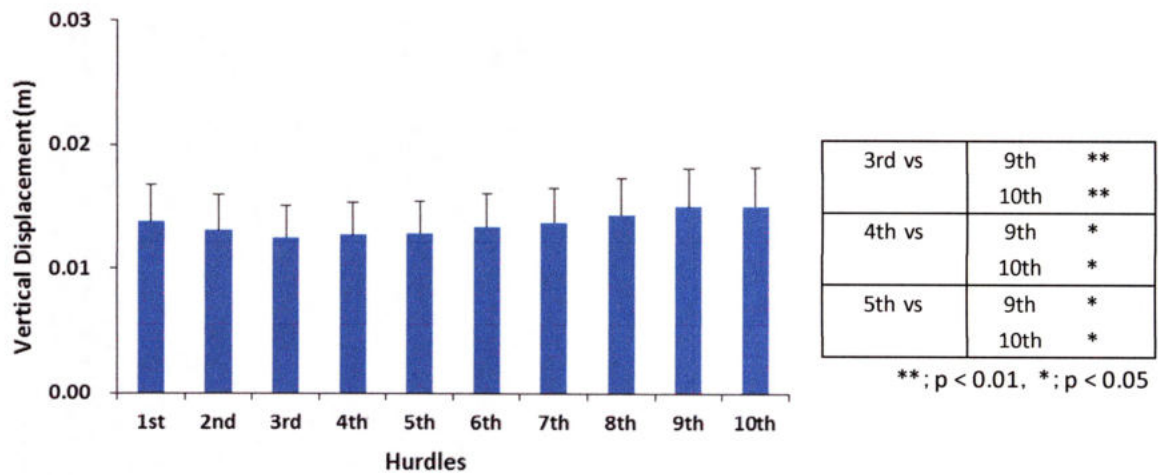


図 6-6. ハードリング着地時における身体重心変位のハードル毎の変化

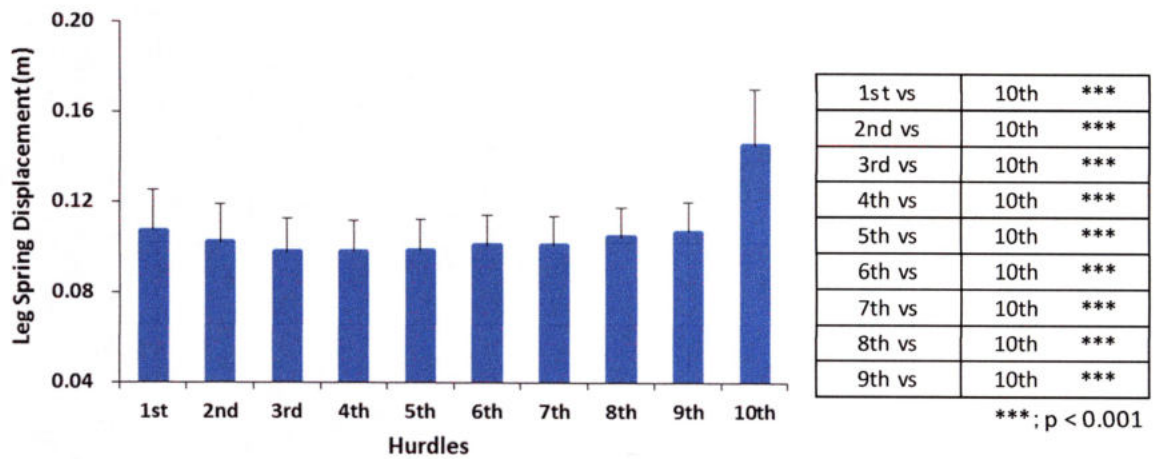


図 6-7. ハードリング着地時における脚長変化量のハードル毎の変化

表1. 対象者の身体的特性

Subjects n=38	Age (yrs)	Height (m)	Body mass (kg)	Personal best (sec)	Time in analyzed race (sec)
A	22	1.85	70	13.84	13.96
B	25	1.83	71	13.86	14.74
C	25	1.85	80	13.90	14.56
D	21	1.82	65	13.92	14.18
E	21	1.78	69	13.94	13.99
F	22	1.83	70	14.01	14.65
G	19	1.81	72	14.03	14.59
H	21	1.77	73	14.17	14.63
I	20	1.83	76	14.20	14.40
J	23	1.80	69	14.23	14.60
K	18	1.81	69	14.24	14.31
L	19	1.73	60	14.25	14.83
M	18	1.74	65	14.27	14.77
N	18	1.71	66	14.36	14.68
O	22	1.80	64	14.38	14.86
P	32	1.83	72	14.41	15.05
Q	21	1.78	65	14.42	15.79
R	20	1.77	71	14.48	14.75
S	19	1.75	70	14.48	14.92
T	20	1.75	64	14.56	14.87
U	22	1.78	70	14.63	15.12
V	21	1.77	75	14.64	14.83
W	19	1.77	69	14.65	15.08
X	20	1.81	63	14.67	15.32
Y	18	1.84	67	14.71	15.45
Z	21	1.88	77	14.75	15.53
AA	18	1.80	68	14.79	15.21
AB	21	1.77	66	14.91	14.84
AC	19	1.76	68	14.96	16.14
AD	20	1.80	72	14.97	15.54
AE	26	1.84	68	15.00	15.56
AF	27	1.78	73	15.20	15.42
AG	31	1.78	63	15.44	15.45
AH	20	1.73	68	15.66	16.11
AI	20	1.72	69	15.66	16.96
AJ	20	1.82	70	15.80	16.54
AK	29	1.83	65	16.01	16.76
AL	20	1.75	65	16.10	16.17
Mean	21.5	1.79	68.9	14.64	15.14
SD	3.5	0.04	4.0	0.74	0.73
Max	32.0	1.88	80.0	16.10	16.96
Min	18.0	1.71	60.0	13.84	13.96

表2. レース時のグラウンドコンディション

J大学競技会の気象条件(1次・2次)		
開催場所	J大学陸上競技場	
日時	2014年5月3日	2014年5月3日
天気	晴れ	晴れ
気温	29.0℃	29.0℃
湿度	48%	50%
風向	西南西	北
風速	0.6m/s	0.9m/s

J大学競技会の気象条件	
開催場所	J大学陸上競技場
日時	2013年11月2日
天気	曇り
気温	17.0℃
湿度	69%
風向	北東
風速	0.3m/s

J大学競技会の気象条件	
開催場所	J大学陸上競技場
日時	2014年6月7日
天気	雨
気温	18.0℃
湿度	78%
風向	北東
風速	2.8m/s

第27回六大学対校の気象条件(予選・OP)	
開催場所	相模原ギオンスタジアム (相模原麻溝公園競技場)
日時	2014年7月19日
天気	雨
気温	25.0℃
湿度	84%
風向	南東
風速	1.2m/s

第27回六大学対校の気象条件(決勝)	
開催場所	相模原ギオンスタジアム (相模原麻溝公園競技場)
日時	2014年7月19日
天気	曇り
気温	25.0℃
湿度	84%
風向	南東
風速	1.7m/s

表3. 疾走時における各変数のインターバル毎の変化

Intervals	S-1st	1st-2nd	2nd-3rd	3rd-4th	4th-5th	5th-6th	6th-7th	7th-8th	8th-9th	9th-10th	10th-G
t_c (ms)	151 (10)	132 (9)	129 (9)	129 (10)	130 (9)	131 (10)	133 (9)	135 (10)	137 (11)	139 (12)	133 (10)
t_r (ms)	81 (9)	94 (10)	97 (8)	97 (7)	100 (8)	100 (10)	102 (9)	105 (10)	104 (9)	107 (12)	118 (11)
F_{max} (kN)	1.65 (0.14)	1.82 (0.16)	1.86 (0.17)	1.87 (0.17)	1.87 (0.15)	1.87 (0.16)	1.88 (0.16)	1.88 (0.15)	1.87 (0.16)	1.88 (0.16)	2.01 (0.17)
Δy_c (m)	0.029 (0.004)	0.022 (0.003)	0.021 (0.003)	0.020 (0.003)	0.021 (0.003)	0.021 (0.003)	0.022 (0.003)	0.023 (0.004)	0.023 (0.004)	0.024 (0.004)	0.022 (0.003)
ΔL (m)	0.11 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)	0.18 (0.02)	0.22 (0.03)
K_{vert} (kN/m)	67 (13)	87 (18)	94 (20)	95 (21)	93 (19)	90 (18)	88 (18)	86 (17)	84 (18)	82 (18)	99 (21)
K_{leg} (kN/m)	18 (3)	11 (2)	12 (2)	12 (2)	12 (2)	11 (2)	11 (2)	11 (2)	11 (2)	11 (2)	10 (2)

Mean
(\pm SD)

表4. 疾走時における疾走速度(V),ピッチ(SF)およびストライド(SL)のインターバル毎の変化

Intervals	S-1st	1st-2nd	2nd-3rd	3rd-4th	4th-5th	5th-6th	6th-7th	7th-8th	8th-9th	9th-10th	10th-G
V (m/sec)	4.93 (0.13)	7.79 (0.33)	7.83 (0.36)	7.83 (0.37)	7.78 (0.41)	7.74 (0.40)	7.67 (0.42)	7.56 (0.46)	7.52 (0.46)	7.42 (0.46)	8.74 (0.55)
SF (Hz)	4.21 (0.17)	4.30 (0.23)	4.31 (0.21)	4.31 (0.19)	4.24 (0.22)	4.21 (0.24)	4.14 (0.22)	4.08 (0.28)	4.06 (0.26)	3.98 (0.28)	4.66 (0.27)
SL (m)	1.17 (0.05)	1.81 (0.07)	1.82 (0.06)	1.82 (0.06)	1.84 (0.06)	1.84 (0.06)	1.85 (0.06)	1.86 (0.06)	1.86 (0.06)	1.87 (0.07)	1.87 (0.07)

Mean
(\pm SD)

表5. ハードリング踏切時における各変数のハードル毎の変化

Hurdles	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
t_c (ms)	133 (9)	129 (8)	127 (8)	127 (8)	129 (8)	130 (9)	131 (9)	133 (9)	135 (9)	136 (9)
t_f (ms)	418 (36)	415 (35)	412 (36)	413 (37)	413 (40)	415 (37)	415 (41)	420 (42)	420 (43)	423 (42)
F_{max} (kN)	4.42 (0.41)	4.48 (0.43)	4.51 (0.42)	4.51 (0.43)	4.47 (0.44)	4.46 (0.41)	4.44 (0.42)	4.42 (0.41)	4.38 (0.41)	4.37 (0.38)
Δy_c (m)	0.022 (0.003)	0.021 (0.003)	0.020 (0.003)	0.020 (0.003)	0.021 (0.003)	0.021 (0.003)	0.021 (0.003)	0.022 (0.003)	0.022 (0.003)	0.023 (0.003)
ΔL (m)	0.08 (0.01)	0.16 (0.02)	0.16 (0.02)	0.16 (0.02)	0.16 (0.02)	0.16 (0.02)	0.16 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)	0.17 (0.02)
K_{vert} (kN/m)	208 (43)	222 (46)	231 (44)	229 (45)	223 (44)	220 (44)	215 (42)	207 (41)	200 (40)	196 (38)
K_{leg} (kN/m)	56 (11)	28 (5)	29 (5)	28 (5)	28 (5)	28 (5)	28 (5)	27 (5)	27 (5)	27 (5)

Mean
(\pm SD)

表6. ハードリング着地時における各変数のハードル毎の変化

Hurdles	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
t_c (ms)	105 (11)	102 (11)	100 (10)	101 (10)	102 (10)	104 (11)	105 (10)	108 (11)	110 (11)	110 (12)
t_f (ms)	46 (12)	50 (12)	51 (11)	49 (11)	49 (12)	48 (11)	49 (13)	49 (11)	49 (12)	44 (13)
F_{max} (kN)	1.53 (0.17)	1.58 (0.17)	1.61 (0.17)	1.58 (0.17)	1.57 (0.17)	1.55 (0.16)	1.56 (0.18)	1.55 (0.16)	1.54 (0.17)	1.49 (0.18)
Δy_c (m)	0.014 (0.003)	0.013 (0.003)	0.012 (0.003)	0.013 (0.003)	0.013 (0.003)	0.013 (0.003)	0.014 (0.003)	0.014 (0.003)	0.015 (0.003)	0.015 (0.003)
ΔL (m)	0.11 (0.02)	0.10 (0.02)	0.10 (0.01)	0.10 (0.01)	0.10 (0.01)	0.10 (0.01)	0.10 (0.01)	0.10 (0.01)	0.11 (0.01)	0.15 (0.02)
K_{vert} (kN/m)	117 (31)	128 (33)	135 (35)	130 (35)	128 (33)	122 (30)	119 (28)	113 (29)	107 (28)	104 (29)
K_{leg} (kN/m)	15 (3)	16 (4)	17 (4)	17 (3)	16 (3)	16 (3)	16 (3)	15 (3)	15 (3)	11 (3)

Mean
(\pm SD)

表7. 疾走時における最大速度区間の K_{vert} と各変数の関係

Intervals	K_{vert} (kN/m)	t_c (ms)	t_f (ms)	F_{max} (kN)	Δy_c (m)	The interdependence of K_{vert}			
						t_c	t_f	F_{max}	Δy_c
3rd-4th	95 ± 21	129 ± 10	97 ± 7	1.87 ± 0.17	0.020 ± 0.003	-0.932 ***	0.445 **	0.828 ***	-0.922 ***

***: p < 0.001, **: p < 0.01

n=38

表8. 疾走時における最大速度区間の K_{leg} と各変数の関係

Intervals	K_{leg} (kN/m)	t_c (ms)	t_f (ms)	F_{max} (kN)	ΔL (m)	The interdependence of K_{leg}			
						t_c	t_f	F_{max}	ΔL
3rd-4th	12 ± 2	129 ± 10	97 ± 7	1.87 ± 0.17	0.17 ± 0.02	-0.819 ***	0.630 ***	0.875 ***	-0.932 ***

***: p < 0.001

n=38

表9. ハードラング踏切時における最大速度地点の K_{vert} と各変数の関係

Hurdles	K_{vert} (kN/m)	t_c (ms)	t_f (ms)	F_{max} (kN)	Δy_c (m)	The interdependence of K_{vert}			
						t_c	t_f	F_{max}	Δy_c
4th	229 ± 45	129 ± 10	413 ± 37	4.51 ± 0.43	0.020 ± 0.003	-0.892 ***	0.197 n.s.	0.833 ***	-0.884 ***

***: p < 0.001

n=38

表10. ハードリング踏切時における最大速度地点のK_{leg}と各変数の関係

Hurdles	K _{leg} (kN/m)	t _c (ms)	t _f (ms)	F _{max} (kN)	ΔL (m)	The interdependence of K _{leg}			
						t _c	t _f	F _{max}	ΔL
4th	28 ± 5	129 ± 10	413 ± 37	4.51 ± 0.43	0.16 ± 0.02	-0.682 ***	0.494 **	0.927 ***	-0.918 ***

***; p < 0.001, **; p < 0.01
n=38

表11. ハードリング着地時における最大速度地点のK_{vert}と各変数の関係

Hurdles	K _{vert} (kN/m)	t _c (ms)	t _f (ms)	F _{max} (kN)	Δy _c (m)	The interdependence of K _{vert}			
						t _c	t _f	F _{max}	Δy _c
4th	130 ± 35	101 ± 10	49 ± 11	1.58 ± 0.17	0.013 ± 0.003	-0.893 ***	0.258 n.s.	0.687 ***	-0.880 ***

***; p < 0.001
n=38

表12. ハードリング着地時における最大速度地点のK_{leg}と各変数の関係

Hurdles	K _{leg} (kN/m)	t _c (ms)	t _f (ms)	F _{max} (kN)	ΔL (m)	The interdependence of K _{leg}			
						t _c	t _f	F _{max}	ΔL
4th	17 ± 3	129 ± 10	413 ± 37	4.51 ± 0.43	0.10 ± 0.01	-0.821 ***	0.309 n.s.	0.727 ***	-0.853 ***

***; p < 0.001
n=38

表13. 疾走時における最大速度区間のK_{vert}およびK_{leg}とピッチ、ストライドおよび疾走速度の関係

Intervals	Step frequency (Hz)	Step length (m)	Running velocity (m/sec)	The interdependence of Step frequency		The interdependence of Step length		The interdependence of Running velocity	
				K _{vert} (kN/m)	K _{leg} (kN/m)	K _{vert} (kN/m)	K _{leg} (kN/m)	K _{vert} (kN/m)	K _{leg} (kN/m)
3rd-4th	4.31 ± 0.19	1.82 ± 0.06	7.83 ± 0.37	0.591 ***	0.348 *	0.053 n.s.	-0.075 n.s.	0.582 ***	0.270 n.s.

***: p < 0.001, *: p < 0.05 n=38

表14. 疾走時における最大速度区間のピッチ、ストライドおよび疾走速度の相互関係

Intervals	Step frequency (Hz)	Step length (m)	Running velocity (m/sec)	The interdependence of Step length		The interdependence of Running velocity		The interdependence of Step frequency	
				Step frequency (Hz)	Step length (m)	Step length (m)	Running velocity (m/sec)	Step frequency (Hz)	Step length (m)
3rd-4th	4.31 ± 0.19	1.82 ± 0.06	7.83 ± 0.37	-0.253 n.s.	0.435 **	0.760 ***			

***: p < 0.001, **: p < 0.01 n=38

表15-1. 疾走時における全インターバルラン区間の
K_{vert}および各変数の値(同競技力)

Subject	Height (m)	Body mass (kg)	Race time (sec)	K _{vert} (kN/m)	V (m/sec)	SF (Hz)	t _c (ms)	t _r (ms)	Δy _c (m)	F _{max} (kN)
A	1.85	70	13.96	98	8.40	4.40	126	95	0.020	1.89
E	1.78	69	13.99	139	8.33	4.70	109	98	0.015	2.01

表15-2. 最大速度区間(3rd-4th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	V	SF	t _c	t _r	Δy _c	F _{max}
A	108	8.54	4.41	122	98	0.018	1.94
E	150	8.36	4.76	105	98	0.014	2.04

表15-3. 速度逡減区間(9th-10th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	V	SF	t _c	t _r	Δy _c	F _{max}
A	91	8.16	4.26	130	98	0.021	1.89
E	134	8.21	4.51	112	113	0.015	2.04

表15-4. 最大速度区間と速度逡減区間のK_{vert}および各変数の変化率

Subject	K _{vert}	V	SF	t _c	t _r	Δy _c	F _{max}
A	84.49	95.54	96.45	92.80	100.00	85.41	97.80
E	89.24	97.91	94.74	97.42	95.16	96.34	99.59

(%)

表16-1. ハードリング踏切時における全インターバルラン区間の
K_{vert}および各変数の値(同競技力)

Subject	K _{vert} (kN/m)	t _c (ms)	t _r (ms)	Δy _c (m)	F _{max} (kN)
A	173	134	341	0.022	3.82
E	290	117	415	0.017	4.85

表16-2. 最大速度区間(4th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _r	Δy _c	F _{max}
A	186	130	337	0.021	3.87
E	314	103	417	0.016	4.97

表16-3. 速度逡減区間(10th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _r	Δy _c	F _{max}
A	156	140	350	0.024	3.77
E	264	120	410	0.018	4.69

表16-4. 最大速度区間と速度逡減区間のK_{vert}および各変数の変化率

Subject	K _{vert}	t _c	t _r	Δy _c	F _{max}
A	84.08	92.86	96.19	86.23	97.50
E	84.27	94.44	101.63	89.23	94.44

(%)

表17-1. ハードリング着地時における全インターバルラン区間の
K_{vert}および各変数の値(同競技力)

Subject	K _{vert} (kN/m)	t _c (ms)	t _f (ms)	Δy _c (m)	F _{max} (kN)
A	135	99	49	0.012	1.61
E	185	85	44	0.009	1.62

表17-2. 最大速度区間(4th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	158	93	53	0.011	1.69
E	208	80	43	0.008	1.64

表17-3. 速度逡減区間(10th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	127	103	57	0.013	1.67
E	160	87	33	0.009	1.47

表17-4. 最大速度区間と速度逡減区間のK_{vert}および各変数の変化率

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	80.39	90.32	94.12	81.58	98.53
E	76.54	92.31	130.00	85.22	89.81

(%)

表18-1. 疾走時における全インターバルラン区間の
K_{vert}および各変数の値(低身長)

Subject	Height (m)	Body mass (kg)	Race time (sec)	K _{vert} (kN/m)	V (m/sec)	SF (Hz)	t _c (ms)	t _f (ms)	Δy _c (m)	F _{max} (kN)
E	1.78	69	13.99	139	8.33	4.70	109	98	0.015	2.01
T	1.75	64	14.87	65	7.77	4.24	141	88	0.022	1.60
AA	1.80	68	15.21	88	7.58	3.71	132	106	0.025	1.88

表18-2. 最大速度区間(3rd-4th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	V	SF	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
E	150	8.36	4.76	105	98	0.014	2.04
T	68	7.79	4.35	138	85	0.024	1.60
AA	96	7.79	4.23	127	103	0.020	1.89

表18-3. 速度逡減区間(9th-10th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	V	SF	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
E	134	8.21	4.51	112	113	0.015	2.04
T	63	7.83	4.23	143	87	0.025	1.58
AA	75	7.31	3.87	142	110	0.025	1.86

表18-4. 最大速度区間と速度逡減区間のK_{vert}および各変数の変化率

Subject	K _{vert}	V	SF	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
E	89.24	98.20	94.74	97.42	95.16	96.34	99.59
T	92.93	98.05	97.18	91.21	98.08	88.02	99.04
AA	78.64	93.87	91.61	97.44	93.94	89.42	98.61

(%)

表19-1. ハードリング踏切時における全インターバルラン区間の
K_{vert}および各変数の値(低身長)

Subject	K _{vert} (kN/m)	t _c (ms)	t _f (ms)	Δy _c (m)	F _{max} (kN)
E	290	117	415	0.017	4.85
T	164	140	419	0.024	3.94
AA	232	126	416	0.020	4.51

表19-2. 最大速度区間(4th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
E	314	103	417	0.016	4.97
T	177	137	427	0.023	4.06
AA	257	120	403	0.018	4.57

表19-3. 速度遅減区間(10th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
E	264	120	410	0.018	4.69
T	146	147	430	0.027	3.88
AA	215	130	427	0.021	4.49

表19-4. 最大速度区間と速度遅減区間のK_{vert}および各変数の変化率

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
E	84.27	94.44	101.63	89.23	94.44
T	82.84	93.18	99.22	86.85	95.39
AA	83.67	92.31	94.53	85.22	98.19

(%)

表20-1. ハードリング着地時における全インターバルラン区間の
K_{vert}および各変数の値(低身長)

Subject	K _{vert} (kN/m)	t _c (ms)	t _f (ms)	Δy _c (m)	F _{max} (kN)
E	185	85	44	0.009	1.62
T	101	102	30	0.013	1.28
AA	92	115	47	0.016	1.48

表20-2. 最大速度区間(4th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
E	208	80	43	0.008	1.64
T	119	97	37	0.011	1.36
AA	96	113	50	0.016	1.51

表20-3. 速度遅減区間(10th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
E	160	87	33	0.009	1.47
T	90	103	20	0.013	1.18
AA	71	123	33	0.019	1.33

表20-4. 最大速度区間と速度遅減区間のK_{vert}および各変数の変化率

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
E	76.54	92.31	130.00	85.22	89.81
T	75.74	93.55	183.33	87.53	86.53
AA	74.44	91.89	150.00	84.46	88.14

(%)

表21-1. 疾走時における全インターバルラン区間の
K_{vert}および各変数の値(高身長)

Subject	Height (m)	Body mass (kg)	Race time (sec)	K _{vert} (kN/m)	V (m/sec)	SF (Hz)	t _c (ms)	t _f (ms)	Δy _c (m)	F _{max} (kN)
A	1.85	70	13.96	98	8.40	4.40	126	95	0.020	1.89
C	1.85	80	14.56	115	8.02	4.19	127	105	0.020	2.25
Z	1.88	77	15.53	96	7.51	3.90	136	114	0.023	2.17

表21-2. 最大速度区間(3rd-4th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	V	SF	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	108	8.54	4.41	122	98	0.018	1.94
C	119	8.21	4.35	123	100	0.019	2.23
Z	99	7.49	3.97	133	112	0.022	2.18

表21-3. 速度逡減区間(9th-10th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	V	SF	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	91	8.16	4.26	130	98	0.021	1.89
C	99	7.81	4.05	135	105	0.022	2.19
Z	90	7.16	3.66	142	125	0.025	2.23

表21-4. 最大速度区間と速度逡減区間のK_{vert}および各変数の変化率

Subject	K _{vert}	V	SF	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	84.49	95.54	96.45	92.80	100.00	85.41	97.80
C	83.15	95.16	93.24	92.50	95.24	87.44	98.57
Z	90.96	95.56	92.07	99.59	89.33	97.78	102.57

(%)

表22-1. ハードリング踏切時における全インターバルラン区間の
K_{vert}および各変数の値(高身長)

Subject	K _{vert} (kN/m)	t _c (ms)	t _f (ms)	Δy _c (m)	F _{max} (kN)
A	173	134	341	0.022	3.82
C	239	127	365	0.020	4.76
Z	210	135	397	0.022	4.68

表22-2. 最大速度区間(4th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	186	130	337	0.021	3.87
C	259	123	363	0.019	4.86
Z	218	133	403	0.022	4.77

表22-3. 速度逡減区間(10th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	156	140	350	0.024	3.77
C	211	133	367	0.022	4.62
Z	193	140	410	0.024	4.66

表22-4. 最大速度区間と速度逡減区間のK_{vert}および各変数の変化率

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	84.08	92.86	96.19	86.23	97.50
C	81.33	92.50	99.09	85.58	95.03
Z	88.54	95.24	98.37	90.71	97.60

(%)

表23-1. ハードリング着地時における全インターバルラン区間の
K_{vert}および各変数の値(高身長)

Subject	K _{vert} (kN/m)	t _c (ms)	t _f (ms)	Δy _c (m)	F _{max} (kN)
A	135	99	49	0.012	1.61
C	126	108	50	0.014	1.80
Z	121	109	53	0.015	1.76

表23-2. 最大速度区間(4th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	158	93	53	0.011	1.69
C	136	103	47	0.013	1.79
Z	125	107	50	0.014	1.74

表23-3. 速度遅減区間(10th)のK_{vert}および各変数

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	127	103	57	0.013	1.67
C	107	117	53	0.017	1.80
Z	97	120	53	0.018	1.71

表23-4. 最大速度区間と速度遅減区間のK_{vert}および各変数の変化率

Subject	K _{vert}	t _c	t _f	Δy _c	F _{max}
A	80.39	90.32	94.12	81.58	98.53
C	78.75	88.57	87.50	78.45	100.38
Z	77.71	88.89	93.75	79.015	98.35

(%)