

## 陸上競技男子400 m 走におけるレースパターンとパフォーマンスとの関係

山元 康平<sup>1)</sup> 宮代 賢治<sup>1)</sup> 内藤 景<sup>1)</sup> 木越 清信<sup>2)</sup>  
谷川 聡<sup>2)</sup> 大山卡圭悟<sup>2)</sup> 宮下 憲<sup>3)</sup> 尾縣 貢<sup>2)</sup>

Kohei Yamamoto<sup>1</sup>, Kenji Miyashiro<sup>1</sup>, Hikari Naito<sup>1</sup>, Kiyonobu Kigoshi<sup>2</sup>, Satoru Tanigawa<sup>2</sup>, Keigo Ohyama Byun<sup>2</sup>, Ken Miyashita<sup>3</sup> and Mitsugi Ogata<sup>2</sup>: The relationship between race pattern and performance in the men's 400-m sprint. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 59: 159-173, June, 2014

**Abstract** : This study was conducted to clarify the relationship between race pattern and performance in the men's 400-m race. Using several video cameras, 154 male 400-m sprinters (45-46 s: 26, 47 s: 35, 48 s: 58, 49 s: 35) in official competitions were videotaped at a sampling rate of 59.94 Hz from the start to the finish. The split time at every 50 m from the start was calculated using the Overlay method, which analyzes the split time by superimposing an image of the 400-m race onto an image of the hurdles in a 400-m hurdle race. Each segment was defined as follows: First segment, from the start to the 100-m mark; 2<sup>nd</sup> segment, from the 100-m mark to the 200-m mark; 3<sup>rd</sup> segment, from the 200-m mark to the 300-m mark; 4<sup>th</sup> segment, from the 300-m mark to the finish. The results of regression analysis revealed significant correlations between the 400-m race time and the all of the segment times ( $r=0.589-0.887$ ,  $p<0.001$ ), the ratio of the time for the 3<sup>rd</sup> segment ( $r=0.290$ ,  $p<0.001$ ) to that of the 4<sup>th</sup> segment ( $r=0.218$ ,  $p<0.01$ ), the rate of change in running speed from the 1<sup>st</sup> to the 2<sup>nd</sup> segments ( $r=-0.317$ ,  $p<0.001$ ), and that from the 2<sup>nd</sup> to the 3<sup>rd</sup> segments ( $r=-0.271$ ,  $p<0.01$ ). However, the relationship between the 400-m race time and the deceleration index (the slope of the linear relationship between running speed and the number of segments from the peak running speed to the finish) was not significant ( $r=0.154$ ,  $p=0.056$ ). These results suggest that it is important to maintain running speed in the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> 100-m segments to achieve high performance in the 400-m sprint.

**Key words** : sprint, pacing strategy, running speed, type  
キーワード : 短距離走, ベース配分, 疾走スピード, タイプ

### I. 緒 言

陸上競技400 m 走は, 競技場を1周する最も長い短距離走種目である。この種目は, 短距離走種目と位置付けられているものの, 男子でも40秒以上の競技時間を要し, スタートからゴールま

で, レース全体にわたって全力疾走を維持することは困難である。したがって, 400 m 走において, 高いパフォーマンスを達成するためには, 適切なペース配分が重要となる (Abbiss and Laurssen, 2008 ; 金原ほか, 1971; Hart, 1981; Schiffer, 2008)。そして, 400 m 走のペース配分は, 各地点の通過タイムや, 疾走スピードの変化に着目

1) 筑波大学大学院人間総合科学研究科  
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
2) 筑波大学体育系  
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
3) 帝京大学医療技術学部  
〒320-8551 栃木県宇都宮市豊郷台 1-1  
連絡先 山元康平

1. *University of Tsukuba, Graduate School of Comprehensive Human Science*  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki  
2. *University of Tsukuba, Faculty of Health and Sport Science*  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki  
3. *Teikyo University, Faculty of Medical Technology*  
1-1 Toyosatodai, Utsunomiya, Tochigi  
Corresponding author kyama1638@yahoo.co.jp

し、「レースパターン」という用語を用いて評価を行うのが一般的である（尾縣ほか，2000；土江，2011）。

400 m 走のレースパターンについては，これまでに，国際大会ではオリンピックや世界選手権（Brüggeman and Glad, 1990; Ferro et al., 2001；持田・杉田，2010），国内では全国高等学校総合大会（インターハイ）や日本選手権などにおいて（杉田，2003），組織的な調査が度々行われており，コーチや競技者からの関心も高い。しかしながら，パフォーマンスとレースパターンとの関係について検討した先行研究を概観すると，研究間で結果が大きく異なり，統一した見解を得るには至っていないのが現状である。例えば，レースパターンを評価する上での代表的な指標のひとつである「スピードの低下」に着目すると，パフォーマンスの高い者ほど低下が大きいとした報告がある一方で（Hanon and Gajer, 2009；伊藤ほか，1997），パフォーマンスの高い者ほどスピードの低下は小さいとした報告も少なくない（van Coppenolle, 1980；尾縣ほか，1998；Ogata et al., 2005）。先行研究の多くは，実験条件，あるいは単一の競技会やレースのみを対象としているなどの理由から，被検者数が少ないことや，個々の競技者が十分に実力を発揮できていないレースを含んでいるなど，適切なデータによって検証されているとは言い難い。一方で，400 m 走と同様に高強度な持久的運動である800 m 走や400 m ハードル走においては，多数のレース分析データをもとに，パフォーマンスの高い競技者のレースパターンの特徴が明らかとされているとともに（門野ほか，2008；森丘ほか，2005），レースパターンの類型化（タイプ分け）およびタイプに応じたペース配分の指標の提案が行われている（門野，2011；森丘，2006）。さらには，それらの知見の積極的な活用によって，国内トップレベルにある競技者においてもパフォーマンスの向上が図られている事例が報告されている（門野，2011；森丘・山崎，2008）。これらのことを鑑みると，400 m 走においても，幅広いパフォーマンスレベルにある競技者を対象に，対象者が十分に実力を

発揮したといえるレースのデータを多数収集し，レースパターンとパフォーマンスとの関係について詳細に検討することで，合理的なトレーニングおよびコーチングを行う上で有益な知見を提供することができると考えられる。

ところで，400 m 走におけるレースパターンの重要性は，疑いの余地のないものであるにもかかわらず，上述したように，これまでに十分に検討がなされてこなかった背景には，曲走路を含むセパレートレーンでの競技であるため，競技会における詳細なデータ収集が，分析技術的に困難であったことがあるといえる（持田ほか，2007）。すなわち，100 m 走などの直線種目では，レーザーを利用したスピード計測装置や（松尾ほか，2009），任意の地点に1台のビデオカメラを配置し，競技者が各地点を通過したタイムを映像から読み取る方法などによって（阿江ほか，1994；Gajer et al., 1999），詳細なデータを比較的容易に収集することが可能である。一方で，曲走路を含む種目においては，レーザー方式の計測装置を使用することが困難であるとともに，ビデオカメラを用いた分析においても，レーンによって曲走路の曲率が異なるため，レーン毎に距離の計測を行った上で，任意の分析地点に対して複数台のカメラを配置せざるを得ず，詳細な分析を行うためには，人的・物的コストが大きくなってしまいが指摘されている（持田ほか，2007）。例えば，Hanon and Gajer (2009) は，400 m 走レースにおける50 m 毎の通過タイムとピッチおよびストライドを分析するために，16台の同期したビデオカメラを用いている。しかし近年，ソフトウェア上での映像の重ね合わせ技術（Overlay 表示技術）を利用した新たな分析手法が提案されたことで（持田ほか，2007），400 m 走のレースパターンに関する従来よりも詳細なデータを，公式競技会において収集することが可能となった。この新たな手法によって多数の競技者のデータを収集することで，400 m 走におけるレースパターンとパフォーマンスとの関係性について明らかにすることができると考えられる。

これらのことから，本研究では，異なるパフ

パフォーマンスレベルにある400 m 走競技者のレースパターンを分析することで、陸上競技男子400 m 走におけるレースパターンとパフォーマンスとの関係を明らかにし、400 m 走の合理的なコーチングに資する基礎的知見を得ることを目的とした。

## II. 方 法

### 1. データ収集

#### (1) 分析対象者

分析対象者は、国内の公式競技会に出場した男子400 m 走競技者154名とした。公式記録が50.00秒以内、かつ分析対象競技会前1年以内の自己最高記録に対する達成率が99%以上を記録した競技者のみを分析対象とした。複数の分析対象レースに出場している競技者については、最も記録が良いレースを分析対象とした。

パフォーマンスレベル別の比較を行うため、分析対象者を、公式記録をもとに、45秒台から1秒毎に群分けした。なお、45秒台の競技者は、データ数が少なかったため(5名)、46秒台群に含めて扱った。Table 1は、分析対象者の公式記録を示したものである。以下、45—46秒台群をG45—46、47秒台群をG47、48秒台群をG48、49秒台群をG49と略す。

なお、本研究では、公式競技会におけるレースを撮影したため、競技者が走行するレーンを統一することはできなかった。レーンが異なることは、曲走路の曲率や他の競技者との相対的な位置関係が異なることによって、パフォーマンスやレースパターンに影響を及ぼす可能性が考えられる(Quinn, 2009)。しかしながら、本研究においては、内側のレーン(1—3レーン)、中央のレーン(4—6レーン)および外側のレーン(7—9レーン)

を走った競技者の400 m 走の公式記録やレースパターンに有意な差は認められなかった。そのため、本研究では、レーンの違いがパフォーマンスやレースパターンに及ぼす影響は小さいものと判断し、レーンの違いによるデータの補正等は行わなかった。

#### (2) レースの撮影

2—3台のVTRカメラ(SONY社製、DCR-VX2000)を、陸上競技場ホームストレートおよびバックストレートのスタンドに設置し、レースを撮影した。スタートピストルの閃光を撮影した後、59.94field/秒で選手を追従撮影した。露出時間は、スタートピストルの閃光撮影時が1/60秒、それ以降が1/500—1/2000秒であった。

### 2. データ処理

#### (1) 通過タイムの算出

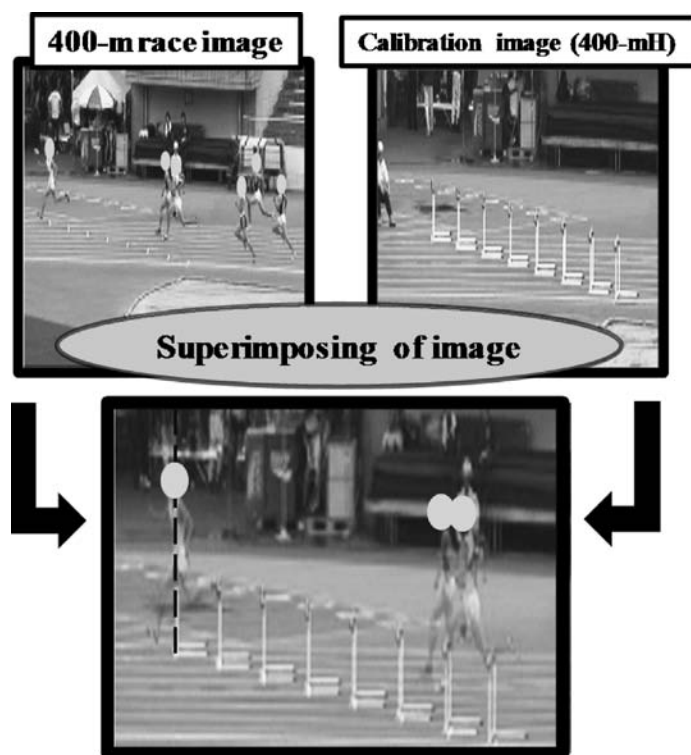
各地点の通過タイムは、Overlay方式を用いて算出した(持田ほか, 2007)。Overlay方式とは、対象とする400 m 走レースのVTR画像と、距離較正用のVTR画像を、ソフトウェア上で合成表示し、任意の地点を対象者が通過した時刻を読み取る方法である。距離の較正には、400 m ハードル走のハードル設置位置を用い、レース撮影時と同じ位置からハードルが設置された状況を撮影した。

ビデオ編集ソフト(Corel社製、VideoStudio12)を用いて、画像を合成表示し、グラウンド上のラインや観客席などを手掛かりに、2つの映像を重ね合わせた後、400 m ハードル走のハードル設置位置である10地点(45, 80, 115, 150, 185, 220, 255, 290, 325および360 m 地点)の通過タイムを、29.97コマ/秒で読み取った(分解能: 0.033秒, Fig. 1)。そして、50 m 毎の各地

Table 1 400-m race time of each group

	Total	G45-46	G47	G48	G49
n	154	26	35	58	35
400-m race time (s)	48.13±1.06	46.41±0.41	47.53±0.25	48.45±0.30	49.48±0.29

\* Values show mean ± standard deviation.



**Fig. 1** Superimposing an image of the 400-m competition race onto an image of the hurdles in a 400-m hurdle race by using the Overlay method.

点の通過タイムを、各地点を挟む前後2地点、すなわち、50 m 地点では45 m および80 m 地点、100 m 地点では80 m および115 m 地点、…、350 m 地点では325 m および360 m 地点の通過タイムを基に、時間と距離の直線回帰式に距離を内挿することによって推定した(持田ほか, 2007; 持田・杉田, 2010)。なお、150 m 地点の通過タイムは、400 m ハードル走の4台目のハードル設置位置の通過タイムを、400 m 地点の通過タイムは、公式記録を、それぞれ用いた。

持田ほか(2007)は、Overlay方式によって算出した100 m 毎の各地点(100 m, 200 m および300 m 地点)の通過タイムと、各地点に配置したカメラによって測定した通過タイムとを比較し、Overlay方式によるデータの妥当性について検証を試みている。その結果、各地点の測定誤差の二乗平均平方根( $RMS_{error}$ )は、いずれの地点も0.05秒であったと報告している。この値は、各地

点の通過タイムに対して0.5%以下の誤差である。また、持田ほか(2007)のデータを基に、後述する100 m 毎の区間タイムの $RMS_{error}$ を算出すると、0.05から0.06秒であった。この値は、本研究における区間タイムの最小値である10.46秒に対して0.5%程度の誤差であった。

これらのことから、Overlay方式を用いて通過タイムおよび区間タイムを算出することは、一定の測定誤差が生じる可能性があるものの、想定される測定誤差は極めて小さい値であり、本研究の目的を達成する上で妥当であると判断した。

## (2) 算出項目および方法

レースパターンを評価する指標として、指導書(土江, 2011)および400 m 走と同等の距離を疾走する400 m ハードル走において、レースパターンとパフォーマンスとの関係について詳細な検討を行った森丘ほか(2005)を参考に、以下に示す項目を算出した。

## 1) 疾走スピード

各地点の通過タイムから、50 m 毎の各区間に要した時間を算出し、区間距離を区間に要した時間で除すことにより、区間平均疾走スピード（以下、疾走スピード）を算出した。

## 2) 区間タイムおよび区間タイム比

400 m を100 m 毎の4つの区間に区分し（それぞれ0—100 m 区間：1st 100 m, 100—200 m 区間：2nd 100 m, 200—300 m 区間：3rd 100 m, 300—400 m 区間：4th 100 m と略す）、各区間に要した時間を区間タイムとして算出した（それぞれ  $T_{1st\ 100\ m}$ ,  $T_{2nd\ 100\ m}$ ,  $T_{3rd\ 100\ m}$ ,  $T_{4th\ 100\ m}$  と略す）。また、ペース配分の指標として、各区間タイムが、400 m 走タイムに占める割合である区間タイム比を算出した（それぞれ  $\%_{1st\ 100\ m}$ ,  $\%_{2nd\ 100\ m}$ ,  $\%_{3rd\ 100\ m}$ ,  $\%_{4th\ 100\ m}$  と略す）。区間タイム比は、パフォーマンスレベルによる影響を取り除いた相対的なペース配分の指標として用いられるものである（森丘ほか, 2005）。

## 3) 疾走スピード変化率

2nd 100 m, 3rd 100 m および 4th 100 m における、前の区間からの疾走スピード変化率を、以下の式により算出した（それぞれ  $\Delta S_{2nd\ 100\ m}$ ,  $\Delta S_{3rd\ 100\ m}$ ,  $\Delta S_{4th\ 100\ m}$  と略す）。

$$\text{疾走スピード変化率} = [1 - (\text{前の区間の疾走スピード} / \text{後の区間の疾走スピード})] \times 100$$

なお、疾走スピード変化率は、正の値が前の区間からの疾走スピードの増加を、負の値が減少を示す。

## 4) 疾走スピード通減指標

尾縣ほか（1998）の方法を参考に、レース全体での疾走スピード通減指標を算出した。すなわち、疾走スピードが最高に達する50—100 m 区間を第1区間、100—150 m 区間を第2区間、…、350—400 m 区間を7区間とし、区間数を独立変数、疾走スピードを従属変数として直線回帰式を算出し、その回帰式の傾きを、各対象者の疾走スピード通減指標とした。なお、回帰式の相関係数は-0.872から-0.999の範囲であり、全ての回帰

式が5%水準で有意であった。この指標は、値が小さいほど、レース全体での疾走スピードの通減が緩やかであることを示す。

## (3) 統計処理

各測定項目の平均値および標準偏差を算出した。各測定項目間の関係を検討するために、Pearson の積率相関係数を算出した。群間の有意差検定には、一元配置の分散分析を行い、F 値が有意であった項目については scheffe 法により多重比較を行った。また、対象者を、レースパターンをもとに類型化するために、ペース配分の指標である区間タイム比に対して、変量を標準化した平方ユークリッド距離を算出し、これを手掛かりとして Ward 法によるクラスター分析をケース（個体）に対して行った。さらに、タイプ毎に、400 m 走タイムを独立変数、100 m 毎の各地点の通過タイムを従属変数とし、直線回帰式を算出した。いずれも、有意性は危険率5%未満で判定した。

## III. 結 果

Fig. 2 は、各群の疾走スピードの変化を示したものである。全ての群が、50—100 m 区間において最高疾走スピードに到達し、以降ゴールまで疾走スピードは漸減した。

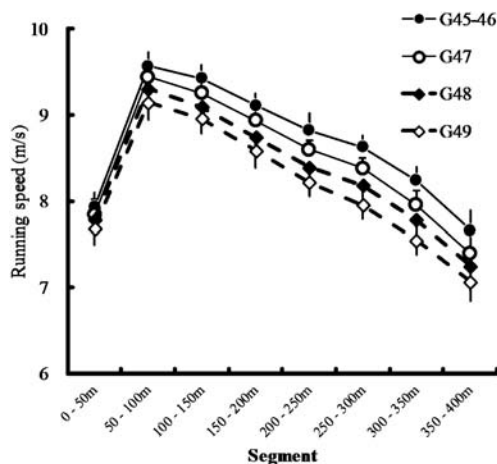


Fig. 2 Changes in running speed of each group.

Table 2 Segment time of each group

	Total	G45-46	G47	G48	G49	Difference
T <sub>1st 100 m</sub> (s)	11.77 ± 0.27	11.54 ± 0.22	11.68 ± 0.21	11.80 ± 0.22	11.98 ± 0.25	45-46 < 48, 49 47, 48 < 49
T <sub>2nd 100 m</sub> (s)	11.14 ± 0.30	10.80 ± 0.16	11.00 ± 0.19	11.22 ± 0.24	11.41 ± 0.23	45-46 < 47 < 48 < 49
T <sub>3rd 100 m</sub> (s)	11.98 ± 0.35	11.47 ± 0.21	11.78 ± 0.11	12.08 ± 0.19	12.38 ± 0.21	45-46 < 47 < 48 < 49
T <sub>4th 100 m</sub> (s)	13.24 ± 0.52	12.61 ± 0.30	13.06 ± 0.33	13.34 ± 0.42	13.71 ± 0.36	45-46 < 47 < 48 < 49

†Values show mean ± standard deviation.

††<: Significant difference ( $p < 0.05$ ) among the groups.

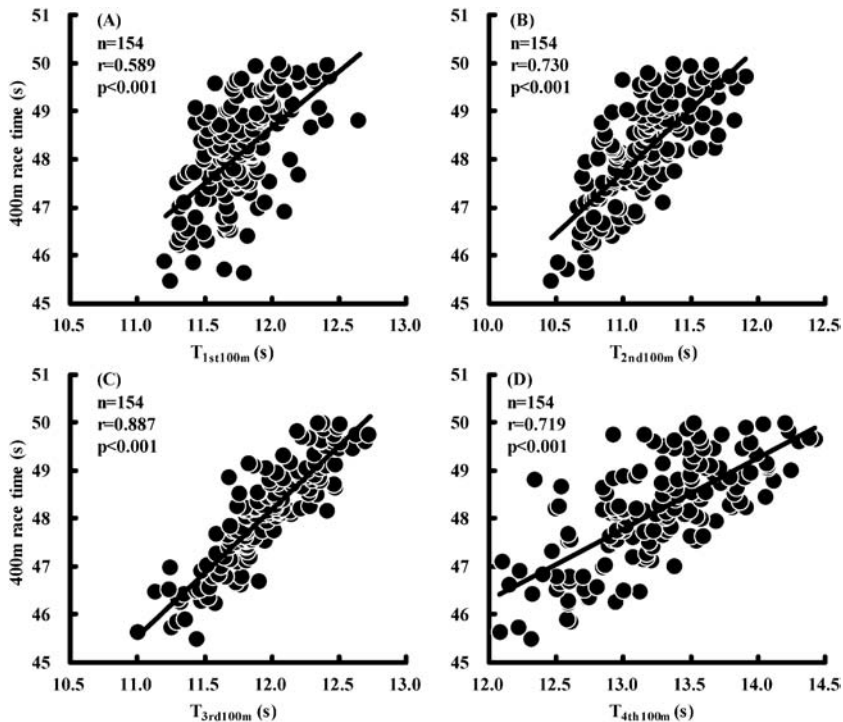


Fig. 3 Relationships between 400-m race time and segment times.  
(A) 1st 100 m, (B) 2nd 100 m, (C) 3rd 100 m, (D) 4th 100 m.

Table 2 は、各群の区間タイムを示したものである。1st 100 m において、G45—46と G48および G49、G47および G48と G49との間に有意な差が認められた。2nd 100 m 以降の区間においては、全ての群間に有意な差が認められた。また、Fig. 3 は、400 m 走タイムと各区間タイムとの関係を示したものである。全ての区間において、変数間に有意な正の相関関係が認められた ( $r = 0.589-0.887$ ,  $p < 0.001$ )。

Table 3 は、各群の区間タイム比を示したもの

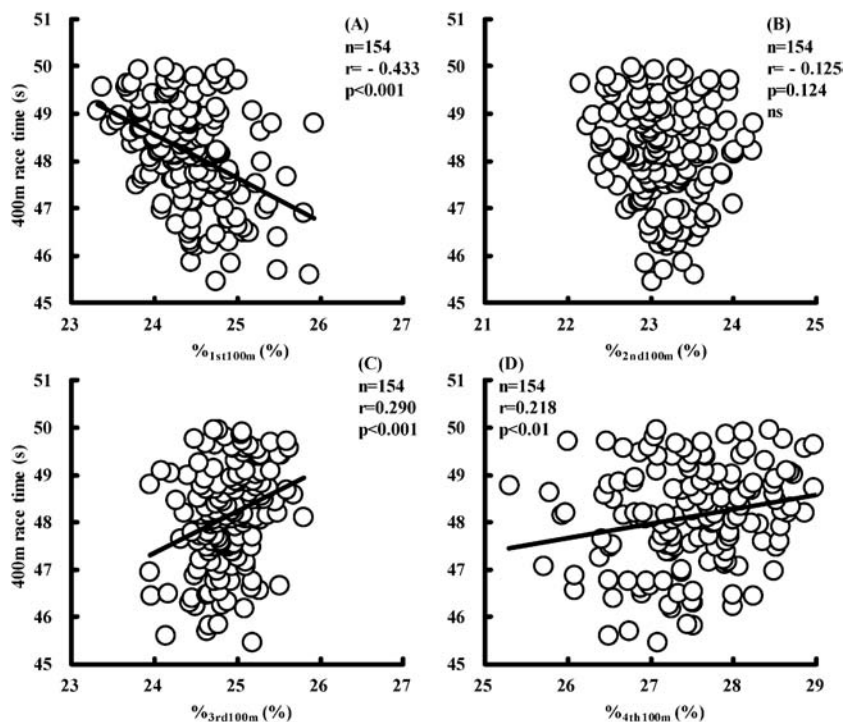
である。1st 100 m において、G45—46は G48および G49と比較して、また、G47は G49と比較して、区間タイム比が有意に大きかった。また、3rd 100 m および 4th 100 m において、G45—46は、G49と比較して区間タイム比が有意に小さかった。2nd 100 m においては、いずれの群間にも有意な差は認められなかった。また、Fig. 4 は、400 m 走タイムと各区間タイム比との関係を示したものである。1st 100 m において、変数間に有意な負の相関関係が ( $r = -0.433$ ,  $p < 0.001$ )、

**Table 3** Ratio of segment time of each group

	Total	G45-46	G47	G48	G49	Difference
%1st 100 m (%)	24.5±0.5	24.9±0.5	24.6±0.4	24.4±0.4	24.2±0.5	45-46>48, 49 47>49
%2nd 100 m (%)	23.2±0.4	23.3±0.3	23.1±0.4	23.2±0.5	23.1±0.4	ns
%3rd 100 m (%)	24.9±0.4	24.7±0.4	24.8±0.2	24.9±0.4	25.0±0.4	45-46<49
%4th 100 m (%)	27.5±0.8	27.2±0.6	27.5±0.7	27.5±0.8	27.7±0.7	45-46<49

†Values show mean±standard deviation.

††> or <: Significant difference ( $p<0.05$ ) among the groups. ns: not significant.



**Fig. 4** Relationships between 400-m race time and ratio of segment times.

(A) 1st 100 m, (B) 2nd 100 m, (C) 3rd 100 m, (D) 4th 100 m. ns: not significant.

3rd 100 m および 4th 100 m において、有意な正の相関関係がそれぞれ認められた（それぞれ  $r=0.290$ ,  $p<0.001$ ;  $r=0.218$ ,  $p<0.01$ ）。2nd 100 m においては、変数間に有意な相関関係は認められなかった（ $r=-0.125$ ,  $p=0.124$ ）。

Table 4 は、各群の疾走スピード変化率および疾走スピード逓減指標を示したものである。疾走スピード変化率は、2nd 100 m では正の値、3rd 100 m および 4th 100 m では負の値を示し、2nd 100 m において、G45-46 と G48 および G49 との

間、3rd 100 m において、G45-46 と G49 との間にも有意な差が認められた。4th 100 m においては、いずれの群間にも有意な差は認められなかった。また、疾走スピード逓減指標についても、いずれの群間にも有意な差は認められなかった。さらに、Fig. 5 は、400 m 走タイムと疾走スピード変化率との関係を、Fig. 6 は、400 m 走タイムと疾走スピード逓減指標との関係を、それぞれ示したものである。疾走スピード変化率は、2nd 100 m および 3rd 100 m において、400 m 走タイム

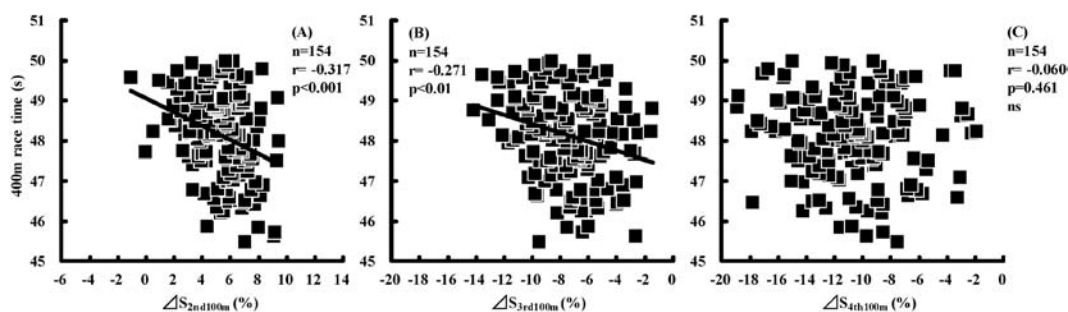
**Table 4** Rate of change in running speed and the deceleration index of each group

	Total	G45-46	G47	G48	G49	Difference
$\Delta S_{2nd\ 100\ m}$ (%)	$5.3 \pm 1.9$	$6.4 \pm 1.5$	$5.8 \pm 1.9$	$4.9 \pm 1.7$	$4.8 \pm 2.1$	45-46 < 48, 49
$\Delta S_{3rd\ 100\ m}$ (%)	$-7.5 \pm 2.6$	$-6.2 \pm 2.1$	$-7.1 \pm 2.0$	$-7.6 \pm 2.9$	$-8.5 \pm 2.5$	45-46 < 49
$\Delta S_{4th\ 100\ m}$ (%)	$-10.6 \pm 3.6$	$-10.0 \pm 3.3$	$-10.8 \pm 2.8$	$-10.5 \pm 4.1$	$-10.8 \pm 3.7$	ns
Deceleration index	$0.33 \pm 0.07$	$0.31 \pm 0.05$	$0.33 \pm 0.07$	$0.33 \pm 0.08$	$0.35 \pm 0.07$	ns

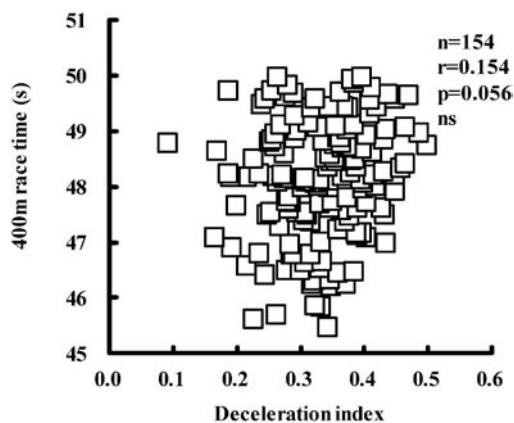
<sup>†</sup>Values show mean  $\pm$  standard deviation.

<sup>\*\*</sup><: Significant difference ( $p < 0.05$ ) among the groups. ns: not significant.

<sup>†††</sup>Deceleration index is the slope of the liner relationship between running speed and the number of segments from the peak running speed to the finish.

**Fig. 5** Relationships between 400-m race time and rate of change in running speed.

(A) 2nd 100 m, (B) 3rd 100 m, (C) 4th 100 m. ns: not significant.

**Fig. 6** Relationships between 400-m race time and the deceleration index.

<sup>†</sup>Deceleration index is the slope of the liner relationship between running speed and the number of segments from the peak running speed to the finish. ns: not significant.

との間に有意な負の相関関係が認められた (それぞれ  $r = -0.317, p < 0.001$ ;  $r = -0.271, p < 0.01$ ).

4th 100 m においては、有意な相関関係は認められなかった ( $r = -0.060, p = 0.461$ )。また、400 m 走タイムと疾走スピード逡減指標との間にも、有意な相関関係は認められなかった ( $r = 0.154, p = 0.056$ )。

ペース配分の指標である区間タイム比を手がかりとしたクラスター分析の結果、クラスターが大きく分かれる点で、対象者は3つのタイプに分類できた (それぞれ Type A, B および C)。各タイプの400 m 走タイムは、それぞれ Type A ( $n = 44$ ) が  $48.03 \pm 1.06$  秒、Type B ( $n = 57$ ) が  $47.68 \pm 1.04$  秒、Type C ( $n = 53$ ) が  $48.70 \pm 0.79$  秒であり、Type C は、他の2タイプと比較して有意に低値を示した。Fig. 7 は、レースの平均疾走スピードを100%として相対化した各タイプの疾走スピードの変化を示したものである。疾走スピードの変化から、Type A は、レース前半の疾走スピードが低く、後半における疾走スピードの低下が小さい「スピード維持型」、Type B は全



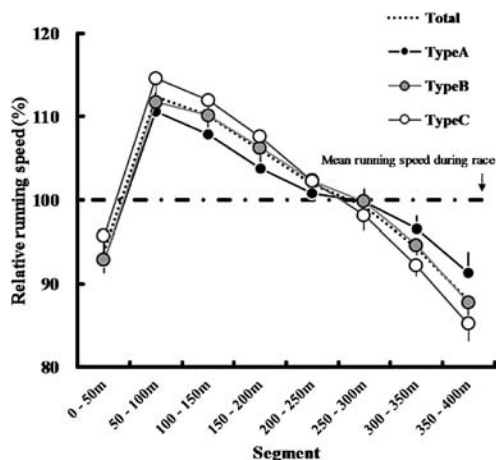


Fig. 7 Changes in relative running speed of each type.

Table 5 Estimate equations for split times during 400-m race of each type

Type	Mark	Estimate equation	R <sup>2</sup>	SEE
Type A	100 m	$Y=0.157x+4.347$	0.362	0.22
	200 m	$Y=0.425x+2.842$	0.735	0.27
	300 m	$Y=0.721x+0.593$	0.917	0.23
Type B	100 m	$Y=0.236x+0.517$	0.777	0.13
	200 m	$Y=0.468x+0.451$	0.894	0.17
	300 m	$Y=0.724x+0.048$	0.960	0.16
Type C	100 m	$Y=0.193x+2.305$	0.557	0.14
	200 m	$Y=0.419x+2.382$	0.748	0.19
	300 m	$Y=0.739x-1.039$	0.874	0.23

\*Y: split time at each mark (s), x: 400-m time (s), R<sup>2</sup>: adjusted coefficient of determination, SEE: standard error of estimate.

\*\*Type A: Speed endurance type, Type B: Mid type, Type C: Speed drop type.

体の平均に近い「中間型」、Type Cはレース前半の疾走スピードが高く、後半における疾走スピードの低下が大きい「スピード低下型」であると判断した。また、Table 5は、400 m 走タイムをもとに100 m 毎の各地点のモデル通過タイムを推定する回帰式、回帰式の決定係数および推定の標準誤差を、タイプ毎に示したものである。回帰式の決定係数は、Type A および Cの100 m 地点を除き（それぞれ、 $R^2=0.362$  ;  $0.557$ ），0.7以上の高い値を示した。また、推定値の標準誤差は、概ね0.1—0.2秒程度であった。

## Ⅳ. 考 察

本研究では、154名の男子400 m 走競技者を対象に、公式競技会においてデータを収集した。400 m 走の公式記録は、全対象者の平均値で  $48.13 \pm 1.06$  秒であり、45.47秒から49.98秒の範囲であった。この記録範囲は、2013年度の日本ランキングでは、日本トップレベルから中学生トップレベルに該当する。データは、個々の対象者の分析対象競技会前1年以内の自己最高記録に対する達成率が99%以上の公式レースのみを分析対象としており、この中には自己最高記録や年度内最高記録が多数含まれていた。これらのことから、本研究では、広範囲なパフォーマンスレベルにある多数の400 m 走競技者の最高またはそれに近いパフォーマンスを測定できたと考えられる。これまでに、このようなデータをもとに、400 m 走のレースパターンについて検討した研究は見当たらない。また、異なるパフォーマンスレベルにある群間の区間タイムの平均値の差は、最も小さい値（1st 100 m のG47とG48の差）でも0.12秒であり、多くの区間・群間において0.2秒以上の差が認められた。したがって、方法で述べた Overlay 方式によるタイム分析において想定される測定誤差の少なくとも2倍から3倍以上の差が、パフォーマンスレベルの異なる群間の区間タイムに生じており、測定誤差によって本研究の結果が覆る蓋然性は低いものと考えられる。

### 1. レースパターンとパフォーマンスとの関係

絶対的な疾走スピードに着目すると、パフォーマンスの高い競技者は、レースの序盤からレース全体にわたって高い疾走スピードを発揮している傾向が認められた（Table 2, Fig. 2, 3）。一方、森丘ほか（2005）は、記録を競う競技において、レースの全ての局面で高い疾走スピードを獲得および維持することが重要であることは当然であるものの、同時に疾走スピードの維持が求められる競技種目においては、単なる疾走スピードの高低のみならず、相対的なペース配分の指標を手掛か

りに、パフォーマンスの高い競技者のレースパターン傾向を明らかにすることが重要であると述べている。そこで、本研究では、区間タイム比や疾走スピード変化率などを、レースパターンを表す指標とし、パフォーマンスとの関係について検討した。

まず、400 m 走タイムと区間タイムとの相関係数に着目すると、1st 100 m が最も小さく (0.589)、3rd 100 m において、0.887 と極めて高い値を示した (Fig. 3)。このことは、レース全体の中でも、特に 3rd 100 m のタイムとパフォーマンスとの関係が強いことを示している。また、相対的なペース配分の指標となる区間タイム比や疾走スピード変化率に着目すると、3rd 100 m および 4th 100 m において、区間タイム比と 400 m 走タイムとの間に正の相関関係が認められた (Fig. 4)。400 m 走タイムと区間タイム比との正の相関関係は、パフォーマンスの高い者ほどその区間に要する時間がレース全体の中で相対的に短いこと、すなわち、400 m 走を同タイムで走った場合、その区間をより高いスピードで疾走していることを示すものである。さらに、2nd 100 m および 3rd 100 m において、400 m 走タイムと疾走スピード変化率との間に負の相関関係が認められた (Fig. 5)。ここで、 $\Delta S_{2nd\ 100\ m}$  は、前の区間からのスピードの増加を表す正の値を示しているが、これは、前の区間にあたる 1st 100 m が、静止した状態からのスタートおよび加速を含み、2nd 100 m と比較して区間タイムが相対的に長くなるためであると考えられる。先述したように、疾走スピードは、50—100 m 区間において最高値に達し、以降ゴールまで漸減するため (Fig. 2)、実際には 2nd 100 m において加速が生じているわけではない。したがって、 $\Delta S_{2nd\ 100\ m}$  の値は、2nd 100 m における疾走スピードの低下に受ける影響が大きいためと考えられ、他の区間と同様に、値が大きいほど疾走スピードが維持できるとみなすことができると考えられる (森丘ほか, 2005)。これらのことを踏まえ考察すると、400 m 走タイムと疾走スピード変化率との間に見られた関係は、パフォーマンスの高い者ほど、

2nd 100 m および 3rd 100 m において、疾走スピードをより維持していることを示すものであると考えられる。一方で、 $\Delta S_{4th\ 100\ m}$  や、レース全体の疾走スピードの低下を評価した疾走スピード逓減指標と 400 m 走タイムとの間には、有意な相関関係は認められなかった (Fig. 5, 6)。これらのことをまとめると、パフォーマンスの高い競技者は、100 m から 300 m 付近において、高い疾走スピードを維持しており、特に 3rd 100 m のタイムと 400 m 走タイムとの関係が強いこと、すなわち、レースの中盤にあたる区間の疾走が重要であることが示唆されたといえる。緒言でも述べたように、400 m 走のレースパターンに関する先行研究は、データ収集の問題から、レースパターンとパフォーマンスとの関係について適切に検討が行えているとは言い難い。本研究では、先述したような多数の競技者の十分に実力を発揮できたと考えられるレースを対象に、レースパターンを評価するための様々な指標から、レースパターンとパフォーマンスとの関係について検討した。その結果、従来指摘されてきたようなレース全体や終盤での疾走スピードの低下とパフォーマンスとの関係は必ずしも強くないこと、一方で、レースの中盤区間にあたる 3rd 100 m のタイムやスピードの維持がパフォーマンスと関係していることが明らかとなったことは意義深い。

これらの結果について、森丘ほか (2005) は、国内外の一流 400 m ハードル走競技者を対象に、パフォーマンスとレースパターンとの関係について検討し、レース序盤に獲得した疾走スピードを中盤 (本研究での 2nd 100 m および 3rd 100 m 付近) において出来るだけ低下させないペース配分が、高いパフォーマンスを達成するために有効であることを示唆している。また、400 m 走と同等の 48—50 秒程度の自転車ペダリング運動において、運動開始時から最高回転数を出力するよりも、試技の中盤区間において回転数や努力感を維持することによって高いパフォーマンスが達成できることが報告されている (金原ほか, 1971; 山本ほか, 2009)。さらに、指導書においても、2013 年現在の男子 400 m 走世界記録保持者であ

る Michael Johnson 選手（米国）のコーチである Hart（1981）は、200 m 地点以降にスピードを上げる意識を持つことや、200 m から300 m へ移行する走りを習得することが、400 m 走において高いパフォーマンスを達成する上で重要であると指摘している。これらはいずれも、レースの中盤区間において疾走スピードを維持し、高い疾走スピードを獲得することの重要性を示唆するものであり、本研究の結果を支持するものである。

なお、400 m 走タイムと $\%_{1st\ 100\ m}$ との間に、有意な負の相関関係が認められたことは（Fig. 4）、パフォーマンスの高い競技者ほど、1st 100 m が相対的に「遅い」ことを示すものであり、400 m ハードル走においても、同様の傾向が報告されている（森丘ほか、2005）。しかしながら、レースの中盤から後半にかけて、疾走スピードが維持できており、レース全体に占める100 m 以降の区間の割合（ $\%_{2nd\ 100\ m}$ 、 $\%_{3rd\ 100\ m}$  および $\%_{4th\ 100\ m}$ ）が小さくなると、 $\%_{1st\ 100\ m}$  は計算上大きくなり、1st 100 m を相対的に「遅く」疾走していると評価されてしまう。したがって、パフォーマンスの高い競技者は、 $\Delta S_{2nd\ 100\ m}$  および $\Delta S_{3rd\ 100\ m}$  が小さく（Fig. 5）、 $\%_{3rd\ 100\ m}$  および $\%_{4th\ 100\ m}$  が小さいこと（Fig. 4）、さらに、レース序盤から絶対的な疾走スピードが高いことを考慮すると（Table 2, Fig. 2, 3）、実際に競技者が、スタート後の100 m を相対的（主観的）に「遅く」疾走しているかは、本研究のデータからは明らかにできない。そのため、この点については、競技者の主観的な努力度に関する調査や、レース中の疾走スピードを、各競技者の最大疾走能力と対比させて検討するなど、さらなる検討が必要である。また、1st 100 m にあたるスタートから最高疾走スピードに至るまでの加速局面は、レース全体のペース配分にも大きく影響する局面であると考えられ、指導を行う上でも重要なポイントになる（Hart, 1981；苅部, 2009；土江, 2011）。一方で、スプリント走の加速局面における疾走スピードの変化は、他の局面と比較して急激なものであり（Debaere et al., 2013；内藤ほか, 2013）、400 m 走においても同様の傾向がみられる（Hanon et al.,

2010；尾懸ほか, 1998）。本研究では、データ収集の手法上、通過タイムから得られる50 m 毎の疾走スピードしか評価できず、400 m 走の加速局面の疾走動態について、詳細な検討を行うことは困難である。したがって今後は、加速局面のより詳細なデータ収集を行い、パフォーマンスの高い競技者がどのようにスピードを増加させているのかを検討することが必要である。

## 2. レースパターンの類型化とコーチングへの示唆

ここまでは、パフォーマンスの高い競技者のレースパターンの特徴について考察を行ってきた。その結果、ペース配分の指標である区間タイム比や疾走スピード変化率、疾走スピード通減指標と400 m 走タイムとの相関係数に着目すると、いずれも相関係数は比較的低い値を示し、散布図を見ても、特にレース終盤（4th 100 m）においては、ばらつきが大きかった（Fig. 4, 5, 6）。また、群間の有意差も、パフォーマンスレベルが大きく異なる群間に認められたのみであった（Table 3, 4）。先述したように、パフォーマンスの高い競技者は、レースの中盤区間において高い疾走スピードを獲得および維持するレースパターンを示す傾向にあった。一方で、このようなペース配分に関する指標の結果は、レースパターンとパフォーマンスとの関係が、必ずしも強くないこと、換言すれば、いずれのパフォーマンスレベルにおいても、多様なレースパターンを示す競技者が存在することを示すものであると考えられる。尾懸ほか（2000）は、日本一流競技者を対象とした研究において、400 m 走競技者には、絶対的なスピードに優れる者や、スピードの持続能力に優れる者など、多様なタイプが存在し、それに伴ってレースパターンも極めて多様であることを指摘しており、指導現場においてもこのような競技者のタイプを考慮することの重要性が指摘されている（Hart, 1981；苅部, 2009；Schiffer, 2008）。そして近年、スポーツパフォーマンスにおいて、競技者のタイプ（個性）に着目することの重要性が指摘され（阿江, 1999；Debaere et

al., 2013 ; 内藤ほか, 2013 ; Salo et al., 2011), レースパターンに関しても, 定性的・定量的なタイプ分け(類型化)が試みられている(門野ほか, 2008 ; 門野, 2011 ; 森丘ほか, 2007). これらのことを鑑みると, 従来からもその重要性が指摘されつつも, 定量的な検討が十分に行われてこなかった400 m 走のレースパターンのタイプについても類型化を試み, パフォーマンスとの関係についての検討や, 具体的なペース配分の指標の提案を行うことによって, 合理的なコーチング実践に資する示唆を得ることができると考えられる.

そこで, 陸上競技の100 m 走や, 競泳の100 m 自由形のレース分析データを用いて, 競技者の定量的なタイプ分けを行った先行研究を参考に(松田ほか, 2010 ; 内藤ほか, 2013), レースパターンの類型化を試みた. 区間タイム比を手がかりとしたクラスター分析の結果, 対象者を「スピード維持型」, 「中間型」, 「スピード低下型」の3つのタイプに分類することができた(Fig. 7). 先行研究や指導書においては, レースパターンを, 疾走スピードの低下に着目し, 低下の大きい「スピード型」や「前半型」, 低下の小さい「持久型」や「後半型」, そしてその中間的な特徴を示す「イーヴン型」や「中間型」に分類しているものが多い(荻部, 2009 ; 尾懸ほか, 2000 ; Schiffer, 2008). 本研究における各タイプの疾走スピードの変化からみた特徴は, これら先行研究や指導書の指摘と一致しており, 実践現場の認識に即したレースパターンのタイプを, 多くの競技者の公式競技会におけるデータをもとにして, 定量的な手法によって示すことができたと考えられる.

レースパターンのタイプと400 m 走パフォーマンスとの関係について見ると, 「スピード低下型」である Type C は, 他のタイプと比較して400 m 走タイムが有意に低かった. このことは, より高いパフォーマンスを達成するためには, 「スピード維持型」あるいは「中間型」のレースパターンが有効である可能性を示唆するものである. しかしながら, いずれのタイプにも, 本研究の中で最もパフォーマンスの高いG45—46の競技者, あ

るいは最もパフォーマンスの劣るG49の競技者が含まれており, 先述したように, いずれのパフォーマンスレベルにあっても, 様々なレースパターンを示す競技者が存在するものと考えられる.

さらに, 本研究では, コーチング実践において利用可能な客観的な指標を得るために, タイプ別のモデル的なペース配分の作成を試みた. ハードル走種目において, 目標記録を達成するためのモデルタッチダウンタイムの作成を行った先行研究を参考に(川上ほか, 2004 ; 宮下, 1993), 400 m 走タイムをもとに, 100 m 毎の各地点のモデル通過タイムを推定する式を作成した. 推定式のあてはまりの高さを示す決定係数は, 概ね高い値を示しており( $R^2=0.7$ 以上), これらの推定式を用いることで, 各地点の通過タイムを高い精度で推定することが可能であると考えられる. なお, 100 m 地点の通過タイムについては, 推定の標準誤差がやや大きい傾向が見られるため(推定値に対して1—2%程度), 実践においては, 誤差の程度を考慮した上で推定式を利用する必要がある.

推定式の活用例として, 2013年現在の世界記録(43.18秒)のデータをもとに, 実際の通過タイムと本研究の推定式を用いたモデル通過タイムとを比較してみる. 世界記録樹立時の通過タイムは, 100 m 毎にそれぞれ11.10秒, 21.22秒, 31.66秒であったと報告されている(Ferro et al., 2001). 一方, 本研究の推定式を用いると, 43.18秒のモデル通過タイムは, Type A のパターンでは, それぞれ11.13秒, 21.19秒, 31.73秒であり, 同様に Type B では10.71秒, 20.66秒, 31.31秒, Type C では10.64秒, 20.47秒, 30.87秒となる. これらのことから, 実際の世界記録は, いずれの地点も, 本研究で作成した Type A のモデル通過タイムの0.1秒以内の範囲で通過していることがわかる. コーチング実践においては, このように実際の競技者のレースやトレーニングにおける各地点の通過タイムを計測し, 推定式によって算出される各タイプのモデル通過タイムと比較することで, 個々の競技者の特徴や課題を評価することが可能になると考えられる. さらに, 目標とする記録を達成するためのモデル通過

タイムを求めることで、トレーニングを行う上での客観的な指標としても利用可能であろう。これらのことは、400 m 走の合理的なコーチングを行う上で有益なものとなると考えられる。さらに今後は、これらレースパターンのタイプと、体力および技術的な特性からみた競技者のタイプとの関係について検討し（Hart, 1981；尾縣ほか, 2000）、競技者の特性に応じたより効果的なレースパターンの選択方法の提案を行うことで（Abbiss and Laursen, 2008）、競技者の個性を活かした効果的な400 m 走のコーチングに資するより実践的な知見の提供が可能になると考えられる。

また、本研究では、国内の比較的幅広いパフォーマンスレベルにある競技者を対象に検討を行ったが、今後は、世界一流競技者やパフォーマンスの劣る競技者といった他のパフォーマンスレベルについても検討を行うことで、より幅広い競技者に適応可能な一般的な知見を得ることが課題である。さらに、レースパターンに影響を及ぼす体力的（Hanon et al., 2010; Hirvonen et al., 1992）および技術的要因（Hanon and Gajer, 2009; Nummela et al., 1992; Sprague and Mann, 1983）との関係についても検討することで、効果的なレースパターンを達成するための知見を提供することができると考えられる。本研究の結果は、そのための基礎的かつ有益な手掛かりとなるであろう。

## V. 要 約

本研究の目的は、異なるパフォーマンスレベルにある多数の400 m 走競技者の公式競技会におけるレースパターンを分析することで、陸上競技男子400 m 走におけるレースパターンとパフォーマンスとの関係を明らかにし、400 m 走の合理的なコーチングに資する基礎的知見を得ることであった。そのために、公式競技会においてレースを撮影した400 m 走競技者154名（45—46秒台：26名、47秒台：35名、48秒台：58名、49秒台：35名）を対象にレースパターンを分析し、パフォーマンスとの関係について検討を試みた。

主な結果は、以下のとおりである。

- 1) パフォーマンスの高い競技者は、スタートからレース全体にわたって疾走スピードが高い傾向にあり、全ての区間タイムと400 m 走タイムとの間に、有意な正の相関関係が認められた。
- 2) 400 m 走タイムと区間タイム比との間に、1st 100 m において負の、3rd 100 m および4th 100 m において正の有意な相関関係が、それぞれ認められた。
- 3) 400 m 走タイムと疾走スピード変化率との間に、2nd 100 m および3rd 100 m において有意な負の相関関係が認められた。
- 4) 400 m 走タイムと区間タイム比および疾走スピード変化率との相関係数は比較的小さく、400 m 走タイムと疾走スピード逡減指標との間には、有意な相関関係は認められなかった。
- 5) クラスタ分析の結果、レースパターンは、「スピード維持型」、「中間型」、「スピード低下型」の3つのタイプに分類された。
- 6) タイプ毎に、400 m 走タイムから各地点の通過タイムを推定する式を算出し、目標記録を達成するためのモデル的な通過タイムを提示することができた。

これらのことから、陸上競技男子400 m 走において、従来指摘されてきたようなレース全体や終盤での疾走スピードの低下とパフォーマンスとの関係は必ずしも強くないこと、一方で、パフォーマンスの高い競技者は、スタート後100 m から300 m 付近における疾走スピードの低下が少なく、レースの中盤区間において高い疾走スピードを発揮していることが示唆された。同時に、パフォーマンスとペース配分に関する指標との関係は、比較的弱いものであり、いずれのパフォーマンスレベルにあっても、様々なレースパターンを示す競技者が存在するため、上述のようなパフォーマンスの高い競技者のレースパターンの特徴を踏まえた上で、競技者個人ごとの特性と課題を適切に評価し、コーチングを行う必要があると考えられる。

## 謝辞

データ収集に際し、公益社団法人日本学生陸上競技連合ならびに関東学生陸上競技連盟に多大なご高配を賜った。また、本誌審査員各位から数々の貴重なご教示を賜った。ここに記し謹んで深謝申し上げます。

## 文 献

- Abbiss, C.R. and Laursen, P.B. (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med.*, 38(3): 239-252.
- 阿江通良・鈴木美佐緒・宮西智久・岡田英孝・平野敬靖 (1994) 世界一流スプリンターの100 m レースパターン分析—男子を中心に—。世界一流競技者の技術。第3回世界陸上選手権大会バイオメカニクス班報告書。日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス班編。ベースボールマガジン社：東京，pp. 14-28.
- 阿江通良 (1999) バイオメカニクスデータを現場にどう活かすか。トレーニング科学, 10(3): 139-144.
- Brüggeman, G.P. and Glad, B. (1990) Time analysis of the sprint events. In: International Athletic Foundation and International Amateur Athletic Federation. (Eds.) Scientific Research Project at the Games of the XXXIV the Olympiad-Seoul 1988 Final Report. International Athletic Foundation: Monaco, pp. 11-89.
- Debaere, S., Jonkers, I., and Delecluse, C. (2013) The contribution of step characteristics to sprint running performance in high-level male and female athletes. *J. Strength Cond. Res.*, 27(1): 116-124.
- Ferro, A., Rivera, A., Pagola, I., Ferreruella, M., Martin, A., and Rocandio, V. (2001) Biomechanical analysis of the 7th World Championships in Athletics Seville 1999. *New Studies in Athletics*, 16(1): 25-60.
- Gajer, B., Thepaut-Mathieu, C., and Lehenaff, D. (1999) Evolution of stride and amplitude during course of the 100 m event in athletics. *New Studies in Athletics*, 14(1): 43-50.
- Hanon, C. and Gajer, B. (2009) Velocity and stride parameters of world-class 400-meter athletes compared with less experienced runners. *J. Strength Cond. Res.*, 23(2): 524-531.
- Hanon, C., Lepretre, P.M., Bishop, D., and Thomas, C. (2010) Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 109: 233-240.
- Hart, C. (1981) 400 meters training. *Track & Field Quarterly Review*, 93: 23-28.
- Hirvonen, J., Nummela, A., Rusko, H., Rehunen, S., and Harkonen, M. (1992) Fatigue and changes of ATP, creatine phosphate, and lactate during the 400-m sprint. *Can. J. Sport Sci.*, 17(2): 141-144.
- 伊藤 章・市川博啓・斉藤昌久・伊藤道郎・佐川和則・加藤謙一 (1997) アジア大会男子400 m の動作分析。日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班編，アジア一流競技者の技術—第12回広島アジア大会陸上競技バイオメカニクス研究班報告—。創文企画：東京，pp. 65-80.
- 門野洋介・阿江通良・榎本靖士・杉田正明・森丘保典 (2008) 記録水準の異なる800 m 走者のレースパターン。体育学研究, 53: 247-263.
- 門野洋介 (2011) 中距離走のレースパターンにみられる共通性と個性。バイオメカニクス研究, 15(3): 96-100.
- 苅部俊二 (2009) ペース配分で記録は大幅にアップする。陸上競技クリニック, 1: 32-34.
- 川上小百合・宮下 憲・志賀 充・谷川 聡 (2004) 女子100 m ハードル走のモデルタッチダウンタイムに関する研究。陸上競技紀要, 17: 3-11.
- 金原 勇・高松 薫・辺土名博司・阿江通良 (1971) ハイスピードの持続能力が高まるペースとフォームに関する実験的研究。昭和46年度日本体育協会スポーツ科学研究報告 No. II, ハイスピードの持続能力の研究 —第一年研究—: 30-46.
- 松田有司・山田陽介・赤井聡文・生田泰志・野村照夫・小田伸午 (2010) 100 m 自由形におけるストローク頻度とストローク長からみた泳タイプ分類。体力科学, 59: 465-474.
- 松尾彰文・広川龍太郎・杉田正明・柳谷登志雄 (2009) レーザー方式による100 m レースのスピード評価の試み。日本トレーニング科学会編，スプリント・トレーニング —速く走る・泳ぐ・滑るを科学する—。朝倉書店：東京，pp. 83-95.
- 宮下 憲 (1993) 110 m 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.
- 持田 尚・松尾彰文・柳谷登志雄・矢野隆照・杉田正明・阿江通良 (2007) Overlay 表示技術を用いた陸上競技400 m 走レースの時間分析。陸上競技研究紀要, 3: 9-15.
- 持田 尚・杉田正明 (2010) 2007世界陸上競技選手権大阪大会における決勝400 m 走レースのバイオメカニクス分析。日本陸上競技連盟バイオメカニクス研

- 究班編, 第11回世界陸上競技選手権大会 日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班報告書 世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術. 財団法人日本陸上競技連盟: 東京, pp. 51-75.
- 森丘保典・榎本靖士・杉田正明・松尾彰文・阿江通良・小林寛道 (2005) 陸上競技400 m ハードル走における一流男子選手のレースパターン分析. *バイオメカニクス研究*, 9(4): 196-204.
- 森丘保典 (2006) 男子400 m ハードルにおけるタイプ別モデルタッチダウンタイムについて. *月刊陸上競技*, 40(12): 176-178.
- 森丘保典・榎本靖士・山崎一彦・杉田正明・阿江通良 (2007) 一流男子400 m ハードル選手のレースパターンの類型化について—世界陸上大阪大会の決勝レース展望—. *陸上競技学会誌*, 6: 55-59.
- 森丘保典・山崎一彦 (2008) 陸上競技男子400 m ハードル走における最適レースパターンの創発: 一流ハードラーの実践知に関する量的および質的アプローチ. *トレーニング科学*, 20(3): 175-181.
- 内藤 景・苅山 靖・宮代賢治・山元康平・尾縣貢・谷川 聡 (2013) 短距離走競技者のステップタイプに応じた100 m レース中の加速局面の疾走動態. *体育学研究*, 58: 523-538.
- Nummela, A., Vuorimaa, T., and Rusko, H. (1992) Changes in force production, blood lactate and EMG activity in the 400-m sprint. *J. Sports Sci.*, 10(3): 217-228.
- 尾縣 貢・福島洋樹・大山圭悟・安井年文・鍋倉賢治・宮下 憲・関岡康雄・永井 純 (1998) 下肢の筋持久性と400 m 走中の疾走速度逡減との関係. *体育学研究*, 42: 370-379.
- 尾縣 貢・安井年文・大山圭悟・山崎一彦・苅部俊二・高本恵美・伊藤 稷・森田正利・関岡康雄 (2000) 一流400 m ランナーにおける体力特性とレースパターンとの関係. *体育学研究*, 45: 422-432.
- Ogata, M., Manabe, Y., and Takamoto, M. (2005) Relationship between physical fitness factors and the ability to maintain joint lower limb torques during the latter half of a 400 meter running event. *Journal of Human Movement Studies*, 48: 379-391.
- Quinn, M.D. (2009) The effect of track geometry on 200- and 400-m sprint running performance. *J. Sports Sci.*, 27: 19-25.
- Salo, A.I.T., Bezodis, I.N., Batterham, A.M., and Kerwin, D.G. (2011) Elite sprinting: are athletes individually step frequency or step length reliant? *Med. Sci. Sports Exerc.*, 43(6): 1055-1062.
- Schiffer, J. (2008) The 400 metres. *New Studies in Athletics*, 23(2): 7-13.
- Sprague, P. and Mann, R.V. (1983) The effect of muscular fatigue on the kinetics of sprint running. *Res. Q. Exerc. Sport*, 54: 60-66.
- 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 (2011) 400 m のレースパターン. *陸上競技入門ブック 短距離・リレー*. ベースボール・マガジン社: 東京, pp. 52-53.
- van Coppenolle, H. (1980) Analysis of 200-meters intermediate times for 400-metres world-class runners. *Track & Field Quarterly Review*, 80(2): 37-39.
- 山本昌三・金高宏文・松村 勲・井上修平・桃原 亮 (2009) 400 m 走を模した50秒間のペダリング運動における効果的なペース配分. *陸上競技研究*, 76: 20-24.

(平成25年9月2日受付)  
(平成26年2月5日受理)

Advance Publication by J-STAGE  
Published online 2014/4/7