陸上競技男子400 m ハードル走における 速度変化特性と記録との関係 : 内外一流選手のレースパターンの分析から

森丘 保典¹⁾ 杉田 正明²⁾ 松尾 彰文³⁾
岡田 英孝⁴⁾ 阿江 通良⁵⁾ 小林 寛道⁶⁾

Relationship between the features of velocity change in the men's 400-m hurdle race and performance: analysis of the race pattern for world class athletes

Yasunori Morioka¹, Masaaki Sugita², Akihumi Matsuo³,
Hidetaka Okada⁴, Michiyoshi Ae⁵ and Kando Kobayashi⁶

Abstract

This study was conducted to clarify the relationship between features of change in velocity and performance of world class athletes in the men's 400-m hurdle race (400 mH). Nine final races of 400 mH were videotaped with several video cameras panning from the start to the finish at 60 fields/s. After the time indication had been superimposed on each field of the VTR images, the time at touchdown immediately after hurdling was obtained. Using the flash of the starter's gun recorded on the VTR image, each hurdle touchdown time from the start, and each section time (from each hurdle to the next) was obtained. The results of regression analysis showed a significantly high correlation ($r=0.90$, $p<0.001$) between 400mH performance and mean section velocity from the 5th to the 8th hurdle (H5-8), and a significant correlation ($r=-0.61$, $p<0.05$) between 400 mH performance and the rate of deceleration in H5-8. These results indicate that in 400 mH it is important to avoid decreasing velocity and to maintain a high velocity in H5-8 of the race in order to attain a high performance.

Key words: Men's 400 m hurdles, velocity change, race-pattern, world class athletes

(Japan J. Phys. Educ. 45: 414-421, May, 2000)

- 1) 財団法人日本体育協会スポーツ科学研究所
〒150-8050 東京都渋谷区神南 1-1-1
岸記念体育会館内
- 2) 三重大学
〒514-8507 三重県津市上浜町1515
- 3) 鹿屋体育大学
〒891-2311 鹿児島県鹿屋市白水町 1
- 4) 電気通信大学
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
- 5) 筑波大学体育科学系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
- 6) 東京大学生命環境科学系
〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

1. Sports Science Lab., Japan Amateur Sports Association, Jinnan, Shibuya-ku, Tokyo 150-8050
2. Department of Health and Physical Education, Faculty of Education, Mie University, Kamihama cho, Tsu-city, Mie 514-8507
3. National Institute of Fitness and Sports in Kanoya, Shiramizu, Kanoya-city, Kagoshima 891-2311
4. Department of Health and Sports Sciences, University of electro-Communications, Chofugaoka, Chofu-city, Tokyo 182-8585
5. Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, Tennodai, Tsukuba-city, Ibaraki 305-8574
6. Department of Life Science, University of Tokyo, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902

キーワード：男子400 m ハードル，速度変化，レースパターン，一流選手

1. 緒 言

400 m ハードル走は，35 m 間隔で並べられた10台のハードル（高さ91.4 cm）をクリアしながら，400 m の距離をいかに速く走るかを競う競技である．この種目では，400 m の走力，ハードリング技術に加えて，他のハードル種目では必要としない逆足踏切やコーナーでのハードリング，レース中の疲労状態を考慮しながらハードルにうまく踏切をあわせるためのインターバルランニングの技術（ハードル間の歩数配分）なども要求され，400 m のフラットレースや他のハードル種目に比べて戦略性が高いといえる．

生理学的には，50秒前後の最大運動ととらえることができ，主に非乳酸性および乳酸性の無気的過程によるエネルギー生成が要求される．金原ら（1971）は，ハイスピードの持続能力が高まるようなペース，すなわち合理的なレースパターンとは，出し得たエネルギーを効果的に使い，また，使い得るエネルギーを効果的に出すという両者のバランスによって決定されると述べている．このように戦略性が高く，50秒近くもハイスピードを持続しなければならない400 m ハードル走において，どのようなペース配分で走るかは，パフォーマンスに影響する重要な要因であると考えられる．したがって，実際のレースを詳細に分析し，疾走速度，インターバル歩数などの変化をとらえ，競技成績や個々の選手の特性と関連づけて検討することは，合理的なレースパターンおよびその達成のためのトレーニングの方向性を示す上で有用であると考えられる．

これまでに，陸上競技トラック種目のレースパターンに関する研究は数多く行われてきており（阿江・鈴木，1991；IAAF，1990；Levchenko，1989；松尾ほか，1994；沼澤・杉浦，1994），400 m ハードル走に関しても，実際の試合のレース分析（森丘・阿江，1993；森丘ほか，1996；Morioka et al.，1997；森田ほか，1994；Susanka et al.，1987）や，回帰分析を用いてモデルレース

パターンを推定したもの（Yasui et al.，1996；安井ほか，1996）などがあるが，一流選手のベストパフォーマンス，あるいは限りなくベストに近いパフォーマンスのみを対象として，レースパターンと記録との関係について詳細に検討したものは見当たらない．

そこで本研究では，世界選手権やオリンピックを含む内外の大会における男子400 m ハードルレースを分析し，一流選手におけるレース中の疾走速度変化特性と記録との関係について明らかにすることを目的とした．

2. 研 究 方 法

2.1 分析対象

1993年8月-1997年10月の間に行われた9つの競技会の決勝計9レースにおいて，50秒以内の記録を達成した選手23名を分析対象とした（表1）．対象レースは，選手がレースを流して走ることによるレースパターンへの影響を除くため，決勝レースに限定した．また，同一選手による偏りを防ぐために，1人の選手が複数のレースに参加している場合，分析データ中の最高記録以外は分析対象から除外した．

2.2 撮影方法

撮影は，複数台のVTRカメラを設置し，スタートピストルの閃光を写した後，疾走する選手を追従しながら，10台のハードルクリアランス直後の着地を写し込むように行った．なお，撮影スピードは60 field/sec，露出時間はスタートの閃光撮影時が1/60秒，それ以降は1/500-1/1000秒であった．

2.3 区間定義

図1は，疾走速度等を算出するための測定区間定義を示したものである．区間定義はスタートから第1ハードルまでの区間をS-H1区間とし，以下ハードル間をH1-2，H2-3…，H9-10，最終ハードル（10台目）からゴールまでをH10-Gとした．また，トレーニングや試合の際にチェックポイントとして頻繁に用いられ，ペース配分の評

表1 分析対象レース及び対象選手記録

年	大会名	対象者数	対象者順位および記録							
			1位	2位	3位	4位	5位	6位	7位	8位
1993	日本選手権	2	48.68	—	49.21	—	—	—	—	—
1995	世界選手権	1	—	—	48.14	—	—	—	—	—
	福岡ユニバーシアード	5	—	48.98	—	49.29	49.35	49.39	49.54	—
1996	大阪グランプリ	2	—	—	48.56	—	49.42	—	—	—
	日本選手権	1	—	—	49.03	—	—	—	—	—
	アトランタ・オリンピック	8	47.54	47.79	47.96	47.98	48.29	48.41	48.57	48.78
1997	グランプリ・ファイナル	2	—	—	—	—	48.66	48.98	—	—
	TOTO スーパー陸上	1	47.86	—	—	—	—	—	—	—
	日本選手権	1	48.34	—	—	—	—	—	—	—

図1 400 m ハードル区間定義および区間距離

価に役立てることができる（宮下，1991）とされている5台目（185 m 地点），8台目（290 m 地点）を基準として，スタートから5台目までの185 m 区間をレース前半区間（以後前半），5台目から8台目までの105 m 区間をレース中盤区間（以後中盤），8台目からゴールまでの110 m 区間をレース後半区間（以後後半）と定義した。

2.4 分析方法

撮影後，ビデオタイマーを用いて1/100 sec ごとの時刻を写し込んだ VTR テープをコマ送りし，ピストルの閃光を基準に各ハードルクリアランス直後の着地時刻を読みとった。これらの通過

時刻の差から，各測定区間を疾走するために要した時間（区間時間）を求めた。

ハードル区間歩数は，ハードルクリアランス直後のリード脚の着地から逆脚の接地までを1歩目とし，次のハードルクリアランス直前の接地までの歩数とした。

各測定区間の平均疾走速度は，図1に示したハードル区間距離を，区間時間で除することにより求めた。

前半から中盤および中盤から後半にかけての各疾走速度低下率（以下それぞれ前-中低下率，中-後低下率）は，それぞれの区間平均速度を求め，次式にて算出した。

疾走速度低下率(%)

$$=[1-(\text{中盤(後半)速度(m/s)}/\text{前半(中盤)速度(m/s)})]\times 100$$

また、前半、中盤、後半それぞれの区間タイムが、400 m ハードル記録（以下記録）に占める割合（以下それぞれ%前半、%中盤、%後半）を求めた。この指標は、必ずしも主観的な努力度と一致するものではないが、パフォーマンスレベルによる影響を除いた相対的なペース配分の指標と考えることができる。

2.5 統計処理

相関分析には、ピアソンの積率相関分析を用いた。また、有意差検定には、一元配置分散分析(ANOVA)とScheffe's post hoc testを用いた。それぞれの有意性の判定には、危険率5%を採用した。

3. 結果および考察

3.1 ハードル区間の歩数について

全ハードル区間歩数（スタートから1台目と10台目からゴールまでのハードル区間歩数は除く歩数のトータル：以下、歩数とする）をみると、最も歩数の少なかったのは48秒台であり、以下47秒台、49秒台の順に歩数が増えていたが、

3群間に有意な差は認められなかった（表2）。

また歩数と記録との間にも有意な相関関係は認められなかった（ $r=0.07$, n.s.）。

一般的に、400 m ハードルで好成績をあげるためには、できるだけ少ない歩数で走ることが目標とされており（宮下，1991），実際に歩数が少ない方が記録が良いという報告（宮下，1991；森田ほか，1994）もあるが、これらは対象とする選手の記録の範囲が47秒から52-55秒までと大きい。本研究では、50秒以内で走る一流競技者を対象とし、記録の接近した選手間の比較であったために記録との相関や有意差が認められなかったものと思われる。しかし、各群の歩数をみると、その上限はおおよそ130歩前後になることから、50秒を切るためには、歩数が130歩を超えない程度に抑える必要があるといえるかもしれない。いずれにしても、一流競技者の場合、単に歩数を少なくすることよりも、選手個々の望ましい疾走フォームをできるだけ崩さずに、効率よく走れる歩数の選択を優先することが重要であると考えられる。

3.2 疾走速度の変化パターン

図2は、記録別の区間平均疾走速度（以下、区間速度）の変化パターンを示したものであるが、3群ともH1-2区間で最高疾走速度に達し、

表2 各パラメータの記録別比較

		47秒台 (n=5)	48秒台 (n=11)	49秒台 (n=7)	ANOVA
400 m ハードル記録	(sec)	47.83±0.18	48.56±0.28	49.32±0.16	p<.0001 ^a
全ハードル間歩数	(歩)	125.0±6.5	123.9±3.8	126.2±5.0	p=.6339
前半 (S-H5) 速度	(m/s)	8.6±0.1	8.6±0.1	8.5±0.1	p=.0722
中盤 (H5-8) 速度	(m/s)	8.5±0.1	8.2±0.1	8.1±0.1	p=.0001 ^b
後半 (H8-G) 速度	(m/s)	7.9±0.1	7.7±0.1	7.6±0.2	p=.0201 ^c
前～中低下率	(%)	2.1±1.6	4.0±1.6	4.9±2.0	p=.0326 ^d
中～後低下率	(%)	7.0±1.7	6.4±2.6	5.9±2.4	p=.7546
%前半	(%)	44.8±0.5	44.4±0.5	44.2±0.7	p=.1966
%中盤	(%)	26.0±0.2	26.2±0.3	26.4±0.3	p=.0517
%後半	(%)	29.2±0.4	29.4±0.6	29.4±0.7	p=.8838

a: 49>48>47 (p<0.01); b: 47>48, 48>49 (p<0.05), 47>49 (p<.0001); c: 47>49 (p<0.05);

d: 47>49 (p<0.05)

図2 記録別レースパターン

以後ゴールに至るまで減速するという先行研究（森丘・阿江, 1993；森丘ほか, 1996；Morioka et al., 1997；森田ほか, 1994；Susanka et al., 1987；Yasui et al., 1996；安井ほか, 1996）の結果と同様の傾向を示した。しかし、47秒台だけは、H10-G区間で加速していた。H10-G区間の疾走速度に関して宮下（1991）は、最終ハードルを越えた後、蓄積された疲労によってスピードを上昇させることができないとしている。しかしながら、この区間はハードルに足をあわせる（歩数をコントロールする）という制限が無く、いわば自由に走れる唯一の区間でもあり、近年の国際大会の決勝レースにおいては、この区間での疾走速度の増加がみられることもある。ここでの速度増加の有無は、記録の良し悪しに大きく影響するものではないが、この区間で順位が大きく入れ替わるシーンはよく見られる。したがって、国際大会において上位入賞するためには、最終ハードルを越えてから速度を増加できる（動きを変えられる）くらいの余裕を残しておくことも必要になるかもしれない。

3.3 前半、中盤および後半の区間速度と記録との関係

前半、中盤及び後半の区間速度（以下それぞ

れ、前半速度、中盤速度、後半速度）については、分散分析の結果、中盤速度および後半速度に有意な群間差が認められ（中盤速度： $p<0.001$ ，後半速度： $p<0.05$ ），多重比較の結果、中盤速度において3群間に（47>48, 48>49 ($p<0.05$), 47>49 ($p<0.001$)), 後半速度において47秒台と49秒台との間に（47>49 ($p<0.05$)) それぞれ有意な差がみられた（表2）。また、全ての区間速度と記録との間には有意な相関関係が認められ、特に中盤速度と記録との間に、極めて高い相関関係（ $r=0.90$, $p<0.001$ ）がみられた（図3）。

森田ら（1994）は、400 m ハードルの記録向上のために必要な要因として、第2ハードルまでの疾走速度を高めることをあげている。今回対象とした47秒台の選手は、いずれも23人の前半速度の平均値（8.56 m/s）を上回っており、このことは、前半にある程度の疾走速度を獲得することの必要性を示すものであると考えられる。しかしながら、中盤速度において3群間に有意な差が認められ、記録との間にも他の区間にはみられなかった極めて高い相関関係が認められた。これらのことから、一流選手を対象とした比較においては、レース前半、あるいは後半よりも中盤における疾走速度が、記録の差を生み出す主要因になっていると考えられる。

図3 前半, 中盤, 及び後半の区間速度と記録の関係

3.4 ペース配分が記録に及ぼす影響について

記録を競う競技である以上, どの局面 (区間) においても, 高い疾走速度を獲得する, あるいは維持することが重要であることは言うまでもない. しかしながら, ハイスピードを40~50秒も維持しなければならない種目においては, 大きなスピードを出す能力だけでなく, 使い得るエネルギーを効果的に出したり, 出し得たエネルギーを効果的に使う能力も要求される (金原ほか, 1971). これは身体能力だけでなく, レースにおけるペース配分にも大きく影響を受けるものであり, 効率の良い走りをするためにはペース配分を最適化することが必要である. そこで本研究では, トレーニング現場で頻繁に用いられるチェックポイント (5 台目, 8 台目ハードル) を基準に区間分けをして, 速度低下率や400 m ハードル記録に占める各区間時間の割合などを算出しペース配分と記録との関係について検討した.

速度低下率については, 分散分析の結果, 前-中低下率に有意な群間差が認められ ($p < 0.05$), 多重比較の結果, 47秒台と49秒台との間に有意

差 ($47 > 49$ ($p < 0.05$)) がみられた (表2). また, 前-中低下率と記録との間には有意な相関関係 ($r = 0.61$, $p < 0.01$) が認められた (図4). 先に示した前半速度において3群間に有意な差がみられなかったことを考えあわせると, 上位選手は, 必ずしも前半から高い疾走速度を獲得するような走り方をしているわけではなく, 前半においてある程度高めた疾走速度を中盤でもできるだけ維持する (低下を少なくする) ような走り方をしていることが推測される.

また, %前半, %中盤, %後半については, 3群間に有意差は認められなかった (表2) が, %中盤と記録との間にのみ有意な相関関係 ($r = 0.61$, $p < 0.01$) がみられた (図5). %中盤にのみ記録との相関関係が認められたことは, 上位選手が, 相対的に中盤に要する時間を下位選手よりも短くしている, すなわち中盤で疾走速度をできるだけ維持する (低下を小さくする) ための様々な方策を講じている可能性を示すものであると考えられる. この方策には, 主観的な努力感を高める, ハードリングのロスを少なくする, インターバルの歩数をできるだけ増やさない, あるいは増やしたときのピッチの切り換えをスムーズにするなど, 疾走速度の維持を目指して行われることのすべてが含まれる. 金原ら (1971) は, エルゴ

図4 疾走速度低下率と記録の関係

図5 区間時間の記録に占める割合と記録との関係

メータによる48秒間のペダリング運動を用いたペース実験を行った結果、失敗の可能性が少なく、かつ大きな成功の可能性のあるペースとして、スタート後12秒から36秒までの間の主観的な努力感を落とさないペース配分をすすめている。これは400 m ハードルのレースでいうと、第3ハードル手前から第8ハードルを越えたあたりまでに相当し、本研究における中盤とはほぼ一致する。

緒言でも述べたように、個々の選手の戦略は、いわば選手の数だけあるといっても過言ではない。また、ペースを考える時には、生理的ペース（エネルギーの合理的な配分）と物理的ペース（スピードの合理的な配分）、そして心理的ペース（意識（努力感）の合理的な配分）の3つのとらえ方の関連を考えていく必要があるという指摘（金原ほか, 1971）もあり、本研究のような時間分析のみから選手個々の理想のペース配分を導き出すことは難しい。しかしながら、選手の様々な「意識」や「戦略（戦術）」により生み出されたパフォーマンスを分析することにより得られたこれ

らの結果は、一流選手の中でもより速い選手達が、意識的、無意識的に関わらずそのようなペース配分で走っているという客観的事実であり、一流選手が中盤の走り方を中心的な課題としてレースを組み立てることが重要である可能性を示すものであると考えられる。今後は、さらに例数を増やしながら、個々の選手における記録とペース配分との関係だけでなく、成功レースや失敗レースにおけるペース配分の比較や、バイオメカニク的な分析による動きの変化などを含めた、疾走速度変化に関する様々な要因について詳細に検討していく必要がある。

4. 要 約

本研究の目的は、国内外の大会における男子400 m ハードルレースを分析し、レースパターンと競技成績とを関連づけて検討することにより、パフォーマンスに影響を及ぼす要因について明らかにすることであった。

得られた結果の要約を以下に示す。

1) 全ハードル区間歩数については、3群間に有意差は認められず、記録との間に有意な相関関係もみられなかった。

2) 中盤速度において3群間に（47>48, 48>49 ($p < 0.05$), 47>49 ($p < .0001$)), 後半速度において47秒台と49秒台との間に（47>49 ($p < 0.05$)) それぞれ有意な差が認められた。

3) 前～中低下率において、47秒台と49秒台との間に有意な差（47>49 ($p < 0.05$)) が認められた。また、記録との間には有意な相関関係（ $r = 0.61$, $p < 0.01$ ）が認められた。

4) %前半, %中盤, %後半については, %中盤と記録との間にのみ有意な相関関係（ $r = 0.61$, $p < 0.01$ ）が認められた。

以上のことから、一流選手が400 m ハードルにおいて高いパフォーマンスを達成するためには、レース中盤の疾走速度を高める（維持すること、すなわち前半に獲得した速度の低下をできるだけ抑えることが重要であるという可能性が示唆された。

本研究の一部は、日本陸上競技連盟バイオメカ

ニクス研究班の活動によるものである。

文 献

- 阿江通良・鈴木美佐緒 (1991) 世界一流スプリンターのレースパターン. *Jpn. J. Sports Sci.* 11: 609-614.
- International Amateur Athletic Federation (1990) Time analysis of the sprint events. Scientific reserch project at the game of the XXIVth Olympiad-Seoul, In: Bruggemann, G. P. and Grad, B. (Ed): London, pp. 11-89.
- 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1年研究—: 30-46.
- Levchenko, A. (1989) 100 meters in 9.83: The birth of a record. *Soviet Sports Review* 24: 182-187.
- 松尾彰文・杉田正明・阿江通良・小林寛道・岡田英孝 (1994) 中長距離決勝におけるスピード, ピッチおよびストライドについて. 佐々木秀幸ほか監 世界一流陸上競技者の技術—第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究班報告書—, ベースボールマガジン社: 東京, pp. 92-111.
- 宮下 憲 (1991) 最新陸上競技入門シリーズ4 ハードル, ベースボールマガジン社: 東京.
- 森丘保典・阿江通良 (1993) 日本人初の400 mH 48秒台レースの徹底分析 ～第77回日本選手権における一流男子400 m ハードラーのスピード変化～. 陸上競技マガジン7月号, ベースボールマガジン社: 東京, pp. 215-217.
- 森丘保典・阿江通良・岡田英孝 (1996) 日本一流男子400 m ハードル選手のレースパターンの分析 —'95ユニバーシアード福岡大会に注目して—. 日本体育学会第47回大会号: 357.
- Morioka, Y., Ae, M., Sugita, M., Matsuo, A., and Kobayashi, K. (1997) Analysis of the race-patterns of men's 400 m hurdles—The Game's of the XXVI OLYMPIAD in Atlanta, 1996—. In: Organizing & Program Committee (Eds) Book of Abstracts, XVIth Congress of International Society of Biomechanics: 206.
- 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 (100 mH, 110 mH) および男女400 mH のレース分析. 佐々木秀幸ほか監 世界一流陸上競技者の技術—第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究班報告書—, ベースボールマガジン社: 東京, pp. 66-91.
- 沼澤秀雄・杉浦雄策 (1994) 200 m, 400 m レースの時間分析. 世界一流陸上競技者の技術—第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究班報告書—, 佐々木秀幸ほか監 ベースボールマガジン社: 東京, pp. 50-65.
- Susanka, P., Kodejs, M., and Miskos, G. (1987) Time analysis of the 400 m hurdles. Scientific report on the II world championships in athletics ROME 1987—BOOK1 Time analysis of the sprint nad hurdle events, International Athletic Foundation: Rome, 1-31.
- Yasui, T., Aoyama, K., Ogiso, K., Asaba, K., and Ogura, Y. (1996) The study of the model interval time in 400 m hurdle race for men. In: Joao M.C.S. Abrantes (Eds) Proceedings of 14th International symposium of Biomechanics in sports: 77-81.
- 安井年文・小木曾一之・青山清英・串間敦郎 (1996) 男子400 mH 走におけるレース分析について. 第13回日本バイオメカニクス学会大会論文集—身体運動のバイオメカニクス—, 第13回日本バイオメカニクス学会大会編集委員会: 茨城, pp. 206-210.

(平成10年12月15日受付)
(平成12年1月22日受理)