

400m 走における下肢スティフネスの継時変化

Leg-spring behavior during a 400-m sprint

保原 浩明 (国立障害者リハビリテーションセンター研究所)

五味 宏生 (早稲田大学大学院スポーツ科学研究科)

彼末 一之 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

I 緒言

代表的な身体運動である走動作では、我々の脚は「バネ」のように振る舞う。こうした下肢の力学的バネ特性を定量的に評価するには、身体を質点と下肢長による線形スプリングとみなす Spring-mass model が用いられてきた (Blickhan, 1989)。このうちバネの硬さ意味する Vertical stiffness (K_{vert} : 立脚中期における地面反力の鉛直成分最大値と重心変位量の比)は、走速度の増加に従って増大することが明らかにされている (Arampatzis et al., 1999; Blickhan, 1989; He et al, 1991; Hobara et al., 2009a; Kuitunen et al., 2002; McMahon et al., 1990; Morin et al., 2005, 2006; Slawinski et al., 2008)。したがって、走動作における K_{vert} の変化を観察することは競技パフォーマンス改善を狙う選手・コーチにとって有用な情報となりうる。現在まで、走パフォーマンスと K_{vert} に関する研究は、主に実験室内に設置したフォースプレート内蔵型のトレッドミルを用いて解析する手法が一般的である。その一方、屋外における実際の走パフォーマンスと K_{vert} との関係は検証されておらず、現場に応用可能な知見は限られているのが現状である。例えば、代表的なトラック競技である 400m 走では、レース前半における走速度の獲得だけでなく、レース後半の疲労によって生ずる走速度減速を抑えることも重要となる (Nummela et al., 1992, 1994, 1996)。こうした競技特有のレースパターンと K_{vert} の関係を明らかにすることは専門種目に特化したトレーニングおよびコーチングの一助になりうる。本研究の目的は、400m 走における下肢バネ特性 (K_{vert}) の継時変化を観察し、走パフォーマンスとの関係について記述することを目的とした。

II 方法

被験者

被験者は 400m 走が専門の全日本クラスの選手 1 名 (年齢 22 歳, 身長 184cm, 体重 72kg, 400m ベストタイム 46.89

秒) とした。実験に先立ち、被験者には本研究の趣旨および考えられるリスクを十分に説明した後、同意を得た。

運動課題と実験手順

実験は早稲田大学所沢キャンパスの陸上競技場 (二種公認) で行った。被験者には通常の試合時と同様のウォームアップを行なわせ、十分な休息を設けた後、試合のレースを想定してクラウチングスタートからピストルの合図で 400m 走を行わせた。疾走中は任意のペース配分をして、最終的に全力で 400m を走りきるという教示のみを与えた。

データ収集および解析

被験者が走るレーン上に 50m 間隔でコーン (高さ 80cm, 底部の直径 40cm) を設置し、競技場の中央部に配置したデジタルビデオカメラ (NV-S9, Panasonic 社製) によって 400m 走中の被験者をパニング撮影した。毎秒 60 コマで撮影したビデオ画像を PC に取り込み、動作解析ソフト (Frame Dias II, DKH 社製) を用いて 50m 区間毎に平均走速度、平均ピッチ (右足の接地から同側の接地まで; f_{stride}) および平均ストライド長 (L_{stride}) を算出した。

走行中の接地-離地を同定するために、加速度計を被験者の右足踵部後面に装着した。加速度計からの出力は携帯型のデータロガー (10.4cm × 6cm × 2.7cm, 125g, フルサワラポアプライアンス社製 FLA-128) に 1000Hz で記録し、得られた加速度波形から、Hobara et al. (2009) の手法に基づき接地時間 (t_c)、滞空時間 (t_f) を算出した。

本来、 K_{vert} の算出には地面反力計が必要であるが、接地時間、滞空時間、走速度および被験者質量を利用して K_{vert} を推定することも可能である (Morin et al., 2005, 2006; Hobara et al., 2009)。 K_{vert} は Spring-mass model (Figure 1) に基づき、以下の式で算出した。

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

このとき F_{max} は立脚中期における地面反力の鉛直成分最大値を、 Δy_c は接地から立脚中期までの重心変位量を表

し、各々の値は以下の推定式を用いて算出した (Morin et al., 2005)。

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

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

このとき m は被験者質量、 g は重力加速度、 t_f と t_c はそれぞれ滞空時間と接地時間を表している。本研究ではこれら先行研究の手法を用いて一ストライドごとに K_{vert} を算出し、50m 区間毎の平均値を求めた。

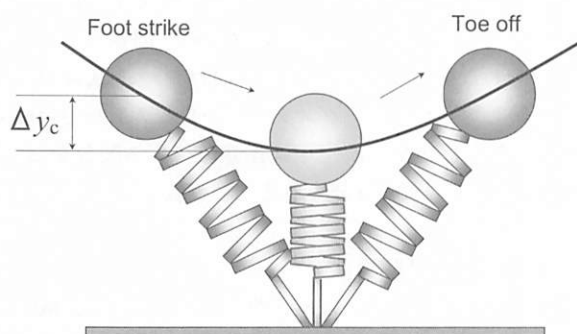


Figure 1. Spring-mass model in running. The leg spring is compressed during the first half of the stance phase and rebounds during the second half. Maximal vertical displacement of the center of mass during ground contact is represented by Δy_c .

統計処理

K_{vert} と走速度、ピッチ、ストライドの関係を Pearson の相関係数を用いて評価した。このとき、危険率 5% 水準を統計学的に有意とした。

Ⅲ 結果

本実験における被験者の 400 m 走のタイムは 48.98 秒であった。Figure 2 に 400 m 走中の K_{vert} および走速度の変化を示す。スタート直後から K_{vert} は増加し、50-100 m 区間で最大値を示した。その後、 K_{vert} はレース終盤にかけて一様に低下する傾向にあった。 F_{\max} は 50-100 m 区間で最大値を示した後、350-400 m 区間では最大値と比較して 16% 減少した。一方、 Δy_c はレース終盤にかけて 32% 増加した (Table 1)。 K_{vert} の変化と同じく、走速度はスタート直後から増加し、50-100 m 区間で最大値を示した後、レース終盤にかけて一様に低下する傾向にあった (Figure 2)。 L_{stride} は 50-100 m 区間で最大値を示した後、350-400 m 区間では最大値と比較して 5% 減少した。一方、 f_{stride} はレース終盤にかけて 10% 減少した (Table 1)。

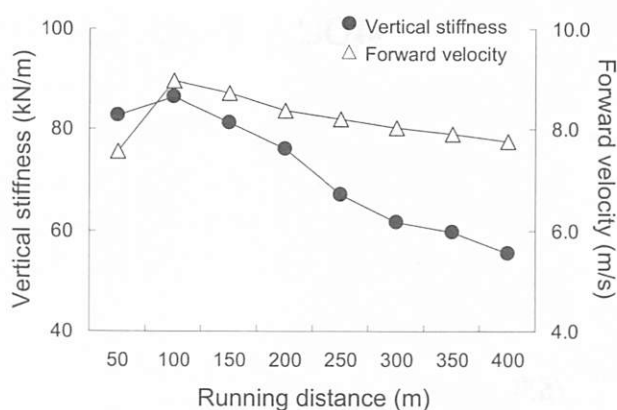


Figure 2. Changes in vertical stiffness and forward velocity as a function of distance.

Table 1. Spring-mass characteristic for every 50 m interval.

	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m
t_c , ms	114	110	114	118	128	136	139	144
t_f , ms	146	158	160	164	154	149	145	151
F_{\max} , kN	2.53	2.70	2.67	2.65	2.43	2.33	2.26	2.28
Δy_c , m	0.031	0.031	0.033	0.035	0.036	0.038	0.038	0.041
f_{stride} , Hz	1.98	1.96	1.92	1.87	1.95	1.84	1.85	1.77
L_{stride} , m	3.81	4.58	4.54	4.48	4.21	4.37	4.28	4.37

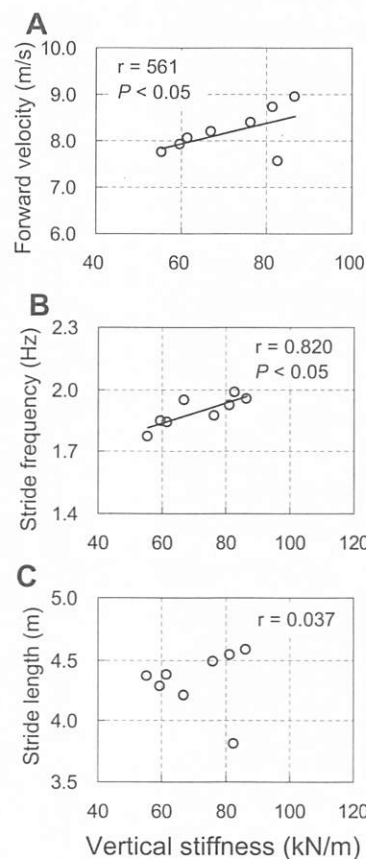


Figure 3. Relationships between vertical stiffness and forward velocity (A), stride frequency (B) and stride length (C).

Figure 3に K_{vert} と走速度(A)、 f_{stride} (B)および L_{stride} (C)との関係を示す。 K_{vert} と走速度はレース全体を通じて有意な正の相関関係が確認された($r = 0.561$)。加えて、 K_{vert} は f_{stride} とも有意な相関関係にあることが確認された($r = 0.820$)。その一方、 L_{stride} との間に有意な相関関係は見られなかった($r = 0.037$)。

IV 考察

本研究の目的は、400m走における下肢バネ特性(K_{vert})の継時変化を観察し、走パフォーマンスとの関係について記述することを目的とした。本実験では、近年開発された推定式(Morin et al., 2005, 2006)を利用することで、地面反力計を使わずに K_{vert} を一步毎に算出した。先行研究では走速度が6.5-8.0 m/s(本研究と類似した速度帯域)のとき K_{vert} の値が約70-100 kN/m程度であり、本研究で得られた値と近い値であった(Arampatzis et al., 1999; Kuitunen et al., 2002; Morin et al., 2006)。また、本実験では被験者の右足踵部後面に装着した加速度計を元に接地時間および滞空時間を同定した。本手法を用いて算出した接地時間を、フォースプレートおよびハイスピードカメラで測定した先行研究の値と比較すると、レースの前半(100 m および 160 m 地点)と後半(360 m および 400 m 地点)でそれぞれ接地時間が119-125 msから136-143 msへと延長するという点で一致している(Nummela et al., 1992, 1994; 尾懸ら 2003)。こうした結果は本実験で用いた測定法および推定式によって算出された値が妥当であることを示唆している。

K_{vert} と走速度はともにスタート直後から増加し、50-100m区間で最大値に達した後、レース終盤にかけて一様に低下する傾向にあった(図2)。そして K_{vert} と走速度はレース全体を通じて有意な正の相関関係が確認された(図3-A)。つまり、400m走中に K_{vert} を高めることは走速度の獲得を通じて400m走のパフォーマンスを向上できる可能性がある。この結果は走速度の増加にしたがって K_{vert} が増大することを報告した先行研究の内容と一致する(Arampatzis et al., 1999; Blickhan, 1989; He et al, 1991; Hobara et al., 2009a; Kuitunen et al., 2002; McMahan et al., 1990; Morin et al., 2005, 2006; Slawinski et al., 2008)。加えて、 K_{vert} は f_{stride} と有意な相関関係にあることが確認された(図3-B)。同様の結果はFarley and Gonzalez (1996)によっても示されている。よって本研究の結果は400m走中に K_{vert} を高めることは f_{stride} の増加させることで走速度を増大させ、400m走のパフォーマンスを向上させることを示唆している。 K_{vert} を高める手法としては、①跳躍動作および筋力トレーニングおよび跳躍ストレーニングを日常的に行うこと(Hobara et al., 2008, 2009b, 2009c)、

②下肢伸筋群の活動レベルを高めること(Hobara et al., 2007)、③着地時の下肢関節角度をより伸展位に保持すること(DeVita and Skelly, 1992; Farley et al., 1998; Hobara et al., 2009d; McMahan et al., 1987)が挙げられるだろう。

V まとめ

本研究の目的は、400m走における下肢バネ特性(K_{vert})の継時変化を観察し、競技パフォーマンスの改善について提言することであった。本研究で得られた結果から、400m走中に K_{vert} を高めることは f_{stride} の増加を通じて走速度を獲得し、400m走のパフォーマンスを向上させることが示唆された。

参考文献

- Arampatzis, A., Bruggemann, G.P., Metzler, V. (1999) The effect of speed on leg stiffness and joint kinetics in human running. *J. Biomech.*, 32: 1349-1353.
- Blickhan, R. (1989) The spring-mass model for running and hopping. *J. Biomech.*, 22: 1217-1227.
- DeVita, P., Skelly, W.A. (1992). Effect of landing stiffness on joint kinetics and energetics in the lower extremity. *Med. Sci. Sport. Exerc.*, 24: 108-115.
- Farley, C.T., Gonzalez, O. (1996) Leg stiffness and stride frequency in human running. *J. Biomech.*, 29: 181-186.
- Farley, C.T., Houdijk, H.H.P., Strien, C.V., Louire, M. (1998) Mechanism of leg stiffness adjustment for hopping on surfaces of different stiffnesses. *J. Appl. Physiol.*, 85: 1044-1055.
- He, J., Kram, R., McMahan, T.A. (1991) Mechanics of running under simulated low gravity. *J. Appl. Physiol.*, 71: 863-870.
- Hobara, H., Inoue, K., Gomi, K., Sakamoto, M., Muraoka, T., Iso, S., Kanosue, K. (2009a) Continuous change in spring-mass characteristics during a 400m sprint. *J. Sci. Med. Sport.*, in press.
- Hobara, H., Inoue, K., Muraoka, T., Omuro, K., Sakamoto, M., Kanosue, K. (2009d) Leg stiffness adjustment for a range of hopping frequencies in humans. *J. Biomech.*, in press.
- Hobara, H., Kanosue, K., Suzuki, S. (2007) Changes in muscle activity with increase in leg stiffness during hopping. *Neurosci. Lett.*, 418, 55-59.
- 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. *J. Biomech.*, 41, 506-514.
- Hobara, H., Kimura, K., Omuro, K., Gomi, K., Muraoka, T., Sakamoto, M., Kanosue, K. (2009b) Differences in lower

- extremity stiffness between endurance-trained athletes and untrained subjects. *J. Sci. Med. Sport.*, in press.
- Hobara, H., Muraoka, T., Omuro, K., Gomi, K., Sakamoto, M., Inoue, K., Kanosue K. (2009c) Knee stiffness is a major determinant of leg stiffness during maximal hopping. *J. Biomech.*, 42, 1768–1771.
- Kuitunen, S., Komi, P.V., Kyröläinen, H. (2002). Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Med. Sci. Sport. Exerc.*, 34: 166–173.
- McMahon, T.A., Cheng, G.C. (1990) The mechanics of running: How does stiffness couple with speed? *J. Biomech.*, 23: 65–78.
- McMahon, T.A., Valiant, G., Frederick, E.C. (1987) Groucho running. *J. Appl. Physiol.*, 62: 2326–2337.
- Morin, J.B., Dalleau, G., Kyrolainen, H., and Belli, A. (2005). A simple method for measuring stiffness during running. *J. Appl. Biomech.*, 21: 167–180.
- Morin, J.B., Jeannin, T., Chevallier, B., Belli, A. (2006) Spring-mass model characteristics during sprint running: correlation with performance and fatigue-induced changes. *Int. J. Sports. Med.*, 27: 158–165.
- Nummela, A., Rusko, H., Mero, A. (1994) EMG activities and ground reaction forces during fatigued and nonfatigued sprinting. *Med. Sci. Sport. Exerc.*, 26: 605–609.
- Nummela, A., Stray-Gundersen, J., Rusko, H. (1996) Effect of fatigue on stride characteristics during a short-term maximal run. *J. Appl. Biomech.*, 12: 151–160.
- Nummela, A., Vuorimaa, T., and Rusko, H. (1992) Changes in force production, blood lactate and EMG activity in the 400-m sprint. *J. Sport. Sci.*, 10: 217–228.
- 尾懸貢, 真鍋芳明, 高本恵美, 木越清信 (2003) 400 m 走中の下肢関節トルク持続能力と下肢の筋持久性との関係. *体力科学*, 52: 455–464.
- 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. *J. Strength. Cond. Res.*, 22: 930–6.

連絡責任者

保原 浩明

〒359-8555 埼玉県所沢市並木4-1

国立障害者リハビリテーションセンター研究所

運動機能系障害研究部(神経筋機能障害研究室)

Tel: 042-995-3100 (内線 2526)

E-Mail: hobara-hiroaki@rehab.go.jp