

ランニングにおけるピッチ変化が下肢バネ特性の左右脚差に及ぼす影響

Step frequency variation and symmetrical leg-spring behavior during running

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)

井上 恒 (早稲田大学大学院人間科学研究科)

彼末 一之 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

I 緒言

代表的なヒトの身体運動である走動作では、その生体力学的特徴を記述する際、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 がしばしば用いられる (図1: Blickhan, 1989; Farley et al., 1993; He et al., 19991; McMahon and Cheng, 1990). 近年, Spring-mass model におけるバネ剛性値 (立脚中期における地面反力最大値と重心変位量の比: Vertical stiffness, K_{vert}) の左右脚差と障害発生頻度には関連があることが指摘されている (Bryant et al., 2008; Clark, 2009; Watsford et al., 2010). そのため、走・跳躍動作における K_{vert} の左右脚差を検討することは障害予防の観点からも重要な問題だといえる. しかしながら、 K_{vert} を算出している先行研究の多くでは、この可能性について実際に検証しないまま、あるいは左右脚差が無いという前提で実験が行われている (Chang et al., 2008; Ferris et al., 2006; Hobara et al., 2010).

事実、一般健常者において、下肢の力学的特性に左右脚差が無いという前提は、筋骨格系の構造や筋力発揮能力の観点からは妥当といえる (de Ruiter et al., 2010;

Jamison et al., 2008; McCurdy et al., 2005). その一方、ヒトは下肢の制御において潜在的な左右脚差を多く有している. 例えば、幾つかの先行研究がヒトには利き脚と非利き脚が潜在的にあることを述べている (Sadeghi et al., 2000; de Ruiter et al., 2010). また、歩行時の視覚遮断によって生じる進路逸脱 (Veering) は、主に右方向に対して生じることが報告されている (Vuillerme et al., 2005). 加えて、平地歩行における地面反力 (前後・鉛直方向成分) の左右脚差は、歩行速度が至適速度よりも大きく (或いは小さく) なることで顕在化することが報告されている ("Functional asymmetry hypothesis": Goble et al., 2003; Sadeghi et al., 2000; Seeley et al., 2008). このほか、陸上競技場に代表される左回りのトラックは、Counterclockwise bias と呼ばれる反時計回り方向に対する走動作の優位性から説明されている (Toussaint and Fagard, 2008).

ランニングの左右脚差に関し、Karamanidis et al. (2003) は様々な走速度下でピッチを至適レベルの $\pm 10\%$ に変化させ、関節キネマティクスの左右脚差を検証した. その結果、いずれの走速度においても、ピッチ変化が左右脚差を生じさせることはないことを報告している. しかしながら、ヒトは一定走速度下において、至適レベルの $\pm 10\%$ より大きくピッチを変化させることができるため (Morin et al., 2007)、本来は存在する左右脚差の潜在性が過小評価されている可能性がある. そこで本研究では一定走速度下におけるピッチ変化に対して、 K_{vert} に左右脚差が生じるか否かを検討することを目的とした.

II 方法

被験者

被験者は心身ともに健康で、両下肢に神経・整形外科的に障害を持たない一般成人男性5名 (平均値 $\pm$ 標準

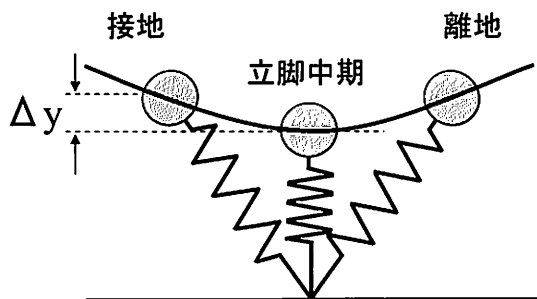


図1. ランニングにおける Spring-mass model (Farley et al., 1993). 本モデルはヒトの下肢を身体質量と下肢長による線形バネに見立てている. 線形バネは立脚期前半で短縮することで弾性エネルギーを蓄積し、立脚期後半で同エネルギーを解放しながら伸長する. 図中の Δy は接地から立脚中期における質量中心の鉛直方向変化量を示している.

偏差, 年齢 30.8 ± 0.8 歳, 身長 1.73 ± 0.05 m, 身体質量 73.7 ± 11.5 kg) であった。実験を行うにあたり, 全ての被験者に対し, 研究の目的, 方法および測定に伴う危険性を十分に説明し, 実験参加に対する同意を得た。

運動課題と実験手順

実験に先立ち, 被験者の利き脚を口頭で確認した。利き脚はボールを蹴る脚と定義し (Chang et al., 2008), 被験者全員が右脚を選択した。走動作は地面反力計埋蔵型トレッドミル (ITR3017; ベルテック社製) 上で行った。このトレッドミルは左右独立したベルトを持つため, 鉛直方向の地面床反力を左右で独立して測定可能である。実験に先立ち, 被験者には運動しやすい服装でシューズを着用しランニングをさせた。また, 軽いストレッチを自由に行ってもらい, 怪我が起こらないように備えてもらった。

本研究では Karamanidis et al. (2003) が行った, 一定走速度下における走ピッチ変化 (至適レベルの $\pm 10\%$) よりも大きく変化させるため, 至適レベルの $\pm 15\%$ に設定した。また, 1) 走速度次第では, 被験者が本研究で設定した「至適レベルの $\pm 15\%$ で走る」という課題を達成できない可能性があったこと, 2) 実験中, 被験者の安全を確保しなければならなかったこと, 3) 同様の実験系 (Farley and Gonzalez 1996) の走速度を参考にしたことから, 走速度は 2.5 m/s に設定した。

まず, 被験者に走りやすい走ピッチで 10 秒程度走らせ, ランニング時の地面反力を測定した。そして, 至適ピッチ ($f_{\text{pref}}: 0\%$) を基準に, メトロノームの音によって $\pm 15\%$ (f_{-15}, f_{+15}) の 3 段階に走ピッチを設定した。 3 段階のピッチでそれぞれ 10 秒程度の測定を各 1 回ずつ行った (なお, 本実験における 5 名分の至適ピッチは 2.76 ± 0.12 Hz であった)。ピッチの変化はランダム試行とし, メトロノーム (SQ100-88; SEIKO 社製) の音によって操作した。実験中に, 走ピッチの高さについての情報は被験者には教えず, メトロノームの音に合わせて走るようにのみ指示した。実験に際し, トレッドミル上の走り慣れるまで, 或いはメトロノームの音に合わせてランニングができるようになるまで, 十分な練習時間を設けた。また, 実験中に被験者が疲労を感じた時には, 試行の間に休憩を設けた。

データ収集および解析

本実験では連続した 10 回のステップを分析に用いた。得られた地面反力より, 接地時間 (Contact time; sec), 滞空時間 (Aerial time; sec), 地面反力最大値 (Peak force; kN) を測定した。また, 地面反力から求めた加速度を二重積分することによって接地時の身体質量中心位置の鉛直変位 (COM displacement; m) を算出した。加えて,

K_{vert} は以下の式で算出した。

$$K_{\text{vert}} = F_{\text{peak}} / \Delta y$$

このとき, F_{peak} は立脚中期における地面反力最大値を, Δy は接地から立脚中期における身体質量中心の鉛直方向変化量を表している (図2)。

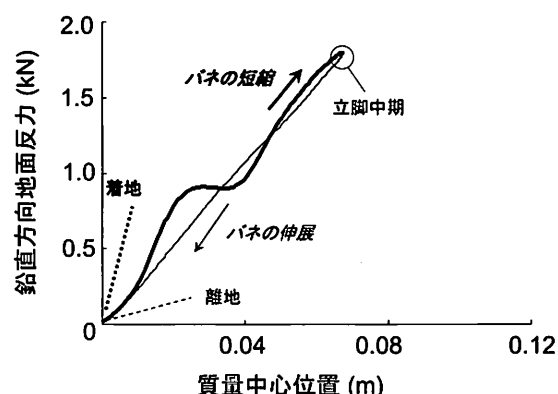


図2. 至適ピッチにおける代表的な地面反力-質量中心変位のリサージュ波形。太線が接地から立脚中期までを, 細線が立脚中期から離地までを示している。

統計処理

左右脚 (2) とピッチ変化 (3) を主要因とした二元配置分散分析を用いた。有意差が確認された場合は多重比較検定として Bonferroni 法を使用した。このとき危険率 5% 水準を統計学的に有意とした。

III 結果

接地時間はピッチが高まるにつれて有意に減少した (表1)。同様に, 滞空時間, 最大地面反力, 重心変位量もピッチの増加に伴い有意に減少した (表1)。一方, K_{vert} はピッチの増加に伴い, 有意に増大する傾向にあった (表1)。しかしながら, どのパラメータも 3 段階のピッチで有意な左右脚差は認められなかった。

IV 考察

本研究の目的は, 一定走速度下においてピッチを至適レベルの $\pm 15\%$ まで変化させ, K_{vert} に左右脚差が生じるか否かを検討することを目的とした。地面反力計埋蔵型トレッドミル上で 2.5 m/s の走動作を行わせ, K_{vert} および接地時間, 滞空時間, 最大地面反力, 重心変位量を左右脚で比較した結果, 走ピッチの増加に従い, K_{vert} および関連パラメータは両脚ともに一樣な変化を示したが, 両脚間で有意な差は認められなかった。この結果は, 走動

表1 各ピッチにおいてSpring-mass model により算出されるパラメータを左右脚で比較した結果

	f_{-15}		f_{pref}		f_{+15}	
	right	left	right	left	right	left
Contact time, s	0.32 (0.02)	0.32 (0.02)	0.28 (0.02)	0.28 (0.02)	0.25 (0.01)	0.27 (0.03)
Aerial time, s	0.14 (0.06)	0.14 (0.07)	0.09 (0.02)	0.08 (0.02)	0.06 (0.01)	0.05 (0.01)
Peak force, kN	1.77 (0.34)	1.72 (0.28)	1.72 (0.26)	1.66 (0.22)	1.60 (0.25)	1.55 (0.20)
COM displacement, m	0.05 (0.02)	0.05 (0.02)	0.04 (0.01)	0.04 (0.02)	0.02 (0.01)	0.03 (0.02)
Vertical stiffness, kN/m	47.96 (34.80)	44.63 (23.48)	48.88 (12.47)	57.50 (26.76)	91.92 (37.31)	88.81 (46.78)

作において左右脚が対称的に振舞うという先行研究の仮定を支持するものである (Chang et al., 2008; Ferris et al., 2006; Hobara et al., 2010)。

本研究では走ピッチの増加に従って K_{vert} の増大が観察されたが、3段階のピッチ間で比較してみると、 f_{+15} の K_{vert} が f_{-15} および f_{pref} よりも極めて高い値を示した (表1)。これは走ピッチ変化に伴う F_{peak} の減少の割合 (約10%) が Δy における減少の割合 (約50%) よりも小さいことに起因していた (表1)。通常、 Δy は立脚中の股・膝・足関節角度変化量に依存する。近年になり、至適ピッチよりも高いピッチで走ることが、ランニング障害の予防および障害からの早期回復に有効であることが示唆されている (Derrick, 2004; Edwards et al., 2009)。例えば、Helderscheit et al. (2010) は 2.9 m/s の走動作において、走ピッチを至適レベルよりも10%増加させることで、股関節および膝関節における負荷 (力学的仕事量) を軽減できることを報告している。こうした至適ピッチ以上の走動作では、ヒトが有する潜在的な左右脚差が顕在化し、逆にランニング障害を引き起こす可能性が考えられた。しかしながら、本研究の結果が示すように、段階的なピッチ変化に対して K_{vert} および関連パラメータに有意な左右脚差は認められなかった。以上のことから、こうした手法がランニング障害の予防法として有効であることが改めて主張できるだろう。

上述のように、走・跳躍動作における K_{vert} の左右脚差を検討することは障害予防の観点からも重要な問題であるにもかかわらず、先行研究では左右脚差の有無を検証しないまま、あるいは左右脚差が無いという前提で実験が行われているのが現状である。近年になり、ホッピング運動における K_{vert} の左右脚差が検証され始めてはいるものの (Bryant et al., 2008; Clark, 2009; Watsford et al., 2010)、走動作では未だ検証されていない。本研究では、2.5m/s という比較的ゆっくりとした走速度下 (2.5m/s) において、走ピッチを至適レベルの $\pm 15\%$ に変化させた際に、左右脚の K_{vert} に対称性が認められた。同様に、走ピッチに関する記述はないながらも、先行研究では Dalleau et al. (1998) が走速度 5.0m/s という条件で下肢スティフネスの左右脚差を調べている。その結果、Dalleau et al.

(1998) は下肢スティフネスには常に若干の左右脚差はあるものの、その差はさきわめて小さく無視できる程度のものであることを述べている。同様に、過去の研究では走速度 2.78 から 5.30m/s の範囲において、spring-mass model によって算出されるパラメータは左右で同等の値を示すことを報告している (Dalleau et al., 1998; Divert et al., 2005ab; Hamill et al., 2009; Morin et al., 2009)。以上のことから、走ピッチならびに走速度の段階的变化に対して、spring-mass model によって算出される K_{vert} および関連パラメータは左右脚間で対称的だとみなせるだろう。

V まとめ

本研究の目的は、一定走速度下 (2.5m/s) においてピッチを $\pm 15\%$ まで変化させ、 K_{vert} と関連パラメータ (接地時間、滞空時間、最大地面反力、質量中の鉛直方向変化量) に左右脚差が生じるか否かを検討することであった。本研究で得られた結果から、走動作におけるピッチ変化はこうした指標の左右脚差を生じさせないことが示唆された。

参考文献

- Blickhan, R. (1989) The spring-mass model for running and hopping. *J. Biomech.*, 22: 1217-1227.
- Bryant, A.L., Kelly, J., Hohmann, E. (2008) Neuromuscular adaptations and correlates of knee functionality following ACL reconstruction. *J. Orth. Res.*, 26: 126-35.
- Chang, Y.H., Roiz, R.A., Auyang, A.G. (2008) Intralimb compensation strategy depends on the nature of joint perturbation in human hopping. *J. Biomech.*, 41: 1832-1839.
- Clark, R.A. (2009) The effect of training status on inter-limb joint stiffness regulation during repeated maximal sprints. *J. Sci. Med. Sport.*, 12: 406-410.
- Dalleu, G., Belli, A., Bourdin, M., Lacour, J.R. (1998) The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 77: 257-263.
- Derrick, T.R. (2004) The effects of knee contact angle on impact forces and accelerations. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 36: 832-7.

- Divert, C., Baur, H., Mornieux, G., Mayer, F., Belli, A. (2005) Stiffness adaptations in shod running. *J. Appl. Biomech.*, 21: 311-321.
- Divert, C., Mornieux, G., Baur, H., Mayer, F., Belli, A. (2005) Mechanical comparison of barefoot and shod running. *Int. J. Sport. Med.*, 26: 593-598.
- Edwards, W.B., Taylor, D., Rudolphi, T.J., Gillette, J.C., Derrick, T.R. (2009) Effects of stride length and running mileage on a probabilistic stress fracture model. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 41: 2177-84.
- Farley, C.T., Glasheen, J., McMahon, T.A. (1993) Running springs: speed and animal size. *J. Exp. Biol.*, 185: 71-86.
- Farley, C.T., Gonzalez, O. (1996) Leg stiffness and stride frequency in human running. *J. Biomech.*, 29: 181-186.
- Ferris, D.P., Bohra, Z.A., Lukos, J.R., Kinnaird, C.R. (2006) Neuromechanical adaptation to hopping with an elastic ankle-foot orthosis. *J. Appl. Physiol.*, 100: 163-170.
- Goble, D.J., Marino, G.W., Potvin, J.R. (2003) The influence of horizontal velocity on interlimb symmetry in normal walking. *Hum. Mov. Sci.*, 22: 271-283.
- Hamill, J., Moses, M., Seay, J. (2009) Lower extremity joint stiffness in runners with low back pain. *Res. Sport. Med.*, 17: 260-273.
- He, J., Kram, R., McMahon, T.A. (1991) Mechanics of running under simulated low gravity. *J. Appl. Physiol.*, 71: 863-870.
- Heiderscheit, B., Chumanov, E.S., Michalski, M.P., Wille, C.M., Ryan, M.B. Effects of step rate manipulation on joint mechanics during running. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, in press.
- Hobara, H., Inoue, K., Gomi, K., Sakamoto, M., Muraoka, T., Iso, S., Kanosue, K. (2010) Continuous change in spring-mass characteristics during a 400m sprint. *J. Sci. Med. Sport.*, 13: 256-261.
- Jamison, S.T., Flanigan, D.C., Nagaraja, H.N., Chaudhari, A.M.W. (2010) Side-to side differences in anterior cruciate ligament volume in healthy control subject. *J. Biomech.*, 43: 576-578.
- Karamanidis, K., Arampatzis, A., Brüggemann, G.P. (2003) Symmetry and reproducibility of kinematic parameters during various running techniques. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 35: 1009-1016.
- McCurdy, K., Langford, G. (2005) Comparison of unilateral squat strength between the dominant and non-dominant leg in men and women. *J. Sports. Sci. Med.*, 4: 153-159.
- McMahon, T.A., Cheng, G.C. (1990) The mechanics of running: How does stiffness couple with speed? *J. Biomech.*, 23: 65-78.
- Morin, J.B., Samozino, P., Féasson, L., Geyssant, A., Millet, G. 2009. Effects of muscular biopsy on the mechanics of running. *European Journal of Applied Physiology* 105, 185-190.
- Morin, J.B., Samozino, P., Zameziati, K., Belli, A. 2007. Effects of altered stride frequency and contact time on leg-spring behavior in human running. *Journal of Biomechanics* 40, 3341-3348.
- de Ruitter, C.J., de Korte, A., Schreven, S., de Haan, A. (2010) Leg dominance in relation to fast isometric torque production and squat jump height. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 108: 247-255.
- Sadeghi, H., Allard, P., Prince, F., Labelle, H. (2000) Symmetry and limb dominance in able-bodied gait: a review. *Gait. Posture.*, 12: 34-45.
- Seeley, M.K., Umberger, B.R., Shapiro, R. (2008) A test of the functional asymmetry hypothesis in walking. *Gait. Posture.*, 28: 24-28.
- Toussaint, Y., Fagard, J. (2008) A counterclockwise bias in running. *Neurosci. Lett.*, 442: 59-62.
- Vuillerme, N., Nougier, V., Camicioli, R. (2002) Veering in human locomotion: modulatory effect of attention. *Neurosci. Lett.*, 331: 175-8.
- Watsford, M.L., Murphy, A.J., McLachlan, K.A., Bryant, A.L., Cameron, M.L., Crossley, K.M., Makdissi, M. A prospective study of the relationship between lower body stiffness and hamstring injury in professional australian rules footballers. *Am. J. Sports. Med.*, in press.

連絡責任者

住所：〒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）

氏名：保原 浩明

E-mail：hobara-hiroaki@rehab.go.jp