走運動及び自転車運動における ピッチと酸素摂取量の関係

佐 竹 昌 之 (筑波大学体育科学研究科)

前 河 洋 一 (国際武道大学)

青 柳 幸 利 (筑波大学体育研究科)

姜 熙 成 (筑波大学体育科学研究科)

池 上 晴 夫 (筑波大学)

(昭和62年 3 月30日 受付)

Relationship between step rate and oxygen uptake during distance running and cycling

Masayuki Satake¹, Yoichi Maekawa²

Yukitoshi Aoyagi³

Hi Sung Kang¹

Haruo Ikegami⁴

Abstract

Some differences in step rate-running economy relationship between male and female runners were reported in our previous paper. The aim of the present study was to verify the possibility of contribution of running form as a cause of the sex difference.

Five male and five female runners underwent treadmill running and cycling at a step rate from 150 to 200 per minute with a given step length of 80 or 100 cm in the former and a given load of 0.5 kp in the latter. Measurements of $\dot{V}O_2$ and heart-rate were made in a steady state of each bout of exercise.

At a lower step rate (below 170 steps/min), no difference in step rate-economy relationship was observed between men and women. The economy dropped with decreasing step rate in running, but not in cycling.

At a higher step rate (above 180 steps/min), the same sex difference in step rate-economy

1 University of Tsukuba, Doctoral Program in Health and Sports Sciences, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki (305)

2 The International Budo University, Faculty of Physical Education, Katsuura, Chiba (299—52)

3 University of Tsukuba, Master Program in Health and Physical Education, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki (305)

4 University of Tsukuba, Institute of Health and Sports Sciences, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki (305)

relationship was found in both running and cycling. In men, the drop in economy was observed as step rate increased, but in women, no change was found at any step rate.

During cycling, there is little change in center of gravity and movements of limbs with changing step rate. With this in mind, the results suggest that the sex difference in step rate-running economy relationship is due to not running form but other factors.

(Masayuki Satake, Yoichi Maekawa, Yukitoshi Aoyagi, Hi Sung Kang and Haruo Ikegami, "Relationship between step rate and oxygen uptake during distance running and cycling", *Jap. J. Phys. Educ.*, 32-2: 91-97, September, 1987)

結 言

一定速度で走行する場合、男子長距離走者は常に走効率 (running economy) の高いピッチ (1分間当たりの歩数) で走っており、これよりもピッチを大きくしても小さくしても走効率の低下することが Cavanagh and Williams¹⁾や Högberg⁹⁾によって報告されている。筆者らは同様の実験を男子と女子の長距離走者について行い、ピッチと走効率の関係 (以下ピッチ・走効率関係とする) が男女で異なることを見出し、先に報告した¹³⁾、すなわち、男子では走効率の高いピッチ (経済ピッチ) は180steps/min前後のかなり限局された範囲内でのみ存在するが、女子ではピッチをかなり広い範囲 (170—220steps/min) に変化させても走効率に変化せず、ほぼ一定に保たれる傾向が認められた。

走効率には種々な要因が関与しており、ランニングフォームはその一つである。例えば、身体重心の鉛直方向への移動量 (以下身体重心の上下動と略す)、腕の振りや下肢の動きなどには個人差が認められるが、これらは走効率に影響を及ぼすと考えられる。このほかにも、内的仕事量 (等尺性筋収縮、主働筋と拮抗筋の不協応、筋や関節部での摩擦抵抗など) 及び筋線維の収縮効率や弾性なども走効率に関与する因子であると考えられる。したがって先報¹³⁾で見出されたピッチ・走効率関係の男女差がいかなる要因に起因するかを明らかにするためには、これらの関係要因について逐一検討しなければならないと考えられる。

走運動の場合には、ピッチの変化に伴ってこれらの複合した要因が同時に変わる可能性がある

考えられる。これに対して軽一中負荷の自転車運動ではピッチ (1分間当たりのステップ数、すなわちクランク回転数×2) を変えても身体重心の上下動や上体の動揺が小さく、上肢の動きはほとんどなく、また下肢の動きもほぼ一定である。したがってピッチと酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の関係を走運動と自転車運動とで比較することによって、ランニングフォームに関する要因が上記のピッチ・走効率関係の男女差の原因となっているかどうかを検討することができると考えられる。

自転車運動の場合には、機械的効率の最も高いピッチが存在し、これよりピッチを増加させると機械的効率の低下することが Seabury, et al.¹⁴⁾や山岡ら¹⁶⁾によって報告されている。また、山岡ら¹⁶⁾はピッチと $\dot{V}O_2$ の関係を自転車運動とその場かけ足 (stationary running) とについて調査し、両運動ともピッチの増加に伴って $\dot{V}O_2$ は指数関数的に増大することを示した。しかしこれらの報告は全て男子について行ったものであり、女子を対象にしたこの種の報告は見当たらない。そこで本研究では自転車運動におけるピッチと $\dot{V}O_2$ の関係を男女で比較し、さらに走運動の場合と比較することによって、身体重心の上下動や四肢の動きなどランニングフォームの差がピッチ・走効率関係の男女差に関係しているかどうかを検討することにした。

方 法

被検者は大学陸上競技部の中長距離走者男女各5名である。彼等は4—9年の競技歴を有し、走トレニングを十分に積んだと考えられる者であり、その身体的特性は表1に示す通りであった。

Table 1. Physical characteristics of subjects.

	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)
male	21.4±1.0	176.2±1.5	64.2±2.2
female	20.5±0.9	161.7±3.1	52.7±1.6

運動には走運動（西川社製トレッドミル）及び自転車運動（モナーク社製エルゴメータ）を用い、走運動では勾配を0%とし、ストライド（歩幅）を80cm または100cm のいずれかに固定した。また、自転車運動では負荷を常に0.5KP とした。そして、いずれの場合にもピッチを150, 160, 170, 180, 190及び200steps/min の6種類とし、これを図1に示すような手順で行った。すなわち、5分間のウォーミングアップの後、Ex. 1—Ex. 3を連続して行い、10分の休憩を挿入した後、Ex. 4—Ex. 6を同様に行った。Ex. 1—Ex. 6は上記6種類のピッチによる運動であり、その順序は無作為とした。運動中のピッチはメトロノームで指示し、右大腿からの筋電図を用いて実際のピッチを監視した。また走行中のストライドはピッチを規定した上で走速度を変えることによって調節した。したがって、運動強度はピッチに依存して変化し、トレッドミルの速度は120—200m/分の範囲になり、

Fig. 1 Exercise protocol. Ex. 1-Ex. 6 mean the random combination of six kinds of step rate exercise.

自転車運動では運動強度が225—300kpm/分になった。

各Ex.の終了前2分間に $\dot{V}O_2$ （ダグラスバッグ法）及び心拍数（双極胸部誘導による心電図法）を測定した。呼気分析には標準ガスで校正した質量分析器（Perkin Elemer 社製1100型）を、そして呼気量測定には乾式ガスメータを用いた。

平均値の有意差検定はすべてt検定で行い、 $P<0.05$ をもって有意差とした。

結 果

走運動におけるピッチと酸素摂取量の関係を図2に示した。実線はピッチと $\dot{V}O_2$ (ml/kg. min) の関係であり、破線はピッチと走行距離100m当たりの酸素摂取量（以下 $Vo_2/100m$ と略す）との関係である。

Fig. 2 Relationships between step rate and oxygen uptake per minute (solid lines) and between step rate and oxygen uptake per 100 meter run (dashed lines) during constant step length run in runners. The asterisks denote a significant change at 0.05 level.

170steps/min 以下のピッチ(以下低ピッチと略す)では,男女ともピッチの減少に伴って $\dot{V}O_2/100m$ の増大傾向がみられた。これに対して180steps/min 以上のピッチ(以下高ピッチと略す)では明らかな男女差が認められ,男子の場合にはピッチの増加に伴って $\dot{V}O_2$ が曲線的な増大傾向を示し, $\dot{V}O_2/100m$ も増大したのに対して,女子の場合にはピッチと $\dot{V}O_2$ が直線的な関係であり, $\dot{V}O_2/100m$ はピッチに関係なくほぼ一定で,かつ男子の最低値よりさらに低い傾向にあった。

図3は自転車運動におけるピッチと酸素摂取量の関係を示したものである。実線はピッチと $\dot{V}O_2$ (ml/min) との関係,破線はピッチと仕事量100 kpm 当たりの酸素摂取量(以下 $\dot{V}O_2/100kpm$ と略す)の関係を表している。図中の●は男子,○は女子のデータであるが,両者間には明らかな差が認められた。すなわち,150steps/min における $\dot{V}O_2$ は男女ともほぼ同一値であったが,ピッチの増加に伴って男子の $\dot{V}O_2$ は曲線的に,そして女子の $\dot{V}O_2$ は直線的な増加を示した。その結果,男子の $\dot{V}O_2$ はピッチが高いほど女子のそれより大きい傾向にあった。 $\dot{V}O_2/100kpm$ を男女で比較すると,男子ではピッチの増加に伴って増大するのに対して,女子ではピッチに関係なくほぼ一定であった。

ピッチと $\dot{V}O_2$ の関係を走運動(図2)と自転車運動(図3)で比較すると次のようになる。女子の場合には高ピッチ域では両運動ともピッチと $\dot{V}O_2$ の関係が直線的であった。また, $\dot{V}O_2/100m$ 及び $\dot{V}O_2/100kpm$ はピッチを変えてもほとんど変化が認められなかった。このことから,ピッチの変化に対する $\dot{V}O_2$ の変化率は両運動でほぼ等しいことがわかる。これに対して男子の場合には,ピッチと $\dot{V}O_2$ の関係が曲線的であった。そこで高ピッチの場合について, $\dot{V}O_2$ を片対数にとってピッチとの関係をグラフ上に表すと,図4の実線に示すようにいずれの運動でもピッチと $\dot{V}O_2$ の関係が直線的となり,それぞれの直線は平行関係になった。山岡ら¹⁶⁾が算出した,その場かけ足及び自転車運動におけるピッチ(X)と $\dot{V}O_2$ (Y)の回帰式 $Y = a \cdot b^x$ に当てはめて,図4実線に示した $\dot{V}O_2$ のピッ

Fig. 3 Relationships between step rate and oxygen uptake per minute (solid lines) and between step rate and oxygen uptake per 100KPM cycling (dashed line) during constant load (0.5KP) cycling in runners.

Fig. 4 Relationships between step rate and oxygen uptake during running (□ △) and cycling (●) in male runners. This figure is shown in a semilogarithmic expression.

チに対する回帰式を求めると,表2に示すように高い相関関係でよく一致することがわかった。方向係数である b についてみると,1.009(自転車運動),1.008(ストライド80cmの走運動)及び1.010(ストライド100cmの走運動)であり,3本の直線とも極めて近似している。このことから,ピッチの変化に対する $\dot{V}O_2$ の変化率は両運動でほぼ等しいことがわかる。

一方,低ピッチの場合をみると,女子では自転

Table 2. Relationship between step rate (x : steps/min) and oxygen uptake (y : l/min) during running and cycling with higher step rate (170–200 steps/min).

		$y = a \cdot b^x$		
		a	b	r
Running	(step length 80cm)	0.399	1.008	0.998
Running	(step length 100cm)	0.382	1.010	0.998
Cycling		0.213	1.009	0.962

車運動におけるピッチと $\dot{V}O_2$ の関係が, 図 3 に示すように高ピッチの場合と同一勾配の直線で示され, ピッチの減少に伴って $\dot{V}O_2$ は低下する傾向にあった。これに対して走運動では (図 2), 150 steps/min の場合の $\dot{V}O_2$ が, それ以外のピッチにおけるピッチ・ $\dot{V}O_2$ の直線関係から外れて増大傾向を示した。男子の場合には, 図 2 及び図 3 に示すようにピッチと $\dot{V}O_2$ の関係がいずれの運動でも曲線的であり, 高ピッチ域と同様に片対数グラフに表すと図 4 の破線のようになった。走運動ではピッチが変わっても $\dot{V}O_2$ はほとんど不変である。したがって高ピッチと低ピッチでは直線の勾配が明らかに異なる。これに対して自転車運動では (同図の最も下の直線), 低ピッチの場合も高ピッチの場合と勾配が等しく, ピッチの減少に伴って $\dot{V}O_2$ は減少する傾向にあり, 走運動との間には明らかな差が認められた。

考 察

筆者ら¹³⁾は, 走運動におけるピッチと $VO_2/100m$ の関係が男女で異なっていることを先に報告した。すなわち男子では特定の経済的なピッチが存在し, このピッチ以外で走ると $VO_2/100m$ が増大するのに対して, 女子の場合にはピッチを広い範囲 (170–220steps/min) で変化させても $VO_2/100m$ が一定に保たれる傾向のあることが認められた。さらに今回の自転車運動の場合でもピッチと $VO_2/100kpm$ の関係に明らかな男女差を認めた。すなわち男子の場合には Seabury, et al.¹⁴⁾, 山岡ら¹⁶⁾の研究と同様, ピッチの増加に伴って

$VO_2/100kpm$ が増大したのに対して, 女子ではピッチに関係なく $VO_2/100kpm$ が常に一定であった。

男子におけるピッチと $\dot{V}O_2$ の関係は曲線的である。ピッチに対する $\dot{V}O_2$ の変化率をさらに検討するために, ピッチ (X) と $\dot{V}O_2$ (Y) の回帰式を高ピッチ域について求めた結果, 走運動及び自転車運動ともに $Y = a \cdot b^x$ の式で表すことができ, 変化率を表す方向係数 b の値はいずれの運動においても近似していた。これらの関係は山岡ら¹⁶⁾が自転車運動とその場かけ足について求めたものと一致している。彼等は, 大筋活動における筋収縮速度とエネルギー需要量の関係は上記の回帰式で表すことができ, b の値は約 1.02 であると述べているが, 本研究の結果はこの見解を支持するものである。

以上のことから, 男子の高ピッチ運動時に $VO_2/100m$ 及び $VO_2/100kpm$ の増大を引き起こす主要因は走運動と自転車運動で共通するものと考えられ, ピッチ・走効率関係の男女差もこれらの要因に起因している可能性が考えられる。したがって, 身体重心の上下動, 腕の振り, あるいは下肢の動きなどランニングフォームに関連する因子は, ピッチ・走効率関係の男女差の原因としては除外できるものと考えられる。

本研究では, 高ピッチ自転車運動時の $VO_2/100kpm$ 増大傾向が男子全員に認められたが, 先行研究では男子でも本研究の女子の場合と同様に $VO_2/100kpm$ 増大の認められない例が報告されている。Faria⁴⁾の研究によれば, 自転車競技選手は 120–260steps/min のピッチ範囲内では自転車運動の機械的効率がほぼ一定であるという。Hagberg, et al.⁸⁾や Merrill and White¹¹⁾も同様の結果を報告し, この理由として自転車競技選手の練習やレースが高ピッチ (180–195steps/min) であることが, 高ピッチ時の機械的効率の向上に貢献していると考察している。

本研究の女子被検者は, 自転車練習を特に行っているということはない。また, 筆者らは走トレーニングを特に行っていない女子卓球選手及び女子水泳選手の場合でも走行時のピッチ変化

が走効率をほとんど変化させないことを認め、先報¹³⁾において報告した。したがって先回と今回の実験において認められたピッチ・走効率関係の男女差がトレーニングの結果生じたものであるとは考え難い。

また、加賀谷¹⁰⁾はスキップ動作の筋放電様式を男女で比較し、筋に対するインパルス発射の時間的・量的調節は女子のほうが優れていると述べている。すなわち、スキップ動作は長短のリズムをもつ左右交互の脚運動であり、左右の腓腹筋への長短・強弱のインパルス放出が筋電図から認められる。女子では長短の時間的調節が整い、しかも一定の比率をもった強弱のインパルスが左右交互に送られたのに対して、男子のインパルス発射様式は長短・強弱に調節されていなかった。このことから考えると、高ピッチの運動においても、筋収縮様式の調節は女子のほうが優れているということも考えられる。

Suzuki¹⁵⁾は、速筋線維（以下FTと略す）の多い者では高ピッチ（200steps/min）の自転車運動でも機械的効率が低下しないことを報告している。この理由として、速い速度での収縮効率がFTにとって、ピッチの増加は最適収縮速度に近づくことになるためであると考察している。しかし本研究の被検者は男女とも中長距離走者であり、Costill, et al.²³⁾による研究では中距離走者のFTは約40%であり、男女差がないとされている。また、Gaesser and Brooks⁵⁾は、比較的効率の低いFTの動員がピッチの増加に伴って選択的に増加するようなことがあれば、消費エネルギー量は増大すると述べている。しかし、Gollnick et al.⁷⁾やPiehl¹²⁾の先行研究によれば、最大下運動では負荷及び筋収縮速度に関係なく遅筋線維（ST）が優先的に動員され、そしてこれらの線維が疲労すると二次的にFTが動員されると言われている。さらにHagberg, et al.⁸⁾は、FTの動員が増えてもそれほど明らかに消費エネルギー量を変えないと考察している。以上のことから、本研究のピッチ・走効率関係の男女差を筋線維組成の面から説明することには無理があると考えられる。

そのほかに、筋の粘弾性などの力学的特性や下

肢の形態、特に振り子としての固有周期などがピッチ・走効率関係の男女差の原因となっている可能性が考えられる。しかし、これらの要因がどの程度走効率に影響を及ぼすのか、あるいはその男女差の有無などに関しては詳細な研究がなく、その検討は今後の課題である。

一方、低ピッチの走運動では男女とも $\dot{V}O_2/100m$ の増大が認められた。低ピッチで走ると身体重心の上下動が大きくなる可能性があり、これが低ピッチ域での $\dot{V}O_2/100m$ 増大の原因のひとつとして考えられる。自転車運動では低ピッチであっても身体重心の上下動が少ない。今回の実験においても自転車運動の場合には低ピッチ域の $\dot{V}O_2/100kpm$ は男女とも増大しなかった。これらのことは、低ピッチ走行時に $\dot{V}O_2/100m$ が増加した原因として身体重心の上下動の増大が関与していることを示唆している。

低ピッチ走運動時に $\dot{V}O_2/100m$ の増大したその他の原因として、走運動における下肢の振り運動が関与している可能性が考えられる。すなわち、低ピッチで走るとは下肢を固有周期よりも遅い周期で動かすことになるため、下肢のモーメントに制動をかけることになり、余分なエネルギーが使われると考えられるからである。

要 約

走運動ではピッチ・走効率関係に明らかな男女差が認められる。本研究では、この男女差が走行時の身体重心の上下動、腕振り及び下肢の動きなどランニングフォームに関する要因の差に起因しているか否かを検討するために、上記の要因の個人差が少ないと考えられる自動車運動についてピッチと $\dot{V}O_2$ の関係を調べ、走運動の場合と比較した。そして次のような結果を得た。

(1) 170steps/min 以下の低ピッチの場合には、ピッチと酸素摂取量の関係が自転車運動と走運動で異なった傾向を示した。走運動ではピッチの減少に伴って $\dot{V}O_2/100m$ の増大傾向が見られたが自転車運動では $\dot{V}O_2/100kpm$ は低ピッチでも増大しなかった。そして、いずれの運動においてもそれらの傾向に男女差は認められなかった。

(2) 180steps/min 以上の高ピッチの場合には、走運動で認められたピッチ・酸素摂取量関係の男女差が、自転車運動でも同様に認められた。すなわち、ピッチの増加に対して男子では $Vo_2/100m$ 及び $Vo_2/100kpm$ が増大するのにに対して女子ではそれらが常に一定であった。

(3) 以上のことから身体重心の上下動や四肢の動きなどのランニングフォームに関する要因は、低ピッチ域での走効率低下の原因である可能性は大きい。高ピッチ域におけるピッチ・走効率関係の男女差の主要原因とは考えられない。

本報告の要旨は第37回日本体育学会（筑波大学）において報告した。

引用・参考文献

- 1) Cavanagh, P.R. and Williams, K.R., "The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running," *Med. Sci. Sports Exerc.*, 14: 30—35, 1982.
- 2) Costill, D.L., Daniels, J., Evans, W., Fink, W., Krahenbuhl, G. and Saltin, B., "Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes," *J. Appl. Physiol.*, 40: 149—54, 1976.
- 3) Costill, D.L., Fink, W. and Pollock, M.L., "Muscle fiber composition and energy activities of elite distance runners," *Med. Sci. Sports*, 8: 96—100, 1976.
- 4) Faria, I., Sjojaard, G. and Bonde-Peterson, F., "Oxygen cost during different pedalling speeds for constant power output," *J. Sports Med.*, 22: 295—99, 1982.
- 5) Gaesser, G.A. and Brooks, G.A., "Muscular efficiency during steady-rate exercise: Effects of speed and work rate," *J. Appl. Physiol.*, 38: 1132—39, 1975.
- 6) Goldspink, G., "Energy turnover during contraction of different type of muscle," in Asmussen, E. and Jorgensen, K. (Eds.), *Biomechanics*, VI-A, Univ. Park Press: Baltimore, M.D., 1978. pp. 27—39.
- 7) Gollnick, P.D., Piehl, K. and Saltin, B., "Selective Glycogen depletion pattern in human muscle fibers after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates," *J. Physiol. (London)*, 241: 45—57, 1974.
- 8) Hagberg, J.H., Mullin, J.P., Giese, M.D. and Spitznagel, E., "Effect of pedaling rate on submaximal exercise responses of competitive cyclists," *J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 51: 447—51, 1981.
- 9) Högberg, P., "How do stride length and stride frequency influence the energy output during running?" *Arbeitsphysiol.*, 14: 437—41, 1952.
- 10) 加賀谷淳子, 「身体運動と女性」宮下充正・石井喜八(編), 新訂運動生理学概論, 第4版, 大修館書店, 1986. pp. 263—76.
- 11) Merrill, E.G. and White, J.A., "Physiological efficiency of constant power output at varying pedal rates," *J. Sports Sci.*, 2: 25—34, 1984.
- 12) Piehl, K., "Glycogen storage and depletion in human skeletal muscle fibres," *Acta Physiol. Scand. Suppl.*, 402: 1—33, 1974.
- 13) 佐竹昌之・池上晴夫「長距離走におけるピッチとストライドの変化が走効率に及ぼす影響」*体育学研究*, 30: 231—39, 1985.
- 14) Seabury, J.J., Adams, W.C. and Ramey, M.R., "Influence of pedalling rate and power output on energy expenditure during bicycle ergometry," *Ergonomics*, 20: 491—98, 1977.
- 15) Suzuki, Y., "Mechanical efficiency of fast- and slow-twitch muscle fibers in man during cycling," *J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 47: 263—67, 1979.
- 16) 山岡誠一・蜂須賀弘久・五十川敏男・平岡英雄「筋運動の負荷量, 筋収縮速度と酸素需要量の関係—スポーツのエネルギー代謝に関する研究. 第8報—」*体育学研究*, 3: 37—41, 1958.