

長距離ランナーにおける自転車トレーニング導入のガイドライン作成  
～異なるペダリング条件における筋活動様相の相違に着目して～

研究代表者:吉岡利貢

目 次

要 約

第1章 緒 言 .....4

第2章 研究課題 I .....6

第3章 研究課題 I 走運動および自転車運動における筋活動様相 .....6

目 的

方 法

結 果

考 察

結 論

第4章 研究課題 II 異なるペダリング条件における大腿部筋活動様相 .....16

緒 言

方 法

結 果

考 察

結 論

第5章 研究課題 III 高強度インターバル・トレーニングの実践事例 .....23

緒 言

方 法

結 果

考 察

結 論

第6章 まとめ .....34

## 長距離ランナーにおける自転車トレーニング導入のガイドライン作成

～異なるペダリング条件における筋活動様相の相違に着目して～

研究代表者:吉岡利貢

### 要 約

本研究では、長距離走パフォーマンス向上のための自転車運動の効果的な導入方法について、姿勢および回転数から検討することを目的とした。また、幅広い体力レベルの対象者に対して、幅広い介入期間を設け、その効果や留意点について明らかにすることを目的とした。また、この目的を達成するために3つの研究課題（I：走運動および自転車運動における筋活動様相、II：異なるペダリング条件における大腿部筋活動様相、III：高強度インターバル・トレーニングの実践事例）を設定した。

研究課題 I では、筋機能的磁気共鳴画像法 (muscle functional MRI: mfMRI) を用いて、走運動および自転車運動における体幹・下肢の筋活動様相を評価した。その結果、下腿部を除く、ほぼすべての筋で自転車運動が高い筋活動レベルを示した。

研究課題 II では、研究課題 I で用いたペダリング条件から、回転数および姿勢を変化させた際に、筋活動がどのように変化するかを検討し、その結果から長距離ランナーが自転車運動を用いてトレーニングする際に選択すべきペダリング条件を明らかにした。その結果、課題 I で採用した semi-upright 姿勢、90 rpm でのペダリングが、リハビリ等で採用される upright 姿勢や 60 rpm でのペダリングと比較して、ハムストリングを強く動員でき、かつその横断面積の大きさが走の経済性に負に作用する大腿直筋の活動レベルを抑えられることが明らかとなった。

研究課題 III では、自転車運動を用いたクロストレーニングの効果について、幅広い体力レベルの対象者に対して、幅広い介入期間を設け、その効果や留意点について明らかにすることを目的とした。その結果、自転車トレーニングによる有酸素性能力の改善は、対象者のトレーナビリティによって、その程度は異なるものの、ほぼ全ての対象者で認められた。一方、トレーニング量を適正範囲に保つことの困難さや、走トレーニングが不足した場合には走の経済性が低下する可能性も示唆された。

## 第1章

### 緒言

長距離走は、必要とされるエネルギーの90%以上を有酸素性エネルギー供給系からまかなうため、そのパフォーマンスの大部分は、有酸素性エネルギー供給能力、すなわち最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) や乳酸性代謝閾値 (Lactate threshold: LT) によって説明される (Costill et al., 1973; Farrell et al., 1979)。また、一定速度での走行中の酸素摂取量によって評価される走の経済性も長距離走パフォーマンスを説明する主要因の一つである (山地, 1997)。これらの能力を高めるためには、トレーニングの量と強度の両者を適正に保つ必要があるが、長距離ランナーやコーチは、伝統的に強度よりも量を重視しがちである (MacDougall and Sale, 1981; Anderson, 1998)。このようなトレーニング量を重視したトレーニングは、障害の発生率を高め (Macera et al., 1992)、長期にわたるトレーニングの中断を招くばかりでなく、選手生命を短縮させるケースも少なくない。また、トレーニングの量と強度はトレードオフの関係にあり、量の増大は強度の低下を招く。前述の  $\dot{V}O_{2max}$  や LT、さらには長距離走パフォーマンスを説明する主要因の一つである走の経済性を高めるためには一定水準以上の強度が必要である (Daniels et al., 1984; Yoshida et al., 1990; Conely and Krahenbuhl, 1981) ことを考慮すると、強度の低下はパフォーマンス向上に対して負に作用する。

主に有酸素性エネルギー供給能力の高低でパフォーマンスが決定する長距離走であるが、競技レベルが上がり運動時間が短縮するにしたがって、無酸素性エネルギー供給系からのエネルギーの貢献も無視できなくなる。また、競技レベルによらず、近年の国際大会に象徴される急激な速度変化が繰り返されるレースやラストスパートに対応するためには、無酸素性エネルギー供給能力の高さも必要となる (Tanaka and Swensen, 1998)。

これらの相反するトレーニング課題に対して効果的なトレーニングを遂行しているのが、世界歴代記録の上位を独占する東アフリカのランナーであろう。すなわち、彼らのトレーニングは、その他の国のランナーと比較して、量が少なく、強度が高い (Billat et al., 2001)。このようなトレーニングが、有酸素性能力のみならず、無酸素性能力をも改善することに

よって、前述のような急激な速度変化を含むレースにおいても高い確率で勝利を収めているものと推察される。一方、近年、両トレーニング課題に対応するトレーニング手段として、超最大強度運動を繰り返しおこなうスプリント・インターバル・トレーニングが注目されている。すなわち、従来、超最大強度でのトレーニングは無酸素性エネルギー供給能力の向上に主眼が置かれてきたが、休息を挟んで繰り返すことによって、有酸素性エネルギー供給能力の向上にも有効であることが報告されている (Burgomaster et al., 2005; 2006; 2008; Gibala et al., 2006)。さらに、運動様式の相違もトレーニング課題を変化させる可能性を有している。すなわち、自転車運動や水泳といった短縮性筋収縮が主体となる運動では、走運動のような伸張性筋収縮を含む運動と比較して、同等の運動強度であっても筋張力が高く、筋内圧の増大に起因する血流の閉塞を起こしやすい (Hicks et al., 1999)。このことが運動開始時の酸素摂取量の立ち上がりを遅らせ (Hill et al., 2003)、無酸素性エネルギー供給系からのエネルギーの貢献率を増大させる。

著者ほかは、無酸素性エネルギー供給系からのエネルギーの貢献率を増大でき、かつトレーニング量の増大に伴う慢性障害や超最大強度での走運動時に起こりやすい突発性傷害 (いわゆる肉離れなど) を予防できる (O'toole, 1992) トレーニング手段として、クロストレーニングの可能性に着目し、研究を進めてきた。クロストレーニングとは「専門とするスポーツの競技力向上のためにその他のスポーツあるいはトレーニングをおこなうこと」 (Gary and George, 2002) と定義されており、世界の一流ランナーにも実践者は多い (Fitzgerald, 2004; Sparks, 1996)。中でも自転車運動は、走運動と同様、下肢の筋群を動員できることに加え、特別な環境や技術を必要としないことから、長距離ランナーのクロストレーニング手段として導入する際の障壁は低い。一方「自転車運動では走運動とは異なる筋を動員するため効果は低い」あるいは「過剰な筋肥大によってパフォーマンスを低下させる」といったトレーニング現場における懸念も無視できない。このような懸念が生じる背景には、その効果が十分に明らかにされていないことに加え、どのような方法で行うべきかといったガイドラインがないことが挙げられる。

そこで本研究では、長距離走パフォーマンス向上のための自転車運動の効果的な導入方法について、姿勢および回転数から検討することを目的とした。また、幅広い体力レベル

の対象者に対して、幅広い介入期間を設け、その効果や留意点について明らかにすることを目的とした。

## 第2章 研究課題

本研究では、上記の目的を達成するために、以下の研究課題を設定した。

課題 I	走運動および自転車運動における筋活動様相
課題 II	異なるペダリング条件における大腿部筋活動様相
課題 III	高強度インターバル・トレーニングの実践事例

## 第3章

### 研究課題 I 走運動および自転車運動における筋活動様相

#### I. 目的

走運動と自転車運動の間に、筋活動（動員部位や収縮様式）の違いやそれに起因する運動効率（消費した代謝エネルギーに対しておこなわれた力学的仕事の割合；%）の差が存在することが先行研究で明らかになっている（Bijker et al., 2001; 2002）。走運動および自転車運動それぞれの筋活動を明らかにした研究は多いが、それらの研究のほとんどが表面筋電図法を用いているため、表層の筋の活動についてしか明らかにしていない。

近年、筋の形態的情報と代謝的情報を同時に得られる方法として筋機能的磁気共鳴画像法（mfMRI）の利用が運動生理学の研究分野で進んでいる。この方法では、運動前後のMRIの横緩和時間（T2値）を比較することによって、運動に動員された筋の活動レベルを定量することができる。したがって、表面筋電図法では評価できない深層の筋の活動レベルも評価できる。深層の筋も含めた様々な筋の活動を走運動および自転車運動で比較し、異なる要素あるいは近似する要素を明らかにすることは、長距離ランナーが自転車運動をトレーニングに導入する際の貴重な資料となる。

そこで本研究では、mfMRI 法を用いて、走運動および自転車運動における体幹、大腿および下腿の各筋および筋群の活動レベルを比較することを目的とした。

## II. 方法

### A. 被検者

被検者は、運動習慣のある健康な男子学生 7 名 ( $22.9 \pm 1.3$  歳,  $171.9 \pm 4.7$  cm,  $61.0 \pm 5.2$  kg) とした。実験に先立ち、実験の主旨、内容および危険性について被検者へ説明し、実験参加の同意を得た。

### B. 測定項目および測定方法

#### 1. 最大運動負荷テスト

各被検者に対し自転車運動および走運動による最大運動負荷テストをおこなわせた。これらの運動前後に MRI を撮影し、mfMRI により筋活動を評価した。負荷テストには、電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ (PowerMax-VII, コンビウエルネス社) およびトレッドミル (西川鉄工社) を用いた。

自転車運動による測定は、 $1.0$  kp で 5 分間の自転車運動とストレッチング等の準備運動をおこなわせた後、開始した。初期負荷は全ての被検者で  $0.6$  kp とし、1 分毎に  $0.2$  kp ずつ負荷を増加させた。

走運動による測定は、任意の速度で 5 分間の走運動およびストレッチング等の準備体操をおこなわせた後、開始した。初期速度は全ての被検者で  $180$  m/min とし、1 分毎に  $10$  m/min ずつ速度を漸増させた。設定速度での走行が不可能になり、被検者が後方へ移動した時点で運動を終了させた。

#### 2. MRI-T2 値

MRI の T2 値の測定には、永久磁石型 MRI 装置 (Airis mate, 日立メディコ社) を用いた。被検者は、MRI 室内のベッドに仰臥位となり、膝関節がベッドと水平になるように固定した。撮影部位は、右脚の大腿部近位 30%部 (図 1) ,および下腿部近位 30%部および脛

位での腹部とした。事前に、大腿部は大転子から大腿骨外側上顆までの距離にかけて、下腿部は脛骨頭から外果端の距離にかけて、それぞれ近位 30%部を同定した。MRI の撮影は、上記の各部位を中心に、近位および遠位方向にそれぞれ 2 枚、スライス厚 10 mm、スライス間隔 20 mm の設定でおこない、計 15 枚の横断像を得た (TR: 1500 ms, TE: 30/60 ms, FOV: 320 mm, matrix: 256×180, NSA: 1 回, 撮像時間: 各 2 分 39 秒)。以上の撮影を椅坐位による 10 分間の安静後および最大漸増負荷テスト直後におこなった。運動後の撮影は、下腿、大腿、体幹の順におこない、すべての撮影を運動終了後 20 分以内に済ませることを条件とした。なお、各部位の撮影にタイムラグが存在するため、部位間の活動レベルを単純に比較することはできない。また、運動終了後の T2 の低下傾向には体力レベルが関与するため、個人によって差が生じる可能性を含んでいる。

得られた横断像のうち、大腿部および下腿部はそれぞれ近位 30%部の画像を、腹部は呼吸の影響を受けない最も遠位の画像を解析に用いた。横断像はパーソナルコンピュータ (iMAC; Apple, Japan) に取り込み、画像処理ソフトウェア (NIH Image J; National Institute of Health, USA) により大腿部は外側広筋 (VL: m. vastus lateralis), 内側広筋 (VM: m. vastus medialis), 中間広筋 (VI: vastus intermedius), 大腿直筋 (RF: m. rectus femoris), ハムストリング (HAM: hamstring muscle), 長内転筋 (AM: m. adductor magnus) および大内転筋 (AL: m. adductor longus), 下腿部は腓腹筋 (Gas: m. gastrocnemius), ヒラメ筋 (m. soleus), および前脛骨筋 (TA: m. tibialis anterior), 腹部は大腰筋 (PM: m. psoas major) の T2 値を安静時および運動直後でそれぞれ算出した (式 1)。

$$T2 \text{ (ms)} = 30 / [\ln(SI(30)/SI(60))] \cdots \cdots \text{式 1} \quad \text{※ ln: Natural log, SI: Signal Intensity}$$

T2 値の分析には、脂肪、血管および腱を含まないようおこなった。安静および運動後の T2 値から式 2 によって T2 値変化率 (T2%) を算出し、活動レベルの指標とした (式 2)。

$$T2\% = (\text{運動後 } T2 / \text{安静時 } T2 - 1) \times 100 \cdots \cdots \text{式 2}$$

また、自転車運動における T2%と走運動における T2%の差を $\Delta T2\%$ とした (式 3).

$$\Delta T2\% = \Delta T2\%_{\text{cycling}} - \Delta T2\%_{\text{running}} \dots \text{式 3}$$

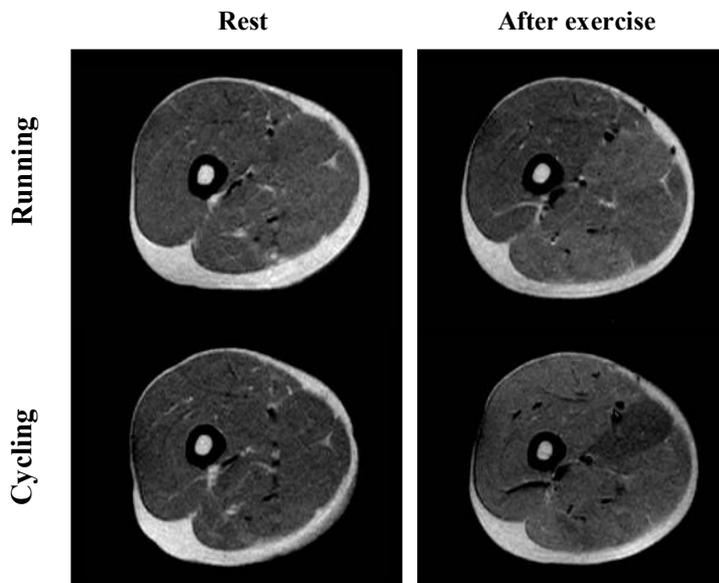


図 1 安静時 (左) および運動直後 (右) の大腿部 T2 強調画像

### C. 統計解析

統計量は、平均値±標準偏差 (図のみ平均値±標準誤差) で示した。各筋あるいは筋群における運動前後の T2 値の比較、条件間の $\Delta T2\%$ 、 $\dot{V}O_{2\max}$  およびその関連指標の比較には、対応のある t-検定を用いた。同一条件における各筋あるいは筋群間の T2 値変化率の比較には、一元配置の分散分析および多重比較 (Tukey-HSD test) を用いた。項目間の相関関係の検討には、Pearson の積率相関係数を用いた。統計的有意性は、危険率 5%未満で有意差ありと判定した。

## III. 結果 (図 2)

### A. 走運動における各筋および筋群の筋活動レベル

体幹部の大腰筋が、17.8%と最も高い活動レベルを示し、大腿四頭筋を構成する外側広筋 (1.6%)、中間広筋 (0.4%) および内側広筋 (4.3%) との間に有意な差が認められた。

大腿部では、長内転筋（16.0%）の活動レベルが最も高く、大内転筋（11.3%）とハムストリング（11.2%）はほぼ同等の値を示した。一方、広筋群は、内転筋群およびハムストリングと比較し、顕著に低い活動レベルを示し、外側広筋および中間広筋において、長内転筋との間に有意な差が認められた。一方、大腿直筋（8.6%）は広筋群よりやや高い活動レベルを示した。下腿部では、ヒラメ筋（1.1%）の活動レベルが最も低く、前脛骨筋（17.7%）および腓腹筋（13.8%）との間に有意な差が認められた。

#### B. 自転車運動における各筋および筋群の筋活動

体幹部の大腰筋の活動レベルは 11.6%であった。大腰筋の活動レベルを下肢の筋と比較すると、ハムストリング（25.7%）よりは有意に低かったが、その他の筋との間に有意な差は認められなかった。大腿部の筋活動レベルはハムストリングが最も高く、長内転筋（1.6%）が最も低かった。最も低い活動レベルを示した長内転筋の活動レベルと、ハムストリング、内側広筋（16.1%）、大腿直筋（16.2%）および大内転筋（16.8%）との間に有意な差が認められた。また、下腿部では、腓腹筋（0.2%）の活動レベルが最も低かったが、前脛骨筋（6.8%）およびヒラメ筋（5.9%）との間に有意な差は認められなかった。

#### C. 自転車運動と走運動の筋活動の差

自転車運動と走運動の筋活動レベルは、大腿部および下腿部の筋で有意な差が認められた。すなわち、大腿部では長内転筋を除く全ての筋において自転車運動で高い活動レベルを示し、外側広筋、中間広筋、内側広筋およびハムストリングにおいて有意な差が認められた。一方、長内転筋は走運動で自転車運動と比較して有意に高い活動レベルを示した。下腿部では、腓腹筋および前脛骨筋において、走運動が有意に高い活動レベルを示した。体幹部の大腰筋の活動レベルは走運動で高値を示したが、その差は有意ではなかった。

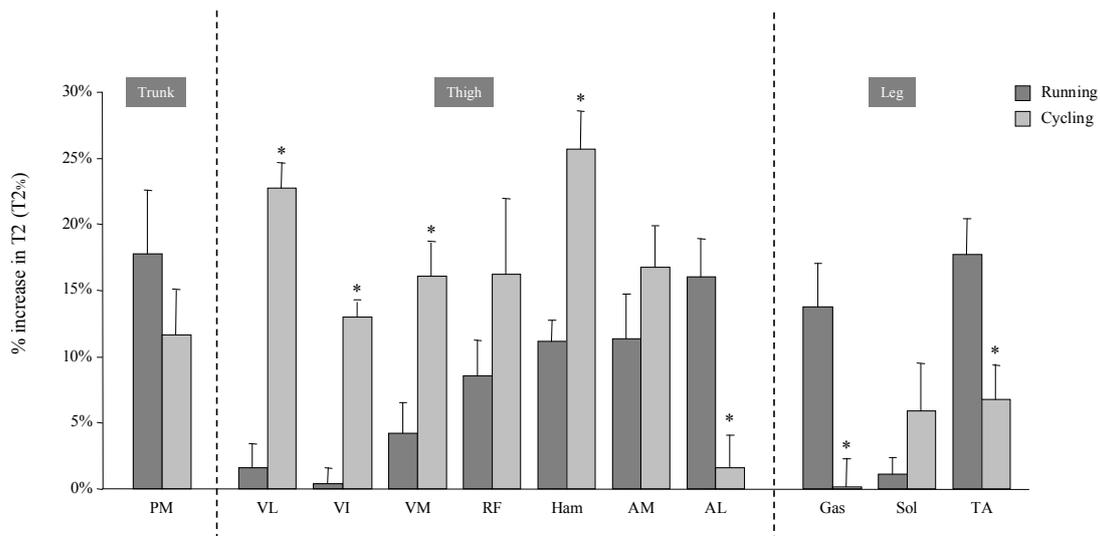


図2. 各筋における運動前後の T2 値変化率

PM : 大腰筋, VL : 外側広筋, VI : 中間広筋, VM : 内側広筋, RF : 大腿直筋, Ham : ハムストリング, AM : 大内転筋, AL : 長内転筋, Gas : 腓腹筋, Sol : ヒラメ筋, TA : 前脛骨筋

\*: significant difference between running and cycling.

#### IV. 考 察

##### A. 漸増負荷最大自転車運動における体幹・下肢筋活動

本研究では、mfMRI を用いて自転車運動の主動作に関与すると考えられる筋および筋群の活動を体幹の深層の筋を含めて評価した。その結果、体幹の深層に位置する大腰筋が、ハムストリングよりは有意に低いものの、大腿四頭筋や大内転筋と同等の高い筋活動レベルを示した。このことは、大腿四頭筋やハムストリングと同様に、大腰筋も自転車運動の主働筋であることを示している。これまで股関節屈曲作用を有する大腰筋の活動については、表面筋電図で明らかにできないため、特にダイナミックな運動中についてはほとんど検討されていない。我々の知る限り、本研究は、自転車運動時の大腰筋の活動を明らかにした初めての研究である。また、その活動が大腿部の大筋群と同等であったことは非常に興味深い。大腰筋は、腰椎に起始を持ち大腿骨骨頭に停止する筋であり、上半身と下半身を結ぶ唯一の筋である。この筋の重要性については、アスリートを対象にした研究 (Hoshikawa et al., 2006; 大川ほか, 2004) のみならず、転倒による寝たきりの危険性が高い高齢者を対象にした研究 (Takahashi et al., 2006; Imamura et al., 1983; Masuda et al., 2002) でも着目されている。また、大腰筋を強化するためのトレーニング方法につい

でも様々なメディアで取り上げられていることから社会的関心は高い。しかしながら、体力トレーニング手段としてポピュラーな自転車運動によって大腰筋がどの程度動員されているかは未知であった。したがって、本研究の結果は様々な対象に対する自転車運動の有効性を示唆するものといえる。ただし、筋活動には様々な条件が関与するため、本研究で用いた自転車運動の姿勢、負荷および回転数などが大腰筋の活動をより活発にした可能性もある。今後、大腿部や体幹表層部の筋を対象に表面筋電図を用いて検討されてきたように、これらの条件を変化させた際の大腰筋の活動についても検証する必要があるだろう。

一方、これまでも多くの研究で報告されている大腿部の筋活動レベルは、ハムストリングで最も高い値を示した。本研究でハムストリングの筋活動が大腿四頭筋より大きかったことには、自転車運動中の姿勢やシューズのタイプ、さらには負荷重量や回転数が関係しているものと考えられる。すなわち、本研究では **Semi-upright** タイプの自転車エルゴメータを用いた。この自転車エルゴメータでは **upright** タイプの自転車エルゴメータと比較して骨盤を含めた体幹が前傾するため、ハムストリングの起始と停止との距離が長くなり、ハムストリングの筋張力およびそれに起因する (Sullivan et al., 1992) 筋活動レベルが高くなったと考えられる。実際、サドル高の異なる 3 種類の全力ペダリング運動におけるハムストリングの筋活動を評価した木越ほか (2003) は、体幹の前傾が大きくなるサドル高の高い条件においてハムストリングの筋活動レベルも大きくなることを報告している。また、シューズとペダルをストラップによって固定させたことによって、上死点から下死点のみならず、下死点から上死点においてもペダルからの力を利用しやすくなる (Hug and Dorel, 2009)。このことも股関節伸展および膝関節屈曲の主働筋であるハムストリングの活動レベルを増大させたと考えられる。さらに、Neptune et al. (1997) は、ハムストリングを構成する半腱様筋あるいは大腿二頭筋が 45 rpm から 120 rpm の範囲において、回転数の上昇に伴い筋活動レベルを増大させることを報告している。

一方、自転車運動時の大腿部の筋活動について、同様に MRI の T2 値を用いた Akima et al. (2005) の研究では、大腿四頭筋を構成する外側広筋が最も大きな活動を示すこと、ハムストリングの活動は大腿四頭筋の活動と比較して小さいことなどが報告されている。Akima et al. (2005) の用いたエルゴメータと本研究で用いたエルゴメータは同種である

が、それにもかかわらず筋活動に違いが生じた原因として、負荷重量および回転数の相違が挙げられる。すなわち、本研究で用いた負荷は、最大でも体重×0.05 kp 程度であり、回転数も 90 rpm に規定した。一方、6 秒間の最大運動を繰り返しおこなわせた Akima et al. (2005) の研究では、体重×0.075 kp の負荷であったことに加え、最大回転数も非常に高く、平均でも 140 rpm 程度にまで達していたと推定される。一般成人において、膝関節の屈曲力は伸展力より低い。したがって、最大努力時には相対的に高い力を発揮できる伸展動作が優位になったと考えられる。

大内転筋と長内転筋は、ともに股関節の内転に作用する筋であるが、自転車運動中には、大内転筋の活動レベルが顕著に高く、両者の間に有意な差が認められた。前述の Akima et al. (2005) の研究や被検者にプロサイクリストを用いた Hug et al. (2006) の研究でも同様の結果が示されている。

#### B. 漸増負荷最大走運動における体幹・下肢筋活動

大腿四頭筋を構成する筋のうち、大腿直筋を除く広筋群の活動レベルはすべて 5%を下回り、この値はその他の筋より顕著に低かった。広筋群の活動レベルが低かったことには走運動の特性と MRI の T2 値の特性が関係している。大腿四頭筋のうち、最も高い活動レベルを示した外側広筋は、接地期前半に伸張性収縮によって膝関節伸展に働く。この作用は、接地に伴う衝撃力の緩和や体重保持を担う重要な機能である。骨格筋の T2 値が伸張性収縮で短縮性収縮と比較して低値を示すことは既に Adams et al. (1992) によって報告されているが、この現象は、表面筋電図を用いて伸張性筋収縮と短縮性筋収縮の特性を比較した研究によって説明できる。すなわち、伸張性収縮では、短縮性収縮と比較して、より少ない運動単位の動員で同等のパワーを発揮できる (Moritani et al., 1987)。したがって、本研究で広筋群の T2 値が低かったことは、広筋群による発揮パワーが小さいことを示すものではなく、より少ない運動単位の動員で高いパワーを発揮できる効率の良い伸張性筋収縮をおこなっていることを示しているといえる。

一方、本研究では大腰筋が最も高い活動レベルを示した。大腰筋はその横断面積と短距離走パフォーマンスに強い関係が見られることから、走運動の主要な活動筋であることは

推察できた。また、走運動時の大腰筋活動を針筋電図によって評価した Andersson et al. (1998) は、大腰筋は、立脚相の後半から遊脚相の前半にかけて活動した後、一度活動を弱め、遊脚相の終盤で再び働き始めることを報告している。なお、最初の活動は股関節の屈曲作用、次の活動は前額面での体幹の動きを調整あるいは安定させるために働いている。このように、大腰筋の活動を定性的に評価した研究はあるが、その活動レベルを走運動の主働筋とされる下肢の筋と比較した研究はない。本研究の結果は、大腰筋が大腿部や下腿部の筋とともに走運動の主働筋として重要な役割を担うことを示唆している。

また、前脛骨筋や長内転筋といった様々な局面で動員される筋も大腰筋に次いで高い活動レベルを示した。すなわち、前脛骨筋は接地時に非常に大きな伸張性の活動を示し、離地後の遊脚相では足関節の固定に貢献する (Elliott et al., 1979) ため、その他の筋と比較して1サイクル中の活動時間の割合が長い (Mann and Hagy, 1980a; 1980b; Nilsson et al., 1985)。また、内転筋群が走運動中の全ての局面で動員される (Mann and Hagy, 1980b) ことも明らかにされている。

### C. 走運動と自転車運動における筋活動レベルの差

走運動と自転車運動の筋活動を比較したところ、大腿部では、長内転筋を除くすべての筋で自転車運動の方が高い活動レベルを示した。このことは両運動の筋収縮様式の相違によって説明できる。前述のように、走運動において大腿四頭筋は伸張性収縮が主要な筋活動様式であるのに対して、自転車運動では主に短縮性収縮を用いる。また、ハムストリングや大内転筋は走運動でも短縮性収縮を含むが、すべての筋活動に占めるその割合は自転車運動で高い。一方、長内転筋は大腿部では唯一、走運動で高値を示した。長内転筋は股関節の内転に加えて、一定の股関節角度域においては屈曲を補助する役割も有する。両運動間の股関節可動域の差が長内転筋の活動レベルに影響したものと推察される。

下腿三頭筋および前脛骨筋は走運動で自転車運動より高い活動レベルを示した。前述のように、走運動では全ての局面で前脛骨筋が動員され、下腿三頭筋は離地時に高い短縮性の活動をおこなう。一方、自転車運動時には、これらの筋は休息期が存在すること、さらには引き上げ動作を強調しない限り、高い活動レベルは得られないことが筋活動レベルの

差に表れたものと考えられる。

以上の結果は、たとえ最大運動であっても、用いる運動様式によって筋は十分な余力を残していることを示している。すなわち、筋活動レベルの高低を決定する要因の一つとして、筋線維および神経からなる運動単位の動員数が挙げられることから、今回の結果は、走運動では自転車運動と比較して大腿部の運動単位の動員数が少なかった可能性を示している。したがって、大腿部の筋に着目すると、自転車運動は走運動では動員できない運動単位まで動員することが可能な運動様式であり、大腿部の代謝能力を高めるためには走運動より優れている可能性を示唆している。

一方、本研究の主な被検筋の一つである大腰筋は、走運動および自転車運動のいずれも高いレベルの活動をおこなうことが明らかとなった。このことは、筋や関節の障害のリスクを軽減できる自転車運動によって、歩行や走行能力を十分高められる可能性を示唆しており、トレーニング過多による障害の頻度が高い長距離ランナーや転倒の危険性が高い高齢者のトレーニング手段としての自転車運動の有効性を支持する結果であるといえよう。

## 結 論

走運動で動員される多くの筋が自転車運動でも動員でき、かつ大腿部においては、ほぼ全ての筋の活動レベルが自転車運動で有意に高値を示した。このことは、長距離走ランナーのためのクロストレーニング手段としての自転車運動の有効性を示唆する結果といえ、「特異性の原理」から自転車運動を否定することはできないことを示している。

研究課題 II では、課題 I で採用したペダリング条件から姿勢および回転数を変化させた場合に筋活動様相がどのように変化するかを検討する。

## 第 4 章

### 課題 II 異なるペダリング条件における大腿部筋活動様相

#### I. 目的

課題 1 において、特に大腿部において、自転車運動が走運動と比較して高い筋活動レベルを示すことが明らかとなった。しかしながら、自転車運動では、負荷、回転数および姿勢が変化すれば筋活動様相が変化することが明らかとなっている。また、疲労によって筋活動部位が変化することも明らかにされている。近年、超最大強度インターバル・トレーニングの有酸素性能向上のためのトレーニングとしての可能性が注目されている (Burgomaster et al., 2005; 2006; 2008; Gibala et al., 2006)。このトレーニングでは、通常疲労困憊に至るまで運動が継続される。したがって本研究では、上記の条件（姿勢、負荷および回転数）を変化させた上で疲労困憊まで運動させた際の筋活動を評価することを目的とした、

#### II. 方法

健康な成人男性 8 名 ( $22.9 \pm 1.3$  歳,  $171.9 \pm 4.7$  cm,  $61.0 \pm 5.2$  kg) を対象とした。実験に先立ち、実験の主旨、内容および危険性について被検者へ説明し、実験参加の同意を得た。

##### B. 測定項目および測定方法

###### 1. 自転車ペダリングテスト

各被検者に対し、自転車運動による 3 種の最大運動負荷テストをおこなわせた。これらの運動前後に MRI を撮影し、mfMRI により大腿部の筋活動を評価した。また、運動直後および MRI 撮影後（運動終了 6 分後）に、指先より採血し、血中乳酸濃度を測定した。負荷テストには、電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ (PowerMax-VII, コンビウエルネス社) を用いた。

i) semi-upright・高回転数条件

高回転試技における回転数は、90 rpm とした。測定は、体重×0.02 kp で 5 分間の自転車運動をおこなわせた後、開始した。負荷は、体重×0.05 kp とし、回転数を維持できなくなった時点で運動を終了した。なお、ペダリング時は、体幹を前傾させる semi-upright 姿勢（写真 1）を取ることにした。

ii) semi-upright・低回転数条件

低回転試技における回転数は 60 rpm とした。測定は、体重×0.03 kp で 5 分間の自転車運動をおこなわせた後、開始した。負荷は、体重×0.075 kp とし、回転数を維持できなくなった時点で運動を終了した。なお、ペダリング時は、体幹を前傾させる semi-upright 姿勢を取ることにした。

iii) upright・高回転数条件

Upright 試技における回転数は 90 rpm とした。測定は、体重×0.02 kp で 5 分間の自転車運動をおこなわせた後、開始した。負荷は、体重×0.05 kp とし、回転数を維持できなくなった時点で運動を終了した。なお、ペダリング時は、体幹を直立させる upright 姿勢（写真 2）を取ることにした。



写真 1 semi-upright 姿勢



写真 2 upright 姿勢

## 2. MRI-T2 値

MRI は、研究課題 I と同様の条件で大腿部 50%部を撮像した。また、大腿部を構成する各筋の平均 T2 値を安静時および運動直後でそれぞれ算出し、その変化率 (T2%) を筋活動レベルとした。

### C. 統計解析

統計量は、平均値±標準偏差 (図のみ平均値±標準誤差) で示した。条件間の各筋あるいは筋群における運動前後の T2 値の比較には、対応のある t-検定を用いた。同一条件における各筋あるいは筋群間の T2 値変化率の比較には、一元配置の分散分析を用いた。項目間の相関関係の検討には、Pearson の積率相関係数を用いた。統計的有意性は、危険率 5%未満で有意差ありと判定した。

## III. 結果

### A. 姿勢の相違の影響

semi-upright 姿勢および upright 姿勢での筋活動を比較すると、大腿四頭筋を構成する 4 つの筋は、すべて upright 条件で高値を示し、RF においてその差は有意であった。一方、ハムストリングを構成する BF、ST および SM は、semi-upright 条件で高値を示す傾向にあったが、その差は有意ではなかった。血中乳酸濃度は、semi-upright 条件で  $6.83 \pm 1.41$  mmol/L、upright 条件で  $6.03 \pm 1.94$  mmol/L と semi-upright 条件で高値を示す傾向 ( $P=0.077$ ) にあったが、有意な差は認められなかった。

### B. 回転数の相違の影響

Semi-upright 姿勢での大腿部筋活動を比較すると、大腿四頭筋を構成する 4 つの筋の活動レベルは全て 60 rpm で有意に高値を示した。一方、半腱様筋および長内転筋は、90rpm で有意に高値を示した。血中乳酸濃度は、90 rpm で  $6.83 \pm 1.41$  mmol/L、60 rpm で  $6.45 \pm 2.51$  mmol/L と両者の間に有意な差は認められなかった。

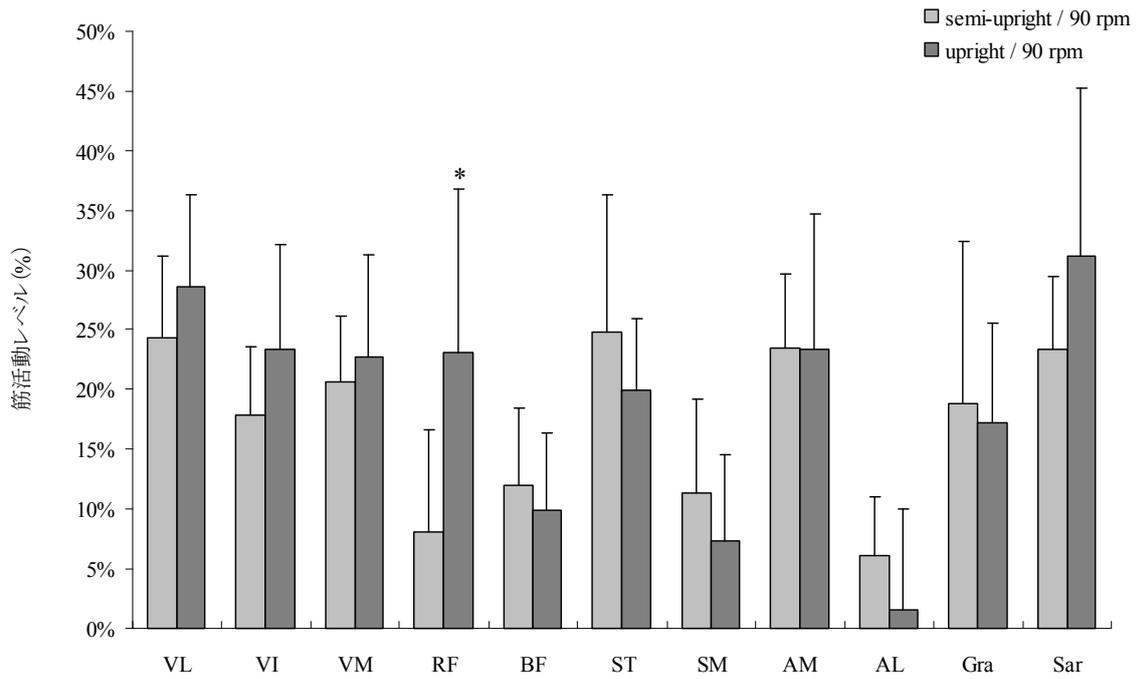


図3 異なる姿勢における大腿部筋活動

\* v.s. Semi-upright / 90 rpm

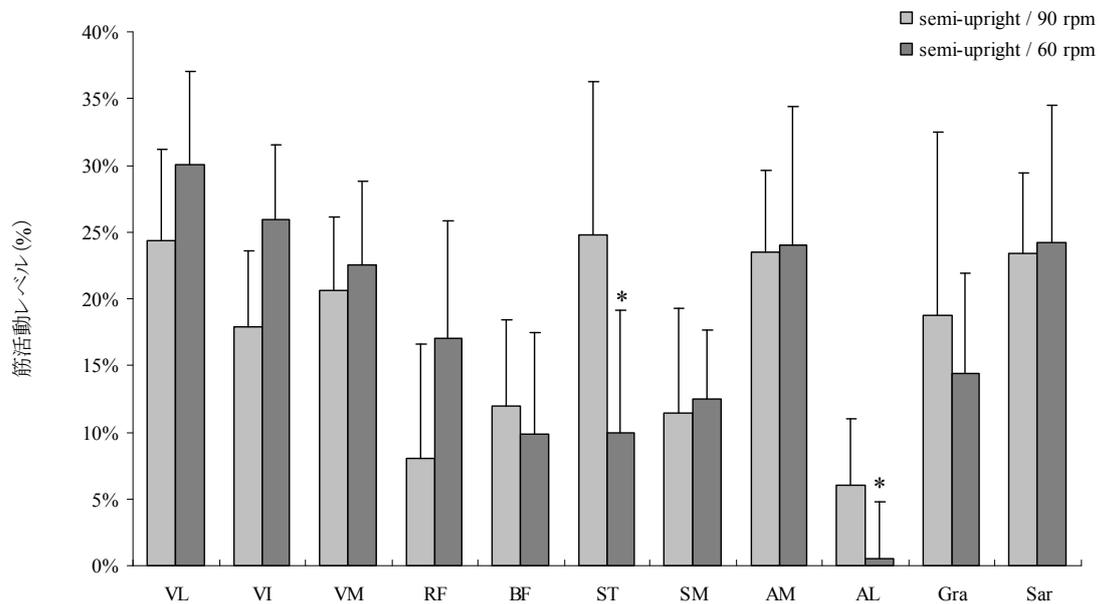


図4 異なるペダリング回転数における大腿部筋活動

\* v.s. Semi-upright / 90 rpm

### C. 同一条件内での筋間の活動レベルの関係

各条件において、各筋の活動レベル間の相関関係について検討すると、90 rpm におい

ては、大腿四頭筋を構成する VI と VL の活動レベルの間に有意な相関関係が認められなかった ( $r = 0.39$ ) が、60rpm では有意な相関関係が認められた ( $r = 0.80$ )。一方、VI と RF の活動レベルの間には、90rpm にのみ有意な相関関係が認められた (90 rpm:  $r = 0.78$ ; 60 rpm:  $r = 0.32$ )。upright 条件においては、大腿四頭筋を構成する 4 つの筋の活動レベルの間に有意な相関関係は認められなかった。

#### IV. 考 察

本研究の結果、semi-upright から upright へ姿勢を変化させることによって、大腿直筋の活動レベルが有意に増大した。また、有意ではないものの、ハムストリングを構成する大腿二頭筋、半腱様筋および半膜様筋の活動レベルが低下する傾向にあった。走運動において、ハムストリングの活動レベルが大腿四頭筋と比較して高値を示す (課題 I) ことを考慮するとランニングパフォーマンス向上のために自転車運動を用いたトレーニングを行う際には、semi-upright 条件が望ましいと考えられる。加えて、これまでに短距離走のみならず長距離走においても、ハムストリングの横断面積が大きい者ほどパフォーマンスが高いことが報告されている (狩野ほか、1997; 吉岡ほか、2009) ことも、ハムストリングを強く動員できるペダリング条件が望ましいことを強調する。

また、著者ほか (2009) は、これまでに、大腿直筋の横断面積が大きいランナーほどランニングエコノミーが低いことを報告している。自転車運動においては走運動と比較して筋収縮時間が長く筋内圧が高くなることが報告されている。筋内圧の上昇によって血流が制限されると筋内は低酸素環境にさらされる。筋の低酸素状態がホルモン応答を介して筋肥大を誘発する一要因となることがスロートレーニングや加圧トレーニングによる筋肥大の機序を解明するための研究で報告されている。このことは、長距離走パフォーマンス向上のためのペダリング条件として、大腿直筋の活動レベルが抑えられる条件が優れていることを示唆するものである。

これまでに報告されている、姿勢変化が筋活動に及ぼす影響についての研究の多くは、サドル高を変化させている。たとえば、Joge and Hull (1986) はサドル高を「最適」な高さ (大転子高の 100%) の 95% に設定した場合、「最適」高と比較して、大腿四頭筋お

よびハムストリングの活動レベルが増大することを報告している。また、サドル高の異なる 3 種類の全力ペダリング運動におけるハムストリングの筋活動を評価した木越ほか (2003) は、体幹の前傾が大きくなるサドル高の高い条件においてハムストリングの筋活動レベルも大きくなることを報告している。一方、坐骨結節と内果間距離の 102%と 120% を比較した Eriscon et al. (1986) は、大腿四頭筋を構成する大腿直筋および内側広筋の活動に差がなかったことを報告している。なお、本研究と同様に、サドル高を変化させず体幹の角度変化の影響について検討した研究は著者の知る限り一つしかない。Savenberg et al. (2003) は、体幹の前傾角度を大きくすることによって大臀筋の活動レベルが有意に増大することを明らかにしている。本研究では大臀筋の活動を評価していないため比較することはできないが、同様に股関節伸展の主働筋であるハムストリングの筋活動レベルは体幹の前傾角度が大きくなる semi-upright 条件で高値を示す傾向にあった。

姿勢の変化に加えて、回転数の変化も大腿部の筋活動を変化させた。これまでにも姿勢の変化が筋活動様相に及ぼす影響については検討されているが、これらの研究では、upright 姿勢で回転数を変化させた研究や姿勢が記述されておらず、それらの結果をトレーニング時の回転数選択には応用することはできなかった。本研究の結果、回転数を低下させると、ハムストリングを構成する半腱様筋および長内転筋の活動レベルが有意に低下することが明らかとなった。半腱様筋の活動レベルが低下することのデメリットは前述のとおりである。長内転筋は、semi-upright かつ 90 rpm の条件で走運動と比較して低い活動レベルを示すことが課題 I で明らかになっている。したがって、それ以上に活動レベルが抑えられることは望ましくない。なお、90 rpm を超える回転数でのペダリング、たとえば近年その有酸素性能力への効果も期待されるようになった全力ペダリング (Burgomaster et al., 2005; 2006; 2008; Gibala et al., 2006) 時に長内転筋の活動が高まるか否かについては検討されていない。

最後に、回転数を変化させることによって大腿四頭筋を構成する筋の活動レベルの関係性に変化が生じるという結果は興味深い。大腿四頭筋を構成する 4 つの筋のうち、大腿直筋のみは股関節と膝関節をまたぐ 2 関節筋である。したがって、姿勢の変化に伴って大腿直筋の活動レベルが変化した結果は理解しやすい。しかしながら、回転数を変化させるこ

とによって、ともに膝関節伸展のみに作用する内側広筋と外側広筋の活動レベルの間の相関関係が変化した。この結果は、大腿四頭筋を構成する広筋群の中でも条件によって活動様相は異なることを示している。その機序は明らかでないため、今後回転数の相違および負荷の相違がペダリング時の動作にどのような影響を及ぼすかを明らかにする必要があるだろう。

## V. 結論

本研究の結果、長距離走パフォーマンス向上を目的に自転車運動を導入する場合、課題 I で採用した *semi-upright* 姿勢、90 rpm でのペダリングが、リハビリ等で採用される *upright* 姿勢や 60 rpm でのペダリングと比較して優れていることが示唆された。

## 第5章

### 課題 III 高強度インターバル・トレーニングの実践事例

#### I. 目的

長距離走パフォーマンスの向上をねらったトレーニングは、主に走運動によって実践される。しかしながら近年、高重量あるいは爆発的な筋力トレーニングが走の経済性を改善するという研究成果 (Paavolainen et al., 1999a) が発表されるなど、長距離走パフォーマンスの改善には、走運動のみに拠らない多角的な取り組みが必要である可能性が示唆されている。著者はこれまでに、6 週間の中・高強度自転車運動の導入が有酸素性能力のみならず無酸素性能力や最大筋力、さらには筋持久力を向上させることを明らかにしている (吉岡ほか, 2005)。しかしながら、対象の体力レベルが低いことなど、自転車トレーニングの効果をトレーニング現場に啓蒙する観点からは、十分とはいえない。

トレーニング介入において、一定水準以上の体力を有するランナーのみを対象とすることは極めて困難である。また、6 週間という介入期間は、介入研究においては標準的であるが、トレーニング現場では、さらに長期あるいは目的に沿った短期導入の効果についての情報が必要とされている。

そこで本研究では、様々な競技・体力レベルのランナーに対する、長期間あるいは短期間の自転車トレーニングの導入事例から、総合的に自転車トレーニングの効果について考察することを目的とする。また、様々な対象あるいは期間を設けることによって、自転車トレーニングを導入する際の留意点を収集することも目的とした。

#### II. トレーニング内容

自転車トレーニングには、電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ (PowerMax-V あるいは VII, コンビウエルネス社) を用いた。トレーニング内容は、以下の 2 種類であった。

##### A. 超最大強度インターバル・トレーニング (超最大強度 IT)

まず1分間毎に0.2 kp ずつ負荷を漸増させる最大漸増負荷テストによって疲労困憊にいたるまでの運動をおこない、1分間継続できた最も高い負荷を最大負荷 ( $L_{max}$ ) とした。なお、回転数は90 rpm とした。その後、24時間以上の休息を挟み、 $L_{max}$  での最大運動テストをおこなった。そして、このテストでの運動継続時間 ( $T_{max}$ ) を基準にトレーニング負荷および時間を決定した。すなわち、 $L_{max}$  での運動を60%  $T_{max}$  の運動時間および休息时间をもって疲労困憊まで繰り返すインターバル・トレーニングを超最大強度インターバル・トレーニングとした。なお、このトレーニングの運動強度は、 $110\% \dot{V}O_{2max}$  程度に相当する。

#### B. スプリント・インターバル・トレーニング (スプリント IT)

体重 $\times 0.075$  kp の負荷で、30秒間の全力ペダリング運動を4分間の休息を挟み、4~7セットおこなうトレーニングをスプリント・インターバル・トレーニングとした。

### III. 事例

2週間で6回という短期間の介入から1年以上に及ぶ長期間の介入まで、これまでにこなってきたトレーニング介入は13名で、のべ15例になる(表1)。様々な期間、頻度およびトレーニングのタイプを採用しており、そのうち、特筆すべき7名の9例について以下に紹介する。

#### A. 2時間台でのマラソン完走を目標とする男性市民ランナーの事例

2時間台でのマラソン完走を目標とする市民ランナー(38歳)を対象とした。自転車トレーニング導入前の自己ベスト記録は開始3ヶ月前のレースで記録した3時間44分39秒であった。

1年間、継続して週に2回、自転車トレーニングを導入した。開始から9ヶ月間は超最大強度ITを、その後の3ヶ月間はスプリントITをおこなった。走トレーニングは、自転車トレーニング開始前3ヶ月が週あたり17.0 kmであったのに対して、1年後の同時期には25.7 kmとやや増大した。トレーニングに伴うLaカーブの推移を図5に示した。カー

表1 トレーニング事例一覧

Sub.	Sex	Age	Training duration	Training Type	Frequency session/week	Event	Performance	$\dot{V}O_{2max}$ ml/kg/min	V2.5mM m/min	OBLA m/min	RE	Others
A	Male	37	1.5 yr	SmIT/SpIT	2	Marathon	3:44:00 <b>3:12:13</b>	61.3 62.3	207.1 <b>259.2</b>	228.0 <b>280.0</b>	↑	
B	Male	21	3 mon	SpIT	2	800 m	2:01.79 <b>1:59.03</b>		230.5* <b>264.0*</b>			6.3% ↓ HR <sub>submax</sub> 7.4% ↑ V <sub>peak</sub>
C	Male	21	3 mon	SpIT	1	3000 mSC	9:33.00 <b>9:09.63</b>		311.7 <b>314.8</b>	329.2 <b>336.0</b>	→	
			1 mon	SpIT	1	1500 m	4:04.15 <b>4:03.85</b>		306.8 <b>308.6</b>	321.2 <b>324.5</b>	→	
D	Male	45	1 yr	SpIT	2	Half Marathon	1:24:00 1:26:15					
E	Male	20	3 wk	SpIT	3	5000 m	16:25 <b>16:00</b>	62.2 <b>66.6</b>	243.2 <b>261.6</b>	252.9 <b>276.0</b>	↑	7.1% ↑ V <sub>peak</sub>
F	Male	30	6 wk	SmIT	2	Marathon	3:10:10 <b>2:46:38</b>	66.1 <b>63.7</b>	262.8 <b>281.9</b>	287.2 <b>298.0</b>	↓	
G	Male	45	8 wk	SmIT	2	Marathon	2:50:17 2:57:34	61.8 61.8	277.9 <b>282.1</b>		↑	
			8 wk	SmIT	2	Marathon	2:57:10 3:10:04		262.1 <b>270.9</b>	279.4 <b>284.9</b>	↑	
H	Male	51	1 mon	SmIT	2	Half Marathon		49.7 49.7	189.0 <b>196.2</b>	198.7 <b>224.8</b>	↑	
I	Male	24	2 wk	SpIT	3	Marathon	3:24 <b>3:13</b>	61.2 <b>63.7</b>	203.5 <b>218.6</b>	224.7 <b>246.8</b>	→	3.6% ↑ V <sub>peak</sub>
J	Male	21	2 wk	SpIT	3	Time to exhaustion	41:20 <b>50:15</b>		209.8 208.5	226.4 <b>227.1</b>		3.8% ↑ V <sub>peak</sub>
K	Male	23	2 wk	SpIT	3	Time to exhaustion	29:00 <b>38:25</b>	46.8 <b>50.9</b>	233.5 <b>238.7</b>	251.7 <b>256.1</b>	↓	4.2% ↑ V <sub>peak</sub>
L	Male	26	4 wk	SpIT	2	V <sub>peak</sub>	325 m/min <b>345 m/min</b>	67.1 63.6	251.5 <b>278.2</b>		→	48.0% ↑ La <sub>peak</sub>
M	Male	23	4 wk	SpIT	2	V <sub>peak</sub>	265 m/min <b>285 m/min</b>	54.1 <b>55.4</b>	188.0 <b>237.2</b>		↑	23.9% ↑ La <sub>peak</sub>

Upper data: Pre training. Lower data: Post training

SmIT: SubMaximal Interval Training

SpIT: Sprint Interval Training

V<sub>peak</sub>: Peak velocity of incremental running test

$\dot{V}O_{2max}$ : Maximal oxygen uptake

V2.5mM: Velocity at 2.5 mmol/l of blood lactate concentration

OBLA: Velocity at 4 mmol/l of blood lactate concentration

RE: Running economy, ↑: improve / ↓: deteriorate

\*: Lactate threshold

ブは右下方に移行し、これらのデータから算出した V2.5mM および V<sub>OBLA</sub> には、それぞれ 25.4%および 21.5%の大幅な向上がみられた。自転車トレーニング導入前に 3 時間 44 分 39 秒であったマラソンパフォーマンスは、トレーニング開始 9 ヶ月後に 3 時間 26 分 11 秒まで、12 ヶ月後に 3 時間 12 分 13 秒まで短縮した。また、V2.5mM および V<sub>OBLA</sub> も大幅に向上した。

内省調査から得られた自転車トレーニングの効果として「苦しくなってからもスピードを維持できる」、「弾むように走れるようになった」などが挙げられた。一方、自転車運動で高めた体力を走運動において出力する際の効率の悪さも指摘した。すなわち、走トレーニングでは、LT 付近までの比較的低い強度でしかおこなっていなかったため、それ以上の強度になった際に、体力的には余力を感じながらも、うまく走れない現象が生じていた。

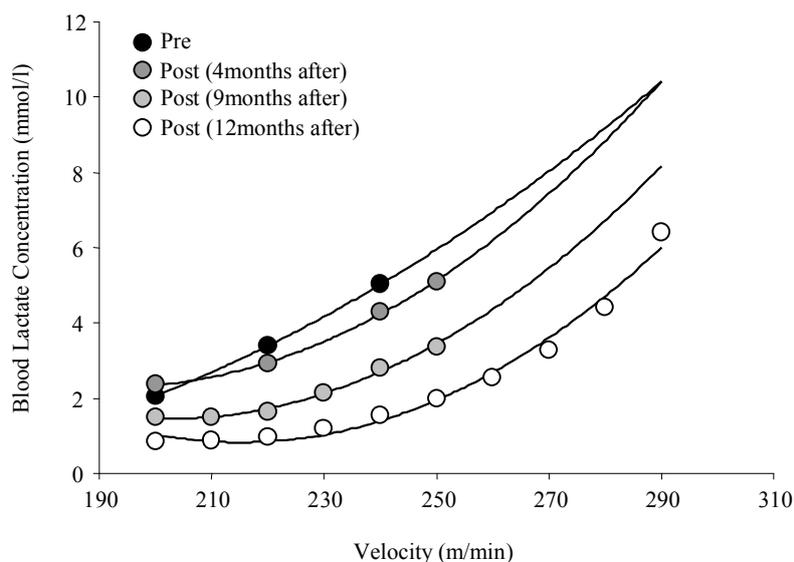


図5 クロストレーニングによる血中乳酸濃度の変化（被検者A）

#### B. 中距離走パフォーマンス向上を目的とした学生ランナーの事例

800 m 走を専門種目とする学生中距離ランナー（20歳）を対象とした。中学生で患った障害により左右脚の筋量差が著しく、その影響もあって障害の発生頻度が高く、トレーニングを継続できていなかった。専門種目である800 m および1500 m の2種目の自己ベスト記録も、約3年間停滞していた。自転車トレーニング導入前のオフシーズン（一般的準備期）にも障害を経験し、走トレーニングは十分ではなかった。そこで、シーズンイン直前の専門的準備期にあたる時期から、週2回、自転車トレーニングを導入した。トレーニングは、有酸素性能力と無酸素性能力の両方を同時に向上できる方法として、スプリントITを採用した。

トレーニング開始3ヶ月後に、2分01秒79であった800 m の自己ベスト記録を1分59秒03まで、4分15秒86であった1500 m の自己ベスト記録を4分07秒47まで短縮

した。また、生理的能力として、 $V_{LT}$ が 230.5 m/min から 264.0 m/min まで向上した。

なお、この期間の走トレーニングは、主に技術的要因の改善に重点が置かれた。内省調査では、自転車トレーニングによって十分な体力を養成できたため、技術的トレーニングを体力的に余力のある状態でおこなえたことを副次的効果として挙げた。また、自転車トレーニングでは体幹の筋に十分な刺激が加えられないと考え、走運動における上肢と下肢との連動動作を円滑におこなえるよう、体幹の補強トレーニングも重視した。

### C. 長距離走パフォーマンス向上を目的とした学生ランナーの事例

3000 m 障害を専門とする学生長距離ランナー（20 歳）を対象とした。地区インカレの標準記録（9 分 18 秒 00）突破を目標に、専門的準備期から週 1 回、2 ヶ月間導入した。その後、一度休止し、秋の試合期に 1 ヶ月間導入した。

この両期間前後の  $La$  カーブの変化を図 6 に示した。両期間ともに、自転車トレーニング後に 320 m/min における  $La$  がやや低下し、 $V_{2.5mM}$  がそれぞれ 311.7 m/min から 314.8 m/min へ、306.8 m/min から 308.6 m/min へわずかながら向上した。走の経済性は、自転車運動の休止期間に大幅に低下したが、自転車トレーニング前後では変化しなかった。一方パフォーマンスは、一度目の導入後に 9 分 33 秒であった自己ベストを三度にわたって更新し、目標であった地区インカレの標準記録も突破した（9 分 09 秒 63）。加えて、同時期に、1500m の自己ベスト記録を 4 分 14 秒から 4 分 04 秒 15 へ大幅に短縮し、さらに二度目の導入後に 4 分 03 秒 85 まで短縮した。

内省調査からは、ラストスパートにおける絶対スピードの改善やハムストリングおよび殿部の筋力向上を感じていることが明らかとなった。また、自転車トレーニングのメリットとして、「筋へのダメージが少ないこと」および「走運動以上の負荷をかけられること」を挙げた。一方、走トレーニングにおける走行距離、走速度といった指標に、自転車トレーニングをどのように対応させれば良いかが分からないといった実践上の課題も残った。

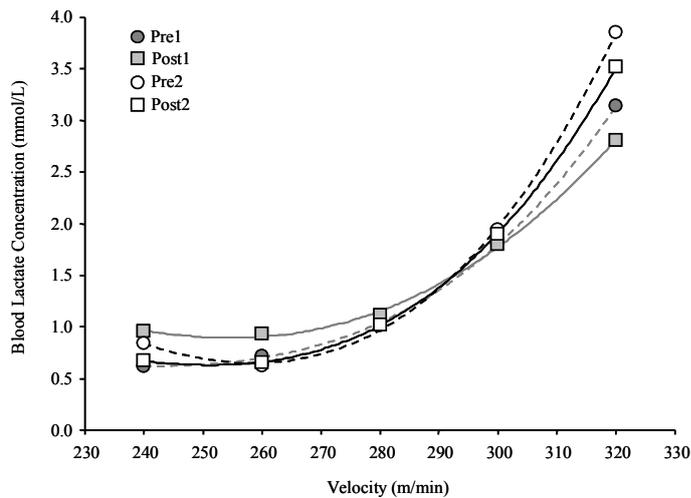


図6 クロストレーニングによる血中乳酸濃度の変化（被検者 C）

D. オーバー・トレーニング症候群を引き起こした事例

2 時間 57 分の自己ベスト記録更新を目標とする男性市民ランナー（50 歳）を対象とした。トレーニングは 6 ヶ月間、週 2 回、スプリント IT を導入した。トレーニング開始 3 ヶ月で有酸素性能力の改善はみられず、開始 2 ヶ月後のマラソンも失敗に終わった。その後も継続したが、自転車トレーニングを課しているにもかかわらず、それ以前と同程度のトレーニングを合わせて実践したことにより、体調が悪化し、有酸素性能力も大幅に低下した。

E. 学生ランナーにおける障害からの復帰過程での短期介入事例

学生長距離ランナー（20 歳，5000 m: 16 分 25 秒）を対象とした。大学から本格的に競技を始め、2 年間は順調に記録を伸ばしていたが、3 年目の試合期に入って間もなく障害を患い、ウォーキング等の低強度トレーニングが続いた。高強度での走トレーニングへの移行を前に、週 2~3 回の高頻度でスプリント IT を導入した。なお、この間の走トレーニングは、LT を下回る低強度トレーニングのみであった。

3 週間、全 8 回の自転車トレーニング前後の La カーブの変化を図 7 に示した。V2.5mM および VOBLA が、それぞれ 243.2 m/min から 261.6 m/min, 252.9 m/min から 276.0 m/min へと大幅に向上した。また、トレーニング前後ともに OBLA 以下の強度になる 230 m/min

から 250 m/min の  $\dot{V}O_2$  はすべて低下，すなわち走の経済性が改善した。

以上の生理的効果に加えて，内省調査では，高強度での自転車トレーニングを実践できたことで，走運動による高強度でのトレーニングを比較的早い時期から取り組めたことを最大のメリットとして挙げた。

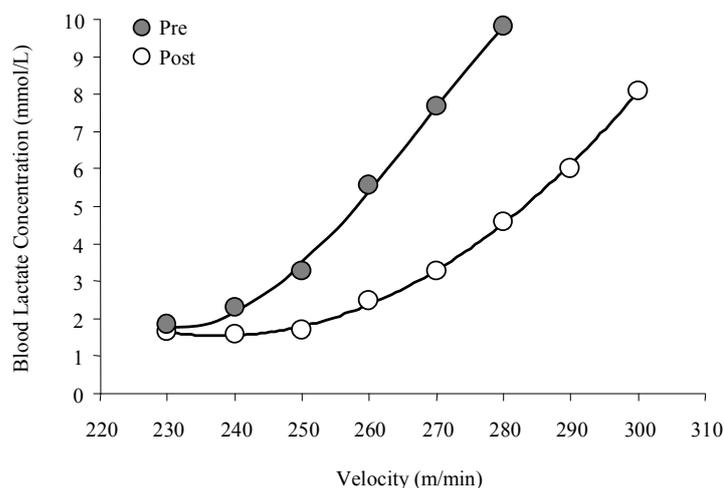


図7 クロストレーニングによる血中乳酸濃度の変化（被検者 E）

#### F. 極めて少ない走トレーニングでマラソンを完走した事例

マラソンレースを2ヵ月後に控えた男性市民ランナー（30歳）を対象とした。導入の2ヶ月前にマラソンを完走しているが，レース1ヶ月前に受傷した肉離れの影響もあり，自己ベスト記録から28分遅れる3時間11分を要していた。その後は，ディ・トレーニングに近い状況が続いていた。すなわち，マラソンレースを挟み，約3ヶ月間は十分なトレーニングをおこなえていなかった。この対象者に対し，レース2週間前までの6週間，週1～2回の超最大強度ITを導入した。その間の走トレーニング量（週あたりの走行距離）は18.1 kmであった。

トレーニング前後のLaカーブの推移を図8に示した。V<sub>2.5mM</sub>およびV<sub>OBLA</sub>が，それぞれ266.7 m/minから280.8 m/min，288.3 m/minから298.0 m/minへ大幅に向上した。一方，低速度での走の経済性は低下した。

レース結果は，2時間46分38秒と自己ベスト記録からは3分程度遅れたものの，強風という悪条件の中で，これまでのレースに比して極めて走トレーニング量が少なかったにもかかわらず，同程度のパフォーマンスを発揮した（表10）。

内省調査では、自転車トレーニングをおこなわなかったレースと比較して、30キロ以降にも「ストライドを維持できる」、「力が出せる」感覚があったことを報告した。

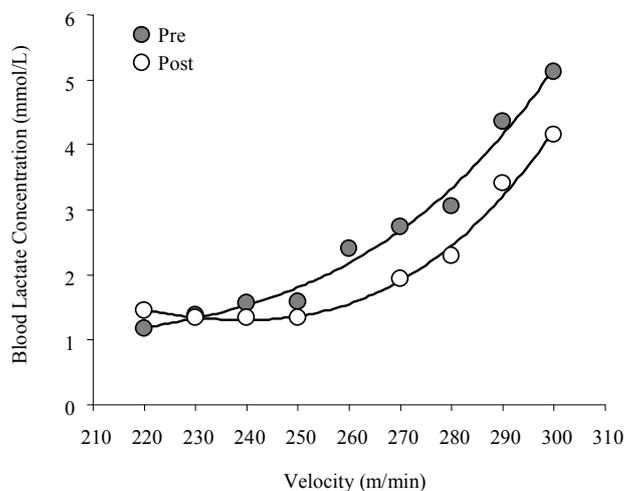


図8 クロストレーニングによる血中乳酸濃度の変化（被検者 F）

表2 過去4レースとの週間走行距離の比較

Competition	Date	Time	Weekly running distances (km)		
			1-4 w	5-8 w	9-12 w
A	2001.11	2:44:35	45.1	41.8	26.9
B	2002.04	2:44:30	46.8	51.5	64.5
C	2005.11	2:43:20	39.9	42.4	43.5
D	2007.11	2:47:58	32.6	48.9	22.5
E	2009.03	2:46:38	5.0	18.5	17.8

■ Cross Training

#### G. 高強度トレーニングを自転車運動で実施した事例

事例 F と同様に、マラソンレースを2ヵ月後に控えた男性市民ランナー（45歳）を対象とした。この対象者に対し、計2レースにおいて、レース前までの8週間、週2回の超最大強度ITを導入し、走トレーニングのみをおこなって出場したレースの結果とその成果を比較した。表3は、ジョギングを除くトレーニングを速度および走行距離から3種類に分類（ $V_{LT}$ 以上、 $V_{LT}$ 以下・20km以上、 $V_{LT}$ 以下・20km未満）し、その頻度を比較したものである。なお、その際の走トレーニング量は、走トレーニングのみをおこなったレースの前より顕著に減少した（表2）。以上の8週間の自転車トレーニングによって、Laカーブは右下方に移行した（図9）。

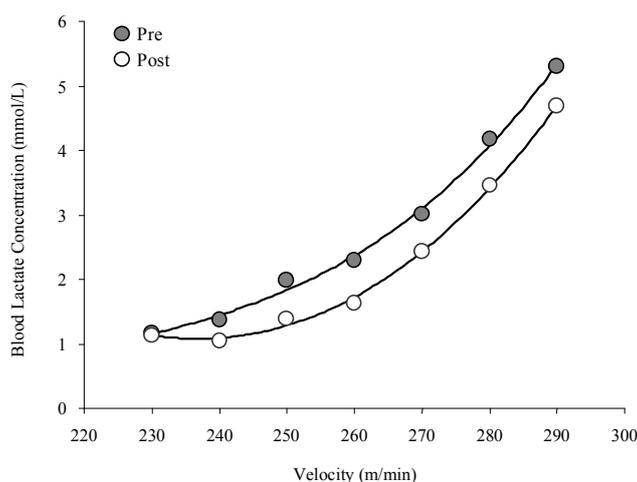


図9 クロストレーニングによる血中乳酸濃度の変化（被検者G）

表3 強度および走行距離によって分類されたマラソントレーニングの回数比較

Competition	Date	Time	Number of Marathon Training			Total
			< LT > 20 km	< LT < 20 km	> LT	
A	2007.02	2:55:20	5	2	4	11
B	2007.11	2:50:17	5	1	3	9
C	2008.02	2:57:34	1	1	1	3
D	2008.11	2:57:10	4	4	3	11
E	2009.03	3:10:04	2	4	0	6

■ Cross Training

レース結果は、1回目の導入では、走トレーニングのみで臨んだレースと同等であったが、2回目の導入では終盤に失速し、15分程度の遅れがみられた。なお、内省報告からは、2回目の導入時には、1回目と比較して走トレーニング量が多く、レース時に疲労が残っていた可能性が示唆された。

#### IV. 考察

$\dot{V}O_{2max}$  は、一部の事例のみでの測定であったが、その変化には個人差がみられた。走の経済性は、自転車トレーニングと同等かそれ以上の頻度で走トレーニングを実践した事例では変化しないか、あるいは改善したが、走トレーニングの頻度が著しく少ない事例Fにおいては低下した。

一方、ほぼ全ての事例において LT ( $V_{2.5mM}$ ,  $V_{OBLA}$ ,  $V_{LT}$ ) は向上した。特に、障害等によってトレーニング量が著しく減少、あるいはディ・トレーニング状態にあった事例では、LT が著しく改善した。なお、長期間にわたって導入した事例においてもプラトーに達することはなかった。これらの結果は、導入前の体力レベルやトレーニングレベルによってトレーナビリティは変化するものの、どの体力レベルにおいても自転車運動が有効なトレーニング手段であることを示している。これまで、走トレーニングは自転車運動による LT を向上させるが、自転車トレーニングは走運動による LT を向上させないという研究が多い (Roberts and Alspaugh., 1972; Pierce et al., 1990)。この現象は、特異性の原理によって説明されてきた。すなわち、筋の代謝能力を反映する LT は、パフォーマンス向上を目指す運動で動員される筋をトレーニング時に動員できなければ、変化しない。たとえば、自転車運動において、大腿四頭筋を主に動員し、走運動で推進力を生むハムストリングをほとんど動員できなければ、走運動での LT は向上しない。一方本研究では、体幹の前傾が大きいスプリントタイプの自転車エルゴメータを用い、回転数は 90 rpm に規定した。これらを規定することによって、ハムストリングを走運動以上に強く動員することができたと考えられる (研究課題 II)。

レースパフォーマンスは、多くの事例において顕著に改善するか、あるいは走トレーニング量に比して高い結果を示した。中でも、食事や天候など、体力要素以外のパフォーマンス決定要因が多いマラソンにおいても高いパフォーマンスがみられたことは、自転車トレーニングがマラソンパフォーマンス向上のためのトレーニング手段として極めて有効であることを示唆している。実際、事例 A では、シューズの選択ミスやカーボローディングの失敗などもあり、十分なパフォーマンスを発揮したとはいえない。また、事例 F においても、レース終盤には激しい風雨のため、ペースの低下を免れない状況にあった。一方、多くの事例で採用した 30 秒全力ペダリングを繰り返しおこなうスプリント IT は、800 m や 1500 m といった中距離走パフォーマンスに対して直接的に影響した。すなわち、トレーニング歴の長い学生ランナーにおいて、これらの種目のパフォーマンスが大幅に向上した (事例 B, C)。これには、スプリント IT が有酸素性能力および無酸素性能力の両方を向上できるトレーニングであり、中距離走はその両方を強く必要とすることが関係している。

また、筋の収縮時間のみに着目すると、30秒の全力ペダリングは60秒の全力走に相当する。このようなトレーニングを肉離れなどの突発的障害の危険なしに導入できることは、自転車トレーニングのメリットといえる。また、前述の最大筋力の向上も中距離種目における顕著なパフォーマンスの改善に寄与したものと推察される。なお、自転車トレーニングによる最大筋力の向上は、障害からの復帰過程における導入時においても意義深い。すなわち、筋腱への負担の大きい走トレーニングへの移行段階で筋力を高めておくことは、障害の再発を防ぐために必要不可欠であると考えられる。

一方、自転車トレーニングの運動特性が負のトレーニング効果をもたらした事例もみられた。自転車運動は筋損傷を促す伸張性筋収縮局面が極めて短い。したがって、高強度のトレーニングであるにも関わらずトレーニング量の減少を促すシグナルが小さく、量的に過剰なトレーニングを可能とする。内省調査からも、自転車トレーニングの量や強度を走トレーニングに対応させてトレーニング計画を組むことの困難さが指摘されたように、今後、適正な量および強度を維持するための方法論の確立も必要とされている。

## 結 論

自転車トレーニングによる有酸素性能力の改善は、対象者のトレーナビリティによって、その程度は異なるものの、体力レベルにかかわらず、ほぼ全ての事例でみられた。一方、トレーニング量を適正範囲に保つことの困難さや、走トレーニングが不足した場合には走の経済性が低下する可能性も示唆された。

## 第6章

### まとめ

以上のように、走運動と異なる運動特性を有する自転車運動は、いくつかの限界や留意点は含むものの、適切なペダリング条件で適切な量と強度のトレーニングを負荷できれば、走運動のみのトレーニングと比較して、より高い効果を引き出せるトレーニング手段である可能性が示された。以上の結果を踏まえ、障害からのリハビリテーション時に高強度での自転車トレーニングを推奨することやマラソンに向けたトレーニング過程における膨大な走トレーニングの一部を自転車トレーニングで代替する方法を推奨することなど、より受け入れられやすい形での啓蒙をおこなうことによって、トップランナーにおける実践およびそれに伴うジュニアランナーへの普及も進むものと推察される。

また今後は、世界のトップランナーも取り入れ、成果をあげているクロスカン트리スキー（Fitzgerald, 2004）や全身の筋をバランス良く動員できるロウイング（Kleshnev, 2007）など、走運動の主働筋である下肢のみならず、上肢や体幹の筋も積極的に動員できる運動の有効性についても検証することで、ランナーの体力特性やトレーニング段階を考慮したクロストレーニング手段の選択が可能になると考えられる。

## 引用文献

Adams, G. R., Duvoisin, M. R. and Dudley, G. A. (1992) Magnetic resonance imaging and electromyography as indexes of muscle function. *J. Appl. Physiol.*, 73: 1578-1583.

Akima, H., Kinugasa, R. and Kuno, S. (2005) Recruitment of the thigh muscles during sprint cycling by muscle functional magnetic resonance imaging. *Int. J. Sports Med.*, 26: 245-252.

Anderson, O. (1998) *Lactate*. SSS publishing Inc: Lansing (MI).

Bijker, K. E., De Groot G. and Hollander, A. P. (2001) Delta efficiencies of running and cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33: 1546-1551.

Bijker, K. E., De Groot G. and Hollander, A. P. (2002) Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 87: 556-561.

Billat, V. L., Demarle, A., Slawinski, J., Paiva, M. and Koralsztejn, J. P. (2001) Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33: 2089-2097.

Burgomaster, K. A., Hughes, S. C., Heigenhauser, G. J., Bradwell, S. N. and Gibala, M. J. (2005) Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans. *J. Appl. Physiol.*, 98: 1985-1990.

Burgomaster, K. A., Heigenhauser, G. J. and Gibala, M. J. (2006) Effect of short-term sprint interval training on human skeletal muscle carbohydrate metabolism during exercise and time-trial performance. *J. Appl. Physiol.*, 100: 2041-2047.

Burgomaster, K. A., Howarth, K. R., Phillips, S. M., Rakobowchuk, M., Macdonald, M. J., McGee, S. L. and Gibala, M. J. (2008) Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *J. Physiol.*, 586: 151-160.

Conley, D. L. and Krahenbuhl, G. S. (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 12: 357-360.

Costill, D. L., Thomason, H. and Roberts, E. (1973) Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med. Sci. Sports.*, 5: 248-252.

Daniels, J., and Scardina, N. (1984) Interval training and performance. *Sports Med.*, 4: 327-34.

Elliott, B. C. and Blanksby, B. A. (1979) The synchronization of muscle activity and body segment movements during a running cycle. *Med. Sci. Sports.*, 11: 322-327.

Farrell, P. A., Wilmore, J. H., Coyle, E. F., Billing, J. E. and Costill, D. L. (1979) Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports*, 11: 338-344.

Fitzgerald, M. (2004) Role model. *Runner's world guide to cross-training*. Rodale Press, Pennsylvania. p. 15, 17-18, 22, 148, 176, 187.

Gary, T. M. and George, H. M. (2002) (訳) 梅林 薫, 須田和裕, 畑山雅史, 選手のためのクロストレーニング, 初版, Gary, T. M., H. M. George, (訳) 梅林 薫, 須田和裕, 畑山雅史, 競技力アップのクロストレーニング, 大修館書店, 東京: pp.2-5.

Gibala, M. J., Little, J. P., van Essen, M, Wilkin, G. P., Burgomaster, K. A., Safdar, A., Raha, S. and Tarnopolsky, M. A. (2006) Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar

initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *J. Physiol.*, 575: 901-911.

Hicks, A., McGill, S. and Hughson, R. L. (1999) Tissue oxygenation by near-infrared spectroscopy and muscle blood flow during isometric contractions of the forearm. *Can. J. Appl. Physiol.*, 24: 216-230.

Hill, D. W., Halcomb, J. N. and Stevens, E. C. (2003) Oxygen uptake kinetics during severe intensity running and cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 89: 612-618.

Hoshikawa, Y., Muramatsu, M., Iida, T., Uchiyama, A., Nakajima, Y., Kanehisa, H. and Fukunaga, T. (2006) Influence of the psoas major and thigh muscularity on 100-m times in junior sprinters. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 38: 2138-2143.

星川佳広・飯田朝美・村松正隆・内山亜希子・中嶋由晴 (2006) 高校生スポーツ選手の競技種目別の大腿筋断面積. *体力科学*, 55: 217-227.

Hug, F. and Dorel, S. (2009) Electromyographic analysis of pedaling: a review. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 19: 182-198.

Hug, F., Marqueste, T., Le, F., Fur, Y., Cozzone, P. J., Grélot, L. and Bendahan, D. (2006) Selective training-induced thigh muscles hypertrophy in professional road cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 97: 591-597.

Imamura, K., Ashida, H., Ishikawa, T. and Fujii, M. (1983) Human major psoas muscle and sacrospinalis muscle in relation to age: a study by computed tomography. *J. Gerontol.*, 38: 678-681.

Jorge, M. and Hull, M. L. (1986) Analysis of EMG measurements during bicycle pedalling. *J*

Biomech., 19: 683-694.

狩野 豊・高橋英幸・森丘保典・秋間 広・宮下 憲・久野譜也・勝田 茂 (1997) スプリンターにおける内転筋群の形態的特性とスプリント能力の関係. 体育学研究, 41: 52-359.

木越清信・尾縣 貢・田内健二・大山卞圭悟・高松 薫 (2003) 短時間の全力自転車ペダリング運動における座位姿勢の相違が筋活動および最大パワーに及ぼす影響. 体力科学, 52: 167-178.

Kleshnev, V. (2007) Biomechanics. Secher, N. H. eds, Rowing, pp. 22-34.

MacDougall, D. and Sale, D. (1981) Continuous vs. interval training: a review for the athlete and the coach. Can. J. Appl. Sport Sci., 6: 93-97.

Macera, C. A. (1992) Lower extremity injuries in runners. Advances in Prediction. Sports Med., 13: 50-57.

Mann, R. A. and Hagy, J. (1980a) Biomechanics of walking, running, and sprinting. Am. J. Sports Med., 8: 345-350.

Mann, R. A. and Hagy, J. L. (1980b) Running, jogging and walking: A comparative electromyographic and biomechanical study. The foot and ankle, 167-175.

Masuda, K., Kim, J., Kinugasa, R., Tanabe, K. and Kuno, S. Y. (2002) Determinants for stair climbing by elderly from muscle morphology. Percept. Mot. Skills., 94: 814-816.

Moritani, T., Muramatsu, S. and Muro, M. (1987) Activity of motor units during concentric and

eccentric contractions. *Am. J. Phys. Med.*, 66: 338-350.

Neptune, R. R., Kautz, S. A. and Hull, M. L. (1997) The effect of pedaling rate on coordination in cycling. *J. Biomech.*, 30: 1051-1058.

O'Toole, M. L. (1992) Prevention and treatment of injuries to runners. *Med. Sci. Sport. Exerc.*, 24: S360-363.

大川昌宏・菅原 勲・櫻井忠義 (2004) 体幹部の筋横断面積および機能に関する陸上競技やり投げ選手と他の投擲選手との比較. *体力科学*, 53 : 411-423.

Paavolainen, L., Häkkinen, K., Härmäläinen, I., Nummela, A. and Rusko, H. (1999a) Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J. Appl. Physiol.*, 86: 1527-1533.

Pierce, E. F., Weltman, A. Seip, R. L. and Snead, D. (1990) Effects of training specificity on the lactate threshold and  $\dot{V}O_{2peak}$ . *Int. J. Sports Med.*, 11: 267-272.

Roberts, J. A. and Alspaugh, J. W. (1972) Specificity of training effects resulting from programs of treadmill running and bicycle ergometer riding. *Med. Sci. Sports*, 4: 6-10.

Savelberg, H. H. C. M., Van de Port, I. G. L. Willems, P. J. B. (2003) Body Configuration in Cycling Affects Muscle Recruitment and Movement Pattern. *J. Appl. Biomechanics*. 19: 310-324.

Sullivan, M. K., DeJulia, J. J. and Worrell, T. W. (1992) Effect of pelvic position and stretching method on hamstring muscle flexibility. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24: 1383-1389.

Takahashi, K., Takahashi, H. E., Nakadaira, H. and Yamamoto, M. (2006) Different changes of quantity due to aging in the psoas major and quadriceps femoris muscles in women. *J. Musculoskelet. Neuronal. Interact.*, 6: 201-205.

Tanaka, H. and Swensen, T. (1998) Impact of resistance training on endurance performance. A new form of cross-training? *Sports Med.*, 25: 191-200.

Tanimoto, M., Arakawa, H., Sanada, K., Miyachi, M., Ishii, N. (2009) Changes in muscle activation and force generation patterns during cycling movements because of low-intensity squat training with slow movement and tonic force generation. *J. Strength Cond. Res.*, 23: 2367-2376.

山地啓司 (1997) ランニングの経済性に影響をおよぼす要因. *日本運動生理学雑誌*, 4: 81-98.

Yoshida, T., Udo, M., Chida, M., Ichioka, M., Makiguchi, K. and Yamaguchi, T. (1990) Specificity of physiological adaptation to endurance training in distance runners and competitive walkers. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 61: 197-201.

吉岡利貢・中垣浩平・向井直樹・鍋倉賢治 (2009) 足の形態的特徴が長距離走パフォーマンスに及ぼす影響. *体育学研究*, 54: 89-98.