

走運動および自転車運動における最大酸素摂取量の差を決定する要因 ～ MRI 画像からみた筋活動レベルに着目して～

吉岡利貢¹⁾ 中垣浩平²⁾ 鍋倉賢治²⁾

DETERMINING THE DIFFERENCE IN MAXIMAL OXYGEN UPTAKE OF RUNNING AND CYCLING — MRI EVALUATION OF MUSCULAR ACTIVITY LEVEL —

TOSHITSUGU YOSHIOKA, KOHEI NAKAGAKI and YOSHIHARU NABEKURA

Abstract

The purpose of this study was to determine the difference in the attainment rate of maximal oxygen uptake in cycling and running ($\%cyc\dot{V}O_{2max}$). Seven healthy male subjects (22.9 ± 1.3 yrs, 171.9 ± 4.7 cm, 61.0 ± 5.2 kg) participated in a maximal incremental exercise test for running and cycling. During the exercise testing, oxygen uptake, carbon dioxide output, respiratory exchange rate, minute ventilation, tidal volume, respiratory rate, and heart rate were measured. Attainment rates of each physiological measurement for cycling and running were shown as $\%cyc\dot{V}O_{2max}$, $\%cyc\dot{V}CO_{2max}$, $\%cycRER_{max}$, $\%cyc\dot{V}E_{max}$, $\%cycVt$, $\%cycRR$ and $\%cycHR_{max}$. Transverse relaxation time ($T2$)-weighted spin echo images were acquired before and after the exercise periods. Exercise-induced $T2$ values of each muscle and muscle-group are indices of muscular activity level, so the difference between the $T2$ value of cycling and running in each muscle or muscle group was shown as $\Delta T2\%$. $\dot{V}O_{2max}$ in cycling was 92.2% of $\dot{V}O_{2max}$ in running. Significant correlations were observed between $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ and $\%cyc\dot{V}CO_{2max}$, $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ and $\%cycRR$. Furthermore, significant correlations were recognized between $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ and $\Delta T2\%$ of the m. quadriceps femoris, $\%cyc\dot{V}CO_{2max}$ and $\Delta T2\%$ of the m. quadriceps femoris, $\%cyc\dot{V}CO_{2max}$ and the m. triceps surae, as well. These results show that the higher muscular activity level of the thigh in cycling increases the uptake of oxygen in the muscle. The $T2$ value shows that the uptake or redistribution of fluid within muscle is driven by the accumulation of lactate and inorganic phosphate. Therefore, the $T2$ value of maximal incremental exercise would reflect the anaerobic capacity of the muscle. Judging from the significant correlations between $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ and $\%cyc\dot{V}CO_{2max}$ or $\%cycRR$, the anaerobic capacity of each subject would also affect the difference between the maximal oxygen uptake of cycling and running.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2009, 58 : 265~274)

key word : running, cycling, maximal oxygen uptake, mfMRI

I . 緒 言

同一個人の最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) が測定に用いる運動様式によって異なることは、これまで数多くの研究で報告されている¹⁾。この運動様式による $\dot{V}O_{2max}$ の相違を説明する要因として、活動筋量の差を指摘する研究が多い^{2~5)}。すなわち、筋量の多い下肢筋群が主に動員される脚ペダリングで

は、筋量の少ない上肢筋群が主に動員される腕クラッキングと比較して $\dot{V}O_{2max}$ が30~40%程度高いこと^{2,3)}や、両脚ペダリングでは片脚ペダリングと比較して $\dot{V}O_{2max}$ が約20%高いこと^{4,5)}などが報告されている。またその他の要因として、筋の収縮様式の相違も無視できない。たとえば、自転車運動はほぼ全ての活動筋が全ての局面において短縮性収縮をおこなうのに対して、走運動では多くの活動筋が伸張

¹⁾ 筑波大学体育センター
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1

²⁾ 筑波大学大学院人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1

Sport and Physical Education Center, University of Tsukuba, 1-1-1
Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574

Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of
Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574

性収縮局面を含む。この違いは、筋の収縮時間と弛緩時間の割合に影響し、短縮性筋収縮が主体となる自転車運動では収縮時間の割合が弛緩時間と合わせた一運動周期の50%程度を占める^{6,7)}のに対して、走運動では24%程度と短い⁸⁾。自転車運動における相対的に長い収縮時間は、運動時の筋内圧を高め、静脈還流量やそれに起因する一回拍出量および心拍出量を低下させる⁹⁾。心拍出量は $\dot{V}O_{2max}$ の規定要因の一つであることから、心拍出量の低下は、動静脈酸素較差によって補償されない限り、直接 $\dot{V}O_{2max}$ の低下を導く。実際、一般成人における自転車運動の $\dot{V}O_{2max}$ は、走運動における $\dot{V}O_{2max}$ より低い¹⁾。これらの結果は、運動様式間の $\dot{V}O_{2max}$ の差が酸素の供給系(主に心拍出量)と酸素の利用系(主に活動筋量)の両者に起因することを示している。

一方、運動様式間の $\dot{V}O_{2max}$ の差は、個人の体力特性や専門とする競技の運動特性によっても異なる。すなわち、自転車運動における $\dot{V}O_{2max}$ は、一般成人で走運動より5~15%低いと報告されている¹⁾が、この差は、サイクリストやトライアスリートなど、ペダリング動作に習熟した競技者ではさらに小さくなる¹⁰⁾か、あるいは逆転し¹¹⁾、逆に女子長距離ランナーでは走運動の方が20~25%高くなる¹²⁾。この自転車運動における $\dot{V}O_{2max}$ の走運動に対する到達率(%cyc $\dot{V}O_{2max}$)の個人差、あるいは専門競技による差は、動員される筋を変化させうるペダリングの巧緻性やサイクリストにおける特異的な筋の形態的特徴¹⁾によるものであると理解されてきたが、客観的に検証した研究はない。そこで我々は、短縮性筋収縮が主体の自転車運動では、特に主働筋の代謝能力からみた体力レベルによって最大活動レベルに差が生じる可能性があるため、動員される筋(ペダリングの巧緻性)やそのサイズ(筋の形態的特徴)のみならず、最大運動時の筋活動レベルも%cyc $\dot{V}O_{2max}$ に影響を及ぼすとの仮説を立てた。この仮説を検証することは、自転車運動および走運動双方の $\dot{V}O_{2max}$ から求めた%cyc $\dot{V}O_{2max}$ によって、下肢筋群の代謝能力を推定できる可能性を含む。一方、筋の代謝能力を直接評価する方法として、磁気共鳴画像法(MRI)の横緩和時間(T2)が挙げられる。T2は生体の細胞内あるいは細胞外にある水の状態を反映する指標であると考えられており、この値は力の発揮¹³⁾、運動強度^{14),15)}および筋電図

積分値^{14),16)}と比例関係にあることなどが報告されている。この方法では、表層の筋のみならず深層の筋の代謝まで評価できる利点がある。

そこで本研究では、自転車運動における $\dot{V}O_{2max}$ の走運動に対する到達率(%cyc $\dot{V}O_{2max}$)の個人差に影響する要因を、換気量、心拍数およびMRI画像から求めた体幹・下肢筋群の活動レベル(T2)を用い、酸素の供給系および利用系の両側面から検討することを目的とした。

Ⅱ. 方 法

A. 被検者

被検者は、週に3~5回程度のランニング習慣のある健康な男子学生7名(22.9±1.3歳, 171.9±4.7 cm, 61.0±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。また本研究は、筑波大学人間総合科学研究科倫理審査委員会の承認を受け、実施した。

B. 測定項目および測定方法

1. 最大運動負荷テストと $\dot{V}O_{2max}$ の決定

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い、 $\dot{V}O_{2max}$ を決定した。負荷テストには、電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ(PowerMax V II, Combi)およびトレッドミル(西川鉄工)を用いた。自転車運動と走運動によるテストは、48時間以上の間隔をあけて実施した。また、両運動の実施順序はランダムとした。

運動中の呼気ガス指標は呼気ガス分析器(Oxycon Alpha, Mijnhardt)を用いて、breath-by-breath法により分析した。この機器を用いて、換気量(\dot{V}_E)、呼吸数(RR)、一回換気量(V_t)、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)および二酸化炭素排出量($\dot{V}CO_2$)を測定し、30秒毎の平均値を出力した。また、運動中、HRモニタ(S610i, Polar)を用いて、心拍数(HR)を観察および記録した。

自転車運動による測定は、1 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ずつ増加させた。ペダル回転数は、筋内圧の上昇による静脈還流量の減少など、中心循環系に走運動と著しい差が生じないよう

90 rpmに規定し、維持できなくなった時点で終了させた。終了の判断基準は、回転数が85 rpmを下回った時点で被検者に知らせ、即時に90 rpmまで回復できなかった場合とした。なお、本研究では、一般の自転車エルゴメータより骨盤の前傾が大きくなるsemi-uprightタイプの自転車エルゴメータを用いた。また、自転車専用シューズを着用させた上、足部とペダルをストラップで固定することによって、ペダリングにおける不安定感を解消した。

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等の準備体操をおこなった後、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。

$\dot{V}O_{2max}$ は、1) $\dot{V}O_2$ のleveling-off(前の負荷段階と比較した $\dot{V}O_2$ の上昇度が150 ml/min以下)、2) 呼吸交換比が1.10以上、3) 運動時HRの最大値が予測HR(220-歴年齢)の90%以上、の3つの判断基準のうち、2つ以上を満たす値が出現していることを条件として求めた¹⁷⁾。

自転車運動における $\dot{V}O_{2max}$ 、最大二酸化炭素排出量($\dot{V}CO_{2max}$)、呼吸交換比の最大値(RER_{max})、最大換気量($\dot{V}_{E_{max}}$)、 $\dot{V}_{E_{max}}$ 出現時の V_t およびRR、および最大心拍数(HR_{max})の走運動に対する到達

率(%)を、それぞれ% $cyc\dot{V}O_{2max}$ 、% $cyc\dot{V}CO_{2max}$ 、% $cycRER_{max}$ 、% $cyc\dot{V}_{E_{max}}$ 、% $cycV_t$ 、% $cycRR$ および% $cycHR_{max}$ とした。

2. MRI-T2値

MRIのT2値の測定には、永久磁石型MRI装置(Airis mate, Hitachi Medical)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%部および臍位での腹部とした。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10mm、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(TR1500 ms, TE30/60 ms, FOV320 mm, matrix256×180, NSA1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¹³⁾。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

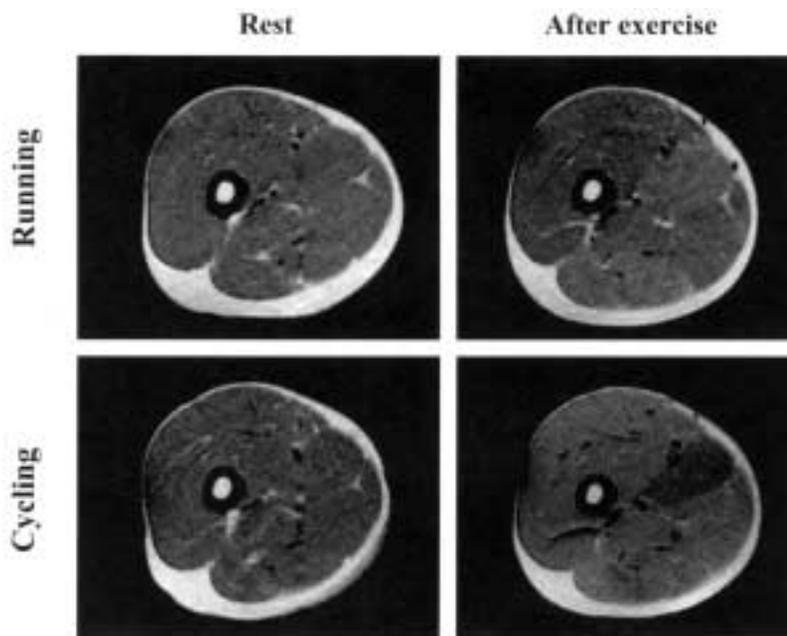


Fig. 1. Representative T2-weighted magnetic resonance images of thigh at rest and after exercise.

後の T2 の低下傾向には体力レベルが関与する¹⁸⁾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) により大腿部は大腿四頭筋 (QF: m. quadriceps femoris), ハムストリング (HAM: m. hamstring), 長内転筋 (AM: m. adductor magnus) および大内転筋 (AL: m. adductor longus), 下腿部は下腿三頭筋 (TS: m. triceps surae) 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)。

$$T2(\text{ms}) = [\ln(SI(30)/SI(60))] / 30 \dots \text{式 1}$$

※ 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)。

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

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)。

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

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 $\Delta T2\%$, $\dot{V}O_{2\text{max}}$ 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

呼吸ガスおよび HR モニタによって得られたパラメータおよび %cyc $\dot{V}O_{2\text{max}}$ と自転車運動における各パラメータの走運動に対する到達率の間の相関係数 (r) を表 1 に示した。

$\dot{V}O_{2\text{max}}$ は、自転車運動 $3475.7 \pm 281.2 \text{ ml/min}$,

Table 1. Physiological measurements at exhaustion. "r" is correlation coefficients between %cyc $\dot{V}O_{2\text{max}}$ and attainment rates of each physiological measurement of cycling to running. ($\dot{V}O_2$ oxygen uptake, $\dot{V}CO_2$ carbon dioxide, RER respiratory exchange rate, \dot{V}_E minute ventilation, V_t tidal volume, RR respiratory rate, HR heart rate)

		Running	Cycling	r
$\dot{V}O_2$	L/min	3767.4 ± 238.1	3475.7 ± 281.2 *	---
	ml/kg/min	62.3 ± 7.0	57.6 ± 8.3 *	
$\dot{V}CO_2$	L/min	4391.6 ± 247.2	4435.7 ± 430.3	0.95 †
RER	---	1.17 ± 0.05	1.30 ± 0.05 *	0.65
\dot{V}_E	L/min	155.0 ± 17.4	165.1 ± 22.5	0.65
V_t	L	2.31 ± 0.31	2.65 ± 0.27 *	0.27
RR	1/min	67.9 ± 11.7	63.1 ± 13.5	0.78 †
HR	beats/min	197.6 ± 5.7	187.3 ± 7.8 *	0.49

Asterisks indicate significant difference between running and cycling. Daggers indicate significant correlation between % $\dot{V}O_{2\text{max}}$ and attainment rates of each physiological measurement of cycling to running.

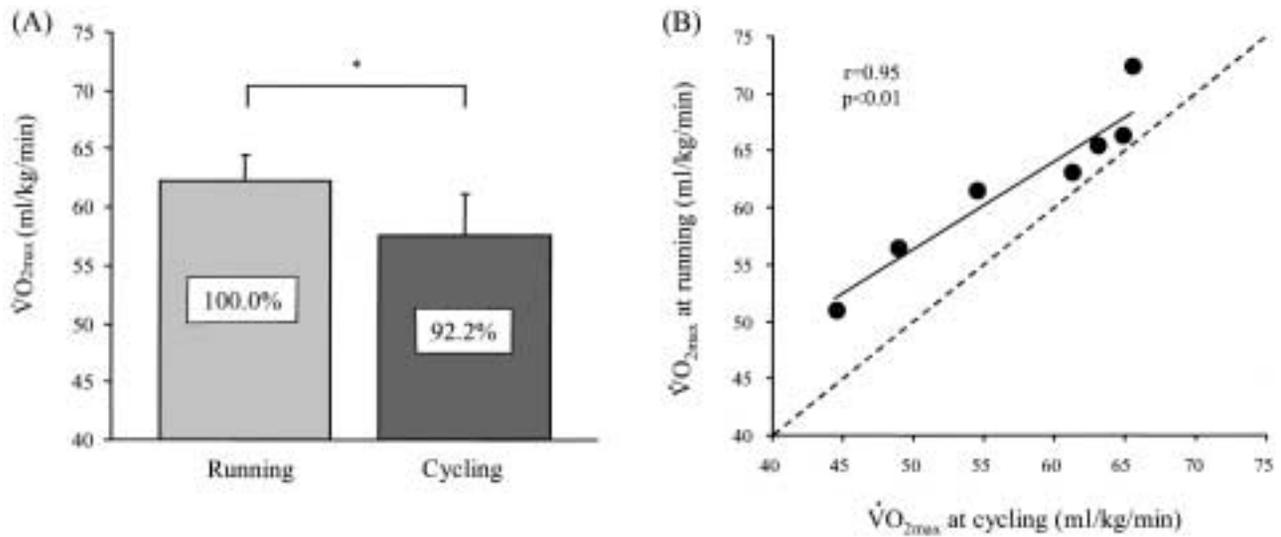


Fig. 2. (A) Maximal Oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$) Running is significantly different from cycling. Values are presented as mean \pm S.E. (B) Relationship between $\dot{V}O_{2max}$ at cycling and running. Dash line shows the same value of two modes.

走運動 3767.4 ± 238.1 ml/min, 体重で標準化すると, 自転車運動 57.6 ± 8.3 (44.6–65.6) ml/kg/min, 走運動 62.3 ± 7.0 (50.9–72.4) ml/kg/min と, 走運動で有意に高値を示した. なお, 自転車運動における $\dot{V}O_{2max}$ の走運動に対する到達率 (% $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$) は, $92.2 \pm 4.8\%$ であった (図 2). $\dot{V}CO_{2max}$ は, 自転車運動 4435.7 ± 430.3 ml/min, 走運動 4391.6 ± 247.2 ml/min と有意差はなかったが, % $\text{cyc}\dot{V}CO_{2max}$ が大きい者ほど % $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$ が大きく, 両者の間に極めて高い有意な正の相関関係が認められた ($r = 0.95$). $\dot{V}O_{2max}$ と $\dot{V}CO_{2max}$ の両者から算出される RER_{max} は, 自転車運動 1.30 ± 0.05 , 走運動 1.17 ± 0.05 と, 自転車運動で有意に高値を示した.

$\dot{V}E_{max}$ は, 自転車運動 (165.1 ± 22.5 L/min) で走運動 (155.0 ± 17.4 L/min) より高値を示したが有意な差は認められなかった. なお, $\dot{V}E_{max}$ を構成する RR は自転車運動で走運動と比較して低値を示したが, V_t は自転車運動で有意に高値を示した. 次いで, これらの到達率と % $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$ の関係について検討すると, % $\text{cyc}\dot{V}E_{max}$ および % $\text{cyc}RR$ が高い者ほど % $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$ が高く, % $\text{cyc}RR$ と % $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$ の間に有意な正の相関関係 ($r = 0.78$) が認められた. 一方, % $\text{cyc}V_t$ と % $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$ ($r = 0.27$) の間には相関関係はみられなかった. また, その他のパラメータとの関係においては, % $\text{cyc}\dot{V}E_{max}$ が高い者ほど % $\text{cyc}\dot{V}CO_{2max}$ が高い傾向 ($r = 0.64$) にあった.

HR_{max} は, 走運動 (197.6 ± 5.7 bpm) で自転車運動 (187.3 ± 7.8 bpm) より有意に高値を示したが, % $\text{cyc}HR_{max}$ と % $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$ の間に有意な相関関係はみられなかった ($r = 0.49$).

MRI 画像から求めた自転車運動および走運動における運動前後の $T2$ 値変化率 ($T2\%$) を図 3 に示した. 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 $T2\%$ を示し, 大腿四頭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, 長内転筋では走運動で自転車運動と比較して有意に高い $T2\%$ を示した. 下腿部では, 下腿三頭筋, 前脛骨筋ともに走運動で高い $T2\%$ を示し, 前脛骨筋においてその差は有意であった. 体幹部の大腰筋の $T2\%$ は走運動で高値を示したが, その差は有意ではなかった.

走運動時と自転車運動時の各筋における $T2\%$ の差を示す $\Delta T2\%$ と % $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$ の関係を図 4 に示した. 大腿四頭筋, ハムストリング, 大内転筋および下腿三頭筋の $\Delta T2\%$ が高い者ほど % $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$ が高く, 大腿四頭筋において有意な正の相関関係 ($r = 0.83$) が認められた. 一方, 大腰筋の $\Delta T2\%$ が高い者ほど % $\text{cyc}\dot{V}O_{2max}$ は低く, 両者の間に有意な負の相関関係 ($r = -0.85$) が認められた. さらに $\Delta T2\%$ と $\dot{V}O_{2max}$ の関連指標の関係について検討したところ, 大腰筋の $\Delta T2\%$ と % $\text{cyc}RR$ の間にも有意な負の相関関係が認められた ($r = -0.91$). また, 大腿四頭筋および下腿三頭筋において, $\Delta T2\%$ と

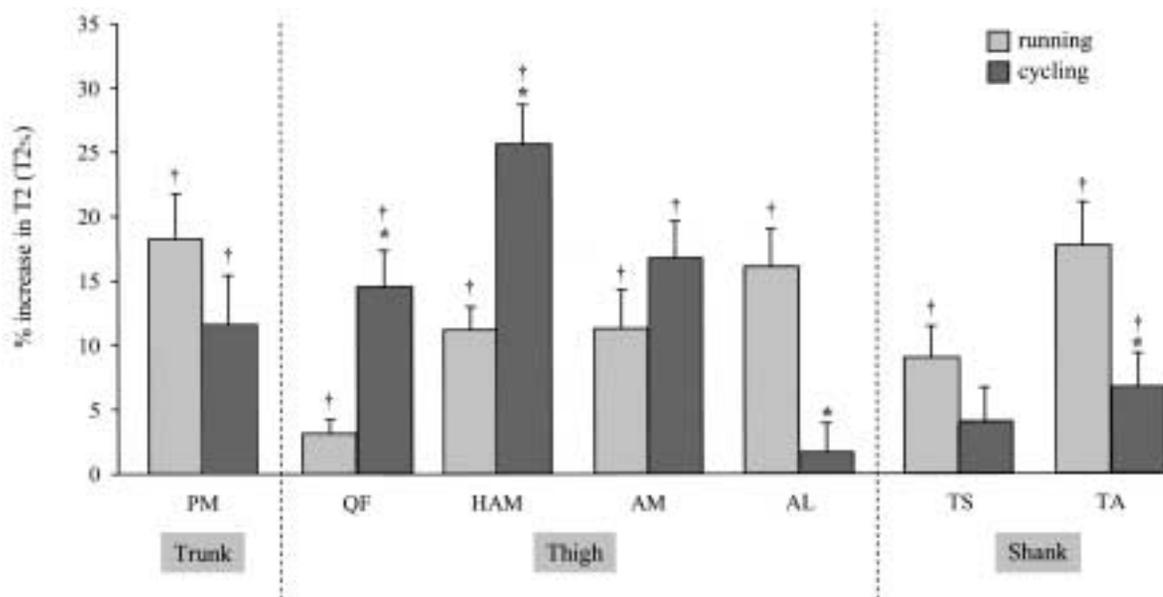


Fig. 3. Mean percent increase in exercise induced T2 values between pre- and post-exercise across type of exercise for each muscle. The mean + S.E. are represented. The gray bars represent the running, black represent the cycling. Asterisks indicate significant difference between running and cycling. Daggers indicate significant difference between rest and after exercise. (PM m. psoas major, QF m. quadriceps femoris, HAM m. hamstring, AM m. adductor magnus, AL m. adductor longus, TS m. triceps surae, TA m. tibialis anterior)

%cyc $\dot{V}O_{2max}$ (大腿四頭筋: $r = 0.91$, 下腿三頭筋: $r = 0.80$) および %cycRER $_{max}$ (大腿四頭筋: $r = 0.81$, 下腿三頭筋: $r = 0.94$) との間に有意な正の相関関係が認められた。

IV. 考 察

自転車運動の $\dot{V}O_{2max}$ は、走運動の $92.5 \pm 4.7\%$ (%cyc $\dot{V}O_{2max}$) に相当し、この値は先行研究¹⁾の値に類似するものであったが、最も高い者で98.1%、低い者で86.9%と10%以上の個人差が確認された。本研究では、この個人差について、酸素の供給系と利用系の両側面から検討した。

まず、酸素供給系としての呼吸循環諸変量から個人差について検討すると、%cycRRと%cyc $\dot{V}O_{2max}$ の間に有意な相関関係が認められ、%cyc $\dot{V}E_{max}$ と%cyc $\dot{V}O_{2max}$ の間に相関傾向がみられた。本結果は、%cyc $\dot{V}E_{max}$ が高かった者、すなわち自転車運動において肺胞から血液に拡散される酸素の量を走運動より高められた者は、走運動と比較して低い心拍出量⁹⁾を高い酸素濃度によって補えた可能性を示唆している。しかしながら、 $\dot{V}E$ を意図的に増大させても $\dot{V}O_{2max}$ は増加しないこと¹⁹⁾や換気亢進によって

肺胞の酸素分圧が高まっても肺の酸素はある一定以上は血液に拡散しないことから、意図的に呼吸数を増加させても%cyc $\dot{V}O_{2max}$ は変化しないものと考えられる。一方、本研究において、%cyc $\dot{V}O_{2max}$ と%cyc $\dot{V}CO_{2max}$ に有意な相関関係が認められ、%cyc $\dot{V}CO_{2max}$ と%cyc $\dot{V}E_{max}$ の間にも相関傾向がみられたことから、%cyc $\dot{V}E_{max}$ の高かった者は、酸素の取り込み量を増加できただけでなく、自転車運動における乳酸の蓄積およびその重炭酸緩衝作用によって生じた二酸化炭素をより効率良く排出することによって、より高い運動強度での運動を可能とし、自転車運動における $\dot{V}O_{2max}$ を高めた可能性も考えられる。HR $_{max}$ は、先行研究^{20), 21)}と同様、走運動(197.6 ± 5.7 bpm)で自転車運動(187.3 ± 7.8 bpm)より有意に高値を示したものの、%cycHR $_{max}$ と%cyc $\dot{V}O_{2max}$ の間に相関関係はみられず、%cycHR $_{max}$ の差で%cyc $\dot{V}O_{2max}$ の個人差を説明することはできなかった。 $\dot{V}O_{2max}$ の規定因子の一つである心拍出量は、心拍数と一回拍出量の積によって求められるため、一回拍出量の差が%cyc $\dot{V}O_{2max}$ の個人差を決定した可能性は残されるが、本研究では一回拍出量を測定していないため、その可能性については推測

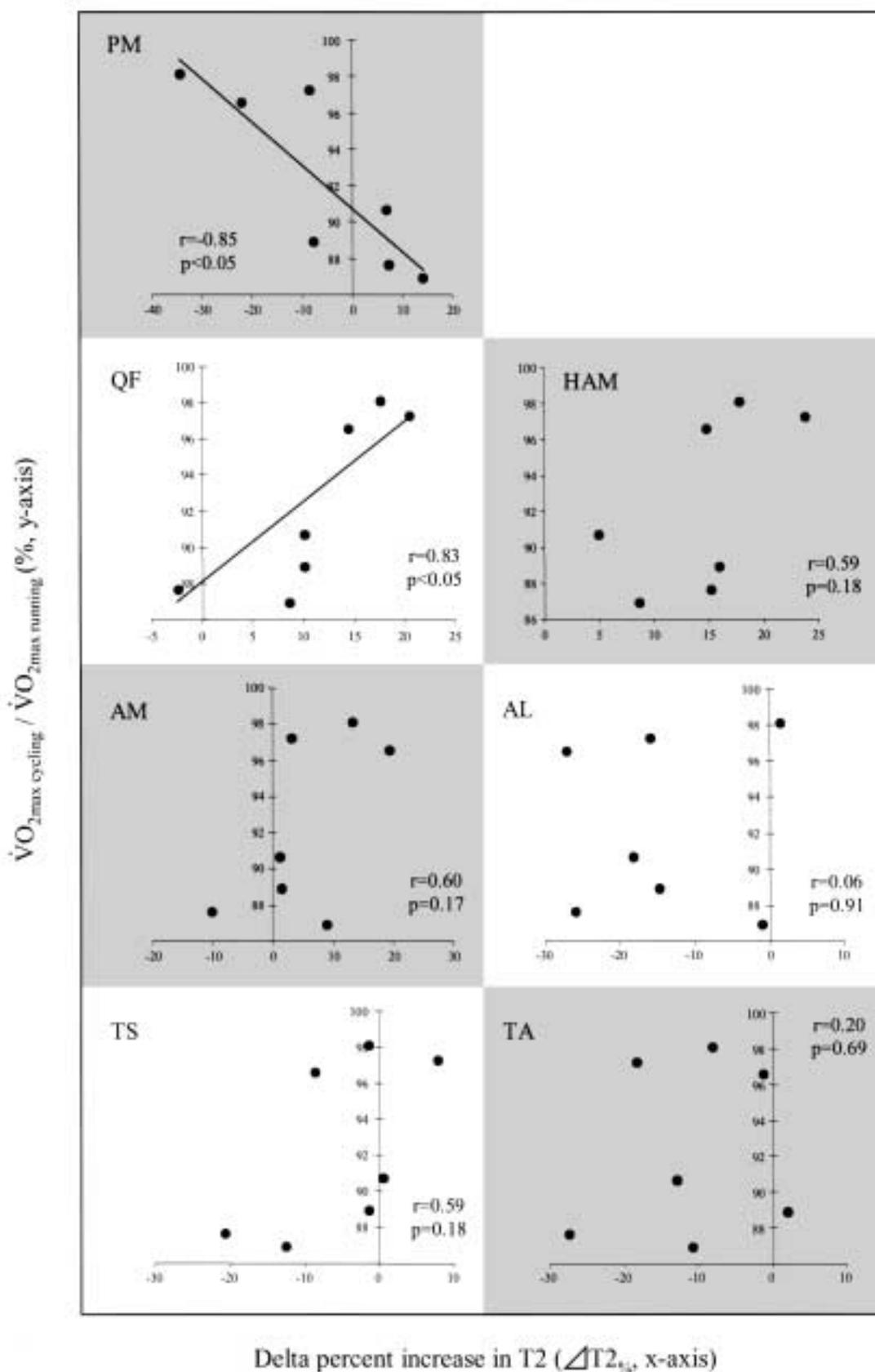


Fig. 4. Relationship between the delta percent increase in T2 values for each muscle and attainment rate of $\dot{V}O_{2max}$ at cycling to running(%)

の域を出ない。

次に、酸素利用系としての活動筋に着目すると、両運動間の $\dot{V}O_{2max}$ の差はこれまで、それぞれの運動に動員される筋量の差によって説明され^{20~22)}、その個人差については特異的な筋の形態的特徴¹⁾によるものと理解されてきたが、客観的には検証されていない。そこで本研究では、この両運動における $\dot{V}O_{2max}$ の差の個人差には、各筋の最大活動レベルが関与しているとの仮説を立て、自転車運動における $\dot{V}O_{2max}$ の走運動に対する到達率($\%cyc\dot{V}O_{2max}$)と筋活動レベルの関係について検討した。その結果、大腿四頭筋は自転車運動の主働筋であること²³⁾のみならず、走運動との活動レベルの差が最も大きい筋の一つであることが示された。走運動において、大腿四頭筋は伸張性筋収縮をおこなうため、T2で評価する活動レベルは、短縮性筋収縮をおこなう筋と比較して低く抑えられる。¹⁴⁾その上、漸増負荷テストでは速度の増大に伴う疲労困憊によって運動が終了するため、長時間運動における疲労困憊時のように接地時間の延長とそれに伴う短縮性筋収縮の貢献度の上昇は起こりにくい。したがって、走運動では大腿四頭筋の活動レベルには個人差が生じにくい(本研究では0.5~6.0%)。一方、自転車運動における大腿四頭筋の最大活動レベルは被検者の大腿部の代謝能力に依存すると考えられるため、比較的大きな個人差が生じる(同3.7~22.1%)。本研究において、自転車運動における大腿四頭筋の活動レベルが走運動と比較して高い者、すなわち $\Delta T2\%$ が高い者ほど $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ が高かったこと、また大腿四頭筋のみならず、長内転筋を除く大腿部筋群の $\Delta T2\%$ と $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ の間にも同様の傾向がみられたことから、動員される筋やそのサイズのみならず、それらの筋の最大活動レベルも $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ に関与することが示された。 $\Delta T2\%$ は、運動単位の動員数の差を反映すると考えられるため、本研究の結果は、自転車運動時に走運動より多くの運動単位を動員し、筋への酸素の取り込みを亢進させた者において、自転車運動における $\dot{V}O_{2max}$ が走運動に近づいたことを示唆している。一方、大腰筋の $\Delta T2\%$ と $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ の間には負の相関関係が認められた。この関係については、本研究で $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ への関与が示唆された呼吸数と大腰筋の活動レベルの関係から説明できるかもしれない。すなわち、自転車運

動において大腰筋の活動レベルが高かった者ほど呼吸数が低かったが、大腰筋と横隔膜はともに腰椎に起始を持つため、大腰筋が強く収縮することによって、横隔膜の主な機能である呼吸が制限され、結果として $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ が低く抑えられたのかもしれない。

一方、最大下強度での運動におけるT2の増大が有酸素性代謝能力に依存する¹⁸⁾のに対して、最大強度あるいは超最大強度での運動におけるT2は、筋の無酸素性代謝能力を反映するとも考えられる。すなわち、MRIのT2は、当初、細胞外水の増加によるものと考えられていた^{24,25)}が、現在では乳酸やリン酸などの代謝物の蓄積による細胞内への水分シフトを反映するというのが代表的な見解である^{26~28)}。したがって、T2%の高低は、これらの代謝物の蓄積を反映しているといえる。最大漸増負荷運動では、無酸素性代謝閾値を超える強度から、無酸素性代謝の貢献が急激に高まるため、運動に動員される筋のいずれかが無酸素性代謝能力の限界を迎えた場合に終了を余儀なくされる。このことは、有酸素性能力の最大値($\dot{V}O_{2max}$)が出現する前にある特定の筋あるいは筋群が無酸素性代謝能力の限界に達した場合、 $\dot{V}O_{2max}$ は過小評価されることを示唆している。したがって本研究において、大腿部の多くの筋で $\Delta T2\%$ が高い者ほど $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ が高かったことは、無酸素性代謝能力が高い者ほど、走運動時に近い $\dot{V}O_{2max}$ が得られた可能性を示唆している。実際、大腿四頭筋において、最大運動時の無酸素性代謝の相対的貢献度を示す指標である $\%cycRER_{max}$ および $\%cyc\dot{V}CO_{2max}$ と $\Delta T2\%$ の間に有意な相関関係が認められ、 $\%cyc\dot{V}CO_{2max}$ は $\%cyc\dot{V}O_{2max}$ とも極めて高い有意な相関関係を示した。

ところで、本研究の測定では、運動直後のMRIの撮影に20分程度の時間を要した。活動筋のT2%は運動後20分程度の間、安静時と比較して高い値を示すことが明らかにされている¹³⁾が、その値は時間の経過とともに減少する。したがって、下腿部、大腿部、そして体幹部の筋のT2%を単純に比較することはできない。本研究において、下腿部、大腿部そして体幹部の順に撮影を行なった理由は、体幹部のMRI画像は、呼吸による影響を受けやすく、本研究のような呼吸器系に最大の負荷をかけた運動

の直後には、特にその影響が大きいためである。したがって、下腿部および大腿部の撮影を終え、激しい呼吸がおさまってから体幹部の撮影をおこなう必要があった。

V. ま と め

本研究では、自転車運動における $\dot{V}O_{2max}$ の走運動に対する到達率(%cyc $\dot{V}O_{2max}$)の個人差について、酸素供給系および利用系の両側面から検討した。その結果、走運動と比較して少ない活動筋量や低い心拍出量を、1) 走運動と比較して高い換気量による効率の良い酸素の取り込みによって補償できた者、2) 乳酸の重炭酸緩衝作用によって生じる二酸化炭素を十分に排出し、より高い強度まで運動を遂行することによって補償できた者、3) 走運動と比較して高い筋活動レベルまで運動を遂行し、筋における酸素の取り込みを亢進することによって補償できた者において、走運動の $\dot{V}O_{2max}$ に近い $\dot{V}O_{2max}$ が得られることが明らかとなった。また、MRI画像から求めた主働筋の最大活動レベルは無酸素性代謝能力に依存する可能性が示唆された。

(受理日 平成21年1月21日)

文 献

- 1) 山地啓司．最大酸素摂取量の科学，第2版，運動様式の相違にみられる $\dot{V}O_{2max}$ の比較，杏林書院，東京，(2001)，27-37.
- 2) Seals, D. R., Mullin, J. P. $\dot{V}O_{2max}$ in variable type exercise among well-trained upper body athletes. Res. Q. Exerc. Sport., (1982) **53**, 58-63.
- 3) Nagle, F. J., Richie, J. P., Giese, M. D. $\dot{V}O_{2max}$ responses in separate and combined arm and leg air-braked ergometer exercise. Med. Sci. Sports Exerc., (1984), **16**, 563-566.
- 4) Davies, C. T., Sargeant, A. J. Effects of training on the physiological responses to one- and two-leg work. J. Appl. Physiol., (1975) **38**, 377-385.
- 5) Neary, P. J., Wenger, H. A. The effects of one- and two-legged exercise on the lactate and ventilatory threshold. Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., (1986) **54**, 591-595.
- 6) Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., Abraham, L. D., Petrek, G. W. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. Med. Sci. Sports Exerc., (1991) **23**, 93-107.
- 7) Neptune, R. R., van den Bogert, A. J. Standard mechanical energy analyses do not correlate with muscle work in cycling. J. Biomech., (1998) **31**, 239-245.
- 8) Bundle, M. W., Hoyt, R. W., Weyand, P. G. High-speed running performance: a new approach to assessment and prediction. J. Appl. Physiol., (2003) **95**, 1955-1962.
- 9) Hermansen, L., Ekblom, B., Saltin, B. Cardiac output during submaximal and maximal treadmill and bicycle exercise. J. Appl. Physiol., (1970) **29**, 82-86.
- 10) Basset, F. A., Boulay, M. R. Specificity of treadmill and cycle ergometer tests in triathletes, runners and cyclists. Eur. J. Appl. Physiol., (2000) **81**, 214-221.
- 11) Hagberg, J. M., Giese, M. D., Schneider, R. B. Comparison of the three procedures for measuring $\dot{V}O_{2max}$ in competitive cyclists. Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., (1978) **39**, 47-52.
- 12) Brown, C. H., Wilmore, J. H. Physical and physiological profiles of champion women long distance runners. Med. Sci. Sports Exerc., (1971) **3**, h.
- 13) Fisher, M. J., Meyer, R. A., Adams, G. R., Foley, J. M., Potchen, E. J. Direct relationship between proton T2 and exercise intensity in skeletal muscle MR images. Invest. Radiol., (1990) **25**, 480-485.
- 14) Adams, G. R., Duvoisin, M. R., Dudley, G. A. Magnetic resonance imaging and electromyography as indexes of muscle function. J. Appl. Physiol., (1992) **73**, 1578-1583.
- 15) Kinugasa, R., Akima, H. Neuromuscular activation of triceps surae using muscle functional MRI and EMG. Med. Sci. Sports Exerc., (2005) **37**, 593-598.
- 16) Kinugasa, R., Kawakami, Y., Fukunaga, T. Muscle activation and its distribution within human triceps surae muscles. J. Appl. Physiol., (2005) **99**, 1149-1156.
- 17) Tanaka, K., Takeshima, N., Kato, T., Niihata, S., Ueda, K. Critical determinants of endurance performance in middle-aged and elderly endurance runners with heterogeneous training habits. Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., (1990) **59**, 443-449.
- 18) Reid, R. W., Foley, J. M., Jayaraman, R. C., Prior, B. M., Meyer, R. A. Effect of aerobic capacity on the T2 increase in exercised skeletal muscle. J. Appl. Physiol., (2001) **90**, 897-902.
- 19) 山地啓司．最大酸素摂取量の科学，第2版， $\dot{V}O_{2max}$ の決定因子と制限因子，杏林書院，東京，(2001)，272-289.
- 20) Bergh, U., Kanstrup, I. L., Ekblom, B. Maximal oxygen uptake during exercise with various combinations of arm and leg work. J. Appl. Physiol., (1976) **41**, 191-196.
- 21) Hermansen, L., Saltin, B. Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. J. Appl. Physiol., (1969) **26**, 31-37.
- 22) Miyamura, M., Honda, Y. Oxygen intake and cardiac output during maximal treadmill and bicycle exercise. J. Appl. Physiol., (1972) **32**, 185-188.
- 23) Akima, H., Kinugasa, R., Kuno, S. Recruitment of the thigh muscles during sprint cycling by muscle functional magnetic resonance imaging. Int. J. Sports Med.,

- (2005) **26**, 245-52.
- 24) Fleckenstein, J. L., Canby, R. C, Parkey, R. W., Peshock, R. M. Acute effects of exercise on MR imaging of skeletal muscle in normal volunteers. *Am. J. Roentgenol.*, (1988) **151**, 231-237.
- 25) Archer, B. T., Fleckenstein, J. L., Bertocci, L. A, Haller, R. G., Barker, B., Parkey RW, Peshock RM. Effect of perfusion on exercised muscle: MR imaging evaluation. *J. Magn. Reson. Imaging.*, (1992) **2**, 407-413.
- 26) de Kerviler, E., Leroy-Willig, A., Jehenson, P., Duboc, D., Eymard, B., Syrota, A. Exercise-induced muscle modifications: study of healthy subjects and patients with metabolic myopathies with MR imaging and P-31 spectroscopy. *Radiology.*, (1991) **181**, 259-264.
- 27) Bendahan, D., Giannesini, B., Cozzone, P. J. Functional investigations of exercising muscle: a noninvasive magnetic resonance spectroscopy-magnetic resonance imaging approach. *Cell Mol. Life Sci.*, (2004), **61**, 1001-1015.
- 28) Weidman, E. R., Charles, H. C., Negro-Vilar, R., Sullivan, M. J., MacFall, J. R. Muscle activity localization with ³¹P spectroscopy and calculated T2-weighted ¹H images. *Invest. Radiol.*, (1991) **26**, 309-316.