

[原 著]

繰り返し自転車スプリント時におけるパフォーマンス —表面筋電図活動と疲労感からの検討—

松浦 亮太¹⁾, 有光 琢磨²⁾, 柚木 孝敬³⁾, 矢野 徳郎³⁾

Investigation of performance during repeated cycling sprints by surface EMG activity and sense of fatigue

Ryouta MATSUURA¹⁾, Takuma ARIMITSU²⁾, Takahiro YUNOKI³⁾,
and Tokuo YANO³⁾

Abstract

The purpose of the present study was to investigate performance during repeated cycling sprints (RCS) by surface electromyogram (SEMG) activity and sense of fatigue. Seven healthy subjects (mean \pm SD, 22.7 \pm 3.5 years, 170.4 \pm 5.7 cm, 65.4 \pm 5.5 kg) performed RCS (ten 10-sec cycling sprints) interspersed with both 30-sec and 360-sec recovery periods. Recovery periods of 360 sec were set before the 5th and 9th sprints. Peak power output divided by body mass ($PPO \cdot BM^{-1}$) was correlated with SEMG indices in only 2 out of 7 subjects and ratings of perceived exertion (RPE) immediately before each cycling sprint in 6 out of 7 subjects. RPE immediately before each cycling sprint was correlated with blood lactate concentration ($r = 0.72$; $P < 0.01$) and oxygen uptake ($r = 0.61$; $P < 0.01$), minute ventilation ($r = 0.71$; $P < 0.01$), and heart rate ($r = 0.57$; $P < 0.01$) immediately before each cycling sprint. These results indicate that performance during RCS was determined by not only efferent motor command from the central nervous system (CNS) to peripheral muscles but also metabolic stress in peripheral muscles. It is thought that the CNS set performance based on afferent information from peripheral muscles and organs in the subsequent exercise during RCS.

KEY WORDS : repeated sprints, central nervous system, surface electromyogram, ratings of perceived exertion, central governor model

緒 言

我々が日常生活やスポーツ競技において運動を行う場合、運動は永久に継続できるわけではない。これは

一般的に、筋疲労の発生が運動の継続を困難にさせるためであると考えられている。この筋疲労が発生するメカニズムを明らかにすることは、スポーツ科学に携わる者にとって長年の課題であり、健康促進やスポー

1) 九州共立大学スポーツ学部

2) 北海道大学大学院教育学院健康スポーツ教育論講座運動生理学グループ

3) 北海道大学大学院教育学研究人間発達科学分野

1) Kyushu Kyoritsu University Faculty of Sports Science

2) Laboratory of Exercise Physiology, Health and Sports Education, Graduate School of Education, Hokkaido University, Sapporo, Japan

3) Department of Human Developmental Sciences, Faculty of Education, Hokkaido University, Sapporo, Japan

ツ競技力向上のために運動を行っている者に対して非常に重要な意義を有する。運動やスポーツには非常に多くの形態や種目が存在するが、最大下強度の連続的な長時間運動から構成されるものよりも、短時間の全力運動を間欠的に繰り返す運動によって構成されている種目の方に、より多くの割合の人々が参加していると言われている (Gaitanos et al. 1993¹⁾)。

筋疲労の原因として、筋内pHの低下やエネルギー基質の枯渇が筋活動に及ぼす悪影響が伝統的に最も検討されており、これは末梢性疲労と呼ばれている (Fitts 1994²⁾)。短時間全力運動の繰り返しを用いた先行研究 (Balsom et al. 1992³⁾, Billaut et al. 2003⁴⁾, Bogdanis et al. 1998⁵⁾, Gaitanos et al. 1993¹⁾, Ratel et al. 2002⁶⁾) においても、末梢性疲労による運動パフォーマンスの低下が議論されている。しかしながら最近では、末梢性疲労のみで筋疲労が説明できないことを示唆している研究も見受けられる。これらの研究では、Ulmer (1996)⁷⁾ の提唱した目的的预期モデルを基に筋疲労の検討を行っている。目的的预期モデルに基づいた筋疲労の捉え方を概説すると以下のようになる。運動によって骨格筋や末梢器官 (心臓および肺など) で起きた変化は求心性信号として中枢神経系 (CNS) へ送られ、この求心性信号によって伝えられた情報が、その後にCNSから末梢へ送られる遠心性運動指令の作成過程を修飾する。この求心性信号が遠心性運動指令の作成過程を修飾する段階で、CNSは求心性情報に基づいて運動を完遂できるようなパフォーマンスを設定し、その結果が筋疲労として現れる、というものである (Lambert et al. 2005⁸⁾, Noakes et al. 2005⁹⁾, St Clair Gibson et al. 2001a¹⁰⁾)。ただし、これらの研究ではCNSが求心性情報に基づいて設定したパフォーマンスと、設定されたパフォーマンスに基づいてCNSから末梢へ送られる遠心性運動指令が同一視されてしまっている。筋で発揮されるパフォーマンスは、CNSからの遠心性運動指令と筋のエネルギー供給能の相互作用によって決定すると考えられるので、CNSは事前に設定したパフォーマンスを発揮するために末梢筋の状況を踏まえた遠心性運動指令を筋へ送るはずである。また、Ulmer (1996)⁷⁾ の提唱した目的的预期モデルのように、末梢からの求心性情報によってCNSでパフォーマンスが事前に設定されているのであれば、末梢からの求心性情報を総括的に反映すると考えられる疲労感とパフォーマンスには何らかの関係があると思われる。

本研究の目的は、繰り返し自転車スプリント

(Repeated Cycling Sprints : RCS) 時におけるパフォーマンスと、CNSから末梢へ送られる遠心性運動指令の結果として表れる筋活動を観察し、求心性情報に基づいて設定されるパフォーマンスと設定されたパフォーマンスに基づいて末梢へ送られる遠心性運動指令の関係を検討することであった。また、末梢からの求心性情報と運動パフォーマンスについて総括的に理解するため、RCSにおける各スプリント直前の疲労感とその直後に行われるスプリントでのパフォーマンスの関係も検討した。

短時間の全力自転車スプリントを繰り返した場合、運動時の ATPは主にクレアチンリン酸 (PCr) と解糖系によって供給されると考えられ (Gaitanos et al. 1993¹⁾, Nevill et al. 1996¹¹⁾)、筋内pHの低下とPCrの減少が代謝ストレスとして作用する可能性がある。そこで、本研究では筋内pHとPCrが求心性情報として果たす役割を分離するため、PCrがほぼ完全に回復する360秒休息 (Arsac et al. 2004¹²⁾, Harris et al. 1976¹³⁾, McCann et al. 1995¹⁴⁾) をRCS時に適宜採用して検討を行った。

方 法

被験者

被験者は7名の健康な大学生および大学院生 (年齢 : 22.7 ± 3.5 (SD) 歳, 身長 : 170.4 ± 5.7 cm, 体重 : 65.4 ± 5.5 kg) であった。被験者は定期的に運動トレーニングを行っており、神経筋障害を有する者および喫煙者はいなかった。実験に先立ち、全ての被験者に実験の趣旨、内容および危険性について口頭ならびに文書にて十分な説明を行い、理解の上で同意書を得た。本研究は、北海道大学大学院教育学研究院倫理委員会の承認を得て実施した。

実験デザイン

被験者は2つのテストをそれぞれ別の日に行い、各テストは少なくとも2日間の間隔を空けた。最初のテストは予備テストであり、各被験者の身体特性を測定し、RCSと主観的運動強度 (RPE) に慣れるために下述する実験プロトコルの1-4セットを行った。この時に測定した各被験者の体重 (BM) は、自転車スプリント時の負荷を決定するために用いた。各被験者には、それぞれのテストの24時間前から高強度運動の実施、アルコールの摂取、カフェインの摂取を控えるように指示した。

実験プロトコル

被験者は実験開始の30分前に実験室を訪れ、実験機器の取り付けを行った。実験機器の取り付け後、被験者は自転車エルゴメータのサドル上で3分の安静状態を保った後、5分間のウォーミングアップを0Wの負荷で行った。ウォーミングアップ時のペダリング速度は100 rpmとした。このウォーミングアップの官僚と同時にRCSテストを開始した。RCSテストは10秒間の自転車スプリントを10回繰り返すものであり、2, 3, 4, 6, 7, 8, 10セット目の直前には30秒の動的休息を採用し、5, 9セット目の直前には360秒休息を採用した。動的休息はウォーミングアップと同様、0 Wの負荷で100 rpmの自転車運動を行うものとした。全ての自転車スプリントは $0.075 \cdot \text{BM} \cdot 9.81^{-1}$ に相当する負荷 (F) [N] で行った (Ayalon et al. 1974¹⁵⁾)。被験者には、自転車スプリント時において出来る限り多くの回転数をペダリングするように指示した。RCSの繰り返し数は事前に被験者には伝えなかった。RCS時、運動中と休息中の両方で被験者はエルゴメータのサドル上に座った状態であった。全ての自転車スプリントのスタートには、ローリングスタートを採用した。

繰り返しの自転車スプリント

全ての運動は、運動の継続時間や負荷を調節するコンピュータを内蔵した自転車エルゴメータ (POWERMAX-VII, Combi, Tokyo, Japan) を用いて行った。任意の運動におけるピーク回転数 (Rpm_{peak}) が自転車エルゴメータ前部に取り付けられているスクリーンに表示されるので、スクリーンには覆いをした。各自転車スプリントにおけるrpmの時系列変動は、10Hzでオンラインコンピュータに記録された。被験者がエルゴメータに座る際には足をペダルの上に寄せ、サドルの高さはペダルが最下端にあるときに膝関節がわずかに曲がるように調節した。ペダルに乗せた足はストラップで固定し、運動時に足が滑らないようにした。各自転車スプリントにおけるピークパワー発揮 (Peak Power Output: PPO) は、Lakomy (1986)¹⁶⁾ と同様の方法で算出した。コンピュータに記録されたrpmの結果は1秒毎に平均し、平均した1秒毎のrpmから1秒間隔の加速度を求めた。この加速度から1秒間隔で“excess load”を算出した。平均した1秒毎のrpmとそれぞれの“effective load (resistive load + excess load)”の積を用い、RCS時の補正パワー発揮を決定した：

$$\text{Power output [W]} = \text{rpm} \cdot 6 \cdot \text{effective load [N]} \cdot 60.04^{-1}$$

定数6は、自転車エルゴメータのフライホイールが360°回転した場合に内臓コンピュータによって計算される距離 [m]、定数60.04は単位 $\text{Nm} \cdot \text{min}^{-1}$ を単位Wに変換するための値 [$\text{Nm} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$] である。各自転車スプリントにおいて、rpmと“effective load”の積で最大のものをPPOとした。被験者の身体特性の差によるばらつきを減少させるため、PPOはBMで除して ($\text{PPO} \cdot \text{BM}^{-1}$) 結果に用いた。

血中乳酸濃度

血中乳酸濃度 ($[\text{La}^{-}]$) は、キャピラリーを用いて指先より微量 (25 μL) の血液を採取し、直ちに乳酸分析器 (YSI 1500 SPORT, YSI, OH, USA) により分析することで求めた。乳酸分析器の較正は、各被験者の各テスト開始前に標準液 (5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) を用いて行った。採血はウォーミングアップ完了30秒前 (Pre1)、RCSの5セット目および9セット目を開始する30秒前 (Pre5, Pre9) およびRCS終了直後 (Post-Ex) に行った。

呼吸ガスおよび心拍数

酸素摂取量 ($\dot{V}\text{O}_2$) のデータは呼吸ガス分析器 (AE-280S, Minato Medical Science, Osaka, Japan) を用いてbreath-by-breathに決定した。換気量 ($\dot{V}\text{E}$) はhot-wire flow meterを用いて測定し、flow meterは2.0 Lのシリンジを用いて較正した。 O_2 および CO_2 濃度は、それぞれジルコニア式 O_2 センサーおよび赤外線 CO_2 センサーを用いて測定した。呼吸ガス分析器は標準ガス (O_2 : 15.17 %, CO_2 : 4.92 %) を用いて較正した。この較正は各被験者の各テスト開始前に行った。 $\dot{V}\text{O}_2$ は運動開始前の安静時、運動時および回復期に連続的に測定し、10秒毎の平均値を算出した。被験者の身体特性の差によるばらつきを減少させるため、BMで除した $\dot{V}\text{O}_2$ ($\dot{V}\text{O}_2 \cdot \text{BM}^{-1}$) を結果に用いた。各自転車スプリントを開始する直前の10秒における $\dot{V}\text{O}_2 \cdot \text{BM}^{-1}$ および $\dot{V}\text{E}$ を、それぞれpre $\dot{V}\text{O}_2$ およびpre $\dot{V}\text{E}$ とした。心拍数 (HR) は、呼吸ガス分析器に備え付けられた心拍モニターを用いて測定し、10秒毎の平均値を算出した。各自転車スプリントを開始する直前の10秒におけるHRを、preHRとした。

主観的運動強度

RCS時、全身のRPEはBorgの15ポイント (6-20) スケールを用いて評価し、スケールは被験者の目の前に設置した。RPEは、RCSの各自転車スプリント

の開始10秒前にスケールの数字を指差してもらうことで記録した。各テストの開始前、安静時の状態を『6-7 (非常に楽である)』, 最大に疲労を感じた状態を『19-20 (非常にきつい)』とするように指示した。また、休息時にRPEを評価するということで、RPEは運動完了後に全身に残っている努力、苦痛、不快感および疲労感覚を反映したものとするように注意した (Utter et al. 2007¹⁷⁾)。

表面筋電図

表面筋電図 (SEMG) は、各自転車スプリント運動時に左脚の外側広筋 (VL) から1000 Hzのサンプリング頻度で導出した。表面電極を取り付ける前には、皮膚抵抗を減らすために以下の処置を記録部位に施した。まず除毛を行い、皮膚表面を皮膚前処理剤で薄く削った。その後、アルコールを用いて皮膚全面を清潔にした。双極のSEMGセンサー電極 (SX230, Biometrics Ltd., Gwent, South Wales, UK; 双極間距離: 20 mm) は、膝蓋骨上縁より5 横指近位部の大腿外側部であるVLの筋腹に取り付けた。基準電極は右手首の茎状突起に取り付けた。SEMG信号はSEMGセンサー電極に内蔵された増幅器 (周波数帯域 = 20-450 Hz; 同相除去比 (CMRR) > 96 dB; 入力インピーダンス > 10 TΩ; ゲイン = 1000) によって増幅し、AD変換器 (MacLab/8s, AD Instruments, Bella Vista, NSW, Australia) を経由してデジタル信号へ変換した後、コンピュータに保存した。その後、コンピュータに保存したSEMGのデータは、解析ソフト (Acknowledge, BIOPAC Systems, Goleta, CA, USA) を用いてオフラインで処理した。デジタル化された生データは、5-500 HzのレンジでFIRバンドパスフィルタ処理を行った。RCS時のSEMG活動は、筋バーストの開始と終了の間の二乗平均平方根 (RMS) と平均パワー周波数 (MPF) を用いて決定した (Racinais et al. 2007¹⁸⁾)。筋バーストの開始地点と終了地点は、± 0.2 mV の一定の閾値を用いて決定した (Billaut et al. 2005¹⁹⁾, Racinais et al. 2007¹⁸⁾)。周波数パワースペクトルを算出するために、各筋バーストの電気信号は高速フーリエ変換を行った。高速フーリエ変換で得られた周波数パワースペクトルの解析は5-500 Hzのレンジに限定し (Kay et al. 2001²⁰⁾, St Clair Gibson et al. 2001b²¹⁾)、次式 (Moritani et al. 1982²²⁾) に基づいてMPFを算出した:

$$MPF = M_1/M_0 = \int_0^\infty fP(f)df / \int_0^\infty P(f)df$$

f は周波数、 $P(f)$ は筋電信号のパワースペクトルである。本実験の各自転車スプリント時におけるパワー発揮の解析の結果、平均して運動開始からペダリング6回転目でピークパワーが発揮されていたので、5回転目と6回転目におけるRMSとMPFを平均して、各自転車スプリント時のピークパワー発現局面での値とした (Racinais et al. 2007¹⁸⁾)。センサー電極を取り付ける場所にはマークを付け、条件間で位置が異ならないように十分注意した。RMSとMPFは1セット目の値の比率で表し、正規化した。

統計処理

結果は平均値 ± 標準偏差 (SD) で表した。時間の主効果を検定するために反復測定の一元配置分散分析を用いた。F値に有意差が見られた場合、Tukey-Kramer's post-hocテストで比較を行った。二変量間の対応関係の強さはピアソンの相関係数により示した。有意水準は5 %未満 ($P < 0.05$) とした。

結果

ピークパワー発揮

$PPO \cdot BM^{-1}$ には有意な時間の主効果が見られ ($F_{9,54}=8.22$; $P<0.0001$), 1セット目と比較して4, 7, 8, 10セット目で有意に減少していた。また、5セット目と9セット目の間に有意な差はなかった (Fig. 1)。

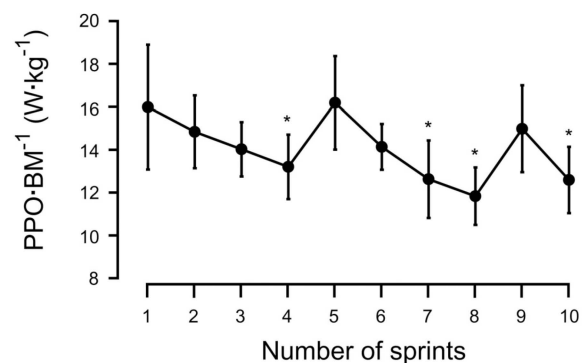


Fig. 1. Changes in peak power output (PPO) divided by body mass (BM) in each of the subjects ($PPO \cdot BM^{-1}$) during repeated cycling sprints (RCS). *: significantly different ($P < 0.05$) from the value in the 1st sprint.

血中乳酸濃度

血中 $[La^-]$ は時間の主効果が有意であり ($F_{4,24} = 119.35$; $P < 0.0001$), Pre1 ($1.5 \pm 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) よりも Pre5 ($12.5 \pm 2.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), Pre9 ($15.2 \pm 4.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) および Post-Ex ($16.4 \pm 3.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) で有意に高い値を示した (Fig.2). さらに, Pre9 および Post-Ex の血中 $[La^-]$ は Pre5 の血中 $[La^-]$ よりも有意に高かった.

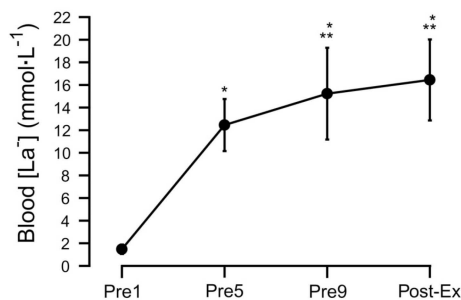


Fig. 2. Changes in blood lactate concentration ($[La^-]$) during repeated cycling sprints (RCS). *: significantly different ($P < 0.05$) from the value immediately before the 1st sprint (Pre1). **: significantly different ($P < 0.05$) from the value immediately before the 5th sprint (Pre5).

各自転車スプリント直前の酸素摂取量, 換気量, 心拍数

RCS時の $\text{pre}\dot{V}O_2$, $\text{pre}\dot{V}E$ および preHR の変化は Fig.3 に示されている. $\text{pre}\dot{V}O_2$, $\text{pre}\dot{V}E$ および preHR の全てで有意な時間の主効果が観察された ($\text{pre}\dot{V}O_2$: $F_{9,54} = 220.52$; $P < 0.0001$, $\text{pre}\dot{V}E$: $F_{9,54} = 111.27$; $P < 0.0001$, preHR : $F_{9,54} = 124.86$; $P < 0.0001$).

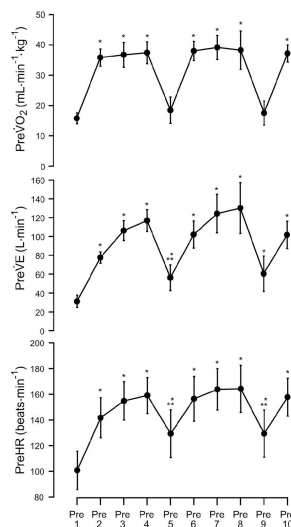


Fig. 3. Changes in oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) divided by body mass (BM) in each of the subjects, minute ventilation (VE), and heart rate (HR) for 10 sec immediately before each of the ten cycling sprints ($\text{pre}\dot{V}O_2$: top, $\text{pre}\dot{V}E$: middle, and preHR : bottom, respectively) during repeated cycling sprints (RCS). *: significantly different ($P < 0.05$) from the value immediately before the 1st sprint (Pre1). **: significantly different ($P < 0.05$) from the value immediately before the 2nd sprint (Pre2).

主観的運動強度

RCS時の各自転車スプリント直前におけるRPEの変化はFig. 4に示されている. RPEでは有意な時間の主効果が見られ ($F_{9,54} = 34.49$; $P < 0.0001$), Pre1を除いた全ての値がPre1の値よりも高かった.

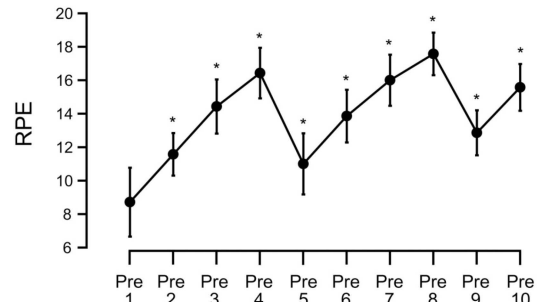


Fig. 4. Changes in ratings of perceived exertion (RPE) 10 sec before each of the ten cycling sprints during repeated cycling sprints (RCS). *: significantly different ($P < 0.05$) from the value immediately before the 1st sprint (Pre1).

表面筋電図

RCSの各自転車スプリント時におけるRMSとMPFはFig.5に示されている. RMSには有意な時間の主効果は見られなかった ($F_{9,54} = 1.25$; $P > 0.05$) が, MPFでは時間の主効果が有意であった ($F_{9,54} = 3.77$; $P < 0.01$). MPFでは, 5セット目と9セット目の両方の値が, 2セット目および3セット目の値よりも有意に高かった.

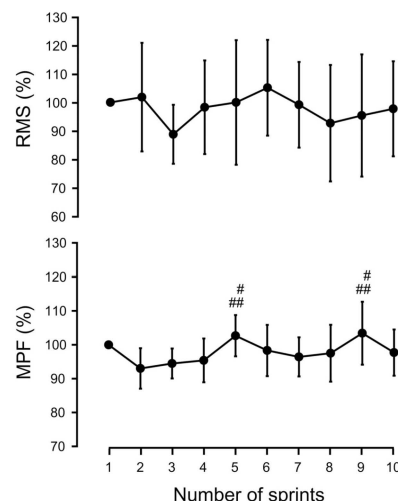


Fig. 5. Changes in RMS from the left vastus lateralis (VL) (top) and mean power frequency (MPF) from the left VL (bottom) normalized by the 1st sprint value during repeated cycling sprints (RCS). #: significantly different ($P < 0.05$) from the value in the 2nd sprint. ##: significantly different ($P < 0.05$) from value in the 3rd sprint.

相関関係

7名の各被験者における $PPO \cdot BM^{-1}$ とRPE, $PPO \cdot BM^{-1}$ とRMSおよび $PPO \cdot BM^{-1}$ とMPFの相関係数をTable 1に示した. $PPO \cdot BM^{-1}$ とRPEでは, 1名を除いた6名において有意な負の相関が見られた. $PPO \cdot BM^{-1}$ とRMSおよび $PPO \cdot BM^{-1}$ とMPFでは, それぞれ2名の被験者が有意な正の相関を示しただけに留まった. 各自転車スプリント直前のRPEと $pre\dot{V}O_2$, $pre\dot{V}E$ および $preHR$ の相関係数は, それぞれ0.61 ($P < 0.001$), 0.71 ($P < 0.001$) および0.57 ($P < 0.001$) と有意な正の相関を示した (Table 2). さらに, 血中 $[La^-]$ とRPEの関係を検討するため, これらの2つの変量におけるPre1, Pre5およびPre9の値を用いて相関係数を算出したところ, 0.72 ($P < 0.001$) と有意な正の相関が見られた (Table 2).

Subject	Correlation coefficient ($n = 10$)		
	$PPO \cdot BM^{-1}$ -RPE	$PPO \cdot BM^{-1}$ -RMS	$PPO \cdot BM^{-1}$ -MPF
A	-0.84**	-0.35	0.08
B	0.37	0.67*	0.34
C	-0.88**	0.84**	0.66*
D	-0.77**	0.21	0.26
E	-0.95**	0.59	0.86**
F	-0.64*	0.53	0.11
G	-0.95**	0.31	0.23

*: $P < 0.05$ **: $P < 0.01$

Table 1 Correlations coefficient for ratings of perceived exertion (RPE) before each of the ten cycling sprints, root mean square (RMS) and mean power frequency (MPF) calculated from surface electromyogram (SEMG), and peak power output (PPO) divided by body mass (BM) in each of the subjects ($PPO \cdot BM^{-1}$).

Correlation coefficient	
RPE- $pre\dot{V}O_2$	0.61** ($n = 70$)
RPE- $pre\dot{V}E$	0.71** ($n = 70$)
RPE- $preHR$	0.57** ($n = 70$)
RPE-blood $[La^-]$	0.72** ($n = 21$)

** : $P < 0.01$

Table 2 Correlation coefficients for ratings of perceived exertion (RPE) before each of the ten cycling sprints, oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), minute ventilation ($\dot{V}E$), and heart rate (HR) for 10 sec immediately before each of the ten cycling sprints ($pre\dot{V}O_2$, $pre\dot{V}E$, and $preHR$, respectively), and blood lactate concentration ($[La^-]$).

考 察

$PPO \cdot BM^{-1}$ とRMSおよび $PPO \cdot BM^{-1}$ とMPFの相関関係を検討したところ, それぞれ2名の被験者が有意な正の相関を示しただけであった. これらの結果は, RCS時のパフォーマンスがSEMG活動のみを反映しているわけではないことを示唆している. 本研究におけるRCSでは, 血中 $[La^-]$ が5セット目直前よりも9セット目直前で有意に大きかった. このことから, RCSの経過に伴い筋内pHも低下していたことが推察される. SEMGの周波数パワースペクトルは筋内pHの低下によって低周波帯へ移行することが報告されている (Hagberg 1981²³), Komi and Tesch 1979²⁴). また, 9セット目のMPFと1セット目のMPFの間には有意な差が見られなかったが, 被験者7名中5名において, 9セット目のMPFは1セット目および5セット目よりも大きな値を記録した. MPFが筋線維活動電位伝導速度 (MFCV) を表すこと (Lindström et al. 1970²⁵), Moritani et al. 1986²⁶), Stulen and De Luca 1981²⁷), SEMGから算出したRMSが動員されている運動単位 (MU) の数と動員されているMUの発火頻度を表すこと (Lind and Petrofsky 1979²⁷), Moritani et al. 1982²²), およびRMSがRCS時に有意な変化を示していなかったことを考慮に入れると, 9セット目では1セット目および5セット目よりも速筋線維の選択的動員が起きていたことが推測される (Matsuura et al. 2006²⁸). このような筋動員が推測される状況で, 有意差は見られなかったが9セット目の $PPO \cdot BM^{-1}$ は全被験者において1セット目よりも低い値を記録していた. したがって, RCS時のパフォーマンスはCNSからの運動指令のみで決定するのではなく, 筋内pHの低下といった筋代謝による影響も反映されることが考えられる.

Ulmer (1996)⁷ やUlmer (1996)⁷ の提唱した目的的预期を支持する結果を報告している研究者たち (Lambert et al. 2005⁸), Noakes et al. 2005⁹), St Clair Gibson et al. 2001a¹⁰) は, 末梢および末梢器官からの求心性情報に基づき, CNSが事前に次の運動で発揮されるパフォーマンスを設定するとしている. 末梢および末梢器官からの求心性信号の発信源として, 骨格筋, 心臓, 呼吸筋が挙げられている (St Clair Gibson and Noakes 2004²⁸). したがって, 本研究における各自転車スプリント直前のRPEは, 筋の代謝産物, HRおよび $\dot{V}E$ と関連があると思われる. 実際に, 各自転車スプリント直前のRPEと血中 $[La^-]$, $pre\dot{V}O_2$,

preHRおよびpreVEの間には有意な正の相関が見られ、各自転車スプリント直前のRPEが骨格筋、心臓および呼吸筋からの各求心性情報を総括的に反映したものであったと考えられる。本研究と同様に、運動の急速時におけるRPEと生理学的変量の相関を検討した先行研究 (Green et al. 2006²⁹⁾) では、血中 $[La^-]$ とRPEの間の相関係数は0.34、HRとRPEの間の相関係数は0.44であった。これらの相関係数は本研究のものよりも低い値であり、本研究で記録されたRPEは末梢からの求心性情報をよく反映していたことが推察される。

本研究で記録されたRPEは、その直後に行われたパフォーマンス (i.e. $PPO \cdot BM^{-1}$) と有意な負の相関が示された。RPEは末梢からの求心性情報を総括的に反映していたと考えられるので、RCS時のパフォーマンスは末梢からの求心性情報に基づき、CNSによって事前に設定されていることが示唆される。したがって、RCSのような短時間の全力運動を間欠的に繰り返すような運動では、休息時にRPEを測定することでその直後に発揮されるパフォーマンスを予測できる可能性がある。

結論として、RCS時におけるパフォーマンスは、CNSからの遠心性運動指令と骨格筋の代謝状況の両方によって決定される。また、RCS時にはCNSが末梢からの求心性情報に基づき、次に行われる運動での発揮パフォーマンスを設定していると考えられる。

参考文献

- 1) Gaitanos GC, Williams C, Boobis LH, Brooks S (1993): Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol* 75: 712-719.
- 2) Fitts RH (1994): Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiol Rev* 74: 49-94.
- 3) Balsom PD, Seger JY, Sjodin B, Ekblom B (1992): Maximal-intensity intermittent exercise: effect of recovery duration. *Int J Sports Med* 13: 528-533.
- 4) Billaut F, Basset FA, Falgairetti G (2005): Muscle coordination changes during intermittent cycling sprints. *Neurosci Lett* 380: 265-269.
- 5) Bogdanis GC, Nevill ME, Lakomy HKA, Boobis LH (1998): Power output and muscle metabolism during and following recovery from 10 and 20 s of maximal sprint exercise in humans. *Acta Physiol Scand* 163: 261-272.
- 6) Ratel S, Bedu M, Hennegrave A, Doré E, Duché P (2002): Effects of age and recovery duration on peak power output during repeated cycling sprints. *Int J Sports Med* 23: 397-402.
- 7) Ulmer HV (1996): Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback. *Experientia* 52: 416-420.
- 8) Lambert EV, St Clair Gibson A, Noakes TD (2005): Complex system model of fatigue: integrative homeostatic control of peripheral physiological systems during exercise in humans. *Br J Sports Med* 39: 52-62.
- 9) Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV (2005): From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans: summary and conclusions. *Br J Sports Med* 39: 120-124.
- 10) St Clair Gibson Lambert MI, Noakes TD (2001a): Neural control of force output during maximal and submaximal exercise. *Sports Med* 31: 637-650.
- 11) Nevill ME, Bogdanis GC, Boobis LH, Lakomy HKA, Williams C (1996): Muscle metabolism and performance during sprinting. In: Maughan RJ, Shireffs SM (eds), *Biochemistry of Exercise IX*. Human Kinetics, Champaign, pp.243-260.
- 12) Arsac LM, Thiaudière E, Diolèze P, Gerville-Rache L (2004): Parameter estimation in modeling phosphocreatine recovery in human skeletal muscle. *Eur J Appl Physiol* 91: 419-424.
- 13) Harris RC, Edwards RH, Hultman E, Nordesjö LO, Nylinde B (1976): The time course of phosphocreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflügers Arch* 367: 137-142.
- 14) McCann DJ, Molé PA, Caton JR (1995): Phosphocreatine kinetics in humans during exercise and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 27: 378-387.
- 15) Ayalon A, Inbar O, Bar-Or O (1974): Relationships among measurements of explosive strength and anaerobic power. In: Nelson

- RC, Morehouse CA (eds), Biomechanics IV. University Park Press, Baltimore, pp.527-532.
- 16) Lakomy HKA (1986): Measurement of work and power output using friction-loaded cycle ergometers. *Ergonomics* 29: 509-517.
 - 17) Utter AC, Kang J, Nieman DC, Dumke CL, McAnulty SR, McAnulty LS (2007): Carbohydrate attenuates perceived exertion during intermittent exercise and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 39: 880-885.
 - 18) Racinais S, Bishop D, Denis R, Lattier G, Mendez-Villaneuva A, Perrey S (2007): Muscle deoxygenation and neural drive to the muscle during repeated sprint cycling. *Med Sci Sports Exerc* 39: 268-274.
 - 19) Kay D, Marino FE, Cannon J, St Clair Gibson A, Lambert MI, Noakes TD (2001): Evidence for neuromuscular fatigue during high-intensity cycling in warm, humid conditions. *Eur J Appl Physiol* 84: 115-121.
 - 20) St Clair Gibson A, Schabort EJ, Noakes TD (2001b): Reduced neuromuscular activity and force generation during prolonged cycling. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 281: R187-R196.
 - 21) Moritani T, Nagata A, Muro M (1982): Electromyographic manifestation of muscular fatigue. *Med Sci Sports Exerc* 14: 198-202.
 - 22) Hagberg M (1981): Muscular endurance and surface electromyogram in isometric and dynamic exercise. *J Appl Physiol* 51: 1-7.
 - 23) Komi PV, Tesch P (1979): EMG frequency spectrum, muscle structure, and fatigue during dynamic constructions in man. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 42: 41-50.
 - 24) Lindström L, Magnusson R, Peterson I (1970): Muscular fatigue and action potential conduction velocity changes studied with frequency of EMG signals. *Electromyography* 10: 341-356.
 - 25) Moritani T, Muro M, Nagata A (1986): Intramuscular and surface electromyogram changes during fatigue. *J Appl Physiol* 60: 1179-1185.
 - 26) Lind AR, Petrofsky JS (1979): Amplitude of the surface electromyograms during fatiguing isometric contraction. *Muscle Nerve* 2: 257-264.
 - 27) Matsuura R, Ogata H, Yunoki T, Arimitsu T, Yano T (2006): Effect of blood lactate concentration and the level of oxygen uptake immediately before a cycling sprint on neuromuscular activation during repeated cycling sprints. *J Physiol Anthropol* 25: 267-273.
 - 28) St Clair Gibson A, Noakes TD (2004): Evidence for complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans. *Br J Sports Med* 38: 797-806.
 - 29) Green JM, McLester JR, Crews TR, Wickwire PJ, Pritchett RC, Lomax RG (2006): RPE association with lactate and heart rate during high-intensity interval cycling. *Med Sci Sports Exerc* 38: 167-172.