

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23570287

研究課題名(和文) 運動条件に依存する大腿筋活動水準の階層性と生理応答との全身的協関

研究課題名(英文) Systematic correlation between hierarchy of activity levels of tight muscle group depending on various exercise conditions and physiological responses

研究代表者

平木場 浩二 (HIRAKOBA, Koji)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：70173226

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：筋発揮張力と筋収縮頻度の変動による大腿筋群の部位別活動水準と全身的生理応答の関連性を検討した運動テストでは、大腿筋群の筋活動水準の総和が運動時の代謝ストレス(酸素摂取量：VO₂、血中乳酸：La)に大きく影響した。一方、筋発揮張力一定条件での3水準の筋収縮頻度での運動テスト(6分間)において、各種生理変量と大腿筋群の筋電図の積分値(iEMG)を評価し、収縮頻度上昇に伴い外側広筋と内側広筋のiEMGが、他の3部位の大腿筋群よりも顕著に増加した。これらの結果から、収縮頻度条件のみの変化で誘発された筋発揮張力の増加が、大腿筋の表層部および深層部の活動水準にも差異を生じさせることが想定された。

研究成果の概要(英文)：In the tests of muscle frequency-incremental and pedal load-incremental exercises, it was found that integral of activity levels of tight muscle group strongly influenced metabolic stress (oxygen uptake: VO₂, blood lactate: La). Furthermore, we estimated various physiological variables and integral (iEMG) of signals in electromyography of tight muscles in a 6-min constant-load exercise test with changes in muscle contraction frequency (40, 80, 120rpm), so that iEMG in vastus lateralis and vastus medialis, compared to other three tight muscles, remarkably increased with rises in muscle contraction frequency. VO₂ and La rose with increases in pedal force related to increase in muscle contraction frequency. From these results, it would be assumed that the muscle exerted tension associated with the changes only in muscle contraction frequency results in hierarchy in activity level of superficial and deep muscle layers in tight muscles.

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：生理人類学

キーワード：大腿筋群 ベダル踏力 筋収縮頻度 筋発揮張力 筋電図 酸素摂取量

1. 研究開始当初の背景

(1) 運動時の筋線維の動員様式は、筋線維タイプと運動強度が密接に関連し、低強度では遅筋線維(Type I)が優先的に動員され、高強度になると速筋線維(Type II)の動員がそれに付加されると指摘されている(Nardone et al., J. Physiol., 409: 451-471, 1989)。しかし、運動時の代謝水準が同一条件で活動筋の発揮張力と収縮頻度の組み合わせを変動させる運動モデルを用いた我々の一連の研究(Tokui & Hirakoba, Eur. J. Appl. Physiol., 101: 565-570, 2007; Hirakoba & Okochi, Proc. Biol. Physiol. Engineering, pp.505-508, 2006)においては、必ずしも運動強度と筋線維タイプの筋線維動員様式の関係が厳密なものではなく、運動条件によっては筋線維タイプに依存せず、表層部と深層部間で活動水準の階層的差異が生じることを示唆する結果が得られた。従って、筋線維活性化水準は、活動筋の筋発揮張力と筋収縮頻度の組み合わせの条件によっては、同一部位の筋においても「表層部から深層部」あるいは「深層部から表層部」へと移行する“筋線維活動水準の階層性”を示す可能性が想定される。運動時の筋線維タイプの動員様式が運動強度依存性を示すという従来の考え方(Greig & Sarjeant et al., J. Physiol., 371: 176P, 1985)から判断すると、この仮説は矛盾している。しかし、骨格筋の筋線維タイプは表層部で Type II が、深層部で Type I が優位であり(Johnson et al., J. Neurol. Sci., 18: 111-129, 1973; Manta et al., Functional Nuerol., 10: 137-141, 1995)、さらに筋線維タイプに限らず表層部では筋線維径が細く、深部組織では筋線維径が太いことも確認されている

(Henriksson-Larsen et al., Acta Physiol.Scand., 123: 171-177, 1985)。これらの報告と運動単位動員の「サイズの原理」(Henneman et al., J. Neurophysiol., 37: 1338-1349, 1974)から導き出された、筋発揮張力と筋収縮頻度の条件によっては、筋線維径の細い表層組織が優先的に動員される、あるいは筋線維径の太い深層組織が優先的に動員されるという筋線維活動水準の階層性の考えは、最近の報告(Farina et al., J. Appl. Physiol., 97: 545-555, 2005)と一致している。

(2) さらに、運動条件に依存した一定負荷運動時の酸素摂取動態における酸素摂取量の時定数($\dot{V}O_2$)と酸素摂取緩成分($\dot{V}O_{2SC}$)の水準は、下肢筋群の筋線維動員様式の変動(Type II 線維の動員の増加)と密接に関連することも指摘されているので、大腿筋での活動水準の階層性は、全身性の生理応答の側面との関連からも検討する必要があるだろう。

2. 研究の目的

本研究では、5 部位(外側広筋、内側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋)の大腿筋を被験筋として、数種類の運動条件(脚筋発揮張力と収縮頻度の組み合わせ)に伴う部位別および表層部と深層部の筋活動水準の差異から、大腿筋における筋活動水準の部位別特性と階層性を明らかにし、それと全身性の生理応答との関連性を検討することであった。

1) 本研究課題の主要目的である大筋群(大腿筋、特に外側広筋)を利用した自転車駆動運動での運動条件設定(脚筋発揮張力の負荷方法

の確立と筋収縮頻度との組み合わせ)の構築のための基礎資料を収集することに焦点を当て、**収縮頻度漸増運動**(本研究で考案した独自の負荷法)と筋発揮張力漸増法(従来の負荷法であり、“負荷漸増法”と呼ばれている)において、筋収縮頻度と筋発揮張力の変化に対応する大腿筋の部位別活動水準と表層部と深層部組織の階層的筋活動水準の標準化を行う試みを行った。

2) 自転車駆動運動時の主動筋である大腿筋の筋線維活動水準の階層性に及ぼす運動条件の検討に焦点を当て、自転車駆動運動時の脚筋発揮張力を一定とし(ペダル負荷 = 1.0 kp)、筋収縮頻度(低速: 40 rpm、中速: 80 rpm、高速: 120 rpm)の組み合わせと5部位の大腿筋活動水準および大腿筋の表層部と深層部の筋活動水準の階層性と筋内環境の内乱と連動する全身性の反応としての一定負荷運動時の代謝水準(酸素摂取量: $\dot{V}O_2$ 、血中乳酸蓄積量: La)の関連性を明らかにすることであった。

3. 研究の方法

(1) 実験1においては、筋運動時の運動条件に対応する大腿筋の部位別活動特性と階層的筋活動水準の標準化を主要課題として、下記に示す実験計画により実施した。

被験者: 被験者は、日常規則的な身体トレーニングを実施していない健康な成人男性10名(年齢: 20.5 ± 0.5 yr、身長: 170.0 ± 3.9 cm、体重: 64.8 ± 5.7 kg、)とした。被験者には、実験の目的、実験手順および生理学的測定項目等について詳細な説明をした後、実験参加の承諾書を書面にて得た。なお、本実験は、九州工業大学大学院生命体工学研究科の

「ヒトを対象とする研究審査委員会」の承認を得た。

本実験のプロトコール:

筋収縮頻度漸増運動: 自転車駆動運動において、無負荷(0kp)にてペダル回転数のみを40rpmから120rpmまで2分毎に20rpm漸増する筋収縮頻度漸増運動テストを実施した。この運動テストは、無負荷において筋収縮頻度のみを漸次的に変えて筋の内的仕事の変化のみに由来した筋活動水準の評価のために、本研究で独自に考案した負荷法であった。

筋発揮張力漸増運動: 筋収縮頻度を一定(ペダル回転数 = 60 rpm)とし、自転車ペダルの負荷強度のみを1.0 kpから3.0 kpまで2分毎に0.5 kp漸増する筋発揮張力漸増運動テストを実施した。

なお、上記2種類の漸増運動テストは、筋収縮頻度と脚筋発揮張力の変化に伴う大腿筋の部位別筋活動水準特性と階層的活動水準の評価には必須の運動負荷テストであると考え、設定した。

生理学的測定項目と解析方法: 活動筋の代謝水準評価のため、呼気ガス変量(分時換気量: \dot{V}_E 、酸素摂取量: $\dot{V}O_2$ 、二酸化炭素排出量: $\dot{V}CO_2$)を自動呼気ガス分析装置(AE-300S、Minato 医科学社製)で breath-by-breath にて測定した。さらに、無酸素性代謝水準の確認のため、各運動テストの安静時、上記2種類の漸増運動テスト直後に指穿から25 μ lの血液標本をヘパリン処理された毛細管を介して採集し、自動乳酸分析装置(1500-SPORT、YSI社製)を用いて血中乳酸濃度(La)を測定した。安静時と各運動局面の血中乳酸濃度の差を血中乳

酸蓄積量(La)とした。

(2) 実験 II においては、自転車駆動運動の主動筋である 5 部位(外側広筋、内側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋)の大腿筋活動水準と階層性(表層部と深層部)の検討を目的とし、下記に示す手順に従って運動実験を実施した。

被験者: 被験者は、前年度と同様の日常規則的な運動トレーニングを実施していない健康な成人男性 10 名(年齢: 21.1 ± 0.3 yr、身長: 169.6 ± 3.9 cm、体重: 66.7 ± 8.4 kg)であった。被験者には、実験の目的、実験手順および生理学的測定項目等について詳細な説明をした後、実験参加の承諾書を書面にて得た。なお、本実験は、九州工業大学大学院生命体工学研究科の「ヒトを対象とする研究審査委員会」の承認を得た。

予備実験: 0.5kp/min による負荷漸増運動テスト(ペダル回転数: 60rpm)を実施し、最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)、換気性閾値(VT)、最大脚筋発揮張力(\dot{W}_{max} に相当するペダル踏力: $F\dot{W}_{max}$)および $\dot{V}O_{2}$ -external work rate の関係式を最小二乗法により被験者毎に求める。

本実験のプロトコール: 本実験における脚筋発揮張力と収縮頻度の設定については、下記の様に設定した。ペダル負荷一定(筋発揮張力一定: 1.0 kp)でペダル回転数(筋収縮頻度)を組み合わせる 3 条件とし、**高頻度(120rpm)**、**中頻度(80rpm)**、**低頻度(40rpm)**とした。3 条件の運動テストの運動時間は各 6 分間とした。3 条件運動テストの順序は、無作為として、異なる日に各運動条件での運動負荷テストを実施した。なお、生理的測定項

目と解析は、一定負荷条件での酸素摂取動態の解析を除いては、実験 I と同様であった。

4. 研究成果

(1) 実験 I においては、自転車駆動運動時の運動条件: 筋収縮頻度と筋発揮張力の変化に対する大腿筋の 5 部位別の活動水準および階層性の標準化を研究目的とした。被験者は、予備実験で用いた健康な男子大学生 10 名とした。自転車駆動運動時の大腿筋活動水準の評価を行うために、自転車駆動における二つのストレステスト: 筋収縮頻度漸増運動(FI: ペダル負荷を 0.5 kp の一定に設定、ペダル回転数を 40 rpm から 120 rpm まで 2 分毎に 20 rpm の漸増)、筋発揮張力漸増運動(LI: ペダル回転数を 60 rpm の一定、ペダルへの発揮張力(Load)を 0.5 kp から 3.0 kp まで 2 分毎に 0.5 kp を漸増する)を実施し、運動時の筋電図、筋赤外分光法による酸素化/脱酸素化動態、全身の酸素摂取量($\dot{V}O_{2}$)および血中乳酸濃度(La)を測定した。

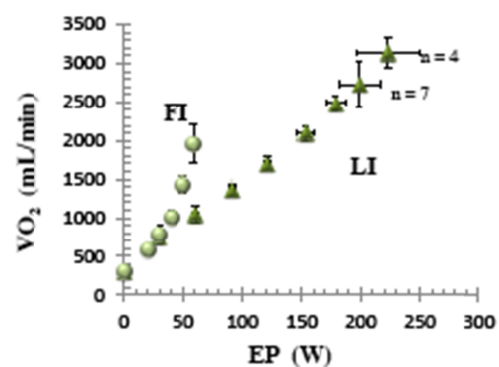


図 1. 頻度漸増法()と負荷漸増法()における外的仕事量と酸素摂取量との関係

FI と LI における外的仕事量(External Power: IP)に対する $\dot{V}O_{2}$ 応答を比較すると、LI の $\dot{V}O_{2}$

は直線的に増加したのに対し、FI の $\dot{V}O_2$ は指数関数的な増加を示した (図 1)。また、EP と内的仕事量 (Internal Power: IP) を総計した総仕事量 (Total Power: TP = EP + IP) に対して $\dot{V}O_2$ は LI および FI とともに直線的に増加し、両ストレステストの TP に対する $\dot{V}O_2$ は同一線上にあることが確認された。一方、5 部位の大腿筋活動水準 (外側広筋、内側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋) を積分筋電図の総計 ($iEMG_{total}$) で両運動時の筋活動水準を評価すると、FI と LI における $iEMG_{total}$ が $\dot{V}O_2$ に対して直線的に上昇し、さらに同一線上にあることが確認された。以上のことから、両ストレステストで個々の部位別の筋活動水準には個人差があったが、筋収縮速度のみを漸増する FI と筋発揮張力のみを漸増する LI に関わらず、大腿筋全体の筋活動水準が自転車駆動運動時の代謝ストレスに大きく影響することが確認できた。

実験 I では、自転車駆動運動時の 5 部位の大腿筋活動水準と全身的な代謝水準 (メタボリックストレス) を反映する全身の酸素摂取水準の関係からの部位別の大腿筋活動水準特性と階層性の標準化を検討課題とした。そのための運動ストレステストとして、筋収縮頻度漸増運動 (FI) と筋発揮張力漸増運動 (LI) の二つの異なる運動ストレステストを設定し、生理変量を測定・評価し、同一外的仕事量と総仕事量での筋収縮速度のみを漸増した FI と筋発揮張力のみを漸増した LI における 5 部位の筋活動水準の相違点、5 部位の筋活動水準と酸素摂取量応答の関係の相違点を明らかにできたが、標的筋である外側広筋の表層部と深層部の活動水準の階層性の評価は実験 II

の検討課題とした。

(2) 実験 II においては、新たに設定した 3 種類の運動条件 (筋発揮張力を一定: 負荷 = 1.0 kp) とし、筋収縮速度 (40 rpm, 80 rpm, 120 rpm) のみを変化させる 6 分間の一定負荷運動テスト) での自転車駆動運動時の 5 部位 (外側広筋、内側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋) の大腿筋活動水準と全身的な代謝水準 (酸素摂取量: $\dot{V}O_2$ 、血中乳酸蓄積量: La) との関係を検証した。一定負荷運動時の $\dot{V}O_2$ はペダル回転数に比例して増加することを確認した。40 rpm と 80 rpm では運動開始後上昇し、定常値を示したが、120 rpm では定常値を示さず、 $\dot{V}O_2$ 緩成分が確認された。これは、La の変化において、40 rpm と 80 rpm で殆ど増加を示さなかったのに対し、120 rpm では 6 mmol/l 以上の顕著な上昇が確認されたことと関連していた。さらに、負荷 (発揮張力) 一定にも関わらずペダル踏力のピーク値 (N) は、40 rpm で 89.0 ± 14.1 N、80 rpm で 227.4 ± 31.5 N および 120 rpm においては 240.0 ± 40.1 N となり、ペダル回転数の上昇に伴い有意に高値となった。さらに、ペダル回転数変化に伴う部位別の大腿筋活動水準 (筋電図信号の積分値: $iEMG/sec$) を検討したところ、40 rpm から 120 rpm にかけて複関節筋 (大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋) では僅かな上昇傾向を示したのに対し、単関節筋 (外側広筋と内側広筋) の活動水準においてはペダル回転数の上昇 (筋収縮頻度上昇) に伴いは顕著に上昇したことが確認された (外側広筋においては 40 rpm (0.021 mv/sec)、60 rpm (0.034 mv/sec)、120 rpm (0.083

mv/sec); 内側広筋においては 40 rpm (0.020 mv/sec) 60rpm(0.031 mv/sec) 120rpm(0.066 mv/sec)。

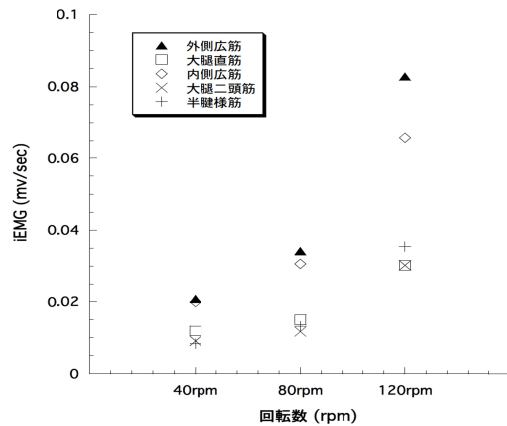


図 2.5 部位における積分筋電図とペダル回転数との関係

この変化はペダル回転数上昇に伴う大腿筋発揮張力の増加と連動していた。このことから、筋発揮張力が一定の設定にも関わらず、筋収縮頻度（速度）のみの変化に伴う筋発揮張力の増加は大腿筋活動水準や代謝水準にも差異が生じさせていることが想定され、今後の運動処方プログラムの作成の基礎資料として有用な情報を与えるものと考えられた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 本)

右田孝志、得居雅人、平木場浩二、自転車駆動運動時における異なるペダル回転数に対するペダル踏力と酸素摂取量の応答、久留米大学健康・スポーツ科学センター紀要、査読無、20 巻、2013、1-7、<http://www.mii.kurume-u.ac.jp/kenspo/kenkyu/index.html>

右田孝志、得居雅人、平木場浩二、自転車駆動における負荷漸増および頻度漸増運動に対する酸素摂取量の応答、久留米大学健康・スポーツ科学センター紀要、査読無、19 巻、2011、1-7、

<http://www.mii.kurume-u.ac.jp/kenspo/kenkyu/index.html>

[学会発表] (計 4 件)

Migita, T. Tokui, M., Hirakoba, K.: Pedal force and metabolic stress responses to different pedal rates during cycling, 18th Annual Congress of the European College of Sport Medicine, 26-29 June 2013, Spain (Barcelona)

Tokui, M. Migita, T. Hirakoba, K.: Effects of pedal rate on pedal force and muscle activity during cycling, 18th Annual Congress of the European College of Sport Medicine, 26-29 June 2013, Spain (Barcelona)

Migita, K. Tokui, M. Hirakoba, K.: Physiological responses to load-incremental and frequency-incremental exercises during cycling. 17th Annual Congress of the European College of Sport Medicine, 4-7 July 2012, Belgium (Bruges)

Tokui, M. Migita, T. Hirakoba, K.: Effects of pedal load- and frequency-incremental exercises in oxygen uptake and muscle activities during cycling, 32th World Congress of Sports Medicine, 27-30 September 2012, Italy (Roma)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平木場 浩二 (HIRAKOBA, Koji)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号: 70173226

(2) 研究協力者

得居 雅人 (TOKUI, Masato)
九州共立大学・スポーツ学部・教授
研究者番号: 00227571

右田 孝志 (MIGITA, Takashi)
久留米大学・健康・スポーツ科学センター・准教授
研究者番号: 00239211