

異なる漸増負荷率での運動負荷試験における
酸素摂取量と筋酸素動態への影響横川 正美 洲崎 俊男 米田 由美* 今 達利**
山添由起子*** 三秋 泰一 立野 勝彦

KEY WORDS

Work efficiency of ramp slope, Maximal oxygen uptake, Skeletal muscle oxygenation

はじめに

心肺持久力の指標としての最高酸素摂取量 (Peak $\dot{V}O_2$) を求める際に行われる運動負荷試験にはいくつかの負荷方法がある。そのうち、自転車エルゴメータを用いた Ramp 負荷法における負荷量は、被験者が予測最大酸素摂取量の予測値に10分程度で到達できるようにして決定するとともに大きい Peak $\dot{V}O_2$ が得られるといわれている¹⁾。20歳代の健常男性の場合、20あるいは30watts/min の一律な負荷で施行されることも多い。しかし、20~50watts/min の Ramp 負荷では Peak $\dot{V}O_2$ に差はなかったという Davis ら²⁾の報告もある。

一方、運動の持続性を決定する重要な因子は、活動筋への酸素供給能力および活動筋での酸素利用能力である³⁾。近赤外線分光法 (Near infrared spectroscopy ; NIRS) を用いた筋酸素動態測定では、このうち後者の活動筋での酸素利用能力、すなわち骨格筋での相対的な酸素取り込み能力を非侵襲的に評価することが可能とされており、これまでに局所的な運動、自転車エルゴメータを用いたダイナミックな運動で測定されている⁴⁻⁷⁾。また、運動負荷試験を実施する上で下肢の筋疲労は制限因子の一つであり、漸増負荷率の設定には活動筋の状態も考慮する必要がある。

本研究では、男子大学生の Ramp 負荷試験で20watts/min と30watts/min のどちらが利便性があるか、また、酸素利用能力指標としての筋酸素動態への影

表1 対象

	平均値±標準偏差
年齢(歳)	21.2±1.5
身長(cm)	172.4±5.7
体重(kg)	64.7±7.9
BMI(kg/m ²)	21.8±2.4
体脂肪率(%)	18.4±4.9
大腿周径(cm)	44.4±3.8

BMI:Body mass index

響について検討を行った。

対 象

事前に測定内容を説明し、同意の得られた金沢大学に在籍する健常男子学生 25名を対象とした(表1)。このほかに4名が測定に参加していたが、運動中にアメリカスポーツ医学会の運動負荷試験中止基準⁸⁾に該当したため終了したり、安静時の動脈血流遮断中に測定値が上昇を示したため、対象から除外した。

方 法

1. 身体情報測定と運動負荷試験

身体情報として身長、体重、体内脂肪計にて体脂肪率(タニタ, TBF-401)を測定し、身長と体重から Body mass index を求めた。大腿周径は、自転車上坐位で筋酸素動態測定部位を計測した。

金沢大学医学部保健学科

* 金沢大学医学部附属病院

** 青森県立中央病院

*** 日野記念病院

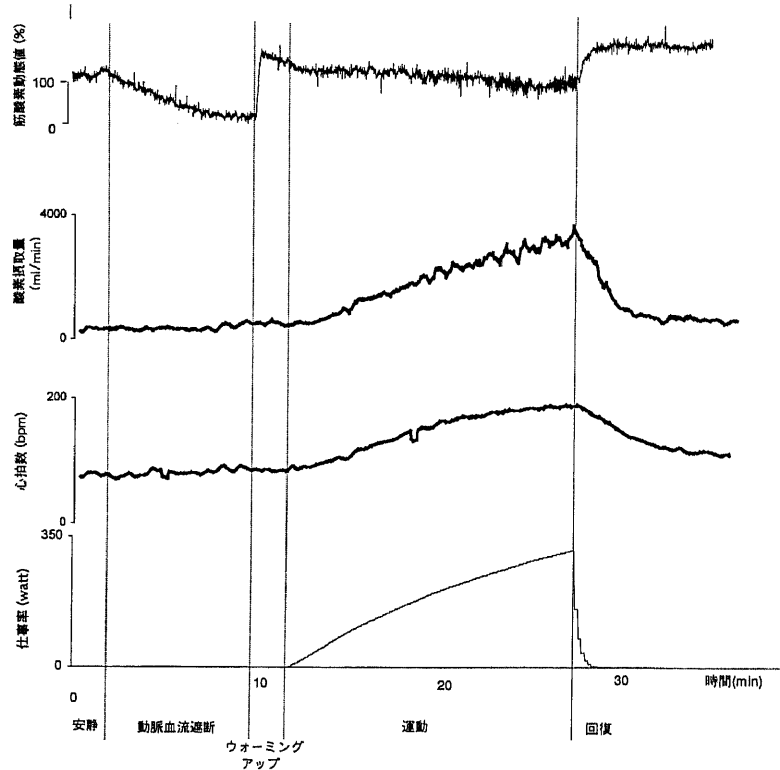


図 運動負荷試験における各測定項目の経過

運動負荷試験は、対象者は自転車上坐位で2分間の安静後、7分間の動脈血流遮断を行い、加圧終了後1分間安静をとった。その後、3分間自転車エルゴメータで0WでのWarm-upに続き、1分間に20Wまたは30Wずつ漸増するRamp負荷を用いて、疲労困憊まで自転車漕ぎ運動を行った。ペダルの回転数はメトロノームに合わせ60回転/分とし、50回転/分を維持できなくなった場合も終了とした。運動中は呼吸代謝測定装置（ミナト医科学，AE-280）でbreath-by-breathにて酸素摂取量を、心電図モニタと血圧計で心拍数と血圧を測定及び監視した。最高酸素摂取量（Peak $\dot{V}O_2$ ）、ガス交換比、最大心拍数は、負荷試験終了前30秒の平均値として算出し、換気閾値（VT）はV-slope法で決定した。対象者へは、前日よりアルコールやカフェインの摂取、測定2時間前より飲食、喫煙を控えるよう依頼した。

2. 筋酸素動態測定

漸増負荷運動では呼吸代謝および心拍血圧とともに、NIRS（バイオメディカルサイエンス，PSA-IIIN）を用いて、筋酸素動態を測定した。本装置のセンサーには光源と2つの受光部があり、700，750，830nmの3波長の近赤外光が送受光される⁹⁾。近赤外光は皮膚を透過し、散乱しながら骨格筋組織にま

で達し、細動脈、細静脈および毛細血管網に存在する血中のヘモグロビン（Hb）と筋内のミオグロビン（Mb）に吸収された後、受光部に戻ってくる¹⁰⁾。この時の光量の変化から酸素化（OxyHb）と脱酸素化（Deoxy Hb）、両者の和であるTotal Hb、Total Hbに対するoxy Hbの割合である組織酸素飽和度（StO₂）が表示される。これらの測定項目のうち、本研究ではStO₂を筋酸素動態の指標とした。

筋酸素動態の測定部位は自転車駆動時の主働筋である大腿部外側広筋とし、センサーを右大転子-膝裂隙間の遠位1/3に取り付けた。測定時の時間分解能は0.5Sとし、測定値は各時点における10秒間の平均値とした。また、測定値を標準化するため、動脈血流遮断を行った。若年成人を対象とした先行研究では6-7分でプラトーに達することが報告されており¹⁰⁾、本研究では負荷試験施行前に大腿用マンシェットをNIRSセンサーよりも中枢側に固定し、300mmHg以上の外圧を加えて7分間駆血した。加圧直前の安静時値を100%、圧迫終了前の最低値を0%として、最大運動時の値を算出した（図）。

3. 統計学的分析

Ramp負荷20W/minと30W/minでの運動負荷試験時の運動持続時間、Peak $\dot{V}O_2$ 、VT、最大心拍数と

表2 各仕事率での測定項目の比較

	20watts/min	30watts/min	p値
Peak $\dot{V}O_2$ (ml/min/kg)	44.8±9.0	43.4±8.5	
VT(ml/min/kg)	25.1±9.5	24.4±8.7	
ガス交換比	1.20±0.08	1.23±0.09	
最大心拍数(bpm)	184.8±9.6	180.0±13.6	*
最大仕事率(watts)	267.1±40.3	285.1±46.4	**
運動時間(秒)	799±121	569±92.8	**
最大運動時筋酸素動態(%)	74.2±22.3	74.2±19.6	

*: p<0.05, **: p<0.001

表3 20watts/min と30watts/min 間の相関係数

	相関係数	p値
Peak $\dot{V}O_2$	0.89	**
VT	0.83	**
ガス交換比	0.50	*
最大心拍数	0.56	*
最大仕事率	0.87	**
最大運動時筋酸素動態値	0.72	**

*: p<0.05, **: p<0.001

最大運動時筋酸素動態値に違いがあるか否かを比較するとともに2つの仕事率の間での相関係数を求めた。測定値は平均±標準偏差で示し、各測定項目における2群間の比較には対応のあるt検定を、相関についてはピアソンの相関係数を用いた。すべての検定はp<0.05を有意とした。

結 果

1. 運動負荷試験中の各測定項目について

図に運動負荷試験における各測定項目の経過の例を示す。負荷の漸増とともに酸素摂取量、心拍数は増加していき、筋酸素動態値は減少した。

2. 2つの仕事率における測定結果の比較

運動負荷試験結果を表2に示す。いずれの負荷も終了理由は対象者の90%が下肢筋疲労か、自転車の回転数維持困難であった。運動時間は20watts/minのほうが有意に長く、最大仕事率は30watts/minのほうが大きかった(いずれもp<0.001)。20watts/minにおけるPeak $\dot{V}O_2$ は44.8±9.0ml/min/kg、最大運動時筋酸素動態値は74.2±22.3%であり、30watts/minではPeak $\dot{V}O_2$ は43.4±8.5ml/min/kg、最大運動時筋酸素動態値は74.2±19.6%であった。Peak $\dot{V}O_2$ 、VT、ガス交換比、最大運動時筋酸素動態値には2群間に有意な違いは認められなかった。最大心拍数は20watts/minのほうが有意に大であっ

た(p<0.05)。

3. 2つの仕事率における測定項目間の相関

20watts/min と30watts/min の各測定項目間の相関係数を示す(表3)。Peak $\dot{V}O_2$ 、最大仕事率、VTはそれぞれr=0.8以上の有意な相関が認められた。最大運動時筋酸素動態値はPeak $\dot{V}O_2$ に比べると相関係数は低かったが有意であった(r=0.717, p<0.001)。

考 察

男子大学生の自転車エルゴメータ運動負荷試験における20watts/min と30watts/minの比較では、Davisら²⁾の結果と同様に、peak $\dot{V}O_2$ やVTに有意な差はなかった。また、活動筋の酸素動態についても2つの負荷率で有意な違いは認められなかった。

最大運動時の筋酸素動態値については、NIRS機器のメーカーは異なるが、いくつかの報告がある。樋口ら¹⁰⁾は、健常男性を対象に20watts/minのRamp負荷で測定し、筋酸素化レベルの平均は67.6%であったとしている。また、8名のスプリンター選手で測定したHagaら¹¹⁾の結果では約60%であり、Baeら¹²⁾の健常成人7名の結果は63.3±14.1%であった。本研究の最大運動時酸素動態値は、いずれの負荷でも平均74%で、これらの報告よりも高い状態で終了していた。運動時の活動筋の酸素消費量と肺胞での酸

素摂取量との関係について、両者は密接な関係をもって変化することが明らかにされている¹³⁻¹⁵⁾。今回の結果でも peak $\dot{V}O_2$ と筋酸素動態値は有意な相関を示しているが、諸家¹⁰⁻¹²⁾の対象者の peak $\dot{V}O_2$ は、すべて今回の対象者よりも高値であり、本研究の筋酸素動態値と過去の報告との差は、酸素摂取量の違いが影響しているものと思われる。

運動時間については、20watts/min は30watts/min にくらべ、4分近く長くなり、心拍数は20watts/min で若干高くなっている。定常負荷運動を続けると、体温上昇に伴う若干の心拍数増加が報告されている¹⁶⁾。本研究は漸増負荷運動ではあるが、心拍数については運動時間の影響もあるかもしれない。一方、筋酸素動態値に差はなかったにもかかわらず、最大仕事率は30watts/min のほうが高値を示した。自転車エルゴメータでの漸増運動時の外側広筋と大腿直筋の酸素動態の変動に関しては、大腿直筋が peak $\dot{V}O_2$ の80-100%強度の区間で急激に減少したのに対し、外側広筋では peak $\dot{V}O_2$ の80%強度までは直線的に減少するが、peak $\dot{V}O_2$ の80-100%強度では明らかな減少が認められなかったという報告がある¹⁷⁾。今回、2つの負荷率で peak $\dot{V}O_2$ に差はなく、30watts/min での最大仕事率が20watts/min に比べ大きかったとはいえ、peak $\dot{V}O_2$ に近い負荷量での外側広筋の筋酸素動態値には違いが表れなかった可能性がある。

以上の事柄より、運動負荷試験において、20歳代の健常男性の運動負荷率は所要時間の短縮という点では30watts/min のほうが有用であるが、20watts/min と30watts/min 間に酸素摂取量と筋酸素動態値に有意差はみられず、いずれの負荷率も選択可能であることが示唆された。

文 献

- 1) Wasserma, K. et al., 谷口興一 監訳：運動負荷テストの原理とその評価法。第2版, 111-113, 南江堂, 1999.
- 2) Davis, J.A. et al : Effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test. *Med Sci Sports Exerc.*, 14 : 339-343, 1982.
- 3) 本間幸子 他：近赤外分光法を用いた活動筋の循環動態の評価—自転車運動時の大腿筋活動について—。 *体力科学*, 41 : 586-594, 1992.
- 4) 岡 隆浩：近赤外分光法による内側広筋等尺性運動の酸素動態測定—評価の指標と信頼性に関する研究—。 *リハ医学*, 35 : 526-532, 1999.
- 5) 本間俊行：膝伸展運動時にみられる協働筋間での酸素供給・消費バランスの相違。 *体力科学*, 47 : 525-534, 1998.
- 6) Belardinelli, R. et al : Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. *Eur J Appl Physiol.*, 70 : 487-492, 1995.
- 7) Belardinelli, R. et al : Skeletal muscle oxygenation and oxygen uptake kinetics following constant work rate exercise in chronic congestive heart failure. *Am J Cardiol.*, 80 : 1319-1324, 1997.
- 8) アメリカスポーツ医学会編, 日本体力医学会体力科学編集委員会監訳：運動処方指針。原著第6版, 102, 南江堂, 2001.
- 9) 酒井秋男 他：近赤外分光法を用いた組織酸素消費量の無侵襲連続測定。 *Therapeutic Research*, 16 : 247-250, 1995.
- 10) 樋口博之 他：漸増負荷運動における局所骨格筋の酸素化レベルの測定について。 *日本運動生理学雑誌*, 6 : 27-35, 1999.
- 11) Haga, S. et al : Oxidative metabolism in skeletal muscle measured during supramaximal exercise in sprinter and active control groups by near infrared continuous wave spectroscopy. *Adv Exerc Sports Physiol.*, 4 : 57-64, 1998.
- 12) Bae, S.Y. et al : Changes in oxygen content and blood volume in working skeletal muscle up to maximal exercise by near infrared spectroscopy. *Therapeutic Research.*, 17 : 129-136, 1996.
- 13) Poole, D.C. et al. : Pulmonary and leg $\dot{V}O_2$ during submaximal exercise : implications for muscular efficiency. *J Appl Physiol.*, 72 : 805-810, 1992.
- 14) Knight, D.R. et al : Relationship between body and leg $\dot{V}O_2$ during maximal cycle ergometry. *J Appl Physiol.*, 73 : 1114-1121, 1992.
- 15) Recharadson, R.S. et al : Determinants of maximal exercise $\dot{V}O_2$ during single leg knee-extensor exercise in humans. *Am J Physiol.*, 268 : H1453-H1461, 1995.
- 16) Rowell, L.B. : Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress. *Physical Rev.*, 54 : 75-15, 1974.
- 17) 樋口博之 他：ランブ負荷運動における外側広筋と大腿直筋の血液・酸素動態。 *体力科学*, 49 : 183-192, 2000.

Effect of ramp slope on oxygen uptake and skeletal muscle oxygenation from the ramp exercise test

Yokogawa Masami, Susaki Toshio, Yoneda Yumi, Kon Tatsunori,
Yamazoe Yukiko, Miaki Hiroichi, Tachino Katsuhiko