



| | |
|------------------|---|
| Title | 漸増運動負荷時の活動筋と非活動筋の酸素化動態 |
| Author(s) | 矢野, 徳郎; YANO, Tokuo; 柚木, 孝敬 他 |
| Citation | 北海道大学大学院教育学研究科紀要, 84, 65-74 |
| Issue Date | 2001-12 |
| DOI | https://doi.org/10.14943/b.edu.84.65 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/28831 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 84_P65-74.pdf |



漸増運動負荷時の活動筋と非活動筋の酸素化動態

矢野 徳郎, 柚木 孝敬, 尾方 寿好

Kinetics of Oxygenation in Active and Non-Active Muscles during Incremental-Load Exercise

Tokuo YANO, Takahiro YUNOKI and Hisayoshi OGATA

I, 緒言

最近, 近赤外分光法を用いて運動時の筋中の酸素動態を検討する研究が多く行われてきている。漸増運動負荷時では, 近赤外分光法で求められた酸化ヘモグロビン (oxyHb) が負荷漸増とともに低下するが, その低下率が無氣的作業閾値 (AT) 以上の負荷時で大きくなり, またこの oxyHb の低下の加速化の開始点が AT 時とほぼ一致することが示唆されてきている²⁾。一方, 漸増運動負荷時では oxyHb は運動を開始すると安静時より大きくなり, その後, 低下する。その低下時の値が安静値と一致するときが AT であるとする研究もある⁵⁾。このように oxyHb の動態から AT が推測できるとされているが, 一致した見解は必ずしも得られていない⁴⁾。

近赤外分光法を用いた研究から, 次のような点が漸増運動負荷時の oxyHb の動態へ影響する因子として指摘されている。すなわち, 漸増運動負荷時の oxyHb は, 大腿直筋では漸次疲労困憊まで低下するが, 外側広筋ではある負荷以上では, 負荷を増加しても低下しないことが示されてきている^{2,6,8,9)}。これらの筋群間での oxyHb の動態の相違は, 筋線維組成や筋組成に関連する酸素の拡散効率の違いが各筋で異なることから生じるとされている^{10,16)}。また, 漸増運動負荷時の外側広筋と腓腹筋外側部の oxyHb の動態の変化と各筋の筋放電量の比較から, 筋の活動量が oxyHb に影響を与えているとされている¹¹⁾。したがって, 筋群間の生理的特性の相違や活動量の相違が oxyHb 動態へ影響を与えられられる。また, これらの特徴から, AT と oxyHb の比較に際しては, oxyHb の測定部位が従来の報告と一致していなければ, 従来の報告と比較ができないと考えられる。

本研究では, これらのことに注意して, AT と oxyHb の動態との関連を再検討した。さらに, 本研究では非活動筋の oxyHb へ関心を向けた。それは, 以下の理由からである。すなわち, 運動強度を高めると交感神経の活動が活発になる¹⁵⁾。この活動の上昇は, 心臓の活動の促進や非活動筋の血管収縮を生じさせると考えられる。また, この活動の増加は, 心拍数の変動の研究からは, AT 時から働き始めるとされている¹⁹⁾。したがって, 非活動筋での血管収縮もこの時期から顕著となると考えられる。非活動筋では, 酸素摂取量は, 安静時と大きくは異ならないと考えられるので, 酸素供給と酸素消費の割合によって決まる oxyHb⁶⁾ はこの時期から低下し始めると考えられるからである。

そこで, 本研究では, 1) 漸増運動負荷時の活動筋の oxyHb の動態から AT を検出する従来

の方法を再検討した。2)また、新たなATの検出法として、非活動筋のoxyHbの動態を検討した。

II, 方法

A, 被験者と実験手順

7名の健康な男子(年齢 19 ± 1.1 歳, 身長 168 ± 8.4 cm, 体重 59 ± 11.5 kg(平均値 \pm 標準偏差))が被験者として参加した。実験の目的や手順および実験に伴う危険性を説明した後、実験への参加の自発的同意を文書にて得た。

コンピューターによって負荷が調節できる自転車エルゴメーター(コンビ社製232C)が実験に用いられた。安静5分の後に漸増運動負荷を課した。その負荷法は、回転数60rpmでゼロwattの負荷を4分間行い、その後に毎分20wattごとの漸増負荷を行うものであった。この負荷を自転車のハンドルを握った場合と体側で肩および腕を脱力させた場合の二条件下で実験を行った。

B, 測定法

酸素摂取量($\dot{V}O_2$), 二酸化炭素摂取量($\dot{V}CO_2$)および換気量(\dot{V}_E)を呼気ガス分析計によってbreath-by-breathモードで測定した(Minato Medical Science社製, AE-280S)。吸気と呼気の換気量は熱線式呼吸流量計を用いて測定した。流量信号は電氣的に一呼吸当たり毎に積分して、それを一分当たりの換気量に換算した。2リッターのシリンジで呼吸流量計の校正を行った。この計器は換気量の0-600l/minの範囲で直線性を示す。酸素と二酸化炭素の濃度はzirconium sensorとinfrared absorption analyzerによってそれぞれ分析した。その後、各データを20秒ごとに出力した。

筋赤外線分光法装置(NIRS:オムロン社製, HEO 200N)を用いて、局所骨格筋の酸素動態を測定した。NIRSはプローブとコンピューター制御部から構成されている。プローブは2つの送光部と1つの受光部からなり、送光部から照射される2波長(760nmと840nm)の近赤外光は、一部骨格筋内のヘモグロビンやミオグロビンに吸収され、再び受光部へ戻ってくる。760nmの光は酸素化ヘモグロビンや酸素化ミオグロビンに、840nmの光は脱酸素化ヘモグロビンや脱酸素化ミオグロビンに吸収され易いという特徴がある。この特徴から、受光部に戻ってくる光の強さから組織の酸素動態を計測することができる。

本研究では、酸化ヘモグロビンを活動筋の外側広筋部と非活動筋の上腕二頭筋部で測定した。近赤外線分光法装置が一台しかないので、2箇所の測定には、同一負荷を2回繰り返す必要があった。また、自転車のハンドルを握った場合とそうでない場合の二通りを行ったので、同一漸増運動負荷を総計4回行った。各同一自転車操作条件下における先行する試行では、被験者が疲労困憊になるまで行った。二回目の試行時には、疲労困憊時の負荷量の90%の負荷で運動を終了した。これらの試行はランダムな順番で、かつ、同一被験者に対しては一日に一回のみ実施した。プローブは、外側広筋の場合は膝上15cmに、上腕二頭筋の場合は中央部に設置した。NIRSのデータは5秒ごとに出力した。

C, 決定法

自転車のハンドルを握った場合の漸増運動負荷時を疲労困憊時まで行った時の最大値をピーク酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2peak}$) であるとした。また、同一条件で二回漸増運動負荷を行った時の初回時の負荷時の酸素摂取量と二酸化炭素摂取量を用いて、V-slope 法¹⁾で無氣的作業閾値を決定した。

D, 統計

結果は平均値と標準偏差値によって表した。2群間の平均値の差の検定は対応のある場合の student t-test を用いた。統計処理の結果は危険率5%未満を有意とした。

III, 結果

ハンドルを持った場合の初回の漸増運動負荷時ではAT時の $\dot{V}O_2$ は 1.63 ± 0.31 l/minであった。この値の $\dot{V}O_{2peak}$ 当たりの値は $61 \pm 0.049\%$ であった。その時の負荷量は 141 ± 23.4 wattであった。また、ハンドルを持たない時の初回の漸増運動負荷時のATは 1.58 ± 0.37 l/minであった。その時の負荷量は 139 ± 32.6 wattであった。ハンドルを持った時と持たない時のAT値やその負荷値に有意差はなかった。また、初回と2回目のそれぞれの同一条件下で行われた漸増運動負荷時のAT値やその負荷値には有意な差はなかった。各個人のAT時の $\dot{V}O_2$ を中心にして、その前後の時間に得られる $\dot{V}O_2$ を平均化して求めた値を図1に示した。負荷の

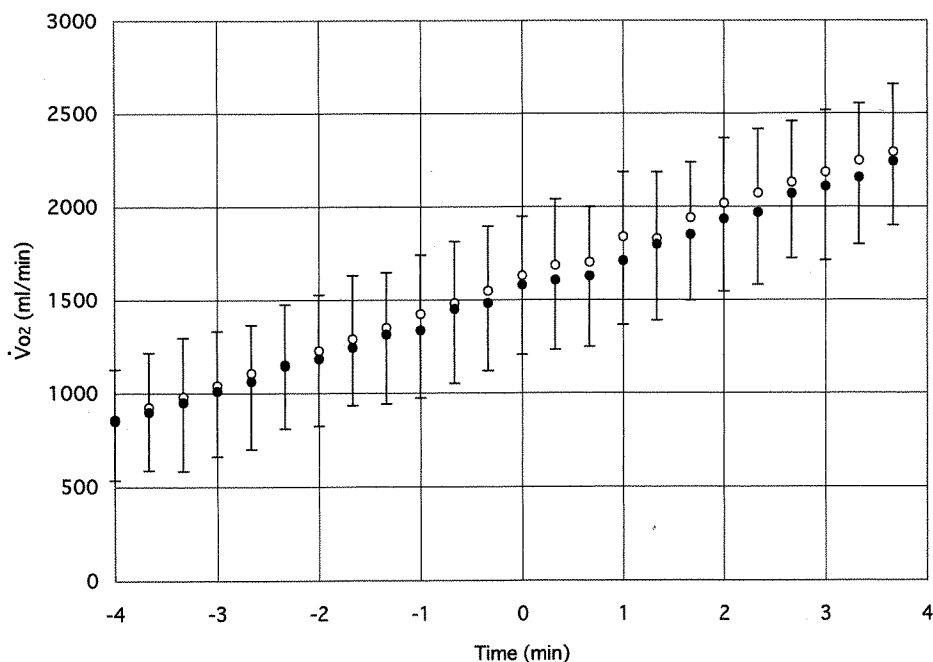


Fig. 1. Oxygen uptake during incremental-load exercise. Data at anaerobic threshold locate in zero time in the figure. Open circles (○) show the value with arm handling and closed circles (●) show the value without arm handling

増加に対する酸素摂取量の増加率は AT の後に増加することはなかった。

図2に漸増運動負荷中の外側広筋の oxyHb の変動を、自転車のハンドルを握った場合と握っていない場合について示した。負荷漸増直後、一旦 oxyHb は増加し、その後、漸次低下を始めた。oxyHb がゼロになる点は約 50 watt であり、AT 時よりかなり早く表れた。また、AT 時以降に oxyHb の低下率が大きくなる傾向は認められなかった。ただし、図2では個人の AT がそれぞれ違うので、AT 時からの oxyHb の変化点が平均化されている可能性がある。そこで、各個人の oxyHb の値を AT を中心に設定しなおして、その前後での比較を行った(図3)。しかし、oxyHb の変動幅を考えると AT 以降から負荷漸増に伴う低下率が増加する傾向はないようであった。

図4に漸増運動負荷中の上腕二頭筋の oxyHb のある被験者の変動(上段)と平均値(下段)を、自転車のハンドルを握った場合と握っていない場合について示した。各個人値は、約1分の周期的変動を示し、かつ低下する程度は最初は少なく、後に大きくなっているため、正確に、oxyHb の低下開始時を規定することはできなかった。そこで、全体の平均を取って、その個人変動を平滑化した。その結果、平均的にはほぼ AT 時から低下傾向を示しているようであった。しかし、この低下時期を AT との関連でより詳細に検討するために、各個人の AT を中心として、平均値を計算しなおした(図5)。そうするとハンドルを握った場合には、AT より約30秒遅れて低下する傾向がみられた。また、ハンドルを握っていない場合には、AT より約1分の遅れの後に低下を開始した。

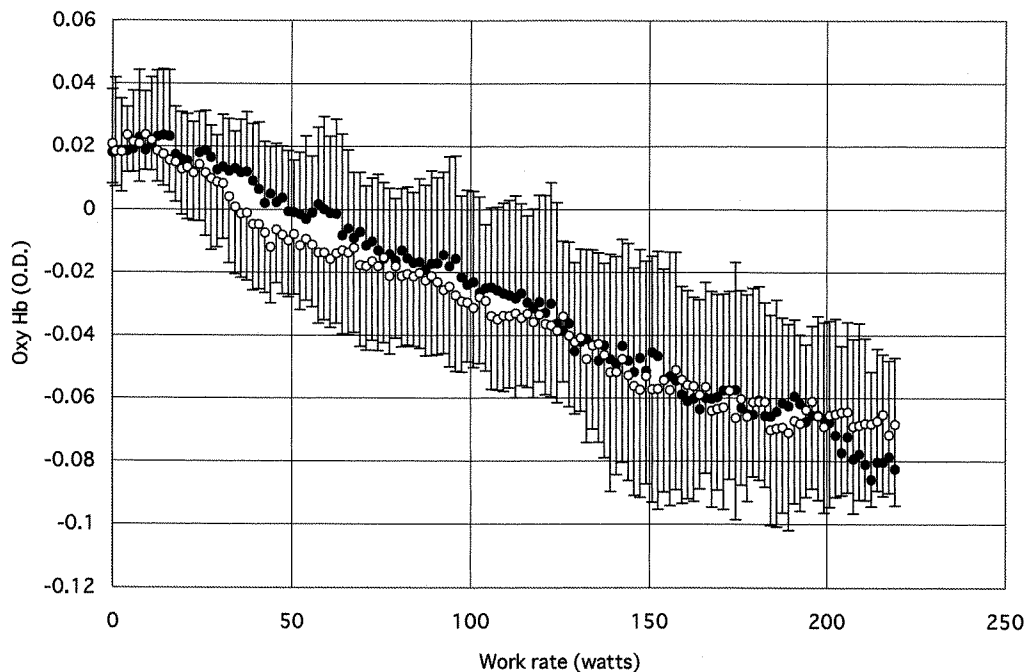


Fig. 2. Oxygenated hemoglobin level in vastus lateralis muscle during incremental-load exercise was plotted against work rate. Open circles (○) show the value with arm handling and closed circles (●) show the value without arm handling.

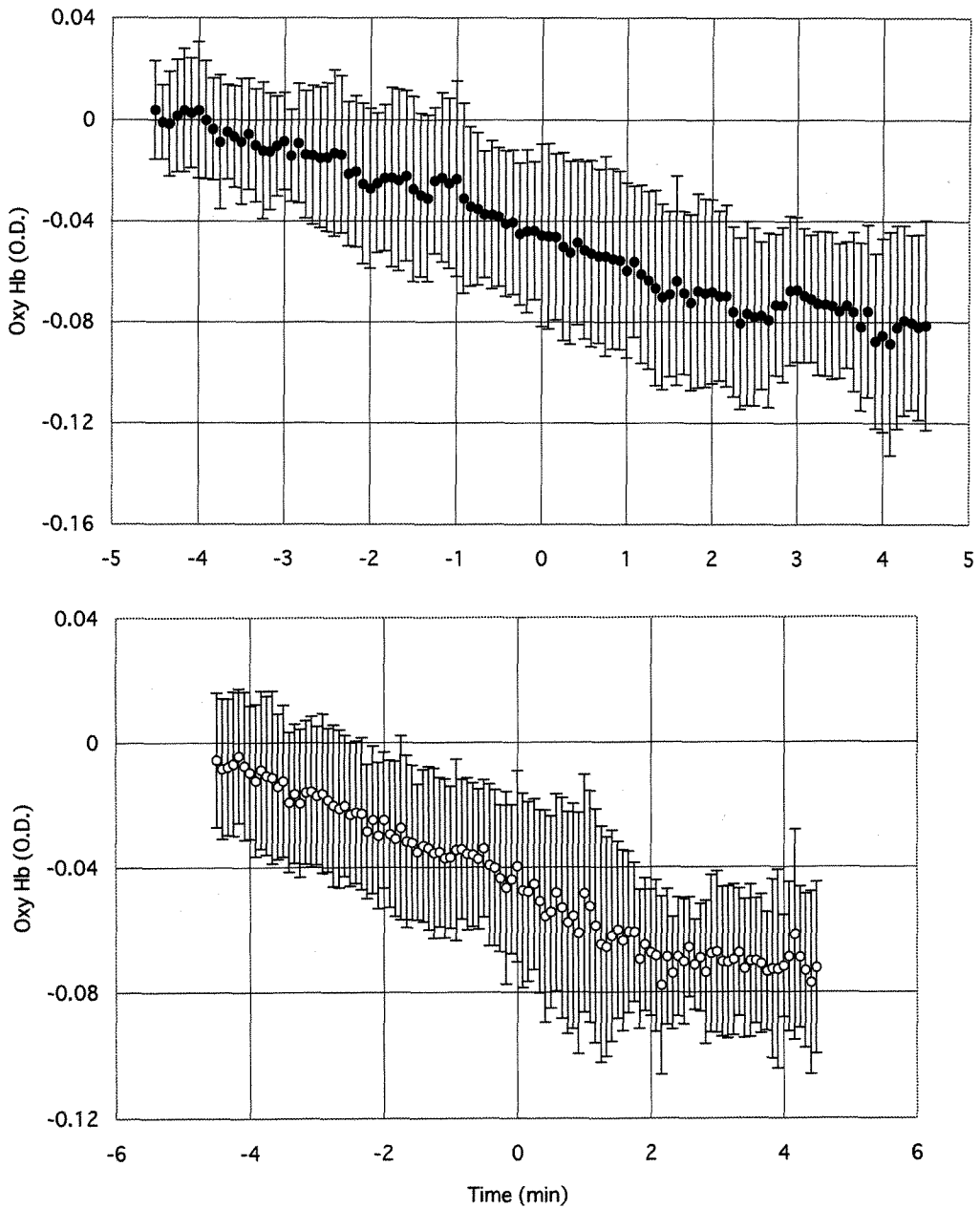


Fig. 3. Oxygenated hemoglobin level in vastus lateralis muscle during incremental-load exercise. Data at anaerobic threshold locate in zero time in the figure. Open circles (○) show the value with arm handling and closed circles (●) show the value without arm handling.

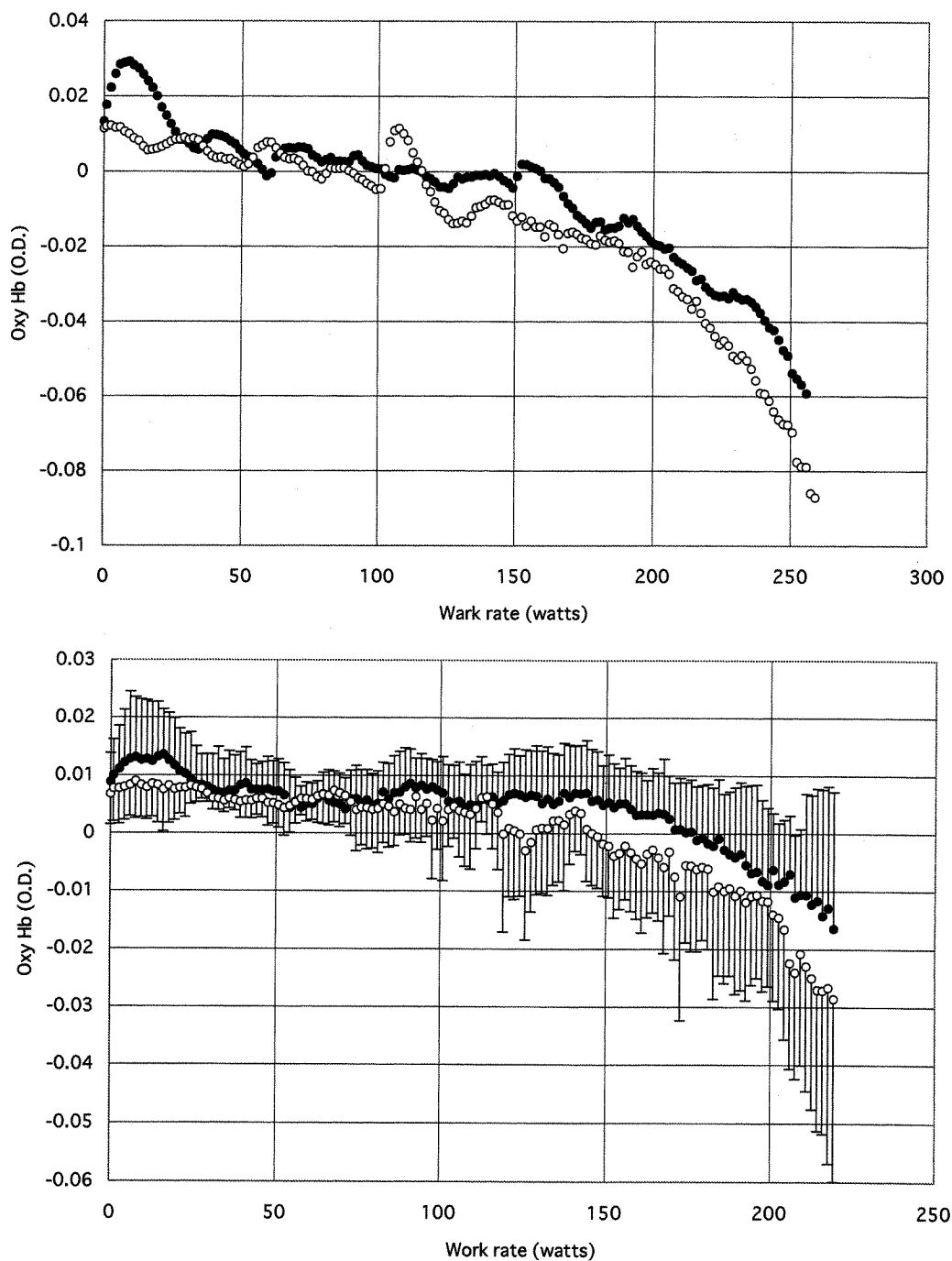


Fig. 4. Oxygenated hemoglobin level in biceps brachii muscle during incremental-load exercise was plotted against work rate in the cases of one subject (upper panel) and average values (lower panel). Open circles (\circ) show the value with arm handling and closed circles (\bullet) show the value without arm handling.

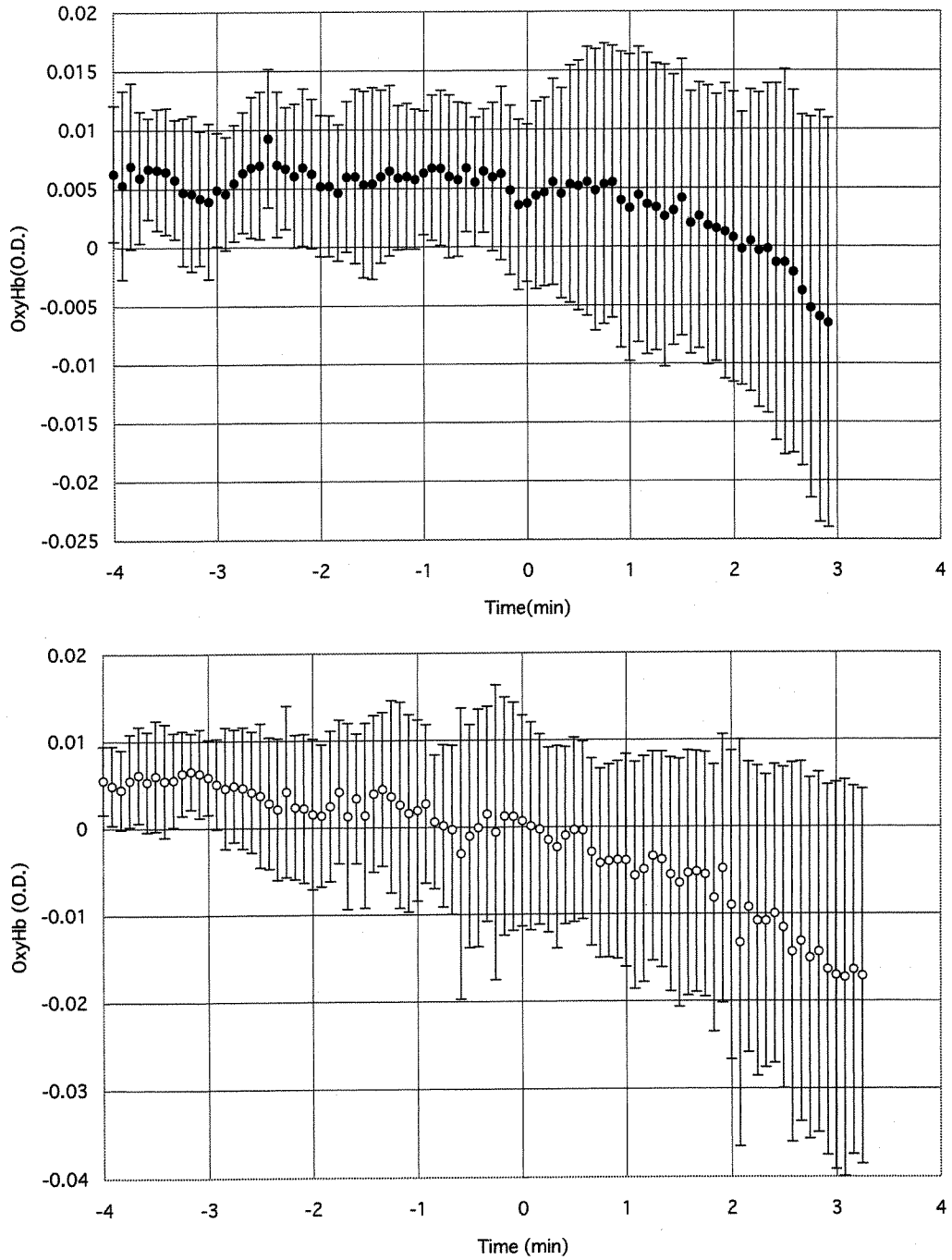


Fig. 5. Oxygenated hemoglobin level in biceps brachii muscle during incremental-load exercise. Data at anaerobic threshold locate in zero time in the figure. Open circles (○) show the value with arm handling and closed circles (●) show the value without arm handling.

IV, 考察

定常運動負荷時では oxyHb は負荷開始後低下し、その後、負荷が軽いと定常状態を示すが、負荷が大きいと漸次低下傾向を続けるとされている⁹⁾。これは、負荷が軽いと局所筋の oxyHb が低下するのみであるが、負荷が大きいと筋中のミオグロビン (Mb) と結合している酸素も低下するために生じると考えられている。また、この高負荷時では、同時に血中乳酸の増加が酸素解離曲線の右方シフトをもたらし、酸素を解離しやすくしていると考えられている。その結果、この血液側の状況と oxyMb の低下によって、酸素の拡散が促進されると考えられている。一方、漸増運動負荷時では、血中乳酸の増加が oxyHb (+oxyMb) の低下の加速開始点と一致していると報告されている⁹⁾。この低下の加速化も oxyMb の低下に関連していると考えられている。

本実験結果では、AT 以降の oxyHb の低下の加速化傾向は認められなかった。そこで、もう一つの AT 決定法である、運動時の oxyHb の値と安静値と一致する点に着目したが、その点は AT よりかなり早い時点であった。このように oxyHb の低下の加速化の時点や安静時への返還点が、AT 時に一致することはなかった。本実験のこれらの結果は、最近報告されている樋口ら⁹⁾ や Bhambhani ら⁴⁾ の結果と一致している。

定常運動負荷時では、酸素摂取量は軽負荷時では3分時まで増加し、その後、定常状態を示す。しかし、血中乳酸が増加するような負荷時では3分時以降も増加し続けることが知られている¹⁴⁾。また、この $\dot{V}O_2$ の増加と oxyHb の低下が関連するとされている。一方、漸増運動負荷時では、一般に、負荷の漸増率が遅いと酸素摂取量の負荷に対する漸増率は、AT 以降でそれ以前より大きくなることが知られている⁷⁾¹⁸⁾。もし定常運動負荷時に観察されるように $\dot{V}O_2$ が oxyHb の動態に影響するのであれば、負荷条件によっては漸増運動負荷時に oxyHb の加速化も起きるものと考えられる。

上腕二頭筋の oxyHb は、運動開始後、安静時よりやや高い値で横ばいし、その後、低下した。ハンドルを持っていない場合には、筋は仕事をしていないので、酸素摂取量は安静時と同じであると考えられる。また、oxyHb は酸素供給と酸素消費との差であると考えられるので、上腕二頭筋の oxyHb の低下は酸素供給の低下に伴っているものと考えられる。また動脈血の酸素含量は運動負荷の増加に伴って多少増加するが、それは少ないので、この酸素供給の減少は、血流量の低下に伴っているものと考えられる。

ある一定強度以上の上肢運動を行うと非活動状態にある下肢筋の oxyHb は低下すること、また下肢が軽度の運動状態にあるときにはこの oxyHb の低下が抑制されることが報告されている¹³⁾。これらの結果は次のように解釈できる。すなわち、上肢運動により自律神経系が興奮し、血管収縮を起こすが、下肢を活動状態にするとこの血管収縮を抑制するような血管拡張物質が放出され、その結果血管の収縮が抑制されることができると考えられる¹²⁾。この実験から本実験結果を推察すると、本実験のハンドルを握っていない場合には血管収縮作用が生じるが、握っている場合には拡張作用が多少生じるかもしれない。しかし、この作用では、oxyHb の低下は、ハンドルを握っている場合の方が遅くなるはずである。これは本実験結果と異なる。したがって、ハンドルを握ることによる仕事による酸素摂取量の増加が、oxyHb に作用していると考えたほうが良いかも知れない。

負荷強度を最大酸素摂取量あたりで表すと交感神経活動は60%強度以上で強く働くことが

示されている¹⁵⁾。また、心拍数の解析からは交感神経系はAT時から強く働き始めるとされている¹⁷⁾。したがって、この時期から交感神経性の血管収縮が生じると考えられる。本研究で用いた非活動筋のoxyHbは前述したように血流量の間接的な指標であると考えてきた。この血流量は、血管径の調節に伴う抵抗値の変化とともに、血圧値の変化にも影響される。漸増運動負荷時では運動強度が増加するに従って、血圧が増加するものと考えられる。したがって、この血圧増加が、ATよりもoxyHbの低下を遅らせているのかも知れない。

V, 結論

活動筋(外側広筋)のoxyHbの動態からATを推定する方法を検討したが、従来報告されてきているような方法では、その推定は可能ではなかった。また、非活動筋(上腕二頭筋)のoxyHb動態を観察した。その結果、oxyHbは負荷漸増後、定常状態を示した後、低下した。この低下時点は、個人内ではoxyHbが継時的変動すること、およびoxyHbの低下が急激には起きないことのために決定が困難であった。そこで、平均的oxyHbの変動から観察するとそのoxyHbの低下点はAT時より高い傾向が認められた。このようにATに関連した、oxyHbの特異点を見つけることはできなかった。

文献

- 1) Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ (1986) A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 60: 2020-2027
- 2) Belardinelli R, Barstow TJ, Porzasz J, Wasserman K (1995) Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy. *Eur J Appl Physiol* 70: 487-492
- 3) Belardinelli R, Barstow TJ, Porzasz J, Wasserman K (1995) Skeletal muscle oxygenation during constant work rate exercise. *Med Sci Sports Exerc* 27: 512-519
- 4) Bhambhani Y, Maikala R, Buckley S (1998) Muscle oxygenation during incremental arm and leg exercise in men and women. *Eur J Appl Physiol* 78: 422-431
- 5) Bhambhani YN, Buckley SM, Susaki T (1997) Detection of ventilatory threshold using near infrared spectroscopy in men and women. *Med Sci Sports Exerc* 29:402-409
- 6) Chance B, Dait MT, Zhang C, Hamaoka T, Hagerman F (1992) Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *Am J Physiol* 262(Cell physiol 31): C766-C775
- 7) Hansen JE, Casaburi R, Cooper DM, Wasserman K (1988) Oxygen uptake as related to work rate increment during cycle ergometer exercise. *Eur J Appl Physiol* 57:140-145
- 8) 樋口博之 勝村俊仁 浜岡隆文 村上元秀 西尾進也 江崎和希 佐古隆之 下光輝一 (2000) ランプ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
- 9) 樋口博之 勝村俊仁 浜岡隆文 佐古隆之 下光輝一 (1999) 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。 *運動生理学雑誌* 6: 27-35
- 10) 本間俊行 本間幸子 加賀谷淳子 (1998) 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

- 11) 三浦哉 荒木秀夫 的場秀樹 (1999) 自転車こぎ運動時の外側広筋および腓腹筋外側部における酸素化と筋放電との関係。 体力科学 48:413-420
- 12) 西安岳 (1999) 運動強度に応える: 全身運動の循環調節。 齊藤満 加賀谷淳子編著 循環 運動時の酸素運搬システム調節 3章63-79 ナップ社
- 13) 尾方寿好 (2001) 上肢運動と下肢運動との関連—自律神経系からみた関連性—北海道大学大学院教育学研究科 修士論文
- 14) Roston WL, Whipp BJ, Davis JA, Cunningham DA, Effros RM, Wasserman K (1987) Oxygen uptake kinetics and lactate concentration during exercise in humans. *Am Rev Respir Dis* 135:1080-1084
- 15) Saito M, Kanao Y, Tanaka H, Sakai T (1999) Muscle sympathetic nerve responses during progressive cycling exercise. *Adv Exerc Sports Physiol* 5:19-25
- 16) Shinohara M, Kouzaki M, Yoshihisa T, Kuno S, Fukunaga T (1999) Non-uniformity of muscle oxygenation in the quadriceps muscle during incremental knee extension. *Adv Exerc Sports Physiol* 5:78-87
- 17) Yamamoto Y, Hughson RL, Peterson JC (1991) Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability spectral analysis. *J Appl Physiol* 71:1136-1142
- 18) Zoladz JA, Duda K, Majerczak J (1998) Oxygen uptake does not increase linearly at high power outputs during incremental exercise test in humans. *Eur J Appl Physiol* 77:445-451