
踏台昇降運動における大腿四頭筋の酸素動態について

(近赤外分光法によるパターン分析)

河北尚夫 小川貫 坂入保世 橋口泰武 森昭雄 山本昌典

日本大学

Oxygen movement of quadriceps in the step test (Pattern analysis by NIRS)

Hisao KAWAKITA, Kan OGAWA, Hose SAKAIRI, Yasutake HASHIGUCHI,

Akio MORI and Masanori YAMAMOTO

Nihon University

Abstract;

Oxygen movement (SdO₂ · total Hb) in the local muscle (quadriceps) was analyzed for the purpose of adding an examination as an index of total endurance. So, a step test was used in subjects with poor and excellent general endurance, and movement analysis of SdO₂ · total Hb was performed.

As a result, a large difference was observed in oxygen movement between the subjects with poor general endurance and those with excellent endurance during step-test exercise and recovery.

I, 研究目的

「全身持久性体力は、活発な身体活動を長時間にわたって維持する体力と定義され、呼吸、循環、血液などの酸素運搬系や組織の酸素利用系が総合的に関与することから、特に健康に関連した体力として最も重要な意味をもち、その維持・向上は一般成人を主とした運動処方を中心課題である」¹⁾との指摘があり、全身持久性は体力・健康からも重要視されている。

活動筋への酸素供給能力及び活動筋での酸素利用能力は運動の持続性を決定する重要な因子であり²⁾、筋組織における酸素動態を知ることは持久性を測定する上で重要と考えられている。近年、近赤外線分光測定法(NIRS)が運動時の骨格筋の酸素状態を非侵襲的に測定する為に開発された。この方法では、組織における酸素化および脱酸素化のヘモグロビン(Hb)やミオグロビン(Mb)が近赤外光に対して特異的な吸光特性を持つことから、組織中の酸素化、脱酸素化(Mb · Hb)の量を測定することにより筋中での酸素状態を知ることができるようになった。そこで本研究グループでは、近赤

外分光法を用いて体内における運動中、運動前後の酸素動態を測定し、筋における酸素の供給と消費のバランスを分析し、心肺機能(全身持久性)の優劣の指標について検討するものである。最終的には心肺機能から見た個人の適正運動量の目安を作ることを目的とした。

筋赤外分光法における研究は医学関係や体力医学分野などで報告がみられ、同時に体力指標の有用性についての検討³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾も試みられてきた。特に体力医学分野での実験をみると測定上の理由と思われるがハンドグリップ、自転車エルゴメーターの実験が多くみられる⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。

近赤外分光法実験ではブローグ(コード)を使用するため、移動する運動は限られる点から、激しい動きがありながらも簡便で運動範囲が少ない踏台昇降運動を用いた。心肺持久性を評価する手段として踏台昇降運動、運動後息こらえ、最大換気量、最大酸素摂取量、最大酸素負債量、最大酸素脈、持久走、急歩、肺活量、5分走、12分走、最大心拍出量、最高心拍数など多くの方法が挙げられるが、学校等での測定は1500m

走（女子1000m）・踏台昇降運動が多く行われてきた。踏台昇降運動（step test）は一定運動を負荷した後の心拍数を調べることにより、心臓機能の優劣を判定しようとするものであり、体力測定としては全身持久性をこれによって推定しようとしている。測定・評価には多くの問題点が指摘されているが¹⁶⁾¹⁷⁾、実用性や簡便性を優先させる立場から、一般のフィールドパフォーマンスから全身持久性体力を評価する方法（12分間走・歩テスト・1500m 走テスト・踏台昇降テスト）が多く利用されてきた¹⁸⁾。そこで踏台昇降運動の動作で最も大きな負荷がかかるのは脚部であることから大腿四頭筋の酸素動態を測定対象とした。被験者は高校生男子生徒で全身持久力の優劣によって選別し、それらがどのような酸素動態を示すのか、またパターンに差異があるのか否かについて検討した。すなわち無侵襲酸素モニターを用いて男子高校生を対象に踏台昇降運動時における大腿四頭筋の SdO₂（酸素化率：酸素供給の絶対値と酸素代謝の目安）・totalHb（総ヘモグロビン：血流量の目安）を測定し、持久性の優劣から SdO₂（酸素化率）・totalHb（総ヘモグロビン）のパターンを分析するとともに

心拍数との関連を報告する。

II 被験者及び測定方法

1. 対象（被験者）は、N 大学付属 N 高等学校男子生徒10名である。

2. 被験者の選別は、同高校で平成12年4月に行われた運動能力測定1500m走の記録により、1,2年生438名中比較的記録の上位の者5名（以後 H 群）、比較的記録の下位の者5名（以後 L 群）を選別し測定した。分析にあたっては被験者10名の内 L 群の1名は操作ミスのため全部のデータが回収されず、また H 群の1名はノイズが大きくデータとしては不相当と判断し、その2名を除外し8名のデータの分析を試みた。

3. 被験者の身体的及び運動特性は表-1に示した通りである。

4. 測定日時は平成12年7月14日（金）、7月19日（水）のいずれも10:30am から実験室において室温22℃～23℃、室温35%～40%の環境条件で行った。測定等の手順は、ハートレートモニター装着→質問紙記入→安静脈測定→体脂肪測定→無侵襲酸素モニター装着→踏台昇降運動測定→無侵襲酸素モニター脱着→自覚的運動強度調査→ハー

表-1 被験者の身体特性

被験者	年齢 (才)	身長 (cm)	体重 (kg)	体脂肪 率 (%)	肥満度 (%)	安静脈 (拍/60秒)	踏台昇降 運動 (指数)	1500m走 (秒)	血圧 (mmHg)	自覚的 運動強度 (指数)
H 1	17.2	174.0	58.4	11.8	-12.3	71.0	71.4	292.0	74~137	12.0
H 2	16.3	168.0	60.0	13.3	-1.9	69.0	98.9	296.0	73~97	9.0
H 3	17.0	171.0	56.4	12.4	-11.9	76.0	78.9	294.0	61~115	11.0
H 4	17.2	170.0	57.0	14.3	-9.5	65.0	54.9	297.0	79~123	7.0
標準偏差値	0.43	2.50	1.60	1.09	4.8	4.57	18.25	2.22		2.22
H 平均値	16.90	170.80	58.00	13.00	-8.9	70.30	76.00	294.80		9.80
L 1	15.3	164.0	66.8	25.1	16.0	92.0	56.3	494.0	60~105	16.0
L 2	15.8	167.0	62.4	23.0	3.4	79.0	55.2	463.0	67~131	14.0
L 3	15.7	176.5	86.8	23.5	26.0	64.0	45.0	526.0	74~107	17.0
L 4	15.4	173.0	56.2	16.5	-14.5	78.0	67.2	534.0	75~117	17.0
標準偏差値	0.24	5.66	13.23	3.79	17.47	11.44	9.08	32.48		1.41
L 平均値	15.60	170.10	68.10	22.00	7.70	78.30	55.90	504.30		16.00

トレイトモニター脱着である。

5. 同一運動負荷として全員に踏台昇降運動 (① 台の高さは40cm とし、毎分30回のテンポで3分間の昇降運動を継続させる。②被測定員は、踏台の前に立ち、始めの合図で片足を踏台に上げ、次の合図で台上において膝を伸ばした直立姿勢をとり、次の合図で先上げた方の脚をおろし、次の合図で始めの姿勢に戻る。この時、必ず最初に昇った方の足から降りる。途中で降り始めの足を変えてもよい。跳び降りや、足先だけを台に掛けて昇る方法はいけない。③3分間の運動後、すぐ椅子に腰掛け、運動後1分から1分30秒まで、2分から2分30秒まで、3分から3分30秒までの3回、脈拍を測定する。④途中で、運動を続けることができなくなったり、昇降のテンポが3回以上遅れた場合は、運動を中止させ、ただちにその時間を秒単位で記録し、前述と同様に運動後の脈拍をはかる。⑤判定指数を算出し、小数点第2位以下を四捨五入して、同第1位まで求める。) を実施した。判定の心拍数は集団測定用ハートベットの (ヤガミ社) を使用し耳朶にセンサーを装着し測定を行った。

6. 酸素動態測定は、近赤外分光法による無侵襲酸素モニター OM-200 (島津製作所) を使用した。運動中で簡便に測定できることを条件に、被験者の右大腿四頭筋部 (外側広筋) 表皮にセンサーを固定し、運動前 (120秒間)、運動中 (180秒間)、運動後 (360秒間) について継続して実施した。また踏台昇降運動中の心拍数はハートトレイトモニター (ポーラル社製) を用いて測定した。

7. その他の測定と調査

体脂肪測定 (タニタ社製体内脂肪計 TBF-310)、安静時心拍数、及び血圧測定 (日本コウリン社健太郎 BP203RV II型) を用いた。踏台昇降運動の測定前に質問紙による調査 (被験者の睡眠状態、食欲、スポーツの嗜好、スポーツ経験等) し、踏台昇降運動の測定後に踏台昇降運動に対する自覚的運動強度をボルグ指数にて測定した。

III 結果と考察

1. 1500m走の優劣による踏台昇降運動時の心拍数について

図-1は H 群と L 群における踏台昇降運動時の心拍数の平均値を比較したものである。両群とも

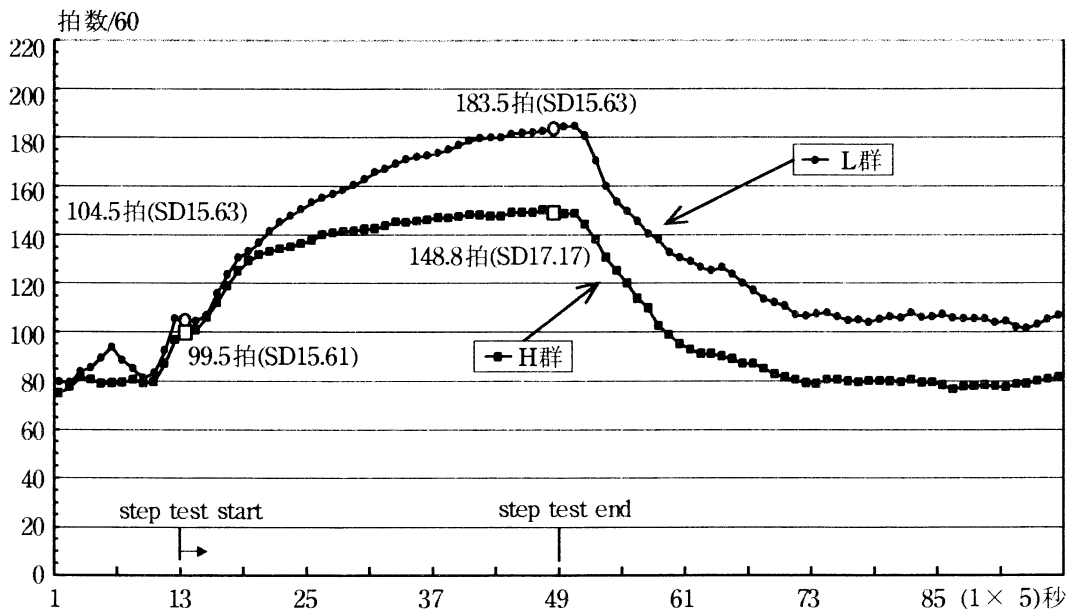


図-1. L 群と H 群の踏台昇降運動時の心拍数の推移

に運動開始時から心拍数は漸次増加する傾向を示し、運動終了時に最高値となり、運動終了後に漸次減少する傾向が顕著に示された。しかし、運動開始時のH群(99.5拍)とL群(104.6拍)間に明らかな差異が認められなかったが、運動終了までの心拍数の推移をみるとH群に比べL群の方は増加率が高い。また特に運動終了時ではH群(148.8拍)とL群(183.5拍)間で有意な差($P < 0.05$)が認められた。また運動終了から約5分間の心拍数の推移を見ると両群の心拍数は同様な傾向で減少が見られた。しかしH群は運動終了後2分で運動開始前の心拍数にもどっているが、L群は運動終了後5分を経過しても、運動前の状態にもどっていない。

2. 踏台昇降運動時の酸素化率について

図2-1はH群(4名)とL群(4名)の酸素化率を平均化したものである。H群における踏台昇降運動開始前の安静状態の酸素化率は約70%レベルであった。酸素化率は運動開始直後一時的に上昇するが、約25秒後に約30%レベルまでの下降を示す。その後運動終了時まで31%レベル(一定状態)で推移している。運動終了後直ちに酸素化率は上昇を始め、約30秒で運動前の安静状態に回復し、更

に酸素化率は上昇し運動終了後約60秒では運動前を上回る数値(80%台)を示した。運動終了から約240秒後には、ほぼ全員が運動前の安静状態への回復が伺えた。

L群における踏台昇降運動開始前の安静状態での酸素化率は約85%レベルであった。運動開始後から約35秒で酸素化率は約68~59%レベルまで急な減少が見られ、その後運動中は一定状態を維持していた。運動終了後直ちに酸素化率の上昇が始まり、約60秒で運動開始前の状態に達したが、その後測定終了まで緩慢な上昇を続けた。

また、運動後のH・L両群の推移を見ると安静時のレベルまで戻る時間はH群が約21秒後、L群が約51秒後でその差が20秒である。酸素化率の最も高い値はH群が約80秒後、L群が約311秒後でその差が231秒の差が見られた。

このようにH・L両群ともU字型的な類似なパターンを示しているが、運動初期の下降率と運動終了後の上昇率で大きな違いがみられ、また運動終了後の回復期では異なったパターンが示された。H・L両群の相違点を挙げると①運動開始前すなわち座位状態で踏台昇降運動の開始を待っている時間帯

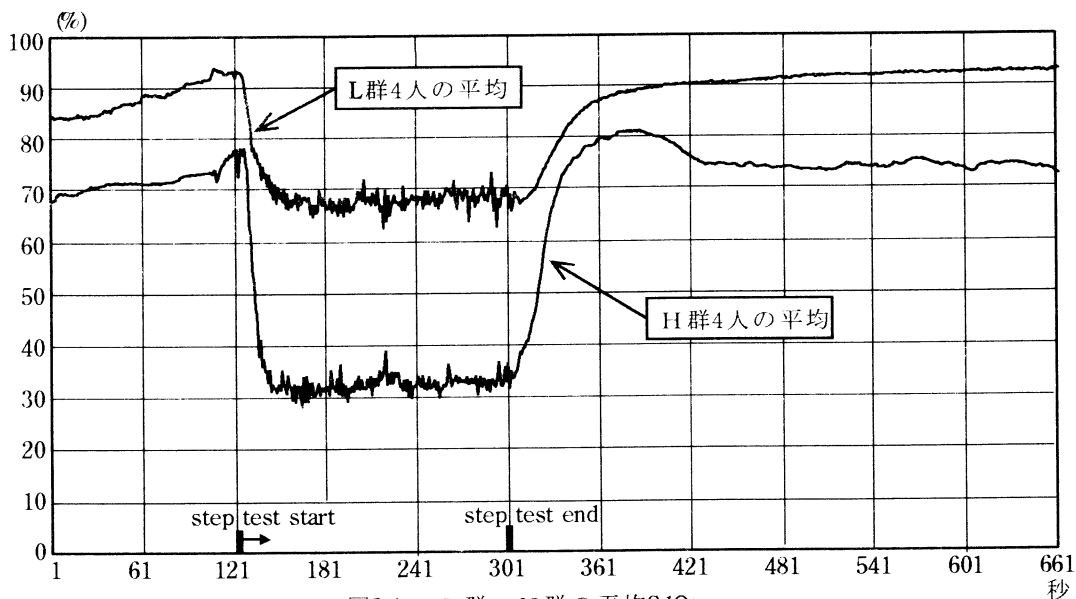


図2-1. L群・H群の平均SdO₂

を比較すると両群に20%レベルの違いが見られた。すなわちH群が約68%レベルであるのに対して、L群は約88%レベルであった。踏台昇降運動開始前の安静状態の酸素化率を見る限り局所筋の酸素供給はL群が高いと推測できる。②運動開始後から運動終了時までの比較では運動開始直後において同様な傾向で下降しているが、H群はL群に比べ酸素化率が急速に減少しその減少率も大きな差が見られた。H群は酸素化率が最下点(約30%レベル)に達した後、運動終了時までほぼ一定の傾向がみられるが、それに対しL群は運動開始後60秒で最下点(68%レベル)に至りH群より緩やかな下降現象が見られた。このようにH・L両群で酸素化率に違いが見られることは、筋組織内の代謝率が大きく作用していると推測できる。③運動終了時から測定終了時300秒までの測定値を見ると両群とも運動終了時に急激な上昇を示している。H群は運動終了から60秒後に約80%レベルの上昇が見られ、運動開始前の状態よりも約10%レベルの高い値となっている。L群はH群と同じ傾向が見られるが運動終了60秒後は運動開始前の状態と同じ値であった。

またH群は運動後80秒以降から運動開始前の状態に戻るような傾向が見られた、しかしL群は僅かであるが上昇の傾向を見せている。運動終了後H群はL群に比べ酸素化率の供給が急速に行なわれ、筋組織内の復元がスムーズに行なわれているように推測できる。

図2-2は被験者8名の踏台昇降運動時における大腿四頭筋の酸素化率を示したものである。全体のパターンとしてはU字型を描いているが、個々によってそれぞれ相違が見られる。

3. H・L両群の酸素化率と心拍数の推移

運動開始前すなわち座位状態で踏台昇降運動の開始を待っている時間帯での酸素化率は両群で20%台の違いが見られたが、心拍数ではほとんど差異がなかった。

運動開始後から運動終了時までの比較では酸素化率においては初期に両群とも急速な下降が見られ、H群はL群より減少度合いが大きい。しかし心拍数は両群で同様な上昇を示している。運動開始30秒後から運動終了時までの推移を見るとH群の酸素化率は運動終了時まで一定の傾向を示し、心拍

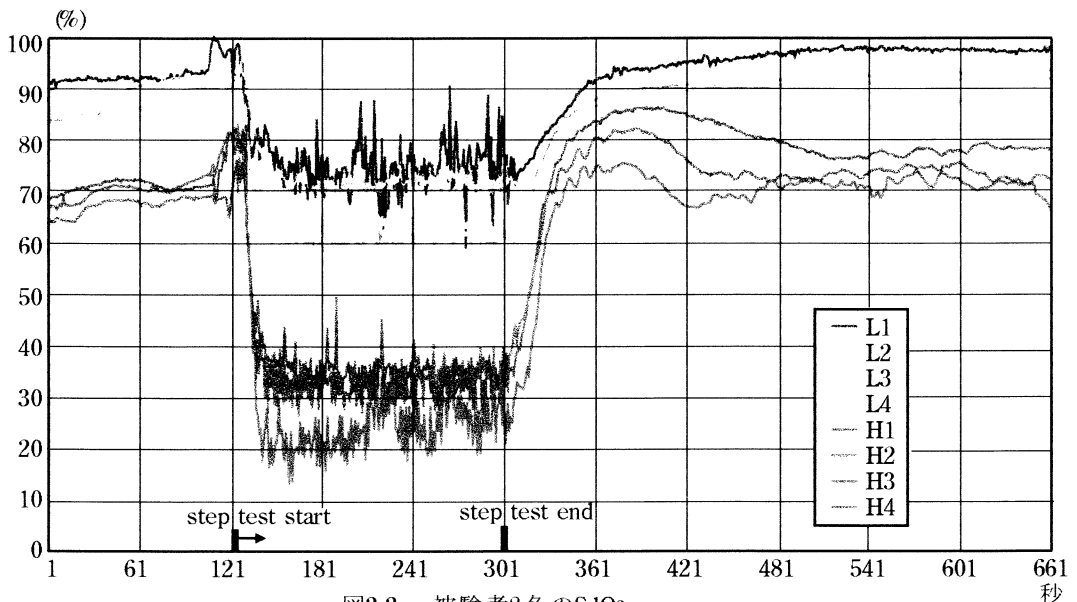


図2-2. 被験者8名のSdO₂

数はそれとは別に上昇が見られる。それに対し L 群の酸素化率は H 群より下降現象が少ないが心拍数においては H 群より上昇が大きい。運動終了時から測定終了時180秒までの測定値を見ると酸素化率では両群とも同様に急激な上昇を示すが H 群は運動開始前の状態よりも約20%台の高い値となるが時間の経過とともに運動開始状態に戻る。L 群は運動開始前の状態と同じ値でありその後は徐々に上昇している。しかし心拍数では H 群と同様な傾向で下降が見られる。すなわち局所筋での酸素化率と心拍数の推移を見ると必ずしも同じ傾向を示しているとは言えない。

4. 運動時の総ヘモグロビンについて

図3-1は、H 群と L 群間での、踏台昇降運動時の総ヘモグロビン（血流量）の平均値を比較したものである。両群間で比較すると、H 群では、運動開始直前（約10~15秒前）では一時的ではあるが、急激な増加傾向がみられるが、運動開始直後急激な減少を示し、その後運動中は漸次増加がみられた。L 群では運動直後から減少を始め運動開始1分後から緩慢な増加（ほぼ定常状態）を示した。運動前、運動中において H・L 両群間で総ヘモグロビン（血流量）に差がみられた。また、運動終了後の経過に

おいても、H 群では、運動終了直後から急激な増加傾向を示し、運動終了後1分後にピークに達しその後漸次減少傾向がみられる。L 群では運動終了直後から増加傾向を示したが、運動終了後6分経過後においても緩慢な増加傾向が続き、測定中に減少傾向をみる事ができなかった。

これらの結果から、H 群では運動開始前から適度な緊張状態に入り、血流供給機能が働き、一時的に総ヘモグロビン（血流量）が増加し、更に運動開始と共に総ヘモグロビン（血流量）が増加され、終了後においても急激な増加が行われたと考えられる。このことは局所筋におけるガス代謝機能がより効果的に促進されていると推測できる。また、L 群では、運動前、運動中の総ヘモグロビン（血流量）の増加傾向はほとんどみられず、運動終了後に増加はするものの代謝機能、血流量供給機能が円滑に働かず、運動終了後6分経過後においても総ヘモグロビン（血流量）の供給状態が続き、減少傾向をみることは出来なかった。今後、総ヘモグロビン（血流量）が運動終了後どの位の経過で、運動前のレベルにもどるのかを、回復過程の測定を検討したい。

図3-2は、運動開始前（60秒）、踏台昇降運動中（180秒）、および運動終了後（360秒）の総ヘモグ

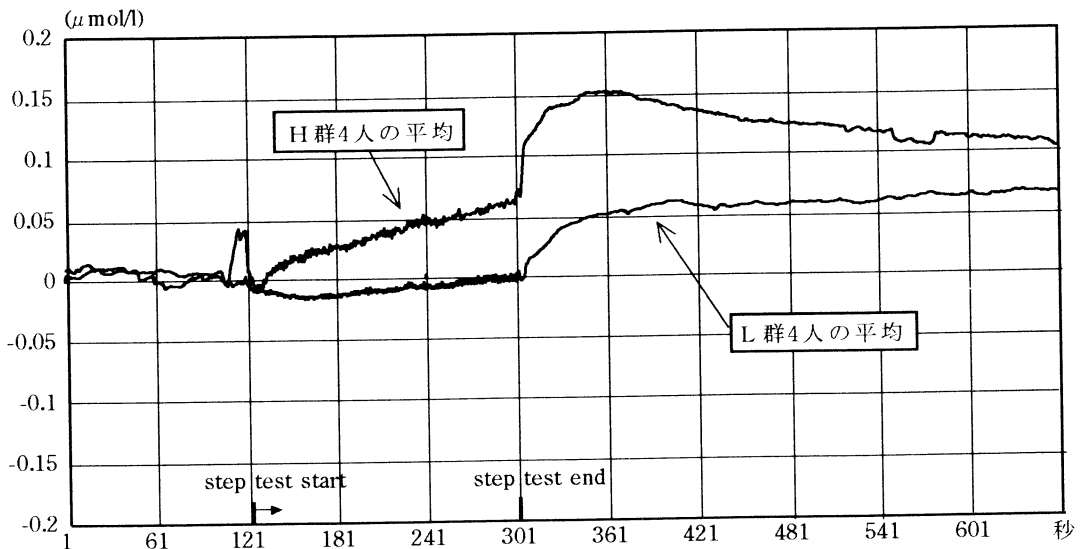


図3-1. L 群・H 群の平均totalHb

ロビン（血流量）の動態について、各被験者の動態パターンを示したものである。大きく分けて二つの（H1, H2, H3, H4とL1, L2, L3, L4）パターンがみられるが、H群の中でもH3, H4は運動開始後から終了まで漸次総ヘモグロビンが増加している。一方H1, H2は運動開始直後一旦減少して、その後漸次増加していく傾向が見られる。運動終了後を見るとH3, H4はH1, H2より総ヘモグロビンの増加率は少ない。L群では運動中はほぼ同様なパターンを示しているが、運動終了時の総ヘモグロビンの増加率は各人において相違が見られた。また踏台昇降運動終了後の総ヘモグロビン増加現象を見ると踏台昇降運動指数が高いほど踏台昇降運動終了後の総ヘモグロビン増加が急激に短時間に行われているが、指数が低いほど総ヘモグロビンの増加は緩慢である。

本間等¹⁹⁾の報告とは（自転車ランプ運動時）運動負荷の異なりからか負荷中の上昇度と負荷終了後の上昇度で違いが見られた。これは被験者の選抜や負荷の相違によるものと思われる。

IV. 結論

局所筋（大腿四頭筋）での酸素動態（酸素化率・総ヘモグロビン）を分析し、全身持久性の指標について検討を加えることを目的にした。そこで全身持久性の優れている者4名と劣っている者4名（N高校生438名中上位にあるもの5名、下位にあるもの5名を選出）を対象に踏台昇降運動を用いて酸素化率・総ヘモグロビンの動態分析を試みた。

その結果、踏台昇降運動の運動中と運動後で全身持久性の優れている者と劣っている者で酸素動態に違いが見られた。

1) 酸素化率をみると、運動中では全身持久性の優れている群は全身持久性の劣っている群に比べ、運動を開始すると酸素化率が激減した。また運動終了後は全身持久性の優れている群は全身持久性の劣っている群に比べ、激増する傾向が見られた。

2) 総ヘモグロビンをみると、運動中では全身持久性の優れている群は運動開始後漸増していくが、全身持久性の劣っている群は漸減し負荷終了時に初期に戻るパターンでみられた。また運動終了後は全身持久性の優れている群は漸増してその後漸減し安静状態に戻るが、全身持久性の劣っている群は漸増した後測定終了まで一定のレベルで保たれて

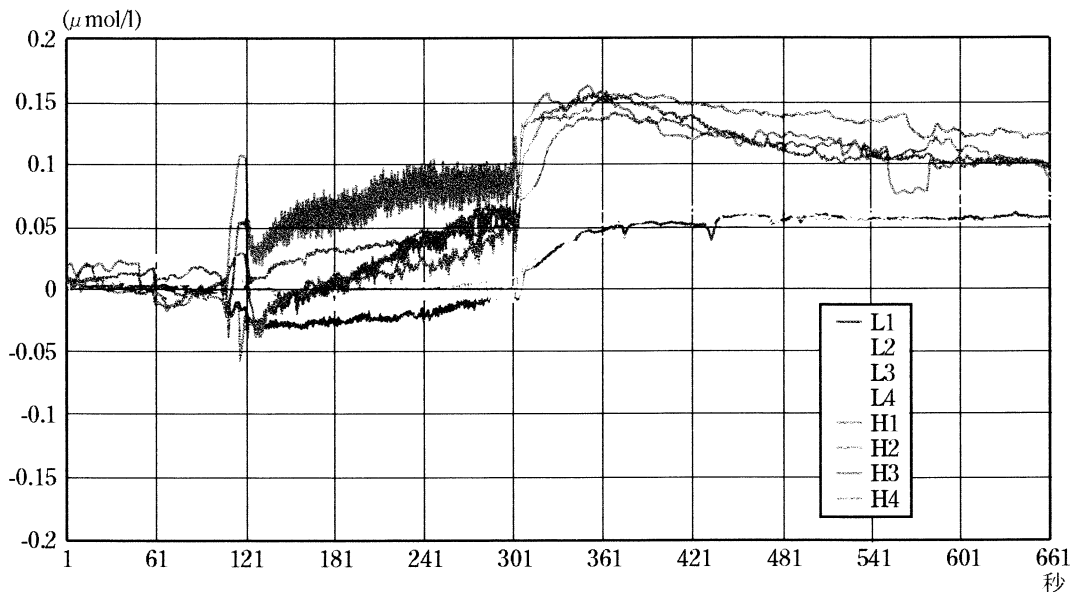


図3-2. 8名のtotalHb

いた。

NIRS測定によりパターン分析をした結果、全身持久性(1500m走)の優劣による各群で異なったパターンを得た。今後、調査を継続しデータ数を増すことにより適正運動量の指標の一助としたい。

参考・引用文献

- 1) 中垣内真樹ほか: 全身持久性体力の評価法としての主観的運動強度を用いた最大化12分間走テストの提案, 体育学研究41:173・180, 1996
- 2) 本間幸子ほか: 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活動筋について —, 体力科学:586-594, 1992
- 3) 弘原海剛ほか: 赤外分光法による運動負荷時酸素動態の体力指標としての有用性, Therapeutic Research Vol. 18, No. 7:156-158, 1997
- 4) 浜岡隆文: 活動筋有酸素代謝率の非侵襲的測定, Therapeutic Research Vol. 16, No. 9, 311-315, 1995
- 5) 浜岡隆文: 運動時および回復期における筋酸素動態とエネルギー代謝の同時測定, Therapeutic Research Vol. 17, No. 6, 149-152, 1995
- 6) 弘原海剛ほか: ランプ負荷運動に伴う近赤外分光法(NIRS)の筋内酸素動態の検討 — 評価方法の試作と運動能力との関連について —, 体力科学, 48:125-136, 1999
- 7) 本間幸子ほか: 活動筋でのO₂ kineticsと乳酸性作業閾値及び喚起性作業閾値との関係 — 近赤外分光法による検討 —, 体力医学会抄録, G-1-7(93.9)
- 8) 本間幸子ほか: 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活動筋に

ついて — 体力科学:586-594, 1992

- 9) 吉田敬義ほか: ハンドグリップ運動および動脈加圧による生体組織の酸化状態, 体力医学会抄録, B-3-5(93.9)
- 10) 浜岡隆文: 活動筋有酸素代謝率の非侵襲的測定, Therapeutic Research Vol. 16, No. 9, 311-315, 1995
- 11) 吉田敬義ほか: 運動負荷に対する筋組織酸素化状態の応答特性の測定, Therapeutic Research, Vol. 16, No. 9, 316-319, 1995
- 12) 沓沢智子ほか: 近赤外分光法による運動筋酸素化状態の評価 — プロスポーツ選手の検討 —, 第2回筋赤外線分光法研究会(1995.11)
- 13) 浜岡隆文: 運動時および回復期における筋酸素動態とエネルギー代謝の同時測定, Therapeutic Research, Vol. 17, No. 6, 149-152, 1995
- 14) 裴祥容ほか: 間欠性運動時における強度の相違が局所活動筋の酸素消費量変化に及ぼす影響, 第4回筋赤外線分光法研究会19(1997.10)
- 15) 本間幸子ほか: 健康増進のための至適運動強度の評価 — 活動筋における酸素の供給と消費のバランスからの検討 —, 体力研究第85号(1994.3)
- 16) 東京都立大学身体適性学研究室: 「心肺持久性」, 飯塚鉄雄(企画), 日本人の体力標準値第三版, 不昧堂出版, 254-255, 1980
- 17) 山地哲司: 運動処方のための心拍数の科学, 74, 大修館書店, 1981
- 18) 中垣内真樹前掲書, 174
- 19) 本間幸子前掲書, 588

受付 平成13年12月10日

受理 平成14年 3月18日