

上下肢の筋活動が呼吸循環系に及ぼす影響

— 80%最大筋力運動における比較 —

洲崎 俊男* 立野 勝彦* 灰田 信英*
濱出 茂治* 浅井 仁* 山崎 俊明*
須釜 聡* 三秋 泰一* 垣内 恵里**

要 旨

理学療法において下肢の運動が困難なときの代替運動を上肢に求められることもしばしば経験する。上肢あるいは下肢単独での研究は多いが、上肢と下肢の運動を相対的に同一にして比較研究したものは少ない。サイベックスを用いて肘および膝関節の屈曲—伸展運動において、3分間の相対的に同等な80%最大筋トルクにおける運動直後の呼吸代謝および循環系応答を比較検討することを目的とした。対象は健康な学生10名であった。その結果、酸素摂取量に関して、肘関節と膝関節の運動部位の違いによる有意差が認められたが、遅い速度と速い速度の違いによる比較では有意差は認められなかった。心拍数、収縮期血圧および主観的作業強度においては、運動部位および速度の違いによる有意な差はみられなかった。循環系反応において分時酸素摂取量(1 ml/kg/min.) 当たりに換算して比較した場合、心拍数および収縮期血圧において上肢は下肢運動に比べて相対的に高い値を示した。

KEY WORDS

Respiro-circulatory response, Elbow and knee exercise, Relative-equal workload, 80% maximal torque, Cybex

はじめに

理学療法において運動の強さをより客観的に把握するための指標として、呼吸代謝系や循環器系反応などの運動生理学的指標を用いて評価する機会が増えてきた。その要因として筋活動に伴う呼吸代謝あるいは代謝エネルギーの測定には、酸素摂取量やガス分析などの測定機器の進歩に伴いより簡便で精度の高い測定機器が出現したことによると思われる。

理学療法において下肢の運動が困難なときの代替運動を上肢に求められることもしばしば経験する¹⁾²⁾。Finestoneら²⁾ Keyserら³⁾、Macmastersら⁴⁾および源ら⁵⁾はエルゴメーターを用い、Graisら⁶⁾はパスボールを用いて上肢運動に対する呼吸循環系反応を調べている。下肢について

はトレッドミル⁷⁾や自転車エルゴメーター⁸⁾⁹⁾を用いた研究が一般的で、上肢あるいは下肢を対象として比較した研究は多くみられるが、同一の研究にて上肢と下肢の運動を相対的に比較したものは少ない¹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。Keyserら¹⁰⁾の両上肢と両下肢、Bondら¹¹⁾の両上肢と一側下肢、Currieら¹¹⁾の両下肢を片側下肢+両上肢における比較によれば上肢と下肢の運動においては、分時酸素摂取量(以下 $\dot{V}O_2$ と略)心拍数(以下HRと略)の応答に相違があることを指摘していることから、より円滑な理学療法を行う上にも上肢と下肢の筋活動による呼吸循環反応の違いを十分に把握しておく必要がある。

今回、われわれは同一の運動機器(サイベックスII)を用いて、肘と膝関節の屈曲—屈伸運動に対し、随意的

* 金沢大学医療技術短期大学部・理学療法学科

** 済生会富山病院

最大筋力（最大筋トルク）の80%の相対的に同等な筋活動を3分間行わせた時の呼吸循環系に及ぼす影響を比較、検討することを目的とした。

対象

日常規則正しい運動習慣がなく、呼吸・循環器系や上・下肢に整形外科的にも神経学的にもなんら障害のない健康な学生10名であった。被験者の平均年齢は21.1±0.6歳（20～22歳）であり、平均身長は166.3±6.5cm（158～178cm）で、平均体重は59.2±7.6kg（48～76kg）であった。

実験方法と測定方法

1. 実験装置および実験肢位

運動負荷装置として、サイベックスII（Lumex製）を用いた。実験肢位として、上肢運動である肘関節の屈曲—伸展運動は椅坐位にて被実験側の上腕が水平になるように高さを調節して机上に固定し、肘関節をサイベックスの回転軸に合わせ、前腕を90°回外位にして前腕末梢部を入力桿に固定した。尚、手指屈筋群の収縮を抑えるために、専用アタッチメントのグリップは用いなかった。下肢運動である膝関節の屈曲—伸展運動は、椅坐位で体幹と被実験側の大腿部を固定し、大腿骨顆部をサイベックスの回転軸に合わせ、下腿下端部を入力桿に固定した。

2. 随意的最大筋力および最大下運動負荷の決定

随意的最大筋力は、肘および膝関節の屈曲—伸展運動を各被験者に対して最大努力のもとで3回試行させ、その平均の筋トルク値とした。

最大下運動負荷の決定は、3分間の肘および膝関節の屈曲—伸展運動が可能であった最高の運動負荷は随意的

最大筋トルクの80%となり、この80%最大筋トルク値を本研究における最大下運動負荷として設定した。

3. 実験方法

サイベックスを用いて肘および膝関節の2種類の屈曲—伸展運動と60deg/secおよび180deg/secの2種類の運動速度とを組み合わせさせた4種類の運動を被験者毎に順不同に実施した。また、運動装置に慣れさせるため事前に各関節の屈曲—伸展運動の練習を実施した。

実験方法は、運動負荷試験を開始する前に各関節の屈曲—伸展運動の練習を軽く行い筋に対する準備運動を行った。

設定運動負荷を維持させるため、各被験者毎の目標筋トルク（80%最大筋トルク）をサイベックスに接続したパーソナルコンピューターの画面に表示して、それを視覚的にフィードバックさせながら3分間運動を行わせた。

4. 測定方法および測定機器

酸素摂取量は、一呼吸毎に呼気ガス分析を行うことができるミナト医科学製エアロモニタ AE-280Sを用いて連続測定し、収縮期血圧（以下SBPと略）およびHRの測

表1 サイベックスによる上下肢運動の随意的最大筋トルク値

| 運動関節 | 運動速度 (deg/sec) | 運動方向 | 最大トルク±SD (kg·m) |
|------|----------------|------|-----------------|
| 肘関節 | 60 | 屈曲 | 3.12±1.10 |
| " | " | 伸展 | 3.21±1.03 |
| " | 180 | 屈曲 | 2.56±0.82 |
| " | " | 伸展 | 2.63±0.89 |
| 膝関節 | 60 | 屈曲 | 10.66±2.15 |
| " | " | 伸展 | 10.67±2.51 |
| " | 180 | 屈曲 | 8.21±1.60 |
| " | " | 伸展 | 8.85±1.82 |

表2 各測定項目の安静時—運動直後の平均値（n=10）

| 測定時期 | 運動関節・速度 (deg/sec) | 酸素摂取量 (ml/kg/min) | 心拍数 (beats/min) | 収縮期血圧 (mmHg) | 主観的作業強度 (RPE) |
|------|-------------------|-------------------|-----------------|--------------|---------------|
| 安静時 | 肘関節・60 | 3.15±0.25 | 74.5±8.7 | 110.1±12.5 | 6.2±0.4 |
| " | "・180 | 3.59±0.24 | 75.1±9.4 | 109.4±10.1 | 6.1±0.3 |
| " | 膝関節・60 | 3.62±0.19 | 74.8±11.9 | 114.3±10.8 | 6.2±0.4 |
| " | "・180 | 3.43±0.27 | 76.4±6.3 | 116.0±7.8 | 6.2±0.4 |
| 運動直後 | 肘関節・60 | 13.0±4.8 | 116.2±19.5 | 149.5±19.5 | 15.8±1.6 |
| " | "・180 | 14.5±3.5 | 122.2±20.8 | 147.2±22.3 | 16.3±1.3 |
| " | 膝関節・60 | 16.5±3.5 | 117.9±21.4 | 146.1±17.3 | 15.9±1.8 |
| " | "・180 | 19.4±3.7 | 130.9±12.2 | 155.3±13.2 | 17.0±1.5 |

*安静時と運動直後間のt検定は、すべて有意差あり（p<0.01）

□ 安静時
 ▨ 60deg/sec 運動直後
 ▩ 180deg/sec 運動直後

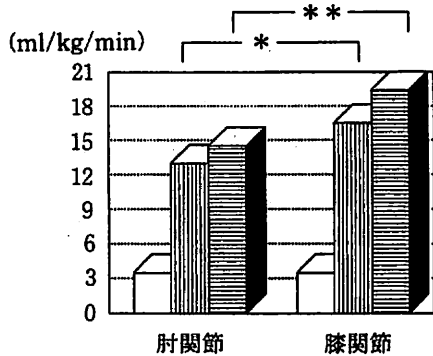


図1 酸素摂取量 $\dot{V}O_2$

** p<0.01, * p<0.05, 無印 p>0.05

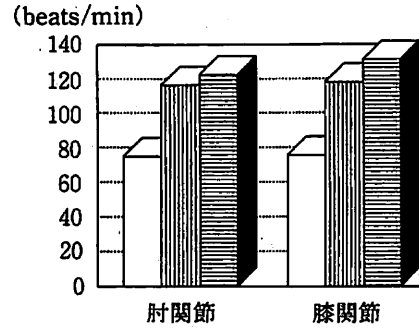


図2 心拍数 HR

□ 安静時
 ▨ 60deg/sec 運動直後
 ▩ 180deg/sec 運動直後

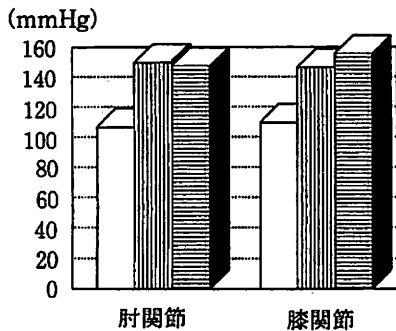


図3 収縮期血圧 SBP

** p<0.01, * p<0.05, 無印 p>0.05

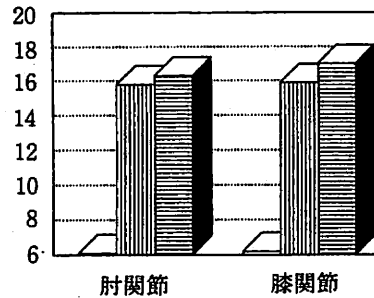


図4 主観的運動強度 RPE

定には日本コーリン製運動負荷用血圧監視装置 STBP-680 を用いて1分毎に連続測定をした。但し、マンシエットの装着は非運動肢の上腕部とした。

主観的作業強度 (以下 RPE と略) は、測定終了後に各被験者より Borg scale¹²⁾を用いて聴取した。

結果

1. 随意的最大筋力の決定について

サイベックスによる肘および膝関節の屈曲—伸展運動時の随意的最大筋トルク値は表1に示した。

2. 3分間の80%最大筋トルク運動直後の呼吸循環系反応の比較について

1) $\dot{V}O_2$, HR, SBP および RPE の安静時と運動終了時の測定値の平均値を表2に示した。各測定項目の安静時と運動直後の間の t 検定において、すべて有意差が認められた (p < 0.01)。

2) $\dot{V}O_2$ について

60deg/sec における肘と膝関節屈曲—伸展運動の比較では、 13.0 ± 4.8 と 16.5 ± 3.5 ml/kg/min. となり両者間には危険率 5% で有意差が認められた (p < 0.05)。同様に 180deg/sec では、 14.5 ± 3.5 と 19.4 ± 3.7 ml/kg/min. となり危険率 1% で有意差が認められた (p < 0.01)。

一方、肘および膝関節における同一の関節運動では運動減速の違いによる有意差はみられなかった (図1)。

3) HR について

肘と膝関節運動の運動部位の比較では2種類の運動速度間において有意差はみられなかった。運動速度間の比較においても肘および膝関節運動ともに180が60deg/sec より高い値を示したが有意差は認められなかった (図2)。

4) SBP, RPE について

運動部位および運動速度の間にはいずれも有意差はみられなかった (図3, 4)。

5) $\dot{V}O_2$ と HR との相関, および RPE と HR との相関について

4種類の運動のいずれにおいても, $r=0.62$ 以下の低い値を示した。また, 膝関節の180deg/secの運動速度にて, 負の相関を示した(表3, 4)。

表3 酸素摂取量($\dot{V}O_2$)と心拍数(HR)との相関

| HR vs $\dot{V}O_2$ | | 相関係数 |
|--------------------|------------|-------------|
| 肘関節 | 60deg/sec | $r = 0.62$ |
| " | 180deg/sec | $r = 0.47$ |
| 膝関節 | 60deg/sec | $r = 0.08$ |
| " | 180deg/sec | $r = -0.50$ |

表4 主観的運動強度(RPE)と心拍数(HR)との相関

| HR vs RPE | | 相関係数 |
|-----------|------------|-------------|
| 肘関節 | 60deg/sec | $r = 0.31$ |
| " | 180deg/sec | $r = 0.45$ |
| 膝関節 | 60deg/sec | $r = 0.47$ |
| " | 180deg/sec | $r = -0.21$ |

考 察

一般的に筋活動に伴うエネルギー代謝の基準として, 一般成人の安静時の代謝量は1.2kcal/minという熱量で表され, 3.5ml/kg/minの酸素摂取量に相当することはすでに周知のことである。従って, 本研究では相対的同等運動負荷のもと上下肢の筋活動の違いを明確にするため $\dot{V}O_2$ を主な指標とし, さらにSBP, HRの循環系指標とRPEも加えて総合的に比較した。

本研究では, サイベックスを用いて80%最大筋トルクの運動を上肢および下肢に施行することで被験者の上下肢に対して相対的に同等な運動を負荷したことにより, 上下肢運動の比較を可能にした。

$\dot{V}O_2$ において, 下肢は上肢よりも有意に高い値を示したが, 180deg/secは60deg/secより高い値になったが有意差は認められなかった。Bondら¹¹⁾やKeyserら¹⁰⁾は, 運動時に関与する筋の量が多いほど $\dot{V}O_2$ が増加すると報告しているが, われわれも同様の結果を得た。肘関節屈筋として上腕二頭筋, 上腕筋および腕橈骨筋, 肘関節伸筋として上腕三頭筋がこれらの運動に主動筋として関与する。膝関節屈筋として大腿二頭筋, 半腱様筋および半膜様筋, 膝関節伸筋として大腿四頭筋がそれぞれ関与している。解剖学的には明らかにこれらの運動に関与する

絶対筋量は下肢が上肢より多いことが考えられる。

2種類の運動速度の比較では, 180deg/secは60deg/secより高い値を示したが有意差を認めるまでに至らなかった。単純計算では3倍の速さの運動であるので, サイベックスによる屈曲—伸展の往復運動でも3倍の筋収縮回数である。3分間での屈曲に要する時間と伸展に要する時間では, 運動回数が違っても筋収縮時間はほぼ同一と考えられる。従って, 速い筋収縮と遅い筋収縮がいかに生体反応の相違を引き起こすかをさらに追求することが必要となる。以前より運動速度を変えたときの呼吸循環系反応を調査した研究はあるが, 一般的にモナークやサイベックスなどの上肢エルゴメータ²⁴⁾¹⁰⁾を用いたものであった。そして, 運動速度が上昇すれば呼吸循環系反応も高くなるとの報告が多いが, 70~90rpmの速い運動に $\dot{V}O_2$, HR, SBPの変化が必ずしも一致していないことも指摘されている。外見的な運動形態として, 本研究のようにサイベックスを用いた一側肢の往復不連続運動とエルゴメータによる両側肢の回転連続運動とは異種の運動に見えるが, いずれも肘あるいは膝関節を中心軸にした角運動であり主動筋および拮抗筋の筋収縮と筋弛緩の反復である。むしろ, サイベックスは一側肢の, エルゴメータは両側肢の運動でありこれが最大の相違点と思われる。

循環系反応におけるHRでは, 膝関節運動は肘関節運動より僅かに高く, 180deg/secは60deg/secより高い値を示したが, いずれも有意差は認められなかった。しかし, $\dot{V}O_2$ (1 ml/kg/min.) 当たりに換算して比較した場合, 上肢の運動が相対的に下肢運動より高い値を示した。福田ら¹³⁾は, 同一の $\dot{V}O_2$ に対して上肢運動の方が高い値を示すことになり, さらに上肢作業では, 筋内圧の上昇による血流抵抗の増大, それに伴う末梢血流量の減少や帰還血流量の減少, そして, 一回拍出量の減少など一連の生理現象を補おうとすると述べている。

SBPでは, HRよりも更に運動関節および運動速度の違いがみられず有意差は認められなかった。一側肢における3分間の短時間の屈曲—伸展往復運動という急激な筋収縮活動は $\dot{V}O_2$ およびHRにより強く反応し, 血圧への反応は前者に比べて遅延したものと思われる。

本研究は一側肢の運動であり, 源ら⁵⁾の上肢エルゴメータを用いて回転速度を変化させた運動では速い回転の

運動は低回転の運動より高い $\dot{V}O_2$ を示したと報告している。本研究との違いは上肢エルゴメーターは両側肢での回転運動であり、サイベックスでの肘関節屈曲—伸展運動は一側肢の往復運動であり、両者に関与する筋量や筋収縮時間の違いも一因と思われる。

RPE においては、HR と類似した傾向を示しており、運動部位および速度間にはいずれも有意差はみとめられなかった。

$\dot{V}O_2$ と HR, RPE と HR との間の相関はいずれも低かった。今回の結果では、相関が低いものとなり、Borg¹²⁾ の健康な被験者による報告を支持するものではなかった。Finestone ら²⁾ の急性不良性血管性切断者による報告と同様な低い相関を示した要因として、Borg¹²⁾ は健康者の自転車エルゴメーター駆動による両下肢での運動であるが、筆者らのサイベックスによる一側肢の運動は運動肢に強度の負担をかけることになって両下肢運動よりもむしろ Finestone ら²⁾ の下肢切断者による両上肢運動と類似した低い相関になったものと思われる。久家⁸⁾ は一側下肢と両下肢での比較で、前者の方が $\dot{V}O_2$ と HR とともに高い値を示したと述べているが、特に、一側肢への単位時間当たりの運動量が増加すれば、筋疲労を速く引き起こすことも考えられる。その結果、 $\dot{V}O_2$ と HR, RPE と HR の相関が低かったのは被験者の絶対筋力、筋持久力などの運動能力に大きなばらつきが生じていたものと思われる。特に、180deg/sec の膝関節運動にその差が顕著であり、低相関や負相関を示したものと思われる。

最大下運動負荷について、Grais ら⁶⁾ は上肢運動として playbuoy (日本名: パスボールゲーム) を心疾患患者に行わせているが、最大運動負荷の約5分の1の $\dot{V}O_2$ の運動は安全な運動であると述べている。Keyser ら³⁾ は60, 80% の運動負荷にて上肢エルゴメーター、加賀谷ら¹⁴⁾ は3分の1運動負荷にて握力と足底屈力の比較をしている。本研究では少なくとも3分の運動が可能であるとの観点から80%随意的最大筋力を用いたが、この80%は最大下運動としては他の研究より高負荷の運動であった。Finestone ら²⁾ は急性の不良性血管性切断者において両上肢のエルゴメーターによる漸増負荷運動にて、頻呼吸や血圧の上昇ではなく、腕の筋疲労によるテストの中断があったと述べていることから、本研究において、80%最大筋トルク運動は特に、一側下肢の高運動負荷となり、末梢性筋疲

勞を惹起させたものと思われる。

今後、上肢の運動は、酸素摂取量よりも心拍数や血圧などの循環系により強い影響を及ぼすということから呼吸循環系応答の両者の指標をモニターしながら、下肢の代替運動を行う必要があると思われる。さらに Keyser ら¹⁰⁾ も指摘しているように無酸素性作業閾値 (AT) を考慮した最大下負荷運動を行わせることが、理学療法における安全な運動処方なるものと思われる。短時間の瞬発的運動よりも長時間の持久的運動、最大運動負荷の何パーセント相当の運動かあるいは運動器具として何が適当かなどより適した運動負荷方法を模索してゆく必要があると考えられる。

まとめ

サイベックスによる3分間の80%最大筋トルクでの肘と膝関節屈曲—伸展運動直後の呼吸代謝および循環系応答を比較検討した。

1. 酸素摂取量に関して、各速度における肘関節と膝関節の運動の違いによる有意差が認められたが、各関節における遅い速度と速い速度の違いによる比較では有意差は認められなかった。
2. 心拍数、収縮期血圧および主観的作業強度においては、運動部位および速度の違いによる有意な差はみられなかった。
3. 酸素摂取量と心拍数および主観的作業強度と心拍数の相関はいずれも低かった。

文献

- 1) Currie, D.M., et al : Aerobic capacity with two leg work versus one leg plus both arms work in men with peripheral vascular disease, Arch Phys Med Rehabil, 73 : 1081-1084, 1992.
- 2) Finestone, H.M., et al : Arm ergometry exercise testing in patients with dysvascular amputations, Arch Phys Med Rehabil., 72 : 15-19, 1991.
- 3) Keyser, R.E., et al : Variation in cardiovascular response accompanying differences in arm-cranking rate, Arch Phys Med Rehabil., 69 : 941-945, 1988.
- 4) Macmasters, W.A., et al : Effect of exercise speed on heart, systolic blood pressure, and rate-pressure product during upper extremity ergometry, Phys Ther., 67 : 1085-1088, 1987.

- 5) 源菜穂子 他：上肢エルゴメータにおけるスピード、運動方向の相違による生体への影響、運動生理, 3 : 233-237, 1988.
- 6) Grais, S.L., et al : Myocardial and aerobic requirements for an upper body exercise ; implications for cardiac rehabilitation, Arch Phys Med Rehabil, 72 : 563-566, 1991.
- 7) 丸山仁司 他：トレッドミル負荷に対する循環系反応の基礎的検討と障害老年者の運動療法の効果について、理・作・療法, 16 : 871-877, 1982.
- 8) 久家直巳：一側下肢と両側下肢による自転車エルゴメーター駆動時の酸素消費量と心拍数について、運動生理, 3 : 7-10, 1988.
- 9) 洲崎俊男 他：等張性・等速性自転車エルゴメーター駆動が呼吸代謝系に及ぼす影響、理学療法学, 16(学会特別号) : 263, 1989.
- 10) Keyser, R.E., et al : Cardiovascular responses and anaerobic threshold for bicycle and arm ergometer exercise, Arch Phys Med Rehabil., 70 : 687-691, 1989.
- 11) Bond, V. et al : Aerobic capacity during two-arm and one-leg ergometric exercise, Int Rehabil Med., 8 : 79-81, 1987.
- 12) Borg, G. : Perceived exertion as an indicator of somatic stress, Scand J Rehab Med., 2-3 : 92-98, 1970.
- 13) 福田明夫 他：作業部位(活動筋量)の相違による HR-% $\dot{V}O_2$ max 直線の変異性, 体育の科学, 32 : 751-756, 1982.
- 14) 加賀谷淳子 他：相対的強度の等しい前腕と下腿の同時運動に対する呼吸循環系応答, 体力科学, 40 : 447-454, 1991.

Effect of muscular activities accompanying elbow and knee movement on respiro-circulatory responses ; Comparisons with exercise being relatively equal at 80% maximum torque.

Toshio Susaki, Katsuhiko Tachino, Nobuhide Haida,
Shigeharu Hamade, Toshiaki Yamazaki, Hitoshi Asai,
Satoshi Sugama, Hiroichi Miaki, Eri Kaitou

Summary

Arm ergometry may be the only means of exercise for persons who cannot performed treadmill or bicycle exercise. Though a lot of articles have been reported on only upper- or lower-extrimity exercise, it have been rarely found studies that was simultaneously compared with arm and knee movement. Therefore, the purpose of this study was to investigate respiro-circulatory responses during upper and lower exercise that was relatively identical at 80% maximum torque. 10 healthy college students underwent exercise for elbow and knee flexion-extension during 3 minutes.

Oxygen uptakes ($\dot{V}O_2$) at immediate post exercise revealed that knee movement is significantly larger than elbow motion throughout 3 minutes. Then, it was not statistically different between 60 and 180deg/sec speeds. Both heart rate (HR) and systolic blood pressure (SBP) were not significantly different from two joints movement at immediate post exercise.

It was indicated that rating of perceived exertion (RPE) is also similar to responses in case of HR and SBP. Above circulatory responses and RPE was not statistically influenced for exercise performed in two joints (elbow, knee) and two speeds (60, 180deg/sec).

In case of relative comparisons with two joint movements on the base of HR and SBP divided by $\dot{V}O_2$, it may be consequently suggested that elbow exercise is relatively higher than knee movement.