臥位運動と坐位運動における呼吸循環反応の違いについて

高橋 哲也* 田辺 一彦** 中山 大** 長田 尚彦**
山田 純生*** 石黒 友康* 伊東 春樹** 村山 正博**

CARDIOPULMONARY RESPONSE DURING SUPINE AND SITTING BICYCLE EXERCISE

TETSUYA TAKAHASHI, KAZUHIKO TANABE, MASARU NAKAYAMA, NAOHIKO OSADA,
SUMIO YAMADA, TOMOYASU ISHIGURO, HARUKI ITOH and MASAHIRO MURAYAMA

Abstract

The difference in cardiopulmonary response between supine exercise and sitting exercise was assessed by the following protocols.

- 1) Cardiopulmonary exercise testing utilizing the ramp protocol with a bicycle ergometer (20 W/min) was performed by nine healthy Japanese men (mean age, 19.9 yr) in a sitting and a supine position. Oxygen uptake, heart rate and blood pressure were measured during the test. Blood was sampled in order to measure noradrenaline (NA) and angiotensin II (ANG II) in the resting control state and immediately after exercise.
- 2) Single-level exercise testing at 100 W was performed on another day. The cardiac index (CI) was computed from the cardiac output, which was measured using the dye-dilution method in the resting control state and during exercise.

The results were as follows :

- 1) Heart rate and blood pressure during exercise had a tendency to be lower in the supine position compared to the sitting position, although not significantly.
- 2) Anaerobic threshold (AT) was lower in the supine position than in the sitting position exercise, (18.3 ± 2.6 ml/kg/min and 21.7 ± 1.9 ml/kg/min, respectively).
- 3) NA and ANG II in the supine position were slightly lower than in the sitting position.
- 4) At rest, the CI in the sitting position was significantly less than in the supine position; however, the CI during the 100 W exercises was the same in both the supine and sitting positions.

It is concluded that blood flow to active muscle during 100W exercise is lower in the supine than in the sitting position. This is thought to be due to changes in blood redistribution and lowered blood flow to active muscle in the supine position, creating a lower AT.

(Jpn. J. Phys. Fitness Med. 1995, 44 : 105~112)

key words : Cardiopulmonary response, Body position, Blood redistribution, Anaerobic threshold.

I. 緒 言

心肺運動負荷試験から得られる Anaerobic Threshold (AT)・peak $\dot{V}O_2$ は、健常人の運動耐容

能評価や、心疾患患者の重症度評価などの指標として有用と考えられている^{20,23)}。これらはトレッドミル、エルゴメータなどの運動種目、あるいはトレーニング内容などによっても影響を受けるこ

*聖マリアンナ医科大学東横病院
リハビリテーション部
〒211 神奈川県川崎市中原区小杉町3-435

**聖マリアンナ医科大学病院
ハートセンター
〒216 神奈川県川崎市宮前区菅生2-16-1

***聖マリアンナ医科大学病院
リハビリテーション部
〒216 神奈川県川崎市宮前区菅生2-16-1

Dept. of Rehabilitation Medicine, St. Marianna University School
of Medicine Toyoko Hospital 3-435 Kosugi-cho
Nakahara-ku Kawasaki-shi Kanagawa, 211 Japan
Heart Center, St. Marianna University School of Medicine
Hospital 2-16-1 Sugao Miyamae-ku Kawasaki-shi
Kanagawa, 216 Japan

Dept. of Rehabilitation Medicine, St. Marianna University School
of Medicine Hospital 2-16-1 Sugao Miyamae-ku Kawasaki-shi
Kanagawa, 216 Japan

とが知られている^{1,13)}。

心筋梗塞後の心臓リハビリテーションなどの臨床ではトレッドミル運動や坐位自転車エルゴメータ運動などの、立位あるいは坐位運動が広く用いられている。その一方で運動負荷シンチグラムや心臓カテーテル中の運動負荷には、検査手技上の制約から臥位自転車エルゴメータなどの臥位運動が用いられることも少なくない。このような臥位運動負荷試験結果を正確に評価するためには、坐位運動と臥位運動の生理学的な差を理解しておくことは極めて重要といえる。

さらには近年、高齢者及び障害者の体力維持増強の観点²¹⁾から、安全かつ実用的な酸素運動の試みが模索され、背もたれ付き自転車エルゴメータの開発や臥位での酸素運動が注目されている。従って、運動肢位の違いが各種生体反応に及ぼす影響を理解することは必須のものとなってきた。

そこで今回我々は、運動肢位の違いが呼吸循環器系にどのような影響をもたらすかについての基礎的研究として、健康人を対象に臥位と坐位にて運動負荷試験を行い、呼吸循環動態、心拍出量動態、各種ホルモン動態について検討した。

Ⅱ. 対象と方法

対象は健康男性9例。平均年齢 19.9 ± 1.5 歳、平均身長 172.6 ± 4.5 cm、平均体重 65.6 ± 8.9 kgで、全対象者が運動部に所属していた。

運動負荷試験にはTS Health System社製Space Cycle SSRを用いて、3分間の安静、20 watts, 60 rpmで3分間のWarming upの後、毎分20 Watts漸増するramp負荷を180 Wattsまで行った。これを同一被検者にて坐位と臥位にてランダムに行い、測定の間隔は基本的に1週間とした。

呼気ガスの測定は、ミナト医科学社製Respirometer RM-300を用い、breath by breath法にて連続的に行った。運動負荷心電図、心拍数測定はフクダ電子製負荷心電図処理装置ML-5000、血圧測定はコーリン製自動血圧計STBP-780を用い、それぞれ1分毎に測定した。さらに、嫌気

性代謝閾値Anaerobic Threshold(AT)は、分時換気量($\dot{V}_E$)/炭酸ガス排出量($\dot{V}CO_2$)の増加なしに、 $\dot{V}_E$ /酸素摂取量($\dot{V}O_2$)が増加開始する点²⁴⁾とし、3名のreviewerによりグラフから決定した。さらに肘静脈にカテーテルを留置した後、それぞれの検査肢位で30分間安静にし、安静時と運動負荷終了時に採血し、ノルアドレナリン、アンギオテンシンⅡを測定した。ノルアドレナリンの測定は、酸化アルミナ吸着抽出後、高速液体クロマトグラフィー(HPLC)にて行い、アンギオテンシンⅡはRIA法にて行った。また別の日に両肢位で6分間の100 watts単一負荷を施行し、安静時と100 watts負荷時に日本光電社製希釈式心拍出量計算装置MLC-4200を用い、固定した肘静脈カテーテルより5mgのジアグノグリーン®注(第一製薬)を注入し、色素希釈法による心拍出量を測定し、さらにその結果から心係数を算出した。

なお、実験対象者全員に本研究の主旨を説明し、同意を得た後に行った。統計学的手法は、主としてt検定を用いて行い、有意水準は原則として両側5%未満を有意と判定した。

Ⅲ. 結 果

A. 心拍数(HR)、血圧(SBP,DBP)動態

坐位および臥位運動時のHR, SBP, DBPの変化を図1に示す。HR, SBP, DBPは有意な差はないものの全般的に坐位運動で高値を示す傾向があった。

B. 酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、 $\Delta \dot{V}O_2/\Delta$ Work Rate、酸素脈(O_2 Pulse)動態

坐位および臥位運動時の $\dot{V}O_2$ の変化を図2に示す。安静時の $\dot{V}O_2$ は坐位で 5.1 ± 0.7 ml/kg/min、臥位で 4.3 ± 0.5 ml/kg/min。Warming up時の $\dot{V}O_2$ は坐位で 10.8 ± 0.7 ml/kg/min、臥位で 9.8 ± 0.9 ml/kg/minと坐位条件で有意に大きい値を示した($p < 0.05$)。またAT時の $\dot{V}O_2$ も坐位で 21.7 ± 1.9 ml/kg/min、臥位で 18.3 ± 2.6 ml/kg/minと坐位条件で有意に大きい値を示した($p < 0.01$)。負荷終了時の $\dot{V}O_2$ は、坐位で 35.8 ± 3.1 ml/kg/min、臥位で 33.7 ± 4.1 ml/kg/minと坐位運動で高値を示す傾向があった。

Fig. 1-1. Variations in heart rate (HR) in response to graded sitting and supine exercise and recovery phase. Values are means $\pm$ SD.

Fig. 1-2. Blood pressure (SBP, DBP) in response to graded sitting and supine exercise and recovery phase. Values are means $\pm$ SD.

Fig. 2. Variations in oxygen uptake in response to graded sitting and supine exercise. Values are means $\pm$ SD.

が有意な差はみられなかった。

AT 時の HR は, 坐位で 123.1 ± 7.8 bpm, 臥位で 114.7 ± 9.4 bpm と有意な差はないものの, 坐位運動で高値であった。さらに運動開始後 AT に達するまでの時間は, 坐位で 203.0 ± 33.8 sec, 臥位で 163.7 ± 31.5 sec と坐位条件で有意に長かった ($p < 0.05$)。

個体の酸素輸送能を示す指標である酸素摂取量の変化率/運動負荷増加率 ($\Delta \dot{V}O_2 / \Delta \text{Work Rate}$) は, 坐位条件で 11.0 ± 1.1 ml/W, 臥位条件で 10.3 ± 1.2 ml/W と有意な差はみられなかった (表 1)。

酸素脈 (O_2 Pulse) は各時期で有意な差はみられなかったが坐位条件で高値を示した (図 3)。

C. ノルアドレナリンおよびアンギオテンシン

II 動態

次に安静時及び負荷終了時のノルアドレナリン, アンギオテンシン II の値を図 4 に示す。ノルアドレナリンは安静時は坐位 365.9 ± 130.6 pg/ml, 臥位 274.6 ± 94.2 pg/ml と坐位で高値を示し, 負荷終了時は坐位 1385.5 ± 484.7 pg/ml, 臥位 1032.3 ± 543.6 pg/ml と坐位条件で高値傾向を示した。またアンギオテンシン II は安静時坐位 14.8 ± 6.4 pg/ml, 臥位 8.0 ± 4.9 pg/ml, 負荷終了時坐位 16.8 ± 4.6 pg/ml, 臥位 11.4 ± 6.1 pg/ml と有意な差はないものの坐位で高値を示した。

D. 心係数動態

心拍出量から計算した心係数は安静時には坐位条件で 2.5 ± 0.7 l/m²/min, 臥位条件で 3.3 ± 0.6 l/m²/min と臥位で有意に高値を示したものの, 100 watts 運動負荷時には, 坐位条件で 7.6 ± 1.5 l/m²/min, 臥位条件で 7.91 ± 1.7 l/m²/min と

Fig. 3. Variations in oxygen pulse in response to graded sitting and supine exercise. Values are means $\pm$ SD.

Table 1. Comparison of oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate (HR) at anaerobic threshold (AT), exercise time 0 to AT among sitting exercise and supine exercise. And $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta \text{Work Rate}$ during each incremental exercise

	$\dot{V}O_2$ -AT (ml/kg/min)	HR-AT (bpm)	Exercise Time (sec)	$\Delta \dot{V}O_2 / \Delta \text{Work Rate}$
Sitting exercise	21.7 ± 1.9	123.1 ± 7.8	203.0 ± 33.8	11.1 ± 1.1
	$p < 0.01$	$P < 0.06$	$P < 0.05$	NS
Supine exercise	18.3 ± 2.6	114.7 ± 9.4	163.7 ± 31.5	10.3 ± 1.2

$\dot{V}O_2$ -AT : $\dot{V}O_2$ at anaerobic threshold.

HR-AT : heart rate at anaerobic threshold.

Fig. 4-1. Plasma noradrenaline in the resting control state and after exercise. Values are means $\pm$ SD.

Fig. 4-2. Angiotensin II in the resting control state and after exercise. Values are means $\pm$ SD.

ほぼ同等の値を示した(図5)。

IV. 考 察

臥位運動と坐位運動の呼吸循環動態に関して、

Fig. 5. Cardiac index in the resting control state and during 100 watts exercise. Values are means $\pm$ SD.

Åstrand ら¹⁾は7人の健常人を対象に運動負荷試験を実施し、臥位運動時の最大酸素摂取量は坐位運動に比べて14%有意に低値を示すと述べ、この違いについて、臥位ではなめらかなクランク運動ができないと運動の機械効率の観点から考察している。また、Lorgeril¹¹⁾らは同様の実験から、臥位運動は坐位運動に比べて最大心拍数が低値であることや、運動時間および最大運動負荷量が低値であることの原因として、運動に動員される筋量が少ないことや運動の習熟度が関係しているとしている。しかし今回の我々の実験では従来のものと異なり、背もたれがある椅子坐位式自転車エルゴメータを用いているため、坐位保持のための抗重力筋の活動は最小限に抑えられていると考えられ、臥位運動と坐位運動の酸素摂取量の差は、重力の違いなどによる心拍出量動態に基づくことが推察される。

安静臥位時の1回拍出量は、静脈環流が多いことなどから安静坐位時に比べて高値を示すことが推察される。Stenberg ら¹⁸⁾はアスリートを対象として色素希釈法で心拍出量を測定し、安静臥位時の1回拍出量は最大1回拍出量の75~81%、安静坐位時は46~50%であるとした。また運動中は臥位で $\dot{V}O_2 \max$ の50%、坐位で $\dot{V}O_2 \max$ の70~80%の負荷強度で1回拍出量はその最大値を示し、それぞれの肢位における1回拍出量の最大値はほぼ同等の値であったとしている。また、

Bevegård ら³⁾は 800 kpm/min の運動で, 1 回拍出量の増加は臥位で 9%, 坐位で 48% であり, その後は運動強度が増加しても 1 回拍出量に変化はないと報告し, 1 回拍出量の変化は運動開始後比較的早期に起こることを報告している。

同様に Poliner ら¹⁴⁾は, 300 kpm/min (50 w) の低負荷で, 坐位運動と臥位運動の 1 回拍出量の違いはすでになかったと報告し, Boucher ら⁵⁾も AT レベルもしくはそれ以前に 1 回拍出量は最高値を示すとしている。これらの報告は, 最大運動負荷レベルより軽い負荷レベルで 1 回拍出量が最大値に到達することで一致しており, 本研究においても, 運動中の心拍数は肢位によってさほど差がみられなかったことから, 最大 1 回拍出量到達後は心拍出量に著明な差はないと考えられる。

心拍出量に関して, Stenberg ら¹⁸⁾は低い運動負荷時には, 坐位運動より臥位運動で高い心拍出量を示し, 運動強度が高くなると坐位運動でやや高値を示すと報告している。今回我々は安静時と 100 W 負荷時に心拍出量を測定し, その結果から心係数を算出したところ, 心係数は安静時には臥位で高く, 100 W 運動負荷時にはほぼ同等の値を得た。したがって, これを Fick の公式, 酸素摂取量 = 心拍出量 × 動静脈酸素較差¹³⁾に当てはめると, 本検討における運動時酸素摂取量は動静脈酸素較差に規定されると考えられる²⁾⁴⁾。

運動中の最大動静脈酸素較差は, 拍出された血液量の大部分を活動筋に流入させることのできる個人の能力にかなり影響されると考えられている¹³⁾。運動に際して活動筋の血流増大は, 心拍出量の増大と, 活動筋における選択的血管拡張, 非活動筋の選択的血管収縮による血流再配分によって規定される。前者の心拍出量に関しては安静時には臥位で高値を示すものの, 100 Watts 単一負荷時までにはほぼ同等になることから, 今回得られた結果は, 末梢の血流量や血流再配分較差の増大が関与するものと考えられる。運動中の活動筋血流量に関して, Folkow ら⁸⁾は毎秒 1 回の律動運動中の腓腹筋血流量を臥位と 60° 直立位と比較し, 60° 直立位の方が腓腹筋血流量は増加すると報告している。Folkow らの結果から, 坐位

運動の方が臥位運動時に比べて活動筋への血流量が多いことが推察できる。また, 運動筋の血管トーンスを制御する因子として松井ら¹²⁾は自律神経系, 末梢組織における代謝性機序(組織 pH, PCO₂, PO₂, 浸透圧, K⁺, アデノシンなど), 血管内皮由来の拡張物質や収縮物質などを挙げているが, 本研究では非活動筋の選択的血管収縮による血流再配分に着目し, 血管収縮作用を持つノルアドレナリンとアンギオテンシンⅡの 2 つのホルモン動態に関して検討した。アンギオテンシンⅡは腹腔内などの非活動筋への血管の収縮を引き起こし, この作用はアンギオテンシンⅡの血管に対する直接的作用と, 交感神経系の活動をより高める間接的作用の両者が推察されている¹⁵⁾。また坐位におけるアンギオテンシンⅡの分泌はアルドステロン分泌を刺激し, Na 貯留の方向に作動し, 坐位姿勢へ適応させる作用を有するとされる¹⁶⁾。一方, 運動中のカテコラミン, アンギオテンシンⅡは強度依存的に分泌量が增大するといわれ, 特にノルアドレナリンは最大運動に近づくに従い, または AT を境に指数関数的に増加するといわれている^{6,9,10,17,19)}。本研究では, 安静時にはアンギオテンシンⅡは, 坐位で有意に大きい値を示し, 運動時には有意な差はないものの, ノルアドレナリン, アンギオテンシンⅡともに, 全般的に坐位で高値を示していた。このことは坐位運動時には, 臥位運動時に比べて非活動筋の末梢血管緊張が高まり, より多くの血流が活動筋へ配分されることを示唆している。

特に今回の実験で特徴的なことは, 臥位運動では坐位運動に比べ, AT に到達するまでの運動時間が短く, AT 時の $\dot{V}O_2$ は低値を示すことである。AT と活動筋量の間には密接な関係があるという事から^{22,25)}, 臥位運動で AT が低いことは実際に動員される活動筋量が少ないことが予想される。

しかし, その一方で Bevegård ら³⁾は臥位運動は坐位運動に比べて血中乳酸濃度が高いことを指摘し, また, Eiken⁷⁾は, Lower Body Negative Pressure(LBNP)により下肢血流量を増加させた状態で臥位運動を行う時に比べ, LBNP を負荷し

ない状態での臥位運動では、血中乳酸濃度の上昇が早いことから、血流量の大小により、嫌氣的代謝への移行速度が異なる事を報告している。今回の実験では血中乳酸濃度の測定は行っていないため、乳酸産生とこれらのホルモン動態との関連は言及できないが、臥位運動と坐位運動では活動筋の血流量に差があり、臥位運動においては運動負荷に対する活動筋に応じた血流量が十分に供給されず、運動筋のAnaerobicな代謝を喚起しやすい事が示唆される。

V. 結 語

健常男性9人を対象に、臥位と坐位にて運動負荷試験を行い、呼吸循環動態の違いを検討した。

A. 血圧、心拍数、酸素摂取量は坐位運動で高値を示した。

B. 臥位運動で AT 時の酸素摂取量、心拍数が低く、早期にATに到達した。

C. 坐位運動では重力の影響に加えて、血管収縮作用のあるホルモンの分泌が多く、活動筋により多くの血液を供給していることが推察された。

D. 臥位運動は活動筋血流量が少ないことから、早期にアシドーシスになり、AT が低いことが示唆された。

文 献

- Åstrand PO, B Saltin (1961): Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *J. Appl Physiol.*, **16**, 977-981.
- Åstrand PO, K Rodahl; 朝比奈一男監訳, 浅野勝己訳 (1979): オストランド運動生理学. VI 循環, 大修館書店. 東京, 83-136.
- Bevegård S, A Holmgren, B Jonsson (1963): Circulatory studies in well trained athletes at rest and during heavy exercise, with special reference to stroke volume and the influence of body position. *Acta Physiol Scand.*, **57**, 26-50.
- Bevegård BS, JT Shepherd (1967): Regulation of the circulation during exercise in man. *Physiol Rev.*, **47**, 178-213.
- Boucher CA, MD Anderson, MS Schneider, JH Hurphy, RD Okada, DJ Kanarek (1985): Left ventricular function before and after reaching the anaerobic threshold. *Chest*, **87**(2), 145-140.
- Deuster PA, CA Luger, JE DeBolt, LL Bernier, UH Trostmann, SB Kyle, LC Montgomery, DL Loriaux (1989): Hormonal and metabolic responses of untrained, moderately trained, and high trained men to three exercise intensities. *Metabolism*, **38**(2), 141-148.
- Eiken O (1988): Effects of increased muscle perfusion pressure on responses to dynamic leg exercise in man. *Eur J Appl Physiol.*, **57**, 772-776.
- Folkow B, U Haglund, M Jodal, O Lundgren (1971): Blood flow in the calf muscle of man during heavy rhythmic exercise. *Acta Physiol Scand.*, **81**, 157-163.
- 藤井宣晴, 鍋倉賢治, 権 五晟, 山崎文夫, 本間幸子, 池上晴夫 (1992): 運動強度の増大に対する心拍数および血漿カテコールアミンの応答, *体力科学*, **41**, 313-321.
- 井川幸雄, 鈴木政登, 塩田正俊 (1984): カテコールアミン、レニン、アンギオテンシンおよび cAMP 反応に及ぼす運動強度の影響, *体育科学*, **12**, 201-212.
- Lorgeril M, J Laurier, V Stucki, B Meier, A Righetti, MG Bourassa (1990): Computerized determination of lactate threshold during three modes of exercise. *Heart-Vessels.*, **5**(2), 76-80.
- 松井 忍, 田村暢熙 (1993): 運動に伴う血中アデノシン動態—健常若年男性における検討—, *体力科学*, **42**, 265-270.
- McArdle WD, FI Katch & VL Katch; 田口貞善, 矢部京之助, 宮村実晴, 福永哲夫監訳 (1992): 運動生理学, 第17章 心血管系の機能, 杏林書院, 東京, 269-288.
- Poliner LR, GJ Dehmer, SE Lewis, RW Parkey, CG Blomqvist, JT Willerson (1980): Left ventricular performance in normal subjects: A comparison of the responses to exercise in the upright and supine positions. *Circulation*, **62**, 528-534.
- Rowell LB (1986): *Human Circulation-Regulation during physical stress-*. Oxford University Press. New York, 78-95.
- Rowell LB (1986): *Human Circulation-Regulation during physical stress-*. Oxford University Press. New York, 137-173.

- 17) Staessen J, R Fagard, P Hespel, P Lijnen, L Vanhees, A Amery (1987): Plasma renin system during exercise in normal men. *J Appl Physiol.*, **63** (1), 188-194.
- 18) Stenberg J, PO Åstrand, B Ekblom, J Royce, B Saltin (1967): Hemodynamic response to work with different muscle groups, sitting and supine. *J. Appl. Physiol.*, **22**, 61-70.
- 19) 田辺一彦, 長田尚彦, 野田聖一, 山本雅庸, 大宮一人, 伊東春樹, 亀谷 学, 村山正博, 須階二郎 (1994): 120% AT レベル単一負荷における循環動態とカテコラミン動態, *J. Cardiology*, **24** (1), 61-69.
- 20) 谷口興一編集 (1993): 心肺運動負荷テスト—呼気ガス分析による心肺疾患の新しい見方—, 南江堂, 東京.
- 21) 山田純生 (1994): 理学療法と体力低下予防、その低下機序と対処方法の考え方, *PT ジャーナル*, **28** (6), 378-382.
- 22) Wasserman K (1984): The anaerobic threshold measurement in exercise testing. *Clin Chest Med.*, **5**, 77-88.
- 23) Wasserman K, JE Hansen, DY Sue, BJ Whipp; 谷口興一, 吉田敬義共訳 (1989): 運動負荷テストとその評価法, 南江堂, 東京, 36-77.
- 24) Wasserman K, BJ Whipp (1975): Exercise physiology in health and disease. *Ann Rev Respir Dis.*, **112**, 219-249.
- 25) Withers RT, WM Sherman, JM Miller, DL Costill (1981): Specificity of the anaerobic threshold in endurance-trained cyclists and runners. *Eur J Appl Physiol.*, **47**, 93-104.