リカンベント式エルゴメータ駆動時のリクライニング角度の違いによる嫌気性代謝域値と血行動態の変化

Effects of Reclining Angle on Changes in Hemodynamics and Anaerobic Metabolic Threshold during Bicycle Ergometry

山崎 大輝¹⁾ 小早川 凌²⁾ 結城 舞²⁾ 西澤 岳³⁾
福田 智美⁴⁾ 正保 哲⁴⁾

HIROKI YAMAZAKI, BScPT¹⁾, RYO KOBAYAKAWA, BScPT²⁾, MAI YÜKI, BScPT²⁾, GAKU NISHIZAWA, BScPT³⁾,
TOMOMI FUKUDA, BScPT⁴⁾, AKIRA SHOBO, BScPT, MHSc, PhD⁴⁾

¹⁾ Department of Medical Rehabilitation Services, Gyoda General Hospital: 376 Mochida, Gyoda-shi, Saitama 361-0056, Japan
TEL +81 48-552-1111 E-mail: pt.hy1019@outlook.jp

²⁾ Department of Medical Rehabilitation Services, Koseikai Hospital

³⁾ Department of Medical Rehabilitation Services, Shin-Katsushika Hospital

⁴⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science Technology, Bunkyo Gakuin University

Rigakuryoho Kagaku 32(1): 63-67, 2017. Submitted Jul. 11, 2016. Accepted Sep. 14, 2016.

ABSTRACT: [Purpose] This study investigated the ideal reclining angle for bicycle ergometry in relation to individuals' anaerobic thresholds (AT) and hemodynamics. [Subjects and Methods] The participants were 14 sedentary healthy men with a mean age of 20.8 years, mean body mass of 64.5 kg, mean height of 171.1 cm and a mean body mass index of 22.0 kg/m². Reclining angles of 20°, 45° and 70° were used, and hemodynamic changes were measured until AT was reached. [Results] Compared to the resting period, mean blood pressure at a reclining angle of 70° was significantly increased, and sympathetic nerve activity at 20°. Oxygen intake increased significantly at 45° and 70° compared with that of 20°. [Conclusion] A reclining angle of 45° may be the most efficient. For hypotensive individuals elevating the legs is desirable, while the gravity-dependent position is best for normal and hypertensive individuals.

Key words: hemodynamics, reclining angle, dynamic exercise

要旨:〔目的〕運動時のリクライニング角度の違いによる嫌気性代謝閾値と血行動態の変化を測定し、エルゴメータ駆動時の適切な肢位を検討した。〔対象と方法〕対象は若年健常男性14名とした。異なるリクライニング角度の嫌気性代謝閾値および血行動態を測定した。〔結果〕平均血圧は安静時から運動時まで70°で高値を示した。交感神経活動は20°で安静時に対し嫌気性代謝閾値で有意に亢進した。酸素摂取量は嫌気性代謝閾値時に20°に対し45°、70°で有意に高値を示した。〔考察〕運動時のリクライニング角度を45°とし、高血圧症例および健常者には下肢下垂位、低血圧症例には下肢挙上位を選択することが望ましいと示唆される。

キーワード: 血行動態、リクライニング角度、動的運動

¹⁾ 行田総合病院 リハビリテーション科: 埼玉県行田市持田376 (〒361-0056) TEL 048-552-1111

²⁾ 康正会病院 リハビリテーション科

³⁾ 新葛飾病院 リハビリテーション科

⁴⁾ 文京学院大学 保健医療技術学部 理学療学科

I. はじめに

近年、運動療法として心肺持久力改善目的にトレッドミル歩行や自転車エルゴメータなどの有酸素運動が行われ、有酸素運動の運動強度として嫌気性代謝閾値 (Anaerobic Threshold: 以下, AT) レベルでの運動処方となされてきた¹⁾。実際の有酸素運動ではトレッドミルあるいは自転車エルゴメータなどの動的運動が行われる。実際にリカンベント式エルゴメータは低体力者や、透析患者に対して用いられ、有酸素運動は、最大酸素摂取量、心肺持久力の改善において、筋力トレーニングより明らかな効果があるといわれている²⁾。

一般的に運動時の循環応答として動的運動においては全身の活動筋へ酸素供給を行うために心拍数 (Heart Rate: 以下, HR)、一回拍出量 (Stroke Volume: 以下, SV)、心拍出量 (Cardiac Output: 以下, CO) の増加を認めるが、総末梢血管抵抗 (Total Peripheral Resistance: 以下, TPR) は低下する²⁾。

先行研究では高橋ら³⁾は、自転車エルゴメータを用いた臥位運動と坐位運動の比較で血圧、心拍数、酸素摂取量 (以下, $\dot{V}O_2$) は坐位運動で高値を示したと述べている。また、臥位運動で AT 時の酸素摂取量、心拍数が低く、早期に AT に達したと報告している。茂吉ら⁴⁾は Head-up tilt の角度を段階的に上昇させた場合の自律神経活動をパワースペクトル密度関数を用いて評価し、低周波数成分 (low frequency: 以下, LF)、高周波数成分 (high frequency: 以下, HF) とし、HF、LF/HF との相関に関して解析を行った。その結果 tilt 試験において、30° 以下と 45° 以上との間に自律神経活動に差があることを示唆している。そして、國本⁵⁾は Head-up tilt 60° ~ 80° の範囲であれば能動的起立と同程度の負荷としている。

運動中の座位におけるリクライニング角度設定に関する基準はなく、リクライニング角度の違いにより運動効果が異なる。そのため明確なリクライニング角度の基準を定めることは臨床的意義が大きいといえる。そこで本研究では、リクライニング角度の違いによる嫌気性代謝閾値と血行動態の変化を測定し、臨床現場でのエルゴメータ駆動時の適切なリクライニング角度について明らかにすることを目的とした。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は、運動習慣のある若年健常男性 14 名を対象とした。平均年齢は 20.8 歳 $\pm$ 1.7 歳、平均身長は 171.1 $\pm$ 6.3 cm、平均体重は 64.5 $\pm$ 7.8 kg、平均 BMI は 22.0 $\pm$ 1.6 kg/m² であった。また、対象者は、呼吸器、循環器疾患および両下肢の整形疾患の既往歴のないものとし

た。なお、本研究は、文京学院大学の倫理委員会の承認を得た (承認番号 2015-0033)。すべての対象者には、事前に本研究の目的と方法を文書および口頭で十分に説明し、参加の同意を書面にて得た。

2. 方法

方法は運動負荷試験を実施し Strength-elgo240 (三菱電機エンジニアリング社製) を使用した。測定肢位はリクライニング角度を 20°, 45°, 70° とした。ペダルの位置は、ペダリングのしやすい位置を求めた予備実験から、ペダルの回転中心が股関節中心の 12 cm 上方の高さとなるように設定し、膝関節軽度屈曲位 (屈曲 10° ~ 20°) になるように座面を調整した。また、右上肢は軽度外転位とし、肘関節が軽度屈曲位をとれるように台を設置した。

呼気ガス測定は、呼気ガス分析装置 Cpex-1 (インターリハ社製) を用いて測定し、心拍数は Balaton (グッドケア社製) を用いて Cpex-1 に入力した。血行動態は心機能測定装置タスクフォースモニタ TFM-3040 (CNSystems 社製) を用いて測定した。AT の決定は、1) ガス交換比 ($R = \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$) が上昇し始める点、2) 分時換気量 (VE) / 炭酸ガス排出量 ($\dot{V}CO_2$) の増加なしに、VE / $\dot{V}O_2$ が増加する点、3) 呼気終末二酸化炭素濃度 (PETCO₂) が変化せずに呼気終末酸素濃度 (PEO₂) が増加し始める点、4) $\dot{V}CO_2$ - $\dot{V}O_2$ の傾きが急に増加する点 (V-slope 法) の中から最も数が一致する点とした。また、自覚運動強度 (Rate of Perceived Exertion: 以下, RPE) を Bolg scale を用いて聴取し、呼吸困難感または下肢疲労の RPE が 17 に達した時点を中止基準とした⁶⁾。同一被験者に対し、リクライニング角度を 20°・45°・70° の 3 回の実験をランダムで行い、実験に間隔を少なくとも 72 時間以上空けて行った。

プロトコールは安静 4 分、20 Watts を 60 rpm で 4 分の warming-up、毎分 20 Watts 漸増する ramp 負荷を AT まで測定した。測定項目は、安静時から AT までの血行動態を HR、平均血圧 (Mean Blood Pressure: 以下, mBP)、SV、CO、TPR、呼気ガス分析は $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ とした。タスクフォースモニタ TFM-3040 は SV をインピーダンス法により算出し、SV $\times$ HR から CO、mBP/CO から TPR を算出している。また、安静時から運動終了後 5 分までの心電図をタスクフォースモニタ TFM-3040 により記録し、心拍変動からスペクトル解析により自律神経活動を算出した。タスクフォースモニタ TFM-3040 は心拍変動解析を自己回帰法 (auto regressive: 以下, AR 法) で行っている。その心拍変動の周波数成分の分類は、0 ~ 0.04 Hz を超低周波数成分 (very low frequency: 以下, VLF)、0.04 ~ 0.15 Hz を LF、0.15 ~ 0.4 Hz を HF とし、LF/HF を交感神経活動の指標とした。

統計解析においては、一元配置分散分析後に、安静時、warming-up 時、AT 時の各パラメーターの比較と各角度間での比較を多重比較検定 Bonferroni の検定を行い、有意水準は 5% とした。解析のためのソフトウェアには、SPSS ver.21.0 J for Windows (IBM 社製) を使用した。

III. 結 果

表 1 に運動中の血行動態、交感神経、酸素摂取量の比較を示す。リクライニング角度において、血行動態 (HR, mBP, SV, CO, TPR), 呼気ガス ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$), LF/ HF を調べた。それぞれの測定項目について、安静時、warming-up 時、AT 時の平均値を求め比較した。その結果、HR と CO は角度の関わらず安静時に

対し AT で有意に上昇した。mBP は安静時に対して AT で有意に上昇した。SV は安静時に対して AT でも有意な差がみられなかった。TPR は安静時に対し AT で有意な低下がみられた。LF/ HF では 20° で安静時に対し AT で有意に上昇した。 $\dot{V}O_2$ は安静時に対し各角度で warming-up 時、AT で有意に上昇した。

各測定項目について角度間比較を行った。3 つの角度全てで有意差が認められたのは、HR (AT 時), mBP (AT 時), SV (安静時と warming-up 時), TPR (安静時と warming-up 時) であった。20° と 45° で有意差が認められたのは CO (安静時と warming-up 時) であった。20° と 70° で有意差が認められたのは、mBP (安静時と warming-up 時) であった。角度間の $\dot{V}O_2$ の変化は AT 時に 20° に対し、45°, 70° で有意に高値を示した。

表 1 運動中の血行動態、交感神経、呼気ガスの比較

	安静時	warming-up 時	嫌気性代謝閾値時
HR (bpm)			
20°	67.4 ± 7.5	85.1 ± 7.4 †	116.2 ± 9.9 †
45°	70.2 ± 6.6	89.6 ± 6.3 †	123.7 ± 11.6 †
70°	72.0 ± 9.1	92.5 ± 9.6 †	132.5 ± 13.3*,**, †
mBP (mmHg)			
20°	86.9 ± 9.1	87.8 ± 9.7	100.9 ± 8.8 †
45°	90.7 ± 8.9	91.5 ± 8.8	102.8 ± 9.2 †
70°	94.1 ± 8.6*	95.6 ± 9.0*	114.9 ± 9.3*,**, †
SV (ml)			
20°	99.9 ± 19.8	104.9 ± 25.6	88.6 ± 19.3
45°	84.3 ± 14.7*	87.0 ± 15.2*	82.1 ± 17.9
70°	83.6 ± 13.2*	87.5 ± 12.7*	78.4 ± 12.9
CO (l/min)			
20°	6.6 ± 1.2	8.8 ± 1.6 †	10.2 ± 2.0 †
45°	5.8 ± 0.7*	7.6 ± 1.0*, †	10.0 ± 1.9 †
70°	5.9 ± 0.6	8.0 ± 1.1 †	10.3 ± 1.4 †
TPR (dyne*sec/cm)			
20°	1041.3 ± 170.0	806.5 ± 162.0 †	809.1 ± 175.1 †
45°	1239.0 ± 186.6*	949.2 ± 127.6*, †	818.5 ± 130.2 †
70°	1250.3 ± 147.4*	956.4 ± 138.5*, †	883.9 ± 89.3 †
LF/ HF			
20°	0.9 ± 0.4	1.4 ± 0.7	2.3 ± 1.4 †
45°	1.1 ± 0.8	1.3 ± 0.6	2.2 ± 1.5
70°	1.2 ± 0.7	1.2 ± 0.4	1.5 ± 0.9
$\dot{V}O_2$ (ml/min)			
20°	363.9 ± 62.3	748.2 ± 75.2 †	1486.6 ± 179.2 †
45°	356.4 ± 67.7	760.6 ± 87.7 †	1528.0 ± 146.7*, †
70°	385.4 ± 39.5	799.7 ± 76.8 †	1799.0 ± 265.4*, †
$\dot{V}CO_2$ (ml/min)			
20°	342.6 ± 69.0	659.2 ± 69.4 †	1148.0 ± 240.9 †
45°	320.4 ± 55.7	667.6 ± 64.9 †	1478.0 ± 205.3 †
70°	356.9 ± 47.4	717.4 ± 76.3*, †	1729.8 ± 209.3*, **, †

n = 14. 平均値 ± 標準偏差。HR : Heart Rate, mBP : mean Blood Pressure, SV : Stroke Volume, CO : Cardiac Output, TPR : Total Peripheral Resistance, LF : low frequency, HF : high frequency.
* : $p < 0.05$ (vs 20°), ** : $p < 0.05$ (vs 45°), † : $p < 0.05$ (vs 安静時)。

IV. 考 察

本研究は、エルゴメータ駆動時のリクライニング角度の違いによる血行動態の変化を測定し、臨床現場でのエルゴメータ駆動時の適切なリクライニング角度について検討した。先行研究では自律神経活動において30°以下を臥位、60°以上を立位としている^{4,5)}ため、リクライニング角度を20°・45°・70°に設定した。下肢の位置は股関節中心から12 cm 挙上位で行った。

安静時のSVとCOは20°で高値を示し、mBPとTPRは70°で高値を示した。立位では、重力の影響によって、血液が下肢に貯留し静脈還流量の減少に伴いSVが減少する⁷⁾。また、同時に血圧の低下が生じる⁷⁾。このとき圧受容器反射によって交感神経活動が亢進し、HRの上昇、心臓・血管収縮の増加が起こりBPは保たれる⁷⁾。そのためTPRが70°で上昇したと考えられる。一方、背臥位では静脈還流量が増加するため、座位より背臥位ではSV、mBPが高値を示す。このことから安静時に20°では70°に比べてSVが上昇したと考えられる。またHRに変化がないため、COも同様に上昇したと考えられる。

mBPについては測定肢位を考慮する必要がある。それは、リクライニング角度によるmBPの低下と下肢挙上によるmBPの上昇の2つの生体反応が考えられる。齊藤らは運動中、重力による静水圧の分だけ下肢運動筋の灌流圧は平均で立位のほうが臥位や微小重力下よりも高くなる⁸⁾と報告している。横井⁹⁾はmBPがリクライニング角度60°で0°に比べ低下したと報告している。一方、MonnetやHuangら^{10,11)}は、下肢挙上により前負荷が増大し、大動脈流速速度および収縮期血圧、SVの上昇が起こると述べている。これらのことから文献的推測の域は出ないが、本研究の70°でのmBPの上昇は、下肢挙上による影響が大きいと考えられる。Warming-up時のような低負荷の運動中においても、安静時と同様の結果が得られている。このことから、今回行った20 Wattsの低負荷の動的運動を低体力者に対して行う際も、姿勢の影響を考慮する必要があると考えられる。

運動時、70°の肢位は $\dot{V}O_2$ が最も大きな肢位であり、AT時にすべての角度でHRとCOが増加したにも関わらずSVに変化は生じなかった。徳田ら¹²⁾は、下肢30 cm 挙上位では血管に静水圧がはたらき、下肢挙上位では1 cmにつき0.7 mmHgの静水圧の影響を受け、下肢の動静脈の陰圧化が生じ、重力により収縮期最高血流速度が高値を示したと報告した。これらのことから、本実験で行った下肢挙上位の動的運動では、骨格筋への血液の輸送が困難となり、SVが変化しないため、HRを増加させることで、COを確保したと考える。SVが変化しなかった理由として、下肢挙上によるSV上昇と背臥位での動的運動時のSV減少¹³⁾の2つの要因が影響

したと考える。

AT時のTPRは角度間で変化がなかった。しかし、70°に対して20°では交感神経活動が亢進していた。これは、20°での動的運動では、静水圧の影響により下肢への血流低下が引き起こされ、血流を確保するため、交感神経活動を高めたと考える。つまり、血圧を維持するため交感神経活性を高め、TPRの低下を抑制し血圧を維持したと考えられる。

最後に $\dot{V}O_2$ は70°で最も高値を示した。高橋ら³⁾は臥位運動に比べて座位運動で $\dot{V}O_2$ が高いと述べている。リクライニング角度の異なるAT時の $\dot{V}O_2$ では45°と70°は差がみられず、それぞれ20°に比べ $\dot{V}O_2$ が大きな肢位であった。このことからリクライニング角度45°以上起こすことにより、リクライニング角度70°と類似した運動効果を得られると考えられる。

以上のことから下肢挙上位でのリクライニング角度45°以上は20°に比べ $\dot{V}O_2$ が大きく、交感神経活性が生じにくい運動肢位であると考えられる。

臨床では、透析をベッド上で行われることが多く、座位でのペダリング運動が困難なことが多い。また、透析中の運動では透析終盤で血圧低下が懸念されている¹⁴⁾。リクライニング角度45°以上の運動は交感神経活動が小さい角度であり、20°より $\dot{V}O_2$ が大きい肢位であった。また、下肢挙上位の運動はリクライニング角度の変化よりも圧上昇への関与が大きいと考えられ、今後は下肢の位置による検討も必要である。

引用文献

- 1) 中島敏明：心疾患患者に最適な運動様式：運動強度・運動時間・運動様式。心臓，2012，44(3)：279-285。
- 2) 河江敏広，高橋 真，関川清一・他：静的運動終了後における筋代謝受容器反射が圧受容器反射感受性に及ぼす影響。理学療法科学，2010，25(1)：121-125。
- 3) 高橋哲也，田辺一彦，中山 大・他：臥位運動と座位運動における呼吸循環反応の違いについて。体力科学，1995，44(1)：105-112。
- 4) 茂吉雅典，横山清子，渡辺興作・他：新しい心拍変動パラメータによるtilt試験に対する自律神経反応の分析。医用電子と生体工学，1996，34(2)：161-170。
- 5) 國本雅也：自律神経機能検査，第4版。日本自律神経学会(編)，文光堂，東京，2007，pp129-133。
- 6) 安達 仁：眼でみる実践心臓リハビリテーション，中外医学者，東京，2013，p72。
- 7) Levick JR：心臓・循環の生理学。岡田隆夫(訳)，メディカル・サイエンス・インターナショナル，東京，2011，pp79-332。
- 8) 齊藤 満，加賀谷淳子：循環 運動時の酸素運搬システム調節。ナッパ，東京，1999，pp104-127。
- 9) 横井郁子：段階的座位時の血圧と心拍変動に関する研究。東京保健科学学会誌，2003，5(4)：225-229。
- 10) Monnet X, Rienzo M, Osman D, et al.: Passive leg raising Predicts fluid responsiveness in the critically ill. Crit Care

-
- Med, 2006, 34(5): 1402-1407.
- 11) Huang L, Zhang WX, Cai WX, et al.: [Passive lag raising predicts volume responsiveness in patients with severe sepsis and septic shock]. *Zhongguo Wei Zhong Bing Ji Jiu Yi Xue*, 2011, 23(3): 154-157.
- 12) 徳田 裕, 東田紀彦: 下肢挙上が静脈還流速度に与える影響. *理学療法学*, 2008, 35(suppl1-2.2): 759.
- 13) Elstad M, Ndland IH, Toska K, et al.: Stroke volume decreases during mild dynamic and static exercise in supine humans. *Acta Physiol (Oxf)*, 2009, 195(2): 289-300.
- 14) Farese S, Budmiger R, Aregger F, et al.: Effect of transcutaneous electrical muscle stimulation and passive cycling movements on blood pressure and removal of urea and phosphate during hemodialysis. *Am J Kidney Dis*, 2008, 52(4): 745-752.