Karvonen法による運動負荷強度における生体反応

Physiological Responses to Exercise Loads set by the Karvonen Method

正保 哲^{1,2)} 洲崎 俊男³⁾ 出口 清喜⁴⁾
廣瀬 昇⁵⁾ 奥 壽郎⁵⁾ 立野 勝彦³⁾

AKIRA SYOUBO^{1,2)}, TOSHIO SUSAKI³⁾, SEIKI DEGUCHI⁴⁾, NOBORU HIROSE⁵⁾, TOSHIHIRO OKU⁵⁾, KATSUHIKO TACHINO³⁾

¹⁾ Graduate Course of Rehabilitation Science, Division of Health Sciences, Graduate School of Medical Science, Kanazawa University: 11-80, Kodatsuno 5, Kanazawa 920-0942, Japan. TEL +81 76-265-2614 E-mail syoubo.akira@camel.plala.or.jp

²⁾ Kanazawa Medical University Himi Municipal Hospital

³⁾ Department of Impairment Study, Graduate Course of Rehabilitation Science, Division of Health Sciences, Graduate School of Medical Science, Kanazawa University

⁴⁾ Department of Rehabilitation, Kanazawa University Hospital

⁵⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Science Technology, Teikyo University of Science

Rigakuryoho Kagaku 26(1): 33-39, 2010. Submitted Jul. 26, 2010. Accepted Sep. 6, 2010.

ABSTRACT: [Purpose] In order to provide safe exercise therapy in the supine position, we investigated the setting of exercise loads in the supine position from the perspective of autonomic nervous system activity with the target heart rate as the index of exercise. [Subjects] The subjects were 11 healthy males with no regular exercise habit. [Method] Using the Karvonen method for exercise intensity, we used exercise loads of 80% and 40% of the target heart rate. Exercise was performed on a bicycle ergometer in the supine position. We measured autonomic nervous activity and recorded electrocardiograms from at rest to 5 min after the cessation of exercise. [Results] At 80% exercise load, HFnu was significantly suppressed compared with at rest, and it rose significantly after cessation of exercise. LF/HF rose significantly at 80% load compared with at rest, and significantly declined after cessation of exercise at loads of 80% and 40%. [Conclusion] Since we anticipate that sympathetic nervous activity would be suppressed and parasympathetic nervous activity would tend to rise after cessation of pedaling exercise in the supine position at an exercise load of 40%, we suggest that it is possible to provide safe exercise therapy for physically weak subjects at low exercise intensities in the supine position.

Key words: heart rate, exercise intensity, autonomic nervous activity

要旨: [目的] 安全な背臥位での運動療法を提供するため、目標心拍数を指標とした背臥位での運動と自律神経活動からみた背臥位での安全な運動負荷の設定について検討を行った。[対象] 運動習慣の無い健康男性11名とした。[方法] 運動強度はカルバーネンの式を用いて、目標心拍数に達した負荷の80%と40%とした。運動は背臥位で自転車エルゴメーターを用いて行い、安静時から運動終了5分までの心電図を記録し、自律神経活動を測定した。[結果] HFnuの変化は、運動負荷80%では安静時に対して有意に抑制され、運動終了後有意に亢進した。LF/HFの変化は運動負荷80%では安静時に対して有意に亢進し、運動終了後運動時に対して有意に低下した。運動負荷40%では運動終了後に有意に低下した。[結語] 運動負荷40%程度の運動負荷における臥位でのペダリング運動は、運動終了後に副交感神経活動の上昇傾向、交感神経活動の抑制が期待されるため、背臥位での低強度の運動が低体力者に対する安全な運動療法の提供を可能にすることが示唆される。

キーワード: 心拍数, 運動強度, 自律神経活動

¹⁾ 金沢大学大学院 医学系研究科保健学専攻リハビリテーション科学領域: 石川県金沢市小立野5-11-80 (〒920-0942) TEL 076-265-2614

²⁾ 金沢医科大学水見市民病院 リハビリテーション科

³⁾ 前 金沢大学大学院 医学系研究科保健学専攻リハビリテーション科学領域

⁴⁾ 金沢大学医学部付属病院 リハビリテーション部

⁵⁾ 帝京科学大学 医療科学部理学療法学科

I. はじめに

心拍数は交感神経と副交感神経の二重支配によって調節されている。心血管疾患患者では持続的な交感神経緊張の亢進が生じ、心不全の進展や重症不整脈の発症に寄与することが推定されている。交感神経緊張亢進の機序として骨格筋をはじめとする末梢組織から交感神経中枢への求心性刺激の増加や、圧受容体反射の感受性低下などが推測されており、慢性心不全では交感神経緊張が高いほど、また圧受容体反射感受性が低いほど生命予後が悪いことが知られている¹⁾。

運動療法はこの求心性刺激を減じ、圧受容体反射の感受性を改善することが報告されており、安静時血漿ノルエピネフリンの減少や筋交感神経活動の低下で示される交感神経緊張の低下と副交感神経緊張の増加をもたらす¹⁾。運動療法は自律神経系に対しても種々の影響を及ぼし、運動後の心拍変動から副交感神経優位になると考えられている¹⁾。また、近年では運動後の心拍数減衰が有力な副交感神経機能の1指標になりうるとの報告²⁾や安静時の副交感神経の活動が高いと運動終了後の副交感神経の再興奮活動が高いとの報告²⁾がある。さらに心拍数減衰については、心不全患者の予後規定因子の1つとも考えられ臨床的に重要視されている。運動後の心拍数減衰曲線の30秒までの時定数T30は交感神経活動に依存せず、副交感神経の選択的支配を受ける。また、T30は嫌気性代謝閾値（以下、AT）レベル以下であれば運動強度や運動時の血圧には影響されない。このことは、副交感神経の再興奮は運動反射や圧受容体反射は無関係であり、運動の中止に連動した何らかの中枢機序が関与していることが示唆され³⁾、運動終了直後の心拍数の急激な減衰応答は大脳皮質での命令の遮断と動脈圧受容器徐脈反射の影響により引き起こされると報告されている³⁾。したがってT30は、動脈圧受容器徐脈反射の感受性と迷走神経活動への迅速な切り換え調節機能の評価ができると考えられる。

運動中の自律神経の活動や運動負荷強度による反応に関する研究はimaiら⁴⁾、佐藤ら²⁾による報告や運動終了後30秒の心拍減衰の時定数（T30）と安静時副交感神経活動や自覚症状との関係を述べた北野ら⁵⁾による報告が見られるが、少ないのが現状である。さらに近年、運動療法の実施形態も多様化してきており、安全で安楽な肢位での運動形態として半臥位での自転車エルゴメーターを用いたプログラムの検討が報告⁶⁾されている。しかし、背臥位での運動療法を推進した例は少なく、背臥位での自転車エルゴメーターを用いた運動を呼吸循環器系の指標から検討した報告⁷⁾も少ない。背臥位での運動は、静脈還流の増大をもたらす一回換気量の増加が起るとされており、運動時の活動組織へ

の血液の供給が効率的に行われると推察される。そこで本研究は、安全な背臥位での運動療法を提供するため、運動中の運動負荷の違いによる自律神経活動の変化と運動後の心拍数減衰曲線の30秒までの時定数T30を求めた。さらに、目標心拍数を指標とした背臥位での運動と自律神経活動からみた背臥位での安全な運動負荷の設定について検討を行った。

II. 対象と方法

1. 対象

運動習慣の無い健康男性11例を対象とした。平均年齢は 26.0 ± 6.5 歳、平均体重は 67.3 ± 8.7 kg、平均身長は 172.8 ± 6.0 cm、平均BMIは 22.4 ± 1.7 であった（表1）。また、対象者は、呼吸器・循環器疾患の既往が無く、喫煙の経験の無いものまたは1年以上禁煙しているものとした。本研究は金沢医科大学氷見市民病院の倫理委員会の承認を得ており（承認番号1）、検査を始める前にすべての被験者に本研究の趣旨ならびに実施方法を説明し、研究への協力に関して文章による同意を得た。また、未成年者の場合は保護者の同意も同時に得た。

2. 方法

最大心拍数と最大酸素摂取量の間には相関関係あるため運動負荷の設定については、心拍数による運動強度の設定によく使用されるカルボーネンの式（目標心拍数 = { (220 - 年齢) - 安静時心拍数 } × 運動強度 + 安静時心拍数⁸⁻¹⁰⁾を用いて目標心拍数を決定した。運動強度（k）を0.5に設定し、毎分10 Wずつ増すランプ負荷試験を実施し、目標心拍数に達した時点の負荷の80%と40%の2種類の負荷量（80% : 83.6 ± 10.4 W, 40% : 41.8 ± 5.2 W）を決定した（表1）。予備実験において目標心拍数に対する100%負荷量では実験プロトコルを遂行できる対象者がいなかったため、実験プロトコルを遂行可能な80%に負荷量を決定した。実験プロトコルは安静時自律神経評価のために5分間の安静

表1 対象及び心拍数と運動負荷

年齢（歳）	26.0 ± 6.5
体重（kg）	67.3 ± 8.7
身長（cm）	172.8 ± 6.0
BMI	22.4 ± 1.7
安静時心拍数（bpm）	60.4 ± 6.4
目標心拍数（bpm）	126.7 ± 5.5
目標負荷（W）	104.5 ± 13.0
運動負荷80%（W）	83.6 ± 10.4
運動負荷40%（W）	41.8 ± 5.2

臥位を取り、その後 20 W で 5 分間の warm up を行い、各々 20 分の定常負荷を実施し、運動後 5 分間の安静をとった。最初に被験者を滑り止めマットの上に骨盤がのるように背臥位をとらせ、膝の角度を屈曲 20° にあわせ、2, 3 回のペダリングで最適な位置にサドルを設置した。回転数は、メトロノームで 50 rpm に調節した。二つの運動の順番はランダムに行い、運動と運動の間隔を最低 2 日あけるようにした。被験者には、運動 2 時間前から飲食を避けるように指示した。なお、自転車エルゴメーターとしてコンビ社、AEROBIKE EX90 を用いた。

安静時から運動終了後 5 分までの心電図を心機能測定装置タクスフォースモニター TFM-3040 (CNSystems 社) を用いて測定した。心電図の電極からの結線は、ノイズが混ざらないように一束にまとめて被験者の腹部に固定した。測定は、空調の取れた部屋で、温度と湿度 ($23.9 \pm 1.4^{\circ}\text{C}$, $65.2 \pm 8.9\%$) を測定し行った。測定項目は、心電図の R-R 間隔から算出される心拍数とした。なお、2 種類の定常運動負荷を施行し、安静時から運動終了後 5 分までの心電図を記録し、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。

タクスフォースモニター TFM-3040 は心拍変動解析、自己回帰法 (auto regressive ; AR 法) を用いている。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 (VLF), 0.04 ~ 0.15 Hz を低周波数成分 : low frequency (LF), 0.15 ~ 0.4 Hz を高周波数成分 : high frequency (HF) とし、低周波成分を交感神経活動の指標とした。この HF を VLF と total frequency (TF) で補正したものを HF normalized unit (HFnu) = $\text{HF} / \{\text{TF} - \text{VLF}\} \times 100$ とし、副交感神経活動の指標とした。

T30 は連続 RR 間隔から算出された心拍数から、縦軸に心拍数の自然対数を横軸に時間を取り、両者の回帰直線の傾きから運動停止後 30 秒間の心拍数減衰曲線の時定数 (T30) を求めた。運動終了後の心拍数が指数関数的に減衰することを条件とすると次式が成り立つ。

$$\log e\text{HR} = b - \tau \times \text{Time}$$

このとき、HR は心電図の R-R 間隔から算出された心拍数、b は定数 (回帰直線の切片)、 τ は運動終了後から 30 秒までの時定数、Time は回復時間 (sec) を表す。T30 は τ の逆数とした。このことは、運動後に心拍数が早く減衰すれば T30 の値が小さくなることを意味する。心拍数、HFnu、LF/HF を運動負荷 80%、40% それぞれに対しプロトコール開始から終了までの 1 分間の平均をそれぞれ取り、各平均値について安静時の平均値との検定を分散分析法にて検定を行い、多重比較検定 Williams の検定を用い、有意水準を 5% 未満とした。

図1 各運動負荷での心拍数の変化

III. 結果

心拍数の変化を 1 分間の平均値にしてさらに 11 名で平均した運動負荷 80%、40% の各々の心拍数の変化を (図 1) に示す。運動負荷 80% では運動負荷中に心拍数は上昇傾向が見られ、運動負荷 40% では運動負荷中に心拍数は運動負荷 4 分以降プラトーに達している傾向が認められた。

副交感神経の活動指標となる HFnu について、運動負荷 80%、40% のときの変化を示した (表 2)。多重比較検定の結果より、運動負荷 80% ではウォーミングアップの 5 分間に対し、運動負荷 2 分目以降、HFnu は運動により有意に抑制されていた。運動終了後、運動負荷 20 分に対して recovery 2 分目以降は有意に亢進していた (表 2)。運動負荷 40% では、ウォーミングアップに対して運動負荷の間はやや減少傾向を示すも有意な抑制はなかった。さらに、運動終了後も、運動負荷 20 分に対して recovery では増加傾向を示すも有意な亢進は認められなかった (表 2)。

交感神経の活動指標となる LF / HF について、運動負荷 80%、40% のときの変化を示した (表 2)。多重比較検定の結果より、運動負荷 80% ではウォーミングアップ 5 分に対し運動負荷 5 分目以降、運動により有意に亢進していた。運動終了後は、運動負荷 20 分に対して recovery 2 分目以降に有意に低下していた。運動負荷 40% ではウォーミングアップに対して運動負荷中にやや増加傾向がみられるが、有意な亢進は認められなかった。運動終了後は、運動負荷 20 分に対して recovery では有意に低下していた。

運動終了 30 秒後の心拍数減衰曲線の時定数の平均値 ± 標準偏差は、運動負荷 80% では 163 ± 61.6 sec、運動

表2 各運動負荷中の副交感神経及び交感神経活動の変化

		安静 5分間の 平均	ウォーミング アップ 5分間の平均	運動負荷					
				1分	2分	3分	4分	5分	6分
運動負荷80 %	HFnu-RR1[%]	44.2±2.0	39.7±1.3	36.8±16.4 [※]	27.6±14.0 [※]	23.3±13.6 [※]	21.8±14.1 [※]	20.9±13.1 [※]	21.1±12.6 [※]
	LF/HF [1]	1.1±0.1	1.6±0.2	2.1±1.3	3.2±1.7	4.5±3.4	5.6±5.1	6.0±5.8 [※]	5.5±5.0 [※]
運動負荷40 %	HFnu-RR1[%]	45.3±1.9	36.6±2.5	32.3±16.4	29.2±14.8	29.2±12.9	30.8±14.7	32.1±15.9	32.7±18.5
	LF/HF [1]	1.5±0.2	2.6±0.6	3.4±2.9	3.8±2.4	3.7±2.9	4.0±3.8	4.2±4.4	7.5±14.7

		運動負荷							
		7分	8分	9分	10分	11分	12分	13分	14分
運動負荷80 %	HFnu-RR1[%]	19.7±12.7 [※]	20.7±12.8 [※]	18.9±10.1 [※]	19.9±14.0 [※]	20.9±13.9 [※]	20.8±14.0 [※]	21.5±13.2 [※]	18.5±11.9 [※]
	LF/HF [1]	5.7±4.1 [※]	5.1±2.9 [※]	6.6±7.7 [※]	5.2±2.8 [※]	5.3±3.5 [※]	4.7±3.2 [※]	3.8±2.0 [※]	6.5±5.2 [※]
運動負荷40 %	HFnu-RR1[%]	35.0±20.3	33.9±20.8	33.0±17.7	29.1±19.6	29.8±18.5	32.7±16.5	33.2±14.5	31.5±15.9
	LF/HF [1]	3.9±4.1	7.8±14.1	3.6±2.9	5.9±5.3	5.6±5.9	3.5±2.8	3.5±3.5	6.5±9.1

		運動負荷					
		15分	16分	17分	18分	19分	20分
運動負荷80 %	HFnu-RR1[%]	22.1±16.2 [※]	18.6±10.7 [※]	15.8±9.0 [※]	15.1±10.1 [※]	15.5±10.5 [※]	17.1±13.0 [※]
	LF/HF [1]	8.4±9.0 [※]	6.3±5.0 [※]	11.3±15.2 [※]	8.6±10.6 [※]	7.0±6.2 [※]	7.0±4.0 [※]
運動負荷40 %	HFnu-RR1[%]	29.8±13.6	29.6±14.8	28.8±16.2	26.0±13.6	30.5±17.0	33.5±16.7
	LF/HF [1]	8.7±14.5	4.9±4.8	5.7±5.8	5.3±4.9	7.3±9.3	4.4±4.8

		運動終了				
		1分	2分	3分	4分	5分
運動負荷80 %	HFnu-RR1[%]	36.6±18.5	47.2±16.5 [*]	48.9±14.7 [*]	39.7±10.1 [*]	37.1±9.8 [*]
	LF/HF [1]	5.3±8.9	1.1±0.7 [*]	1.0±0.6 [*]	1.1±0.5 [*]	1.3±0.5 [*]
運動負荷40 %	HFnu-RR1[%]	41.1±16.8	42.2±14.7	40.5±11.8	40.8±13.4	37.9±14.1
	LF/HF [1]	3.8±5.5	2.0±1.9 [*]	1.9±1.1 [*]	2.2±2.3 [*]	2.5±2.1 [*]

※p<0.05 : ウォーミングアップ5分と各定常負荷時の比較

*p<0.05 : 定常負荷20分と回復時5分との比較

表3 運動負荷80%中の自覚運動強度の変化

		運動負荷									
		1分	2分	3分	4分	5分	6分	7分	8分	9分	10分
下肢		8.0±1.3	8.5±2.0	9.3±2.3	9.6±2.3	9.9±2.3	10.2±2.4	10.5±2.3	10.7±2.3	10.8±2.4	11.3±2.4
胸		6.9±3.2	7.6±3.5	8.3±3.8	8.8±4.0	8.9±4.0	8.9±4.0	9.2±4.0	9.3±4.1	9.4±4.2	9.7±4.3

		運動負荷									
		11分	12分	13分	14分	15分	16分	17分	18分	19分	20分
下肢		11.4±2.2	11.5±2.2	11.6±2.2	11.8±2.1	11.8±2.4	12.4±2.3	12.4±2.1	12.3±2.3	12.4±2.1	12.3±3.3
胸		9.5±4.2	9.6±4.3	9.6±4.3	9.9±4.4	9.9±4.5	10.5±4.7	10.3±4.7	10.2±4.7	10.2±4.8	9.8±5.0

負荷40%では、175.9±98.8 secであった。

安静時副交感神経活動と運動停止直後の心拍数減衰の相関関係は、運動負荷80%、40%ともに安静時HFnuとT30の間には有意な相関は認められなかった（運動負荷80% : r=0.13, 運動負荷40% : r=-0.45）。

HRR-1（Heart rate recovery at 1 minute after exercise : 運

動後1分間の心拍数の回復）と運動停止直後の心拍数減衰の相関関係では、HRR-1とT30は運動負荷80%では有意な負の相関が認められた（r=-0.61, p<0.05）が、運動負荷40%では明らかな相関は認められなかった（r=-0.34）。

IV. 考 察

今回、運動習慣の無い健常男性に対しカルボネン法による2種類の定常運動負荷を行い、心拍変動解析から自律神経活動を、運動終了後の心拍数減衰からT30を算出し運動強度によるこれらの指標について検討した。そして、安静時の副交感神経活動とT30、HRR-1の関係について検討した。

今回、カルボネン法を用いて目標心拍数による負荷量の決定を行った。その運動強度(k)は0.5であった。しかし、実際には個人差による±10%の誤差が生じるという報告¹¹⁾もあり、運動強度を決定する際には、注意を要する。北見ら¹²⁾はアスリート、健常者及び成人病患者におけるAT時の心拍数とカルボネン法との比較で健常者のAT時のK値は 0.49 ± 0.13 であったと報告しており、持続的運動の運動強度の設定には $K=0.4 \sim 0.5$ 程度が適当だとしている。今回、使用した運動強度は先行研究を参考にした強度であったが、心拍数を指標とするカルボネン法では、個人間の本来のATの決定が困難なことから背臥位での運動であったことで運動継続を考慮し、目標心拍数に対応した100%負荷に対して負荷量を20%低く設定した。このため、今回の負荷量では理論上ATを超えないと予測された。しかし、図1から運動負荷80%では心拍数は時間の経過とともに上昇傾向が見られるため、ATもしくはややATを超えていた可能性がある。つまり、運動負荷80%と運動負荷40%の間にATが存在していることが推測された。

今回の測定肢位は、背臥位であった。背臥位での運動は、高齢者や障害者の体力維持増進の観点から安全かつ実用的な有酸素運動として行われている。したがって、臥位での運動負荷の違いが生体に及ぼす影響を理解することは重要であると考えられる。

臥位運動時の最大酸素摂取量は座位運動に比べ14%有意に低下を示す⁷⁾という報告がある。その原因は、動員される筋量の少ないことや運動の熟練度が関係している。また、重力の影響による心拍出量動態が関係している。低い運動負荷の場合、臥位では高い心拍出量となるが、運動負荷が高くなると座位でやや高い値を示す。これをFickの公式、(酸素摂取量=心拍出量×動静脈酸素較差)に当てはめると運動時酸素摂取量は動静脈酸素較差に規定される⁷⁾。運動中の最大動静脈酸素較差は拍出される血液をどれだけ活動筋に流入させる能力があるかに影響される。末梢の血流量や血流配分較差の増大が関与するものと考えられる。臥位の運動は座位の運動に比べ非活動筋の末梢血管緊張が低く、血流が活動筋に配分されにくいことが示唆される。このことは、臥位の運動では、座位の運動に比べATに達するまでの時間が短く、AT時の酸素摂取量は低くな

り、実際に動員される活動筋量が少ないことが予想される。また、臥位の運動では血中乳酸濃度上昇が早いことから血流量により嫌氣的代謝への移行速度が異なり、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ないことが伺える。

今回上記のことと予備実験でのプロトコール継続率を考慮し、運動負荷を20%低く設定した。しかし、運動負荷80%では心拍数は時間の経過とともに上昇傾向が見られたことから、本研究で行った運動負荷80%の運動強度は、活動筋に応じた血流量が十分に供給されにくい運動強度であったと考えられる。また、対象者は、運動習慣が無く背臥位でのペダリング運動に不慣れであったため、活動している下肢の活動筋の疲労が速く生じたことも考えられた。このことは、80%の運動強度での自覚運動強度が胸に比べ下肢で運動負荷開始6分から二桁台を示すことから伺える(表3)。

表2より運動負荷80%では、副交感神経は2分以降有意な低下が認められ、交感神経は5分以降有意な増加が認められた。これは樋渡ら¹³⁾が、高齢者に対し運動強度(最大心拍数の30%と50%)で自転車エルゴメーターによる運動を行い心拍変動解析を行った結果、負荷強度が高いと副交感神経活動の抑制が強く、交感神経活動の興奮が強い傾向にあり、両負荷における自律神経活動の基本的パターンは同じであったという結果と一致する。

また、運動負荷14分以降、交感神経の指標であるLF/HF成分が上昇傾向にあった。高田ら¹⁴⁾は、非常に安静な状態ではLF/HF値は2.0より小さく、日常の安静時では2~3程度となり、副交感神経活動が抑制または交感神経活動の興奮状態ではLF/HF値が4.0以上になると推察している。本研究の結果においても、LF/HF値4.0以上のものから有意な上昇となっている。また、堤¹⁵⁾らは、交感神経の亢進に際し、脂肪代謝が亢進すると述べており、運動負荷14分以降の交感神経活動の亢進は糖質代謝に比し脂肪代謝が高まってきたことが推測される。運動開始から15~20分で糖質から脂質にATP産生のエネルギー源が移行すること¹⁵⁾や運動時間が延びるにつれてエネルギー基質に占める脂肪の割合が増加し、運動強度が低いほど糖質よりも脂質をエネルギー基質として利用しやすいこと¹⁵⁾が知られている。上記のような運動負荷14分以降の交感神経活動の亢進と脂質代謝の亢進の関係は運動生理から説明される。

表2から運動負荷40%ではHFnu成分、LF/HF成分ともにウォーミングアップに対して運動負荷では有意な差が認められなかった。これはこの強度の運動では自律神経活動に影響を与えることなく運動が行えていることを意味している。また、運動終了後のHFnu成分は有意差が認められなかったが、安静時に比べ上昇傾向

が認められた。さらに、運動終了後のLF/HF成分では有意な低下が認められた。これらの点を考慮すると今回行った運動負荷40%程度の運動負荷における臥位でのペダリング運動は、交感神経が優位となっている急性期における心疾患患者あるいは低体力の高齢者に運動中自律神経に影響を与えることなく、運動終了後に副交感神経活動の上昇傾向、交感神経活動の抑制が期待される安全で有効な運動療法を提供できる可能性があるとして示唆される。

T30は、運動負荷80%で、 163 ± 61.6 sec、運動負荷40%で、 175.9 ± 98.8 secであった。佐藤ら¹⁶⁾が、若年健康者(22.1 ± 1.5 歳)に対し中等度及び軽度の運動負荷をカルボーネンの式を用いて運動強度0.6, 0.4に設定して行った結果では、その目標心拍数に到達した時点で運動を停止して得られたT30の値は、中等度で 121.9 ± 33.8 sec、軽度で 137.1 ± 52.9 secであった。これは、中等度の運動負荷より軽度の運動負荷では時定数に延長が見られる本研究結果と類似した傾向であった。

心拍数減衰の時定数(T30)は副交感神経の再興奮を表すものであるため、安静時の副交感神経活動と運動終了後の副交感神経再興奮の関係について検討した。安静時のHFnuと心拍数減衰の時定数(T30)において、運動負荷80%、運動負荷40%ともに相関は認められなかった。古谷ら¹⁷⁾は、最大運動負荷を用いたT30を安静時心拍スペクトルと比較し、T30を安静時心拍スペクトルから推測することは困難であると報告している。また、佐藤ら²⁾は、中等度負荷を用いたT30と安静時心拍スペクトルとは逆相関すると報告している。このことは、中程度の負荷ではT30と安静時心拍スペクトルは相関関係にあることを示しており、運動負荷80%、運動負荷40%ともに中程度の負荷量に適さない運動負荷であったと考えられる。

最大負荷では、交感神経の活動が運動終了後2分程度持続するため、交感神経活動の影響をうけ、安静時副交感神経活動の影響は少ないと考えられている¹⁷⁾。運動負荷80%では、運動終了後1分まで交感神経活動が亢進していたため、安静時副交感神経の影響は少なかったと考えられる。また、表2から運動負荷40%では、負荷が軽すぎて運動中に副交感神経が十分に抑制されなかったため、HFnuと副交感神経再興奮の指標であるT30との相関が認められなかったと推測された。

HRR-1とT30は運動負荷80%では中等度の負の相関が認められたが、運動負荷40%では明らかな相関は認められなかった。Kitanoら¹⁸⁾は、糖尿病患者の運動後の心拍数の回復が心臓自律神経機能に関連があるか調査した報告で、運動後1分間の心拍数の回復(HRR-1)とT30の間に強い相関があると述べており、本研究結果では運動負荷80%で中程度の負の相関が認められた。

HRR-1は心拍数の回復を評価する指標として広く使われている。一方、T30は運動終了後の心臓自律神経機能の指標として使われているが、臨床で用いる指標としては実用的ではない。しかし、HRR-1とT30の間に運動負荷80%で中等度の負の相関が認められたことから、HRR-1の使用により心臓自律神経機能を予測できる可能性があると考えられる。

今回の測定は、カルボーネンの式による心拍数での運動強度の決定であった。今回行った運動負荷40%程度の運動負荷における臥位でのペダリング運動は、交感神経が優位となっている急性期における心疾患患者あるいは低体力の高齢者に運動中自律神経に影響を与えることなく、運動終了後に副交感神経活動の上昇傾向、交感神経活動の抑制が期待される安全で有効な運動療法を提供できる可能性が示唆される。しかし、今回臥位運動における自律神経活動から見た最適な運動強度設定には至らなかった。今後は、この点を追及し、より安全で効果的な臥位運動を提供するための指標を確立する必要がある。また、客観的な運動強度決定の場合でも、同様な自律神経反応がみられるか検討する必要がある。

引用文献

- 1) 斉藤宗靖, 谷口興一: 心疾患における運動療法に関するガイドライン. *Circulation Journal*, 2002, **66**(Suppl 4): 6-7.
- 2) 佐藤さおり: 運動負荷後の回復過程の心拍減衰を用いた副交感神経指標の検討. *日本臨床生理学会雑誌*, 2002, **32**(4): 185-190.
- 3) 井上 博: 循環器疾患と自律神経機能. 医学書院, 東京, 2002, pp3-75.
- 4) Imai K, Sato H, Hori M, et al.: Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure. *J Am Collcardiol*, 1994, **24**: 1529-1535.
- 5) 北野貴美子: Wavelet法を用いた心拍変動スペクトル解析による運動時の自律神経応答の検討. *日本臨床生理学会雑誌*, 2003, **33**(4): 219-225.
- 6) 秋澤陽達, 田辺一彦, 杉原 浩・他: semi-recumbent cycle心臓運動負荷試験における呼吸循環反応. *心臓リハ*, 1998, **30**: 1-3.
- 7) 高橋哲也: 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**: 105-112.
- 8) Robert A: The surprising history of "HRmax=220-age" equation. *J Exercise Physiologists*, 2002, **5**: 1-10.
- 9) 奈良 勲: 理学療法士のための運動処方マニュアル. 文光堂, 東京, 2002, pp143-175.
- 10) 田畑 稔: 有酸素運動の基本. *理学療法ジャーナル*, 2008, **42**(6): 515-526.
- 11) 杉田正明: 心拍数の具体的活用法. *トレーニング・ジャーナル*, 2005, **27**(7): 51-53.
- 12) 北見祐史: アスリート, 健康者及び成人病感患者におけるAT時心拍数—カルボーネン法との比較検討—. *体力科学*, 1996, **45**(6): 693.

-
- 13) 樋渡正夫：心拍変動からみた運動による自律神経活動の変化。リハビリテーション医学，2001，**38**(12): 1007-1008.
 - 14) 高田晴子：心拍変動周波数解析のLF成分・HF成分と心拍変動係数の意義。総合健診，2005，**32**(6): 12-20.
 - 15) 堤 達也：交感神経系の脂質代謝に及ぼす影響。産業医学，1968，**10**(2): 90.
 - 16) 佐藤さおり：運動負荷後の回復過程の心拍減衰を用いた副交感神経指標の検討。日本臨床生理学会雑誌，2002，**32**(4): 185-190.
 - 17) 古谷雄司：運動時の心拍数減衰と安静時心拍変動の関係についての検討。心臓，1998，**30**(suppl 3): 38-39.
 - 18) Kitano K, Shiotani H, Tanaka S: Attenuated heart rate recovery immediately after exercise is related to cardiac autonomic dysfunction in diabetic patients. Jpn J Clin Physio, 2006，**35**(6): 347-322.