

心肺運動負荷試験における 自律神経の経時的変化の特徴 —heart rate variability を用いた検討—

天田浩司¹ 米持英俊² 源美智子¹ 松田貴雄¹
釘宮基泰¹ 保科早苗¹ 菊池 博¹ 森 照明³

【要 旨】

心肺運動負荷試験での自律神経活動をリアルタイム心拍変動 (HRV) 解析により経時的に観察した。直線的漸増負荷法 (ランプ負荷) での最高酸素摂取量 (peakVO₂) は交感神経活動の指標である LF/HF 比と正の相関 ($R=0.61, p<0.01$) を、副交感神経活動の指標である HF の無酸素代謝閾値 (AT:anaerobic threshold) までの総和と負荷終了までの総和の比率は無酸素代謝閾値と正の相関 ($R=0.57, p<0.01$) を示した。この結果は増大する負荷に応じた酸素代謝と最高酸素摂取の調節反応に自律神経が深く関与することを示唆する。

【キーワード】

自律神経、心拍変動解析、心肺運動負荷試験、最高酸素摂取量、無酸素代謝閾値

1. 緒言

無酸素代謝閾値 (AT) は全身持久力と関連が強く、有酸素運動能力の指標と言える。マラソン選手などの長距離ランナーは有酸素運動能力が高く、副交感神経活動も高くなるため安静時にしばしば徐脈となる。最高酸素摂取量 (peakVO₂) は文字通り個人の運動能力の高さを表す。トレーニング効果など比較的長い間隔での自律神経活動の変化はよく知られているが¹⁾²⁾³⁾⁷⁾⁸⁾、運動負荷中など短時間での自律神経変化をリアルタイムに観察した報告は少ない⁴⁾⁹⁾。

直線的漸増負荷法 (ランプ負荷) を用いた心肺運動負荷試験は緩徐に負荷量が増大し、急激な自律神経の変化を来たさないため、心拍変動をリアルタイムに観察するのに有利である⁵⁾⁶⁾。我々はリアルタイム (2秒毎) の心拍変動 HRV が計測可能な解析ソフト (MemCalc/Tarawa) を用いて、心肺運動負荷試験での心拍数 (HR)、副交感神経活動指標 (HF)、交感神経活動指標 (LF/HF) を計測し、それらの指標と最高酸素摂取量 peakVO₂ と無酸素代謝閾値 AT との関連

¹ 国立病院機構西別府病院

² 別府大学食物栄養科学部食物栄養学科

³ 大分岡病院

を検討した。

2. 方法

対象は西別府病院を受診した各種アスリートおよび慢性心不全患者を含む37名（平均年齢43.3 ± 24.0歳，男性20名 女性17名）で、サイクルエルゴメーターを用いた直線的漸増負荷法での心肺運動負荷試験を施行した。運動負荷試験中の心電図 R-R 間隔を用いて、2秒毎に30秒間の心拍変動を計測した。パワースペクトル解析は最大エントロピー法を用いた解析ソフトである MemCalc/Tarawa (GMS) を使用した。ランプ負荷での心肺運動負荷試験により最高酸素摂取量 peakVO₂、無酸素代謝閾値 AT を計測した。サイクルエルゴメーターによる心肺運動負荷試験のプロトコールは以下の通りである。

- ① 定常負荷 (10W) による3分間のウォーミングアップ
- ② ランプ負荷 (10W/分, 15W/分, または20W/分)：負荷の終了時点は個人の症候限界(呼吸困難、下肢疲労)または最大心拍数 (220-年齢) の85%~90%に達した時とした。
- ③ 負荷終了後、再び定常負荷 (10W) での3分間のクールダウン

呼吸ガス分析は呼吸代謝モニターシステム (AE-3100S ミナト医科学) を用い、無酸素代謝閾値 AT および最高酸素摂取量 peakVO₂ は呼吸代謝データから (AT window データ解析ソフト：ミナト医科学) 計測した。無酸素代謝閾値 AT については V-slope 法または Time-Trend により求めた。

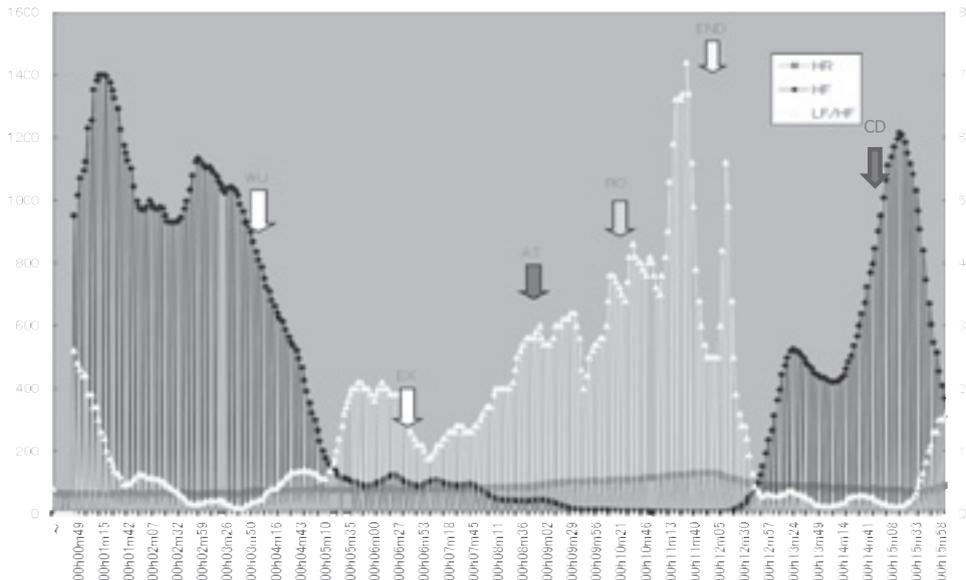


図1. 典型例の直線的漸増運動負荷法による自律神経活動の経時的変化
 横軸：時間経過(min,sec) 縦軸：HF パワー (ms^2/Hz), LF/HF, HR(/min)
 HR：心拍数、HF：HRVの高周波成分、LF：HRVの低周波成分、WU：ウォーミングアップ開始時
 EX：負荷開始時、AT：無酸素代謝閾値時点、RC：呼吸性代償期時点、END：最大負荷終了時点
 CD：クールダウン終了時点

3. 結果

心肺運動負荷試験の典型例（30歳、女性）を図1に示す。副交感神経活動の指標である心拍変動のHF成分はウォーミングアップ開始時に低下後にほぼ定常状態となり、運動負荷開始で徐々に低下して無酸素代謝閾値を超えると急激に低値となる。低下状態が最高酸素摂取量（peakVO₂）に達する負荷終了まで持続する。クールダウンによりHF成分は再上昇して負荷前のレベルまで回復した。

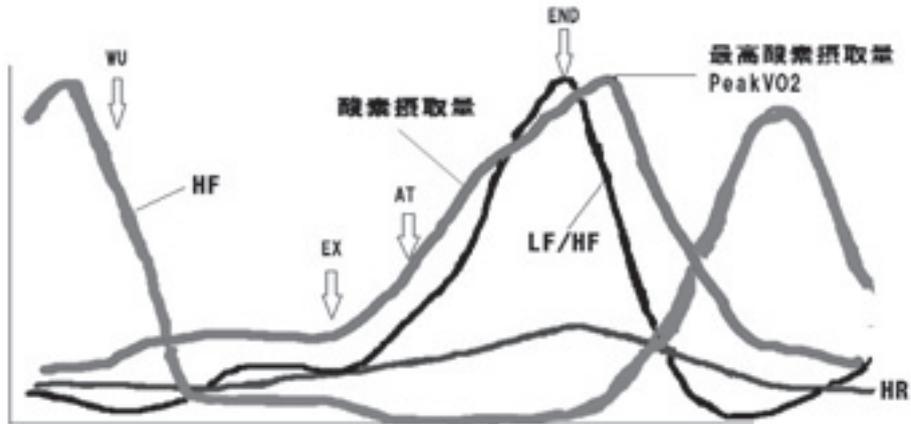


図2 運動負荷での酸素摂取量と自律神経活動の関連

HR：心拍数、HF：高周波成分、LF（低周波成分）/HF、WU:ウォーミングアップ開始時、EX：負荷開始時、AT：無酸素代謝閾値時点、RC:呼吸性代償期時点、END:最大負荷終了時点、peakVO₂:最高酸素摂取量

一方、交感神経活動の指標のLF/HFはウォーミングアップで一過性に上昇し、その後は負荷の増大とともにほぼ直線的に上昇し続けた。負荷終了時に頂点に達し、その後急激に低下して負荷前のレベルに復した。心拍数は負荷増大につれて徐々に増加し、AT後も上昇し続けて負荷終了時に心拍数はピークに達した。終了後に心拍数は徐々に回復し、安静時レベルに復した。

図2に自律神経活動の経時的变化と酸素摂取量との関係を示す。酸素摂取量はウォーミングアップで軽度増加した後定常状態となる。負荷開始と同時に上昇し始め、ランプ負荷量の増大

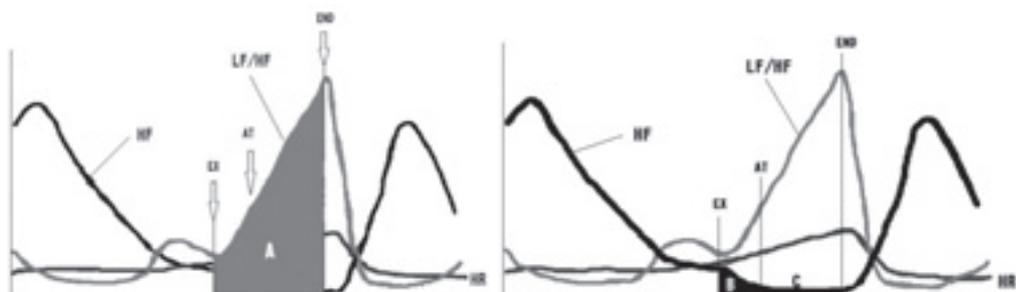


図3. 自律神経活動の評価指標

A：LF/HFの負荷開始から終了までの総和

B：HFの負荷開始から無酸素代謝閾値までの総和

C：HFの無酸素代謝閾値から負荷終了までの総和

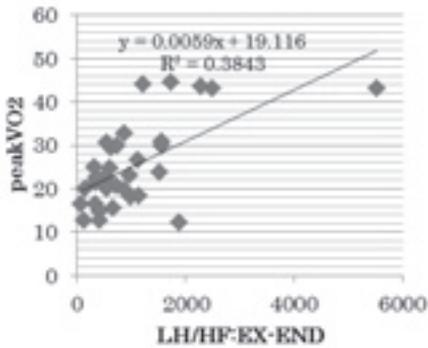


図4. 最高酸素摂取と交感神経活動の関連
LF/HF:EX-END: 負荷開始から負荷終了までHFの総和、peakVO2: 最大酸素摂取量

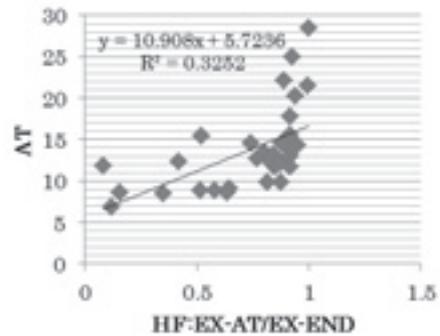


図5. 無酸素代謝閾値 (AT) と副交感神経活動の関連. HF:EX-AT/EX-END: 負荷開始からATまでの総和/ATから負荷終了までの総和)

に応じて増加し、負荷終了 (END) 後短時間でピークに達し、その後下降する。

運動負荷に対する身体反応の酸素摂取量と交感神経活動の関係を明らかにするために、LF/HF:EX-END (負荷開始時から負荷終了時までのLF/HFの総和、図3の上図:面積A)を算出した。図4に示すように最高酸素摂取量との間には明らかな相関が認められた ($R=0.61$, $p<0.01$)。一方、HF成分と最高酸素摂取量とは相関は認められなかった。

次にATとHFの関連を検討した。HF成分は負荷開始と同時に低下を始めるがATを超えると急激に低下する。直線的漸増運動負荷開始からATまでのHF成分の総和HF:EX-AT (図3下図B)と負荷開始から負荷終了までの総和HF:EX-END ((図3下図B+C)から、その比であるHF:EX-AT/EX-END (B/B+C)を算出した。ATとHF:EX-AT/EX-ENDは有意な正の相関を示した (図5、 $R=0.57$, $p<0.01$)。負荷開始からATまでのHF成分の総和HF:EX-AT (図3:B)とATにも弱い相関が認められた (図6、 $R=0.39$, $p<0.05$)。

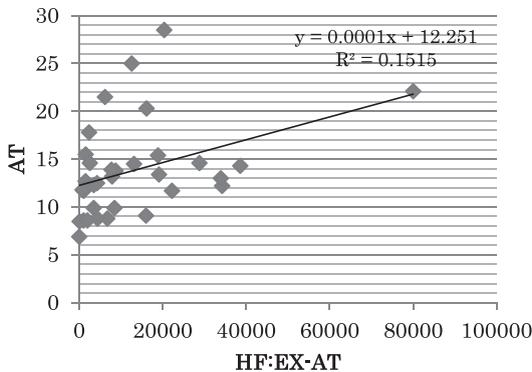


図6. 無酸素代謝閾値 (AT) に至るまでの副交感神経活動とAT値の相関.
AT 無酸素代謝閾値、HF:EX-AT 負荷開始から無酸素代謝閾値に至るまでのHF成分の総和

4. 考案

運動、各種スポーツにおいて最高のパフォーマンスを発揮するためには交感神経が十分に活性化されなければならない。しかし、過度のトレーニングによる身体的なストレスや精神的なス

トレスによりオーバートレーニング症候群のように自律神経活動に乱れをアスリートにおいても生じることがある¹⁵⁾。無酸素代謝閾値 AT を超えない有酸素運動は過度の交感神経の亢進を来たさず安全に実施でき、慢性心不全患者などの心臓リハビリテーションや健康運動においても推奨されている。^{14), 16)}

心肺機能が高い各種アスリートから低下している慢性心不全患者が対象の本研究で、個人の最大運動能力の指標である最高酸素摂取量と交感神経活動指標 LF/HF 間に正の関連が認められた(図4)。この結果は心肺機能の程度に依存することなく、最高酸素摂取量は交感神経活動と強く関連していることを示唆するものである。運動により生じた代謝産物は筋内の化学受容器を刺激し、有髄神経や無髄神経からなる求心線維を経て脊髄を上行し、呼吸中枢や心血管運動中枢を刺激する。その結果、交感神経は緊張し、血液の酸素化が進み、筋血流は増大する。持続的な交感神経緊張の亢進により末梢組織から求心性刺激が増加し、圧受容体反射の感受性低下が起こる¹²⁾¹³⁾。運動に伴う一連の交感神経活動が酸素摂取量に及ぼす作用に関するこれまでの報告と今回の結果は一致している⁴⁾¹⁰⁾。

一方、運動と自律神経、特に副交感神経との関係では運動療法は求心性刺激を減じ、圧受容体の感受性を改善することが報告されている¹⁶⁾。運動療法により心疾患患者においても安静時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活動の増加が報告されている^{11), 16)}。本研究では運動開始から終了までの HF パワーの総和は最大酸素摂取量ではなく AT 値と相関を認めた(図6)。今回我々は、副交感神経活動の評価指標として負荷開始から負荷終了までの HF 成分の総和を AT までと負荷終了までに分けて、その比を算出した(HF:EX-AT/EX-END)。この指標は負荷開始から AT までの HF 成分の総和より AT 値とより強い正の相関を示した(図5)。この結果は運動負荷の直線的な増大に対する身体反応で AT に至るまでと、その後の自律神経、特に副交感神経活動のダイナミックな動態が AT 値あるいは有酸素運動能と関連することを示唆している。

過度のストレスや加齢、慢性心不全などの病的状態により交感神経活動の持続的緊張と副交感神経活動の低下をきたし、スポーツのみならず、日常の身体活動においてもパフォーマンスの低下を引き起こす¹¹⁾¹⁵⁾。近年、加齢やストレスなどの原因で低下した副交感神経活動を活性化することの重要性が注目されている¹⁷⁾。今回の検討では有酸素運動時の副交感神経活性それ自体が有酸素運動能力と密接な関係があることが示された。いわゆる「有酸素運動」が、種々の原因により低下した副交感神経活性を回復させる手段であるか否かは今後の検討課題である。

5. 文献

1. 心臓リハビリテーションにおけるインターバルトレーニングと持久トレーニング中の自律神経活動の比較検討 花田智 関根正樹 田村俊世 新地友和 上田美香 藤本登四郎 生体医工学 (1347-443X) 49巻6号 p977-981 (2011.12)
2. 定期的運動習慣の有無が間欠性無酸素性運動後回復期の心臓自律神経活動に及ぼす影響 小川真人 北垣和史 小野くみ子 理学療法学 (0289-3770) 37巻5号 p349-355 (2010.08)
3. 中高齢者の自転車エルゴメーター運動後の仰臥位浸水と心拍数および心臓副交感神経系調節との関連性 西村一樹 吉岡哲 小野寺昇 川崎医療福祉学会誌 (0917-4605) 19巻2号 p291-295 (2010.01)
4. 漸増負荷運動における呼気延長呼吸が呼吸循環応答と自律神経活動に与える影響 松本卓也 堀田一樹 清水良祐 米澤隆介 石井玲 山本周平 原美弥子 饗庭尚子 松永篤彦 増田卓 心臓リハビリテーション 14巻2号 p363-368 (2009.06)
5. Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability spectral analysis Y.

- Yamamoto, RL Hughson, C Peterson Journal of Physiology September 1, 1991 vol. 71 no. 31136 – 1142
6. Autonomic control of heart rate during physical exercise and fractal dimension of heart rate variability Y. Nakamura, Y. Yamamoto, I. Muraoka Journal of Applied Physiology Feb. 11993, vol. 74 no. 2875 – 881
 7. Effect of endurance exercise on autonomic control of heart rate James B. Carter, Eric W. Banister and Andrew P. Blaber Sports Med. 2003 ; 33 (1) : 33–46.
 8. Effect of endurance exercise training on heart rate variability at rest in healthy young and older men Wayne C. Levy, MauelD. Cerqueira, GeorgeD. Harp, Karl–Arne Johannessen, ItamarB. Abrass, RobertS. Schwartz, John R Stratton The American Journal of Cardiology Vol. 82, Issue10, 15 November 1998, p1236 – 1241
 9. 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 北野貴美子 田中公二 安東啓司 塩谷英之 日本臨床生理学雑誌 (0286–7052) 33巻4号 p219–225 (2003.08)
 10. 運動時の自律神経応答 特に副交感神経活動の関与について 末松正邦, 伊藤芳久, 小竹親夫、他 呼吸と循環 (0452–3458) 33巻11号 p1317–1321
 11. スポーツ現場に生かす運動生理学・生化学 樋口満編著 市村出版
 12. 循環器疾患と自律神経機能 第2版 編集 井上博 医学書院
 13. 自律神経機能検査 第4版 日本自律神経学会編 文光堂
 14. 体力とは何か–運動処方その前に– 長澤純一編 127–132, ナップ 2007
 15. オーバートレーニング症候群における呼吸・循環機能 長嶋淳三 臨床スポーツ医学 : Vol23, No. 8 (2006–08)
 16. 心疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン (2012年改訂版) 日本循環器学会 HP 循環器病の診断と治療に関するガイドライン (2011年度合同研究班報告) <http://www.j-circ.or.jp/guideline/>
 17. 「ゆっくり動く」と人生が変わる 小林弘幸 PHP 文庫

Abstract

We investigated the relation of autonomic nerve activity with peakVO₂ and anaerobic threshold (AT) during cardiopulmonary exercise test using heart rate variability (HRV) analysis. LF/HF, which is an index of sympathetic nerve activity, is positively correlated with peakVO₂ (R = 0.61, p < 0.01). Ratio of EX–AT/EX–END (calculated by sum Start–AT/Start–End HF power, an index of parasympathetic nerve activity) had a positive correlation with AT (R = 0.57, p < 0.01). The present results demonstrated the involvement of autonomic nerve system in physical and metabolic response to increase of physical load.