



Title	長時間一定負荷運動時の心拍ドリフトと自律神経活動の関係
Author(s)	連, 長順; 有光, 琢磨; 山中, 亮 他
Citation	北海道大学大学院教育学研究院紀要, 120, 45-52
Issue Date	2014-06-30
DOI	https://doi.org/10.14943/b.edu.120.45
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56424
Type	departmental bulletin paper
File Information	AA12219452_120_45-52.pdf



長時間一定負荷運動時の心拍ドリフトと 自律神経活動の関係

連 長 順* 有 光 琢 磨** 山 中 亮***
アフルンデ ロガイエ* 白 川 和 希* 小 田 史 郎***
柚 木 孝 敬**** 矢 野 徳 郎****

【要旨】 本研究では、長時間一定負荷運動時に観察される心拍数（HR）の漸増現象（HR drift）と心臓自律神経活動の関連性を検討するため、7名の健常男子大学生を対象に自転車エルゴメーターを用いて60分の長時間一定負荷運動テストを実施した。自律神経活動はHR変動を周波数分析することによって評価した。長時間一定負荷運動の前半（3-30分）においては、HR driftの発生は交感神経活動に関連せず、副交感神経活動に一部関連していると考えられた。運動の後半（30-60分）におけるHR driftは自律神経活動によって説明できず、運動ストレスなどの因子と関連する可能性が考えられた。

【キーワード】 長時間運動、心拍数、交感神経活動、副交感神経活動

I. 緒言

運動中の心拍数（Heart Rate: HR）は、運動時間が長時間に及ぶと、その強度が一定中強度以下の負荷であったとしても徐々に増加する（心拍ドリフト: HR drift）²⁻⁴。このHR driftをもたらし要因として、体温上昇に伴う皮膚血流量（Skin Blood Flow: SBF）の増加による一回拍出量（Stroke Volume: SV）の減少が従来からよく知られている¹²。それに加えて、最近の研究では、非活動肢⁷および活動肢⁶における血液貯留量の増加がHR driftの要因となる可能性が報告されている。これらの知見は、末梢部位（皮膚、非活動肢、活動肢）における血液貯留量の増加に伴う中心血液量の低下がHR driftを誘発することを示唆している。そのメカニズムには、心肺圧受容器からの求心性インパルスの減少に伴う自律神経活動の変化（交感神経活動の亢進および副交感神経活動の減弱）が関与していると考えられる¹¹。しかしながら、我々の先行研究⁸では、60分の長時間一定負荷運動の前半30分におけるHR driftは活動肢血液貯留量の増加に起因したが、後半30分では、HR driftが観察されたにも関わらず、SBFおよび活動肢血液貯留量に有意な変化が認められなかった（Fig. 1）。この結果は、HR driftに対する心臓自律神経活動の関与が運動時間の経過に伴って変化することを示唆していると考えられる。これまでに、長時間一定負荷運動時のHR driftと自律神経活動の経時的関係を検討した研究は著者の文献探索では見出せていない。そこで本研究は、健常大学生における長時間一定負荷運動時に得られたHR変動（R-R間隔）データを周波数分析することにより、HR driftと自律神経活動の関連性を検討することを目的とした。

* 北海道大学大学院教育学研究院 ** 国立スポーツ科学センター スポーツ科学研究部

*** 北翔大学生涯スポーツ学部スポーツ教育学科 **** 北海道大学大学院教育学研究院人間発達科学分野

II. 方法

A. 被験者

被験者は、健康な男子大学生7名(平均年齢±標準偏差:20.0±1.0 才, 身長:175.0±12.0 cm, 体重:67.8±9.5 kg)であった。各被験者には、実験の目的および危険性について十分に説明を行い、実験参加の同意を書面にて得た。本研究は北海道大学大学院教育学研究院の研究倫理委員会の承認を得て実施された。

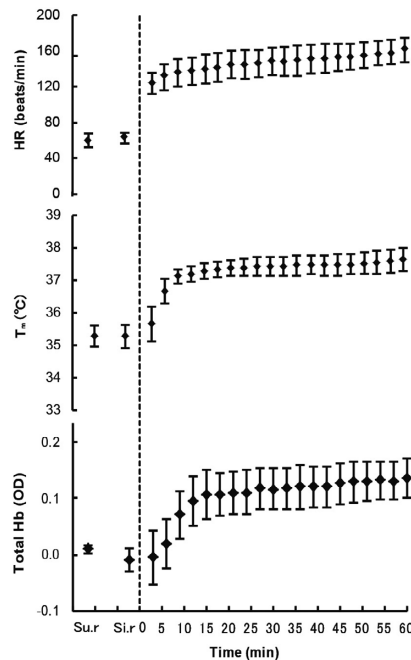


Fig. 1 Changes in the heart rate (HR) and deep temperature (T_m) and blood volume (Total Hb) in active muscle during prolonged constant-load exercise.

B. 実験プロトコル

1. 最高(ピーク)酸素摂取量

後述する長時間一定負荷運動テストの運動強度を決定するために、コンピューター制御式の自転車エルゴメーター(232CXL, Combi)を用いてランプ負荷運動テストを実施した。各被験者は、3分のウォーミングアップ(20 W, 60 rpm)に引き続き、漸増率20 W/minのランプ負荷運動を規定ペダル回転数(60 rpm)を維持できなくなるまで行った。運動中最も高い酸素摂取量(10秒毎に平均出力)を最高酸素摂取量($\dot{V}O_{2peak}$)とした。

2. 長時間一定負荷運動テスト

各被験者は、ランプ負荷運動テスト後少なくとも3日を空けてから長時間一定負荷運動テストを行った。各被験者は、5分間の座位安静を保った後、事前に行ったランプ負荷運動テストで求められた $\dot{V}O_{2peak}$ の60%に相当する強度(138 ± 19 W)で60分の長時間一定負荷運動を行った。その際のペダル回転数は60 rpmとした。

ランプ負荷運動テスト時および長時間一定負荷運動テスト時の呼吸数, $\dot{V}O_2$, 呼吸交換比

(RER)は呼吸代謝モニタシステム(AE-280S, Minato Medical Science)を用いて、安静時から運動終了時まで連続的に測定した。長時間一定負荷運動テストのHRとR-R間隔はHRモニタ(S810i, Polar)によって連続的に記録した。記録されたHRは1分毎に平均した。

C. 自律神経活動

解析ソフトの心拍ゆらぎリアルタイム解析システム(MemCalc/Tarawa, GMS)を用いて最大エントロピー法によりR-Rデータを周波数解析した。高周波帯域(High Frequency:HF)が0.15-0.4 Hzをとし、低周波帯域(Low Frequency:LF)が0.05-0.15Hzをとした。副交感神経活動指標としてHF、また、交感神経活動指標としてLH/HF比を用いた⁹。算出されたHFおよびLF/HFは1分毎に平均した。

D. 統計解析

結果は平均値±標準偏差で示した。長時間一定負荷運動時における各測定項目の経時的変化の分析には反復測定一元配置分散分析を用いた。その後、有意な差が認められた場合にDunnett法を用い、運動開始後3分値と30分値を基準として検定を行った。二変量間の相関の強さは、ピアソンの相関係数(r)を用いて表した。統計学的有意水準は5%未満($p<0.05$)とした。

Ⅲ. 結果

長時間一定負荷運動時のHRに有意な時間の主効果が認められた($F_{7,42} = 130.66$, $p<0.05$)。HRは、安静時(67 ± 8 bpm)から運動開始後3分値(131 ± 14 bpm)まで急峻に増加し(Fig. 2, $P<0.05$)、その後、運動の前半(30分値: 146 ± 17 bpm)および運動終了時(60分値: 156 ± 13 bpm)まで有意に上昇した(Fig. 2, $P<0.05$)。LF/HFには時間の主効果が認められなかったが、HFには有意な時間の主効果が認められた($F_{7,42} = 23.56$, $p<0.05$)。

LF/HFは安静時(2.90 ± 1.96)から運動開始後3分値(9.35 ± 6.54)まで上昇する傾向があった($0.05<P=0.087<0.1$)が、30分値(9.94 ± 5.24)まで変化しなかった。その後、運動終了時(4.99 ± 4.50)までの変化も示さなかった(Fig. 2)。HFは運動開始後3分値まで急激な減少を示した(安静時: 521.28 ± 307.11 (beats/min)²/Hz ; 3分値: 56.57 ± 45.63 (beats/min)²/Hz, $P<0.05$)。その後運動開始後3分値から30分値(0.88 ± 1.12 (beats/min)²/Hz)まで有意に減少した($P<0.05$)。その後運動終了時(0.51 ± 0.55 (beats/min)²/Hz)まで減少の傾向があったが、統計的に有意な変化を示さなかった($0.05<P=0.094<0.1$)。安静時から運動開始後3分値までのHFの変化が非常に大きかったため、Fig. 2のようにHFの変化は対数変換して示した。Fig. 4に示されるように、HRは60分値の値を100%として、HFは安静時(時間ゼロ)の値を100%として相対化した。その結果、長時間一定負荷運動テストの3分から30分までは、HFは10%低下し、HRは14%増加した。さらに、長時間一定負荷運動テストの運動前半において、HFとHRが有意な負の相関関係を得られた($r=0.993$, $p<0.05$)。HFの減少とともにHRが増加になる。しかし、30分以降には運動終了時までHFは変化しないが、HRは6%増加した。

長時間一定負荷運動時において、呼吸数と $\dot{V}O_2$ およびRERは運動開始後3分時まで急峻に増加したが($P<0.05$)、その後、変化しなかった (Fig. 3)。

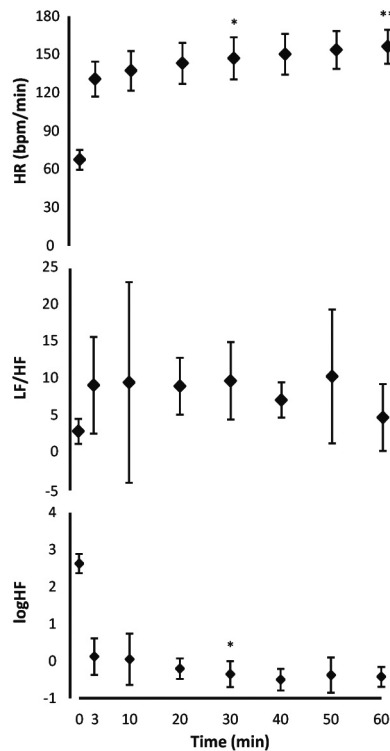


Fig. 2 Changes in heart rate (HR) and the ratio of low-frequency area and high-frequency area (LF/HF), logarithmic HF (log HF) from rest to the end in a prolonged constant-load exercise test. * : Comparison from the value at 3 minute of exercise ($P<0.05$) ; ** : Comparison with the 30 minutes and 3minute ($P<0.05$).

Ⅳ. 考察

A. 呼吸数および代謝性因子がHR driftに及ぼす影響

本研究では長時間一定負荷運動時のR-R間隔データを周波数分析することにより、HR driftと心臓自律神経活動の関連性を検討した。先行研究¹⁰では心拍変動は呼吸数によって部分的に影響され、さらに、呼吸数が増加すれば心拍変動の周波数スペクトルにおける高周波数領域のパワーが減少すると報告された。本研究では、長時間一定負荷運動の運動開始3分時まで、呼吸数は急峻に増加し、その後、変化が認められなかった (Fig. 3)。したがって、本研究では、少なくとも運動開始3分以降では呼吸数がHFやLF/HFに及ぼす影響は少なかったと考えられる。また、運動中には代謝産物(乳酸、炭酸ガス、水素イオン)による筋代謝受容器に対する刺激が循環中枢を經由して交感神経を興奮させ、HRの増加や血管収縮を引き起こすことが報告されている¹。しかし、本研究ではRERおよび $\dot{V}O_2$ は運動開始後3分時まで急峻に増加したが、その後、運動終了時まで変化しなかった (Fig. 3)。このことから、筋内の代謝性の化学変化は少な

くとも運動開始後3分以降では定常状態であったと考えられる。以上のことから、本研究で観察されたHR driftは呼吸数および代謝性因子に起因した現象ではないと推測される。

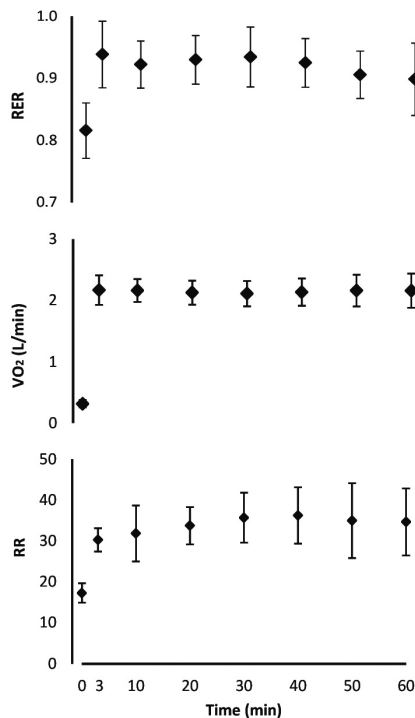


Fig. 3 Changes in the respiratory exchange ratio (RER), respiration rate (RR), and oxygen (VO₂) uptake from rest to the end in a prolonged constant-load exercise test.

B. 運動の前半 (0-30分) におけるHR driftと自律神経活動

HRは運動開始後3分時 (124 ± 17 bpm) まで速やかに増加した後、運動30分時 (146 ± 16 bpm) まで徐々に増加した (Fig. 2)。従来、運動時では100bpm以下のHRの増加は副交感神経活動の減少によって引き起こされ、100 bpmを超えるHRの増加は交感神経活動の亢進に関連すると考えられている¹³。しかし、本研究においてLF/HFは運動開始後3分時まで増加する傾向が見られたが、その後は定常状態を示した。HFは運動開始後3分時まで大幅に減少し、その後、運動30分まで有意な低下を示した (Fig. 2)。Fig. 4に示されるように、運動開始後3-30分にかけて、HFは10%低下し、HRは14%増加している。さらに、HFとHRの間に有意な相関が得られた ($r = 0.993$)。したがって、運動の初期 (0~3分) ではHRの増加は主に副交感神経活動の抑制作用の低下によって引き起こされると考えられ、さらに、運動の30分までもHR driftの発生は交感神経活動に関連せず、副交感神経活動の抑制作用の減弱に関連するかもれないと考えられる。

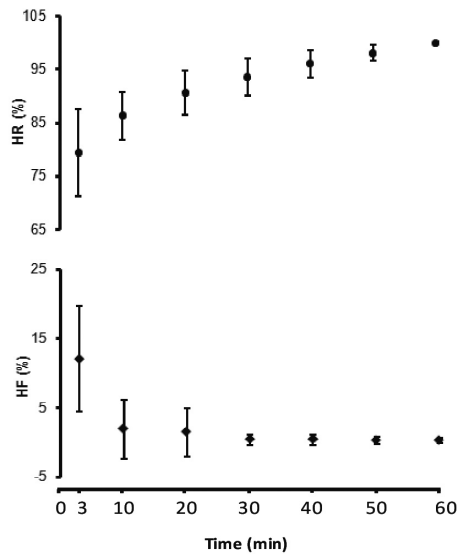


Fig. 4 Changes in the heart rate (HR) and high-frequency area (HF) from rest to the end in a prolonged constant-load exercise test. HR is a relative value for 60 minute. HF is a relative value for rest (0 minute).

C. 運動の後半 (30-60分) におけるHR driftと自律神経活動

運動の後半 (30-60分) においては、HRの有意な増加が認められたが ($146 \pm 16 \sim 155 \pm 14$ bpm), LF/HFは変化しなかった (Fig. 2)。したがって、HR driftは交感神経活動に関連しない可能性があることが本研究より示唆された。また、運動の後半ではHFは低下の傾向を示したが、統計的に有意ではなかった。したがって、運動の後半ではHR driftは副交感神経活動の低下によりわずかな影響があると考えられる。しかしながら、運動の40～60分時ではHFはほとんど変化しなかったため、運動の経過とともにHR driftに対する副交感神経活動の影響が減弱すると考えられる。先行研究⁸では、運動の後半において活動肢血液貯流量の変化が見られないと報告された (Fig. 1)。そこで、長時間一定負荷運動では、運動後半の交感神経および副交感神経活動が少なくなると考えられる。

運動中の運動ストレスは交感神経を介して副腎髄質へ影響を及ぼす。その結果、副腎髄質から血中にアドレナリンが放出される。実際、長時間一定負荷運動では運動の経過とともにカテコールアミン濃度が上昇する⁵。さらに、カテコールアミンは心臓の収縮性に対して影響するが、アドレナリンとノルアドレナリンはいずれも心筋に直接作用して収縮力を高め、心拍数を上昇させる。したがって、長時間一定負荷運動でのHR driftは自律神経系ばかりでなく、体液性因子にも影響されるかもしれない。

V. 結論

長時間一定負荷運動の前半(3-30分)においては、HR driftの発生は交感神経活動に関連せず、副交感神経活動に一部関連していると考えられた。運動の後半(30-60分)におけるHR driftは自律神経活動によって説明できず、運動ストレスなどの因子と関連する可能性が考えられた。

VI. 文献

- 1 Donal S, O' Leary, Robert A, Augustyniak (1998) Muscle metaboreflex increases ventricular performance in conscious dogs. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 275: H220-H224
- 2 Ekelund LG, Holmgren A (1964) Circulatory and respiratory adaptation during long-term, non-steady state exercise in the sitting position. *Acta Physiol Scand*, 62: 240-255
- 3 Ekelund LG (1966) Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise in the supine position. *Acta Physiol Scand*, 68: 382-396
- 4 Ekelund LG (1967) Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise of moderate intensity in the sitting position. *Acta Physiol Scand*, 69: 327-340
- 5 Galbo H (1983) Hormonal and metabolic adaptation to exercise. Georg Thime Verlag, Stuttgart, New York
- 6 Hayashi Y, Kawaguchi K, Onari K (2002) Influence of blood volume in exercising muscle on stroke volume declining during prolonged exercise. *Adv Exerc Sports Physiol*, 8: 31-38
- 7 Kimura T, Matsuura R, Arimitsu T, Yunoki T, Yano T (2010) Effect of blood volume in resting muscle on heart rate upward drift during moderately prolonged exercise. *J Physiol Anthropol* 29 : 205-210
- 8 連長順, 有光琢磨, 山中亮, アフルンデ・ロガイエ, 柚木孝敬, 矢野徳郎 (2012) 一定負荷長時間運動時の心拍ドリフトと活動肢における深部温および血液量との関係. *日本生理人類学会誌*, 17巻2号: 49-56
- 9 Pomeranz B, Macaulay RJB, Caudill MA, Kutz I, Adam D, Gordon D, Kilborn KM, Barger AC, Shannon DC, Cohen RJ, Benson H (1985) Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *Am J Physiol*, 248: 151-153
- 10 Penttila J, Helminen A, Jartti T, Kuusela T, Huikuri H. V, Tulppo M. P, Coffeng R, Scheinin H (2001) Time domain, geometrical and frequency domain analysis of cardiac vagal outflow: effects of various respiratory patterns. *Clin. Physiol*, 21: 365-376
- 11 Rowell LB (1974) Human cardiovascular adjustments to exercise and heat stress. *Physiol. Rev*, 54: 75-159
- 12 Rowell LB (1986) *Human Circulation: Regulation During Physical Stress*. Oxford University Press, New York, pp. 363-406
- 13 Rowell LB, O' Leary DS, Kellogg DL (1996) Integration of cardiovascular control systems in dynamic exercise. *Handbook of Physiology. Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems*. Am Physiol Soc Bethesda, MD, sect. 12, chapt. 17: 770-83

Relationship Between Heart Rate Drift and Autonomic Nerve Activity During Prolonged Constant-load Exercise

Chang-Shun LIAN, Takuma ARIMITSU, Ryo YAMANAKA,
Roghayye AFROUNDEH, Kazuki SHIRAKAWA, Shiro ODA,
Takahiro YUNOKI, Tokuo YANO

Key Words

1. Prolonged exercise 2. Heart rate 3. Sympathetic nerve activity 4. Parasympathetic nerve activity

Abstract

The aim of this study was to determine the relationship between heart rate (HR) drift and cardiac autonomic nerve activity during constant-load prolonged exercise. Seven healthy men performed a moderate-intensity (about 60% of peak oxygen uptake) 60-min cycling exercise. Autonomic nerve activity was evaluated by the frequency analysis of HR variability. The powers of high frequency (HF, 0.15-0.4 Hz), low frequency (LF, 0.04-0.15 Hz) and LF to HF ratio (LF/HF) components of HR Variability (HRV) have been shown to estimate cardiac vagal and sympathetic activities. The results showed that HR was rapidly increased from (67 ± 8 bpm) to (131 ± 14 bpm) at the 3rd minute after start from the state of rest (Fig. 2, $P < 0.05$), thereafter, at the first half of the exercise (the 30th minute: 146 ± 17 bpm) and the end of the exercise (the 60th minute: 156 ± 13 bpm), where HR was both increased significantly (Fig. 2, $P < 0.05$). Although the LF/HF showed the tendency ($0.05 < P = 0.087 < 0.1$) to increase from the state of rest (2.90 ± 1.96) to the 3rd minute of exercise (9.35 ± 6.54), after that, it did not show any change at the 30th (9.94 ± 5.24) minute and the end of the exercise (4.99 ± 4.50) (Fig. 2). The HF was rapidly decreased after 3-minute exercise from the state of rest; at rest: 521.28 ± 307.11 (beats/min)²/Hz; the 3rd minute: 56.57 ± 45.63 (beats/min)²/Hz, $P < 0.05$). Although it showed significantly decreased from 3rd minute to the 30th minute of exercise (0.88 ± 1.12 (beats/min)²/Hz ($P < 0.05$), HF did not show statistically significant change from the 30th minute to the end of the exercise (0.51 ± 0.55 (beats/min)²/Hz, $0.05 < P = 0.094 < 0.1$). The HR drift in the first half of the exercise (3-30 min) was considered not to be related to sympathetic activity, but related to parasympathetic nerve activity. In the last half exercise (30-60 min), the HR drift seemed to be independent of the autonomic nervous activity.