

令和元年6月12日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01594

研究課題名(和文) 心拍ゆらぎを指標とした登山に対する強さの解析

研究課題名(英文) Heart Rate Variability in Response to Mountain climbing

研究代表者

長澤 純一 (NAGASAWA, Junichi)

日本大学・文理学部・教授

研究者番号：40228002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：自律神経や生体応答の健全性を評価するために、登山時や低酸素環境においても、心拍変動解析(HRV)が、時間領域あるいはFFTなどによる解析手法によって評価されてきたが、高地では、評価不能な事例も多かった。本研究は、(1)心拍変動の非線形解析(スケーリング指数)を適用することによって、低酸素環境での生体情報を定量し、さらに(2)高地での運動に適用可能であることを明らかにすることを目的とした。結果、(1)運動中の α_1 は、低酸素環境ではほぼ酸素濃度依存性があり、(2)富士山のトレイルランレースにおいて、ランニングタイムが短い(速い)ランナーほど、安静値からの α_1 の変動量が少ないことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低酸素環境において、DFA法によるスケーリング指数 α_1 は、運動開始とともに上昇し、中等度の強度の運動中に極大値を示した。また、 α_1 の極大値は、環境酸素濃度依存的に低負荷側に移行し、酸素濃度が低くなるにつれ、より低い負荷で α_1 が低下を示すことが明らかになった。フィールドでは、 α_1 の安静値からの差分は、富士登山タイムアタックの時間と正の相関、OBLAと負の相関をする傾向が認められ、山に対する強さを表す有力な指標になる可能性が示唆された。また、 α_1 のその日の安静値からの変動分は、身体に対する生理的負担を評価するパラメーターとして、山に対する強さを反映する指標になるのではないかと考えられた。

研究成果の概要(英文)：A number of reports have evaluated loads on the body during mountain climbing by applying heart rate variability(HRV) parameters. However, at high altitudes the power spectrum of HRV decreases significantly and the full spectrum is often undetectable. The aim of this study was (1)to quantitatively evaluate bio-information in a hypoxic environment by applying a nonlinear analysis of HRV; and (2)to determine whether detrended fluctuation analysis(DFA) could be applied to sports activities at high altitudes.(1) α_1 was the highest at an oxygen content of 20.94% and decreased approximately in an oxygen-content-dependent manner in hypoxic environments. (2)The difference between the value of α_1 during supine rest and the average value of α_1 during running was evaluated in each runner. A significant correlation was found between this difference and the running time. Thus the change in α_1 from the value during supine rest was smaller for runners with shorter running times, or faster runners.

研究分野：運動生理学

キーワード：心拍変動 登山 低酸素 DFA法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 山岳環境における測定可能性などを考慮して、心拍変動 (heart rate variability: HRV) を指標とした非侵襲的な測定手法を適用して、自律神経系に対する登山の生体負担が多く測定されてきた。これには、時系列データをフーリエ変換などによってスペクトル解析して評価する周波数領域 (frequency domain) 解析が多く用いられてきたが、高地では HRV のパワー全体が大きく減少し、スペクトルの検出が困難になる事例が多数みられている。

(2) HRV の周波数領域解析については、平地においても身体運動中には同様のパワー低下が見られ、低周波 (Low Frequency : LF) 成分および高周波 (High Frequency : HF) 成分の両者がほぼ検出不可能なレベルまで低下した報告も散見される。LF/HF 比は一般に交感神経賦活の指標とされるものの、高強度の運動時にスペクトルが検出できなければ、測定としては成り立たない。以上のように“高所”の“運動”である登山に対しては、HRV の周波数領域による解析手法は必ずしも妥当とはいえない。

(3) 登山の生体負担の程度をどのような生理学的指標によって表現するかについては不明な点が多い。たとえば、日欧のエベレスト登山隊など、一流登山家の最大酸素摂取量 (VO_2max) が $50 - 60 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 程度である例も多く、平地での体力指標をそのまま準用できないようである。

(4) DFA 法は、Pengら(1)によって提案された、短時間のフラクタルスケーリング指数を計算するアルゴリズムで、信号のトレンドを数学的に除去することで、変動におけるフラクタル性の有無を解析する手法である。DFA 法では、HRV パワー大部分を占める (安静状態で 85% 程度とされる) を占める周波数領域の VLF (0.04Hz 以下の成分で特定のピークを持たないため解析に利用されない) を含めたゆらぎ全体の情報を評価に利用できる利点がある。他方、DFA 法によって R-R 間隔のデータから得られたスケーリング指数 () が生理学的に何を意味するのかは必ずしも明確になっているわけではない。健常な被験者の α は、経験的に安静時に 1 付近を示すことがわかっており、心不全の患者などではこの値が減少するなど、1 から上下に逸脱する程度が大きいほど、外乱に対する反応や補償の困難な、“健全性が失われた状態”であると解釈されている。

2. 研究の目的

登山時の生体負担を評価する試みのひとつとして、HRV の非線形解析のひとつである DFA (detrended fluctuation analysis) 法に着目して、低酸素環境下の身体運動に対する生体負担の定量性を評価にすることを目的とした。また高地での運動に本法が適用可能であるかを明らかにするために、山岳ランナーを対象としたトレイルラン・タイムトライアルレースにおける HRV の DFA 解析結果と持続的体力指標と連関を調査し、HRV の非線形解析による測定結果が山に対する強さの指標のひとつになりうるか検討を加えた。

3. 研究の方法

(実験 1) 種々の低酸素濃度環境での漸増負荷運動中における心拍変動

健常な男子大学生 5 名を被験者とした (年齢: 22.6 ± 0.9 歳, 身長: 170.9 ± 8.5 cm, 体重: 67.1 ± 10.1 kg, BMI: 22.8 ± 1.2 kg/m^2)。低酸素環境は、Hypoxico・エベレストサミット II を用いて、低酸素テント (W:200, D:200, H:180 cm) 内に外気の 20.93% (0 m 相当), 17.38% (1,500 m), 15.28% (2,500 m), 14.23% (3,000m), 13.40% (3,500m) および 12.56% (4,000m) の酸素濃度を設定した。測定室の室温および湿度は、 23°C および 50% に設定した。

心電図の R-R 間隔は、安静時、運動中とも Polar V800 (Polar 社製) によって記録した。低酸素室入室から座位にて 10 分以上経過した後、20 分間、仰臥位をとらせ安静時の R-R 間隔を記録した。その後自転車エルゴメーター (エアロバイク 75XLIII; COMBI 社) により、50W から 25W ずつ 200 W までの 7 段階、各 5 分の漸増負荷運動を行わせ、その間継続して R-R 間隔を記録した。なお、HRV の解析範囲は仰臥位では最後の 5 分間、運動中は、各運動強度の最後の 3 分間とした。HRV の解析は、kubios HRV (ver 2.2) を用いた。解析対象として LF (0.4 - 0.15 Hz)、および HF (0.15 - 0.4 Hz: 副交感神経系賦活の指標) 帯域におけるスペクトルのパワー密度を求めた。また、交感神経系の指標として、LF/HF 比を算出した。非線形解析として、サンプル・エントロピー (SampEn) および DFA 法によるスケーリング指数 α のうち、短期変動を示す α_1 (range 4 n 16) を評価した。

(実験 2) トレイルラン時の HRV における DFA 解析の適用

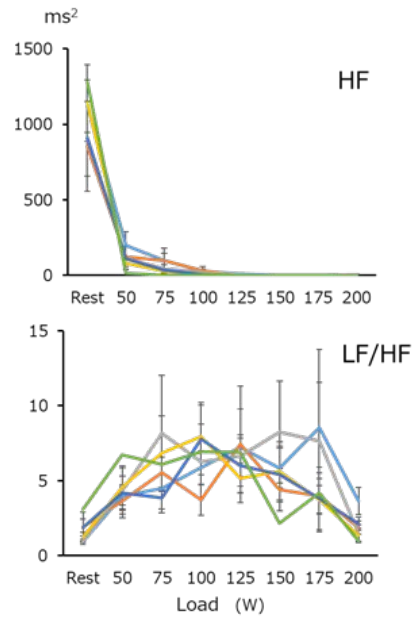
被験者は、日本代表レベルを含むトレイルランニング経験者 8 名であった。被験者には喫煙者はおらず、また心臓に病歴をもつ者はいなかった。タイムトライアル形式でのレースは、富士山御殿場口五合目に設置されたトレイルステーション (富士山ツーリズム御殿場実行委員会, 御殿場市: 標高 1,450m) から八合目の赤岩八合館 (3,300m) の往復走とした。被験者は、前日御殿場市内の宿泊施設に宿泊し、就寝時間、起床時間および食事内容を統一した。また、前日のトレーニング等は行わないこととした。測定当日、自動車御殿場口五合目に向かい、到着約 2 時間後に五合目からランを開始した。ラン前後に御殿場口五合目において、10 分間仰臥位安静をとらせ、HRV を Polar V800 (Polar 社) を用いて心拍の R-R 間隔を記録した。なお、解析は、後半 5 分間とした。

4. 研究成果

低酸素濃度環境での漸増負荷運動中における心拍変動

周波数領域パラメーター: 図 1 に、副交感神経系賦活の指標である HF のパワースペクトル密度ならびに交感神経系の指標である LF/HF 比を示した。HF は、50W の時点で大きく低下をしており、100W 以上の負荷強度では、パワーがきわめて小さく、酸素濃度の影響も分離できなかった。LF/HF 比は、運動中、動揺が大きく一定の傾向を示さなかった。

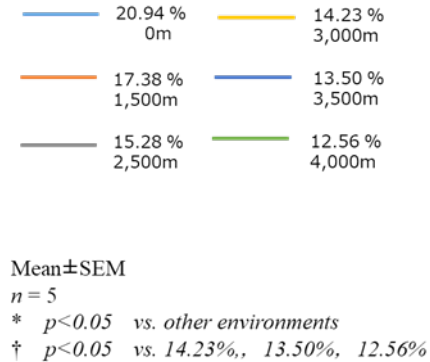
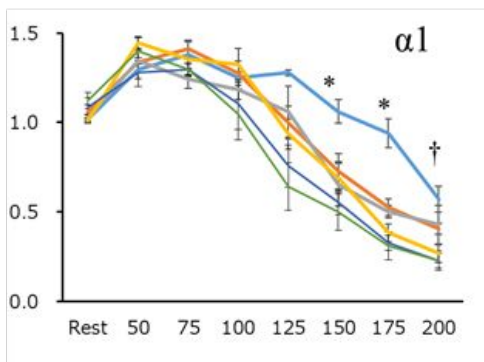
図1



非線形解析: 図 2 に安静時および運動中の α_1 の変動を示した。

仰臥位安静時 (Rest) の α_1 は、 1.02 ± 0.02 (0m 相当), 1.05 ± 0.04 (1,500m), 1.02 ± 0.02 (2,500m), 1.01 ± 0.01 (3,000m), 1.08 ± 0.05 (3,500m) および 1.12 ± 0.04 (4,000m) となり、正常な状態とされる α_1 付近に収束し、酸素濃度環境間の有意差は認められなかった。漸増負荷運動中、 α_1 の値は、50W から 100W の低強度ではすべての酸素濃度環境で Rest よりも上昇し、その後低下する上に凸の様態となった。また、外気の酸素濃度環境では 175W 以上で、17.38, 15.28 および 14.23% (3,000m 相当まで) の環境では 125W 付近で、また 13.50% および 12.56% (3,500-4,000m 相当) では 100W 付近で安静の値を下回った。運動時、すべての低酸素環境での α_1 は、150W および 175W 強度で、20.93% 環境よりも有意 ($p < 0.05$) に低値を示し、200W 負荷時には 14.23%, 13.50% および 12.56% 濃度のとき低値を示した ($p < 0.05$)。なお、SampEn には、分離可能な変動を認めなかった。

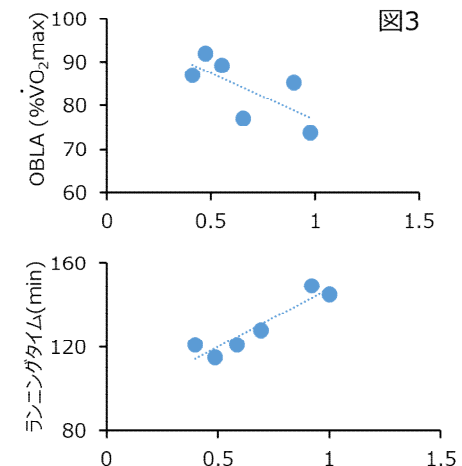
図2



トレイルラン時の HRV における DFA 解析の適用

トレイルラン前後の α_1 : 被験者 8 名のうち、安静時からトレイルラン終了後の測定まで心拍の記録がすべて回収できたのは 6 名であったため、以下の処理は 6 名についておこなった。トレイルラン前後の安静仰臥位における α_1 は、ラン前で 1.17, ラン後で 1.51 と有意に上昇し ($p < 0.05$) た。 α_1 は、八合目までの登攀に要した時間(ランニングタイム)と出発前仰臥位安静時の α_1 には有意な相関は認められなかった。

トレイルラン中の α_1 : ラン開始以降早い段階で一時的な低下がみられる例があるものの、その後は標高やレースの進捗にかかわらず、走行中大きな変動およびドリフトはなく、安静値を下回るほば一定の値で推移していた。そこで、運動中の α_1 の平均値と五合目出発前の安静値との差分(図 3)を $\Delta \alpha_1$ として評価したところ、ランニングタイムは $\Delta \alpha_1$ と有意な正の相関 ($R^2 = 0.903$; $p < 0.05$) が認められた。また、各被験者の $\Delta \alpha_1$ と OBLA 値には負の相関が認められた ($R^2 = 0.475$; $p < 0.05$)。



まとめ

低酸素環境における HRV 評価において、DFA 法によるスケーリング指数 α_1 は、運動開始とともに上昇し、中等度の強度の運動時まで上昇しその後“1”を下回って低下した。各酸素濃度における運動中の α_1 の変動を、二次曲線に近似 (50-175W の範囲) させると、 α_1 の極大値は、環境酸素濃度依存的に低負荷側に移行する、すなわち、酸素濃度が低くなるにつれ、より低い負荷で α_1 が低下を示すことが明らかとなった。これらの近似曲線から、安静時の水準を下回る点、 α_1 を下回る点、極大値などが算出できるが、本実験では、おおよそ設定した酸素濃度の順序効果も認められた(表 1)。

表1 酸素濃度による α_1 の極大値と1を切るときの運動強度の変動

酸素濃度(%)	20.94	17.38	15.28	14.23	13.40	12.56
極大値(W)	90	72.5	70	72.5	55	35
1との交点(W)	165	135	130	132.5	125	107.5

他方、トレイルランに応用した結果(実験 2)から、 α_1 の安静値からの差分は、富士登山タイムアタックの時間と正の相関および OBLA と負の相関をする傾向がみられ、(測定環境に制約の大きい)登山のような低酸素環境での身体運動にたいする生体負荷を定量的に評価する指標として、スケーリング指数 の評価は有為であるものと思われた。

<引用文献>

(1) Peng CK, Havlin S, Stanley HE, et al.: Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos* 5: 82-87,1995

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

祝原 豊, 長澤 純一, 内丸 仁, (他 5 名) : 準高所ハイキングコース歩行時の生体負担に関する実践的研究. *Walking Research* 22: 3-8, 2018 査読有

長澤 純一, 小磯 直人, 吉富 悠騎, (他 10 名) 低酸素環境下の生体負担指標としての心拍変動 DFA 解析 登山医学 38: 26-35 2018 査読有

〔学会発表〕(計 8 件)

辻川 比呂斗, 長澤 純一ら. 富士山スカイランニングタイムアタックと平地最大運動テスト 結果からみたスカイランナーの体力特性. 第 23 回日本ウォーキング学会大会 2019

TSUJIKAWA Hiroto, NAGASAWA Junichi et al. Changes in weight bearing index (WBI) before and after sky running in Mt. Fuji. *The 9th Federation of the Asian and Oceanian Physiological Societies Congress*.2019

長津 恒輝, 長澤 純一ら. 準高所における一過性の高強度運動が翌日の無酸素性パフォーマンスに及ぼす影響. 第 73 回日本体力医学会大会.2018

祝原 豊, 長澤 純一ら. 準高所におけるハイキング時の生体負担に関する実践的研究. 第 73 回日本体力医学会大会.2018

小磯 直人, 長澤 純一ら. 低酸素環境における生体負担に対する心拍変動の DFA 解析. 第 38 回日本登山医学会学術集会.2018

小磯 直人, 長澤 純一ら. 自律神経系の応答におよぼす山岳レース(トレイルラン)の影響. 第 169 回日本体力医学会関東地方会.2017

高濱 矩子, 長澤 純一ら. トレイルランレースが酸化ストレスにおよぼす影響. 第 169 回日本体力医学会関東地方会.2017

西尾 聖剛, 長澤 純一ら. 低圧・低酸素下での運動が酸化ストレス指標及び抗酸化酵素の mRNA に及ぼす影響. 第 4 回アジア・太平洋登山医学会/第 37 回日本登山医学会合同学術集会.2017

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：辻川 比呂斗
ローマ字氏名：(TSUJIKAWA, hiroto)

研究協力者氏名：杉山 康司
ローマ字氏名：(SUGIYAMA, koji)

研究協力者氏名：祝原 豊
ローマ字氏名：(IWAIHARA, yutaka)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。