

氏名	たのうえ ゆきや 田上 友季也
学位の種類	博士(スポーツ健康科学)
報告番号	甲第 1942 号
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 17 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 (課程博士)
学位論文題目	自律神経活動に着目した新規運動処方システムの開発
論文審査委員	(主 査) 福岡大学 教授 上原 吉就 (副 査) 福岡大学 教授 檜垣 靖樹 福岡大学 准教授 道下 竜馬 福岡大学筑紫病院 教授 浦田 秀則

内 容 の 要 旨

1. 本論文の目的

健康づくりを目的として運動を行う場合、安全性を保ち、かつ最善の運動効果を獲得するためには、各個人に適した運動強度を決定することが重要である。運動強度を決定するために用いられるゴールドスタンダードな方法は血中乳酸濃度の測定や呼気ガス分析が挙げられるが、これらの測定は侵襲性があること、または分析装置が高額であるなど、実用性に乏しい。そこで、本論文は比較的安価かつ非侵襲的に自律神経活動を評価可能な心拍のゆらぎ（心拍変動）評価による交感神経活動評価に着目して、簡便にかつ適切に運動強度を判定できる実用的な新たな運動処方システムの開発を目的とした。

2. 研究 1・2 の内容

研究 1 および 2 では、心拍変動評価において従来から用いられている交感神経活動の指標である LF/HF（心拍変動を周波数解析することにより得られる低周波成分 [Low-frequency; LF] と高周波成分 [High-frequency; HF] の比）は、運動による交感神経活動の高まりを評価できないという仮説のもと、運動後および運動中における LF/HF の評価を行った。研究 1 では、ランニング運動の前後に心拍変動測定を行い、LF/HF を評価したところ、心拍は運動前に比べて運動後は高い状態であったにも関わらず、LF/HF は運動の前後で変わらなかった。さらに、研究 2 においては自転車エルゴメータによる漸増運動負荷試験中の LF/HF とカテコラミン（交感神経活動が高まると分泌されるホルモン）の変化を比較したところ、カテコラミンは運動強度が高まるにつれて指数関数的に上昇した一方で、LF/HF は低下する傾向が認められた。このことから、従来の心拍変動の交感神経指標 LF/HF は、運動中の交感神経活動を評価できないことが示唆された。

さらに研究 2 では、上記の結果を踏まえて、心拍変動測定から運動中の交感神経活動を評価できる新たな指標の開発を行った。運動によって上昇する心拍は圧受容器反射と呼

ばれる自律神経を介した調節機構により制御されているという点に基づき、圧受容器反射の信号として心拍変動に含まれる低周波成分（Low-frequency; LF成分）に着目して、心拍をLF成分で除したHeart rate/LFを考案した。Heart rate/LFはカテコラミンと同様に指数関数的な上昇を示し、特にノルアドレナリンとの高い正の相関性が認められたことから、Heart rate/LFは心拍変動から評価できる新たな交感神経指標となることが示唆された。

3. 研究3の内容

研究3では、Heart rate/LFを用いた運動強度判定法の検討を行った。運動強度判定に用いられる血中乳酸とカテコラミンの急増点（乳酸性作業閾値、カテコラミン閾値）は近似するという先行研究の結果に基づき、カテコラミンとの高い正の相関性が認められたHeart rate/LFから乳酸性作業閾値やカテコラミン閾値の運動強度を推定できるという仮説のもと、Heart rate/LFが急増するポイント（以下、Heart rate/LF閾値とする）と乳酸性作業閾値、カテコラミン閾値の運動強度を比較した。Heart rate/LF閾値は、乳酸性作業閾値とカテコラミン閾値の運動強度とおおよそ一致しており、代謝亢進や交感神経活動が急激に高まる運動強度を心拍変動測定から推定できることを見出した。

4. 本論文の結論

従来の交感神経指標LF/HFは運動中の交感神経活動を反映していないことが示唆された。さらに、本研究で考案したHeart rate/LFは運動中の交感神経活動を非侵襲的に評価できるだけでなく、代謝亢進や交感神経活動が急激に高まる運動強度を推定できる有用な指標となる可能性を示した。このことから、心拍変動測定によるHeart rate/LFの評価は、従来から運動強度判定に用いられている血中乳酸濃度の測定や呼気ガス分析に比べて、比較的安価で非侵襲的に評価できる実用性な新規の運動強度判定システムとなりうる可能性示された。

審査の結果の要旨

1. 研究の概要

本論文は、従来から運動強度判定に用いられている血中乳酸濃度や呼気ガス濃度の測定における実用性の課題解決のために、比較的安価かつ非侵襲的に自律神経活動を評価可能な心拍変動評価に着目して、運動中の交感神経活動を評価できる指標の検討を行うとともに、実用的な運動強度判定法を開発することを目的とした。

研究1および2では、従来広く用いられてきた心拍変動の交感神経指標が運動中の交感神経活動を評価できないことを明らかにした。この結果を踏まえて、新規の心拍変動指標として心拍と心拍変動の低周波成分（Low-frequency, LF; 圧受容器反射信号を反映している）の比（以降Heart rate/LFと記載）を考案し、運動中の交感神経活動を評価できることを示した。

研究3では、Heart rate/LFを用いて、Heart rate/LFの急増点（以下、Heart rate/LF閾値）から乳酸性作業閾値およびカテコラミン閾値の運動強度を推定できる可能性を示し、実用性の高い運動強度判定法となることが示唆された。

2. テーマの斬新性

心拍変動評価における従来の交感神経指標の有用性は認められていなかった。本研究では、交感神経活動が高まると上昇するカテコラミンと逆行して、運動中の従来の交感神経指標は低下することを明らかにし、従来の交感神経指標が有用ではないことを示した。さらに、心拍と心拍変動の組み合わせることで、運動中のカテコラミンの変化と近似する新たな心拍変動指標を考案した点において、本研究の斬新性が認められる。

3. 研究結果の有用性

心拍変動から交感神経活動を評価できる有用な指標がないとされている中で、新たに運動中の交感神経活動を評価できる心拍変動指標を開発できたことは、心拍変動評価における新たな可能性を広げる知見となると考える。また、新たな交感神経指標を用いて運動強度を判定できるという点で有用性が認められ、従来からの課題であった運動強度判定に対する実用性の課題解決を推し進める知見となることが期待できる。

4. 外部評価

本研究の成果は、以下の学術雑誌に厳正な審査を経て掲載されており、適切な外部評価を得た内容であると判断できる。

①Yukiya Tanoue, Takaaki Komiyama, Hiroaki Tanaka, Yasuki Higaki, Yoshinari Uehara. (2021) Relationship between cognitive function and parasympathetic nerve activity after acute mild to moderate intensity exercise. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 10 (4) 181 – 189. 10. <https://doi.org/10.7600/jpfsm.10.181>

②Yukiya Tanoue, Tomohiro Komatsu, Shihoko Nakashima, Takuro Matsuda, Ryoma Michishita, Yasuki Higaki, Yoshinari Uehara. (2021) The ratio of heart rate to heart rate variability reflects sympathetic activity during incremental cycling exercise. *European Journal of Sport Science*. Open access, 1–10. <https://doi.org/10.1080/17461391.2021.1994652>

5. 主な質疑応答

本学位申請論文の審査に際し、以下の討議が行われた。

Q. Heart rate/LF 閾値の判定は数学的に決定した方が望ましいが、検討はしているか。

A. 現在はアナログ的に域値決定をしているが、バイアスの面からも数学的な域値決定を今後の課題として検討していく予定である。

Q. Heart rate/LF 閾値の判定の際にwatts数をlog値に変換するのは恣意的ではないか。

A. 先行研究の方法に基づいて採用したが、判定の際の条件については今後の課題として検討していく必要があると考えている。前述の数学的な域値決定を検討していくことでも、解決できると考えられる。

Q. 判定ができる対象者の限界があるのではないか。

A. ペースメーカーを装着している患者や不整脈、自律神経障害がみられる患者に対しては、判定が難しいのではないかと考えている。

Q. 酸素摂取量と二酸化炭素排出量との相関図において、弓なりになる理由は何か。

A. 酸素摂取量と二酸化炭素排出量は運動負荷量の増大に伴い比較的直線的に増加するのに対してHeart rate/LFは非線形な変化を示すため、弓なりになっていると考えられる。

Q. Heart rate/LF閾値の判定は、ランニング運動においても可能か。

A. ランニング運動による検証を行った際も、Heart rate/LFの急増点を確認しており、ランニング運動においてもHeart rate/LF閾値の判定は可能であると考えている。

Q. LFが低下する理由は圧受容器反射が下がっていくからと考えてよいか。

A. 圧受容器反射の機能としての心拍や血圧調節自体は運動中でも維持されるものの、その反射による心拍や血圧が変化する範囲（動作範囲）は低下することが報告されている。そのため、LF成分の低下は圧受容器反射による心拍の動作範囲の低下を反映していると考えられる。

Q. Heart rate/LF閾値の判定は数値での判定も可能か。

A. いくつか検討はしているものの、有用な基準値は明確にできておらず、今後の課題として検討していく予定である。

Q. Heart rate/LFは乳酸と同様に産生と除去のような関係が成り立つのか。

A. 運動によって乳酸は産生されるが除去が産生を上回る状態は血中乳酸濃度が比較的安定し、除去が産生に対して追い付かなくなると上昇する関係にあると考えられる。一方で、漸増運動のような場面において、継続的な心拍の上昇に対して圧受容器反射による心拍上昇の制御が上回る状態が継続されることはなく、その制御レベルを少しずつ低下させていくと考えている。そのため、LF成分も継続的に低下していく。圧受容器反射の制御レベルの低下が下限に達するとHeart rate/LFは上昇すると考えられる。このことから、Heart rate/LFにおいては乳酸の産生と除去のような関係は成り立たないとする。

6. 審査委員会の結論

本学位申請論文は、口頭試問のいずれの質問にも適切で明確な回答を得た。よって、審査委員合議の結果、試験は合格とした。