

漸増漸減型自転車エルゴメーター負荷への瞬時心拍応答

山崎 健(新潟大学教育人間科学部)、蘇日塔拉図(新潟大学自然科学研究科)

Summary

In this study we examined the heartbeat response to gradual increase-gradual decrease load type in bicycle ergo-meter work. In spite of same work load-heartbeat response was different between gradual increase load stage and gradual decrease load stage. In every condition of decrease stages the load decreased but heartbeat did not decrease in most subjects. As a result of this phenomenon the correlation coefficient between load and heartbeat decreased remarkably.

In this stage LF/HF ratio of instantaneous heart rate variation (IHRV) decreased in most subjects. As peak load increased with PWC130, PWC150, PWC170 conditions, this tendency became stronger. Therefore we can consider that LF/HF ratio of IHRV and heart-beat rate are related to some extent.

1 はじめに

山地(1992)によれば、最大酸素摂取量は様々な対象について数多くの研究がなされており、負荷漸増時の心拍応答については非常に多くの報告がなされている。

しかし、負荷漸減中の心拍応答についてはあまり報告されていない。しかし、クロスカンントリー・スキーでは、競技ルールで全コースの平地・登り・降りの距離がそれぞれ3分の1であることが決められており、それにともないアップダウンのある運動遂行中には負荷漸減型のパターンも発生する。

山崎ら(2005)は、自転車エルゴメーターでの反復される漸増漸減型負荷時の心拍変動について、Akselrodら(1981)がスペクトル解析で示した0.1Hz付近の血圧反射性成分と0.3Hz付近の呼吸反射性成分について検討し、負荷漸増時と漸減時では心拍数の変動とともに瞬時心拍変動のスペクトル成分も大きく変動していること。また、10分1セットで3回反復される負荷-心拍応答について各セットから求められるPWC(Physical Work Capacity)170の推定値

が異なることを報告した。

また山崎ら(2007)は、自転車エルゴメーターでのピーク値PWC150相当の漸増漸減型負荷への瞬時心拍応答について検討し、負荷ピーク後には負荷が減少しているにもかかわらず心拍数が低下していないことを報告した。

山地は(1981)、運動中に最高心拍が現れないような超最大作業運動実施時には、負荷終了後に心拍数のピークが現れることを指摘したが、これは短時間の作業での現象である。

早野(1996)は、心拍変動による心臓自律神経活動評価の原理を、走っている車のアクセルとブレーキにたとえ、交感神経活動と心臓迷走神経活動が異なる伝達特性を有し、交感神経による心拍数調節は0.15Hz以上(周期6.7秒以上)であるのに対し、心臓迷走神経は1Hz前後の心拍変動まで伝達することを指摘している。

このことは、負荷ピーク後に心拍数が減少しない要因として、1)ピーク時までの酸素需要量の補填のため、2)伝達特性の遅い交感神経活動の残存の影響、の両者が関与している可能性が考えられる。

本研究は、この漸増漸減型負荷変動での負荷

ピーク後に見られた心拍上昇について、ピーク時運動強度をPWC130、PWC150及びPWC170相当に変化させ、運動強度の増加にともなう負荷心拍応答について瞬時心拍変動を含め詳細に検討しその基礎的知見を得ようとするものである。

2 方法

被験者は健康な運動部所属学生7名でそのプ

ロフィールを表1に示す。

被験者のピーク時運動時強度(Watts)の推定は、PWC170テストのプロトコールと同様に、自転車エルゴメーターEC1600(キャットアイ)での3分毎に3段階に増加する9分間のステップ負荷により負荷-心拍応答の一次回帰式から心拍数130bpm、150bpm及び170bpm(心拍/分)相当の負荷を求めた。

表1 被験者のプロフィール

	Height	Weight	PWC170 (r^2)	Peak (W)	Sports
Sub.A	170	68	279(0.92)	215	Soccer
Sub.B	169	61	329(0.65)	230	Soccer
Sub.C	165	62	367(0.95)	245	Rugby
Sub.D	166	61	242(0.93)	170	Volleyball
Sub.E	181	68	282(0.88)	220	Soccer
Sub.F	174	64	245(0.92)	190	Sprinter
Sub.G	177	70	262(0.89)	190	Soccer

3セット繰り返される漸増漸減型のピーク負荷の決定は、事前に求めたPWC相当の負荷で試行し、最初のセットのピーク時心拍数が10bpmほど低くなるよう設定した。

被験者は3分間の座位安静時にメトロノームにより4秒で1回の呼吸制御(0.25Hz)を行い、その後自転車エルゴメーターで50W負荷3分間のウォーミングアップ後、1セット10分計3セット30分間の漸増漸減型ペダリング運動を行った。

自転車エルゴメーターACTIVE10(竹井機器工業)は、パーソナルコンピューターによるRS232C制御により漸増漸減型負荷パターンを設定した。

負荷は、ピーク時まで30秒毎に5分間漸増し

その後30秒ごとに5分間漸減する10分間を1セットして3セット反復した。また10秒ごとの負荷量と平均心拍数をコンピューターに記録した。

瞬時心拍変動における呼吸反射性の影響を考慮して、被験者には運動中1分60回のペダリングにあわせて呼吸する(2秒に1呼吸でほぼ0.5Hz)ように指示した。

負荷心拍応答は、ACTIVE10より10秒間ごとのデータからソフトウェア(Microsoft: Excel)を用いて回帰分析を行い、一次直線回帰式及び決定係数(r^2)を求めた。

瞬時心拍変動は、ハーレートメモリS810i(Polar)を用いて胸部電極よりトランスミッターで心電図R-R間隔を記録し、ソフトウェア

(Polar: Precision Performance 4.0) を用いて単純高速フーリエ変換 (FFT) を行い 0.1Hz 付近の血圧反射性成分 (LF 成分: 0.04~0.15Hz) と 0.3Hz 付近の呼吸反射性成分 (HF 成分: 0.15~0.4Hz) を求め、交感神経系の活動を反映するとされる LF/HF 比 (%) を算出して分析した。

3 結果及び考察

(1) 負荷心拍応答の回帰分析

事前に測定された負荷-心拍応答から回帰分析により PWC170 の推定値を求めた。その際の決定係数は一例を除きいずれも 0.85 以上で非常に信頼性の高いものであった。

ピーク時負荷 PWC130 相当、PWC150 相当、PWC170 相当の負荷量及び心拍数の変動例を図 1-3 に示す。いずれの被験者も、漸増漸減型負荷の反復にともないセットが進むにつれて心拍数が増加しかつ負荷ピーク後に心拍数の上昇が観察された。この傾向はピーク時負荷 (Watts) が高くなるほど顕著であった。また、負荷漸増時と漸減時の負荷心拍応答の回帰分析により求めた決定係数 (r^2) は仕事量が同一であるにもかかわらず、漸増時よりも漸減時に著しく低下する傾向が見られた。負荷ピーク前後の 2 分 30 秒の負荷心拍応答の 1 例を図 4 に示す。

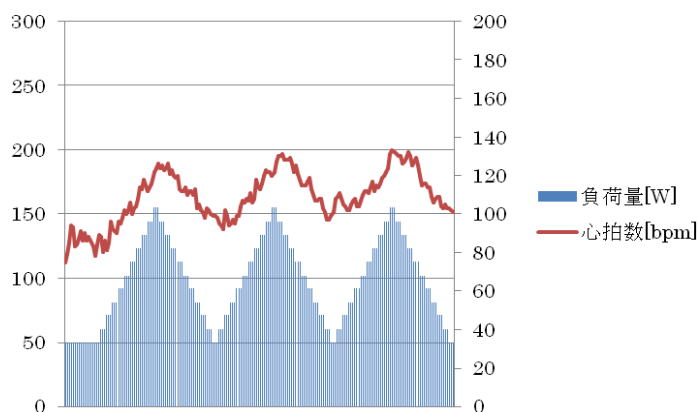


図 1 運動時の負荷と心拍数変動例 (Sub. A : PWC130)

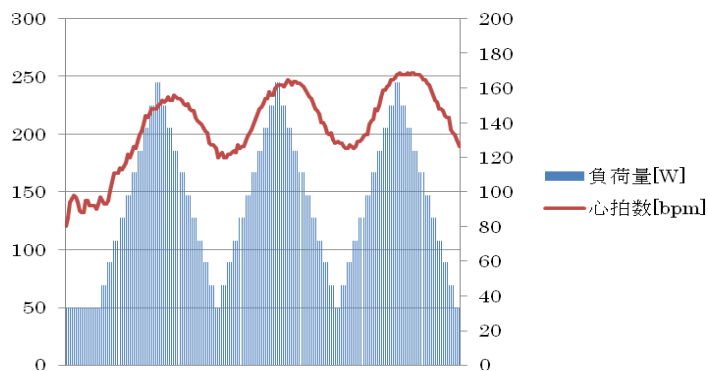


図2 運動時の負荷と心拍数変動例 (Sub.C : PWC150)

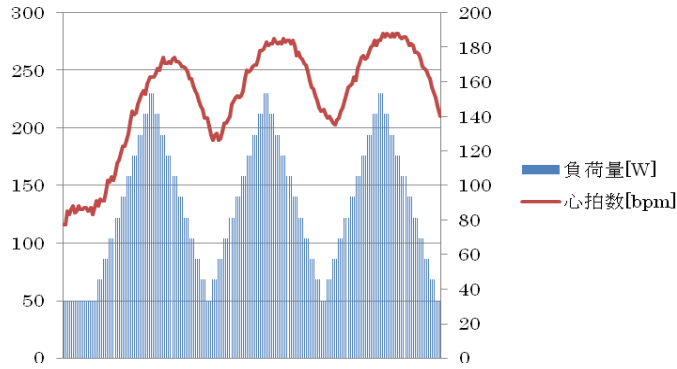


図3 運動時の負荷と心拍数変動例 (Sub.B : PWC170)

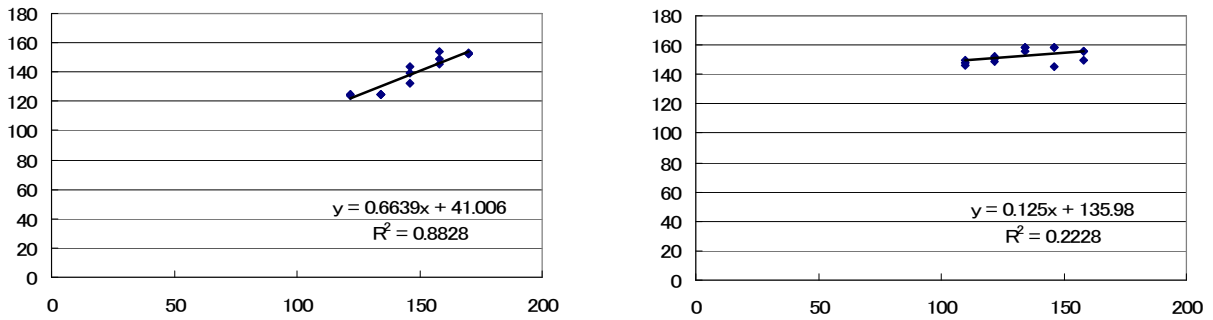


図4 負荷ピーク前後2分30秒間の負荷心拍応答例 (Sub.E : PWC170)

全被験者の回帰分析より得られた負荷ピーク前後2分30秒ごとの決定係数の継時的変化を、PWC130相当、PWC150相当、PWC170相当の条件ごとに図5-7に示す。

全体的に、負荷ピーク前の決定係数は高くピーク後に低下を示しており、この傾向はピーク時負荷がPWC130、PWC150、PWC170と増加するのにもない強くなった。

以上の結果より、負荷漸増時と負荷漸減時における心拍応答の様相の違いは、負荷ピーク後に負荷が減少するにもかかわらず心拍数が低下していないことが大きな要因と考えられる。

負荷ピーク後に心拍数が減少しない要因とし

て、1) ピーク時までの酸素需要量の補填のため、2) 伝達特性の遅い交感神経活動の残存の影響、の両者が関与している可能性が考えられる。

PWC130というLT(血中乳酸2.3Mmol/L)以下の運動強度よりもPWC170というOBLA(血中乳酸4Mmol/L)を超えると推定される運動強度でこの傾向が強くなることから、運動強度が高くなるにつれ酸素需要量の増大とそれを支える心拍数上昇のための交感神経系の活動が強くなり、早野の指摘する伝達特性の遅れとあいまってピーク後の負荷漸減時にも心拍数が低下しないという可能性も推察される。

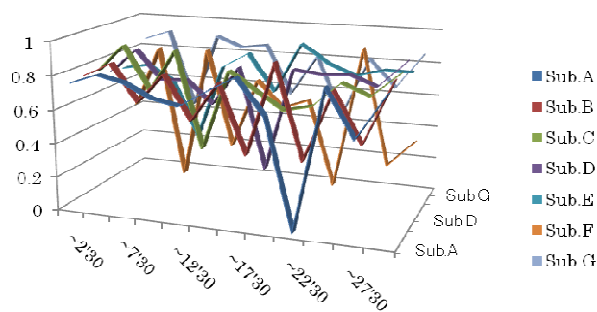


図5 全被験者の2分30秒ごとの決定係数の変化 (PWC130条件)

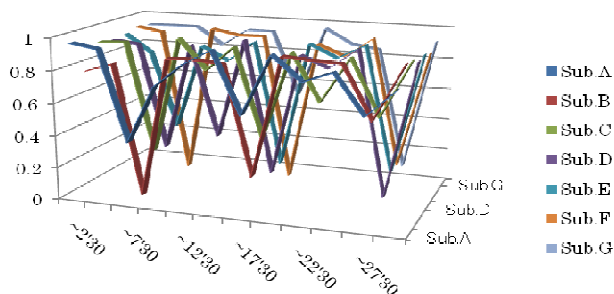


図6 全被験者の2分30秒ごとの決定係数の変化 (PWC150条件)

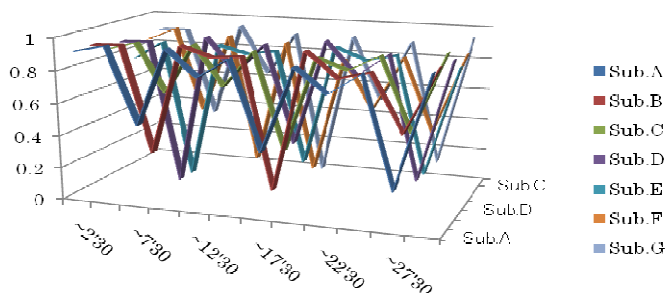


図7 全被験者の2分30秒ごとの決定係数の変化 (PWC170条件)

定常負荷での運動の継続的实施においてもLTレベルを超える運動強度の場合には心拍数が上昇することはよく知られており、山地(1981)はStrandellやHellstomのデータを引用し、心拍数が120~130拍/分以下の作業では実質的

な定常状態が一時的に現れるが、それ以上の負荷作業では定常状態の出現は起こりそうもない、と指摘している。

鍋倉ら(1991)は、比較的強い一定強度の運動の長時間実施により、心拍数や一回拍出量が

運動初期の定常状態からやがて漸増や漸減を起こす現象 (cardio-vascular drift : CVD) について、被験者の運動経験や有酸素能力に応じて異なることを指摘した。また、4分間1周期で5回反復される正弦波負荷運動時の心拍応答特性 (追従性) が、有酸素性トレーニングの実施により改善されることを報告した (2007)。

本研究においても、継時的な3セットの漸増漸減負荷の反復に伴い、すべての被験者において心拍数の増加傾向は強くなった。また、ピーク時負荷の高い条件ほど継時的な増加があり、かつ心拍ピークの追従性の遅れが見られた。

PWC 条件ごとの例を図8に示す。

一方、決定係数の変動はこれに対応したような継時的な傾向はみられていない。

このことから、負荷漸減時の心拍数上昇のメカニズムにはさらに幾つかの因子が複雑に関わっているものと推察される。

(2) 瞬時心拍変動のスペクトル解析

中村 (1994) は、Yamamoto らの換気閾値の 30%~110% に相当する 5 種類の運動強度と心拍変動指標 (HI、LO、LO/HI) との関連を引用し、非常に弱い運動は「副交感神経系有意」、中くらいの運動は「どちらともいえない」、強い運動は「交感神経系が賦活する」という対応可能性を指摘した。そして、心拍変動を用いた自律神経活動の評価法について (2001)、心拍変動の FFT 法 (高速フーリエ解析法) では、0.15Hz 以上を HF (高周波成分)、0.05-0.15Hz を LF (低周波成分)、0.05Hz 以下を自律神経系が関与しない VLF (超低周波成分) として、HF は副交感神経系活動+ α (誤差) を、LF は副交感神経系活動+交換神経系活動+ α として、LF/HF 比が交感神経系活動を反映する可能性を指摘した。

山地ら (1993) は、トレッドミル走を用いて最大酸素摂取量の 30%、50%、70%、90% 及び 100% と 8 分間ずつ増大する負荷テストを行い、そのパワースペクトルを解析し、Lo、Hi および Lo/Hi 比は運動強度の増大とともに減少することを報告した。

負荷ピーク後に心拍数が低下しない現象が、酸素需要量の補填と伝達特性の遅い交感神経系の影響の残存と仮定するならば、負荷ピーク前後の瞬時心拍変動のスペクトルはピーク強度や継時的反復実施と関連してどのような変容を示すのであろうか。

本実験での 30 分間の負荷漸増漸減時の 2 分 30 秒ごとの心拍変動のスペクトル解析結果の 1 例を図 9-13 に示す。(▲マークはピーク後の負荷漸減時 2 分 30 秒区間)

ピーク時負荷が PWC130 相当の場合は、各セットの負荷ピーク後漸減時の LF/HF 比の変動に一定の傾向は見られていない。(図 9、図 10) これに対してピーク時負荷が PWC170 相当の場合には 2 例を除き LF/HF 比の低下が見られ、特に心拍上昇と追従性遅れの大きい 3 セット目は全被験者でピーク後漸減時の低下が見られた。

(図 11 : PWC150 条件、図 12 : PWC170 条件、図 13 : PWC170 条件)

PWC170 条件では、LF/HF 比低下の要因は 5 例が LF 成分の低下、2 例が HF 成分の上昇であった。

HF 成分は、PWC150 や PWC170 条件においてピーク前の負荷漸増時に減少し漸減時にさらに減少するケースが多いが Sub.B、Sub.F は 3 セット目の漸減時にはあまり変動せず逆に増加する場合もみられた。

またピーク後漸減時以外の区間では LF/HF 比の増減に対応して拮抗的に HF 成分が増減する区間もみられたが、協同的に増減する場合も

あり一定の傾向はみられなかった。

以上のことから、HF成分とLF/HF比は、安静時には機械論的に単純に「拮抗的」に活動する場合も考えられるが、運動実施時には伝達特性の違いによる位相遅れや呼吸反射性の影響、

ピーク前の酸素需要量の補填など他の様々な要因が複雑に関連して変動している可能性が考えられる。

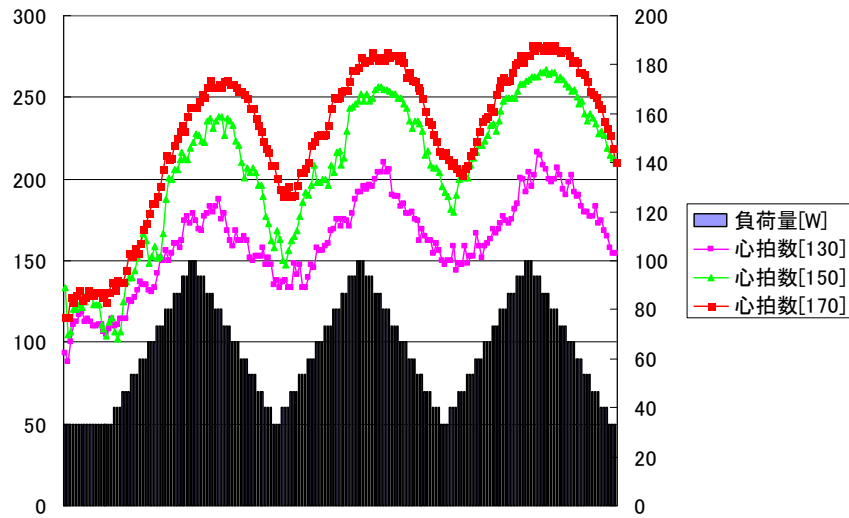


図8 負荷ピークの違いによる心拍数ピークの追従性の遅れ (Sub.B)

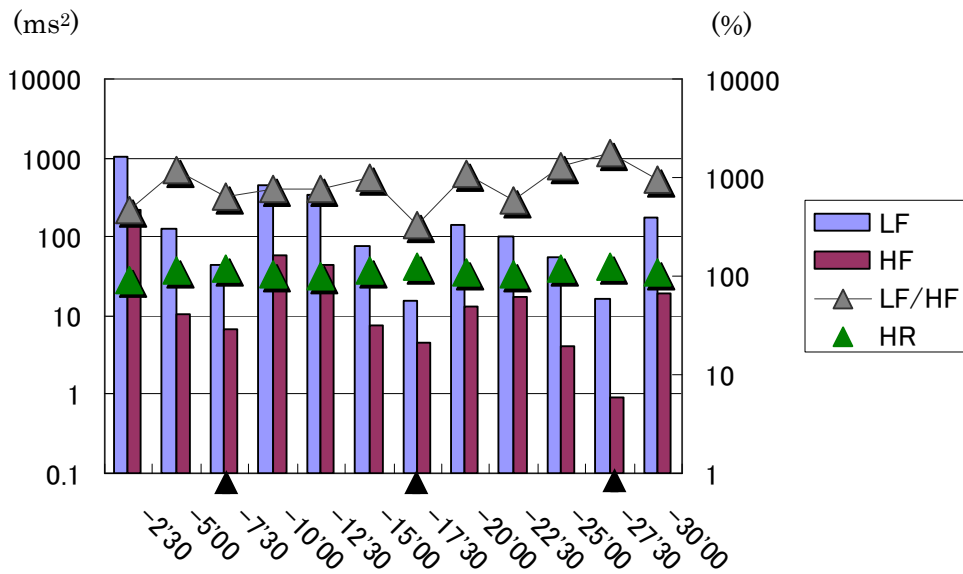


図9 運動実施中の瞬時心拍変動スペクトル (Sub.A : PWC130)

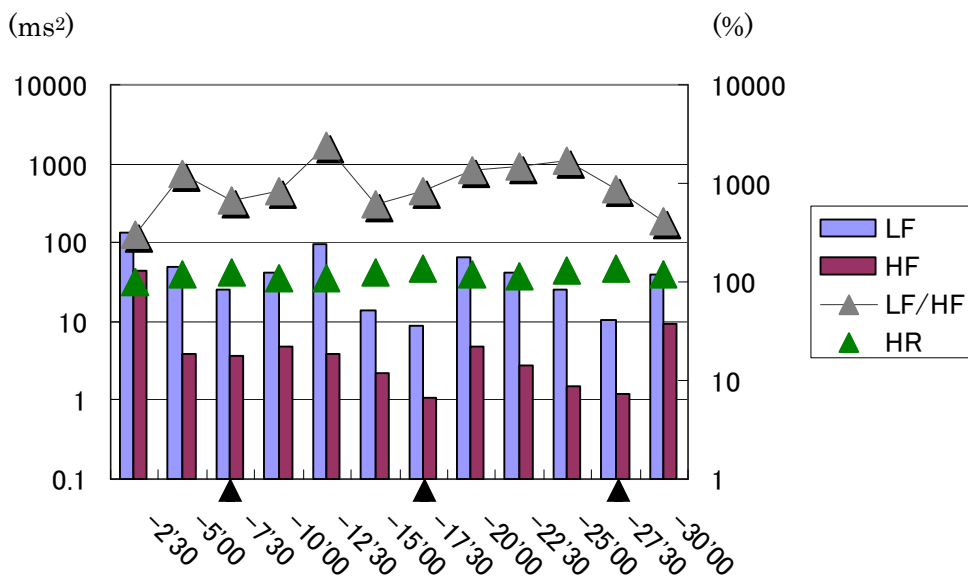


図10 運動実施中の瞬時心拍変動スペクトル (Sub.E : PWC130)

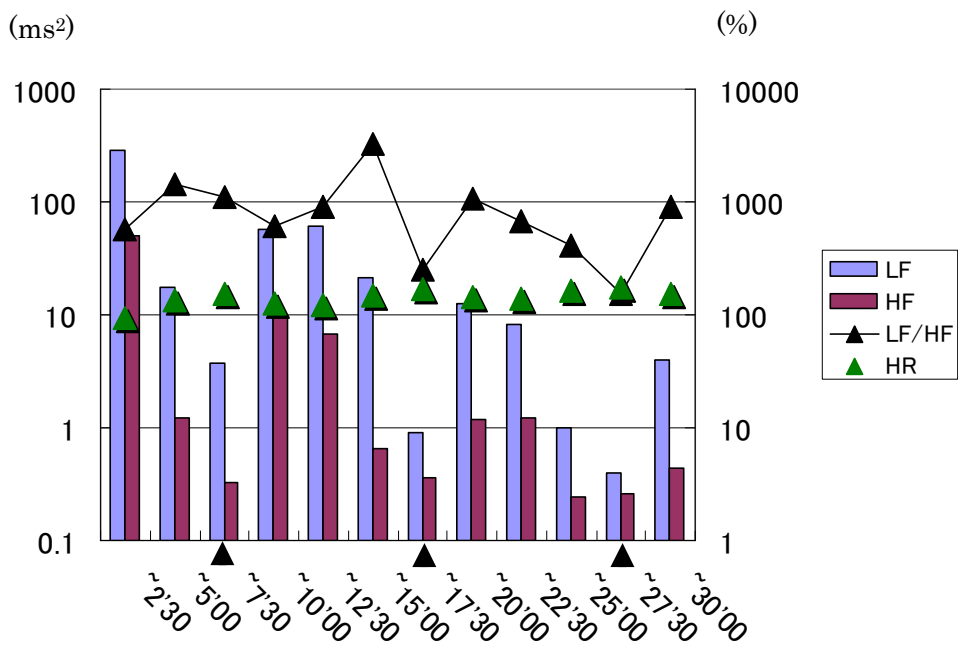


図11 運動実施中の瞬時心拍変動スペクトル (Sub.B : PWC150)

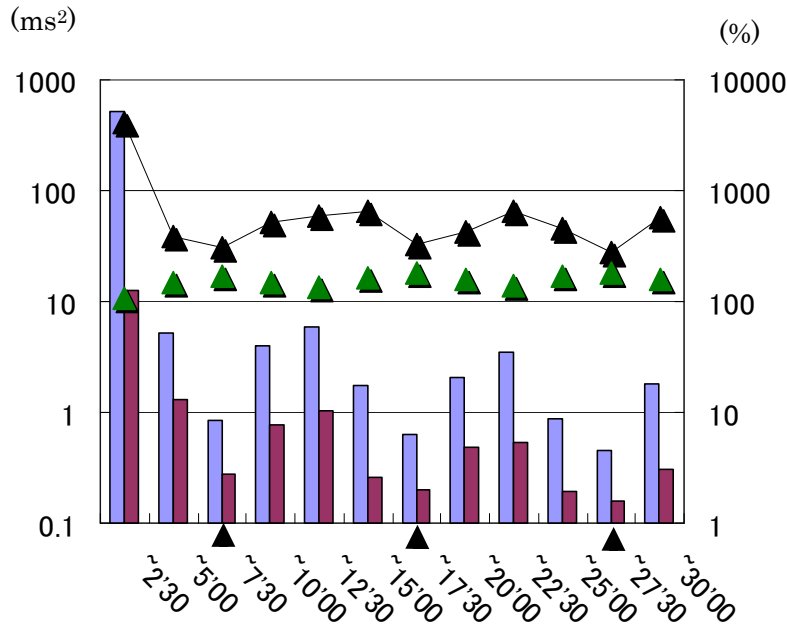


図12 運動実施中の瞬時心拍変動スペクトル (Sub.D : PWC170)

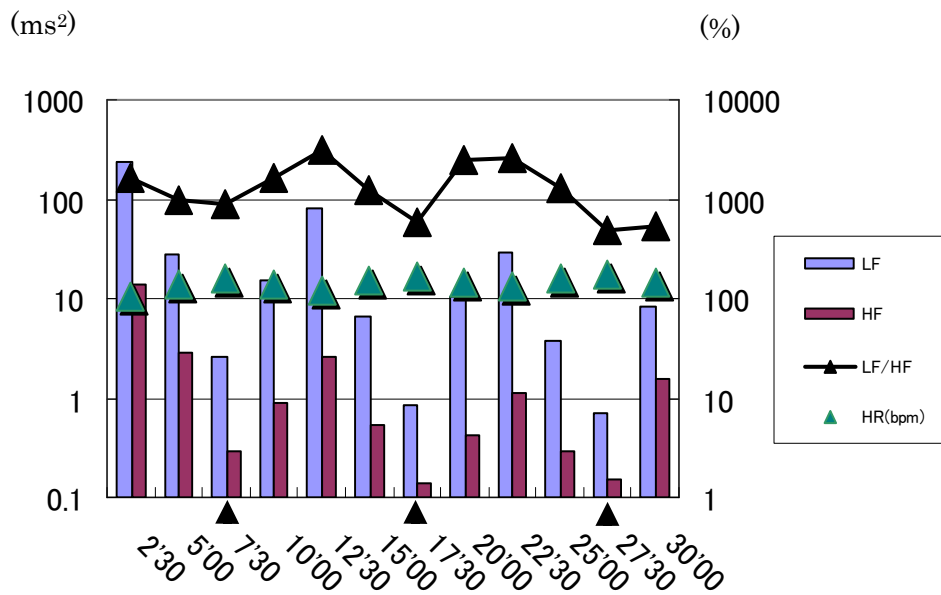


図13 運動実施中の瞬時心拍変動スペクトル (Sub.F : PWC170)

負荷漸減時の心拍数上昇という現象についての瞬時心拍変動のスペクトル解析では、運動強度がLT(血中乳酸濃度 2.3Mmol/L)以下と推

定されるPWC130条件での軽度の運動実施ではあまり特定の傾向が見られず、強度がOBLA(血中乳酸濃度 4.0Mmol/L)を超えると推定さ

れるPWC150条件やPWC170条件の3セット目でLF/HF比の低下が観察された。

PWC150条件やPWC170条件の3セット目で、交感神経系の活動を反映すると推定されるLF/HF比が低下しているにもかかわらず心拍数が低下しない背景には「酸素需要量補填システム」が優位に働き、PWC130条件では伝達特性の遅い「交換神経活動システム」と「酸素需要補填システム」が混在、拮抗しているため特定の傾向が見られないと推察することもできる。

今後、継時的にセットが進むにつれて心拍ピークの追従性が遅れる現象を含め、運動強度のパターンを変化させ呼気ガス分析による酸素需要量の変動や1回拍出量(Stroke Volume)等の指標も含め総合的に検討してゆくことが必要と思われる。

4 まとめ

本研究では、自転車エルゴメーターによる漸増漸減型負荷変動に対する経時的心拍応答について、回帰分析と瞬時心拍変動を求め以下の結論を得た。

- ・ 負荷ピーク前2分30秒の心拍応答の回帰分析から求めた決定係数は非常に高い傾向にあった。
- ・ ピーク後2分30秒は、負荷が減少しているにもかかわらず心拍数は低下せず、その結果決定係数は著しく低くなった。
- ・ その際の瞬時心拍変動スペクトル解析の結果、LF/HF比は、負荷漸減時に低下する傾向がみられこの傾向は負荷ピーク値の上昇にともない強くなった。
- ・ 負荷ピーク後漸減時のHF成分はいずれも減少している傾向にあるが、増加する例もみられLF成分との相対的關係でLF/HF比の

増減が生じた。

- ・ HF成分とLF/HF比は、安静時には拮抗的な副交感神経(心臓迷走神経)活動と交感神経活動を反映するとされているが、運動実施時には他の要因も含め複雑に変動しているものと思われる。

本研究の一部は、日本体育学会第58回大会(神戸大学:2007年9月)で発表した

<文献>

1. Akselrod S, et al. (1981): Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of heart-to-beat cardiovascular control, *Science* 213, pp.220-222
2. 鍋倉賢治・曾根涼子・藤井宣晴・池上晴夫 (1991)、長時間運動中の心周期分画の変動と有酸素能力との関係、*体育学研究* 第36巻1号、pp.53-62
3. 鍋倉賢治・吉岡利貢・中垣浩平・辻村真一・仙石泰雄 (2007)、正弦波運動負荷時の心拍数応答におけるトレーニング効果、*日本運動生理学雑誌*、第14巻第2号、pp.29-39
4. 中村好男 (1994)、心拍変動パワースペクトルからみた自律神経活動、*体育の科学* 第44巻6号、pp.432-436
5. 中村好男 (2001)、心拍変動を用いた自律神経活動の評価法、加賀谷・中村編「運動と循環」、NAP、pp.93-106
6. 早野順一郎 (1996)、心拍ゆらぎと自律神経、*Therapeutic Research* Vol.17(1)、pp.163-235
7. 山崎 健・杉本英夫・加名生さやか・馬場裕子 (2005)、瞬時心拍変動による運動経過の記録、新潟大学教育人間科学部紀要・自然科学

編 第7巻2号、pp.157-169

8. 山崎 健・馬場裕子・ソリタラト・岡本芳三
(2006)、長距離ランニング中のペース変化と
瞬時心拍変動、新潟大学教育人間科学部紀
要・自然科学編 第8巻2号、pp.109-123
9. 山崎 健・蘇日塔拉図(2007)、反復される漸増
漸減型自転車エルゴメーター負荷への心拍応答、
新潟大学教育人間科学部紀要・自然科学編 第
9巻2号、pp.55-62
10. 山地啓司(1981)、運動処方のための心
拍数の科学、大修館書店、pp.15-36
11. 山地啓司(1992)、最大酸素摂取量の科
学、杏林書院、pp.3-54
12. 山地啓司・梅野克身・塚原勝行・川崎匡
(1993)、トレッドミル走行時における心拍変
動のパワー・スペクトル解析、J.J.Sports
Sciences Vol.12(8)、pp.531-537