

瞬時心拍変動による運動経過の記録

山崎 健¹⁾、杉本英夫¹⁾、加名生さやか²⁾、馬場裕子³⁾

1)新潟大学教育人間科学部 2)(株)ルネサンス 3)新潟大学大学院自然科学研究科

1.はじめに

運動実施にともなって酸素需要量は増大し、循環系では一回心拍出量の増加とともに心拍数の増加が見られることは良く知られている。

加賀谷²⁾は、運動時の循環調節メカニズムについて、循環の中核としての心臓、血液を分配する血管、血液と物質を交換する組織、その全体を調整するシステム、があり、循環調節におけるセントラルコマンド(中枢司令)と代謝性因子の影響について、運動終了後、心拍数は急速に低下するのに対して、血圧は高い値を維持することを指摘した。

しかし、実験室で測定される拘束的方法は、運動負荷変動等は一定に制御できるものの、実際の運動場面の複雑な変化には対応できない。

この点で、運動経過の記録に腕時計型の心拍メモリーを用いる方法は、非拘束的であるため通常の練習時や試合時にも測定が可能であり、様々な場面に応用することができる。

山崎ら⁶⁾は、体操運動実施時の心拍数の変化を記録し、同一の運動実施であっても、実施者の持久的能力や運動実施のレベル(運動振幅や速度)によって心拍変動が異なることを指摘した。(図1)

しかし、この心拍メモリーは、5秒間の平均心拍数を算出したものであり、運動時に刻々と変化する心拍応答は十分には分析

できない。

この心拍数の瞬時的変動は、1981年に AkseI rodら¹⁾が、高速フーリエ変換(FFT)によるイヌの心拍変動の定量的パワースペクトル解析を初めて行い、その後ヒトにおいても0.1Hz付近に血圧反射性の、0.3Hz付近に呼吸反射性の成分がみられ自律神経系の影響を受けていることが指摘されている。中村³⁾は、1拍ごとの心拍動リズムの「ゆらぎ」現象が、自律神経系における交感神経系と副交感神経系の影響を反映するとし、心拍変動のスペクトル解析による自律神経系活動の評価方法を概説した。

山崎らは、1拍ごとの間隔(心電図のR棘 R棘間隔)を記録できる瞬時心拍メモリーを用いて、走運動時の1拍ごとの変動を検討した。そして、同一ペースの走行(1Kmあたり6分)で平均心拍数もほぼ150拍/分で推移をしているにもかかわらず、副交感神経活動を反映するとされるHF(0.04-0.15Hz)成分、交感神経及び副交感神経活動をあらわすとされるLF(0.15-0.4Hz)成分、交感神経活動を反映するとされるLF/HF比が、10分毎に微妙に変動していることを明らかにした。(図2:未発表データ)

運動実施時には、交感神経系の活動が圧倒的に優位とされ、また安静時の60~70拍/分に対して150~200拍/分に増加し、心拍動間隔(R R間隔)が大きく減少するなどの理由から、運動時の心拍変動に関する報告はほとんどなされていない⁴⁾⁸⁾。

しかし、負荷漸増時には、心拍数が急増しR-R 間隔は変動しにくくなると考えられるが、例えば登山で登りが終わっての平坦や降りなどの負荷軽減時には「開放感」や「爽快感」等の感覚が生ずることも経験的に指摘されている。

本研究では、この運動時の瞬時心拍変動に関する基礎的知見を得るため、自転車型エルゴメーターを用い、漸増漸減型負荷変動パターンの反復実施に対する負荷 心拍応答経過を周波数スペクトル解析の手法をもちいて検討しようとするものである。

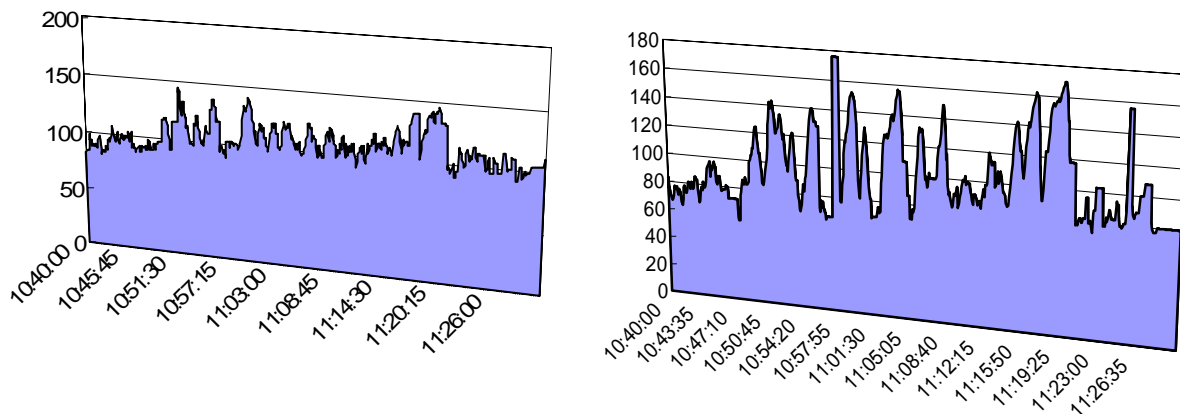


図1 同一運動（体操）実施時の被験者による心拍応答のちがい

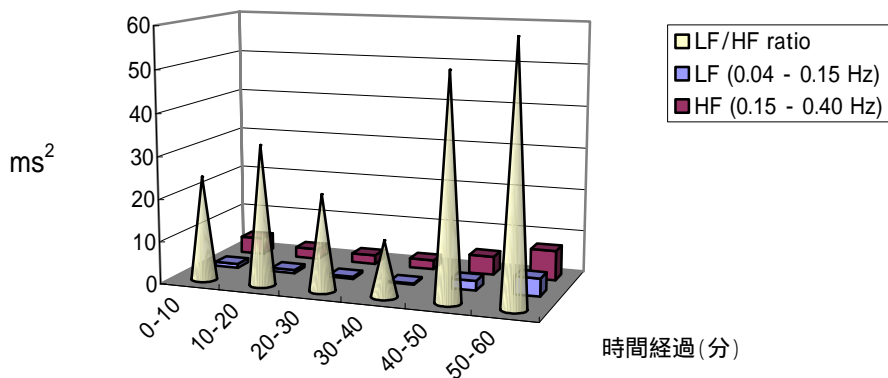


図2 10Km走行中の瞬時心拍変動ならびに周波数成分の変化

2. 方法

被験者は、新潟大学学友会運動部に属する健康な男子学生6名であり、事前に自転車

型エルゴメーターを用いた三段階漸増型負荷テストを行い、負荷 心拍応答の一次回帰式より外挿法により心拍数170 / 分（170bpm）時の仕事量（PWC170）を推定し

た。

負荷パターンは、竹井機器工業社製自転車エルゴメーター・Avtive10を、RS232C制御のプロトコルでパーソナルコンピュータよりソフトウェアで制御し、50Watts負荷で3分間ペダリングした後、6分間まで漸増してピークとなり、その後4分間で漸減する10分間のステージを3回反復するパタ

ーンを用いた。負荷パターンの一例を図3に示す。

各ステージのピーク時の仕事量は、被験者のPWC170の推定値よりおよそ150～160 bpmとなる値を推定した。被験者の概要と実際の運動実施中のピーク負荷時に観察された最高心拍数 (bpmMax.) を表1に示す。

表1 各被験者の概要とPWC170 (Watts) 及びステージのピーク値

	Age	Height	Weight	PWC170	Peak値 (bpmMax.)	Sports
Sub.A	21	171cm	61Kg	221W	160W (164)	Hand Ball
Sub.B	20	166cm	62Kg	170W	160W (163)	Base Ball
Sub.C	20	171cm	64Kg	243W	180W (163)	Hand Ball
Sub.D	21	169cm	64Kg	262W	180W (143)	Hand Ball
Sub.E	20	183cm	71Kg	364W	240W (156)	Soccer
Sub.F	21	180cm	70Kg	382W	240W (174)	Hand Ball
Average	20.5	173cm	65Kg	274W		

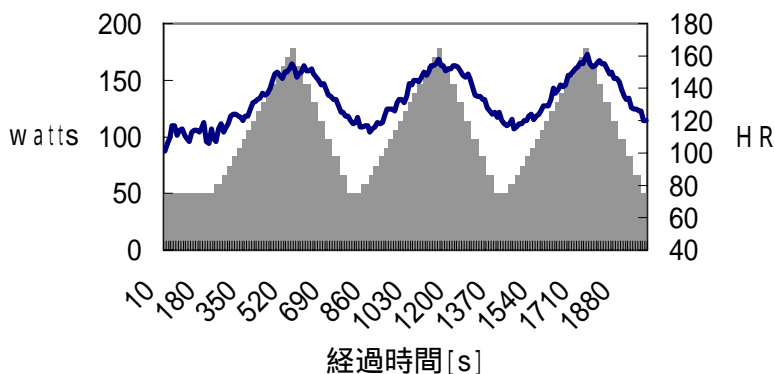


図3 運動負荷パターンと心拍数変化の例 (Sub.B)

心拍数は、胸部双極誘導法により日本電気三栄社製生体アンプで増幅し、SONY社製FMデータレコーダーに記録した後、パーソナルコンピュータでA/D変換し瞬時心拍数を求めた。

瞬時心拍数の解析は、Polar社製ソフトウ

エア・Precision Performance を用いて、VLF (0.00-0.40Hz) 成分、LF (0.04-0.15Hz) 成分、HF (0.15-0.40Hz) 成分及びLF/HF ratioを算出した。

3. 結果及び考察

各被験者別の瞬時心拍数変動

(Instantaneous Heart Rate Variation: IHRV) 及び3つのステージの漸増時及び漸減時の周波数成分のスペクトル解析結果を図4-15に示す。

交感神経系活動と副交感神経系活動の両者を反映するとされるLF成分及び副交感神経系活動を反映するとされるHF成分は出現頻度時間パワー (ms^2)、交感神経系活動を反映するとされるLF/HF ratio は%で表示してある。(被験者Dのみ絶対値表示)

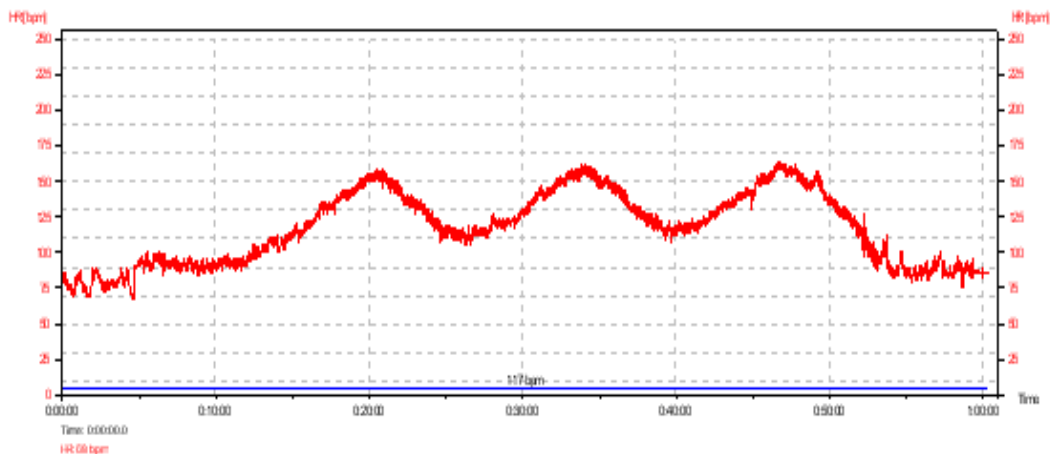


図4 ペダリング運動時の瞬時心拍数変動 (Sub.A)

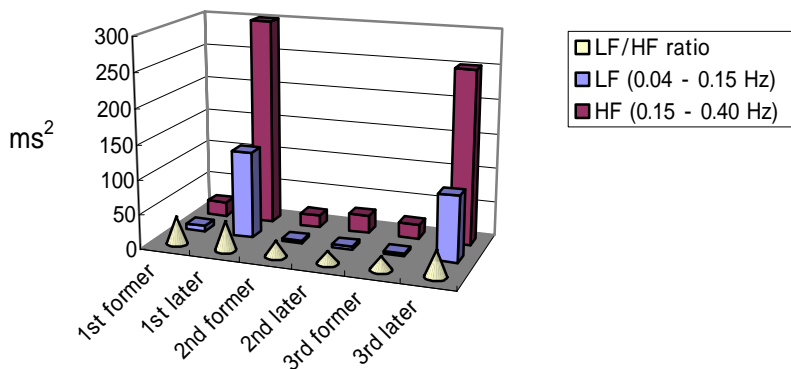


図5 心拍変動のスペクトル解析結果 (Sub.A)

表2 被験者Aの各周波数成分

	1st former	1st later	2nd former	2nd later	3rd former	3rd later
LF (0.04 - 0.15 Hz) ms^2	8.35	125.68	3.93	4.46	3.98	94.95
HF (0.15 - 0.40 Hz) ms^2	21.14	299.55	17.66	25.94	20.85	250.83
LF/HF ratio (%)	39.6	42	22.3	17.3	19.1	37.9

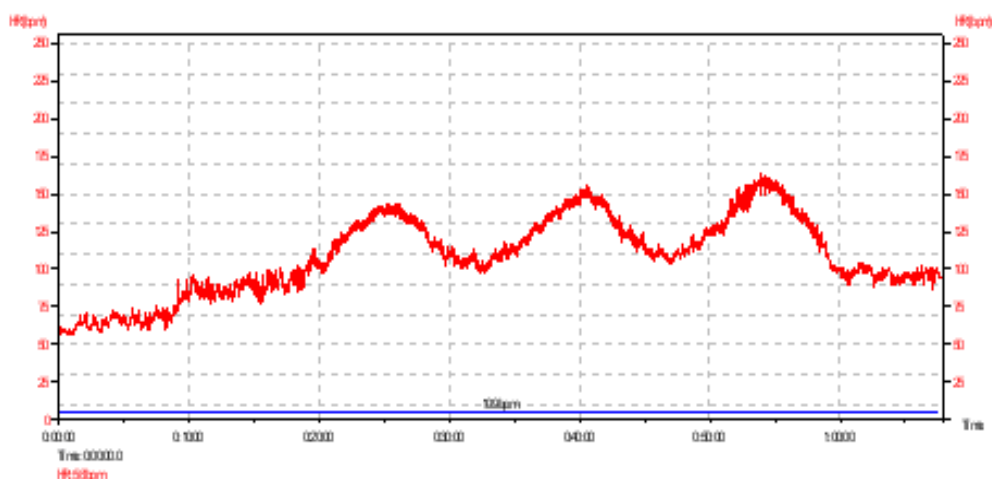


図6 ペダリング運動時の瞬時心拍数変動 (Sub.B)

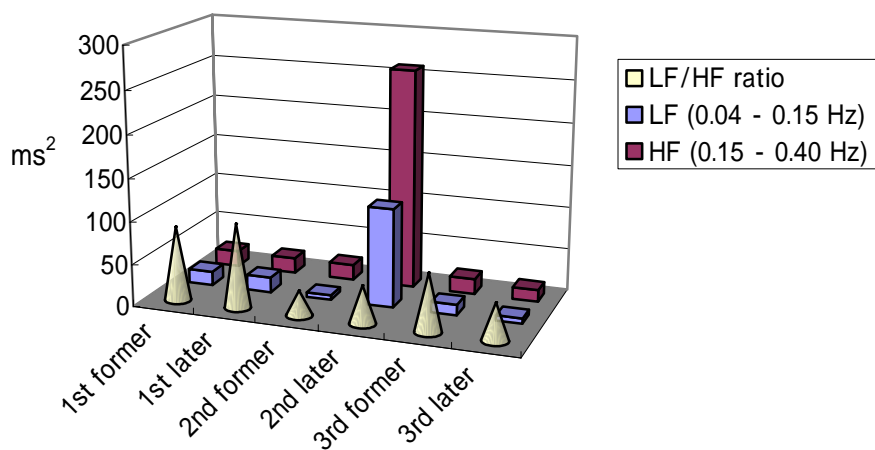


図7 心拍変動のスペクトル解析結果 (Sub.B)

表3 被験者Bの各周波数成分

		1 st former	1 st later	2 nd former	2 nd later	3 rd former	3 rd later
LF (0.04 - 0.15 Hz)	ms ²	16.41	17.89	5.37	115.68	12.47	6.11
HF (0.15 - 0.40 Hz)	ms ²	18.67	18.08	18.23	258.85	18.32	14.01
LF/HF ratio (%)		87.9	99	29.5	44.7	68.1	43.7

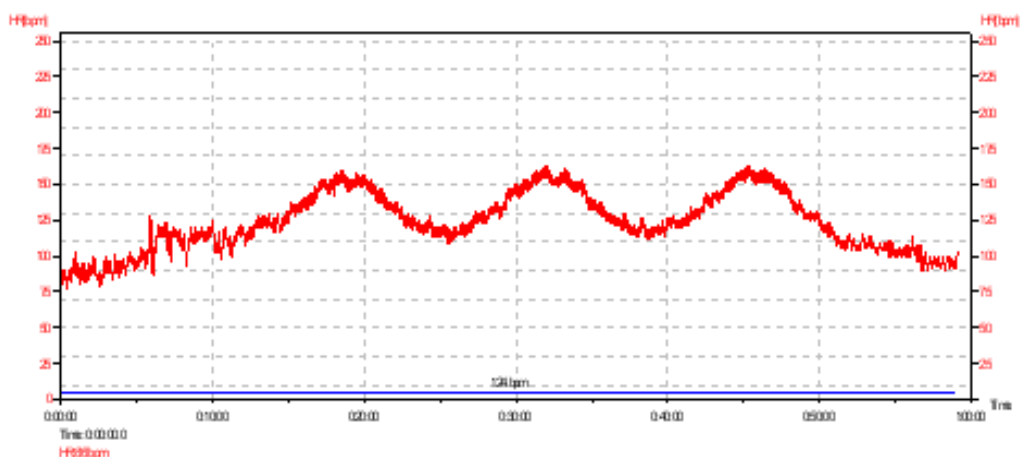


図8 ペダリング運動時の心拍数変動 (Sub.C)

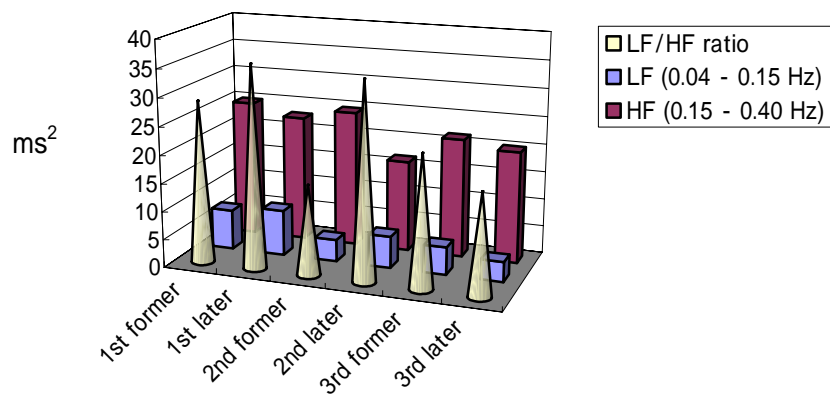


図9 心拍変動のスペクトル解析結果 (Sub.C)

表4 被験者Cの各周波数成分

		1 st former	1 st later	2 nd former	2 nd later	3 rd former	3 rd later
LF (0.04 - 0.15 Hz)	ms ²	7.12	8.15	3.91	5.7	4.98	3.58
HF (0.15 - 0.40 Hz)	ms ²	24.66	22.68	24.48	16.36	21.31	19.99
LF/HF ratio (%)		28.9	36	16	34.9	23.4	18

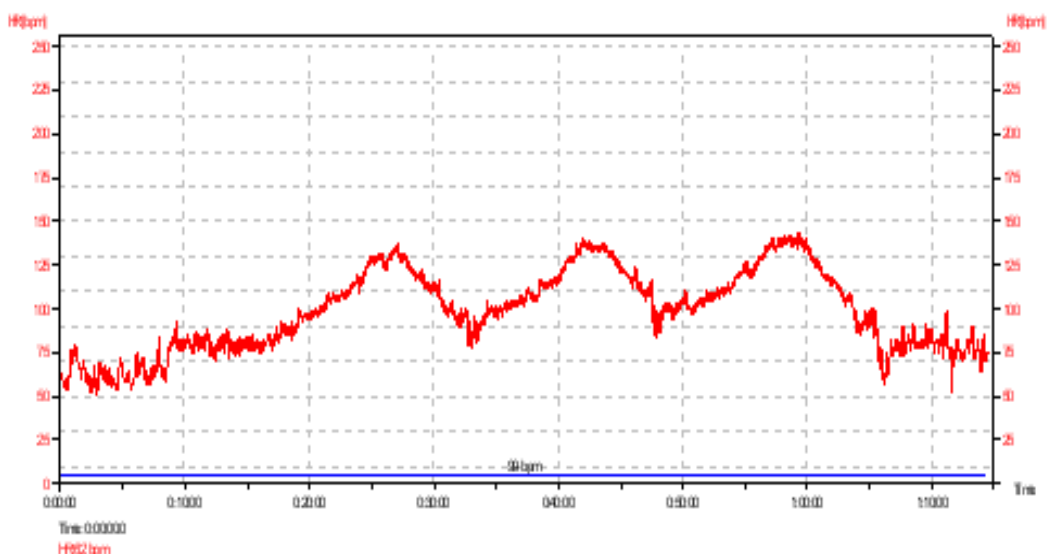


図10 ペダリング運動時の心拍数変動 (Sub.D)

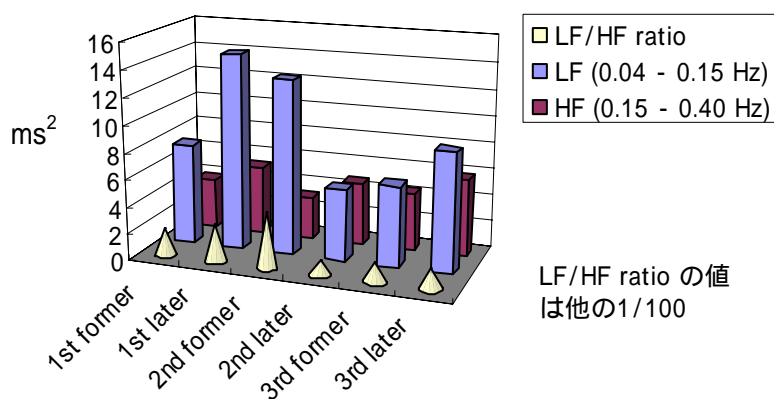


図11 心拍変動のスペクトル解析結果 (Sub.D)

表5 被験者Dの各周波数成分

		1st former	1st later	2nd former	2nd later	3rd former	3rd later
LF (0.04 - 0.15 Hz)	ms ²	7.57	14.61	13.09	5.39	6	8.86
HF (0.15 - 0.40 Hz)	ms ²	3.77	5.19	3.23	4.7	4.27	5.8
LF/HF ratio (%)		200.6	281.7	405.7	114.8	140.4	152.8

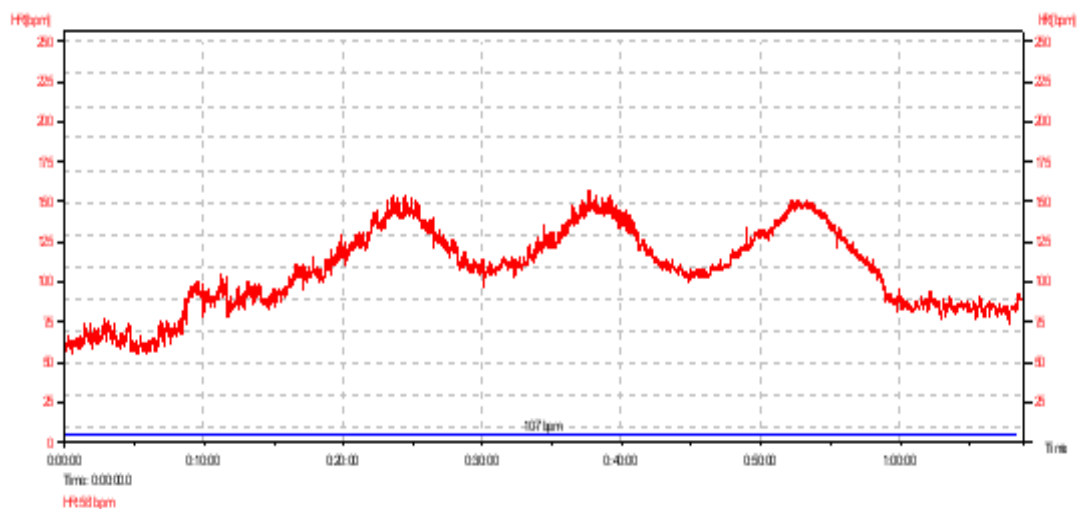


図12 ペダリング運動時の心拍数変動 (Sub.E)

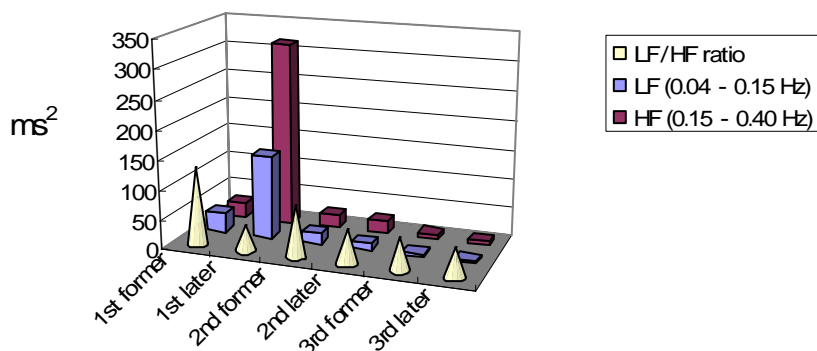


図13 心拍変動のスペクトル解析結果 (Sub.E)

表6 被験者Eの各周波数成分

		1 st former	1 st later	2 nd former	2 nd later	3 rd former	3 rd later
LF (0.04 - 0.15 Hz)	ms ²	33.13	141.52	19.9	12.31	4.85	3.33
HF (0.15 - 0.40 Hz)	ms ²	25.15	315.3	22.83	21.5	8.69	6.88
LF/HF ratio (%)		131.8	44.9	87.2	57.3	55.9	48.5

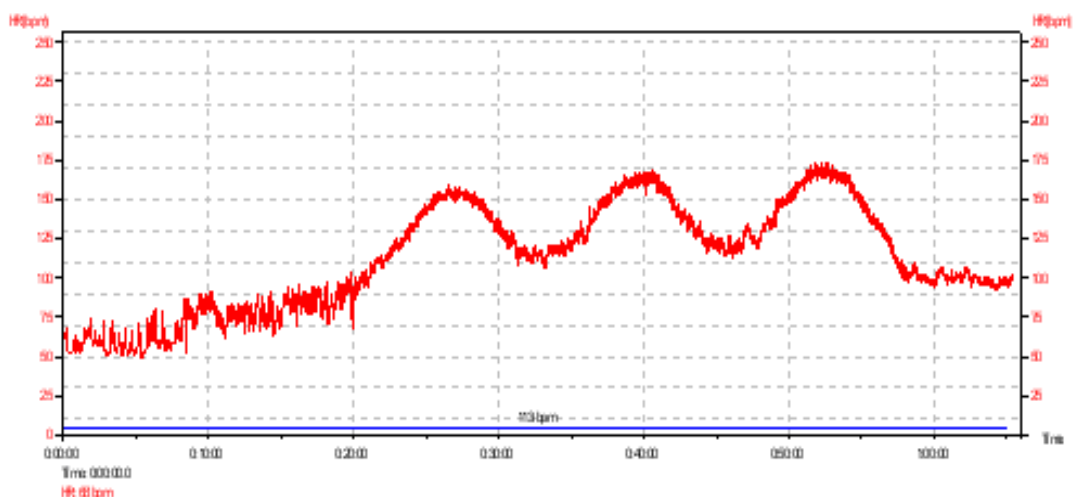


図14 ペダリング運動時の心拍数変動 (Sub.F)

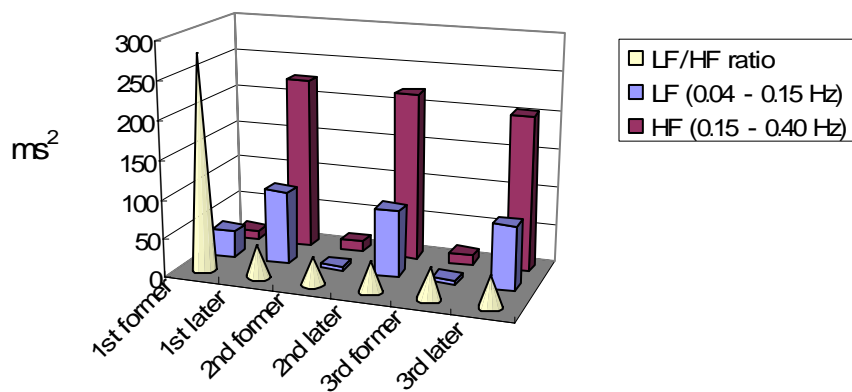


図15 心拍変動のスペクトル解析結果 (Sub.F)

表7 被験者Fの各周波数成分

		1 st former	1 st later	2 nd former	2 nd later	3 rd former	3 rd later
LF (0.04 - 0.15 Hz)	ms ²	35.38	95.73	5.34	86.98	5.41	83.55
HF (0.15 - 0.40 Hz)	ms ²	12.65	225.73	14.83	218.61	13.18	202.44
LF/HF ratio (%)		279.8	42.5	36	39.8	41.1	41.3

被験者A及び被験者Bの負荷ピーク時最高心拍数は163~164bpmで、いずれかのステージでの負荷漸減時に高いHF成分とLF成分がみられ「心拍ゆらぎ」の増加と思われる傾向が見られたが、LF/HF比には一定の傾向は観察されなかった。

被験者Cの最高心拍数も163bpmで、LF/HF比が、最初の2つのステージでは負荷漸減時にやや減少し、3つ目のステージでは逆に増加している。

PWC170の推定値の高い被験者Eは、負荷ピーク時の最高心拍数が10拍ほど低い156bpmであり、最初のステージの負荷漸減時に高いHF成分が見られ、LF/HF比は低下した。

被験者Fは、PWC170の推定値が最も高く、またピーク時最高心拍数も最も高い174bpmであった。HF成分は、負荷漸増時に減少し負荷漸減時には増加しており、LF成分も同様で、漸増時に「心拍ゆらぎ」が減少し漸減時に増加している。そして呼吸性の交感神経系の活動を反映するとされるLF/HF比は最初のステージ前半の負荷漸増時が最も高く、以降はあまり変動していない。

被験者Dは、各成分の絶対値が最も小さく、他に比べてLF成分の値が相対的に高く、その結果LF/HF比も高い。これは、ペダリング運動時の心拍数が、140~145拍程度にしか上昇しなかったことと関連しているものとも思われ、異なる負荷設定での再検討が必要と考えられる。

山崎⁷⁾は、運動選手の心拍変動のパワースペクトル解析を行い、副交感神経系の活動を反映するHF成分が運動選手群の方が高く、安静時の副交感神経活動レベルが亢進して入ることを指摘した。

吉武⁹⁾は、Neuropathyが著しい糖尿病患者の心拍変動のスペクトル解析から、心拍変

動のゆらぎが減少し、スペクトル自体も小さいとのUeらデータと、自律神経活動が低下傾向にある肥満者が、持続的トレーニングの結果心拍数変動の振幅値が増加するとAmanoらのデータを引用し、自律神経機能改善の可能性を指摘した。また、呼吸数制御による影響、運動時に交感神経活動が亢進しても心拍数自体も増加するためLF成分が相対的に減少する問題点、なども指摘した。

Pichonら⁴⁾は、14名のトレーニングされた被験者を、異なる運動強度(最大酸素摂取水準の60%、70%、80%)での自転車エルゴメーターを用いたペダリング運動を実施させ、3分後6分後9分後の各3分間の心拍数スペクトルの解析を行った。そして、LF成分は運動強度の増加にともない経時的に減少するが、HF成分は最初の3分が高く、90%強度では経時的にやや増加すること、LF/HF比は、運動継続にともない減少して60%強度よりも90%強度のほうが最初の3分間の比率が低いことを報告した。

この運動の継続的实施にともなう変化や運動強度の変動、疲労の進行や「心拍ゆらぎ」の増減などの現象に対し、瞬時心拍変動の周波数スペクトル解析の手法を用いることは、従来の平均心拍数の分析では得られない有効性を持つものと考えられる。

また、本研究では、PWC170の推定に、9分間三段階の負荷漸増法を用いた。しかし、漸増漸減負荷10分を3回反復するという運動実施時には、ピーク時負荷と心拍数との関係にPWC170の推定値と異なる結果が見られ、被験者D(最高心拍数145bpm)と被験者E(同156bpm)と被験者F(同174bpm)では、結果として相対的運動強度が異なったものと推測される。

このような現象の背景には、反復される負荷変動への自律神経系の関与や次に来るステージへの「事前準備」という要因が存在することが考えられ、今後スペクトル解析の手法を併用しながら分析を進めてゆくことが重要なものと思われる。

4. まとめ

運動時の瞬時心拍変動に関する基礎的知見を得るため、自転車型エルゴメーターを用い、漸増漸減型負荷変動パターンの反復実施に対する負荷心拍応答経過を検討して以下の結果を得た。

1. 運動実施時の瞬時心拍変動は、負荷漸増時と負荷漸減時で異なる可能性が示唆された
2. 自律神経機能を評価するのに有効とされる心拍変動のスペクトル解析は、運動強度に対する経時的な変化や疲労の進行、交感神経系と副交感神経系の活動動態等の分析にも有効なものと思われる
3. 単一の負荷漸増パターンで推定されるPWC170の値(仕事量)では、反復される負荷漸増漸減パターンでの運動実施時の生体反応での仕事量とは異なる結果が得られた。

<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. 加賀谷淳子、運動時の循環調節メカニズム、加賀谷・中村編「運動と循環」, NAP, pp.1-5
3. 中村好男、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
4. Pichon A, Bisschop C., et al. (2004), Spectral Analysis of Heart Rate Variability during Exercise in Trained Subject, *MEDICINE & SCIENCE IN SPORTS AND EXERCISE*, pp.1702-1708
5. 山崎 健(1986)、スポーツの認識と習熟(伊藤・出原・上野編「スポーツの自由と現代(下)」)、青木書店、pp.299-313
6. 山崎 健、滝澤かほる、岡本芳三、馬場裕子(2003)、心拍数とサーモグラフィ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5巻2号, pp.35-41
7. 山崎 元(1998)、スポーツ心臓と心拍の変化、竹宮隆・石河利寛編:運動適応の科学、杏林書院、pp.103-104
8. 山地啓司、梅野克梅、塚原勝行、川崎匠(1993)、トレッドミル走における心拍変動のパワースペクトル解析, *J.J.Sports Science* 12(8)、pp.531-537
9. 吉武康栄(2003)、生体信号のレシピア、大分看護科学研究4(1)、pp.27-32