

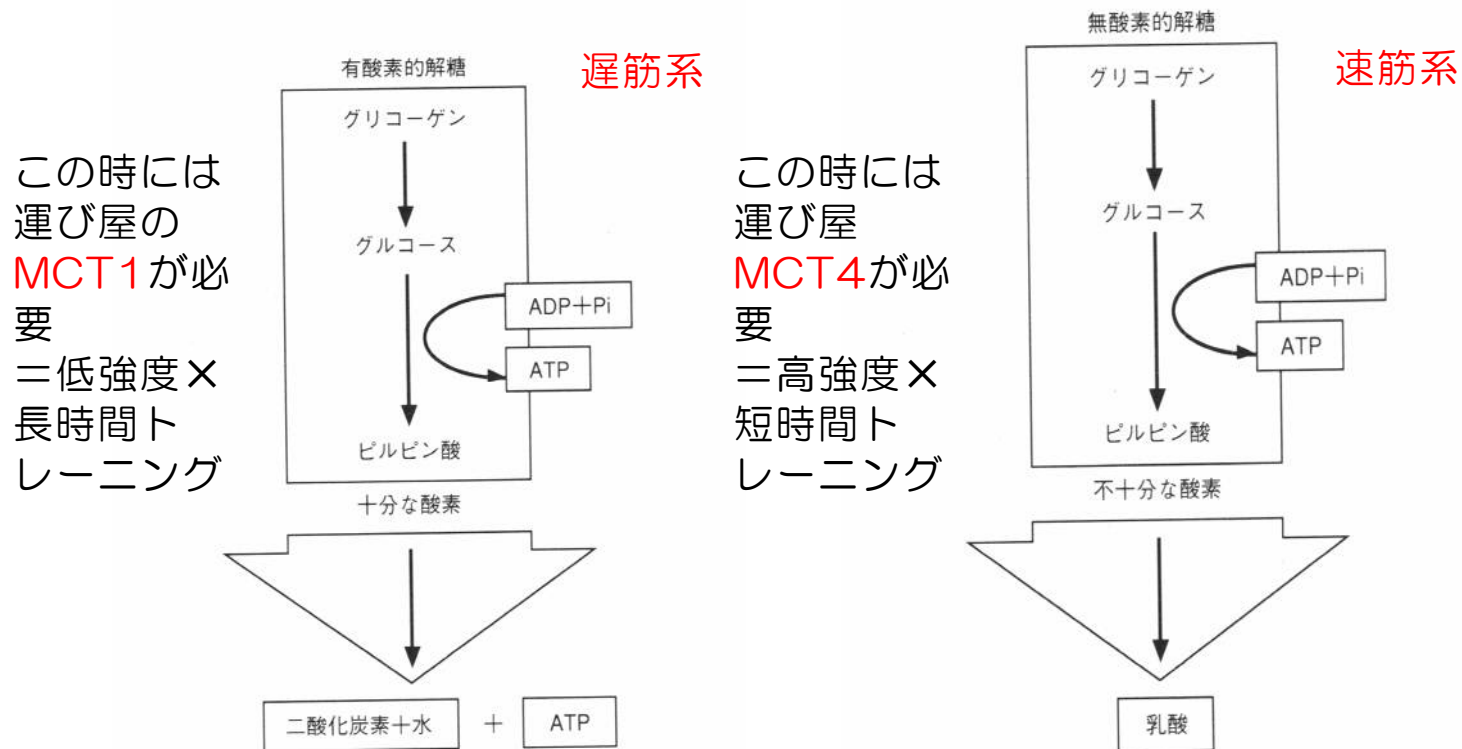
運動と心拍応答

山崎 健

運動時の心拍変動

- 運動の持続的実施とエネルギー生産性
 - ATP → ADP + Pi (解離) が基本
 - ① ATP-PCr系 (13Kcal/sec/Kg)
 - ② 乳酸を生成する解糖系 (7Kcal/sec/Kg)
 - ⇒ 乳酸の分解過程で85%が再合成される
 - ③ 有酸素系
 - ⇒ TCA回路：糖質・脂質・蛋白質量に依存
- エネルギー生産のための酸素需要量の増大
 - 心拍出量 (1回拍出量 × 心拍数) の増加

有酸素的解糖と無酸素的解糖

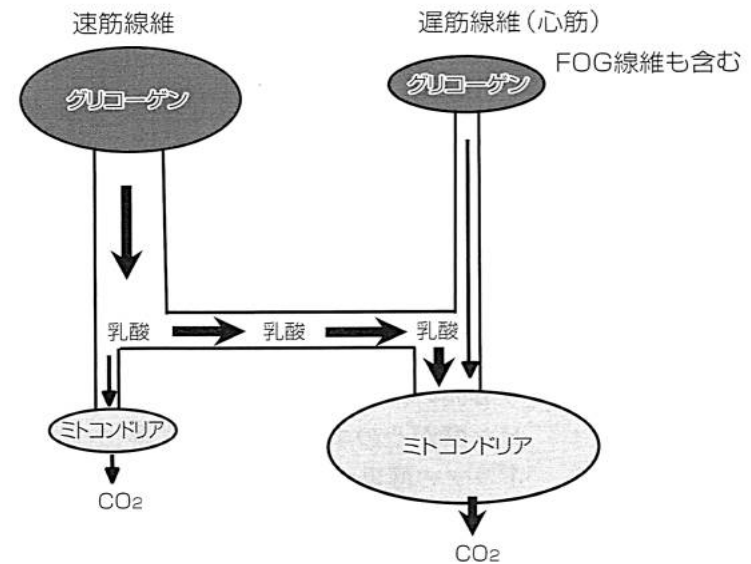


フォックスとマティウズ（1981）

「乳酸シャトル」の意味するもの・・・

筋線維タイプ	遅筋線維	速筋線維	
	タイプ(SO)	タイプIIa(FOG)	タイプIIb(FG)
ミオシンATPアーゼ活性	●		●
代謝酵素			
解糖系酵素	●	●	●
酸化系酵素	●	●	●
代謝基質			
グリコーゲン	●	●	●
中性脂肪	●	●	●
毛細血管密度	●	●	●

図6-1 筋線維の代謝 (定本ら, 1987)
 ○内の色合いが濃いほど、各項目の活性や濃度が高いことを示す。



3×3システムによる動作の発現

動きをつくり出すシステム

		Type I	Type II a	Type II b
エネルギーをつくり出すシステム	ATP-PCr系	△	◎	◎
	解糖系	○	◎	◎
	有酸素系	◎	○	△

定本ら（1987年）の図を山崎が改変

心拍変動のダイナミクス

- 運動強度の増加
⇒ 定常状態とAll-out
- 心拍出量の増加
1回拍出量×心拍数
- 運動強度との直線性
120~130bpm ⇒ 180~190bpm
- 最高心拍数と年齢
トレーニング度など個人差が大きい

$$\text{心拍出量} = \text{一回拍出量} \times \text{毎分心拍数}$$

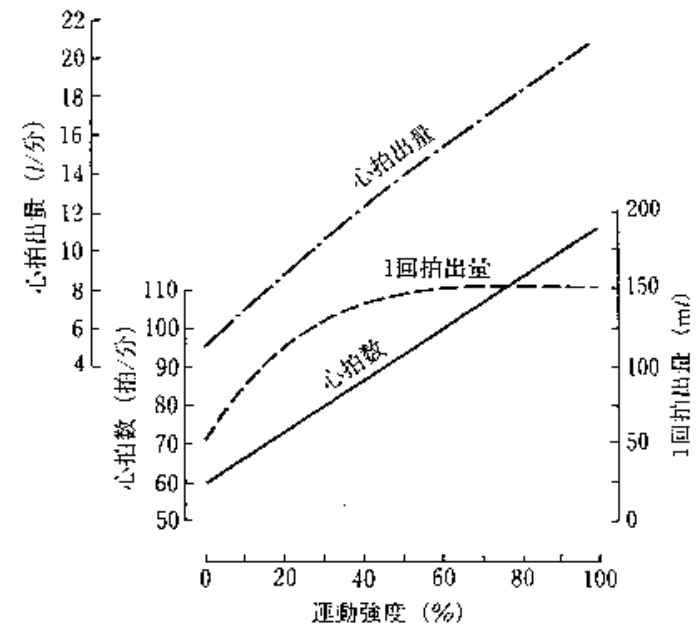


図9-1-21 運動強度と心拍数、1回拍出量および心拍出量の関係 (池上.1987)

運動強度と乳酸濃度

- 呼吸性換気閾値 (VT)
- 解糖系の活動亢進
血中乳酸濃度の上昇
- LTとOBLA
運動強度の臨界点
- トレーニングレベル
OBLAの際の走行スピード
でパフォーマンスを推定

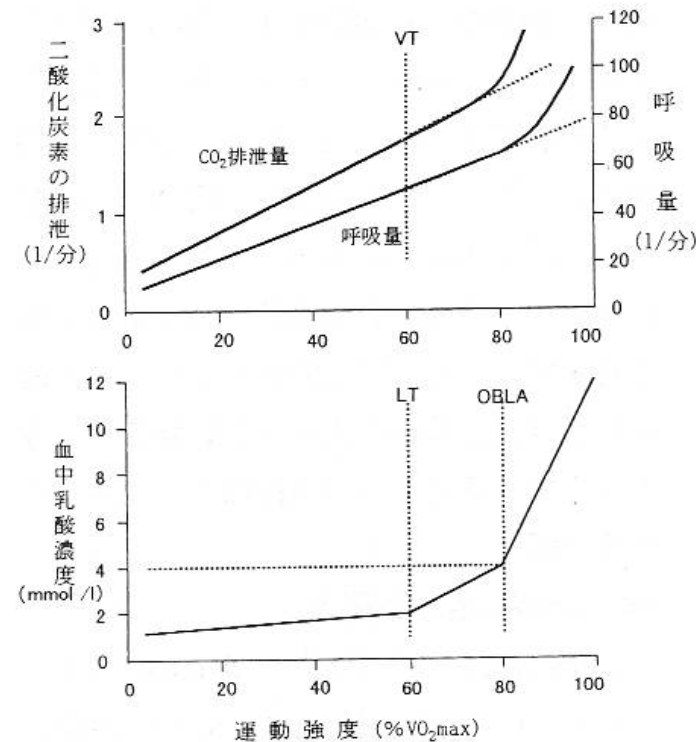


図9-I-12 漸増運動負荷法テストにおける呼気ガスおよび血中乳酸濃度の変化

表 2-2 運動処方のための運動強度のとらえ方

自覚的運動強度 (RPE) 強度の感じ方、その他の感覚を参考に RPE点数をきめる		$\dot{V}O_2\max$ からみた 強度	脈拍数からみた強度 $\% \dot{V}O_2\max$ に相当すると 思われる脈拍数					
強度の感じ方	その他の感覚	RPE 点数	$\% \dot{V}O_2\max$	1 分間当たりの脈拍数 60歳代 50歳代 40歳代 30歳代 20歳代				
最高にきつい	からだ全体が苦しい	20 19	100%	155	165	175	185	190
非常にきつい	無理、100%と差がないと感じる、 若干言葉が出る、息がつまる	18 17	90%	145	155	165	170	175
きつい	続かない、やめたい、のどがかわ く、がんばるのみ	16 15	80%	135	145	150	160	165
ややきつい	どこまで続くか不安、緊張、汗び っしょり	14 13	70%	125	135	140	145	150
やや楽である	○いつまでも続く、充実感、汗が出る	11 10	○60%	120	125	○130	135	135
楽である	汗が出るか出ないか、フォームが 気になる、ものたりない	9 8	50%	110	110	115	120	125
非常に楽である	楽しく気持ちよいがまるでものた りない	7 6	40%	100	100	105	110	110
最高に楽である	じっとしているより動いたほうが楽	5	30%	90	90	95	95	95

(体育科学センター資料およびRPEより 1987, 伊藤改変)

○年齢40歳代で、60% $\dot{V}O_2\max$ 強度の運動処方の場合、自覚的運動強度は「やや楽である」であり、RPE点数だと11点、脈拍数だと130拍がめやすとなる

負荷-心拍応答と持続的能力の推定

- 最大酸素摂取量の推定
自転車エルゴメーターやランニング等でのステップ負荷（プロトコール）
⇒ 呼気ガス「直接法」で測定（推定）する
- 自転車型エルゴメーター
負荷（ワット） - 心拍応答の回帰式
人体の自転車運動の効率を23%程度で推定
1Watt で12.47ml として Physical Work Capacity の体重あたりの最大値を計算する

ところが・・・

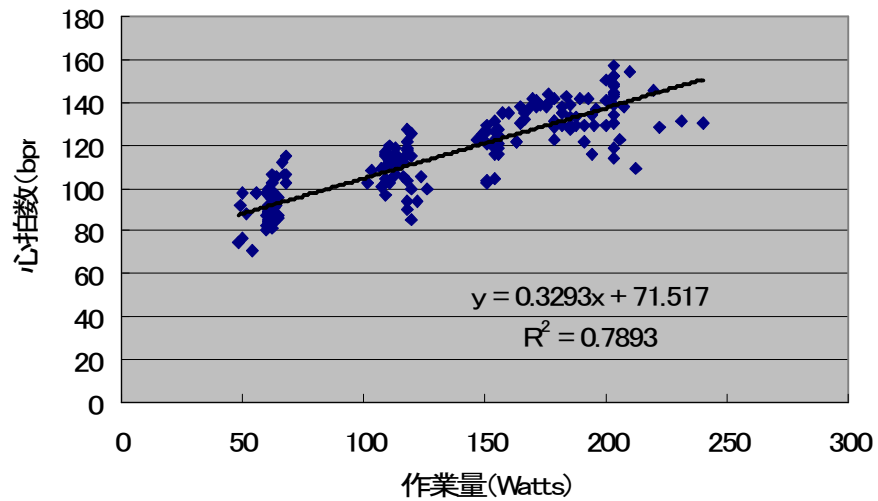
- 自転車型エルゴメーター機器では・・・
 - ①最大下運動での推定で安全性はあるが・・・
 - ②年齢から推定される最高心拍数が個人によって異なる点
 - ③負荷心拍応答の最高心拍数の「頭打ち現象」が考えられる点
- 二重の「不確定性」からの「推定値」

Physical Work Capacity (PWC) 170 という概念は

- 1分60回転で、三段階のステップ負荷
- 負荷 - 心拍の一次回帰式から「推定」する心拍数170拍
／分時の仕事量 (Watts)
- 直線性のある区間内での推定で、子どもや高齢者には
PWC150も用いる
- 確かに優れた方法ではあるが・・・
「競技中」は「最高心拍数」で遂行しているのでは？

そこで・・・

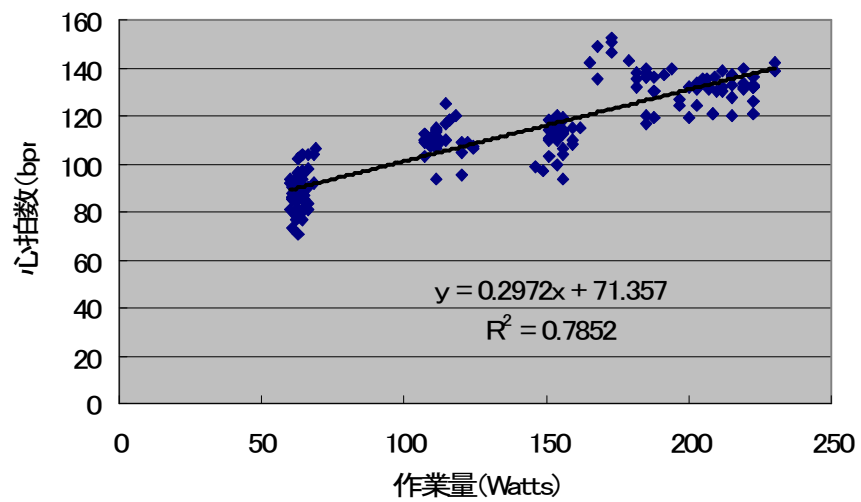
- 陸上長距離選手と他の運動部選手を検討
- PWC170の推定値と1 2分間走の「相関分析」を行うと・・・
 - ①運動部選手群では回帰式の妥当性（決定係数 R^2 ）が高いが長距離選手群は低い！
 - ②長距離選手群の1 2分間走時は190bpm以上だが、運動部選手群は170～180bpm
 - ③運動様式の「特異性」の問題が・・・



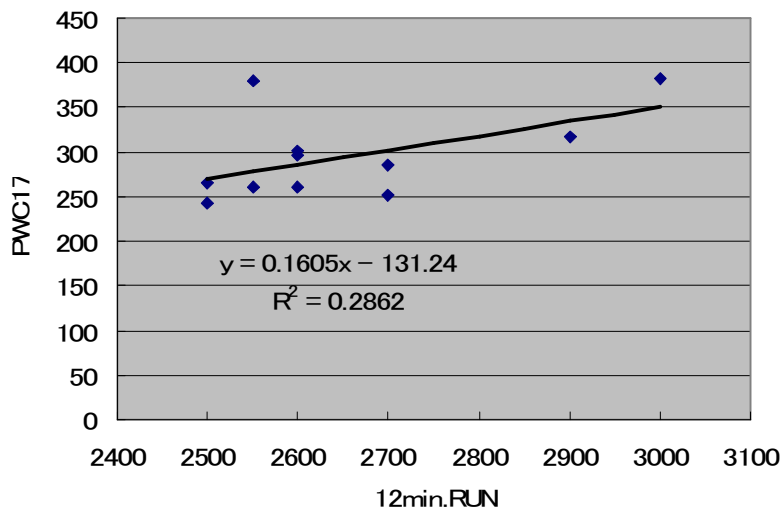
運動部群

R^2 (決定係数)
相関係数の2乗で信頼性を示す

長距離選手群



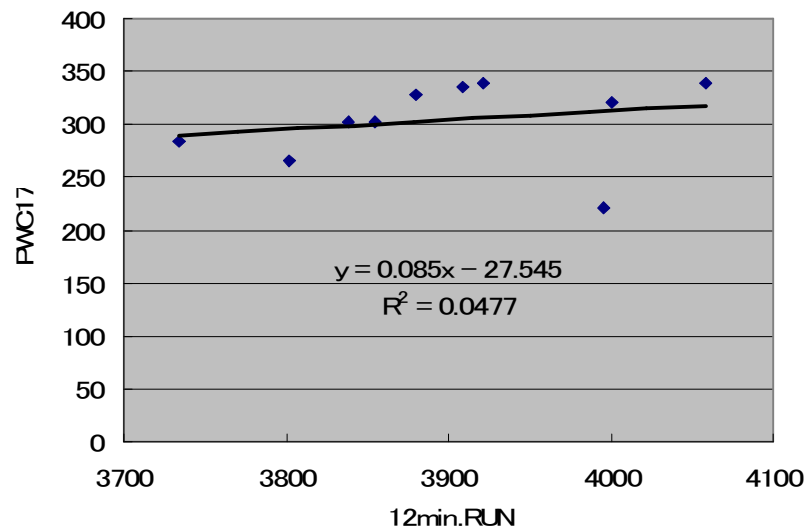
長距離ランナーは心拍数170／分より高いレベルで走っている？



運動部群

長距離選手群

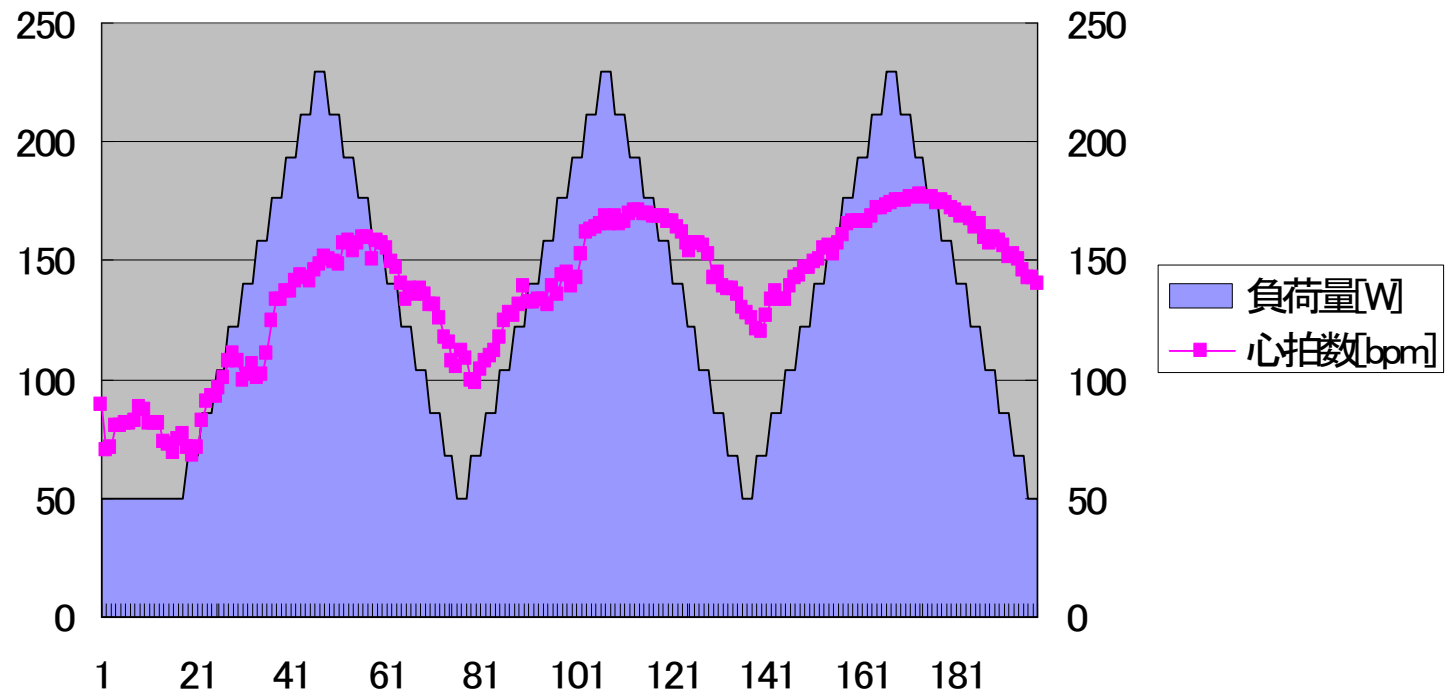
長距離選手はもっと高い心拍数
でランニングをしている？
(決定係数が低い)



運動強度が一定でない運動では

- 反復される「漸増 - 漸減型」負荷変動で・・・
- 3ステージ毎のPWC150の推定値（Watt）が異なる・・・！
- 負荷漸増時は決定係数（ R^2 ）が高いが漸減時は低くなる・・・
 - ⇒ 「まじめ」な登りと「遊ぶ」降り？
- 漸増漸減とも同一仕事量ではあるが・・・
- 同一心拍数でも「主観的運動強度」に違いが・・・

負荷-心拍応答の経過 (Sub. A)



平均心拍数だけではわからないこと・・・

何か新たなアプローチはないかいな・・・



心拍数を決めるもの・・・





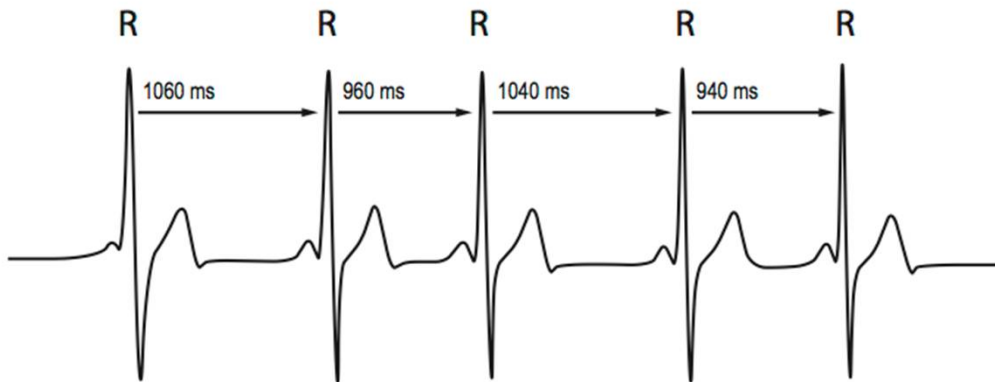
心拍数の「ゆらぎ」ということ

- 心拍は1拍毎に「ゆらぎ」がある
 - 60 bpmでも1.05秒や0.95秒に
- 自律神経系の二つの作用
 - 交感神経系：緊急反応で心拍数上昇（遅い）
 - 副交感神経系：お休みモードで心拍数低下（速い）
- 心筋梗塞、重症糖尿病や高齢で心拍数のゆらぎが減少する（心臓の反応性が低下？）

同じ60bpmでも・・・

R-R間隔が短縮 ⇒ 交感神経系の作用

R-R感覚が伸長 ⇒ 副交感神経系の作用



「心拍ゆらぎ」はストレス反応の指標？

自律神経系の活動の反映

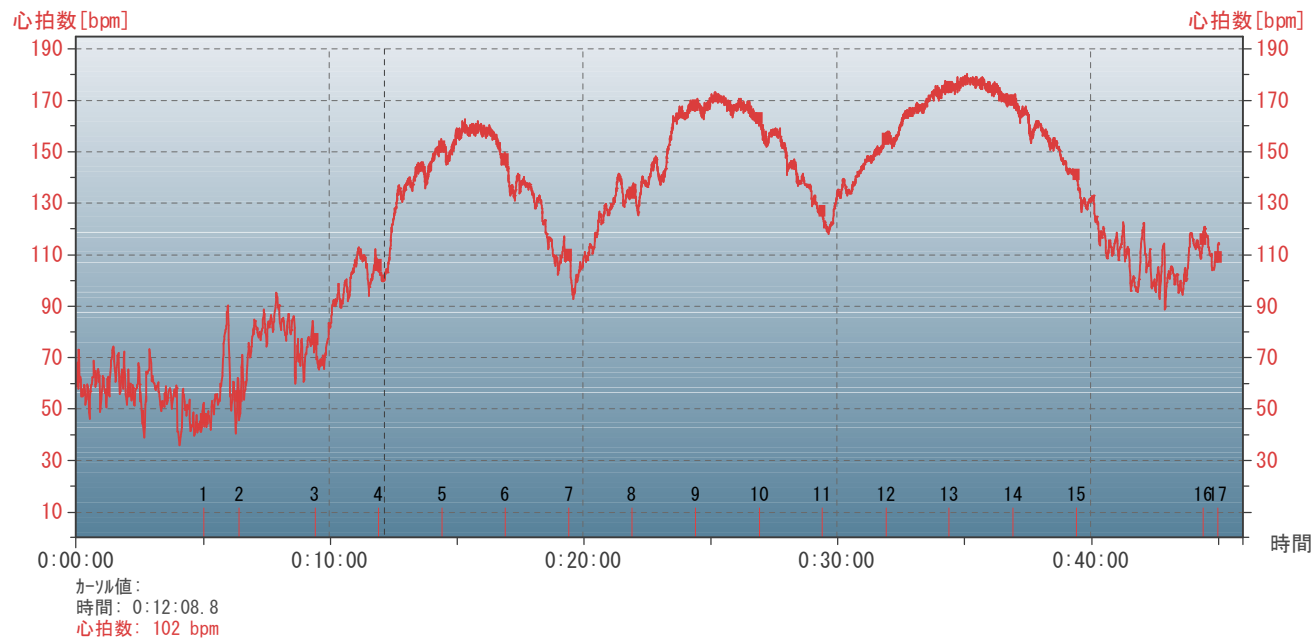
自転車エルゴメーター負荷実験

- 負荷漸増時
 - 心拍数が高くなってゆらぎがなくなる
- 負荷漸減時
 - 心拍数が減りながら「ゆらぎ」がもどる
- 同一心拍数でも主観的運動強度（PRE）が異なる（漸減時が“楽”）

ということは・・・

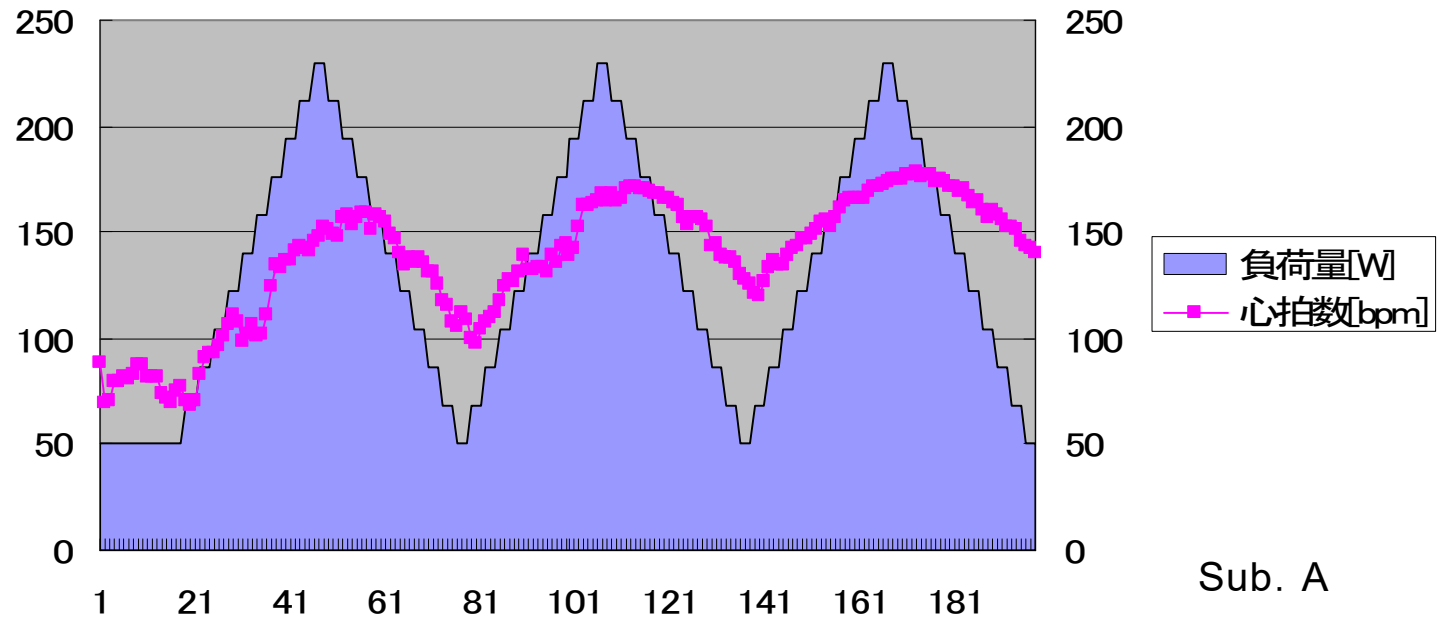
- 一定の運動経過ではないほうが・・・？

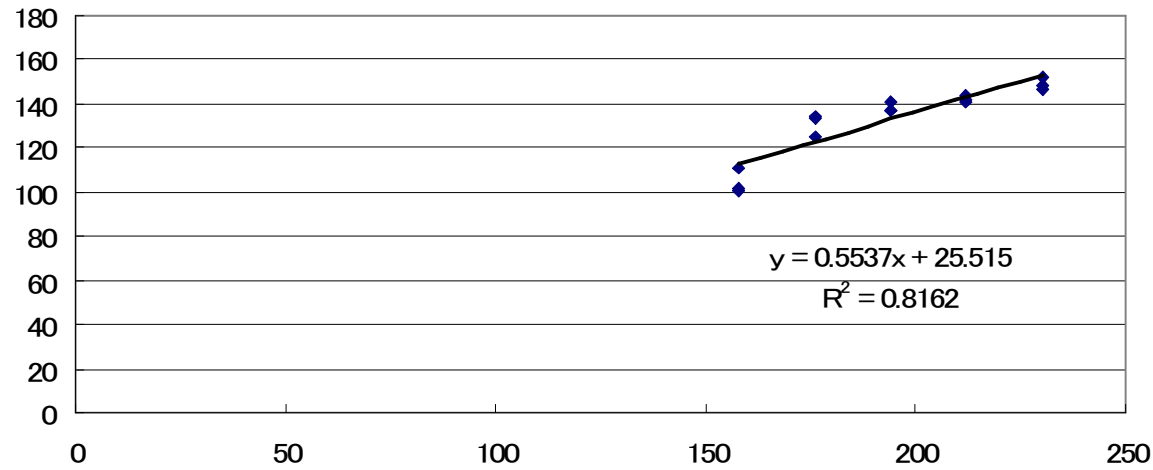
瞬時心拍変動の経過 (R-R間隔の逆算)



ユーザー	060409	日付	2006/06/09	心拍数 平:			
エクササイズ	金田06060901	時刻	9:23:14	心拍数 最:			
スポーツ	ランニング	継続時間	0:45:03.6				
メモ				選択			

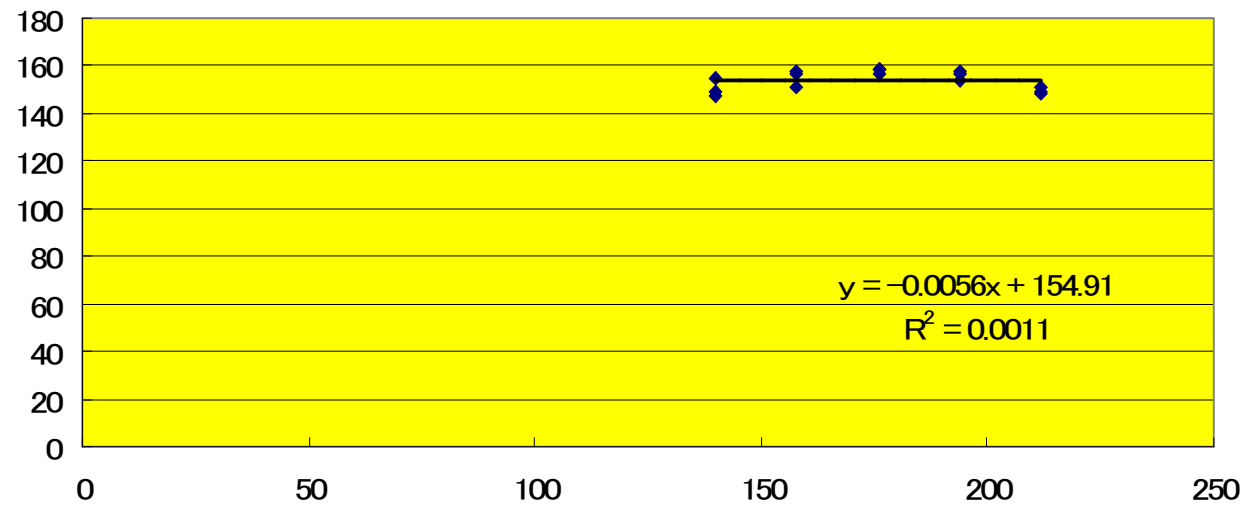
負荷ピークと心拍ピークに位相差が生ずる点





負荷のピーク時までの
2分30秒は

ピーク直後2分30秒
の負荷-心拍応答は



負荷軽減時に何が・・・

- どうやら「予測性反応」や「戦略決定（文脈的意味）」があるのでは？
- XCスキー選手の特異な心拍反応
登り・降る・平地が比率1／3で構成され、連続的に変動する
「降り」の間に急速に低下する心拍数
- 「爽快感」「開放感」などとの対応も・・・？
- 運動の「生理心理学的効果」の背景か？

「ゆらぎ」と自律神経系

- 「 $1/f$ ゆらぎ」ということ
全周波数にわたって変動する（フラクタルといえます）
- 病人や高齢者では「ホワイトノイズ化」
特定の傾向がない（反応のピークがない）
- どうやら機械的な一様性は都合が悪い？

確かに・・・

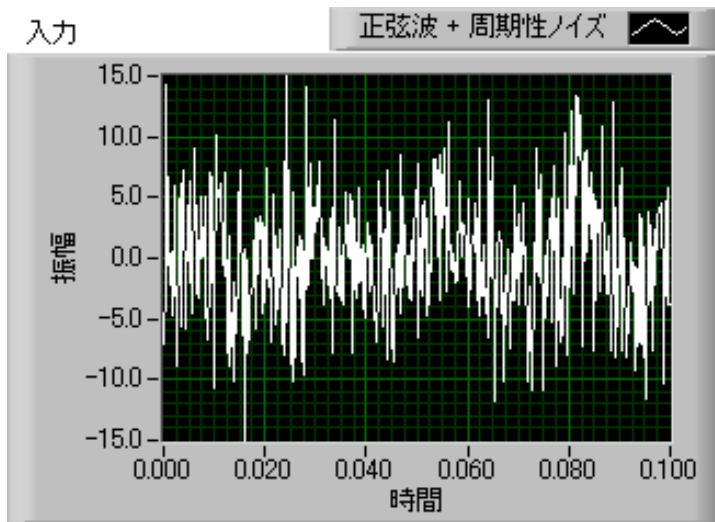
- 持久的運動の実施にともなう酸素需要量の増大と心拍数の増加及び血中乳酸の動態

<しかし・・・>

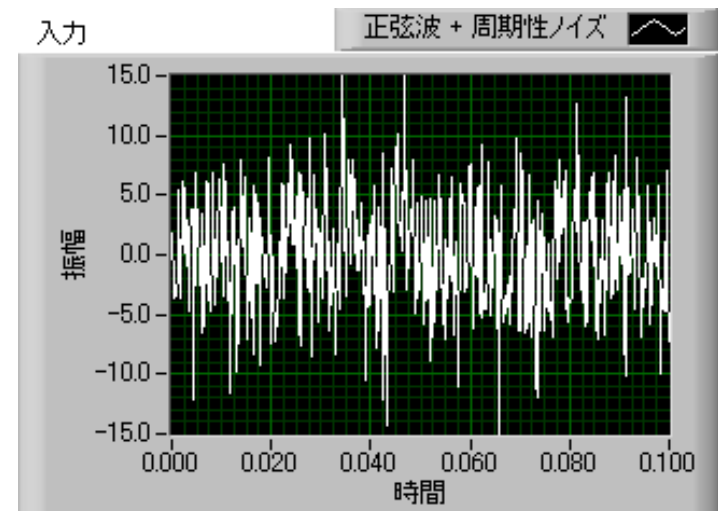
- 心拍数が同じでも「毎日違う」「走るたびに違う」「前半と後半で違う」感覚
- Long Slow Distance トレーニングの意味
(佐々木功「ゆっくり走れば速くなる」)
- 「毎日15マイルよりも10マイル+20マイルがよい？」
(アーサー・リディアード)

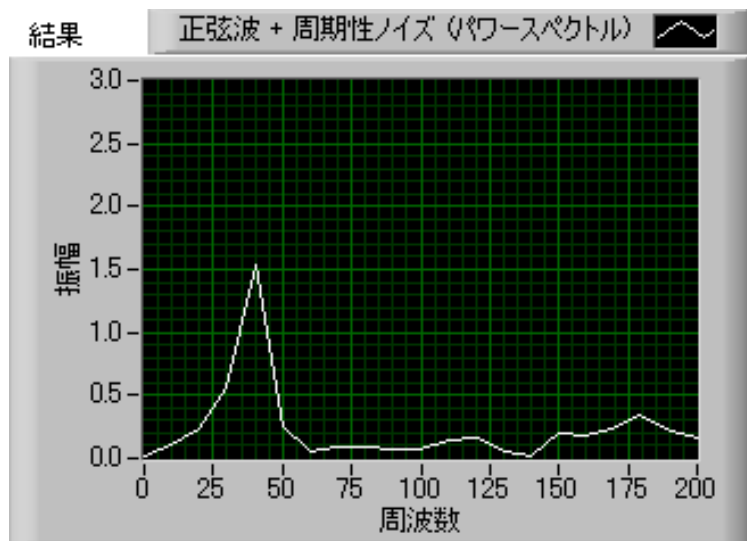
生体情報の高速フーリエ変換

筋電図のシミュレーション



どちらも似たような
波形だが・・・





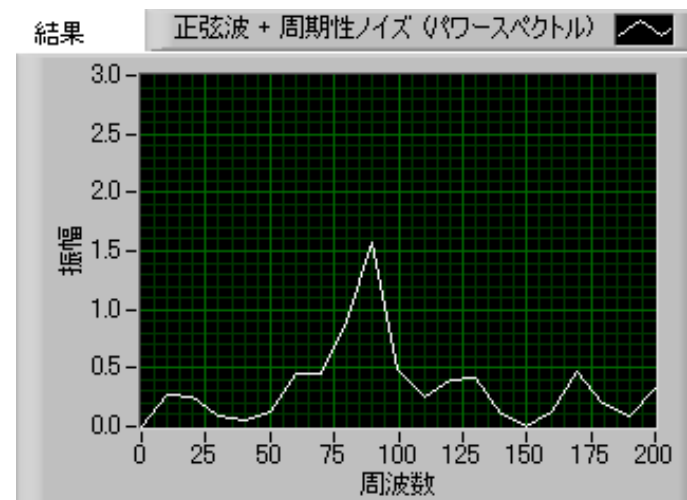
40Hzにピークパワーがある（遅い成分が優位）

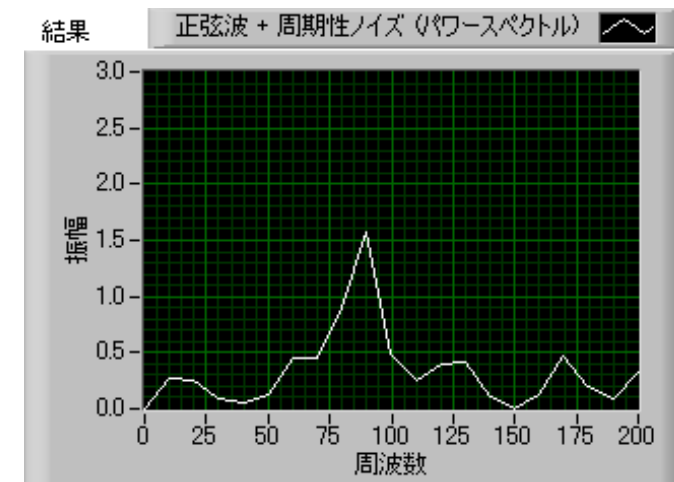
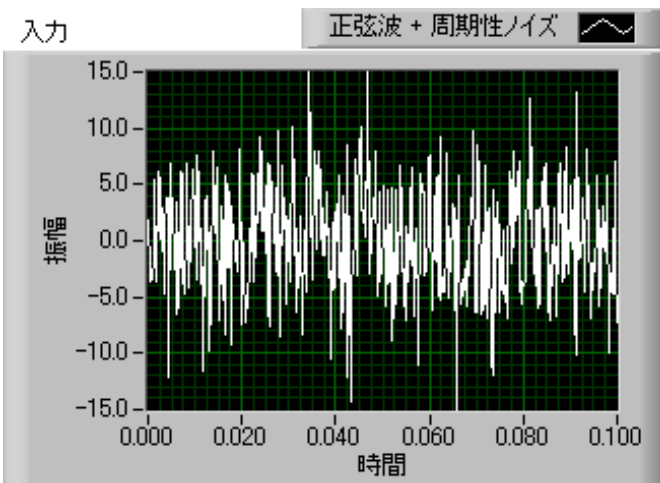
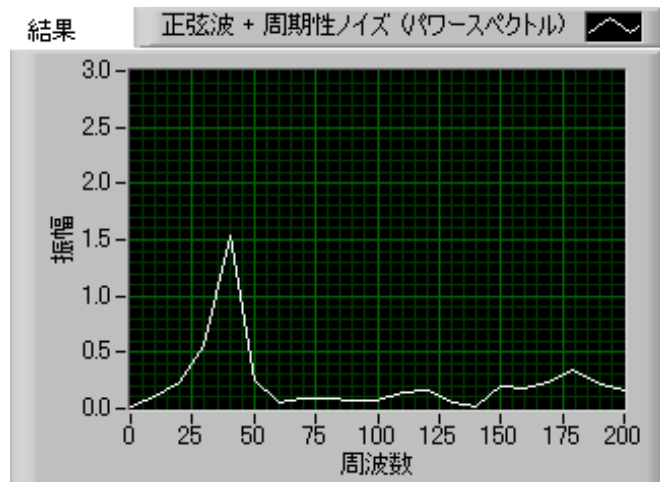
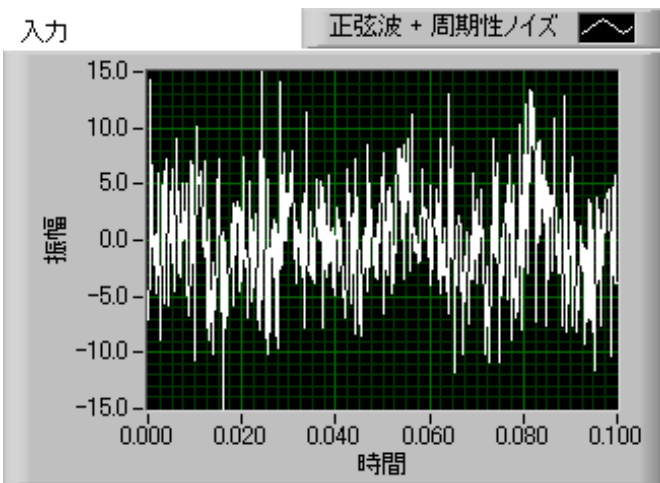
- 持続性の収縮だった

（Hz：1秒間の活動数）

90Hzにピークパワーがある（速い成分が優位）

- 瞬発性の収縮だった





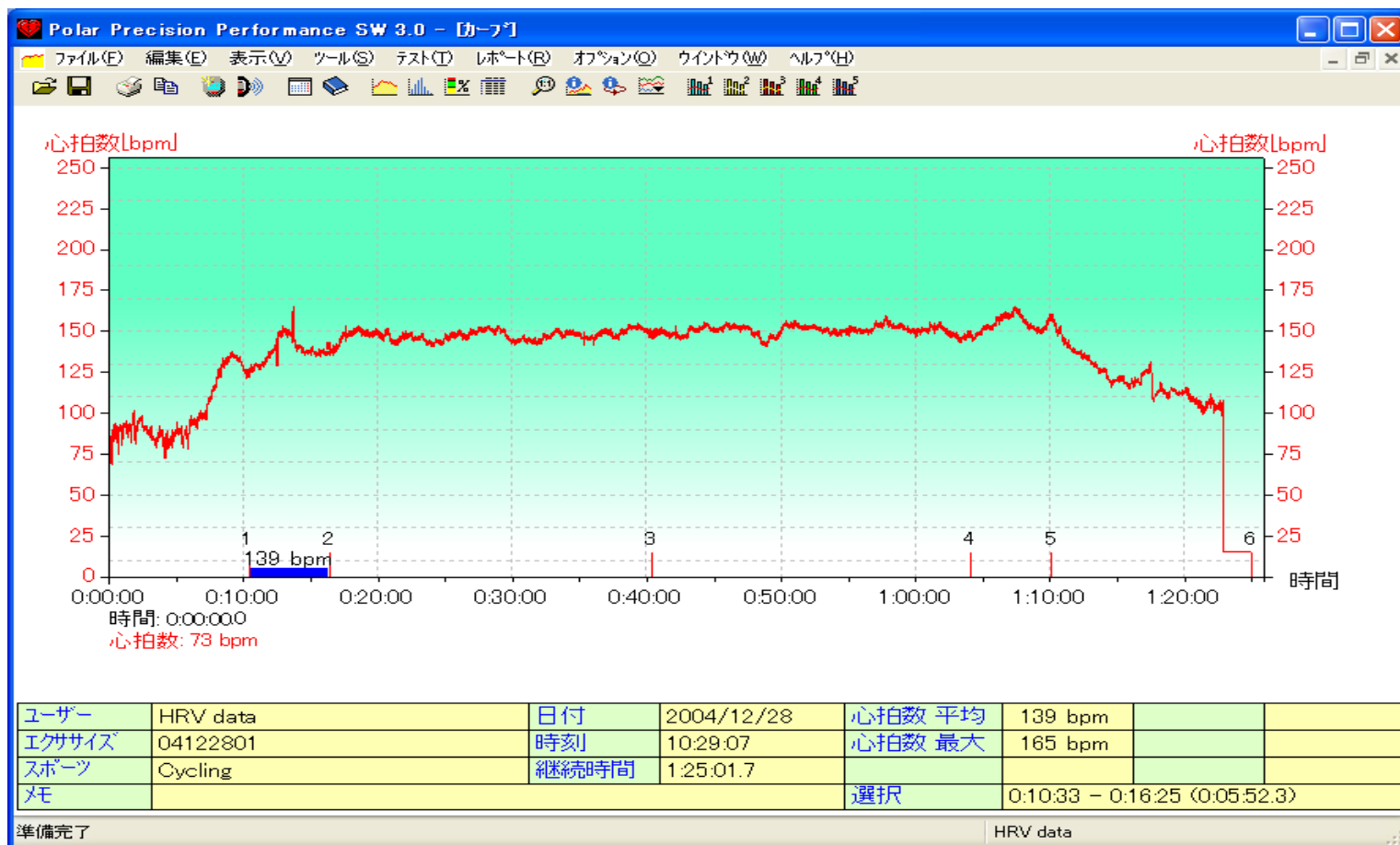
周波数解析（スペクトル解析）で・・・

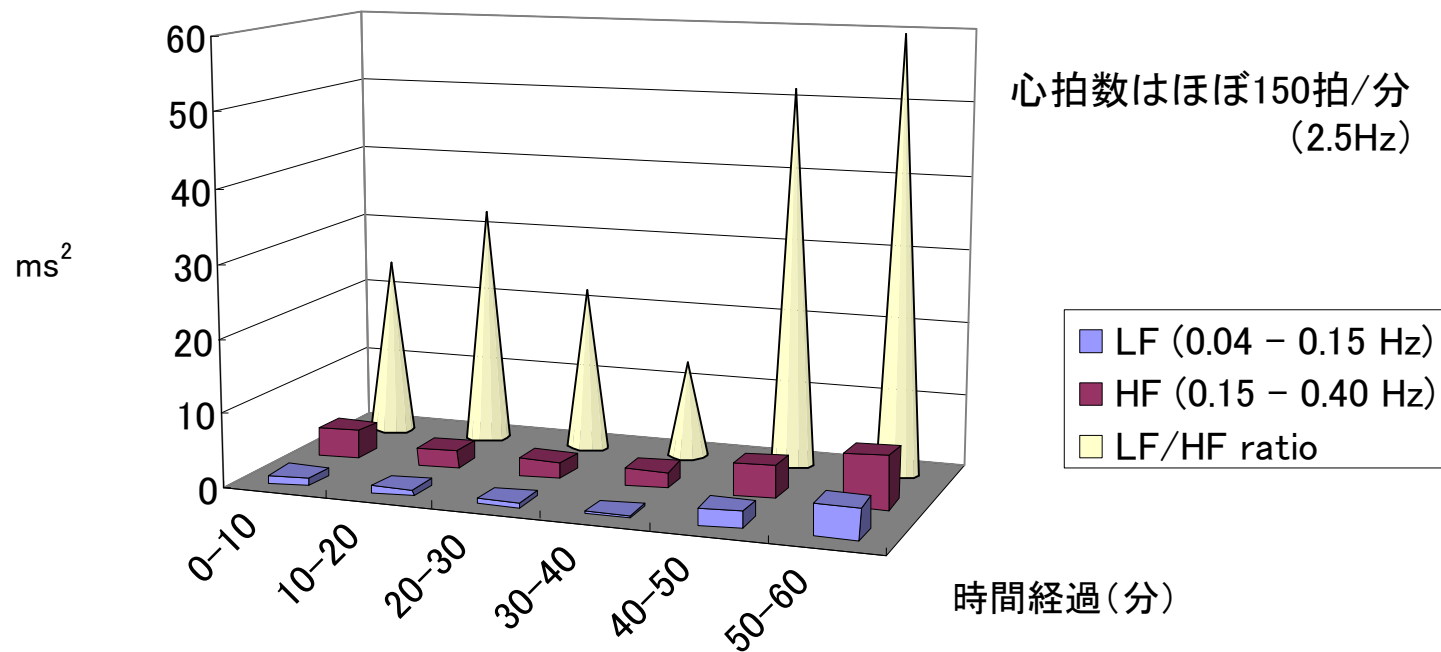
- 筋電図（筋活動）では
 - 持続性活動（ST系：45Hz以下）
 - 瞬発性活動（FT系：80Hz以上）
- 脳波では
 - 安静・リラックス（ α 波：8～13Hz）
 - 意識集中・緊張（ β 波：14Hz以上）

安静時の瞬時心拍変動のスペクトル

- R-R間隔のスペクトル解析によるピーク成分
(Akselrod et al., 1981)
- 自律神経活動の薬理ブロックによる同定
 - 体温調節性の影響：VLF帯域（0.05Hz付近）
 - 血圧反射性の影響：LF帯域（0.1Hz付近）
 - 交感神経系活動と副交感神経系活動を反映
 - 呼吸反射性の影響：HF帯域（0.3Hz付近）
 - 副交感神経系活動を反映
 - LF/HF比（%）：交感神経系活動を反映

同一強度とみなされるランニングでも





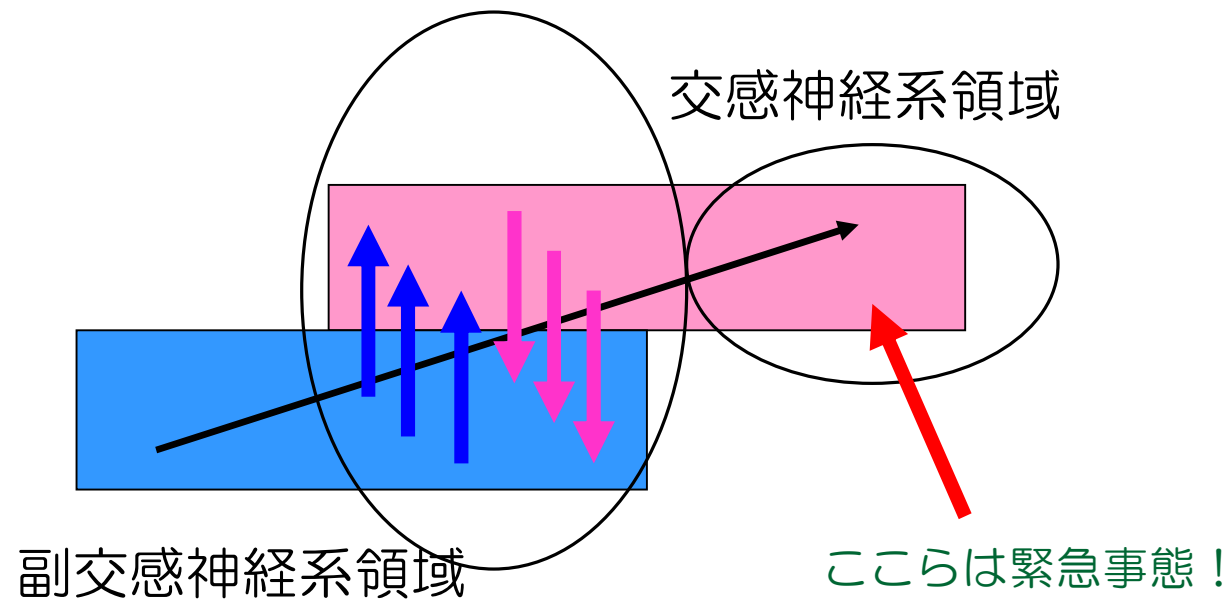
時間経過(分)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
LF (0.04 - 0.15 Hz : ms ²)	0.96	0.79	0.48	0.28	2.27	4.21
HF (0.15 - 0.40 Hz : ms ²)	3.94	2.41	2.16	2.2	4.37	7.04
LF/HF ratio (%)	24.5	32.8	22.5	13	51.9	59.6

- 運動選手の心拍変動のパワースペクトルで、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
(山崎 元、1988)
- 運動群のほうが、運動により上昇したLF/HF比の回復が早い
(早野順一郎、1996)
- 心筋梗塞、重症糖尿病患者や高齢者では心拍変動が減少（心臓の反応性が低下？）

神経支配がない場合には

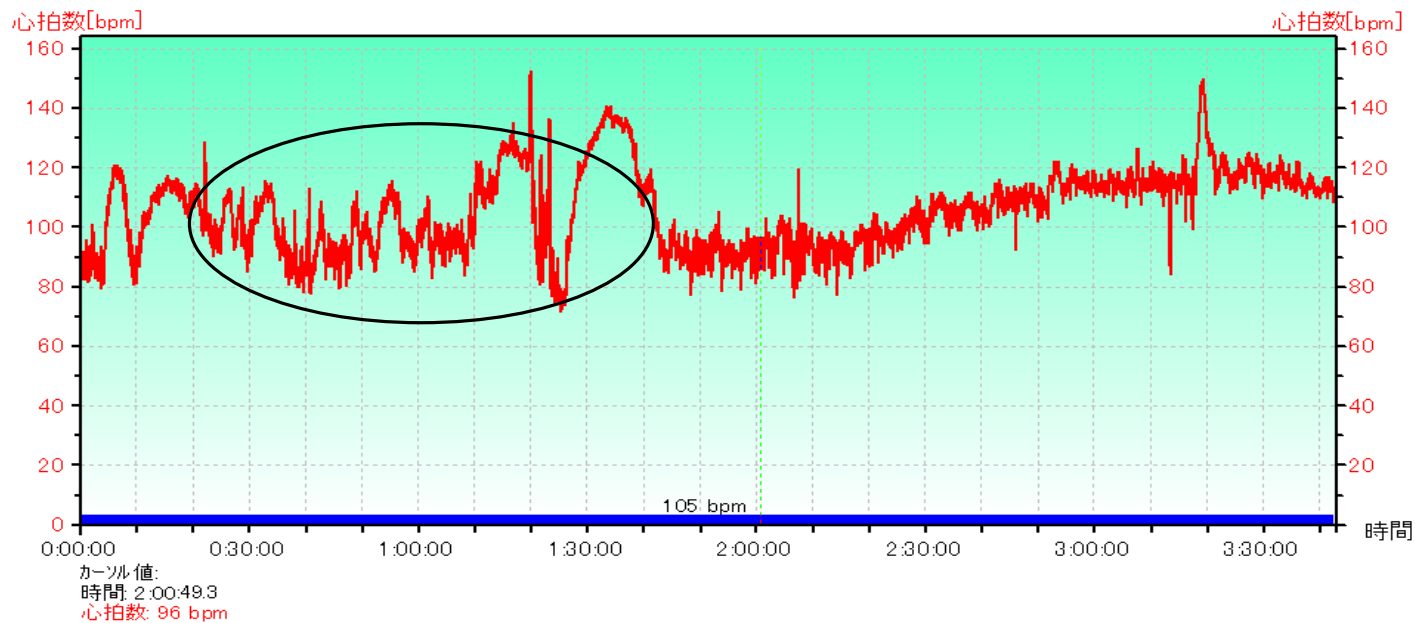
- 内因性心拍数に収斂（上昇）する
20歳で107拍/分 30歳で101拍/分
50歳で 90拍/分 70歳で 78拍/分
- 健常者では安静時には恒常的に心臓迷走神経が作動している
- 過度の安静（ベッドレスト）によるカテコールアミン耐性の低下も？

Defense-arousal system という考え方



Hilton(1982) 及び 中村と山本(1991) の概念より山崎が作製、2005

軽度の登山は心の健康も改善？



ユーザー	KEN Yamazaki	日付	2005/04/23	心拍数 平均	105 bpm		
エクササイズ	MO042301	時刻	8:59:00	心拍数 最大	153 bpm		
スポーツ	Running	継続時間	3:42:35.5				
メモ				選択	0:00:00 - 3:42:35 (3:42:35.5)		
準備完了				コーチ (KEN Yamazaki)			

新たな研究課題

運動の生理心理学的効果

運動の継続的実施の要因分析

適度な身体運動はストレスを軽減

- 脳波の二つの成分（Hzは一秒間の振動数）
 - α 波成分：8～13 Hz の脳波成分
安静、冥想、リラックス
 - β 波成分：14～30 Hz の脳波成分
緊張、意識集中
- アロマセラピーや音楽聴取でも α 波増加
- α 波バイオフィードバック療法
α 波を「気持ちのいい音」に変換しコントロール

山崎研究室での実験・・・

- 早稲田大学の実験では・・・

 - 30%強度の軽い運動で脳の α 波の左右差が減少する
(右脳と左脳の極端な分化はストレス)

 - 70%強度の運動ではだめらしいが・・・

- 軽い自転車こぎ運動の実施で脳波の α 波成分の増加（リラックス効果）と左右差の減少

 - ただし持続的能力が高いと強い運動でも効果がみられる

ということは・・・

- 自律神経系の状況がある程度分析できる？
- 例えば・・・
 - その運動は交感神経系優位か副交感神経系優位か・・・
 - その運動はリラックス効果があるか・・・
 - その運動の継続で持久性（≠持久力）は改善するか？
 - その運動の継続で自律神経への好ましい効果はあるか？
 - その運動の継続で情動反応は改善されたか？

などがある程度推定できる！

もしも運度実施が継続されると

- 心拍ゆらぎが増加して・・・
- 運動時の「爽快感」「開放感」が反復され・・・
- 自律神経系の交感神経と副交感神経の活動のバランスよい相互作用が生まれ・・・
- 抗ストレス性が改善される・・・
- 前頭連合野と情動反応との協応も改善されるかも・・・