

正弦波運動負荷に対する心拍応答と運動習慣との関係

鍋倉 賢治¹⁾・吉岡 利貢¹⁾
高嶋 渉¹⁾・篠田 知之²⁾・池上 晴夫³⁾

Daily exercise related to heart rate response during sinusoidal exercise

NABEKURA Yoshiharu, YOSHIOKA Toshitsugu,
TAKASHIMA Wataru, SHINODA Tomoyuki, IKEGAMI Haruo

Abstract

The present study is an examination to clarify the heart rate response during sinusoidal exercise. We determined the phase response and amplitude response of heart rate during sinusoidal exercise. The examination was in period of 4 min, and involved 16 physically trained, of which 9 were runners, and 14 physically untrained men. Power spectrum analysis of heart rate fluctuations was used to provide information regarding the quantitative autonomic nervous system during sinusoidal exercise. The results obtained were as follows;

1. The phase lag of heart rate was shorter in the trained group and also during light workloads in both groups.
2. The amplitude of heart rate was significantly larger in the trained group.
3. Significant correlations were found between the response of heart rate and maximal oxygen uptake and especially between the response of heart rate and daily exercise.
4. The density of high frequency fluctuations of heart rate in light workloads was higher than in heavier workloads in both groups.

These findings suggest that phase lag of heart rate in sinusoidal exercise was shorter, and the amplitude was larger in physically trained men. This tendency of heart rate response is due to daily exercise.

1. 緒言

正弦波運動負荷テスト(以下、正弦波負荷テスト)は、運動強度を正弦波状に変化させ、その時の生体反応の追従性を評価する負荷テストである。すなわち、負荷の変化に対し生体反応は遅れて追従するため、その遅れ時間や反応の大きさ(振幅)などから生体の適応力を評価することができる^{11,13)}。運動をストレスと考えた場合、正弦波負荷テストはストレスに対する適応能力を評価していることになる。そのため、正弦波負荷テストに

おける生体の反応から客観的な適応力を評価することができれば、運動ストレスに対する体力の評価につながり、その意義は大きい。

Fukuoka et al.⁶⁾は正弦波運動に対する酸素摂取量の追従性を、ランナー、アメリカンフットボール選手及び非鍛練者で比較し、ランナーの追従性は他者より優れており、負荷の変化に対し、より振幅が大きく、かつ位相遅れが短いことを明らかにしている。これに対して、アメリカンフットボール選手の振幅や位相遅れは、非鍛練者と大きな

¹⁾筑波大学人間総合科学研究科

²⁾岐阜県スポーツ科学トレーニングセンター

³⁾筑波大学名誉教授

表1 被験者プロフィール

群	性	n	年齢 year	身長 cm	体重 kg	%Fat %	BMI	最大酸素摂取量 ml/kg/min	最大運動強度 w	運動時間 h	運動日数 /week
ランナー	男	5	27.6	173.8	64.3	16.6	21.3	58.1	309	8.2	5.8
			6.5	3.77	3.58	3.13	1.64	8.32	36	3.76	1.6
	女	4	23.8	157.5	47.8	23.0	19.3	42.7	168	2.0	3.0
			2.9	2.89	3.10	4.14	1.34	5.99	26	1.57	2.7
スポーツ	男	3	21.7	171.7	65.6	17.1	22.3	56.1	281	5.0	2.7
			0.6	3.06	6.40	1.17	1.98	2.82	31	6.07	1.2
	女	4	21.3	162.0	56.3	25.8	21.4	42.4	180	12.8	5.3
			0.5	6.06	6.26	1.51	1.24	2.30	8	6.18	1.5
対照	男	5	22.2	172.6	74.0	22.7	24.9	40.9	219	0.3	0.3
			1.6	4.45	12.49	7.43	4.24	10.08	20	0.21	0.2
	女	9	21.9	158.4	54.4	26.6	21.7	39.3	162	0.7	0.4
			2.0	3.13	5.07	4.73	2.58	3.69	21	0.56	0.3

上段：平均値、下段：標準偏差

かった。このことから彼らは、持久性トレーニングが酸素摂取量の応答特性を改善したと考えた。一方、正弦波運動の研究は生体工学が端緒であり、初期の研究は正弦波運動に対する生体(例えば酸素摂取量や心拍数)反応のモデル化に重点がおかれた^{2,15)}。そのため、以後も生体反応をサインモデルに近似させ、呼吸調節機構のメカニズムなどを検討した研究が主流である³⁻⁸⁾。生体反応をサインモデルへ適合すれば、負荷変化に対する遅れ時間を位相のずれで評価できるため、異なる周期の正弦波運動時の遅れを同様に評価できる利点がある。一方、Sone et al.¹⁷⁾は、正弦波運動中の呼吸性不整脈の大きさが、負荷の上昇局面と下降局面で異なることから、運動強度に応じた自律神経活動の活性レベルの違いを指摘している。そのため、正弦波運動における負荷の高い時点と低い時点では、必ずしも生体反応の遅れが同一にならない可能性があり、サインモデルではこの差を無視してしまうことになる。Fukuoka et al.⁷⁾は、この点についても着目し、酸素摂取量の変化は正弦波運動に対し、非対称性となることを認め、その原因を酸素負債の変化、体液性要因及び神経性要因と推察している。

本研究では、正弦波運動による生体反応を運動ストレスに対する適応ととらえ、体力を評価する一つのテストとして活用できないか、と考えた。すなわち、日頃の運動量や運動の種類によって運動に対する適応力は異なるものと考えられる。そ

こで、ランナーを含む様々な運動習慣(運動量と運動の種類)をもつ広範な体力レベルの対象者に、正弦波負荷テストを実施し、運動習慣や有酸素能力などとの関係について明らかにすることを目的とした。また、負荷の最高値と最低値に分けて応答特性を評価し、負荷に応じて心拍数の適応が異なるのかどうかを明らかにし、そのメカニズムを検討した。

2. 方法

1) 被検者

被検者には健康な成人男女30名を用いた。すなわち、競技スポーツ選手、レクリエーションとしてスポーツを行なっている人、など幅広い運動習慣を持つ者16名を運動習慣者とし、そのうち、主にジョギング・ランニングを実践している者をランナー群(9名、男性5名及び女性4名)、ランニング以外の運動を実践している者をスポーツ群(7名、男性3名及び女性4名)とした。さらに、日頃運動習慣のない者を対照群(14名、男性5名及び女性9名)とした。いずれも研究内容、実験に伴う危険性などを十分に説明した後、実験参加に対する同意を得た。被検者の年齢、身長、体重、体脂肪率、最大酸素摂取量、日常の運動習慣などは表1に示した。

2) 測定項目

被検者には、まず自転車エルゴメーター(コン

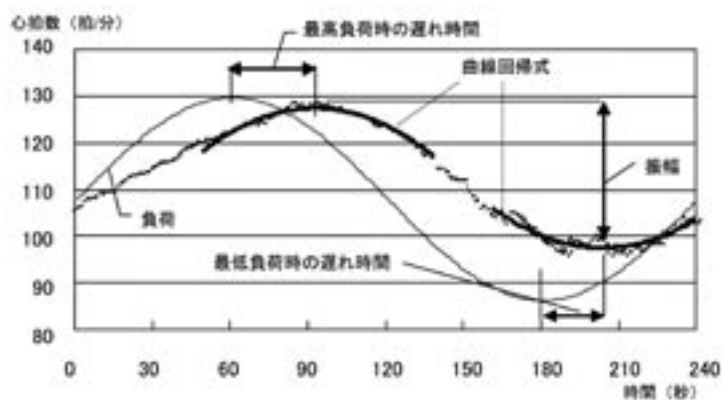


図1 心拍数の応答特性の算出

横軸：時間(秒)，縦軸：心拍数(1秒間隔値に補完し、5周期分を加算平均した値、拍/分)

細い実線：負荷の変化，太い実線：最高，最低局面における曲線回帰式ただし，負荷強度の単位は対応していない

ビ社、75XL)による多段階漸増負荷運動テストを行わせた。テスト開始時の負荷強度は被検者の体力レベルを考慮して決定し、最初の負荷は4分間、以後2分毎に男性は30w、女性は20wずつ、12分目以降は1分毎に男性は15w、女性は10wずつ負荷を漸増し、all-outに至らしめた。このテストによって被検者の最大酸素摂取量と最大運動強度を求めた。また、酸素摂取量と運動強度の一次回帰式から、正弦波負荷テストにおける最低(20%)、中間(40%)及び最高(60%)の各負荷強度を算出した。自転車運動の回転数は60rpmとした。

日を変えて、正弦波負荷テストを実施した。運動には自転車エルゴメーター(コンビ社、75XL)を用い、運動強度を外部コンピューター(Dell社製)によって自動制御し、正弦波状に変化させた。制御可能な最小負荷及び最小時間は1ワット(w)/秒である。運動中連続して心電図を測定(フクダ電子、PHV-100)し、R-R間隔から心拍数をbeat-by-beatに算出した。正弦波負荷の一周期は4分とし、負荷の最高値及び最低値をそれぞれ最大酸素摂取量の60%及び20%に設定した。正弦波負荷テストに先立ち、正弦波負荷の最低、最高及び中間に相当する負荷で各4分間ずつの運動を行ない(キャリブレーションテスト:C-Test)、それに引き続き負荷を正弦波状に変化させた。正弦波負荷は5周期繰り返し、C-Testとあわせて、運動時間は32分となった。実験はいずれも室温20~22℃の静穏な環境下で実施された。

3) 応答特性

負荷の変化に対する心拍数の応答特性として、心拍数の変動の大きさ(振幅)と負荷変化に対する心拍数変化の遅れ時間を分析した。すなわち、beat-by-beatに連続測定した心拍数を1秒間隔値に補完し、反復した正弦波負荷5周期分を加算平均した。正弦波状に変化する心拍数の山と谷の局面において、非線形最小二乗法によって曲線回帰式(2次関数)を推定し、回帰式から求めた心拍数の最高値及び最低値と、負荷の最高時及び最低時に対するそれぞれの遅れ時間を算出した(図1)。心拍数の最低値から最高値までの振幅は、C-Testにおける最高負荷時と最低負荷時の差の相対値に換算した。

4) 心拍変動のパワースペクトル解析

正弦波負荷テスト中に連続測定した心拍数から、心拍変動パワースペクトル解析を用いて心臓自律神経活動を評価した。すなわち、心電図R-R間隔時系列データを最大エントロピー法と時間領域における解析を行うため汎用時系列データ解析システム(諏訪トラスト、Mem Calc/Trawaシステム)を使用し²⁰⁾、心拍変動パワースペクトル分布を求めた。データは、正弦波負荷の最高負荷時点(1/4周期)及び最低負荷時点(3/4周期)について、それぞれを中心とする30秒間のデータを分析し、5周期分を平均した。得られたパワースペクトル

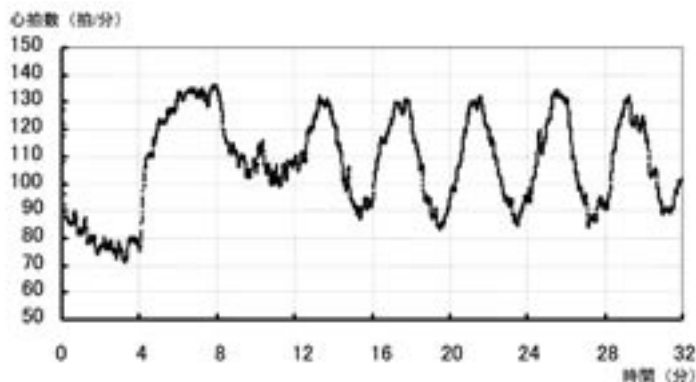


図2 正弦波負荷テスト中の心拍数変動の典型例(ランナー群 W.T.)
 横軸：時間(秒)，縦軸：心拍数(拍/分)
 0～12分：キャリブレーションテスト
 12分～：正弦波負荷テスト

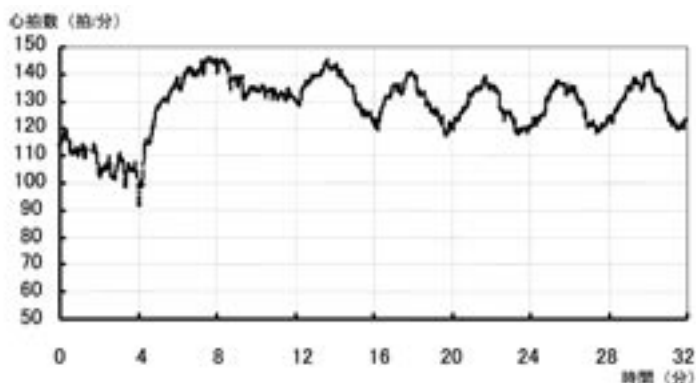


図3 正弦波負荷テスト中の心拍数変動の典型例(対照群 K.S.)
 横軸：時間(秒)，縦軸：心拍数(拍/分)
 0～12分：キャリブレーションテスト
 12分～：正弦波負荷テスト

分布から、0.04～0.15Hz及び0.15～0.5Hzの周波数帯域に含まれる成分を積分し、それぞれ低周波成分密度及び高周波成分密度とした。

5) 統計処理

心拍応答の平均値の差の検定には分散分析を行った。すなわち、振幅に関しては一元配列の分散分析を行ない、LSD法による多重比較による有意差検討を行ない、遅れ時間に関しては二元配列の分散分析で交互作用のないことを確認し、LSD法による多重比較による有意差検討を行った。

また、心拍変動パワースペクトル解析における平均値の差の検定には、対応のある t 検定を用いた。いずれも $p < 0.05$ で有意とした。

3. 結果

1) 被検者の持久性能力

最大酸素摂取量はランナー群(51.2ml/kg/min)、スポーツ群(48.2ml/kg/min)、対照群(39.8ml/kg/min)の順に高かった。

表2 全被検者の心拍数の応答特性

subject	性	遅れ時間		振幅 %
		最高負荷 sec	最低負荷 sec	
ランナー群				
T.Y	m	32.5	24.0	69.7
W.T	m	31.5	26.6	76.6
T.S	m	23.9	24.8	71.4
Y.N	m	27.7	26.1	71.4
T.K	f	30.7	29.5	80.1
T.N	f	35.4	25.5	55.0
T.T	m	28.6	22.1	65.4
M.T	f	18.4	19.9	71.6
S.K	f	40.4	34.0	62.1
mean		29.9*	25.8*	69.3*
SD		6.4	4.1	7.5
スポーツ群				
M.Y	m	35.4	27.1	68.0
T.T	m	31.3	39.5	51.9
T.N	f	45.0	27.2	69.4
M.K	m	27.6	27.8	63.2
E.S	f	30.1	26.0	61.6
R.S	f	29.3	29.3	65.6
K.O	f	25.8	31.8	74.1
mean		32.1	29.8	64.8*
SD		6.4	4.7	7.0
対照群				
M.H	m	47.7	37.6	53.6
K.S	m	42.8	41.8	40.7
T.A	m	41.7	38.9	50.6
M.F	f	40.2	25.8	53.8
Y.F	f	40.2	35.6	54.3
M.T	m	39.3	41.6	55.7
K.S	f	32.7	28.7	76.6
M.A	f	36.8	38.1	47.8
M.W	f	38.1	27.9	55.0
K.T	f	33.9	24.3	53.2
M.T	f	42.4	28.7	57.6
Y.O	m	37.6	54.0	60.4
M.R	f	26.4	41.6	47.2
M.S	f	38.9	23.9	60.6
mean		38.5	34.9	54.8
SD		5.1	8.7	8.2

* : 対照群との有意差(p<0.05)

2) 正弦波負荷テスト時の心拍数の変化

図2及び3に正弦波負荷テスト時の心拍数の推移の典型例を示した。図2はランナー群(被検者W.T)の例であり、図3は対照群(被検者K.S)の例である。いずれも負荷の変化に追従するように心拍数は変化するが、C-Test時の心拍数の変動幅に比べて、正弦波負荷テスト時の心拍数の変動幅は小さく、その傾向は、対照群のK.Sの方が顕著である。また、12、16、20、24及び28分は、正弦波負荷の1～5回目の各周期の開始時間に相当する。各周期開始時の負荷強度は中間値であること

を考慮し、比較するといずれも負荷の変化に対して心拍数の変化は若干遅れており、その遅れは対照群のK.Sの方が大きいことがわかる。そこで、全員の心拍数の応答特性を、振幅の大きさと遅れ時間で評価した。

3) 心拍数の応答特性

表2は被検者全員の正弦波負荷テスト時の心拍数の応答特性を示している。図4は、群毎の振幅の平均値である。その結果、振幅はランナー群(69.3%)で一番大きく、次いでスポーツ群

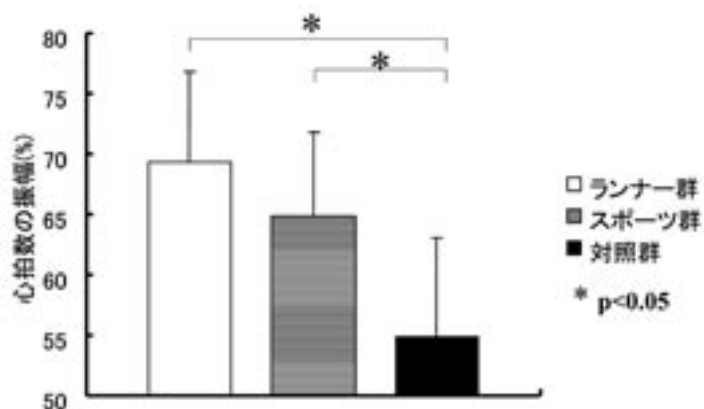


図4 正弦波負荷における心拍数の振幅
キャリブレーションテストの変動の大きさの相対値

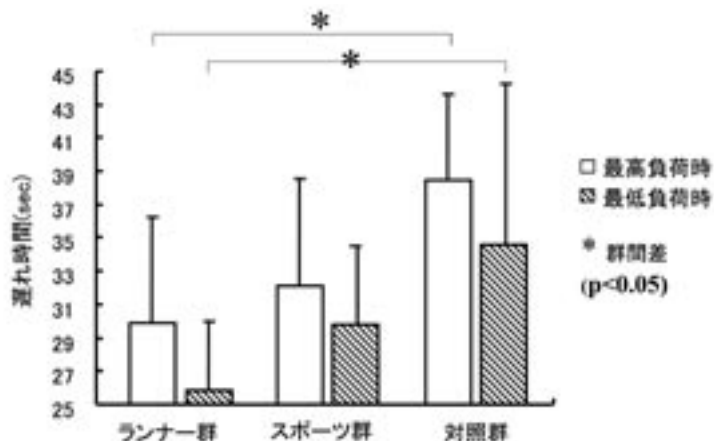


図5 正弦波負荷における最高及び最低負荷時における心拍数の遅れ時間

(64.8%)、対照群(54.8%)の順であり、群間の効果は有意であり($F(2, 27) = 10.33, p < 0.01$)、ランナー群とスポーツ群は、対照群に比べ有意に大きかった($MSe = 60.41, 5\%$ 水準)。

図5は各群の遅れ時間を、最高負荷時と最低負荷時に分けて示したものである。分散分析の結果、交互作用はなく群間に主効果があった($F(2, 27) = 29.06, p < 0.01$)。遅れ時間は、ランナー群が一番小さく、次いでスポーツ群、対照群の順であり、最高及び最低負荷時のランナー群と対照群に有意な差が認められた($MSe = 75.53, 5\%$ 水準)。一方、最高負荷時と最低負荷時の遅れ時間を比較すると、いずれの群でも最低時における遅れ時間が

短い傾向にあり、その差は3～5秒程度であった。

4)心拍数の応答特性と体力及び運動習慣との関係
表3には心拍数の応答特性(遅れ時間と振幅)と最大酸素摂取量、最大運動強度、週あたりの運動時間と運動回数との間の相関関係を示している。上段は全被検者、中段は男性のみ、そして下段は女性のみそれぞれの相関係数である。全体に遅れ時間は、最大酸素摂取量や最大運動強度、運動習慣と負の相関があり、反対に振幅は、それらと正の相関関係が認められた。男性においては、体力や運動習慣と心拍数の応答特性の間に有意な相関関係が数多く認められたのに対して、女性にお

表3 心拍数の応答特性と各パラメーターとの相関関係

	遅れ時間		振幅
	最高負荷	最低負荷	
全被検者			
最大酸素摂取量	-0.33	-0.30	0.35
最大運動強度	-0.26	-0.08	0.34
運動時間	-0.48*	-0.32	0.56*
運動回数	-0.68*	-0.51*	0.65*
男性			
最大酸素摂取量	-0.53	-0.78*	0.55*
最大運動強度	-0.71*	-0.81*	0.82*
運動時間	-0.52	-0.69*	0.78*
運動回数	-0.70*	-0.80*	0.84*
女性			
最大酸素摂取量	-0.23	0.25	0.28
最大運動強度	-0.11	0.34	0.35
運動時間	-0.46	-0.02	0.42
運動回数	-0.68*	-0.29	0.51*

* : p<0.05

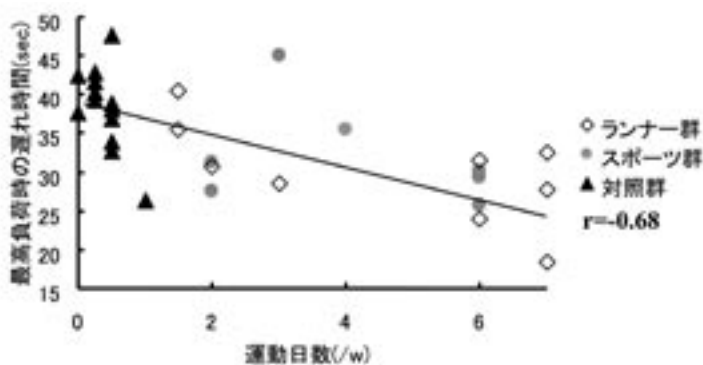


図6 運動習慣(週当たりの運動日数)と最高負荷時の遅れ時間の関係

いては、運動回数と最高負荷時の遅れ時間及び振幅との間に有意な相関関係が認められたのみであった。また、遅れ時間、振幅のいずれの相関関係も、最大酸素摂取量や最大運動強度よりも運動習慣との関係の方が強かった。図6は全被検者を対象とした運動習慣(週当たりの回数)と最高負荷時の遅れ時間の関係を示している。運動日数が多い者ほど、遅れ時間が短くなり、両者には $r = -0.68$ ($p < 0.01$) の有意な負の相関関係が認められた。一方、図7は男性を対象とした最大酸素

摂取量と振幅の関係である。全体に最大酸素摂取量の高い者ほど振幅は大きく、両者に $r = 0.55$ ($p < 0.05$) の有意な正の相関関係が認められた。

5) 心拍動パワースペクトル分布

図8は最高負荷時と最低負荷時の心拍動パワースペクトル分布を全員の平均値で示している。高周波成分の分布では、最高負荷時に比べ最低時には有意に大きく ($p < 0.01$)、低周波成分と高周波成分の比では、反対に最高時の方が有意に高かつ

なっており、パワー系と持久系の実践者が混在していた。これが心拍数の応答特性において、ランナー群と対照群の中間に位置した原因かも知れない。

また、心拍数の応答特性は、最大酸素摂取量と相関関係が認められ、最大酸素摂取量の高い者ほど追従性に優れることが明らかとなった。このことは、福岡ら^{4,6)}も酸素摂取量の応答特性で明らかにしている。さらに今回、被検者の運動量(運動頻度など)と心拍数の応答特性に相関関係が認められ、最大酸素摂取量や最大運動強度といった運動能力よりもその関係が密接であった。図7のAで印したランナー群の被検者Y.Nは、最大酸素摂取量が低く、振幅が大きかった例である。この被検者は、ほぼ毎日低負荷のランニング(ジョギング)を実践していたが、強度の強い運動(速いランニング)はほとんどしていない。このようなトレーニングは最大酸素摂取量などの持久的パワーの改善にはあまり貢献しなかったものの、最大下運動時の循環系の適応能力の改善には貢献し、それが正弦波負荷テストにおける心拍数の応答特性に関与したのかも知れない。それに対して、Bで示したスポーツ群の被検者T.Tは、最大酸素摂取量は高かったが、振幅は小さかった例である。この被検者は主に野球を実践しており、その他にウエイトトレーニングやジョギングも合わせて実施していた。彼のトレーニングの場合、最大酸素摂取量は改善したものの、心拍数の応答特性にはあまり影響しなかったのかも知れない。このように、正弦波負荷テストは最大酸素摂取量などの最大テストの指標とは異なる評価が可能となり、体力・健康の新たな視点が生まれる。

2) 負荷と心拍適応反応

先行研究のほとんどは、生体反応をサインモデルへ当てはめることが目的であり、したがって、最高負荷と最低負荷の2つの局面に分けて評価した研究は少ない^{7,12)}。本研究では、負荷の変化に対応する生体反応の遅れを、最高負荷と最低負荷の2局面に分けて求めた。その結果、いずれの群においても、最高負荷局面での遅れ時間よりも最低負荷局面での遅れ時間の方が短い傾向にあり、その差は3～5秒ほどであった。

今回の正弦波負荷テストの最高負荷は最大酸素摂取量の60%であり、テスト中の被検者の主観

的強度は運動能力テストとしてはかなり低いものであった。しかしながら、最大酸素摂取量の60%という強度であっても、被検者によっては、無酸素性作業閾値に近いか、あるいは越えていたことも考えられる。そのため、強度の高い局面では、無氣的エネルギーが動員していた可能性も考えられ、それによる負債の影響が、ピーク付近での遅れ時間を延長させたことも考えられる。また、Yamazaki et al.²¹⁾は、正弦波運動時の体温を測定し、体温も正弦波状に変化することを明らかにしている。したがって、最高負荷局面では体温も高くなることが予想され、それが心拍数を高め、遅れ時間を延長させたことも十分に考えられる。

さらに、心拍数の調節メカニズムを考えた場合、負荷が低い場合ほど、交感神経活動よりも迷走神経活動の貢献割合が強まる^{14,22)}。この点に関してSone et al.¹⁷⁾は、正弦波負荷運動中の呼吸性不整脈の大きさが、負荷の上昇局面と下降局面で異なることから、運動強度に応じた自律神経活動の違いを指摘している。迷走神経活動の変化は交感神経活動よりも速いことが知られており、負荷の低い局面において迷走神経支配の貢献が大きかったことが、最下点での遅れを短くした可能性もある。そこで、心臓自律神経活動を評価する目的で、正弦波負荷テスト中の心拍数の変動からパワースペクトル解析を行なった。パワースペクトル解析は、Akselrod et al.¹⁾の発表以降、心臓自律神経活動の評価としてよく利用されている。これは呼吸性不整脈に関わる高周波成分を迷走神経活動の指標として、低周波成分と高周波成分の比を交感神経活動の指標として評価するものである。この測定は非観血的に行えるメリットがある反面、測定には長い時間(数分間)を要すデメリットが考えられている。一方、今回用いたMem CalcによるR-R間隔の揺らぎの解析は、比較的短時間(30秒間)の心拍数の変動から、スペクトル解析が可能である^{9,19,20)}。

今回この解析手法によって最高負荷局面と最低負荷局面における心拍数のスペクトル分布を比較したところ、最低負荷局面における高周波成分は最高負荷よりも有意に高く、低周波と高周波の比は有意に低い結果となった。したがって、心臓自律神経活動を比較すると、最高負荷局面に比べ最低負荷局面では、迷走神経活動が高く、交感神経活動は低かったものと考えられる。これが両局面

での心拍数の遅れ時間の差となって現れた可能性は高い。したがって、正弦波負荷テストで生体の追従性を評価する場合、負荷の最高値と最低時では自律神経活動の貢献が異なることに留意する必要がある。また、両者の追従性を分けて評価すれば、運動強度に応じた自律神経活動の適応性についても評価できる可能性がある。今回、全被検者の値を用いた場合、最高負荷局面における追従性が最低負荷局面における追従性よりも、運動習慣との相関関係は強かった。一方、男性と女性に分けて相関関係を検討すると、男性は最低負荷における追従性が、運動習慣及び運動能力と高かったのに対して、女性では、最低負荷における追従性には、相関関係が認められなかった。男女で異なった原因は、今回明らかではないが、男女の心拍変動パワースペクトルを比較すると、男性の方が女性よりも最低負荷時における高周波成分の密度が大きかった。女性の迷走神経活動が男性よりも何らかの理由によって低く、それが両者の差になっているのかも知れない。今後この点については詳細な検討が必要である。

5. 要約

日頃の運動習慣の違いから、ランナー群、スポーツ群、運動習慣のない対照群に分類し、それぞれの正弦波負荷テスト中の心拍数の応答特性を明らかにし、運動習慣や有酸素能力などとの関係について検討した。応答特性は、遅れ時間と反応の大きさを評価した。すなわち、負荷の最高値と最低値に分けて、最高負荷と最高心拍数、最低負荷と最低心拍数のそれぞれの時間差を求めて遅れ時間とし、最高及び最低心拍数の差を振幅とした。また、負荷に応じた心拍数の適応の相違とそのメカニズムを自律神経活動の指標である心拍数の変動パワースペクトル解析によって検討した。得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 遅れ時間はランナー群、スポーツ群、対照群の順に短く、また、いずれの群も最高負荷局面よりも最低負荷局面における遅れ時間の方が短い傾向にあった。
- 2) 振幅はランナー群、スポーツ群、対照群の順に大きかった。
- 3) 応答特性には、最大酸素摂取量(男子のみ)と週あたりの運動量との間に有意な相関関係が認められた。

- 4) 負荷の最高時点に比べ最低時点の方が、心拍パワースペクトル分布における高周波成分の密度が大きかった。

以上の結果から、正弦波負荷テストに対する心拍数の応答特性は、よく運動する者ほど反応が大きく、かつ速いことが明らかとなった。このような応答特性は、最大酸素摂取量などの持久力などの体力指標よりも、運動習慣(時間や頻度)とより関係が強く、正弦波負荷テストによる心拍数の応答特性が健康・体力の新たな指標となりうる可能性が示唆された。また、運動負荷レベルに応じて心臓自律神経活動が異なり、それが負荷の最高時と最低時の遅れ時間の相違の原因となっていることが示唆された。

この研究は、平成14・15年度科学研究費補助金(基盤研究C-2、課題番号14580016)の助成を受けて行なった。

参考文献

- 1) Akselrod, S., Gordon, J. B., Madwed, J. B., Snidman, N. C., Shannon, D. C. and Cohen, R. J. (1985): Hemodynamic regulation: investigation by spectral analysis. *Am. J. Physiol.* 249, H867-H875.
- 2) Bakker, H. K., Struikenkamp, R. S. and De Vries, G. A. (1980): Dynamics of ventilation, heart rate and gas exchange in sinusoidal and impulse load in man. *J. Appl. Physiol.* 48, 289-301.
- 3) Fukuoka, Y. and Ikegami, H. (1990): Respiratory response to sinusoidal work load in humans. *Ann. Physiol. Anthropol.* 9, 175-183.
- 4) 福岡義之、近藤徳彦、後藤真二、池上晴夫(1991): 正弦波運動負荷に対するガス交換の応答特性-振幅応答及び位相差と有酸素能力との関係について-. *体力科学* 40, 60-73.
- 5) 福岡義之、鍋倉賢治、曾根涼子、権五晟、藤井宣晴、池上晴夫(1991): 正弦波運動における呼吸交換率(R)の応答. *生理人類学誌* 10, 91-100.
- 6) Fukuoka, Y., Gwon, O., Sone, R. and Ikegami, H. (1995): Characterization of sports by the $\dot{V} \cdot O_2$ dynamics of athletes in response to sinusoidal work load. *Acta. Physiol. Scand.* 153, 117-127.
- 7) Fukuoka, Y., Shigematsu, M., Fukuba, Y., Koga, S.

- and Ikegami, H. (1997) : Dynamics of respiratory response to sinusoidal work load in humans. *Int. J. Sports Med.* 18、264-269.
- 8) Fukuoka, Y., Shigematsu, M., Itoh, M., Fujii, N., Homma, S. and Ikegami, H. (1997) : Effects of football training on ventilatory and gas exchange kinetics to sinusoidal work load. *J. Sports Med. and Phys. Fitness.* 37、161-167.
- 9) 林列成、田中幸雄、寺地三朗(2002) : 時系列解析の立場から見たRR間隔変動データとMemCalc. 第12回体表心臓微小電位研究会.
- 10) 池上晴夫(1982) : 運動処方、朝倉書店、東京.
- 11) 池上晴夫(1989) : フィットネス評価法としての正弦波負荷法. *保健の科学* 5、3-8.
- 12) 池上晴夫(編) (1997) : 身体機能の調節性、朝倉書店、東京.
- 13) 池上晴夫(1998) : 正弦波運動負荷を用いた循環応答の動特性評価法の開発. 平成9年度科学研究費補助金(基盤研究B)成果報告書、pp1-30.
- 14) Martin, C.E., Shaver, J.A., Leon, D.F., Thompson, M. E., Reddy, P.S. and Leonard, J.J. (1974) : Autonomic mechanisms in hemodynamic responses to isometric exercise. *J. Clin. Invest.* 54、104-115.
- 15) Miyamoto, Y., Nakazono, Y., Hiura, T. and Abe, Y. (1983) : Cardiorespiratory dynamics during sinusoidal and impulse exercise in man. *Jpn. J. Physiol.* 33、971-986.
- 16) Nieman, D.C. (1994) : Exercise, upper respiratory tract infection, and the immune system. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26、128-139.
- 17) Sone, R., Yamazaki, F., Fujii, N., Fukuoka, Y. and Ikegami, H. (1997) : Respiratory variability in R-R interval during sinusoidal exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 75、39-46.
- 18) 菅原順、湯川英昭、白井克佳、斉藤実、鍋倉賢治、松田光生(2000) : アスリートにおける運動負荷後の心臓副交感神経系活動回復応答を用いた体調評価の有用性. *体育学研究* 45、611-618.
- 19) 鷺見紋子(2001) : MemCalcによる生体時系列データ解析の実際. 日本周術期時間医学研究会.
- 20) 常盤野和男、大友詔雄、田中幸雄(2002) : 最大エントロピー法による時系列解析-MemCalcの理論と実際、北海道大学図書刊行会、札幌.
- 21) Yamazaki, F., Fujii, N., Sone, R. and Ikegami, H. (1996) : Responses of sweating and body temperature to sinusoidal exercise in physically trained men. *J. Appl. Physiol.* 80、491-495.
- 22) Xenakis, A.P., Quarry, V.M. and Spodick, D. H. (1975) : Immediate cardiac response to exercise : physiologic investigation by systolic time intervals at graded work loads. *Am. Heart. J.* 89、178-185.