九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

生活環境評価指標としての心拍変動性の評価方法に関する研究 : 外因性及び内因性刺激の自律神経応答に及ぼす相互作用の検討

石橋, 圭太

https://doi.org/10.11501/3168350

出版情報：九州芸術工科大学, 1999, 博士（芸術工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

第 2 章

生活環境評価指標として心拍変動性に対する測定時の呼吸に関する検討

2.1.　はじめに

心拍変動性(HRV)には、呼吸による律動的な心拍数の変動である HF 成分と、非呼吸性の LF 成分が含まれている。一般的な呼吸状態ではこの二つの変動成分は出現する周波数帯域が異なるので、両者の分離は可能である。しかしながら、迷走神経活動の指標としての HF 成分を考えた場合、呼吸周期や一回換気量などの変化による呼吸パターンの変化は HF 成分に影響を及ぼす因子であり、自律神経評価指標としての HRV の適用において呼吸に関する検討が必要であると考える。

Pagani et al. (1986)は自発呼吸時の HRV と比較して、メトロノームにあわせた呼吸統制による HF 成分の増大と LF 成分の減少を報告しており、交感と迷走神経活動のバランスとしての LF/HF 比は迷走神経優位に変位するとしている。しかしながら、Pagani et al. (1986)は、同時に、これらが呼吸パターンの変化に起因することも示唆している。呼吸を統制させることによる利点として、HRV における各変動成分の発生因を特定することが容易になることである。呼吸周期を統制することによって HF 成分の発生する周波数帯域を LF 成分が発生する周波数帯域と明確に分離することが可能であるが、一回換気量の増減によって RSA 振幅が迷走神経のトーヌスとは無関係に変化することが確認されている(Kollai and Mizsei, 1990; Grossman et al.,

1991)。従って、一回換気量の変化による HF 成分の応答は必ずしもその状態での心拍数に対する迷走神経性調節の量的寄与を反映しているわけではなく、測定時の呼吸統制において一回換気量の統制の必要性も生じる。しかしながら、呼吸を統制させることによる精神的要因も無視できない。HF 成分は暗算作業、反応時間課題やスピーチタスクなどの精神負荷により減少することが報告されており(Berntson et al., 1994; Láng et al., 1991-92; Langewitz and Rüddel, 1989; Pagani et al., 1991)、生活環境評価指標として、HRV の変化から精神的要因も含めて評価するためには、その呼吸統制による精神的影響を検討する必要があると思われる。

一方において、呼吸を統制することにより測定が簡便な自律神経評価指標としての HRV の有用性が制限されることも考慮しなければならない。Grossman et al. (1991)は、HF 成分を迷走神経活動の指標として用いるのであれば、HRV を測定する際に被験者の呼吸をある一定のパターンに統制させることを推奨しているが、同時に、被験者が他のタスクに従事しているときに呼吸統制が難しいことも指摘している。Kobayashi (1998)は、呼吸周期を統制した上での一回換気量の増減に伴う HF 成分の変化を各被験者の肺活量に対する相対値で補正する方法を提唱している。また谷口ら(1995)は、RSA が呼吸に同期した変動であることに注目して、心拍変動と呼吸曲線の時系列データの相互相関関数を用いることにより HRV の呼吸性の変動成分を定量的に評価できる手法を提案している。この手法は呼吸と心拍変動との相互相関関数の最大値、即ち線形結合度から心拍数の変動の中で呼吸性の変動を選択的に推定するので呼吸の変化による影響を受けにくいとされた。Kobayashi (1998)や谷口ら(1995) が注目しているのは、呼吸循環器系に対する呼吸と心拍との入出力関係からの HRV の評価であり、この手法がどの程度呼吸による影響を取り除くことができ、また生活環境評価指標として適用可能であるかについては検討する必要がある。

このような観点から、本実験では呼吸統制による精神的要因、及び呼吸統制が困難な精神作業時に、呼吸による末梢性の変化が HRV から評価される交感神経と迷走神経活動の相対的寄与に影響を及ぼすことを考慮した HRV の評価方法について検討した。呼吸統制の影響に関する評価において、Pagani et al.(1986)のように呼吸統制をさせたことにより自発的な呼吸パターンから呼吸パターンが変化する場合、その HF 成分の変化が呼吸統制による精神的要因によるのか呼吸パターンの変化によるのかが判別できない。そこで第 2 章(本章)では、HRV の測定時の呼吸による影響を検証するために、3 種類の異なる条件で測定した HRV を相互に比較した(図 2.1)。3 種類の条件は、被験者に呼吸に関して何も教示しない条件(B1)、呼吸周期と一回換気量の両方を統制させる条件(B2)、及び呼吸条件 B1 で得られた自発呼吸のパターンを追従させるよう呼吸を統制させる条件(B3)、である。呼吸条件 B2 では、異なる呼吸周期と一回換気量を組合せた 24 種類の呼吸パターンを検討した。また、

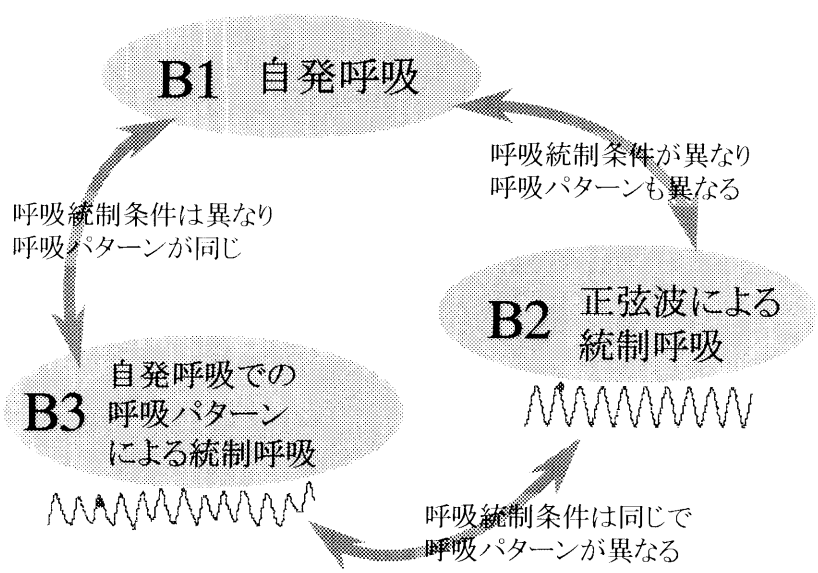

図 2.1　3 つの呼吸条件の相互関係

B3 条件では B2 条件と同様に呼吸周期と一回換気量の両方を統制させているが、その波形のパターンは B2 条件と異なり被験者自身の自発的な呼吸パターンを示す。本実験では、これらの呼吸条件で得られた HRV を相互に比較することにより、呼吸周期や一回換気量という因子のみならず、その波形も含んだ呼吸パターンの変化による影響を検証し、さらに呼吸統制の影響を検証した。その上で、B2 条件での 24 種類の呼吸パターンに対する HRV の応答から、自律神経評価指標としての HRV の妥当性と呼吸パターンの変化に対する HRV の補正法について検討を加えた。

2.2.　方法

2.2.1.　被験者

被験者は健康な男子学生 6 名(平均年齢 22.7 ± 0.5 歳)であり、被験者の肺活量はそれぞれ、3380、3405、3477、4335、4640、及び 4840 ml であった。

2.2.2.　実験手順

実験は室温 23℃、床から 730mm の机上面の水平面照度が 500lx に保たれたシールドルームで行われた。実験室及び実験装置の概要を図 2.2 に示す。

3 種類の呼吸条件のうちで、呼吸統制を行わせないのは呼吸条件 B1 のみであり、B1 条件では被験者に呼吸に関して何も教示せずに測定した。この被験者の自発的な呼吸から、せき、くしゃみ等の突発的な呼吸の変化がない区間を選択し解析に用いた。

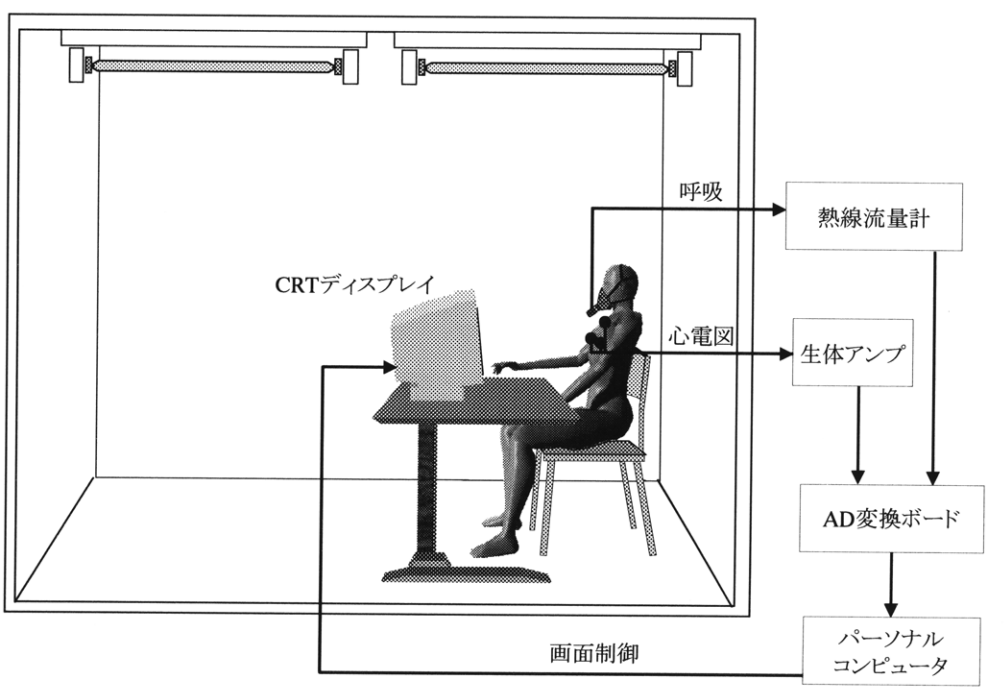

図 2.2　実験室及び実験装置の概要

呼吸統制を行わせる呼吸条件 B2 と B3 では、被験者の正面に設置した画面に表示された曲線を、被験者の呼吸によって制御される円形カーソルでトレースする方法で呼吸統制を行わせ測定した。この円形カーソルは、吸気に対して画面の上方へ、呼気に対して画面の下方へ動き、時間経過により右方へ移動する。呼吸条件 B2 と B3 で画面に表示させる曲線の例を図 2.3 に示す。この呼吸統制の方法は、メトロノーム等を用いて呼吸の頻度のみを統制する方法よりも呼吸統制に伴う主観的な負担度が高く(小林と河原, 1999)、難易度が高いと思われたので前日に被験者に十分練習させた。

呼吸条件 B2 では、画面にトレースさせる曲線として正弦波を表示した。この正弦波の振幅と周期を変えることで、統制させる呼吸周期と一回換気量をコントロールした。変化させた呼吸周期は 2 秒から 6 秒の範囲で、一回換気量は被験者の肺活量に対して 10%から 50%の範囲で指定した。予備実験において、これら呼吸周期と一回換気量の組み合わせに対して、指定された呼吸パターンをトレースすることが不可能であった条件があったため、本実験

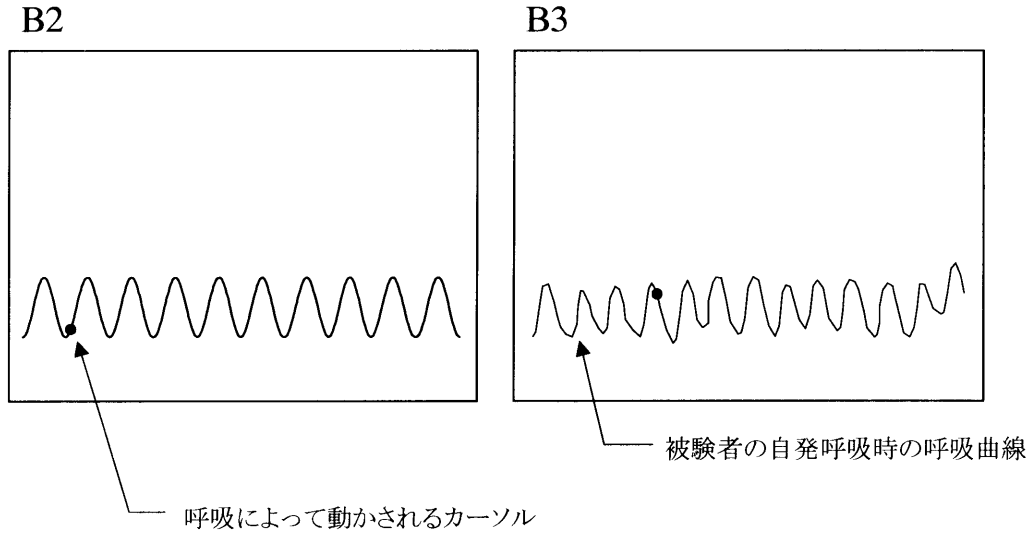

図 2.3　呼吸条件 B2 と B3 で表示される画面の例

においては、それらの条件を除いた 24 種類の呼吸パターンを測定した(表 2.1)。

呼吸条件 B3 では、呼吸統制の為にトレースさせる曲線として画面に呼吸条件 B1 で解析に用いた区間の自発的な呼吸パターンを表示した。従って、呼吸条件 B1 と B3 で得られた HRV は、呼吸パターンが同じものとみなして良い。また B3 条件は繰り返し 3 回測定した。

表 2.1　B2 条件で呼吸統制に用いた呼吸周期と一回換気量の組合せ

呼吸周期	2秒	3秒	4秒	5秒	6秒
一回換気量	10%	10%	10%	10%	10%
	20%	20%	20%	20%	20%
	1000ml	1000ml	1000ml	1000ml	1000ml
		30%	30%	30%	30%
			40%	40%	40%
				50%	50%

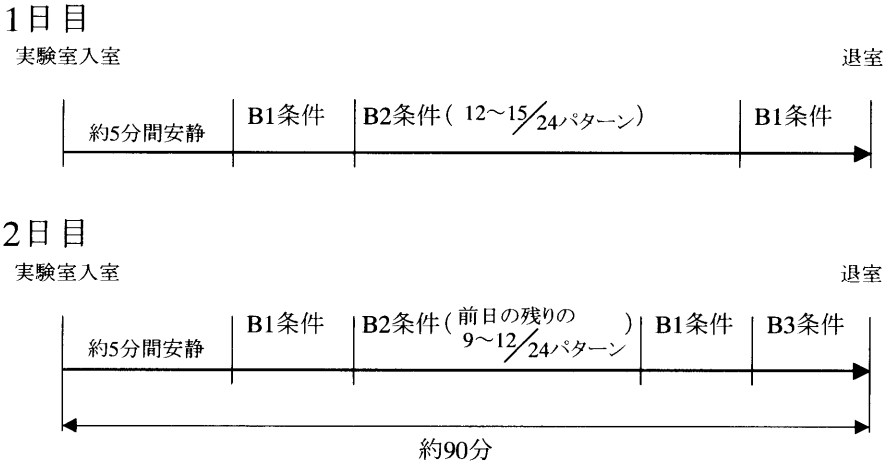

図 2.4　実験のスケジュール

測定は、各呼吸条件を 2 日間に分けて行い、各被験者、同じ時間帯で測定した。各呼吸条件の測定の順序を図 2.4 に示す。呼吸条件 B2 での 24 種類の呼吸パターンの順番は各被験者でランダムに行った。B1 条件は 2 日間に分けて 4 回測定したが、B3 条件で用いた呼吸曲線は直前の B1 条件で得られたものを用いた。

2.2.3.　データの記録と解析方法

心電図は胸部双極誘導により導出され、生体アンプ(日本光電, AB-621G)により増幅された。呼吸は被験者に着用させたマスクに装着した熱線流量計(ミナト医科学, RF-H)により測定された瞬時肺活量である。被験者の心電図と呼吸は同時に記録され、12 ビット A/D コンバータ(カノープス電子, ANALOG-PRO Jr.)を介してパーソナルコンピュータ(EPSON, PC-386V)に取りこまれた。サンプリング周波数は 250Hz であった。呼吸統制を行う呼吸条件では、パーソナルコンピュータに取りこまれた被験者の瞬時肺活量の変化は被験者の正面に設置された画面上に表示されるカーソルの動きとしてフィードバックされる。なお、熱線流量計により測定される被験者の瞬時肺活量は、流量として検知されたものを積分したものであるので、測定時間の延長により誤差が積算され呼気終了時に基線に戻らなくなることがある。このため、呼吸統制を行う前に、測定器からの値を基線に戻すスイッチを被験者自身に操作させて、呼気終了時に基線にカーソルが戻るように指示した。

取りこまれた心電図波形から HRV の周波数解析までの手順は以下のように行った。まず心電図波形から R 波を検出し RR 間隔列を求め、この不等間隔データである RR 間隔列を 10Hz の直線補間で等時間間隔化し、心拍数に変換した後、同時に取りこまれた呼吸曲線とともに磁気ディスクに記録した。次に、10Hz 補間で作成した心拍時系列データ 512 点から一次トレンドを除去した後、FFT (fast Fourier transform) によりスペクトル推定を行いパワースペクトルを求め、この心拍変動スペクトルの 0.137～0.586Hz の区間を

積分したものを HF 成分とし、0.059～0.137Hz の区間を積分したものを LF 成分とした。なおスペクトル推定に際しウィンドウウィング処理は行っていない。

HRV に対する呼吸による変化の補正法については、谷口ら(1995)の報告をもとに、式 2.1、及び式 2.2 に示すように、B2 条件で得られた心拍変動の時系列と呼吸の時系列との相関係数から呼吸性相関係数(r-RESP)を算出した。これは、心拍全体の変動係数から呼吸性変動係数(CV_{RESP})を抽出するために用いられる。

$$\text{r-RESP} = \left|\rho_{xy}(\tau_{\max})\right| \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{式2.1}$$

$$CV_{RESP} = \frac{C(\tau_{\max})}{\text{mean}[X(t)]\cdot\sqrt{C_y(0)}} = \frac{\text{r-RESP}\cdot\sqrt{Var[X(t)]}}{\text{mean}[X(t)]}\times 100 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{式2.2}$$

式中の記号は以下の通りである

$X(t)$: 心拍変動時系列

$Y(t)$: 呼吸曲線時系列

τ : 時間変位

$\tau_{\max}$: 相関係数の絶対値が最大となる時間変位

$C_x(\tau)$: $X(t)$ の自己共分散関数

$C_{xy}(\tau)$: $X(t)$ と $Y(t)$ の相互共分散関数

$\rho_{xy}(\tau)$: $X(t)$ と $Y(t)$ の相関係数(基準化相互共分散関数)

相関係数は

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{C_{xy}(\tau)}{\sqrt{C_x(0)\cdot C_y(0)}}$$

と定義されすべての τ について

$$-1 \le \rho_{xy}(\tau) \le 1$$

を満たす。

また Kobayashi (1998)が提唱した一回換気量の変化に対する補正法も同様に B2 条件で得られたデータから検討した。

2.2.4. 統計処理

呼吸条件 B2 における、呼吸周期と一回換気量の影響に対する統計解析は、呼吸周期、一回換気量、被験者を要因とした 3 元配置の分散分析を用いた。なお分散分析には、呼吸周期が 3〜6 秒、一回換気量が 10%、20%、1000ml、及び 30%の区間のデータを用いた。3 種類の呼吸条件間の比較には対応のある t 検定を用いた。有意性の危険水準は 0.05 以下とした。

2.3. 結果

2.3.1. 自発呼吸時(呼吸条件 B1)の結果

B1 条件における呼吸周期は 3.6 ± 0.5 秒 (平均値 ± 標準偏差)であった。また一回換気量は、各被験者の肺活量に対して 14.3 ± 2.7%であった。HF 成分は、それぞれの呼吸周期と一致した周波数帯域に出現した。

2.3.2. 呼吸統制時(呼吸条件 B2)の結果

表 2.2 に B2 条件における 24 種類の呼吸周期と一回換気量に対して設定通りの呼吸が行われたかを実測値で示す。

表 2.2　B2 条件での各呼吸周期と一回換気量の実測値

上段：呼吸周期(秒)

下段：一回換気量(%もしくは ml)

平均値±標準偏差

	呼吸周期				
一回換気量	2秒	3秒	4秒	5秒	6秒
10%	2.0±0.0 10.0±0.5	3.0±0.0 10.5±0.9	4.0±0.1 10.1±0.5	4.9±0.0 10.0±0.9	5.8±0.2 11.1±1.5
20%	2.0±0.1 19.9±0.8	3.0±0.0 20.0±0.7	4.0±0.0 20.0±0.3	4.9±0.0 19.6±0.7	5.9±0.1 20.3±0.7
1000ml	2.0±0.0 1000±30	3.0±0.2 970±80	4.0±0.0 1000±20	4.9±0.0 1010±30	5.9±0.0 960±50
30%		3.0±0.0 30.0±0.5	4.0±0.0 29.7±0.7	4.9±0.0 29.5±0.7	5.9±0.0 30.0±1.0
40%			3.9±0.0 40.0±0.9	4.9±0.0 39.2±1.9	5.9±0.0 39.7±0.0
50%				4.9±0.0 49.7±1.1	5.9±0.0 48.9±1.5

B2 条件においても、HF 成分は呼吸周期と一致した周波数帯域に出現した。図 2.5 にこの HF 成分が出現する周波数帯域と呼吸周期との対応の例を示す。

B2 条件における呼吸周期と一回換気量に対する HF 成分の変化を図 2.6 に示す。分散分析の結果、HF 成分に対する呼吸周期の主効果($F[3, 15] = 6.34$, $p < 0.01$)と一回換気量の主効果($F[3, 15] = 12.62$, $p < 0.001$)が共に有意であった。しかしながら呼吸周期と一回換気量の交互作用($F[9, 45] = 1.24$, N.S.)

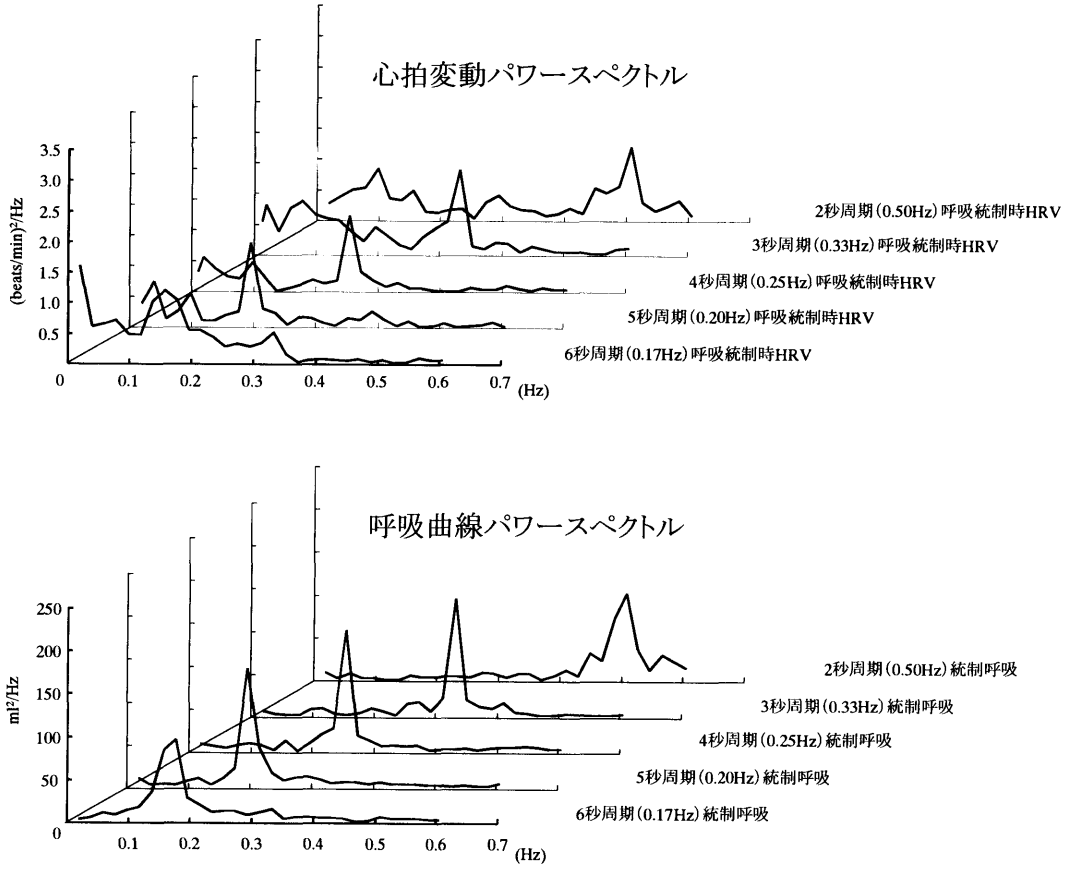

図 2.5　呼吸条件 B2 での呼吸周期が 2 秒から 6 秒の間での
心拍変動と呼吸曲線のパワースペクトルの例
すべて 20%の一回換気量、被験者 A

は有意ではなかった。これらのことから、呼吸周期の延長と一回換気量の増大に伴って HF 成分が増加したことが示されたが、呼吸周期と一回換気量の HF 成分に対する交互作用は見られなかった。この呼吸に対する HF 成分の応答を、呼吸周期と一回換気量を独立変数に用いて重回帰分析したところ、両変数に対して有意な 1 次回帰が得られ、重相関係数から呼吸周期と一回換気量の変化により HF 成分の分散の 47%が説明されることが示された。またそれぞれの変数に対する HF 成分の標準偏回帰係数の比較から、B2 条件における呼吸周期と一回換気量の変化幅に対しては、HF 成分が一回換気量の変化に対してより強く影響を受けていることが示された(表 2.3)。式 2.3 はこの回帰分析によって得られた HF 成分の呼吸周期と一回換気量に対する回帰式である。

$$HF = 0.00661 \cdot Rc + 0.00271 \cdot Tv + 0.0161 \qquad \text{式 2.3}$$

式中の Rc は呼吸周期を示し単位は秒である。一方、Tv は一回換気量を示し単位はパーセントで被験者の肺活量に対する百分率である。

図 2.7 に呼吸周期と一回換気量に対する LF 成分の変化を示す。分散分析の結果、LF 成分に対する呼吸の影響は、呼吸周期、一回換気量ともに有意な主効果が見られず、また有意な交互作用も見られなかった。

表 2.3　呼吸条件 B2 での呼吸周期と一回換気量に対する HF 成分の応答
HF 成分を従属変数とした重回帰分析結果

独立変数	標準偏回帰係数	回帰係数	偏相関係数	
呼吸周期(秒)	0.169	0.00661	0.213	$p < 0.05$
一回換気量(%)	0.609	0.00271	0.619	$p < 0.001$

n = 144　　重相関係数 = 0.683, $p < 0.001$

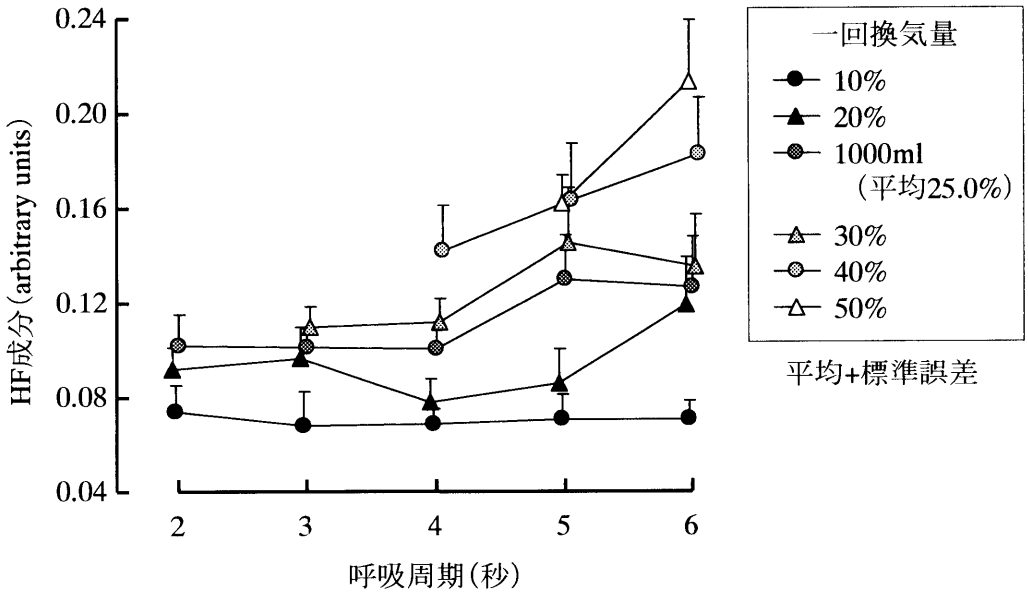

図 2.6　呼吸条件 B2 における呼吸周期と一回換気量に対する HF 成分の変化

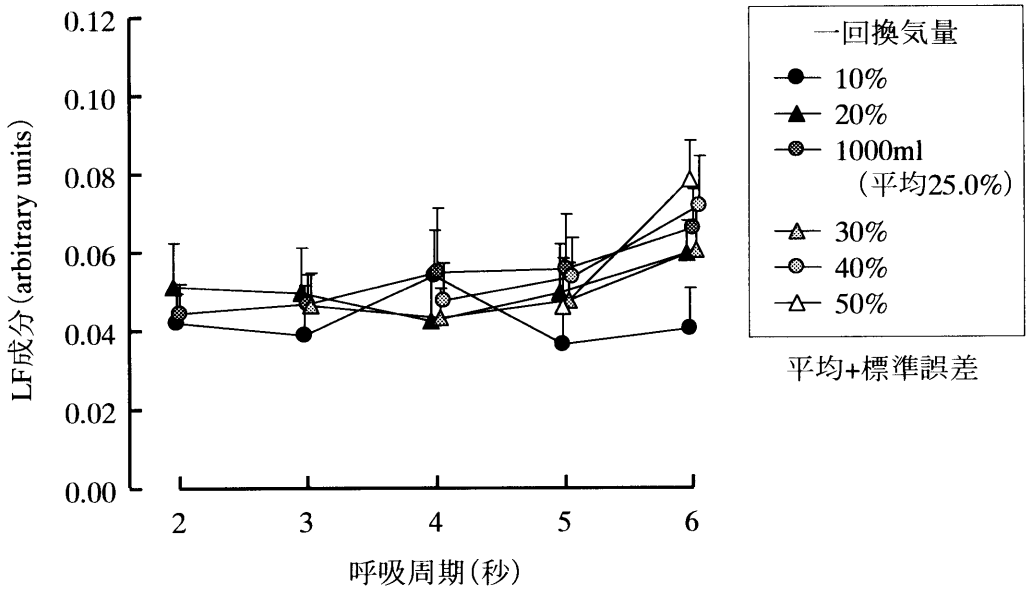

図 2.7　呼吸条件 B2 における呼吸周期と一回換気量に対する LF 成分の変化

2.3.3.　呼吸条件 B1 と B2 の比較

自由呼吸(B1)と統制呼吸(B2)での HRV の比較は、それぞれ呼吸パターンが異なるので、直接比較することが出来ない。そこで、前項での重回帰分析で得られた式 2.3 に対して、B1 条件での呼吸の平均呼吸周期と平均一回換気量を当てはめ推定値を算出し、実際に B1 条件で得られた HF 成分と比較した。従って、呼吸による影響がみられなかった LF 成分に対してはこの推定値を介しての比較は行っていない。

図 2.8 に示すように、B1 条件での HF 成分の実測値は、式 2.1 からの推定値よりも有意に($p < 0.01$)大きな値を示した。これにより、呼吸統制を行い、かつ、呼吸パターンを正弦波にさせた場合、自発呼吸時(B1)と比較して HF 成分が有意に小さくなる事が示唆された。

2.3.4.　呼吸条件 B2 と B3 の比較

呼吸条件 B2 と B3 での HRV の比較も同様に、B3 条件の HF 成分の実測値と B2 条件で得られた呼吸周期と一回換気量に対する HF 成分の回帰式から推定値を求め比較した。図 2.9 に示すように、B3 条件での HF 成分の実測値は、式 2.1 からの推定値よりも有意に($p < 0.01$)大きな値を示した。このことから、呼吸統制を行った場合でも、呼吸パターンが、その被験者の自発呼吸の呼吸曲線であった場合と正弦波であった場合とで比較した場合、後者において HF 成分が有意に小さくなる事が示唆された。

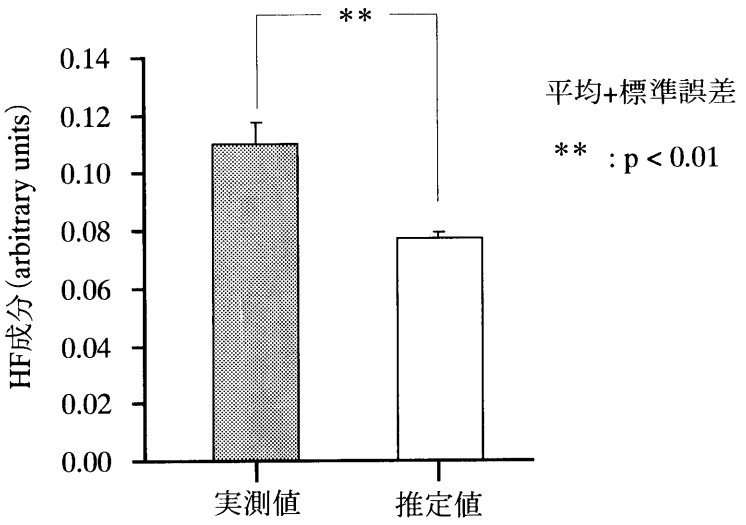

図 2.8　呼吸条件 B1 における HF 成分の実測値と B1 条件における平均呼吸周期と平均一回換気量を式 2.3 に代入し得られた推定値との比較

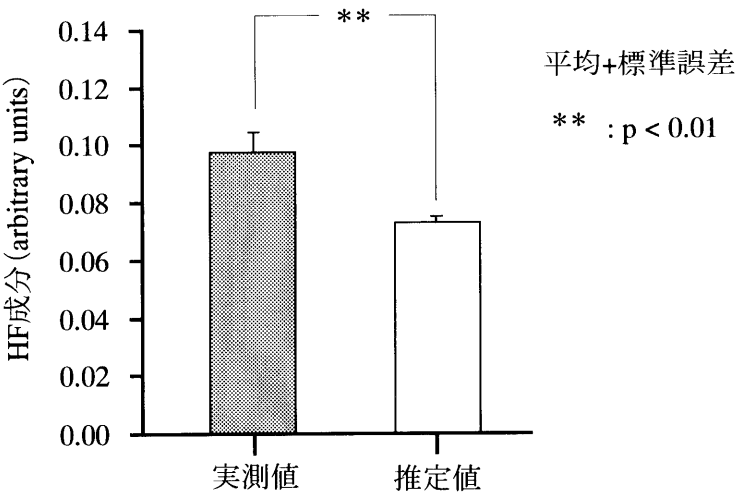

図 2.9　呼吸条件 B3 における HF 成分の実測値と B3 条件における平均呼吸周期と平均一回換気量を式 2.3 に代入し得られた推定値との比較

2.3.5.　呼吸条件 B3 と B1 の比較

統制呼吸(B3)と自発呼吸(B1)での HRV の比較は、それぞれ呼吸パターンが同一であるとみなすことが出来るので、それぞれの実測値を比較した。図 2.10 に心拍数の結果を、図 2.11 に HF、LF 両成分の結果を示す。B3 条件は同一の呼吸パターンで 3 回繰り返し測定したので、それぞれ B3.1、B3.2、B3.3 とした。対応のある t 検定の結果、呼吸条件 B3 と B1 の間で、また B3 条件を繰り返した測定値についても HF、LF 成分とも有意差が見られなかった。また同様に、心拍数にも有意差は見られなかった。これらのことから、呼吸パターンが同一である場合、呼吸を統制する行為そのものによる影響は見られなかった。また同一の呼吸を繰り返すことによる呼吸条件に対する慣れの影響も見られなかった。

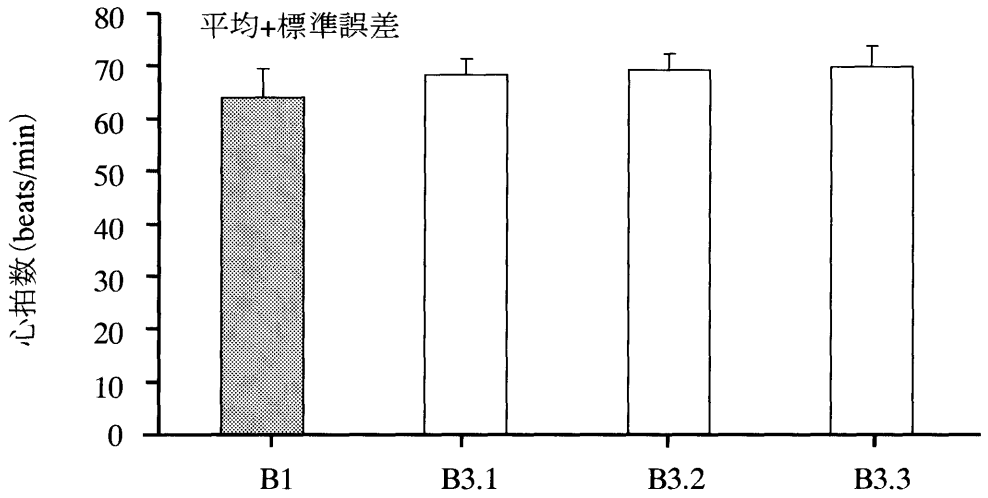

図 2.10　呼吸条件 B1 と B3 における心拍数の比較
B3 条件は同一の呼吸パターンを 3 回繰り返し
測定したので、それぞれ B3.1、B3.2、B3.3 とする。

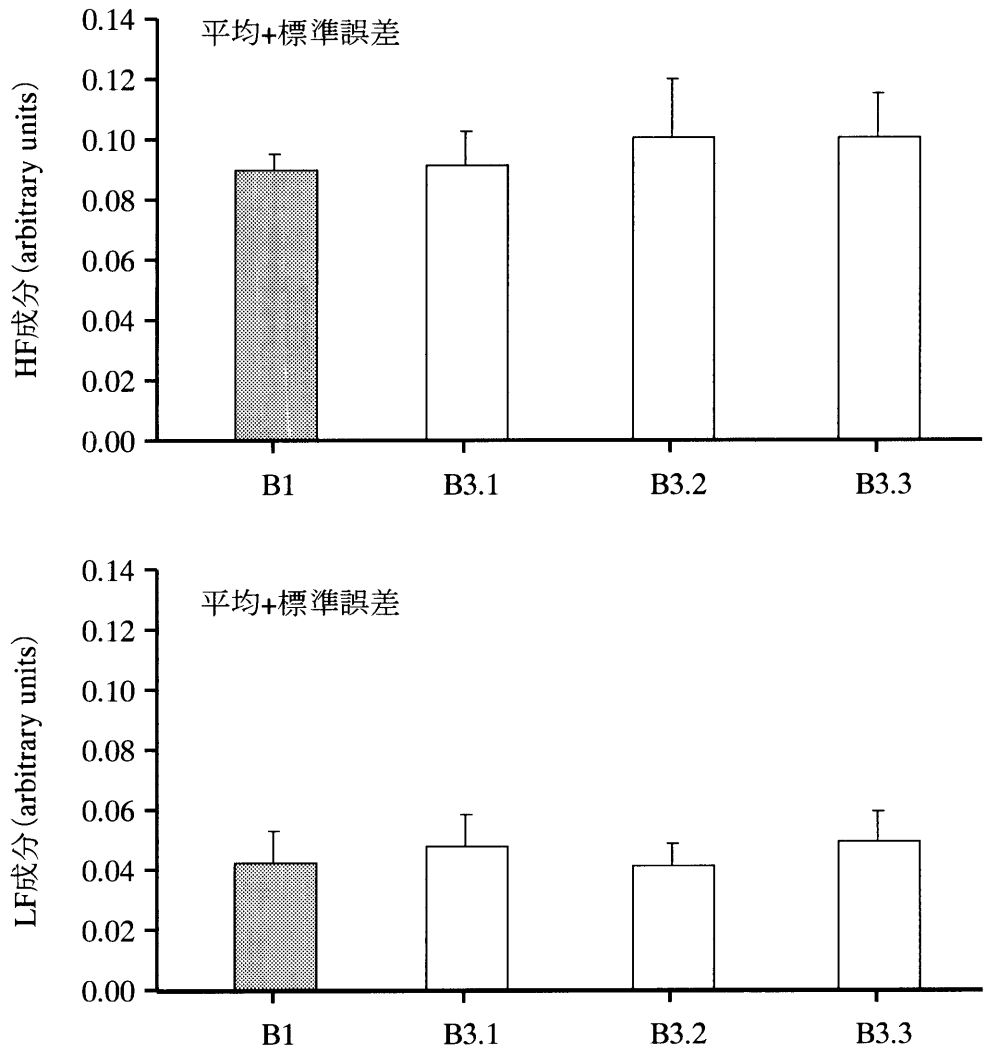

図 2.11　呼吸条件 B1 と B3 における HF、LF 成分の比較
B3 条件は同一の呼吸パターンを 3 回繰り返し
測定したので、それぞれ B3.1、B3.2、B3.3 とする。

2.3.6.　HRV による自律神経評価の妥当性と呼吸パターンの変化

表 2.4 に B2 条件での呼吸周期、及び一回換気量の変化の組合せによって現れた HF 成分、及び LF/HF 比の変化に対する心拍数との被験者毎の相関係数を示す。心拍数との対応は、HF 成分と LF/HF 比で、それぞれ被験者毎に異なっており、6 人中 3 人の被験者から、有意な相関関係が得られなかった。また有意な相関係数が得られた被験者においても、迷走神経活動の指標としての HF 成分から予測される心拍数との間の負の相関関係ではなかった。

一方、B2 条件でのこれら呼吸に対する変化に対して、Kobayashi (1998)

表 2.4　呼吸条件 B2 での心拍数と HRV の各指標との個人内相関係数
- 補正前 -

	被験者						
	A	B	C	D	E	F	平均 (標準偏差)
HF成分	0.11	0.57**	0.42*	0.30	0.56**	0.15	0.35 (0.20)
LF/HF比	0.37	-0.42*	-0.16	-0.36	-0.15	-0.33	-0.17 (0.29)

n = 24,　* : $p < 0.05$,　** : $p < 0.01$

表 2.5　呼吸条件 B2 での心拍数と HRV の各指標との個人内相関係数
- 補正後 -

	被験者						
	A	B	C	D	E	F	平均 (標準偏差)
HF成分	-0.40	-0.55**	0.56**	-0.62**	-0.22	-0.55**	-0.30 (0.44)
LF/HF比	0.64**	0.44*	0.05	0.49*	0.59**	0.37	0.43 (0.21)

n = 24,　* : $p < 0.05$,　** : $p < 0.01$

の報告した方法を用いて被験者の肺活量に対するその条件の一回換気量の割合から、一回換気量の変化による HF 成分への影響を補正したときの HF 成分、及び LF/HF 比の変化に対する心拍数との被験者毎の相関係数を表 2.5 に示す。この補正方法により HF 成分と心拍数との間は負の相関関係となり、LF/HF 比においては、正の相関関係を示すようになった。

さらに、B2 条件での呼吸の変化に対して、谷口ら(1995)が提唱した呼吸と心拍変動の相互相関関数の最大値、即ち、線形結合度(r-RESP)を算出したものが図 2.12 である。この呼吸周期と一回換気量に対する r-RESP の応答曲面を図 2.13 に示す。r-RESP は 2 秒周期の呼吸に対しては、一回換気量が少ない場合大きな値を示し、一回換気量が 40 から 50%の場合でも大きな値として算出されることが B2 条件の呼吸パターンに対する変化から示唆された。さらに、B1 及び B3 条件で算出した r-RESP を図 2.12 のグラフ上に示す。呼吸曲線が正弦波ではない B1 及び B3 条件においても、その呼吸周期と一回

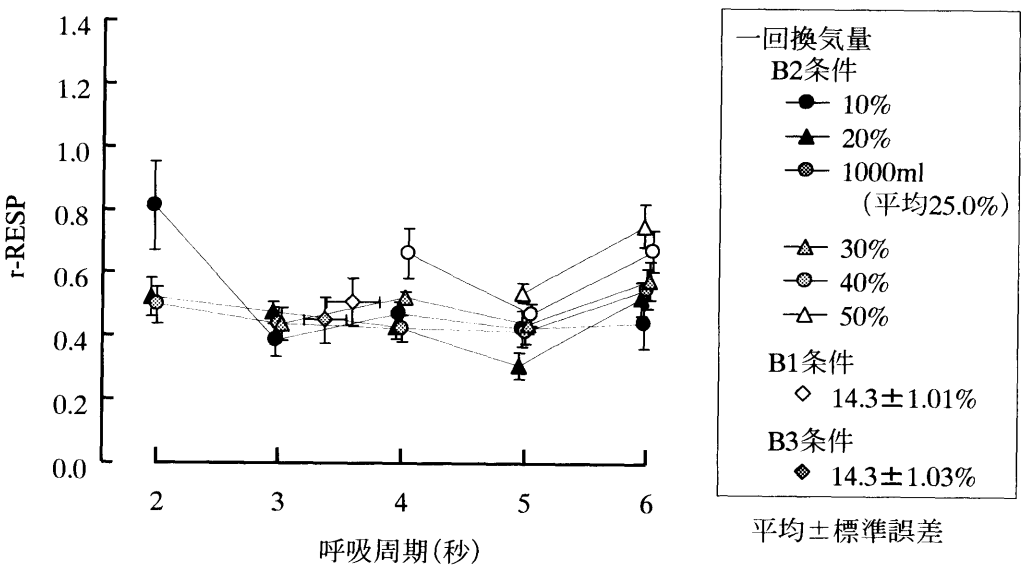

図 2.12　呼吸条件 B2 における呼吸周期と一回換気量に対する r-RESP の変化と呼吸条件 B1、B3 での r-RESP

換気量での B2 条件での値と大きな違いが見られなかった。これらのグラフから呼吸パターンの変化によらず安定した相関係数を示したのは呼吸周期が 3 から 5 秒の範囲で一回換気量が 10 から 30%の範囲であり、B1 条件での自発呼吸時の平均呼吸周期と一回換気量はこの範囲にある。一方、図 2.6 に示した同じデータに対する HF 成分の変化と比較すると、呼吸に対する一定の変化の方向が見られなくなっており、呼吸と心拍数の変動との相互相関からは呼吸の変化による偏倚を減らすことができるものと思われる。

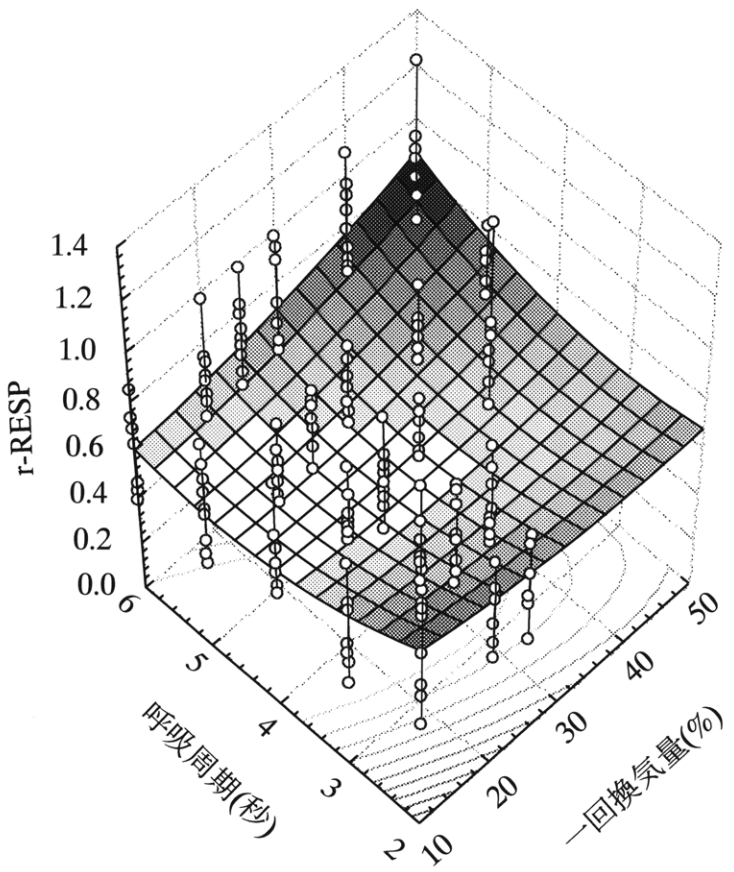

図 2.13　呼吸条件 B2 における呼吸周期と一回換気量に対する r-RESP の応答曲面

2.3.7.　結果のまとめ

図 2.14 に本実験の呼吸統制の影響に関する結果をまとめた。呼吸 3 条件の間で有意差が認められなかったのは、いずれも自発的な呼吸パターンである B1 と B3 条件間のみであり、この条件間の比較において、呼吸周期と一回換気量の両方が統制されている場合においても、心拍数、HF 成分、及び LF 成分ともに有意な差が見られなかった。一方、呼吸パターンの波形が正弦波である B2 条件との比較において、B1 条件、及び B3 条件ともに推定値を介して HF 成分において有意差が認められた。

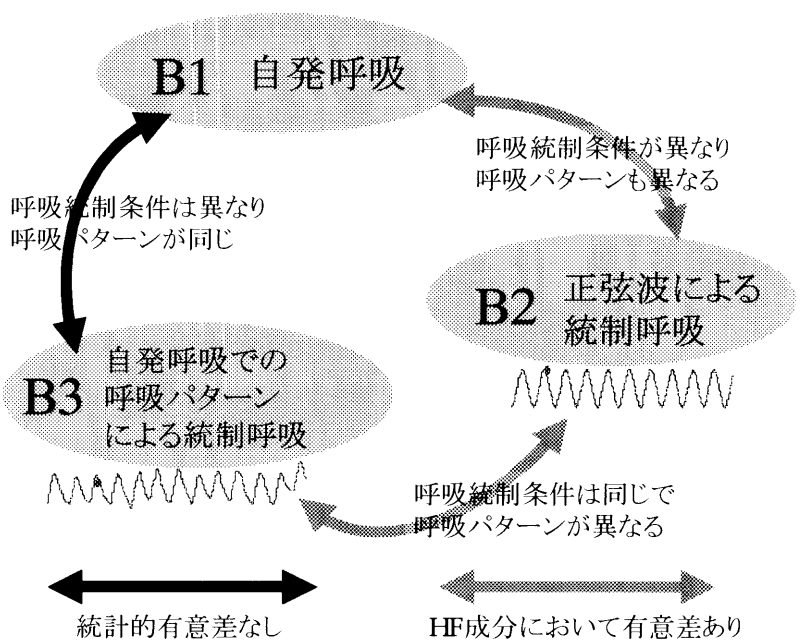

図 2.14　結果のまとめ

2.4. 考察

本実験では、呼吸パターンの変化による HRV への影響と、呼吸統制による精神的影響、及び呼吸パターンの変化に対する HRV の補正法について検討した。

HRV の各成分に対する精神的影響として、Langewitz and Rüddel (1989) は 135 人の壮年男性(44 ± 7 歳)に対する反応時間課題と暗算課題による HRV への影響を報告し、その中で反応時間課題による HF 成分と LF 成分の両方の減少は、その作業による精神負荷の影響であると報告したが、暗算課題による HF 成分の減少と LF 成分の増大は、被験者のタスク中の不規則な呼吸による影響であるとした。一方、Kobayashi et al. (1995)はトラッキング作業により、呼吸統制を行わない条件では作業により安静時に対して有意に LF 成分が減少することを報告したが、呼吸の頻度を 3 秒周期に統制した条件では作業による有意な LF 成分の変化は見られなかったとした。これらの報告は自発呼吸時における実験的課題による精神負荷の影響を HRV の変化から見た場合、タスク特有の呼吸による影響が含まれることを示唆している。

本実験では、呼吸を統制する行為のみによる精神的影響を純粋に評価できる方法として、被験者自身の自発的な呼吸を再びトレースさせる実験を行った。しかしながら、心拍数においても、また HRV の各成分においても有意な変化は認められなかった。呼吸を統制する行為に対する影響として、Patwardhan et al. (1995b)は、同様に被験者の呼吸をトレースさせる実験から心拍数の増大を報告しており、その時みられた HF 成分と LF 成分の減少に対して脊髄や脳幹よりも上位の中枢からの影響を示唆している。さらに、タスクを行うことによる一回換気量と呼吸周期の変化に対して回帰分析を用いて標準化した実験結果からは、タスクの種類によらずに精神負荷により有意な心拍数の増大とそれにともなう HF 成分の減少が報告されている (Berntson et al., 1994)。Patwardhan et al. (1995b)の結果と、本実験の結果

とで異なるのは、呼吸統制中の迷走神経活動の抑制を反映した心拍数の有意な増大が見られたことであり、本実験の結果では、この呼吸統制による心拍数と HRV の両方においてその変化は有意ではなかった。この差異において、呼吸統制による精神的影響は、その負荷に対する心拍数の亢進の有無によって左右されることが示唆される。その上、Patwardhan et al. (1995b)は、この呼吸統制を 2 回行っており、2 回目の試行においては 1 回目の試行で見られた LF 成分の減少は有意ではなかった。この 2 回の試行による呼吸統制に対する応答の差異は、その呼吸統制を繰り返すことによる慣れの影響を示唆しているものであるが、本実験の結果からは、この呼吸統制を繰り返すことによる影響はみられなかった。これらのことから、本実験ではこの呼吸統制の作業に対して十分に慣れた後の結果であり、一方、Patwardhan et al. (1995b)の呼吸統制中の心拍数の増大、及び HRV の各成分の減少は、被験者がまだ呼吸統制に慣れていないことにより精神負荷の影響が大きかった場合の結果であると考えられる。Sayers (1973)は、HRV が心拍数の変化として現れない自律神経調節を評価し得るとしたが、これらの結果は、心臓への自律神経調節に影響を及ぼすような負荷に対して、HF 成分、及び LF 成分は敏感に反応することを示している。なおこの呼吸を統制する行為そのものに対する影響については、被験者 8 名で追実験を行い、本実験と同一の結果を得ている(石橋と安河内, 1996; 図 2.15)。この追実験においても、本実験と同様の B2 条件の測定による十分な練習のあとに B1 と B3 条件を測定している。

呼吸統制による影響として、Pagani et al. (1986)はメトロノームに合わせた 3 秒周期の呼吸統制による HF 成分の増大と LF 成分の減少を報告しており、さらに LF 成分の呼吸統制時の有意な減少は Kobayashi et al. (1995)も報告している。しかしながら、これらが呼吸統制により生じた心拍数に対する自律神経性調節の変化を反映したものではなく、自発呼吸時からの呼吸パターンの変化に起因することも示唆している(Kobayashi et al., 1995; Pagani et al., 1986)。Malliani et al. (1991)は、呼吸を統制することにより、呼吸性

の心拍変動成分の帯域幅が集中することにより HF 成分が増大するものとしているが、Patwardhan et al. (1995a)は、この呼吸の帯域幅の影響については 2.86 から 4.00 秒周期(0.35 から 0.25Hz)までの呼吸周期を組み合わせて平均で 3.33 秒周期(0.30Hz)の呼吸パターンに統制した条件と 3.33 秒周期のみで統制した条件の比較から呼吸パターンの帯域幅が集中することによる HF 成分への影響は少ないとした。しかしながら、谷口ら(1994)は、呼吸周期がばらつくことよって LF 成分の周波数帯域まで呼吸の影響がある場合と比較すると、4 秒周期の呼吸統制時に HF 成分は増大し、LF 成分は減少するとし、これは Pagani et al. (1986)の結果と一致するものである。

本実験の結果からは、呼吸を統制することによる HRV の変動成分に対する影響として、B1 条件と B3 条件との比較から、呼吸パターンが自発性である場合は、心拍数、及び HF、LF 成分とも有意差は認められなかったが、B3 条件と B2 条件との比較から、呼吸パターンが自発性の呼吸パターンと異なった場合は、HF 成分において有意差が認められた。B3 と B2 条件の呼吸パ

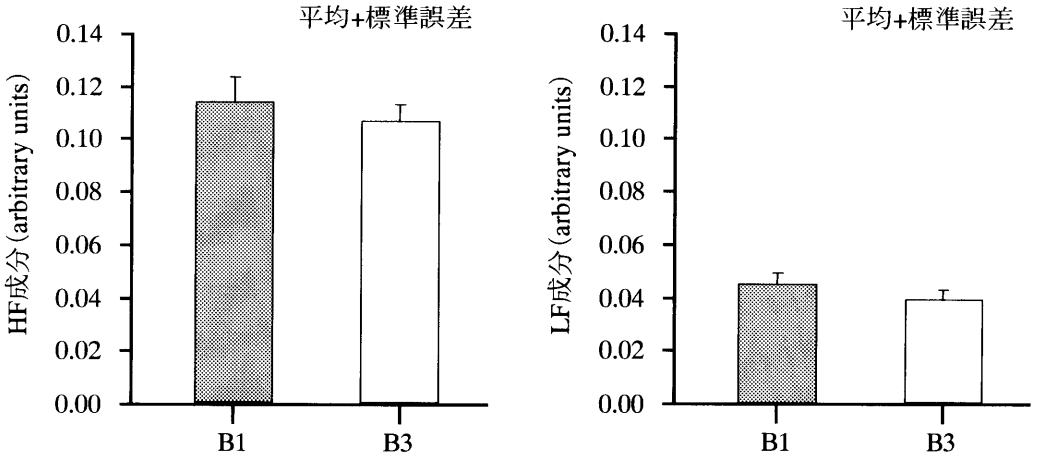

図 2.15　呼吸条件 B1 と B3 における HF、LF 成分の比較
追加実験の結果(被験者 8 名)

ターンの違いは、自発呼吸時の呼吸パターンと正弦波の呼吸パターンの違いであり、本実験の結果から、正弦波の呼吸パターンによる HF 成分の減少が示唆された。本実験では B3 条件での自発的な呼吸パターンにおける平均呼吸周期と一回換気量から推定値を求めたことから、この呼吸パターンの違いによる HF 成分の変化において、正弦波の呼吸パターンでの吸気時間と呼気時間が同じ時間に保たれていることに起因しているものと思われるが、一方において、自発呼吸時の平均呼吸周期と同じ呼吸周期に統制させた実験からは、HF 成分において有意に同じ値を示すことが報告されている(Patwardhan et al., 1995a)。このメトロノームを用いての呼吸パターンを統制させた結果からは、呼吸を統制させることによる影響は認められていない。実験で記録はなされていないが、被験者の内省報告では、正弦波の呼吸パターンよりも自発的な呼吸パターンをトレースする方が比較的負担が少なかったという報告がある。これは自発的な呼吸パターンをトレースさせたＢ3 条件では、その呼吸統制による影響が認められなかったことからも示唆される。しかしながら、B2 条件と B3 条件での推定値を介しての比較において、この主観的な反応に対する考慮はなされておらず、また前述の通り、心臓への自律神経調節に影響を及ぼすような負荷に対して HF 成分が敏感に反応することを考慮すると、これら呼吸統制に伴う HRV の影響は、その負荷に対する心拍数の亢進の有無が重要であると考えられる。

一方、呼吸周期と一回換気量を組合せて呼吸パターンを変化させた B2 条件の結果からは、呼吸周期の延長と一回換気量の増大により、HF 成分が増大し、過去の研究結果を追認した(Hirsch and Bishop, 1981; Kobayashi, 1998)。さらに、重回帰分析を用いて HF 成分の変化に対する一回換気量と呼吸周期の相対的重要度を検討した結果、本実験の呼吸条件の範囲内において、呼吸周期よりも一回換気量の変化に対する強い影響がみられた。この重回帰分析において、呼吸周期と一回換気量の変化により HF 成分の分散の 47％を説明することが明らかとなり、HF 成分の応答が呼吸パターンの変化に強く依存し

た現象であることが示された。

この呼吸パターンを変化させたときにあらわれた HRV に対する心拍数との対応に関して、Katona and Jih (1975)は麻酔下のイヌの迷走神経冷却による遮断から、RSA 振幅と心拍数の迷走神経性調節とのあいだに個体間の平均値で 0.97 ± 0.02 (n = 7)という高い相関係数を見出している。一方、本実験の結果では、心拍数と HF 成分との対応は被験者毎に異なったものであったが、被験者間の平均値で 0.35 ± 0.20 という相関係数であり、また迷走神経活動の指標としての HF 成分から予測される心拍数との負の相関関係ではなかった。さらに交感神経と迷走神経活動のバランス関係を反映するとされる LF/HF 比においても、Bootsma et al. (1994)は段階的体位変換試験によるヒトの HRV から、心拍数と LF/(HF+LF)比との間に 0.80 ± 0.13 (n = 21)という相関係数を報告しているが、本実験の呼吸を変化させたときにあらわれた心拍数と LF/HF 比の変化との相関係数は 0.17 ± 0.29 であった。しかしながら、これら呼吸の変化による HF 成分と LF/HF 比に対する心拍数の対応は、一回換気量で補正することにより改善され、それぞれの相関係数は被験者間の平均値で-0.30 ± 0.44 と 0.43 ± 0.21 となった。先の Katona and Jih (1975)や Bootsma et al. (1994)で報告された相関係数よりも低い値であったが、本実験では迷走神経遮断や体位変換による心拍数の変化を促す負荷が与えられていないことを考慮するとこの補正の効果は高いと考えられる。

一方、谷口ら(1995)が提唱した相互相関関数による呼吸と心拍変動の相関係数は、呼吸周期や一回換気量の変化による一定の変化の傾向は見られなかった。相互相関関数は算出に用いるそれぞれの変動の大きさに依存せずに線形結合度を推定する方法であり、呼吸の変化による偏倚を減少させることができるものと思われた。谷口ら(1995)が提唱している副交感神経活動の指標である CV_{RESP} は HRV の周波数解析における HF 成分に相当し、呼吸と同期した変動成分のみを反映する。従って、呼吸と同期する程度をあらわす r-RESPは呼吸性と非呼吸性の変動の割合を示すものであり、B2 条件におい

て本実験の結果では LF 成分が呼吸により変化しなかったことから、安定したr-RESPを示すものと思われた。しかしながら、B2 条件のすべての呼吸パターンで安定した相関係数が得られたわけではなく、安定して呼吸性の変動を推定できる呼吸周期と一回換気量の範囲のあることが特定された。この範囲には本実験の自発呼吸条件での呼吸周期と一回換気量のパターンが含まれ、さらには呼吸パターンの波形の違いによる大きな差異は認められなかった。

まとめとして、本実験の結果から、被験者自身の自発的な呼吸パターンをトレースさせる呼吸統制の結果において精神的影響は示されなかった。しかしながら、過去の報告との比較において、呼吸統制に伴う負荷に対する HRV の影響は、その統制に対する被験者の慣れの影響もあると思われ、その際には、心拍数の亢進の有無が重要であることが示唆された。一方、HF 成分は、呼吸周期や一回換気量の変化を含む呼吸パターンの変化によって HF 成分の振幅が迷走神経のトーヌスとは無関係に変化することが言われており(Kollai and Mizsei, 1990; Grossman et al., 1991)、これは本実験による結果からも示された。さらに、重回帰分析により呼吸周期と一回換気量の変化によって 47%の HF 成分の変動が説明されたことは、呼吸パターンの変化による末梢からの入力による影響は、HRV の変化から自律神経の応答を評価するのに適当ではなく、生活環境評価指標として HRV を用いるならば、むしろ、呼吸パターンの変化により説明されなかった HF 成分の変動部分が、生活環境の評価に活用されるべきと考える。しかしながら、この影響を考察するためには呼吸パターンの変化による HF 成分の応答が含まれていないことが前提となり、Grossman et al. (1991)が主張するように、他のタスクを行っていない条件に対する HRV からの評価において、呼吸統制の重要性が示された。また、呼吸統制が困難な精神課題の遂行時に生じる呼吸パターンの変化に対して、Kobayashi (1998)が提案した呼吸周期のみの統制によって得られた HRV に対する一回換気量の変化を補正する方法が有効であることが示された。さらに、谷口ら(1995)が提案した相互相関関数からの HRV の評価は、本実験で用

いたすべての呼吸パターンに対して適用できるとは限らなかったが、安定して呼吸性の変動を推定できる一回換気量と呼吸周期の範囲のあることが特定された。これにともない、HRV の測定に際し被験者の呼吸周期と一回換気量のパターンの特定が必要であることが示された。