

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 4 章

受動的体位変換時の精神的要因に対する自律神経 応答の検討

4.1. はじめに

HRV から評価される自律神経活動に対する外因性の刺激と内因性の刺激による相互作用について、第 3 章では、物理的環境要因による外因性の刺激と精神作業による内因性の刺激に対する応答から検討し、それぞれ異なった自律神経調節の機序が心臓に対して働いていることが明らかとなった。つまり、外因性の刺激に対して、主として副交感神経系による調節がなされているなかで、内因性の刺激に対しては交感神経活動の亢進が示唆された。しかしながら、生活環境評価において、外因性の刺激に対する主たる調節系が、副交感神経系のみでは、外因性と内因性の刺激に対する自律神経応答を考察するには不十分といえる。即ち、交感神経活動による調節が段階的に関与するような外因性の刺激が負荷されている状況においても、内因性の刺激としての精神的要因に対して同じように自律神経の調節がなされるか検討する必要がある。

本実験では、生活環境において交感神経活動を亢進させる外因性の刺激として体位変換による影響に注目した。仰臥位から立位への姿勢変化により安静時においても交感神経優位になることが知られており(Smith and Ebert, 1990)、これは薬理的遮断を用いての HRV から報告されている(Pagani et al., 1986; Pomaranz et al., 1985)。本実験ではこの体位変換を負荷し、仰臥

位から立位までの自律神経応答を段階的ヘッドアップティルト試験により評価した。

一方、内因性刺激としての精神的負荷は第 3 章と同様の精神作業を用いた。Moriguchi et al. (1991)の行った実験では 60°ヘッドアップティルトもしくは暗算課題(椅座位)のいずれかによる負荷を別々の日に行い、それぞれ負荷に対する自律神経応答を HRV から評価し、若年者においてそれぞれの負荷に対して LF 成分、及び LF/HF 比の増大を報告しており、外因性と内因性の両刺激に対して交感神経活動の亢進を示している。しかしながら、第 3 章において、両方の刺激に対する相互作用を検討するためには、両方の刺激が同時に負荷されている状態での評価が必要であることが示唆されている。従って、本実験においても段階的ヘッドアップティルト試験と精神作業を同時に行う必要がある。

本実験では、このような観点から、HRV から評価される自律神経活動に対する外因性の刺激と内因性の刺激による相互作用について再検討する。

4.2. 方法

4.2.1. 被験者

被験者は健康な男子学生 17 名(平均年齢 22.9 ± 1.05 歳)であり、身長、体重、及び肺活量は、それぞれ 170.8 ± 5.36 cm、 61.1 ± 7.68 kg、及び 3743 ± 503 ml (平均 \pm 標準偏差)であった。被験者の実験時の着衣は第 3 章と同じ T シャツ、短パンとした。被験者には、実験開始 2 時間前から、飲食、喫煙、及び運動を控えるよう教示した。

4.2.2. 実験条件

実験は、室温 28°C 、相対湿度 50%に設定された人工気象室(九州芸術工科大学 特殊生態実験棟 ホモトロン No.4)で行われた。段階的ヘッドアップティルト試験は、フットレストと手すりのついた手動のティルトテーブルを用いて行われた。実験室の照度はこのティルトテーブルを直立させたときの被験者の胸の高さを基準に、水平面照度 700lx に設定した。

ティルティングが行われる時は、必ず被験者には手すりに捕まらせるように指示し、また手動のティルトテーブルの操作は必ず実験者 2 人で行った。被験者には、ティルティングによる負荷によって失神もしくはめまいなど気分が悪くなった時は必ず申告するよう指示した。その場合は直ちに実験を中止することもあらかじめ説明した。

実験で用いたティルトテーブルの角度は、水平から直立の間を傾斜角度の正弦値において 0.2 ずつ等間隔に変化させた 6 段階の体位傾斜角度からなる。被験者は、この段階的ヘッドアップティルト試験を、同じ日に精神作業の有無で 2 回繰り返した。

実験では聴覚性弁別反応時間課題を精神作業として用いた。この精神作業は、ヘッドホンから同時に左右の耳に異なる一桁の数字を声で提示し、1 試

行毎にランダムに提示される2つの数字に対して、被験者には大きな数字が提示された側のボタンをすばやく押すように教示した。ヘッドホンの左右から同じ数字が提示されることはない。この精神作業の試行間隔は2秒に設定し、各傾斜角度毎に120試行の課題を準備した。

4.2.3. 実験手順

図4.1に実験のタイムスケジュールを示す。被験者を直立姿勢でティルトテーブルに身体を確保させた後、ティルトテーブルを水平にし、この状態で25分の安静区間を設けた。その後、傾斜角度の正弦値0.0(0°水平)条件の測定が開始され、各傾斜角度を6分間維持しながら、傾斜角の正弦値で0.2、0.4、0.6、0.8、及び1.0(それぞれ11.5、23.6、36.9、53.1、及び90.0°)に段階的にティルトテーブルの傾きを変化させた。

HRVの測定は各傾斜角度における6分間の1分目から5分目までの4分間において行われ、被験者は測定中、呼吸統制もしくは精神作業に従事した。呼吸統制はヘッドホンから提示される音に合わせた4秒周期の呼吸とした。本実験において一回換気量は統制させなかった。一方、精神作業中に呼吸を統制させる合図は、2秒ごとに提示される課題の音声であった。被験者は最初のヘッドアップティルト試験終了後、一旦ティルトテーブルから降り、10分ほど休憩した後、もう一度、別の条件で、この水平から垂直までの段階的ヘッドアップティルト試験を繰り返した。最初のヘッドアップティルト試験に精神作業を行いながら受けた被験者は17人中9人であった。

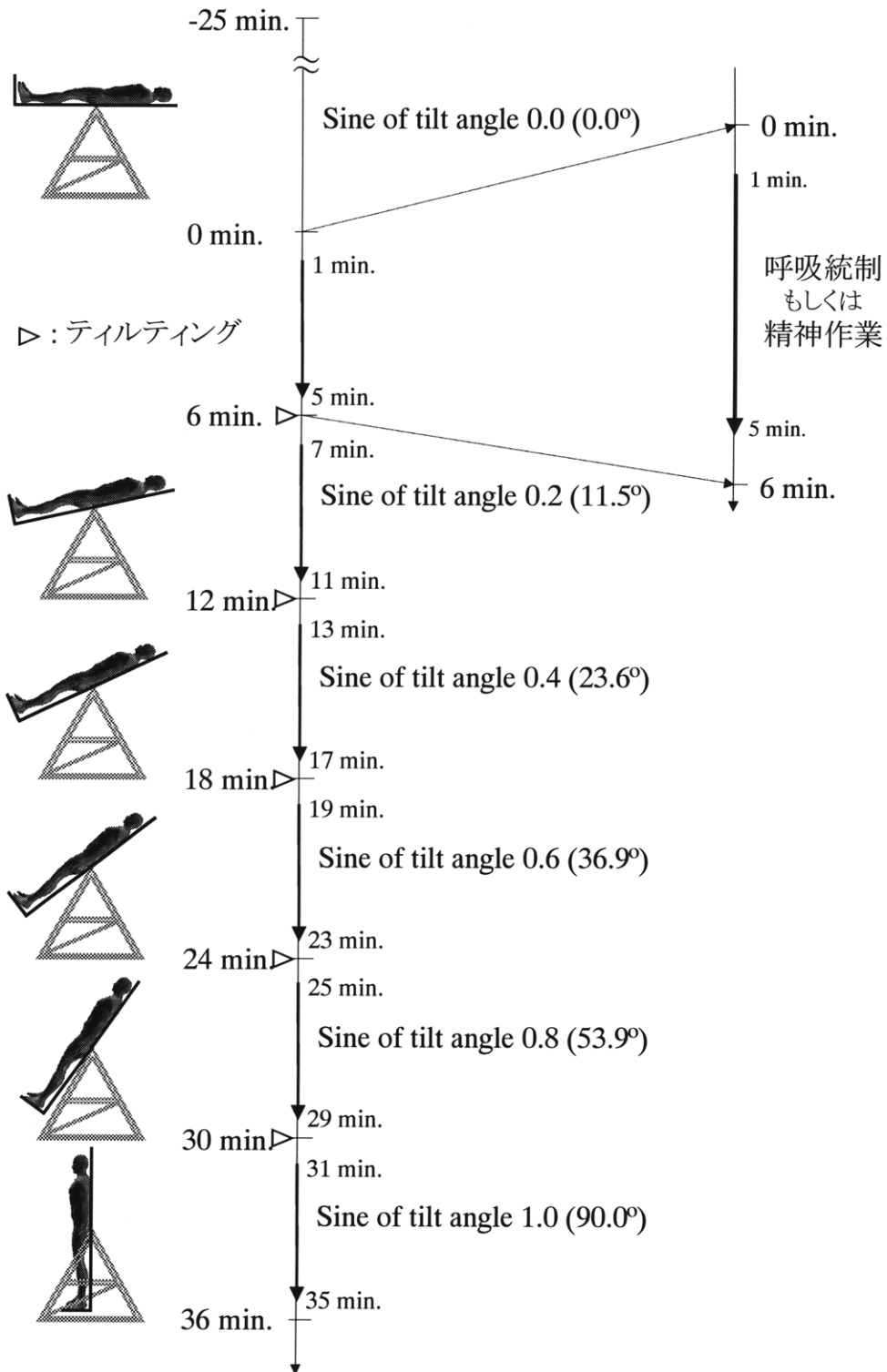


図 4.1 実験のタイムスケジュール

4.2.4. データの記録と解析方法

心電図、及び呼吸の測定、並びに記録方法は第2章とほぼ同じであり、測定装置としては熱線流量計(ミナト医科学, RF-2)、12ビット A/D コンバータ(マイクロサイエンス, ADM-652AT)、及びパーソナルコンピュータ(IBM, 2168-62J)が2章とは異なる。また記録方法としてはサンプリング周波数を1kHzに改善した。さらに、被験者の呼吸は流量として記録したので、第2章で言及したような呼吸統制に際し測定中に被験者が流量計の出力の基線操作を行う必要はなかった。流量で取りこまれた被験者の呼吸は、測定後、瞬時肺活量に変換し、一次トレンドは除去した。

10Hz 補間で作成した心拍時系列データ 1024 点から一次トレンドを除去した後 FFT 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 0.176~0.332Hz 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。心拍数、HF 成分、及び LF 成分は各ティルト角度で2度算出し、これらの値はそれぞれの平均値を用いた。

本研究では、呼吸統制に際し、呼吸周期のみを統制し、一回換気量に関しては統制していない。従って、第2章で言及したように、HF 成分は一回換気量の変化に伴いその値が変化させられる。これを正規化するために、Kobayashi (1998)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。この補正の有効性は第2章において示された通りである。

4.2.5. 統計処理

結果は平均値 \pm 標準誤差で示す。心拍数、及び HRV の各指標には3元配置の分散分析を用い、精神作業の反応時間、及び正解率には2元配置の分散分析を用いた。3元配置の分散分析の要因は、それぞれ、作業条件2水準(精神作業あり、精神作業なし)、体位傾斜角度6水準、及び被験者14水準(結果、

4.3.1.参照)であり、2 元配置の分散分析の要因は、体位傾斜角度 6 水準、及び被験者 14 水準であった。下位検定には、分散分析の結果、有意と認められた場合のみ LSD (Least Significant Difference: 最小有意差) 検定を用いた。有意性の危険水準は 0.05 以下とした。

4.3. 結果

4.3.1. 解析したデータについて

実験中ティルティング試験によるめまい等を訴えた被験者はいなかった。一方、呼吸に関して、17人中3人の被験者が指定された呼吸周期に統制することが出来なかったため、解析には14人のデータを用いた。これにより精神作業の有無に関する順序に関して、最初のティルティング試験において精神作業が負荷された条件でおこなわれたのは14人中8人の被験者であった。

4.3.2. 心拍数

図4.2に精神作業の有無に関する段階的ヘッドアップティルトに対する心拍数の変化を示す。3元配置の分散分析の結果、体位傾斜角度条件間($F [5, 65] = 139.33, p < 0.0001$)と、作業条件間($F [1, 13] = 9.26, p < 0.01$)の主効果が有意であった。さらに体位傾斜角度と作業条件の交互作用($F [5, 65] = 5.77, p < 0.001$)も有意であった。精神作業による心拍数の応答は傾斜角度の正弦値で0.0から0.4まで有意($p < 0.01$)に「精神作業なし」と比較して増大したが、それ以上の傾斜角度の増加において作業条件間には有意な差はみられなかった。

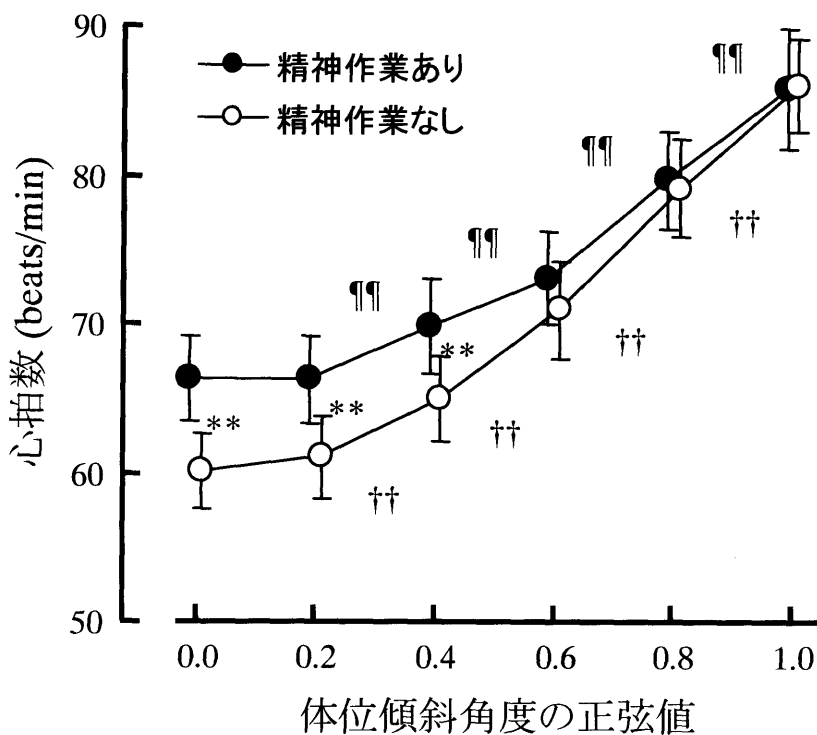


図 4.2 精神作業の有無に関する段階的ヘッドアップティルトに対する心拍数の変化。(平均値 ± 標準誤差)

¶¶ $p < 0.01$, ¶ $p < 0.05$:

「精神作業あり」条件での体位傾斜角度の変化に対する下位検定結果

†† $p < 0.01$, † $p < 0.05$:

「精神作業なし」条件での体位傾斜角度の変化に対する下位検定結果

** $p < 0.01$, * $p < 0.05$:

各体位傾斜角度条件での作業条件間の下位検定結果

4.3.3. HF 成分

図 4.3 に精神作業の有無に関する段階的ヘッドアップティルトに対する HF 成分の変化を示す。3 元配置の分散分析の結果、体位傾斜角度の主効果($F[5, 65] = 12.70, p < 0.0001$)のみが有意であった。この HF 成分の体位傾斜角度の主効果に対する下位検定の結果、傾斜角度の正弦値で 0.0 と 0.2 の間で有意差が見られなかったが、その後、傾斜角度の増加に伴い HF 成分は有意に減少した。

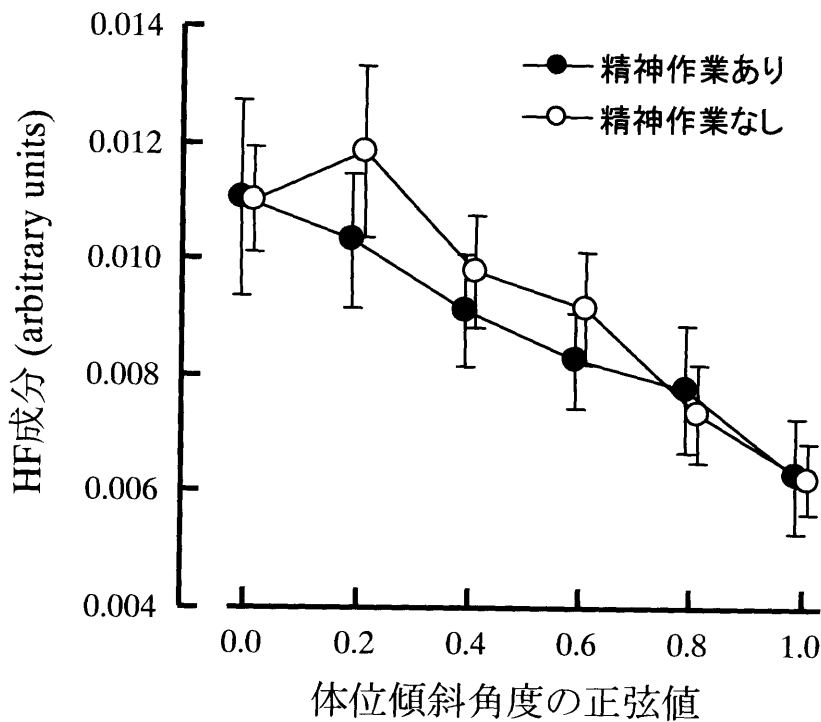


図 4.3 精神作業の有無に関する段階的ヘッドアップティルトに対する HF 成分の変化。(平均値 ± 標準誤差)

4.3.4. LF 成分

図 4.4 に精神作業の有無に関する段階的ヘッドアップティルトに対する LF 成分の変化を示す。3 元配置の分散分析の結果、体位傾斜角度の主効果($F [5, 65] = 24.15, p < 0.0001$)、及び体位傾斜角度と作業条件の交互作用($F [5, 65] = 3.77, p < 0.01$)が有意であった。精神作業により LF 成分は傾斜角度の正弦値で 0.0 から 0.2 まで有意($p < 0.05$)に「精神作業なし」と比較して増大したが、それ以上の傾斜角度においては正弦値で 1.0 の条件において精神作業により LF 成分の有意($p < 0.05$)な減少がみられた。

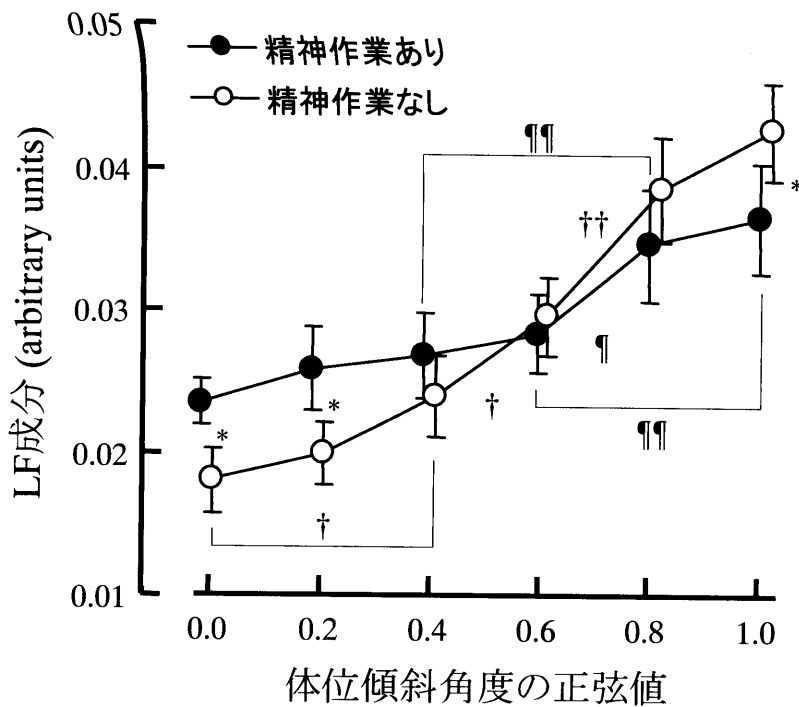


図 4.4 精神作業の有無に関する段階的ヘッドアップティルトに対する LF 成分の変化。(平均値 ± 標準誤差)
下位検定結果に対する有意水準の記号は図 4.2 に順ずる

4.3.5. LF/HF 比

図 4.5 に精神作業の有無に関する段階的ヘッドアップティルトに対する LF/HF 比の変化を示す。3 元配置の分散分析の結果、体位傾斜角度の主効果 ($F [5, 65] = 29.91, p < 0.0001$)、及び体位傾斜角度と作業条件の交互作用 ($F [5, 65] = 3.11, p < 0.05$) が有意であった。精神作業により LF/HF 比は傾斜角度の正弦値で 0.0 から 0.2 まで有意 ($p < 0.05$) に「精神作業なし」と比較して増大したが、それ以上の傾斜角度の増加においては作業条件間に有意な差はみられなかった。

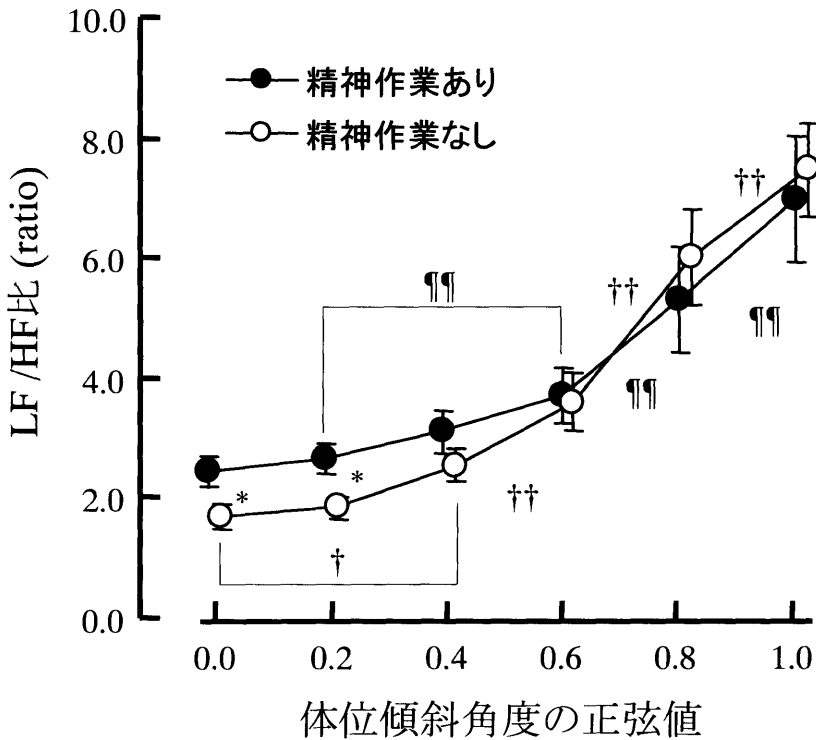


図 4.5 精神作業の有無に関する段階的ヘッドアップティルトに対する LF/HF 比の変化。(平均値 ± 標準誤差)
 下位検定結果に対する有意水準の記号は図 4.2 に順ずる

4.3.6. 反応時間と正解率

図4.6に段階的ヘッドアップティルトに対する弁別反応時間課題の反応時間と正解率の変化を示す。2元配置の分散分析の結果、体位傾斜角度における主効果は、反応時間($F [5, 65] = 0.54, N.S.$)、及び正解率($F [5, 65] = 1.28, N.S.$)いずれも有意ではなかった。

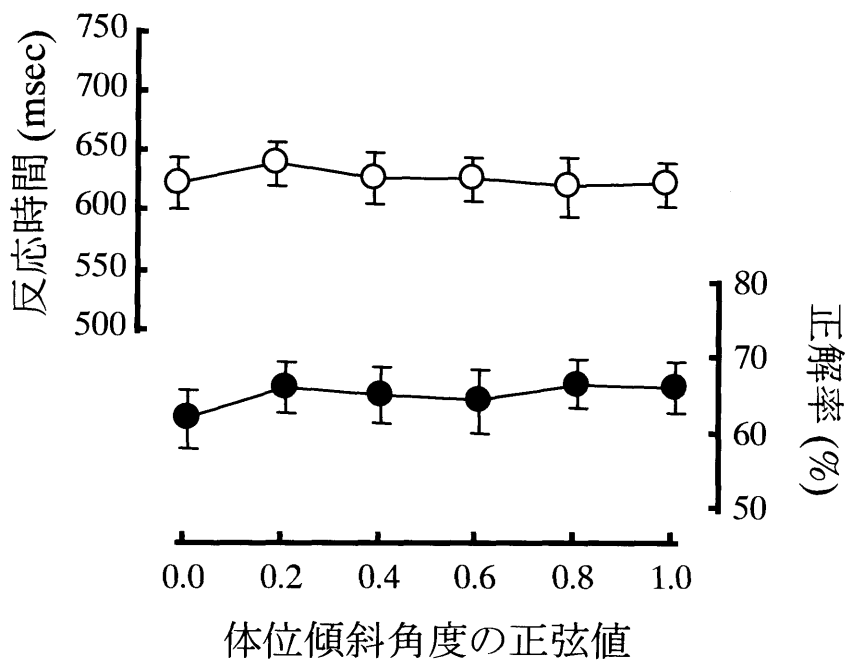


図 4.6 段階的ヘッドアップティルトに対する弁別反応時間課題の反応時間と正解率の変化。(平均値 ± 標準誤差)

4.4. 考察

本実験は、受動的体位変換時の精神作業による HRV の応答から、交感神経活動による調節が段階的に関与するような外因性の刺激が負荷されている状況においても、内因性の刺激としての精神的要因に対して第3章と同じように自律神経の調節がなされるか検討した。

起立性負荷に対する自律神経の応答において、重力は被験者に影響を及ぼす本質的要因である。ティルトテーブル上の被験者に作用する重力は、体軸方向とティルトテーブルに面した垂直方向に分けられる。そして、ティルトテーブルの傾斜角度の正弦値は体軸方向に作用する重力と比例する。精神作業を課さない条件での段階的ヘッドアップティルトに関して、本実験の結果からは体位傾斜角度の正弦値の増加に対して、HF 成分の累進的な減少と、LF/HF 比の増大が示された。この結果は、姿勢変化に対する交感神経活動と迷走神経活動の相反的变化として特徴付けられ、過去に報告された段階的ヘッドアップティルトや90°ヘッドアップティルトによる HRV の応答と同様の結果を示した(Bootsma et al., 1994; Kobayashi, 1996; Mukai and Hayano, 1995; Pagani et al., 1986; Yokoi and Aoki; 1999)。一方、LF 成分に関して、本実験の結果は体位傾斜角度の増加に対して累進的な増大がみられたが、Mukai and Hayano (1995)は、段階的ヘッドアップティルトに対して、LF 成分は30°までの体位傾斜角度(正弦値では0.5)に対して増加し、30から90°(正弦値では1.0)までの増加に対して、LF 成分が有意ではないが僅かに減少すると報告した。この Mukai and Hayano (1995)と本実験の結果との相違には、各体位傾斜角度条件での測定時間における違いが考えられた。Wieling (1988)は体位変換に対する心拍数の初期応答に対して主として迷走神経による調節がなされ、後に交感神経による調節が行われるとしており、本実験の各体位傾斜角度条件における測定時間において交感神経が主として起動される時間を含んでいたことによると思われる。本実験の結果と同様な相対的な LF 成

分の累進的な増加は、途中で水平状態を設けて各体位傾斜角度をランダムにヘッドアップティルトを行った Montano et al. (1994)も報告しており、本実験における精神作業による負荷がない条件での HRV の応答としては妥当なものと思われた。

一方、精神作業の成績において、反応時間、及び正解率が各体位傾斜角度条件で変わらなかったことから、段階的ヘッドアップティルト中の被験者への内因性刺激として精神負荷が各体位傾斜角度条件を通して同程度の負荷が維持されていたものと思われる。精神作業を課さない条件において、前述の通り、体位傾斜角度の増加により交感神経活動の亢進を伴った心拍数の増加が見られ、これに精神負荷が加わることにより一貫した心拍数の増大が見込まれたが、各体位傾斜角度条件での精神作業による心拍数、及び HRV の応答において、精神負荷の有無による差異は一貫した変化として現れなかった。本研究の結果において、低い体位傾斜角度(正弦値で 0.0-0.4)での精神作業による心拍数の有意な増大がみられたが、高い体位傾斜角度(正弦値で 0.6-1.0)での変化は有意ではなく、精神作業を課さない条件での心拍数と比較すると、心拍水準の上昇に伴い、精神作業の有無による心拍数の違いが縮小するかもしれないは見られなくなった。この心拍水準の上昇に伴い精神作業の有無による心拍数への影響が縮小された結果は、第3章において示されたように、温熱要因に対する心拍水準の上昇に伴い、精神作業に対する心拍数への影響が拡大した結果とは対照的であった。

精神作業による影響が見出されなかった HF 成分の結果から、低い体位傾斜角度における LF/HF 比の精神作業による有意な増大は、主として、交感神経活動の亢進を反映したものと思われる。従って、低い体位傾斜角度での精神作業による心拍数の増大は交感神経性の調節によるものと考えられる。過去に実験的課題を用いた精神負荷による交感神経性の心拍数の増大を報告した研究があり (Cacioppo et al., 1995; Freyschuss et al., 1988; Jørgensen et al., 1990)、第3章における精神作業による心拍数の増大も同様に、交感神経

活動の亢進が示唆された。しかしながら、本実験の結果からは、同様の機序によると考えられる心拍数の増大は、低い体位傾斜角度においてのみ認められ、これは外因性の刺激としての体位変換による交感神経活動の亢進が現れる前の応答とも考えられる。Wieling (1988)は体位変換に対する心拍数の初期応答に対して主として迷走神経による調節がなされるとしたが、Yokoi and Aoki (1999)による段階的ヘッドアップティルトに対する HRV の応答は 30° までの体位傾斜角度において迷走神経活動は敏感に抑制されるとしている。本実験の結果からは心拍数、LF 成分、及び LF/HF 比が途中から高い傾斜角度で顕著に増大したのに対して、体位傾斜角度の増加に伴い HF 成分は直線的に減少していた。これらの指標の傾斜角度に対する応答から、外因性の刺激により交感神経活動が亢進される以前の迷走神経活動による調節がなされている状態、即ち、低い体位傾斜角度での精神作業に対する応答は、第3章において温熱要因による外因性の刺激に対して迷走神経活動により調節されている状態での精神作業に対する応答と類似する結果であったと考えられる。

さらに、本実験における LF 成分の各体位傾斜角度条件毎の精神作業に対する応答は興味深い結果であった。精神負荷に対する LF 成分の応答は、過去多くの研究から、結果の相違する報告がなされてきており、その応答に一貫した方向性が見られていない。一方において、Langewitz and Rüdell (1989)は、精神負荷に対する LF 成分の応答は被験者に提示するその実験的課題に固有の現象であるとした。しかしながら、比較し得るであろう同種の暗算課題による LF 成分の応答に対しても、その応答に一貫した方向性が見られていない。具体的には、暗算課題により LF 成分の増大するという結果 (Pagani et al., 1989, 1991)と、変化が見られなかったとするもの (Langewitz and Rüdell, 1989)、反対に減少するという結果 (平柳ら, 1996; Sloan et al., 1995; Lang et al., 1991-92)がある。本研究の結果は、低い体位傾斜角度と高い体位傾斜角度での精神作業に対する LF 成分の応答は、それぞれ、精神作業を課さない条件での応答に対して増大と減少であり相対する結果を示した。

従って、この結果が示すように、精神作業に対する LF 成分の応答の不一致において、Langewitz and Rüdell (1989)が主張するように、精神作業の作業内容に依存した応答であるとするよりも、精神負荷が加わる以前の交感神経の緊張状態の違いによることが考えられる。Moriguchi et al.(1991)は 60°ヘッドアップティルトと暗算課題(椅座位)のそれぞれの負荷に対し LF 成分の増大を報告したが、本実験の結果からは、体位変換試験に対しては、水平状態から比較して体位傾斜角度の正弦値で 0.4(23.6)°から LF 成分が有意に増大し、精神作業に対しては、前述の通り、低い体位傾斜角度条件においてのみ有意に LF 成分が増大した。従って、Moriguchi et al.(1991)が報告した 60°ヘッドアップティルトと暗算課題(椅座位)のそれぞれの負荷に対する LF 成分の増大は、本実験で示された外因性と内因性の刺激に対する相互作用における一部分を反映しているものであるが、全体としての反応の方向を示していたわけではなかったことが示唆される。

本実験において示された外因性の刺激と内因性の刺激の相互作用として、本実験が意図した外因性の刺激により交感神経活動が亢進された状態における内因性の刺激としての精神作業の影響は第3章と異なり、心拍応答に対する精神作業の影響は小さくなったかもしくは見られなくなったが、それ以前の応答としては、精神作業による交感神経性の心拍数の増大と、HRVの非呼吸性の変動成分である LF 成分の増大が見られ第3章の結果と一致するものであった。しかしながら、この相互作用について心拍数の変化からみると、外因性の刺激に対する心拍水準の上昇に伴い、精神作業の有無による心拍数への影響が縮小された結果であったが、第3章においては、寒冷環境下での低い心拍水準と高温環境下での高い心拍水準との比較から、心拍水準の低下に伴い、精神作業の有無による心拍数への影響が縮小された結果となり、対照的な結果を示した。これらの結果は、外因性の刺激と内因性の刺激の相互作用に対して心拍数の変化では、外因性の刺激に対する心拍水準がある限られた範囲内にあるとき、内因性の刺激に対する影響が強く見られ、その範囲

外での心拍数の応答は減弱されることが示唆される。しかしながら、HRVの解析により、第3章における心拍水準の上昇は、主として迷走神経活動の抑制によるものであり、本実験における心拍水準の上昇は迷走神経活動の抑制のみならず交感神経活動の亢進を伴ったものであることから、先の心拍数における相互作用は自律神経系による心拍数調節の機序において、本質的に異なることが明らかであろう。また、外因性の刺激と内因性の刺激の相互作用において、外因性の刺激に対する自律神経調節の違いにより、内因性の刺激に対する自律神経応答に影響を及ぼしていることが示された。即ち、外因性の刺激に対して主として迷走神経の抑制により心拍水準が増大しているときの内因性の刺激に対する心拍数の応答は、交感神経活動の亢進による心拍数の増大となり、一方、外因性の刺激として交感神経活動の亢進を伴った心拍水準の上昇においては、内因性の刺激に対して交感神経活動の亢進は見られず、心拍数の応答として表出されにくいことが示された。しかしながら、この場合においてもHRVの解析によりLF成分においては減少する結果が認められ、交感神経と迷走神経の活動を反映するLF成分は、外因性の刺激に対する自律神経調節の違いにより、内因性の刺激に対して増大と減少の両方の反応を示すことが明らかとなった。これはSayers (1973)が主張するように、心拍数の変化からではわからない自律神経調節の状態をHRVの解析により評価し得ることを示しており、精神作業に対するLF成分の応答は精神負荷が加わる以前の交感神経の緊張状態の違いに依存することが示された。

結論として、内因性の刺激に対する自律神経応答は、その状態での外因性の刺激に対する自律神経活動に依存することが示唆された。即ち、外因性の刺激が物理的環境要因による場合(第3章)でも、体位変換による場合(本章)のいずれの外因性の刺激に対しても、刺激の種類によらず、外因性の刺激に対して自律神経調節の基調を成す副交感神経系により調節が行われている場合は、精神負荷による内因性の刺激に対して、心拍数の亢進とともに、心拍変動成分の非呼吸性の成分としてのLF成分が増大する傾向が見られることが

示された。さらに、内因性の刺激に対して増大と減少の両方の反応を示した LF 成分の応答は、その状態での外因性の刺激に対する自律神経活動を反映することが示された。これらのことから、内因性の刺激に対する心拍数や LF 成分の反応の方向から外因性の刺激に対する自律神経応答の様態を評価することが可能であり、その状態で迷走神経性の心拍数の調節がなされていることの具体的な基準として、内因性の刺激に対する心拍数の亢進と LF 成分の増大が相当する。この外因性と内因性の刺激による自律神経応答の相互作用からの評価は、生活環境評価指標としての HRV の評価方法における新たな視点を提供するものであり、HRV を用いての客観的な生活環境評価の可能性を示すものである。