

メンタルストレス時における心臓自律神経活動 —補正後の心拍変動指標による評価—

了徳寺大学健康科学部

横井麻理

実践女子大学生生活科学部生活環境学科

山崎和彦

【キーワード】 HRV、副交感神経活動、座位、呼吸数、心拍数

1. 目的

ヒトの心拍は運動や精神活動に伴い大きく変動するが安静時においても1拍ごとに変動し、その変動は心臓自律神経活動により調節されている¹⁾。この評価法としては心拍変動 (HRV) スペクトル解析が広く用いられており、Askelrodら²⁾ はイヌのHRV スペクトル解析から、高周波数帯域のパワーは副交感神経活動を、低周波数帯域のパワーは交感神経活動と副交感神経活動の両方を反映することを示した。そこで、これらの各帯域のパワーを用いて心臓自律神経活動状況を数値化することが可能となり、体位や呼吸、メンタルストレス等が心臓自律神経活動へ及ぼす影響について評価されている。

これらの指標を用いて体位の影響を評価すると、臥位に比べて立位では交感神経活動が増加し、副交感神経活動が低下することが報告されている。そして、交感神経活動の変動に作用する圧受容体感受性³⁾ や交感神経性血圧変動 (Mayer wave)⁴⁾ の効果についての検討が試みられている³⁾。

また、HRV 指標は呼吸性洞性不整脈という呼吸 (呼吸数および換気量) の影響を受けている。これは主に心臓副交感神経活動に作用しており^{5) 6)}、呼吸数の増加、換気量の減少により呼吸性洞性不整脈は減少するといわれている⁷⁾。

その他、メンタルストレス時における心臓自律神経活動に関する評価も行われており、精神作業 (計算タスク⁸⁾、識別作業⁹⁾、カラーワードテスト¹⁰⁾) により交感神経活動は亢進し、副交感神経活動は低下するとされている^{9) 10)}。しかしながら、それらの研究は精神作業によるメンタルストレスに関する報告が主であり、対人によるメンタルストレス時の報告はほとんどみられない。

そこで、本研究ではHRV 指標により対人メンタルストレス時における心臓自律神経活動を非侵襲的に評価することを試みた。しかしながら、このHRV 指標には常に呼吸の影響が含まれているため、これらの指標により心臓自律神経活動を評価する際においては呼吸の条件を統一することが望まれている¹¹⁾。そこで、呼吸数や換気量を統制するとそれ自体がストレスとなり、HRV 指標に影響を及ぼす恐れも現れる。これらのことより、中尾ら¹²⁾ はHRV 指標を呼吸数により補正する式を作成したが、

この補正式は臥位における HRV 指標に対するものであり、より日常的な姿勢である座位については報告されていない。そこで、本研究では体位や呼吸数が HRV 指標に及ぼす影響について評価し、臥位時 HRV 指標補正式¹²⁾を座位において使用することの可能性について検討した(実験 I)。そして、その補正式を用いて対人メンタルストレス時における心臓自律神経活動を評価すること(実験 II)を目的とした。

2. 方法

2. 1 被験者

実験 I および実験 II の被験者は、それぞれ健康な成人女子 19 名(20-24 才、平均 21.6 ± 1.1 才)、12 名(20-32 才、平均 22.3 ± 3.3 才)であった。実験開始前日より飲酒および極度の疲労を伴う作業を禁止し、通常と同程度の睡眠をとるように被験者に指示した。さらに、実験開始 2 時間前以降の食事、カフェインを含む飲料の摂取、および喫煙は禁止した。

2. 2 実験手順

実験 I では 2 つの体位(臥位および座位)を設定し、呼吸数を臥位では 15 回/分(Supine15)、座位では 10 回/分、15 回/分、20 回/分(Sit10, Sit15, Sit20)の計 4 条件に設定した。実験期間中の室温および相対湿度は $18-22^{\circ}\text{C}$ および RH60-65%であった。実験は被験者を 2 つのグループ(Sup15 から開始するグループ: Group 1、Sit15 から開始するグループ: Group 2)に分けて行った。測定開始時の姿勢は測定開始の 10 分前より保持させた。各条件における試行期間は 5 分としたが、体位変化後の条件においてはその影響を避けるために試行期間を 10 分とした(Fig. 1)。心電図は胸部誘導三電極法により導出し、生体用アンプ(日本光電製 RM-9008)で増幅してからデータレコーダ(TEAC 製 RD111-T)に記録した。そして、各条件終了前の 3-4 分間のデータを HRV 解析した。呼吸数の調節はメトロノーム信号で行い、自然な深さで呼吸させた。実験は午前中に行い、実験開始前に呼吸統制の練習を行った。

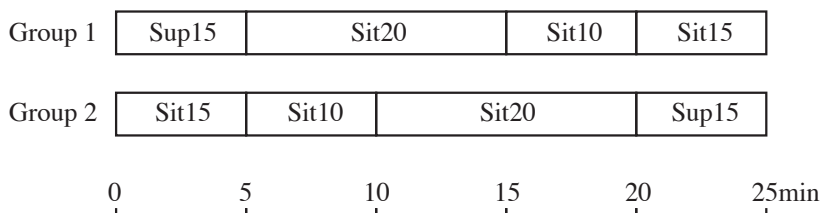


Figure 1. Protocol of experiment I.

Subjects were controlled their respiratory rate by metronome. Sup15, respiratory rate of 15 cycle/min in supine; Sit10, respiratory rate of 10 cycle/min in sitting; Sit15, respiratory rate of 15 cycle/min in sitting; Sit20, respiratory rate of 20 cycle/min in sitting.

実験Ⅱでは、身体接触によるメンタルストレスが自律神経活動に及ぼす影響を測定した。この身体接触は、被験者の右側に特定の女性もしくは男性1名が座り左腕で被験者の左肩を軽く抱くという行為で行った。実験期間中の室温および相対湿度は18-22℃およびRH60-65%であった。測定開始の10分前より座位安静状態を保持させた後に、安静、身体接触対女性、身体接触対男性の順に各条件を4分間ずつ試行した(Fig. 2)。実験内容の事前通知はメンタルストレスの内容以外の項目について被験者に対し行った。測定項目は心電図および心拍数、呼吸数、皮膚温(頬部、耳朶部、手背部)であり、心拍数、呼吸数の測定およびHRV解析は各条件終了前の3-4分間のデータで行った。皮膚温は10秒毎に記録し、各条件終了直前のデータを解析に使用した。呼吸数および皮膚温の測定は、小型サーミスタ呼吸ピックアップ(日本光電製TR-761T)、温度データコレクタ(安立製AM-7052)を用いて行った。

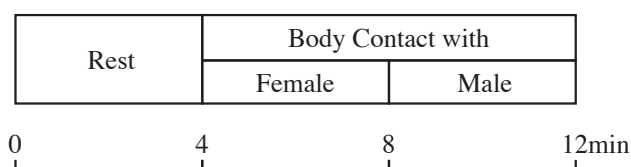


Figure 2. Protocol of experiment II.

Subjects breathed spontaneously in sitting. Subjects were at rest for 4 min. And they were in body contact with female for 4 min, then with male for 4 min.

2. 3 HRV データ解析

心電図データをサンプリング周波数1000 HzでA/D変換し、RR間隔を検出した。そして、ラグランジ補間を行ったデータを高速フーリエ変換した後にスペクトル解析を行った。スペクトル解析は、サンプリングポイント128 points、加算回数2回、周波数分解能0.016 Hz、周波数解析範囲0~1 Hzで行った。このHRV解析はVITAL RHYTHM NO.9801(日本電気三栄製)で行い、低周波数帯域のパワー値(LF: 0.07~0.14 Hz)、高周波数帯域のパワー値(HF: 0.14~0.40 Hz)、RR間隔を求めた(13)。それらの値からHRV指標を求め、心臓自律神経活動指標とした。その交感神経活動指標には LF/HF (4)を、副交感神経活動指標は HF (2)、 $CCV-HF$ (14)、 $HF/(LF+HF)$ (4)を使用した。 $CCV-HF$ は HF の平方根を平均RR間隔で除し100を掛けたものである。

2. 4 統計手法

実験ⅠのSup15とSit15間の比較には、対応のあるt検定を用いた。座位における呼吸条件の比較は反復測定一元分散分析で行い、要因内の比較は対比で行った。座位時のHRV指標と呼吸数間の相互関係は直線回帰分析で求め、臥位時と座位時における回帰直線の比較は共分散分析で行った。実験Ⅱの安静時および各メンタルストレ

ス時における比較は、反復測定一元分散分析および対比で行った。

全ての検定は Super ANOVA ver. 1.11 (Abacus Concepts, Inc.) で行い、危険率は 5% 以下とした。

3. 結果

実験 I における体位および呼吸の影響を Table 1 に示す。Sup15 より Sit15 において LF/HF は有意に高く、HF、CCV-HF、HF/(LF+HF) は有意に低い値を示した。

座位において呼吸数の影響を比較すると、CCV-HF は Sit10 が最も高く Sit20 が最も低い値を示し、呼吸数の増加に伴い有意に低下した。HF は Sit15 と Sit20 間に差は認められなかったものの、Sit10 と Sit15 間、Sit10 と Sit20 間に有意差が認められ、呼吸数の増加に伴い減少する傾向にあった。さらに、座位における呼吸数、HF、CCV-HF を常用対数 (log 呼吸数、log HF、log CCV-HF) に変換すると、log 呼吸数と log HF 間、log 呼吸数と log CCV-HF 間に直線回帰関係が認められた (Fig. 3、Fig. 4)。

Table 1. Effect of posture and respiratory rate on HRV indexes.

Sup 15	Sit 10	Sit 15	Sit 20	
LF/HF		0.36±0.21	0.72±0.21	0.92±1.11* 1.02±0.79
HF (msec ²)		2664.9±1447.8	2597.4±2148.8	1593.1±1011.7*† 912.7±804.0†
CCV-HF (%)		5.10±1.30	5.49±2.19	4.32±1.10*† 3.20±1.29†‡
HF/(LF+HF)		0.75±0.11	0.61±0.13	0.63±0.20* 0.56±0.17

Values are mean±SD (n=19). Sup15, respiratory rate of 15 cycle/min in supine; Sit10, respiratory rate of 10 cycle /min in sitting; Sit15, respiratory rate of 15 cycle /min in sitting; Sit20, respiratory rate of 20 cycle /min in sitting; LF, low frequency spectral power; HF, high frequency spectral power; CCV-HF, square root of HF divided by mean RR intervals. * Values of Sit15 significantly differed from Sup15 values (P<0.05). †Values of Sit15 and Sit20 significantly differed by contrast with Sitting 10 (P<0.05). ‡ Values of Sit20 significantly differed by contrast with Sit15 (P<0.01).

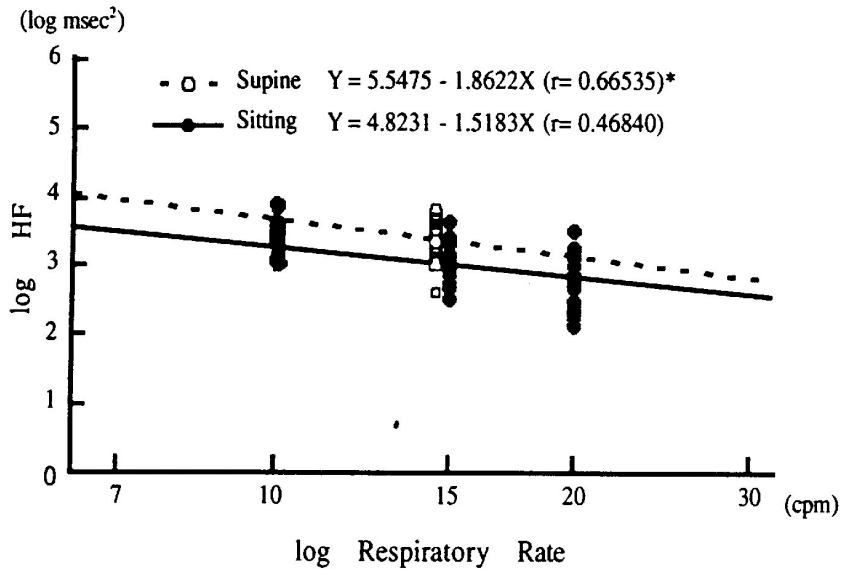


Figure 3. Relationship between log respiratory rate and log HF.

*Value of regression in supine was based on the report which has been shown by Nakao et al.¹²⁾

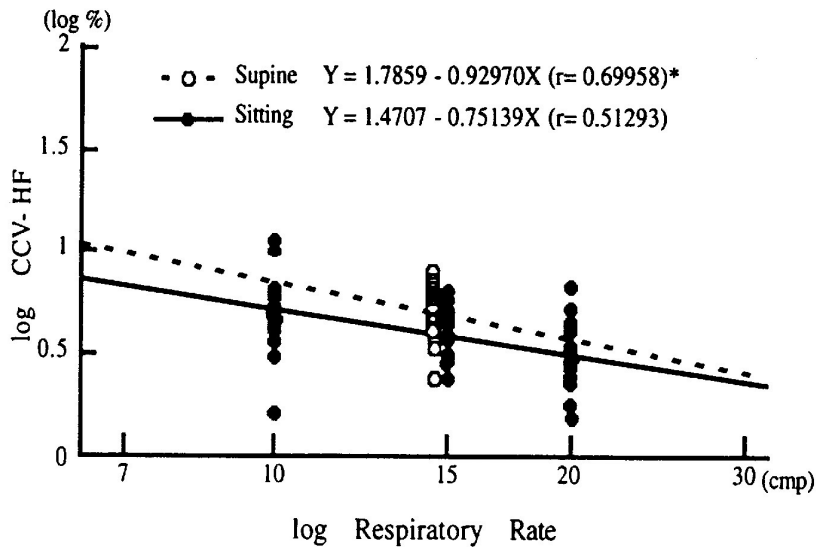


Figure 4. Relationship between log respiratory rate and log CCV-HF.

*Value of regression in supine was based on the report which has been shown by Nakao et al.¹²⁾

臥位における HRV 指標 (HF、CCV-HF) に及ぼす呼吸数の効果については中尾ら¹²⁾ が既に報告しており、以下の補正式を示している。

“臥位において呼吸数が X 回/分の HRV 指標 (HF'X、CCV-HF'X) から呼吸数が

Y 回/分の HRV 指標 (HF'Y、CCV-HF'Y) を予想する場合”

$$\text{HF'Y} = \{(X/Y)1.8622\} \cdot \text{HF'X} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{CCV-HF'Y} = \{(X/Y)0.9297\} \cdot \text{CCV-HF'X} \quad \dots \dots \dots (2)$$

この補正式は、臥位における HRV 指標および呼吸数の常用対数間に直線回帰関係が認められたことにより作成された。

このことより、臥位における中尾ら¹²⁾の回帰式と座位における本実験の回帰式を共分散分析により比較し、呼吸数の効果に作用する体位(臥位および座位)の影響について検討を行った。これに際し、Sup10 および Sup20 の HRV 指標は中尾ら¹²⁾の臥位時 HRV 指標補正式に準じて Sup15 のデータより予測した。その結果、HF および CCV-HF に作用する呼吸数の効果に体位の影響は認められなかった (P=0.4740、P=0.4052)。

実験Ⅱの結果を Table 2 に示す。心拍数は安静時より身体接触時において低い値を示し、対男性時において有意に低下した。呼吸数は安静時より身体接触時において高い値を示し、対男性時において有意に増加した。

Table 2. Effect of personal body contact on heart rate, respiratory rate, HRV indexes and skin temperatures.

	Rest	Body Contact with	
		Female	Male
Heart Rate (bpm)	76.17±8.65	74.17±9.14	72.75±10.10*
Respiratory Rate (cpm)	17.33±3.50	18.12±4.78	20.25±4.53*
Uncorrected HRV Indexes (%)			
LF/HF		-9.81±48.13	+56.84±130.50
HF		+39.20±483.82	+14.27±54.00
CCV-HF		+10.24±22.46	-1.15±18.38
HF/(LF+HF)		+15.20±27.45	+7.19±44.55
Corrected HRV Indexes (%)			
Corrected HF		+41.10±48.18*	+49.92±59.20
Corrected CCV-HF		-13.42±17.78	+14.01±22.26
Skin Temperatures (°C)			
Cheek	32.48±1.78	32.73±1.77*	33.10±1.70*†
Earlobe	30.27±2.07	30.63±2.19	31.12±2.34*†
Dosal Hand	30.93±1.79	31.13±1.91	31.35±2.03

Values of HRV indexes, respiratory rate, heart rate and skin temperatures are mean±SD (n=12). HRV indexes are shown as percentage of change from baseline in rest. * Values significantly differed by contrast with rest (P<0.05). †Values significantly differed by contrast with body contacted with female (P<0.05).

身体接触時における心臓自律神経活動を補正前の HRV 指標 (LF/HF、HF、CCV-HF、HF/(LF+HF)) で評価したが、その変動に一貫した傾向は認められなかった。今回、身体接触により呼吸数が増加し、実験 I の結果より、呼吸数の変化が HRV 指標に影響を及ぼした可能性があると考えられる。そこで、中尾ら¹²⁾ の呼吸数補正式を用いて HRV 指標を呼吸数 15 回 / 分に補正し、呼吸数の影響を排除した補正後の HRV 指標により心臓自律神経活動を評価した。その指標は Corrected HF、Corrected CCV-HF と記す。その結果、Corrected HF は身体接触により有意に増加した。

頬部皮膚温は安静時より身体接触時において有意に増加し、その増加は対男性時において最も高い値を示した。また、耳朶部皮膚温においても同様の傾向は認められた。

4. 考察

HRV のスペクトル解析による心臓自律神経活動評価は非侵襲的であるため、有用な手法として広く一般的に用いられている^{3) 10)}。しかしながら、それらの HRV 指標には体位や呼吸数の影響も含まれているため、その影響について検討することを実験 I の目的とした。実験 II ではその影響を考慮した上で対人メンタルストレスが心臓自律神経活動へ及ぼす影響を HRV 指標により評価することを目的とした。

まず、体位について Sup15 と Sit15 で比較すると、座位における交感神経活動指標 (LF/HF) は有意に高い値を示し、Butler ら¹⁵⁾ の報告と一致した。彼らは傾斜台で立位を再現し、立位による交感神経活動の増加は下半身への血液貯溜、静脈還流の減少、血圧の低下という一連の応答を防ぐための反応であるとしている。本実験は立位ではなく座位で実験を行ったが、座位においても立位と同様に重力の影響が循環系に作用していると考えられる。そのため、座位における交感神経活動の増加は立位と同様の反応によるものであると考えられる。その要因としては、血管の交感神経性血圧変動 (Mayer wave)⁴⁾、それに反応する交感神経性圧受容体反射³⁾ の関与が考えられる。しかしながら、この圧受容体感受性は立位時において低下するとされているため³⁾、立位に類似した座位における LF/HF の増加には交感神経性血管収縮が作用していると考えられる。したがって、座位における交感神経活動指標の増加は動脈圧の Mayer wave によるものであると考えられる。一方、座位における副交感神経活動指標 (HF、CCV-HF、HF/(LF+HF)) の減少は交感神経活動の亢進による二次的な副交感神経活動の抑制であると考えられる。

早野¹⁶⁾ は呼吸数が HRV 指標に及ぼす影響を臥位および立位において評価し、両体位とも呼吸数の増加に伴い副交感神経活動が減少することを報告している。座位においてその影響を比較した本研究においても同様の結果が得られ (Table.1)、呼吸数の増加に伴う副交感神経性呼吸性洞性不整脈の減少が認められた。また、座位においては呼吸数と副交感神経活動指標 (HF、CCV-HF) 間に回帰直線が認められ、臥位に

おける中尾ら¹²⁾の回帰直線と比較すると、呼吸数の効果に作用する体位の影響は認められなかった。したがって、臥位における中尾ら¹²⁾の補正式を座位において使用することの可能性が示された。

次に、身体接触が各生理指標に及ぼす影響について比較した。身体接触により心拍数は低下し、呼吸数は増加したが、心臓自律神経活動を反映している補正前の HRV 指標 (LF/HF、HF、CCV-HF、HF/(LF+HF)) に一貫した傾向は認められなかった。メンタルストレスは呼吸パターンを変化させ HRV 指標に影響を及ぼすとされており^{9) 17)}、実際に対人メンタルストレスにより呼吸数は有意に増加した。実験 I の結果より、呼吸数の変化は HRV 指標に影響を及ぼしたため、本実験の HRV 指標には呼吸数の影響が含まれていると考えられる。そこで、中尾ら¹²⁾の臥位時 HRV 指標補正式を座位において使用し、呼吸数の影響を排除した HRV 指標 (Corrected HF、Corrected CCV-HF) により評価した。Corrected HF は身体接触により有意に増加し、心拍数の低下現象と一致した。したがって、対人メンタルストレスにより心臓副交感神経活動は亢進し、Corrected HF は心臓副交感神経活動をより良く反映すると考えられる。

メンタルストレス時における顔面皮膚温の上昇は、 β アドレナリン作動性交感神経活動による動静脈吻合の拡張に起因するとされている¹⁸⁾。本実験においても、身体接触により頬部皮膚温および耳朶部皮膚温は有意に増加し、対人メンタルストレスにより顔面皮膚温が増加することが認められた。

身体接触によるこれらの生理指標の変動を、身体接触条件 (対女性および対男性) により比較すると、頬部皮膚温は対女性時より対男性時において有意に高い値を示した。それと同様の傾向は、心拍数および呼吸数、Corrected HF に認められたが、有意ではなかった。したがって、身体接触が各生理指標へ及ぼす効果に身体接触条件の差異を認めることはできなかった。

精神作業によるメンタルストレスは交感神経活動を亢進し¹⁰⁾、副交感神経活動を抑制する傾向にあるとされているが⁹⁾、本実験の対人メンタルストレス時における副交感神経活動指標 (Corrected HF) は異なった結果を示した。このことより、メンタルストレス種類 (精神作業、対人) は心臓血管調節機構に影響を及ぼすかもしれないと考えられる。

以上をまとめると、HRV 指標を変動させる呼吸数の効果に体位条件 (臥位および座位) の影響は認められなかった。そのことから HRV 指標の臥位時呼吸数補正式 1) は座位時においても使用できると考えられる。また、対人メンタルストレスにより心拍数は低下することが認められた。その時の心臓自律神経活動を呼吸数補正後の HRV 指標で評価すると、身体接触により Corrected HF は増加した。したがって、対人によるメンタルストレスは心臓副交感神経活動を亢進させると考えられる。

【参考文献】

- 1) Scher, A. M. and Young, A. C.: Reflex control of heart rate in the unanesthetized dog. *Am. J. Physiol.* 218: 780-789, 1970
- 2) Akselrod, S., Gordon, D., Madwed, J. B., Snidman, N. C., Shannon, D. C. and Cohen, R. J.: Hemodynamic regulation: investigation by spectral analysis. *Am. J. Physiol.* 249: H867-H875, 1985
- 3) Eckberg, D. L., Abboud, F. M. and Mark, A. L.: Modulation of carotid baroreflex responsiveness in man: effects of posture and propranolol. *J. Appl. Physiol.* 41: 383-387, 1976
- 4) Pagani, M., Lombardi, F., Guzzetti, S., Rimoldi, O., Furlan, R., Pizzinelli, P., Sandrone, G., Malfatto, G., Orto, S. D., Piccaluga, E., Turiel, M., Baselli, G., Cerutti, S. and Malliani, A.: Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of symptho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circ. Res.* 59: 178-193, 1986
- 5) Hirsch, J. A. and Bishop, B.: Respiration sinus arrhythmia in humans: how breathing pattern modulates heart rate. *Am. J. Physiol.* 241: H620-H629, 1981
- 6) Angelone, A. and Coulter, Jr. N.: Respiratory sinus arrhythmia: a frequency dependent phenomenon. *J. Appl. Physiol.* 19: 479-482, 1964
- 7) Eckberg, D. L. : Human sinus arrhythmia as an index of vagal cardiac outflow. *J. Appl. Physiol.* 54: 961-966, 1983
- 8) Steptoe, A. and Sawada, Y.: Assesment of baroreceptor reflex function during mental stress and relaxation. *Psychophysiol.* 26: 140-147, 1989
- 9) Pagani, M., Mazzuero, G., Ferrari, A., Liberati, D., Cerutti, S., Vaitl, D., Tavazzi, L. and Malliani, A.: Sympthvagal interaction during mental stress. A study using spectral analysis of heart rate variability in healthy control subjects and patients with a prior myocardial infarction. *Circ.* 83: 43-II 51, 1991
- 10) Hoshikawa, Y. and Yamamoto, Y.: Effects of stroop color-word conflict test on the autonomic nervous system responses. *Am. J. Physiol.* 272: H1113-H1121, 1997
- 11) Grossman, P., Karemaker, J. and Wieling, W.: Prediction of tonic parasympathetic cardiac control using respiratory sinus arrhythmia: the need for respiratory control. *Psychophysiol.* 28: 201-216, 1991
- 12) 中尾睦宏、熊野宏昭、久保木富房、末松弘行、安士光男、高島香代子：呼吸回数が心拍変動に与える影響について、*心身医学*, 35: 455-462, 1995
- 13) Janssen, M. J. A., Bie, J., Swennw, C. A. and Oudhof, J.: Supine and standing sympthovagal balance in athletes and controls. *Eur. J. Appl. Physiol.* 67: 164-167, 1993
- 14) Hayano, J., Sakakibara, Y., Yamada, A., Yamada, M., Mukai, S., Fujinami, T., Yokoyama, K., Watanabe, Y. and Takata, K.: Accuracy of assessment of cardiac vagal tone by heart rate variability in normal subjects. *Am. J. Cardiol.* 67: 199-204, 1991

- 15) Butler, G. C., Yamamoto, Y., Xing, H. C., Northey, D. R., and Hughson R. L.: Heart rate variability and fractal dimension during orthostatic changes. *J. Appl. Physiol.* 75: 2602-2612, 1993
- 16) 早野順一郎：心拍変動の自己回帰スペクトル分析による自律神経機能の評価 - RR 間隔変動係数 (CCV-RR) との比較, *自律神経*, 25: 334-343, 1988
- 17) Jisng, W., Hayano, J., Coleman, E. R., Hanson, M. W., Frid, D. J., O'Connor, C., Thurber, D., Waugh, R. A. and Blumental, J. A.: Relation of cardiovascular responses to mental stress and cardiac vagal activity in coronary artery disease. *Am. J. Cardiol.* 72: 551-554, 1993
- 18) 永坂鉄夫：皮膚・粘膜血流異常と自律神経、*東女医大誌*、63:62-67, 1994

Cardiac Autonomic Nervous Activity Interaction under Mental Stress; A Study Using the Corrected Heart Rate Variability Indexes

【Abstract】

The purposes of this study are to evaluate the effect of the posture and the respiratory rate on the heart rate variability (HRV) indexes during sitting (ExperimentI), and to assess the effect of mental stress on cardiac autonomic nervous activity by using the corrected HRV indexes (ExperimentII). Since the effect of respiratory rate that had kept influencing the HRV indexes during sitting was the same in the supine posture, the HRV correction formula by respiratory rate in the supine posture were found possible to use to correct of the HRV indexes, even in sitting as well. The mental stress was carried out by body contacts with others, and its effect was evaluated at the corrected HRV indexes in sitting. As a result, the mental stress decreased the heart rate and increased the corrected HF, representing that mental stress causes the increase of the cardiac parasympathetic nervous activity.