

心拍変動への呼気ガス分析用マスク
による死腔の影響*Influence of the Dead Space Induced by
the Face Mask on the Measure of Heart
Rate Variability*

古谷 雄司*
 椎木 俊明
 中村 浩士
 中村 安真
 石崎 浩史
 内山 和俊
 原田 雅彦
 清水 昭彦
 松崎 益徳

Yuhji FURUTANI, MD*
 Toshiaki SHIIGI, MD
 Hiroshi NAKAMURA, MD
 Yasuma NAKAMURA, MD
 Hiroshi ISHIZAKI, MD
 Kazutoshi UCHIYAMA, MD
 Masahiko HARADA, MD
 Akihiko SHIMIZU, MD
 Masunori MATSUZAKI, MD, FJCC

Abstract

The respiratory pattern influences the power spectrum of heart rate variability and therefore control or monitoring of respiration is needed. The effect of the dead space induced by the face mask used in the expiratory gas exchange analysis on the measurement of heart rate variability was evaluated in 22 subjects (15 males and 7 females aged 39-76 years, mean 42 years) using electrocardiography recorded for 5 min during spontaneous respiration under the conditions of supine rest, sitting on the bicycle ergometer with and without a face mask. The power spectrum of heart rate variability was obtained by the coarse-graining spectral analysis (CGSA) method and the total power (TP: 0-0.5 Hz), low frequency component (LF: 0-0.15 Hz), high frequency component (HF: 0.15-0.50 Hz), HF/TP and LF/HF were measured. The volume of the face mask was 320 ml and the tidal volume during sitting with the face mask was 596 ± 110 ml (444-808 ml).

The value of LF/HF increased from supine rest to sitting in accordance to the change of body position ($p < 0.05$), but the value of LF/HF when sitting with the face mask decreased to the level during supine rest. The value of HF/TP decreased from supine rest to sitting ($p < 0.05$), but when sitting with the face mask returned to that during supine rest. To evaluate the effect of tidal volume, the subjects were divided into two groups (each of 11 subjects) by the median value of tidal volume (570 ml). The value of LF/HF decreased from supine rest to sitting with the face mask in the smaller tidal volume group (tidal volume < 570 ml) ($p < 0.02$). Moreover, there was a significant correlation between the change of the value of LF from supine rest to sitting with the face mask and the tidal volume ($r = 0.44$, $p < 0.05$).

These results suggest that the power spectrum of heart rate variability is strongly influenced by the dead space induced by the face mask used in expiratory gas exchange analysis. In particular, the sympathetic activation from supine rest to sitting in subjects with the smaller tidal volume is unclear. Thus, interpretation of the results of heart rate variability with or without the face mask used in expiratory gas exchange analysis requires care.

Key Words

Heart rate (variability), Respiratory dead space, Spectrum analysis, Ventilation

山口大学医学部 第二内科: 〒755 山口県宇部市小串 1144; *(現)国立下関病院 循環器内科: 〒750 山口県下関市後田町 1-1-1

The Second Department of Internal Medicine, Yamaguchi University School of Medicine, Ube; *(present) Department of Cardiology, National Shimonoseki Hospital, Shimonoseki

Address for reprints: FURUTANI Y, MD, Department of Cardiology, National Shimonoseki Hospital, Ushiroda-cho 1-1-1, Shimonoseki, Yamaguchi 750

Manuscript received October 2, 1996; revised December 18, 1996; accepted December 26, 1996

Selected abbreviations and acronyms

CGSA=coarse-graining spectral analysis
HF=high frequency component
LF=low frequency component
TP=total power

はじめに

心拍変動スペクトル解析は非侵襲的に自律神経活動の評価に利用でき、最近、呼気ガス分析と同時に、この解析を用いて自律神経活動を評価する報告がなされている¹⁾。

心拍変動スペクトルには呼吸のパターン(1回換気量、呼吸数)が影響するとされ、両者の関係が検討されてきた²⁻¹⁰⁾。しかし、これまでの研究は呼吸数ないし1回換気量をメトロノームなどにより意識的に変化させたものであり、呼吸のパターンを意識的に変えると、自律神経のバランスが変化することが最近報告された⁹⁾。

今回、意識的に呼吸のパターンを変えないと考えられる通常の呼気ガス分析用のマスクを用い、その装着の有無による死腔の負荷が心拍変動スペクトル解析に影響を及ぼすか否かについて検討した。

対象と方法

対象は陳旧性心筋梗塞9例、労作性狭心症4例、拡張型心筋症4例、健常者5例の計22例で、男15例、女7例、平均年齢62歳(39-76歳)であった。

自発呼吸下で、安静臥位5分、自転車エルゴメーター上坐位5分間および自転車エルゴメーター上で通常の呼気ガス分析用のマスクを付けた坐位5分間の心拍を収集した。また1回換気量の大きさが関与するか否かを検討するため、坐位マスク装着時の1回換気量の中央値である570mlで、1回換気量570ml以上とそれ未満の2群(各11例)に分けて検討し、低周波成分の坐位からマスク使用時坐位への変化と1回換気量の関係についても検討した。

得られた5分間の心拍より、平均R-R間隔、標準偏差を求めた。心拍変動スペクトル解析はcoarse-graining spectral analysis (CGSA) 法¹¹⁾にて行い、0-0.50 Hzのパワーを総パワー(total power: TP)、0-0.15 Hzのパワーを低周波成分(low frequency component: LF)、0.15-0.50 Hzのパワーを高周波成分(high frequency

component: HF)とした¹¹⁾。副交感神経の指標としてHF/TP、交感神経の指標としてLF/HFを使用した¹²⁾。

各成分は自然対数に変換し、分散分析法にて検定を行い、post-hoc検定にはScheffe法を用い、 $p < 0.05$ を有意差の判定とした。

結 果

症 例

拡張型心筋症と診断された66歳、男性で、左室駆出率は48%であった。Fig. 1-左にR-R間隔の時系列を示し、Fig. 1-右にそのスペクトル解析を示す。上段の安静臥位では低周波成分と高周波成分が明瞭に見られるが、中段の自転車エルゴメーター上坐位では低周波成分が増加、高周波成分は減少し、交感神経の指標であるLF/HFは安静臥位の0.84から8.90へ増加、副交感神経の指標であるHF/TPは安静臥位の0.18から0.06へ低下し、臥位から坐位への体位変化による自律神経の変化を明瞭に示している。下段に示す自転車エルゴメーター上坐位に呼気ガス分析用マスクを付けた状態では、低周波成分が減少、LF/HFは2.16へ低下し、臥位から坐位への体位変換時の交感神経緊張が不明瞭となった。

呼気ガス分析に使用しているマスクの容量は320mlあり、坐位でマスク装着時の1回換気量は平均[±SD]596±110ml(444-808ml)であった。

平均R-R間隔、標準偏差、高周波成分にこれら3様の各状態で有意な変化はみられなかった(Table 1)。総パワーは安静臥位に比べ坐位で増加した。低周波成分も同様の傾向にあったが、マスクを付けた坐位状態で減少し、安静臥位と差がなくなった(Table 1)。交感神経の指標であるLF/HFは安静臥位に比べ坐位で増加したが、坐位でマスクを装着すると低下し、安静臥位と差がなくなった(Table 1)。一方、副交感神経の指標であるHF/TPは安静臥位に比べ坐位で低下したが、呼気ガス分析用のマスクを付けると増加し、安静臥位時と差がなくなった(Table 1)。以上より、マスクによる死腔の負荷によって、臥位から坐位への体位変換時の交感神経の活性化と副交感神経活性の低下が不明瞭になると考えられた。

1回換気量の大きさが呼気ガス分析用マスクの心拍変動への影響に関与するか否かを検討するため、1回

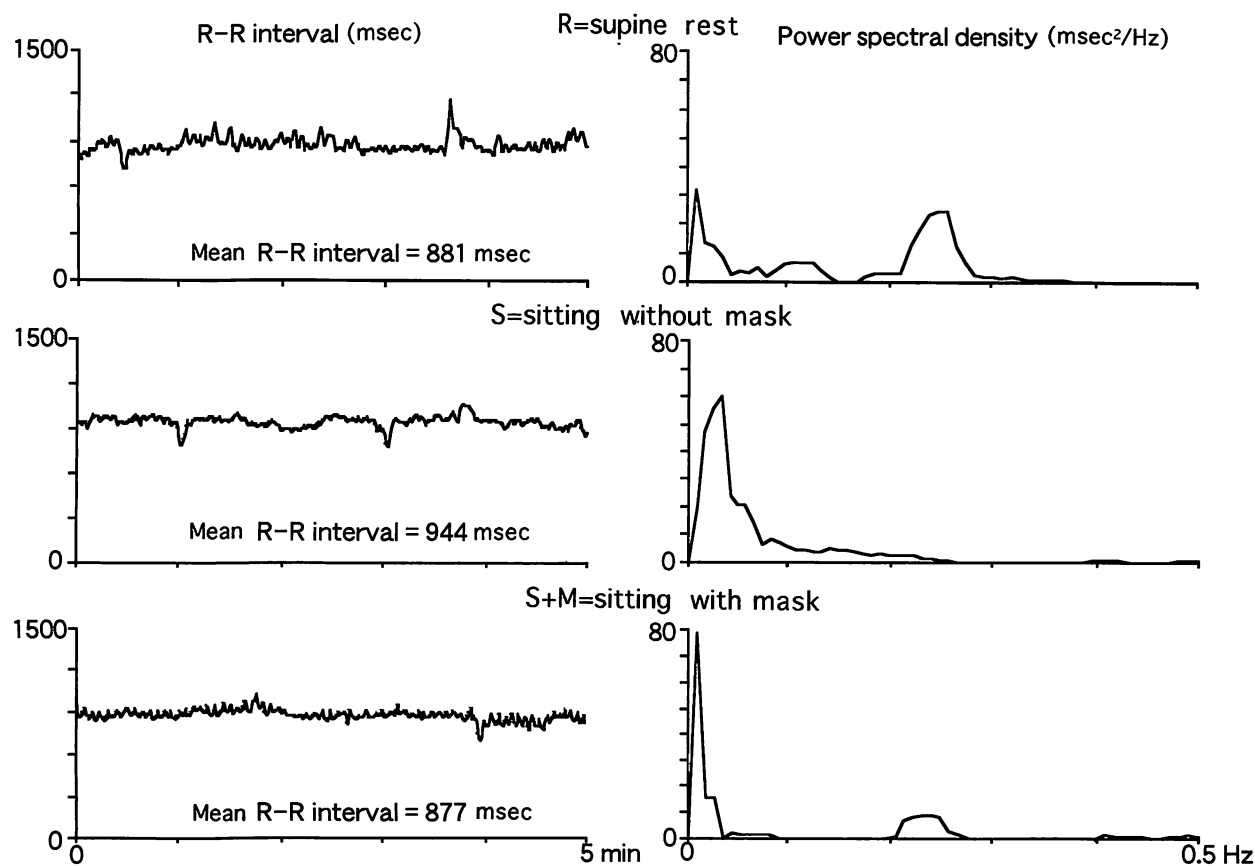


Fig. 1 Time-series of R-R interval (left) and power spectral analysis (right) of a representative subject under the three experimental conditions

Table 1 Heart rate variability measurements under the three experimental conditions

	R	S	S+M
Mean R-R interval (msec)	907 ± 110	880 ± 109	831 ± 118
SD (msec)	25.8 ± 9.2	33.0 ± 11.6	26.8 ± 8.2
Ln TP	5.37 ± 0.92	6.01 ± 0.84 [†]	5.60 ± 0.63
Ln LF	3.58 ± 1.34	4.54 ± 1.24*	3.54 ± 1.36
Ln HF	2.93 ± 1.11	2.85 ± 1.18	3.44 ± 1.01
Ln HF/TP	-2.44 ± 0.94	-3.17 ± 1.08 ^{†*}	-2.19 ± 0.76
Ln LF/HF	0.68 ± 1.39	1.71 ± 1.26 ^{†*}	0.13 ± 1.36

Values are mean ± standard deviation (SD). * $p < 0.05$ S vs S+M, [†] $p < 0.05$ R vs S, [‡] $p < 0.01$ S vs S+M. Ln = natural logarithm. Other abbreviations as in Fig. 1.

Table 2 Heart rate variability measurements in subjects with TV ≥ 570 ml

	R	S	S+M
Mean R-R interval (msec)	930 ± 115	916 ± 110	859 ± 128
SD (msec)	24.4 ± 10.7	34.0 ± 12.8	27.0 ± 8.1
Ln TP	5.33 ± 1.16	6.08 ± 0.83	5.62 ± 0.67
Ln LF	3.64 ± 1.37	4.54 ± 1.12	4.03 ± 1.02
Ln HF	2.75 ± 1.28	2.97 ± 1.45	3.58 ± 1.13
Ln HF/TP	-2.58 ± 0.89	-3.12 ± 0.96*	-2.10 ± 0.85
Ln LF/HF	0.89 ± 1.25	1.57 ± 0.91	0.51 ± 1.08

Values are mean ± SD. * $p < 0.05$ S vs S+M. TV = tidal volume. Other abbreviations as in Fig. 1, Table 1.

換気量の大小による影響の違いと低周波成分の坐位からマスク使用時坐位への変化と1回換気量の関係について検討した。1回換気量 570 ml 以上の群では HF/TP が坐位に比べマスク使用時の坐位で有意に増加した (Table 2)。一方、1回換気量 570 ml 未満の群では LF/

HF が坐位に比べマスク使用時の坐位で有意に低下した (Table 3)。また、坐位からマスク装着坐位への低周波成分の変化と1回換気量の間には $r = 0.44$, $p < 0.05$ の相関を認め、1回換気量の少ない例ほどマスクの装着により低周波成分が減少すると考えられた (Fig. 2)。こ

Table 3 Heart rate variability measurements in subjects with TV <570 ml

	R	S	S+M
Mean R-R interval (msec)	885±106	846±101	803±107
SD (msec)	27.1±7.8	32.1±10.8	26.6±8.6
Ln TP	5.41±0.65	5.93±0.87	5.57±0.60
Ln LF	3.52±1.38	4.55±1.41	3.06±1.51
Ln HF	3.11±0.95	2.73±0.89	3.30±0.90
Ln HF/TP	-2.30±1.00	-3.23±1.23	-2.27±0.70
Ln LF/HF	0.47±1.55	1.84±1.56*	-0.24±1.55

Values are mean±SD. * $p < 0.02$ S vs S+M.

Abbreviations as in Fig. 1, Tables 1, 2.

これらのことより、坐位から臥位への体位変換時の交感神経の活性化が、呼気ガス分析用のマスクによる死腔負荷により、1回換気量の少ない例でより不明瞭になると考えられた。

考 案

安静時の心拍変動スペクトルには低周波と高周波(LFとHF)と呼ばれる2つの主要な成分のピークが観察され、低周波成分は血圧変動のMeyer波が圧受容体反射を介して心拍に反映されることによって生じるとされる¹³⁾。一方、高周波成分は、通常、呼吸性洞性不整脈に対応し、その発生機序には、1) 脳幹における呼吸中枢から心臓血管中枢への干渉、2) 動脈圧受容体と化学受容体の感受性の影響、3) 心肺圧受容体からの入力、4) 動脈圧受容体による変調、5) 肺や胸壁の伸展受容体からの入力、6) 呼吸による洞結節の伸展が関与するとされる⁹⁾。これらの機序により、心臓への迷走神経入力は呼気時に増加、吸気時に抑制され、その結果、心拍数は呼気時に減少、吸気時に増加し、高周波成分が生じるとされる。また、心臓交感神経活動の呼吸性の変調も報告されている⁹⁾。

心拍変動スペクトル解析により、精神的ストレスや臥位から坐位や立位への体位変換時に副交感神経活性が減少し、交感神経優位になることが報告されている^{12,14)}。今回の検討でも、臥位から坐位になることで、低周波成分が増加傾向となり、高周波成分に有意な変化がなく、交感神経の指標であるLF/HFは増加した。この比を交感神経の指標に用いることについては、安静時の低周波成分が主に迷走神経活動を反映すること

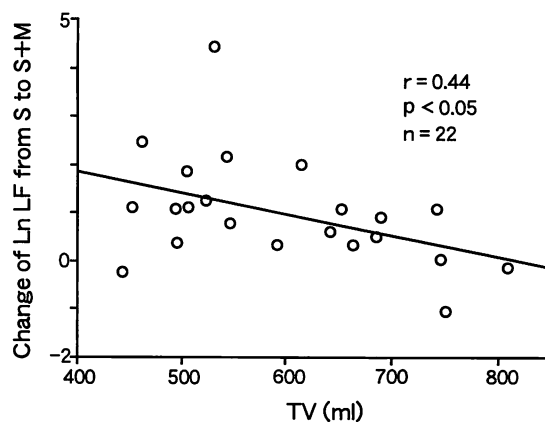


Fig. 2 Relationship between change of natural logarithm low frequency from S to S+M and tidal volume

Abbreviations as in Fig. 1, Tables 1, 2.

から問題視する報告もあるが^{13,15)}、臥位から坐位になることで、高周波成分の増加を伴わずに低周波成分が増加することから、今回の検討でのLF/HFの増加は交感神経の活性化によるものと考えられた。また、臥位から坐位になることで総パワーが増加したため、副交感神経の指標であるHF/TPは低下した。従来、体位変換時の自律神経の変化をみる方法としてhead-up tiltがよく用いられ、Shannonら¹⁶⁾は、30歳以上の健常者では、この方法により両周波成分に有意な変化を生じないと報告し、Lipsitzら¹⁷⁾も、高齢健常者では両周波成分に変化はないが、若年者では高周波成分は不変で、総パワーの増加と低周波成分の増加傾向を報告した。今回の結果はLipsitzらの若年者の反応とほぼ同じであり、CGSA法が周波数成分(LF, HF)の変化をより鋭敏にとらえることができるためと考えられた¹⁷⁾。

心拍変動スペクトルには呼吸のパターン(呼吸数、1回換気量)が影響し、呼吸数が増加するか1回換気量が増加すると高周波成分は増加するとされ、心拍変動の解釈には呼吸のモニターないし調節呼吸が必要とされる^{2,3)}。一方、近年、調節呼吸そのものが軽い精神的ストレスとなり、自律神経バランスに影響を及ぼすため、調節呼吸を用いるときには注意が必要と報告されている⁹⁾。

今回、呼気ガス分析用マスクによる死腔が心拍変動に及ぼす影響を検討したところ、マスクの装着により低周波成分は低下し、高周波成分は不変のため、LF/HFは安静時の状態と差がなくなった。この原因としてSaulら⁹⁾は、副交感神経のみならず交感神経も呼吸

により影響されることを示し、Brown ら²⁾は、呼吸のパターンが高周波成分のみならず低周波成分にも影響することを報告しており、今回の結果は、呼吸パターン(おそらく1回換気量の増加)が低周波成分の減少に関与したと考えられた。

また、1回換気量の大きさがマスクの有無による心拍変動に影響するか否かを検討したところ、1回換気量の多い群ではHF/TPがマスクを付けることで減少し、1回換気量の少ない群ではLF/HFが減少し、坐位からマスク装着坐位への低周波成分の変化と1回換気量の間に正相関を認め、1回換気量の少ない例ほどマスクの装着により、低周波成分が減少すると考えられた。これらのことより、1回換気量の少ない例では坐位から臥位への交感神経の活性化がマスクの装着により不明瞭になりやすいと考えられた。

副交感神経の指標であるHF/TPは安静臥位に比べ坐位で減少し、マスクを装着した坐位で増加し安静臥位と差がなくなり、体位変化による副交感神経活性の低下がマスクの装着により不明瞭になると考えられた。この機序として1回換気量の増加は高周波成分の増加を生じることが示されており²³⁾、今回の検討でも高周波成分はマスク装着により増加傾向にあり、マスクに

よる死腔の増加が1回換気量の増加を引き起こしたためと推定された。

以上より、通常の呼気ガス分析マスクの装着によっても心拍変動スペクトル解析に影響が及ぶため、そのデータの解釈には注意が必要と考えられた。ただし、今回の対象は均一でなく、健常者と心疾患患者を含んでおり、今後健常者と疾患群および疾患の違いによって差があるか否かについての検討を要すると考えられた。

結 論

1. 心拍変動スペクトル解析(CGSA法)により、坐位から臥位へ体位変化時の交感神経の活性化と副交感神経活性の低下を明瞭に観察可能であった。

2. 通常の呼気ガス分析に使用するマスクの装着により、坐位から臥位への体位変化時の自律神経の変化が不明瞭となり、特に1回換気量の少ない例では交感神経の活性化が不明瞭となった。

3. 通常の呼気ガス分析に用いるマスク程度の死腔でも、心拍変動スペクトルに影響を及ぼすため、そのデータの解釈には注意を要すると考えられた。

要 約

心拍変動スペクトル解析には呼吸のパターンが影響するとされ、調節呼吸ないし呼吸のモニターが必要とされる。今回、通常の呼気ガス分析に用いるマスクの有無による死腔の負荷が心拍変動スペクトル解析に影響を及ぼすか否かについて検討した。

陳旧性心筋梗塞9例、労作性狭心症4例、拡張型心筋症4例、健常者5例の計22例(男15例、女7例、平均年齢62歳:39-76歳)を対象に、自発呼吸下で、安静臥位5分間、自転車エルゴメーター上坐位5分間、自転車エルゴメーター上でマスクを付けた坐位5分間の心拍を収集した。CGSA法にて心拍変動スペクトル解析を行い、総パワー(TP:0-0.50 Hz)、低周波成分(LF:0-0.15 Hz)、高周波成分(HF:0.15-0.50 Hz)、HF/TP、LF/HFを求め比較した。呼気ガス分析用のマスクの容量は320 mlであり、坐位でマスク装着時の1回換気量は平均[±SD]596±110 ml(444-808 ml)であった。

LF/HFは安静臥位に比べ坐位で増加したが($p<0.05$)、マスクを付けた坐位では安静臥位の状態に戻った。逆にHF/TPは安静臥位に比べ坐位で低下したが($p<0.05$)、マスクを付けると安静臥位の状態に戻った。また、1回換気量の大きさが関与するか否かを検討するため、1回換気量の中央値である570 mlで2群(各11例)に分けて検討したところ、1回換気量570 ml未満の群でLF/HFは安静臥位に比べ、マスク装着坐位で有意に低下した($p<0.02$)。また、坐位からマスク装着坐位への低周波成分の変化と1回換気量の間に $r=0.44$ 、 $p<0.05$ の相関を認めた。

以上より、通常の呼気ガス分析に用いるマスク程度の死腔でも心拍変動スペクトルは鋭敏に変

化し、臥位から坐位への体位変化時の交感神経の活性化および副交感神経活性の低下が不明瞭となり、特に1回換気量が少ない例で交感神経の活性化が不明瞭となった。このため通常の呼吸ガス分析に用いるマスク程度の死腔でも、心拍変動スペクトルに影響を及ぼすため、そのデータの解釈には注意が必要であると考えられた。

J Cardiol 1997; 29: 171-176

文 献

- 1) Piepoli M, Clark AL, Volterrani M, Adamopoulos S, Sleight P, Coats AJS : Contribution of muscle afferents to the hemodynamic, autonomic, and ventilatory responses to exercise in patients with chronic heart failure : Effects of physical training. *Circulation* 1996; **93** : 940-952
- 2) Brown TE, Beightol LA, Koh J, Eckberg DL : Important influence of respiration on human R-R interval power spectra is largely ignored. *J Appl Physiol* 1993; **75** : 2310-2317
- 3) Hayano J, Mukai S, Sakakibara M, Okada A, Takata K, Fujinami T : Effects of respiratory interval on vagal modulation of heart rate. *Am J Physiol* 1994; **267** : H33-H40
- 4) Hirsch JA, Bishop B : Respiratory sinus arrhythmia in humans : How breathing pattern modulates heart rate. *Am J Physiol* 1981; **241** : H620-H629
- 5) Patwardhan AR, Vallurupalli S, Evans JM, Bruce EN, Knapp CF : Override of spontaneous respiratory pattern generator reduces cardiovascular parasympathetic influence. *J Appl Physiol* 1995; **79** : 1048-1054
- 6) Patwardhan AR, Evans JM, Bruce EN, Eckberg DL, Knapp CF : Voluntary control of breathing does not alter vagal modulation of heart rate. *J Appl Physiol* 1995; **78** : 2087-2094
- 7) Saul JP, Berger RD, Chen MH, Cohen RJ : Transfer function analysis of autonomic regulation. II : Respiratory sinus arrhythmia. *Am J Physiol* 1989; **256** : H153-H161
- 8) Saul JP, Berger RD, Albrecht P, Stein SP, Chen MH, Cohen RJ : Transfer function analysis of the circulation : Unique insights into cardiovascular regulation. *Am J Physiol* 1991; **261** : H1231-H1245
- 9) Saul J, Cohen R : Respiratory sinus arrhythmia. *in* *Vagal Control of the Heart : Experimental Basis and Clinical Implications* (ed by Levy M, Schwartz P). Futura Publishing Co., Inc., Armonk, 1994; pp 511-536
- 10) Taha BH, Simon PM, Dempsey JA, Skatrud JB, Iber C : Respiratory sinus arrhythmia in humans : An obligatory role for vagal feedback from the lungs. *J Appl Physiol* 1995; **78** : 638-645
- 11) Yamamoto Y, Hughson RL : Coarse-graining spectral analysis : New method for studying heart rate variability. *J Appl Physiol* 1991; **71** : 1143-1150
- 12) Pagani M, Lucini D, Rimoldi O, Furlan R, Piazza S, Biancardi L : Effects of physical and mental exercise on heart rate variability. *in* *Heart Rate Variability* (ed by Malik M, Camm A). Futura Publishing Co., Inc., Armonk, 1995; pp 245-266
- 13) Parati G, Saul JP, Di Rienzo M, Mancia G : Spectral analysis of blood pressure and heart rate variability in evaluating cardiovascular regulation : A critical appraisal. *Hypertension* 1995; **25** : 1276-1286
- 14) Perini R, Orizio C, Milesi S, Biancardi L, Baselli G, Veicsteinas A : Body position affects the power spectrum of heart rate variability during dynamic exercise. *Eur J Appl Physiol* 1993; **66** : 207-213
- 15) Hayano J, Sakakibara Y, Yamada A, Yamada M, Mukai S, Fujinami T, Yokoyama K, Watanabe Y, Takata K : Accuracy of assessment of cardiac vagal tone by heart rate variability in normal subjects. *Am J Cardiol* 1991; **67** : 199-204
- 16) Shannon DC, Carley DW, Benson H : Aging of modulation of heart rate. *Am J Physiol* 1987; **253** : H874-H877
- 17) Lipsitz LA, Mietus J, Moody GB, Goldberger AL : Spectral characteristics of heart rate variability before and during postural tilt : Relations to aging and risk of syncope. *Circulation* 1990; **81** : 1803-1810