

自然呼吸時と呼吸統制時における心拍変動自律神経評価の精度

不破 輝彦*

The Accuracy of Evaluation of Autonomic Nervous System Activity by Heart Rate Variability under Natural Respiration and Controlled Respiration

Teruhiko FUWA*

The heart rate variability (HRV) is one of the methods for evaluating the autonomic nervous system activity. In many cases subjects during HRV measurement should be kept the respiration rhythm in constant. This procedure has been called controlled respiration. But there is a report that the effects of controlled respiration on the reproducibility of HRV measurements were insignificant.

In this study the effects of controlled respiration on the evaluation of autonomic nervous system activity were examined by a paired t-test. HRV of 47 male subjects (age range: 20-21 years) were measured under a combination of two respiratory conditions (natural respiration and controlled respiration) and two postures (standing and sitting). LF (0.04-0.15 Hz) and HF (0.15-0.4Hz) components of HRV were obtained by respective band-pass digital filters, and LF/HF and LF/(LF+HF) were calculated as the index of sympathetic nervous system activity. I used the paired t-test to evaluate the difference of sympathetic nervous system activity between two postures. The p-value under the controlled respiration was lower than that under the natural respiration. This suggests that the controlled respiration is effective for the evaluation of autonomic nervous system activity by heart rate.

Keywords: heart rate variability, autonomic nervous system activity, natural respiration, controlled respiration, t-test, p-value

1. はじめに

自律神経評価¹⁾は、臨床医学、生理学、心理学、スポーツ科学、人間工学、福祉工学、感性工学など、様々な分野で活用されている。ものづくりの分野では、製品の使いやすさの評価や疲労度の評価、快適性の評価などに用いられ、製品の付加価値を高めるための設計手法の一つとして、商品開発時に利用されることも多い。例えば、浴槽形状開発において入浴

時の快適性を自律神経活動で評価した松下電工(株)の研究²⁾、家庭用柔軟仕上げ剤が自律神経活動に及ぼす影響を研究したライオン(株)と信州大の共同研究³⁾などがある。

生体は様々な自律神経の支配を受けているため、自律神経評価の方法もいくつかあるが、比較的手軽に測定できる方法として、心拍変動による自律神経評価法⁴⁾がある。この手法では、被験者の心電図を計測して A/D 変換し、コンピュータ上で瞬時心拍数(心臓鼓動の時間間隔の逆数に 60 を乗じた値)の時

* 職業能力開発総合大学校 機械システム工学科

* Department of Mechanical System Engineering, Polytechnic University

間の変化(心拍変動)を算出し、周波数解析を行う。測定が容易であること(体表面に2あるいは3個の使い捨て電極を装着し、電位差を差動増幅すればよい)、脈波(耳朶や指先に光電脈波センサをクリップで挟むだけで可能)でも代用できること、信号処理がシンプルであることから、自律神経評価法として一般化している。血圧計のように一般家庭でも使用できる携帯型の心拍変動測定器も市販されている(例えば(株)トライテックの「チェック・マイハート」)。

心拍変動による自律神経評価においては、心電図測定時の被験者の呼吸周期を一定に保つ呼吸統制が必要と言われている(例えば文献^{5,6)}など)。一方、呼吸統制による心拍変動測定の安定性、再現性改善の効果は小さいとする研究^{7,8)}もあり、呼吸統制に対する効果は定まっているとは言えない。

本研究の目的は、心電図測定時の呼吸統制の有無が心拍変動による自律神経評価の精度に影響するかどうか検証することである。一般に人の自律神経(交感神経と副交感神経)のバランスは立位と座位では異なり、立位の方が交感神経活動は高い。そこで、被験者47名による心電図を計測し、心拍変動自律神経評価法でこの自律神経バランスの違いを統計的に示すことができるかどうかを検定する。ここではt検定を行い、その有意確率pを呼吸統制の有無で比較することにより、自律神経評価の精度を検証する。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、健康な男子学生47名とした。測定は2008～2010年度にかけて筆者が担当する3年次生用の実習科目「制御システム実習Ⅲ」の中で行われた。年度別の内訳は、それぞれ11名、15名、21名である。測定時の被験者の年齢は、全員が20または21歳であった。被験者に対しては、測定前に実験目的を説明して同意を得た。

2.2 測定システム

測定する項目は、被験者の心電図である。胸部3か所に使い捨て電極(L-150, 日本光電工業(株))を

装着し、CM5誘導で測定する。生体信号増幅器(MEG-1200, 日本光電工業(株))を使用し、増幅率は心電図の最大振幅が5V以下となるように被験者毎に調整し、ハイパスフィルタ(カットオフ周波数0.5Hz)、ローパスフィルタ(カットオフ周波数100Hz)、ハムフィルタ(50Hz)を設定する。増幅器の出力(心電図)は、A/D変換カード(CBI-360116, (株)インタフェース)を介して、サンプリング周波数200HzでA/D変換されてノート型パーソナルコンピュータ(VY16F/RX-R, 日本電気(株))に取り込まれ、テキスト形式で保存される。

2.3 測定条件

被験者の姿勢は、立位と座位の2姿勢とする。座位には一般的なOA用チェア(CCS-005, エレコム(株))を使用する。被験者の呼吸は、自然呼吸と呼吸統制の2種類とする。呼吸統制条件では、合成音声ソフトウェア(ボイス君のテキストスピーチ2Ver.2.0.0.4, (株)エヌ・ティ・ティ・データ)で作成した「吸って」、「吐いて」という音声ファイルを2秒毎に交互に再生させる。被験者には、これに合わせて呼吸するように指示を与える。自然呼吸条件では、自然に呼吸するように指示を与えるが、会話をしないこと、笑わないこと、(止むを得ない場合を除き)咳(咳払い)をしないことも加えて指示する。

2.4 測定手順

測定条件の組み合わせにより、4通りの実験、すなわち、①座位・自然呼吸、②立位・自然呼吸、③座位・呼吸統制、④立位・呼吸統制を行った。それぞれの実験時間は5分間とし、その間の心電図を上記の順序で記録した。測定の合間には5分程度の安静時間をおいた。測定開始のためのマウス操作は、各被験者に行わせた。実験は、各年度の被験者を2班に分け、合計6日間かけて実施された。

2.5 自律神経評価方法

テキスト形式で保存された心電図データを微分してR波を検出し、瞬時心拍数を求めた後、スプライン補間を用いて0.5秒毎の心拍変動の時系列データを作

成した。一般に自律神経評価に用いられる心拍変動の帯域は、LF 成分 (0.04~0.15 Hz) と HF 成分 (0.15~0.4 Hz) である。そこで、心拍変動の直流成分を除去し、さらにカットオフ周波数 0.04 Hz、200 次零位相 FIR フィルタをかけた結果を HRV とする。HRV に 0.04~0.15 Hz を通過域とする 200 次零位相 FIR フィルタをかけた結果 (HRV_{LF}) を二乗して平滑化 (カットオフ周波数 0.005 Hz の 200 次零位相 FIR フィルタ) した波形を L とする。同様に、HRV に 0.15~0.4 Hz を通過域とする 200 次零位相 FIR フィルタをかけた結果 (HRV_{HF}) を二乗・平滑化した波形を H とする。L/(L+H)、および L/H の 50~250 秒間の積分値をそれぞれ「LF/(LF+HF)」、「LF/HF」とした。これらは一般に交感神経活動を表す指標として用いられている。なお、測定開始直後と終了直前の 50 秒間はフィルタの適用範囲外のため、積分範囲から除外した。

2.6 統計解析方法

自然呼吸時において、座位—立位間で被験者 47 名の LF/(LF+HF) の平均値に差があるかどうか、対応のある t 検定を行い、有意確率 p (両側) を求めた。LF/HF についても p 値を求めた。同様に、呼吸統制時においても LF/(LF+HF)、LF/HF それぞれについて p 値を求めた。

人間工学や生体医工学などの分野における被験者数は、一般に 10 名程度⁹⁾は必要とされており、被験者数を 10 名前後にしている研究報告や論文は多い。そこで被験者が 10 名の場合をシミュレーションするため、被験者 47 名のうち、無作為に 10 名を抽出し、同様に p 値を求めた。抽出には一様乱数を使用し、初期値を変えて 10 パターンの組み合わせで行った。

3. 結果

被験者 47 名分の結果のうち、波形については被験者 A の立位、呼吸統制時の測定波形および信号処理結果を例として示す。

図 1 は、心電図である。心電図の R 波高に周期的なゆらぎが見られるが、これは呼吸の影響を受けたものと考えられる。

図 2 は、上から心拍変動 HRV、心拍変動の LF 成分 HRV_{LF}、心拍変動の HF 成分 HRV_{HF}、交感神経活動指標の L/(L+H)、L/H を示す。測定時間は 300 秒であるが、フィルタが作用しない前後の各 50 秒は除外して表示した。この測定における被験者 A の心拍変動の直流成分 (平均値) は 83.7 bpm であった (bpm は拍/分の意)。

図 3 は、図 2 の HRV の 50~250 秒間に対して 10 次 AR モデルによるパワースペクトルを求めた結果である。0.1 Hz 付近のピーク (Mayer 波) と 0.25 Hz にピークを持つ呼吸成分を確認できる。

図 4 および図 5 は、4 通りの実験における交感神経活動指標 (LF/(LF+HF) および LF/HF) の 47 名分の平均、および標準偏差を示したものである。立位と座位を比較すると、指標の種類、呼吸条件に関わらず立位の方が高い値を示している。

表 1 は、被験者 47 名の交感神経活動指標に対して、立位と座位の間で各指標の t 検定を行い、得られた p 値をまとめたものである。指標の種類、呼吸条件に関

表 1 呼吸状態と 2 姿勢間 p 値 (被験者 47 名)

交感神経活動指標	自然呼吸	呼吸統制
LF/(LF+HF)	1.75×10^{-5}	2.26×10^{-8}
LF/HF	3.43×10^{-5}	1.86×10^{-5}

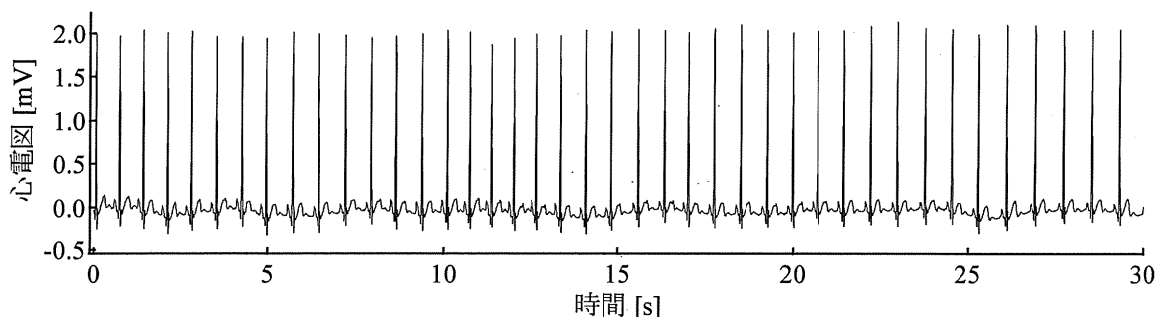


図1 被験者A、立位、呼吸統制時の心電図波形。全測定時間300秒のうち先頭の30秒間を示す。0.5~100Hzを通過域と設定した生体アンプにて計測し、サンプリング周波数200HzでA/D変換した。

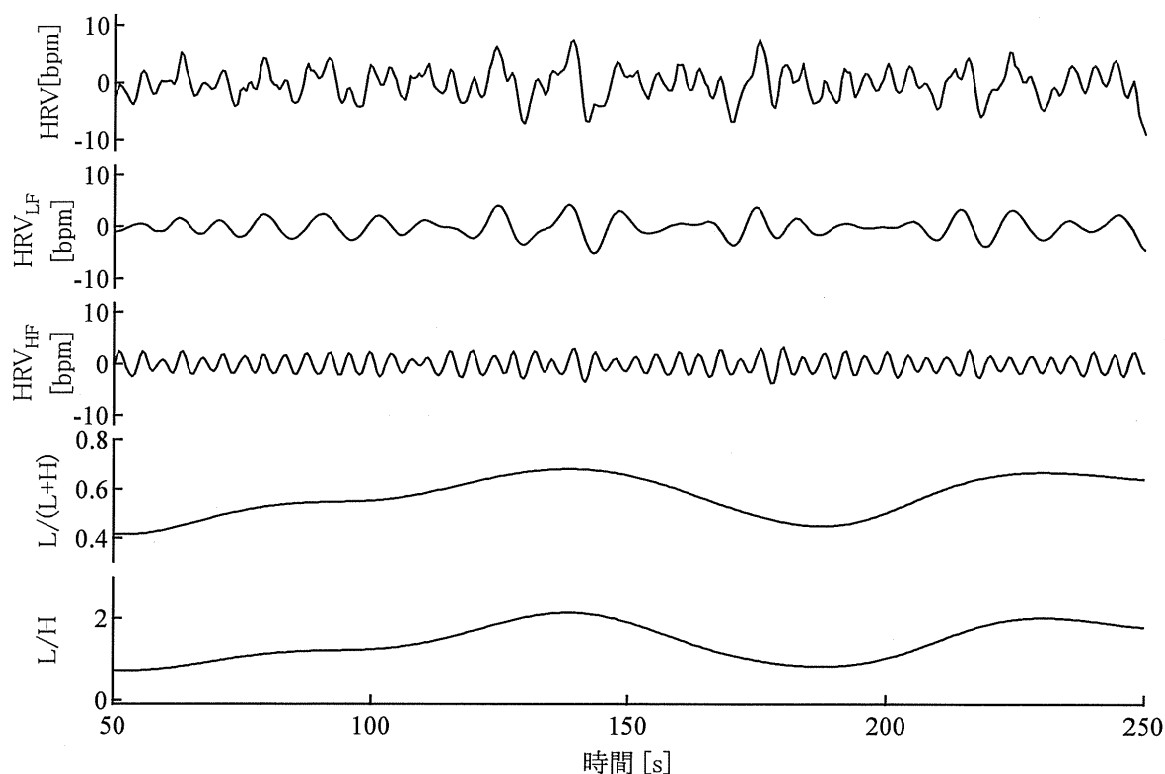


図2 被験者Aの立位, 呼吸統制時の各種結果. 上から, 0.04Hz以下を除去後の心拍変動HRV, 心拍変動のLF成分 HRV_{LF} , 心拍変動のHF成分 HRV_{HF} , 交感神経活動の時間変化を示す $L/(L+H)$, 同じく交感神経活動の時間変化を示す L/H をそれぞれ示す. 全測定時間300秒のうち, 各種のデジタルフィルタが適用されない前後50秒を除いた50~250秒間を表示している.

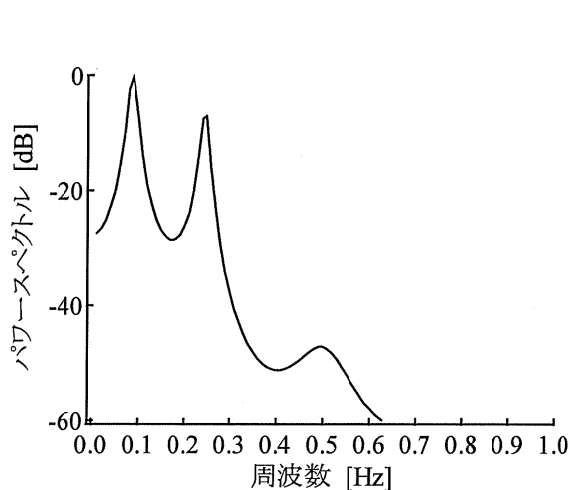


図3 被験者A, 立位, 呼吸統制時の心拍変動パワースペクトル. 4秒周期の呼吸統制により0.25Hzに呼吸成分を確認できる. 0.1Hz付近のピークは動脈血圧受容器反射によるMayer波と呼ばれる. 0.5Hzのピークは呼吸成分の高調波である.

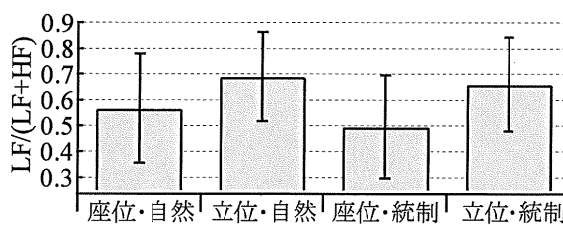


図4 被験者47名, 姿勢2種類, 呼吸統制有無に対する交感神経活動指標 $LF/(LF+HF)$ の比較

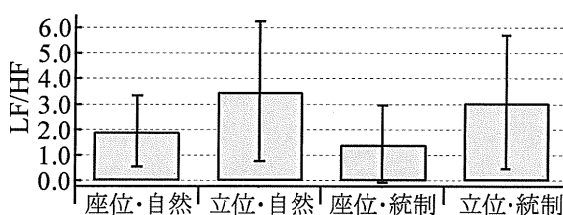


図5 被験者47名, 姿勢2種類, 呼吸統制有無に対する交感神経活動指標 LF/HF の比較

ならず, $p < 0.01$ を満たしており, 有意水準 1 % で統計的有意差があること, すなわち交感神経活動指標は立位の方が大きいことがわかる.

表 2 および表 3 は, 被験者 47 名から無作為に選んだ 10 パターンの各 10 名分の交感神経活動指標に対して立位と座位の間で各指標の t 検定を行い, 得

られた p 値をまとめたものである. 有意水準 5 % で統計的有意差が示されたものに対して*印を付加した.

4. 考察

使いやすさや快適性などヒトの感性に関する情報

表 2 呼吸統制有無に対する 2 姿勢間の p 値
(被験者 47 名から無作為に 10 名抽出)

交感神経活動指標: LF/(LF+HF) *: $p < 0.05$

無作為抽出パターン	自然呼吸	呼吸統制
1	0.4396	0.0021*
2	0.0515	0.0333*
3	0.7955	0.0037*
4	0.0359*	0.0652
5	0.0817	0.0132*
6	0.0461*	0.0652
7	0.0678	0.0007*
8	0.0298*	0.0290*
9	0.2972	0.0279*
10	0.2994	0.0390*

は、中枢神経系や自律神経系の活動を評価することで得られる。中枢神経系の評価には、脳波や近赤外線脳機能計測法が用いられる。しかし、脳波は電氣的ノイズに弱く、また電極の装着も煩雑であること、近赤外線脳機能計測法は機器が高額であることから、手軽に測定できるものではない。一方、自律神経系の活動は心電図や脈拍から容易に得られることから、多方面でよく用いられる。その多くは、交感神経活動を LF/(LF+HF) や LF/HF で評価するものであり、これらの指標に対する統計学的仮説検定により、ヒトの感性を定量的に評価できる。

図 3 は心拍変動パワースペクトルの一例である。0.1 Hz 付近のピークは動脈血圧受容器反射に由来する Mayer 波であり、心拍変動の LF 成分の主体である。0.25 Hz のピークは呼吸性不整脈による成分で、HF 成分の主体である。この図は 4 秒周期に呼吸統制された時のもので、0.25 Hz のピークが明確だが、自然呼吸時はピーク周波数の位置が左右にシフトしたり、ピークの鋭さが弱まることが多い。

図 4、図 5 は、姿勢変化時の交感神経活動指標を比較した結果である。ヒトの自律神経(交感神経と副交感神経)のバランスは、姿勢を変化させることによって意図的に変えることができる。仰臥位、座位、立位は自律神経評価の研究ではよく用いられる姿勢であり、この順に交感神経活動が高くなることが知られている。本研究では座位と立位で交感神経活動指標を比較したが、両指標ともに、被験者 47 名の平均値は立位の方が高くなり、生理学的に妥当な結果であ

表 3 呼吸統制有無に対する 2 姿勢間の p 値
(被験者 47 名から無作為に 10 名抽出)

交感神経活動指標: LF/HF *: $p < 0.05$

無作為抽出パターン	自然呼吸	呼吸統制
1	0.2788	0.0135*
2	0.1169	0.0875
3	0.4583	0.0476*
4	0.0594	0.1540
5	0.0432*	0.0602
6	0.0844	0.1147
7	0.0861	0.0639
8	0.0600	0.0557
9	0.3503	0.1695
10	0.5970	0.0946

った。しかし統計学的に立位の方が高いと言えるかどうかは、t 検定を行ってみなければ判断できない。

表 1 は、その t 検定結果の p 値である。p 値とは、2 群にたまたま差が出ないという希なことが起きる確率である。p 値が予め決めておいた有意水準以下であれば、統計的有意差があると言える。有意水準は、一般に 1 % や 5 % が用いられることが多いが、表 1 ではいずれも 0.01 を下回っており、立位と座位の交感神経活動には、有意水準 1 % で統計学的有意差があると言える。指標の違いをみると、LF/HF の方が p 値は大きい。この計算式の分母が HF のみであることから、指標としての安定性が LF/(LF+HF) よりも劣ることが示唆される。呼吸方法の違いをみると、呼吸統制時の方が p 値は小さくなった。これは呼吸統制を行った方が姿勢間の交感神経活動の違いをより強く主張できることを意味しており、呼吸統制時は自律神経活動の推定精度が高いと考えることができる。この結果は、呼吸統制の必要性を主張する先行研究^{5,6)}とは矛盾しない。しかし、表 1 の p 値は自然呼吸時においても十分に小さく、呼吸統制は必要ないとも言える。一般にサンプル数が多いと p 値が小さく計算される場合があり、今回の実験の被験者数が 47 名と多かったことから、自然呼吸時でも p 値が十分に小さくなったと考えられる。

生体計測においては、被験者数を 10 名前後とする場合が多い。そこで本実験データから、被験者 10 名を想定して t 検定を行った結果が表 2 および表 3 である。表 2 は LF/(LF+HF) についてまとめたもので、

10 パターンのうち、有意水準 5 % で有意差を示したものは、自然呼吸時で 3 例、呼吸統制時で 8 例であった。本来、生理学的には差があるべきなので、この結果は、自発呼吸時では統計的有意差無しという誤った結果に導かれる可能性が高いことを意味する。p 値を見ると、10 パターンのうち 8 例で呼吸統制時の方が小さい。表 3 は LF/HF の場合である。5 % 有意を示したものは、自然呼吸時で 1 例、呼吸統制時でも 2 例しかなく、LF/HF は指標としての安定性が低いことがわかる。p 値を見ると、10 パターンのうち 7 例では呼吸統制時の方が小さい。これらの結果は、呼吸統制を行った方が自然呼吸時よりも自律神経評価の精度が高いことを示唆するものである。小林の実験では、呼吸統制による心拍変動測定安定性・再現性改善の効果は小さいとしている^{7,8)}。しかし同時に、効果が見られなかった原因として、自然呼吸時に呼吸の乱れが起こらなかったためとも推測している。呼吸統制の効果については、検証方法や呼吸の規則性の評価なども含め、今後、更なる検討が必要であろう。

5. まとめと今後の課題

本論文では、呼吸統制の有無が心拍変動による自律神経評価法の推定精度に影響を与えるかどうか、被験者 47 名の実験により検証した。その結果、

(1) 座位と立位間の交感神経活動指標の違いを t 検定した結果、呼吸統制時、自然呼吸時の両方において、有意水準 1 % で統計学的有意差が認められたが、p 値は呼吸統制時の方が小さくなった。

(2) 被験者 10 名の測定をシミュレーションするために、47 名から無作為に 10 名を 10 パターン抽出し、同様に t 検定を行った結果、p 値は 10 パターン中 8 例 (LF/(LF+HF) の場合)、あるいは 7 例 (LF/HF の場合) で呼吸統制時の方が小さくなった。

以上より、呼吸統制を行った方が心拍変動による自律神経評価の推定精度は高いことが示唆された。

今後の課題は、検出力や必要なサンプル数の検討を加えて、呼吸統制の効果についてさらに統計的に検証すること、測定時の呼吸規則性を定量化し¹⁰⁾、推定精度との関係を定量的に評価することである。

謝 辞

本研究のデータ処理においては、不破研究室の平成 23 年度 4 年生である小野洋二郎君、菊永祐輔君、田代尚弘君、友重翼君、村上侑亮君に、作業の一部をお願いした。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 飯田健夫, 感覚生理工学, 2009, コロナ社
- 2) 岩川幹生, 寺野真明, 富田和志: 入浴時の快適性・リラックス性に対する浴槽形状の影響, 松下電工技報, Aug.2003, pp.64-69, 2003
- 3) 金井博幸, 石澤広明, 西松豊典, 宮坂広夫: 嗜好性と自律神経活動に及ぼす家庭用柔軟仕上げ剤の香りの影響, J Textile Eng, **53**, pp.37-41, 2007
- 4) 早野順一郎, 岡田暁宜: 心拍変動による自律神経機能評価とその応用: 加齢と心臓迷走神経機能, 自律神経, **34**(3), pp.207-213, 1997
- 5) 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., **75**(5), pp.2310-2317, 1993
- 6) Cammann H, Michel J : How to avoid misinterpretation of heart rate variability power spectra? Computer Methods and Programs Biomedicine, **68**(1), pp.15-23, 2002
- 7) 小林宏光: 呼吸コントロールによって心拍変動測定の再現性は向上するか? 日本生理人類学会誌, **12**(特別号 2), pp.56-57, 2007
- 8) Kobayashi H : Does paced breathing improve the reproducibility of heart rate variability measurements? J Physiol Anthropol, **28**(5), pp. 225-230, 2009
- 9) 横溝克己, 小松原明哲: エンジニアのための人間工学(第 4 版), 2006, 日本出版サービス
- 10) 不破輝彦, 赤田浩太郎, 花房昭彦, 池田知純, 塩田泰仁: 呼吸規則性定量化指標の提案とシミュレーション特性, 生体医工学シンポジウム 2009 講演予稿集(CD-ROM), pp.527-532, 2009