

心拍変動及び脳波の解析による心的状態推定

泉 巖, 前田 大輔, 中島 康博, 栗野 晃希, 橋場 参生

Estimation of Mental State Using Heart Rate Variability and Electroencephalogram Analysis

Iwao IZUMI, Daisuke MAEDA, Yasuhiro NAKAJIMA,
Koki KUWANO, Mitsuo HASHIBA

抄 録

メンタルケアを目的とした製品の開発現場では、その効果検証のために心的状態を客観的に把握する手法が求められている。本研究では、生理心理学の知見を活用し、心拍変動及び脳波からリラックスに関する心的状態を客観的・定量的に推定するための手法を検討した。これを照明観察実験に適用し、3種類の点灯パターン（1/f ゆらぎ・点灯・点滅）を観察した場合の心的状態を推定した。その結果、1/f ゆらぎ照明観察時は心拍変動性の高周波成分が有意に上昇、 β 波成分が有意に低下し、最も安らぎ・落ち着いた状態にあったことが示唆された。この結果は被験者の主観評価とほぼ一致したことから、本手法の有効性を確認した。

キーワード：心拍変動，脳波，リラックス，照明，1/f ゆらぎ

Abstract

At the development of products for mental care, a method for objectively grasping the mental state is required to verify the effect of products. In this research, we investigated a method to estimate the mental state of relaxation objectively and quantitatively using heart rate variability and electroencephalogram, from the viewpoint of physiological psychology. By use of this method, we estimated the mental state of subjects who observed three types of lighting patterns (1/f fluctuation, normal lighting, and blinking). As a result, HF(High Frequency component) was significantly increased and β -wave component was significantly decreased during observing 1/f fluctuation, suggesting that the mental state had been the most comfortable and calm. This result was in agreement with the subjective evaluation, and the effectiveness of this method was confirmed.

KEY-WORDS : Heart Rate Variability, Electroencephalogram, Relax, Lighting, 1/f fluctuation

1. はじめに

近年の健康意識の高まりを背景として、癒しやストレス軽減といったメンタルケアを目的とした製品の開発が積極的に行われている。こうした開発現場では、製品が与える心的効果の検証のため、人の心的状態を客観的・定量的に把握する手法が求められている。このような手法はいくつか提案されているものの、主観評価との整合性が課題となっている。そこで筆者らは、外的刺激の変化に伴う心理生理反応の計測・

解析により、主観評価と合致する心的状態推定手法について検討した。

本研究では、安らぎや心地良さといったリラックス感に関する心的状態を客観的・定量的に推定するため、副交感神経と脳波の心理生理反応に着目し、心拍変動解析及び基礎律動解析による心的状態推定手法を考案した。これを照明観察実験に適用し、照明の点灯パターンが与える心的効果を推定した。さらに、その結果を被験者の主観評価と比較することで、本手法の有効性を検証した。

事業名：経常研究

課題名：心的状態推定のための生体情報計測技術の開発

2. 心的状態推定に用いる生体情報の検討

2.1 リラックスと副交感神経反応

我々の生活には、リラックスに関する単語が深く浸透している。リラックスは「くつろぐこと、力を抜くこと、緊張を緩めること」¹⁾、リラクゼーションは「神経、筋の緊張並びに精神的緊張の緩和を促すこと」²⁾と定義されている。ストレス社会と評される現代において、ストレス解消のために人々がリラックスを求めるのは必然的な成り行きと言える。

リラックスに対する認識や感受性は個人の感覚に由来するものが大きい傾向にあるが、Benson³⁾は「ストレス反応は交感神経反応、リラクゼーション反応は副交感神経反応とみなすことができる」としており、その考えにもとづいた文献も多数存在する⁴⁻⁵⁾。交感神経・副交感神経は、自律神経系を構成する末梢神経であり、循環、呼吸、消化、発汗・体温調節、内分泌機能といった不随意機能を互いに拮抗しながら調整し、ホメオスタシスを維持している⁶⁻⁷⁾。交感神経は、ノルアドレナリン、アドレナリンを主とした神経伝達物質により、心拍数の上昇、末梢血管の収縮、血圧の上昇といった循環器系機能の亢進や、肝臓や筋肉に蓄えられたグリコーゲンを分解して血糖値を上昇させるなどの働きがあり、危機に対処できる態勢を整えることから、「闘争と逃走の神経」とも呼ばれる。一方、副交感神経における神経伝達物質はアセチルコリンが主であり、循環器系に対してはおもに機能を抑制させる働きがある。

2.2 心拍変動解析による副交感神経機能の推定

心臓の拍動間隔は一定ではなく、一拍ごとに時間間隔が異なっている。このような心拍間隔の変動を、心拍変動性(HRV: Heart Rate Variability)と呼ぶ。心拍間隔は、図1のように心電図R波のピーク間隔(RRI: R-R Interval)によって定義され、R波の発生時刻を横軸、直前のR波とのRRIを縦軸にとったものをRRIトレンドグラムと呼ぶ(図2)。HRVは、RRIトレンドグラムのスペクトル解析等により評価され、健常者のHRVスペクトルには主たるピークが2つある(図3)。これらは0.04-0.15Hzと0.15-0.40Hz帯の成分であり、前者を低周波成分(LF: Low Frequency component)、後者を高周波成分(HF: High Frequency component)と呼ぶ。LFは血圧変動、HFは呼吸の周期と一致することが確認されており、これらの周期は交感神経機能及び副交感神経機能が関与していることから、LF、HFはその評価指標として用いられている。

副交感神経機能はLFとHFの両方に関与するが、交感神経機能はLFにしか関与しない。つまり、HFは副交感神経系機能のみを反映する。2.1節で述べたように、人がリラックス状態にあれば副交感神経系が反応することから、HFの変動に着目することでリラックス状態の推定が可能となる。

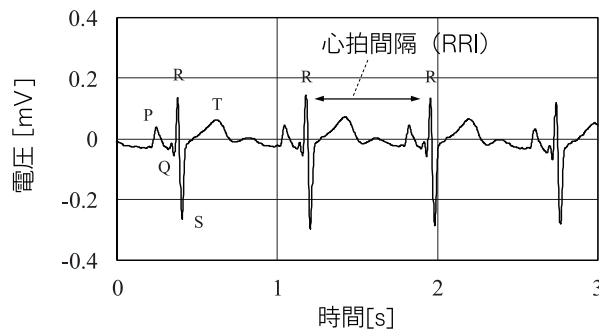


図1 心電図における心拍間隔

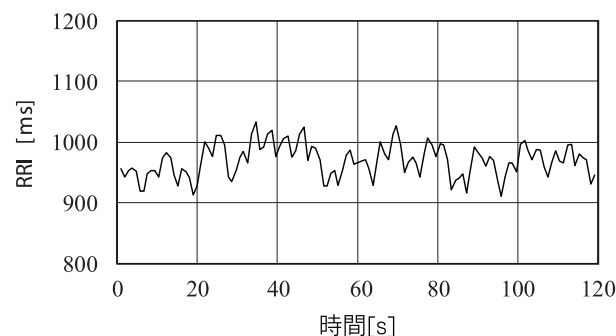


図2 RRIのトレンドグラム

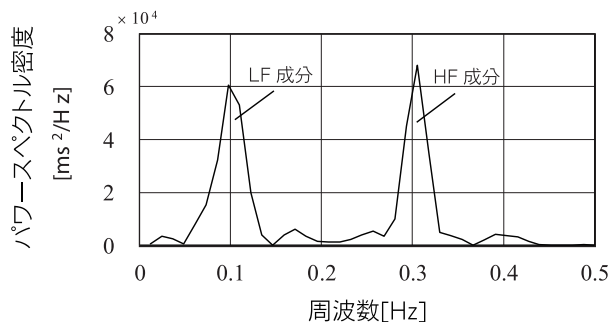


図3 RRIのスペクトル解析

2.3 脳波と覚醒水準の関係

頭皮上に電極を置きアンプで増幅すると、図4のように0.5-100Hzの周波数で構成される数十 μ V程度の電位変動が得られる。これを脳波という。脳波は、脳活動に伴う覚醒水準に応じて周波数及び振幅が変化することが知られている。

脳波を構成する主要な周波数帯成分は基礎律動と呼ばれ、

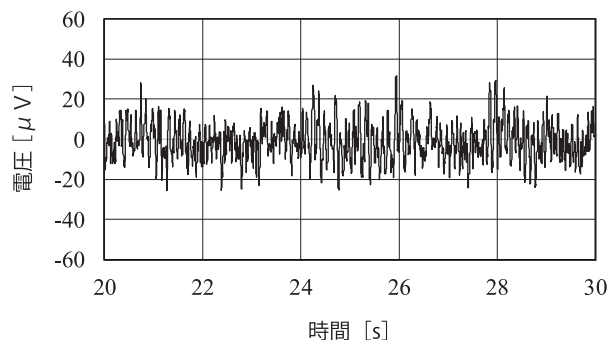


図4 脳波

おもに δ 波(0.5-4Hz), θ 波(4-8Hz), α 波(8-14Hz), β 波(14Hz~)に分類される。基礎律動は、覚醒水準が高いときには高周波帯, 低いときには低周波帯の成分が優位になることが知られている。 δ 波と θ 波は徐波と呼ばれ, δ 波は睡眠が深いとき, θ 波は入眠初期のまどろみ状態で出現する。 α 波は, 目を閉じて光刺激を遮断したり, ぼんやりと目覚めた状態のときに優勢となり, 開眼状態では減衰する。 β 波は速波と呼ばれ, 意識レベルの高い状態又は興奮した状態で出現し, 能動的で活発な思考や集中した状態と関連づけられている。安らぎや心地良さといったリラックスな状態にある場合は, 意識を保ちながらも比較的低い覚醒水準にあるとされている。本研究では開眼条件でも減衰しにくい β 波に着目し, その周波数解析により覚醒水準の評価を行い, リラックス状態を推定した。

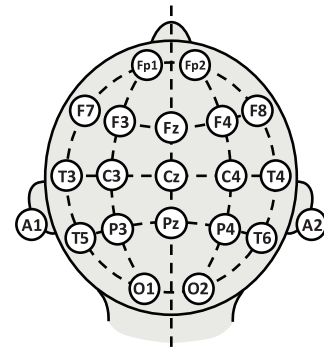


図6 国際10-20法にもとづく電極配置

3. 生体情報の計測及び解析手法

3.1 心電図の計測と心拍変動解析

心電図は, 心電心拍センサ (DL-320: S&ME社製) を用いて, 図5のように第II誘導で計測した (サンプリングレート: 1 kHz)。心電図からRRIを算出し, RRIの高速フーリエ変換によって得たパワースペクトル密度を0.15-0.40Hzの区間で積分することで, HFを算出した。

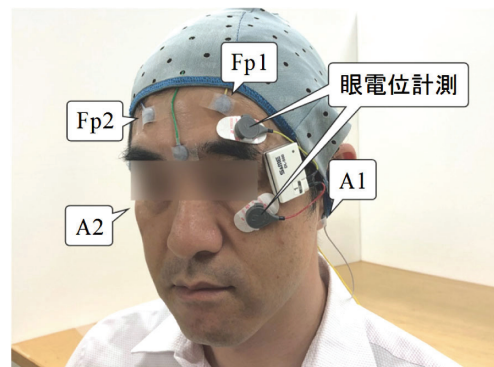


図7 脳波及び眼電位の計測

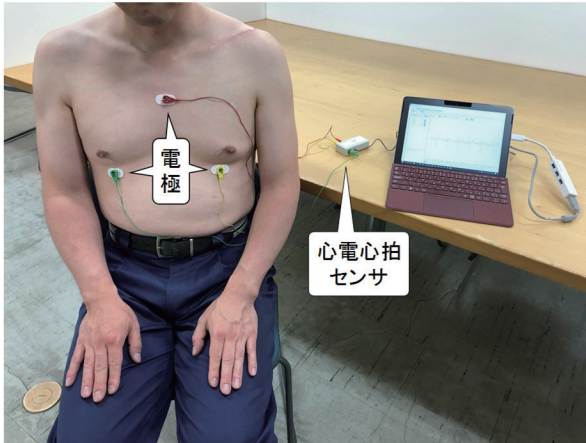


図5 心電図計測 (DL-320: S&ME社製)

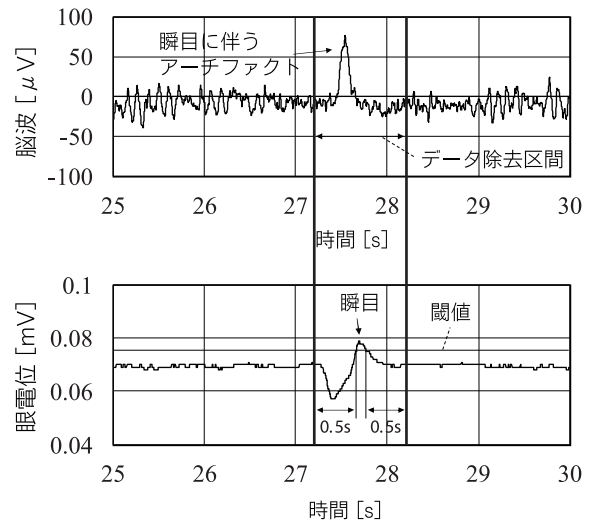


図8 瞬目に伴うアーチファクトの除去

3.2 脳波の計測と基礎律動解析

脳波は, 2ch脳波センサ (DL-160A: S&ME社製) を用いて, 図6の国際10-20法にもとづく Fp1-A1, Fp2-A2誘導により計測した (サンプリングレート: 1 kHz)。また, 瞬目に伴うアーチファクト除去のため, 図7のように無線筋電センサ (DL-5000: S&ME社製) を用いて眼電位を計測した (サンプリングレート: 1 kHz)。眼電位がある閾値を超えた場合に瞬目が発生したと判断し, その前後それぞれ0.5秒区間の脳波を除去した (図8)。瞬目のアーチファクトを除去した脳波データを高速フーリエ変換し, 得られたパワースペ

クトル密度を14-20Hzの周波数帯で積分することで, β 波成分を算出した。

4. 心的状態推定実験の検討

HF及び β 波成分の変化に着目した心的状態推定の有効性検証のため, ヒトの五感の中でも視覚に着目した実験系を検討し, 心的ストレス課題と照明観察を組み合わせた実験により, 照明の点灯パターンが与える心的効果を推定した。

4.1 心的ストレス課題

心的ストレスを与える課題の一つに、内田クレペリン精神検査がある⁹⁾。こうした継続的な計算作業は、精神的疲労やストレスを負荷する手法として多くの先行研究で利用されていることから、内田クレペリン検査を模した計算課題（図9）を用いて、被験者に心的ストレス負荷を与えた。

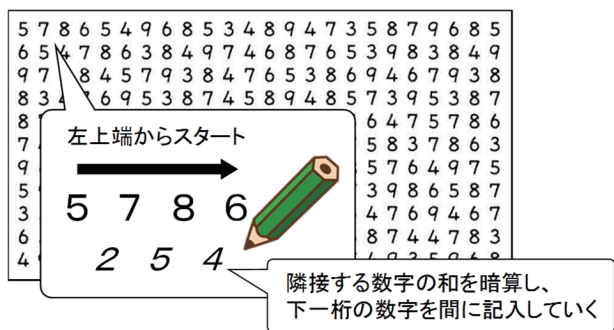


図9 計算課題

4.2 照明観察

白色LEDを用いて、3種類の点灯パターン（1/fゆらぎ、常時点灯、3Hz点滅）をPC上で切替可能な照明を製作した（図10, 11）。



図10 観察用照明

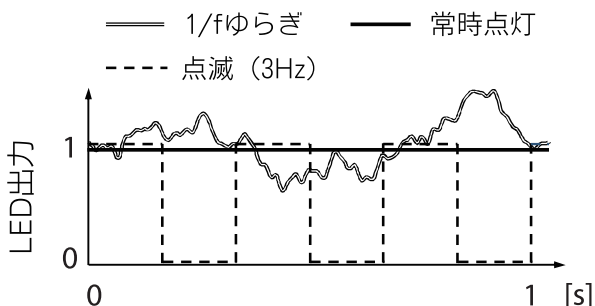


図11 LEDの出力制御

4.2.1 1/fゆらぎ

1/fゆらぎは人に安らぎや心地よさ、快適感などを与える信号とされており、自然風の風速や風向、鳥のさえずり、潮騒、蛍の光等の特徴について調べた事例ではいずれにも1/fゆらぎの存在が報告されている⁹⁾。実験では、M系列信号発生器と高速フーリエ変換を用いて人工的に生成した1/fゆらぎ信号を用いた¹⁰⁾。

4.2.2 点灯パターン制御用コントローラ

LEDの点灯パターンは、マイコン（Arduino Uno）を用いたPWM（Pulse Width Modulation）制御で生成し、PCのアプリケーション上で切替できるようにした。1/fゆらぎの点灯パターンについては、マイコンの内部メモリに格納した1/fゆらぎの配列データを利用し、矩形波のパルス幅を制御・出力した。ゆらぎ信号は180秒でループさせ、平均照度が常時点灯及び点滅の照度と一致するように調整した。

4.3 実験手順

明室で被験者を座位姿勢にて5分間安静にさせた後、心的ストレス課題を10分間課した。その後、部屋を暗室にして照明を5分間観察させた。この手順を3回繰り返して3種類の点灯パターンを観察させ（図12）、それぞれの区間で被験者の心電図及び脳波を計測した。

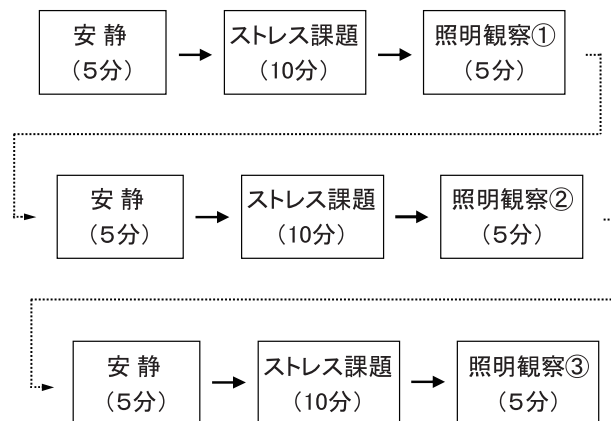


図12 実験手順

4.4 被験者

被験者は20～40代の健常な男性6名とした。3種類の点灯パターンを提示する順番（全6通り）は、すべての被験者で異なるようにした。

被験者には本研究の概要を口頭で説明し、インフォームド・コンセントを実施した上で実験に参加してもらった（図13）。本実験は、地方独立行政法人北海道立総合研究機構産業技術研究本部の規定にもとづき、当场における倫理審査委員会の承認を得た後に実施した。



図13 実験の様子

5. 実験結果

5.1 各課題遂行時の生体情報変化

HFと β 波成分を1分ごとに算出し、安静区間の平均値と比をとった結果の一例をそれぞれ図14、15に示す。HFは計算課題開始後から徐々に下降し、照明観察を始めると上昇した。 β 波成分は計算課題開始後に上昇し、照明観察を始めると低下した。こうした傾向は、ほかの被験者の実験結果においても確認することができた。

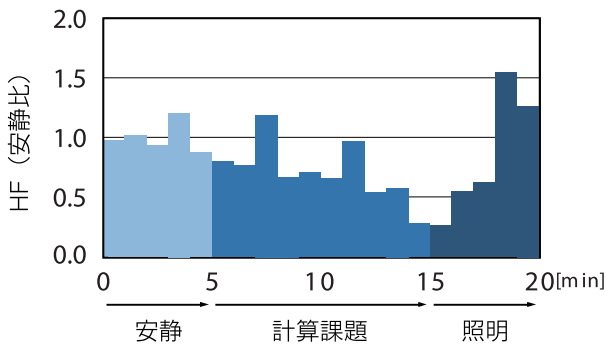


図14 1/f ゆらぎパターン観察時のHFの変化

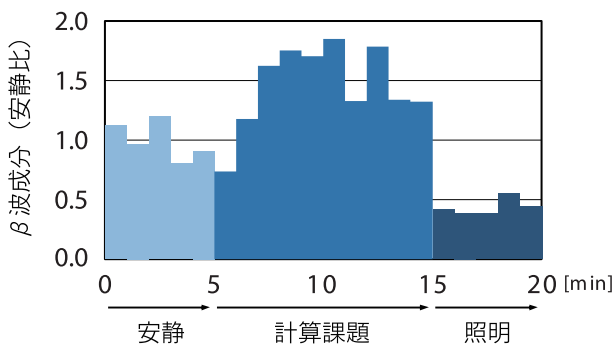


図15 1/f ゆらぎパターン観察時の β 波成分の変化

5.2 点灯パターンの違いによる生体情報変化

照明観察区間のHF及び β 波成分の平均値を算出し、安静区間の平均値との比を点灯パターンごとに比較した結果を図

16、17に示す。常時点灯パターン観察時に対して1/fゆらぎパターン観察時のHFが有意に上昇し、点滅パターン観察時に対して1/fゆらぎパターン観察時の β 波成分が有意に低下した。

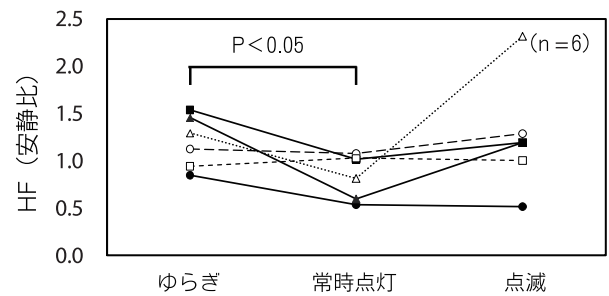


図16 各点灯パターン観察時のHFの変化

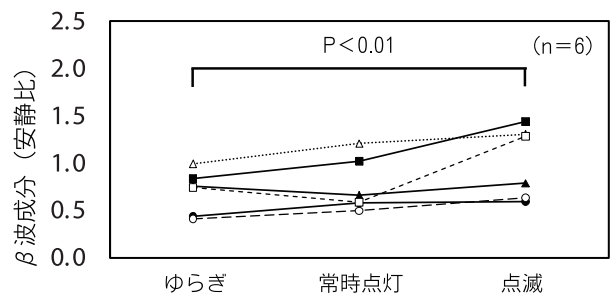


図17 各点灯パターン観察時の β 波成分の変化

また、実験終了後に実施したヒアリングで被験者から得たコメントを以下に示す。1/fゆらぎパターン観察時は落ち着きや穏やかさを感じるなど、リラックスな状態にあったという回答が多くを占めた。

- 最も気分が落ちついたのはゆらぎ照明。点滅パターンは見えていて不快だった。
- ゆらぎパターンをぼんやり眺めたときが一番楽な気分だった。

- ・常時点灯のときは退屈で、点滅パターンは不快だった。ゆらぎパターンは見ていて飽きなかった。
- ・ゆらぎと常時点灯に差は感じなかったが、点滅は不快だった。
- ・ゆらぎ照明を見ているときが一番穏やかな気分だった。
- ・点滅は不快だったが、ゆらぎは落ち着きを感じた。

6. 考察

6.1 心的ストレス課題遂行時の心的状態推定

心的ストレス課題遂行時は β 波成分が活性化したことから、覚醒水準が上昇し、計算作業へ集中した状態であったことが考えられる。また、計算課題時はHFが低下したことから、副交感神経活動が抑制されていたことがわかる。以上より、被験者は計算課題によって強制的に計算作業へ集中させられ、その結果として心的ストレスを受けたことが推定できる。

6.2 照明観察時の心的状態推定

各点灯パターン観察時のHF及び β 波成分を比較した結果から、1/fゆらぎパターン観察時は常時点灯パターン観察時より副交感神経活動が亢進し、点滅パターン観察時より覚醒水準が低下していたことがわかる。よって、1/fゆらぎパターン観察時は最も安らぎや落ち着きといった状態にあったことが推定できる。この推定結果は被験者の主観評価とほぼ一致したことから、本手法による心的状態推定の有効性を確認することができた。

7 おわりに

本研究では、安らぎや心地良さといったリラックス感の客観的・定量的な推定を目的に、副交感神経及び脳波の心理生理反応に着目し、心拍変動解析及び基礎律動解析による心的状態推定手法について検討した。これを照明観察実験に適用し、3種類の点灯パターンが与える心的効果を推定した。その結果、被験者の主観評価とほぼ一致する推定結果が得られたことから、本手法の有効性を確認した。

今後は、ヒトの五感における視覚以外の刺激を対象とした実験系についても検討・検証を進め、実際の製品やサービスの開発支援へ展開していく。

参考文献

- 1) 新村出：広辞苑 第七版，岩波書店，3640PP., (2018)
- 2) 和田 攻・南 裕子・小峰光博：看護大事典，医学書院，3042PP., (2010)
- 3) Herbert Benson, Miriam Z Klipper: The Relaxation Response, Harper Collins, 240PP., (2000)

- 4) Jennifer A. Galvin, Herbert Benson, Gloria R. Deckro, et al.: The Relaxation Response: reducing stress and improving cognition in healthy aging adults, Complementary Therapies in Clinical Practice, Vol.12 No.3, pp.186-191, (2006)
- 5) Bei-Hung Chang, Ulrike Boehmer, Yue Zhao, et al. "Relaxation Response With Acupuncture Trial in Patients With HIV: Feasibility and Participant Experiences, The Journal of Alternative and Complementary Medicine, Vol.13 No.7, pp.719-724, (2007)
- 6) 浅井麻紀：自律神経機能検査，文光堂，508PP., (2015)
- 7) 真島英信：生理学，文光堂，630PP., (1996)
- 8) 坂本千秋・栗崎純一・小林三智子：主観的および客観的ストレス応答を増大させる課題の提案，日本官能評価学会誌，Vol.20 No.1, pp.16-21, (2016)
- 9) 安久正紘・大口國臣：人に快適感を与える1/fゆらぎとその家電機器への応用，電気学会誌，Vol.113, pp.27-33, (1993)
- 10) 橋場参生・新井浩成・大崎恵一：ゆらぎ信号を用いた電子機器制御技術，北海道立工業試験場報告，No.305, pp.87-90, (2005)
- 11) 三宅晋司：商品開発・評価のための生理計測とデータ解析ノウハウ，NTS, 324PP., (2017)
- 12) 高薄一弘：ストレス・疲労のセンシングとその評価技術，技術情報協会，598PP., (2019)