

## 課題遂行時における自律神経活動から遂行者の課題に関する知識・経験のレベルを推定する試み

白水 陽久, 片山 宗哲, 白水 重憲

**要旨** 試験を受ける, 或いは発電所等の制御室でコンピュータを使用して危機対応操作を行う等の高度の知識・経験を必要とする課題を遂行する際に, 遂行者が必要とされる知識や経験を有しているか否かを推定する方法として, その課題を遂行している時の自律神経活動の特徴から推定する方法を提唱した。この方法を UAE のハリファ大学における発電所運転員の危機管理教育に応用して実用性を確認した。更に, この方法を使って, 再教育・訓練の効果を評価することができた。

**キーワード**: 課題遂行, 自律神経活動, 定期試験, 発電所運転, 危機管理

### 1. 自律神経活動マップ<sup>1)</sup>

心電・加速度・皮膚温度測定装置 (M-BIT) の出力により, 様々な状況での自律神経活動 (ANS) の測定, 例えば, 大学での講義中に聴講している学生達の ANS を測定して彼等の集中度・興味度を評価する事も可能になった。ここでは, 2つの学生グループを対象に, 同じ内容を違う条件下 (表 1) で講義した場合の, 学生達等の自律神経活動の挙動を比較して図 1 に示した。

図 1 では, 副交感神経活動の指標 (PSNS) を横軸に, また交感神経活動の指標 (SNS) を縦軸にしたグラフ (我々はこれを「自律神経活動マップ」と名付けた) にこれらの結果を示した。PSNS はリラックスの度合いを示すが, 大きすぎると眠気を催している可能性がある。一方, SNS は緊張, 精神集中等の度合いを示す。

図 1 のデータ分布挙動を見ると, PSNS が大きく SNS が小さい「右下の領域」と, PSNS が小さく SNS が大きい「左上の領域」とに別れた。「右下の領域」には主に「グループ B」の結果が, 「左上の領域」には

主に「グループ A」の結果が分布していた。「グループ A」の多くは熱心に, 「グループ B」の半分近くはリラックスして (或いは眠たげに) 聴講していた事が推測された。

同じ 2つのグループの学生に, 今後の講義の中で使用する数学的手法に関して, どの程度の知識と実践力を有しているかを確認する為の「数学と力学の初歩」に関する試験を行った。体育学部の学生の彼らにとっては数年ぶりの数学との再会であり, また, 特に事前の準備はさせなかった。試験を受けている時の ANS の測定を行い, その結果を図 2 に示した。比較の為に, 聴講時の測定結果も一緒に示した。聴講時のものに比較して試験時は分布が狭くなり, PSNS が小さくない, 一方 SNS が大きい方の領域にデータが集中していた。学生達が, 緊張して真面目に試験に取り組んでいた事が推察された。

### 2. 課題に関する知識・経験レベルを推測できる可能性の発見<sup>2)</sup>

被験者の人生にとってインパクトが大きく, 重要な意義がある課題遂行時の, いわば本当の真剣勝負の際の ANS 挙動測定の最初の例として, 定期試験中の高

表1 2つのグループの講義条件

条件	グループA	グループB
講義者と学生の関係	初対面	親しい
講義内容の新鮮さ	新鮮	半分は2回目
講義室の明るさ	明るい	暗い
プレゼンテーション方法	パソコンディスプレイ	プロジェクター
学生達の分布	集まって	散らばって

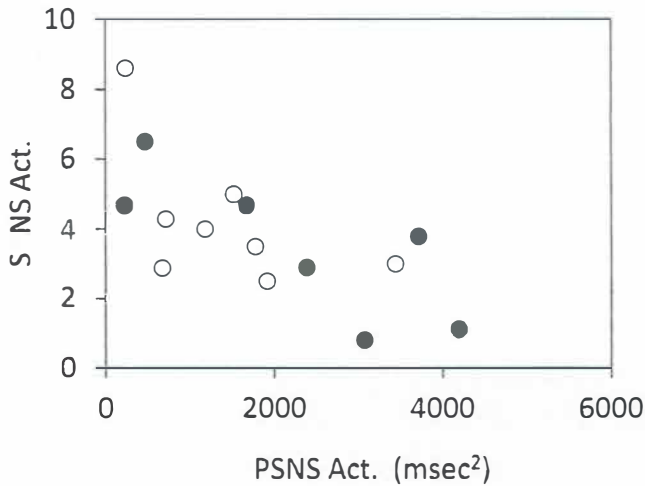


図1 聴講中の学生達の自律神経活動  
横軸は副交感神経活動の尺度、縦軸は交感神経活動の尺度  
○：グループA，●：グループB

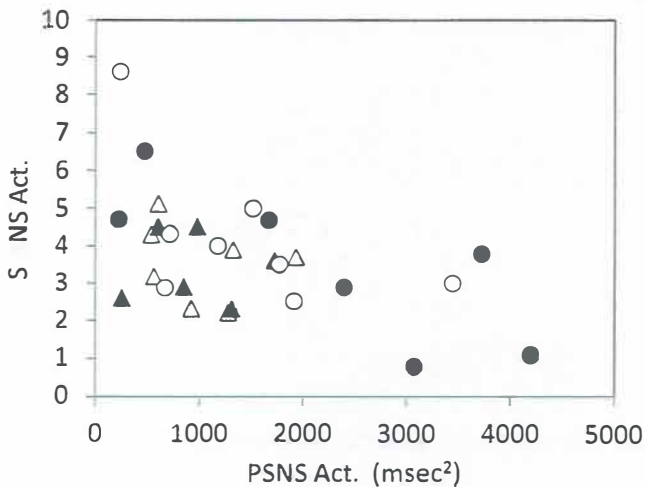


図2 試験中と聴講中の学生達の自律神経活動の比較  
横軸は副交感神経活動の尺度、縦軸は交感神経活動の尺度  
○：グループA聴講中，●：グループB聴講中，△：グループA試験中，▲：グループB試験中

校3年生を対象に24時間のANSを測定することができたので、定期試験の際のANSの挙動が明らかになった。

図3に、測定の結果のANSマップを示した。睡眠開始は23時58分、睡眠終了は5時23分であり、睡眠

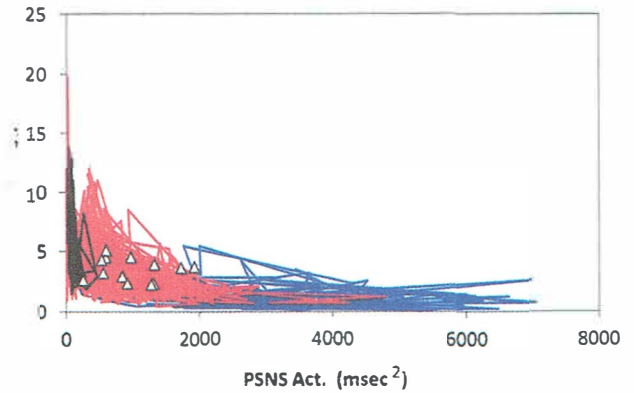


図3 定期試験中の高校生の24時間の自律神経活動の測定結果の例

横軸は副交感神経活動の尺度、縦軸は交感神経活動の尺度  
青線は睡眠時、赤線は覚醒時、黒線は定期試験時  
△は図2に示した大学生たちの試験時の平均値、ここではグループA、Bは区別せず。

の長さは5時間27分であった。図3の青い線は、この睡眠時のANSの指標の位置を示し、赤い線は覚醒時のANSの指標の位置を示す。

睡眠時のANSは、横軸付近に集中し、横の方向に分布が広がっているという顕著な特徴を持っていた。睡眠時のSNSは小さく、3以下の領域に集中し、PSNSは大きく2000~6000 msec<sup>2</sup>に亘り分布した。一方、覚醒時は、副交感神経活動は小さく、主に2000 msec<sup>2</sup>以下の領域に集中していたのに対して、交感神経活動は大きかった。

試験を受けている際の自律神経活動マップは、縦軸付近に集中し、縦軸方向に伸びているという特徴を持っていた。PSNSは非常に小さく、その分布は数百 msec<sup>2</sup>以下の領域に局在していた。SNSは大きく、5程度を中心に10を超える領域まで分布していた。被験者の自己申告では、“気持ちよく、快調に試験に臨んでいた”という事であり、当日受けた試験の成績は全て90%以上であった。

SNSが大きい場合には“不快感を伴った緊張感”を考慮してしまいがちであるが、このケースの様に“90%以上の成績”を示せるような知識・経験レベルを持ち、“気持ちよく快調に”試験に臨み、回答を続けていた場合の集中した状態におけるANSは、PSNSが小さく、SNSが大きな状態、つまり、図2に示されるような縦軸付近に集中し、縦軸方向に広がった形状の自律神経活動マップで表される状態になるものと考えられた。

比較の為に、図2に示した大学生たちのANSを図3に白抜きで示した。今回の被験者の試験時の

分布と比較すると、PSNSは比較的大きな領域に位置し、SNSは分布の下の方に位置した。彼等の成績は最高のものが40%台であり、平均は20%台であった。従って、彼らは試験という事で、少し緊張した状態ではあるものの、十分な知識・経験を持ち解答に集中している状態ではなかったものと考えられた。課題遂行中の被験者の比較的小さなSNSと比較的大きなPSNSは、いずれも課題に集中できていない事、更には課題に対する知識・経験の不足を示している事が考えられた。

以上の議論より、課題遂行中の被験者のANSを測定し、横軸をPSNS、縦軸をSNSの値とした自律神経活動マップ上に表示する事で、課題遂行に対する被験者の知識・経験レベルを推測できる可能性が示された。以後、この方法を「自律神経活動マップ法」と呼ぶ事にした。

### 3 課題に関する知識・経験レベルを推測することへの応用<sup>3)</sup>

(UAEのKhalifa University of Science, Technology and Research (KUSTAR)及び韓国 Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)との共同研究)

石油化学プラントや原子力発電所等では、運転員の不適切な行動によるヒューマンエラーは重大な危機をもたらしかねない。ヒューマンエラーを減らす為の基本は、彼らに課題遂行の為に必要な十分な知識と経験を与える事である。この自律神経活動マップ法を活用し、実際に運転員の知識と経験レベルの把握が可能である事を確認する為に、原子力発電所運転員の危機対応教育のシミュレーションで使用した。

被験者は、韓国のKAISTとUAEのKUSTARの大学院生19名(男性10名、女性9名、年齢21~34歳)であった。被験者はプラントオペレーションに関する習熟度により、初級レベル(Level 1, 11名)、中間レベル(Level 2, 5名)及び専門レベル(Level 3, 3名)に分けられた。

運転員の運転シミュレーション実験(以下「実験」と記す)は、主制御室の模擬セットを使用して行われた。被験者には、非常事態対応マニュアルに従うように指示した。蒸気生成装置のパイプ破損という事故シナリオを使用した実験についての測定を行った。

図4に、Level 1とLevel 3の被験者の実験時におけるANSの変化を自律神経活動マップで示した。黒

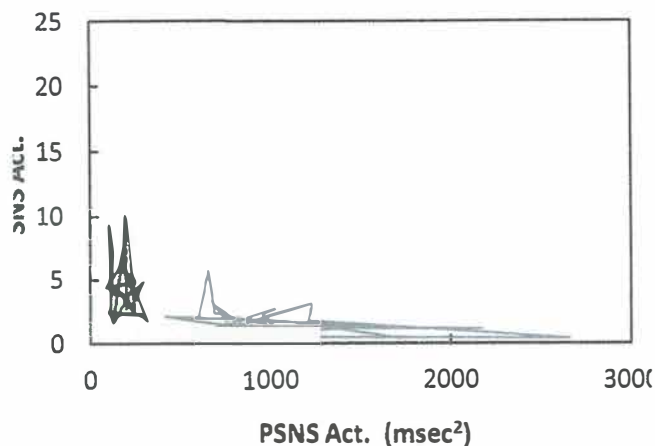


図4 Level 1被験者(黒色線)とLevel 3被験者(灰色線)の実験時の自律神経活動の例  
横軸は副交感神経活動の尺度、縦軸は交感神経活動の尺度

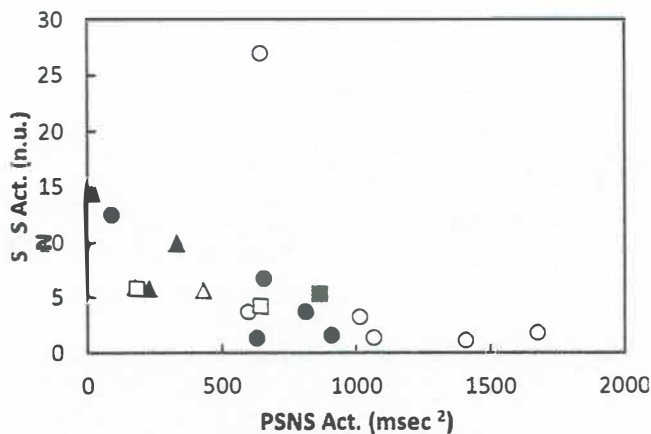


図5 全19被験者の実験時の自律神経活動の平均値  
横軸は副交感神経活動の尺度、縦軸は交感神経活動の尺度  
Level 1男性被験者:●, Level 1女性被験者:○, Level 2男性被験者:▲, Level 2女性被験者:△, Level 3男性被験者:■, Level 3女性被験者:□。

色の実線は「Level 3被験者」、明るい灰色の実線は「Level 1被験者」にそれぞれ対応する。

Level 3被験者のANSはPSNSが小さいレベルにとどまり、SNSが比較的大きな領域で縦軸に沿った形での分布を示した(緊張ゾーン)。

一方、Level 1被験者のANSはSNSが小さな領域で、横軸に沿って大きなPSNSの値にまで分布した(リラックスゾーン)。

このように、「Level 1被験者」と「Level 3被験者」とでは、ANSの分布が顕著に異なっていた。図5に示すように、19名の被験者全てについての結果を、それぞれの被験者の平均値で比較することができた。

図5においては、○と●とは女性と男性のLevel 1被験者のANSをそれぞれ示した。図4におけるLevel 1の被験者のPSNSは1065 msec<sup>2</sup>、SNSは1.4であっ

た。多くの Level 1 の被験者の ANS はリラックスゾーンに位置した。発電所運転に関する知識の不足により、彼らは何をすべきかを考えることができず、彼等の課題遂行に真の意味で集中できなかったことが推定された。このような状況であったので、彼等の ANS は休息やリラックスした状態と同じ状態になってしまったものと考えられた。

△と▲は、女性と男性の Level 2 被験者の ANS をそれぞれ示す。全部で5つの Level 2 被験者の ANS は緊張ゾーンに位置し、中でも4つの ANS は Level 1 のものとは明白に離れていた。十分な知識を持つ Level 2 被験者は、与えられた課題に集中し、適切な判断をし、運転操作を実施したものと考えられた。

□と■は、女性と男性の Level 3 被験者の ANS をそれぞれ示す。図4で着目した Level 3 被験者の PSNS は 182 msec<sup>2</sup>、SNS は 5.8 であり、緊張ゾーンに位置したが、残りの2人の被験者の ANS は PSNS が少し大きな領域に位置した。この2点の ANS は、運転操作に慣れた事による緊張感の減少の可能性を示した。運転操作に慣れる事による緊張感の減少も、一つのヒューマンエラーを引き起こす要因となるので注目する必要がある。

Level 1 被験者と Level 2 被験者の自律神経活動 MAP 上の位置の差に関して得た知見をサポートする為に、4人の Level 1 被験者を選び出し、教育の効果のデモンストレーションを行った。彼等の最初の図5上の位置は、A (1065, 1.4), B (656, 6.7), C (909, 1.6), 及び D (810, 3.7) であった。今使用している事故シナリオに関する教育を被験者の母国語により2時間行った後、再度この実験を行った。

これらの被験者について、実験時の ANS が教育によってどのように変化したかを図6に示した。水平軸も垂直軸も図5のものに比して拡大している。被験者 A, B, C 及び D は、それぞれ、□, ○, △及び◇で示した。各被験者は、教育後の実験を2回行ったので、図6にはそれぞれ3つの ANS 点がある。これらを結ぶ矢印は、時間の順序を示した。図6に示した様に、教育後においては、最初の実験時の ANS 点の位置は全て緊張ゾーン側へ移動した。

最初の実験終了後、被験者たちは、2回目の実験をその日のうちに再度行うか、或いは翌日に行うかを選択させられた。被験者 A と C は翌日を、B と D は同一日を選んだ。翌日を選んだ被験者 A と C の2回目の実

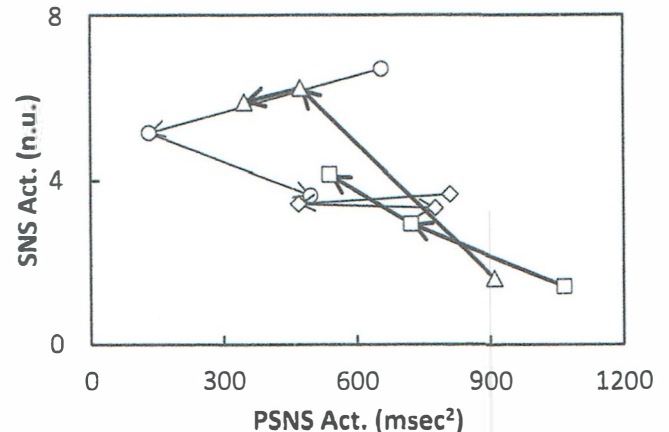


図6 Level1 被験者の教育による実験時の自律神経活動の変化の例

横軸は副交感神経活動の尺度、縦軸は交感神経活動の尺度  
被験者 A: □, 被験者 B: ○, 被験者 C: △, 被験者 D: ◇.  
被験者は3回の実験を実施、図5中にも示した初回、教育後1回目と2回目。矢印は時間の順を示す。

験時の ANS 点は、更に緊張ゾーン側へ向かって移動した。それとは対照的に、同一日を選んだ B と C の2回目の実験点は、移動距離は小さいが、リラックスゾーン側へ戻った。

2回目の実験を翌日に行った被験者 A と C は、再び、フレッシュな状態で実験に臨むことにより、知識と経験の増加の効果が発現できたものと考えられた。

一方、同一日に再実験を選択した B と C の場合は、疲労や2回目の実験である為の緊張感の欠如等のネガティブな効果が、ここでの教育の効果打ち消したものと思われた。また、2回目の実験を同一日に選んだ選択自体も、既の実験を“消化事項”と考える慣れの悪影響があらわれた可能性も考えられた。

以上の結果より、以下の事は結論できるものと思われた。

- 1) 実験においては、その為の知識や経験が少ない場合には実験時の ANS はリラックスゾーンに位置する。
- 2) 教育により、少なくとも最初は、実験時の ANS は緊張ゾーン側へ向かって動く。

#### 4. リアルタイムモニターと居眠り防止の為の装置

以上述べてきた議論は、試験、あるいは、コンピュータを使用した運転操作等、被験者が時間的に拘束された座位でのデスクワークで、成果の有無に関係なく所定の時間が経過すれば終了となる課題である。勿論、知識・経験が無くても被験者本人がそれを自覚し、それによる焦燥感、苛立ちがあれば、課題遂行時

のPSNSは低下し、SNSは増加するであろう。そのような被験者のケースはここでは対象外とした。

次のステップとして、我々は、被験者が課題を遂行している最中にリアルタイムでANSをモニターし、必要に応じて介入する事を考えた。ワイヤレスタイプの迷走神経心電・加速度・皮膚温度測定装置(R-BIT)を使用し、自律神経活動マップを時々刻々と描画させるリアルタイムモニターを作成した。

また、自ら課題・目的を設定して行う学習や調査・研究であっても、長時間連続していると徐々に眠気を催し、時には居眠りしてしまう事がある。このような場合に対応する為には、ANSの挙動から居眠りに近づいた事を自動的に検出し、居眠りに近づいたら居眠り防止の為に警報をならす必要がある。

このような場合、一般的には睡眠時にはPSNSが増加し、SNSが減少するが、課題遂行時、あるいは入眠時のANSのリアルタイム測定の研究はまだ途上であ

り、ANSによる睡眠覚醒推定には未だ成功していない段階である。

一方、睡眠時にはPSNS及びSNS同様にRR間隔変動から得られる「呼吸周波数」及び「呼吸周波数変動幅」が顕著に低下し、特に、「呼吸周波数変動幅」を使用して睡眠覚醒の推定が可能であることを我々は報告して来た。そこで、リアルタイムモニターでは、自律神経活動マップと同時に横軸を呼吸周波数、縦軸を呼吸周波数変動幅としたマップを同時に描画させる事にし、居眠り状態に近くなると、予め登録しておいた音楽ファイル(MP3形式)が再生され始める様にした(図7)

当初は、「呼吸周波数変動幅」で居眠り開始の検出を試みていたが、現在では「呼吸周波数」での検討を続けている。

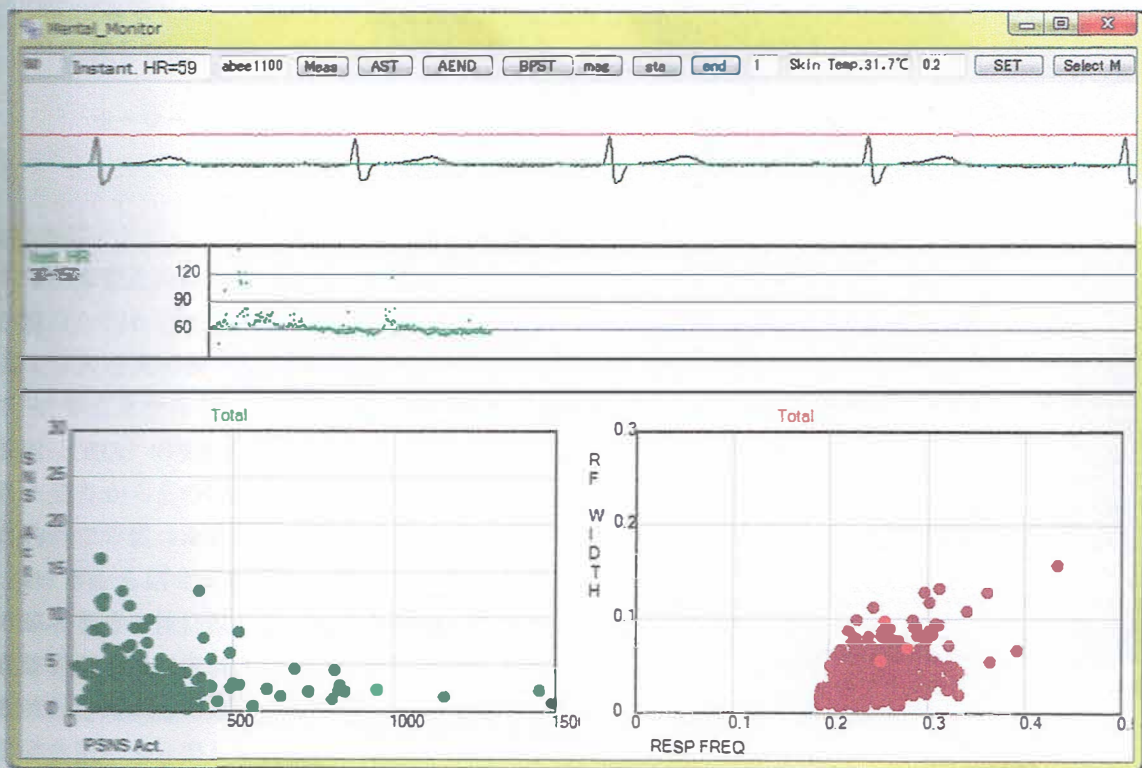


図7 自律神経活動リアルタイムモニター

最上段グラフはECGと加速度の生波形、204.8 Hzでサンプリングされている。次段はRR間隔。最下段左は、自律神経活動MAP、縦軸は副交感神経活動の尺度、縦軸は交感神経の尺度。右図の横軸は呼吸周波数、縦軸は呼吸周波数変動幅。単位はいずれもHz。  
-表示されているのは、一睡眠分のデータで、いずれのグラフも最新の3分間のデータは明るい丸で示される。

#### 居眠り防止機能

- 予め最上段右側の「Select M」ボタンを押して音楽のMP3ファイルを選択して置くと、呼吸周波数が閾値以下になった場合に、音楽を再生して居眠りを防止する。
- 閾値はデフォルトでは0.2 Hz、閾値の変更には、右から3番目のボックスの0.2を書き換え、右から2番目のSETボタンを押す。
- 再生が始まった音楽を止めるには右から6番目の「end」ボタンを押す。
- \*\*呼吸周波数が再び閾値以下になると、再び、音楽再生が始まる。

## 参考文献

- 1) 白水重憲: M-BIT (超小型心電・加速度・皮膚温度測定装置)のある講義風景, 全面発達の展開 2 : 61-64, 2012.
- 2) 白水重憲, 片山宗哲, 白水陽久: 定期試験中の高校生の24時間の自律神経活動, 全面発達の展開 2 : 65-68, 2012.
- 3) Shirouzu S, Mohamed ASAH, Kim AR et al.: Estimate of Knowledge and Experience Level by Autonomic Nerve Activity During Task Execution, and Follow Up Effect of Education, 全面発達の展開 2 : 1-7, 2012.
- 4) 白水重憲, 近藤英明, 森佳織, 片山宗哲: 呼吸周波数変動幅による NREM 睡眠領域検出, 全面発達の展開 2 : 83-90, 2012.