

単純計算およびゲーム遂行時の脳波および自律神経機能の評価

木村達洋* 二郷大生** 古賀琴絵*** 山崎清之****

Evaluation of EEG and autonomic functioning during monotonous calculation task and game playing

by

Tatsuhiko KIMURA, Taisei NIGO, Kotoe KOGA and Kiyoyuki YAMAZAKI

(Received: October 31, 2016, Accepted: January 27, 2017)

Abstract

In aged society, biomedical monitoring in aged and handicapped people must be important for maintain or improve their health status and their quality of life. We have been investigated the evaluation of subject's psychophysiological and the autonomic functioning during various mental tasks. In this study, to investigate psychophysiological aspects of monotonous continuous calculation task and game (TETRIS) playing conditions, the experiments with the EEG and ECG measurement were carried out in healthy student volunteers. Experimental conditions were as follows: (1) at rest with eyes open, (2) at rest with a clock indication on a PC screen, (3) participants asked to calculate continuous addition like the Kraepelin test, and (4) playing the TETRIS game on the iPad screen. During each condition the EEG and ECG were recorded. The obtained EEGs were analyzed using FFT and power spectra were calculated. From the recorded ECGs, R-wave interval series were extracted and analyzed by using the Poincare plots and autocorrelation function. Results showed that under the task condition, the standard deviations of heart rate were decreased, beta activities of the EEGs were increased. Periodicity of heart beat fluctuation under monotonous calculation task was smaller than that under the game playing condition. It was estimated that the recreational aspects of the tasks might be influenced on the results. The possibility of the evaluation of qualitative aspects of mental tasks was discussed.

Key Words: EEG, Autonomic function, ECG, Poincare plot, Autocorrelation function

1. はじめに

高齢化は世界的な規模で急速に進展しているが、我が国においてはさらに顕著な高齢化が予測されている。内閣府の統計によると2015年現在、65歳以上の人口は3,392万とされ4人に1人は高齢者である。また、2042年には3,878万人でピークを迎えると予測されているが、人口の減少に伴い、比率としては2060年に39.9%に達し、国民の約2.5人に1人が65歳以上の高齢者となる社会が到来すると推計されている¹⁾。このような中、高齢者の健康管理や健康状態のモニタリングは非常に重要な課題であり、できるだけ対象者を拘束せず、負担の少ない自然な状況での計測が望まれる。

負担の少ない生体計測としては、近年、小型で使用者が身に付けることができるウェアラブルなデバイスが開

発され、普及してきている²⁾。2015年にapple社より発売されたapple watchは腕時計型で心拍数や活動量を計れるデバイスとして話題になった事は記憶に新しい³⁾。この他にも、小型なウェアラブルセンサを用いて、脈波⁴⁾や呼吸⁵⁾、血圧⁶⁾、血流⁷⁾など、様々な生体情報を計測できるデバイスが開発されている。

また、従来の生体計測は電極を装着したうえで、機器に接続された状態で計測されるため、被験者が不安や緊張状態を強いられる事も多々発生する。その一方、ウェアラブルセンサを用いた計測は、作業を要する条件下では自然な動作を妨げない環境で計測することが可能であるため、より実態に即した計測が期待される。

本研究では被験者が自由に行動できる無拘束下での心拍、呼吸等の計測が可能な着衣型ウェアラブルセンサを用いて自律神経系指標の計測を行った。従来の報告では負担の評価という点が重視された研究がおこなわれてきたが、ここでは、主観的な時間経過の違いによる自律神経系評価の目的で(1)安静開眼状態(2)安静閉眼状態で経過時間情報フィードバック(3)単純計算課題(4)ゲーム遂

* 東海大学 基盤工学部 医療福祉工学科 講師

** 東海大学 工学部 医用生体工学科

*** 東海大学 基盤工学部 医療福祉工学科

**** 東海大学 工学部 医用生体工学科 教授

行、の4条件にて心拍変動と脳波の計測を行った。課題として課された作業と、自発的に楽しめるゲームとの間の違いも含めて心身の状態の判定が可能か否かを検討した。自律神経機能の揺らぎについて、時間軸の他、心拍時系列を生物学的時間軸とみなし、心拍についてはポアンカレプロットを拡張させた $X(i)$ vs. $X(i+j)$ を考慮した解析を試みた。

2. 実験

2.1 実験方法

被験者は健康男子大学生(20~22歳)10名であり、研究の趣旨を理解し参加した。被験者は脳波用シールドルームの椅子に掛けさせて次の条件で脳波、心電図、呼吸曲線の測定を行った。実験条件は、各個人の脳波の状態を把握する目的で安静閉眼時の脳波記録を行った後、次の条件下で記録した。(1)安静開眼状態で特にタスクを課さない、(2)安静開眼状態で特にタスクを課さないがPCの画面上に秒針つきのアナログ時計を表示し、それを注視する、(3)乱数を印刷した用紙を使用してクレペリン型の1ケタ計算を連続して課す、(4) iPad (apple社製, MLMW2J/A) 上でテトリスゲーム⁸⁾を連続的に行わせる条件、の4種類で、各条件は5分間とした。

また、各条件での主観的な印象について、アンケートにより調査した。質問項目は、図1に示すように、5分間の時間が退屈であったか、長く感じたかどうか、負担に感じたか、テトリスゲームはうまくできたか、好きか嫌いか、などにつき主観的な印象を記録させた。

◇ 本日の体調	1 良好	2 よくない		
◇ 室温	1 暑い	2 適切	3 寒い	
◇ 1番長く感じたもの	1 安静時(無課題)	2 安静時(時計提示)	3 計算	4 テトリス
◇ 1番短く感じたもの	1 安静時(無課題)	2 安静時(時計提示)	3 計算	4 テトリス
◇ 1番楽しかったもの	1 安静時(無課題)	2 安静時(時計提示)	3 計算	4 テトリス
◇ 1番退屈だったもの	1 安静時(無課題)	2 安静時(時計提示)	3 計算	4 テトリス
◇ テトリスは	1 得意	2 普通	3 苦手	4 未経験
◇ テトリスは	1 うまくできた	2 うまくなかった		
◇ テトリスは	1 楽しかった	2 楽しくなかった		
◇ 時間の感覚を短いと思った順に書いてください。				

図1 主観評価アンケート

脳波はデジタル脳波計測システム(Brain Products 製

Vision Recorder 1.20) を用いて、10-20 法に基づき C3, C4, P3, P4, O1 および O2 から耳朶を基準とした単極導出で、心電図および呼吸曲線は着衣型ウェアラブルセンサ(Hexoskin 製)を用いて記録した。脳波はサンプリング頻度 100Hz、精度 16 ビットで記録した。

2.2 解析方法

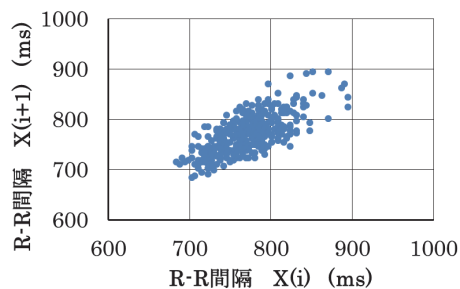
脳波は5分間の記録から、10.24秒を1セグメントとしてFFTによるパワースペクトル解析を行い、全パワーのうち α および β 帯域の占める割合を $\alpha\%$ 、 $\beta\%$ として算出した。ウェアラブルセンサの記録はサンプリング頻度 256Hz で記録し、心電図 R-R 間隔、分時呼吸数系列を算出した。さらに R-R 間隔系列から、ポアンカレプロットと $X(i)$ vs. $X(i+j)$ の相関係数を算出した自己相関関数、R-R 間隔系列から心拍揺らぎ曲線を作成し、等間隔(1Hz)に再サンプリングし、その自己相関関数を計算した。また、呼吸データは分時呼吸数に換算した頻度時系列曲線を作成した。

なお、本研究は東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の承認を得て行われた。

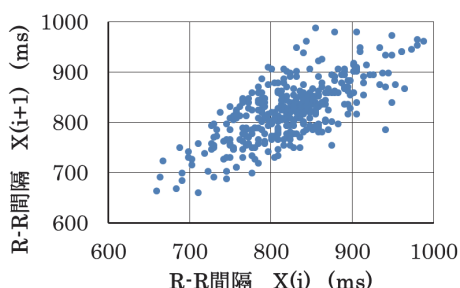
3. 結果

図2は1被験者における代表的な R-R 間隔系列のポアンカレプロットを示す。上段(a)が安静開眼時で、下段(b)がテトリスゲーム遂行中の R-R 間隔系列ポアンカレプロットである。全被験者においてゲーム遂行によりプロットの分布範囲が狭まり、心拍変動性が低下していることを示している。このプロットの分布範囲は R-R 間隔系列のばらつきを表しており、標準偏差を算出することで心拍変動性として図3に示した。その結果、安静開眼時に比べて時計表示条件では有意な差は確認されなかったが、計算時、テトリスゲーム遂行時で小さい傾向がみられた。サンプル数が少ないことを考慮し t 検定を用いて検定を行った結果、有意な減少であることが確認された。

図4は、1被験者(被験者C)における自己相関関数の例である。この例は時計を表示して安静を保たせた条件で、最も退屈であると答えた例である。左側上段は時計提示条件で、横軸のタイムラグ心拍数軸のもの、下段が実時間軸のものである。これらはともに60拍または60秒までに第一周期のピークが認められず、すなわち 1cpm(cycle/minute)以上の周期成分が認められなかった。右側は計算条件における自己相関関数で、上段ではタイムラグが心拍数軸、下段が実時間軸である。この例では、計算課題において、30拍のタイムラグで相関係数のピークが見られる。一方、実時間軸では40秒程度のタイムラグの範囲において相関係数のピークが見られなかった。



(a) 安静開眼



(b) テトリスゲーム遂行

図2 R-R 間隔系列のポアンカレプロット例

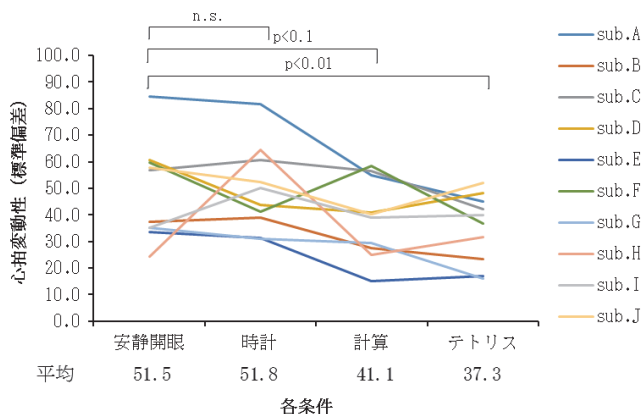
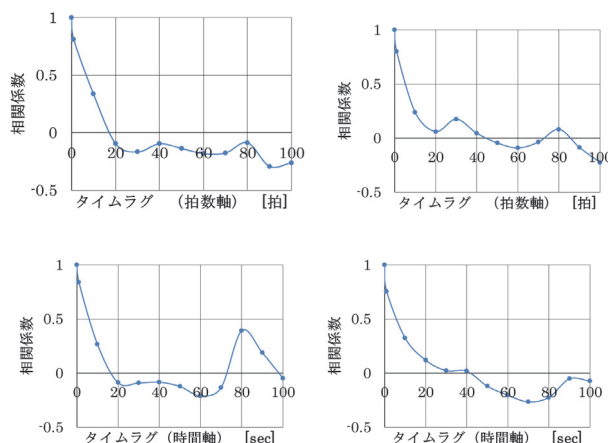


図3 各条件での心拍変動性の変化

このような心拍ゆらぎにおける低周波成分(LF)に対応すると考えられる周期性成分は実験条件の5分のセッションを短く感じるか、または楽しいと感じるかで認められることが多く、実験条件セッションを長く感じるか、または退屈と答えた場合には認められないことが示された。表1に各被験者の主観評価と周期性成分の関係を示した。表中の(+)は周期性成分が認められたことを示し、(-)は周期性成分が認められなかったことを示す。

脳波のパワースペクトルは単にパワー値を比較するのみではなく、全スペクトルに対する割合や、 β 波帯域成分に対する α 波帯域成分の割合のように、比率として比較されることも多く⁹⁾、本研究においても同様に検討を



(a) 時計提示条件 (b) 計算課題条件

図4 被験者Cにおける自己相関関数

(各条件とも上段は心拍数軸、下段は実時間軸を示す)

表1 主観評価と周期性成分の有無

被験者	長く感じた	楽しかった 短く感じた
A	+	+
B	+	-
C	-	+
D	-	+
E	-	+
F	-	+
G	-	+
H	-	-
I	+	+
J	-	-
計	3/10	7/10

行った。また本論文においては、各周波数帯域が最も明瞭に観察できたP3部位からの脳波データの解析結果を示す。

脳波のパワースペクトルにおける β 帯域の比($\beta\%$)では、作業により安静時に比べて実験条件で増大した。その内訳は表2に示すように、開眼安静時に対して時計提示条件で10例中7例が、計算条件で10例全例が、テトリスゲーム遂行では10例中7例で $\beta\%$ が増大した。10例中8例はテトリスゲームが計算よりも楽しいと答えたが、 $\beta\%$ でみるとテトリスゲーム条件よりも計算条件で $\beta\%$ が増大していたのは10例中8例であった。

α 成分との相対的な関連性を考慮して、 $\alpha\%$ と $\beta\%$ の比

(α/β)を検討すると、時計条件と計算条件では安静開眼時に比べて10例中9例が減少し、テトリスゲーム条件で8例が減少した。また、テトリスゲーム条件に比べて計算条件では8例の減少が見られた。図5には全被験者の $\beta\%$ 変化の平均を、図6には全被験者 α/β 変化の平均を示した。t検定の結果も併せて両図中に示したが、 α/β 変化においては全ての項目で有意差が認められた。

表2 各条件下での $\beta\%$ 、 α/β の増加被験者数

条件	$\beta\%$	α/β
開眼 < 時計	7	1
開眼 < 計算	10	1
開眼 < テトリス	7	2
テトリス < 時計	8	2

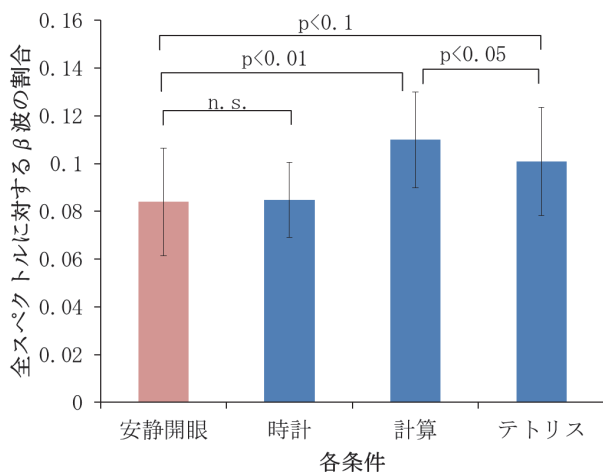


図5 全被験者の $\beta\%$ の平均

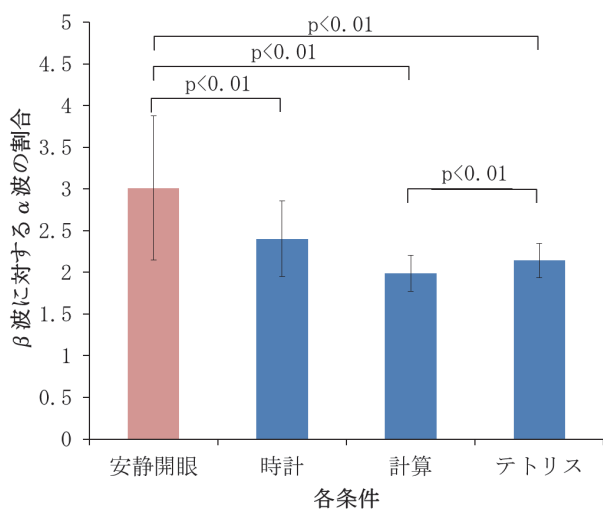


図6 全被験者の α/β の平均

4. 考察

本研究では、自律神経指標と脳波を用いて、安静開眼時、時計表示付き安静条件、単純計算課題およびテトリスゲーム遂行時の各条件下での状態分析を試みた。これまでは課題による心身への負担という点が重視されてきたが、ここでは主観的な時間経過という点から課題の質的側面も含めて検討する。たとえ5分間でも単に安静状態を維持するのは退屈であることから、時計の表示によって時間経過をフィードバックする意義、精神作業としての単純計算と、時間経過をポジティブに感じる事が予想できるゲームの遂行について検討した。

10名の被験者について、それぞれの実験条件についての主観的印象をアンケートで調査した結果、各実験条件の5分間のセッションのうちテトリスゲームを最も短く感じたのは9名であった。1名は単純計算課題と答えた。ゲームは予想困難な状況で逐次生じる課題を解決して結果により達成感のフィードバックがあるため、連続的な脳内情報処理により、退屈な時間がなく、主観的な時間経過が速かったと考えられる。しかし、テトリスゲームに慣れていない被験者にとっては、単純計算の方が心理的な負担が少なかったことが推測される。

これに対して主観的に時間経過が長かったと評価されたセッションは安静条件5名、時計表示付き安静条件4名、計算課題1名であった。時計は秒針付きであれば、注視すれば完全に予測可能であって退屈な感覚を生み、間欠的に見れば、時間経過のフィードバックとなることから、時計をどのように利用するかで、評価が異なったものと考えられる。時計の利用について、被験者への事前の教示を統一しておけば、結果は異なった可能性も考えられる。

4.1 心拍変動について

心拍変動は人間工学的研究ではしばしば用いられる指標である¹⁰⁾¹¹⁾。心拍数は身体運動にともなう組織からの酸素要求量や心理的負荷による自律神経への影響によって変動するが、心身を定常的状态に維持するようにしても自発性の揺らぎ現象が認められる。心拍揺らぎの時系列データをスペクトル解析することで得られる高周波成分は呼吸性心拍変動と関連し、副交感神経活動の、低周波成分は血圧変動と関連して交感神経活動の指標と考えられ、活用されている。また、心拍変動の特性を可視化するためにR-R間隔系列 $X(i), i=1, 2, 3, \dots, n$ を $X(i)$ vs. $X(i+1)$ で平面上に展開するポアンカレプロットが利用されている。

本実験から得られた心拍データのポアンカレプロットを作成した結果、安静開眼時のプロットに比較して楕円

領域の長軸長が、各課題条件において短縮していた。これは心拍変動性が課題によって抑制されていたと考えられる。この傾向は各被験者における R-R 間隔の標準偏差からも伺える。このことは、課題遂行により副交感神経の活動が抑制され、呼吸性変動の影響が現れにくくなったものと考えられる。

そこで、周期性変化を詳細に検討する目的で自己相関関数を計算した。本研究では自己相関のタイムラグを実時間としたものと、心拍数軸としたものの2種類を計算した。後者は、ポアンカレプロットの $X(i)$ vs. $X(i+1)$ を拡張して $X(i)$ vs. $X(i+j)$ とし、生体内時間経過を心拍系列で考えようとするものである。心拍変動に高周波成分が存在すれば、自己相関関数の波形は減衰後に相関係数のピークが生じ、示すタイムラグは変動の周期に一致する。退屈で長く感じる条件下では、高周波成分のピークが見られない例が多かった。これに対してテトリスゲーム遂行条件では20秒から40秒程度のタイムラグで相関係数のピークがみられ、退屈を強いられている状況とは異なる反応を示した。実時間軸タイムラグによる自己相関関数と心拍軸タイムラグでの自己相関関数は、必ずしも一致しておらず、周期に一致するピークが見られる場合とそうでない場合があった。実時間軸によるタイムラグは、もともと不等間隔である R-R 間隔系列の変動波形をスプライン補完して得られたものから再サンプリングされて作成されたものであるから、このことが作用している可能性がある。生体の時間経過は、体のサイズやエネルギー消費と関連していることが知られている¹²⁾。心拍軸を生物学的時間軸として解析する意義についてはさらに検討が必要であろう。

4.2 脳波の解析から

本実験における時計表示付き安静条件、単純計算課題条件、テトリスゲーム遂行条件とも安静条件に比べて β 成分の含有比 ($\beta\%$) が増大していた。脳波のうち β 波は閉眼よりも開眼で観察され、精神作業、心身への負担や興奮、覚醒水準の上昇などによって出現量が増大することが知られている。各課題がおよぼす影響に応じた変化であると考えられる。

本実験における単純計算とテトリスゲームは精神作業と考えられるが、主観的時間経過は異なり、テトリスゲームの方が計算課題よりも短時間に感じられる傾向があった。この両条件を比較するとテトリスゲームの方が計算課題よりも $\beta\%$ の増大は少なく、時間を短く感じさせる楽しみや娯楽的要素は、 $\beta\%$ の増大を抑える可能性が考えられる。

また、安静時の α 波はリラクゼーションの指標と考え

られているが、本研究では開眼での作業を含むので、 α 波を直接扱うのは適切ではない。しかし、 α 帯域の出現量は脳波全体のスペクトル構造を特徴づけるので、 α 帯域成分の含有率 $\alpha\%$ と $\beta\%$ の比である α/β を指標として各条件を比較したところ、 $\beta\%$ とほぼ同様の結果が得られ、課題として強いられた作業条件と、ゲームとしての娯楽性を含む作業とでは、脳波上の反応が異なることが示された。

5. 今後の展望

本研究では今後ますます進んでいく高齢化を鑑み、日常的な生体モニタリングの需要を考慮し、ウェアラブルセンサを用いた計測を行った。脳波計測においては従来の有線電極を使用して計測したが、多くのセンサを取り付ける方法と比較して被験者に聞き取り調査を行ったところ、「作業の妨げにならない」や「緊張感が少ない」などの報告を得ており、計測そのものに含まれる負担は軽減したと推察された。日常生活環境での生体計測を考慮すると、無拘束であることが最低条件であると考えられ、着衣型のウェアラブルセンサは適したデバイスといえ、今後の発展が期待される。

6. まとめ

本研究では、安静条件、時計表示付き安静条件、精神作業条件における心拍変動性と脳波を記録・解析した。心拍変動の周期性は自己相関関数によって特徴づけることができ、実験条件のセッションに対する主観的時間経過と関連することが示された。脳波の周波数スペクトルにおける $\beta\%$ および α/β を指標として用いると、一般的に退屈とを感じる作業と、娯楽性を含む作業では異なる反応が認められた。今後は日常的な生体モニタリングの需要も高まると考えられるが、生体の状態を把握するうえで、無拘束であることに加え、活動状況の質的側面も取り扱うことができる技術が望まれると考えられる。こうしたモニタリングにはウェアラブルセンサは行動を妨げないため適したデバイスと言える。このような観点から、今後は生体モニタリングへの応用を考慮した研究を進めたい。

参考文献

- 1) 内閣府, 平成28年版高齢社会白書
<http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2016/html/zenbun/index.html>
- 2) 槇弘倫, 小川英邦, 他4名: ウェアラブル生体情報記録システム, 医機学(2010) Vol. 80, No. 4, pp. 281-289

- 3) apple 社, apple watch
<http://www.apple.com/jp/watch/>
- 4) Mikio Aritomo, Yoshiharu Yonezawa, W. Morton Caldwell : A Wrist-mounted Activity and Pulse Recording system, Proceedings of the 21th Annual International Conference of the IEEE EMBS (1999) Vol. 2, p. 693
- 5) Loriga G., Taccini N., De Rossi D. et al. : Textile Sensing Interfaces for Cardiopulmonary Signs Monitoring. Proceedings of 27th Annual International Conference of the IEEE EMBS (2005) pp. 7349-7352
- 6) 飯島勝矢, 亀山祐美, 他 8 名 : 高齢者におけるウェアラブル血圧センサーの臨床応用～認知機能およびストレス感受性からみた血圧短期変動評価への有用性の検討～, 人工知能学会論文誌(2012), 27 巻, 2 号, pp. 40-45
- 7) 桑原啓, 樋口雄一, 他 2 名 : スマホで見る血液の流れ—超小型ウェアラブル血流センサ, NTT 技術ジャーナル(2014), 11, pp. 21-24
- 8) The Tetris Company 社
<http://tetris.com/>
- 9) B. Nielsen · T. Hyldig et al. : Brain activity and fatigue during prolonged exercise in the heat, Pflügers Arch - Eur J Physiol (2001) 442, pp. 41-48
- 10) Marco di Rienzo et al. : 24h Sequential Spectral Analysis of Arterial Blood Pressure and Pulse Interval in Free-Moving Subjects, IEEE Transaction on Biomedical Engineering(1989), Vol. 36, No. 11, pp. 1066-1075
- 11) 星合清隆, 長島圭子, 他 8 名 : 心電図スペクトル解析による自律神経機能の解析手法, 東海大学開発工学部紀要(1994), 4 号, pp. 201-207
- 12) 本川達雄 : 生命の時間・心の時間, 動物心理学研究(2008), 58(1), pp. 15-19