

温・冷刺激予告シグナルに伴う末梢血管反応と脳波変動

下田政博¹・宮良俊行²・西平賀昭¹・竹宮 隆¹・八田有洋³

Changes in EEG Power Spectrum and Δ DPG Amplitude Following Warning Signal for Cold and Hot Water Stimulation

Masahiro SHIMODA¹, Toshiyuki MIYARA², Yoshiaki NISHIHIRA¹,
Takashi TAKEMIYA¹ and Arihiro HATTA³

Abstract

We investigated changes in the amplitude of differential digital photoplethysmogram (Δ DPG) and the EEG power spectrum before cold and hot water immersion (foreperiod), and during immersion in six male subjects. During the foreperiod of hot water immersion, the Δ DPG amplitude decreased and the beta power (13.0 – 19.8 Hz) decreased at Fz, P3 and P4. Also, during the foreperiod of cold water immersion the Δ DPG amplitude decreased, but the alpha2 power (10.0 – 12.8 Hz) decreased at C3 and P3. The Δ DPG amplitude decreased during hot and cold water immersion. During hot water immersion, the beta1 power decreased at P4. During cold water immersion, the alpha2 power decreased at C3 and P3, and beta1 power decreased at C3. From these results, it was concluded that the EEG power spectrum and sympathetic nerve activity changed preceding the cold and hot water stimulation, and that these changes might be related to motor preparation and stimulus anticipation.

Key words: EEG, Δ DPG, arousal, anticipation, motor preparation

I. 緒言

体性神経系と自律神経系はお互いに協調しあって人間の生命活動や行動を維持していることが知られている。その機能的メカニズムについては不明な点が多かったが、最近の研究によって、自律神経系は生命維持に重要な心臓、血管等を支配するばかりでなく、骨格筋や体性感覚受容器をも支配し、侵害受

容器などからの体性感覚入力によっても反射的に制御されることが明らかとなっている¹²⁾。自律神経系の高位中枢である視床下部は上位の大脳皮質との密接な連絡があることから、大脳皮質活動の変動に際してその自律神経調節を変化させることが予想され、自律神経活動と高次脳活動の関連については非常に興味のもたれるところである。しかしながら、

¹筑波大学体育科学系 (〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1)

²熊本機能病院附属熊本体力研究所 (〒860 熊本県熊本市清水町山室534)

³筑波大学体育科学研究科 (〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1)

¹Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba (1-1-1 Tennodai, Tsukuba 305, JAPAN)

²Kumamoto Institute of Total Fitness (534 Yamamuro, Shimizu-Machi, Kumamoto 860, JAPAN)

³Doctoral Program in Health and Sport Sciences, University of Tsukuba (1-1-1 Tennodai, Tsukuba 305, JAPAN)

この両者はそれぞれ単一の研究で分けて検討されることが多かった。

脳活動に関して、師尾ら¹³⁾は事象関連電位のP300頂点潜時と刺激前自発脳波パワースペクトラムとの関連について、また河野⁹⁾は特殊なイメージと特異的集中状態の気功師の脳波を観察し、注意集中時や至適覚醒時における上位中枢の状態について検討している。また、動作開始に関する情報(予告)が与えられた場合には、頭皮上からCNV (Contingent Negative Variation²⁸⁾)の出現することが知られている。これまでの研究の結果、このCNVは予告期間中の注意、刺激予測、反応準備といった高次脳機能の活動状態を反映していると考えられている^{3,6,7,8,19,24)}。一方、自律神経活動の高次脳機能との関連について、竹宮ら²³⁾は精神情緒刺激として暗算を被験者に負荷した際の指尖容積微分脈波(Δ DPG)波高の顕著な減少を観察し、交感神経性の細動脈血管収縮の起こったことを示唆した。斉藤と間野²¹⁾は健康な男子学生を対象に、掌握動作前の皮膚交感神経活動(SSNA)と筋交感神経活動(MSNA)をmicroneurographyを用いて検討した。その結果、動作開始の予測ができる場合、その動作前では血圧、MSNAに変化が見られないのに対して心拍数と手掌支配のSSNAが亢進したことが観察され、運動開始予測による皮質の興奮が心拍数とSSNAを増大させた結果であるとした。さらに運動に対する心理的構え、すなわち上位中枢の運動予測(準備)は交感神経活動を選択的に賦活、又は抑制し、適切な運動の開始と遂行のために重要な役割を果たしていると考えられている。また、CNVと自律神経活動の両者を同時に測定した研究^{15,18,29)}では、

予告期間中のCNV出現に伴い心拍数、血圧、皮膚電気活動が微妙に変動することが報告されているものの、その生理学的メカニズムや意義については不明な点が多い。

本研究では、予告刺激(Warning Stimulus; WS)で選択動作課題の内容を呈示し、動作駆動刺激(Imperative Stimulus; IS)で課題を遂行させるWS-IS paradigmを用いて、予告期間(WS-IS間)中の指尖容積微分脈波及び脳波の変動を観察し、大脳皮質活動と自律神経活動の関連を検討した。

II. 方法

A. 被験者及び実験手順

被験者は健康な男子6名であり(Table 1)、実験の主旨及び方法について十分説明した上で実験参加の同意を得た。

刺激は発光ダイオード(LED)を用いた光刺激とした。アームレスト付きのリクライニングチェアに座った被験者の眼前約1mに吊り提げた縦30cm、横30cmの黒い板の中央に黄、その左右に5cm間隔で赤及び緑のLEDを配置し、赤及び緑のLEDは予告刺激、黄のLEDは動作駆動刺激とした。被験者の右手の左右15cmの場所には、 $43.7 \pm 2.9^\circ\text{C}$ の温水と $2.1 \pm 1.3^\circ\text{C}$ の冷水の入った容器2つをおいた。

被験者にはLEDを凝視するよう指示し、予告刺激として赤が点灯した場合には右手指をその15cm左においた温水に、緑が点灯した場合にはその15cm右においた冷水に浸水することとし、予告刺激後約10秒で黄を点灯させ、浸水動作を行わせた。浸水時間は30秒とした(Fig. 1 A)。以上の試行を1試行とし、数回練習した後に本実験を開始した。

Table 1. Physical characteristics of each subject

Subject	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	Blood Pressure (mmHg)	Heart Rate (bpm)
A	19	177	72	120/69	61
B	21	165	60	132/85	64
C	19	166	61	118/73	72
D	21	170	68	121/67	56
E	20	173	72	131/88	68
F	21	170	60	118/61	64
Mean	20.2	170.2	65.5	123.3/73.8	64.2
SD	1.0	4.4	5.9	5.9/9.7	5.5

本実験では試行間隔90~120秒で、温水及び冷水浸漬をランダムに12~16回行った。なお、実験室の環境は室温 $23.8 \pm 1.1^\circ\text{C}$ 、湿度 $62.8 \pm 4.2\%$ であった。

B. 記録とデータ処理

被験者の左手第2指に光透過型校正脈波計 (MLV-2301, 日本光電) のピックアップを装着して指尖容積脈波 (DPG) を導出し、これを時定数0.03秒の前置増幅器に再導入して指尖容積微分脈波 (Δ DPG) を得た。脳波 (EEG) は国際10-20電極配置法に基づく8部位 (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, P4) に銀-塩化銀電極をおき、両耳朶を基準電極として単極導出した。これを時定数0.3秒, High cut 120 Hzで脳波計 (1A97, NEC三栄) に紙記録

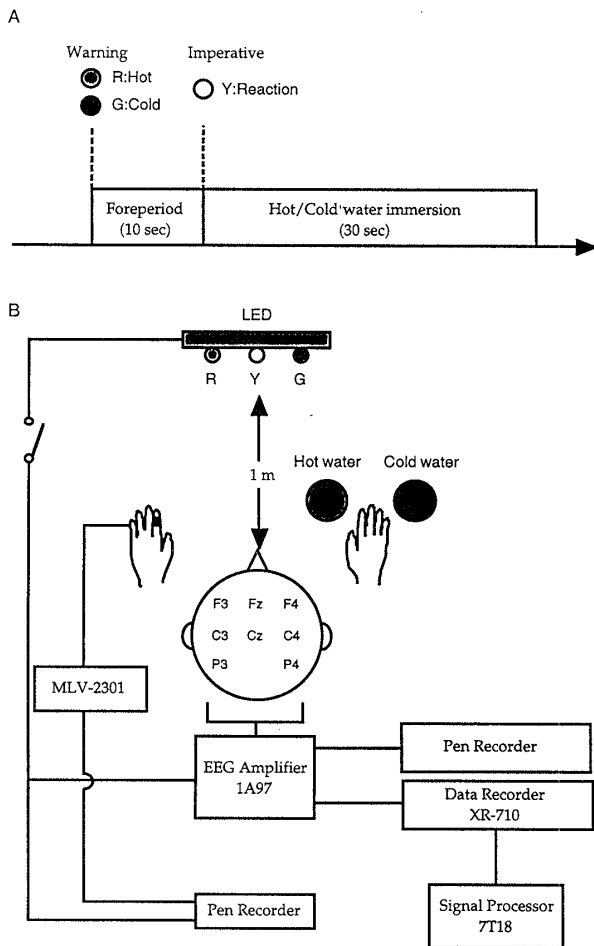


Fig. 1 Experimental procedure (A) and settings (B). LED for red (R) and green (G) represents warning stimulus (start of foreperiod), and yellow (Y) represents imperative stimulus (IS) as to immersion of hot/cold water.

し、同時にデータレコーダ (XR-710, TEAC) に磁気記録した (Fig. 1 B)。

Δ DPGはそのピーク波高 (mV/V) を分析対象とし、課題開始前の安静時をcontrolとして、予告期間中 (Foreperiod) 及び浸水後20-30秒 (Immersion) の波高値を算出した。EEGは、紙記録の視察により安静時 (Control), 予告期間中 (Foreperiod) 及び浸水後20-30秒 (Immersion) においてアーチファクト混入のない区間を分析対象とした。データレコーダを再生してサンプリングタイム5.0 ms, 1024 pointを1単位としてシグナルプロセッサ (7T18A, NEC三栄) に取り込んで高速フーリエ変換を行い、6回の加算平均の後、各導出部位についてDelta (2.0~3.8 Hz), Theta (4.0~7.8 Hz), Alpha1 (8.0~9.8 Hz), Alpha2 (10.0~12.8 Hz), Beta1 (13.0~19.8 Hz), Beta2 (20.0~29.8 Hz) の各周波数帯域での平均振幅値 (μV) を求めた。

C. 統計処理

統計処理には repeated measure ANOVA を用い、時間条件 (安静・予告期間・浸水動作) 及び動作条件 (温水刺激・冷水刺激) の要因内で差が見られたときには各要因の水準間について対比を行った。なお、有意水準は危険率5%とした。

III. 結果

Δ DPG-P波高値について repeated measure ANOVAを行った結果、時間条件と動作条件間の交互作用がなく、時間条件による差のみが見られた ($F=13.05$, $P<0.001$) ので、時間条件間で対比を行った (Table 2)。温水浸漬課題時では予告期間及び浸水動作中の波高値が安静時より有意に減少した (Foreperiod: $P<0.05$; Immersion: $P<0.01$)。また冷

Table 2. Changes in Δ DPG-P wave amplitudes

Task	Time Course ($F=13.05$)		
	Control	Foreperiod	Immersion
Hot	3.75 (0.78)	1.80* (1.61)	1.63** (1.05)
Cold	3.75 (0.78)	1.76** (1.35)	1.51** (1.11)

* and ** ; $P<0.05$ and 0.01 vs Control, respectively Mean (mV/V) (SD)

水浸漬時においても予告期間及び浸水動作中の波高値が有意に減少した (Foreperiod: $P < 0.01$; Immersion: $P < 0.01$)。

EEG の Alpha2 及び Beta1 帯域の平均振幅値にも時間条件と動作条件間の交互作用がなく、時間条件による差のみが見られた (Alpha2: $F=10.55$, $P < 0.001$; Beta1: $F=8.00$, $P < 0.001$) ので、各導出部位において時間条件間で対比を行った (Table 3)。

Alpha2 帯域では、冷水浸漬課題時の C3 ($F=6.74$, $P < 0.05$) において予告期間及び浸水動作中の平均振幅値が安静時より有意に減少した (Foreperiod: $P < 0.05$; Immersion: $P < 0.01$)。P3 ($F=10.50$, $P < 0.01$) においても同様に予告期間及び浸水動作中の平均振幅値が有意に減少した (Foreperiod: $P < 0.01$; Immersion: $P < 0.01$)。

Beta1 帯域では、冷水浸漬課題時の C3 ($F=4.535$, $P < 0.05$) において、浸水動作中の平均振幅値が安静時及び予告期間中に比べて低い値 ($P < 0.05$) であった。温水浸漬課題時の Fz ($F=10.446$, $P < 0.05$) では予告期間中の平均振幅値が安静時 ($P < 0.001$) 及び浸水動作中 ($P < 0.05$) よりも低く、P3 ($F=4.797$, $P < 0.05$) では予告期間中の平均振幅値が安静時よりも低かった ($P < 0.05$)。また、P4 ($F=6.587$, $P < 0.05$) では予告期間及び浸水動作中の平均振幅値が安静時

よりも低い値であった (Foreperiod: $P < 0.05$; Immersion: $P < 0.01$)。

なお、他の周波数帯域の平均振幅値に有意な変動は認められなかった。

IV. 考察

本研究の目的は、WS-IS paradigm における予告期間 (Foreperiod) 中の Δ DPG-P 波高と EEG 周波数帯域の変動を観察し、自律神経活動と大脳皮質活動の関連を検討することにあつた。その結果、Foreperiod では Δ DPG-P 波高の低下、さらに EEG の Alpha2 及び Beta1 帯域平均振幅値の低下が認められた。この結果を浸水動作前の刺激予測と運動準備の要因から解釈する。また、浸水中の結果についても若干の考察を行った。

1. 予告期間 (Foreperiod) 中の変化について

Saito et al.²⁰⁾ は、ヒトにおいて静的掌握運動に対する皮膚 (SSNA) と筋交感神経活動 (MSNA) の反応が異なっており、SSNA は中枢からの下行性神経活動 (Central Command) により亢進することを示唆している。また齊藤と間野²¹⁾ は健康な男子学生を対象に、掌握動作前の SSNA と MSNA を microneurography を用いて検討した。その結果、動作開始の予測ができる場合、その動作前では血圧、

Table 3. Changes in Alpha2 and Beta1 wave amplitudes

Band	Position	Task	Time Course		
			Control	Foreperiod	Immersion
Alpha2 ($F=10.55$)	C3	Cold	3.99 (2.05)	2.99* (1.04)	2.47** (1.12)
	P3	Cold	5.09 (2.51)	3.28** (1.34)	2.84** (1.27)
Beta1 ($F=8.00$)	Fz	Hot	3.01 (0.72)	2.31** (0.50)	2.70† (0.61)
	C3	Cold	2.93 (0.77)	2.38 (0.51)	2.19* (0.24)
	P3	Hot	2.84 (0.65)	2.39* (0.45)	2.62 (0.42)
	P4	Hot	2.78 (0.87)	2.41* (0.75)	2.19** (0.39)

* and ** ; $P < 0.05$ and 0.01 vs Control, respectively

† ; $P < 0.05$ vs Foreperiod

Mean (μ V)
(SD)

MSNAに変化が見られないのに対して心拍数と手掌支配のSSNAが亢進したことが観察され、運動開始予測による皮膚の興奮が心拍数とSSNAを増大させた結果であるとした。さらに運動に対する心理的構え、すなわち上位中枢の運動予測（準備）は交感神経活動を選択的に賦活、又は抑制し、適切な運動の開始と遂行のために重要な役割を果たしていると考えられている。 Δ DPG-P波高について、竹宮ら²³⁾によれば、 Δ DPG-P波高は暗算などの精神活動時に顕著に減少し、その減少度は筋作業時のそれを上回っているという。これらの結果と同様に、本研究でも、温水及び冷水浸漬のどちらであっても約10秒のForeperiodにおいて対側の Δ DPG-P波高が顕著な減少を示したことは、動作開始前にSSNAが亢進し皮膚に存在する細動脈の収縮が起こっていたことを示唆するものと考えられる。

一方、随意動作に関連した緩徐な脳電位はKornhuber and Deecke¹¹⁾によって発見され、運動関連脳電位と呼ばれている。特に動作開始前1～1.5秒には運動準備電位(Bereitschaftspotentiale)が左右差なく出現する。この運動準備電位については、大脳皮質における感覚運動系のpreactivation及び運動反応の接近に関連しているという示唆もあり²⁶⁾、随意運動のための一般的な準備状態を反映するとされている。また、WS-IS paradigmにおいて出現するCNV²⁸⁾は、Foreperiod中の注意、刺激予測、反応準備といった高次脳機能の活動状態を反映していると考えられている。最近では、IS前のCNV後期成分は、運動成分の運動準備電位と非運動成分のSPN (Stimulus preceding negativity⁴⁾)とが重畳したものであるとの見解が有力である^{2,25)}。Pfurtscheller and Aranibar¹⁶⁾は2秒のForeperiodでCNVとAlpha帯域の脱同期化(Event-related desynchronization)を観察した。そしてAlpha帯域の脱同期化とCNV振幅の増加が中心部で優位なことを示し、前者は視床-皮質系の感覚運動メカニズムに関連しており、後者は運動準備電位に似たものであると考察した。さらにPfurtscheller¹⁷⁾は、中心部でcentral upper alpha band components (10～12 Hz)の脱同期化が明瞭に観察されることから、このAlpha帯域が感覚運動系の内因的活動を示すものであり、Alpha帯域の脱同期化はその内因的活動が高まることによって生じると考察している。

本研究において、動作肢と対側の中心部(C3)

と頭頂部(P3)でForeperiod中のAlpha2帯域平均振幅値の低下が認められたことから、注意、刺激予測及び動作準備に関連してAlpha2帯域の脱同期化が起こっていたと推察された。このAlpha2帯域平均振幅値の低下は冷水浸漬前にのみ有意であったことから、刺激呈示の予測と同時に、冷刺激の持つ心理的あるいは生理的覚醒効果^{5,22,27)}を被験者があらかじめ予測していたのではないかと思われる。さらには、動作遂行に伴う準備状態が含まれているかもしれない。そして、これらの影響が視床下部を介してSSNAを促進し、皮膚の細動脈を収縮させた結果、 Δ DPG-P波高が低下したものと考察した。

2. 浸漬中の変化

下田ら²²⁾は冷水浸漬直後の Δ DPG-P波高と脳波周波数変動を観察した。その結果、浸漬直後10秒において脳波に変化は見られないものの、 Δ DPG-P波高の顕著な減少を観察し、これが覚醒効果としてのSSNAの亢進によるものと考察した。Fagius and Blumberg⁵⁾は冷水浸漬直後の対側の正中神経で急速なSSNAの増大を観察し、これが覚醒刺激に対する反応として当然のものであるとしている。またWallin and Fagius²⁷⁾も冷水刺激に対するSSNAの急速な増大は覚醒反応であり、それより遅れて始まるMSNAの増大はストレス刺激によるものであろうとしている。本研究において、冷水だけでなく温水浸漬であっても、浸漬後20-30秒で対側の Δ DPG-P波高の減少が続いていたことは、覚醒効果によるSSNA亢進のためと思われるが、これについてはMSNAの関与もあろう。また、浸漬中にあってC3とP3でAlpha2帯域振幅値の低下がみられたことは、冷水刺激中のAlphaパワーの減少が既に報告されており^{1,10,14)}、それらと同様の結果であった。これは温度受容器からの求心性インパルスが、脳幹網様体の物側延髄腹外側部からの興奮性インパルス発射を促してMSNAとSSNAが増加すると共に、視床にも入力して大脳皮質に投射され、覚醒レベルを高めたものであろうと考えられる。そしてこれらが視床下部へ伝達され、SSNAを(あるいはMSNAを併せて)さらに亢進させたと思われる。

V. 結論

本研究では、WS-IS paradigmにおける予告期間(Foreperiod)中の指尖容積微分脈波波高(Δ

DPG-P波高)とEEG周波数変動を観察し,自律神経活動と大脳皮質活動の関連を検討した。その主な結果として,Foreperiodでは Δ DPG-P波高の低下,さらにEEGのAlpha2帯域振幅値の低下が認められた。これらは,反応動作の準備に加えて刺激呈示の予測が大脳皮質の覚醒レベルを亢進させ,視床下部を介して皮膚血管支配の交感神経活動を亢進させた結果であると思われた。

謝辞

本研究の一部は平成6年度筑波大学学内プロジェクトの交付を受けて行われた。

文献

- 1) Backonja M, Howland E W, Wang J, Smith J, Salinsky M and Cleeland C S (1991) Tonic changes in alpha power during immersion of the hand in cold water. *Electroenceph clin Neurophysiol* 79 : 192-203.
- 2) Brunia C H M and Damen E J P (1988) Distribution of slow brain potentials related to motor preparation and stimulus anticipation in a time estimation task. *Electroenceph clin Neurophysiol* 69 : 234-243.
- 3) Chwilla D J and Brunia C H M (1992) Effects of emotion on event-related potentials in an arithmetic task. *J Psychophysiol* 6 : 321-332.
- 4) Damen E J P and Brunia C H M (1994) Is a stimulus conveying task-relevant information a sufficient condition to elicit a stimulus-preceding negativity? *Psychophysiol* 31 : 129-139.
- 5) Fagius J and Blumberg H (1985) Sympathetic outflow to the hand in patients with Raynaud's phenomenon. *Cardiovasc Res* 19 : 249-253.
- 6) Haagh S A V M and Brunia C H M (1984) Cardiac-somatic coupling during the foreperiod in a simple reaction-time task. *Psychol Res* 46 : 3-13.
- 7) Halgren E and Marinkobic K (1995) Neurophysiological networks integrating human emotions. In M.S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences* (pp. 1137-1151). Cambridge, MA: MIT Press.
- 8) Hiraku S and Sakuma H (1996) Effects on contingent negative variation of set created by anticipating variable foreperiods. *Perceptual and Motor Skills* 83 : 1163-1169.
- 9) 河野貴美子 (1991) 気功と脳波. *J J Sports Sci* 10 (8) : 571-576.
- 10) Kenshalo D R and Isensee O (1983) Responses of primate SI cortical neurons to noxious stimuli. *J Neurophysiol* 50(6) : 1479-1496.
- 11) Kornhuber H H and Deecke L (1965) Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotentiale und reafferente Potentiale. *Pflügers Arch ges Physiol* 284 : 1-17.
- 12) 間野忠明 (1994) 教育講座「運動と自律神経」. *体力科学* 43 : 130-135.
- 13) 師尾 郁, 今田俊明, 山田達夫 (1992) P300頂点潜時と刺激前の自発脳波パワースペクトルとの関連. *臨床脳波* 34(8) : 493-497.
- 14) Mountcastle V B and Powell T P S (1959) Neural mechanisms subserving cutaneous sensibility, with special reference to the role of afferent inhibition in sensory perception and discrimination. *Bull Johns Hopkins Hosp* 105 : 201-232.
- 15) Otten L J, Gaillard A W K and Wientjes C J E (1995) The relation between event-related potential, heart rate, and blood pressure response in an S1-S2 paradigm. *Biol Psychol* 39 : 81-102.
- 16) Pfurtscheller G and Aranibar A (1977) Event-related cortical desynchronization detected by power measurements of scalp EEG. *Electroenceph clin Neurophysiol* 42 : 817-826.
- 17) Pfurtscheller G (1989) Functional topography during sensorimotor activation studied with event-related desynchronization mapping. *J Clin Neurophysiol* 6(1) : 75-84.
- 18) Rockstroh B, Elbert T, Birbaumer N and Lutzenberger W (1982) Slow brain potentials and behavior. (1 ed.). Baltimore-Munich: Urban & Schwarzenberg.
- 19) Rosahl S K and Knight R T (1995) Role of prefrontal cortex in generation of the contingent negative variation. *Cerebral Cortex* 2 : 123-134.
- 20) Saito M, Naito M and Mano T (1990) Different responses in skin and muscle sympathetic nerve activity to static muscle contraction. *J Appl Physiol* 69(6) : 2085-2090.
- 21) 齊藤 満, 間野忠明 (1992) 運動予測と皮膚及び筋交感神経活動. *体力科学* 41 : 117-123.
- 22) 下田政博, 八田有洋, 鈴木淳一, 前田順一, 西平賀昭, 竹宮 隆 (1996) アルコール摂取時の冷水刺激に伴う末梢循環反応と脳波変動—指尖容積微分脈波と脳波パワースペクトルによる検討—. *体力科学* 45(3) : 377-386.
- 23) 竹宮 隆, 藤田紀盛, 吉田 茂, 佐藤 卓, 井福

- 裕俊 (1987) 精神情緒刺激及び静的筋作業負荷時の指尖容積微分脈波について. 筑波大学体育科学系紀要 10 : 227-233.
- 24) Tecce J J (1972) Contingent negative variation (CNV) and psychological processes in man. *Psychol Bull* 77 (2) : 73-108.
- 25) Van Boxtel G J M and Brunia C H M (1994) Motor and non-motor components of the Contingent Negative Variation. *Int J Psychophysiol* 17 (3) : 269-279.
- 26) Vaughan H G, Jr. (1975) Electrophysiologic analysis of regional cortical maturation. *Biological Psychiatry* 10 (5) : 513-526.
- 27) Wallin B G and Fagius J (1988) Peripheral sympathetic neural activity in conscious humans. *Ann Rev Physiol* 50 : 565-576.
- 28) Walter R G, Cooper R, Aldridge V J, McCallum W C and Winter A L (1964) Contingent negative variation: An electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature (London)* 203 : 380-384.
- 29) 山崎 薫, 片山宗一, 平田幸一 (1993) 事象関連電位に伴う各種自律神経反応の検討. *日本臨床生理学会雑誌* 23(1) : 99-108.
- (平成9年3月29日受付)
(平成9年7月10日受理)