

K-複合と睡眠中の運動反応

菅原 正和*

(1977年7月6日受理)

I. はじめに

感覚刺激(主に聴覚刺激)によって正中線(特に Cz)付近に誘発される K-複合(K-complex)は、当初、3つの成分(component)から成ると考えられていた。第Ⅰのものは4 c/sec 前後の鋭波、第Ⅱは、これに続くマイナス方向(negative deflection)の大徐波、第Ⅲ成分は刺激 on 後 600~1000 msec 付近に出現する12~14 c/sec の紡錘様の波(spindle wave)から成るとされていた(Roth et al., 1956)。後にこの150 μ v 以上にも及ぶ大きな誘発反応は、聴覚刺激以外の感覚刺激によっても生じ、又、時には刺激が無い状態でも自発的に出現することが明らかとなった(Pampiglione & Ackner, 1958; Metcalf et al., 1971)。

K-複合は睡眠の stage 2,3 (Dement & Kleitman, 1957) で最も顕著に出現し、近年いわゆる脳波の重ね合わせ法(Dawson, 1951, 1954)の開発によって得られるようになった聴覚誘発電位(Auditory evoked potential; AEP)を睡眠の stage 2,3 で記録したものと極めて類似した波形を有する。

誘発電位の初期並びに後期成分の生理、心理学的意味に関する多くの論議の中で、AEP についての頂点間(peak-to-peak)分析では、 N_1 - P_2 成分(N は陰性成分、 P は陽性成分: N_1 ; 潜時約 100msec, P_2 ; 180msec 前後)が注意状態(attention)と最も良く対応し(Picton & Hillyard, 1974), P_2 - N_2 成分(N_2 ; 300 msec 前後)は我々の今までの検討では(菅原, 1975), 他の条件を統制した場合、覚醒水準(arousal level)との関係で最も変動する(cf. Williams et al., 1962, 1964; Weitzman & Kremen, 1965; Ornitz et al., 1967 a, 1967 b)。しかし、より心理学的な P_3 以降の成分に関しては議論が様々で(例えば, information delivery, uncertainty resolution, task-relevance, decision-making etc.—Chapman & Bragdon, 1964; Sutton et al., 1965; Karlin, 1970; Regan, 1972), 前二者(N_1 - P_2 , P_2 - N_2)より更にその解釈は多義的である。

ところで覚醒時とは異なり、睡眠中にこれらの AEP 成分は心理学的事象に対応してどのような変動を示すかはあまり明らかにされていない。本論は睡眠中における生体の刺激処理過程、特に睡眠中のオペラント行動(operant behavior)のあり方と、単独の(加算しない)K-複合の波形との間に、どのような関連があるかを検討することにより、誘発電位の各成分と大脳の刺激処理過程に関する多くの論議に、睡眠を利用した知見を付け加えようとしたものである。

更に、あわせてヒトのオペラント行動<特にここでは睡眠中の聴覚信号に対する運動反応>は覚醒水準の相違により、どのような変容をうけるかを検討した。

* 岩手大学教育学部

Ⅱ. 方 法

(1)被 験 者

視覚系に障害を持たない健康な男子大学生, 及び大学院生 7 名, 年齢は 20~31 歳の範囲であった。被験者は防音電気遮蔽暗室内に用意された寝具に就寝し, 終夜睡眠記録を行った。実験記録は 23 時から翌朝 8 時ごろまで連続して行われた。

(2)刺 激

被験者の左側 1 m の距離に置かれたスピーカーから 60 dB クリック並びに 60 dB 純音 (500 Hz or 1000 Hz) を提示した。各々の持続時間は 5 msec と 1000 msec であった。ISI (inter stimulus interval) は 5 sec で竹井製 Pre-set Timer により自動制御された。

(3)装 置

脳波記録 (日本光電製 Model 131-A 13 素子脳波計, 及び三栄測器製 NM-103 14 素子多用途脳波計) は Cz-E₂, O₁-E₁, 他に EMG, EOG, MT, HR を同時記録し (装置についての詳細は Kanoh & Kitajima, 1972 参照), TEAC R-401 FM テープレコーダーに収録した。AEP の分析は Cz-E₂ のみとし, 掃引時間は 1000 msec, 加算回数は 40 回とした。加算装置は日本光電製 ATAC-201 を使用, 理研電子製 F-42C X-Yプロッターで書き出した。

(4)手 続 き

被験者は次のいずれかの条件下で睡眠をとった (条件 A は 3 名, 条件 B 4 名)。

条件 A : クリック刺激と 60 dB 純音 (500 Hz or 1000 Hz, 持続時間 1000 msec) 以外の刺激は一切与えられず, 又睡眠中になんらの課題も課されていない。

条件 B : 終夜睡眠におけるクリック刺激中に時々クリックの代わりに 60 dB 純音 (500 Hz or 1000 Hz) を提示し, この音が聞こえたらマイクロスイッチ (右手掌に伴創膏で装着してある) を押すように教示した。そしてこの条件 B で実験に従事した被験者の中 2 名は, 更に 500 Hz と 1000 Hz を弁別するように教示された。即ち, 1 名は 500 Hz に 1 回, 1000 Hz に 2 回押すように, 他の 1 名はその反対の運動反応をするよう要求された。残りの 2 名は弁別を課されていない (即ち, いずれの純音に対しても 1 回の反応でよかった)。

Ⅲ. 結 果

1. K-複合と AEP との関係

K-複合と AEP は波形成分が極めて類似していることから同一の発現機序に基づくものと推定された。本実験における分析の結果, K-複合のいわゆる第 I 成分は潜時から見て AEP の P₁, N₁, P₂ に相当すると思われる (図 1, 3)。

この中で特に顕著なのは P₂ に相応する部分である。第 II 成分は明らかに N₂ のことであり, 第 III 成分は P₃ 以降である。図 2 は同一被験者の stage 2 における K-複合で, 上は A 条件, つまり睡眠中になんらの課題も与えられていない状態での記録, 下はマイクロスイッチ押しを課されている。これら 2 つの条件下で, K-複合の波形の著しい相異は成分全般に渡るよりもむしろ N₂-P₃ (peak-to-peak) 相当成分の増大であった。B 条件下では被験者によってこの N₂-P₃ 相当成分が 200 μ v 以上にも及ぶことがあった (図 2)。

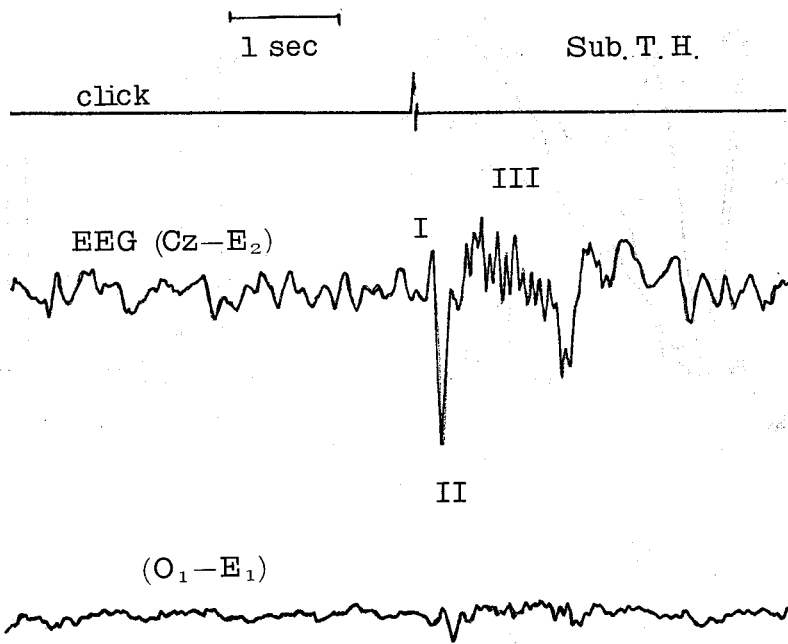


図1 睡眠 stage 2 におけるクリックに対するK-複合の3つの成分。
EEG は Cz からの単極誘導。

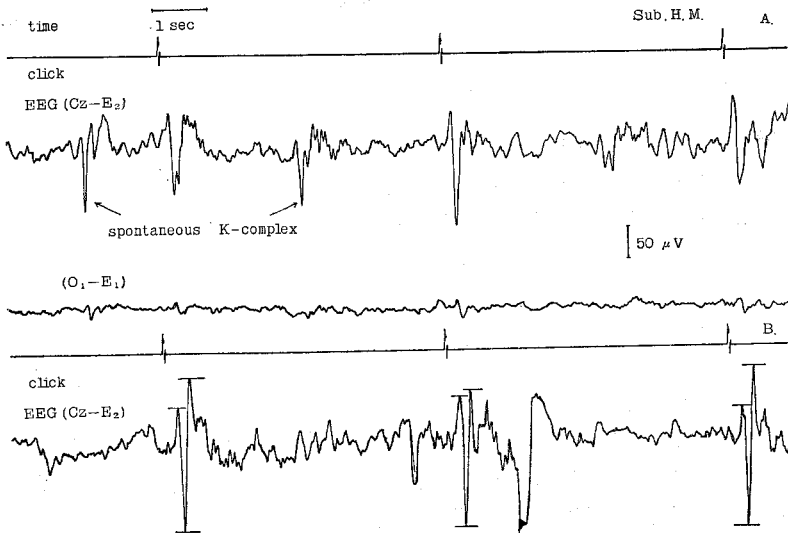


図2 task に伴う K-複合波高値の増大 (特にN₂-P₃)。上図Aは task を課されていない, 下図Bは課されている。

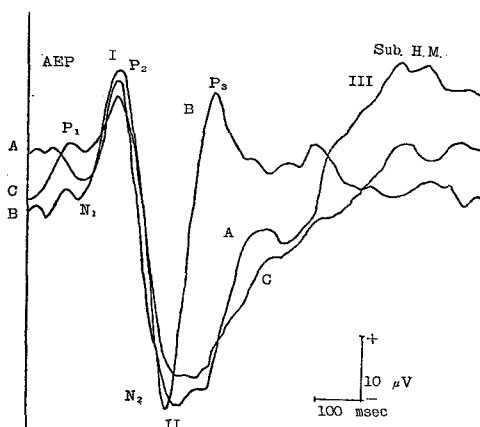


図3 聴覚誘発電位 (AEP)。加算回数40回。A: 睡眠 stage 2 における AEP, task は課されていない。B: 睡眠 stage 2 において task が課されているときの AEP。P₃ 成分が増大し、潜時も短くなる。C: 睡眠 stage 4 における AEP, P₃ 成分は得られず運動反応は不可能。

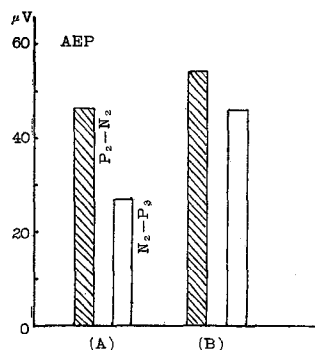


図4 task による AEP 波高値 (特に N₂-P₃ 成分) の増大。

第1表 A, B 両条件下における AEP 波高値 (μV)

	(A) N. M.	T. H.	H. M.	(B) H. M.	M. S.	A. K.	T. A.
P ₂ -N ₂	52.4	37.2	48.6	52.5	43.5	49.3	67.2
N ₂ -P ₃	39.8	10.6	12.5	43.3	40.0	29.5	67.0
			46.1				53.1
			27.7				45.0

一方, AEP の P₃ 潜時も課題を与えた被験者では早くなる (図3)。又, 終夜睡眠の stage 2, 3 における全被験者の AEP 振幅は A, B 両条件下で表1の如くであった。一般に task なしでの睡眠時 AEP は P₃ 成分が明瞭でない (条件 A における N₂-P₃ 振幅値は平均 27.7 μV) しかし睡眠中に課題を与えた B 条件では P₂-N₂ もやや増加の傾向 (P=.200, U=3, n₁=4, n₂=3) を示したが, N₂-P₃ が著しく増大 (P=.057, U=1, n₁=4, n₂=3) した (図4)。この傾向は単一の K-複合を見ても明瞭であった (図2)。

2. 睡眠時における運動反応の可能性と K-複合

各睡眠段階ごとのマイクロスイッチ押しの成績は, stage 1, 2, 3, REM 期, 4 の順となった。これらの成績結果は Williams et al. (1964), 大熊ら (1966 a, b) の順位とほぼ一致する。スイッチ押しの反応時間 RT は Williams らのデータより全体的にやや遅かった。

K-複合が出現している段階まで (stage 2, 3) は殆んど反応が可能であるが, これが出現しなくなると (stage 4, REM 期) 応答は不可能となる傾向があった。REM 期には K-複合は出現しないが, 急速眼球運動 (rapid eye movement) の生じている時より, 生じていない時期の方がスイッチ押し反応は可能なようである。stage 4 を除けば, この段階が最も運動反応

第2表 B条件における各被験者ごとの運動反応回数

Sub.	H. M.	M. S.	A. K.	T. A.				R T
Stage	1	5/5	8/8	3/3	6/7	22/23	96%	0.38±0.24
	2	4/4	7/8	2/2	6/7	19/21	90%	1.01±0.40
	3	4/5	4/5	2/3	7/8	16/21	76%	1.85±1.29
	4	0/4	—	0/3	0/8	0/15	0%	∞
	REM	4/5	3/6	2/5	2/5	11/21	52%	2.52±1.88

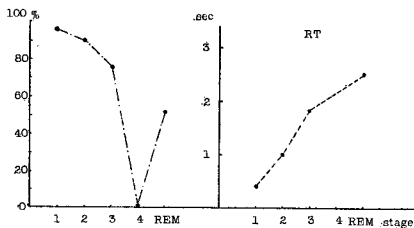


図5 各睡眠段階ごとの task 達成率と反応時間。

は難しく、反応時間も極めて遅い。そして反応が可能な場合でも信号の種類 (500 Hz と 1000 Hz) を弁別してそれを運動反応に結びつけることは不可能であった。即ち就寝前の教示とは関係なく回数が逆転したりした。しかし50%強が反応可能であることは興味深い。大熊ら (1966 a) はこの REM 期の key 押し反応では信号の知覚はかなり正確であるのに、それに対する運動反応が困難となり、これが単に REM 期における筋活動の低下のみに帰し得ない点を指摘していることは注目される。

3. K-複合の条件づけ

K-複合が出現しやすい stage 2 で、一定の繰り返し刺激を時々抜いて、刺激がない状態 (omitted click) でも皮質上に K-複合を誘発することが出来るかどうかを試みた。K-複合の条件づけが可能であるか否かと云う問題に関しては、感覚間条件づけ (sensory conditioning) に関する可能性の是非をめぐっての問題 (e. g. Ellson, 1941; Brogden, 1950; Brogden & Gregg, 1951) と関連して長い間、可能であるとする Pampiglione, Ackner (1958) らと、不可能とする Oswald (1962) らで意見が分かれていた。今回、最初 ISI を 5 sec にして実験したところどの被験者においても条件づけは成立しなかった。但し、平均加算した場合は、omitted click に対する AEP は得られないが、自発的K-複合はタイミングがずれて出現するようになる。又、omitted click の次のクリックに対する K-複合は波高値を増大する傾向にある (図6)。Picton と Hilliard (1974) は覚醒時に1.1 sec 間隔でクリックを提示し、途中をいくつか抜いて、その抜いた個所を加算すると P₃ 成分に相当する peak が記録されることを報告してい

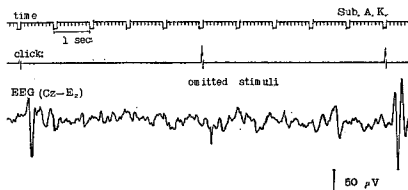


図6 omitted click 後のクリックに対する K-複合波高値の増大 (特に第III成分)。

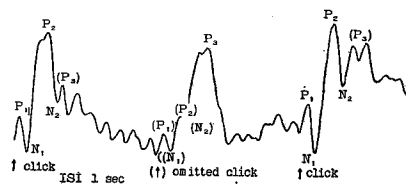


図7 覚醒時の omitted click に伴う P₃ 成分の出現。ISI 1sec, P₁~N₂ 成分は不明瞭となるが P₃ が出現するようになる。

る。そこで我々は ISI を 1sec とし覚醒並びに睡眠中の omitted stimuli に対する AEP を分析した。その結果、覚醒時では omitted click に対する AEP の P_1 , N_1 , P_2 , N_2 の各成分に、その振幅を減ずるか又は不明瞭となるが、それまで出現していなかった P_3 が出現するようになった (図 7)。この現象は睡眠時の K-複合では、omitted click に対する第 I, II 成分は不明瞭となり、第 III 成分のみが条件づけられることと対応した。従って K-複合の条件づけの可能性と云う問題は K-複合の波形全体が条件づけられるのではなく、第 III 成分のみが可能であると考えべきであり、ここに従来の混乱があったと思われる。Picton と Hilliard は AEP を sensory evoked response 部分と perceptual decision complex 部分に分けて考えているが、K-複合の条件づけが可能なのはこの後者の部分であると考えられる。

IV. 考 察

睡眠中に Oswald ら (1960, 1961) は同一刺激量に対する K-複合が task irrelevant な場合よりも relevant な、あるいは meaningful な刺激で誘発され易いことをあげている (例えば睡眠中に様々な名前を聞かせて行くと、自分と関わりのある者の名前に対する K-複合が振幅を増す)。我々の実験でも睡眠中に課題を与えた場合の K-複合の波高値が増大することが確かめられた。しかし K-複合全体が大となるのではなく、第 III 成分の増大と潜時の短縮が特徴的であることが解った。この事は AEP 成分の分析における N_2 - P_3 の増大と対応している。マイクロスイッチ押しの可能な stage 1,2,3 (それぞれの達成率は 96,90,76%) では K-複合が出現しているが、それが不可能、又は困難な stage 4 (0%) と REM 期では (52%) 出現しなくなる。又、同じ REM 期でも急速眼球運動が生じていない時より生起している場合の方が AEP の波高値が更に小さくなる傾向があった。

以上の結果から K-複合の第 III 成分の増大 (AEP における N_2 - P_3 の増大) はどのような大脳の活動と解釈されるべきであろうか? 被験者が運動反応課題を与えられた場合にこの成分の増大が見られたのであるからこれは当然 sensory-motor 系の neural activity を示していると思われる。条件 B では、頭頂部脳波上に、運動活動ないし運動思考に関連あるとされているローランド速波様の律動が条件 A に比して多く出現した。そして後頭部ではこのような律動の相違は両条件下で見られなかった。しかし他方 K-複合第 III 成分の増大を AEP の P_2 - N_2 成分と同様に単なる覚醒水準の変動と考えることも出来る、と云うのは条件 B のような課題場面では覚醒水準は条件 A よりはるかに変動し易く、又、第 III 成分に後続する速波は覚醒水準の急激な上昇に伴って容易に出現する (図 1) からである。この場合先ず信号は皮質において分析を受け、次に皮質から遠心衝撃が網毛体に伝わり大脳覚度の全般的一時的上昇が生じ、これが第 III 成分速波の出現をうながして運動反応が可能となると考える。そして第 III 成分は覚醒水準の急激な上昇をもたらす賦活系の活動と対応していると仮定すれば、第 III 成分が出現しない stage 4 や REM 期では感覚刺激に対して覚醒水準は変化し難く従って運動反応も困難であることと一応は符合する。

かくしてここでも AEP 成分の心理・生理学的意味をめぐっての比較的困難な問題、即ち、AEP を変動させる因子において、覚醒水準、注意水準因子と他の要因をどのようにに区別するかと云う問題 (e. g. Karlin, 1970) が生じる。

しかしながら現段階ではこの両者は現実には常に密接に関連しており、必ずしも分離はし得

ないと思われる。従って K-複合 第Ⅲ成分の増大 (AEP の N_2-P_3 の増大) は sensory-motor 系の neural activity, 及び arousal level の急激な上昇をもたらす賦活系の活動の双方を示しているものと考えらるべきであろう。

次に、ヒトのオペラント行動は意識水準の相違によって、どのような変容をうけるであろうか。覚醒水準の低下は生体の運動反応成績を漸次低下させ、反応時間を遅くする。NREM 期では睡眠深度に対応して、かかる反応成績は比較的単純に推移しデータ間に大きな差異は見うけられない。しかし REM 期に関しては単純な睡眠深度の測定実験においてすら異なっていることがある。人名を刺激に使用した場合と条件づけを用いた場合でも異なる。

筆者は以前 (菅原, 1974) 眼瞼反射の条件づけを用いて条件反応 (CR) が覚醒水準の相違により、どのような変化を示すかを調べたことがある。その際 NREM 期においては、睡眠深度が深まる程 CR は出現しにくくなるが、覚醒から睡眠への移行期に 陽性条件刺激 (CS+) と 陰性条件刺激 (CS-) に対する条件反応が逆説的に生起することがあることに気づき、Pavlov の逆説相 (paradoxical phase) との関係で論じた。REM 期が Pavlov の等質相 (equilibrium phase) や逆説相と結びつくとは思えないが、NREM 期に比して、極めて異質の刺激処理過程をたどるようである。今回の実験では REM 期において 52% 運動反応が可能であったが、500 Hz と 1000 Hz を弁別して反応することは殆んど出来なかった。このような現象は他の睡眠段階では起こらないことであり反応が可能な場合には弁別も可能であった。これは、REM 期は stage 4 を除けば最も運動反応が困難で反応時間も遅く、睡眠深度が深いからであると云う理由だけでは説明がつかない。と云うのは、HR や FP (Plethysmograph) を指標として CS+ と CS- に対する反応の違いを各睡眠段階で調べると、stage 4 でも CS+ に対する反応は CS- に対してより増加するが、REM 期では弁別が出来なくなる。しかし条件づけではなく人名のような刺激に対する REM 期の反応は、自己に関わりの強い名前に対してはるかに感度が高く、明瞭な弁別を示す (e. g. McDonald et al., 1975)。これらの与えられる刺激の種類によって、各覚醒水準における反応の質的違い (特に NREM 期と REM 期の相違) が生じる現象をどのように整理して考えればよいであろうか。

おそらく REM 期においては睡眠直前の運動反応教示や条件づけのような短期記憶 (short-term memory) は容易にこわれ易く、反応も統一性を欠き易い一方、人名のような長期記憶 (long-term memory) に関しては比較的統一性を持つ反応が可能なのであろう。

NREM 期においてはいわゆる short-term memory と long-term memory といった刺激種類の差によって反応が著しく異なるといった現象は生じにくいと考えられる。

V. 結論と要約

1. 睡眠中 (特に stage 2,3) に聴覚刺激によって誘発される K-複合は AEP と同一の成分を有し、AEP 成分の心理・生理学的意味の分析に有効である。

2. AEP 後期成分の心理・生理学的意味については未だ不明確な点が多いが、睡眠中の運動反応の成立は K-複合 第Ⅲ成分 (AEP の N_2-P_3 成分) の波高値の増大と対応しており、この成分が出現しない睡眠段階では運動反応も不可能なことが多い。それ故、睡眠時における感覚刺激入力に対する K-複合 第Ⅲ成分の増大は、sensory-motor 系の neural activity の変化、及び arousal level の急激な上昇をもたらす賦活系の活動を示すものと考えられる。

3. 感覚間条件づけが誘発電位上で可能なのは 300msec 以降の後期成分のみである。
4. REM 期においては、睡眠直前の運動反応教示や条件づけのような短期記憶は、NREM 期に比して消去され易い。

References

- 1) Brogden, W. J.: Sensory conditioning measured by the facilitation of auditory acuity. *J. exp. Psychol.*, 40; 512-519 (1950).
- 2) Brogden, W. J. and Gregg, L. W.: Studies of sensory conditioning measured by the facilitation of auditory acuity. *J. exp. Psychol.*, 42; 384-389 (1951).
- 3) Chapman, R. M. and Bragdon, H. R.: Evoked responses to numerical and non-numerical stimuli while problem solving. *Nature*, 203; 1155-1157 (1964).
- 4) Dawson, G. D.: A summation technique for detecting small signals in a large irregular background. *J. Physiol.*, 115; 2-3 (1951).
- 5) Dawson, G. D.: A summation technique for the detection of small evoked potentials. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 6; 65-84 (1954).
- 6) Dement, W. and Kleitman, N.: Cyclic variations in EEG during sleep and their relation to eye movements, body motility, and dreaming. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 9; 673-690 (1957).
- 7) Ellson, D. G.: Hallucination produced by sensory conditioning. *J. exp. Psychol.*, 28; 1-20 (1941).
- 8) Kanoh, M. and Kitajima, S.: Some psychological determinants of alpha attenuation after patterned flashes. *J. Psychol.*, 82; 155-166 (1972).
- 9) Karlin, L.: Cognition, preparation, and sensory-evoked potentials. *Psychological Bulletin*, 73; 122-136 (1970).
- 10) McDonald, D. G. and Carpenter, F. A.: Habituation of the orienting response in sleep. *Psychophysiol.*, 12; 618-623 (1975).
- 11) McDonald, D. G., Schicht, W. W., Frazier, R. E., Schallenberger, H. D. and Edwards, D. J.: Studies of information processing in sleep. *Psychophysiol.*, 12; 624-629 (1975).
- 12) Metcalf, D. R., Mondale, J. and Butler, F. K.: Ontogenesis of spontaneous K-complex. *Psychophysiol.*, 8; 340-347 (1971).
- 13) 大熊輝雄, 中村圭佐, 林 秋男, 藤森正夫: いわゆる逆説波型と睡眠深度, *脳と神経*, 18; 49-56 (1966).
- 14) 大熊輝雄, 中村圭佐, 林 秋男, 藤森正夫: 睡眠のポリグラフ的研究 —— とくに睡眠深度の問題について, *神経研究進歩*, 10; 113-122 (1966).
- 15) Ornitz, E. M., Ritvo, E. R., Carr, E. M., Panman, L. M. and Walter, R. D.: The variability of the auditory averaged evoked response during sleep and dreaming in children and adults. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 22; 514-524 (1967).
- 16) Ornitz, E. M., Ritvo, E. R., Carr, E. M., La Franchi, S. and Walter, R. R.: The effects of sleep onset on the auditory averaged evoked response. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 23; 335-341 (1967).
- 17) Oswald, I.: *Sleeping and Waking*. Elsevier, N. Y., (1962)
- 18) Oswald, I., Taylor, A. M. and Treisman, M.: Cortical function during human sleep. *Ciba Foundation Symposium on the Nature of Sleep*. J. & A. Churchill Ltd., London, (1961).

- 19) Oswald, I., Taylor, A. M. and Treisman, M.: Discriminative responses to stimulation during human sleep. *Brain*, 83; 440-453 (1960).
- 20) Pampiglione, G. and Ackner, B.: The effects of repeated stimuli upon EEG and vasomotor activity during sleep in man. *Brain*, 81; 64-74 (1958).
- 21) Pavlov, I. P.: Lecture of conditioned reflex. International Pub., N. Y. (1928).
- 22) Picton, T. W. and Hillyard S. A.: Human evoked potentials. II. Effects of attention. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 36; 191-200 (1974).
- 23) Regan, D.: Evoked potentials in Psychology, Sensory Physiology and Clinical Medicine. Wiley-Interscience, (1972).
- 24) Roth, M., Shaw, J. and Green, J.: The form, voltage distribution and physiological significance of the K-complex. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 8; 385-402 (1956).
- 25) 菅原正和：人格変換の生理心理学的基礎機構——Hypnotic phase に於けるCR逆転相の脳波学的研究——。北大教育学部紀要, 23; 425-434 (1974)。
- 26) 菅原正和：睡眠移行期の誘発電位。日本心理学会第39回大会発表論文集, (1975)。
- 27) Sutton, S., Braren, M. and Zubin, J.: Evoked potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, 150; 1187-1188 (1965).
- 28) Sutton, S., Tueting, P., Zubin, J. and John E. R.: Information delivery and the sensory evoked potentials. *Science*, 155; 1436-1439 (1967).
- 29) Weitzman, E. D. and Kremen, H.: Auditory evoked responses during different stages of sleep in man. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 18; 65-70 (1965).
- 30) Williams, H. L., Hammack, J. T., Daly, R. L., Dement, W. C. and Lubin, A.: Responses to auditory stimulation, sleep loss and the EEG stages of sleep. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 16; 269-279 (1964).
- 31) Williams, H. L., Morlock, H. C., Morlock, J. V. and Lubin, A.: Auditory evoked responses and the EEG stages of sleep. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 112; 172-179 (1964).
- 32) Williams, H. L., Tepas, D. T. and Morlock, H. C.: Evoked responses to clicks and electroencephalographic stages of sleep in man. *Science*, 138; 685-686 (1962).