

7 脳波(EEG)と体性感覚誘発電位(SEP)

本実習項目では、ヒトの脳波の記録体験と、脳波の取り扱いに慣れ、脳波の各種成分、脳波の発生機序について学習し、さらに、体性感覚誘発電位の記録を行なう。

(1)脳波 Electroencephalography (EEG)

活動している脳の電気現象を頭皮上においた電極から導出し、これを脳波計に増幅記録したものを、脳波 (Electroencephalogram) という。その変動は主として 1~100Hz の正弦波要素からなり、電圧は数百 μ V 以下である。動物種差、個人差が大きく、同一個体でも睡眠や覚醒、感覚的・心理的刺激等により強く影響される。脳波は通常、図 1 のように分類される。

δ 波と θ 波を slow wave (徐波)、 β 波を fast wave (速波) ともいい、その電圧の高さにより、high voltage、low voltage と呼ぶこともある。臨床的には、癲癇(Epilepsy) の診断、意識状態の確認、脳死の判定などに重要な意味を持つ。

a. 目的

ヒトの頭皮上から自発性脳波を導出記録し、正常脳波の特性を修得する。脳波と雑音や人工産物 (artifact) との識別を知ること大切である。

b. 実験準備

脳波計(Electroencephalography)を用いる。脳波計の時定数(Time constant; τ) は 0.3 秒 (基線が動揺して記録しにくい時は 0.1 秒とするが、生体電気現象の徐波成分の大きさは減少する) とし、高域フィルターは使用しない。しかし交流障害を除去するために 60Hz カットのフィルターを入れることがある。この時は速波成分の大きさが減少する* (この理由を考えよ、

記録の紙送り速度は 30mm/sec と決められている。また増幅度は 50 μ V/5mm が標準であり、実験の開始時と終了時及び装置の時定数や高域フィルターあるいは増幅度などを変更した時には校正電圧を記録しておくことが大切である。脳波計の調整が正しく行われたかどうかを知るには、実際の記録条件と同じ条件で校正電圧を記録して、その振れが 5mm で指数関数的に基線へ戻り、振れの高さが約 $1/3(1/e)$ に減衰するまでの時間が 0.3 秒 (時定数) であればよい (図 2)。10 チャンネルすべてのペンの振れが揃っていることも確かめておく。

銀円板皿電極を電極糊で頭皮上に国際 10-20 法 (ten-twenty electrode system) の部位のうち以下の観察に適した部位に装着する (図 3)。被検者は座位をとり、この部位の頭皮上にサインペンであらかじめ印を付けておくと装着しやすい。アース電極は眉間(Fz)と耳朵(A1,A2)につける。電極の装着部位と対応した入力箱の数字記号の

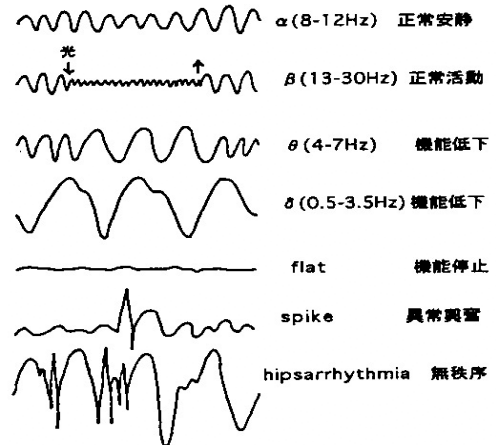
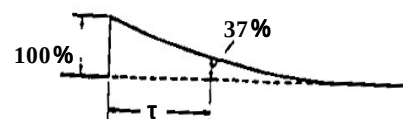


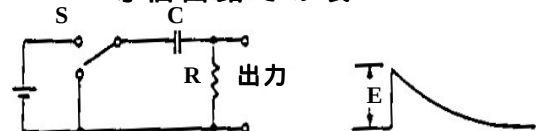
図 1 : 脳波の種類と脳機能

時定数 (Time constant) の測定

校正曲線の振幅値 E が $1/e(37\%)$ になるまでの時間 (τ)



等価回路での表



時定数 (τ) = $C \times R$ で決まる。時定数が短いほど周波数の低い成分は早く減衰する。

図 2 : 時定数

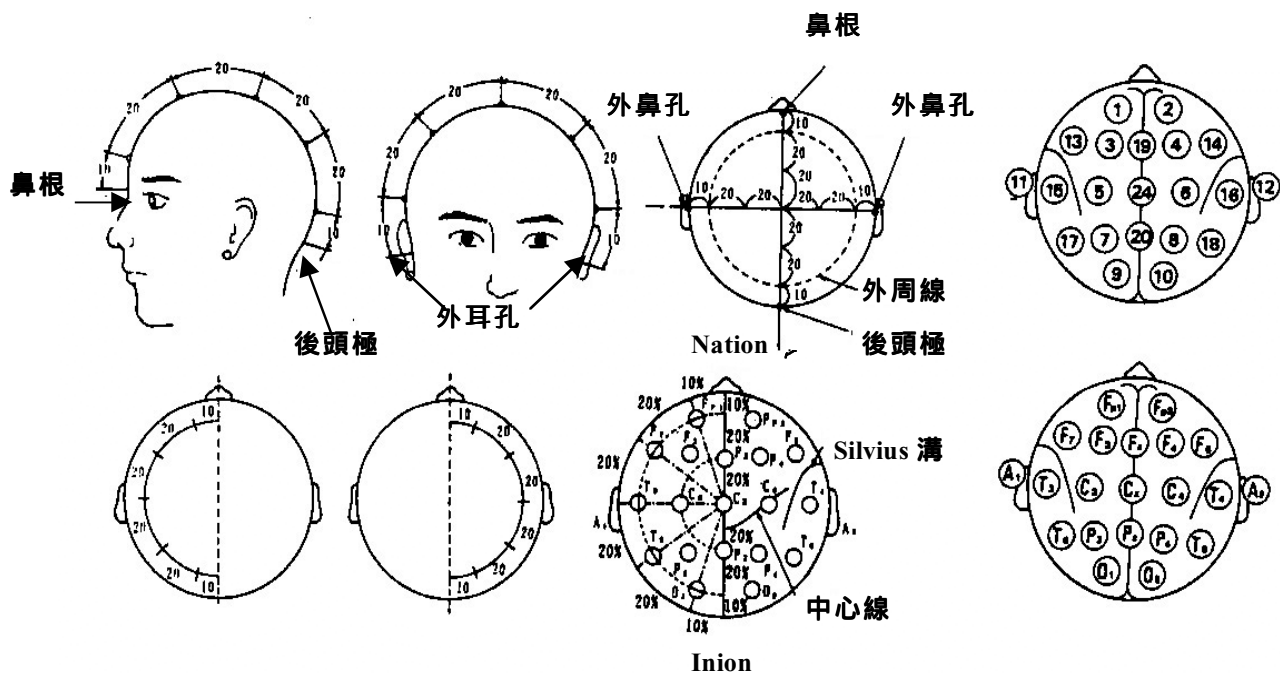
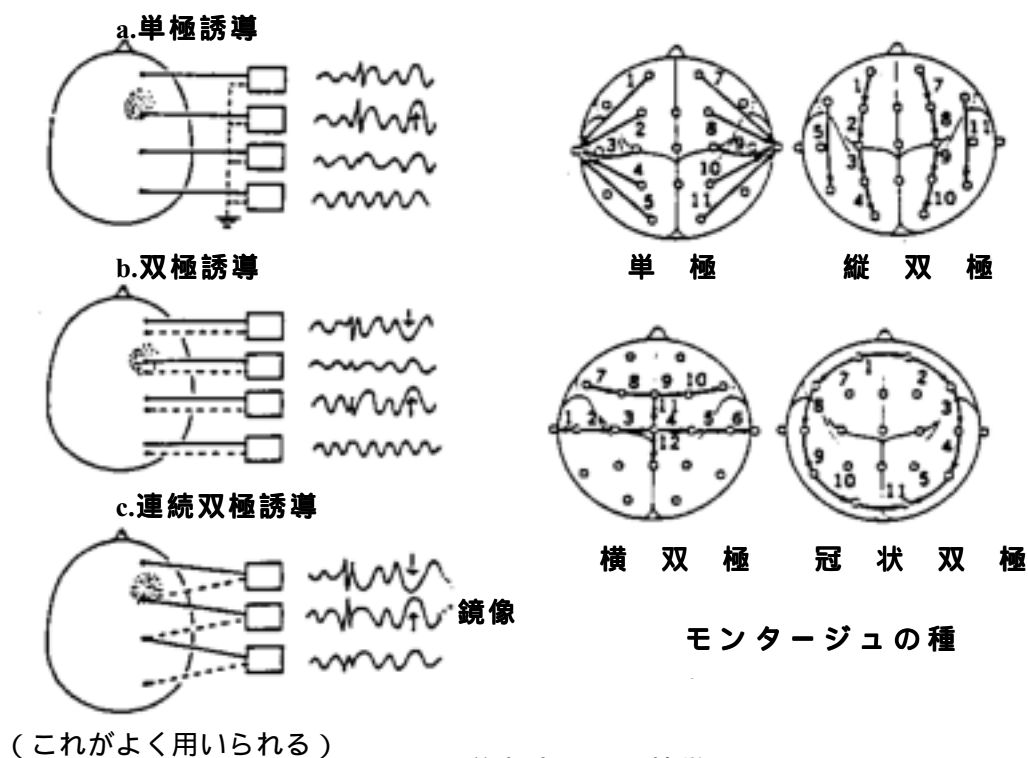


図 3：10 - 20 法による電極配置と計測法

端子に電極のリード線を接続する。

導出法には、心電図の場合と同様に、基準電極を設定する単極導出と、2つの電極間の電位差をみる双極導出とがある（図 4）。目的に応じて必要な導出法で記録する。一般に、双極誘導は記録部位以外の部分からの電位変化を相殺するので、電位現象の振幅が小さくなるが、局所の変化を捕捉しやすく、図 4 に示すように障害部位を同定しやすい（特に連続双極誘導の場合、位相の逆転により検出できる）。



（これがよく用いられる）

図 4：導出法とその特徴

銀円板電極を付ける時の注意（図 5）

- 1) 電極の接触抵抗を下げるため、皮膚及び毛髪の付け根をスキンプュアーなどでふき、浮いた脂肪分を乾いたガゼでよくふきとる(電極接着抵抗は 20 K Ω 以下が望ましい)。
- 2) 直径 10mm 位にペーストをすりこむように塗る。
- 3) 電極をペーストで包むように塗り、装着面に張り合わせるように載せる。
- 4) 耳朶、無毛部は絆創膏などで固定する。電極を強く押さえると金属部が直接皮膚にふれ、分極電圧を発生する恐れがあるので注意すること。
- 5) 電極リードのチップを入力箱の ELECTRODE 端子に接続する。
- 6) 電極抵抗を測定し、20 K Ω 以上の時は付け直すこと(チェックボタンを押し確認)。
- 7) 被検者は頭皮、頭髪を清潔に保っておくこと。

注意：実験終了後は、器具・装置の整理が大切である。使用した電極は微温湯で洗浄し、ティッシュで拭いて乾燥させる。次の実験者が正しく使用できるように、器具を整備しておく必要がある。

記録電極の種類

1. 皿電極（一番良く使用）
2. コロジオン膜（長時間記録用）
3. 針電極（肝炎などの感染に注意）

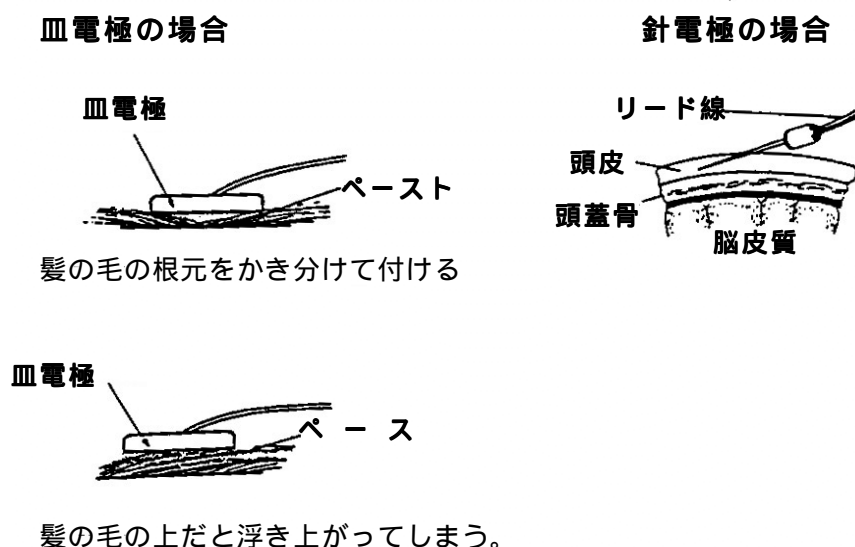


図 5 記録電極の付け方

c. 実験中のアチファクト(artifacts；人工産物)について

実験操作中に様々のアチファクトが混入して脳波との識別が必要となる（図 6）。これらの人工的な現象を直ちに取り除く手段を講じなければ良い脳波記録は得られない。脳波計そのものから発生する内部雑音は（INST のスイッチを入れて）入力を短絡しても消失しない。この場合は脳波計そのものの点検が必要

である。外部雑音として、漏洩電流、静電誘導、電磁誘導などによる雑音があり、これらは交流源による 60HZ であるのすぐわかる（図 6）。また電極や電極装着の不良によって基線が急に大きく動揺することもある。

被験者に由来するアチファクトとしては、体動や筋活動、まばたきと眼球運動などによるものや、発汗による電極接触抵抗の変化に由来するものがあり、また皮膚電気反射や心電図の混入などがある。

d. 実験操作及び記録方法

1) 基礎律動の記録

まず単極導出で閉眼安静時の脳波を記録して、基礎律動、特に α 波の分布、局所差、左右差などについて観察する。 α 波は 8~13Hz の波で、出やすい人と出にくい人がある。(記録部位は例えば Fp1, Fp2, F7, F8, C3, C4, P3', P4', O1, O2 の 8 ケ所とする)

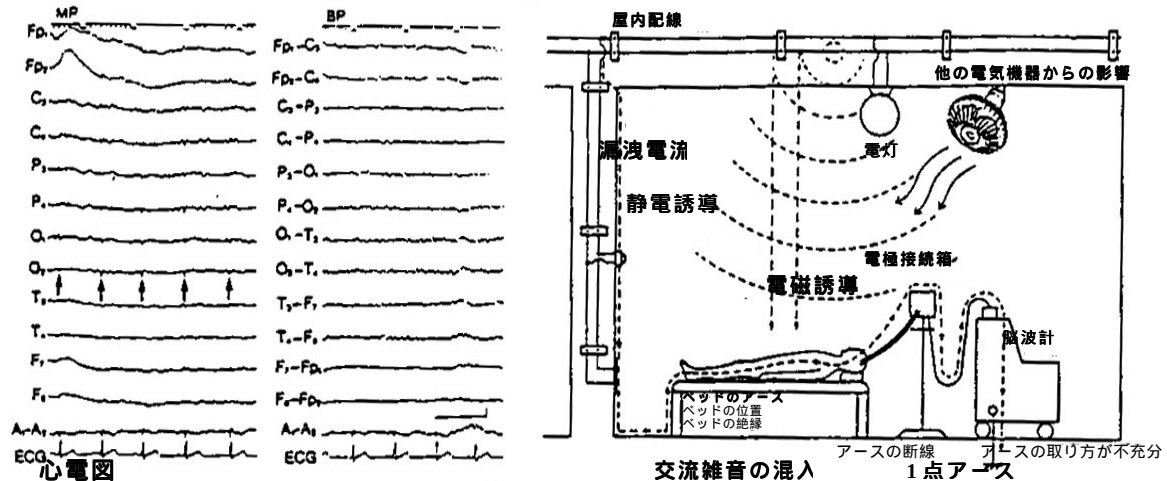


図 6：アーチファクトの例とその原因

2) 脳波賦活法

a) α 波抑制(α -blocking, α -attenuation)による脳波変化

α 波が連続して出ている時に開眼を指示すると、 α 波は振幅の小さい周波数の高い β 波に変化することを観察する。この開眼・閉眼を 10 秒毎に繰り返す。 β 波の周波数は平均 18Hz である。この α 波の抑制効果が少ないときは眼前の物を凝視させてみる。また閉眼のまま簡単な暗算をさせても、同様の α 波の抑制効果が起こる。

開眼あるいは暗算開始から α 波抑制出現までの潜時を記録紙より測定する(α 波抑制時間)。

開閉眼による異常： α 波の残存

肝性脳症などによる意識障害や narcolepsy、dementia で見られることがある。逆説的 α 波抑制(paradoxical α blocking)という。

b) 閃光刺激(photoc stimulation)による脳波変化

通常閉眼で、覚醒した状態で行う。ストロボを低周波から順に 2 ~ 3 Hz 感覚で 30 Hz 程度まで行う。photoc stimulation による正常な反応として、左右の後頭部に光駆動反応(photoc driving response)が出現する。これには、その出現周波数により、被験者の背景脳波に近い周波数での反応である、基本同調駆動反応(fundamental driving)や、その整数倍の高次同調駆動反応(harmonic driving)、整数分の一の低次同調駆動反応(subharmonic driving)などがある。このような駆動反応は被験者の背景脳波に近い周波数(8 ~ 13 Hz)の刺激に最も良く反応する。

光刺激による異常波の誘発

光駆動の反応の異常：欠如、左右差などがアルコール依存症などで見られる。

光痙攣反応(photoconvulsion response)：棘波や棘徐波複合の誘発。

前頭部有意に、棘波様反応が出現。光ミオクロニー反応(閉眼により消失)

発作波の誘発：光原性癲癇(photogenic epilepsy)

c) 過呼吸(hyperventilation)

20～30回/分のペースで3分間深呼吸を行い、脳波の変化を観察する。過呼吸をすると、ある時点から脳波は徐波化して振幅が増大する(build up)。前頭部優位で左右対称に出現し、小児で頻度が高い。これは過呼吸により、 P_{CO_2} の減少(hypocapnea)や脳血管抵抗の増大によると考えられている。過呼吸終了後2～3分は回復過程を観察する。正常では30秒以内に元に戻る。2～3分後も持続するなら(rebuild up)、異常を疑う。

過呼吸賦活で誘発される異常：癲癇特に欠神発作(petit mal)で見られる spike and wave(3Hz)を誘発するのに有効。

d) 睡眠賦活(sleep activation)

睡眠時脳波は覚醒時では現れにくい異常波が出現するので重要な賦活法。紡錘波(spindle wave)が出現する stage 2 までの浅い睡眠の時期に異常波が出現しやすい。

睡眠深度の分類には種々あるが、現在では Rechtschaffen & Kales の分類が良く用いられている(図7)。睡眠深度は大きく non-REM 睡眠(徐波睡眠、slow wave sleep)と REM 睡眠(rapid eye movement)に分けられる。non-REM 睡眠は stage 1～4に分けられ、背景脳波活動は、軽睡眠期(stage 2 まで)では、低振幅徐波傾向が見られ、睡眠深度が深まるにつれて高振幅徐波化して行く。低頻度高振幅波(δ wave range で振幅 $75 \mu V$ 以上)は、丘波(hill wave)と呼ばれるが(図8) この出現を中等度睡眠(stage 3)とし、連続してくると深睡眠(stage 4)とする。

脳波的特徴		Gibbs 分類 (1950)	分類分類 Rechtschaffen & Kales (1968)
低振幅徐波(興奮) ↓ α波(安静) ↓ θ波(睡眠)	覚醒期		W
α波消失、平坦波型、 低振幅θ波、波状	浅睡眠期	drowsiness	1
頻数減衰波(細波)	(軽睡眠初期)	very light sleep	
紡錘波とK波合併、 背景は中等度徐波徐波	軽睡眠期	light sleep	2
紡錘波と高振幅徐波	中等度睡眠期	moderately deep sleep	3
高振幅徐波の連続、 紡錘波(-)	深睡眠期	deep sleep	4
低振幅θ波、波状と 急速眼球運動の出現	REM 睡眠期	early morning sleep	stage REM

Stage W: 覚醒時、低振幅速波。

Stage 1: α wave の消失, 低電位の θ wave が出現し、両側中心部に瘤波が出現。

Stage 2: θ wave に加え、睡眠紡錘波が出現。音刺激に対し K-complex の出現。

Stage 3: 丘波の出現が 20-30%。

Stage 4: 丘波の出現が 50%以上。

REM (stage REM): 急速眼球運動(rapid eye movement)の出現と筋緊張の低下。脳波は stage 1 に似る。

図7：睡眠段階の分類

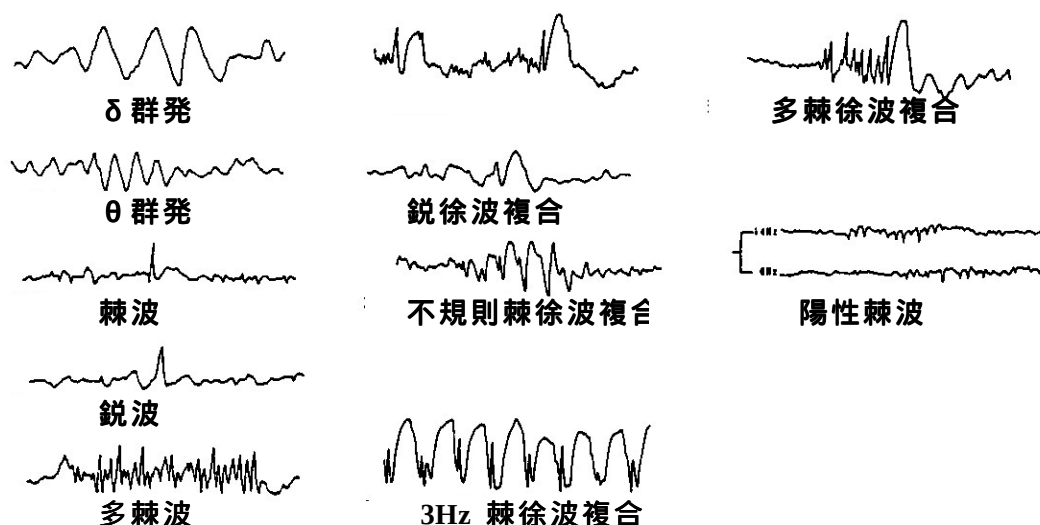


図8：各種の突発脳波

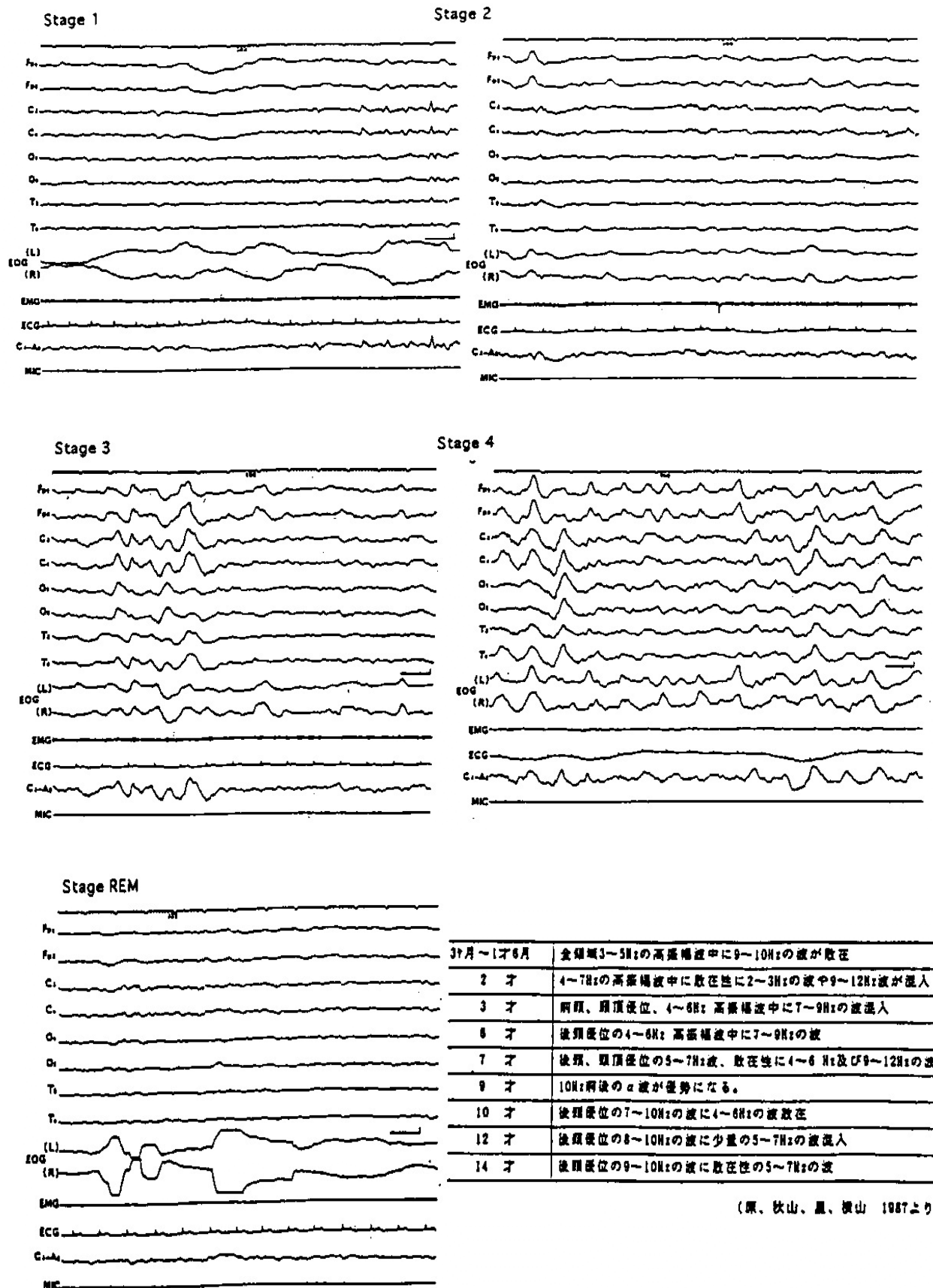


図9：睡眠各段階での脳波の例と小児脳波の特徴

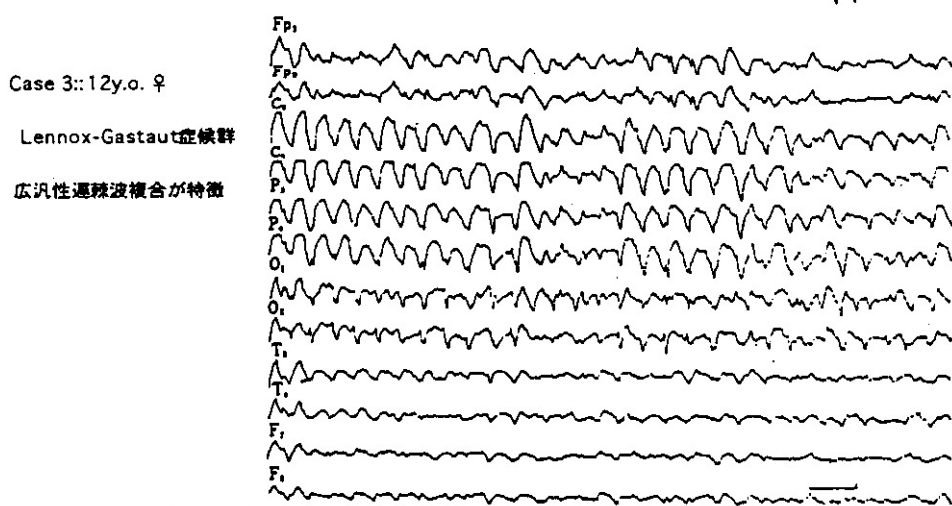
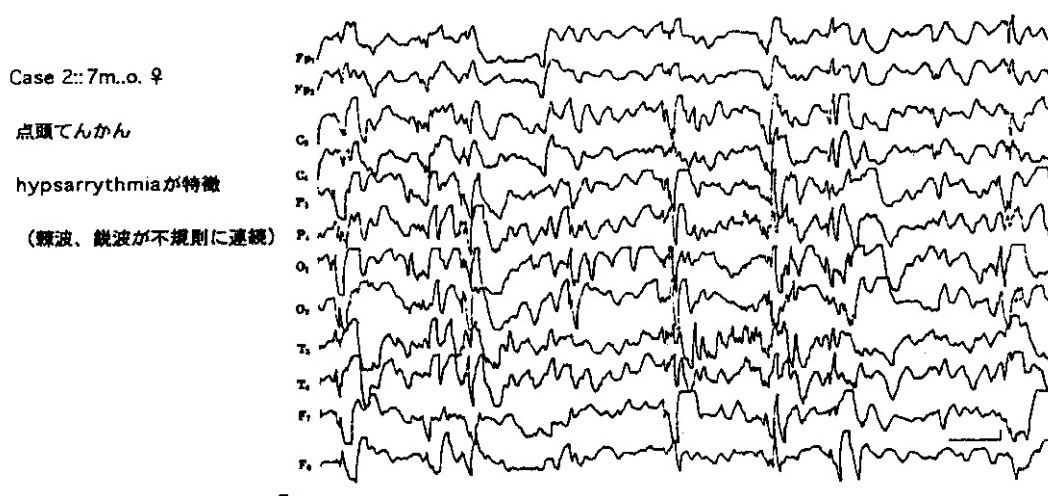
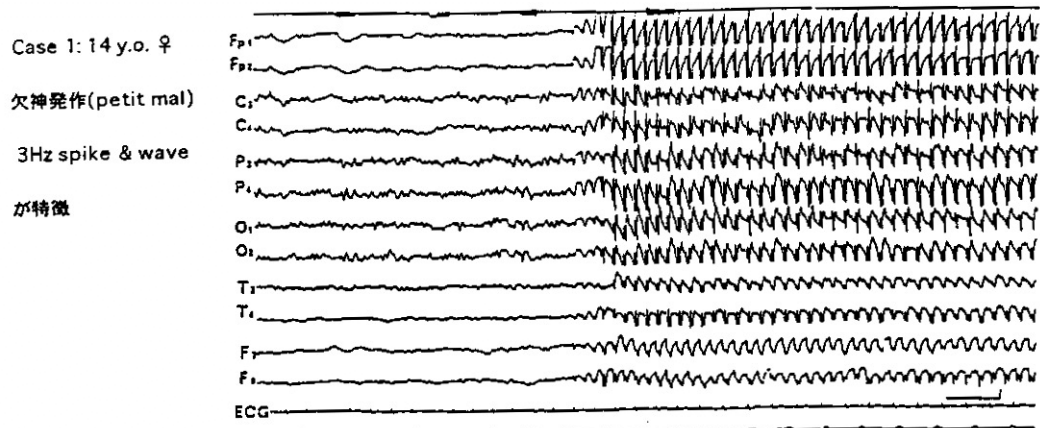


図10：異常脳波の例

【設問】

- 問1 成人に普通みられるα波優勢の脳波について、その成因と後頭部に優位に出現する機序について調べよ。
- 問2 自分の脳波記録の中で、各種の突発脳波の出現部位と種類をまとめよ。
- 問3 α波抑制(持続)時間と反応潜時(刺激からのα波抑制出現まで)との関係について考察せよ。
- 問4 脳波の双極導出の特徴を述べ、それぞれの長所短所について考えよ。

問5 生体に由来するア・チファクトの混入の機序について考察せよ。またその除去方法を考察せよ。

(2) 体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potential, SEP)

a. 目的

視覚、聴覚、あるいは体性感覚などの刺激により、その求心路さらに一次感覚野などに極めて小さい電位変化が発生する。しかしこの変化は小さすぎて通常の脳波記録では背景脳波に埋没してしまい観察できない。そこで加算平均法を用いて背景脳波を平均化して消滅させ、128～1024回の加算により増幅された電位変化を観察する。この電位変化のうち頭皮上の記録電極で導出される電位として近接(near-field)及び遠隔(far-field)電場電位の2種類がある。近接電位は大脳皮質(感覚野)の電位変化であり、遠隔電位は感覚求心路における電位変化が、容積伝導により広く分布したものを頭皮上から記録するものである。本実習では体性感覚刺激として、末梢神経の電気刺激を用いて誘発される短潜時の誘発電位を中心に観察する。加算回数は1Hzの頻度で200～400回とする。

b. 器具・装置

感覚神経の伝導速度の場合と同じような測定機器を用いるが、加算回数を多くできることと、S/N比の高い装置であることが必要である。今回の実習では、storage oscilloscope (日本光電 VC-10 又は 11)と、加算装置(DAT-1100)、ペンレコーダを用いる。

c. 実験方法

体性感覚刺激として、正中神経を直接電気刺激する。方法は感覚神経における逆行性の伝導速度計測の場合と同様にして行うが、その部位は手関節の近位部とする(図11)。

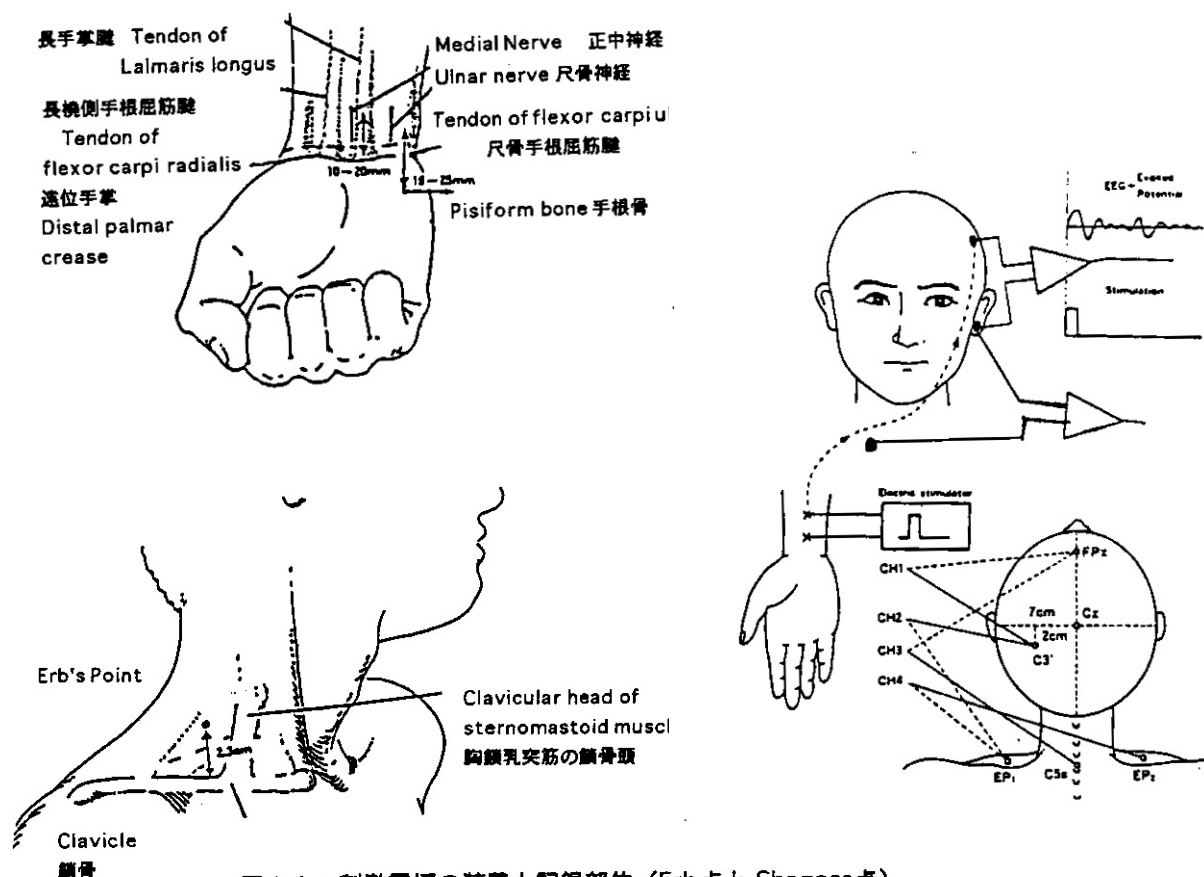


図11：刺激電極の装着と記録部位（Erb点とShagass点）

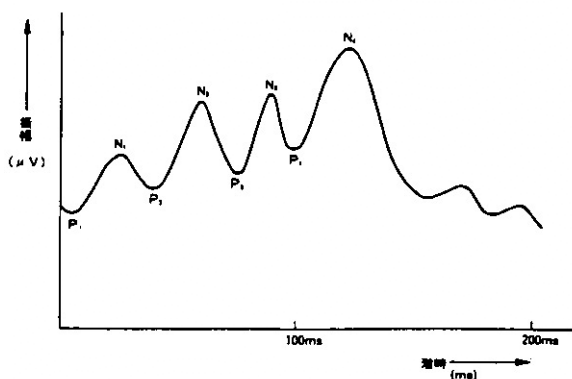
誘発電位の導出は、記録電極として表面電極を頭皮上に装着する。その部位は関電極を第一次体性感覚

野の手の領域に対応する頭皮上（C3 または C4 の 2cm 後方, Shagass 点）に置き（R1）、不関（基準）電極を眉間（Z）とする（耳朶を基準電極とすることもある）。さらに脊髄後根からの求心路における近接電位の記録のために鎖骨上窩（Erb 点）に関電極を装着し（R2）、不関（基準）電極は Z 点とする。記録したい部分を電極箱の - 極、Z 電極を + 極、接地電極（腕）を E につなぐ。増幅度は $5 \sim 20 \mu\text{V}/\text{div}$ とし、掃引速度は $10 \text{ msec}/\text{div}$ 位で観察する。加算回数は 200 回位とする。観察される誘発電位は加算回数の増加とともに増大していき、逆に背景脳波や雑音は平均化されて次第に小さくなる。この変化を確認しながら実験を進める。同一の方法で出来れば 2 回以上記録をとり、再現性を確認する。

d. 記録の分析

得られた記録の各波形を同定しその名称を付ける。さらにそれらの潜時を測定し、求心路における各部位との対応を考えてみる。記録波形の名称の付け方には、潜時の短い順に番号を付ける方法と、潜時を波形に付ける方法とがある（図 1 2）。記録波形は通常上向きを負にとる。

潜時の順に番号を付ける方法



潜時を波形に付ける方法

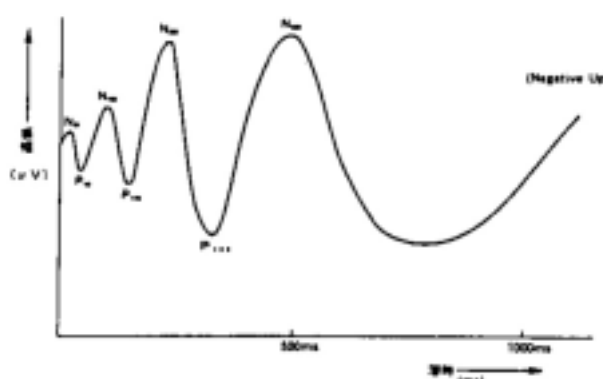
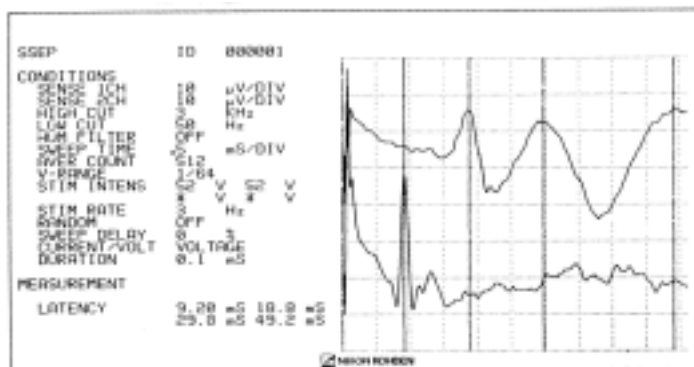
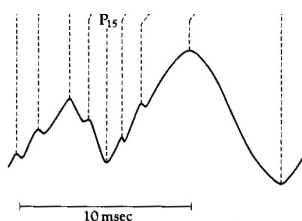


図 1 2 : 波形の名称の付け方



Erb's 点, Shagass の点よりの導出例



N₉ - 上腕神経叢
N₁₁ - 後 索
N₁₃ - 楔状束核
N₁₄-P₁₅ - 内側毛帯
N₁₆ - 視 床
N₁₇ - 視床皮質放線
N₂₀ - 第一次性感覚皮質
P₂₅ - ?

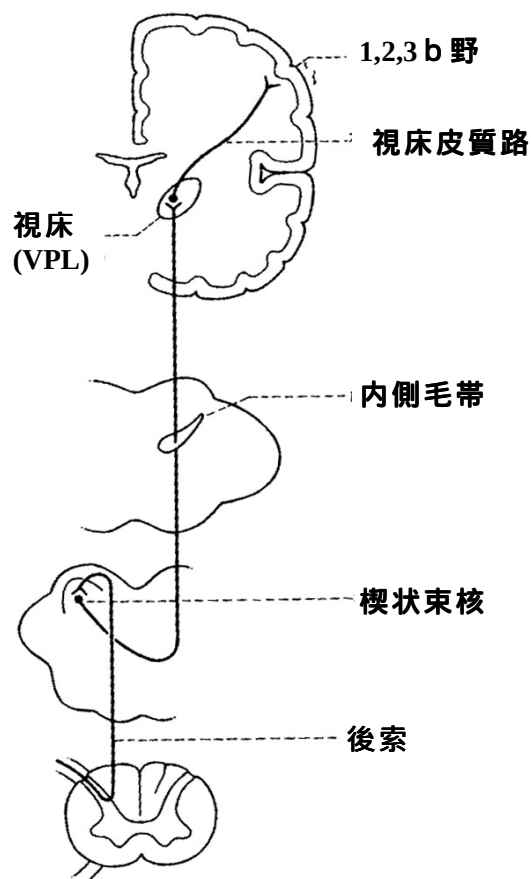


図 1 3 : 正中神経刺激による体性感覚誘発反応の正常波形とその発生源

基準電極を頭部外におくと、遠隔電位 SEP(far-field SEP)を記録することになる。これは、上行性活動電位を容積伝導により広がったものを記録することになる。

e . SEP 検査が診断上有用な疾患

感覚伝導路が障害を受けていると、その部位より中枢での誘発電位が変化する。例えば、多発性硬化症、脳血管障害、脊髄小脳変性症など脊髄後索の障害疾患や末梢神経障害の診断に有効(図 1 4)。

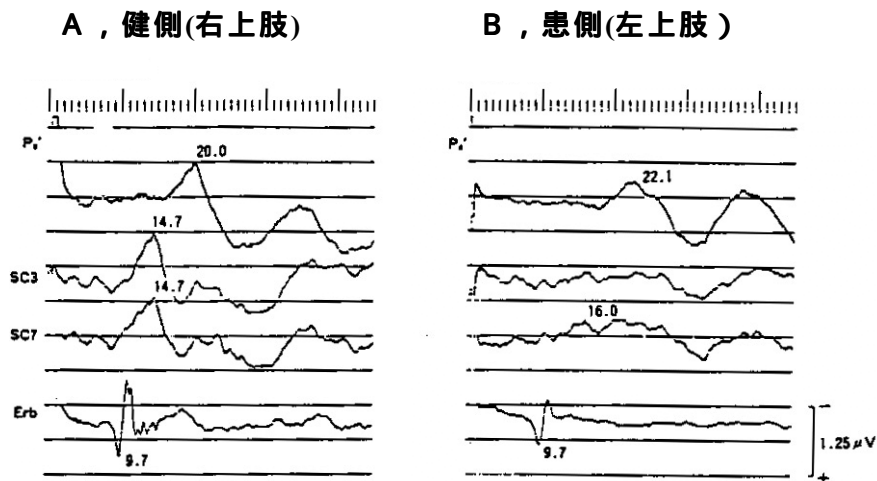


図 14 : 上腕神経叢、神経根損傷例

f: その他の加算平均を用いて明らかになる皮質電位

1) 事象関連電位(Event related potential: ERP)

ERP は、ある課題を被験者に課したとき種々の精神作業の負荷によって生ずる反応の総称。

a) P300 (図 1 5)

課題関連刺激を、呈示頻度の高い非標的刺激と呈示頻度の低い標的刺激(この時被験者はボタン押しなどの作業を行う。)を与えたときに誘発される長潜時陽性電位(潜時 300ms あたりに出現)。記録電極は頭頂正中部に置く。

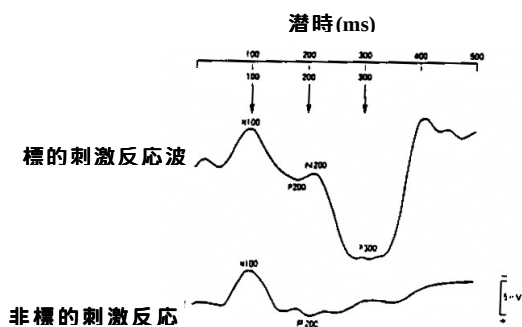


図 1 5 : P 3 0 0 の記録例

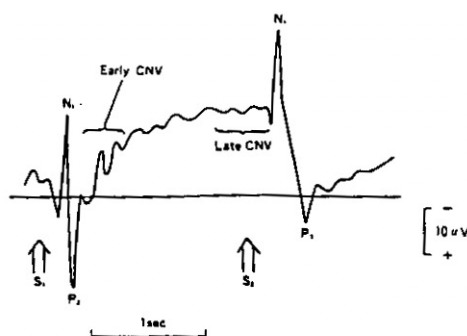


図 1 6 : Cz で記録された CNV

b) 随伴性陰性変動 (Contingent negative variation: CNV) (図 1 6)

警告刺激(warning stimulus, 第一刺激)と命令刺激(imperative stimulus, 第二刺激)を一定の間隔で一対呈示し、S 2 が呈示されたら出来るだけ早く応答するようにしたとき、S 1 - S 2 の刺激間隔に出現する緩徐な陰性電位。頭頂部で最大振幅を示す。課題から分かるように、予期、注意、動機付けなどの心理生理学的要因を反映。

c)運動関連電位(Movement-related cortical potential: MRCP, motor potential: MP)

随意運動時に、運動開始前に現れる成分と、運動開始後の成分に分けられる。これらのうち、運動準備電(Bereitschaftspotential, readiness potential) (図 1 7) が良く知られている。

【設問】

問 1 Sensory Evoked Potential (SEP) には、実習で行った体性感覚誘発電位の他にどんなものがあるか？

問 2 それらの伝導経路を考察せよ。

問 3 事象関連電位の意味について考察せよ。

(3) 脳波発生機序についての生理学的・解剖学的考察

脳波は皮質細胞に発生するシナプス電位の反映である。視床－皮質投射によるシナプス電位は EPSP として電位発生に関与する。IPSP はその平衡電位が静止膜電位に近いので、電場電位の形成には余り関与しない。また、活動電位は、その持続時間が短いので、特殊な状況（多数のニューロンが同期して発火するような場合；癲癇発作のような痙攣状態）以外では、やはり脳波には反映されにくいと考えられる（ 図 1 8 ）。

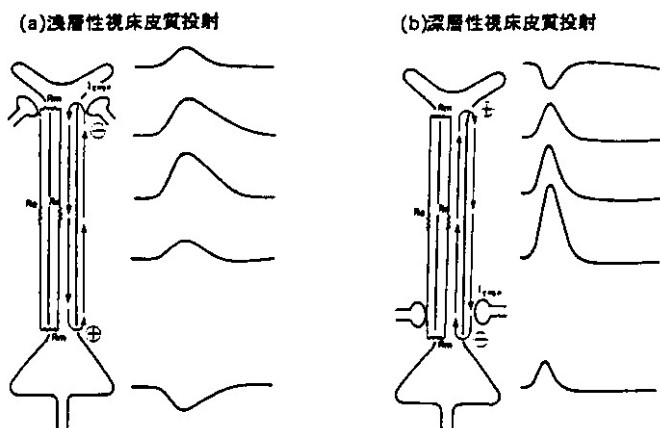


図 1 8 : 大脳皮質への 2 種類の視床投射と層的電場電位

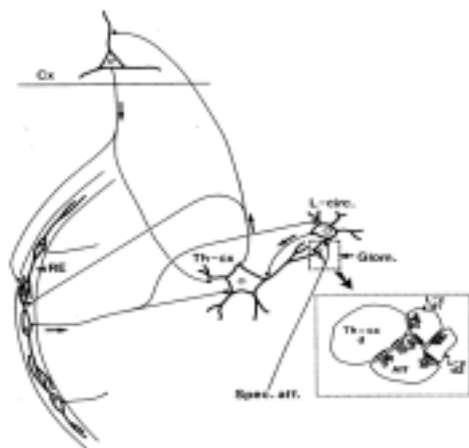


図 1 9 : 視床網様核の関与・線維結合と発火様式

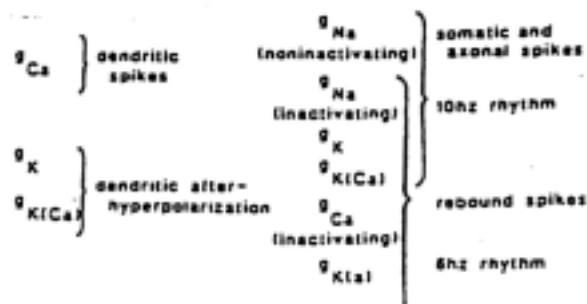
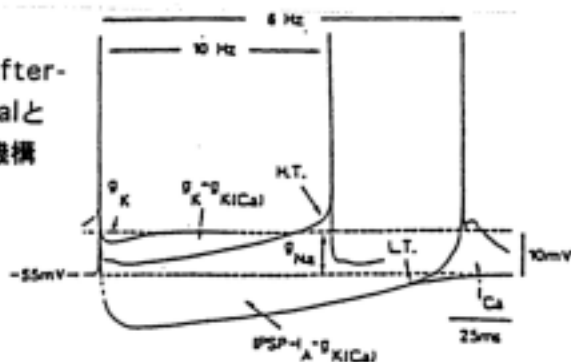


図20:After-potentialとイオン機構



かつては、視床内にある抑制性 neuron の視床皮質投射細胞への反回抑制がリズム形成に重要だと考えられたが、現在では、視床の周辺にある視床網様核（抑制性細胞）の関与が重要と考えられている（図 19）。

視床網様核と結合のある視床核細胞は、抑制性シナプス電位などの過分極応答により oscillation を起こすことが知られている（図 20）。

この視床網様核に対して、脳幹の reticular activating system と呼ばれている、cholinergic, monoamine neuron からの入力に影響を与える。Jouvet（仏）は、serotonin を含有する縫線核は non-REM 睡眠に、noradrenaline を持つ青斑核は REM 睡眠に関係するという説を提出している。

[memo]