

# 光環境刺激に対する脳波のダイナミクス

## Brain Wave Dynamics due to the light stimuli

九大工,<sup>A</sup>福工大 森 敏生,<sup>A</sup>山崎 秀樹, 甲斐 昌一

### はじめに

脳波はヒトの頭皮上から得られる数十 $\mu$ V程の非常に微小な電気信号であるが、脳の活動状態を反映し、ヒトの意識状態によりその電位振幅・周波数が大きく変化する。脳波はヒトの4種の意識状態が $\alpha$ 波、 $\beta$ 波、 $\gamma$ 波、 $\delta$ 波とそれぞれ周波数帯域で区分され、各脳波について研究がなされてきた。特に $\alpha$ 波は閉眼安静状態で他の脳波の発現を抑え後頭部優位に発生する周波数8~13Hzのリズミックでwaxing and waningと呼ばれる振幅増減を持つ非常に安定した波であり基本的な脳波と考えられる。しかし各個人固有の $\alpha$ 波周波数がありその性質はバラエティに富む。その為、 $\alpha$ 波は最も古典的な脳波リズムでありながらその理解は困難であった。

脳波そのものの発現機構は未だに確立されておらず、視床ペースメーカー説<sup>1)</sup>等いくつかの有力な説がある。本研究では、「部分と全体とがダイナミックに相補関係を有する」という複雑系研究の立場から、脳波の発現を取り扱う。脳波が外部からの周期的な光刺激によって引き込み現象を呈することはよく知られている<sup>2)3)</sup>。しかし、この問題は1997年に起こったポケモン騒動にも知られるようにコンピュータやテレビ等の明滅するディスプレイに接する機会の多い現代社会では、この光刺激による脳の引き込み現象の解明は臨床環境医学としても重要である。ここでは脳波の引き込み現象を複雑系として理解するために、この $\alpha$ 波の光刺激による入出力応答を調べた。この光刺激には間欠せん光刺激と連続変化ホワイトノイズ光刺激を使用した。特に間欠せん光刺激付加による $\alpha$ 波の引き込み現象は、非線形振動子としての $\alpha$ 振動子の特有な性質に起因した現象であると考えられる。この引き込み現象が脳内でどのように生じるか、そのダイナミクスの実験結果を示し、モデルを議論する。

### 実験方法

実験は健康な男子学生15名を対象として安静時、及び光刺激照射時の脳波を閉眼状態で採取した。脳波導出用電極の配置は国際式10-20電極配置法に従い、左右頭部上の前頭部Fp<sub>1</sub>・Fp<sub>2</sub>から後頭部O<sub>1</sub>・O<sub>2</sub>までの10部位を対象とし、両耳たぶを基準電極とした単極導出を行った。

図1に実験系ブロック図を示す。系はデータ取得系と刺激装置位相コントロール系より成る。これらより取得された脳波は12bit・サンプリング周波数500HzでAD変換され、オフラインで解析を行った。解析はFFT法によるスペクトル推定とComplex Demodulation法(以下CD法)<sup>4)5)</sup>を使用した。光刺激に

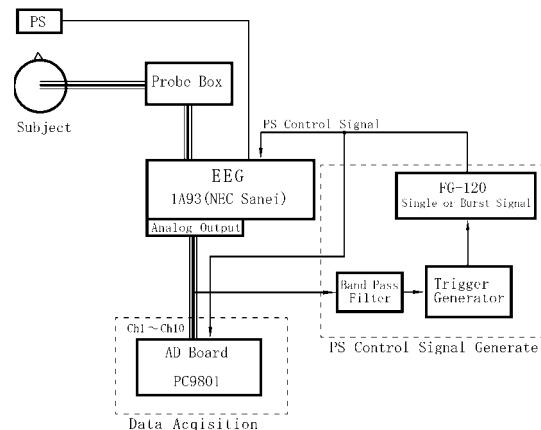


図1 実験系  
Experimental system

は脳波計付属のPS装置(間欠刺激)または高輝度白色LEDによる刺激装置(間欠刺激および連続刺激)を使用した。ノイズはノイズジェネレータ出力を30Hz低域通過フィルターに通し<sup>6)</sup>LED発光用にオフセットをかけた使用した。

## 実験結果

ここでは、顕著な結果が得られた2名の被験者(W, I)について実験結果を示す。また左右頭部の結果に大きな差異は無いので、優位脳と呼ばれる左頭部の実験結果について示す。まず被験者Wにおいて間欠光刺激周波数を8~12Hz, 0.5Hz刻みで提示した際の 波パワー/光刺激時パワー - 波周波数/刺激周波数(部位 $O_1$ )を図2に示す。図2においてパワー比0が引き込み状態を示し、刺激周波数が9~10.5Hzでこの状態を得た。この結果この被験者の引き込み範囲を9~10.5Hzとした。被験者の固有 波が10Hz前後であり、引き込みは被験者の 波の周波数近傍で生じることが分かる。

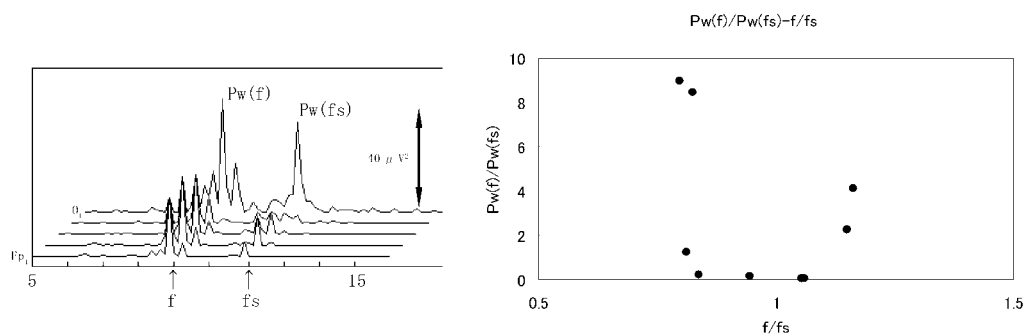


図2 波パワー/光刺激時パワー - 波周波数/刺激周波数( $f$ :刺激周波数,  $f_s$ : 周波数)  
PW ratio( rhythm/Light stimuli freq.) - Frq. ratio( rhythm/Light stimuli freq.)

次にCD法より得られた、この引き込み状態にある各部位における光刺激に対する相対位相を図3に示す。図よりせん光刺激周波数が高くなると光刺激に対する相対位相が大きくなって行くことが分かる。

被験者Iにおいて、被験者Wと同様に間欠光刺激による引き込みを呈するが、固有 波である10Hz近傍のみの狭い引き込み範囲であった。他の被験者においても同様の結果が得られたが、引き込み範囲は被験者により異なった。これから、振動子の性質や振動子間の結合に個人差があると考えられる。

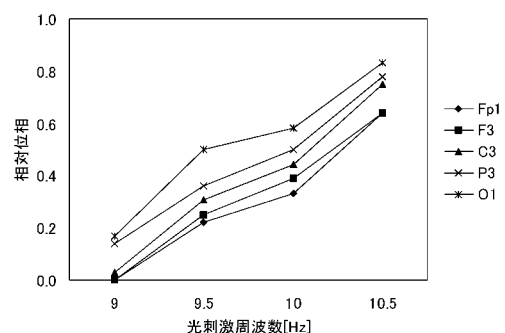


図3 光刺激周波数に対する脳波の相対位相  
Relative phase to the light stimuli

さらに、被験者Iに対してはノイズ光刺激付加実験を行った。図4に光刺激直前及び光刺激中のパワースペクトルを示す。後頭部位 $P_3, O_1$ において、被験者本人の固有 波の周波数に顕著なパワースペクトル値の増加が認められる。またこの結果が得られるのはある特定範囲の平均ノイズ光強度であり、最適ノイズ光強度が存在すると考えられる。しかし、現在、5人の被験者に対しノイズ光付加実験を行ったが、同様の結果が得られたのは他に1人であった。この1人に

関しても、ノイズ光提示条件を変えて得られているので、ノイズ光に対する感受性は個人差が大きいと推測される。

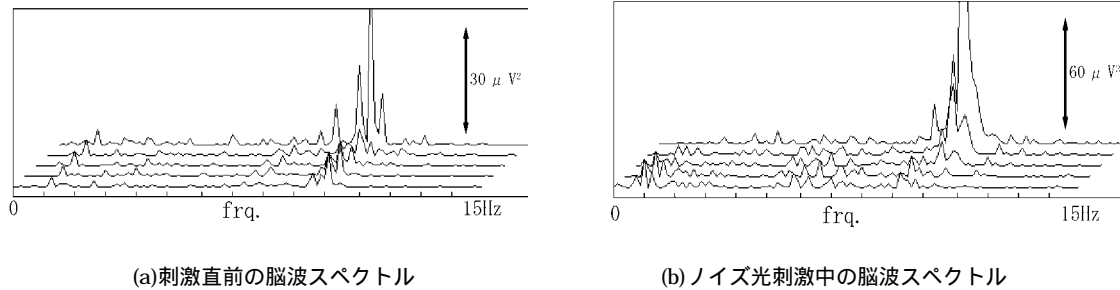


図4 ノイズ光刺激直前及び刺激中の脳波スペクトル  
Brain wave spectram (a)general wave spectram (b) stimulated by noise

議論

結果より、まず間欠光刺激に対して被験者各人で差異はあるものの引き込みを起こす周波数帯域が存在する。これは間欠光刺激付加条件を全ての被験者で同条件としているため、光に対する個人差があるためである、または 振動子の相互結合強度に個人差があると考えられる。次に引き込み範囲において刺激周波数の高さに応じ、脳波の引き込みに対する相対位相が大きくなることは、刺激によりリミットサイクルがシフトされることを意味している。これらから、振動子はリミットサイクル的な性質を持つと考えられる。また、ノイズ光刺激に対し、ある特定範囲の平均ノイズ光強度において被験者の固有 波のパワー値が顕著に増加する現象が得られた。これは 振動子がノイズとある種共鳴を起こしていると推測される。

ここで、ファン・デル・ポール方程式による非線形振動子強制引き込みの一般論から得られる位相方程式において環境雑音  $\xi(t)$ が存在する場合を考える(式(1)).

$$\frac{d\theta}{dt} = a - b\cos(\theta(t)) + \xi(t) \tag{1}$$

この型の方程式が確率共鳴現象を導くことは良く知られている。生体にも多くの環境雑音が存在していると考えられるので、振動子の性質とこの雑音の効果を考慮し、波の引き込み・脳波のモデルを以下のように考える。モデルを図5に示す。波を発現する非線形振動子は解剖学的最小機能単位であるコラムと考えられている。コラムは多数のニューロンから成り、その内部にはフィードバック系をも有するので、コラム内に信号の循環、つまり振動発生機能を有す。このような多数の振動子において個々の振動子は、各々近い振動数と位相で振動している(図5-a)。隣接する振動子の振動周波数が近い場合は非線形振動子であるのでお互いに引き込み現象を起こす。このような振動子が多数存在すると、各々の振動子

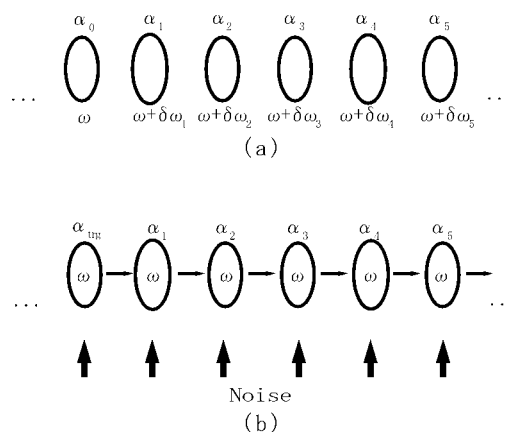


図5 脳波モデル  
Brain wave model

は他の振動子からの影響を雑音として感じる。すなわち各々振動子は全て同じ様な雑音環境場の中に存在して振動現象を呈しており、環境と切り離せない。いわゆる自他非分離型の複雑現象下にある。このときに、周囲の雑音の強度がある大きさになると、各振動子はいずれかメジャーな振動子(安定性の高い振動子、図5中の  $\omega_{trg}$ )をトリガーとして引き込まれ、明確な波を構成させる。しかしながら、雑音強度は刻々と変化するので、この波は長続きしない。ところが、もし外部から強い刺激が加わると、この刺激によって引き込みが生じる雑音領域は広がり、長時間引き込みが可能となる。これが実験で観測された引き込み現象で、その特徴は引き込みを起こす周波数域に個人差が大きいことである。それは雑音強度・結合強度及びその変化に個人差があるためと考えられる。

### おわりに

内部雑音の影響を調べるために、外部から内部雑音に対し刺激を与え脳波の応答を調査しているが、ノイズ光に対する光感受性の個人差が大きく恒常性のある結果とはなっていない。実験系を見直し、このモデルの妥当性を再検討する。また、このアイデアの根幹にあるものが近年、振動化学反応系で見つかった非線形共鳴現象、ノイズシンクロナイゼーション<sup>7)</sup>である。この振動化学反応系は、生体興奮系に共通した現象を見通しよく、直接的に単純化して調べられる化学反応現象として捉えられており、これらの反応系で得られる成果を利用して、解析を進めることにする。

### 参考文献

- 1) Andersen P. and Andersson S.A. :Appleton-Century-Crofts , New York (1968)
- 2)三島・平川・原田・山崎・甲斐：信学会技研報告，NLP85-37，39(1985)
- 3)中沢・川人・大須賀・鈴木：医用電子と生体工学，23，7(1985)
- 4)深見・島田・石川・石川・斉藤：医用電子と生体工学，38，3(2000)
- 5)原田・米田・松尾・甲斐・平川：信学論，J68-C，737(1985)
- 6)Kristen A Richardson, Thomas T.Imhoff, Peter Grigg, James J.Collins:CHAOS, 8,3,599(1998)
- 7)K.Fujii, D.Hayashi, S.Kai, O.Inomoto :FORM , Jpn(2000)