

大脳周波数応答等高線図の電子計算機 による自動描記について

二 宮 理 憲*

(1972年1月 受付)

On the automatic drawing of the cerebral frequency response contour map
by computer

Satoki Ninomija

To draw the frequency response contour map due to flicker stimulation is a useful method for analyzing the cerebral function. The routine system drawing such contour map automatically by computer was developed.

At first, the power spectral density of evoked response of the cerebrum under miscellaneous frequency of the stimulation was smoothed with 5 points, 7 points and 9 points methods to directions of stimulation frequency and frequency of power spectrum respectively, and these data were interpolated secondary. It was verified that 5 points smoothing was the most useful method for this purpose.

This method — Smoothing and interpolating — is useful not only for EEG analysis but also for the data with correlation accompanying some random errata.

内 容 要 旨

脳の閃光性周波数応答等高線図を求めることは、脳の働きを知る上に非常に有効な手法である。著者は、これを電子計算機により自動的に求めるために種々の刺激頻度の誘発応答のスペクトル密度を5点法、7点法、9点法の各々で刺激頻度とスペクトルの周波数の2方向に平滑化を試み、さらに補間を加え、5点法による平滑化が最適であることを示した。

この方法は、観測誤差などのゆらぎを伴いながらも互いに相関のあるデータの処理に有効であることも判った。

1. 序 論

脳波は、脳の活動に伴う電位のゆらぎであるが、その記録から有意な情報をとり出そうとするには視察や簡単な計測による大まかな振幅や周期の決定、さらには相関関数 Fourier 分析およびその両者を利用する分析方法などが用いられている¹⁻⁷⁾。

安静に寛いだ状態の脳波は、外的内的環境から刻々に与えられる無数の刺激による導出電極附近の脳の応答の一つと考えられる^{4,5,7)}。この無数の刺激は、自然刺激と呼ばれている⁷⁻⁹⁾。これに対して誘発応答は、実験的に直接的あるいは間接的に与えられた刺激（実験刺激）による応答である。自然刺激の性質を直接的に求めることは極めて困難であるが、実験刺激のそれは決めることができる。それで、不明確な自然刺激による応答（脳波）よりも、決った（実験）刺激による誘発応答の方が導出電極附近の脳の活動に関する情報をより多く得られるといえよう。実験刺激としてはある決った強さの閃光刺激の単一刺激と反復刺激とがある。これらのすべての場合を考えるには種々の頻度の周期刺激を与えた際の周波数応答⁴⁾と自然状態の応答との差から周波数応答等高線図^{7,9)}を求めるのが適切である。しかし、この等高線図を描くには

* 青山学院大学理工学部

多大の労力と時間を要し、かつまた得られた種々の刺激頻度の誘発応答等高線を描くとき、人為的に平滑化と補間が行われているが、その際の誤差も考慮すべきである。そして、この誤差をなくするためには相当の熟練が必要である。

閃光性周波数応答等高線を描くには、求める誘発応答が多ければ多いほど容易に等高線を描ける。しかし、実験回数にはおのずと制限があり、刺激頻度がとびとびになり、各々の場合の値がとびとびになることもやむをえない。電子計算機で自動的に閃光性周波数応答等高線を描くには、これらの値には有意でないゆらぎも含まれるので、それを除くために適当な平滑化をしなければならない。しかも適当な補間も必要である。これらを考慮して大脳の閃光性周波数応答等高線図の自動描記への手がかりを得たので報告する。

2. 方 法

2-1. 脳波の導出および記録

被験者としては、心身共に正常な成人4名(全員20才, 女), および脳卒中発作後3ヶ月経過した右片麻痺の患者(56才, 男)を用いた。

薄暗い、約13ルクス、防音室内の電磁遮蔽室のベッドに被験者を仰臥させ、眼の上1mの位置に200W青白色閃光刺激ストロボ放電管(p. s. 101)をおき、これを刺激装置(日本光電)で駆動した。脳波と刺激シグナルは、13チャンネルポリグラフ(EG 138型, 三栄測器)とTEAC 351 F型4チャンネルデータレコーダーによるインク書きと、磁気記録を同時に行った(図1)。脳波導出電極は、10-20国際方式によりペーストで銀盤電極を頭皮上にあてた。インク書きで刺激シグナル、心電図の他12箇所、 F_1 , F_2 , C_3 , C_4 , P_3 , P_4 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , O_1 , O_2)の単極導出脳波を記録し、磁気記録では、実験条件指示の音声、刺激シグナルと左右後頭部の単極導出(O_1-A_1 と O_2-A_2)脳波を記録した。

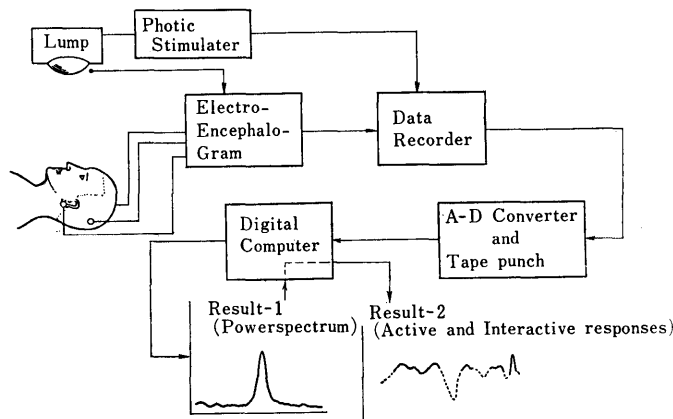


図1 EEG-Data Processing System with Digital Computer

まず、閉眼覚醒安静時の脳波を1分間記録した後、毎秒2回の閃光刺激を与えてから1分間記録した。そして1分間休んだ後、毎秒3回の閃光刺激時の記録を1分間行った。この操作を毎秒2, 3, 4, …, 20回の各刺激について行った。なお、記録の途中で被験者の眠気、尿意、体動など実験結果に障害が考えられる場合は実験を中止し、日を改めて初めから再び実験を行った。これらの障害を防ぐため、実験前には十分に睡眠や休養をとらせた上、直前に排尿させた。

2-2. 周波数分析

得られた脳波の磁氣的記録は、アナログ-デジタル変換器(DATAC 1000, 岩崎通信機)により1/100秒毎の電位値の時系列とし、これを以下の方法によるパワースペクトル密度算出用のプログラムを作成し、汎用電子計算機(OKITAC-5090, 沖電気, およびIBM-360-40, IBM)で求めた²⁾。

いま、 $\Delta t (=1/100)$ 秒毎の脳波の M 個の時系列を $x(\Delta t), x(2\Delta t), \dots, x(M\Delta t)$ とすると、時系列 $M/100$ 秒の長さの脳波のコログラム $C_{xx}(l)$ は次式

$$C_{xx}(l) = \frac{1}{M} \sum_{\nu=1}^{M-l} \bar{x}((l+\nu)\Delta t) \cdot \bar{x}(\nu\Delta t) \quad (l=0, 1, 2, \dots, k) \quad (2\cdot2\cdot1)$$

$$\bar{x}(\nu\Delta t) = x(\nu\Delta t) - \bar{x}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{\nu=1}^M x(\nu\Delta t)$$

となり、そのスペクトル密度関数 \bar{p}_x は、 fr を周波数とすると、次の式で現わされる。

$$\begin{aligned} \bar{p}_x(fr) = \Delta t \left\{ C_{xx}(0) + 2 \sum_{l=1}^{k-1} C_{xx}(l\Delta t) \cos\left(2\pi \frac{r}{2k} l \Delta t\right) \right. \\ \left. + (-1)^r C_{xx}(k\Delta t) \right\} \quad (r=0, 1, 2, \dots, k) \end{aligned} \quad (2\cdot2\cdot2)$$

ここで、周波数 fr は

$$fr = \frac{r}{k} \cdot \frac{1}{2\Delta t} Hz \quad (2\cdot2\cdot3)$$

で与えられるが、このスペクトル密度関数を 3 点法によって平滑化を行なった $\hat{p}_x(fr)$ は次式

$$\hat{p}_x(fr) = \sum_{n=-2}^2 a_n \bar{p}_n \left(\frac{r-n}{k} \cdot \frac{1}{2\Delta t} \right) \quad (r=0, 1, 2, \dots, k) \quad (2\cdot2\cdot4)$$

をここでは用いた。ただし $M=500, k=100, a_0=0.6398, a_1=a_{-1}=0.2401, a_2=a_{-2}=-0.0600$ である²⁾。

2-3. 閃光性周波数応答等高線図

初めに述べた自然刺激は外的内的環境から常に与えられているので、実験刺激を与える際にもやはり与えられていることになる⁷⁾。この時刻 t での自然刺激を $x_0(t)$ 、誘発電位(誘発応答)を起す毎秒 S 回の周期的実験刺激を $x_s(t)$ とし、この応答を $y(t)$ とすると、活動性の法則から^{7,9)}

$$\begin{aligned} {}_s y(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} x_0(t-\tau) \{g_0(\tau) + g_{0s}(\tau)\} d\tau \\ &\quad + \int_{-\infty}^{\infty} x_s(t-\tau) \{g_s(\tau) + g_{s0}(\tau)\} d\tau \\ &= \{y_0(t) + y_{0s}(t)\} + \{y_s(t) + y_{s0}(t)\} \end{aligned} \quad (2\cdot3\cdot1)$$

が得られる。ここで g_0, g_s は x_0, x_s に関する活動性(単位衝撃応答)、 g_{0s} と g_{s0} は、相互活動性(相互衝撃応答)である。

$x_0, x_s, x_{0s}=x_0+x_s, g_0, g_s, g_{0s}, g_{s0}, {}_s y, y_0, y_s, y_{0s}, y_{s0}$ 等の周波数 f に関しての各スペクトル密度をそれぞれ $X_0(f), X_s(f), X_{0s}(f), G_0(f), G_s(f), G_{0s}(f), G_{s0}(f), {}_s Y(f), Y_0(f), Y_s(f), Y_{0s}(f), Y_{s0}(f)$ とすると

$${}_s Y(f) = Y_0(f) + Y_s(f) + \bar{Y}_{0s}(f) \quad (2\cdot3\cdot2)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{Y}_{s0}(f) &= X_{0s}(f) \bar{D}_{0s}(f) \\ \bar{D}_{0s}(f) &= \bar{G}_{0s}(f) + \bar{C}_{s0}(f) \\ \bar{G}_{0s}(f) &= \{X_s(f) G_{0s}(f) + X_s(f) G_{s0}(f)\} / X_{0s}(f) \\ \bar{C}_{0s}(f) &= \{X_0(f) C_{0s}(f) + X_s(f) C_{s0}(f)\} / X_{0s}(f) \\ C_{0s}(f) &= 2 [\operatorname{Re}\{G_0(i f)\} \operatorname{Re}\{G_{0s}(i f)\} \\ &\quad + \operatorname{Im}\{G_0(i f)\} \cdot \operatorname{Im}\{G_{0s}(i f)\}] \\ &= 2 [\operatorname{Re}\{G_s(i f)\} \cdot \operatorname{Re}\{G_{s0}(i f)\} \\ &\quad + \operatorname{Im}\{G_s(i f)\} \cdot \operatorname{Im}\{G_{s0}(i f)\}] \end{aligned} \right\} \quad (2\cdot3\cdot3)$$

が成立する. ただし $i^2 = -1$, Re は実数部, Im は虚数部を示す. ここで

$$y_{0s}(t) = y_{0s}(t) + y_{s0}(t)$$

とすると, 誘発電位は,

$y_s(t) + \bar{y}_{0s}(t)$ で背景脳波活動は自然刺激による応答 $y_0(t)$ で示される.

実験刺激を毎秒 s 回の周期閃光刺激とすると, 誘発電位のスペクトル密度は, 周波数 f と刺激頻度 s に関係することになる. それで, これを $H(f, s)$ とすると

$$H(f, s) = Y_s(f) + Y_{0s}(f) = Y(f) - Y_0(f) \quad (2.3.4)$$

となる. ここで横軸に周波数 f Hz, 縦軸に刺激頻度 s をとるとこの平面上の (f, s) の位置に $H(f, s)$ の値が与えられる. そこで互いに等しい値を人為的に適当になめらかな等高曲線として結べば周波数応答等高線図がえられる.

2-4. 平滑化について

2-4-1. 1次元の平滑化

一般に等間隔 (h) の n 個の x_1, x_2, \dots, x_n の各点で観測された値をそれぞれ y_1, y_2, \dots, y_n とする. そしてこれらの観測値はそれぞれ観測誤差を伴っているものとする. これらの観測値の代わりに各の誤差の自乗の総和が最小となるように適当な値を求めるのが最小自乗法による平滑化である^{10,11)}. これら n 個の観測点で, $N=2, 3$ および 4 の各の場合についてまづ1番目から $2N+1$ 番目までの相続く $2N+1$ 個の点でつぎの2次式

$$y = a + bx + cx^2 \quad (2.4.1)$$

を最小自乗法であてはめる. つぎに2番目から $2N+2$ 番目迄の点, 3番目から $2N+3$ 番目までの点, $\dots, (n-2N)$ 番目から n 番目までの点等の各の相続く $2N+1$ 個の点で同じ2次式をあてはめる. これらの各の $2N+1$ 個の点を書き代えて

$$\begin{aligned} x_{-N}' &= -Nh, & x_{-N+1}' &= (-N+1)h, \dots, & x_0' &= 0, \\ x_1' &= h, \dots, & x_{N-1}' &= (N-1)h, & x_N' &= Nh \end{aligned}$$

とする. これらの各点での観測値をそれぞれ

$$y_{-N}', y_{-N+1}', \dots, y_0', y_1', \dots, y_{N-1}', y_N'$$

とする. これらと2次式の値との差の2乗和

$$S = \sum_{i=-N}^N (y_i' - y)^2 = \sum_{i=-N}^N \{y_i' - (a + bhi + c(hi)^2)\}^2 \quad (2.4.2)$$

が最小になるように a, b および c を決定する. そのために S を a, b, c で偏微分したものを0とおくと3つの方程式がえられる. これらから b は

$$b = \frac{\sum_{i=-N}^N i y_i'}{h \sum_{i=-N}^N i^2} \quad (2.4.3)$$

により求められ, ついで a と c は

$$a = \frac{\sum_{i=-N}^N y_i' \sum_{i=-N}^N i^4 - \sum_{i=-N}^N i^2 y_i' \sum_{i=-N}^N i^2}{(2N+1) \sum_{i=-N}^N i^4 - \left(\sum_{i=-N}^N i^2\right)^2} \quad (2.4.4)$$

$$c = \frac{(2N+1) \sum_{i=-N}^N i^2 y_i' - \sum_{i=-N}^N y_i' \sum_{i=-N}^N i^2}{h^2 \left\{ (2N+1) \sum_{i=-N}^N i^4 - \left(\sum_{i=-N}^N i^2\right)^2 \right\}} \quad (2.4.5)$$

として求められる.

これらの a, b, c を用いて (2.4.1) 式から具体的に $x_{-N}', x_{-N+1}', \dots, x_0', x_1', \dots, x_N'$ の各点

での平滑化された値 (平滑値) を計算することができる。

ここで $N=2$ の場合には、 x_{-2}' , x_{-1}' , x_0' , x_1 , x_2' の各に対しての平滑値 \hat{y}_{-2}' , \hat{y}_{-1}' , \hat{y}_0' , \hat{y}_1' , \hat{y}_2' は¹¹⁾

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_{-2}' &= \frac{1}{35} (31y_{-2}' + 9y_{-1}' - 3y_0' - 5y_1' + 3y_2') \\ \hat{y}_{-1}' &= \frac{1}{35} (9y_{-2}' + 13y_{-1}' + 12y_0' + 6y_1' - 5y_2') \\ \hat{y}_0' &= \frac{1}{35} (-3y_{-2}' + 12y_{-1}' + 17y_0' + 12y_1' - 3y_2') \\ \hat{y}_1' &= \frac{1}{35} (-5y_{-2}' + 6y_{-1}' + 12y_0' + 13y_1' + 9y_2') \\ \hat{y}_2' &= \frac{1}{35} (3y_{-2}' - 5y_{-1}' - 3y_0' + 9y_1' + 31y_2') \end{aligned} \right\} \quad (2.4.6)$$

となる。これらを 1-5 番目の点について求め、つぎに 2-6 番目までの点について全く同様の操作を施して x_4 に対する平滑値 \hat{y}_0' を求める。さらに 3-7 番目までの点についてというように順次求めていく。そして $n > 5$ の場合には n 個の点 x_1, x_2, \dots, x_n の各における平滑値としてそれぞれ $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ が得られたとすると初めの 3 つの平滑値は、1-5 番目の点に関して (2.4.6) 式で求めた値を用い、 $\hat{y}_1 = \hat{y}_{-2}'$, $\hat{y}_2 = \hat{y}_{-1}'$ および $\hat{y}_3 = \hat{y}_0'$ とする。また最後の 3 つの平滑値は、最後の 5 個の点に関して (2.4.6) 式から求めた値を用い、 $\hat{y}_{n-2} = \hat{y}_0'$, $\hat{y}_{n-1} = \hat{y}_1'$, $\hat{y}_n = \hat{y}_2'$ とする。それ以外の 3 番目から $(n-2)$ 番目までの各点 x_k , $3 \leq k \leq n-2$ での平滑値 \hat{y}_k は $(k-2)$ 番目から $(k+2)$ 番目の 5 点に関して (2.4.6) 式から求めた値の \hat{y}_0' を用いる。ここで $y_{k-2} = y_{-2}'$, $y_{k-1} = y_{-1}'$, $y_k = y_0'$, $y_{k+1} = y_1'$, $y_{k+2} = y_2'$ であるから \hat{y}_k は

$$\hat{y}_k = \frac{1}{35} (-3y_{k-1} + 12y_{k-1} + 17y_k + 12y_{k+1} - 3y_{k+2}) \quad (2.4.7)$$

で求められる。

すなわち、 n 個の点 x_i における平滑値 ($i=1, 2, \dots, n$) は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_1 &= \frac{1}{35} (31y_1 + 9y_2 - 3y_3 - 5y_4 + 3y_5) \\ \hat{y}_2 &= \frac{1}{35} (9y_1 + 13y_2 + 12y_3 + 6y_4 - 5y_5) \\ \hat{y}_i &= \frac{1}{35} (-3y_{i-2} + 12y_{i-1} + 17y_i + 12y_{i+1} - 3y_{i+2}) \\ &\quad (i = 3, 4, \dots, n-2) \\ \hat{y}_{n-1} &= \frac{1}{35} (-5y_{n-4} + 6y_{n-3} + 12y_{n-2} + 13y_{n-1} + 9y_n) \\ \hat{y}_n &= \frac{1}{35} (3y_{n-4} - 5y_{n-3} - 3y_{n-2} + 9y_{n-1} + 31y_n) \end{aligned} \right\} \quad (2.4.8)$$

この方法は 5 点での値を用いて平滑化するので 5 点法という。

また $N=3$ の場合 (7 点法) には同様にしてつぎの 7 個の平滑値

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_{-3}' &= \frac{1}{42} (32y_{-3}' + 15y_{-2}' + 3y_{-1}' - 4y_0' - 6y_1' - 3y_2' + 5y_3') \\ \hat{y}_{-2}' &= \frac{1}{14} (5y_{-3}' + 4y_{-2}' + 3y_{-1}' + 2y_0' + 1y_1' + 0 \cdot y_2' - 1 \cdot y_3') \\ \hat{y}_{-1}' &= \frac{1}{14} (y_{-3}' + 3y_{-2}' + 4y_{-1}' + 4y_0' + 3y_1' + y_2' - 2y_3') \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_0' &= \frac{1}{21} (-2y_{-3}' + 3y_{-2}' + 6y_{-1}' + 7y_0' + 6y_1' + 3y_2' - 2y_3') \\ \hat{y}_1' &= \frac{1}{14} (-2y_{-3}' + 1 \cdot y_{-2}' + 3y_{-1}' + 4y_0' + 4y_1' + 3y_2' + 1 \cdot y_3') \\ \hat{y}_2' &= \frac{1}{14} (-1 \cdot y_{-3}' + 0 \cdot y_{-2}' + 1 \cdot y_{-1}' + 2y_0' + 3y_1' + 4y_2' + 5y_3') \\ \hat{y}_3' &= \frac{1}{42} (5y_{-3}' - 3y_{-2}' - 6y_{-1}' - 4y_0' + 3y_1' + 15y_2' + 32y_3') \end{aligned} \right\} (2.4.9)$$

がえられる。そして $N=2$ の場合と同じく x_1, x_2, x_3 と x_{n-2}, x_{n-1} と x_n に対する平滑値としては次に示す $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{y}_3$ と $\hat{y}_{n-2}, \hat{y}_{n-1}, \hat{y}_n$ を用い、それ以外には $(i-3)$ 番目から $(i+3)$ 番目 $(4 \leq i \leq n-3)$ の7点に関しての平滑値を与える(2.4.9)式の \hat{y}_0' を i 番目の点の平滑値 \hat{y}_i とする

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_1 &= \frac{1}{42} (32y_1 + 15y_2 + 3y_3 - 4y_4 - 6y_5 - 3y_6 + 5y_7) \\ \hat{y}_2 &= \frac{1}{14} (5y_1 + 4y_2 + 3y_3 + 2y_4 + 1 \cdot y_5 + 0 \cdot y_6 - 1 \cdot y_7) \\ \hat{y}_3 &= \frac{1}{14} (1 \cdot y_1 + 3y_2 + 4y_3 + 4y_4 + 3y_5 + 1 \cdot y_6 - 2y_7) \\ \hat{y}_i &= \frac{1}{21} (-2y_{i-3} + 3y_{i-2} + 6y_{i-1} + 7y_i + 6y_{i+1} + 3y_{i+2} - 2y_{i+3}) \\ &\qquad\qquad\qquad (i = 4, 5, \dots, n-3) \\ \hat{y}_{n-2} &= \frac{1}{14} (-2y_{n-6} + 1 \cdot y_{n-5} + 3y_{n-4} + 4y_{n-3} + 4y_{n-2} + 3y_{n-1} + y_n) \\ \hat{y}_{n-1} &= \frac{1}{14} (-1y_{n-6} + 0 \cdot y_{n-5} + 1 \cdot y_{n-4} + 2y_{n-3} + 3y_{n-2} + 4y_{n-1} + 5y_n) \\ \hat{y}_n &= \frac{1}{42} (5y_{n-6} - 3y_{n-5} - 6y_{n-4} - 4y_{n-3} + 3y_{n-2} + 15y_{n-1} + 32y_n) \end{aligned} \right\} (2.4.10)$$

として求められる。

$N=4$ の場合 (9点法) には、上記のような式で表現しようとする、複雑になるため行列を用いて示す。すなわち

$$Y' = (y_{-4}', y_{-3}', y_{-2}', y_{-1}', y_0', y_1', y_2', y_3', y_4')^T \tag{2.4.11}$$

$$A = \frac{1}{1422960} \begin{pmatrix} 940016 & 543312 & 232848 & 8624 & -129360 & -181104 & -146608 & -25872 & 181104 \\ 543312 & 396704 & 271656 & 168168 & 86240 & 25872 & -12936 & -30184 & -25872 \\ 232848 & 271656 & 285824 & 275352 & 240240 & 180488 & 96096 & -12936 & -146608 \\ 8624 & 168168 & 275352 & 330176 & 332640 & 282744 & 180488 & 25872 & -181104 \\ -129360 & 86240 & 240240 & 332640 & 363440 & 332640 & 240240 & 86240 & -129360 \\ -181104 & 25872 & 180488 & 282744 & 332640 & 330176 & 275352 & 168168 & 8624 \\ -146608 & -12936 & 96096 & 180488 & 240240 & 275352 & 285824 & 271656 & 232848 \\ -25872 & -30184 & -12936 & 25872 & 86240 & 168168 & 271656 & 396704 & 543312 \\ 181104 & -25872 & -146608 & -181104 & -129360 & 8624 & 232848 & 543312 & 940016 \end{pmatrix} \tag{2.4.12}$$

とするとき求める値 $\hat{Y}' = (\hat{y}_{-4}', \dots, \hat{y}_0', \dots, \hat{y}_4')$ は、(2.4.11) と (2.4.12) とから

$$\hat{Y}' = AY' \tag{2.4.13}$$

で与えられる。それで $N=2$ と 3 の場合と同様に

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 &= \frac{1}{1422960} (940016 y_1 + 543312 y_2 + 232848 y_3 + 8624 y_4 \\ &\quad - 129360 y_5 - 181104 y_6 - 146608 y_7 - 25872 y_8 + 181104 y_9) \\ \hat{y}_2 &= \frac{1}{1422960} (543312 y_1 + 396704 y_2 + 271656 y_3 + 168168 y_4 \\ &\quad + 86240 y_5 + 25872 y_6 - 12936 y_7 - 30184 y_8 - 25872 y_9) \\ \hat{y}_3 &= \frac{1}{1422960} (232848 y_1 + 271656 y_2 + 285824 y_3 + 275352 y_4 \\ &\quad + 240240 y_5 + 180488 y_6 + 96096 y_7 - 12936 y_8 - 146608 y_9) \\ \hat{y}_4 &= \frac{1}{1422960} (8624 y_1 + 168168 y_2 + 275352 y_3 + 330176 y_4 \\ &\quad + 332640 y_5 + 282744 y_6 + 180488 y_7 + 25872 y_8 - 181104 y_9) \\ \hat{y}_i &= \frac{1}{1422960} (-129360 y_{i-4} + 86240 y_{i-3} + 240240 y_{i-2} + 332640 y_{i-1} \\ &\quad + 363440 y_i + 332640 y_{i+1} + 240240 y_{i+2} + 86240 y_{i+3} - 129360 y_{i+4}) \\ &\quad (i = 5, 6, \dots, n-4) \\ \hat{y}_{n-3} &= \frac{1}{1422960} (-181104 y_{n-8} + 25872 y_{n-7} + 180488 y_{n-6} + 282744 y_{n-5} \\ &\quad + 332640 y_{n-4} + 330176 y_{n-3} + 275352 y_{n-2} + 168168 y_{n-1} + 8624 y_n) \\ \hat{y}_{n-2} &= \frac{1}{1422960} (-146608 y_{n-8} - 12936 y_{n-7} + 96096 y_{n-6} + 180488 y_{n-5} \\ &\quad + 240240 y_{n-4} + 275352 y_{n-3} + 285824 y_{n-2} + 271656 y_{n-1} + 232848 y_n) \\ \hat{y}_{n-1} &= \frac{1}{1422960} (-25872 y_{n-8} - 30184 y_{n-7} - 12936 y_{n-6} + 25872 y_{n-5} \\ &\quad + 86240 y_{n-4} + 168168 y_{n-3} + 271656 y_{n-2} + 396704 y_{n-1} + 543312 y_n) \\ \hat{y}_n &= \frac{1}{1422960} (181104 y_{n-8} - 25872 y_{n-7} - 146608 y_{n-6} - 181104 y_{n-5} \\ &\quad - 129360 y_{n-4} + 8624 y_{n-3} + 232848 y_{n-2} + 543312 y_{n-1} + 940016 y_n) \end{aligned}$$

等がえられる。

2-4-2. 2次元の平滑化

x と y とを変数とする関数を $z=h(x, y)$ とする。 i 番目の x_i, j 番目の y_j において、この関数値を観測した値を z_{ij} とし、これには観測誤差 ε_{ij} を伴うものとする

$$z_{ij} = h(x_i, y_j) + \varepsilon_{ij} \tag{2.4.2.1}$$

で表わされる。このとき近傍のいくつかの相続観測値から最小自乗法によって平滑化した z を求める方法を述べる。1次元の場合と同じく x_i, y_j はそれぞれ等間隔 (h) で与えられているとする。各5個ずつの x_i と y_j の値について、従って25個の点 (x_i, y_j) で $h(x, y)$ として

$$z = a x^2 + b y^2 + c + d x + e y + f x y \tag{2.4.2.2}$$

をあてはめることにする。観測値 z_{ij} と z との差の自乗和は次の S :

$$S = \sum_{i,j=1}^5 (z_{ij} - (a x_i^2 + b y_j^2 + c + d x_i + e y_j + f x_i y_j))^2 \tag{2.4.2.3}$$

で与えられる。ここで S を最小にする a, b, c, d, e, f は (2.4.2.3) 式を a, b, c, d, e, f でそれぞれ偏微分したものを0とおいたものからえられる連立方程式

$$\left. \begin{aligned} \Sigma z_{ij} x_i^2 &= a \Sigma x_i^2 x_i^2 + b \Sigma y_j^2 x_i^2 + c \Sigma 1 \cdot x_i^2 \\ &\quad + d \Sigma x_i x_i^2 + e \Sigma y_j x_i^2 + f \Sigma x_i y_j x_i^2 \\ \Sigma z_{ij} y_j^2 &= a \Sigma x_i^2 y_j^2 + b \Sigma y_j^2 y_j^2 + c \Sigma 1 \cdot y_j^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & + d \Sigma x_i y_j^2 + e \Sigma y_j y_j^2 + f \Sigma x_i y_i y_j^2 \\
 \Sigma z_{ij} \cdot 1 & = a \Sigma x_i^2 \cdot 1 + b \Sigma y_j^2 \cdot 1 + c \Sigma 1 \\
 & + d \Sigma x_i \cdot 1 + e \Sigma y_j \cdot 1 + f \Sigma x_i y_j \cdot 1 \\
 \Sigma z_{ij} x_i & = a \Sigma x_i^2 x_i + b \Sigma y_j^2 x_i + c \Sigma 1 x_i \\
 & + d \Sigma x_i x_i + e \Sigma y_j x_i + f \Sigma x_i y_i x_i \\
 \Sigma z_{ij} y_j & = a \Sigma x_i^2 y_j + b \Sigma y_j^2 y_j + c \Sigma 1 y_j \\
 & + d \Sigma x_i y_j + e \Sigma y_j y_j + f \Sigma x_i y_j y_j \\
 \Sigma z_{ij} x_i y_j & = a \Sigma x_i^2 x_i y_j + b \Sigma y_j^2 x_i y_j + c \Sigma 1 x_i y_j \\
 & + d \Sigma x_i x_i y_j + e \Sigma y_j x_i y_j + f \Sigma x_i y_j x_i y_j
 \end{aligned} \tag{2.4.2.4}$$

により求められる。ただしここで $x_i = ih, y_j = jh, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, K$ である。1次元の場合と同じく求める a, b, c, d, e, f は 25 個の観測値 $Z_{i'j'}$ ($i' = i-2, i-1, i, i+1, i+2, j' = j-2, j-1, j, j+1, j+2$) と h によって表わされる。 $Z_{i'j'}$ から求められたものを $\hat{a}_{ij}, \hat{b}_{ij}, \hat{c}_{ij}, \hat{d}_{ij}, \hat{e}_{ij}, \hat{f}_{ij}$ とし、これらのベクトル $A(i, j)$ を考え、

$$A(i, j) = (\hat{a}_{ij}, \hat{b}_{ij}, \hat{c}_{ij}, \hat{d}_{ij}, \hat{e}_{ij}, \hat{f}_{ij}) \tag{2.4.2.5}$$

とすると、 \hat{a}_{ij} は点 (i, j) に対する平滑値を定める a の推定値である。 $\hat{b}_{ij}, \hat{c}_{ij}$ 等についても同様である。これらの値による平滑値を z_{ij} とし、

$$\theta(i, j)^T = (x_i^2, y_j^2, 1, x_i, y_j, x_i y_j) \tag{2.4.2.6}$$

とすると、

$$z_{ij} = \hat{a}_{ij} x_i^2 + \hat{b}_{ij} y_j^2 + \hat{c}_{ij} + \hat{d}_{ij} x_i + \hat{e}_{ij} y_j + \hat{f}_{ij} x_i y_j = A(i, j) \theta(i, j) \tag{2.4.2.7}$$

となる。しかし周辺の x_i, y_j における平滑化は、その点における $A(i, j)$ が中心部のようには求まらないため、

- 1) $i \leq 2, j \leq 2$ のときは $A(3, 3)$ を用いて

$$z_{ij} = A(3, 3) \theta(i, j)$$
- 2) $i \leq 2, 3 \leq j \leq K-2$ のときは $A(3, j)$ を用いて

$$z_{ij} = A(3, j) \cdot \theta(i, j)$$
- 3) $i \leq 2, j \geq K-1$ のときは $A(3, K-2)$ を用いて

$$z_{ij} = A(3, K-2) \cdot \theta(i, j)$$
- 4) $3 \leq i \leq N-2, j = 2$ のときは $A(i, 3) \theta(i, j)$
- 5) $3 \leq i = N-2, 3 = j \leq K-2$ のときは $A(i, j) \theta(i, j)$
- 6) $3 \leq i \leq N-2, j > K-2$ のときは $A(i, K-2) \theta(i, j)$
- 7) $i > N-2, j \leq 2$ のときは $A(N-2, 3) \theta(i, j)$
- 8) $i > N-2, 3 \leq j \leq K-2$ のときは $A(N-2, j) \theta(i, j)$
- 9) $i > N-2, j > K-2$ のときは $A(N-2, K-2) \theta(i, j)$

で与えられる。

2-5. 補間法

補間法には、いろいろあるが、計算機を用いる場合はラグランジェの補間法が最適といえよう。しかし、脳波のデータ処理ではデータ数が膨大であるため、あまり多くの点での補間とか、そのつどの係数の計算などでは時間がかかりすぎるので、2点および4点の簡単な補間を行った。

2点による補間は、 j 番目と $j+1$ 番目の観測値 y_j と y_{j+1} から $j+1/2$ 番目の値として

$$y_{j+1/2} = (y_j + y_{j+1})/2 \tag{2.5.1}$$

となる。

4点による補間は、平滑化の場合と同様に

$$y = a + bx + cx^2 \tag{2.5.2}$$

を用いて、一般性を失わないで $x = -3h, -h, h, +3h$ の4点での最小自乗法により、 a, b, c

を求め、得られた値 \hat{a} , \hat{b} , \hat{c} を用いて $x=0$ での y を求めると、

$$y(0) = \frac{1}{10} (-y_{-3} + 9y_{-1} + 9y_1 - y_3) \quad (2.5.3)$$

となる。また

$x=-2h$, $+2h$ での y の値は、それぞれ

$$y(-2h) = \frac{1}{80} (39y_{-1} + 33y_{-1} + 17y_1 - 9y_3) \quad (2.5.4)$$

$$y(+2h) = \frac{1}{80} (-9y_{-3} + 17y_{-1} + 33y_1 + 39y_3) \quad (2.5.5)$$

となる。両端では (2.5.4) と (2.5.5) を用い、他の場合は (2.5.3) を用いる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} y_{1+1/2} &= \frac{1}{80} (39y_1 + 33y_2 + 17y_3 - 9y_4) \\ y_{j+1/2} &= \frac{1}{16} (-y_{j-1} + 9y_j + 9y_{j+1} - y_{j+2}) \\ &\quad (j=2, 3, \dots, n-1) \\ y_{n-1/2} &= \frac{1}{80} (-9y_{n-3} + 17y_{n-2} + 33y_{n-1} + 39y_n) \end{aligned} \right\} \quad (2.5.6)$$

である。

しかし、この式から明らかなように、いずれも 2 点法と 4 点法とでは特殊の場合を除いて大きな差はない。

3. 実験成績

閃光刺激による誘発電位応答のスペクトル密度は (2.3.4) 式の $H(f, s)$ に示すように刺激時の脳波のスペクトル密度 $Y(f)$ から対照脳波 (背景脳波) のそれ $Y_0(f)$ を引いたもので与えられる。

表 1-1 と 1-2 は、正常成人と患者の左後頭部 (O_1) の誘発電位のスペクトルの値を電子計算機で印字したものであるが、左から右へ毎秒 2, 3, ..., 20 回の周期閃光刺激頻度の各々の場合を上から下に向ってスペクトル周波数 0.5, 1.0, 1.5, ..., 24.5 Hz の各の場合を示している。印字された値は、 $10^{-11} \mu V^2$ を単位としている。

まず正常人のスペクトル (表 1-1) についてみるとスペクトルの周波数 0.5 Hz では殆んどすべての刺激頻度 (2~20 回/秒または fl/sec) で正の応答値がみられるが、6 fl/sec の刺激では負の応答値となっている。また、 α 波の周波数で 2~18 fl/sec のほとんどの刺激頻度で負の応答値を示しているが、10, 14 fl/sec では小さい正の値となっている。さらに 20~22 Hz では 2~20 fl/sec のほとんどの刺激で負の値となっているが、20 Hz で 7 fl/sec と 20 fl/sec の刺激、21.5 Hz で 11 fl/sec の刺激、22 Hz で 11 fl/sec の刺激では正の値となっている。その他 10~20 fl/sec の刺激で刺激頻度と同じ周波数 (10~20 Hz) のところに、従って対角線状に大きな正の値が並んでいる。

ところが患者のスペクトル (表 1-2) を見ると約 1 Hz で 5~20 fl/sec の刺激では大きな正の値が、3~4 fl/sec の刺激では小さい負の値が認められる。また 10 Hz では 2~20 fl/sec の刺激で絶対値の大きい正や負の値が不規則に出現した。さらに 10.5 Hz と 9 Hz で 2~20 fl/sec の刺激で大きな正の値がみられたが、8, 10, 13 fl/sec の刺激では絶対値の小さい負の値が認められた。そして 19~24.5 Hz では 2~20 fl/sec の刺激のほとんどで正の値であるが、19 Hz では 11 fl/sec の刺激、22 Hz では 3 fl/sec の刺激、24 Hz では 17 fl/sec の刺激では絶対値の小さな負の値をみた。

こうした所見は、印字された値で等しいものを結んで、等高線図を描けば、さらに明らかになる筈であるが、例えば表 1-1 の対角線状の正の値、特に 18 Hz 附近で 18 fl/sec 刺激のもの

などは横と縦の方向だけでなく、斜の方向にも急激に変化している。また 19fl/sec 刺激で 9.5~10.5Hz の狭い範囲で 63, 16, -24 と急激に変化し、しかもその附近の値の変化も激しいのでこのままでは山や谷の等高曲線を描き難くなっている。それで 2-4 で述べた一次元平滑化を、まず刺激頻度の方向について、つぎに周波数の方向について、それぞれ 5 点、7 点と 9 点の平滑化をし、さらに補間を行った。

表 2-1-5 には表 1-1 の値に 5 点平滑と補間を加えたものである。ここで 18Hz で 18fl/sec 刺激の位置の正の極大値は表 1-1 のそれより低くなっているが、その附近で巾が広く滑らかな正值が並んでいる。また 19fl/sec 刺激で 9.5~10.5Hz では 38, 27, 17, 6, -4 と変化がなめらかになっている。それ故、図 2-1, 2-2 に示すように、平滑と補間を加えた方がより容易に等高曲線を描くことができた。

印字された平滑値(表 2-1-5) で山は +5 毎に、谷は -5 毎に結んで等高曲線を描き、+10 以上の谷と -10 以下の谷に番号をつけた。5 点平滑の等高線図(図 2-1-5) では 1Hz 附近では 2-20fl/sec のほとんどの刺激に対して山(+I(5) と +II(5)) となっているが、6fl/sec 刺激では谷となっていた。3Hz 附近では 2-16fl/sec と 20fl/sec 刺激で +5 以上の正值を示し、4 つの山(+III(5), +II(5), +IV(5) と +V(5)) がそれぞれ 2-7fl/sec, 10-13fl/sec, 15fl/sec 附近と 20fl/sec に現われた。10Hz 附近では 2-9fl/sec と 11-14fl/sec と 15-18fl/sec の刺激でそれぞれ深い渓谷(-I(5), -II(5) と -III(5)) がみられた。しかし、9Hz には 2 つの山(+VI(5) と VII(5)) がそれぞれ 9-10fl/sec と 16-20fl/sec に浅い谷をはさんで並んだ。また 12Hz 附近では 2fl/sec に VIII(5) の山、5-8fl/sec に IX(5) の山、9-14fl/sec には +X(5) の山と 19-20fl/sec に XI(5) の山がみられたが、これらの山の間は何れも +5 以上の正值を示し、山脈を作っていた。そして +X(5) の山は 12-19fl/sec と 12-19Hz での刺激頻度と周波数の等しい対角線状にのびる山脈の左端の部分となっている。さらに刺激頻度の 2 倍の周波数の位置にも一つの山(+XII(5)) がみられるのも正常者の特徴の 1 つである。最後に 21Hz を中心にほとんどの刺激に対して大きな渓谷(-IV(5)) があるが、この谷は刺激頻度 7fl/sec と 16fl/sec では広がっている。

つぎに 7 点平滑値(表 2-1-7) から描いた等高線図をみると、5 点平滑のそれよりもより滑らかな山や谷となった。例えば、+XII(5) の山に対応する山 +XII(7) はなだらかな台地状になり、その中心の位置も少し刺激頻度の高い方へ移った。また +X'(7) の対角線状の山脈は、12-18Hz (fl/sec) にみられ、5 点平滑のそれ(+X(5)) に比べて右端がやゝ縮まり、山脈の高さも低くなっただけでなく、15fl/sec にくびれが現われてきた。5 点平滑の -IV(5) の谷に相当する -IV(7) の谷には変化が現われなかったが、これは -IV(5) の谷がなだらかな谷であったためであろう。

印字された 9 点平滑値(表 2-1-9) から等高線図を描いてみると(図 2-1-9)、5 点平滑の +XII(5) の山はなだらかな台地状になり、刺激頻度と周波数との対角線上の山脈(+X'(9)) は、7 点平滑よりもよりなだらかになり、くびれはさらに著しくなり、山脈の高さもより低くなった。

7 点と 9 点の平滑によって 15fl/sec 附近に起るくびれは、16fl/sec の刺激で対角線状の山脈の両側(14 と 18Hz 附近)に浅い負値のいくつかは並んでいるためと考えられる。

右片麻痺患者(例 2)の 5 点平滑値は、表 2-2-5、等高線図は図 2-2-5 に示した。この患者では正常人(図 2-1-5)の対角線状の山脈(+X(5))は現われず、10Hz 附近の渓谷(-I(5), -II(5) と -III(5))に相当するものも僅かに 8fl/sec, 15fl/sec と 18fl/sec の各の狭い範囲に縮小してみられた(-VI(5), -VII(5), -VIII(5))。正常人の 21Hz 附近で 2-20fl/sec の -IV(5) の渓谷はその位置にみられず、その代りに 17.5Hz 附近で 2-14fl/sec, 17-20fl/sec の浅い谷が現われている。8-9Hz に正常人ではあまり著しくない山(+V(5) と VI(5))がみられたが、この患者では 2-20fl/sec の全範囲にわたる高い山脈と化しており、正常人では 12Hz の +VIII(5), +IX(5), +X(5) と +XI(5) の 4 つの山に分れていたものが、2-20fl/sec の長い山脈とな

っていた。これら2つの山脈は4-6 fl/sec, 10 fl/sec 等で互に融合していた。なお0.5-1 Hz 附近では正常人の例と同様に4 fl/sec の刺激以外のほとんどの刺激頻度で高い山脈となっていた。

7点平滑値(表2-2-7)とそれの等高線図(図2-2-7)では、5点平滑(表2-2-5)と図2-2-5での10 Hz 附近の浅い3つの谷(-I(5), -II(5)と-III(5))が消失し、9 Hz と12 Hz 附近の山々は2-7 fl/sec では1つになり、10 Hz で8-20 fl/sec の細長い正のくぼみを結んだ2つの山脈となった。また、5点平滑で17.5 Hz にみられた浅い谷はさらに浅く、しかも平坦になった。

さらに9点平滑値(表2-2-9)とその等高線図(図2-2-9)をみると12 Hz の山は2-12 fl/sec と14-18 fl/sec の2つの山に分れてきた。また17.5 fl/sec の浅い谷は2-5 fl/sec と10-13 fl/sec にある2つの谷に分れた。

最後に正常成人(例1)について刺激頻度(s)と周波数(f)の両方向に対して5点ずつの2次元平滑化を行なってみた結果を表4-1-5に示す。このパターンは1次元5点平滑の場合(表2-1-5)と大差のないことが認められた。

4. 考 按

脳波の統計的分析は多くの報告³⁻⁶⁾があるが、単なる自然刺激下で観察される脳波よりも適当に決った実験刺激による応答の方が導出電極附近の脳の活動に関する情報をより明確にとらえやすいと考えられる。佐藤¹²⁻¹⁵⁾は種々の頻度の周期閃光刺激を与えた際のそれぞれの脳波を分析し、周波数応答等高線図を作成する手法を考案し、さらに神経生理学の基本法則のいくつかを導き、脳の生体情報処理活動の基本過程を確立している。

しかし、周波数応答等高線図を作製するには多大な労力と時間を要し、しかも誤差や個人差の少い人為的な平滑化と補間ができるようになるためには相当熟練しなければならない。それでこれらの熟練も多大の労力も時間も必要としない自動的機械的な手法の開発は極めて重要である。

周波数応答等高線図は周期刺激頻度と誘発電位応答のスペクトルの周波数を直交軸とする平面上に応答スペクトルの値の等高曲線群を描いたものである。熟練の結果良好になされる人為的な平滑と補間を自動的機械的なものにおきかえるには、最小自乗法に基づく平滑化と補間の方法を刺激頻度と周波数の両者に関して行えばよい筈である。周波数に関しては、スペクトル密度を求める際に(2.2.4)式による平滑化しているので、まづ刺激頻度に関して平滑化を行った。しかし、このままで等高曲線群を描くよりは、さらに周波数に関して平滑化した方が曲線群はより容易に描ける2,3の所見がみられたので、まづ刺激頻度に関し、ついで周波数に関し平滑化した後に両方向の補間をして等高線図を求めるプログラムを作成した。

佐藤^{9,18,19)}、新^{8,17)}らの実験結果によると、脳の誘発電位の周波数応答の山や谷の中は2 Hz 程度であり、さらに閃光性周波数応答等高線図の山や谷も刺激頻度に関しては2 fl/sec, 周波数に関しては2 Hz 程度の中となっている。平滑化にはこうした実験結果を考慮する必要がある。最も簡単な平滑は1次式による移動平均であるが、ここで行った実験では周期刺激は1 fl/sec 毎に行われ、スペクトルは0.5 Hz 毎に求められている。それで、山や谷は刺激頻度の方向には、たかだか2個位、周波数の方向には高々数個の観測値で表わされていることになる。2個位の値による山や谷は1次式による平滑ではつぶれすぎてしまうおそれがある。従って2次以上の曲線による平滑が適当となるが、この曲線が高次になる程より忠実に観測値を表現することになり、不規則なゆらぎを消す平滑化の効果は失われていく。それで2次式による平滑が考えられる。この場合5点以上の平滑化となるが、既に述べたように5点平滑で得られた周波数応答等高線図(表2-1-5, 図2-1-5, および表2-2-5, 図2-2-5)にはいろいろな山や谷が認められたが正常成人の+X(5), +XI(5)の山、-I(5), -II(5)と-III(5)の谷等、右片麻痺患者の+V(5)の山と-VI(5), -VII(5)と-VIII(5)の等谷などは生理学的に重要な意義があるといえよう。これらの山や谷は、7点法や9点法の平滑では消えてしまう場合もあったので、さらに多

くの実験例の種々の検討を要するが、一応5点平滑が適切と考えられる。

2次元の25点の平滑化でも表4-1-5のように十分に良いと考えられる結果が得られるが、1次元平滑の計算処理はIBM-360-40により1分のできるのに対し2次元の計算処理は15分かかるので、脳波の龐大なデータ処理には適当ではないといえよう。

5. 総 括

閃光性大脳周波数応答等高線図を求めるには、相当な熟練と多大な労力と時間が必要であるが、これを電子計算機により短時間にしかも極めて容易に求める手法を開発した。

稿を終るにあたり御指導、御校閲を賜った長崎大学医学部生理学第二教室佐藤謙助教授に深く感謝するとともに御協力下さった共同研究者日本医科大学第二内科教室新城之介教授、岩佐治男博士、北島淳博士、一原規方医学士、梶山宏一医学士および同教室脳波研究班の諸医学士ならびに倭成病院予防保健部長志波剛博士に御礼申し上げます。さらに計算の援助をいただいた青山学院大学計算センターの諸氏に感謝いたします。

文 献

- 1) Wiener, N: The extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series, John Wiley, New York (1949).
- 2) 赤池弘次, 三枝八重子, 藤井光昭, 高橋宏一: 不規則振動の統計的解析, 統計数理研究所, 東京 (1961).
- 3) 佐藤謙助: 脳波の生体情報処理 (I), 臨床脳波 Vol. 10, No. 2 (1968).
- 4) 佐藤謙助: 脳波の生体情報処理 (II), 臨床脳波 Vol. 10, No. 3 (1968).
- 5) 佐藤謙助: 脳波の生体情報処理 (III), 臨床脳波 Vol. 10, No. 3 (1968).
- 6) 佐藤謙助: 脳波の発生機構に関する統計論的研究, 脳波の分析とその応用, 医学書院, 東京 (1957).
- 7) 佐藤謙助: 生体情報処理活動の基本過程について, 日本生理学雑誌第22巻, 第10号 (1970).
- 8) 新城之介, 一原規方, 北島 淳, 岩佐治男, 梶山宏一, 博多文良, 小林倫仁, 二宮理憲: 周期性刺激に対する脳血管障害例の脳波発生系の応答について, 第12回日本神経学会総会, 東京 (1971).
- 9) 佐藤謙助, 深田高一, 千葉剛次, 二宮理憲, 新城之介, 北島 淳, 岩佐治男, 一原規方, 梶山宏一: 生体情報処理活動の基本過程について, 第10回日本ME学会大会, 東京 (1971).
- 10) 新城之介, 岩佐治男, 北島 淳, 一原規方, 矢野正司, 梶山宏一, 二宮理憲, 上野晴樹: 電子計算機による脳波の分析, 臨床脳波 Vol. 11, No. 1 (1969).
- 11) 山内二郎, 森口繁一, 一松 信: 電子計算機のための数値計算法 I, 培風館, 東京 (1965).
- 12) 森田優三: 経済変動の統計分析法, 岩波書店, 東京 (1967).
- 13) Kensuke Sato; Kazuo Kitajima: On the Average EEG Response Activities in Relation to the Intensity of Flicker Stimulation: The Japanese Journal of Physiology (1965)
- 14) Kensuke Sato: An Interpretation Concerning Physiological Significance of Statistical Nature of Electroencephalogram, Folia Psychiatrica et Neurologica Japonica Vol 10, No. 4 (1957)
- 15) Kensuke Sato: On the Interactivity and Recovery Function in Physiological System: Kybernetik 6. (1969)
- 16) 佐藤謙助: 脳波, 日本医師会雑誌, 第66巻 (1971).
- 17) 新城之介, 北島 淳, 岩佐治男, 一原規方, 桂 武, 博多文良, 小林倫仁, 内海敏子, 志波 剛, 梶山宏一, 二宮理憲, 上野晴樹, 山崎重彦: 脳血管障害患者の閃光性周波数応答における促進と咬合の過程, 第19回日本脳波学会総会シンポジウム講演, 長崎 (1970).
- 18) 二宮理憲, 佐藤謙助, 新城之介, 北島 淳, 岩佐治男, 一原規方, 梶山宏一, 小林倫仁, 志波 剛: 脳波のパターン認識, 医学データ処理シンポジウム, 統計数理研究所, 東京 (1971).
- 19) Kensuke Sato, Koichi Fukada, Satoki Ninomiya, Norikata Ichihara, Koichi Kajiyama, Jun Kilajima: Bio-information Content of the Average Evoked Responses, Fifth Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii (1972).

表 1-1 例 1 (正常成人) の周波数応答スペクトル密度; 横軸は刺激頻度, 縦軸は周波数である

Table with 20 columns (stimulation frequencies) and 20 rows (frequencies). Values range from -20 to 100. Includes labels for frequency and stimulation frequency.

表 1-2 例 2 (右片麻痺) の周波数応答スペクトル密度

Table with 20 columns (stimulation frequencies) and 20 rows (frequencies). Values range from -20 to 100. Includes labels for frequency and stimulation frequency.

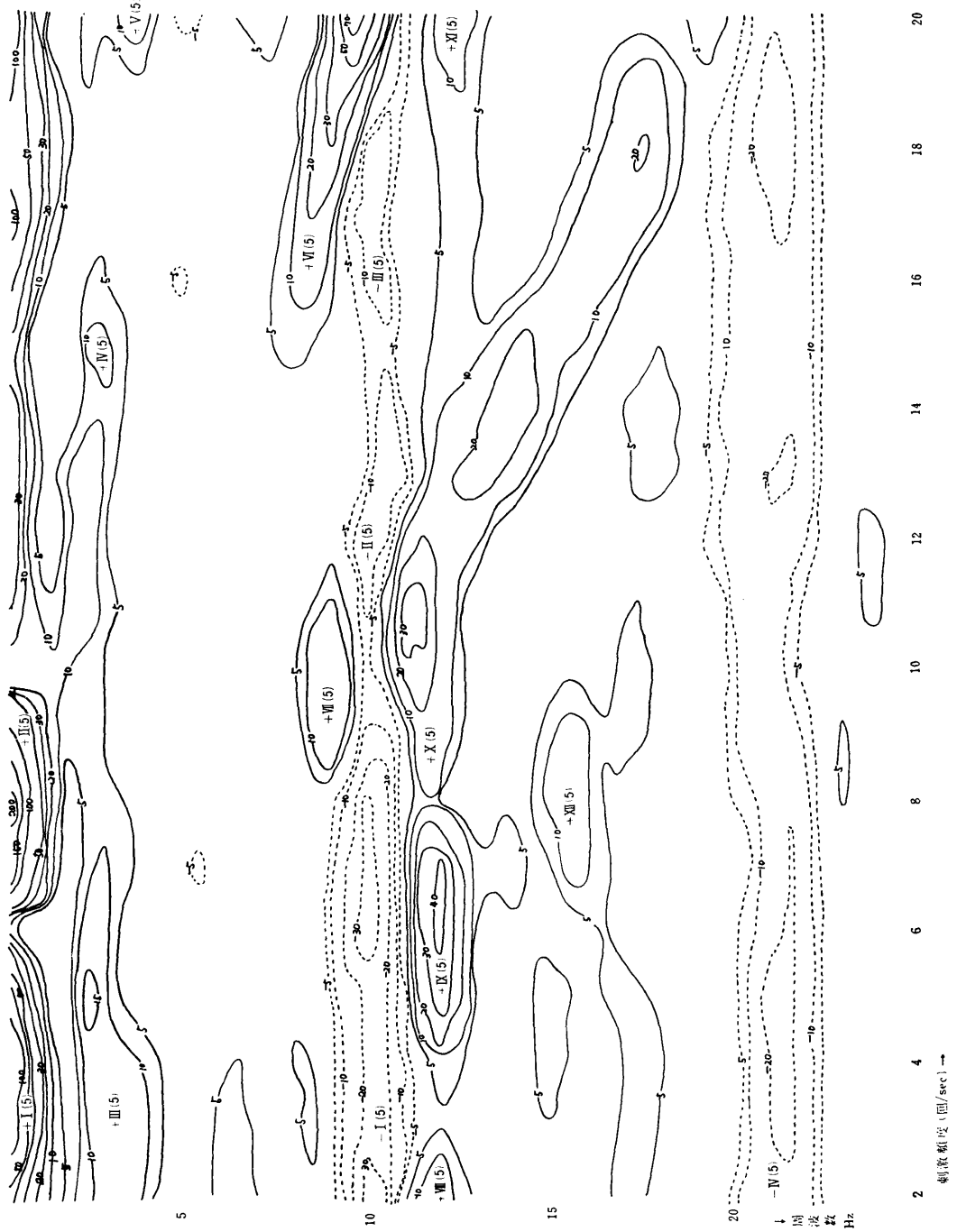


図 2-1-5 (例 1 の 5 点平滑化): 表 2-1-5 に応ずる等高線図; +10 より高いものには, +*(5) と番号をつけ, -10 より深いものは, -* (5) と番号をつけ, 7 点平滑, 9 点平滑と比較できるようにしてある. 表 2-1-5 の上にトレシング用紙を置き図にしたものである. 他

の図も同様.

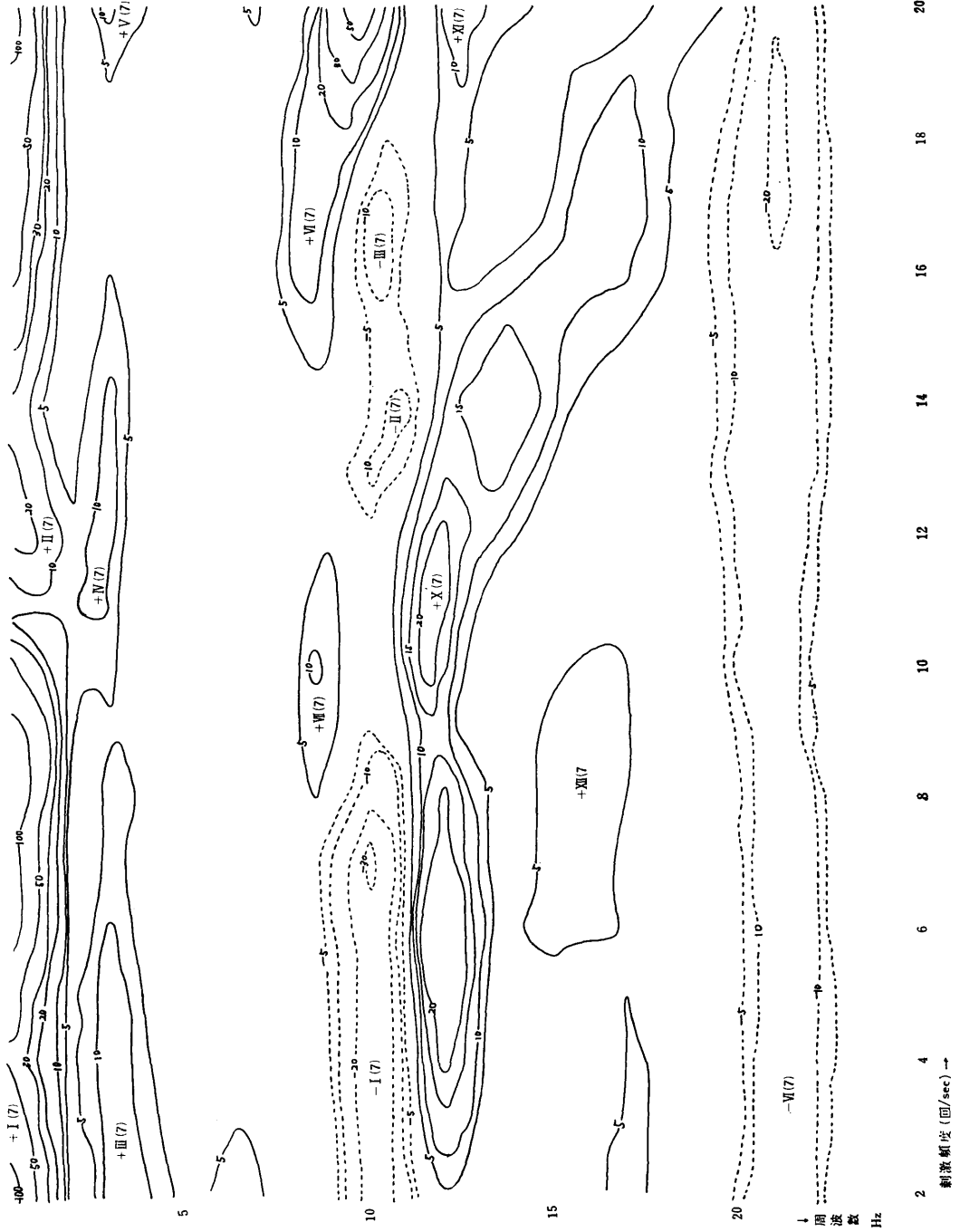


図 2-1-7 (例1の7点平滑化) : 図 2-1-5 と同様に表 2-1-7 と対応している, +I(7) は +I(5) と同じ場所にある山である。また -II(7) は -II(5) と同じ場所にある谷である。他の山や谷もそれぞれ図 2-1-5 と対応した番号が付いている。しかし少し場所が変るとか、他の山と一語になる場合がある。

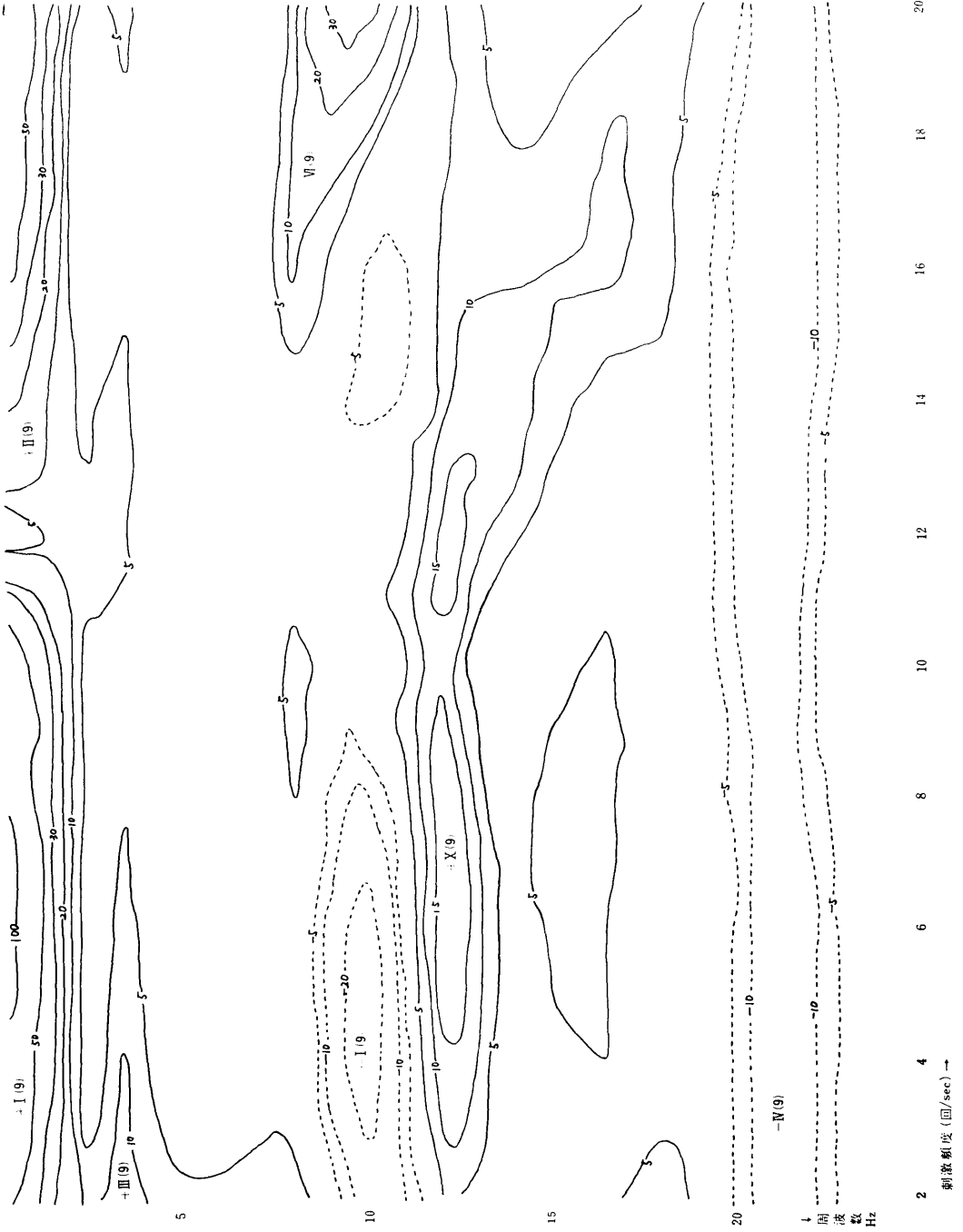


図 2-1-9 (例 1 の 9 点平滑化) : 表 2-1-9 に対応する等高線図, 山や谷の番号は図 2-1-7 と同様である。

表 2-2-5 例2の5点平滑：右片麻痺患者の周波数応答スペクトル密度

140	108	99	93	88	83	78	73	68	63	58	53	48	43	38	33	28	23	18	13	8	3	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60	-65	-70	-75	-80	-85	-90	-95	-100	-105	-110	-115	-120	-125	-130	-135	-140	-145	-150	-155	-160	-165	-170	-175	-180	-185	-190	-195	-200	-205	-210	-215	-220	-225	-230	-235	-240	-245	-250	-255	-260	-265	-270	-275	-280	-285	-290	-295	-300	-305	-310	-315	-320	-325	-330	-335	-340	-345	-350	-355	-360	-365	-370	-375	-380	-385	-390	-395	-400	-405	-410	-415	-420	-425	-430	-435	-440	-445	-450	-455	-460	-465	-470	-475	-480	-485	-490	-495	-500	-505	-510	-515	-520	-525	-530	-535	-540	-545	-550	-555	-560	-565	-570	-575	-580	-585	-590	-595	-600	-605	-610	-615	-620	-625	-630	-635	-640	-645	-650	-655	-660	-665	-670	-675	-680	-685	-690	-695	-700	-705	-710	-715	-720	-725	-730	-735	-740	-745	-750	-755	-760	-765	-770	-775	-780	-785	-790	-795	-800	-805	-810	-815	-820	-825	-830	-835	-840	-845	-850	-855	-860	-865	-870	-875	-880	-885	-890	-895	-900	-905	-910	-915	-920	-925	-930	-935	-940	-945	-950	-955	-960	-965	-970	-975	-980	-985	-990	-995	-1000
-----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

別添紙(回/sec)→

↓周波数 Hz

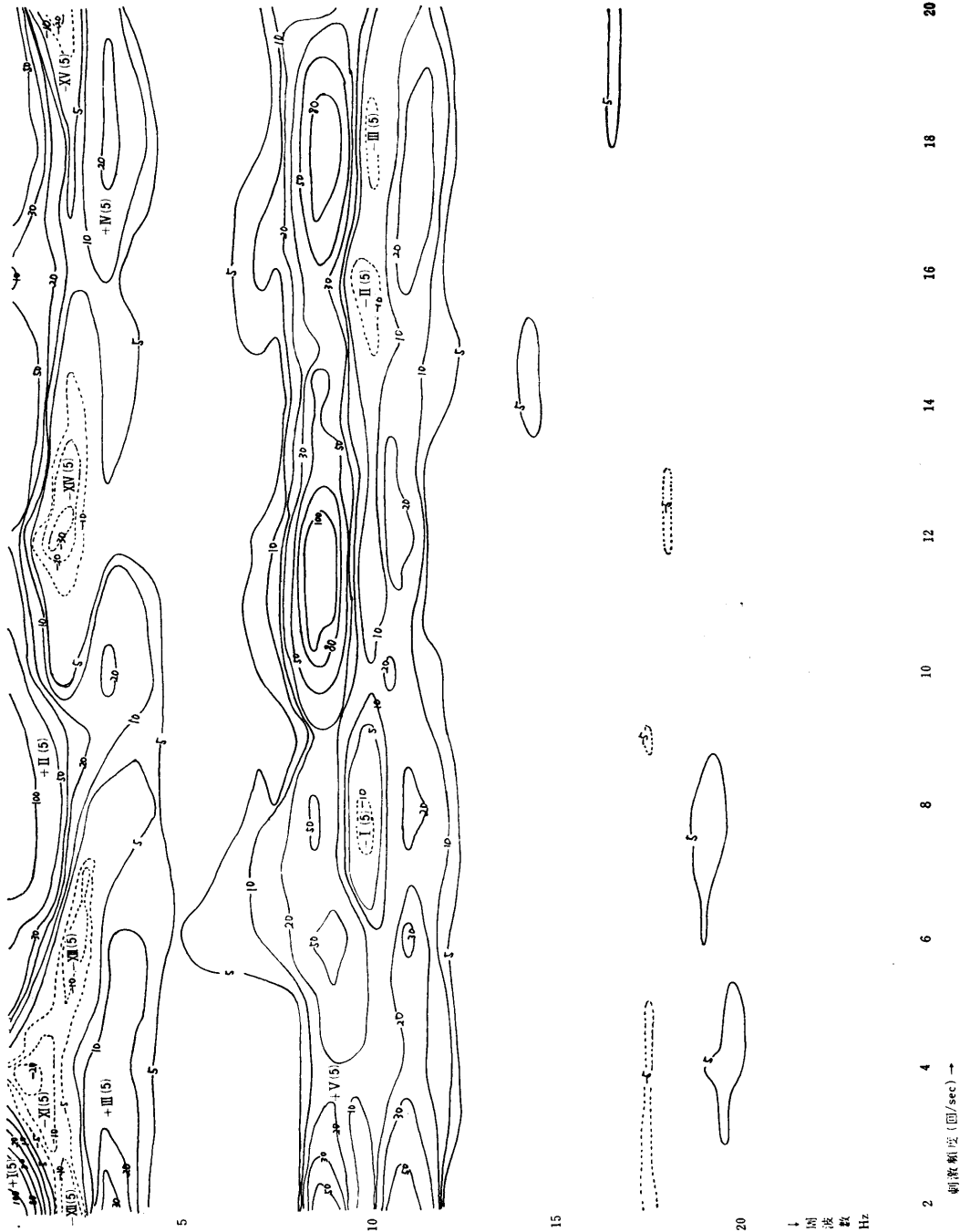


図 2-2-5 (例2の5点平滑化) : 表2-2-5に対応する周波数応答等高線図, 山と谷の番号は例1とで異なるだけ対応するように付けた.

図 2-2-7 (例2の7点平滑化) : 表2-2-7に対応する等高線図.

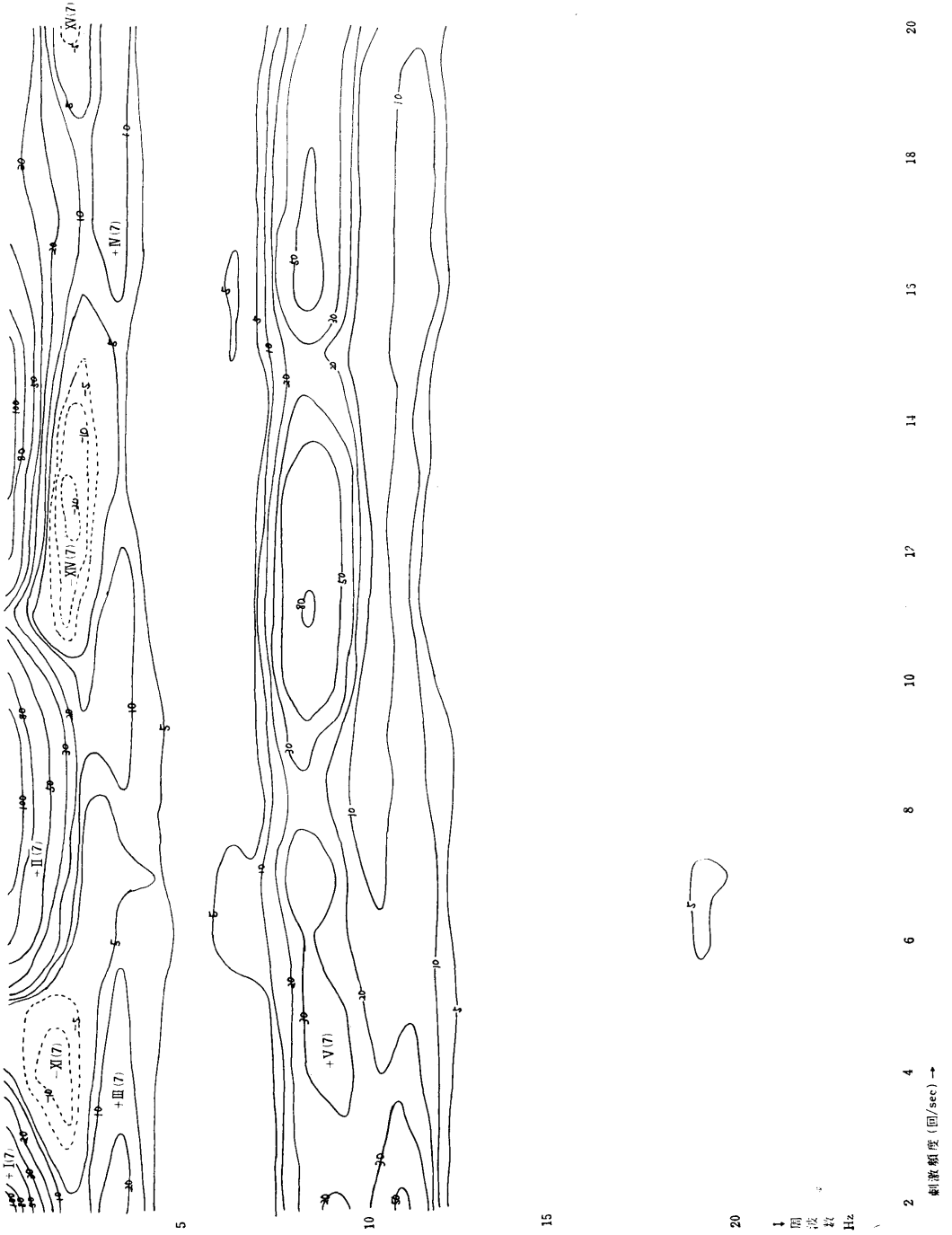


表 2-2-9 例 2 の 9 点平滑

48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

測定頻度(回/sec) →

↑ 周波数 Hz

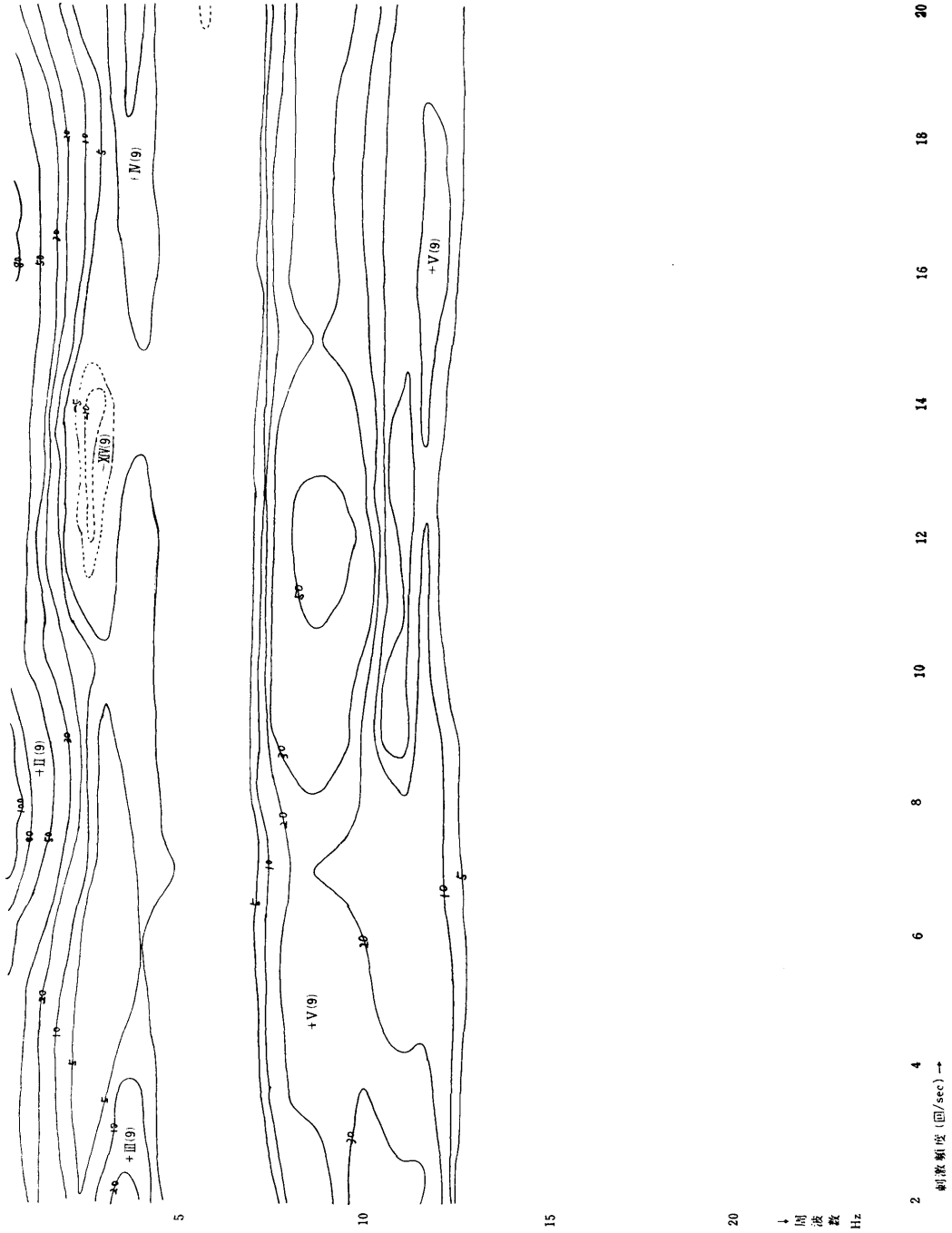


図 2-2-9 (例2の9点平滑化) : 表2-2-9に対応する等高線図.

表 3-1-5 : 例 1 (正常成人) の 5 点平滑の応答スペクトル密度の山と谷 (+10 以上, 山に +*(5) と -10 以下の谷に -(5) と名づけ, 右上から順に番号をつけた)

番 号	刺激頻度の		周波数の		山又は谷の特徴
	下 限	上 限	下 限	上 限	
+ I (5)	2	5.5	0.5	1.5	横につながっている
+ II (5)	6.5	20	0.5	3.0	
+ III (5)	2	7	2	4	横につながっている
+ IV (5)	14.5	15	2.5	3	
+ V (5)	20	20	3.5	4.5	
+ VI (5)	16	20	8	10	
+ VII (5)	9	10.5	8	9	
+ VIII (5)	2	2.5	11	12	
+ IX (5)	4.5	7.5	11	12.5	横につながっている 刺激頻度と同じ周波数の山脈
+ X (5)	8.5	19	10	18	
+ XI (5)	19	20	12	12.5	
+ XII (5)	7	9	15	15.5	刺激頻度の 2 倍の周波数の山脈
- I (5)	2	9	9	11	
- II (5)	11	14.5	10	11	横につながっている
- III (5)	15.5	18.5	10	10.5	
- IV (5)	2	20	20	22	

表 3-1-7 : 例 1 の 7 点平滑

番 号	刺激頻度の		周波数の		山又は谷の特徴
	上 限	下 限	上 限	下 限	
+ I' (7)	2	10.5	0.5	1.5	+ I (5) と fl/sec の範囲が異なる + II (5) と fl/sec の範囲が異なる
+ II (7)	11.5	20	0.5	2.0	
+ III (7)	2	6	3	4	
+ IV (7)	11	14	2	3	
+ V (7)	20	20	3	3	1 点である
+ VI (7)	16	20	8	20.5	
+ VII (7)	10	10	8.5	8.5	1 点である
+ X' (7)	3	18.5	11	17.5	+ VII (5), + IX (5) と + X (5) が一語になったもの
+ XI (7)	19	20	12	13	
+ XII (7)	8	8	16	16	
- I (7)	2	8.5	9	11	
- II (7)	13	14	10	11	
- III (7)	16	17	10	10.5	
- IV (7)	2	20	20	22	

表 3-1-9 : 例 1 の 9 点平滑: + VI (5), + V (5), VII (5) と XII (5) の山, - I (5), - II (5) の谷が消失している

番 号	刺激頻度の		周波数の		山又は谷の特徴
	上 限	下 限	上 限	下 限	
+ I' (9)	2	11.5	0.5	2	+ I (5) と + I' (7) と範囲が異なる + II (5) と + II' (7) と範囲が異なる
+ II (9)	13	20	0.5	2	
+ III (9)	2	4	3	4	
+ VI (9)	16	20	8	11	
+ X (9)	3	18	11	17	+ VIII (5), + IX (5) と + X (5) がつながったものである
- I (9)	2	8	9	11	
- IV (9)	2	20	19	22	

表 3-2-5 : 例 2 (右片麻痺) の 5 点平滑
 15 Hz 以上の所では山は高くなく, 谷は深くない (絶対値が 10 以下)
 番号は表 3-1-5 の山と谷と対応している

番 号	刺激頻度の		周波数の		山又は谷の特徴
	下 限	上 限	下 限	上 限	
+ I (5)	2	3	0.5	1.5	横につながった山脈
+ II (5)	5	20	0.5	4	
+ III (5)	2	6	2.5	4	
+ IV (5)	16	20	2.5	4	
+ V (5)	2	20	7	12	9 Hz と 11 Hz に峯のある山脈
- I (5)	7.5	8	9.5	10	横につながっている谷
- II (5)	15	16	9.5	10	
- III (5)	17.5	18.5	10	10	
- IV (5)	3.5	4.5	0.5	1.5	横につながっている谷
- V (5)	2	2.5	15	2	
- VI (5)	5	7	1.5	2.5	
- VII (5)	11.5	14.5	2	2.5	
- VIII (5)	19.5	20	1	2	

表 3-2-7 : 例 2 の 7 点平滑
 - III (5), + VIII (5), - I (5), - II (5), - IV (5) が消失している

番 号	刺激頻度の		周波数の		山又は谷の特徴
	下 限	上 限	下 限	上 限	
+ I (7)	2	3.5	0.5	1.5	9 Hz と 11 Hz に峯のある山脈
+ II (7)	5.5	20	0.5	3.5	
+ III (7)	2	5.5	2.5	4.0	
+ IV (7)	10	20	3	3.5	
+ V (7)	2	20	7.5	12	
- VI (7)	3.5	4.5	1	2	横につながっているが, 途中の山の影響で谷は浅くなっている
- VII (7)	11	14	1.5	2.5	
- VIII (7)	20	20	2	2.5	

表 3-2-9 : 例 2 の 9 点平滑
 - VI (7), - VIII (7) の谷は消失している. + I (7), + II (7) はつながって, + II' (9) となった.
 + II' (9) のように ' のついているのは + II (5) より少し異なっているもの

番 号	刺激頻度の		周波数の		山又は谷の特徴
	下 限	上 限	下 限	上 限	
+ II' (9)	2	20	0.5	2.5	+ I (5) と + II (5) からできた
+ III (9)	2	3.5	2.5	4	+ IV (5) より位置がづれている
+ IV' (9)	18.5	20	3.5	3.5	
+ V (9)	2	20	7.5	12	+ V (5) の一部からできている
+ V' (9)	13.5	18.5	11	12	
- VI (9)	12	14	2.5	2.5	

表 4-1-5 : 例 1 (正常成人) の 2次元平滑化による周波数応答スペクトル密度

50	65	60	53	64	76	83	71	60	20	19	21	19	25	35	48	58	61	61	
23	32	30	20	11	39	44	34	11	9	7	7	4	5	13	25	26	28	27	
0	17	13	1	-19	18	28	11	-5	4	1	1	-2	-6	0	11	7	7	6	
1	5	5	-1	-9	5	8	2	-2	6	2	5	2	-2	-1	4	2	1	-1	
8	9	8	6	7	6	5	5	8	9	9	7	3	2	3	2	3	2	2	
8	9	8	7	6	5	4	4	2	5	5	6	4	5	3	0	2	2	5	
9	7	0	4	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	1	0	0	2	5	
5	6	3	1	1	1	1	1	1	2	0	1	1	1	0	0	1	2	3	
3	3	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-2	0	0	1	0	
1	1	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	-1	0	0	0	
1	1	0	-2	-2	-1	-2	0	0	0	-2	0	-1	-1	-2	0	0	0	-2	
3	3	2	-1	-1	-1	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	
4	3	2	0	0	0	1	3	3	2	0	0	0	1	0	0	0	1	1	
2	2	2	0	0	0	2	2	4	3	2	-1	0	0	2	1	1	0	1	
1	2	1	0	0	1	0	2	1	0	-3	-1	0	2	2	3	3	1	2	
2	2	2	0	0	0	-3	1	2	0	-5	-2	0	3	4	4	5	4	1	
2	3	3	1	-1	0	0	0	0	0	-2	0	1	8	7	6	5	9	12	
-2	0	0	-1	-6	-2	1	10	12	7	0	3	3	4	7	8	9	16	26	
-11	-9	-8	-10	-13	-11	-8	1	9	4	-3	0	1	0	-1	3	10	17	28	
-14	-16	-16	-17	-19	-19	-18	-11	-2	-2	-9	-10	-3	-5	-9	-6	-2	10	23	
-16	-16	-15	-13	-12	-13	-16	-7	1	0	-5	-9	-6	-6	-7	-9	-7	1	17	
-8	-8	-5	0	0	2	-5	9	12	13	4	1	-3	-2	-1	-1	-7	-1	4	
7	3	5	13	16	17	6	9	17	18	11	5	2	2	1	3	0	1	4	
14	4	9	18	21	20	10	5	11	13	10	6	7	4	3	4	4	5	6	
7	3	4	12	14	14	3	2	4	7	6	13	10	6	2	5	5	6	9	
0	-3	-2	3	4	6	-3	0	0	2	3	12	11	7	1	2	2	4	6	
-1	-1	-1	0	2	3	0	0	0	0	0	10	12	8	1	0	0	1	2	
0	0	0	2	2	2	3	1	-1	-2	1	9	13	10	3	-1	0	0	1	
1	2	2	3	1	3	3	1	-1	0	-1	7	11	11	3	1	0	0	1	
0	2	3	3	2	6	5	4	0	0	-3	2	9	9	5	3	1	0	1	
0	1	3	3	4	3	2	4	3	3	0	2	4	4	9	9	0	0	2	
0	0	1	3	2	5	7	7	2	1	0	-1	2	5	7	6	5	4	2	
2	2	2	3	0	4	4	4	1	1	0	0	0	4	6	8	6	4	1	
9	5	5	4	1	3	2	4	3	3	0	2	4	4	9	9	0	0	1	
4	5	5	4	1	1	2	4	4	2	3	4	2	3	9	10	7	1	1	
1	2	1	2	0	0	0	1	2	1	0	3	3	1	1	5	6	5	0	
0	0	0	1	-2	9	-1	1	2	0	-1	2	2	1	0	1	3	3	1	
0	1	2	1	-1	0	0	0	2	0	-2	0	0	0	-3	-1	0	1	3	
2	4	4	1	1	0	0	-1	1	0	-4	-4	-4	-4	-6	-2	1	3	7	
0	1	1	2	3	0	-3	-9	-7	-6	-13	-12	-11	-14	5	-4	-12	-9	-3	
-9	-8	-8	-6	-6	-5	-7	-9	-9	-10	-12	-11	-12	-9	-9	-10	-11	-9	-4	
-14	-13	-13	-14	-13	-10	-11	-13	-10	-12	-13	-12	-13	-12	-11	-13	-14	-20	-18	-12
-12	-12	-12	-14	-12	-10	-10	-10	-7	-7	-9	-11	-11	-10	-12	-12	-16	-16	-14	-14
-8	-8	-9	-9	-9	-7	-6	-5	-3	-3	-5	-7	-13	-8	-9	-11	-13	-13	-13	-13
-2	-2	-3	-2	-3	-1	-1	-1	0	0	-1	-3	-3	-2	-2	-1	-14	33	32	-12
2	1	1	1	1	2	3	2	1	2	2	1	0	1	1	2	10	10	9	9
1	0	0	0	0	1	2	2	2	4	3	30	7	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	2	2	1	3	3	17	3	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	-1	0	0	1	-1	0	0	-22	-9	0	0	0	0	0	0	0	2
2	4	6	8	10	12	14	16	18	20										

刺激頻度(回/sec)→