

パターン視覚誘発電位のフーリエ解析

—陳旧性視神経炎における高調波成分の変化—

長谷川 茂, 阿部 春樹

新潟大学医学部眼科学教室

要 約

視覚誘発電位 (P-VEPs) のフーリエ変換 (FFT) の有効性を高調波を含めて検討するために正常 15 眼および陳旧性視神経炎 14 眼を対象とし, 14.4' のチェッカーボードパターンを 4, 6, 8, 12, 16/sec の 5 段階で反転させ P-VEPs を測定した. FFT によりスペクトル周波数ごとにパワーの平方根 (振幅) を求め, 正常群に対する視神経炎群での振幅の低下を統計学的 (*t* 検定) に調べ以下の関係を認めた. (1) 反転頻度が 8/sec 以上では有意水準 (*p*) は第 1 高調波 (反転頻度に一致した成分) < 第 *n* 高調波 ($n \geq 2$), (2) 反転頻度 6/sec での *p* は第 1 高調波 = 第 *n* ($n \geq 2$) 高調波, (3) 反転頻度 4/sec では *p* は第 3 高調波 < 第 2 高調波 < 第 1 高調波. したがって低い反転頻度における P-VEPs のフーリエ変換では第 1 高調波成分は指標としての有用性は低いが, より高次の第 3, 2 高調波をも含めて評価すれば transient VEP のフーリエ変換の異常検出における有用性は steady state VEP に劣らないことが確認された. (日眼会誌 96: 1449—1457, 1992)

キーワード: フーリエ変換, 高調波成分, パターン視覚誘発電位, 陳旧性視神経炎, 反転頻度

Fourier Analysis of Pattern Visual Evoked Potentials and
Changes of the Harmonic Component in Longstanding Optic Neuritis

Shigeru Hasegawa and Haruki Abe

Department of Ophthalmology, School of Medicine, Niigata University

Abstract

To determine the clinical usefulness of Fast Fourier Transform (FFT) for the detection of abnormal pattern visual evoked potentials (P-VEPs), the P-VEPs were recorded using a checkerboard pattern (check size: 14.4') which was reversed ranging from 4 to 16 per second. Fourteen eyes of 7 patients with longstanding optic neuritis and 15 eyes of age-matched normal controls were examined. Means and the standard deviation of the square root of the FFT power as a function of spectral frequency ($1.953 \times \text{fHz}$, $f=1\sim 17$) were calculated and statistically significant levels between the two groups were studied for each reversal rate. When the reversal rate was more than 8/sec, the 1st or 2nd harmonic components decreased significantly in optic neuritis and the significant levels (*p*) of the 1st harmonic component were lower than that (*p*) of 2nd or 3rd harmonic component. When the reversal rate was 6/sec, the 1st and 2nd harmonic components decreased significantly and 1st harmonic component had the same level of significance as the 2nd harmonic component. When the reversal rate was 4/sec, the 2nd, 3rd, 5th and 6th harmonic components decreased significantly but 1st

別刷請求先: 951 新潟市旭町通一番町 新潟大学医学部眼科学教室 長谷川 茂

(平成4年3月9日受付, 平成4年5月29日改訂受理)

Reprint requests to: Shigeru Hasegawa, M.D. Department of Ophthalmology, School of Medicine, Niigata University, Ichibancho, Asahimachidōri, Niigata 951, Japan

(Received March 9, 1992 and accepted in revised form May 29, 1992)

harmonic component did not. The level of significance of the 3rd harmonic component was the lowest followed by that of 2nd harmonic component. It was concluded that 2nd and 3rd harmonic components of transient P-VEPs decreased more significantly than 1st harmonic component in optic neuritis and the abnormality in the power spectrum of transient P-VEPs in optic neuritis could be detected as sensitive as that of steady state P-VEPs by estimating higher harmonic components of the power spectrum. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 96 : 1449-1457, 1992)

Key words : Fourier transform, Harmonic component, Pattern visually evoked potentials, Longstanding optic neuritis, Reversal rate

I 緒 言

視神経炎の診断および経過観察にパターン視覚誘発電位(以下 P-VEP と略)は極めて有用であるが、従来よりその評価は P-VEP の振幅および潜時をもってするのが一般的である。しかし視神経炎の急性期や中心視機能の強く障害されている場合には振幅が小さく雑音レベルに近い場合ピークを特定することが困難な場合も少なくない。また P-VEP の振幅、潜時のみでは視神経炎の病期とともに変化する P-VEP の波形そのものの評価が十分とは言い難い。

通常我々が対象とする P-VEP は時間軸上の現象として振幅、潜時を観察しているが、P-VEP を周波数軸上の事象として解析すれば(スペクトル解析)、別の視点からの解析が可能となる。スペクトル解析^{1)~5)}は理工系のみならず生体計測の分野でも盛んに応用されているが眼科領域でも主として P-VEP への応用の報告^{6)~10)}も散見されるがいまだ一般的に用いられるには至っていない。スペクトル解析にはフーリエ変換の他、長いタイムラグを持つ情報の解析に威力を発揮する最大エントロピー法^{11)4)~6)}があり、これらのスペクトル解析の目的は決して単なる振幅測定に代用にとどまるものではなくパラメータの推定による制御方式の決定やパターン認識の手段などへの適用⁵⁾⁶⁾も重要である。

P-VEP のフーリエ変換は従来線形システムとの関連で transient VEP には不適¹⁷⁾とされ steady state VEP の解析に主に用いられてきた。確かに P-VEP は厳密には線形ではなく反転頻度が低い場合単一のフーリエ成分のみを指標とすると情報の欠落が生じる。一方実際に臨床的に transient VEP のフーリエ変換の有効性を 30 数 Hz の全高調波にわたり統計学的に検討した報告¹⁸⁾は少ない。今回我々は正常群および陳旧性視神経炎群を対象とし、視覚刺激のパターンを反転

頻度を変化させ transient VEP から steady state VEP まで測定しそのフーリエ変換を行いパワースペクトルを求めた。そして正常群と視神経群のパワースペクトルの基本波を含めた全高調波成分における両群間の統計学的有意差を反転頻度毎に調べ transient VEP から steady state VEP まで P-VEP のフーリエ解析の異常検出力を検討した。

II 方 法

測定方法：P-VEP の測定は関電極に針電極を用い後頭結節より 5 cm 以上の頭皮上とし、不関電極および接地電極は Ag-AgCl 皿状電極を用い両耳朶に設置した。VEP 装置(日本光電社製 Neuropak 8)は解析時間 50 msec, 加算回数 64 回, low cut filter 0.5 Hz, high cut filter 100 Hz に設定した。視覚刺激の反転および averager のトリガーには専用の外部トリガー(竹井機器)を用い 0.1 msec 単位でトリガーをかけた。P-VEP 測定のサンプリング数は 1 kHz である。P-VEP に α 波の混入が認められた場合にはデータから除外した。波定はシールドされた明室にて観察距離を 283 cm とし、屈折完全矯正の上方眼視にて施行した。

視覚刺激：チェックサイズ 14.4 min, 反転頻度 4, 6, 8, 12, 16/sec (時間周波数はその 1/2), コントラスト 95%, 平均輝度 45 cd/m² のチェッカーボードパターンをパターンリバーサルにて TV モニター上(TV スクリーンは視角 7.8×6.3 deg)に提示した。

対象：正常群は矯正視力 1.2 以上の 15 眼で、平均年齢 42.7 歳(標準偏差 14.4 歳)、視神経炎群は陳旧性の視神経炎 14 眼(視力 0.1~1.2, 平均 0.6, 標準偏差 0.38)で、平均年齢は 51.8 歳(標準偏差 13.9 歳)であり、両群は age matching されている。

解析方法：P-VEP のデータ点数は 512 個で、スペクトル解析には窓関数なし(rectangular)の高速フーリ

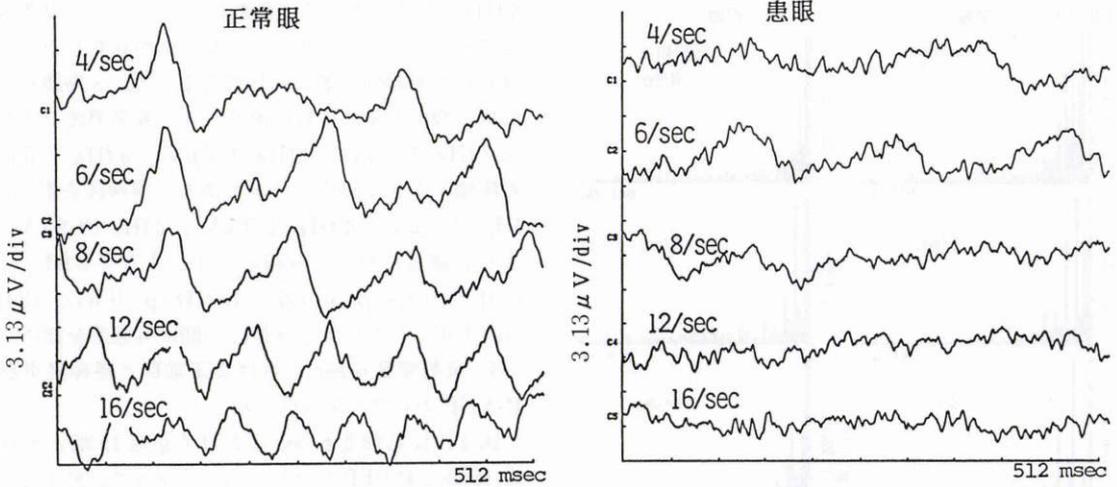


図1 片眼性視神経炎の患眼と正常眼における P-VEPs.

パターンの反転頻度 4 から 16/sec の 5 段階に対応する P-VEP を片眼性視神経炎の 1 症例の正常眼 (左) と患眼 (右) について示した. 視覚刺激は 14.4' のチェッカーボードパターン, 解析時間 500 msec. 正常では反転頻度 N Hz に対して 500 msec 間に N 個の VEP 反応が誘発される.

エ変換を用いた. サンプル周波数は 1 kHz であり, スペクトル周波数の間隔 f は 1.953125 Hz ($= 1,000/512$) となる. 得られたパワースペクトルの平方根を縦軸 (単位 μV), スペクトル周波数 ($1 \times f$ Hz の整数倍で $17 \times f = 33.2$ Hz まで) を横軸として正常群, 視神経炎群のそれぞれにおいて 4 から 16/sec の各反転頻度とも, 各スペクトル周波数毎 (f Hz から $17 \times f$ Hz の 17 点) にパワーの平方根の平均と標準偏差を求め, その各々において両群間の統計的有意差 (t 検定) を調べた.

波形解析システム: Neuropak 8 形成にフォーマットされたフロッピーディスクのファイルを MS-DOS 形式に変換し, パーソナルコンピュータ (NEC PC 9801) で処理し高速フーリエ変換 (以下, FFT と略) によるスペクトル解析を行った. FFT プログラムは Cooley と Turkey のアルゴリズムを用い, プログラムは C コンパイラ¹⁹⁾²⁰⁾により作成した.

III 結 果

1. 片眼性視神経炎の患眼と正常眼とにおける P-VEP 例

図 1 はパターンの反転頻度 4 から 16/sec の 5 段階に対応する P-VEP を片眼性視神経炎の 1 症例の正常眼と患眼について示したものである. 正常眼についてみると反転頻度 4/sec では解析時間 500 msec 中に 2 つ

の VEP 反応が認められることより 1 秒間では 4 個の VEP 反応が誘発される. 同様に反転頻度 6/sec では 3 個の VEP 反応が存在し, 理論的には N を自然数とすると反転頻度 N Hz に対して 1 秒間に N 個の VEP 反応が誘発されることになる. 反転頻度 4, 6 Hz における各 P-VEP 波は transient VEP の要素を多く含み P 100 を主要成分とする第 1 成分に加えて P 200 成分も認められる. 反転頻度 8 Hz より次第に正弦波に近くなり P-VEP 波は単一波形の繰り返しとなる. 患眼においては反転頻度 4, 6, 8/sec において低振幅の反応が認められるが第 2 次成分は不明瞭である. また 12 Hz 以上では雑音レベル以上の反応は認められなくなる. 矯正視力は正常眼 1.2, 患眼 0.4.

2. 片眼性視神経炎の患眼と正常眼とにおける P-VEP のパワースペクトル

図 2 は図 1 の各々の P-VEP に対して FFT を実行しパワースペクトルを求めたものである. 正常眼においてはパワースペクトルのピークは反転頻度の $f \times$ 整数倍のところに認められ, またその数は図 1 の反転頻度に伴う P-VEP 波の変化から予想されるように反転頻度が高くなるにしたがい主要なピークの数も少なくなる. すなわち複雑な波形の transient VEP 波形はより多くのフーリエ成分から構成されていることになる. 患眼では正常眼において見られたピークの減少が認められる. 反転頻度 4/sec では $1f, 4f, 6f, 8f$ Hz

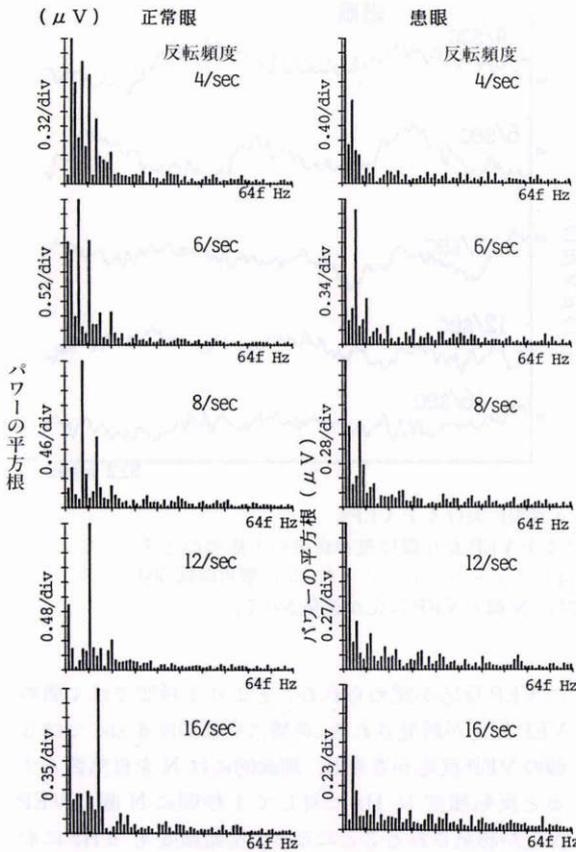


図2 片眼性視神経炎の患眼と正常眼におけるP-VEPのパワースペクトル。

図1の各々のP-VEPに対してFFTを実行しパワースペクトルを求めたもの。左側が正常眼、右側患眼で、スペクトル周波数0 Hz~64 fHz (=125 Hz)の範囲のパワースペクトルを表示した。各縦軸に1目盛りのスケール ($\mu\text{V}/\text{div}$) を示した

の高周波が著明に減少し2 fHzの成分は比較的保たれており、P-VEP波形の変化を示している。反転頻度6/secでは6 fHzの成分の減少が著しい。8/secになると2 fHzの成分もかなり減少し12/sec以上になると高調波のピークは認められなくなる。

3. 反転頻度4/secにおける正常群と視神経群のP-VEPのパワースペクトル

図3は反転頻度4/secにおける正常群15眼と視神経炎群14眼のP-VEPのパワースペクトルを示したものである。図の横軸はスペクトル周波数(Hz)、縦軸はパワーの平方根である。図中の黒丸はパワーの平均、縦棒は標準偏差である。2×f(以下2fと略)、4f、6f、

8 fHzと反転頻度のほぼ整数倍のスペクトル周波数のところにパワースペクトルのピークが存在し正常群では特に反転頻度を基準にして第1、2、3高調波(時間周波数を基準にすれば第2、4、6高調波)すなわち2 fHz ($1.7 \mu\text{V}$)、4 fHz ($1.7 \mu\text{V}$)、6 fHz ($1.6 \mu\text{V}$)の振幅が大きく同じレベルである。視神経炎群では6 fHz ($1.2 \mu\text{V}$)、4 fHz ($1.1 \mu\text{V}$)、2 fHz ($0.9 \mu\text{V}$)とより高調波において振幅の低下が大きく6 fHz ($p < 0.01$)、8 fHz ($p < 0.025$)、10 fHz ($p < 0.05$)、12 fHz ($p < 0.05$)において正常群との間に有意差を認めた。

4. 反転頻度6/secにおける正常群と視神経炎群のP-VEPのパワースペクトル

図4は反転頻度6/secにおける正常15眼と視神経炎14眼のP-VEPのパワースペクトルで、図3と同様に横軸をスペクトル周波数(Hz)としてパワーの平方根の平均値と標準偏差を図中に示した。正常群でのパワースペクトルのピークはスペクトル周波数3f、6f、9f、12f、Hzにあり振幅はその順に小さくなり(3.5, 2.4, 1.0, $0.53 \mu\text{V}$)。12 fHzでは雑音レベルである。視神経炎群では正常群と比較し第1、2高調波すなわちスペクトル周波数3 fHz ($1.9 \mu\text{V}$)、6 fHz ($1.2 \mu\text{V}$)において有意な振幅低下を認めた ($p < 0.005$)。

5. 反転頻度8/secにおける正常群と視神経炎群のP-VEPのパワースペクトル

図5は反転頻度8/secにおける正常15眼と視神経炎14眼のK-VEPのパワースペクトルである。正常群ではスペクトル周波数4f、8f、12 fHzにパワースペクトルのピーク(振幅はそれぞれ3.9, 1.5, $0.7 \mu\text{V}$)が認められるが12 Hzのピークは雑音レベルに近い。視神経炎群では正常群と比較しスペクトル周波数4 fHzの第1高調波においては有意な振幅低下 ($p < 0.01$)を認めたが、スペクトル周波数8f、12 fHzでは軽度の低下 ($p < 0.05$)であった。

6. 反転頻度12/secにおける正常群と視神経炎群のP-VEPのパワースペクトル

図6は反転頻度12/secにおける正常15眼と視神経炎14眼のP-VEPのパワースペクトルのパワーの平均と標準偏差を図3と同様に示した。正常群でのパワースペクトル周波数6f、12 fHzにあるが、振幅はその順に小さくなる(4.3, $0.7 \mu\text{V}$)。視神経炎群では正常群と比較し第1、2高調波すなわちスペクトル周波数6 fHz ($p < 0.01$)、12 fHz ($p < 0.025$)において有意な振幅低下 ($p < 0.01$)を認めた。

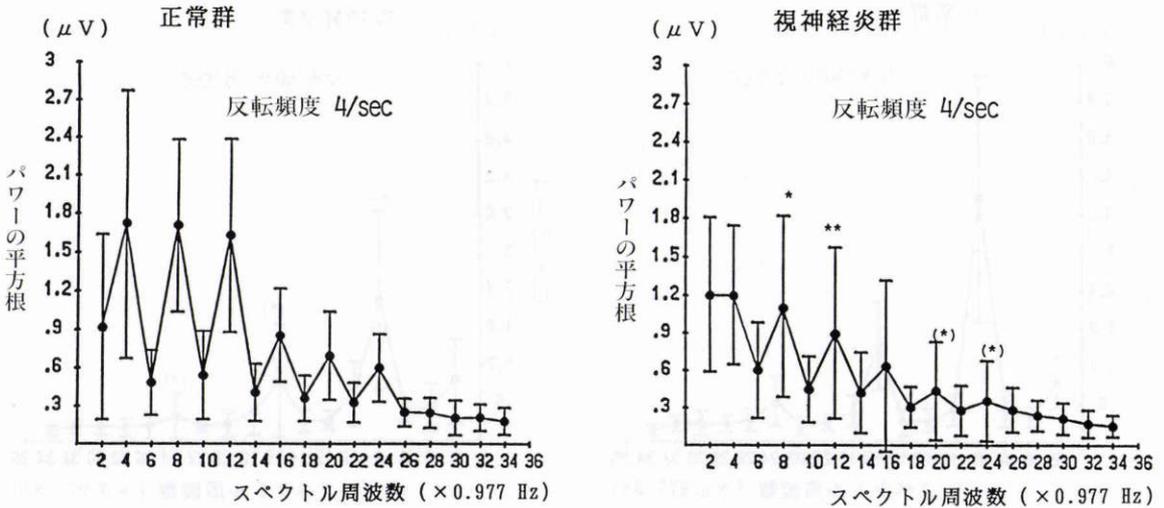


図3 反転頻度4/secにおける正常群と視神経群のP-VEPのパワースペクトル。
 対象は正常群15眼と視神経群14眼。横軸はスペクトル周波数(Hz)で、表示してある数字に0.977 (=f/2, f=1,000/5/12)をかけた値が正確な数値。縦軸はパワーの平方根で単位はμV。図中の黒丸は平均値、縦棒は標準偏差を示す。視神経炎群の図中アスタリスク*は正常群と視神経群の間の統計学的有意差における有意水準(p, t-test)を表し***はp<0.5%, **はp<1%, *はp<2.5%, (*)はp<5%。スペクトル周波数6 fHz, 4 fHz, 10 fHz, 12 fHz(有意水準順)において有意差を認める。

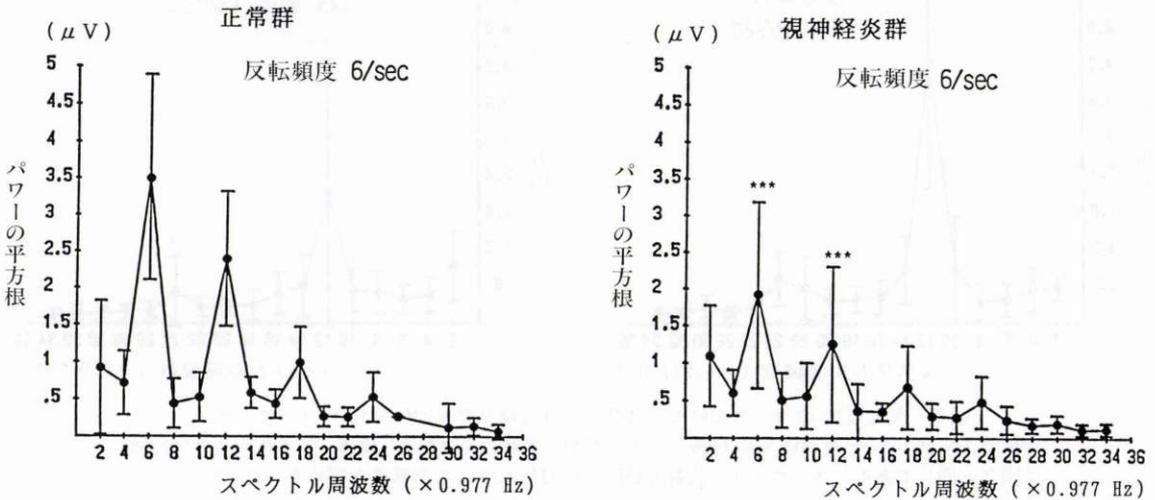


図4 反転頻度6/secにおける正常群と視神経群のP-VEPのパワースペクトル。
 対象は正常群15眼と視神経炎群14眼。図中の横軸、縦軸および黒丸、縦棒、アスタリスク*の意味は図3と同じである。スペクトル周波数3 fHz, 6 fHzにおいて有意差を認める。

7. 反転頻度16/secにおける正常群と視神経炎群のP-VEPのパワースペクトル

図7は反転頻度16/secにおける正常15眼と視神経炎14眼のP-VEPのパワースペクトルのパワーの平

均と標準偏差である。正常群でのパワースペクトルのピークはスペクトル周波数8 fHz (2.8 μV)に認める。15 f, 16 fHzにわずかな高まりが認められる。視神経炎群では正常群と比較し第1 2高調波すなわちスペクトル

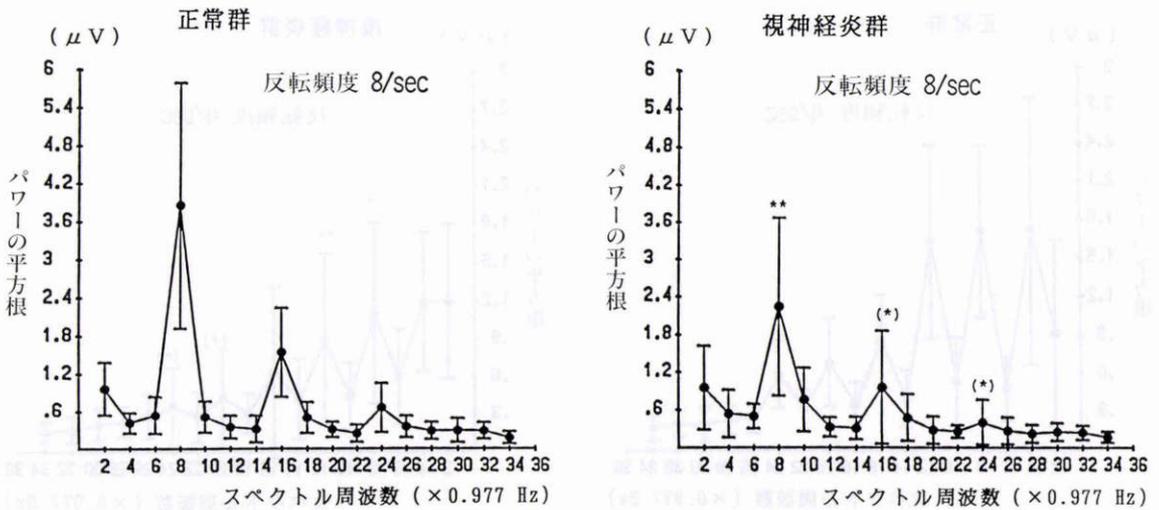


図5 反転頻度 8/sec における正常群と視神経炎群の P-VEP のパワースペクトル。対象は正常群 15 眼と視神経炎群 14 眼。図中の横軸、縦軸および黒丸、縦棒、アスタリスク*の意味は図3と同じである。スペクトル周波数 4 fHz, 8 fHz, 12 fHz において有意差を認める。

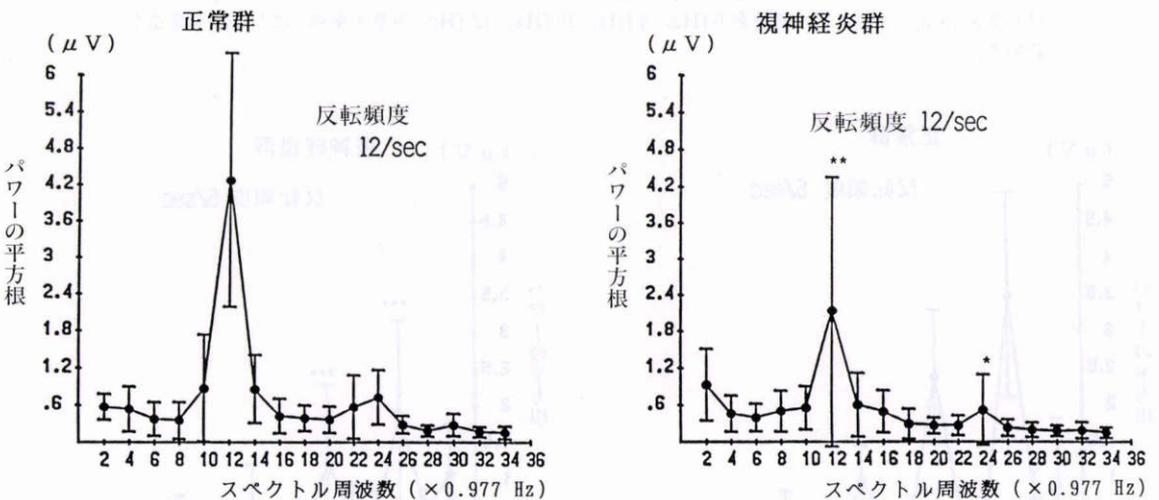


図6 反転頻度 12/sec における正常群と視神経群の P-VEP のパワースペクトル。対象は正常群 15 眼と視神経炎群 14 眼。図中の横軸、縦軸および黒丸、縦棒、アスタリスク*の意味は図3と同じである。スペクトル周波数 6 fHz, 12 fHz において有意差を認める。

ル周波数 8 fHz ($p < 0.005$), 15 fHz ($p < 0.025$), 16 fHz ($p < 0.025$) において有意な振幅低下を認めた。

8. 表1は結果3から7を表にまとめたものである

正常眼 P-VEP のパワースペクトルはパターン反転頻度に一致した第1高調波成分とその整数倍の高調波成分よりなり、反転頻度が高くなるにしたがい高調波成分は減少した。正常群に対する視神経炎群の各

フーリエ成分の低下を統計学的 (t 検定) に検討した。反転頻度 6/sec 以上では反転頻度に一致した第1高調波成分とそのN倍の高調波成分においても有意な低下を認めた。すなわち反転頻度 6/sec では 3 fHz ($p < 0.5\%$) と 6 fHz ($p < 0.5\%$) の成分、反転頻度で 8/sec では 4 fHz ($p < 1\%$) と 8 fHz および 12 fHz ($p < 5\%$) の成分、反転頻度 12/sec では 6 fHz ($p < 1\%$),

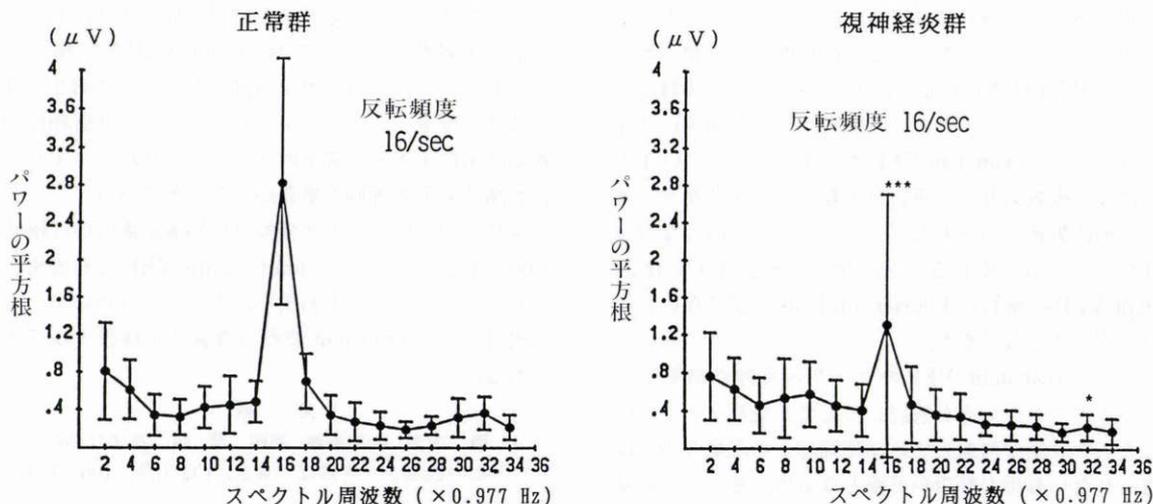


図7 反転頻度 16/sec における正常群と視神経炎群の P-VEP のパワースペクトル。対象は正常群 15 眼と視神経炎群 14 眼、図中の横軸、縦軸および黒丸、縦棒、アスタリスク*の意味は図3と同じである。スペクトル周波数 8 fHz, 16 fHz において有意差を認める。

表1 正常群と視神経炎群間で有意差を示した高調波成分の有意水準

反転頻度 (rev/sec)	有意水準 (t 検定)			
	p<0.005	p<0.01	p<0.025	p<0.05
4/sec		III	II	V, VI
6/sec	I, II			
8/sec		I		II, III
12/sec		I	II	
16/sec	I		II	

図中 I ~ VI は高調波成分を示す。反転頻度を基準にして反転頻度に一致するスペクトル周波数の高調波を第 1 高調波 (I)、その n 倍のスペクトル周波数の高調波を第 n 高調波 (II ~ VI) とした。時間周波数を基準にすれば第 n 高調波は第 $2 \times n$ 高調波となる。

と 12 fHz ($p < 2.5\%$) の成分、反転頻度 16/sec では 8 fHz ($p < 0.5\%$)、16 fHz ($p < 2.5\%$) の成分が有意な低下を示した。一方、低い反転頻度 4/sec では 2 fHz の第 1 高調波の低下は有意でなく、6 fHz ($p < 1\%$) および 4 fHz ($p < 2.5\%$) において有意な低下が認められた。

IV 考 按

従来の振幅、潜時をもって行う P-VEP 波数の計測は測定者の主観が入りやすく、S/N 比の低いデータや基線の動揺の大きい場合あるいは複雑な波形のときは計測そのものが困難、評価不可能となる場合も多い。

その点、スペクトル解析は客観的であり測定者により結果が左右されない。フーリエ変換¹⁾⁻⁶⁾はさまざまな分野で利用されその重要性が認識されている。一方 P-VEP のフーリエ変換に関してはクリアすべき多くの問題点⁶⁾が残されている。エイリアシング(aliasing)の問題はサンプリング周波数の設定やローパスフィルターにより解決される。また有限区間の現象を無限に続くものとして計算することから派生する誤差もあるが、P-VEP はトリガーと解析時間の設定によりほぼ周期的信号とみなせ、データの長さをほぼ信号 (P-VEP) の 1 周期の整数倍とすることは可能であるから基線の動揺が激しい場合以外は窓関数を使う必要はない。P-VEP の時間周波数特性を調べる際注意しなければならないのは EEG (脳波) の α 波の影響である。特に視覚刺激の周波数が α 波に近い場合 α driving を生じ一見 P-VEP の振幅が増大し FFT では α 波の周波数の power が大となる可能性がある。さらに視力不良の症例では α 波の blocking が起こらず α 波が混入しやすい。今回は方法の項でも触れたように α 波の混入が明らかな場合データから除外した。さらにアルファ波の混入が疑わしい場合には transient から steady state までの VEP 波形の特に P 100 成分の一貫性を調べさらに P-VEP を再記録し α 波の混入がないのを確認した。

問題は視覚系のように非線形システムに対するフーリエ変換の有効性¹⁷⁾である。Steady state VEP のよう

に正弦波に近い場合には得られるパワースペクトルは1本の鋭いピークとなることが直感的にも予想され、さらにP-VEP波が正弦波に近似すれば周波数軸上のパワースペクトルの計測は時間軸上の振幅測定に他ならなくなる。Transient VEPでは主要なピークは1本ではなく複数ありその扱い方が難しい。必要なスペクトル周波数範囲の主要なピークの全てを評価しなければ情報の欠落が生じることになる。その意味でtransient VEPの解析にFourier analysisは適さないとの意見¹⁶⁾¹⁷⁾は正当である。

しかしtransient VEPのフーリエ変換の結果得られるスペクトル分布を検討した上で必要なフーリエ成分全てを評価の対象とすれば時間軸上の現象のみでは得られない有用な解析が可能となる¹⁸⁾。逆フーリエ変換によるデジタルフィルターもその応用の一つであるし、直接的には主要なフーリエ成分(パワーと位相)を変換とする関数としてP-VEPを近似することも可能である(波形の数量化)。

いずれにせよtransient VEPのフーリエ変換の有効性には実証的論議が必要である。Hasegawaら¹⁸⁾は正常眼および緑内障におけるスペクトル分布を分析しtransient VEPでもフーリエ解析は有用であることを実証した。その際従来のように時間周波数の2倍の第2調波成分でなくそれよりも高次の高調波成分の有用性を指摘した。

今回は正常群に対する視神経炎群の各フーリエ成分の低下を統計学的(t検定)に検討したが反転頻度8/sec以上では反転頻度に一致した第1高調波成分とともに2次以上の高調波成分においても有意な低下を認め、その危険率あるいは有意水準(p)はいずれも第1高調波<第n高調波($n \leq 2$)であった。6/secでの危険率は第1高調波成分=第n($n \leq 2$)高調波成分となり、さらに反転頻度4/secにおける危険率は第3高調波(6 f, $p < 0.01$) < 第2高調波(4 fHz, $p < 0.025$) < 第1高調波(2 fHz, $p > 0.05$)と逆の関係となった。このことはP-VEPやP-ERGのフーリエ変換で通常用いられている反転頻度に対する第1高調波(時間周波数に対しては第2高調波に相当)はtransient VEPには適さないことを示している。正常のtransient VEPでパワースペクトルの高調波のピークが多いのは1サイクルの現象中にP 75, P 100, P 125などの鋭いピークやP 200など第2次成分の存在と対応する。また患眼における高調波の減少はこれらの波形成分が損なわれ波形がより単純化することに対応すると考えられる。

今回のスペクトル分布や正常群と視神経群における有意差の結果から正常のtransient VEP波を構成する主要フーリエ成分は第1高調波のみならず第2, 3高調波が重要であることが明確であり、より低頻度の視覚刺激による誘発電位のスペクトル解析にはより高次高調波成分の評価が重要かつ不可欠である。

現状においてフーリエ変換は振幅測定あるいは潜伏測定の変法として主にsteady state VEPに於て用いられているが、今回の結果をふまえ今後さらにフーリエ成分によるtransient波形の数量化を検討する予定である。

文 献

- 1) 南 茂夫, 内田照雄, 河田 聡, 他: 科学計測のための波形データ処理. 東京, CQ 出版, 166—180, 1986.
- 2) 小池慎一: Cによる科学技術計算. 東京, CQ 出版, 318—322, 1987.
- 3) 三上直樹: 高速フーリエ変換の考え方と使い方. トランジスタ技術 4月号, 367—376, 1986.
- 4) 日野幹雄: スペクトル解析. 東京, 朝倉書店, 210—227, 1981.
- 5) 川嶋弘尚, 酒井英昭: 現代スペクトル解析. 東京, 森北出版, 185—236, 1989.
- 6) 長谷川茂, 阿部春樹: P-VEPの波形解析に関する研究—フーリエ変換と最大エントロピー法—. 日眼会誌 96: 400—407, 1992.
- 7) Srebro R, Sokol B, Wright W: The power spectra of visually evoked potentials to pseudorandom contrast reversals of gratings. *Electroence Clin Neurophys* 51: 63—68, 1981.
- 8) 入江純二: TV pattern reversal VEPの研究. VEPのdigital処理. 日眼会誌 85: 502—509, 1981.
- 9) Epstein CM, Gammon JA, Gemmill M, et al: Visual evoked potential pattern generation, recording, and data analysis with a single microcomputer. *Electroence Clin Neurophys* 56: 691—693, 1983.
- 10) Cannon MW Jr: Contrast sensitivity: Psychophysical and evoked potential method compared. *Vision Res* 23: 87—95, 1983.
- 11) 大関尚志: 小児の黄斑錐体機能検査としてのFlash VEPの高速フーリエ変換による解析. 眼紀 34: 2067—2074, 1983.
- 12) Trick GL, Trobe JD, Dawson WW, et al: Power spectral analysis of visual evoked potentials in multiple sclerosis. *Curr Eye Res* 3: 1179—1186, 1984.
- 13) Jutai JW, Gruzelier JH, Connolly JF: Spectral analysis of the visual evoked potential

- (VEP): Effects of stimulus luminance. *Psychophysiology* 21: 665-672, 1984.
- 14) 森 一満: キセノン光刺激により得られた Transient VEPのフーリエ分析. *眼紀* 35: 1231-1242, 1984.
 - 15) 高木道雄: 逆フーリエ変換による Pattern VEPの頂点潜時と位相の研究. *日眼会誌* 89: 589-599, 1985.
 - 16) 築島謙次: 高速フーリエ変換法の VEPへの応用とその問題点. *神経眼科* 2: 107-115, 1985.
 - 17) Regan D: Fourier analysis of evoked potentials; some methods based on Fourier analysis, in Desmedt JE (ed): *Visual Evoked Potentials in Man: New Developments*, Oxford, Clarendon Press, 110-117, 1977.
 - 18) Hasegawa S, Abe H, Takagi M, et al: Study on Fourier analysis of pattern visual evoked potentials in early glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 31(Suppl): 231, 1990.
 - 19) 土井滋貴: Cプログラムの作り方と応用. *トランジスタ技術* 12月号, 431-432, 1987.
 - 20) Lattice ING: *Lattice Cリファレンスマニュアル*. 東京, ライフボード, 2-242, 1986.