パターン VEP の波形解析に関する研究

一最大エントロピー法とフーリエ変換-

長谷川 茂,阿部 春樹

新潟大学医学部眼科学教室

要 約

最大エントロピー法(以下, MEM)により P-VEPのスペクトル解析をおこない, 高速フーリエ変換(以下, FFT)と比較検討した. 空間周波数2c/dの正弦波格子を時間周波数2,3,4,6,8,12 Hzにて反転させ P-VEPを測定した. 自己回帰モデルの次数を変化させたときの MEM によるパワースペクトルの変化は transient VEP と steady state VEP では相違していた. 最終予測誤差による次数決定法では対象による変 動が大きく満足な結果を得られなかった. 正常 16 眼を対象として P-VEPを測定した. MEM と FFT のパ ワースペクトルの第2次高調波成分を指標とした時間周波数特性曲線は互いに近似し時間周波数6 Hz にピー クを有する帯域ろ過型を示した. FFT と MEM の相関は時間周波数および高調波成分により異なり両者の相 違を示した. MEM はスペクトル分解能が高く最適なパラメータを用いれば P-VEP の解析に非常に有用であ る.(日眼会誌 96:400-407, 1992)

キーワード:最大エントロピー法,スペクトル解析,フーリエ変換,パターン VEP, 高調波成分

Maximum Entropy Method and Fourier Transform for Wave Analysis of Pattern Visual Evoked Potentials

Shigeru Hasegawa and Haruki Abe

Department of Ophthalmology, School of Medicine, Niigata University

Abstract

To estimate spectral analysis of pattern visual evoked potentials (P-VEPs) the maximum entropy method (MEM) and fast Fourier transform (FFT) were investigated. P-VEPs were recorded in 16 normal eyes using the reversal pattern of 2 c/d vertical sine wave gratings. Six temporal frequencies (2, 3, 4, 6, 8, 12 Hz) were used. MEM power spectrum with the parameter (dimension of autoregression model) which was decided final prediction error (FPE) method did not necessarily always give satisfactory results. The MEM power spectrum of transient VEP changed in manner different from that of steady state VEP as the dimension of autoregression model varied. In steady state VEP the peak of the MEM spectrum was positioned accurately at dimension 50 but in transient VEP the peak positioned accurately at a larger dimension. Both in MEM and FFT the curves of the square root of the power vs temporal frequencies (2, 3 Hz) the correlation coefficient increased gradually as the harmonic component became higher (2 nd < 4 th < 6 h). MEM powers in the second harmonic compo-

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

(平成元年9月26日受付,平成3年7月9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 September 26, 1989 and accepted in revised form July 9, 1991)

平成4年3月10日

nent were highly correlated with FFT power in temporal frequency above 4Hz. These results showed that the MEM power spectrum had higher resolution than FFT and had different properties especially at lower temporal frequencies. MEM with optimum parameters should be very useful for wave analysis of P-VEPs. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 96: 400-407, 1992)

Key words : Maximum entropy method, Spectrum analysis, Fourier transform, Pattern VEP, Harmonic component

I 緒 言

従来, pattern visual evoked potentials (以下, P-VEP) を含め, 電気生理学的検査により得られる電 位波形の計測は成分波形の振幅, 潜時によるものがほ とんどである. これらの測定パラメータは, 大きな雑 音が波形へ重畳した場合や, 波形そのものが複雑な場 合には測定そのものが困難となる. また測定者の主観 が入りやすいという欠点もある.

フーリエ変換は理工系の分野ではいたるところで用 いられている重要な物理数学^{11~55}であり、音声解析は もとより筋電図や脳波などの解析への応用もなされて いる.眼科領域でも主として P-VEP への応用の報 告^{61~151}が散見されるが、一般的に用いられるには至っ ていない.また単に振幅測定あるいは潜時測定の変法 として主に steady state VEP に於て用いられている のが現状である。従来よりフーリエ解析は transient VEP の解析には有効でないとする意見¹⁵¹⁶⁰があるが、 実際に臨床的に transient VEP のフーリエ変換の有 効性を検討した報告は少ない. Hasegawa ら¹⁷⁰は時間 周波数特性の面から transient VEP と steady state VEP を測定しフーリエ解析を用いてスペクトル分布 を調べ transient VEP でのフーリエ解析の有効性を 明らかにした。

近年注目されている最大エントロピー法(以下, MEM) あるいは AR モデルは高速フーリエ変換(以 下, FFT)にはない特徴をもつスペクトル推定法¹¹²¹⁴⁰⁵⁾ であり長いタイムラグを持つ情報の解析に威力を発揮 する. さまざまな分野での応用が試みられており, 眼 科領域では transient VEP の波形解析に用いれば フーリエ解析より有用である可能性がある.

これらのスペクトル解析の目的は決して単なる振幅 測定の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)も}重要である.本研究では MEM の P-VEP,特 に transient VEP への応用の可能性を探るため,まず MEM のパラメータ(自己回帰モデルの次数)を検討した. さらに視覚刺激の反転頻度をさまざまに変化させ transient VEP から steady state VEP まで連続的に 測定し,フーリエ解析と最大エントロピー法によるス ペクトル解析を行い,両者を時間周波数特性および相 関分析により比較検討した.

II 方 法

視覚刺激: パターン発生装置として Cadwell 社製 コントラスト感度測定装置(CTS 5000)を用い視角 7.8×6.3 deg の TV モニター上に、コントラスト 20%,平均輝度 45 cd/m²,空間周波数 2 cpd の正弦波 格子を時間周波数 2, 3, 4, 6, 8, 12 Hz(反転頻度は その 2 倍)の反転刺激にて呈示した。

電極:関電極は針電極を用い後頭結節より5 cm 上 の頭皮上とした.不関電極および接地電極は Ag-AgCl 電極を用い両耳朶に装着した.

測定: VEP測定装置として,日本光電社製 Neuropack 8 を用いた.パターン発生装置は外部トリガー装 置(竹井機器製)によりトリガーされ,得られた誘発 電位は low cut filter 0.5 Hz, high cut filter 300 Hz, 解析時間 512 msec の設定にて 100 回の加算を行っ た.P-VEP 測定のサンプリング周波数は1 KHz であ る.測定は明室にて観察距離 283 cm,屈折完全矯正し 片眼視にて行った.対象は正常 16 眼(平均年齢 31.5 歳).

波形解析システム: Neuropack 8形式にフォー 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 FFT および MEM によるスペクト ル解析を行った. FFT プログラムのアルゴリズムは Cooley と Turkey に、MEM プログラムのアルゴリズ ムは Burg のアルゴリズムによった.使用用語は、Cコ ンパイラ¹⁸⁾¹⁹⁾である.

III 結 果

1. 正常眼における P-VEP(2~12 Hz)の FFT と MEM

図1は2Hz~12Hzのパターンに対する正常眼の



図1 正常眼における P-VEP. 視覚刺激は空間周波数 2 c/d の正弦波格子を用い,時間周波数は上からそ れぞれ2,3,4,6,8,12 Hz(反転頻度はその2倍) である。時間周波数が高くなるにつれ VEP 波形は transient から steady state へと変化する. 各波形の 縦軸の1 目盛り(1 div,単位 μV)を横軸中央の下に 示した。横軸の最大値は 512 msec. P-VEP の実際の波形を示した. P-VEP の解析時間は 512 msec で P-VEP は 512 個のデジタルデータより構 成される.時間周波数(反転頻度はその 2 倍)の増大 につれ P 100 成分の数が増加する.時間周波数 4 Hz まで transient 波形を含んだやや複雑な P-VEP 単位 から構成されるが時間周波数 6 Hz からほぼ正弦波様 の波形となる.



図2 図1に示した P-VEPs をフーリエ変換(FFT) した結果を示す. 横軸の最大値は48.83 Hz で縦軸 はパワーの平方根である.各パワースペクトルの縦 軸の1目盛り(1 div)を横軸中央の下に示した.時 間周波数が高くなるにつれ高調波成分が減少し第2 高調波成分が優位となり,時間周波数6 Hz 以上で はほぼ単一のピークとなる. 平成4年3月10日

図2は図1のP-VEPの各々に対するFFTを示しており,縦軸はパワーの平方根,横軸はスペクトル周波数で最大値は48.8 Hz である. P-VEP に対応して







り7.8 Hz, 15.6 Hz がそれに続く. すなわち時間周波 数2 Hz においては第6次,第4次,第8次の高調波成 分が優位である. 時間周波数3 Hz では第4次高調波 成分の11.7 Hz に最大ピークがあり,第2次(5.9 Hz),第6次(17.6 Hz)高調波成分が続く. 時間周波 数4 Hz からはパワースペクトルのピーク数は徐々に 減少するとともに第2次高調波成分が最大ピークを形 成する.

- 図3は図1の各々のP-VEPに対して MEM により スペクトル解析を施行した結果である. MEM の自己 回帰モデルの次数は200とし, FFT 同様縦軸はパワー の平方根, 横軸はスペクトル周波数である. MEM では スペクトル点数を自由に設定できるためこの例では最 大周波数を50 Hz, スペクトル点数は500 に設定して あり, スペクトルの周波数軸の刻み幅(分解能)は0.1 Hz ときめ細かい. 各々の時間周波数に対する MEM のパワースペクトルの分布は FFT とほぼ等しいが, 同じ解析時間ならば MEM の方がはるかに詳細なス ペクトル分布の観察が可能である. 加えて MEM では FFT に比ベスペクトルのピークの立ち上がりが急峻 かつ明瞭であり, スペクトルの分解能がはるかに高い,

2. MEM における自己回帰モデルの次数

最終予測誤差による次数決定法(以下, FPE法)を 図 1 の P-VEP に適用した。時間周波数 2 Hz~12 Hz に対し FPE 法により決定された次数は 456, 497, 11, 500, 25, 498 と一定せずそれにより与えられるスペク トル推定値はかなり FFT とかけはなれており, また 視覚刺激の時間周波数により予想される分布と異なっ ていた。

図4は図1の時間周波数2Hzの視覚刺激に対する transient VEPを対象として自己回帰モデルの次数を 50~400まで50刻みで変化させた時のMEMスペク トルの変化を示したものである.次数が増加するにつ

図4 transient VEP(時間周波数2Hz)における最 大エントロビー法のパワースペクトルと自己回帰モ デルの次数との関係.次数が大きくなるにつれスペ クトルのピークが明瞭になり,ピークの大きさおよ び最大ピークの位置が変化する.次数200において FFTとMEMのパワースペクトルが最も近似す る. 横軸の最大値は50.0Hz,縦軸はパワーの平方 根.各パワースペクトルの縦軸の1目盛り(1div) と各スペクトルにおける最大ピーク位置(Hz)を図 中に示した.スペクトル点数は500. れパワースペクトルのピークが分離され,数が増加し 立ち上がりは急峻になる.すなわち次数 50 では 13.25 Hz に最大ピークを有するほぼ 1 峰性のスペクトル曲 線であるが,次第にピークの数が増え位置が正確とな る.次数 200 においてスペクトル曲線は 12.25 Hz に 最大ピークを有する FFT と相似な形を示すようにな りピークの位置は固定し次数 250 以降は 15.75 Hz に 最大ピークを認めるようになる.

図5は図1の時間周波数6Hzの視覚刺激に対する steady state VEPを対象として自己回帰モデルの次 数を50~400まで50刻みで変化させた時のMEMス ペクトルの変化を示したものである.図4のtransient VEPの場合と大きく異なり次数50ですでにスペクト ルのピークの位置は正確であり次数が増えてもピーク は立ち上がりが鋭くなるが基本的な分布には変化が認 められない.

図6は5Hzの正弦波(振幅10)をコンピュータで シュミレートし自己回帰モデルの次数の変化に対して MEM スペクトルの5Hzにおけるピークの振幅がど のように変化するかを示したものである.次数の変化 とともに振幅は大きく変化し,次数240において最大 値をとる.

3. FFT と MEM における時間周波数特性

図7は時間周波数の2倍のスペクトル周波数におけ るパワー(第2次高調波成分)を指標として時間周波 数特性を求めたもので、closed circle が FFT, open circle が MEM によるものである. P-VEP は正常 16 眼を対象に、空間周波数2 cpd のパターン(正弦波格 子)にて時間周波数を2,3,4,6,8,12 Hzの6 段階 に変化させて測定した. 図の横軸は時間周波数, 縦軸 はパワーの平方根で平均値と標準偏差(1SD)を示し た. MEM の自己回帰モデルの次数は,結果2に示した ように FFT と相似したスペクトルを与える 200 に設 定した.FFT, MEM ともに時間周波数特性曲線は2 Hzから6Hzまでなだらかに上昇し6Hzでピークを 形成し, 6 Hz から急激に低下する帯域ろ過型の曲線と なる. 振幅は2Hz では MEM が FFT より小さく6 Hz では逆に MEM の方が大きい. P-VEP の振幅の個 体差が大きいため,変動係数(偏差値/平均値)はFFT, MEM ともかなり大きい.

4. FFT と MEM における回帰分析

表1は正常16 眼において時間周波数毎にFFT と MEM(次数200)の相関を調べたものである.FFT, MEM ともにパワースペクトル曲線は時間周波数2 Hz では4,6,8次高調波成分が,時間周波数3,4Hz では第2,4,6次高調波成分が,時間周波数8Hz し降は第2次高調波成分が主体をなす.表1ではこれ らの主体をなす成分を回帰分析の対象とした.時間周 波数2Hzにおいては第2,4次高調波成分(スペクト ル周波数4,8Hzにおけるパワー)で相関係数は0.6 前後とやや低いが,第6次高調波成分では0.838と高 くなる.時間周波数3Hz,6Hzでもこの傾向は同じで 高次成分になるにつれ相関係数は高くなる.時間周波 数4,8,12Hzでは相関係数は0.7以上の高い値であ る.回帰直線の傾きは時間周波数2Hzおよび3Hzの 第2次高調波成分,4Hzの第6次高調波成分で0.6前 後と低いがその他においては1.0前後である.

IV 考 按

振幅, 潜時をパラメータとする P-VEP 波形の計測 は, 簡便かつ直接的で計測の基本となるが, 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であり, 測定者の主 観が入らざるを得ない. 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. Regan¹⁶⁾は transient VEP の解 析に Fourier analyser は適していないと述べている. 確かに線形システムの解析という点から考えれば人の 視覚系は線形ではなく,特に波形が正弦波とはかけ離 れている transient VEP においては FFT の有用性は 少ないと言える.しかし P-VEP 波形の認識を従来の 時間軸上でなく周波数軸上にて行うと考えれば同一レ ベルの議論は成立しない.本論分の結果1に示したよ

図5 steady state VEP (時間周波数6Hz) における 最大エントロビー法のパワースペクトルと自己回帰 モデルの次数との関係.次数50においてすでにパ ワースペクトルの明瞭なピークが12.25Hzの位置 に認められる.次数がさらに高くなるとピークはよ り急峻になるが,ピークの数および最大ピークの位 置がほぼ不変である.次数300において単一ピーク の大きさが最大となる. 横軸の最大値は50.0Hz で 縦軸のパワーの平方根.各パワースペクトルの縦軸 の1目盛り(1div)と各スペクトルにおける最大 ピーク位置(Hz)を図中に示した.スペクトル点数 は500. うに正常眼の transient VEP のスペクトルはいくつ かの主要なピークから構成される. これを逆フーリエ





図6 5Hzの正弦波(コンピュータによるシミュレーション波形)における最大エントロピー法のパワースペクトルと自己回帰モデルの次数との関係曲線、次数とともにパワーも変化し次数 240 に最大値を有する一峰性の曲線となる。縦軸はパワーの平方根。

変換すればいわばデジタルフィルタリングを施した P-VEP 波となるわけで、スペクトルのピークの評価は 決して無意味なものではない.むしろ必要な周波数領 域を選択すれば雑音成分の影響を少なくし信号成分自 体の情報を多く得る結果となる.この点に関してはス ペクトル分布にまで立ち入った実証論議が必要であろ う.Hasegawa ら¹⁷⁾は正常眼および病眼におけるスペ 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次高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.この詳細に ついては次報にて述べる予定である.

近年注目されている MEM は有限区間のデータか ら無限区間のスペクトルを推定する方法で、観察区間 (解析時間)が短く周期成分の数が少ない場合に威力を 発揮する。特に transient に近い VEP の解析では FFT との相違に興味がもたれる.またスペクトル分解 能が高く、雑音の影響を受けにくい等の FFT にはな い特徴をもつスペクトル推定法¹¹⁴である。

結果3に示すようにFFTと自己回帰モデルの次数 200におけるMEMでは時間周波数特性曲線の形はほ ぼ同じで,FFT,MEMとも6Hzをビークとする帯域 ろ過型を示した。しかし結果2に示すように自己回帰 モデルの次数によりMEMのパワースペクトルは変 化し、またそのスペクトルは transient VEPと steady



図7 正常眼における MEM および FFT による P-VEP の時間周波数特性.対象は正常 16 眼.視覚刺激 として空間周波数 2 c/d の正弦波格子を用いた. 横 軸は時間周波数(反転頻度の 1/2 倍),縦軸はパワー の平方根で,パワーは第 2 次高調波成分を用いた. MEM, FFT ともに 6 Hz をビークとする曲線とな る.

表1 正常16眼における MEM および FFT の 各高調波成分間の相関

Temporal frequency	Spectral frequency	Regression coefficient	Y- intercept	Correlation coefficient
2 Hz	4 Hz	0.660	0.314	0.661
	8 Hz	0.457	0.299	0.568
	12 Hz	0.551	-0.121	0.838
3 Hz	6 Hz	0.572	2.053	0.284
	12 Hz	1.026	0.110	0.729
	18 Hz	1.015	-0.283	0.903
4 Hz	8 Hz	1.204	-0.359	0.957
	$16~\mathrm{Hz}$	0.923	0.065	0.838
	24 Hz	0.660	0.111	0.774
6 Hz	12 Hz	0.859	2.317	0.638
	24 Hz	0.762	0.031	0.767
8 Hz	$16~\mathrm{Hz}$	1.504	-0.829	0.826
12 Hz	24 Hz	1.084	0.004	0.721

両者の相関は 4Hz における第2次高調波成分において最も高く (r=0.957), 3Hz における第6次高調波成分(r=0.903)がそれに続 く.時間周波数の低い領域(2,3Hz)ではより高次の高調波成分にお いて相関が高い傾向を認める.

state VEP とで大きく異なる. transient VEP におい て FFT とスペクトルが近似するのは steady state VEP より大きな次数に於てである.また最終予測誤差 等による方法¹⁾⁵⁾では結果に示したように何等かの前

406

平成4年3月10日

407

処理を施さないと実用的でない.

特に transient に近い波形ではより高次の成分も解 析の対象に含めると FFT と MEM のスペクトル解析 における特徴の相違が明らかとなると考えられる. steady state VEP に比べ繰り返し波形の数が少なく 波形が複雑な Transient VEP では MEM のほうがよ り正確な結果を与える可能性がある。今後この点に関 して臨床例を用いて検討を加える予定である。一方 MEM の短所として FFT に比べはるかに多くの計算 時間を要すること,パラメータ(自己回帰モデルの次 数)の与え方が難しく,位相の測定ができないことな どが挙げられる。

結果4に示したようにFFTとMEMの相関を調べると時間周波数2Hzにおいては第2,4次高調波成分(スペクトル周波数4,8Hzにおけるパワー)で相関係数は0.6前後とやや低いが,第6次高調波成分では0.838と高くなり,時間周波数3Hzでもこの傾向は同じで高次高調波成分になるにつれ相関係数はほぼ0.7以上の高い値である.この回帰分析の結果はtransientに近いP-VEPでは第2,第4次高調波成分においてFFTとMEMの相違がより大きい事を示唆している.

本研究により、従来言われている MEM の特長の 他,1) 正常眼の P-VEP 波を MEM によりスペクトル 解析する際問題となるパラメータ(自己回帰モデルの 次数)のスペクトルに及ぼす影響が transient VEP と steady state VEP で異なること,2) 正常眼の P-VEP による時間周波数特性において MEM と FFT の高調 波成分の構成の相違が認められる事などの点が明らか になった. MEM の有用性および transient VEP のス ペクトル解析に関しては患眼を用いた臨床研究により 今後さらに明確にしていく予定である.

稿を終えるにあたり御指導,御校閲いただきました岩田 和雄教授に深謝いたします.

文 献

- 南 茂夫:科学計測のための波形データ処理.東 京,CQ出版,166-180,1986.
- 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) Srebro R, Sokol B, Wright W: The power spectra of visually evoked potentials to pseudorandom contrast reversals of gratings. Electroencepha Clin Neurophysiol 51: 63-68, 1981.
- 入江純二: TV pattern reversal VECPの研究. VEPのDEGITAL処理. 日眼会誌 85: 502 -509, 1981.
- 8) Epstein CM, Gammon JA, Gemmill M, et al: Visual evoked potential pattern generation, recording, and data analysis with a single microcomputer. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 56: 691-693, 1983.
- 9) Cannon MW Jr: Contrast sensitivity: Psychophysical and evoked potential method compared. Vision Res 23: 87-95, 1983.
- 大関尚志:小児の黄斑錐体系機能検査としての Flash VEP の高速フーリエ変換による解析. 眼紀 34:2067-2074, 1983.
- 12) Jutai JW, Gruzelier JH, Connolly JF: Spectral analysis of the visual evoked potential (VEP): Effects of stimulus luminance. Psychophysiology 21: 665-672, 1984.
- 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.
- 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.
- 15) 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.
- 16) 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, 1990.
- 17) Hasegawa S, Abe H: Study on Fourier analysis of pattern visual evoked potentials in early glaucoma. ARVO abstracts. Invest Ophthalmol Vis Sci 31(Suppl): 231, 1990.
- 18) 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.
- Lattice INC: Lattice C リファレンスマニュア ル. 東京, ライフボード, 60-242, 1986.