

竹中技術研究所 正員 ○辰巳 安良
 京都大学防災研究所 正員 佐藤 忠信

1. はじめに

スペクトル特性を予測して設計用地震動を模擬することが良く行われているが、この場合、振幅と位相は独立に与えられることが多かった。しかし、地震動は波動の到達時刻以前では振幅がゼロとなる因果関数であるから、スペクトルの振幅と位相の間には相関性があり、両者の独立性を仮定することによって模擬された地震動は本質的に矛盾を含んでいることになる。本研究は、実地震記録に因果性の概念を適用して得られる最小位相推移関数（システム応答関係）とそれへの入力特性について考察を加えたものである。

2. 最小位相推移関数による波形の分離

因果関数 $f(t)$ のフーリエスペクトルを次式のように表す。 $F(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) = A(\omega)e^{j\phi(\omega)}$
 ただし、 $R(\omega)$ は実数部、 $X(\omega)$ は虚数部、 $A(\omega)$ は振幅、 $\phi(\omega)$ は位相である。ここに、 $R(\omega)$ と $X(\omega)$ は互いに独立ではなく、Hilbert 変換によってそれらの一方は他方から一意的に決定される。一方、 $F(\omega)$ を次式で表現した場合、 $F(\omega) = e^{-\alpha(\omega) - j\theta(\omega)}$
 すなわち、 $\alpha(\omega) = -\ell_n A(\omega)$ 、 $\theta(\omega) = -\phi(\omega)$ とした場合、 $\alpha(\omega)$ から $\theta(\omega)$ が一意的に決定できなくなる。しかしながら、 $\ell_n F(j\omega)$ が解析関数になるという仮定を設けると、 $\theta(\omega)$ は $\alpha(\omega)$ から一意的に決定できる。このような関数は最小位相推移関数とよばれる¹⁾。この場合Wiener-Lee 変換により、 $\alpha(\omega)$ はフーリエ級数展開を用いて $\theta(\omega)$ と関係づけることができる。

そこで、図-1のフローに示すように、まず原波形をフーリエ変換し、求めたフーリエ振幅 $|F(\omega)|$ を Wiener-Lee 変換を用いて最小位相推移関数としての回帰式で表現し、これから、その振幅 $|F_m(\omega)|$ と位相 $\phi_m(\omega)$ を決定し、最小位相推移関数 $F_m(\omega)$ を求める。

さらに、 $F(\omega)$ を $F_m(\omega)$ で除することにより、残余のスペクトル $F_R(\omega)$ を求め、 $F_m(\omega)$ と $F_R(\omega)$ をフーリエ逆変換することにより、各々の時刻歴波形 $f_m(t)$ および $f_R(t)$ を求める。このようにして、原波形を最小位相推移関数の逆フーリエ変換したものの $f_m(t)$ と残余の関数 $f_R(t)$ のコンボルーションとして分離することができる。ここで、関数 $f_m(t)$ は地震波の伝播経路などの波動伝達システムにかかわるものであり、 $f_R(t)$ は断層面上の破壊過程などで表現される入力に大きく関係するものと推定できる。

3. 計算例と考察

上述の手法に基づき、以下の4波形について計算を行った。

a) 1自由度系のインパルス応答関数〔固有振動数 1.0Hz 、減衰定数 0.1 〕を最大値を 100 として 10 秒ずらせて2波加えた波形、b) インパルス応答関数〔a)と同一〕を最大値、正負、初期時刻を変化させ8波加えた波形、c) E1 Centro (1940) のNS成分の変位波形、d) 八戸(1968)のEW成分の変位波形

図-2は例としてa), d) の原波形のフーリエスペクトル $F(\omega)$ と回帰で求めた最小位相推移関数 $F_m(\omega)$ を比較して示したものである。細線が $F(\omega)$ 、太線が $F_m(\omega)$ を示す。a), d) も $F_m(\omega)$

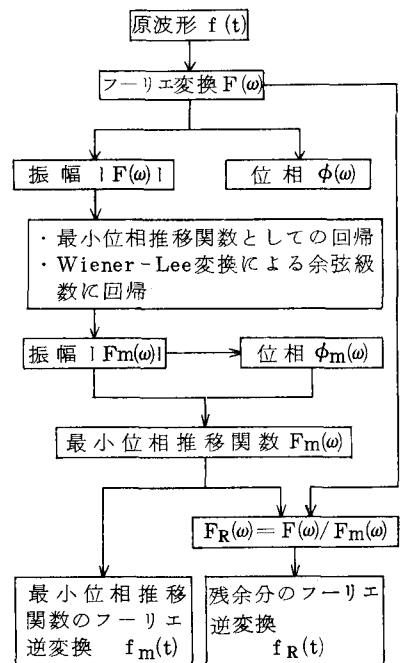


図-1 計算手順のフロー

の位相は $F(\omega)$ の位相に比して変化が小さいこと、a)に比してd)の方が $F(\omega)$ と $F_m(\omega)$ のフーリエ振幅の相関が大きいこと等がうかがえる。

図-3はa)~d)の各々の波形について、 $f(t)$ 、 $f_m(t)$ 、 $f_R(t)$ を上から順にならべたものである。これから以下のことがいえる。

- i) 最も基本的なa)の波形については、インパルス応答関数と入力がよく分離されている。
- ii) やや複雑なb)の波形についても、インパルス応答関数と入力がよく分離され、 $f_R(t)$ に入力の大きさ、正負、時刻が明確に表れている。
- iii) c)のEl Centro波については、Trifunacらの研究²⁾で知られている発震の情報が $f_R(t)$ の波形に表れている。これより、実地震波を分離すると、 $f_m(t)$ が伝達経路のシステムにかかわるものを表し、 $f_R(t)$ が発震にかかわる情報を多く持っていることがわかる。
- iv) d)の八戸波については $f(t)$ と $f_m(t)$ が良い相関を示しシステムの特性が卓越した波形であることがわかる。またこのような場合、原波形のフーリエ振幅 $|F(\omega)|$ だけから、原波形を推定できることがわかる。

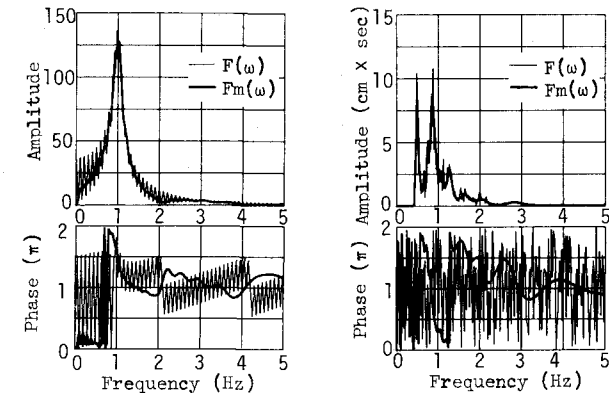
4. おわりに

地震波の因果性、すなわち解析関数であるという数学的な特性を有効に利用することにより、地震波自体の持つより多くの情報を抽出すること、あるいは設計用模擬地震動をより合理的に作成することが可能になるであろう。

最後に、貴重な御示唆を頂いた群馬大学、斉藤三郎助教授に深く感謝の意を表します。

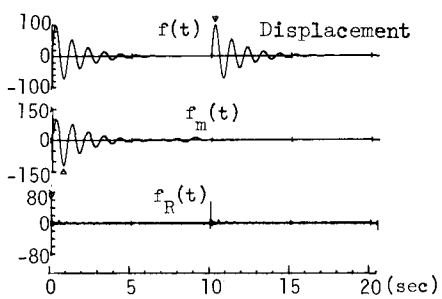
参考文献

- 1) バボリス：応用フーリエ積分，オーム社，昭和53年
- 2) Trifunac M.D. and Brune J.N.: Complexity of Energy Release—, BSSA, Vol.60, No.1, pp.137—160, February, 1970

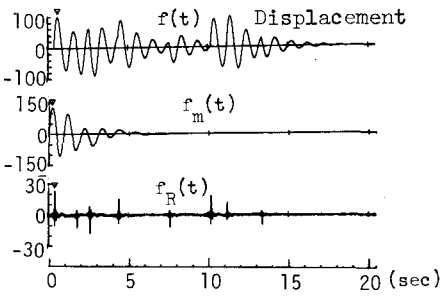


a) インパルス応答関数(2波) d) 八戸(1968) EW

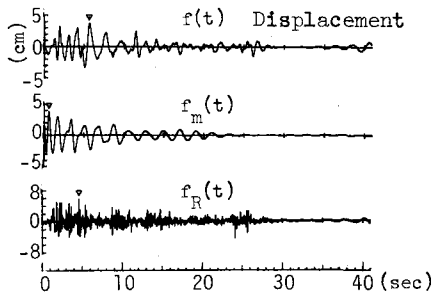
図-2 フーリエスペクトルの比較



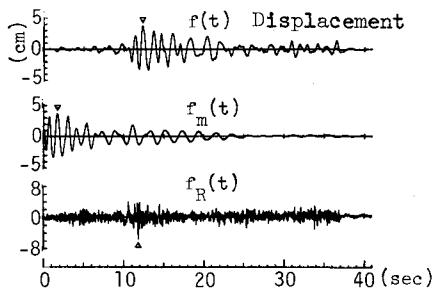
a) インパルス応答関数(2波)



b) インパルス応答関数(8波)



c) EL Centro (1940) NS



d) 八戸(1968) EW

図-3 波形の分離