地震動の位相特性のモデル化

京都大学防災研究所　正員　佐藤忠信
京都大学防災研究所　正員　土岐憲三
東海旅客鉄道株式会社　○岡田明夫

1.はじめに　本研究では、実地震記録を最小位相推移関数と全域通過関数とに分離し、両関数をモデル化する。そしてモデルの中に含まれるパラメータを複数の観測地震記録を用いて同定し、各パラメータのアテニュエーション則（距離減衰則）を構築し、それを用いて模擬地震波形の作成を行おうとするものである。

2.最小位相推移関数と全域通過関数　地震動の原波形f(t)をフーリエ変換し、周波数領域F(ω)に変える。F(ω)から求めたフーリエ振幅の対数を取り符号を変えたものを、ヒルバート変換することにより最小位相が求められる。この最小位相とフーリエ振幅を用いてフーリエ逆変換することにより求められる時刻歴の関数h(t)を最小位相推移関数と呼ぶ。最小位相推移関数のフーリエ振幅は原波形のものと一致するが、位相が異なっているので時刻歴に変換すると原波形とは非常に異なったものとなる。そこで因果性を満たす全域通過関数a(t)を求める。周波数領域では全域通過関数は　$A(\omega)=F(\omega)/H(\omega)$　で示されるので、これをフーリエ逆変換し時刻歴にすることにより全域通過関数を求めることが出来る。

3.最小位相推移関数のモデル化　最小位相推移関数のモデル化を行う。対象とした地震波形はEl Centro地震記録である。フーリエ振幅スペクトルから基本特性を取り出し、それに乱数をのせることによってモデル化することにより、最小位相推移関数のモデルを作成した。フーリエ振幅の基本特性は、振幅スペクトルがピークとなる位置の1/2までは直線で増加し、それ以降は$y=A\exp(-\alpha x)$で減少すると考え、αは最小二乗法で決定した。図-1に例を示した。実際のフーリエ振幅の対数を取ったものと、基本特性の対数を取ったものとのばらつきは正規乱数と見なせたので、基本特性の対数を取ったものに正規乱数をのせて、これのヒルバート変換より最小位相を求めた。この位相と振幅をフーリエ逆変換することにより最小位相推移関数が求められる。この方法を用いると、フーリエ振幅スペクトルがピークとなる周波数f_p、f_pでの振幅値A_{max}、周波数0Hzのときの振幅の初期値S、正規乱数の標準偏差σ、αの値、の五個のパラメータにより最小位相推移関数がモデル化できることになる。

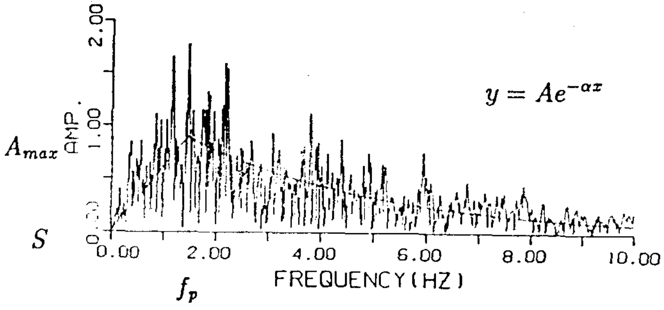

図１　抽出したフーリエ振幅の位相特性

4.全域通過関数のモデル化　全域通過関数はフーリエ振幅スペクトルの大きさが１であるので、位相スペクトルをモデル化できれば、全域通過関数のモデル化ができることになる。位相スペクトルから全域通過

Tadanobu SATO, Kenzo TOKI, Akio OKADA

関数を求める方法として振幅スペクトルを１として求めれば良い。すなわち、位相スペクトルを$\phi(\omega)$とすると、全域通過関数の実数部は$\cos\phi(\omega)$となるので、それをヒルバート変換することによって虚数部が求められる。この場合、周波数領域では全域通過関数が $A(\omega)=\cos\phi(\omega)+i\sin\phi(\omega)$ として示されるので、$A(\omega)$をフーリエ逆変換することによって全域通過関数の時刻歴を求めることができる。全域通過関数の位相スペクトルの差分を用いてそのモデル化を行う。位相スペクトルについて、ｎ＋１番目のデータからｎ番目のデータを引いた差分をｎ＋１番目にプロットした差分時系列が図-2である。これをポアソン過程と仮定し、位相スペクトルをモデル化した。差分時系列において、ある閾値を越える値が発生する事象が周波数軸上でポアソン過程にしたがって発生するとし、閾値を越えない値については、0.0周りの正規分布にしたがうと仮定し、その分散を求めて閾値を越えない正規乱数をのせた。この差分時系列モデルを用いることにより、全域通過関数のモデルを作成することができる。この方法だとあるレベルを越える値が発生する事象の周波数軸上での発生率μと、レベルを越えない値の0.0周りの分散の二個のパラメータによりモデル化できることになる。

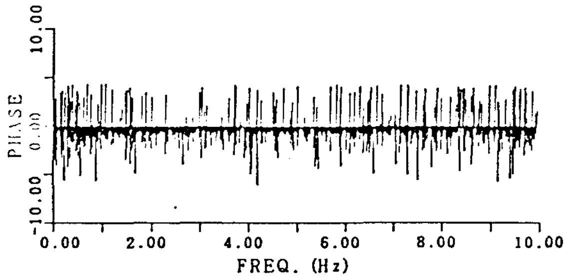

図２　位相スペクトルの差分時系列

5.模擬地震波の作成　ここでは、前章までで述べたモデル化手法に基づいて、模擬地震動の作成モデルを構築する。まず、前章までで述べた最小位相推移関数と全域通過関数のモデル化パラメータを、複数の地震記録について求めた。ここでは27地点での地震記録を用いた。次に各々の関数のモデル化に用いた、全部で七個のパラメータについてアテニュエーション則を決定した。ここで用いたアテニュエーション則は式-1で表されるものとした。定数 A,a,b は最小二乗法により決定した。これによりマグニチュードと震央距離により、最小位相推移関数と全域通過関数をシミュレートできることになる。両関数を合成することにより、模擬地震波が作成できる。図-3にマグニチュード7.0で震央距離を50kmとした模擬地震波を示す。さらにマグニチュードと震央距離を一様乱数により決定して模擬地震波をシミュレートした。ただしマグニチュードは7.0から8.0 、震央距離は50kmから300km とした。100個の模擬地震波を作成し、それぞれの最大加速度を求め、震央距離との関係を示したのが図-4である。実線は多数の実測記録に基づく経験式である。割と良い一致を示していると思われる。

$$y = A \times \frac{10^{aM}}{(\Delta+30)^b} \quad (式-1)$$

$$\begin{cases} y & : 各々のパラメータの値 \\ M & : マグニチュード \\ \Delta & : 震央距離 \\ A,a,b & : 定数 \end{cases}$$

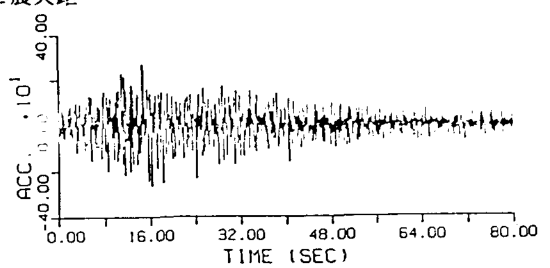

図３　マグニチュード7.0 、距離 50km の模擬地震波

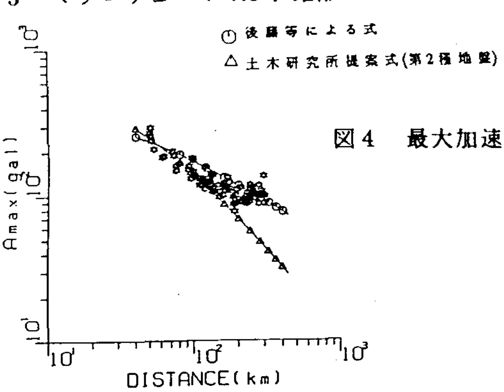

図４　最大加速度

＜参考文献＞

佐藤忠信・土岐憲三・森口康弘：地震動に含まれる位相特性のモデル化,京都大学防災研究所年報,第31号B-2,昭和63年4月

土木学会：地震動・動的物性,技報堂出版,pp.14-28