

広島工業大学 正員 中山隆弘
藤原建築設計事務所 正員 藤原豪紀

1. まえがき 非定常スペクトルを用いて地震波をシミュレーションする場合、非定常スペクトルを反映させた振幅と一様乱数による位相を用いた調和関数型モデルが採用されることが多い。これは非定常振幅特性を反映した波形が簡単に合成できるという実用性の点から採用されてきたようであり、非定常スペクトル理論から誘導されたものではない。

ところで、筆者らはPriestleyのEvolutionary Spectrum理論¹⁾に基づいて、非定常スペクトルと、時間と共に変化する位相(以下時間位相という)を用いた非定常波のシミュレーション法を提案した²⁾。ここでは、El Centro NS(1940)の地震動記録を用い、時間位相を用いてシミュレーションした波形の特性と、従来の方法を用いてシミュレーションした波形のそれとの簡単な比較を行う。

2. 時間位相を用いたシミュレーション式 非定常確率過程は、次式で表されるとする。

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t, \omega) e^{i\omega t} dZ(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dF(t, \omega) \quad (1)$$

ここで、非定常スペクトルは次のように定義される。

$$2E[dF(t, \omega)]^2 = f(t, \omega) d\omega \quad (2)$$

さらに、確定関数である変調関数 $A(t, \omega)$ は、

$$A(t, \omega) = A_R + iA_I = |A(t, \omega)|(\cos \beta(t, \omega) + i \sin \beta(t, \omega)), \quad \tan \beta(t, \omega) = A_I / A_R \quad (3)$$

と表され、直交過程 $dZ(\omega)$ は、

$$dZ(\omega) = dZ_R + i dZ_I = |dZ(\omega)|(\cos \theta(\omega) + i \sin \theta(\omega)), \quad \tan \theta(\omega) = dZ_I / dZ_R \quad (4)$$

と表されるとする。また、次式が成り立つとする。

$$2E[dZ(\omega)]^2 = f(\omega) d\omega, \quad f(t, \omega) = |A(t, \omega)|^2 f(\omega) \quad (5)$$

このとき次の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} dF(t, \omega) &= |dF(t, \omega)|(\cos \varphi(t, \omega) + i \sin \varphi(t, \omega)) \\ &= (A_R dZ_R - A_I dZ_I) + i(A_R dZ_I + A_I dZ_R) \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $dF(t, \omega) = dF_R + i dF_I$, $\tan \varphi(t, \omega) = dF_I / dF_R$ とする。

(6)式を用い、 $X(t)$ が実関数であるとする、非定常確率過程(1)の標本関数は近似的に次式で表すことができる。

$$x(t) \cong \sum_{i=1}^n \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \beta(t, \omega_i) + \theta(\omega_i)) \quad (7)$$

式中、 $\theta(\omega)$ が確率変数となる。なお従来の方法では次式が用いられる。

$$x(t) \cong \sum_{i=1}^n \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \theta(\omega_i)) \quad (8)$$

3. 数値計算 解析データとして、El Centro NS(1940)の地震動記録(時間間隔0.02秒、記録時間22秒)を用いた。図1に地震動波形を示す。

非定常スペクトルの解析は文献3)に示すcomplex demodulation法による方法を用いた。解析に用いたバンドパス、ローパスフィルターのパラメーターは、文献2)と同様である。(7)および(8)式の $\theta(\omega)$ は、 $[-\pi, \pi]$ の一様乱数を用い、(7)式の $\beta(t, \omega)$ は、時間位相 $\varphi(t, \omega)$ からFFTによって求めた位相を引いて算出した。

比較のため、(7)式と(8)式を用いてシミュレーションした20波の波形から得られた結果を表1に示す。

図2にはそれぞれ各20波の加速度応答スペクトルの一部を示す。表と図のいずれによっても(7)式による結果のばらつきが(8)式のそれに比較して小さいことがわかる。図3にはシミュレーション波形の非定常スペクトルと時間位相の一例を示す。本例では、従来の方法によるシミュレーション波形の非定常スペクトルが原波形のそれと大きく異なっていることがわかる。

5. まとめ Priestlyのevolutionary spectrum理論に基づいた地震動のシミュレーション式を用い、El Centro NS記録に対して計算を行った。さらに従来のシミュレーション法による結果との簡単な比較を行った。今後は地震波のシミュレーションに必要となる条件を明確にし、各法の特徴を明らかにしたい。

参考文献 1) Priestley, M. B.: Evolutionary Spectra and Nonstationary Processes, Jour. R. Statist. Soc., Ser. B, Vol. 27, pp. 204~237, 1965.

2) 中山隆弘, 藤原豪紀: 非定常スペクトル理論に基づく地震波のシミュレーション, 平成6年度土木学会中国四国支部年次学術講演会講演概要, 1994年5月。

3) 小松定夫・藤原豪紀・中山隆弘: コンプレックス・ディモデュレーション法による地震動の非定常スペクトル解析, 土木学会論文報告集, 第368号, 1986年4月。

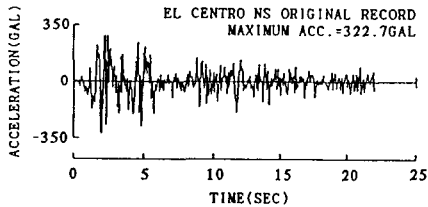


図1 El Centro NS 原波形

表1 シミュレーション結果

項目	式(7)	式(8)	備考
周波数間隔 Δf (Hz)	文献3)	0.05 等間隔	0.1~9.5Hz
$\theta(\omega)$ の分布	一様乱数	一様乱数	$[-\pi, \pi]$
$\theta(\omega)$ の整数	1.4	1.89	
最大加速度の範囲	250.7~404.9	210.2~515.4	単位 gal
同平均値	342.9	351.7	原波形 322.7
同標準偏差	37.7	85.0	
最大加速度の発生時刻範囲	1.84~2.76	1.60~5.58	単位 sec
同平均値	2.25	2.85	原波形 2.02秒
同標準偏差	0.28	1.21	

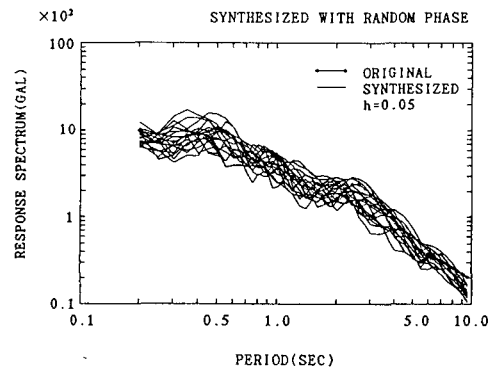
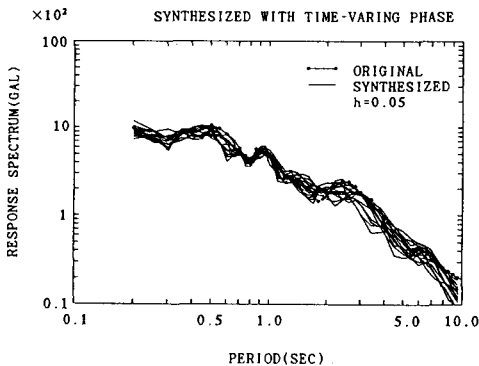


図2 シミュレーション波形の応答スペクトル

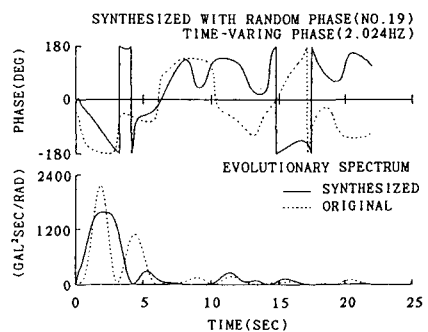
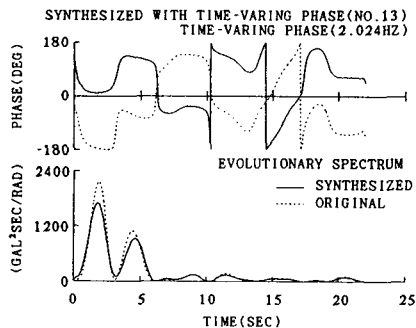


図3 シミュレーション波形の非定常スペクトルと時間位相