

非定常スペクトル理論による地震動のシミュレーションと応答スペクトル

梶谷エンジニア中国支店 正員 ○藤原 豪紀

広島工業大学 正員 中山 隆弘

フクヨシエンジニアリング 正員 多久見宗一郎

1. まえがき 筆者らは、Evolutionary Spectrum理論に基づいて、非定常スペクトルと、時間の関数である位相（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¹⁾。さらに、本法と従来法（非定常スペクトルを反映させた振幅成分と一様乱数を用いたシミュレーション法）との比較を行い、本法の方がより原波形に近い波形をシミュレートできることを示した。ここでは、本法によるシミュレーション波から求めた応答スペクトルの特性について検討する。特に、非定常スペクトルの計算に用いるバンドパスフィルターの帯域幅によって、シミュレーション波群の応答スペクトルのばらつきが変化することを示す。

2. シミュレーション式 既報¹⁾にしたがって、簡単にシミュレーション式を示す。

実関数である非定常確率過程 $X(t)$ が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、 $A(t, \omega)$ 、 $dZ(\omega)$ はそれぞれ変調関数と直交過程である。この2つの関数は一般的には複素関数と考えられる。このとき、(1)式は非定常スペクトルを用いて次のように書き直すことができる。

$$X(t) \cong \sum_I \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \varphi(t, \omega_i)) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \quad \tan \varphi(t, \omega) &= \frac{(A_R dZ_I + A_I dZ_R)}{(A_R dZ_R - A_I dZ_I)} \\ &= \frac{(\tan \beta(t, \omega) + \tan \theta(\omega))}{(1 - \tan \beta(t, \omega) \tan \theta(\omega))} \\ &= \tan(\beta(t, \omega) + \theta(\omega)) \end{aligned} \quad (3)$$

なお、添字 R, I はそれぞれ実部、虚部を表す。 $-\pi \leq \varphi(t, \omega) \leq \pi$ とすると、次の関係式が成立する。

$$\varphi(t, \omega) = \beta(t, \omega) + \theta(\omega) + 2n\pi, \quad n \text{ は整数} \quad (4)$$

したがって、非定常確率過程の標本関数は次式のように表すことができる。

$$x(t) \cong \sum_{i=1}^n \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \beta(t, \omega_i) + \theta(\omega_i)) \quad (5)$$

ここで、 $\theta(\omega)$ が確率変数である。(5)式が本法によるシミュレーション式となるが、式中、 $\beta(t, \omega)$ すなわち変調関数 $A(t, \omega)$ が一意に決定できないことから、このままでは(5)式は計算できない。そこで、 $dZ(\omega)$ が $x(t)$ の複素フーリエ係数で表されると仮定すると、 $\beta(t, \omega)$ は次式から求めることができる。

$$\beta(t, \omega) = \varphi(t, \omega) - \theta(\omega) \quad (6)$$

ここで、 $\theta(\omega)$ は $x(t)$ のフーリエ位相である。したがって、シミュレーション式は最終的に次式で表される。

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

3. 数値計算 計算には、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。シミュレーションに用いた非定常スペクトルは文献²⁾による方法から求めた。非定常スペクトルの計算に用いたフィルターのパラメーター（図1）を表1～3に示す。表1の値は文献²⁾から、表2の値は Δf を0.5Hzに固定するように、さらに、表3の値は応答スペクトルのばらつきを周波数域において均一化するように設定した。表1と3のバンドパスフィルターは、それぞれ図2と3に、減衰定数 $h=0.05$ の周波数応答関数の絶対値と併せて図示した。図4～6には、それぞれ表1～3のフィルターを用いてシミュレートした20波形の応答スペクトル

を示す。なお、(7)式の $\theta(\omega)$ には $[-\pi, \pi]$ の一様乱数を用いた。

図から明らかなように、応答スペクトルのばらつきはバンドパスフィルターの帯域幅によって変化する。これはバンドパスフィルターと周波数応答関数の帯域幅の関係によって説明できよう。すなわち、応答のばらつきは $\theta(\omega)$ からもたらされるので、周波数応答関数の帯域幅中に複数のバンドパス波形が含まれる場合にはばらつきが大きくなる。つまり、周波数応答関数の幅よりバンドパスフィルターの幅を小さくすると、ばらつきが大きくなる。ばらつきを周波数域で均一化するためには、図3に示すようにバンドパスフィルターの幅を周波数応答関数のそれにおおよそ一致するように設定すればよい。

4. まとめ 時間位相を考慮してシミュレートした地震動波形の応答スペクトルの特性について検討した。今回は加速度応答スペクトルに限定したが、シミュレーション波形の応答のばらつきがバンドパスフィルターと周波数応答関数の帯域幅の関係から説明できることを示した。

参考文献 1) 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，土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，1994年5月。

2) 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。

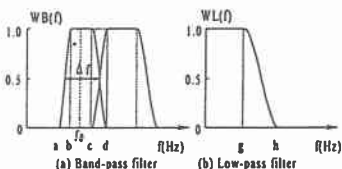


図1 Ormsby フィルター

表1 フィルターパラメータ(1)

No.	fo(Hz)	a(Hz)	b(Hz)	c(Hz)	d(Hz)	g(Hz)	h(Hz)
1	0.101	0.080	0.090	0.110	0.124	0.050	0.140
2	0.140	0.110	0.124	0.152	0.172	0.110	0.200
3	0.194	0.152	0.172	0.212	0.240	0.180	0.290
4	0.271	0.212	0.240	0.296	0.335	0.290	0.400
5	0.378	0.296	0.335	0.413	0.468	0.360	0.500
6	0.529	0.413	0.468	0.578	0.655	0.500	0.800
7	0.740	0.578	0.655	0.809	0.917	0.700	1.000
8	1.037	0.809	0.917	1.133	1.284	0.800	1.500
9	1.451	1.133	1.284	1.586	1.797	1.300	2.000
10	2.030	1.586	1.797	2.219	2.514	2.100	3.000
11	2.841	2.219	2.514	3.104	3.517	3.100	4.000
12	3.974	3.104	3.517	4.343	4.921	4.500	5.900
13	5.561	4.343	4.921	6.077	6.886	5.000	8.000
14	7.782	6.077	6.886	8.504	9.637	8.000	11.800

表2 フィルターパラメータ(2)

No.	fo(Hz)	a(Hz)	b(Hz)	c(Hz)	d(Hz)	g(Hz)	h(Hz)
1	0.414	0.080	0.247	0.581	0.748	0.500	0.800
2	0.915	0.581	0.748	1.082	1.249	1.000	1.400
3	1.416	1.082	1.249	1.583	1.750	1.500	2.300
4	1.917	1.583	1.750	2.084	2.251	2.000	3.300
5	2.418	2.084	2.251	2.585	2.752	2.500	4.300
6	2.919	2.585	2.752	3.086	3.253	3.000	5.300
7	3.420	3.086	3.253	3.587	3.754	3.500	6.300
8	3.921	3.587	3.754	4.088	4.255	4.000	7.300
9	4.422	4.088	4.255	4.589	4.756	4.500	8.300
10	4.923	4.589	4.756	5.090	5.257	5.000	9.300
11	5.424	5.090	5.257	5.591	5.758	5.500	10.300
12	5.925	5.591	5.758	6.092	6.259	6.000	11.300
13	6.426	6.092	6.259	6.593	6.760	6.500	12.300
14	6.927	6.593	6.760	7.094	7.261	7.000	13.300
15	7.428	7.094	7.261	7.595	7.762	7.500	14.300
16	7.929	7.595	7.762	8.096	8.263	8.000	15.300
17	8.430	8.096	8.263	8.597	8.764	8.500	16.300
18	8.931	8.597	8.764	9.098	9.265	9.000	17.300
19	9.432	9.098	9.265	9.599	9.766	9.500	18.300

表3 フィルターパラメータ(3)

No.	fo(Hz)	a(Hz)	b(Hz)	c(Hz)	d(Hz)	g(Hz)	h(Hz)
1	0.142	0.080	0.110	0.170	0.209	0.100	0.200
2	0.251	0.170	0.209	0.287	0.338	0.150	0.300
3	0.393	0.287	0.338	0.439	0.505	0.180	0.400
4	0.576	0.439	0.505	0.637	0.723	0.300	0.800
5	0.815	0.637	0.723	0.894	1.005	0.500	1.000
6	1.126	0.894	1.005	1.228	1.373	0.800	1.500
7	1.529	1.228	1.373	1.663	1.851	1.000	2.000
8	2.054	1.663	1.851	2.227	2.472	1.500	3.000
9	2.736	2.227	2.472	2.961	3.279	2.000	4.000
10	3.623	2.961	3.279	3.916	4.329	3.000	5.500
11	4.776	3.916	4.329	5.156	5.694	4.000	7.000
12	6.274	5.156	5.694	6.769	7.468	5.000	8.000
13	8.223	6.769	7.468	8.866	9.774	8.000	12.000

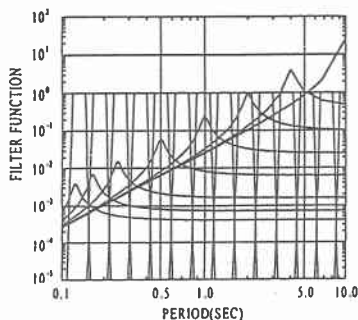


図2 バンドパスフィルター(1)と周波数応答関数

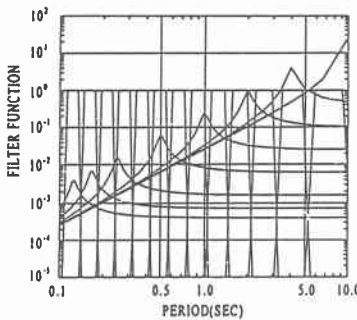


図3 バンドパスフィルター(3)と周波数応答関数

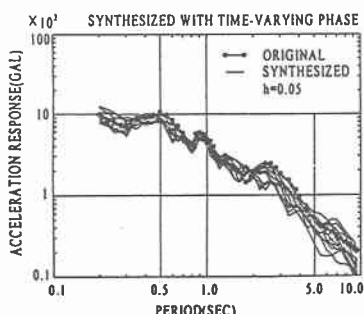


図4 応答スペクトル(バンドパス(1))

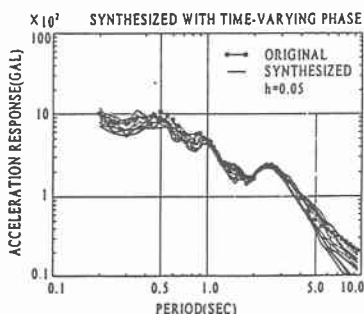


図5 応答スペクトル(バンドパス(2))

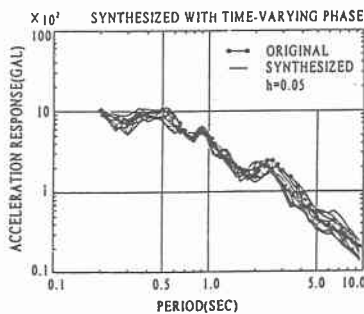


図6 応答スペクトル(バンドパス(3))