

神戸大学工学部 正員 桜井春輔
神戸大学工学部 学 山下正章

1 まえがき 現在、海洋構造物としてはシーバース、石油プラットフォームなどがあるが、いずれも波浪のピーク周波数に一致するような固有振動数をもつ構造物の場合、動的な問題としてその波浪応答解析を行なう必要がある。この様な波浪応答計算の手法として、周波数領域で行なうスペクトル解析と時間領域で行なう時系列解析とがあるが、外力の抗力の項が線型でないでそのような非線型性を完全に表示できる時間領域での解析結果が必ず必要である。そこで、より合理的な波浪シミュレーションを行なうために Borgman の方法をもとにして (A) Wave Superposition 法と (B) Digital filter 法の相方の比較を試みた。

2 波浪シミュレーション法

(A) Superposition 法、あるスペクトル密度 $S(\omega)$ をもつ時系列 $x(t)$ は、それがゼロ平均ガウスランダム過程ならば式(1)の様に有限数の調和波の和で近似される。ここに、 $A_n = [S(\omega_n)\Delta\omega]^{1/2}$ 、

$$x(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N A_n \sin(\omega_n t - \phi_n) \quad \dots (1)$$

$\omega_n = (n - 1/2)\Delta\omega$ 、 ϕ_n は $0 \sim 2\pi$ に一様分布するランダム変数である。シミュレートする波浪スペクトルとして有義波高 $5m$ ($U_{1.5} = 15.3m/s$) の Pierson-Moskowitz Spectrum 式(2)とすると、波高 $\eta(t)$ 、水粒子速度 $v(t)$ 、加速度 $a(t)$ はそれぞれ線型波動理論により式(3)~(5)でシミュレートされる。ここに、 $A_n = [S_{\eta}(\omega)\Delta\omega]^{1/2}$ 、 $\omega_n^2 = K_n g \tanh K_n d$ 、 d : 水深、 z : 海底からの距離。

$$S_{\eta}(\omega) = 8.10 \times 10^{-3} \frac{g^2}{\omega^5} \exp(-0.74 (g/\omega)^4) \quad \dots (2)$$

$$\eta(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N A_n \sin(\omega_n t - \phi_n) \quad \dots (3)$$

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\cosh K_n z}{\sinh K_n d} \sin(\omega_n t - \phi_n) \quad \dots (4)$$

$$a(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N A_n \omega_n^2 \frac{\cosh K_n z}{\sinh K_n d} \cos(\omega_n t - \phi_n) \quad \dots (5)$$

(B) Digital filter 法、ある様なスペクトル特性をもつ入力 $r(t)$ にシミュレートするスペクトル特性をもつフィルター関数 $h(\tau)$ をコンボリューションして求める方法で式(6)で表わされる。

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) r(t-\tau) d\tau \quad \dots (6)$$

入力 $r(t)$ 、出力 $x(t)$ のパワースペクトルの間には式(7)の関係があり、 $h(\tau)$ と $H(\omega)$ はフーリエ

$$S(\omega) = |H(\omega)|^2 S_r(\omega) \quad , \quad H(\omega) = \sqrt{S(\omega)/S_r(\omega)} = \sqrt{S(\omega)/const.} \quad \dots (7)$$

変換の関係がある。実際のシミュレーションでは、FFT を使用するために式(6)の両辺をフーリエ変換し式(8)のようにして、さらに式(8)の左辺をフーリエ逆変換して時系列 $x(t)$ を求める。

$$F\{x(t)\} = F\{h(\tau)\} \cdot F\{r(t-\tau)\} = H(\omega) \cdot F\{r(t-\tau)\} \quad , \quad (F\{\} \text{はフーリエ変換を示す}) \quad \dots (8)$$

波高、水粒子速度、加速度のシステム関数は式(9)~(11)で与えられる。ここに、システム関数を式(7)のようにとすると、 $h(\tau)$ はゼロ位相フィルターとなる。

$$F\{h_{\eta}(\tau)\} = H_{\eta}(\omega) = \sqrt{S_{\eta}(\omega)/const.} \quad \dots (9) \quad H_v(\omega) = H_{\eta}(\omega) \cdot \omega \cdot \frac{\cosh K_n z}{\sinh K_n d} \quad \dots (10) \quad H_a(\omega) = H_{\eta}(\omega) \cdot \omega^2 \quad \dots (11)$$

3 シミュレーション例とその結果

(A) Superposition 法: 式(1)で与えられるスペクトルは $0 \leq f \leq \infty$ で分布しているが、低周波、

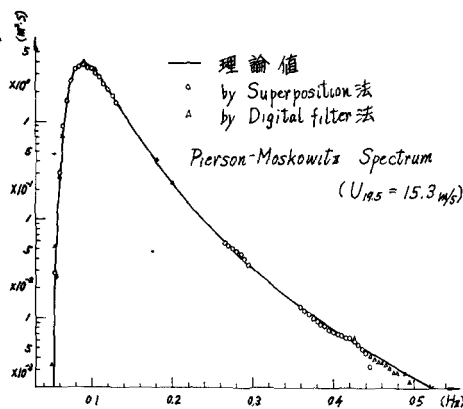


図1 波高の Power Spectrum

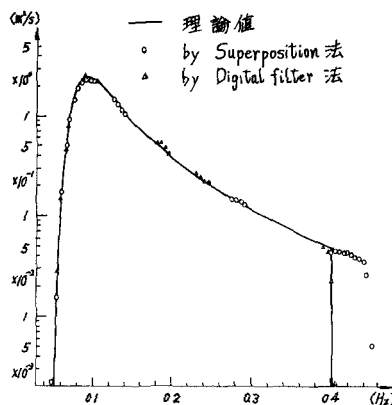


図2 速度の Power Spectrum

高周波側で全パワ
ーの約0.2%でカット
し、それぞれの限
界値を $f_1=0.06$, $f_2=0.45$
とし、 f_1 から f_2 ま
でを50等分して、
その間隔の中央値
をスペクトルの値
として計算した。
時間間隔は digital-
filter法其0.5秒とし、

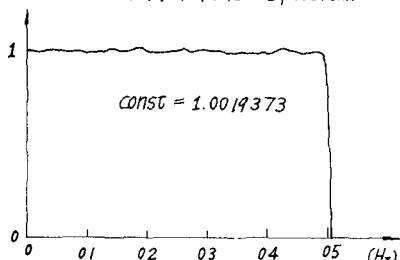


図4 Pink-Noise の Power Spectrum

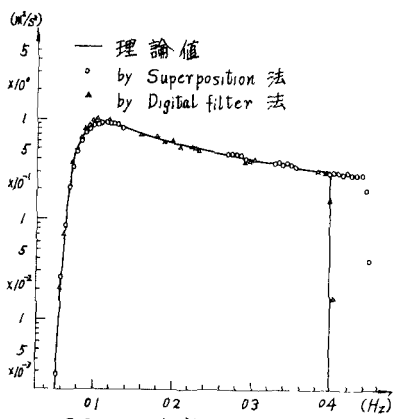


図3 加速度の Power Spectrum

パワースペクトルの計
算は Blackman-Turkey の
方法で行なった。結果
は図(1)~(3)に示す。

④ Digital filter 法：
高周波限界値を約0.4Hz
としてデータ数は2048
個として計算した。一
様なスペクトル特性を
もつ pink-noise $r(t)$ のパ
ワースペクトルを④

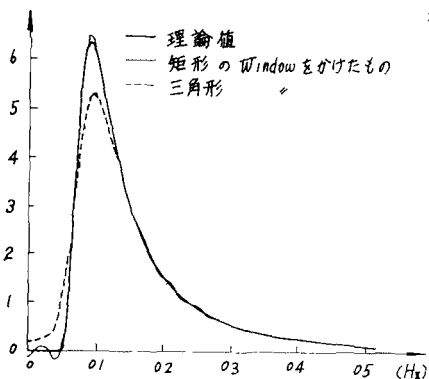


図5 波高のシステム関数

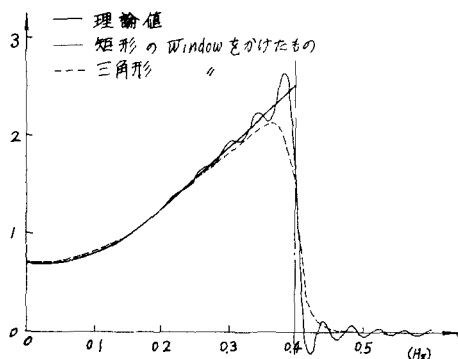


図6 速度のシステム関数

に示す。また、フィルターを有限個 ($N=50$) で打ち切った
もの、三角形 window をかけたもののフーリエ変換したシ
ステム関数を図(5)~(6)に示して比較した。

4 考察

シミュレーションされたパワースペクトルの図からみて、
2つの方法の精度はほぼ同じであろうと思われる。計
算時間は、加速度の場合、①法で約45秒、②法で
約33秒でFFT法の方がやや速い。また ②法で window
をかけたフィルターを有限個で打ち切る場合、そのwin-
dow の種類によって周波数特性が著しく変化すること
がわかる。波高の場合、矩形、速度加速度の場合、
三角形 window が直していていると思われる。

5 参考文献

Borgman, L.E. "Ocean wave simulation for engineering design"
Jour. ASCE. Vol 95 WW4 1969