

風波のスペクトルにおけるエネルギーバランス

九州大学 正員 光易 恒

九州大学 正員 草場 忠夫

九州大学 学生 板東 利幸

1. はじめに

波浪の数値予報には、風波のエネルギー平衡式 $\frac{\partial \psi(f, \theta)}{\partial t} + C_g \nabla \psi(f, \theta) = S (=S_1 + S_2 + S_3)$ (ここに $\psi(f, \theta)$ は波の二次元スペクトル, C_g は群速度, S は Source function で S_1 : エネルギー入力項, S_2 : 波相互間の非線形伝達項, S_3 : 消散項である) を積分する方法が用いられている。したがって波浪の予報の精度を高めるためにはこの平衡式の Source function を高い精度で推定することが必要である。Source function のうちエネルギー入力項 S_1 については最近の風波の増幅率の高精度の測定結果から、見積もることが可能になった。また非線形伝達項 S_2 については理論式から計算することができる。ところが消散項 S_3 に関してはまだはっきりとしたことがわかっていない。そこで今回は消散項の特性を明らかにするため (i) 風洞水槽において風による水面波の変動を長時間測定し分解能ならびに信頼度の高いスペクトルを求め、(ii) θ に関して積分した形の平衡式におけるエネルギー収支項、入力項、非線形伝達項をそれぞれ実測値、実験式、理論式により推定し、(iii) これをもとに消散項を計算し、各項と比較を行った。その結果を報告する。

2. 実験方法

実験は幅 0.6m, 高さ 0.8m, 水深 0.39m, 測定部の長さ 14.8m (後端 2.9m は金網を用いた消波機) の風洞水槽を使用して行われた。電気抵抗式波高計を測点 F: 0.52, 2.52, 4.52, 6.52, 8.52, 10.52m の 8 個所に設置し、水槽の一端より断面平均風速で 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0m/s の 5 種類の風を順次吹かせ各風速で定常状態に達した風波を約 90 分測定した。風については、ピトー管をトラバースして対数法則を適用して代表断面の風の摩擦速度 u_* を決定した。

3. 実験データの処理

風波のデータは、高速 A-D 変換によって、200Hz で sampling し数値フィルターとして 5 本の移動平均を行った後、数値を 5 本おきに間引いて使用した。このデータを用いて FFT 法により風波のエネルギースペクトル ϕ を計算した。

4. Source function の計算方法

風波のスペクトルエネルギーの主方向の変動を支配するエネルギー平衡方程式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial \phi(f)}{\partial t} + \tilde{C}_g \cdot \frac{\partial \phi(f)}{\partial x} = S_{in} + S_{nl} + S_{di} \quad \tilde{C}_g = \int C_g \cos \theta \psi(f, \theta) d\theta / \phi(f)$$

ここで $\phi(f)$ は一次元スペクトル, S_{in} はエネルギー入力項, S_{nl} は波相互間の非線形伝達項, S_{di} は消散項である。方向スペクトル $\psi(f, \theta)$ は次式により近似される。

$$\psi(f, \theta) = \phi(f) \times G(f, \theta) \quad G(f, \theta) = \begin{cases} G^*(m) \cos^2 \theta & (|\theta| < \pi/2) \\ 0 & (\pi/2 \leq \theta < 3\pi/2) \end{cases} \quad (G(f, \theta) \text{ は方向分布関数})$$

m の値は郭の論文(風波の波速に関する研究)を参考にして $m=4$ とした。Source function の各項の計算を以下に示す

(1) エネルギー収支項

今回の実験で得られた風波のスペクトル $\phi(f)$ は時間的に定常であるから $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ の項は消える。 $\tilde{C}_g \frac{\partial \phi}{\partial x}$ は次の差分式でもとめる。

$$\tilde{C}_g \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_i = \tilde{C}_g \frac{\Delta \phi}{\Delta F} \Big|_i = \tilde{C}_g \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{F_{i+1} - F_i} \quad (i=1, 2, \dots, 7)$$

ここで、 ϕ_i , F_i はそれぞれ測点番号 i でのパワースペクトルおよび吹送距離を表す。

(2) エネルギー入力項Sin

Sinは風波の増幅率 β から求められる。 β に関しては多数の報告があるがここでは単一周波数の規則波の発達から導いたMitsuyasu and Honda 1982の式

$$\frac{\beta}{f} = 0.34 \times \left(\frac{U_0}{c} \right)^2$$

が風波の主要周波数帯全域にわたって成り立つものと仮定し、これを各周波数成分に適用する。したがってSinは、次式により求められる。

$$Sin = \beta \bar{\phi}(f) = \beta \frac{\phi_{i+1} + \phi_i}{2}$$

(3) 非線形伝達項Sn1

非線形伝達関数Sn1は増田氏が室内実験室における風波の非線形伝達関数を計算した結果 (図1) を用いる。

(4) 消散項Sdi

以上をもとにして消散項Sdiは次式で計算される。

$$Sdi = C_g \frac{A_0}{A_f} \cdot Sin - Sn1$$

図2に主要周波数帯におけるエネルギーバランスを示す。

6. 結果

図2によると $f = 0.5 fm - 0.8 fm$ 付近までは風の入力エネルギーSinが直接波のエネルギーに変換されているがスペクトルピーク周波数 fm に近づくにつれてエネルギーの消散Sdiが増大し、 $f = fm$ では入力項Sinより消散項Sdiの方が大きくなる。周波数がさらに高くなると入力項Sinの減少とともに消散項Sdiも小さくなる。次に風の入力エネルギーのうち、どれほどの割合が風波の発達に寄与するかを調べて見た。すなわち次の値

$$E_{in} = \int Sin \, df, \quad E_{di} = \int Sdi \, df$$

を計算しエネルギーの全入力に対する全消散の比 $\frac{E_{di}}{E_{in}}$ をもとめたところ、その値は95%以上であることがわかった。すなわち風の入力エネルギーのうち発達に寄与するのはわずか5%あるいはそれ以下にすぎないことがわかった。このことは風波のFetch relationから当然予想されるものである。なおエネルギー消散項のスペクトル形に関しては現在のところ検討中である。

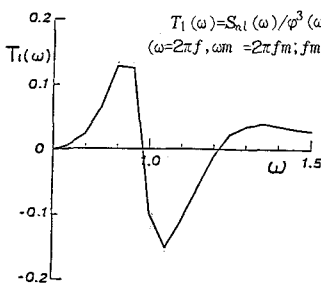


図1. 非線形伝達関数

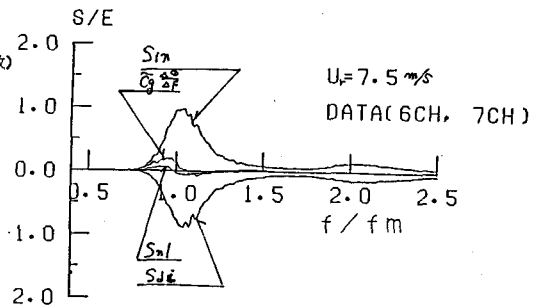


図2. エネルギーバランス
(縦軸は $E = \int \phi \, df$ で横軸はスペクトルピーク周波数 f_m で規格化したもの)