

島陰部の波浪スペクトルと係留浮体の動揺特性

九州大学大学院 学生員○宮地正樹 松村勇紀

九州大学大学院 正会員 山城 賢 吉田明徳 入江 功

1. まえがき

ある方向スペクトルを持つ波が比較的海底勾配の急な島に入射する場合、その周辺海域では島からの散乱波が重なりあうため、波浪場は複雑となる。しかも、散乱波の影響は相当な沖合にまで及び、実測値のみから入射波スペクトルを推定することは困難である。このような海域において、通常観測地点は高々数点に限られ、島周辺の任意地点における方向スペクトルを得ることは容易ではない。一方、波の散乱解析を用いると観測値からの入射波スペクトルの同定、および任意地点での方向スペクトルの推定を精度よく行うことができる(吉田ら2003)。

本研究では、境界要素法に基づく島周辺の散乱解析により入射波スペクトルを推定し、入射波に対する島周辺の波浪特性(方向スペクトル)を求め、これを外力として浮体の動揺解析を行うまでの一連の島周りの波浪及び島陰部係留浮体の動揺を推定するシステムを構築することを目的とし、その一環として北九州市沖合に位置する白島石油備蓄基地を対象に、波浪特性と浮体動揺の推定の妥当性を観測値をもとに検証する。

2. 観測の内容

図-1に白島石油備蓄基地の概観と、観測地点を示す。図において、地点A, B, Cでは波浪観測が、地点Eでは風向風速の観測が行われている。また基地建設時(1996年)には地点Dにおいて作業船の動揺が波浪(地点C)と同時に観測されている。なお、地点A, Bの観測は九州大学、地点C, Eの観測は基地によるものである。波浪観測時間は毎正時前後の10分間の20分間、サンプリング間隔は0.5秒である。

3. 観測値によるスペクトル推定法の検証

図-2は、波の散乱解析法を用いて算定した波峰線分布の一例で、周期10秒、波向き90°の単一成分入射波による分布を示している。図-3には図-2に示す異なる2地点(P1, P2)における散乱波の方向スペクトル分布を推定した結果を示している。図-3上図(P2)を見ると、クロススペクトル(空間のラグ(X, Y)に関する相関関数)分布から読み取れる波向きに対応して、方向分布関数 $G(\theta, f)$ は波向き310°で極大値を取っており、妥当な方向スペクトルが得られていることが分かる。下図(P1)をみても同様に、二つの方向からなる散乱波のクロススペクトルに対応して、 $G(\theta, f)$ が波向き195°, 260°で極大値を取っており、妥当な方向分布が得られていること

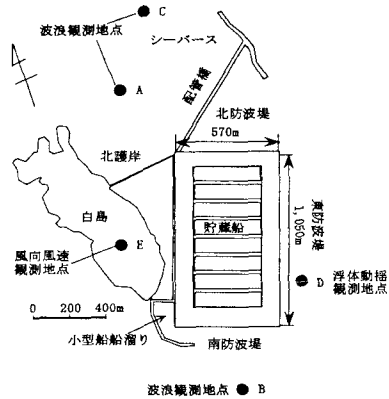


図-1 白島石油備蓄基地と波浪観測地点

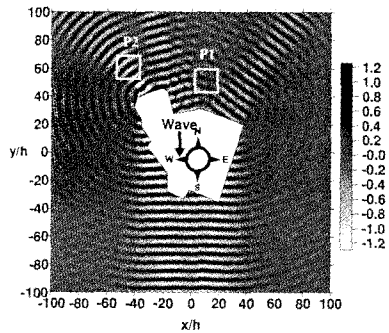


図-2 波峰線分布

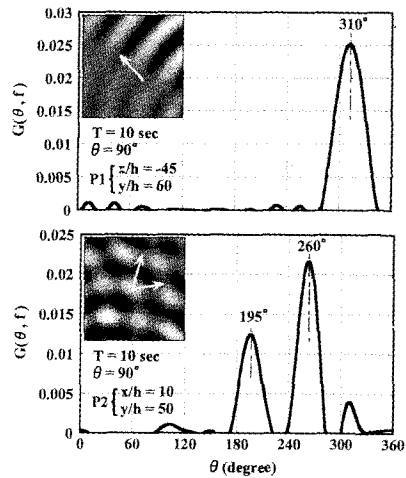


図-3 方向スペクトル

がわかる。したがって、動揺の散乱解析を入射波スペクトルの各周波数と波向きの成分 (f, θ) について行い、それらを重ね合わせることで方向スペクトルが算定される。

本研究ではまず、推定した方向スペクトルの観測値による検証を行う。図-1に示したように、A、BおよびC地点においては波高と流向流速が、E地点においては風向と風速が観測されている。まず波高と流向流速の毎正時の観測値により、各地点における実測の方向スペクトルを算定することができる。風向が比較的長時間一定で、風速も大きい場合については、風向と入射波の主波向きが一致すると仮定して、波向き集中度 S_{MAX} 、有義周期 $T_{1/3}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ をパラメータとして、各地点における方向スペクトルを推定することができる。次いで、A、B、C地点における方向スペクトルの実測値と推定値とを比較し、方向スペクトルの推定の妥当性を検証する。

4. 観測値による浮体動揺推定法の検証

前述のように、白島では1996年5月の基地建設時にC地点において波浪の観測が、D地点において作業船動揺の観測が行われており、これらの実測結果を理論解析で推定した結果と比較することによって動揺の推定値の妥当性を検証する。C地点の波浪のデータは、波高の周波数スペクトルのみが示されていることから、まず入射波スペクトルの同定を行う必要がある。このため、入射波を *Bretschneider* - 光易型スペクトルと、光易型方向分布関数を持つ方向スペクトルで仮定する。次いで、入射波のスペクトル $S(f, \theta)$ について島周りの散乱回折波計算を行い、C地点での水面変動の周波数スペクトルを求める。これを実測値のスペクトルと比較して入射波を仮定する際に設定したパラメータ（有義周期 $T_{1/3}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ 、波向き集中度 S_{MAX} ）を同定して入射波スペクトルを決定する。次に推定した入射波スペクトルから浮体の位置における方向スペクトルを算定し、これを浮体に作用する外力として、後述する浮体の動揺解析理論により、浮体の変位等の諸量を求め、動揺の実測値と検証する。

5. 3次元浮体動揺解析

浮体動揺の解析にはポテンシャル接続法の選点解法（吉田ら、1992）を用いた。図-5に示すように、一定水深 h の海域にある矩形浮体（短軸長 $2a$ 、長軸長 $2b$ 、吃水 qh ）に対し、角周波数 σ の微小振幅規則波が x 軸と θ の角度で入射する場合を考える。この時、流体域を浮体底面下の領域（2）と浮体側面より外の領域（1）に分割する。領域（1）のポテンシャルに対して自由表面条件と水底条件、領域（2）のポテンシャルに対して浮体底面境界条件と水底条件を満足するように求めると、領域（1）と（2）のポテンシャル $\phi_1(x, y, z)$ 、 $\phi_2(x, y, z)$ は、

$$\phi_1(x, y, z) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[f_0(x, y)Z_1^{(0)}(z) + \sum_{n=0}^{\infty} f^n(x, y)Z_1^{(n)}(z) \right]$$

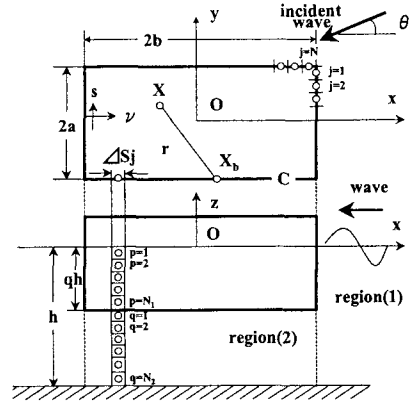


図-4 計算領域の分割

$$\begin{aligned} \phi_2(x, y, z) = & \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \varphi^{(s)}(x, y)Z_2^{(s)}(z) \right. \\ & + i\bar{v} \left\{ \left(-X_3 - \frac{y}{h}\theta_1 + \frac{x}{h}\theta_2 \right) \left(1 + \frac{z}{h} \right)^2 \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{4} \left(2X_3 + \frac{y}{h}\theta_1 - \frac{x}{h}\theta_2 \right) \left(\frac{x^2 + y^2}{h^2} \right) \right\} \right] \end{aligned}$$

と表すことができる。上式で $f^{(n)}(x, y)$ 、 $\varphi^{(s)}(x, y)$ はポテンシャルの平面分布を表し、それぞれヘルムホルツの方程式を満足すべき関数で、 $Z_1^{(n)}(z)$ 、 $Z_2^{(s)}(z)$ はポテンシャルの鉛直分布を表す関数である。また X_3 は軸方向変位量、 θ_1 、 θ_2 は回転変位量である。ここで浮体周りの開領域に対してグリーンの定理を用ると各領域の未知関数 $f^{(n)}(x, y)$ 、 $\varphi^{(s)}(x, y)$ と、その法線微分値 $\bar{f}^{(n)}(x, y)$ 、 $\bar{\varphi}^{(s)}(x, y)$ に関する積分方程式が得られる。一方、領域の鉛直境界では次の境界条件が成り立つ。

$$\phi_1 = \phi_2 \quad (-h \leq z \leq -qh)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial v} = \begin{cases} V_v & (-qh \leq z \leq 0) \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial v} & (-h \leq z \leq -qh) \end{cases}$$

この境界条件が図-4に示す境界面上の面要素の中心 $(p = 1, 2, \dots, N_1, q = 1, 2, \dots, N_2)$ で成り立つものとして得られる関係式と積分方程式、及び各軸方向、軸周りに関する運動方程式とを合わせて連立方程式とし、これらの式を離散化して数値的に解くことによりポテンシャルを算定する。なお、詳細は（村上、1995）を参照されたい。

6. あとがき

具体的な解析の結果は講演時に述べる予定である。

参考文献

- 1) 鍛冶壮吉、宮本好英ほか：大型起重機船吊り荷の能動型制振装置の開発、土木学会論文集 No.549/1-37 pp.149-158
- 2) 土木学会（1994）：海岸波動-波構造物地盤の相互作用の解析法- pp.340-349
- 3) 吉田明徳、横田雅紀ほか：島嶼部周辺の波浪スペクトル特性、海岸工学論文集 第50巻（2003）土木学会、pp.171-175
- 4) 村上啓介：グリーン公式を用いたストークス波と海岸構造物の非線形干渉解析法に関する研究、九州大学学位論文（1995）