

現地観測による港内長周期波浪流速特性とその予測方法 に関する検討

藤 畑 定 生* ・ 秦 禎 勝**・ 森 屋 陽 一***
中 山 晋 一****・ 関 本 恒 浩****

1. はじめに

近年, 多くの現地観測などにより港内の係留船舶の動揺に長周期波 (周期数十秒から数分のオーダーの平均海面の変動) が深く関わっていることが指摘されている (松良ら, 1994; 朝崎ら, 1996; など). 係留船舶の動揺を評価するためには, 港内の長周期波の波高のみでなく流速変動 (船体に作用する波向等) を適切に予測する必要がある。

喜岡ら (1996) は, 分散性を改良した Nwogu の修正 Boussinesq 方程式を用いた任意港湾形状に対する港内副振動予測モデルを提案し, 水位に関しては十分な現地再現性があることを示しているが, 流速変動に関する検討は行っていない。

港外の長周期波には, 自由波以外に拘束波にも有意な大きさがあり, 非線形性を考慮した扱いが必要である。喜岡ら (1993) は, multiple-scale 摂動法を用いて長周期波の表示式を誘導し, 矩形港湾内に港口から直入射する波向での数値的検討を行い, 拘束波を自由波と見なす線形的扱いでは, 応答が過小評価になる可能性があることを示している。しかしながら, 現在, 実務的な港内長周期波の計算は, 主に線形理論を用いて行われている。

本研究では, 港内外の水位および流速変動に関する現地観測を行い, 観測結果と比較することにより, 長周期の水位のみでなく流速変動に関しても Boussinesq 方程式の現地再現性を調べた。また, 風波に対して港内静穏度が確保された実際の港湾では, 主防波堤での遮蔽効果により, 港内の長周期波はそのほとんどが自由波として存在するであろう。よって, 実港湾形状に対し, Boussinesq 方程式と線形 Boussinesq 方程式の計算結果を比較し, 実際的な場合に対する線形計算の適用性を検証した。さらに, 港外の観測記録等がない場合に有用となる長周期波の標準 (矩形) スペクトル (平石ら, 1997) を用いることに関しても検討を行った。

2. 現地観測の概要

熊本県の最西端の天草下島に位置し, 東シナ海に直接面している九州電力 (株) 苓北火力発電所専用港湾において, 港内外の波浪流速変動に関する現地観測を行った。観測期間は 1996 年 2 月 23 日～2 月 25 日および 1996 年 3 月 13 日～3 月 17 日である。図-1 に港湾形状を示す。西防波堤は 1000 m, 揚炭岸壁は 780 m, 港内の水深は約 15.0 m である。港外 P0 地点および港内 P2, P3, P4 地点では, 水圧式波高計および電磁流速計により, サンプリング周波数 1.0 Hz で, 水圧変動と流速変動の連続観測を行い, P0 および P2 地点では, 超音波式波高計により, サンプリング周波数 2.0 Hz で, 水位変動の 20 min/2 hr の観測を行った。20 min/2 hr で観測した水位変動データを用いて, 水圧変動から水位変動に変換するための補正係数を適切に求め, さらに, 潮位を除去して 1 時間毎に分割した水位変動データを作成した。観測期間中の 3 月 15 日に観測地点付近を低気圧が通過し, 港外の短周期成分の有義波高が最大 (2.6 m) になった 3 月 15 日 13 時からの 1 時間のデータを検討対象とした。

3. 数値計算モデル

3.1 モデル方程式

基礎方程式としては, 佐藤・Kabiling (1993) と同様な Peregrine の式に運動量補正項および底面摩擦項を付加した, 以下に示す Boussinesq 方程式を用いる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

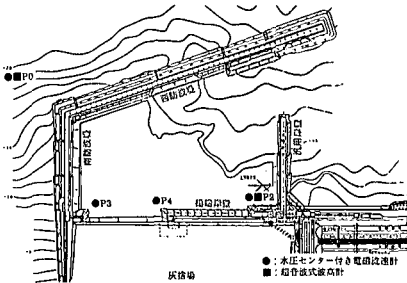


図-1 調査地点位置図

* 正会員 工修 九州電力 (株) 土木部火力原子力土木課
** 九州電力 (株) 土木部火力原子力土木課
*** 正会員 工博 五洋建設 (株) 技術研究所
**** 正会員 工修 五洋建設 (株) 技術研究所

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ &= \frac{1}{3} h^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial y} \right) \\ & - \frac{f_w}{2D^2} P \sqrt{P^2 + Q^2} + \nu_e \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ &= \frac{1}{3} h^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) \\ & - \frac{f_w}{2D^2} Q \sqrt{P^2 + Q^2} + \nu_e \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) \dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 η は水面変動、 P 、 Q はそれぞれ x 方向、 y 方向の線流量、 h は静水深、 D ($=h+\eta$) は全水深、 g は重力加速度である。また、 ν_e は碎波の効果およびスポンジ層による減衰効果を表す渦動粘性係数であり、その算出は金山ら (1994) と同様に行った。 f_w は底面摩擦係数であり、その値は佐藤・Kabiling (1993) にない 0.02 を採用した。計算は、各時間ステップ毎に線流量 P または Q を水位 η と連立させて解く ADI 法を用いた。計算格子は x 方向に 10 m 間隔、 y 方向に 10 m 間隔、時間方向に 0.2 s 間隔で行った。

3.2 入射波の作成

入射波は多方向不規則波とした。入射波の作成方法は、短周期成分 (0.06 Hz 以上)、長周期成分 (0.06 Hz 以下) 共に 100 成分 (合計 200 成分) のシングルサンメンション法とし、各成分波の振幅と周波数は港外 P0 地点で観測された水位変動の周波数スペクトル (図-8) をエネルギー等分割して決定し、各成分間の位相は乱数により決定した。また、各成分波の波向は、光易型方向分布関数を用いて、境界に対して $\pm 45^\circ$ の範囲に入るように決定した。光易型方向分布関数を計算する際の、主波向および方向集中度の評価は、短周期成分に関しては、港外 P0 地点の短周期成分を EMEP により方向スペクトル解析した結果から、主波向は WSW とし、方向集中度 $S_{\max}$ は 25 とした。長周期成分の主波向は短周期成分と同じ WSW とした。木村・田中 (1997) によれば、短周期成分の方向集中度が 25 の場合、長周期の拘束波の方向集中度は、周波数に依存せず、ほぼ 10 となる。港外に存在する自由長周期波は、長周期の拘束波の存在に起因するものであると考え、長周期成分の方向集中度は周波数によらず一律 10 とした。

以上の方法で作成した成分波から水位変動と、進行波であるとして水位変動から計算した 2 成分の線流量の時系列を、造波境界での各メッシュ位置において計算し、入力データとした。

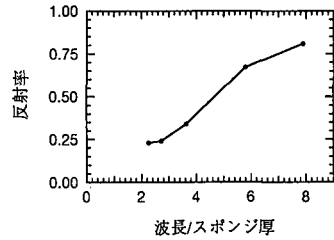


図-2 岸壁位置に設置したスポンジ層の反射率

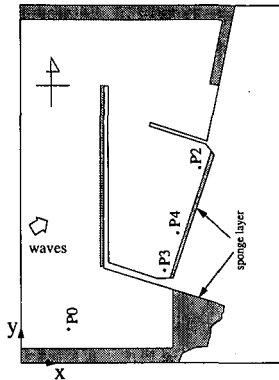


図-3 計算領域とスポンジ層の設置位置

3.3 境界条件

港湾の境界は鉛直壁とし、実港湾では、揚炭岸壁が下部傾斜堤の棧橋構造になっているため、揚炭岸壁位置には現地の反射特性を考慮して、図-2 に示す特性を持ったスポンジ層を設けた。

造波境界においては、時々刻々反射波の波向を求め、線形長波理論により反射波を吸収させた。また、図-3 に示すように、側方および港外の岸側境界においては、境界前面にスポンジ層を設置し、さらに、側方境界においては、造波境界と同様に線形長波理論により反射波を透過させた。

4. 計算結果

図-4 は P2 地点、図-5 は P4 地点における長周期成分の流速のスカッタープロットである。P2 地点は隅角部に近いため、形状は丸くなるが、P4 地点では、揚炭岸壁の中央付近であるため、揚炭岸壁に沿った方向の重複波の節に近く、スカッタープロットの形状も細長くなり、揚炭岸壁に沿った方向特性を示す。Boussinesq 方程式による計算結果は、流速振幅および向きに関して、現地観測結果とほぼ同じになることがわかる。朝崎ら (1996) は、底面摩擦を考慮していない Boussinesq 方程式の計算により、流速振幅は現地観測結果に対してかなり過大になることを指摘しているが、今回の計算では、底面摩擦

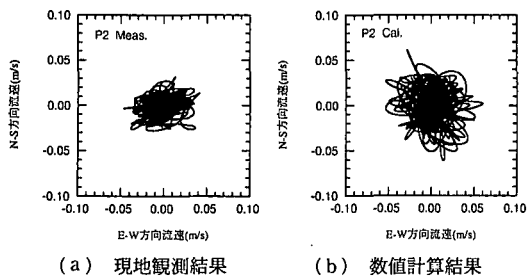


図-4 P2地点の流速のスカタープロット

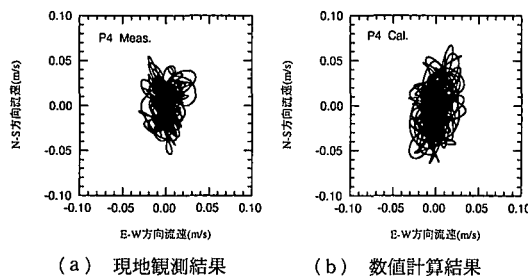


図-5 P4地点の流速のスカタープロット

表-1 有義値の比較

地 点		短周期成分		長周期成分	
		有義波高(m)	有義波周期(s)	有義波高(m)	有義波周期(s)
P2	実測値	0.14	7.8	0.12	78.2
	Bous.(多方向)	0.15	10.1	0.12	77.4
	線形(多方向)	0.15	9.9	0.15	80.7
	Bous.(一方向)	0.14	9.9	0.16	64.5
P3	実測値	0.19	8.0	0.16	68.3
	Bous.(多方向)	0.19	9.3	0.15	61.0
	線形(多方向)	0.20	9.5	0.16	62.6
	Bous.(一方向)	0.18	9.3	0.27	64.6
P4	実測値	0.25	8.9	0.08	62.6
	Bous.(多方向)	0.20	9.6	0.07	54.7
	線形(多方向)	0.20	9.4	0.08	54.7
	Bous.(一方向)	0.18	9.5	0.09	60.8

を考慮したことにより、流速振幅は現地観測結果とほぼ同程度の大きさになっている。

表-1は、現地観測結果、入射条件を多方向不規則波および単一方向不規則波とした Boussinesq 方程式の計算結果、入射条件を多方向不規則波とした線形 Boussinesq 方程式の計算結果を、短周期成分 (0.06-0.2 Hz) および長周期成分 (0.005-0.06 Hz) に分けて、波別解析し統計処理した結果である。線形 Boussinesq 方程式は、(2) 式および (3) 式の左辺第 2 項および第 3 項を落としたものである。入射条件を多方向不規則波とした Boussinesq 方程式の計算結果は、短周期成分の有義波周期が、

現地観測結果に比べて、やや長くなるが、有義波高に関しては、波浪成分および長周期成分共に現地観測結果とよく一致する結果になった。線形 Boussinesq 方程式の計算結果は、Boussinesq 方程式の計算結果と同程度の精度で、現地観測結果と一致する結果になった。入射条件を単一方向不規則波とした Boussinesq 方程式の計算結果は、長周期成分の有義波高が、特に P3 地点で過大に計算される結果になった。

図-6は、港内の P2 および P4 地点の水位変動の周波数スペクトルに関して、現地観測結果、入射条件を多方向不規則波および単一方向不規則波とした Boussinesq 方程式の計算結果、入射条件を多方向不規則波とした線形 Boussinesq 方程式の計算結果を比較したものである。

現地観測結果と入射条件を多方向不規則波とした Boussinesq 方程式の計算結果を比較すると、港内の隅角部である P2 地点の周波数スペクトルは、短周期成分では合わないが、長周期成分に間しては、極大値の位置のみでなく、その大きさについてもよく合っている。揚炭岸壁中央付近である P4 地点の周波数スペクトルは、短周期成分ではよく一致する。長周期成分に関しても、極大値の位置は多少ずれるものの、エネルギーレベルとしては、ほぼ対応する結果となった。

入射条件を多方向不規則波とした Boussinesq 方程式の計算結果と線形 Boussinesq 方程式の計算結果を比較すると、スペクトル形状は概ね一致しているが、詳細に見ると、線形計算では P2, P4 地点共に 0.008-0.012 Hz でのエネルギーレベルがやや大きくなっている。

喜岡ら (1993) は、港内の応答が線形計算ではやや小さく計算される可能性を指摘しているが、今回の計算では、線形計算でも非線形計算とほぼ同様な結果が得られた。この理由は、喜岡ら (1993) は、港口から直入射する波向で数値的検討を行っているため、港内でも拘束波が無視できないが、実港湾の場合、主防波堤での遮蔽効果により、港内の長周期波はほぼ自由波と見なすことができたためであると考えられる。

また、入射条件を単一方向不規則波とした Boussinesq 方程式の計算では、長周期成分のエネルギーレベルが全体的に過大に評価され、入射波として多方向性を考慮することが必須である。

図-7は、P2 地点の E-W 方向流速と P4 地点の N-S 方向流速の周波数スペクトルに関して、現地観測結果、入射条件を多方向不規則波および単一方向不規則波とした Boussinesq 方程式の計算結果、入射条件を多方向不規則波とした線形 Boussinesq 方程式の計算結果を比較したものである。

長周期成分に着目すると、P2 地点の E-W 方向流速お

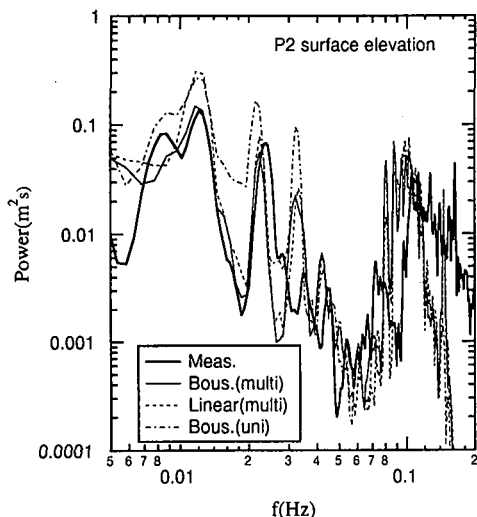


図-6(a) P2地点の水位変動の周波数スペクトル

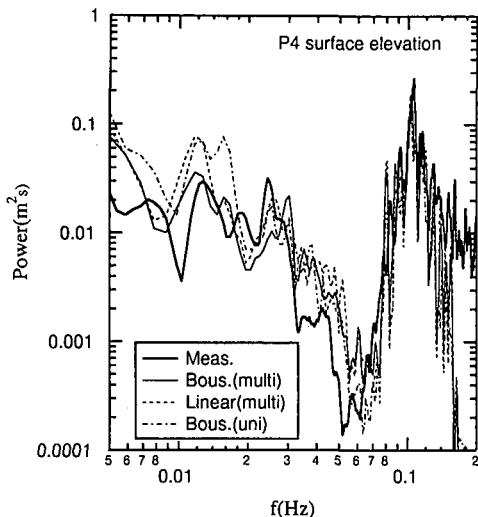


図-6(b) P4地点の水位変動の周波数スペクトル

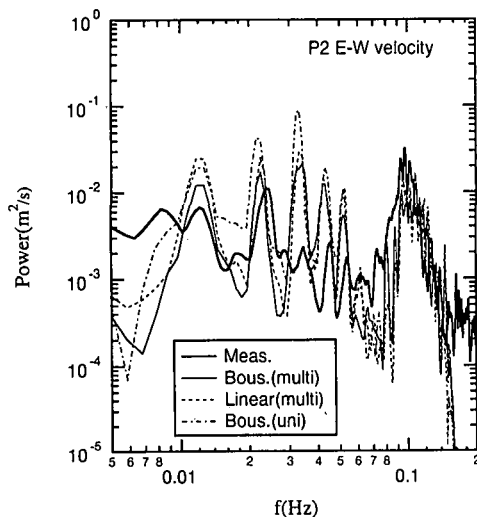


図-7(a) P2地点のE-W方向流速の周波数スペクトル

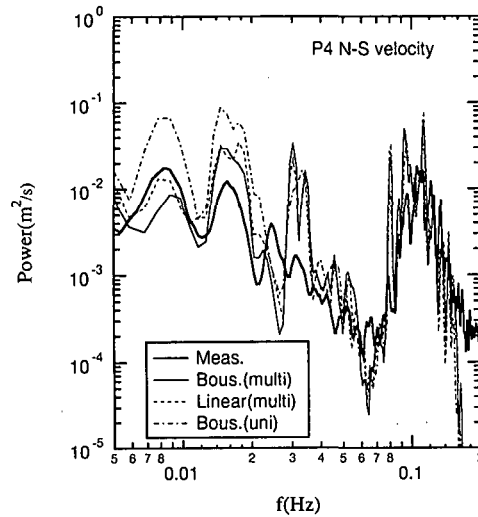


図-7(b) P4地点のN-S方向流速の周波数スペクトル

よびP4地点のN-S方向流速共に、現地観測結果に比べて入射条件を多方向不規則とした Boussinesq 方程式の計算結果はエネルギーレベルがやや大きい、極大値の位置はよく対応している。また、流速に関しても、線形 Boussinesq 方程式の計算は、Boussinesq 方程式の計算とほぼ同様な結果を与えることがわかる。

以上により、港内の長周期波に関して、水位変動のみでなく、流速変動に関しても、入射条件を多方向不規則波とした Boussinesq 方程式の数値計算により、現地観測結果を実用上十分な精度で再現できることが確認できた。

5. 標準（矩形）スペクトルによる線形計算

Boussinesq 方程式の数値計算では、入力条件として港

外の観測記録を用いたが、港外の観測記録がない場合には、何らかの方法で港外の長周期波を評価しなければならない。平石ら（1997）は、長周期波の標準スペクトルとして、スペクトル形状を矩形とすることを提案している。この手法の妥当性について議論の余地はあるものの、実用性の面から見てある程度有効な手法であると思われる。ここでは、Boussinesq 方程式よりも取り扱いが容易であることを考慮して、矩形スペクトルを入力としたグリーン関数法による計算を行うとともに、現地観測結果に基づく多方向不規則波を入力条件とした Boussinesq 方程式による計算結果と比較した。図-8に Boussinesq 方程式への入射波を計算した現地観測結果の港外P0地点の水位変動の周波数スペクトルを示す。

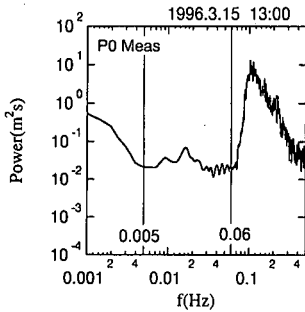


図-8 入射波の周波数スペクトル

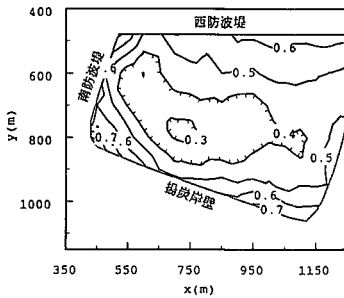


図-9 Boussinesq 方程式による長周期波の応答関数

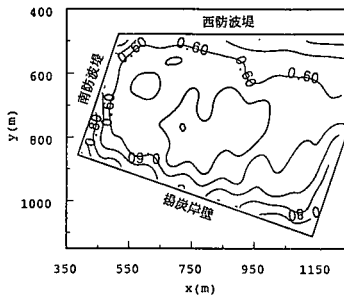


図-10 グリーン関数法による長周期波の応答関数

グリーン関数法としては、Lee(1971)の方法を用いた。ここで、Leeの方法は、多方向不規則波に対応できるように、入射波の波向が考慮できるように改良し、規則波の計算結果をエネルギー的に重ね合わせて、多方向不規則波を表現した。

計算の対象とした周波数帯は0.005~0.06 Hzであり、この周波数帯を100分割した。また、方向分布関数は光易型を仮定し、主波向をWSW、方向集中度は周波数によらず一律10として、波向を7成分に分割した。周波数の分割数を100とかなり多くとったのは、港内の共振周波数をはずさないようにするためである。

図-9はBoussinesq方程式の数値計算による長周期成分(0.005-0.06 Hz)の港内の応答関数(港内長周期有義波高を港外の西防波堤先端地点の長周期有義波高で無

次元化したもの)分布である。図-10はグリーン関数法による港内の応答関数分布である。グリーン関数法の計算結果の方が応答関数の値として、全体的にやや大きな値になるが、分布の形状はほぼ一致することがわかる。

以上により、標準(矩形)スペクトルを入射条件としたグリーン関数法による計算は、実用上ある程度妥当な結果を与えることがわかった。

6. おわりに

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

① 港内の長周期波に関して、水位変動のみでなく、流速変動に関しても、入力条件を多方向不規則波としたBoussinesq方程式の数値計算により、現地観測結果を実用上十分な精度で再現できることがわかった。

② 実港湾形状に対する港内波浪場の有義波高や、水位変動および流速変動の周波数スペクトルに関して、線形Boussinesq方程式の計算により、Boussinesq方程式の計算とほぼ同程度の精度で、現地観測結果を評価できることがわかった。

③ 長周期波の標準スペクトルとして、矩形スペクトルを入力条件とするグリーン関数法の計算結果と現地観測結果を入力条件としたBoussinesq方程式の計算結果を比較し、港内応答関数の値としては、グリーン関数法の計算結果の方が、やや大きくなるものの、グリーン関数法による計算は、実用上ある程度妥当な結果を与えることがわかった。

参考文献

- 朝崎勝之・松尾憲親・藤畑定生・鶴飼亮行・清水琢三 (1996): 港内副振動に関する現地観測と長周期波を考慮した荷役稼働率の評価, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 886-890.
- 金山 進・清水琢三・磯部雅彦 (1994): プシネスク方程式を用いたサーフビート・水位上昇の平面二次元計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 61-65.
- 喜岡 渉・柏原謙爾・相川久紀・田中正博 (1996): 多方向不規則波による港内副振動の予測モデルとその適用性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 196-200.
- 木村 晃・田中耕作 (1997): 浅海域における2次非線形長周期波の方向スペクトル, 土木学会論文集, No. 565/II-39, pp. 99-109.
- 佐藤慎司・Michael Kabiling (1993): Boussinesq方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.
- 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川純三 (1997): 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 931-935.
- 松良精三・瀝美洋一・菅沼史典・宮本義憲 (1994): 波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 71-75.
- Lee, J. J. (1971): Wave induced oscillations in harbors of arbitrary geometry, J. Fluid Mech., Vol. 45, pp. 375-394.