

現地観測データに基づく長周期波の方向関数特性と 静穏度解析への適用

阿部 光信*・興野 俊也**・青野 利夫***

1. はじめに

港湾周辺および港内での長周期波については、近年多くの地点において現地波浪観測が行われ、その有義波諸量や周波数スペクトルなどの特性が明らかにされ、長周期波による港内係留設備への影響予測評価や長周期波に対する対策工の検討などが実施されている。しかし、長周期波の方向スペクトルに関する研究については、2次拘束波に対する理論的な検討(木村・田中, 1997; 関本, 1999)や現地データを用いた検討(橋本ら, 1992)があるものの、静穏度解析への適用を検討したのは木村(1997)による矩形港湾の解析のみで、実用的なものとはなっていない。このため、現在は、港内静穏度解析における長周期波は、平石ら(1997)の標準周波数スペクトルによる単一方向不規則波を用いるのが一般的である。

一方、著者ら(1999)が実施した長周期波の現地観測によれば、長周期波の方向スペクトル特性は波浪成分と異なり、港外での長周期波は方向分散性が非常に高いことが明らかとなった。同様の傾向は永井ら(1997)が実施した現地観測でも見られ、長周期波に含まれる自由波の影響が方向分散性に寄与していることなどが報告されている。このような長周期波の方向分散性を評価するためには、長周期波の方向関数について分析し、港内静穏度解析あるいは船舶動揺解析に対して長周期波の方向分散性がどの程度影響を及ぼすのかを明らかにすることが重要である。

本研究では、船舶動揺を考慮した合理的な係留施設の計画・設計法に関する研究の一環として、長周期波の現地観測データに基づいてその方向分布特性を分析するとともに、長周期波の数値解析における方向関数を提案し、港内静穏度解析への適用について検討した。

2. 現地観測による長周期波の方向スペクトル特性

(1) 現地観測の概要と長周期波の方向スペクトル

長周期波の現地観測は、茨城県ひたちなか市に建設中の東京電力(株)常陸那珂火力発電所の周辺海域で、1998年10月7日～11月25日の約40日間実施した。観測地点は、図-1に示すように、東防波堤北側に1地点(No. 0, 入射波観測地点, 水深-25 m)、港内に3地点(No. 1～No. 3)で、各観測地点には4成分型波浪計(超音波, 水圧, 電磁センサー付き)を設置し、毎偶数時前後60分間の水位, 水圧, 成分流速値を0.5秒間隔で計測した。長周期波の解析は、No. 0地点での周波数スペクトルより0.04～0.001 Hzを長周期波成分と考え、FFT法による帯域フィルターを用いて行い、長周期波の時系列データを求めた。また、方向スペクトル解析にはEMEP法(橋本ら, 1993)を用いた。

既報(阿部ら, 1999)では、現地観測による長周期波の港内伝播特性、方向スペクトル特性について分析するとともに、港内外での長周期波の有義波諸量の推定方法について検討した。

その結果によれば、長周期波の方向スペクトル特性は波浪成分と異なる。すなわち、港外での方向スペクトルが、波浪成分は単峰型のスペクトル形状であるのに対して、長周期波成分は波浪成分とほぼ同じ波向とその反対方向の波向が卓越した二山形のスペクトル形状を示しており、前者は波浪成分の波群特性に起因する拘束波と岸

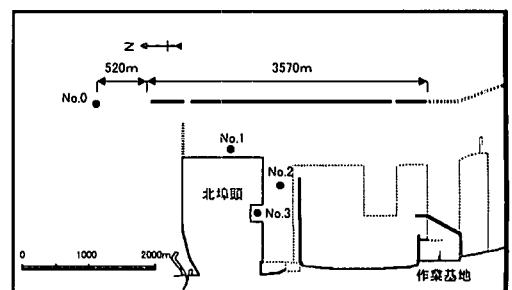


図-1 現地観測位置図

* 正会員 東電設計(株)第二土木本部港湾・海岸部
** 正会員 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ
*** 正会員 工博 東亜建設工業(株)技術研究所情報・解析研究室長

側に向かう自由波、後者は汀線からの反射波による自由波であると考えられる。また、港内での長周期波成分の方向スペクトルは波浪成分と異なった波向特性を示している。これは、港内での長周期波が自由波として進行し、港湾形状に依存した水面変動が発生していることによるものと考えられる。

(2) 長周期波の方向分布特性

長周期波の方向分布特性を把握するため、波浪成分と長周期波成分の方向関数を比較した。図-2は高波浪来襲時の10月18日8時と10月23日6時のピーク周波数付近の代表周波数における方向関数を示したもので、左図がNo.0地点(入射波)、右図がNo.1地点(港内)である。

No.0地点での波浪成分の方向関数は、(a)については周波数による波向変動が見られるものの、(a)、(b)ともに光易型方向関数で良く近似される。これに対して、長周期波成分の方向関数はピーク波向、値とも周波数による大きな違いは見られず、光易型方向関数とは傾向が異なっている。また、港内のNo.1地点での波浪成分の方向関数は周波数による波向、ピーク値の相違はわずかであるが、長周期波成分については周波数によって卓越波向が 0° (N)となるケースと 180° (S)となるケースが見られる。

長周期波の波向特性をさらに詳細に分析するため、長周期波成分の周波数ごとの方向関数を求めた。図-3は、図-2と同じ日時における長周期波成分の周波数ごとの方向関数を示したものである。

港外のNo.0地点での方向関数は、いずれの周波数でも岸に向かう進行波に対応した波向と岸からの反射波に対応した波向の2方向のピークが見られ、それらのピー

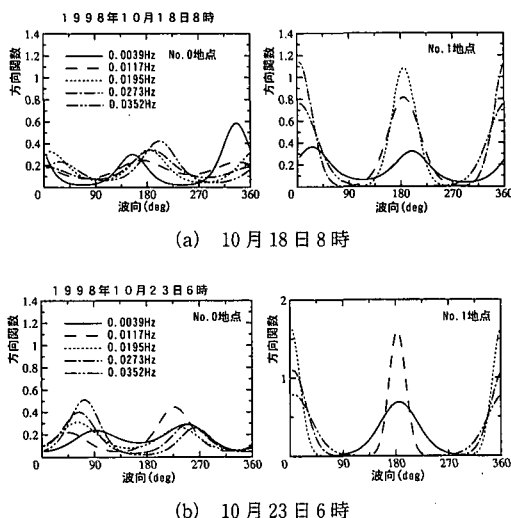


図-3 長周期波成分の周波数ごとの方向関数

ク値は顕著な差違は見られない。これに対して、港内のNo.1地点での方向関数は、ピーク波向が 0° の周波数と 180° の周波数に分けられ、ピーク値の値も周波数によって顕著な違いが見られる。

10月18日と23日の方向関数は、No.0地点ではピーク波向に若干違いが見られる。これは、2つの日時での波浪成分の波向が違うことにより、拘束波の影響が寄与しているものと推察される。これに対して、港内のNo.1地点では10月18日と23日でのピーク波向の違いは見られず、港内での長周期波は波浪成分の影響はほとんど受けていないものと考えられる。

3. 長周期波の方向関数に関する検討

(1) 方向スペクトルのピーク周波数と方向集中度パラメータ

以上のように、長周期波の方向分布特性は波浪成分と異なった傾向を示している。長周期波の影響を考慮した港内静穏度解析や船舶動揺解析では、このような特徴を適切に評価する必要があり、そのためには長周期波の数値解析の入力条件としての実用的な方向関数を設定する必要がある。

方向関数は、次式に示す光易型方向関数(Mitsuyasu et al., 1975)を用いることが多い。

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad \left. \vphantom{G(f; \theta)} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1}$$

ここで、 $G(f; \theta)$ は方向関数、 f は周波数、 θ は波向、 S は方向集中度パラメータである。

光易型方向関数は方向集中度パラメータ S の取り扱い

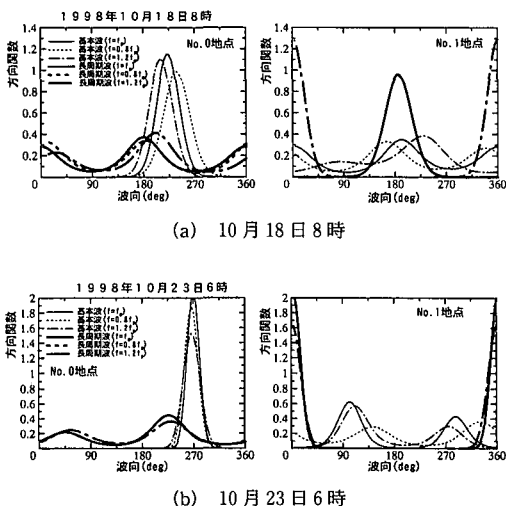


図-2 波浪成分と長周期波成分の方向関数

に特徴があり、波浪成分に対しては合田・鈴木 (1975) が提案した方向集中度パラメータの最大値 $S_{\max}$ と周波数による変化を考慮した算定式が用いられる。ここでは、合田・鈴木 (1975) の算定式を用いた長周期波成分の方向集中度パラメータ S の推定方法について検討するため、港外の No. 0 地点での現地波浪観測データに基づく長周期波成分のピーク周波数と方向集中度パラメータの分析を行った。

図-4 は長周期波成分のピーク周波数 f_{CP} と波浪成分のピーク周波数 f_p の関係を示したものである。これによれば、波浪成分のピーク周波数は $f_p=0.1$ Hz 前後に集中しているが、長周期波成分のピーク周波数は分析対象周波数範囲 $f_{CP}=0.01\sim0.04$ Hz に広く分散し、その範囲内にピークを持たないケースも多く見られる。図-5 は長周期波成分のピーク周波数 f_{CP} と有義波周期 $T_{G1/3}$ の関係を示したものである。これによれば、長周期波成分の有義波周期は $T_{G1/3}=40\sim70$ s 程度に広く分布している。

このように、長周期波成分のピーク周波数は分析対象周波数範囲に広く分散し、また、波浪成分のピーク周波数や長周期波成分の有義波諸量との相関も見られない。

図-6 は高波浪来襲時の 10 月 18 日 8 時と 10 月 23 日 6 時における周波数ごとの方向集中度パラメータ S_C を示したものである。ここで、方向集中度パラメータの推

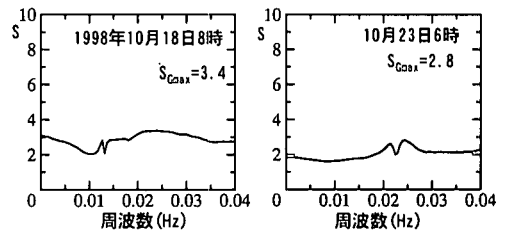


図-6 方向集中度パラメータの周波数変化

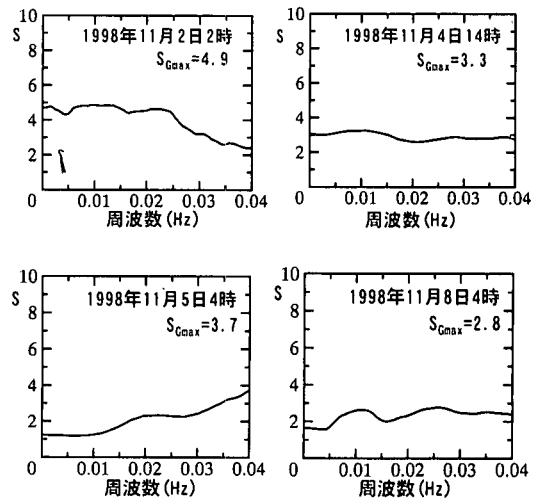


図-7 高波浪来襲時の方向集中度パラメータの周波数変化

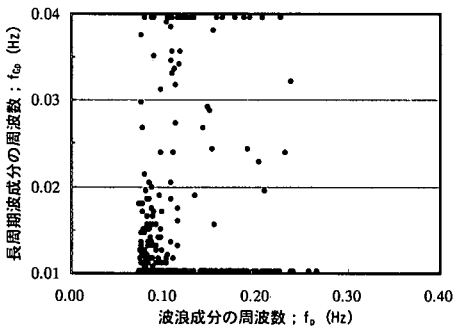


図-4 長周期波成分と波浪成分のピーク周波数の関係

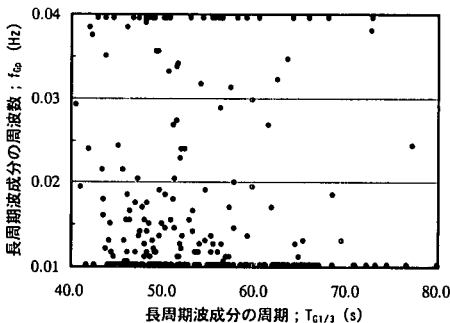


図-5 長周期波成分のピーク周波数と有義波周期の関係

定は磯部 (1989) の方法を用いた。これによれば、長周期波成分の方向集中度パラメータは周波数による変化が非常に少なく、いずれの周波数でも $S_C=2\sim3$ の値を示している。これは、波浪成分の方向集中度パラメータの周波数変化が $S_{\max}$ をピークとして大きく変化することと異なっている。図-7 は 11 月 2 日から 8 日にかけての高波浪来襲時の代表時刻での方向集中度パラメータの周波数変化を示したものである。方向集中度パラメータはいずれの時刻でも $S_C=1\sim5$ の値を示しているが、その周波数変化傾向は時刻によってやや異なり、分析対象周波数範囲にピークが現れないケースも見られた。

(2) 長周期波の方向関数の提案

以上の結果より、長周期波成分の方向集中度パラメータは、波浪成分とは異なった周波数変化を示すことから、合田・鈴木 (1975) の方向集中度パラメータの推定方法は適用できず、新たな推定方法を検討する必要があると判断された。そこで、港外の No. 0 地点での波浪観測データをもとに、長周期波の方向集中度パラメータの定式化を試みた。長周期波成分の方向集中度パラメータは周波数によってほとんど変化しないことから、その定式化のための指標としては、波浪成分の方向集中度パラメータ

の推定で用いる最大値 S_{Gmax} は必ずしも適切でないことから、ここでは対象周波数範囲での方向集中度パラメータの平均値 S_{Gave} について検討した。

図-8 は、長周期波成分の方向集中度パラメータ S_{Gave} と波浪成分の方向集中度パラメータ S_{max} の関係を示したものである。これによれば、長周期波成分の方向集中度パラメータは $S_{Gmax}=1.5\sim4$ に分布しており、波浪成分の方向集中度パラメータ S_{max} が小さいほど分散が大きく、 $S_{max}=20$ 以上ではおおむね $S_{Gmax}=2$ 程度になる。

図-9 は、長周期波成分の方向集中度パラメータ S_{Gave} と No. 0 地点での有義波高 $H_{G1/3}$ の関係を示したものである。港外での長周期波には、前述のように岸に向かう進行波と岸からの反射波とが共存しているが、ここで検討する方向関数は進行波のみを対象とすることから、波浪観測データの方向スペクトル解析結果から進行波成分に対応する波向のエネルギーのみを抽出して進行波としての有義波高を求めた。これによれば、長周期波成分の方向集中度パラメータは有義波高とは関係なく分散している。

以上のように、長周期波成分の方向集中度パラメータは、波浪成分の方向集中度パラメータや長周期波成分の

有義波高との相関は見られず、それらの諸量とは無関係に $S_{Gmax}=1.5\sim4$ の狭い範囲に分散していることが明らかとなった。これらのことから、長周期波の方向関数としては、式 (1) に示す光易型方向関数における方向集中度パラメータ S_G を一定値とし、その値については長周期波の荷役限界波高が $H_{G1/3}=0.1\text{ m}$ 程度であることに着目して、次式のとおりとした。

$$S_G=2 \dots\dots\dots (2)$$

4. 長周期波の方向分散性を考慮した港内静穏度解析の現地適用性

前項で提案した長周期波の方向関数の適用性を確認するため、長周期波の数値解析モデルとして頻繁に用いられる線形長波方程式により現地観測データの再現計算を行った。

検討ケースは、No. 0 地点で高波浪が観測された 10 月 18 日 8 時 (長周期波の入射有義波高 0.06 m, 波向 134°)、10 月 23 日 6 時 (0.19 m, 91°)、11 月 8 日 4 時 (0.14 m, 103°) の 3 ケースとした。線形長波方程式の解析はスタガードリーブフロッグ法で行い、計算格子間隔は 40 m, 計算時間間隔は 1.0 s, 沖側境界と側方境界は日野 (1988) による無反射境界、汀線境界は水位変位をゼロとする境界とした。

入射波の周波数スペクトルは、平石ら (1996) が提案した境界周波数より短周波数側のスペクトル $S_L(f)$ を一定値とするスペクトル形状を用い、 $S_L(f)$ の値については堀沢ら (1997) の表示を参考に次のとおりとした。

$$\left. \begin{aligned} S_L(f) &= m_{0L}/f_L \\ m_{0L} &= H_{G1/3}^2/16 \\ f_L &= 1/25 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

また、方向関数は上記式 (1)、式 (2) を用いた。

波の不規則性については線形解の重ね合わせによって評価し、周波数方向は 0.04~0.004 Hz を 9 等分割、波向方向は 15° ピッチに等角度分割した。

図-10 は 10 月 23 日の現地再現計算で得られた長周

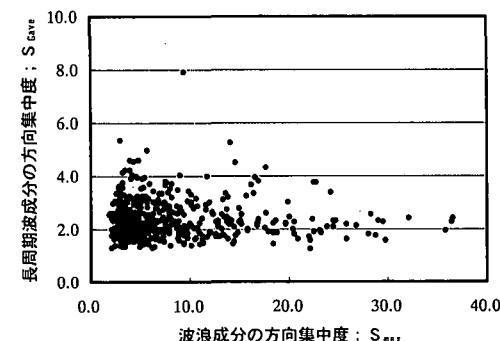


図-8 長周期波成分と波浪成分の方向集中度パラメータの関係

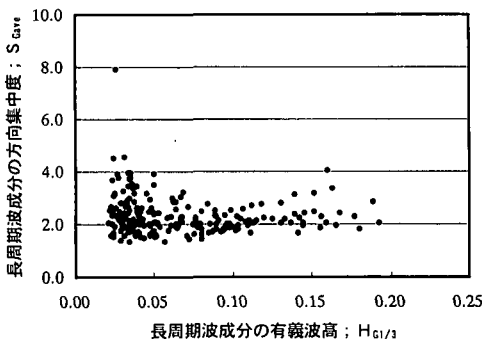


図-9 長周期波成分の方向集中度パラメータと有義波高の関係

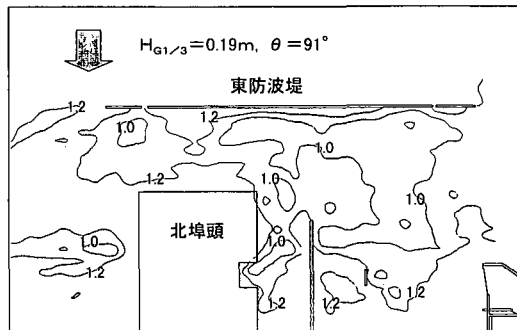


図-10 長周期波の波高比平面分布図

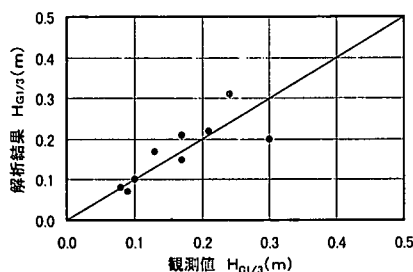


図-11 長周期波高の観測値と計算値の比較

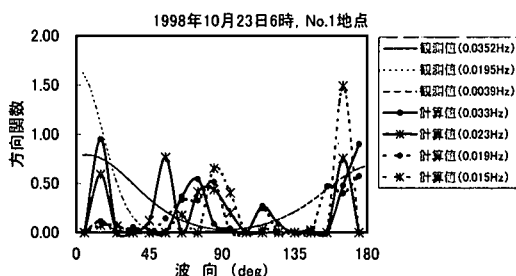


図-12 長周期波の方向関数の計算結果 (No. 1 地点)

期波高の平面分布である。長周期波成分が港内に伝播している様子がうかがえる。

図-11 は港内各観測地点での長周期波高の観測値と計算値を比較したものである。本手法による計算値は観測値とほぼ一致し、良好な再現性を示している。

図-12 は、10月23日の現地再現計算で得られた港内 No. 1 地点での代表周波数に対する方向関数で、図中には観測結果も併記してある。これによれば、本手法による計算結果では、周波数によって卓越波向が大きく変化しており、防波堤法線形状に平行な 0° と 180° のスペクトルが卓越している。これは、現地観測で得られた長周期波の方向分布特性を適切に再現しているものと判断される。

5. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す。

- ① 長周期波の方向分布特性として、現地観測データの周波数ごとの方向関数を分析した結果、港外においては周波数による方向関数の変化は少ないが、港内では周波数によって卓越波向が異なる傾向を示した。
- ② 長周期波の周波数ごとの方向集中度パラメータを分析した結果、その周波数による変化は非常に少なく、波浪成分の方向関数とは異なった傾向を示した。

③ 長周期波の方向関数について、光易型方向関数の適用を検討した結果、その方向集中度パラメータを一定値 ($S_c=2$) とすればよいものと判断された。

④ 提案した長周期波の方向関数を適用して現地再現計算を行った結果、港内での長周期波の二方向性などの特徴を精度よく再現できることが明らかとなった。

本研究は、合理的な係留施設の計画・設計法に関する研究の一環として実施したものである。これらの検討成果により、港内静穏度解析において長周期波の方向分布特性を適切に評価できるものと考えられる。今後は、港内での長周期波による係留船舶動揺への影響として、長周期波の方向分布特性を考慮した動揺解析手法に関する検討を実施する予定である。さらに、港湾全体の要求性能を考慮した港内静穏度の評価手法についても検討していきたい。

参考文献

- 阿部光信・興野俊也・青野利夫 (1999): 現地連続観測に基づく港湾内の長周期波の伝播特性に関する検討, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 311-315.
- 磯部雅彦 (1989): 標準化された方向スペクトルの推定法, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 158-162.
- 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.
- 合田良実・鈴木康正 (1975): 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技術資料, No. 230, pp. 1-45.
- 関本恒浩 (1999): 港湾内外の長周期波の特性とその評価に関する研究, 中央大学博士論文, pp. 1-130.
- 永井紀彦・橋本典明・白石 悟・川口浩二・清水勝義・上野成三・小林明男・東江隆夫・柴田孝雄 (1997): 現地連続観測による沖合長周期波の発達・減衰過程と港内係留船舶の動揺, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 226-230.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃・久高将信・小野修平 (1993): 方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法の拡張, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 136-140.
- 橋本典明・永井紀彦・菅原一晃・浅井 正・久高将信 (1992): 波浪の多方向性と弱非線形効果を考慮した水圧から表面波への変換法について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 171-175.
- 日野幹雄 (1988): 解説一波の無反射透過境界の計算スキームについて, 東工大土木工学科研究報告, No. 39, pp. 1-7.
- 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三 (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. 246-250.
- 堀沢真人・佐藤典之・大中 晋・青野利夫・Eric C. Cruz・早川 淳 (1998): 港内外長周期波の現地観測とその予測手法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 301-305.
- Mitsuyasu, H., A. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda and K. Rikiishi (1975): Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, Jour. Physical Oceanography, Vol. 5, pp. 750-760.