

冬期日本海の現地観測に基づく浅海域への入射長周期波の評価

中 畑 禎* ・ 落 合 敏 浩** ・ 柏 原 裕 彦***
花 山 格 章**** ・ 森 屋 陽 一***** ・ 関 本 恒 浩*****

1. はじめに

近年, 多くの現地観測などによって係留船舶の動揺や
海浜地形変化といった浅海域の工学的な問題に長周期波
(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。こうした問題を
解決するためには, 浅海域における長周期波の特性を把
握すること, また, 波浪場を高い精度で再現・推定する
ことが必要である。

長周期波の特性を把握するために, 多くの現地観測が
行われるとともに, データが解析されている。こうした
中, 例えば, 永井ら (1997) や堀沢ら (1998) では長周
期拘束波の推定を行うにあたり, 長周期波を単一方向波
として扱っている。しかしながら, 実際の波浪は多方向
不規則波であることから, 長周期波の特性を適切に評価
するためには, 多方向波としての取扱いが必要である。

非線形干渉を考慮した長周期波の推定は, すでに
Boussinesq 方程式等を用いた数値計算により行われて
いる。しかしながら, 観測された長周期波は多方向不規
則波であり, 非線形干渉に伴う拘束波と沖および岸向の
自由波が混在していることから, 関本ら (1999a) が指
摘しているように観測結果をもとにして数値計算に用い
るための入射長周期波を時系列的に作成することは難し
い。そのため, 現状の数値計算においては, 沖で観測さ
れた長周期波のエネルギーすべてを入射させる方法が用
いられている (例えば, 藤畑ら, 1998)。このように, 観
測された長周期波のエネルギーをすべて入射させること
は, 岸から沖へ向かう反射波成分等も含めて入射波とし
てしまうことから, 数値計算において得られる結果を過
大評価することになる。

本研究では, 日本海に位置する直江津港周辺において
観測された波浪および理論的に導かれた多方向不規則波
に対する長周期拘束波から, 長周期波の特性についてエ

ネルギー的な議論から評価する。続いて, 長周期波特性
を考慮し, 設定した入射長周期波を用いて Boussinesq 方
程式による数値計算を実施する。最後に観測結果と数値
計算結果の対応から設定した入射長周期波の妥当性につ
いて評価する。

2. 現地観測の概要

1999 年 1 月 18 日～2 月 18 日にかけて日本海に面す
る新潟県直江津港内外に 9 台の水圧センサー付き超音波
式波高計・2 成分電磁流速計を設置し, 水位・水圧・2
成分流速についてサンプリング間隔 0.5 秒の連続観測を
実施した。詳細な観測結果は中畑ら (2001) に記述され
ている。図-1 に港湾形状および波高計設置位置を示
す。港外に設置した波高計については, 5 台のうち 4 台
(A1～A4) を岸沖直角方向に配置した。また, A1～A4 地
点の水深は沖側からそれぞれ 25 m, 20 m, 16 m, 12 m と
なっている。

観測データの解析は, 水位・水圧・流速について正時
から 1 時間ごとのデータセットを作成して行った。その
際, 水位のパワースペクトルをもとに, 波浪成分は周期
20 秒以下, 長周期波成分は周期 20 秒以上と定義した。ま
た, 砕波点付近では気泡の混入により超音波水位データ
が正確に記録されない時刻もあったことから, 微小振幅
波理論の伝達関数を用いて水圧から水位を算出して用い
ている。

観測地点で最も沖に位置する A1 地点の有義波高・有
義波周期および波向の経時変化を図-2 に示す。また, 期

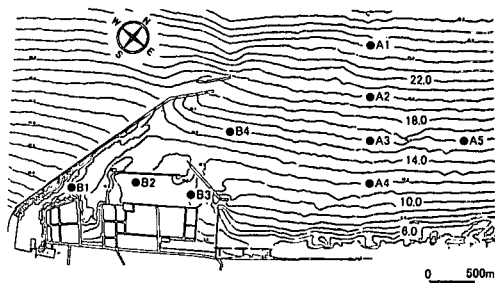


図-1 波高計設置位置

・	工 修	上越共同火力発電(株)技術部
..		上越共同火力発電(株)技術部
***		(株)日本港湾コンサルタント
****	正会員 工 修	五洋建設(株)技術研究所
*****	正会員 博(工)	五洋建設(株)技術研究所(現 国土交通省国土 技術政策総合研究所)
*****	正会員 博(工)	五洋建設(株)技術研究所

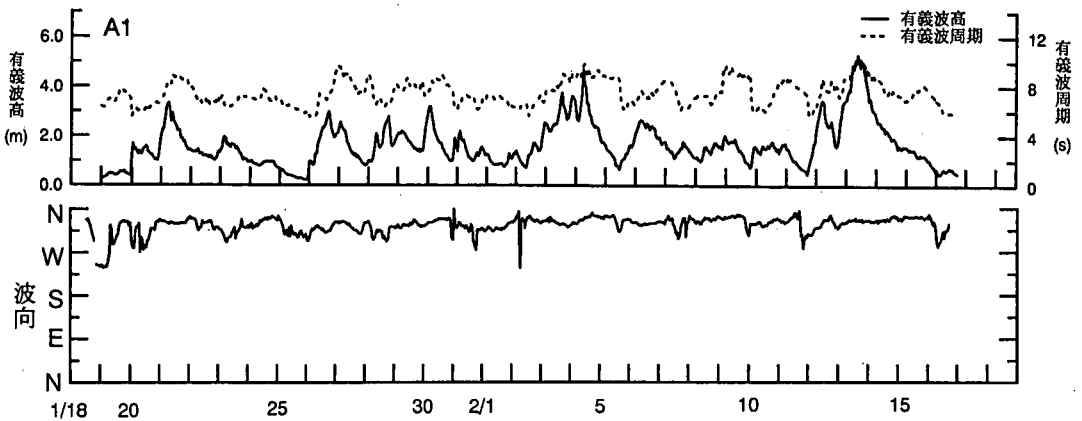


図-2 有義波高・有義波周期・波向の経時変化 (A1)

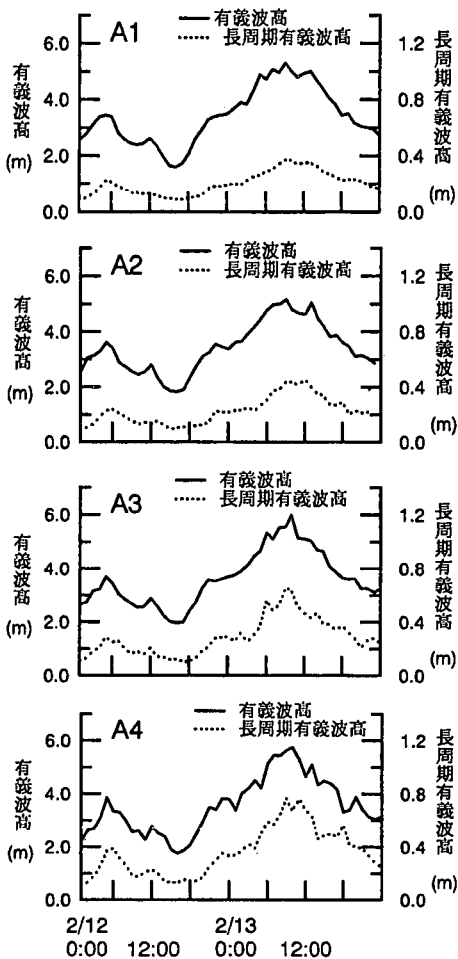


図-3 有義波高・長周期有義波高の経時変化 (A1～A4 地点)

に注目すると A1～A3 地点まで水深の減少に伴い有義波高が増加傾向にあるのに対して、4 地点で最も水深の浅い A4 地点では減少に転じている。したがって、この時刻では A3～A4 地点の間 (水深 16～12 m) が砕波点であると考えられる。また、長周期波についてはその発達・減衰が有義波高の発達・減衰と対応していることがわかる。

3. 現地観測に基づく長周期波特性

高波浪が記録された 2 月 12 日～13 日を対象に港外の A1～A4 地点における観測結果について詳細な解析を実施した。

観測された波浪データから長周期波について特性を把握するために、まず、スペクトル解析を行った。図-4 に A1～A4 地点の 2 月 13 日 9:00 における水位のパワースペクトルを示す。長周期波については、A1～A4 (沖から岸) に向かってエネルギーが増加する傾向がみられる。

観測長周期波の存在形態について把握するために、水位のパワースペクトルと観測流速に線形長波の応答関数を乗じたものとのエネルギー的な比較を行った。図-5 に A1～A4 地点における 2 月 13 日 9:00 の長周期波のパワースペクトルの比較結果を示す。

各地点において水位変動のパワースペクトルと流速変動に応答関数を乗じたもののパワースペクトルは、ほぼ等しいエネルギーを持つことが確認できる。したがって、現地で観測された長周期波は流れに伴う乱れ成分ではなく、波として存在するものと考えられる。

長周期波は長周期拘束波と自由長周期波の 2 つの性質の異なる波として存在していることが知られている。また、自由長周期波の発生には長周期拘束波が関わっていることがわかっている (例えば、水口, 1995)。しかしながら、自由長周期波の推定はその発生要因が多岐にわたることから容易ではない。一方、長周期拘束波のスペク

間中に高波浪を観測した 2 月 12 日～13 日の A1～A4 地点における有義波高および長周期有義波高の経時変化を図-3 に示す。2 月 13 日のピーク付近における有義波高

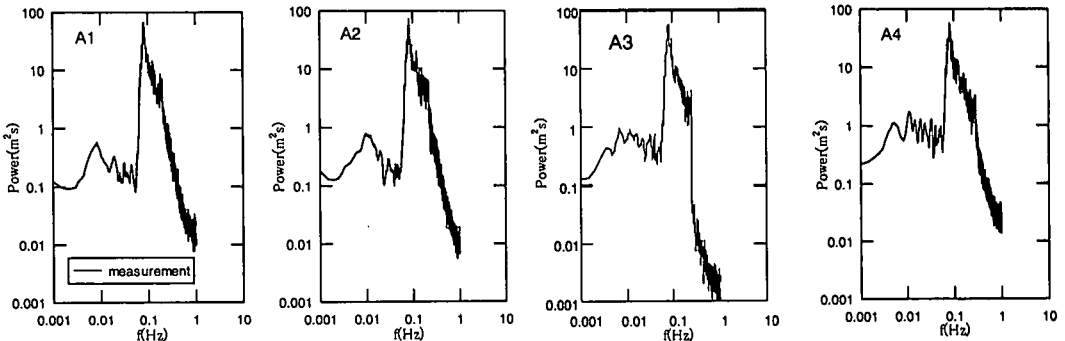


図-4 水位のパワースペクトル (2月13日9:00)

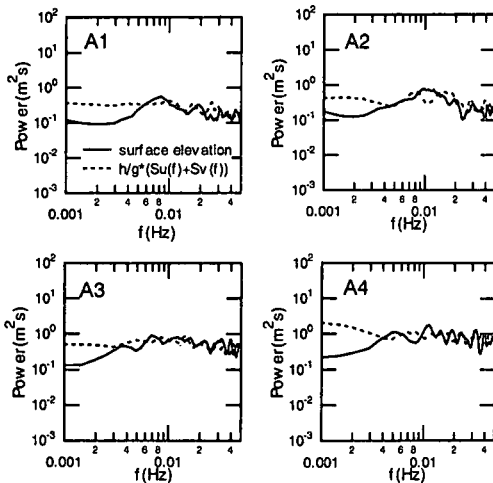


図-5 長周期成分のパワースペクトル

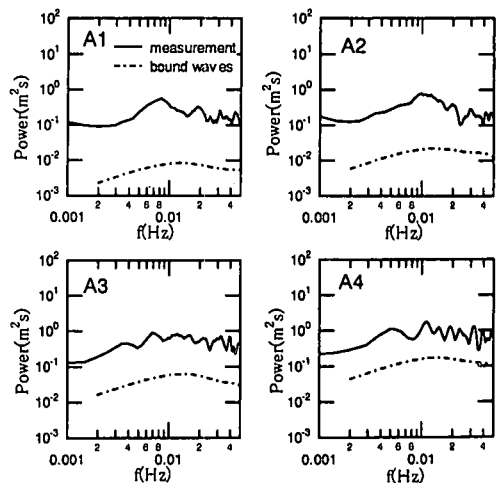


図-6 観測長周期波と長周期拘束波の比較

トルについては現地観測結果をもとに理論的に算出することが可能である。そこで、エネルギー的に長周期拘束波について評価を行い、自由長周期波のエネルギーについては長周期波全体のエネルギーから長周期拘束波を引いた残差として近似的に評価する。

多方向波浪場における長周期拘束波のパワースペクトルは関本 (1999) が示したように、波浪成分の方向スペクトルに非線形核関数を用いることによって算出できる。ここでは、現地観測結果を方向スペクトル解析した結果から波向 NNW, $S_{\max}=25$ として A1~A4 地点それぞれについて長周期拘束波の方向スペクトルを算出した後、波向方向に積分しパワースペクトルを求めた。図-6 に A1~A4 地点の長周期拘束波および観測長周期波のエネルギーを示す。砕波帯沖側となる A1~A3 地点の長周期拘束波のエネルギーは観測された長周期波に比べて非常に小さいことがわかった。

続いて、異なる有義波周期を持つ観測データを使用して長周期拘束波を算出し、長周期波との関係について検討した。対象としたのは有義波高が約 3 m で、有義波周

期が異なる、2月12日3:00, 6:00, 21:00 および2月13日22:00の4ケースである。図-3に示した有義波高の経時変化からわかるように、2月12日3:00, 21:00は波浪の発達期にあたり、2月12日6:00と2月13日22:00は波浪の減衰期にあたる。図-7に4ケースのパワースペクトルを示す。通常波浪成分の周期が長くなるにつれて観測長周期波のピークエネルギーが大きくなることが確認できる。この傾向は他の観測地点においても同様であった。図-8に砕波点付近のA3地点での2次の非線形干渉理論による長周期拘束波のパワースペクトルとA1地点における観測された長周期波とを比較したものを示す。水深25m地点における長周期波のスペクトル形状は砕波帯付近の長周期拘束波のスペクトル形状と類似しており、通常波浪成分の周期の増加に伴う長周期波のエネルギーレベルの増大についても両者は同様の対応を示している。また、海域全体の長周期波についても同様のことがいえる。したがって、観測された長周期波のエネルギーは砕波点付近での長周期拘束波に関連づけられるものと考えられる。

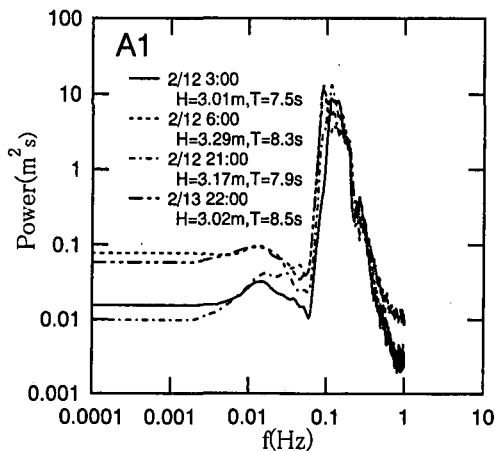


図-7 水位のパワースペクトル

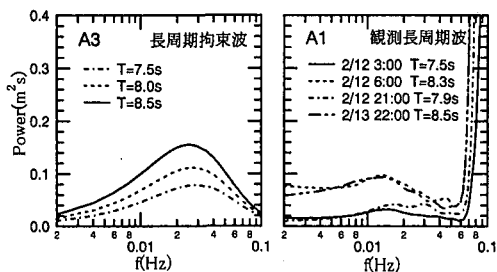


図-8 砕波点の長周期拘束波と沖の観測長周期波のパワースペクトルの比較

検討結果から、観測された長周期波は砕波点付近の長周期拘束波に起因すると考えられる。そこで、本研究では水深が比較的深い領域では長周期波エネルギーの岸向き成分は、ほぼ長周期拘束波のエネルギーに等しいとみなすとともに、波速と群速度の差異がそれほど大きくないことを考え、数値計算の入射波条件を長周期拘束波と同等のエネルギーを持つ自由波として与えることとした。

4. 現地観測に基づく入射長周期波を用いた数値計算

4.1 数値計算の概要

本研究では、長周期波を含む波浪場の推定に Bousinesq 方程式を用いて数値計算を行った。数値計算は藤畑ら (1998) が用いた手法にならった。

計算格子は x 方向に 10.0 m, y 方向に 10.0 m, 時間方向に 0.2 s 間隔とした。図-9 に計算領域を示す。

入射境界については、計算領域の水深が 30 m 程度であるが、相対水深および最も沖の観測地点である A1 地点の水深が 25 m であることを考慮して 25 m より深い場合には 25 m の一様水深とした。

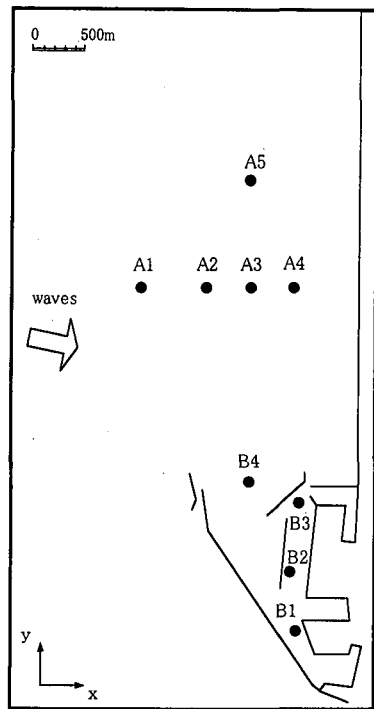


図-9 計算領域

入射波は A1 地点における観測データの方向スペクトル解析結果から波向 NNW および $S_{\max}=25$ と設定し、多方向不規則波として作成した。長周期波成分の波向は波浪成分と同じであるとし、 $S_{\max}$ は木村・田中 (1997) および関本 (1999b) を参考にして 10 と設定した。入射波の作成法は通常波浪成分、長周期波成分ともに 100 成分のシングルサンメンション法とした。各成分の振幅および周波数は、通常波浪成分については観測結果の水位の周波数スペクトル、長周期波については計算より求めた長周期拘束波の周波数スペクトルをエネルギー等分割することで決定した。また、比較検討を行うため長周期波については、観測長周期波のエネルギーを調整し 50% のエネルギーを持つものおよび長周期波のエネルギーを持たないものについても併せて作成した。各成分間の位相は乱数により決定し、各成分波の波向は光型型方向分布関数を用いて、境界に対して $\pm 45^\circ$ の範囲に入るよう決定した。

以上の方法で作成した成分波から水位変動および進行波として水位変動から計算した 2 成分線流量の時系列を造波境界における各メッシュ位置において計算し、入射波データとした。

4.2 計算結果

数値計算は 2 月 13 日 9:00 を対象にして行った。図-10 に A1~A4 地点の計算結果と観測結果のパワースペ

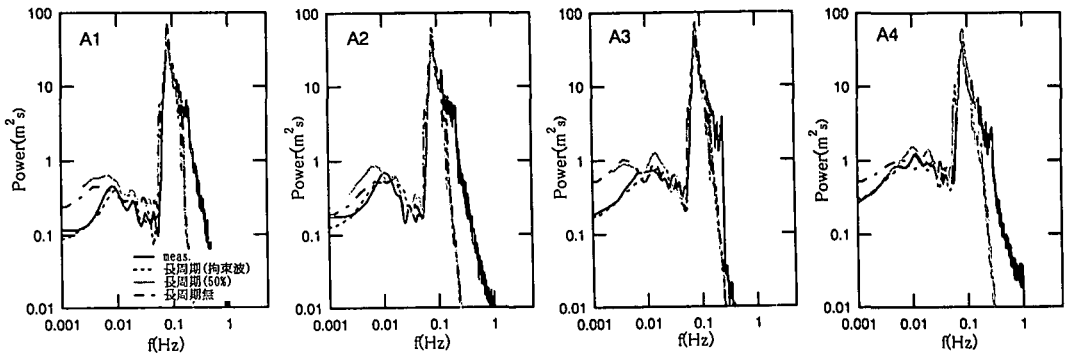


図-10 計算結果と観測結果のパワースペクトルの比較

クトルを示す。各地点ともに、拘束波のエネルギーを入射した結果は長周期側の小さなピークの出現位置およびエネルギーにはやや違いはあるものの、長周期波全体のエネルギーレベルにおける対応は非常に良いことがわかる。また、観測長周期波の50%のエネルギーを入射したケースでは長周期波全体に過大評価傾向がみられ、長周期波を入れないケースにおいても0.01 Hz以下で過大評価傾向がみられる。対象地点のみの結果ではあるが、長周期波の入射波として長周期拘束波のエネルギーを与えることで、数値計算によって非常に高い精度で長周期波の推定が可能であることが確認できた。

5. おわりに

冬期日本海における現地観測結果をもとに長周期波浪特性を明らかにするとともに数値計算への入射長周期波の評価を行った。その結果、長周期拘束波のエネルギーは観測長周期波のエネルギーと比較した場合、非常に小さいことが確認できた。長周期波の全エネルギーは砕波帯付近での長周期拘束波のエネルギーに大きく依存するので、砕波帯沖側での岸向きの長周期波のエネルギーは、長周期拘束波のエネルギーと同程度と考えられる。

観測結果に基づく長周期波の検討から数値計算における長周期波成分について長周期拘束波のエネルギーをもつ入射波を作成し、数値計算を行った。観測結果と計算結果の長周期波のスペクトルの対応は非常に良いことか

ら、適切な入射波を与えることにより、非常に高い精度で長周期波の推定・再現が可能であることが確認できた。

今回の検討結果をふまえて、他地点における検討を行っていくことが今後の課題である。

参考文献

- 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.
- 関本恒浩・森屋陽一・水口 優 (1999a): 多方向波浪場における長周期拘束波の推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 291-295.
- 関本恒浩 (1999b): 港内外の長周期波の特性とその評価に関する研究, 中央大学学位論文, p. 130.
- 永井紀彦・橋本典明・白石 悟・川口浩二・清水勝義・上野成三・小林昭男・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の動揺, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 226-230.
- 中畑 禎・落合敏浩・柏原裕彦・関本恒浩・花山格章 (2001): 冬期日本海における波浪・長周期波の現地観測, 海洋開発論文集, Vol. 17, pp. 31-36.
- 藤畑定生・秦 禎勝・森屋陽一・中山晋一・関本恒浩 (1998): 現地観測による港内長周期波浪特性とその予測手法に関する検討, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 306-310.
- 堀沢真人・佐藤典之・大中 晋・宮野利夫・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.
- 水口 優 (1994): 浅海域の長周期波について, 水工学に関する夏期研修, pp. B-3-1-B-3-15.