観測データに基づく港外および沖合長周期波の出現特性 に関する一考察

Characteristics of Long Waves Observed at Outside Harbour and in Offshore

加島寛章¹・平山克也²

Hiroaki KASHIMA and Katsuya HIRAYAMA

A series of data set of ocean wave records observed at outside harbour and in offshore is analyzed for understanding long wave characteristics in lights of relationship between short and long waves in an effort to improve reliability of harbour tranquility. It is found that long wave is strongly dependent to short wave during high wave and that it is possible to evaluate long waves with an assumption that long waves propagate in the same direction as short waves. In addition, long wave at outside harbour has different characteristics from long waves in offshore in terms of developing process of free and bound long waves.

1. 緒言

1990年代初頭から係留索の破損や船舶動揺による荷役障害などの長周期波による問題が表面化し、これまでに長周期波に関する研究が精力的に行われてきた（たとえば、関本ら，1990）。このような問題に対処するため、長周期波に対する港内静穏度解析が実施されるようになり、防波堤や岸壁等の港湾整備や設計に活用されている。

長周期波に対する港内静穏度解析では、長周期波は風波とともに来襲するという仮定のもと、その波向は風波と同じものとして取り扱われる場合が多い（たとえば、平石ら，1998）。また、長周期波の観測が行われていない場合には、風波の波高や周期から長周期波の波高を予測する方法が採用されている。しかしながら、長周期波の波向特性については未解明な部分が多く、長周期波の港内への侵入量が適切に評価されていない可能性がある。

そこで本研究では、長周期波に対する港内静穏度解析の精度向上のため、観測波浪データを解析し、波向や長周期波の性質に着目して港外（水深50m程度）および沖合（水深100～120m程度）における長周期波の出現特性について考察を行うとともに、沖合と港外における長周期波の関係性について検討を行い、その波向分布を推定するための手掛かりを得ることとした。

2. 波浪観測データの概要

本解析で用いたデータは、全国港湾海洋波浪情報網

図-1 解析対象観測点（等深線：5m間隔）

(NOWPHAS)の港外および沖合における観測波形である。解析対象地点は、港外と沖合の波浪の相互関係を把握可能な地点を候補とし、港外観測点として酒田港と久慈港、それぞれの沖合に位置する観測点として山形県沖と岩手北部沖の合計4観測点を選定した（図-1）。解析対象擾乱は、各観測点に対して長周期波が顕著となりうるうねりや高波が観測された2擾乱（酒田港・山形県沖：2010年12月2日～6日，12月22日～28日，久慈港・岩手北部沖：2009年9月17日～23日，10月7日～12日）とした。なお、各観測点の観測機器の設置水深はそれぞれ、酒田港では45.9m，久慈港では49.5m，山形県沖では104m，岩手北部沖では125mである。解析では、港外および沖合観測点のそれぞれに対し、1回の20分観測で得られる2400点（2Hz），1200点（1Hz）の水位および流速変動データ，GPSブイの位置データ（緯度・経度・高度）を用いた。なお、通常の長周期波の解析では60分間の連続データを用いるが、本研究で取り扱った長周期波のピーク周期が70s程度であることから20分観測のデータを用いてもある程度の精度が確保されるものと判断した。

データ解析は、まず港外および沖合で観測された水位および流速変動データ，GPSブイの位置データに対して

1 正会員 修(工) (独法) 港湾空港技術研究所
2 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所

図-2 NOWPHASと共分散法による波向の関係（実線：誤差=0，一点鎖線：誤差=π/8，点線：誤差=π/4）

デジタルフィルターにより周期30s未満の短周期波と周期30～300s未満の長周期波（以下では，観測長周期波と表記する。）に分離した．次に，分離後の各波浪成分の流速変動に対し，港外観測点では共分散法により，沖合観測点では清水ら（2007）の波向推定法（以下では，単に波向法と表記する．）により，それぞれの波向を算出した．波向法では，ブイの緯度経度から求まる水平方向の位置データのパワー（2次モーメント）とブイの垂直位置と水平方向流速のクロスパワー（共分散）の関係から波向が推定される．なお，各方法により得られる波向（ θ ）の閾値は，共分散法では $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ であり，波向法では $0 \leq \theta \leq 2\pi$ である．解析方法の統一性の確保やEMEPなどの方向スペクトル解析による長周期波の波向推定精度の不明確性を考慮し，本解析では，簡易的に算定可能な共分散法や波向法を採用した．図-2に示すのは，全周波数帯を対象としたNOWPHAS波浪台帳で整理されている波向（方向スペクトルにより得られる波向）と共分散法により得られた波向の関係であり，両者の誤差は $\pi/8$ 程度の範囲におさまリ，共分散法からでも波向をおおむね把握することが可能であると考えられる．

最後に，上記で抽出された短周期波の水位変動データに対し，FFT変換法により各成分波の周波数，振幅，初期位相を，共分散法や波向法により波向を算出し，2次の非線形理論に基づくSand（1982）の拘束波推定式から短周期波に拘束された長周期波（以下では，拘束長周期波と表記する．）を算出した．なお，本研究では，観測長周期波は，拘束長周期波とそれ以外の成分である自由長周期波から構成され，さらに自由長周期波には，擾乱発生前にその波浪場に残留している，擾乱時の波浪に独立した成分や他の波浪場において短周期波に対する拘束が解放されて来襲する成分が含まれているという立場で長周期波の特性について検討した．

このようにして得られた各波浪成分に対する波浪統計

量の経時変化や関係性に着目して港外および沖合における長周期波の特性について分析を行った．

3. 結果と考察

(1) 港外における長周期波の出現特性

a) 波浪統計量の経時変化

図-3および図-4に港外観測点における短周期波や観測長周期波，拘束長周期波の各波浪統計量の経時変化を示す．上から順に，短周期波の有義波周期（ T_S ）および有義波高（ H_S ），これらの積（ $H_S T_S$ ），観測長周期波の波高（ H_L ），拘束長周期波の波高（ H_{Lb} ），観測長周期波に占める拘束長周期波のエネルギー割合（ ξ_{brms} / ξ_{rms} ），観測長周期波と短周期波の波向（ θ ）（○：短周期波，×：観測長周期波）である．ただし，波向は北向きを0と定義した時計回り表示に変換して示している．

まず，図-3（a）より，比較的急激な短周期波の発達・減衰（およそ1日の間に短周期波の波高が数m～10m程度まで変化）を捉えた酒田港の擾乱1についてみると，観測長周期波の波高は，短周期波の波高や周期，および渥美ら（1997）や泉宮・金井（2009）が論じている短周期波の波高と周期の積に追従して変化していることがわかる．また，観測長周期波の波高が卓越している期間では，拘束長周期波の波高が卓越し，そのエネルギー割合は50%以上に達している．この時の観測長周期波の波向は短周期波の波向にほぼ一致している．一方，その後の短周期波の減衰期には，拘束長周期波の波高やそのエネルギー割合は減少し，波向の一致性もみられなくなる．したがって，拘束長周期波の主波向が理論的に風波の主波向と一致することを合わせて考えると，少なくとも高波発生時には，観測長周期波の波向は風波の波向で代表させても差し支えないことがわかる．

次に，図-3（b）に示すように，短周期波の波高増大後に波高5m以上の高波高が長時間継続する場合（酒田港の擾乱2）についてみると，上記の擾乱1と同様，高波高の出現期間には観測長周期波や拘束長周期波の波高が継続して卓越し，観測長周期波の波向は短周期波の波向にほぼ一致している．

一方，短周期波が非常に緩やかに発達する場合（波高5m以下の波浪が連続して発生する）を捉えた久慈港の擾乱1（図-4（a））についてみると，短周期波が急激に発達した上記の酒田港の2事例に比べ，拘束長周期波の発達過程に違いが見られる．すなわち，短周期波の発達初期の9月20日には，観測長周期波とともに拘束長周期波の波高は増大するが，その後，観測長周期波の波高が0.1m程度まで増加するにもかかわらず，拘束長周期波のエネルギー割合は50%に達する前に減少に転じ，波高も低下する．また，この期間における観測長周期波の波向のば

(a) 擾乱1 (2010年12月2日～6日)

(b) 擾乱2 (2010年12月22日～28日)

図-3 波浪統計量の時系列変化 (酒田港)

(a) 擾乱1 (2009年9月17日～23日)

(b) 擾乱2 (2009年10月7日～12日)

図-4 波浪統計量の時系列変化 (久慈港)

らつきが大きい。このように、波の発達が顕著でない場合に観測される長周期波では、その波浪場にもともと残留していた自由長周期波や他の波浪場から伝播してきた自由長周期波など、拘束長周期波以外の成分の影響が相対的に大きくなると考えられる。

最後に、酒田港の擾乱1と同様、比較的急激な短周期波の発達を捉えた久慈港の擾乱2 (図-4 (b)) についてみると、観測長周期波の波高は短周期波に付随して変化していることが確認できる。しかし、10月8日に短周期波の波高のピークが出現した時間帯でデータの欠損が生じているため、長周期波の出現特性に関するこれ以上の考察は難しい。ただし、観測長周期波と短周期波の波向が発達時にも一致していないことから、この場合には、周辺海域から伝播した自由長周期波の存在が疑われる。

以上より、高波発生時に観測される長周期波は、短周期波に拘束された成分が支配的になることが確認されたが、この場合、長周期波を対象とした一般的な静穏度解析では、これらの拘束長周期波がすべて自由長周期波へ移行することを仮定していることになる。

b) 波浪統計量間の関係

ここでは、観測長周期波と短周期波の関係についてより詳細に検討するため、両者の波浪統計量間の相互関係について分析を行った。図-5および図-6に示すのは、図-

3および図-4に示す全てのデータを対象に行った分析結果である。なお、久慈港の擾乱2におけるデータの欠損がみられた時間帯のデータは省いている。各図の右下図は観測長周期波と短周期波の波高、および両者の波向差の関係を俯瞰的に捉えたものであり、水平軸は観測長周期波と短周期波の波向差 (絶対値)、奥行軸および鉛直軸は短周期波および観測長周期波の波高である。また、残りの図はこのうちそれぞれ2者の関係についてまとめたものである。図中の○、△、▽、□はそれぞれ、短周期波の発達前、発達期 (短周期波の波高増大時)、高波高継続期、減衰期 (短周期波の波高減衰時) におけるデータであり、水色で塗りつぶされたプロットは、拘束長周期波のエネルギー割合が50%以上のデータに対応する。また、各図の右上図の点線および破線はそれぞれ、短周期波の波高の1乗および2乗に比例する直線を表している。

図-5 (a) および (b) より、酒田港についてみると、短周期波の発達前では、短周期波と観測長周期波の波向差のばらつきが大きく、短周期波の波高と観測長周期波の波高の相関が弱い。これは、この期間の短周期波に依存しない、既にこの波浪場にもともと残留していた自由長周期波の影響と思われる。短周期波の発達期や高波高継続期では、短周期波あるいは観測長周期波の波高の増

(a) 擾乱1

(b) 擾乱2

図-5 波浪統計量間の関係：酒田港（○：発達前，△：発達期，▽：高波高継続期，□：減衰期，水色塗り：拘束長周期波のエネルギー割合が50%以上，点線および破線：短周期波の波高の1乗および2乗に比例する直線）

大に伴って観測長周期波と短周期波の波向差が小さくなるとともに、観測長周期波の波高が短周期波の波高に依存するようになる。特に、観測長周期波に対し、拘束長周期波が支配的とみなせる場合には、その波高は短周期波の波高の2乗に比例する。これは、関本ら（1990）が示した2次の非線形干渉理論に基づく両者の関係と合致する結果である。その後の短周期波の減衰期では、短周期波や観測長周期波の波高の減衰とともに観測長周期波と短周期波の波向差が再び大きくなり、2乗に比例していた両者の波高の関係も変化している。

一方、図-6 (a) および (b) より、久慈港についてみると、拘束長周期波の成分以外の影響が相対的に大きいことから、短周期波の状態にかかわらず、短周期波と観測長周期波の波向差のばらつきが大きく、また観測長周期波は短周期波のほぼ1乗に比例するように見える。これは、Bowers（1992）やHerbersら（1994）が示した観測長周期波と拘束長周期波のエネルギー差から算出された自由長周期波と短周期波の関係に合致する。彼らは、2次の非線形干渉による成分波間のエネルギー伝達が碎波などの短周期波の減衰で妨げられると、2乗の関係性

(a) 擾乱1

(b) 擾乱2

図-6 波浪統計量間の関係：久慈港（○：発達前，△：発達期，□：減衰期，水色塗り：拘束長周期波のエネルギー割合が50%以上，点線および破線：短周期波の波高の1乗および2乗に比例する直線）

が弱くなると報告しているが、これらの結果として両者が1乗の関係に従う理由については不明であり、今後検証する必要がある。

(2) 港外と沖合長周期波の関係

ここでは、沖合から港外まで伝播する長周期波の特性について検討するため、沖合および港外観測点間の波浪統計量について分析を行った。図-7に擾乱1に対する沖合および港外波浪観測点における各波浪統計量の経時変化を比較した結果を示す。図中の細実線および●，太実線および○はそれぞれ、港外および沖合観測点に対するデータである。なお、岩手北部沖で得られた観測長周期波の波高の経時変化でみられるノイズの変動は、データの欠損による波の数の低下によるものと考えられる。

まず、図-7 (a) より、比較的短時間のうちに短周期波の発達・減衰を捉えた酒田港および山形県沖についてみると、沖合と港外において短周期波の波高や周期、これらの積、波向に顕著な違いはほとんど見られないが、短周期波の発達期において港外の拘束長周期波の波高が沖合に比べて大きい。この違いについて検証するため、この期間に観測された波浪の方向分散について調べた。図-