

港湾における長周期波の増幅現象に関する現地観測

田端竹千穂*・田所篤博**・平石哲也***・玉城重則****

1. はじめに

港湾に侵入する長周期波により、係留された船舶の水平運動が励起されて大きくなり、荷役が中断されたり、係船索が切断される事故が生じ、従来から港湾整備における大きな問題となっている。最近、苫小牧および仙台北港において港外と港内に波高計を設置し、港内に侵入する長周期波の特性が詳細に観測されている(松良ら, 1994, 永井ら, 1994)。これらの観測により、荷役障害を起こす長周期波の発生要因としては波群に拘束されたセットダウン波が主なものとして挙げられることが判明した。長周期波が港内に侵入すると、漁港のような小型の港湾では、長周期波の周期と港湾固有周期が近い場合に共振により港内副振動が励起され、長周期の振幅が増大する(金山ら, 1994)。港内域が広い港湾においても波群の拘束波を起因とする長周期波により副振動が励起される可能性がある(永井ら, 1994)が、観測結果からは増幅現象は明らかにはされていない。

日本海側に位置する能代港においても、従来から係留船舶の荷役障害が生じており、その対策の必要性が論じられてきた。そこで、本研究では、能代港において港外と港内で水位の連続観測を行い、その特性を明らかにするとともに、港内副振動の発生状況についても検討を行った。さらに、副振動の数値計算によって増幅モードを調べた。

2. 現地観測の概要と結果

図-1は能代港における現地観測地点を示す。図に示す港外および港内の観測点の水深はそれぞれ25および14mである。港外の観測点では水圧式と超音波式の波高計で水位を観測し、港内の観測点では超音波式で波高観測を行った。港外と港内の2地点で同時に観測した期間は、1) 1993年11月18日～12月18日と2) 1994年1月29日から2月30日である。1)の期間では、10s間隔で観測期間中全時間の連続データを取得した。全観測時

間の長時間の連続データの解析によって、周期20s以上の長周期の水位変動の特性を検討できる。2)の期間では、風波と長周期波との関係を検討するために毎偶数時の2時間間隔で、20min間の水位データを0.5s間隔で記録した。さらに、観測3)として1992年から1993年における係留索切断時に相当する港外における20min間のアナログの波浪観測データを収集し、解析した。

図-2は、観測3)の係留索切断時の港外波の周波数スペクトルの解析例である。スペクトル形には2つの顕著なピークが見られる。11.1sの鋭いピークは通常の風波によるもので、これらの短周期の波に対して港内が静穏となるように防波堤の配置が決定されている。周期2.9minのピークは長周期波によるもので、係留船舶のサージの固有振動周期に近く、共振により船舶の水平運動を励起し、荷役障害を与える主因となっていると考えられる(松良ら, 1994)。

図-3は、観測期間1)における港外の観測データから

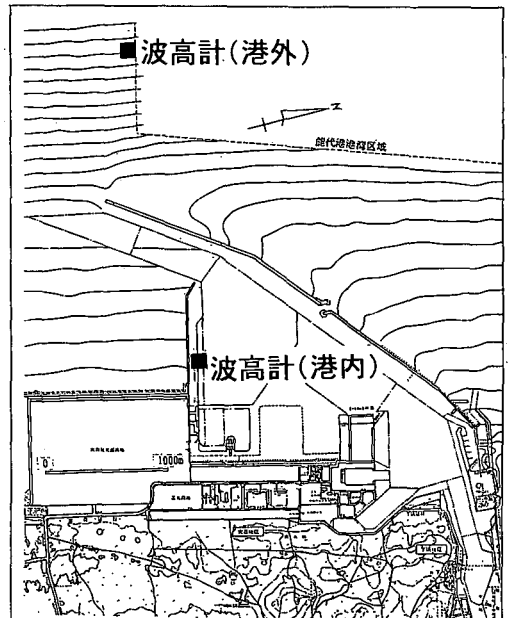


図-1 能代港の観測地点

* 正会員 工修 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所 所長
 ** 正会員 工修 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所 次長
 *** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
 **** 正会員 工修 (株)エコー第一技術部

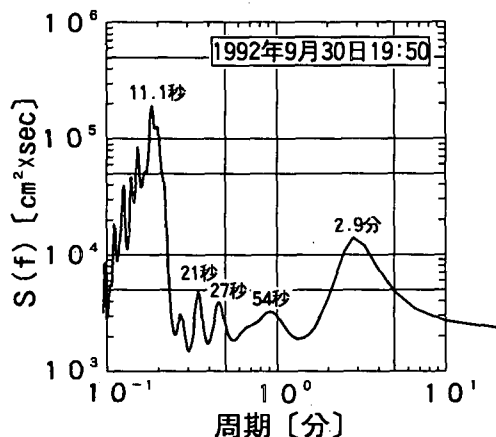


図-2 係留索切断時の港外波の周波数スペクトル

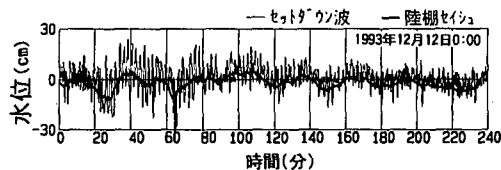


図-3 能代港における長周期の水位変動

移動平均法により潮汐成分とノイズを除去した波形記録の一例である。水位変動には、周期 1~5 min 程度のサーフビートに似た変動成分と周期 20~60 min の変動成分が含まれている。周期 1~5 min 程度の変動成分は、港外の波群性の強い波に拘束されたセッダウン波と考えられ、周期 20~60 min の水位変動は能代港を含む港外の陸棚におけるセイシュの影響と思われる。

図-4 は、観測期間中の港外の有義波高、港外および港内のサーフビート状の変動成分と港内副振動の平均波高の経時変化図を示す。港内および港外のサーフビート波高は港外の有義波高の変化とほぼ対応しており、有義波高が増大するとサーフビート波高も増大する。副振動波高の変化は、有義波高の変化との相関が小さく、観測期間中 12 月 11 日を除くと大きく変化していない。港外と港内の観測値を比較すると、サーフビート波高は港内において大きく増幅されることはなく、港外と港内でほぼ同一である。副振動波高は港内で常に大きくなっており、港内の共振現象により顕著な港内副振動が常時生じていることがわかる。なお、本観測 1) のサンプリング周期は 10 s で、風波の解析ができないので、有義波高および周期の値は観測台帳 (菅原ら, 1994) データを用いた。

図-5 は、観測期間 1) における港外と港内の水位変動の周波数スペクトルの比較である。図の下段には、港内の水位変動の港外のそれに対する長周期波高比を表し

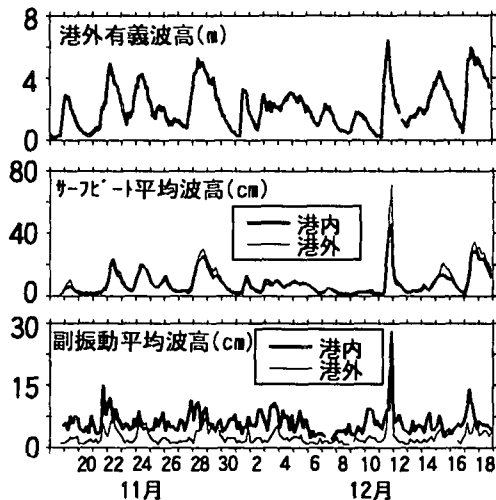


図-4 長周期波高の経時変化

た。長周期波高比 A は次式で求めた。

$$A(f) = \sqrt{\frac{S_{in}(f)}{S_{out}(f)}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 S_{in} および S_{out} はそれぞれ港内および港外の周波数スペクトル密度であり、 f は周波数である。

長周期波高比は 30 min 程度に高いピークを有し、港内での増幅が生じていることがわかる。周期 1~10 min の波高比は概ね 1~3 程度で比較的増幅率は小さい。しかし、波高比が 1 以下になることはなく、港外で発生した周期数分の長周期波は減衰せずに、港内へ影響を及ぼすことがわかる。ただ周期 2.1 min の時に顕著なピークが生じており、この周期については港内で共振が生じている可能性があることがわかる。観測期間 1) 中の他の解析ケースにおいても、ピークの高さはばらつくが、ほぼ同じ周波数で顕著なピークが生じた。

次に、期間 2) のデータを用いて、港外における長周期波成分の振幅とセッダウン波高の比較を行った。セッダウン波の水位は Longuet-Higgins and Stewart (1962) に従って次式で計算した。

$$\eta_1 = -\frac{S_x}{\rho(gh - C_0^2)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$S_x = \frac{1}{2} \rho g a^2 \left(\frac{2C_0}{C} - \frac{1}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

η_1 : セッダウン波の水位、 h : 水深、 C_0 : ゼロアップクロス法で定義された個々の波の群速度、 C : ゼロアップクロス法で定義された個々の波の波速、 a : ゼロアップクロス法で定義された個々の波の振幅、 g : 重力加速度および ρ : 水の密度である。セッダウン波の水位変動を求めた後に、波の統計解析と同様の手法を用いてセッ

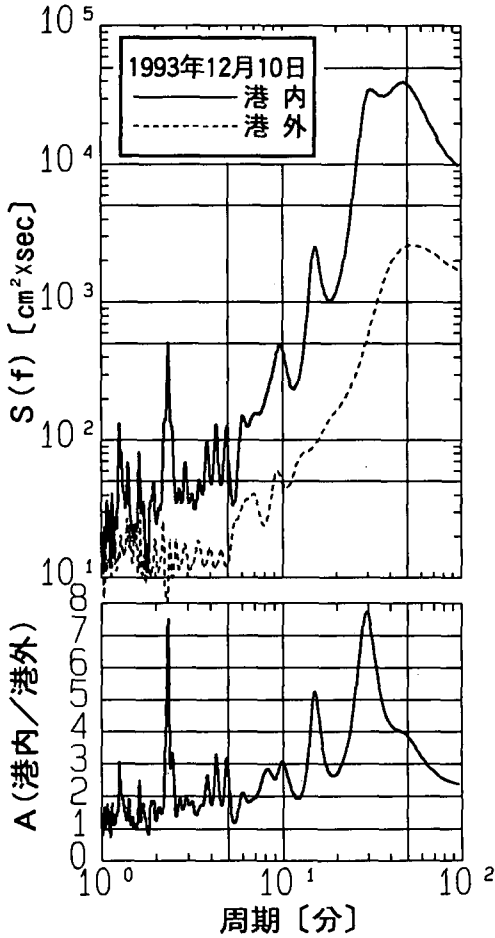


図-5 能代港における長周期波高比

トダウン波の有義波高 $H_{d1/3}$ および有義波周期 $T_{d1/3}$ を整理した。

長周期波成分は、連続波形記録の移動平均操作により周期 1 min 以上の変動成分を抽出することにより求めた。図-6 は港外の観測点における長周期波成分の有義波高とセットダウン波の有義波高を比較したものである。セットダウン波高が大きくなると、ばらつきが増加するが、両者の値はほぼ一致しており、能代港外の長周期波の要因を波群によるセットダウン波として考えることが妥当であることがわかる。

図-7 は、港外の観測値より求めたセットダウン波形 (H_d) と長周期波形 (H_L) の比較であり、波高と同様に両者はよく一致する。港外における長周期波の原因としては日本海におけるセイシュなども考えられるが、数値計算をしても、本観測で得られた周期成分と一致する振動は現れなかった。そこで、図-6 および 7 の結果から判断して、能代港外の周期数分の長周期変動は波群に拘束されたセットダウン波であると考えることができる。この

場合には、港外の有義波高値から港口へ達するセットダウン波高を推定できる。

図-8 は、港外の有義波高と計算によるセットダウン波高を比較したものである。セットダウン波高の有義値は風波の有義波高の 2 乗に比例し、能代港の場合 $H_d = 0.84 \times 10^{-2} H_{1/3}^2$ で推定することができる。港外の有義波高は定常的な観測で常時得られており、この値から長周期波をある程度推定できる。

3. 港内の増幅機構の検討

次に、港内の長周期波の増幅現象を検討するために副振動計算を行った。計算法は、線形長波の連続式と運動方程式を連立させた差分近似式を各タイムステップ毎に解くもので、各周波数毎に規則入射波の伝播を計算し、港内の応答関数を計算するものである (高山・平石, 1988)。計算領域は、能代港とその沖合の水深 200 m 以浅の海域を含む矩形領域で、計算領域の西側から微小振幅長波が入射するものとする。最も沖側の格子間隔は 800 m であり、浅海域では順次 1/2 ずつ格子幅を分割し、能代港内では図-9 に示すように 50 m 格子で地形を表した。図-9 の P1 および P2 が、港外および港内の現地観測地点に相当する。沖側境界の入射波の片振幅は 2 cm

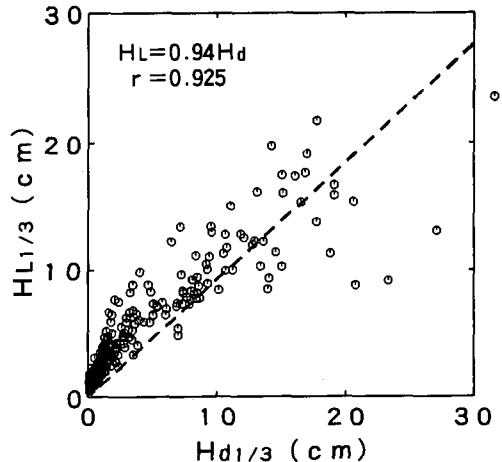


図-6 長周期波とセットダウン波の有義波高の比較

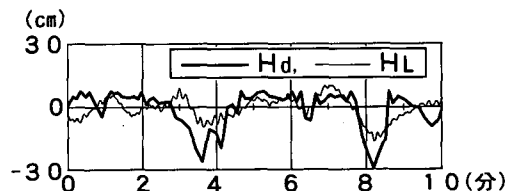


図-7 セットダウン波形と観測長周期波形の比較

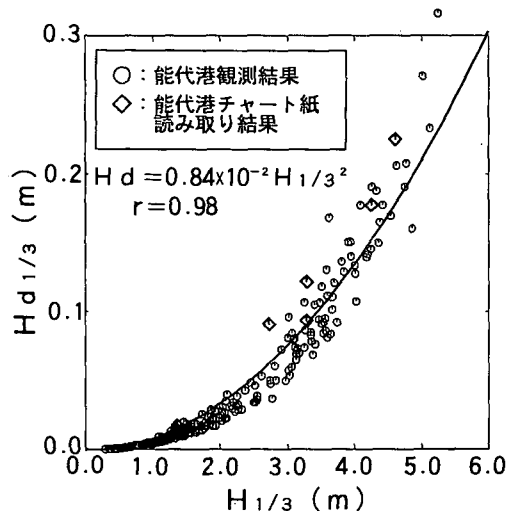


図-8 風波とセットダウン波の有義波高の比較

で一定とし、周期を1~60 minで1 min毎に変化させて港内水位を計算した。

図-10は、港内観測点の長周期波成分の港外のそれに対する波高比Aの観測結果と計算結果を比較したものである。観測結果は、期間1)において港外の有義波高が4 m以上になった期間のスペクトル解析結果を平均して求めた。長周期波高比の観測値と計算値を比較すると、ピークの出現周期はよく一致し、30, 15, 10, 4および2 minに両者共にピークが現れる。ピークの高さは、周期2, 4, 10 minなどではよく一致するが、30 min程度のピークは観測値が計算値の2倍程度になる。しかし、オーダーとしてはよく一致しており、本計算モデルによって港内の増幅特性を検討できることがわかる。そこで、顕著な増幅が生じている周期30 minと2 minについて増幅率の平面分布を調べた。なお、増幅率は、沖側境界上の入射波振幅に対する港内計算点の水位の振幅として定義した。

図-11は周期32 minの微小入射波が進入したときの港内の増幅率分布を示す。港内の中では細い水路C1およびC2において増幅率が6以上になっており、顕著な増幅が生じていることがわかる。港口部の増幅率は2程度で小さく、港内において共振によって振幅が増大している。この増幅モードは、港口部を節とし、港奥の水路を腹とする能代港全体の1次モードの振動と考えることができる。

図-12は、短周期側の顕著な振動に相当する周期2.1 minの増幅率の分布を示す。港外に比較すると港内の増幅率は小さいが、船舶係留点P2において局所的に増幅率が5程度になっている。水位の平面分布を検討すると、港内観測点の水位が上昇した場合には、対岸の北防波堤

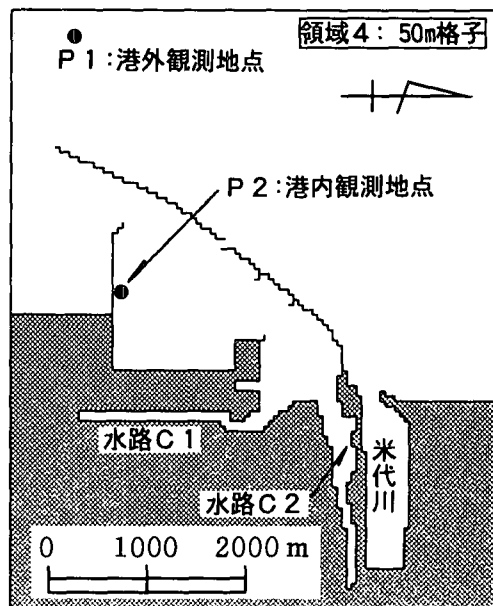


図-9 能代港の計算領域 (格子間隔 50 m)

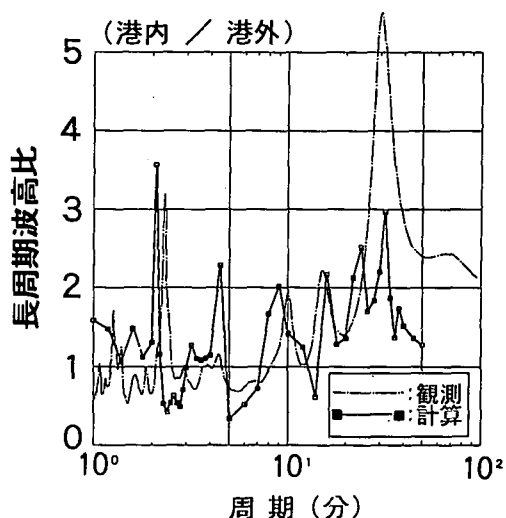


図-10 長周期波高比の観測値と計算値の比較

背後の水位が低下していた。したがって、この周期2.1 minの振動は港内の岸壁と防波堤をそれぞれ腹とするような振動モードによって増幅しているものと思われる。このように、能代港においては港内全域を振動域に含む周期30 min程度の副振動と、港内の岸壁間で発生する比較的短い周期2 min程度の副振動が生じている。特に、港外のセットダウン波との共振によって生じる短周期の副振動は、その周期が係留船舶の固有振動周期と近い大きな水平運動を励起してしまう。なお、図-12に示すように、周期2.1 minの場合、港内の位置によって増幅率

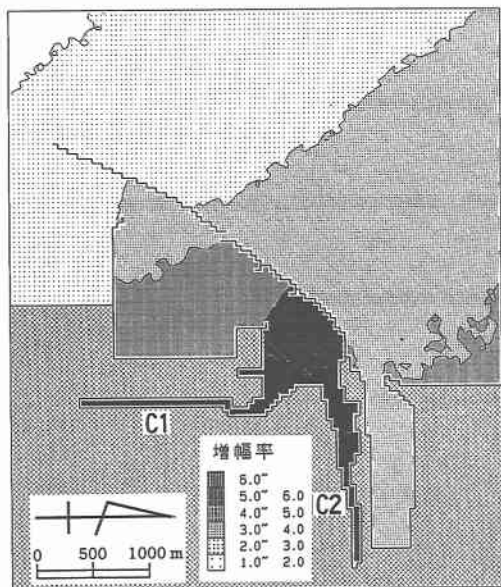


図-11 港内増幅率の計算結果 (周期: 32 min)

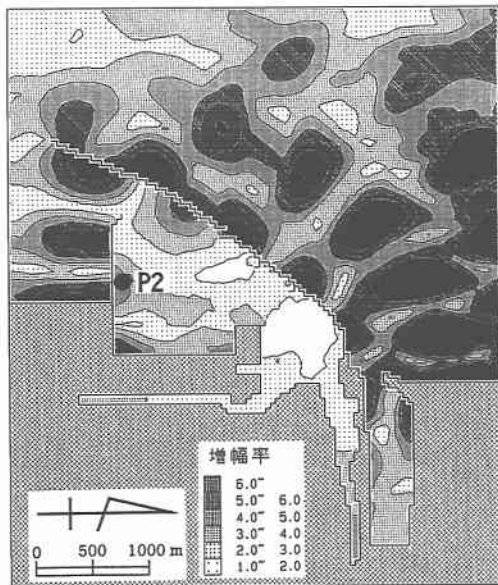


図-12 港内増幅率の計算結果 (周期: 2.1 min)

が変化し、使用しているパースの位置を少し変更すれば、増幅率が小さくなる。したがって、荷役障害を防止するためには、パース位置の変更が考えられる。

5. あとがき

本調査で得られた主な結論は以下の通りである。(1) 能代港外の観測点における長周期波とセットダウン波の波形および波高はよく一致し、能代港外における長周期波の主な発生要因は、波群に伴う拘束波であると考えられる。(2) セットダウン波高の有義値 H_d は風波成分の有義波高 $H_{1/3}$ の2乗に比例し、能代港の場合、 $H_d = 0.84 \times 10^{-2} H_{1/3}^2$ で表される。したがって、港外の定常的な波浪観測値から港外における長周期波高を予測できる。(4) 周期2 minのセットダウン波による振動は港内で増幅され顕著になり、これが係留船舶のサージの固

有周期とも一致し、荷役障害の主因となる。

参考文献

- 菅原一晃・永井紀彦・橋本典明・清水勝義 (1994): 全国港湾海洋波浪観測台帳, 港湾技研資料, No. 782, 326 p.
- 高山知司・平石哲也 (1988): 数値計算と現地観測による港内副振動特性の検討, 港湾技研資料, No. 636, 70 p.
- 永井紀彦・橋本典明・浅井 正他 5名 (1994): 現地データに基づく港内係留船舶の動揺に及ぼす港外長周期波, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 931-935.
- 松良精三・渥美洋一・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.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', J. of Fluid Mechanics, Vol. 13, No. 4, pp. 481-504.