

# 係留中の大型貨物船の船体動揺について

細井 晶弘\*・高山 知司\*\*・中野渡 秀一\*\*\*・藤井 寿輝\*\*\*\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

\*\* (一財) 沿岸技術研究センター 上席客員研究員

\*\*\* 国土交通省 東北地方整備局 小名浜港湾事務所 企画調整課長

\*\*\*\* 前 国土交通省 東北地方整備局 小名浜港湾事務所 企画調整係長

小名浜港では、これまで14m岸壁で主にパナマックス船(70,000DWT)を受け入れてきたが、ケープサイズ船(175,000DWT)を受け入れるために東港地区(水深18m岸壁)の整備を進めてきた。本検討は、この大型貨物船が小名浜港東港地区岸壁に接岸した際に、どのような船体動揺が発生するか浮体動揺解析システムを用い検討した。

キーワード：大型貨物船, 船体動揺, 波浪特性

## 1. はじめに

小名浜港は、東港地区における国際バルク戦略港湾(石炭)整備が進み、東日本のエネルギー供給拠点を担う重要港湾として注目されている。

小名浜港では、石炭などの貨物取扱量の増加とこれらを輸送する船舶の大型化が進む中、大型船が接岸できる水深の深い岸壁が不足しており、積載量を減らしての入港や、船舶の沖待ち(滞船)が発生し、効率が悪い状況にあった。東港地区の整備は、これらの問題を解決し、小名浜港を東北の火力発電所などに送る石炭の集荷拠点へと位置付け、石炭を大型船で一括輸入し輸送コストを大幅に減らす狙いがある(図-1)。

本検討は、今後利用が本格化する東港地区岸壁における大型貨物船の船体動揺を検討するものである。

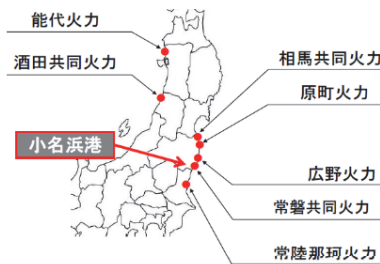


図-1 小名浜港位置図

## 2. 検討内容と手順

これまで、小名浜港で主に石炭の荷役に使用されてきた7号ふ頭-13m岸壁において発生した過去の貨物船に関する船体動揺の記録から、船体動揺の再現シミュレーションを行い、小名浜港内で船体動揺に影響を与える波浪の特定とシミュレーションの精度を確認した上で、特定された波浪条件を用いて、東港地区岸壁での利用が想定される大型船舶の発生動揺量を船舶動揺シミュレーションにより確認し、荷役障害発生の可能性について検討した。

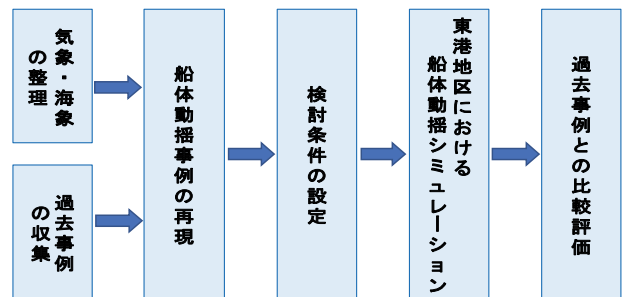


図-2 検討フロー図

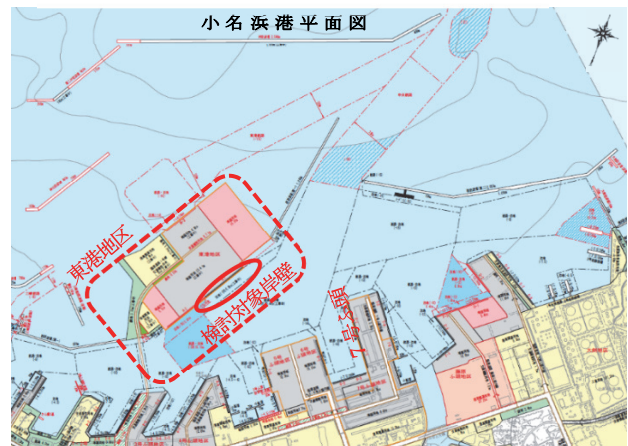


図-3 検討対象岸壁位置平面図

## 3. 気象・海象の整理

気象・海象特性を把握するため、アメダス小名浜およびNOWPHAS小名浜の時系列データ(2007年~2017年)の整理を行い、波浪に関する出現頻度図(図-4)を作成した。

NOWPHAS小名浜から以下の特徴が見られた。

- ・波高・周期別頻度  
波高 0.51m~1.0m  
周期 7.1s~8.0s の波浪が最も多かった。
- ・波高・波向別頻度  
波高 0.51m~1.0m  
波向 ESE の波浪が最も多かった。

・周期・波向別頻度  
 周期 8.1s~9.0s  
 波向 ESE の波浪が最も多かった。

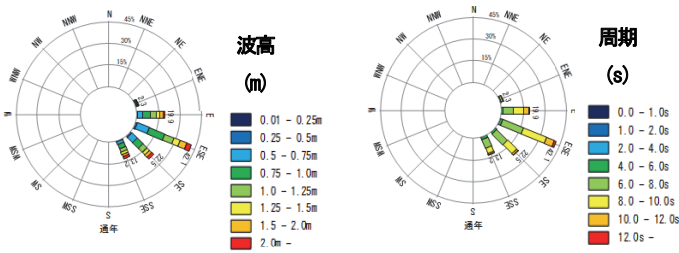


図-4 小名浜の波向別波高・周期出現頻度図 (2007~2017)

また, NOWPHAS 小名浜の観測データを用いて年数回高波浪をもたらした擾乱 (下限値 1.5m, 上限値 3.0m) を抽出し整理したところ, 11 年間で 120 擾乱を抽出した (図-5).

- ・高波浪時の最高波高の波向は E, ESE, SE, SSE の 4 波向きであり, 発生回数は, SSE, SE, ESE, E の順に多い.
- ・波向 E は発生回数が小さく最大波も他の波向に比べて小さい.

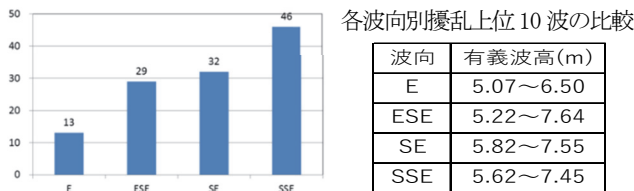


図-5 波向別擾乱発生回数 (全 120 擾乱)

#### 4. 過去に発生した船体動揺の事例

小名浜港内で過去に発生した船体動揺事例について情報を収集したところ, 2002 年 11 月 25 日に 7 号ふ頭で発生した係留索の切断事例が詳細な情報として記録されていた (表-1).

表-1 2002 年 11 月 25 日の係留索切断時の時系列

日にち	時間	事象
25日	7:35	7号ふ頭1バースに接岸
	深夜	船体動揺大
	4:00	ホーサーが次々に切断 (7本)
	7:00	船長よりタグポート緊急要請 (2隻)
	7:20	タグポートにて船体保持作業
	9:40	船体保持作業完了、タグポート離舷
26日	13:00	ホーサーが4本切断
	14:00	船長よりタグポート緊急要請 (2隻)
	14:15	船長より港外への避難手配要請
	14:45	水先人乗船
	15:15	離岸
	16:34	港外投錨
27日	7:14	7号ふ頭1バースに再接岸

##### (1) 対象船舶

名 前 : Full Strong  
 貨 物 : 石炭  
 総トン数 : 36,586GT  
 排水重量 : 72,495DT  
 船 長 : 225m  
 船 幅 : 32.26m



##### (2) 障害発生時の気象・海象の整理

荷役障害発生期間 (2002 年 11 月 25 日~26 日) の港外波浪 (NOWPHAS 小名浜) について整理した (図-6).

11 月 26 日 4 時に最大波高 (波高 5.71m, 周期 14.1s, 波向 SE) となっており, 係留索の切断が記録されており, この時の船体動揺はサージ 5.1m となっている (図-7).

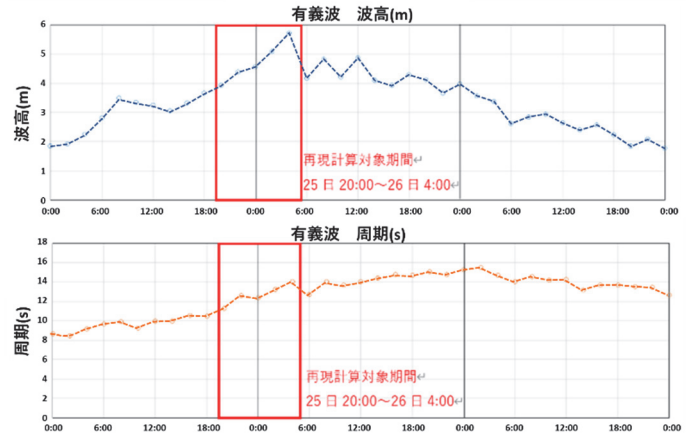


図-6 係留索切断時の有義波波高および有義波周期

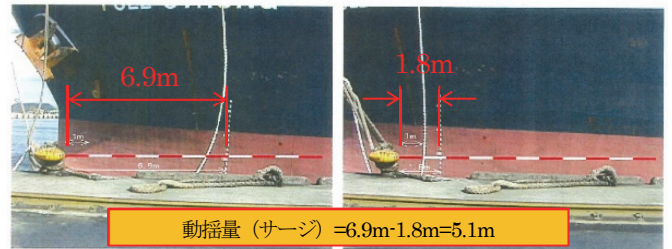


図-7 係留索切断時の船体動揺状況

#### 5. 過去の船体動揺事例の再現

##### 5.1 再現シミュレーションの条件

再現シミュレーションは 4. 過去に発生した船体動揺の事例で述べた事例の船体動揺 (サージ 5.1m) と係留索の切断を再現の対象として行う.

##### (1) 風波による岸壁前面の波高算定

シミュレーションに用いる対象岸壁前面の波高を表-2 の条件のもとエネルギー平衡方程式を用いた波浪変形計算により算定した.

表-2 再現計算の沖波条件

日時	波高(m)	周期(s)	波向	観測潮位(cm)	Smax
2002/11/25 20:00	3.91	11.3	SSE	127	25
2002/11/25 22:00	4.37	12.6	SSE	88	25
2002/11/26 0:00	4.54	12.4	SE	52	25
2002/11/26 2:00	5.07	13.3	SE	47	25
2002/11/26 4:00	5.71	14.1	SE	70	25

沖波波形勾配 (Ho/Lo) が 0.030 以上 : Smax = 10  
 0.015~0.030 : Smax = 25  
 0.015 以下 : Smax = 75

再現対象 (7 号ふ頭水深 13m 岸壁 1 バース) 前面の平均有義波高, 周期, 岸壁前面の波向を表-3 及び図-8 に示す. なお, 有義波周期は沖波と同様とする.



表-3 風波による岸壁前面の有義波算定結果

日時 <sup>①</sup>	平均有義波高(m) <sup>②</sup>	有義波周期(s) <sup>③</sup>	岸壁前面波向 <sup>④</sup>
2002/11/25 20:00 <sup>⑤</sup>	0.25 <sup>⑥</sup>	11.3 <sup>⑦</sup>	岸壁から反時計回りに10度 <sup>⑧</sup>
2002/11/25 22:00 <sup>⑤</sup>	0.28 <sup>⑥</sup>	12.6 <sup>⑦</sup>	岸壁から反時計回りに10度 <sup>⑧</sup>
2002/11/26 0:00 <sup>⑤</sup>	0.19 <sup>⑥</sup>	12.4 <sup>⑦</sup>	岸壁から反時計回りに10度 <sup>⑧</sup>
2002/11/26 2:00 <sup>⑤</sup>	0.22 <sup>⑥</sup>	13.3 <sup>⑦</sup>	岸壁から反時計回りに10度 <sup>⑧</sup>
2002/11/26 4:00 <sup>⑤</sup>	0.24 <sup>⑥</sup>	14.1 <sup>⑦</sup>	岸壁から反時計回りに10度 <sup>⑧</sup>

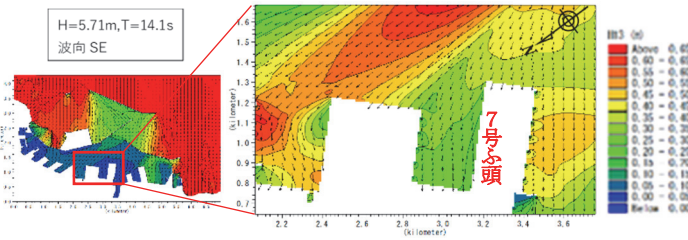


図-8 風波による波高・波向分布図

(2) 長周期波による岸壁前面の波高算定  
 長周期波 (30~300s) については平山・加島により提案された近似的を基に風波より長周期波を推定し、ブシネスク方程式を用いた波浪変形計算により算定した。また、7号ふ頭水深13m岸壁の前面で長周期波のスペクトル解析を行い、周波数帯 (30s~300s) に副共振を起こすような周波数 (周期) があるか調べたところ、周期 220 s 付近でスペクトルの共振が見られた(図-9)。振幅の増幅率が5倍強となっているため、長周期波による船体動揺計算では波浪外力は規則波として与えることにした。

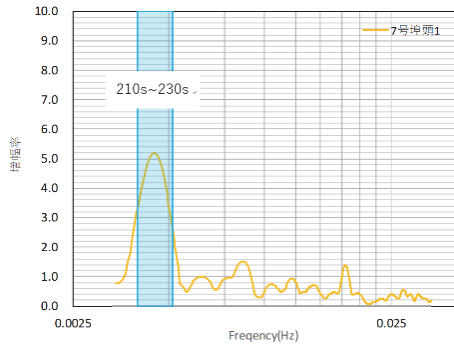


図-9 7号ふ頭岸壁1 パース付近の増幅率

## 5.2 再現シミュレーション結果

再現対象船舶の動揺計算を 5.1 で求めた風波と長周期波の条件でそれぞれ計算した。ただし、風については、7m/s 以下であり、船体の動揺には大きな影響を与えないとして無視した。

風波については、船体動揺量は小さく、荷役障害が生じるような動揺は発生しなかった。特定の周期での増幅が大きかった長周期波については、動揺量 (サージ) は表-4、図-10 に示す通り、最大で±5m強に達した。また、係留索の応力も破断強度に達しており、港外波高が 4.4m になる 25 日 22:00 には係留索の破断が生じ、外洋波浪が大きくなるにつれて、係留索の破断本数が増えている (表-5)。再現計算の破断係留索の場所と破断した時刻は実際の記録と似ており、動揺計算法の精度が確認されたといえる。

表-4 長周期波による再現計算結果 (動揺量)

長周期波		日時 (2002年11月)			
		25日22時	26日00時	26日02時	26日04時
SURGE	最大値(m)	3.60	3.67	4.78	6.32
	最小値(m)	-2.43	-2.61	-3.84	-5.33
SWAY	最大値(m)	0.14	0.24	0.41	0.69
	最小値(m)	-1.21	-1.29	-2.46	-4.17

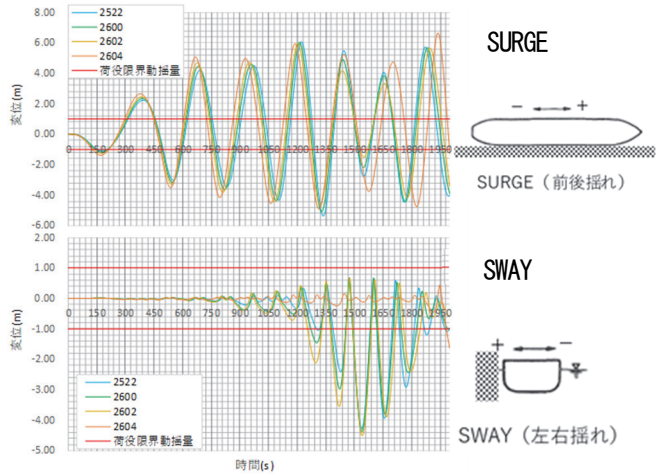


表-5 長周期波による再現計算結果 (係留索応力最大値)

係留索位置	係留索種類	再現計算結果 (最大張力:kN/本)				切断本数 実績
		日時 (2002年11月)				
		25日22時	26日00時	26日02時	26日04時	
スターライン	ナイロン	54.2	55.3	73.7	109.1	1本/6
プレストライン	ナイロン	84.4	87.5	153.0	776.9	1本/1
スプリングライン	ポリプロピレン	384.3	<b>765.2</b>	<b>869.1</b>	<b>1653.7</b>	② 1本/2
スプリングライン	ポリプロピレン	<b>516.6</b>	<b>535.4</b>	<b>656.9</b>	<b>1364.4</b>	① 1本/2
プレストライン	ナイロン	264.3	287.5	601.6	<b>1844.5</b>	③ 2本/2
パウライン	ナイロン	18.7	23.1	35.4	55.0	1本/6

※赤字は係留索の切断荷重を超えたもの

## 6. 東港地区 船体動揺シミュレーション

### 6.1 東港地区における検討条件の設定

#### (1) 検討対象岸壁

検討対象岸壁 (東港地区岸壁) を図-11 に示す。

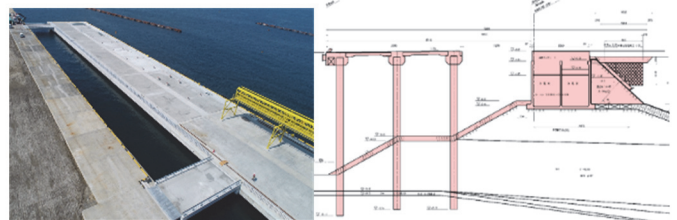


図-11 東港地区岸壁(-18m) (耐震), 東港地区護岸

#### (2) 検討対象船舶

検討対象船舶は、ケーブサイズ: 180,000DWT とパナマックス: 90,000DWT の2種類の石炭船を想定した。

表-6 対象船舶の代表寸法

載荷重量トン	垂線間長	型幅	型深さ	満載喫水	半載喫水
DWT	Lpp(m)	B(m)	D(m)	D(m)	D'(m)
90,000	238.5	38.1	23.9	14.7	11.3
180,000	293.4	46.2	29.8	18.2	14.1

(3) 波浪条件

7号岸壁で荷役障害が起きたときの港外波浪条件で東港岸壁前面における波浪を7号岸壁に用いた方法で算定した。

風波については、大きな違いはない。一方、長周期波については、7号岸壁で発生したような特定の周期帯のエネルギーが卓越している状況はなく港外入射波の条件とほとんど変わらない(図-12)。そのため、表-7に示す通り、全てのピークを抽出し、12個の不規則波の成分波に分解し入射波浪条件とした。

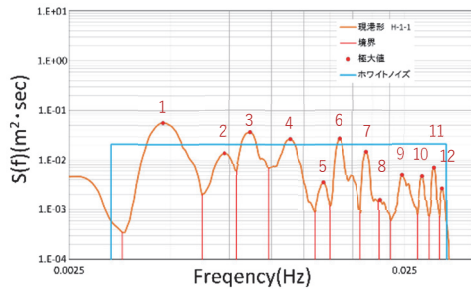


図-12 東港岸壁前面の周波数スペクトル計算結果と成分波分割(長周期波, 11/26 4:00)

表-7 東港岸壁前面の長周期成分波の諸元(船体動揺シミュレーション入力条件)

番号	片振幅(m)	周波数(Hz)	波高(m)	周期(s)	エネルギー比率(%)
1	0.031	0.0048	0.06	210.1	25.93
2	0.015	0.0073	0.03	137.7	5.93
3	0.025	0.0087	0.05	115.3	17.14
4	0.025	0.0114	0.05	87.6	17.75
5	0.008	0.0143	0.02	69.7	1.59
6	0.022	0.0160	0.04	62.5	13.43
7	0.015	0.0193	0.03	51.9	6.30
8	0.006	0.0212	0.01	47.2	0.95
9	0.013	0.0247	0.03	40.6	4.60
10	0.009	0.0283	0.02	35.4	2.45
11	0.011	0.0306	0.02	32.6	3.13
12	0.007	0.0324	0.01	30.9	1.18

6.2 船体動揺シミュレーション結果

再現計算で対象とした高波浪(長周期波)が来襲した場合、表-8及び図-13に示すように90,000DWTは係留索8本ではサージ、スウェイともに±1mを大きく超えている。しかし、係留索2本(プレストライン)増し取りすることにより、サージは±1m強、スウェイは57cm(4分の1)になることが分かった。

180,000DWTについては、サージは±1m程度、スウェイ1.2mと若干大きいのが、増し取りすることで、パナマックスと同様に小さくすることが期待できる。

係留索の応力については、破断強度には至らなかった。

表-8 長周期波による計算結果(動揺量)

長周期波	船型			
	90,000DWT	90,000DWT	180000DWT	
係留索数	8本	10本	8本	
SURGE	最大値(m)	1.78	1.10	0.96
	最小値(m)	-1.63	-1.26	-1.13
SWAY	最大値(m)	0.02	0.03	0.01
	最小値(m)	-1.91	-0.57	-1.20

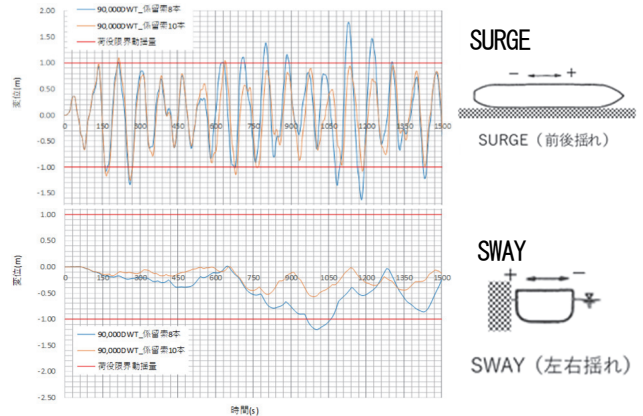


図-13 長周期波による計算結果(動揺量)

表-9 長周期波による計算結果(係留索の応力の最大値)

係留索番号	係留索種	船型	90,000DWT		
			係留索8本		係留索10本
			最大値(kN)	最大値(kN)	最大値(kN)
R-1	ポリプロピレン	最大値(kN)	23.3	14.0	23.5
R-2	ポリプロピレン	最大値(kN)	21.4	15.3	23.8
R-3	ポリプロピレン	最大値(kN)	25.5	18.3	30.9
R-4	ポリプロピレン	最大値(kN)	17.2	10.8	9.8
R-5	ポリプロピレン	最大値(kN)	14.5	10.5	11.7
R-6	ポリプロピレン	最大値(kN)	28.7	18.2	26.8
R-7	ポリプロピレン	最大値(kN)	23.3	14.9	24.8
R-8	ポリプロピレン	最大値(kN)	20.5	12.7	—
R-9	ポリプロピレン	最大値(kN)	—	12.1	—
R-10	ポリプロピレン	最大値(kN)	—	12.5	—

7. 過去事例との比較による評価

本検討は、過去に7号ふ頭で発生した障害が起きた時刻(2002年11月26日4時)の波浪を対象としたもので、このような高波浪の条件であっても、東港岸壁でパナマックス船が係留した際でもサージ±1m強、スウェイ50cm強と、荷役限界動揺量程度であること(図-13)、係留索応力が破断荷重には至らない(表-9)ことにより、荷役障害の可能性は低いと考えられる。

8. おわりに

本検討では、NOWPHAS 小名浜の時系列データ(2007年~2017年)の確定値を使用した。しかし、近年(2018~2019年)の速報値を見ると今回使用したデータにはない、南寄りの波の発生が見られ、波向Sの出現率が2.4%であった。今まで発生しなかった南寄りの波浪が発生すると小名浜港の地形では、風波でも港内への影響も考えられる。本検討は過去のデータを使用した検討であったが、今後予想される波浪の変化に留意する必要がある。

謝辞

本稿は、国土交通省東北地方整備局小名浜港湾事務所発注の「令和元年度 小名浜港船体動揺検討業務」の成果の一部をまとめたものである。関係各位には、記して厚くお申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤平和・白石悟・米山治男: コンテナ船およびフェリーの荷役許容動揺量の検討, 港湾空港技術研究所資料, No. 1055, 2003年9月
- 2) 国土交通省東北地方整備局小名浜港湾事務所: 令和元年度小名浜港船体動揺検討業務報告書, 令和2年3月