

# 荷役障害の継続時間を考慮した 港内係留船舶の荷役稼働率の評価と考察

EVALUATION ON THE WHARF OPERATION RATIO OF SHIPS  
MOORED TO QUAYWALL TAKING INTO ACCOUNT OF  
DURATION OF MOORING TROUBLES

白石悟<sup>1</sup>・中川大和<sup>2</sup>・松川彰太<sup>3</sup>・永井紀彦<sup>4</sup>・久高将信<sup>5</sup>・額田恭史<sup>6</sup>  
Satoru SHIRAISHI, Yamato NAKAGAWA, Syota MATSUKAWA,  
Toshihiko NAGAI, Masanobu KUDAKA and Yasushi NUKADA

<sup>1</sup>正会員 博(工) 北海道工業大学教授 空間創造学部 (〒006-8585 札幌市手稲区前田7-15-4-1)

<sup>2</sup>㈱高島テクノロジーセンター (研究時北海道工業大学) (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町3-13-7)

<sup>3</sup>札幌建設運送㈱ (研究時北海道工業大学) (〒003-0030 札幌市白石区流通センター5-6-43)

<sup>4</sup>フェロー 博(工) (独)港湾空港技術研究所 理事 (〒239-0026 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>5</sup>正会員 ㈱エコー 参与 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

<sup>6</sup>工修 ㈱エコー 海象解析課長 (同上)

This paper discusses the wharf operation ratio in a port by use of wave data obtained by Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HAaboutS (NOWPHAS). The observed interval of wave data was twenty minutes of every two hours due to the limitation of data transformation during about thirty years after starting the wave observation in 1970. In recent years, continuous wave data have been observed in the remarkable progress of information processing and communication technology. However, the effect on the wharf operation ratio depending on the difference of wave observation interval was not studied. This paper thus examines the differences of wharf operation ratio estimated when discontinuous or continuous data were applied, respectively taking into account of duration of mooring troubles.

**Key Words :** Wharf operation ratio, long period waves, moored ship, wave data, NOWPHAS

## 1. 概要

外洋から進入する波の影響で船舶の荷役が不可能となることがある。荷役が年間どの程度出来るかという指標として荷役稼働率があり、日本の港湾では原則として97.5%以上を目指している。長年にわたり港湾の波浪観測は2時間に1回の20分間のデータ取得がなされてきたが、通信および情報技術の進歩に伴いナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)において切れ目のない連続観測が実施されるようになってきた<sup>1)</sup>。白石ら<sup>2)</sup>は、切れ目のない連続観測に基づく通常波浪成分および長周期波成分に対する荷役稼働率の評価(定義1:全事象で評価, 定義2:荷役障害日数で評価)に関して検討を行い、従来の荷役稼働率との相違について考察している(以下, 前報と記述する)。前報では、長周期波成分については連続観測を行っていないことから、長周期波成分は通常波浪成分の連続観測記録を用いて回帰推定を行って求めているが、2. で述べるよう

に回帰推定には時間中心のずれがあったことから、本研究では、時間中心のずれを補正した解析を新たに行なった。また定義2による荷役稼働率では定義1に比べて荷役稼働率を小さく評価するが、これは1日に1回でも荷役障害事象が発生している場合に荷役障害日と判定していることによる。そこで、本研究では図-1のように長周期波高が長周期波に対する荷役限界波高を超える時間を荷役障害の継続時間と定義し、荷役障害の継続時間がある閾値を超えた場合を荷役障害日と定義し荷役稼働率の評価を行なった。

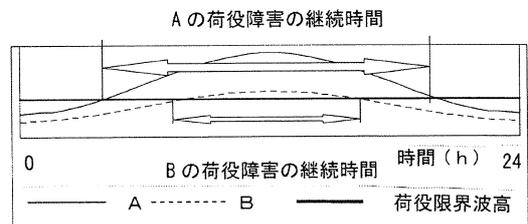


図-1 荷役障害の継続時間

## 2. 検討に用いたデータおよび荷役稼働率の定義

### (1) 検討に用いたデータ

検討に用いた記録はナウファス観測地点である石狩湾新港と石巻港の2005年と2006年の観測記録である。

### (2) 検討に用いた観測記録の種別

#### a) 2時間毎観測

長周期波成分については新しい観測システムにおいても、従来と同様に2時間毎の観測となっており、通常波浪成分のような連続記録としてデータが取りまとめられていない。この観測データを「2時間毎」と表記する。長周期波波浪観測台帳ではデジタルフィルターを用いて5秒毎にサンプリングした長周期波の2時間の観測水位の時系列を用いて周波数スペクトルを求め、そのエネルギー密度から周波数帯別に、 $H_1$ : 30~60秒,  $H_2$ : 60~300秒,  $H_3$ : 300~600秒,  $H_4$ : 600秒以上の各周期区分ごとの有義波高が求められている。本研究では、長周期波マニュアル<sup>3)</sup>において、船体動揺に影響を及ぼす周期成分とされている周期30~300秒の範囲の長周期波高 $H_{30,300obs}$ について検討するものとし、 $H_1$ と $H_2$ の二乗平方和の平方根より長周期波高を求めている。

#### b) 連続観測 (連続1)

通常波浪成分の2時間毎の連続観測の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ と長周期波高 $H_{30,300obs}$ を用いて回帰推定を行ない、この回帰係数を用いて、通常波浪成分の連続観測記録より回帰式を用いて長周期波高を求め長周期波の連続観測記録 $H_{30,300est}$  (以後、連続1と表記)とした。本研究に用いた回帰式を式(1)~(4)に示す。

$$H_{30,300est} = a \times (H_{1/3})^2 + b \quad (1)$$

$$H_{30,300est} = a \times (H_{1/3}^2 \cdot T_{1/3}) + b \quad (2)$$

$$H_{30,300est} = a \times (H_{1/3} \cdot T_{1/3}) + b \quad (3)$$

$$H_{30,300est} = a \times (H_{1/3})^b \times (T_{1/3})^c \quad (4)$$

ここに、

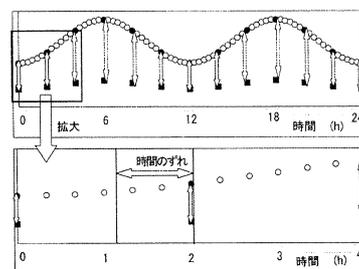
$H_{30,300est}$ : 波周期範囲30~300秒で回帰推定した長周期波有義波高(m)

$H_{1/3}$ : 有義波高(m)

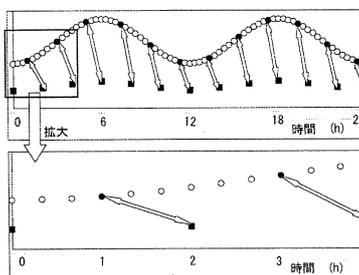
$T_{1/3}$ : 有義波周期(s)

式(1)~(4)を用いて重回帰分析を行ったところ、式(3)が最も重相関係数 $R$ が大きかったことから、以下の検討ではこれを用いることとした。また、前報では回帰分析においては、例えば2:00の有義波高 $H_{1/3}$ と同時刻の長周期波波高 $H_{30,300obs}$ を対応させていたが図-2(1)に示すように、通常波浪成分(図中の○)および●が直前20分の統計(例えば2:00の記録は

1:50~2:10の20分間の記録であって時間中心は2:00)であるのに対し、長周期波成分(図中の■)は直前2時間の統計(例えば2:00の記録は0:10~2:10の120分間の記録であって時間中心は1:10)であるため、通常波浪成分(○)と長周期波成分(■)では両者の観測データの時間中心を比べると50分の時間中心のずれがあった。そこで、本研究は、時間中心のずれを補正するため、図-1(2)に示すように1:00の有義波高 $H_{1/3}$ (時間中心1:00)と2:00の長周期波波高 $H_{30,300obs}$ (時間中心1:10)を対応させて回帰推定を行った。



(1) 時間中心のずれを補正しない回帰分析



(2) 時間中心のずれを補正した回帰分析

図-2 回帰分析の際のデータ比較の方法

表-1には式(3)の回帰係数 $a$ 、 $b$ と重相関係数 $R$ を港湾および年ごとおよび時間中心のずれの補正の有無別に示す。石狩湾新港の重相関係数は総じて石巻港の重相関係数より高い値を示した。また、時間中心のずれを補正した計算結果は2006年石巻港を除き重相関係数が大きくなっている。

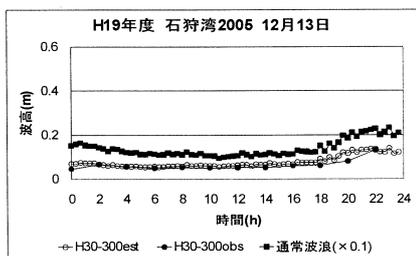
表-1 回帰式(式(3))の係数

港湾名	年	a	b	R	時間のずれ
石狩湾新港	2005	0.0058	0.0180	0.929	補正せず
		0.0059	0.0176	0.946	補正
	2006	0.0056	0.0201	0.938	補正せず
		0.0056	0.0198	0.946	補正
石巻港	2005	0.0057	0.0287	0.778	補正せず
		0.0058	0.0282	0.788	補正
	2006	0.0078	0.0176	0.836	補正せず
		0.0079	0.0172	0.826	補正

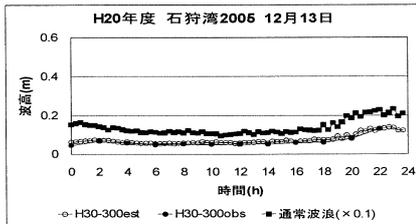
図-3は2005年12月13日の石狩湾新港の長周期波高の経時変化を示している。図中の●は長周期波高

$H_{30,300obs}$  を、○は回帰推定より求めた連続1による長周期波高  $H_{30,300est}$  を示す。また、■は参考のため通常波浪成分の有義波高  $H_{1/3}$  を1/10倍して表示している。連続1による長周期波高  $H_{30,300est}$  は  $H_{30,300obs}$  と(1)(2)のいずれについてもほぼ一致しているが、長周期波高が増大過程にある20:00においては、(2)の時間中心のずれを補正した解析の方がよく一致していることがわかる。

図-4 は、2005年12月11日の石狩湾新港の長周期波高の経時変化を示している。図中の表記は図-3と同じである。長周期波高が大きな場合 ( $H_{30,300obs} > 0.4m$ ) には、 $H_{30,300est}$  と  $H_{30,300obs}$  の相違が大きい。相違の原因は前報でも述べたように自由進行長周期波の影響と思われる。しかしながら長周期波高が増大している6:00においては(2)の時間中心のずれを補正した解析の方が(1)の補正しない解析よりも  $H_{30,300est}$  と  $H_{30,300obs}$  が一致する傾向が見られ、回帰推定の精度が向上していることがわかる。

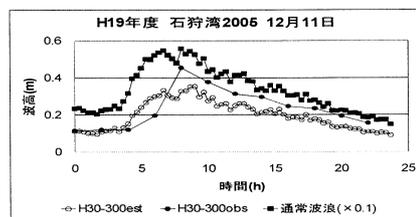


(1) 時間中心のずれを補正しない

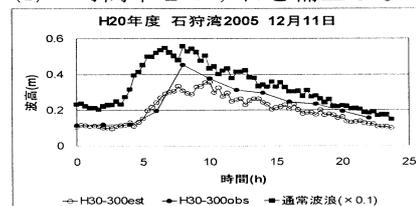


(2) 時間中心のずれを補正

図-3 2時間毎と連続1の比較  
(石狩湾新港 2005年12月13日)



(1) 時間中心のずれを補正しない



(2) 時間中心のずれを補正

図-4 2時間毎と連続1の比較  
(石狩湾新港 2005年12月11日)

### c) 連続観測 (連続2)

20分間隔の連続観測データでは周波数帯別波浪帳に周期32秒以上成分の長周期波有義波高  $H_{32-obs}$  (以後、連続2と表記) が整理されていることからこれを用いた解析も行なった。連続1 ( $H_{30,300obs}$ ) と連続2 ( $H_{32-obs}$ ) の関係は前報で示しており、2港のうち石狩湾新港では両者の波高の相違が大きい事例がみられる。連続2のデータの使用においては、観測時間が20分間であることから、長周期波成分は観測時間中に数波しか含まれないため精度的な問題があることに留意する必要がある。

### d) 連続観測 (連続3)

ナウファスでは①で述べたように5秒ごとの2時間の長周期波ファイル(データ数1440個)から周波数スペクトル解析を行ない、周波数帯別の長周期波高を求めている。この通常保管されている長周期波ファイルのデータを20分ずつずらしてスペクトル解析することによって20分毎の長周期波高を求めることも可能である。こうしたデータ処理は計算処理のロードがかかることから現状では実施されていない。本研究では、長周期波の短時間における変動特性を確認するために以下の日について解析を試みた。これを以降、「連続3」と表記する。

i) 石狩湾新港 2005年12月9日~13日

ii) 石巻港 2006年10月5日~9日

### e) 連続観測の比較

図-5 および図-6 は連続1による長周期波高(実線)、連続2による長周期波高  $H_{32-obs}$  ( $\Delta$ )、連続3による長周期波高  $H_{30,300obs}$  ( $\bullet$ ) を比較したものである。また、Bower<sup>4)</sup>による提案式(5)で推定される長周期波高  $H_s$  を求めて点線で図示した。

$$H_s = 0.074 H_{1/3}^2 T_p^2 / h^2 \quad (5)$$

ここに、

$T_p$ : スペクトルのピーク周期(s),  $T_p = 1.05 T_{1/3}$

$h$ : 水深(m) (石狩湾新港:  $h = 21.3m$ , 石巻港:  $h = 20.8m$ ) である。

連続2による長周期波高はデータのばらつきが大きく安定していない場合がある。これは観測時間が20分間で長周期波のデータ解析としては短いことが原因である。これに対して連続3では長周期波高がピーク値を示す時間帯を除けば時間的な推移は安定している。

連続1は石狩湾新港の場合には、12月11日の波高がピークを示す時間においては連続3に比べて過小評価になっているが、その他の時間帯ではほぼ一致している。石巻港の場合には10月5日~6日の長周期波高の発達過程においては、連続1と連続3とおおむね一致しているが、10月7日の長周期波高がピークを示す時間帯、7日~8日の長周期波高の減衰過程においては相違が大きい。これは、図の点線に示すように式(5)で計算される非線形拘束波成分が実測の長周期波高に比べて小さく、長周期波

が十分発達した後は自由進行長周期波の影響が大きいことによる。

図-7 は石巻港においてより長周期波高が小さな事例について、連続1による長周期波高（実線）、連続2による長周期波高  $H_{32-obs}$  ( $\Delta$ ) を比較したものである。この図では2時間毎観測の長周期波高  $H_{30,300obs}$  を●で示している。この例では、連続1による長周期波高は、連続2による長周期波高とおおむね一致している。ただし、非線形拘束波成分が小さいことは図-6 と同様である。

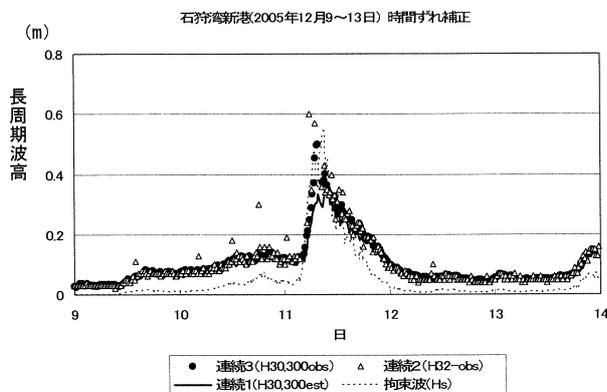


図-5 観測記録の比較  
(石狩湾新港, 2005年12月9~13日)

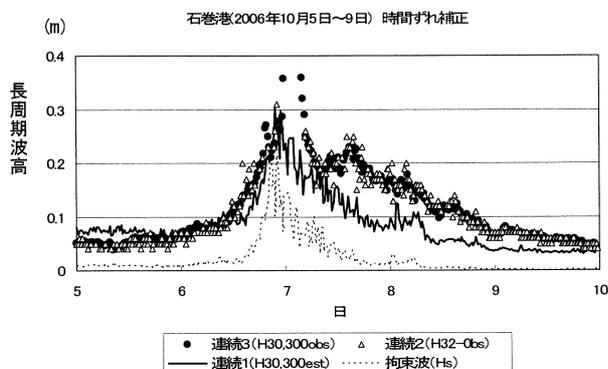


図-6 観測記録の比較  
(石巻港, 2006年10月5~9日)

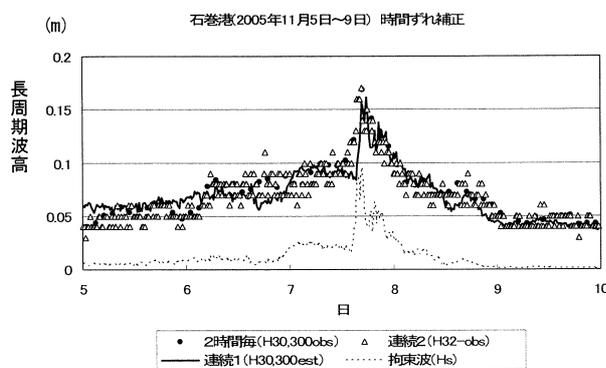


図-7 観測記録の比較  
(石巻港, 2005年11月5~9日)

### (3) 荷役稼働率の定義

荷役稼働率の定義は以下の2通りとした。

定義1 :

$$\text{荷役稼働率 (\%)} = (1 - \text{荷役障害事象の数} / \text{全事象の数}) \times 100 \quad (6)$$

定義2 :

$$\text{荷役稼働率 (\%)} = (1 - \text{荷役障害日数} / 365) \times 100 \quad (7)$$

式(6)において前報では「荷役不可能事象の数」と記述していたものを「荷役障害事象の数」に、同じく式(7)において「荷役不可能日の数」としていたものを「荷役障害日数」に表現を変更しているが、定義そのものは変えていない。港湾計画では定義1を用いて荷役稼働率を求めるのが一般的であるが、現地ベースでの荷役管理では定義2による荷役稼働率を用いるのが運用実態をより適切に表すことができる。前報では、荷役障害日とは荷役障害事象が一日のうち1度以上発生している日と定義した。すなわち、定義2では波浪観測記録中で1回でも荷役障害事象が発生する場合（観測波高>荷役限界波高）を荷役障害日と判定して荷役稼働率を計算していた。すなわち荷役障害事象と判定する継続時間は連続観測では20分、2時間毎観測では、120分としていたことになる。本研究では荷役障害事象と判定する荷役障害の継続時間の閾値を変化させて荷役稼働率を計算することとした。荷役障害と判定すべき波浪の継続時間の閾値は、船種や荷役方式、船舶の係留時間など荷役状況によって異なると考えられるが、現状では明確になっていない。そこで、本研究では、波浪の継続時間の閾値を20~120分と変化させて荷役稼働率への影響を検討する。

### 3. 荷役障害事象の継続時間

荷役障害となる長周期波の日別の発生時間や継続時間の分布を調べた。表-2 は定義2による荷役障害日数を港湾別、年別、荷役限界長周期波高別に調べたものである。ただし、この場合は荷役限界波高を1日1回でも超えると荷役障害日と判定していることから荷役障害事象と判断する際の閾値は2時間毎観測では120分、連続観測では20分である。石狩湾新港、石巻港のいずれについても連続観測データを用いることにより荷役限界波高を上回る波高となっているかどうかの判定を行う回数が6倍に増えることから、荷役障害日数が増えることがわかる。また、荷役限界波高が大きな場合には荷役障害日数が激減する。

図-8 および図-9 は石狩湾新港および石巻港において2時間毎観測の長周期波成分の波高データを用いて荷役障害事象の継続回数を求めたものである。ただし、荷役限界波高は0.15mとしている。両港とも3回未満（6時間未満）の継続回数が多いが、

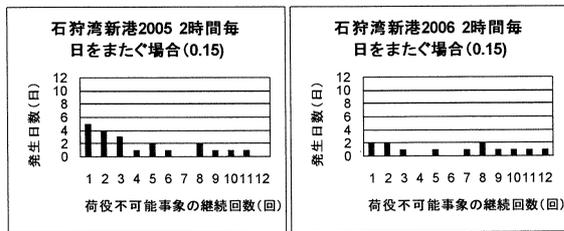
中には10回(20時間)を超える継続回数も見られる。

図-10および図-11は、連続1の記録を用いて荷役障害事象の継続回数ごとに発生日数の分布を求めたものである。連続観測ではデータの間隔が20分毎であるから継続回数/3が継続時間である。観測回数が2時間毎観測から連続観測へ6倍に増えることで、荷役障害事象の発生日数が増加していることがわかる。しかしながら、図より荷役障害事象の継続回数が6回以下、すなわち荷役障害の継続時間が2時間以下の事例が大半を占めることがわかる。すなわち、前報で述べた定義2による荷役稼働率が2時間毎観測と連続観測の波浪データによって異なる理由は、短時間の長周期波の増大のためである。

表-2 定義2による荷役障害日数

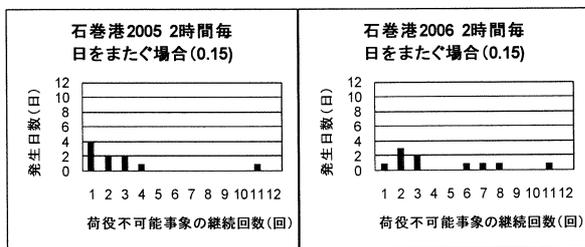
荷役限界波高(m)		0.1		0.15		0.2	
		2005	2006	2005	2006	2005	2006
石狩湾	①	66	55	29	25	8	11
	②	86	81	39	31	14	21
石巻	①	40	50	13	22	4	11
	②	49	94	30	49	21	36

①：2時間毎，②：連続1 (単位：日)



(1) 2005年 (2) 2006年

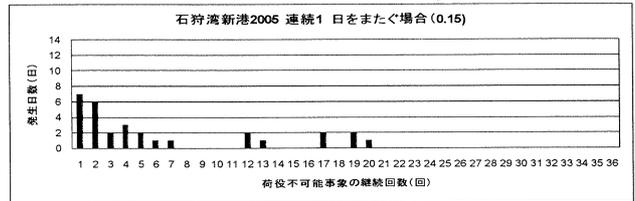
図-8 2時間毎観測による荷役障害事象の継続回数(石狩湾新港, 荷役限界波高0.15m)



(1) 2005年 (2) 2006年

図-9 2時間毎観測による荷役障害事象の継続回数(石巻港, 荷役限界波高0.15m)

表-3は荷役障害事象の平均継続時間を港湾別、年別、荷役限界波高別に示したものである。荷役障害事象の平均継続時間は、連続観測(連続1)の方が短くなっているが、図-10および図-11に示すように、連続観測を行うことで荷役障害事象の継続回数が6回未満の日数が大幅に増えるため、みかけ上の平均継続時間が短くなっていることによる。

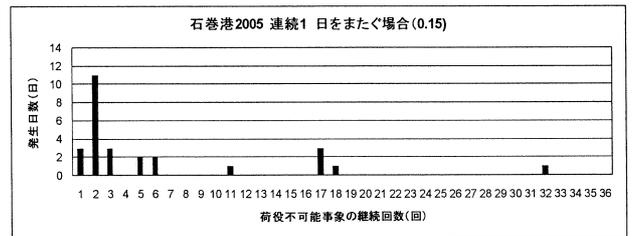


(1) 2005年

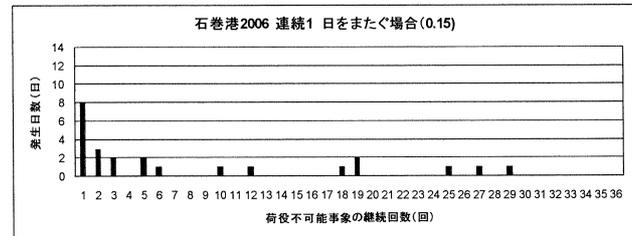


(2) 2006年

図-10 連続観測による荷役障害事象の継続回数(石狩湾新港, 荷役限界波高0.15m)



(1) 2005年



(2) 2006年

図-11 連続観測による荷役障害事象の継続回数(石巻港, 荷役限界波高0.15m)

表-3 荷役障害事象の平均継続時間

荷役限界波高(m)		0.1		0.15		0.2	
		2005	2006	2005	2006	2005	2006
石狩湾	①	10.2	10.8	8.4	12.2	9.6	10.2
	②	2.8	2.4	1.9	2.1	2.6	2.6
石巻	①	8.8	8.8	5.8	9.0	6.6	10.8
	②	2.3	2.2	2.1	2.3	1.1	1.8

①：2時間毎，②：連続1 (単位：時間)

#### 4. 荷役障害の継続時間の閾値を考慮した荷役稼働率

荷役障害の継続時間の閾値を荷役可否を判定する際のパラメータとして用いて、定義2による荷役稼働率の変化を調べた。先にも述べたように荷役障害事象として判定すべき荷役障害の継続時間の閾値については、現在のところ明確になっていない。そこ

で、本研究では荷役障害の継続時間の閾値を 20 分～120 分とした。

図-12 は連続 1 のデータを用いた定義 2 による荷役稼働率 (図中の○) を港湾別、年別に荷役障害の継続時間の閾値を 20 分～120 分と変化させて求めた結果を示している。また、連続 2 (図中の●) を用いた解析は 2005 年のみ行なった。さらに、2 時間毎観測値を用いた荷役稼働率は継続時間の閾値 120 分としてプロットしている (図中の□)。荷役障害事象の継続時間の閾値を 120 分とする計算値は 2 時間毎観測を用いた荷役稼働率の計算値とおおむね一致することがわかる。

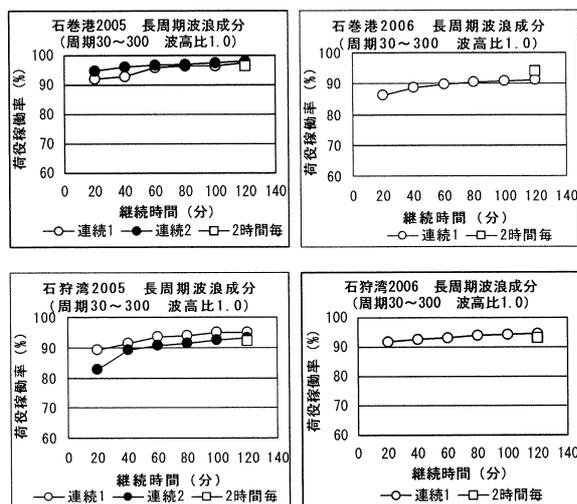


図-12 荷役障害事象の継続時間の閾値を考慮した荷役稼働率 (長周期波成分)

なお、本論文では長周期波成分に対する荷役稼働率に関して議論してきたが、荷役障害事象の継続時間の影響については通常波浪成分についても同様の取り扱いが可能である。

## 5. 結論

1) 長周期波の実測値  $H_{30,300obs}$  と長周期波の推定値  $H_{30,300est}$  の時間推移を調べた。低波浪時については時間中心のずれを補正して求めた  $H_{30,300est}$  は長周期波が大きくなる立ち上がり時の時間推移について、時間のずれを補正しない場合と比べて  $H_{30,300obs}$  と良い一致を示す。

2)  $H_{30,300obs} > 0.4m$  の高波浪時のときは、補正後においても回帰推定の精度があまり良くない。しかしながら立ち上がり時の推定結果は改善されていることがわかる。

3) 荷役障害事象の継続回数 (時間) を 2 時間毎、連続 1 のデータを用いて調べた。連続 1 では 6 回未満 (2 時間未満) のケースが多く、荷役障害となる長周期波高は比較的短時間で発生している事例が多いことがわかった。

4) 荷役障害の継続時間の閾値をパラメータに取り、荷役稼働率 (定義 2) の変化を調べた。荷役障害の継続時間の閾値を長くとり荷役可否の判定をすることによって荷役稼働率が上がっていき、荷役障害の継続時間の閾値を 120 分として求めた荷役稼働率は、従来、一般的に用いられている 2 時間毎観測のデータに基づく荷役稼働率の数値にほぼ近くなることがわかった。

## 6. 今後の課題

本研究は、ナウファスにおける波浪観測が連続観測に切り替わったことをふまえて港湾計画の指標として用いられている荷役稼働率への影響度を調べるとともに、より詳細な検討手法の確立を目指して取組みを開始した。従来から一般的に用いられている定義 1 に対する荷役稼働率への影響がほとんど無いことを前報で明らかにしている。より詳細なバース管理のための指標としての定義 2 による荷役稼働率については定義 1 による荷役稼働率との相違が大きく、本研究では、荷役障害の継続時間の閾値という概念を新たに取り入れるることにより、より詳細な検討法を提案した。今後の課題を以下に整理する。

### ① 船種・荷役方式別の荷役障害の継続時間の閾値

定義 2 による荷役稼働率の評価においては、荷役障害の継続時間の閾値という概念を新たに導入したが、これについての標準的な数値について明確になっていない。今後は船種、荷役方式別に現地における荷役実態を調査することによって明確にしておく必要がある。

### ② 長周期波高の連続観測の整備

長周期波の連続観測記録は定常観測における記録保管がなされていないため、本研究では、連続 3 という形で、一部の日時についてのみ解析している。論文中でも示しているように連続 2 の記録では、解析に用いる時間が短いことによるデータのばらつきが大きいという問題があること、回帰分析の結果より求める連続 1 では、長周期波高が大きくなる事象や減衰過程での自由進行長周期波の割合が大きくなる時間帯で精度が悪くなるという問題がある。今後は、長周期波についても連続的な波高の解析保管の実施が望まれる。

## 参考文献

- 1) 永井紀彦, 小川英明, 額田恭史, 久高将信: 波浪計ネットワークによる沖合津波観測システムの構築と運用, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp. 173-178, 2004.
- 2) 白石悟, 永井紀彦, 李在炯: 沿岸波浪の連続観測データを用いた港内係留船舶の荷役稼働率の評価と考察, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp. 993-998, 2008.
- 3) (財) 沿岸技術研究センター: 港内長周期波影響評価マニュアル, 沿岸技術ライブラリー NO. 21, 2004.
- 4) Bower, E.C.: Low Frequency Waves in Intermediate Water Depth, Proc. of 23th ICCE, Vol.1, pp.832-845, 1992.