

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

ESTIMATION ON THE WHARF OPERATION RATIO OF SHIPS MOORED TO
QUAYWALL BY USE OF CONTINUOUS OBSERVED WAVE DATA

白石 悟¹・永井 紀彦²・李在炯³

Satoru SHIRAIISHI, Toshihiko NAGAI and Jae Hyeng LEE

¹正会員 工博 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)

²フェロー会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 統括研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 前(財)沿岸技術研究センター 波浪情報部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

This paper discusses the wharf operation ratio in a port by use of wave data obtained by Nationwide Wave information network for Ports and Harbours (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 discussed. This paper thus examines the differences of wharf operation ratio estimated when discontinuous or continuous data were applied, respectively.

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

1. 概要

港湾では係留施設の整備検討を行う際に港内静穏度の評価を行い、港内での円滑な荷役を実施するために必要となる防波堤など外かく施設の整備水準を検討する。港内静穏度は従前は港内での波高の出現頻度に基づいて評価されていたが、係留船舶の動揺の影響をより詳細に考慮することが合理的なこと¹⁾から現在では係留船舶の動揺の影響を考慮した荷役稼働率で評価されるようになってきている。その際に用いる波浪の出現頻度表は、これまでは港外で観測された2時間に1回の20分間観測のデータに基づき作成されるのが一般的であった。しかしながら近年の通信および情報処理技術の進歩に伴い、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)において切れ目の無い連続観測が実施されるようになってきた²⁾。すなわち、これまでは2時間毎に20分間の波高、周期の統計値が1日12回整理されてきたのに対し、切れ目がない20分毎の統計値が1日72回整理されるようになった。しかしながら観測間隔が変更になった波浪情報について実務面での影響については十分に整理されていない面もある。そこで、本論文では、新しい観測間隔でのデータ取得が港湾計画や港湾での荷役管理へ及ぼす影響について検討すること

とした。具体的には、切れ目のない連続観測記録に基づいて通常波浪成分および長周期波成分に対する荷役稼働率を求め、従来の2時間に1度の観測間隔のデータより計算される荷役稼働率と比較し、その影響について考察することとした。

2. 検討に用いた波浪データについて

(1) 通常波浪成分

解析に用いたデータはナウファス観測地点である石狩湾新港、石巻港の2005年および2006年の波浪観測記録である。石狩湾新港では2004年11月4日より、石巻港では2001年12月20日より連続観測が開始されている。これらの連続観測記録で得られた20分毎の有義波高と有義波周期のデータを解析に用いた。

図-1は石狩湾新港における2005年1月7日の14:00~20:00までの通常波浪成分のデータの事例である。図には従来の2時間毎観測の有義波高(図中の●)と連続観測の有義波高(図中の○)の時間推移と荷役限界波高の港外波換算値を示している。本研究では通常波浪成分に対する荷役限界波高は後述するように「港内長周期波影響評価

マニュアル（以下、長周期波マニュアル³⁾」にしたがい、波向、波周期別に設定している。したがって、図中の荷役限界波高の港外波換算値が15:20に変化しているのは有義波周期が変化したためである。従来の2時間毎観測では、14時、16時、18時、20時の観測波高が荷役限界波高の港外波換算値を下回ることから14～20時の時間帯ではすべて荷役可能と判定される。一方、連続観測に基づいて荷役の可否を判定すると16:20～17:20の間に荷役不可能事象が発生すると判定される。

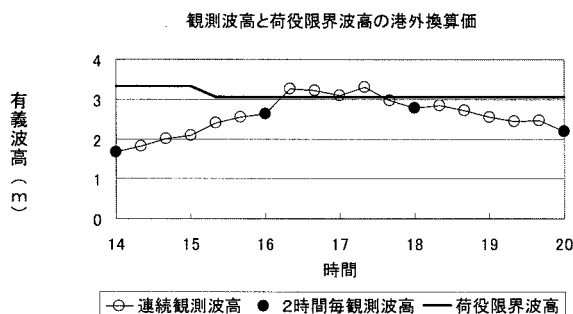


図-1 2時間毎観測と連続観測による港外の観測波高と荷役限界波高の港外波換算値の比較（石狩湾新港 2005年1月25日）

(2) 長周期波成分

長周期波成分については、ナウファスの長周期波浪観測台帳の周波数帯別の有義波高を用い周期30～300秒の成分の長周期波有義波高 $H_{30,300\text{obs}}$ と周期30～600秒の成分の長周期波有義波高 $H_{30,600\text{obs}}$ を荷役稼働率の評価に用いた。

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、 $H_{30,300\text{obs}}$ については H_1 と H_2 から、 $H_{30,600\text{obs}}$ については H_1 、 H_2 、 H_3 の二乗平方和の平方根より長周期波高を求めている（以後、2時間観測と表記）。なお長周期波マニュアルでは係留船舶の動揺に及ぼす成分として長周期波の周期範囲を30～300秒としているが、本研究ではやや周期範囲を広げた30～600秒についても検討することとした。

長周期波波浪観測台帳は通常波浪成分と異なり、現状でも2時間毎の間隔でデータが整理されているため通常波浪成分と同様な20分毎の荷役可否判定ができない。そこで回帰式(1)～(4)を用いて、通常波浪成分の連続観測の有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ とから回帰推定を行ない長周期波高を求め連続データとしたものを $H_{30,300\text{est}}$ 、 $H_{30,600\text{est}}$ として長周期波の連続観測波高記録（以後、連続1と表記）

とした。

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

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

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

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

ここに、

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

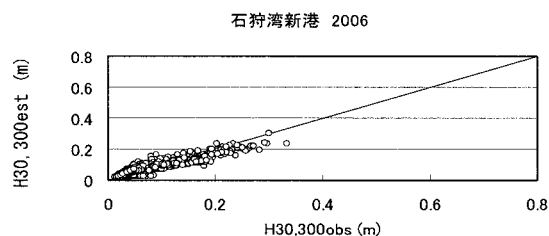
$H_{1/3}$: 有義波高(m)

$T_{1/3}$: 有義波周期(s)

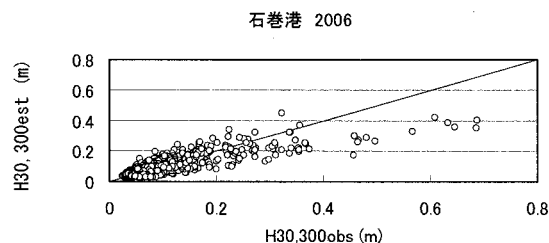
回帰式(1)～(4)を用いて重回帰分析を行ったところ、式(3)が最も重相関係数 R が大きかったことから、以下の検討ではこれを用いることとした。表-1には式(3)の回帰係数 a 、 b と重相関係数 R を港湾および年ごとに示す。石狩湾新港の重相関係数は総じて石巻港の重相関係数より高い値を示した。

表-1 回帰式の係数

港湾名	年	a	b	R
石狩湾新港	2005	0.00579	0.0180	0.929
	2006	0.00556	0.0201	0.938
石巻港	2005	0.00571	0.0287	0.778
	2006	0.00780	0.0176	0.836



(1) 石狩湾新港2006年



(2) 石巻港2006年

図-2 $H_{30,300\text{obs}}$ と $H_{30,300\text{est}}$ との関係

図-2は $H_{30,300\text{obs}}$ と $H_{30,300\text{est}}$ との関係を2006年のデータについて港湾別に示している。 $H_{30,300\text{obs}}$ が0.3mを超える場合に両者の相関は良くなく、 $H_{30,300\text{obs}}$ に対して $H_{30,300\text{est}}$ は過小評価となる。しかしながら長周期波に対して荷役可否のしきい値となると考えられる波高0.1～0.2mの領域では比較的良好な相関を示す。

図-3は式(5)に示されるBowerによる提案式⁴⁾で非線形拘束波として推定される長周期波波高 H_s を求めて $H_{30,300\text{obs}}$ に対する比 $H_s/H_{30,300\text{obs}}$ を求めて図示したものである。ただし、 $T_p=1.05T_{1/3}$ として計算した。

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

ここに、

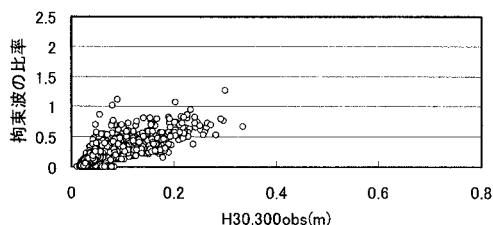
T_p : スペクトルのピーク周期(s)

h : 水深(m)

である。

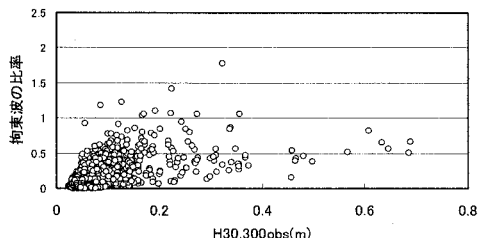
石狩湾新港では長周期波高が大きくなるにしたがい非線形拘束波成分の比が大きくなる傾向にあることがわかる。これに対して石巻港では、長周期波波高が大きくなっても非線形拘束波成分は0.5前後の比にしかならないことがわかる。これは、日本海側と太平洋側の海域特性の相違によるものと思われる。先に示した表-1の回帰式において石狩湾新港では重相関係数が大きかったのは長周期波成分のうち非線形拘束波成分が石巻港より大きかったためと考えられる。これに対して石巻港で自由進行長周期波成分の比率が大きいため回帰式の相関係数も低くなったと考えられる。

拘束波の比率 石狩湾新港2006



(1) 石狩湾新港2006年

拘束波の比率 石巻港2006



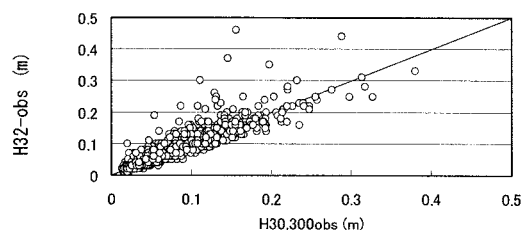
(2) 石巻港2006年

図-3 Bowerの式から求めた拘束波の比率

本研究では回帰式(3)を用いて有義波諸元から長周期波の連続観測データを作成したが、図-2に見られるように観測値との相違も見られる。そこで、20分間隔の連続観測データでは周波数帯別波浪台帳に周期32秒以上成分の長周期波有義波高 $H_{32-\text{obs}}$ (以後、連続2と表記)が整理されているこ

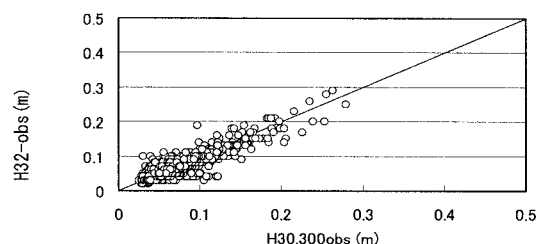
とからこれを用いた解析も行なった。図-4は石狩湾新港と石巻港について2005年のデータについて連続1 ($H_{30,300\text{obs}}$)と連続2 ($H_{32-\text{obs}}$)の関係を示したものである。2港のうち石狩湾新港では両者の波高の相違が大きい事例がみられる。連続2のデータの使用において留意しなければならないことは、観測時間が20分間であることから、長周期波成分は観測時間中に数波しか含まれないためやや精度的な問題があることである。

石狩湾新港 長周期波2005



(1) 石狩湾新港2005年

石巻港 長周期波2005



(2) 石巻港2005年

図-4 $H_{30,300\text{obs}}$ と $H_{32-\text{obs}}$ との関係

以上のようにして求められた長周期波成分の経時変化の例を図-5に示す。図は石狩湾新港2005年1月25日の記録を示し、△は式(3)で求めた $H_{30,300\text{est}}$ (連続1)を示す。また、○は $H_{32-\text{obs}}$ (連続2)を示す。●は2時間毎観測の $H_{30,300\text{obs}}$ である。この図より連続1と連続2は比較的良好に一致していることがわかる。これに対して●の2時間毎観測の数値は連続観測の○や△との相違が見られる。連続1と連続2は直前20分間の長周期波の代表値であるのに対して、2時間毎観測では直前2時間の波浪状態を表しているためであると思われる。

長周期波成分の経時変化
(石狩湾新港 2005年1月25日)

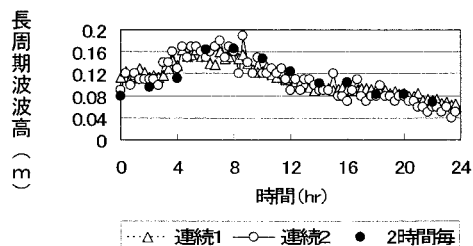


図-5 長周期波の経時変化の例
(石狩湾新港2005年1月25日)

3. 荷役稼働率の評価の方法

(1) 評価の基本方針

長周期波マニュアルでは、荷役稼働率の評価方法として標準解析法と詳細解析法が示されている。詳細解析法は係留船舶の動揺計算を行い、より詳しく荷役の可否を判定した上で荷役稼働率を求めるものであるが、本研究の目的が波浪データの観測間隔が荷役稼働率に及ぼす影響度を分析することであることから、標準解析法で検討を行なうこととし、マニュアルに標準的に示されている荷役限界波高を用いて荷役稼働率を計算する。

(2) 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：

荷役稼働率 (%) =

$$(1 - \text{荷役不可能事象の数} / \text{全事象の数}) \times 100 \quad (1)$$

定義2：

荷役稼働率 (%) =

$$(1 - \text{荷役不可能日の数} / 365) \times 100 \quad (2)$$

通常、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、現地バースでの荷役管理では定義2による稼働率評価が行われることもある。なお、本論文では、荷役不可能日とは荷役不可能事象が一日のうち1度以上発生している日と定義する。実際には荷役不可能事象の継続時間を考慮することがより現実的であると考えますが、船種や荷役方式、船舶の係留時間など荷役状

況によって変化するパラメーターであることから、本論文では一日1度以上発生した場合と定義する。

(3) 荷役限界波高

荷役稼働率の評価に用いた通常波浪成分に対する荷役限界波高を表-2に示す。この値は上田ら⁴⁾によって提案された数値を基に再整理されて長周期波マニュアルに示されているものである。また、長周期波成分に対する荷役限界波高を表-3に示す。

4. 荷役稼働率の評価と考察

(1) 評価の基本方針

荷役稼働率の評価においては通常波浪成分と長周期波成分について波浪変形計算を行い、港外波と港内波の波高比を求める必要がある。しかしながら本研究では、波浪観測の時間間隔や荷役稼働率の定義による荷役稼働率の相違についての感度分析を行うことを主眼としているので波浪変形計算を行わないこととする。港外の観測波と港内の対象バース前面の波高比は以下の数値を計算に用いた。

通常波浪成分 0.15, 0.20

長周期波成分 0.8, 1.0

(2) 通常波浪成分に対する荷役稼働率の評価

図-6、図-7は10000DWT一般貨物船を対象に定義1、定義2のそれぞれに対して荷役稼働率をバースの波向別に求めたものである。船舶に対する入射波の波向が大きくなるにつれて船舶のSwayおよびRollの動揺の影響が顕著となるため荷役稼働率が低下する。定義1では連続観測と2時間毎観測の荷役稼働率は、ほぼ一致しており波浪観測が連続観測に変更になった影響は荷役稼働率を評価する上でほとんど無いことがわかる。一方、定義2による荷役稼働率では定義1によるものに比べて低下することがわかる。

図-8は横軸に2時間毎観測記録を用いた荷役稼働率を、縦軸に連続観測記録を用いた荷役稼働率をとり両者の関係を示したものである。定義1の荷役稼働率（図中の●および▲）では連続観測と従来の2時間毎観測との違い、すなわち、波浪の観測間隔による相違が無いことがわかる。観測間隔が従来より密になって荷役限界波高を超える事象が増加しても同様に超えない事象も増加することから全観測事象に対する比率は大きく変化しないためと考えられる。一方、定義2による荷役稼働率（図中の○および△）は連続観測データを用いることにより数%の荷役稼働率の低下が見られる。これは図-1の事例で示したように従来の2時間毎観測では荷役不可能事象が発生していない日においても観測間隔が細かくなったことにより荷

表-2 一般貨物船の荷役限界波高（単位：m）

船型 (DWT)	波向 (°)	有義波周期 (s)					
		4	6	8	10	12	15
1000	15	0.50	0.35	0.25	0.20	0.20	0.20
	30	0.50	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20
	45	0.50	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20
	60	0.45	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
10000	15	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.40
	30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45	0.40
	45	0.50	0.50	0.50	0.45	0.35	0.25
	60	0.50	0.50	0.50	0.25	0.20	0.20
50000	15	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.35
	60	0.50	0.50	0.50	0.25	0.25	0.20

表-3 長周期波成分に対する荷役限界波高

船型 (DWT)	長周期波有義波高(m)
1,000	0.20
10,000	0.15
50,000	0.10

役不可能事象となる波高が観測され、そのために荷役不可能日と判定される日数が増加することによる。

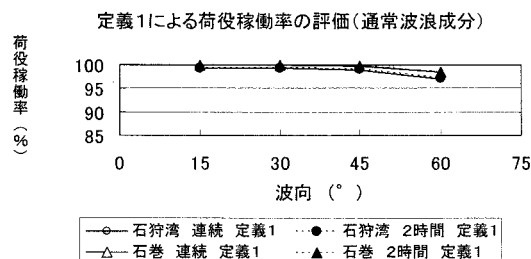


図-6 定義 1 による荷役稼働率
(通常波浪成分, 一般貨物船, 10000DWT,
2005年データを用いて解析, 波高比0.15)

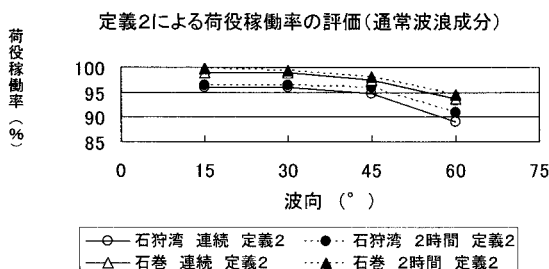


図-7 定義 2 による荷役稼働率
(通常波浪成分, 一般貨物船, 10000DWT,
2005年データを用いて解析, 波高比0.15)

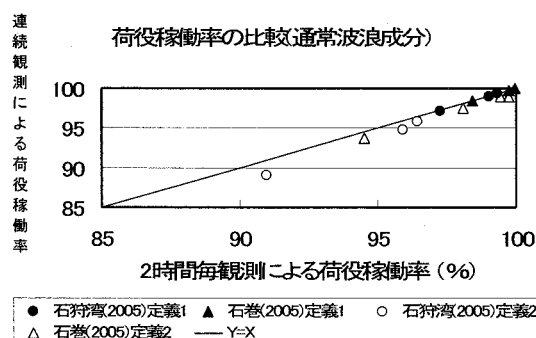


図-8 2 時間観測と連続観測による荷役稼働率の比較
(通常波浪成分, 2005 年データを用いて解析,
10,000DWT 一般貨物船, 波高比 0.15)

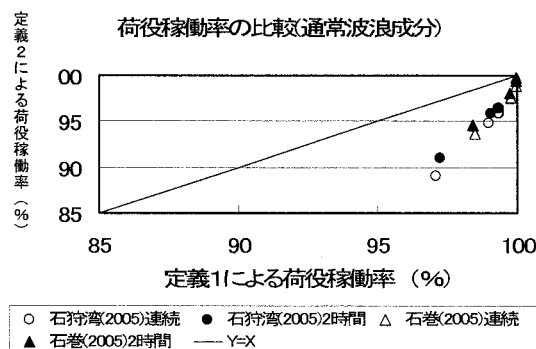


図-9 定義 1 と定義 2 による荷役稼働率の比較
(通常波成分, 2005 年データを用いて解析,
10,000DWT 一般貨物船, 波高比 0.15)

図-9 は横軸に定義 1 による荷役稼働率を、縦軸に定義 2 による荷役稼働率をとり両者の関係を示したものである。定義 2 による荷役稼働率は連続観測であっても 2 時間毎観測であっても定義 1 による荷役稼働率に比べて大幅に低下することがわかる。

(3) 長周期波成分に対する荷役稼働率の評価

図-10, 図-11 は長周期波に対する荷役稼働率を船型別に定義 1, 定義 2 のそれぞれについて示している。荷役限界波高は表-2 の数値を用いているため船型が大きい場合に荷役稼働率が低下する傾向にあり、定義 2 において低下の度合いが大きい。

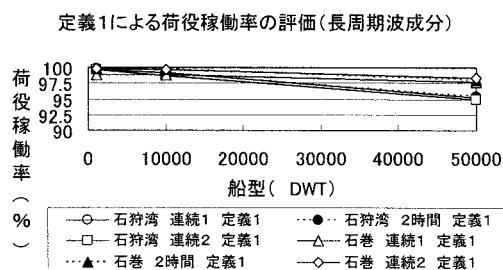


図-10 定義 1 による荷役稼働率
(長周期波成分, 2005年データを用いて解析, 一般貨物船, 波高比0.8)

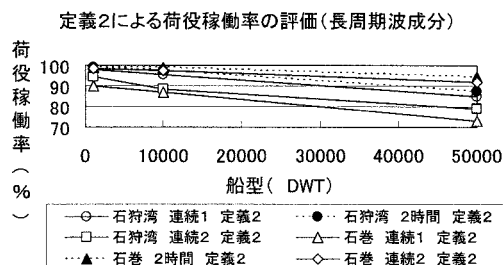


図-11 定義 2 による荷役稼働率
(長周期波成分, 2005年データを用いて解析, 一般貨物船, 波高比0.8)

図-12は長周期波記録を用い横軸に2時間毎観測記録を用いた荷役稼働率を、縦軸に連続観測記録(連続 1 および連続 2)を用いた荷役稼働率をとり両者の関係を示したものである。定義 1 の荷役稼働率では連続観測と従来の2時間観測との違い、すなわち、波浪の観測間隔による荷役稼働率の相違が非常に小さいことがわかる。その理由は通常波浪成分と同様と考えられる。一方、定義 2 による荷役稼働率では20分毎の観測データを用いて荷役稼働率を算定すると通常波浪成分以上に大きな稼働率の低下が見られる。

図-13 は長周期波について、横軸に定義 1 による荷役稼働率を、縦軸に定義 2 による荷役稼働率をとり両者の関係を示したものである。定義 2 による荷役稼働率は定義 1 による荷役稼働率よりも大きく低下する。

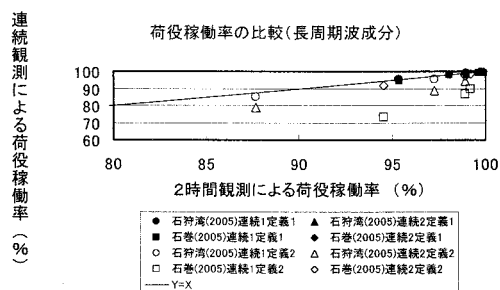


図-12 2時間観測と連続観測による荷役稼働率の比較
(長周期波成分, 2005年データを用いて解析,
一般貨物船, 波高比 0.8)

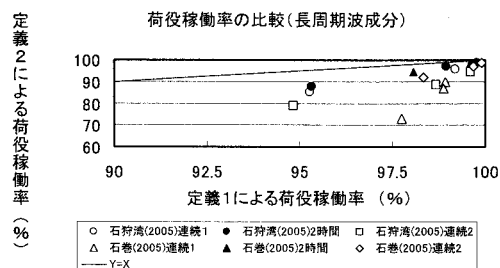


図-13 定義1と定義2による荷役稼働率の比較
(長周期波成分, 2005年データを用いて解析,
一般貨物船, 波高比 0.8)

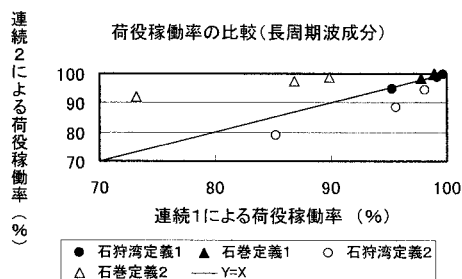


図-14 連続1と連続2による荷役稼働率の比較
(長周期波成分, 2005年データを用いて解析,
一般貨物船, 波高比 0.8)

図-14は長周期波について、横軸に連続1による荷役稼働率を、縦軸に連続2による荷役稼働率をとり両者の関係を示したものである。定義1による荷役稼働率はデータの違いによる影響が小さいが定義2による荷役稼働率では相違が大きい。連続1は回帰推定であることによる誤差、連続2は観測時間の短さによる誤差が含まれる。長周期波浪観測台帳では2時間毎にデータが記録保管されているが、これを20分ずつずらして長周期波に対しても連続観測データを得る方法もあるが、演算上の煩雑さが伴う。したがって長周期波連続観測データとして連続1もしくは連続2を用いるのが実用的と考える。なお、従来から港湾計画に用いている定義1の荷役稼働率については波浪データ毎の相違が少ない。一方、バース管理等に用いる定義2の荷役稼働率を用いる場合については用いるデータによる相違が大きかったことから更に検討が必要と考える。

5. 結論

- 1) 通常波浪成分, 長周期波成分について, 定義1による荷役稼働率は, 従来の2時間毎観測と連続観測による差異が小さい。したがって波浪の出現頻度表はどちらを用いて作成してもよい。
- 2) 通常波浪成分について, 定義2による荷役稼働率は, 定義1による荷役稼働率よりも低下する。また, 2時間毎観測と連続観測による荷役稼働率には数%の差異が見られる。
- 3) 長周期波成分について, 定義2による荷役稼働率は, 定義1による荷役稼働率よりも低下し, 特に荷役限界波高の小さい 50,000DWT 船舶の荷役稼働率の低下が大きい。また, 長周期波においては連続観測データを用いたときに荷役稼働率の低下が大きい。

6. 今後の課題

本論文では石狩湾新港と石巻港で観測された連続観測記録を用いて荷役稼働率の評価方法について考察した。ここで行った解析は両港での港湾形状や波浪変形特性を考慮したものではないので両港での実測波浪観測記録を用いているが荷役稼働率の実態とは異なる。今後は連続観測記録と港湾における荷役障害の実態とを照合させながらより詳細な荷役稼働率の評価を行うとともに荷役管理への適用を検討していくが必要になる。また、本研究では定義2では一日の中で20分間でも荷役不可能事象に相当する波高が出現したときに荷役不可能日と判定しているが、荷役不可能事象の継続時間を考慮した検討も必要と思われる。

謝辞：本研究の実施においては、北海道工業大学 平成18年度卒業生藤井輝大君、柏崎聖君、平成19年度卒業生小林亮典君、佐藤秀俊君の協力を得ている。以上4君の協力に謝意を表する。

参考文献

- 1) 上田茂, 白石悟, 大島弘之, 浅野恒平: 係岸船舶の動揺に基づく荷役許容波高の提案および稼働率, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.916~920, 1994.
- 2) 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.
- 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N0.21, 2004.
- 4) Bower, E.C.: Low Frequency Waves in Intermediate Water Depth, *Proc. of 23th ICCE*, Vol.1, pp.832-845, 1992.
- 5) 上田茂, 白石悟, 大島弘之, 浅野恒平: 係岸船舶の動揺に基づく荷役許容波高の提案および稼働率, 港湾技術研究所資料, No. 779, p. 64, 1994.