

コンテナ船およびフェリーの 荷役許容動揺量の解析

ANALYSIS OF THE ALLOWABLE SHIP MOTIONS FOR CONTAINER SHIPS AND FERRIES

佐藤平和¹・白石 悟²・米山治男³

Hirakazu SATOH, Satoru SHIRAIISHI and Haruo YONEYAMA

¹非会員 工修 国土交通省関東地方整備局 (〒231-8436 神奈川県横浜市中区北仲通5-57)

²正会員 工博 財団法人沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

³正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

This paper discusses ship motions moored at a quay wall as the harbour calmness index. Cargo handling at a wharf may occasionally be interrupted and/or suspended if ship motions exceed the allowable ones. The wharf operation efficiency, then, should be defined based on the allowable ship motions for cargo handling in terms of the type and size of a ship and cargo handling equipment.

In this study, we investigated instances of interruption and suspension of cargo handling due to ship motions for container ships and ferries. We then estimated the allowable ship motions for container ships and ferries through executing numerical simulations for each instance of interruption and suspension of cargo handling. We also evaluated and revised the estimated values respecting opinions of cargo handling operators, and finally proposed the allowable ship motions for container ships and ferries.

Key Words : Allowable ship motions, Container ship, Ferry, Calmness index, Cargo handling, Wharf operation efficiency

1. まえがき

本研究では港内の静穏度の指標としての係留船舶の動揺に着目して論じる。係留船舶が荷役の許容動揺量を超えて動揺する場合には、荷役が中断または延期されることがある。したがって、港湾荷役の稼働率は荷役可能な船舶の動揺量に基づき、船種、船型、および荷役の方法にしたがって定義されなければならない。

本研究においては、係留船舶の動揺が原因となって荷役に支障をきたした事例を調査する。また、個々の事例について数値シミュレーションを行って係留船舶の許容動揺量の暫定値を求める。この許容動揺量の暫定値について港湾荷役関係者に意見照会を行う。そして、それらの結果に基づいて修正して得た荷役許容動揺量を提案する。

本研究において検討する荷役許容動揺量の考え方はP. Burrn^{1), 2)}によって提案されたもので、我が国では上田・白石³⁾が、国内における荷役障害事例に基づいて一般貨物船、穀物運搬船、鉱石運搬船、タンカー(内航および外航)について示している。また、PIANC(国際航路会議)のWG⁴⁾でも既往の調査を

まとめて数値を提案している。しかしながら、荷役許容動揺量に及ぼす長周期波の影響が十分に考慮されておらず、またコンテナ船・フェリーに対する調査が我が国では実施されていないなどの課題があると思われるので、本研究では新たに調査を行うこととした。

2. 研究内容

本研究では、荷役障害が頻繁に発生していると思われる港湾を対象にアンケート票を送付し、荷役障害発生事例を収集し、得られた荷役障害発生事例を基に長周期波の影響を考慮した係留船舶の動揺の数値シミュレーションを行う。これらの動揺量を統計処理および既往の研究成果との比較・検証を行い、コンテナ船およびフェリーの荷役許容動揺量の暫定値を提案する。

次に、提案した荷役許容動揺量の暫定値について全国の荷役業者にアンケート調査を行い、そのアンケート調査結果を基に暫定値を修正して、荷役許容動揺量を提案する。

図-1に荷役許容動揺量の検討のフローを示す。

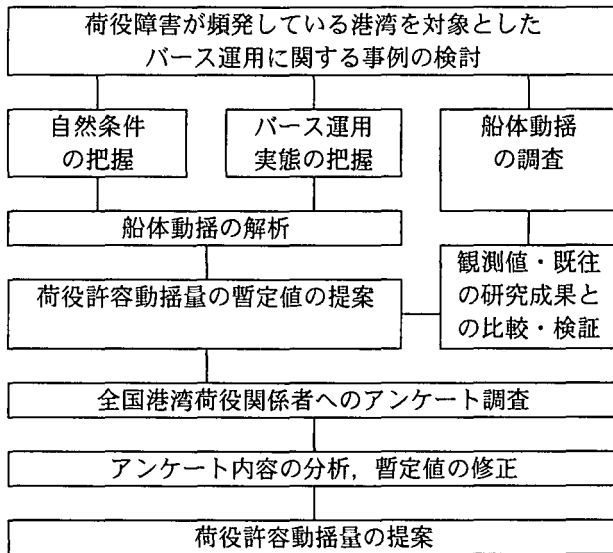


図-1 荷役許容動揺量の検討フロー

3. 荷役許容動揺量の暫定値

荷役障害発生事例のアンケートは、荷役障害が頻繁に発生していると思われるA港、SA港、T港、H港およびSI港を対象とした。なお、荷役障害発生事例の調査対象期間は港湾によっても異なるが、おおむね1997年以降としている。

アンケート調査票の質問項目は全部で2項目である。質問1は荷役障害発生状況に関する質問であり、調査対象期間における荷役障害の発生件数、発生年月日時、発生バース、船種およびサイズ、荷役障害発生当時の波浪および被害状況について記述される。質問2は質問1に対するさらに詳細なバース運用状況に関する質問であり、ここでは、当該船舶の諸元、港外到着時から荷役障害発生、出港までの年月日時、荷役作業内容、波浪および風条件、荷役障害発生時の船体動揺状況および係留系について記述される。

収集した荷役障害発生事例はコンテナ船ではA港、SA港およびH港の25件、フェリーではT港およびSI港の79件の合計104件である。

次に、得られた荷役障害事例ごとに係留船舶の動揺数値シミュレーション^{5), 6)}を実施した。ここに、計算条件は荷役障害発生時の自然条件およびバース運用状況報告を参考に設定するものとし、波浪は全国港湾海洋波浪観測網(NOWPHAS)による港外有義波高に、当該港湾における静穏度計算によって求めたバース前面における波高比を乗じ港内有義波高とする。ただし、一部港湾においては港内における目視波高を用いている。また、長周期波による船体動揺を考慮するため、波の周波数スペクトルとして平石の簡易式⁷⁾を用いている。

a) コンテナ船の荷役許容動揺量の暫定値

図-2および図-3は数値シミュレーションにより求めたコンテナ船の最大動揺量の動揺成分別累積頻度

分布を示す。

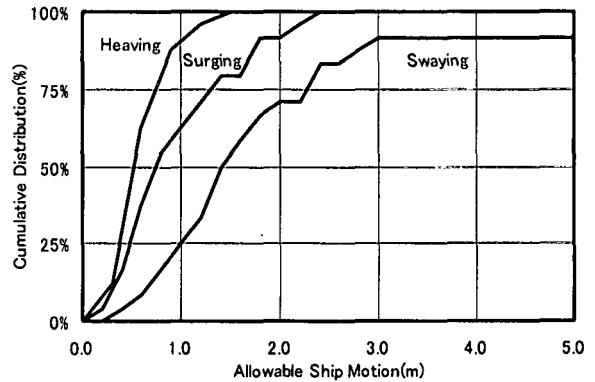


図-2 コンテナ船の最大動揺量の累積頻度分布(サージング, スウェイグ, ヒーピング成分)

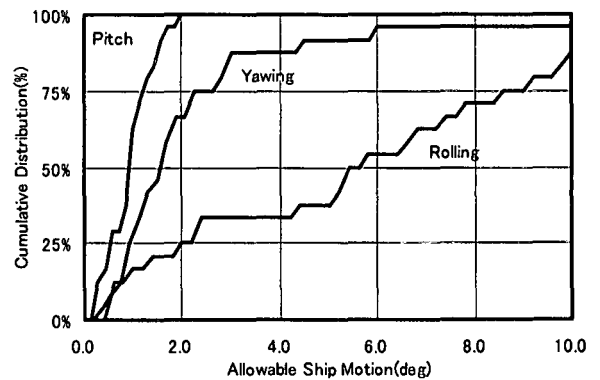


図-3 コンテナ船の最大動揺量の累積頻度分布(ローリング, ピッチング, ヨウイング成分)

サージングについては、PIANCの荷役効率50%値と100%値の中間の値となった。これは実際には、外洋の港湾でうねりや長周期波が作用する場合には、荷役効率は100%よりも小さくなっていると考えられることから、得られた数値は概ねPIANCの提案値と同等であると考えられる。

スウェイグについては、PIANCの提案値よりも大きな数値が得られた。これは一部に船体が大きく離れてタグボートで押し付けて荷役が実施されていた事例が含まれているためであり、実際にはこれよりも小さな数値が荷役許容動揺量であると考えられる。また、同様のことはヨウイングにも言える。

ローリングはPIANCの提案値よりもかなり大きな値となっている。これは調査対象船舶のGM値が不明であったために、動揺シミュレーションの設定値は既往のデータ⁸⁾を参考に設定しているが、実際よりもやや小さなGM値を用いて動揺シミュレーションを実施したことに起因していると考えられる。

表-1は図-2および図-3に示す累積頻度分布の50%値より得られたコンテナ船荷役許容動揺量の暫定値を示す。なお、表中の数値の±は動揺の片振幅を、スウェイグの+は係船岸から離れる側の動揺量を示す。また、表にはPIANCの提案値を併記している。

表-1 コンテナ船の荷役許容動揺量の暫定値

| | コンテナ船 | | PIANC-WG | |
|----------|---------|---------|----------|---------|
| | 50%効率 | 100%効率 | 50%効率 | 100%効率 |
| Surging | ±1.0m | ±0.5m | ±1.0m | ±0.5m |
| Swaying | +1.5 | +0.8 | +1.2 | +0.6 |
| Heaving | ±0.6 | ±0.4 | ±0.6 | ±0.4 |
| Rolling | ±5.0deg | ±2.5deg | ±3.0deg | ±1.5deg |
| Pitching | ±1.0 | ±0.5 | ±1.0 | ±0.5 |
| Yawing | ±1.5 | ±0.8 | ±0.75 | ±0.5 |

てもPIANCの提案値よりも小さく、調査対象とした範囲の中では荷役障害の要因となっていないと考えられる。ここで、図の()中は港湾名を示す。

b) フェリーの荷役許容動揺量の暫定値

図-4および図-5はフェリーの最大動揺量の動揺成分別累積頻度分布を示す。

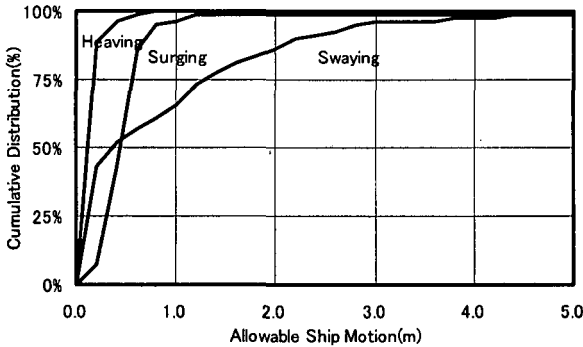


図-4 フェリーの最大動揺量の累積頻度分布 (サージング, スウェイング, ヒービング成分)

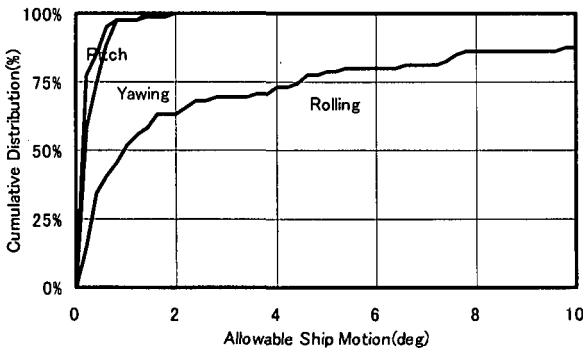


図-5 フェリーの最大動揺量の累積頻度分布 (ローリング, ピッチング, ヨウイング成分)

得られた2港のデータを取りまとめた計算結果によると、サージングはPIANCの提案値よりもやや大きく、ローリングはPIANCの提案値とほぼ同等である。これに対してスウェイング、ヒービング、ピッチング、ヨウイングについてはPIANCの提案値よりもかなり小さい。これは、それぞれの港湾で荷役障害の原因となる動揺成分が異なることによるものと考えられ、T港、SI港の数値を両方加算して評価するよりも、それぞれの港湾における荷役障害の主たる動揺成分を考慮した上で荷役許容動揺量を定めるのがより適切と思われる。

上述の観点からデータを見直した結果を図-6および図-7に示す。なお、ヒープはいずれの場合につい

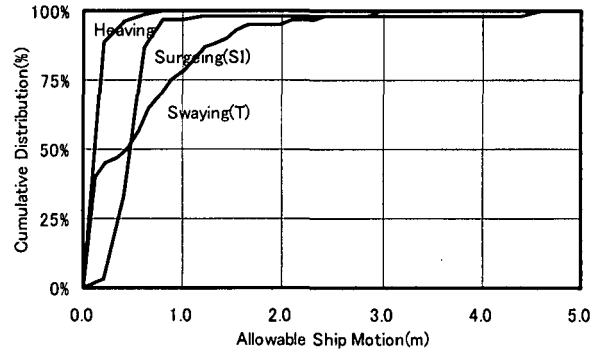


図-6 フェリーの最大動揺量の累積頻度分布 (サージング, スウェイング, ヒービング成分)

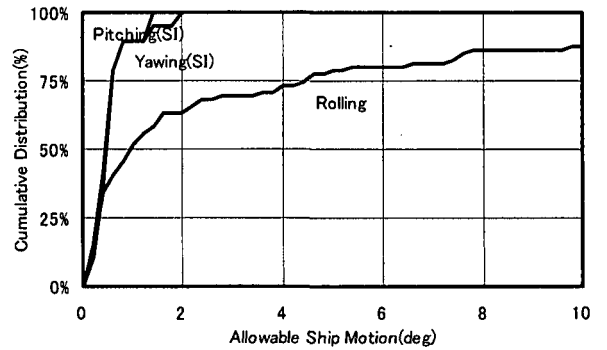


図-7 フェリーの最大動揺量の累積頻度分布 (ローリング, ピッチング, ヨウイング成分)

以上の結果より、フェリーの荷役許容動揺量の暫定値を表-2に示す。

表-2 フェリーの荷役許容動揺量の暫定値

| | フェリー | | PIANC-WG |
|----------|---------|---------|-----------|
| | 中短距離 | 長距離 | SIDE RAMP |
| Surging | ±0.4m | ±0.4m | ±0.3m |
| Swaying | +0.4 | +0.4 | +0.6 |
| Heaving | ±0.3 | ±0.3 | ±0.3 |
| Rolling | ±1.0deg | ±1.0deg | ±1.0deg |
| Pitching | ±0.5 | ±0.5 | ±0.5 |
| Yawing | ±0.5 | ±0.5 | ±0.5 |

4. アンケート調査およびその解析

アンケート調査票による調査は各地方整備局、北海道開発局および沖縄総合事務局の協力により実施された。調査はコンテナ船もしくはフェリーを取扱うほとんどすべての荷役会社に送付した。

アンケート調査票の質問項目は全部で5項目であり、質問1は都道府県および港湾名である。質問2は船種とサイズ、取扱われる貨物および荷役方法の種

類である。船種はコンテナ船、中短距離フェリーおよび長距離フェリーに分類される。船のサイズは7種類に分類される。貨物の種類は農畜産品、水産品、林産品などの15項目に分類される。荷役方式はガントリクレーン、グラブ、シューターなど荷役装置により10項目に分類される。

質問3は荷役中断の原因と頻度に関する質問である。荷役中断の原因は波浪、強風、雨または雪、霧、その他の5項目の気象条件による原因に分類される。また、波浪による船舶の動揺が原因で荷役中断が発生した場合には質問4において荷役中断が生じたバース、その際の波高、周期などの詳細な状況について記述される。

質問5は本アンケート調査における主目的の一つであり、ここでは船舶の荷役許容動揺量の暫定値について荷役会社に直接意見を求めている。荷役許容動揺量の判断コードとして-2, -1, 0, +1, +2の5段階で評価している。+2は荷役会社で判断する荷役許容動揺量が暫定値よりかなり大きいと考えられる場合であり、概ね暫定値の1.5倍以上の場合に対応している。+1は暫定値よりもやや大きいと考えられる場合、0は暫定値とほぼ同程度と考えられる場合、-1は暫定値よりもやや小さいと考えられる場合に対応している。また、-2は暫定値よりかなり小さいと考えられる場合を示し、概ね暫定値の0.7倍以下の場合に対応している。ここで、荷役会社の5段階評価結果が0でない場合、すなわち荷役会社が判断する荷役許容動揺量が暫定値と異なる場合には、実際にどの程度の船体動揺が生じた場合に荷役限界状態になるかを記述している。したがって、アンケート調査結果より荷役会社の5段階評価結果が暫定値と大きく異なる場合はその修正を行う必要がある。

表-3はアンケート調査票の送付数および有効回答数を示す。アンケート調査票の送付先は合計632箇所であり、内訳はコンテナ船の取扱い会社が300箇所、フェリーの取扱い会社が332箇所である。また、有効回答数はコンテナ船で80、フェリーで115、全体で195であり約3分の1程度の回答が得られた。

表-3 アンケート調査票の回答状況

| | 全体 | コンテナ船 | フェリー | |
|----------|-----|-------|------|----|
| 送付数 | 632 | 300 | 332 | |
| 返送有 | 222 | 96 | 126 | |
| 返送無 | 410 | 204 | 206 | |
| 有効回答数 | 195 | 80 | 115 | |
| 無効回答数 | 27 | 16 | 11 | |
| 地域別有効回答数 | 北海道 | 14 | 3 | 11 |
| | 東北 | 17 | 7 | 10 |
| | 北陸 | 5 | 1 | 4 |
| | 関東 | 24 | 16 | 8 |
| | 中部 | 13 | 9 | 4 |
| | 近畿 | 23 | 13 | 10 |
| | 中国 | 30 | 15 | 15 |
| | 四国 | 15 | 1 | 14 |
| | 九州 | 49 | 14 | 35 |
| | 沖縄 | 5 | 1 | 4 |

アンケート調査結果から質問5に対する統計的な分析を行った。1つは暫定値に対する荷役会社の5段階評価で表された判断指標のまとめであり、1つは荷役会社が判断する荷役許容動揺量のまとめである。

図-8から図-11は暫定値に対する船種別船体動揺成分ごとの5段階評価の度数分布を示す。

図-8より、荷役効率50%時のコンテナ船の荷役許容動揺量の暫定値はサージング、ヒーピングおよびピッチングについては荷役会社の意見が概ねランク0に集中しており、暫定値は荷役会社が判断する荷役許容動揺量とほぼ同等である。スウェイングおよびローリングでは、荷役許容動揺量は暫定値よりも小さくなると考えられる。また、ヨウイングは評価が分かれているため累積頻度分布から暫定値を修正する必要がある。

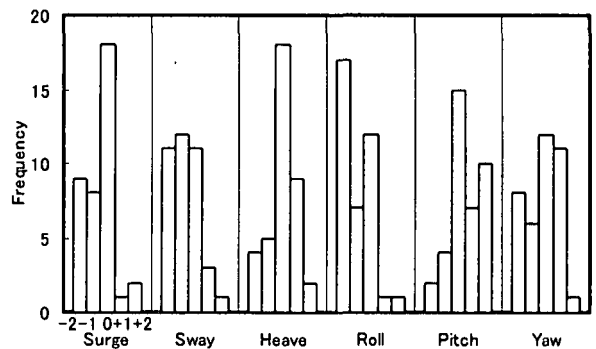


図-8 コンテナ船（効率50%）の判断指標の度数分布

図-9より、荷役効率100%時のコンテナ船の荷役許容動揺量の暫定値はサージング、ヒーピングおよびピッチングについては荷役会社の意見が概ねランク0に集中しており、荷役会社の判断する荷役許容動揺量とほぼ同等である。また、スウェイング、ローリングおよびヨウイングは暫定値よりも小さくなると考えられる。

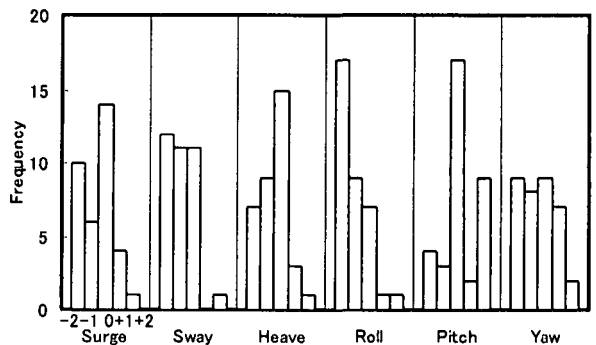


図-9 コンテナ船（効率100%）の判断指標の度数分布

図-10より、中短距離フェリーの荷役許容動揺量の暫定値はローリング、ピッチングおよびヨウイングについては荷役会社の意見が概ねランク0に集中

しており、荷役会社の判断する荷役許容動揺量とほぼ同等である。サージングおよびスウェイングでは評価が分かれているため累積頻度分布から暫定値を修正する必要がある。また、ヒービングは暫定値よりも大きくなると考えられる。

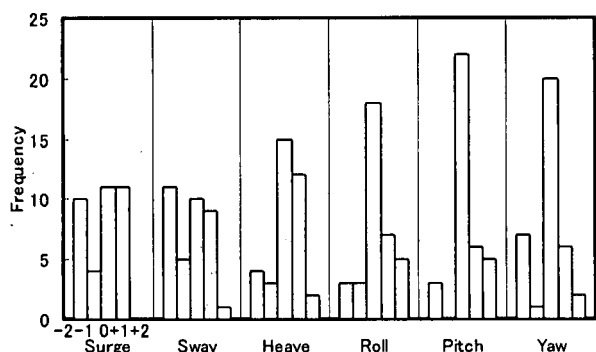


図-10 中短距離フェリーの判断指標の度数分布

図-11より、長距離フェリーの荷役許容動揺量の暫定値はサージング、ピッチングおよびヨウイングの評価は概ねランク0に集中しており、荷役会社の判断する荷役許容動揺量とほぼ同等である。スウェ

イングおよびローリングでは評価が分かれているため累積頻度分布から提案値を求める必要がある。また、ヒービングは暫定値よりも大きくなる。

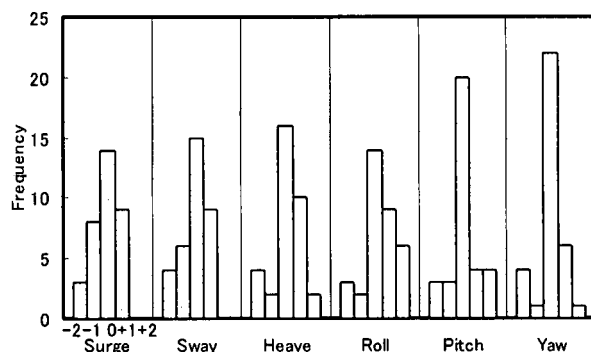


図-11 長距離フェリーの判断指標の度数分布

表-4は本調査における荷役許容動揺量の統計分析結果を示す。ここに、表中の提案値は上述の判断指標の度数分布結果から荷役許容動揺量の提案値として不適当と判断された暫定値に対して、累積頻度分布およびPIANCの提案値を参考に暫定値に対する修正を行っている。具体的には、判断指標の度数分布

表-4 荷役許容動揺量の統計分析結果

| 船種 | 動揺成分 | 暫定値 | 提案値 | アンケート調査票 | | | | PIANC |
|-------------------|--------------|------|------|----------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | 平均値 | 累積頻度分布 | | | |
| | | | | | 25% | 50% | 75% | |
| コンテナ船 (50%効率) | Surging(m) | ±1.0 | ±1.0 | ±0.60 | ±0.38 | ±0.52 | ±1.03 | ±1.00 |
| | Swaying | +1.5 | +1.0 | +0.82 | +0.48 | +0.90 | +1.18 | +1.20 |
| | Heaving | ±0.6 | ±0.6 | ±0.54 | ±0.41 | ±0.54 | ±0.74 | ±0.60 |
| | Rolling(deg) | ±5.0 | ±3.0 | ±3.36 | ±2.45 | ±3.12 | ±5.04 | ±3.00 |
| | Pitching | ±1.0 | ±1.0 | ±1.52 | ±1.04 | ±1.15 | ±2.08 | ±1.00 |
| | Yawing | ±1.5 | ±1.0 | ±1.28 | ±1.06 | ±1.18 | ±1.59 | ±0.75 |
| コンテナ船 (100%効率) | Surging(m) | ±0.5 | ±0.5 | ±0.29 | ±0.12 | ±0.26 | ±0.46 | ±0.50 |
| | Swaying | +0.8 | +0.5 | +0.41 | +0.18 | +0.41 | +0.57 | +0.60 |
| | Heaving | ±0.4 | ±0.4 | ±0.32 | ±0.20 | ±0.36 | ±0.51 | ±0.40 |
| | Rolling(deg) | ±2.5 | ±1.5 | ±1.80 | ±1.12 | ±1.54 | ±2.41 | ±1.50 |
| | Pitching | ±0.5 | ±0.5 | ±0.78 | ±0.43 | ±0.53 | ±1.07 | ±0.50 |
| | Yawing | ±0.8 | ±0.5 | ±0.67 | ±0.43 | ±0.55 | ±1.03 | ±0.50 |
| 中短距離 フェリー | Surging(m) | ±0.4 | ±0.4 | ±0.46 | ±0.28 | ±0.45 | ±0.65 | ±0.30 |
| | Swaying | +0.4 | +0.5 | +0.49 | +0.30 | +0.46 | +0.92 | +0.60 |
| | Heaving | ±0.3 | ±0.4 | ±0.43 | ±0.29 | ±0.43 | ±0.65 | ±0.30 |
| | Rolling(deg) | ±1.0 | ±1.0 | ±1.58 | ±1.05 | ±1.17 | ±2.11 | ±1.00 |
| | Pitching | ±0.5 | ±0.5 | ±0.89 | ±0.45 | ±0.54 | ±1.06 | ±0.50 |
| | Yawing | ±0.5 | ±0.5 | ±0.62 | ±0.42 | ±0.51 | ±0.59 | ±0.50 |
| 長距離 フェリー | Surging(m) | ±0.4 | ±0.4 | ±0.56 | ±0.40 | ±0.51 | ±1.00 | ±0.30 |
| | Swaying | +0.4 | +0.5 | +0.52 | +0.40 | +0.49 | +0.59 | +0.60 |
| | Heaving | ±0.3 | ±0.4 | ±0.45 | ±0.29 | ±0.39 | ±0.64 | ±0.30 |
| | Rolling(deg) | ±1.0 | ±1.0 | ±1.58 | ±1.08 | ±1.19 | ±2.13 | ±1.00 |
| | Pitching | ±0.5 | ±0.5 | ±0.77 | ±0.46 | ±0.54 | ±1.08 | ±0.50 |
| | Yawing | ±0.5 | ±0.5 | ±0.68 | ±0.45 | ±0.53 | ±1.00 | ±0.50 |

がランク0に集中している場合には、暫定値を荷役許容動揺量の提案値とした。また、度数分布が大または小の偏りを持つ場合には、極端な数値の影響を防ぐため累積確率分布の50%値を荷役許容動揺量の提案値とした。

5. 荷役許容動揺量の提案値

表-5は上述の結果より得られた荷役許容動揺量の提案値を示す。

表-5 荷役許容動揺量の提案値

| | コンテナ船 | | フェリー | |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| | 50%効率 | 100%効率 | 中短距離 | 長距離 |
| Surging | ±1.0m | ±0.5m | ±0.4m | ±0.4m |
| Swaying | +1.0m | +0.5m | +0.5m | +0.5m |
| Heaving | ±0.6m | ±0.4m | ±0.4m | ±0.4m |
| Rolling | ±3.0deg | ±1.5deg | ±1.0deg | ±1.0deg |
| Pitching | ±1.0deg | ±0.5deg | ±0.5deg | ±0.5deg |
| Yawing | ±1.0deg | ±0.5deg | ±0.5deg | ±0.5deg |

提案値は概ねPIANCにおいて提案されている荷役許容動揺量と同等の値となった。ただし、スウェイングについてはどの船種に対してもPIANCの提案値に比較して小さく評価されている。これは、荷役会社に対するアンケート調査結果による影響が大きいことが理由と考えられる。また、PIANCのとりまとめの作業の中では、我が国からは上田・白石³⁾の調査結果に基づいて一般貨物船、穀物運搬船、鉱石運搬船、タンカーについての荷役許容動揺量を提案し、これらがそのレポートの中でほぼ取り入れられる形になっている。しかしながら、今回検討したコンテナ船、フェリーに対するデータはその当時無く、

ヨーロッパにおける提案値が採用される形となった。しかしながら、その調査は今回行った程には系統だてられたものではなく、今回の調査結果は、我が国の実態を反映させて提案されたものであることから、今後の港湾計画の改訂等においては本提案に基づく荷役許容動揺量を用いるのが良いと考えられる。

6. 結論

本研究では、港湾の静穏度指標としての荷役許容動揺量について検討した。対象とした船種はコンテナ船およびフェリーであり、コンテナ船（荷役効率50%時）、コンテナ船（荷役効率100%時）、中短距離フェリーおよび長距離フェリーについて長周期波を考慮した動揺数値シミュレーションおよび荷役会社に対して行われたアンケート調査に基づいて荷役許容動揺量を提案した。

参考文献

- 1) P.Burrn: Breakwater or mooring system ?, The Dock & Harbour Authority, 1981.
- 2) P.Burrn: Port Engineering, Third Edition, 1981.
- 3) Ueda, Shiraishi: The allowable ship motions for cargo handling at wharves, Report of PHRI 27-4, 1988.
- 4) PIANC: Criteria for movements of mooring ships in harbour - A practical guide -, Report of Working Group No.24 of the Permanent Technical Committee II, 1995.
- 5) 上田茂・白石悟: 係留船舶の動揺計算方法とその評価, 港湾技術研究所報告, 第22巻第4号, pp.181-218, 1983.
- 6) 上田茂: 係留船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技術研究所資料, No.504, 1984.
- 7) 平石哲也: 長周期波のエネルギーレベルとそれによる荷役稼働率の推定, 港湾技術研究所資料, No.934, 1999.
- 8) 関西造船協会編: 造船設計便覧第4版, 1983.