

港内における長周期波と船舶の荷役稼働率の評価

Long-period Waves in a Harbor and Evaluation on Wharf Operation Ratio Taking into Account Vessel Motions

白石 悟*・福山博己**

SHIRAISHI Satoru and FUKUYAMA Hiromi

* (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹兼第二調査部長

** (財) 沿岸技術研究センター 波浪情報部 研究員

New methods to evaluate wharf operation ratio are proposed taking into account vessel motions. Proposed new method is compiled to “The Manual to Evaluate Long-period Waves in the Ports” as well as other information and numerical technique on long-period waves in a port.

Key Words : long-period waves, harbor calmness, vessel motion, wharf operation ratio

1. 港湾における船舶の荷役問題

港湾の静穏度の評価においては、これまで荷役限界波高という指標が係留施設の年間を通じての利用できる確率を判定する際の指標として用いられており、その数値は小型船0.3m, 中・大型船0.5mとされていた。この指標では係留船舶の動揺に及ぼす波周期や波向の影響が考慮されていない。このため、波高だけを見れば、港内が静穏と判定される条件においても、船舶の荷役が出来ないという状況が主として外洋に面した港湾において発生している。これまでの研究により周期10s以上のうねり、周期30~300s程度の長周期波がその原因とされている。うねりを原因とする荷役障害では船舶のスウェイ、ロールが卓越し、長周期波を原因とする荷役障害ではサージが卓越することが特徴的である。船体の動揺が大きときには荷役が中断し、さらには、係留索の切断、防舷材の損傷、船体の損傷が生ずることもある。このようなことから外洋に面した港湾においては、静穏度を高めて荷役非稼働日を少なくすること、および船舶の安全な係留が緊急の課題とされている。長周期波に関するこれまでの研究をふまえ、長周期波の影響評価や対策検討を行う際の手引書として、このほど「港内長周期波影響評価マニュアル(以下、マニュアルと記す)」が出版された¹⁾。

2. マニュアルの概要

2.1 長周期波とその港湾に及ぼす影響について

船舶の荷役障害の主たる原因として長周期波の影響が挙げられる。長周期波の船体動揺への影響は古くから「底うねり」等の表現で海事関係者に認識されていた。しかしながら、その原因が周期30~300s程度の波浪成分に起因することが定量的に明らかになったのは最近のことである。これまで、長周期波の観測技術が確立されていなかったこと、船体動揺シミュレーション技術が未発達であったこと等により、長周期波が船舶へ及ぼす影響に

ついての理解が十分でなく、また定量的な評価も困難であった。

長周期波の発生原因については、多くの研究がなされている。その成因はある程度明らかになりつつあるが、現状でもその性質が完全に明らかになっていないのが現状である。マニュアルでは、波の分類の中で、長周期波について以下のように記述している。「風波やうねりの波群の変化や、サーフビートに起因して生ずる長周期の水面変動であり、ここでは周期30~300sと限定して定義する。主に大型の係留船舶に作用すると、波高が数cm程度であっても、その係留系のサージ固有周期と共振して数十cm以上の振幅を有する水平振動を引き起こすことがある。」

本稿で示す、船舶の動揺成分は図-1のとおりである。

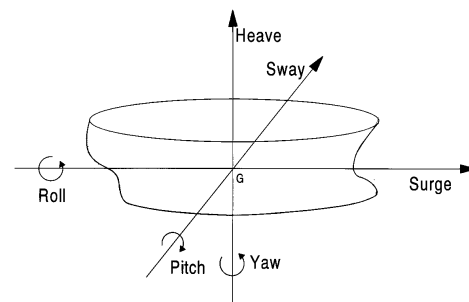


図-1 船舶の動揺成分

2.2 マニュアルの構成

マニュアルの構成は以下のとおりである。

1. 序論
2. 荷役稼働率の考え方およびその評価法
3. 長周期波の特性
4. 長周期波の観測と解析
5. 長周期波の予測法
6. 長周期波の変形計算法
7. 長周期波に対する船舶の動揺評価

- 8. 長周期波対策法
- 9. 本マニュアルにおける課題と今後の研究

付録A 上田らによる荷役限界波高

付録B 本マニュアルを用いた港湾での荷役稼働率の計算例

3. 荷役稼働率の評価法

3.1 荷役稼働率の計算法の分類

マニュアルでは、荷役稼働率の計算法を表-1のように分類している。このうち、うねりおよび長周期波に対して波の周期を考慮した荷役稼働率を評価する方法としてマニュアルでは①標準解析法と②詳細解析法を示している。

表-1 荷役稼働率計算法の分類

評価法	荷役限界波高	風波・うねりおよび長周期波の取り扱い	船体動揺シミュレーション	マニュアルでの扱い
従来法	一定	なし	計算しない	なし
標準解析法	付録に提示	分けて計算する	計算しない	あり
詳細解析法	動揺計算によって設定	分けて計算する	計算する	あり
厳密解析法	動揺計算によって設定	一体的に計算する	計算する	なし

① 標準解析法

標準解析法は、荷役限界波高をこれまでの提案値（マニュアルには付録Aに上田ら²⁾によるものが掲載）あるいは荷役実績や現地での船体動揺特性から設定し、対象バースにおける通常波浪成分および長周期波成分のそれぞれについて、バース前面における波高の設定値よりも低くなる時間を確率的に評価して、荷役稼働率を評価する方法である。なお、荷役限界波高は**3.2**に示すように波周期と波向の関数である。この方法では対象バースの船体動揺計算を行う必要が無いので、比較的計算時間が短くてすむ。したがって、多くの種類の船舶が使用する公共埠頭の荷役稼働率の評価に適している。また、バース構造が詳細に決まっていない港湾計画の段階などにおいて、バース法線形状や外郭施設の検討など数多くのケースについて簡易に荷役稼働率を求めたい場合に用いるのがよい。

② 詳細解析法

詳細解析法は、対象バースにおける通常波浪成分およ

び長周期波成分のそれぞれについて、バースの係留条件を考慮して動揺シミュレーション等により船体動揺量を求め、これを荷役許容動揺量と比較することにより対象となるバースにおける荷役限界波高を求めた上で荷役稼働率を確率的に算定する。荷役許容動揺量は船種や荷役方式、船舶の係留状態の関数である。すなわち、個別の船舶を対象とするため、荷役稼働率の計算はより高い精度を有する。一方、動揺シミュレーションを行うためには、詳細な船舶形状データや係留索の条件入力が必要となり、計算準備に時間がかかる。また、個別の船舶に対する評価になるので、すべての船舶に適用しようとするのは困難である。詳細解析法を用いれば係留系の改善による荷役稼働率の向上についても評価ができる。したがって、この方法は既存バースの荷役稼働率向上対策の評価法として、現在荷役障害が生じている岸壁での対策工の計画や、港形の改良だけでは長周期波による荷役障害が防止できないと予想される港湾での事前対策の検討などの詳細調査に用いることができる。

3.2 荷役限界波高

荷役限界波高は、荷役が可能となる上限のバース前面の有義波高であって、通常波浪成分および長周期波浪成分のそれぞれに対して定義される。通常波浪成分に対する荷役限界波高は、船種、船型、波向、波周期等のパラメータが船体の動揺に及ぼす影響を考慮して求めるのがよい。他に参考とする資料が無い場合には、上田ら²⁾が多くの係岸船舶の動揺シミュレーションを実施して提案したものを参考とすることができる。マニュアルでは、一般貨物船、タンカー、コンテナ船、ロールオン・ロールオフ船、自動車運搬船、穀物運搬船、鉱石運搬船の場合について示している。表-2は、その一例を、一般貨物船の1,000, 10,000, 50,000DWTの場合についてのみ示している。表-2では従来用いた限界波高0.5mを下回る部分を赤字で示している。この表より、荷役限界波高は小型の船舶では小さいこと、波周期が長くなるにつれて小さくなること、波向が船の側面からの方向となる60°のときにより小さくなるのがわかる。これらは、いずれも係留船舶の動揺が大きくなる条件である。

一方、長周期波に対しては荷役限界波高は通常波浪成分に対するものほどには明らかになっていない。これは、係留船舶の固有周期や長周期波の卓越周期帯によって船舶の動揺特性が異なることから限界波高を定めることが困難であることによる。したがって、すでに供用されているバースの対策検討においては、対象とする船舶の種類や荷役方式を考慮し、荷役実態を調査した上で個別に求めることが望ましい。ただし、マニュアルでは、これを判定する資料が無い場合の参考値として表-3の数値を提示している。長周期波に対する荷役限界波高については、今後さらに検討する必要がある。

表-2 通常波浪成分に対する荷役限界波高 (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	0.50	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 長周期波に対する荷役限界波高

レベル	想定される条件	荷役限界波高 (m)
1	サージングについて荷役許容動揺量が比較的大きな船種またはサージングの固有周期が1.5min以下の船舶(中型船:1,000~5,000DWT)	0.20
2	サージングについて荷役許容動揺量が中程度の船種およびサージングの固有周期が1.5min以下の船舶(一般貨物船:5,000~10,000DWT)	0.15
3	サージングについて荷役許容動揺量が小さな船種およびサージングの固有周期が2~3minの船舶(コンテナ船, 鉱石船等:10,000~70,000DWT)	0.10

3.3 荷役許容動揺量

荷役許容動揺量は荷役時の動揺量の限界値を示すものであって船種、荷役方式ごとに設定される。これまでブルン、Ueda and Shiraiishi⁹⁾があり、これらに加えて他の研究についても参考してとりまとめたPIANCのWG24の提案値⁴⁾がある。Ueda and Shiraiishiの提案ではコンテナ船、フェリーについては示されていないが、最近、佐藤ら⁹⁾が日本国内の荷役障害事例に対する動揺解析およびアンケートに基づく統計解析をふまえて提案を行っている。ここでは、Ueda and Shiraiishiによる提案値に加えて佐藤らの提案値を加えたものを表-4に示す。

4. 長周期波の影響評価についての計算法

マニュアルに提示された長周期波の変形や係留船舶の

表-4 荷役許容動揺量の提案値

船種	サージ (m)	スウェイ (m)	ヒール (deg)	ロール (deg)	ピッチ (deg)	ヨウ (deg)
貨物船	±1.0	+0.75	±0.5	±2.50	±1.0	±1.5
穀物船	±1.0	+0.5	±0.5	±1.0	±1.0	±1.0
鉱石船	±1.0	+1.0	±0.5	±3.0	±1.0	±1.0
内航T	±1.0	+0.75	±0.5	±4.0	±2.0	±2.0
外航T	±1.5	+0.75	±0.5	±3.0	±1.5	±1.5
コンテナ50	±1.0	+1.0	±0.6	±3.0	±1.0	±1.0
コンテナ100	±0.5	+0.5	±0.4	±1.5	±0.5	±0.5
フェリーS	±0.4	+0.5	±0.4	±1.0	±0.5	±0.5
フェリーL	±0.4	+0.5	±0.4	±1.0	±0.5	±0.5

内航T:内航タンカー, 外航T:外航タンカー, コンテナ50:コンテナ船(荷役効率50%), コンテナ100:コンテナ船(荷役効率100%), フェリーS:中短距離フェリー, フェリーL:長距離フェリー

動揺についての具体的な計算法について概説する。

4.1 長周期波の予測法

長周期波の予測は、港湾ごとにあるいはバースごとリアルタイム気象海象観測情報や過去の観測統計等のさまざまな情報を活用して行うのが望ましい。長周期波の発生・発達・伝播・減衰などのメカニズムが十分に解明されていない現状においては、今後のさらなる開発を待たなければならないが、現状では以下の予測モデルがある。

①波浪の有義波高と有義波周期の予測値から長周期波波高を推定する方法

この方法の代表的事例は、北海道開発局によって開発された苫小牧港による経験モデルが挙げられる。この方法では過去の観測データの分析に基づいて、通常波の波浪の有義波高と有義波周期と長周期波波高の関係式を求めておいて、波浪予測によって得られる有義波高と有義波周期から長周期波波高を簡便に求めるものである。

②統計的予測手法を用いた方法

過去の長周期波の観測情報と気象図情報とを対応させて関連づけ、予測気象情報を基に長周期波を予測するモデルである。

4.2 長周期波の変形計算法

非線形干渉現象を含めて解析できる非線形波浪計算モデルが開発されているが、計算に多大な時間を要する。その場合には計算時間が短くて済む線形長波モデルで計算してよい場合もある。

①線形長波モデル

このモデルは津波や副振動の数値予測に用いられている数値計算法であり、計算格子が比較的大きくとれ、計算時間が速く扱いやすいという利点を有する。ただし、線形長波を規則波で与えなければならないこと、境界で

の反射率を 1.0 に固定しなければならぬ等の制約がある。

②非線形波浪モデル

本来は、非線形性の強い風波の浅海域における屈折、回折、砕波変形等の解析のために開発されたモデルであるが、最近では長周期波の変形問題にも適用されている。計算格子を波長の 1/10 程度に設定する必要があるが、長周期波のみを対象とするときは格子を大きくできる。計算は時系列的に行うことが可能である。港湾空港技術研究所では、NOWT-PARI Ver.4.6β というモデルを開発しており、マニュアルでも紹介されている。

4.3 長周期波に対する船体動揺の計算法

長周期波に対する係留船舶の動揺シミュレーションは通常波浪成分に対するものと同様に行うことができる。通常波浪成分と長周期波成分とは、本来はそれぞれ独立には存在しないが、詳細解析法によって荷役稼働率を算定するには分けて解析することになる。運動方程式の数値解法については、式中の係数値を、ある特定の周期での係数として一定とする方法（一定係数法）とシミュレーション中の動揺状態に応じて時間的に変化させる方法（遅延関数法）とがある。実際にシミュレーションを行う際には係留索の変位復元力特性の入力や長周期動揺に対する粘性減衰係数の取り扱いに注意を要する。

5. 長周期波対策法

長周期波に対する対策では、荷役障害の軽減のために以下の 3つの方法が考えられる。対策の選定に際しては、費用、効果を勘案して適切な方法を選定するのがよい。

- ①波浪制御構造物による対策
- ②係留系による対策
- ③波浪予測による対策

5.1 波浪制御構造物による対策

波浪制御構造物による対策では、防波堤の建設、港内の波浪制御構造物の設置などによって港内に侵入する通常波浪成分および長周期波成分の波高を低減させて、係留船舶の動揺を低減させる。ただし、港内の施設整備が進み自然の砂浜等が消失することによって、かえって荷役稼働率が低下することもあるので、対策工の選定においては慎重な検討が必要である。

5.2 係留系による対策

係留系による対策は、船舶の係留系の固有周期を長周期波の固有周期帯からはずすことによってサージング等の共振を防止するものである。港内における長周期波の卓越周期と船舶の固有周期が近接しているときに効果が大きい。最新の研究では、係留岸側に設置したウインチ装置を自動制御することにより動揺低減を図るシステムが開発されている。今後はこれの実用化研究が望まれる。

5.3 波浪予測による対策

予測による対策では、事前に当該バースに作用する通常波浪の波高や長周期波の波高が荷役限界波高を超える可能性を判定し、荷役の遅延や係留中の事故を防止するものである。本質的には荷役稼働率の改善にはつながらないが、係留中に荷役不可となって沖だしする際のタグボート費用の軽減対策にはなる。茨城県鹿島港では平成 15 年度より長周期波予測システムが試験運用されている。

6. 今後の課題

今後の課題を以下に簡単にまとめる。

- ①現在の観測技術では観測データから拘束長周期波と自由長周期波の厳密な区分が難しいので、今後の研究・調査が必要である。
- ②長周期波の波向の設定法については、今後も調査・研究が必要である。
- ③長周期波対策法の検討に用いる非線形波浪変形計算法を、大規模港湾に適用することには現段階では限界がある。計算アルゴリズムの改良と計算機能力の向上に期待する必要がある。
- ④マニュアルでは波高のみで評価しているが、副振動によるサージ運動に対しては、流速等他のパラメータを含めて評価するより合理的な方法を検討する必要がある。

7. おわりに

マニュアルの作成・出版においては沿岸技術研究センターに設置した「港内長周期波影響評価マニュアル検討委員会（委員長：合田良実横浜国立大学名誉教授）」に審議いただいた。委員をはじめ関係各位に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：港内長周期波影響評価マニュアル（沿岸開発ライブラリー21）、79p、2004。
- 2) 上田 茂・白石 悟・大島弘之・浅野恒平：係留船舶の動揺に基づく荷役許容波高および稼働率、海岸工学論文集、第 41 巻、pp.916-920、1994。
- 3) Ueda, S. and Shiraiishi, S.: The allowable ship motions for cargo handling at wharves, Report of PHRI, 27-4, pp.3-61, 1988.
- 4) PIANC : Criteria for movement for moored ships in harbours – A practical guide, Report of Working Group No.24 of the Permanent Technical Committee, 1995.
- 5) 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解析、海洋開発論文集、第 19 巻、pp.643-648、2003。