

うねり性波浪の影響を考慮した港内静穏度の評価方法について

釧路開発建設部 釧路港湾事務所 ○佐藤 大地
杉尾 大樹
(株)クマシロシステム設計 阿部島 直哉

北海道の港湾・漁港においては、係船岸での荷役・係留等の安全性・効率性を確保するため、荷役稼働率を指標として港内静穏度の要求性能の達成状況が評価されてきた。一方、近年の気候変動・海象変化に伴い、波高・周期の増大や波向の変化、うねり性波浪による荷役・係留障害や施設被害等の発生が利用者より報告されている。これらの要因により、荷役稼働率による港内静穏度の評価と実態とが乖離していることが課題となっている。本報告では、うねり性波浪の影響を考慮した港内静穏度の評価方法について、検討したものである。

キーワード：港内静穏度、静穏度解析手法、荷役稼働率、うねり性波浪

1. はじめに

北海道の港湾・漁港では、「港湾の技術上の基準・同解説」や「港内長周期波影響評価マニュアル」(2004)に示される“従来法”により、静穏度解析を実施して荷役稼働率を算定し、港内静穏度の評価がなされてきた¹⁾。ここで、“従来法”とは、港に來襲する5ヶ年以上の波浪(風波・うねりを含む全成分)の波向別波高出現頻度表(以下、頻度表)と波高比分布計算に基づき、係船岸前面の荷役限界波高を一定で設定して稼働・不稼働を評価するものである。一方、近年の気候変動に伴う海象変化により、來襲波浪の特性(波向、波高、周期)が変化しており²⁾、うねり性波浪による影響も懸念されている³⁾。

本報告においては、北海道沿岸に來襲する波浪特性と釧路港を事例としたうねり性波浪による港内擾乱の実態を整理し、うねり性波浪を考慮した静穏度解析手法を提案し、釧路港を事例にうねり性波浪を考慮した港内静穏度の評価方法について検討したものである。

2. 來襲波浪の特性と擾乱状況

(1) うねり性波浪の定義

うねりは、平山らの提案³⁾に準じて「周期8秒以上、かつ波形勾配(H/L)が0.025未満」と定義することとした。本報告では、波浪の全成分の内、上記の定義に該当するものを“うねり”、それ以外を“風波”として取り扱うものとする。

(2) うねり性波浪の來襲状況

北海道沿岸におけるうねり性波浪の來襲状況を把握するため、日本海側(仙法志、留萌、石狩湾新港、瀬棚)、太平洋側(苫小牧、十勝、釧路、尻羽岬)、オホーツク海側(紋別、紋別南、網走、ウトロ)における過去30年程度の期間における波浪観測データを基に、來襲波浪の特性(風波・うねりの割合)を分析した。分析結果は図-1に示すとおりであり、波浪観測期間におけるうねりの割合は日本海側では2%未満、太平洋側で20~40%程度(釧路港では30%程度)、オホーツク海では20%程度と、海域毎に特性が異なる結果となった。特に、吹送距離の短い日本海では風波が主であるものの、太平洋・オホーツク海ではうねりが一定程度を占めることから、港内静穏度に対し影響があるものと想定される結果となった。

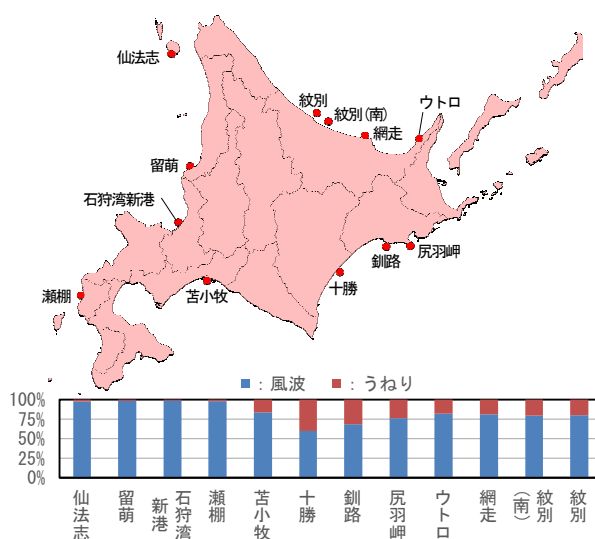


図-1 北海道沿岸に來襲する波浪特性

(3) うねり性波浪による港内擾乱の実態

北海道の太平洋沿岸やオホーツク海沿岸においては、うねり性波浪の来襲割合が多いことが確認された。うねり性波浪は、風波に対して周期(波長)が長く波形勾配が小さいため、波浪変形の特長としては「屈折・回折しやすい」、「消波構造に対し反射率が大きくなる」ことが想定され、荷役や係留に影響を与えうる可能性がある。

このため、釧路港西港区を対象に、利用障害・施設被害の発生状況について、表-1に示す内容に関する利用者ヒアリングを実施するとともに、港湾管理者から施設被害履歴を入手した。その上で、利用障害・施設被害の発生時における釧路港ナウファスデータの波浪諸元を基に、風波・うねりに分類して被害履歴との対比を行った。

図-2は、バース別の利用障害・施設被害の発生状況である。同図から、うねり性波浪の来襲割合が30%程度であるのに対し、利用障害・施設被害は風波の場合と同程度、またはそれ以上に発生していることがわかる。

一方、図-3は周期帯別に利用被害・施設障害の発生状況を整理したものである。同図から、周期8秒以上(うねりの下限周期)を超える周期帯では、うねり性波浪が利用被害・施設障害の主因であることが確認された。また、周期6秒未満や、周期15秒以上の周期帯では、出現頻度が少ないことや、港外退避等がなされ、利用被害・施設障害の発生が少ないことも確認された。

表-1 利用者ヒアリング項目

対 象	内 容
港湾管理者	●施設被害の発注状況 ・被害内容、日時、岸壁位置、被害額
船社	●利用障害の発生内容 ・障害内容(港外避難含む)、日時、岸壁位置
船舶代理店2社	
港湾荷役業者	

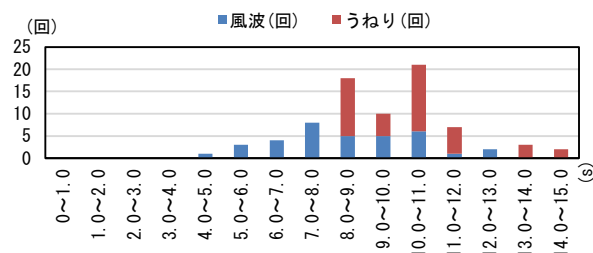


図-3 施設被害・利用障害の発生回数(周期別)

3. うねりを考慮した静穏度解析手法の提案

(1) 従来の静穏度解析手法(従来法と標準解析法)

静穏度解析手法としては、図-4に示すとおり、“従来法”と“標準解析法”がある。“従来法”は、前述のとおり、これまで北海道内の港湾・漁港における静穏度解析で一般的に用いられてきた手法である。一方、“標準解析法”は、複数周期の波高比分布計算を行うこと、荷役限界波高の設定は対象バースの船型・船種・入射波向に応じ、「港内長周期波影響評価マニュアル」(2004)

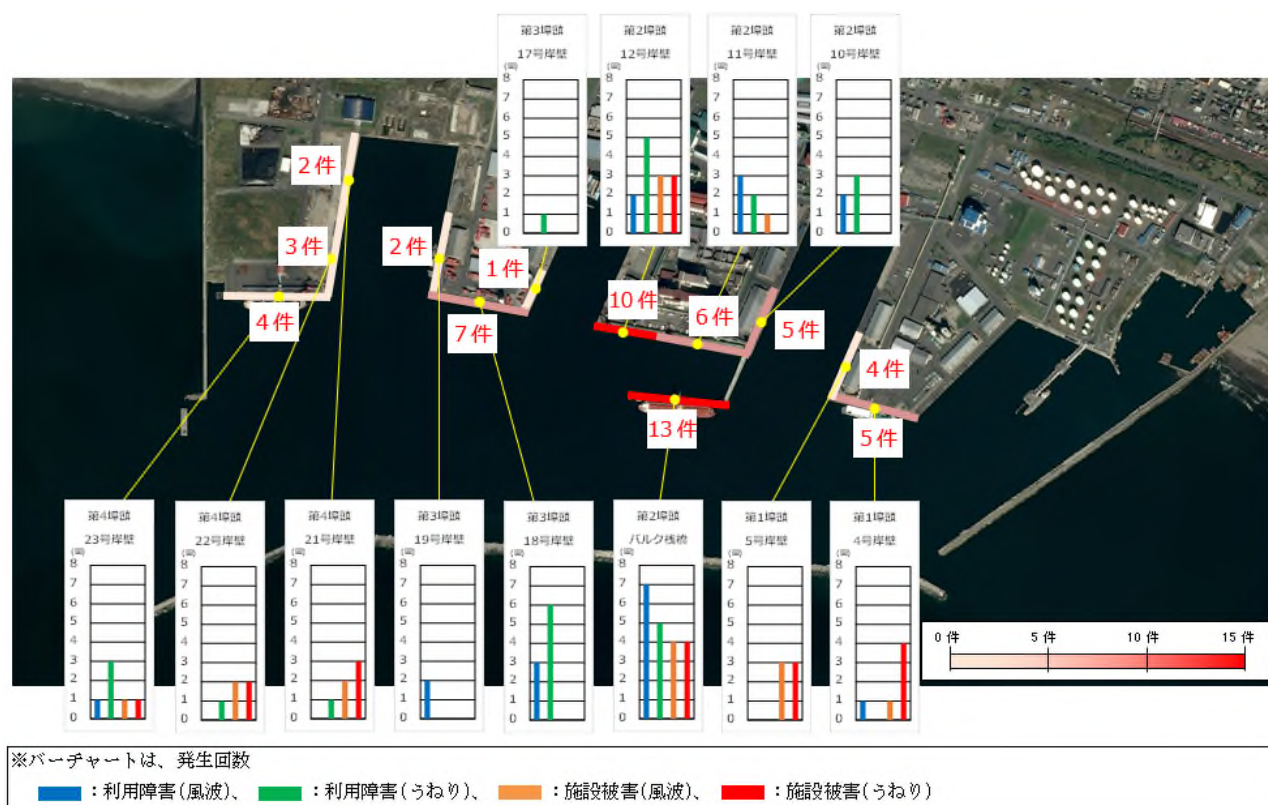


図-2 釧路港西港区における荷役障害・施設被害の発生状況(件数)

の付録Aに示される値を設定して荷役稼働率を評価する点が異なる。すなわち、“標準解析法”は、風波・うねりを含む様々な周期帯の波浪による影響、及びバースの利用実態に応じた荷役限界波高の変化を考慮した荷役稼働率の評価が可能であるといえる。

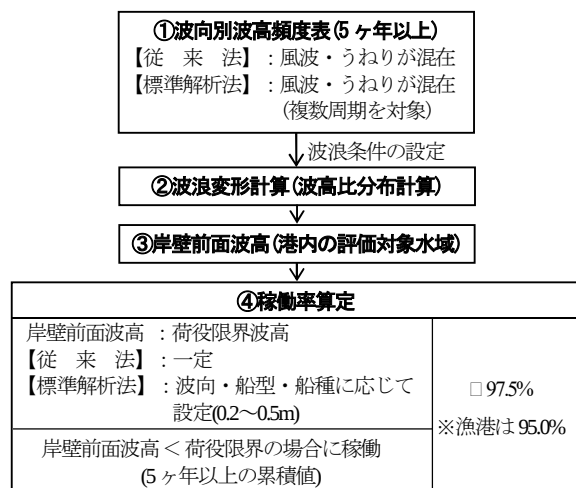


図-4 常時波浪の荷役稼働率の評価

(2) 標準解析法の実務上の問題点

“標準解析法”の検討事例は、「港内長周期波影響評価マニュアル」(2004)の付録Bに示されており、表-2に解析条件を示す。同表に示すとおり、検討事例では代表6周期を設定し、最小周期は4秒を設定しており、この解析条件では2つの問題点が生じる。まず1点目は、計算ケース数が“従来法”の数倍(事例では6倍)となることである。2点目は、最小周期の設定(事例では4秒)によっては、計算精度を確保するため、計算格子サイズ(推奨は波長の1/10以下)をより詳細に設定する必要がある、結果として計算時間の増大を招くことである。これら2つの問題点は、作業効率の低下や作業工程の増大等、実務上のボトルネックとなるものである。

表-2 標準解析法の検討事例

周期帯(S)	(0.0~4.0)	(4.1~6.0)	(6.1~8.0)	(8.1~10.0)	(10.1~12.0)	(12.1~15.0)
代表周期(S)	4	6	8	10	12	15

(3) 簡略法の提案

前述の“標準解析法”の実務上の問題点を解決するため、図-5に示す“簡略法”を提案する。

“従来法”や“標準解析法”では、頻度表は風波・うねり混在の全波浪で整理しているものに対し、“簡略法”では風波・うねりを分類した頻度表として作成する。次に、風波、うねりの代表周期(代表2周期)を設定するが、前述の利用障害・施設被害の発生事例を踏まえ、被害の発生が多い8秒~12秒程度の周期帯を選定する。その上で、風波・うねりの波高比分布計算を行って、係船岸前面の波高比を算定する。荷役限界波高は、“標準

解析法”と同様、対象バースの船型・船種・入射波向に応じて設定する。

以上の方法により、計算ケース数を削減し、計算格子の制約を排除しつつ、うねり性波浪の影響を考慮した荷役稼働率評価が可能となる。加えて、従来の頻度表と風波のみの波高比を用いることにより、“従来法”の荷役稼働率も同時に算定可能となり、“従来法”と“簡略法”の比較、すなわち、うねり性波浪による荷役稼働率への影響を評価可能となる。

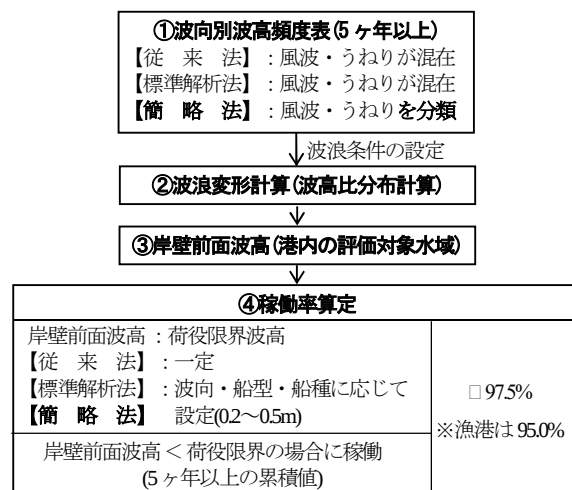


図-5 常時波浪の荷役稼働率の評価(簡略法の提案)

4. うねり性波浪による荷役稼働率への影響評価

(1) 検討概要

釧路港西港区を対象に、“従来法”と“簡略法”による静穏度解析を行い、うねり性波浪による荷役稼働率への影響評価を行った。検討手順は図-6に示すとおりである。

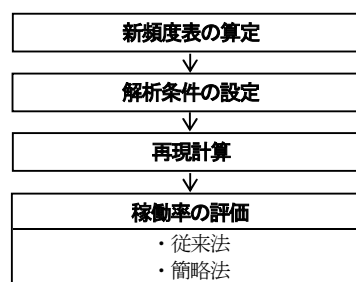


図-6 検討手順

(2) 新頻度表の作成方法

釧路港では、平成12年に波浪推算により頻度表(以下、旧頻度表)が作成され、既往の静穏度解析で荷役稼働率算定に用いられてきた。しかし、作成から20年以上が経過し、近年の気候変動に伴う海象変化が含まれないため、港内静穏度を過小に評価している可能性がある。一方、釧路港の沖合(水深50.1m)では、図-7に示すとおり

ナウファス波浪観測が 2005 年より実施されており、このデータを基に、新たな頻度表(以下、新頻度表)を作成することとした。

新頻度表作成にあたっては、図-8 に示す変換方法を採用し、『エネルギー平衡方程式』による屈折計算を表-3 に示すケースで実施した。これにより、釧路ナウファス～深海域、深海域～釧路港西港区周辺(R5 年度波浪観測地点 H-0 の水深 22m)までの波浪変形を考慮した変換が可能となる。上記の変換方法の妥当性を検証するため、有義波高について、R5 波浪観測値(H-0)と釧路ナウファスを基に変換した値を比較すると図-9 に示すとおりである。同図より、変換値は観測値と一致し、変換方法の妥当性が認められた。

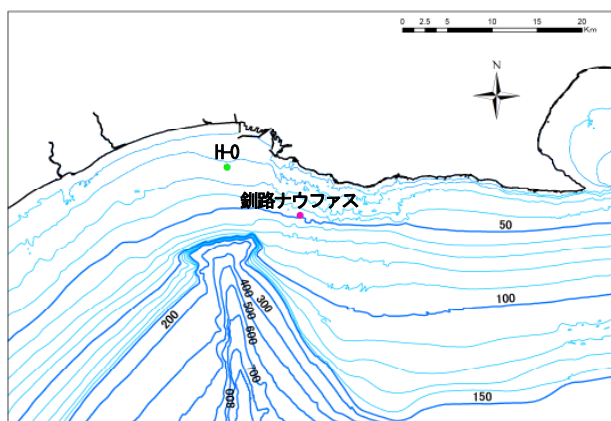


図-7 釧路ナウファス及び新頻度表の算定位置

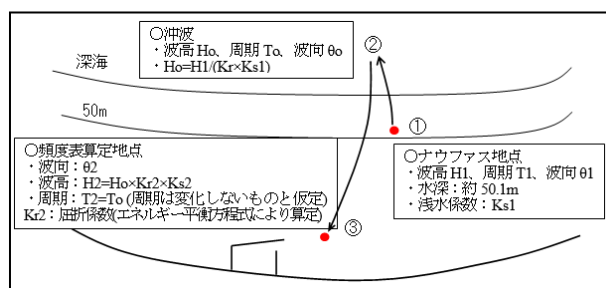


図-8 ナウファスデータの頻度表算定地点への変換方法

表-3 屈折計算条件

項	内 容
計算手段	エネルギー平衡方程式
対象波向	7波向(ESE～WSW)
対象周期	6周期(3、6、9、12、15、18秒)

※ナウファスデータを包括する波向・周期を設定

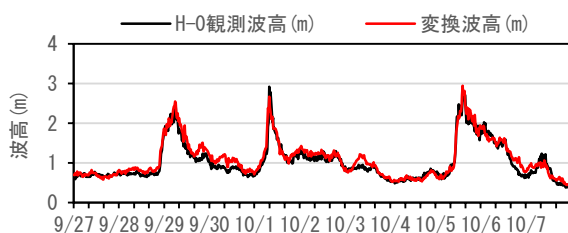


図-9 変換値と観測値の比較

(3) 新頻度表の特徴

作成した新頻度表(R5 作成：2013 年～2022 年の 10 ヶ年)と旧頻度表(H12 作成：1994 年～1998 年の 5 ヶ年)を比較すると図-10 及び図-11 に示すとおりである。新頻度表は、海象変化等の影響により、旧頻度表よりも波高 2m 以上の出現率が 3.2%から 7.0%に増加する傾向が認められる。また、波向については、旧頻度表においては波向 S が 60%を占め主方向であるのに対し、新頻度表では波向 SSE が 41%、波向 S が 33%と主方向が波向 SSE に変化する傾向となった。

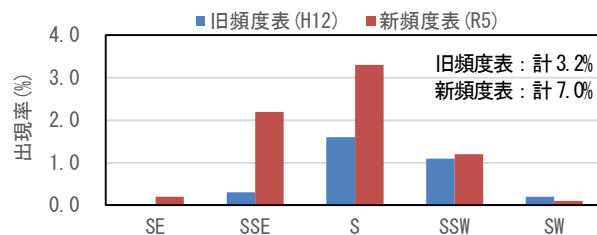


図-10 波高 2m 以上の波向別出現率

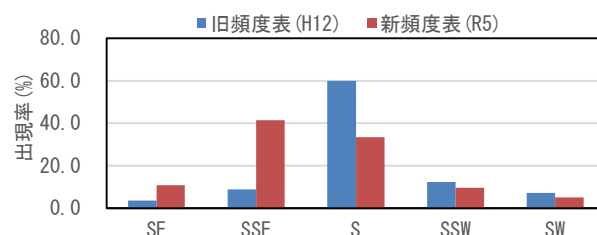


図-11 波向別波高出現率(合計)

一方、新頻度表においては、“簡略法”によるうねり性波浪を考慮した荷役稼働率を算定するため、平山らの定義で風波・うねりに分類したものを表-4 に示すとおり作成した。

表-4 風波・うねりに分類した新頻度表

波高 波向	項 目	0.0m～ 1.0m	1.0m～ 2.0m	2.0m～ 3.0m	3.0m 以上	合計
SE	風波	6.0%	1.8%	0.1%	0.0%	7.9%
	うねり	1.6%	1.1%	0.1%	0.0%	2.9%
	計	7.6%	2.9%	0.2%	0.0%	10.7%
SSE	風波	19.3%	5.1%	0.6%	0.3%	25.3%
	うねり	8.5%	6.2%	1.2%	0.2%	16.0%
	計	27.8%	11.3%	1.8%	0.5%	41.3%
S	風波	15.0%	7.8%	1.1%	0.6%	24.5%
	うねり	3.0%	4.3%	1.4%	0.2%	8.9%
	計	18.0%	12.1%	2.5%	0.8%	33.4%
SSW	風波	4.0%	4.2%	0.8%	0.2%	9.2%
	うねり	0.1%	0.2%	0.1%	0.0%	0.4%
	計	4.0%	4.4%	0.9%	0.2%	9.6%
SW	風波	3.7%	1.2%	0.1%	0.0%	5.0%
	うねり	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	計	3.7%	1.2%	0.1%	0.0%	5.0%
合計	風波	47.9%	20.1%	2.7%	1.2%	71.8%
	うねり	13.2%	11.8%	2.8%	0.4%	28.2%
	計	61.1%	31.9%	5.5%	1.5%	100.0%

(4) 解析条件の設定

“従来法”及び“簡略法”による静穏度解析は、表-5に示す解析条件により実施し、解析手法は最新のブシネスク方程式モデル『NOWT-PARI Ver.5.2』⁴⁹⁾を採用した。消波ブロック等の反射率は透水層モデルにより設定し、自然海浜は遡上条件とした。解析領域は、有効造波領域を勘案して沿岸方向約12km、岸沖方向約5kmと設定した。波向Sの例を図-12に示す。

表-5 解析条件

項目	内容
解析手法	NOWT-PARI Ver.5.2
検討港形	R5現況(R5年6月水深)
計算格子サイズ	10m
計算時間間隔	0.01秒
対象波浪	5波向(SSE～SSW)、風波・うねり

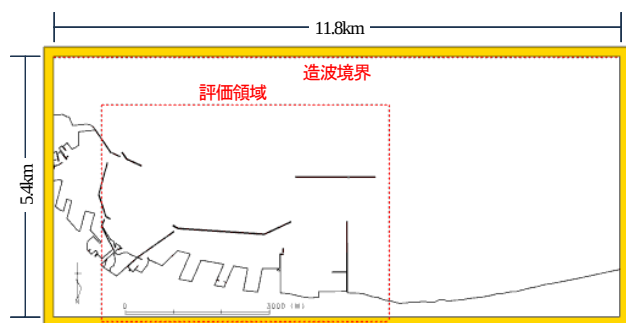


図-12 解析領域(波向Sを例)

一方、波浪条件は、累積97.5%波高を基に、新頻度表算定に用いたデータを基に風波・うねりそれぞれの波高周期相関の関係から、表-6に示すとおり設定した。なお、波高分布計算は、波浪伝搬における非線形性を考慮するため表中の波高(入射波)で行い、計算結果(港内波高)を波高(入射波)で割り戻すことにより、波高比分布を求める方法を採用した。

表-6 波浪条件

波浪種別	波高H(m)	周期T(s)	Smax
風波	2.01	8.0	25
うねり	2.79	12.0	75

(5) 再現性の検証

波高比分布計算の再現対象は、図-13に示すR5年度の波浪観測位置で取得された観測結果を基に、風波・うねりそれぞれについて港外のH-0を基準とした港内(H-1～H-4)の波高相関から求めた波高比(観測値)とした。再現計算結果の内、波向Sの風波・うねりの波高比分布図を例として図-14～図-15に示す。

各波向の風波・うねりの波高比分布計算結果から、港内観測地点での波高比を抽出し、観測値と比較すると図-16に示すとおりであり、風波・うねりの計算値は観測値と近似し、十分な再現性が認められた。

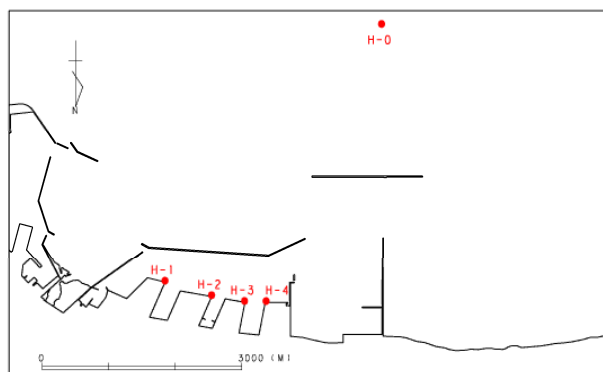


図-13 R5年度の波浪観測位置図

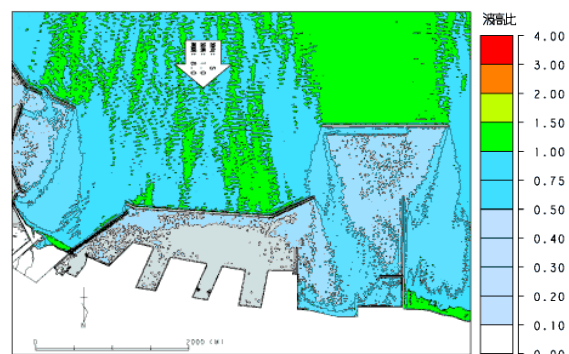


図-14 風波の波高比分布図($H_{1/3}=1.00\text{m}$, $T_{1/3}=8.0\text{s}$, $S_{\text{max}}=25$)

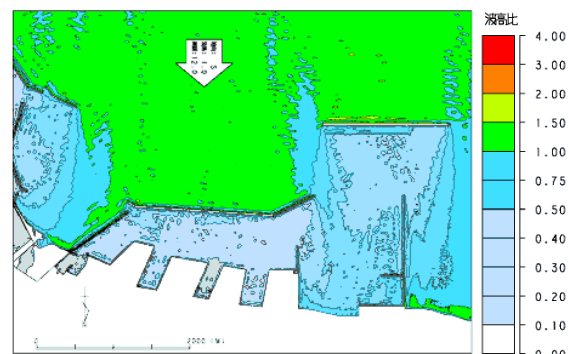


図-15 うねりの波高比分布図($H_{1/3}=1.00\text{m}$, $T_{1/3}=12.0\text{s}$, $S_{\text{max}}=75$)

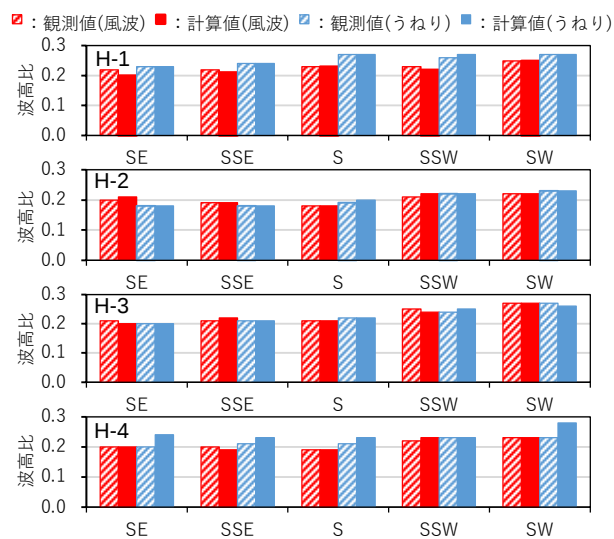


図-16 波高比の再現性の検証

(6) 従来法・簡略法による荷役稼働率評価

上述の風波・うねりの波高比分布計算結果を基に、表-7 に示す条件により、“従来法”及び“簡略法”の荷役稼働率を算定する方法を提案する。

表-7 従来法と簡略法の荷役稼働率の算定条件

項 目	従来法	簡略法
頻度表	風波・うねり混在	風波・うねり分類
波高比	風波	風波・うねり
荷役限界波高	一定	船型・船種・入射波向毎に設定

同手法の妥当性を検証するため、図-2 に示した釧路港西港区における荷役障害・施設被害の発生状況を基に、うねり性波浪による障害・被害が発生した事例について、対象岸壁の静穏度の状況を評価すると表-8 に示すとおりである。同表においては、港外の波浪諸元はうねりに分類される事例であり、障害・被害の生じた岸壁位置・船舶諸元と被害・障害の内容を示している。また、“従来法”による評価では、風波の波高比分布を基に岸壁前面波高比・波高を算定し、技術基準の荷役限界波高との対比により稼働(○)と不稼働(×)を評価している。

一方、“簡略法”では、うねりの波高比分布を基に岸壁前面波高比・波高を算定し、船種・船型・入射波向に応じた荷役限界波高との比較により、同様に稼働・不稼働を評価したものである。これらの結果を見ると、被害・障害が発生した海象条件に対し、“従来法”による評価では稼働(○)と評価され、“簡略法”による評価では不稼働(×)と評価されることが確認できる。すなわち、釧路港西港区において、うねり性波浪により港内静穏度が低下する実態を考慮して稼働率を評価する上では、“簡略法”による評価が適切であるものと考えられる。

以上の結果から、“簡略法”により荷役稼働率を算定することにより、うねり性波浪による港内静穏度への影響を明確化でき、港湾利用者が感じる港内静穏度の実態に近い荷役稼働率の評価が可能となったと言える。

5. まとめ

本報告の結論を要約すると以下のとおりである。

- ①北海道沿岸に来襲する波浪におけるうねりの割合を分析したところ、太平洋・オホーツク海で多く、釧路港では約 30%程度であった。
- ②うねり性波浪による影響を考慮した静穏度解析方法として、“標準解析法”の実務上の問題点を改善する“簡略法”を提案した。
- ③釧路港を対象に、近隣ナウファスデータを基にした新頻度表の換算方法を提案し、その妥当性を検証するとともに、風波・うねりを分類した新頻度表を作成した。
- ④風波・うねりを対象とした波高比分布計算を『NOWT-PARI Ver.5.2』により実施し、波浪観測値との比較により再現性が良好であることを検証した。
- ⑤“簡略法”によるうねり性波浪の影響を考慮した港内静穏度解析を行うことにより実態に近い荷役稼働率の評価が可能となった。

参考文献

- 1)ブシネスク方程式モデルを活用した高精度港内静穏度解析法の提案，海工論文集，Vol.55，PP.796-800(平山克也、2008)
- 2)波浪観測に基づく北海道沿岸の波浪変化について，北海道開発技術研究発表会論文，PP.549-552(平尾・水口、2021年度)
- 3)うねりによる波高の発生確率とその地域特性に関する考察，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.71，No.2，P.185-190(平山・加島・佐井・成毛、2015)
- 4)ブシネスク方程式モデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射率境界処理法の開発，海工論文集，Vol.48，PP.26-30(平山克也、2001)
- 5)平面 2 次元ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法の開発と現地適用，海工論文集，Vol.52，PP.11-15(平山克也、2005)

表-8 従来法と簡略法による荷役稼働評価の比較（一例）

発生日時			波浪諸元 (H0)		岸壁位置 バース名	船舶諸元 総トン数 (GT)	施設被害・利用障害の内容	従来法の評価				簡略法の評価			
			波高 [m]	周期 [s]				岸壁前面波高比	岸壁前面波高 [m]	荷役限界波高 [m]	評価	岸壁前面波高比	岸壁前面波高 [m]	荷役限界波高 [m]	評価
2020年	9月1日	15時20分	1.25	8.0	第4埠頭23号	20,087	うねりのため荷役中止	0.19	0.24	0.50	○	0.27	0.34	0.30	×
2021年	9月30日	14時00分	2.50	8.7	第3埠頭18号	9,858	うねりのため荷役中止して離岸	0.18	0.45	0.50	○	0.23	0.58	0.20	×
2022年	11月24日	0時00分	2.90	11.1	第2埠頭 バルク棧橋	43,006	車止め破損	0.16	0.46	0.50	○	0.21	0.61	0.50	×

※岸壁前面波高比は、従来法では「風波」、簡略法では「うねり」の波高比分布計算結果より算定

※岸壁前面波高は、H0の波高×岸壁前面波高比により算定

※評価において「○」は稼働、「×」は不稼働