

鴛泊港におけるボーディングブリッジの利用向上を図る対策検討について

稚内開発建設部 稚内港湾事務所 ○難波 佳佑
石田 遼祐
日本データサービス株式会社 平郡 聖士

鴛泊港フェリーターミナルは、荒天時も高齢者等が安全かつ快適に利用できるボーディングブリッジ（以下、BB）を備えたバリアフリー対応旅客施設として平成26年3月に整備された。しかし近年、港内擾乱によりフェリーが動揺し、乗客がBBを利用できずタラップでの乗降を余儀なくされる事象が生じている。本報告では、実態把握のための現地調査結果および擾乱要因を踏まえたBB利用率向上を図る対策港形の検討結果について報告する。

キーワード：波浪、ボーディングブリッジ、静穏度解析

1. はじめに

利尻島北部の鴛泊港は、北側のペシ岬から南側までを海岸線で囲まれた鴛泊湾に面した地方港湾で、物流・人流拠点であるとともに地域の水産基地でもある（図-1）。

本港は、来襲波浪の周期に関わらず船舶規模に応じた一定の荷役限界波高によって静穏度を評価する方法（以下「従来法」）により、フェリーが利用する岸壁（-6.0m）を含めた港内静穏度が港湾の整備水準（稼働率97.5%）を満たす港形として整備されてきた。

平成26年3月には岸壁（-6.0m）に乗客の乗下船時の利便性・安全性確保のためBBが整備されたが、港内擾乱によりフェリーが動揺しBBが使えず、タラップによる乗下船を余儀なくされる状況が発生しており、従来法による静穏度評価結果とBB利用の実態に乖離が生じていた。

平成25～26年度実施の現地観測により、鴛泊港の2つの開口部から進入する風波、うねり、長周期波が港内静穏度に影響を与えていることが示されたが、BBを利用するフェリーへの影響までの評価は行われていなかった。

このことを踏まえ、本報告では現地波浪観測および船体動揺観測により鴛泊港におけるBB利用障害の詳細な実態と要因を把握した上で、実態に則した現況再現性の高い静穏度解析手法によりBB利用率向上を目的とした対策港形を検討した結果について報告する。

2. 波浪観測

(1) 観測地点と観測期間

図-1は鴛泊港の主要施設位置、波浪観測地点を示したものである。波浪観測地点は、来襲波浪把握のための港外（以下「St. 1」）、港湾利用者への事前ヒアリング（以下「利用者ヒアリング」）により波の進入が想定された南側開口部（以下「St. 2」）、および岸壁（-6.0m）前面（以下「St. 3」）の3地点を想定し、観測地点の妥当性について有識者へのヒアリングを行った上で決定した。

観測期間は、利用者ヒアリングにおいて港内擾乱に伴うBB利用障害が多く発生するとされた10月を含む、2023年9月22日～11月17日（56日間）とした。

(2) 波浪観測結果

図-2は各地点の波向別波高出現頻度を示したものである。観測期間中のSt. 1ではNNW～NのN系の波向が卓越しており、2.0m以上の高波高もこれらの波向からの来襲が多かった。St. 2ではENE～EのE系の波向が卓越しており、来襲したN系の波浪の一部が南外防波堤南端から回折して進行している状況が推察された。St. 3ではESE～SのE



図-1 鴛泊港の施設位置と波浪観測地点

系およびS系の波向が卓越していることから、南外防波堤南端からの回折波が南側開口部から進入し、岸壁（－6.0m）に進行していると推察された。なお、港内波高は1.0m未満が多く、港外に対して減衰していた（図-2）。

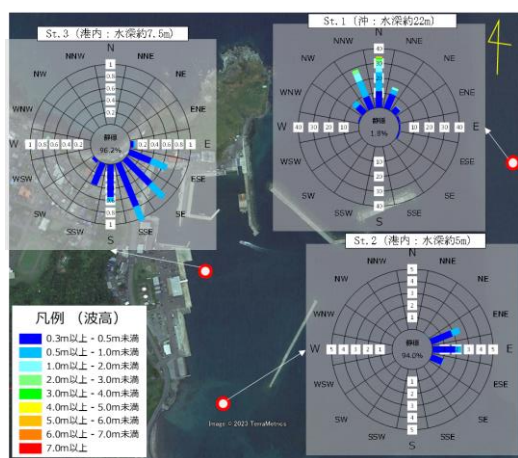


図-2 各地点の波向別波高出現頻度

(3) 港内の波浪特性

図-3、図-4、図-5はそれぞれSt.1と他2地点の波高相関、BB利用障害時の波浪の水位変動および方向のスペクトルを示したものである。港外St.1と港内各地点の波高の相関関係より、St.1とSt.2、St.1とSt.3の相関式の傾き（波高比）は、それぞれ0.141、0.138となり、港外から進入した波は、港内では波高が15%程度に減衰することがわかった（図-3）。

港内静穏度やフェリーの動揺要因を把握する上で、波の周期特性および波向特性が重要になる。波は複数の周期・方向の波が重なった不規則波のため、BB利用障害時の波浪（波高2.32m、周期8.5s、波向N）に対してスペクトル解析を行い、周期別・方向別の波エネルギー（スペクトル密度）の分析を行った。これにより、BB利用障害に寄与する周期・方向の波を明らかにすることができる。

水位変動スペクトルでは、St.1の10秒前後のピークが高く、来襲波浪中の風波・うねり成分のエネルギーが大きかったことが示された。これに加えて100～33秒程度にも緩やかなピークが確認できることから長周期波の存在もうかがわれた。一方、港内St.2～3では10秒前後のエネルギーは減衰したのに対して、100～33秒程度ではやや増幅傾向にあり、港内で長周期波の影響が大きくなっている状況が示された（図-4）。

方向スペクトルでは、St.1のN方向の10秒前後の周期帯に強いエネルギー分布がみられ、風波・うねりがこの方向から来襲していたことが確認された。これに対して、St.2ではNE～E系、St.3ではEを中心にNE～Sに風波・うねりのエネルギーが広く分布しており、港口および南側開口部からの風波・うねりの進入が示唆された。また、St.1にみられなかった長周期帯のエネルギーが、St.2および

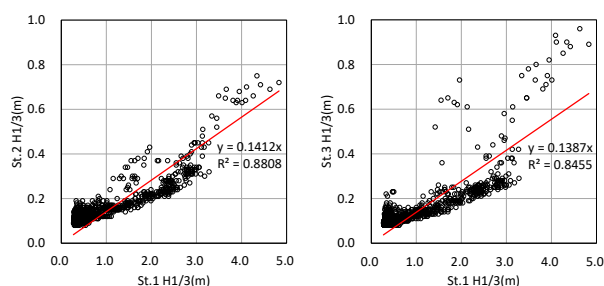


図-3 St.1と港内各地点の波高相関

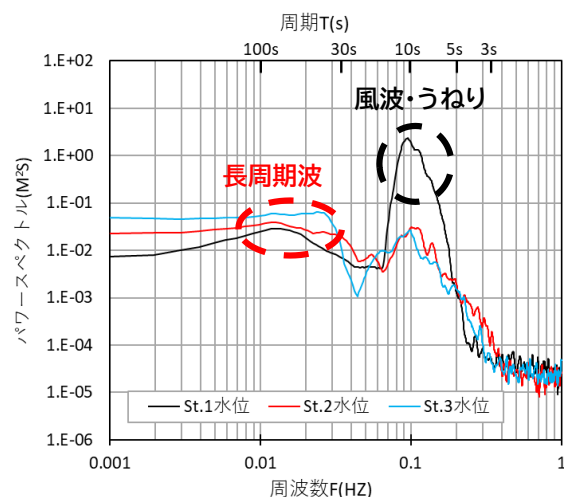


図-4 BB利用障害時の代表的な水位変動スペクトル

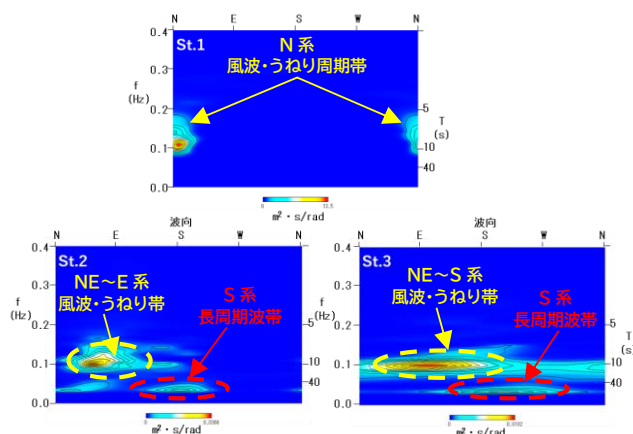


図-5 BB利用障害時の代表的な方向スペクトル

St.3ではS系を中心に分布がみられた（図-5）。これは来襲波浪中の長周期波が増幅して南側開口部から進入しているためと考えられた。なお、錨泊港の南側は海岸線で閉じられている（図-1）ため、N方向から来襲したうねりおよび長周期波が湾曲した海岸線で反射したのち南側開口部から港内に進入していると考えられた。

3. 船体動揺観測

(1) 観測場所と観測期間

船体動揺特性を把握するため岸壁(-6.0m)において、係留中のフェリーを対象として船体動揺観測を行った。観測期間は波浪観測と同一期間とした。

(2) 観測方法

一般的に船体動揺観測ではビデオカメラによる撮影が多い。ただし、ビデオカメラによる観測では船体の水平運動は高精度に解析できるものの、回転運動に対しては精度が低下する。このため、本観測ではクラウドカメラによる撮影に加えて、回転運動を高精度に観測可能な傾斜計およびモーションセンサーによる計測を同時に行い、船体動揺6成分(図-6)の解析を行った。

クラウドカメラは駕泊港フェリーターミナル二階(屋内)および駐車場際(屋外)の2箇所に設置し、フェリーの側面・背面に設置したマーカーを撮影し、それをトレースすることで船体動揺量を解析した。傾斜計・モーションセンサーは、フェリーブリッジ内に設置した(図-7、図-8)。

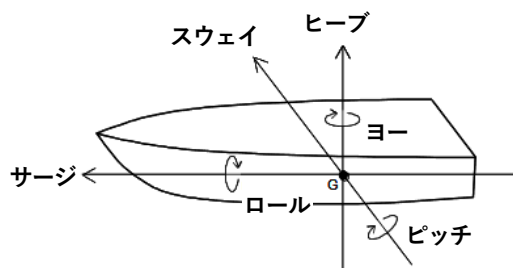


図-6 動揺6成分



図-7 クラウドカメラの設置位置

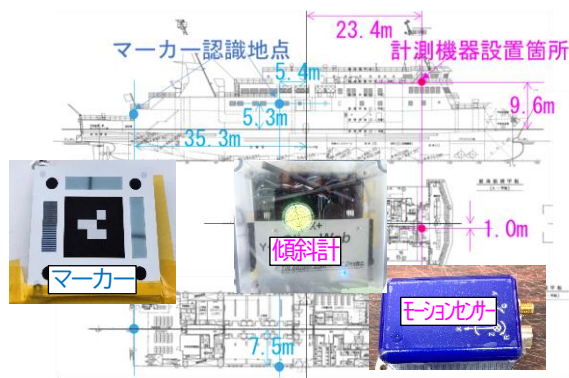


図-8 計測機器およびマーカーの設置位置

(3) 船体動揺観測結果

観測期間中に最も大きな船体動揺を生じた2023年10月18日8:32~9:08の事例について整理した。

表-1は波浪観測期間中船体動揺最大時の各地点の波浪諸元を示したものであり、船体動揺を生じた当時、波向N、波高2.26m(St.1)、周期8.3秒の波浪が来襲しており、岸壁(-6.0m)前面では港口方向のEからの波高0.19mの波として観測された。

表-2は観測された6成分の動揺量と「港内長周期波影響評価マニュアル」(以下、「長周期マニュアル」)に記載の各動揺成分の許容動揺量(基準値)を示したものである。

ロール以外の動揺5成分は基準値を下回っていたのに対して、ロールのみ $\pm 2.69^\circ$ と基準値($\pm 2.0^\circ$)を上回っていた。この結果は、ロールがBB利用時に影響が大きいとされた利用者ヒアリング結果とも整合しており、ロール成分の動揺が大きくなったことでBB利用障害が発生したものと考えられた。

以上のことから、岸壁(-6.0m)前面では波高が0.2m程度であっても船体動揺、特にロールの影響によりBB利用障害が発生する可能性があることがわかった。

このため、以降はBB利用障害に影響が大きいと考えられたロール成分に着目した検討を行う。

表-1 最大動揺観測時の波浪状況

日付	St.1			St.2			St.3		
	H1/3(m)	T1/3(s)	波向	H1/3(m)	T1/3(s)	波向	H1/3(m)	T1/3(s)	波向
2023/10/18 8:32~9:08	2.26	8.3	N	0.24	7.6	ESE	0.19	7.5	E

表-2 各動揺成分の動揺量と許容動揺量

日付	サージ		スウェイ		ヒープ	
	観測値(m)	基準値(m)	観測値(m)	基準値(m)	観測値(m)	基準値(m)
2023/10/18 8:32~9:08	± 0.14	± 0.80	$+0.35$	$+0.50$	± 0.16	± 0.80
	ピッチ		ロール		ヨー	
	観測値($^\circ$)	基準値($^\circ$)	観測値($^\circ$)	基準値($^\circ$)	観測値($^\circ$)	基準値($^\circ$)
	± 0.47	± 1.00	± 2.69	± 2.00	± 0.55	± 1.00

(4) 船体動揺のスペクトル解析

図-9は表-1の波浪が生じた際のロール成分のスペクトルを示したものである。船体動揺の周期特性を把握するために、観測期間中に最も大きな船体動揺を生じた事例について、ロール動揺に対するスペクトル解析を実施した。これによりスペクトルが大きい（船体動揺が大きい）周期帯を明確にすることができる。

- ・風波の周期帯である5秒付近に大きいスペクトルがみられた。
- ・風波・うねりの周期帯である10秒前後に最も大きいスペクトルがみられた。
- ・長周期波の周期帯である100～33秒には大きいスペクトルはないものの、緩やかに増加するスペクトルが2箇所みられた。
- ・全体的なスペクトル密度は、ここには示していない他の動揺5成分と比較して、ロールが10倍以上高く、船体動揺成分の中で影響が特に大きかった。

以上の結果から、篤泊港の岸壁（-6.0m）のBB利用障害の要因としては、フェリー船体のロールの影響が最も大きく、ロールを生じる要因としては風波、うねり、長周期波が影響していることが確認された。また、その影響の度合いはそれぞれの周期帯の波エネルギーによって異なり、スペクトルより「風波・うねり→長周期波→風波」の順に大きいと推察された。

4. BB利用率低下の要因

(1) BB利用率低下要因の分析

波浪観測結果、船体動揺観測結果を分析して、岸壁（-6.0m）においてBB利用ができなくなる3つの要因を整理した。

- ① 主港口からの風波・うねりの進入
 - ・港口方向からのE系波向の観測（図-2）
 - ・風波・うねりの周期帯にEを中心にNE～S方向にエネルギーの広がりあり（図-5）
 - ・風波・うねりによる船体動揺あり（図-9）
- ② 南側開口部からのうねり・長周期波の進入
 - ・南側開口部からのS系波向の観測（図-2、図-5）
 - ・長周期波帯にSを中心に東西方向に広がるエネルギーあり確認（図-5）
 - ・うねり・長周期波による船体動揺あり（図-9）
- ③ 南外防波堤からの反射波
 - ・南外防波堤側からのSE系波向が高頻度（図-2）
 - ・風波・うねりによる船体動揺あり（図-9）

これらは利用者ヒアリングでも港内擾乱要因として挙げられており、現地観測によって裏付けられた（図-10利用者ヒアリングによって明らかにされた港内擾乱要因をまとめたもの）。

岸壁（-6.0m）におけるBB利用率を向上させるためには、風波、うねり、長周期波、それぞれが港内静穏度

与える影響を把握したうえで、それぞれに対応した対策を検討する必要がある。

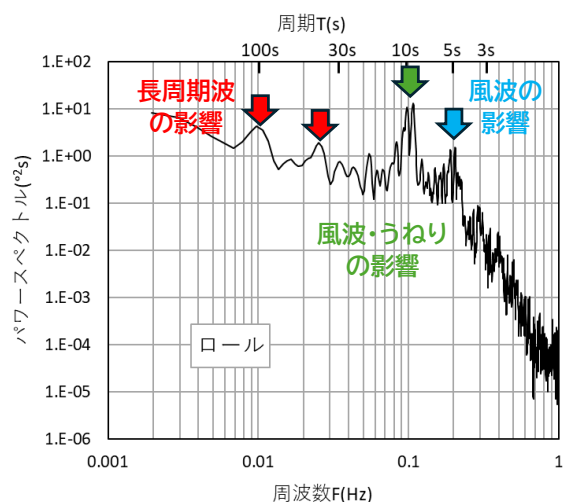


図-9 ロール成分のスペクトル



図-10 利用者ヒアリングによるBB利用障害要因

(2) 現状のBB稼働率

BB利用を想定した静穏度を適切に評価するためには、現状でのフェリー乗降時にBB利用ができた確率（以下「BB稼働率」）を把握することが重要である。

BB稼働率は、過去5か年（2019～2023年度）のフェリー運航記録から、フェリー運航日およびBB利用中止日をカウントし、下式に代入することで算定した。

$$\text{BB稼働率 (\%)} = \frac{\{1 - \text{BB利用中止日数} / \text{フェリー運航日数}\} \times 100}{}$$

BB稼働率は年度によって94～97%程度と変動しているが、5か年平均は95.0%（BB利用中止日数18日）となった（図-11）。

5. 静穏度対策と効果検証

(1) 静穏度の検討方法

「長周期マニュアル」には、擾乱要因として風波、うねり、長周期波の影響が考えられる場合、それぞれを分

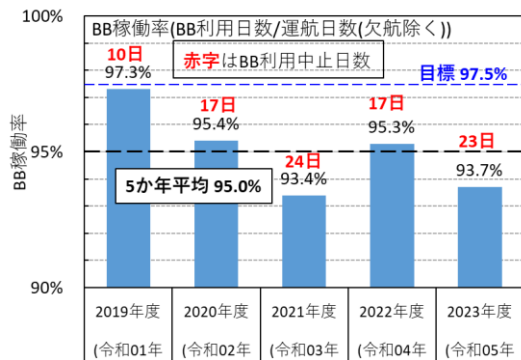


図-11 過去5か年のフェリーターミナルのBB稼働率

けて計算を行い評価することが望ましいとされている。

錨泊港の岸壁（-6.0m）でBB利用ができなくなる要因として風波、うねり、長周期波が想定されていることから、本検討ではこれらの要因別に静穏度解析を行った。

また、評価に用いる荷役限界波高についても、現地観測結果により港内波高と船体動揺の関係が整理されていることから、船体動揺解析を行い風波、うねり、長周期波それぞれ個別に設定することとした。

この方法は「長周期マニュアル」において荷役稼働率計算方法の中で詳細解析法として示されているものであり、静穏度評価において妥当な方法である。

(2) 静穏度対策の方針

図-12はBB利用率低下要因解消のために検討した対策港形を示したものである。

港内擾乱要因は、①主港口からの風波・うねりの進入、②南側開口部からのうねり・長周期波の進入、③南外防波堤からの反射波が想定されており、それぞれの対策を複合させて静穏度を向上させる必要がある。

まず①主港口からの進入波対策として最も有効なのは、港口幅を狭くして進入波自体を低減することである。しかし、フェリー航路であることから、フェリー操船上これ以上狭くすることは困難である。このため港口幅は現状のまま、進入波による港内多重反射への対策で対応することとした。②南側開口部からの進入波対策は、船揚場横に突堤を配置した。なお、配置した突堤による港内多重反射の増幅が懸念されるため、突堤港内側を直立消波構造とした。③南外防波堤からの反射波対策として、南外防波堤港内側に消波ブロック（港内消波工）を設置した。

なお対策港形の静穏度はフェリー利用岸壁（-6.0m）の稼働率にて評価した。目標稼働率は「港湾の施設の技術上の細目を定める告示」の規定を採用し97.5%とした。

(3) 風波・うねりの分類

「港湾の技術上の基準・同解説」より、うねりの定義を「周期8秒以上かつ波形勾配0.025未満」の波として、

この条件を満たす波をうねり、それ以外を風波と判定して、全波浪に対する波向別波高・周期の出現頻度表を風波・うねりの頻度表に分割した。

波の周期は波浪変形に与える影響が大きいため、適切に設定する必要がある。このため、風波・うねりの代表周期は、静穏度の目標稼働率97.5%に相当する累加出現波高に対応した周期を波高-周期相関により試算した（表-3）。

試算した結果から本検討では、風波：6秒、うねり：9秒を代表周期として設定した。

(4) 船体動揺解析と荷役限界波高

従来法では荷役限界波高を周期に関わらず0.5mとしていた。これはBB利用に対する限界波高とは異なるため、BB利用実態に則した評価ができなかった。

本検討では、船体動揺解析を行い、許容動揺量から算定した風波・うねり別の荷役限界波高を設定した。

船体動揺解析の係留条件・解析条件を図-13に示す。荷役限界波高は、風波6秒、うねり9秒の波に対し0.05m刻みで波高を変化させた船体動揺解析を実施し、得られた各波高に対する動揺量を波高-動揺量相関図として整理した。動揺成分の中でも最も動揺が大きかったロールの許容動揺量2.0°に対する荷役限界波高は、風波0.4m、うねり0.2mとなった（図-14）。

(5) 静穏度解析とフェリー岸壁稼働率評価

対策港形の効果は、「ブシネスクモデルによる波浪変形計算（NOWT-PARI Ver5.2）」を用いた静穏度解析にて検証した。静穏度解析における対象波向は、錨泊港で出現する風波6波向（NNW, N, NNE, NE, ENE, E）、うねり3波向（N, NNE, NE）である（表-3参照）。

計算結果の一例として、風波（周期6秒、波向N、波高比計算のため波高1.0m）の対策港形と現況港形との波高分布計算結果について波高の差分をとることで、対策港形の波高低減効果を図-15に示した。

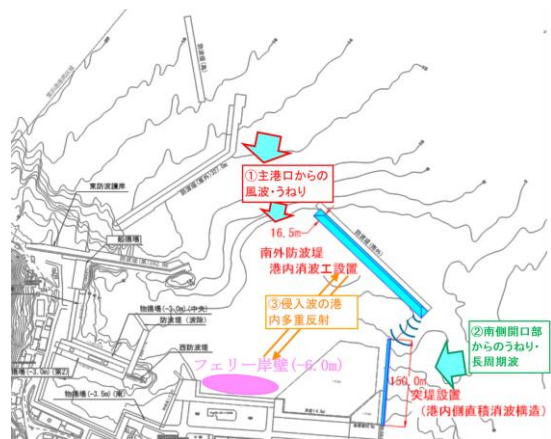


図-12 対策港形

表-3 風波・うねりの代表周期算出方法概要

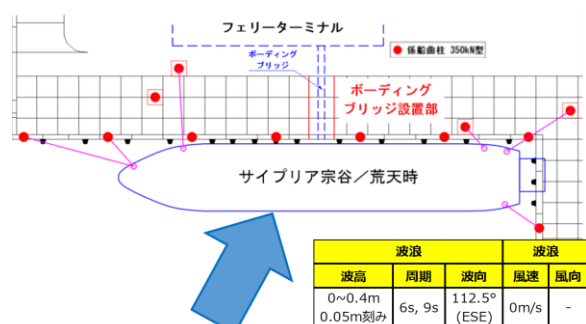
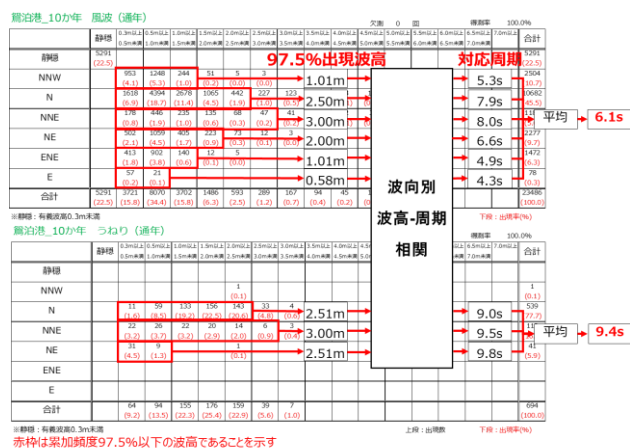


図-13 船体動揺解析 係留条件

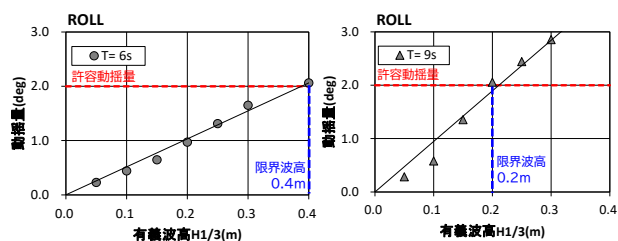


図-14 風波・うねり時の荷役限界波高

これによると新設した突堤の港内側の波高低減が大きく、突堤による南側からの進入波低減と直立消波構造による消波効果が相乗的に効いていると推察された。一方、南外防波堤内では、港内消波を設置した効果により波高低減が大きく、反射波対策として有効であると推察された。岸壁(-6.0m)前面の波高についても、これらの相乗効果によって低減した。

評価対象の岸壁（-6.0m）の稼働率に関しては、現況における BB 稼働率の実態が 95.0%であったのに対して、静穏度解析による現況再現計算では95.3%と計算され、計算の再現性が良好であることが確認された。対策港形における岸壁（-6.0m）の稼働率は 97.5%と現況に対して 2.2%向上した。これは南側開口部からの進入波およ

び港内反射波に対して効果的な港形であることを示している。また、現況の BB 利用不可日数が 18 日/年であったのに対して、対策港形では 9 日/年まで低減される結果となっており、BB 利用率向上においても効果的な対策であることが示された（表-4）。

なお長周期波に対する静穏度に関しては現在検討中である。

6. おわりに

本報告による主要な結論は、以下のとおりである。

- ・波浪・船体動揺観測および利用者ヒアリングより港内擾乱要因は主港口からの風波・うねり、南側開口部からのうねり・長周期成分、南外防波堤からの反射波によることがわかった。
- ・風波・うねり別に設定した荷役限界波高を用いた静穏度解析により稼働率を算出することで、BB利用実態に則した評価および適切な対策港形を提案できた。
- ・対策港形における稼働率は97.5%（BB利用中止日数9日）を満足し、現況港形より2.2%向上した。

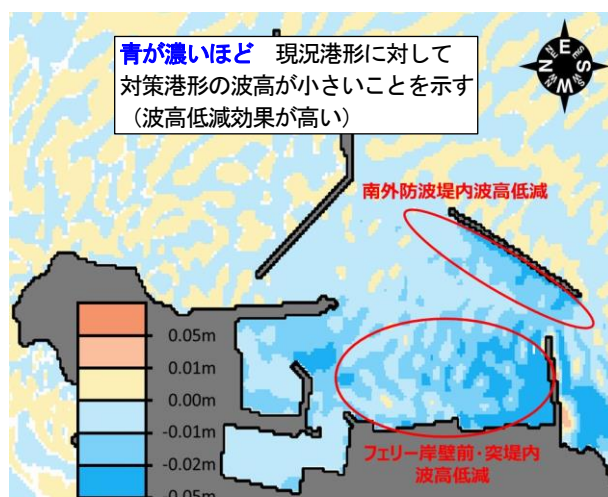


図-15 波高差分の分布 (対策港形－現況港形)

表-4 各港形における稼働率とBB利用可能日数

施設名	限界 波高(m)	現況港形			対策港形案	
		稼働率(%)	BB利用不可 (日/年)		稼働率(%)	BB利用不可 (日/年)
港町-6.0m 岸壁	風波:0.4 うねり:0.2	95.3	18		97.5	9

参考文献

- 1) 財団法人 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（2004）
- 2) （公社）日本港湾協会：港湾の技術上の基準・同解説