波浪データを用いた係留限界の二段階予測 による短距離フェリーの最適運航

笹 健児¹・竹内 海智²・田村 政彦³・三井 正雄⁴

¹正会員 神戸大学准教授 海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

E-mail:sasa@maritime.kobe-u.ac.jp

²神戸大学大学院 海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

E-mail:177w315w@stu.kobe-u.ac.jp

³株式会社ソニック 営業部 (〒190-0012 東京都立川市曙町1-18-2)

E-mail:masahiko-tamura@u-sonic.co.jp

⁴正会員 株式会社ソニック (〒190-0012 東京都立川市曙町1-18-2)

E-mail:masao-mitsui@u-sonic.co.jp

港内静穏度は係留船舶の長周期動揺により評価する必要性が示されるもののほとんど実現していない。航海時間が1時間に満たない短距離航路の場合、停泊時間の方が長く港内係留時の安全性から見た最適運航が必要と思われる。本研究では沖縄県の離島フェリーを対象に運航困難となる台風パターンを整理し、両港内にて波浪を連続計測した結果を分析した。この結果、長周期波の存在が明らかとなり、1時間先の周期帯別波高に対する一段階目の重回帰予測式を構築した。つぎにフェリーの船体動揺を数値シミュレーションにて再現し、これと周期帯別の波高を説明変数としたsurgeおよびswayを推定する二段階予測式を構築した。2015年度のデータをもとに構築した予測式を2016年度のデータに適用し係留限界を1時間先予測した結果、85～93%の確率で予測可能であることを示した。

Key Words : mooring criteria, monitoring system, long-period waves, short-distance ferry, ship operation

1. 研究の目的

四方を海に囲まれた日本は従来から海上輸送の重要性に議論の余地はなく、エネルギー、食糧、原料輸送等の多くを船舶輸送に依存している。東日本大震災や熊本地震などにより港湾の物流機能が麻痺状態となり、地域社会は大混乱に陥った。これより輸送の定常的な安定供給は我々の日常生活において最重要項目の一つであることを改めて認識する機会となった。海上輸送は他の輸送手段に比べ、気象海象の影響を強く受け、時には安全性および定時性に大きな支障をきたすため、船舶に対し航海中だけでなく港内停泊中も安全な水域を確保することが重要な命題である。1990年代を中心に世界各地の外洋性港湾にて船舶の係留問題が報告され、波高数センチ～数十センチ、周期1～2分の長周期波の特性や船体動揺との関係性が詳細に議論された¹⁾。新たな係留システムや防波堤設計などが対策工として提案され^{2,3)}、現場では港内静穏度の大きな向上が期待された。しかし、20年以上が経過した現在もこれらが具現化している事例はわずかであり、多くの外洋性港湾では今なお係留船舶の安全性が確保されず、現場にて対応に苦慮する状況が続いている。一方、大洋航海中の船舶については航海ルートごと

に遭遇しうる気象海象の予測情報をもとに船舶の安全性、航海時間や燃料消費量といった経済性、近年ではCO₂排出量など環境面の国際規制を満足した複雑な運航が要求され、科学的なシミュレーションにより最適航路を提案するウェザールーティングが実用化し⁴⁾、船員の経験則だけに依存しない運航方法が根付きつつある。ただしウェザールーティングは航海中のみが評価対象であり、港内係留時の安全性評価は考慮されていない。日本には多くの離島が存在し、離島との唯一の交通手段としての短距離フェリーが重要な役割を果たしている。これらは航海時間が数十分から1時間未満であり、港内での停泊時間は航海時間よりも長く、短距離フェリーの最適運航はむしろ港内の安全性を主体に評価すべきと考える。本研究で対象とする沖縄県の離島と本島を結ぶ短距離フェリーでも係留が時折困難となり、対応に苦慮している。沖縄県は平成26年度に調査委員会を立ち上げ⁵⁾、港内波浪のモニタリングシステム構築の提言より、翌年度から波浪観測を開始している。本研究では、同様な経緯を辿りながら問題の本質を解決するに至らなかった過去20年間における多くの事例を教訓とし、単なる波浪観測の実施に留まらず、運用者が現場での確かな運航判断を可能とする係留限界の二段階予測の構築と検証を目的とした。

2. 離島フェリーにおける運航実態と問題点

沖縄県は位置関係より春季から秋季まで台風が通過または接近し、冬季は大陸の高気圧と日本付近の低気圧により気圧傾度が大きくなるため、年間の多くが船舶に影響する気象海象となりうる。図-1に本研究で対象とした離島港湾（I港）と沖縄本島側にある港湾（M港）の位置関係およびI港およびM港の形状図を示す。図に示すとおり両港とも東シナ海に面し、両港を結ぶフェリーは橋梁が建設されていないI島にとって唯一の交通手段となる。I港はM港から北西約9kmに位置しており、通常時は1日4便、夏季やイベント実施時などの繁忙期は1日5～10便就航している。航海時間は片道30分であり、港に着岸後、30分～90分間停泊し、17:30に最終便がI港に入港後、翌朝8:00まで港内に停泊する。同船型を2隻保有しているが、通常時は1隻で運航し、1週間ごとに交互に使用している。よって航海時間よりも港内の停泊時間の割合が高く、フェリーの最適運航は係留時の安全性を最優先に検討する必要があると考えられる。特にI港は港口が南側を向いた形状であり、東シナ海を伝播する波浪影響が懸念される。フェリーの運用状況についてヒアリング調査を実施し、問題点を以下のように把握した。

- (1) 台風が近距離で接近するような状況であれば港外避泊の対応を取るため、大きな問題は生じていない。一方、台風の接近前または通過後のような状況にて、一見穏やかに見える海面状態の中、係留フェリーが水平方向に長周期かつ大振幅の船体動揺が卓越し係留が不可能となる事象が時折発生している。
- (2) 台風の接近、強風または高波浪のように荒天を明確

図-1 離島航路および港湾の位置関係図

に認識できない場合、利用客にフェリー欠航の理由を理路整然と説明できず、この対応に苦慮している。

- (3) 両港にて係留が困難な場合、図-1に示すU港まで90分航海し、緊急時の避難港としている。現状では波浪情報を活用して係留限界を判断できる具体的な手段がなく、欠航または運航再開を自信を持って判断できない。今も実際に船を入港・着岸させた後の様子で決めている。

調査委員会にて波浪計測、船体動揺の現地観測、波浪の港内変形シミュレーションが実施された。この結論として、台風や低気圧時に長周期波の存在が確認されたものの、フェリーの船体動揺に対する影響は微小であるとされ、対策として防波堤の拡張のみ提案している。この結論は(1)や関連研究の内容と矛盾し、再検証が必要と考える。防波堤の拡張は莫大な予算が必要であり、昨今の社会情勢より実現は容易でない。計測された両港の港内波浪データを分析し、フェリー欠航となった状況を運航台帳と比較しながら長周期波の特性を再整理する。

3. 港内波浪のモニタリングシステム

平成28年度よりI港およびM港の港内に図-2に示すような波浪計測およびモニタリングシステムを整備し、現在も稼働中である。両港ともフェリー岸壁の近くに空中発射型の超音波波高計（US-500）が設置されており、計測データは岸壁内に設置配線されたケーブルを通じ港内に設置した波浪モニタリング装置に転送・保存される。計測データは波高計位置での水位変動がサンプリング周期0.5sごとに記録され、20分間を1データ（ $20 \times 60 / 0.5 = 2400$ 点）として保存される。

4. 台風のパターン整理

フェリーが欠航となった時の台風パターンを整理する。気象庁から得られる台風の中心気圧と位置データより気圧ごとの経路図を作成し、傾向を分析した。図-3に2015年度にフェリー欠航となった台風経路を示す。台風の中心気圧は図中の円の色にて表現しており、黒色はそれぞれの台風の中心気圧の最低値を、白色は比較的高い中心気圧を示す。これよりフェリーの係留に影響を及ぼすまたは影響しない台風は以下の三種類に大別できる。

- (1) 北上し短距離で沖縄を通過する台風（パターンA）

図-2 波浪モニタリングシステムの設置状況（I港）

図-3 フェリー欠航となった台風経路（2015年度）

(2) 沖縄の南側を数百キロ離れて西進し、さらに中国大陸で大きく転向する台風（パターンB）

(3) 東経135°より東側、北緯20°より南側に位置・通過する台風（パターンC）

フェリーが欠航に至るのはパターンAおよびパターンBであり、図中にパターンCの台風は見られない。パターンAの場合、警報や避難勧告が発令され、欠航対応が通常なされるが、パターンBの場合、警報や避難勧告が発令されるとは限らず、荒天が認識しづらいゆえフェリーへの影響を予測できず危険な状況に陥ることが多い。

5. 長周期波の特性と長周期船体動揺の再現推定

(1) 長周期波の特性分析

港内波の観測データをスペクトル解析し、長周期波の有義波高は次式より求められる。

$$H_{L1/3} = 4.00 \sqrt{\int_{f_L}^{f_U} S(f) df} \quad (1)$$

ここで、 $S(f)$ は港内波の周波数スペクトル、 f は周波数、 f_L および f_U は長周期波の下限周波数（ $=1/500$ ）および上限周波数（ $=1/30$ ）を示す。同様の計算をそれぞれの周波数帯にて表-1に示す設定で有義波高を求めた。ここで係留限界の判断が困難であると言われるパターンBの台風にて欠航した2015年8月8～9日および2016年9月13～15日における両港内にて計測された $H_{L1/3}$ 、 $H_{S1/3}$ および $H_{W1/3}$ の変化を図-4および図-5に示す。2015年8月のケースは $H_{L1/3}=0.05\sim0.1\text{m}$ 、 $H_{S1/3}=0.1\sim0.5\text{m}$ 、 $H_{W1/3}=0.1\sim0.6\text{m}$ であり、 $H_{L1/3}$ および $H_{S1/3}$ は両港ともほぼ同じであるのに対し、 $H_{W1/3}$ はM港では1/3以下となっている。一方、2016年9月のケースも類似した傾向であるが、長周期波を含めた変化が2日目のところで急になっている。これらより台風が沖縄から数百キロ以上離れた場合にも両港内に数センチ～10センチ程度の長周期波および周期12～30sのうね

表-1 周期帯別の有義波高に関する設定

有義波高	下限周波数 $f_L(\text{Hz})$	上限周波数 $f_U(\text{Hz})$
$H_{L1/3}$	1/500	1/30
$H_{S1/3}$	1/30	1/12
$H_{W1/3}$	1/12	1/8

図-4 両港における港内波の変化（2015年8月8～9日）

図-5 両港における港内波の変化（2016年9月13～15日）

りも0.1～0.4mが存在する一方、周期8～12sの成分波はI港では0.2～0.6mであるのに対し、M港では0.2m以下と小さい。これはM港の地形および防波堤形状により低減されたと考えられ、周期12sより長い周期帯の波浪はI港と大きな違いは見られないことが分かる。

(2) 係留フェリーの船体動揺の再現・検証

港内波の解析結果をもとに係留フェリーの船体動揺を再現する。I 港およびM港ともに図-6に示すとおり、3本の係留索と左舷錨鎖にて係留している。岸壁には船体中央付近に空気式防舷材が取り付けられているが、通常時にフェリーと接触はしておらず、swayがある程度大きくなった時のみ反力が生じる。運航中に係留時間が30分の場合は錨鎖を使用しないが、係留力の前後バランスを取るためと思われる。また係船ウィンチの個数、位置等の制約よりプレストラインやスプリングを取っておらず、前後および左右方向への係留力が十分確保できていないように考えられる。船体動揺の卓越によりフェリーがI港とM港の両方に係留できない場合、両港から約90分かけてU港に避難し、運航再開まで待機している。入射波向は防波堤先端と船のなす角度よりI港では50°、M港では30°と定義した。長周期波も含めた不規則波中における船体動揺はインパルス応答を考慮した時系列解析を使用する必要性が明確にされている⁷⁾。流体力と波浪強制力を三次元グリーン関数法で周波数領域にて解析した結果を時間領域に拡張した6自由度の運動方程式を用いる。

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ij} + m_{ij}(\infty)) \ddot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{X}_j(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + K_{ij}) X_j(t) = F(t) \quad (i,j=1\sim 6) \quad (2)$$

ここで、 M は船体質量、 C は復原力係数、 K は係留力係数、 $F(t)$ は時刻 t における波浪強制力、 X は船体変位、 $m(\infty)$ および $L(t)$ は次式で示される不変付加質量およびメモリー影響関数を示す。

図-6 両港におけるフェリーの係留図

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} q_{ij}(\omega) \cos \omega t d\omega \quad (3)$$

$$m_{ij}(\infty) = p_{ij}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} L_{ij}(t) \sin \omega t dt \quad (4)$$

ここで、 $p(\omega)$ および $q(\omega)$ は角周波数 ω における付加質量および減衰係数である。係留索は直径50mmの合成繊維であり、錨鎖張力は上田らのカタナリー理論⁹⁾を用い変位復元力の特性を考慮した。ここでは船体動揺の実測値が存在しないため、式(2)の計算値を過去の精度検証の実績⁷⁾より実測値相当と仮定する。大まかな検証として、過去の欠航日について再現計算し、係留限界を超えるか否かを確認した。フェリー関係者へのヒアリングにて、係留困難となる判断指標はsurgeおよびswayの振幅が1.5mを超えることと定義している。よってシミュレーションにて得られるsurgeまたはswayの時系列中に発生する最大振幅が1.5mとなれば係留限界と見なし、欠航判断について妥当性を検証した。図-7および図-8にsurgeおよびswayの最大振幅 X_1 および X_2 の計算結果と係留限界の関係を表す。2015年8月のケースは両港ともsurgeおよびswayで係留限界を大きく上回っており、欠航しU港へ避難したという運用上の対応を裏付けている。2016年9月のケースはI港では係留限界を超えている時間が長い、M港は2～2.5日以外はsurgeおよびswayとも係留可能な範囲にあり、欠航しM港で待機した結果を再現できている。以上からシミュレーション結果は現場の係留限界を概ね再現できていると見なし、実測相当値として議論する。

6. 二段階予測による係留限界の推定と検証

フェリーの運航判断を高精度化するため、一段階目の予測として両港内における周期帯別の波高について、1

図-7 船体動揺と係留限界の検証（2015年8月8～9日）

図-8 船体動揺と係留限界の検証(2016年9月13～15日)

時間先の値を予測する。これをもとに $H_{L1/3}$, $H_{S1/3}$, $H_{W1/3}$ を説明変数とした X_1 , X_2 に関する重回帰推定式を構築，船体動揺を推定，係留限界を判定する。図-9に平成27年度にフェリーが欠航した24日間における1時間先の $H_{L1/3}$, $H_{S1/3}$, $H_{W1/3}$ を単回帰予測した結果と実測値の比較を示す。両港とも3種類の波高について1時間先予測値と実測値の相関係数が0.76～0.9であり，予測精度も1時間先であれば高い状態を維持できている。これをもとに船体動揺量 X_1 および X_2 の重回帰式を次式のようにモデル化する。

$$X_i = a_i H_{L1/3} + b_i H_{S1/3} + c_i H_{W1/3} + d_i \quad (i=1,2) \quad (5)$$

ここでI港およびM港における重回帰係数 a , b , c , d は2015年度のデータより図-9に示すとおり求められた。係数 a が他の係数の4～6倍大きい値であり， $H_{L1/3}$ が係留フェリーの船体動揺に対する支配要因となっていることが分かる。図-9に示す1時間先予測値を式(5)に代入すれば，1時間先の X_1 および X_2 が求められる。式(5)にて2016年度に欠航した33日間の予測を試みる。図-10に両港における X_1 および X_2 の予測値とシミュレーションにて求めた実測相当値との比較を示す。図中にて赤でマーキングされた領域は実測相当値が1.5mの係留限界を超えているにもかかわらず予測値が1.5m以下に過小評価した場合であり，予測失敗と定義する。また青でマーキングされた領域は実測相当値が1.5m未満であるのに対し，予測値が1.5mを超えて過大評価した場合に相当する。予測失敗および過大評価を除いた二段階予測の的中率は85～93%となっており，両港における1時間先の係留限界を約90%の精度で予測可能である。図-11に最適運航を実現するための流れを示す。判断1で両港とも係留不能となる場合，M港のみ係留可能となる場合はU港またはM港に避難する。判断2で欠航中のフェリーが運航再開を決断するタイミングは難しいが，現状のようにU港からI港またはM港に一旦着岸し現場の状況を見極める作業が不要となる。

図-9 港内波の1時間先予測値と観測値の相関関係(2015年度，I港およびM港)

判断1にてU港に避難中のフェリーがI港またはM港に向かったがまだ係留できない場合，再びU港へ戻る。この往復航海と接岸作業に3.5時間を要し，人件費，燃料費等が48万円必要となる。2016年度の欠航日数は33日あり，欠航および運航再開の判断を午前午後の2回行う場合，仮に全ての判断に失敗すれば年間の損失額は48万円×33日×2回=3,168万円に加え，船舶や港湾の設備に損傷が生じた場合はその補償額が発生する。一方，33日間を全て欠航すれば，1日あたりの期待収入額は180万円であり，180×33日=5,940万円の機会損失となる。二段階予測での失敗率は図-10より7～15%であり，損失額は3,168万円×(0.07～0.15)=221～475万円および欠航日数分の機会損失となる。当該システムを運航管理者が運用し，1時間先の予測対応を適宜，乗組員に指示することで経験則に依存する従来での問題点の改良が期待できる。

図-10 二段階予測式によるsurgeおよびswayの予測値と実測相当値の関係と的中率（2016年度欠航時）

図-11 二段階予測によるフェリーの最適運航フロー

7. 結論および今後の課題

- (1) フェリー欠航が発生する台風として、沖縄に近接する場合（パターンA）と沖縄から数百キロ南方の海域を北西進する場合（パターンB）に大別される。
- (2) 両港の港内波浪データより周期30s以上の長周期波の存在が確認された。またこれが係留限界を超える主要因であり、現場にて欠航に至った状況も再現検証された。
- (3) 両港内での周期帯別の波高に対する1時間先予測値を重回帰分析した。予測値と実測値の相関係数は0.76～0.9

であり、実用的な信頼性を有する。この予測値をもとに係留フェリーの船体動揺を推定する重回帰式を構築、係留限界の二段階予測の概念を提案した。2016年度の欠航状況を予測し、的中率は85～93%であった。これを現場で活用する場合、波浪モニタリングシステムとの連携により極めて安価な運航判断が可能となる。

(4) 本研究では短距離輸送を対象とし、1時間先予測を考えたが、予測手法の高度化で前広の判断ができればさらに有効となる。また係留問題に関し、研究成果が現場でほとんど実現していない背景を調査する必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたり、フェリー運航の詳細な資料およびデータを提供していただいた沖縄県の松本荘氏（当時）、株式会社イーコム宮城順一氏に深く感謝の意を表す。本研究は平成28年度に神戸大学と株式会社ソニックの共同研究として実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲：波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測，海岸工学論文集，第41巻，pp.71-75，1994。
- 2) 池内章雄・高山知司・三井道雅・森屋陽一：長周期波対策施設による静穏度向上効果，沿岸技術研究センター論文集，No.9，pp.37-40，2009。
- 3) 白石悟・久保雅義・上田茂・榊原繁樹：係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策，海岸工学論文集，第42巻，pp.941-945，1995。
- 4) 庄司りり：船舶のウェザールーティング（最適航路選定）における要素技術，オペレーションズリサーチ，pp.599-605，2013。
- 5) 沖縄県：平成27年度港湾機能向上検討業務・第1回検討会資料，33p.，2015。
- 6) 上田茂・白石悟：カテナリー理論による最適係留鎖の選定法および計算図表，港湾技研資料，No.379，55p.，1981。
- 7) 久保雅義・笹健児・白石悟・榊原繁樹：数値計算手法が長周期波作用下における長周期船体動揺へ及ぼす影響について，海岸工学論文集，第44巻，pp.236-240，1997。

(2017.3.15 受付)

OPTIMAL ROUTING WITH TWO-STEP PREDICTION OF MOORING CRITERIA

Kenji SASA, Kaichi TAKEUCHI, Masahiko TAMURA and Masao MITSUI

It is inevitable to maintain safe area inside harbor for ships. However, many ports still have operational difficulty related on moored ship motions. This study aims to contribute for the optimal ship routing from viewpoint of mooring criteria. The correlation coefficients are 0.75-0.9 between 1-hour ahead predicted and measured wave heights. Suspensions of ferry service are accurately simulated here. The two-step prediction of mooring criteria consists of these parts, and enables to estimate ship motions of moored ferry in the ports in Okinawa 1 hour ahead. The strike ratio of prediction is 85-93% for 33 days that the ferry service were canceled in 2016. It is expected to contribute as the optimal routing of short-distance ferry, and does not require big investments of building breakwaters or new mooring facilities.