

瀬戸内海の離島での強潮流時の船舶運航から見た港湾計画のあり方

Port Planning Considering Ship Operation under Strong Tidal Currents at Isolated Islands in the Seto Inland Sea

笹 健児¹・日比野 忠史²・金 キョンヘ³・水井 真治⁴

Kenji SASA, Tadashi HIBINO, Kyunghoi KIM and Shinji MIZUI

The Seto Inland Sea is located among the main land, the Shikoku and the Kyushu. There are many isolated islands there, so it makes very complicated tidal conditions. Many of those isolated islands still depend on the maritime transportation. In this study, the difficulty of berthing due to strong currents is researched from viewpoint of port planning. At first, the influence on ferry operations due to oceanographic conditions is interviewed to the local ferry operators. Then, tidal currents and some other parameters have observed around the ferry port which the ferry berthing is difficult. The numerical simulation of ship motions is constructed to reproduce the situations under strong tidal currents. Simulated results can almost explain the difficulty of berthing caused by tidal currents. Finally, the new evaluation method of the port planning is proposed as the safety of ferry berthing in the Seto Inland Sea.

1. 研究の目的

瀬戸内海は古来より海上交通の要所として発展し、多種多様な船舶が行き来している。一方、瀬戸内海には橋梁の架かっていない離島が未だ多く存在し、生活全般を海上輸送に強く依存せざるを得ない。これらの地域にとって、海上輸送の定時性・安全性は最重要課題と言える。しかし、瀬戸内海は静穏であるという一般概念や海難事故を人為的なミスとしてのみ分析される現状（海難審判庁、2008）より、気象海象に着目し船舶運航の困難さを検討した例は非常に少ない。瀬戸内海は本州、四国、九州に囲まれ無数の島嶼部が位置する地形のため、大きな潮位差や多くの狭水域のため強潮流が卓越する海域も多く、離島の海上輸送も強潮流で船舶運航が困難となる状況が見られる（Sasaら、2005）。本研究では瀬戸内海の離島と本州を結ぶフェリー運航を対象とし、気象海象と船舶運航の関係について現地調査により問題点をまず把握した。これをもとに潮流が卓越する島の北東部にて潮流等の定点観測を数ヶ月間継続すると同時に小型船による移動観測を大潮時に実施し、海象および潮流特性の把握に努めた。また観測結果を検証するため、付近海域を計算領域とした流れ場の数値解析も行い、観測結果の妥当性についても検証した。つぎにフェリー・棧橋に着岸する局面を対象にフェリーの船体運動を数回にわたって現地観測し、操船パターンおよび運動特性を取りまとめた。

以上の結果をもとに潮流を外力とした着岸時の船体運動を時系列にて再現できる船体運動の数値解析モデルを構築した。潮流および船体条件ごとによる着岸の困難度を定量的に評価する手法を検討し、強潮流が卓越する海域での港湾計画のあり方について考察を行った。

2. 船舶運航に関する現地調査

ここでは瀬戸内海の芸予地区に位置する離島を対象に検討を行うこととする。図-1に対象としたOK島まわりの地形図を示す。



図-1 OK島まわりの地形図

OK島は本州と四国の間に位置し、周辺に非常に多くの離島が存在する。また本州、四国、離島間でのフェリーおよび高速艇による海上輸送網が構築されている。四国側には来島海峡が位置し、強潮流の影響を受けやすい。本研究ではOK島の北東部に位置するT港と本州を結ぶフェリー輸送を対象に船舶運航に関する現地調査を実施した。図-1よりT港は対岸の島との狭水域に位置し、図-2に示すようにフェリーは棧橋に対して縦方向に接岸する方法を採用している。

- 1 正 会 員 博 広島商船高等専門学校准教授 商船学科 (商船)
- 2 正 会 員 博(工)広島大学大学院准教授 工学研究科 社会環境システム専攻
- 3 学生会員 修(工)広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 博士後期課程
- 4 博 広島商船高等専門学校教授 商船学科 (商船)

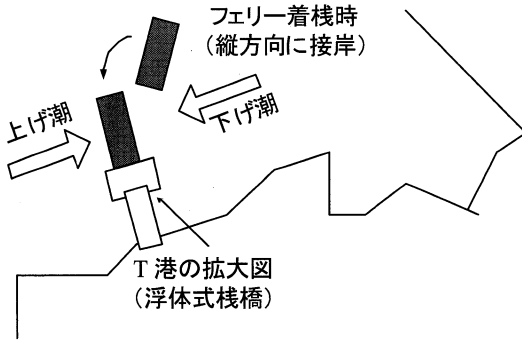


図-2 T港の拡大図およびフェリーの着岸方向

図よりT港は大きな潮位差に対応した浮体式の栈橋であり、海底からチェーンを用いて係留している。潮流中のフェリー運航に関し、関係者へのヒアリングにて問題点を整理したところ、以下の事項が明らかとなった。

- ①上げ潮時には船が北東方向に圧流（海事分野で圧流とは船が機関・舵を使用しているが、潮流により流される現象のことを指す）され、着岸時の姿勢制御が非常に困難となる。現状では図-3のように反対側に大きく舵を切りながら機関を前進にかけて圧流を防ごうとしている。
- ②下げ潮時には南側に圧流されるため、図-3に示すような潮流による圧流を利用した方法を取っている。まず栈橋に対して大きく左方向に舵を切り、下げ潮流を船尾近くから受けるような位置関係にしている。
- ③現状では潮流が現地計測されたこともなく、経験と勘に裏打ちされた熟練技術で対応している。しかし、大潮前後の状況では非常に緊張した操船となる。
- ④浮体式の栈橋はチェーンにて係留しているが、強潮流のためにチェーンの劣化が他の港よりも早く、5年ごとに交換する必要性が生じている。

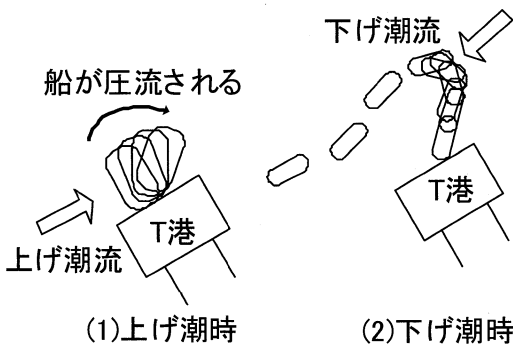


図-3 上げ潮および下げ潮時の着岸方法

3. 潮流および海象の現地観測

現地調査にて気象海象が船舶運航に強く影響していることが明らかとなったため、潮流および海象条件の現地観測を実施した。

(1) 潮流および海象の連続観測

まずT港付近の潮流、潮汐、水質特性についての数ヶ月間にわたる変動の把握を試みた。潮流特性については、T港栈橋の下に電磁式の流向流速計を設置し、2007年9月19日から12月19日までの3ヶ月間にわたり10分ごとに10秒間の平均流向・流速を計測した。図-4にT港栈橋の下で観測された3ヶ月間の潮流ベクトル図および流速の南北成分の時系列をFFT法によってスペクトル解析した結果を示す。

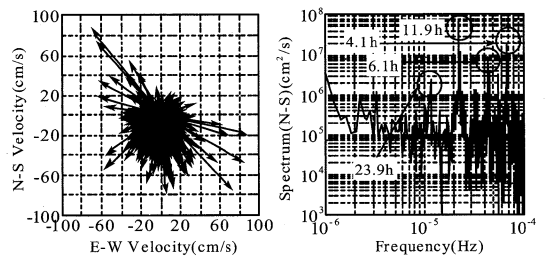


図-4 観測された潮流ベクトルおよびスペクトル

左側の図より、流向はNW～SW～SE方向の複数の方向で卓越しており、T港沖で卓越するNE～SWと若干異なる。流速は最大で1m/s程度発生し、右側のスペクトル解析結果より、最も卓越しているのは半日周期の成分（11.9時間）であり、主要4分潮のM₂潮およびS₂潮等に関与していると考えられる。また倍潮の成分（6.1時間）および日周潮の成分（23.9時間）にもピークが見られ、潮汐の周期が支配的である。一方、主要分潮の周期よりもやや短い4.1時間の周期成分にもピークが見られ、やや複雑な傾向となっている。これらの要因としては、観測点が岸側のために陸岸の水深や地形も影響したと考えられる。

(2) 潮流の移動観測

定点観測と同時に潮流および水質の空間的な分布を把握する意味で、ドップラー式流速計を装備した小型観測船にて移動しながらT港付近の表層潮流（水深3m）を2007年7月および12月の大潮日に観測した。図-5にT港栈橋の100m沖にて観測した潮流ベクトル図を示す。

図より上げ潮時にはNE、下げ潮時にはSW方向への流れが卓越しており、地形を考慮して理論的に説明できる結果が得られた。流速の最大値は1～1.5m/sの範囲であり、図-4に示した観測結果よりも若干大きいことが分かる。

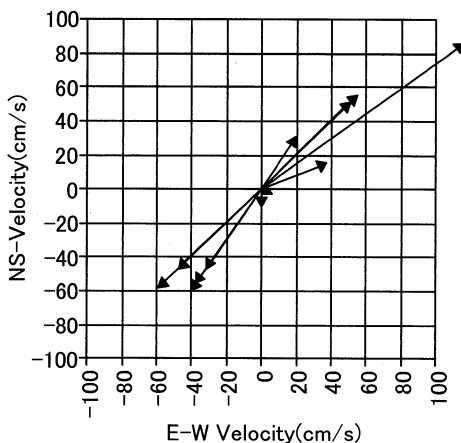


図-5 T港沖で観測された潮流ベクトル

(3) 数値シミュレーションによる再現検証

観測されたデータは極めて狭い範囲のものであり、OK島まわりの流れ場についても把握する必要がある。ただし、実測により流れ場を把握することは多くの観測機器を必要とするため、ここでは数値解析によってT港沖の潮流を再現検証した。数値計算にあたり流体の粘性を考慮したナビエーストークスの方程式を時間ごとに差分にて解く手法を使用した。数値計算はOK島の北部を計算領域として、100m格子を100×85に設定した。境界水位の与え方が重要となるが、今回は瀬戸内海全域の計算から取った水位データを境界値で設定した。図-6に計算時間を2週間とした場合のT港沖での潮流ベクトルの計算結果を示す。

計算結果より、潮流ベクトルの方向は図-5に示す結果とほぼ同一、流速は観測値よりも若干小さい。これからもT港の沖では1~1.5m/sの潮流が卓越し、フェリー運航を困難としていることが想像される。

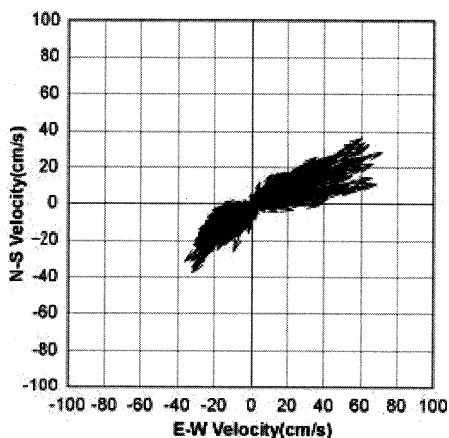


図-6 T港沖での潮流ベクトルの計算結果

4. フェリー着岸時の船体運動について

前章にて調査した潮流特性をもとにフェリー着岸時の船体運動について、現地観測するとともにこれを再現できる数値解析モデルを構築した。

(1) 船体運動の現地観測

T港に着岸するフェリーがどのような操船パターンおよび運動をしているのかを把握するため、フェリーに小型のGPSによって着岸時の運動を観測した。対象としたフェリーの主要目は垂線間長38.5m、幅11.0m、満載喫水2.65m、排水量563t、メタセンター高さ3.3mであり、船の前後両方にプロペラ、舵および船橋が設置されている両頭船である。これは栈橋に対し図-1のように前後方向に着岸し、着岸時と反対側の船橋からすぐに離れさせるために多くの離島フェリーで採用されている。着岸時に船体を減速するにあたり、船首側のプロペラ推力を同時に発生させる操船方法を取る点が通常の船舶と異なっている。船体運動の観測は単独測位式のGPSを前後の船橋とT港の栈橋上の3カ所に設置し、それぞれの位置を1秒間隔でデータロガーに収録した。図-7に2007年12月11日（大潮）にT港に着岸するときの船体位置から求めた船体速度および船首方位の変化傾向を示す。

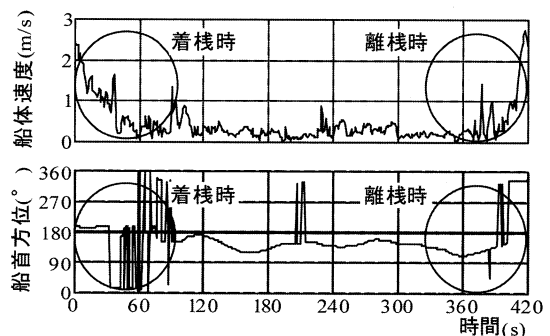


図-7 着岸時の船体速度および船首方位の変化傾向

図より栈橋の100m手前から着岸に至るまでの所要時間は1分程度で、船体速度は3m/s程度から適宜減速しながら着岸している様子が分かる。船首方位については停泊中で110~150°であり、潮流の卓越流向（NEおよびSW）に対して幾何学的にほぼ真横であることが分かる。

(2) 数値シミュレーションの概要および計算結果

船体運動の観測結果を参考に着岸時の操船パターンをもとにこれを再現する数値シミュレーションを構築した。潮流による流圧力、風圧力を外力とした運動方程式はインパルス応答を考慮し次式で表される (Cummins, 1962)。

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

ここで、 M は船体質量、 $m(\infty)$ は不変付加質量、 $L(t)$ は遅延関数、 C は復原力係数、 $FTD(t)$ は時刻 t における流圧力、 $FWD(t)$ は時刻 t における風圧力を示す。また i および j は運動のモードであり、特にsway（モード1）、surge（モード2）およびyaw（モード6）の3運動に注目した。不変付加質量および遅延関数を計算するために必要な流体力は三次元グリーン関数法（John, 1950）を用いて計算しているが、波力は無視できるとして考慮していない。流圧力は次式にて計算した（日本海難防止協会, 1975）。

$$FTD_1(t) = 0.5 \rho_w C_{xw} (U_c \cos \phi)^2 L d \quad (2)$$

$$FTD_2(t) = 0.5 \rho_w C_{xw} (U_c \sin \phi)^2 L d \quad (3)$$

$$FTD_6(t) = 0.5 \rho_w C_{mw} U_c^2 L^2 d \quad (4)$$

ここで、 ρ_w は海水密度、 C_{xw} 、 C_{mw} は船体の流圧力係数および流圧モーメント係数、 U_c 、 ϕ は潮流の流速および流向、 L 、 d は船の垂線間長および喫水を示す。着栈時の船体運動を対象としているため、船体速度は微速と見なせるためゼロとした。観測結果より着栈作業に要する時間は1分程度であったため、時系列解析の計算時間は1分間、タイムステップは0.1sとした。潮流および船体運動の観測結果から表-1に示す潮流条件に従って再現計算を行った。図-8はケースCおよびFについてフェリーの1分間の移動軌跡を比較したものである。図中の原点は計算開始時の船体位置を示す。潮流が 90° （ケースA～C、上げ潮時）では流速が0.5m/s、1.0m/s、1.5m/sでそれぞれ21m、77m、140mほど圧流され、 -90° （ケースD～F、下げ潮時）ではそれぞれ21m、84m、180mほど圧流された。流速が増加するにつれて下げ潮時の方が上げ潮時よりも圧流距離は若干大きくなっている。フェリーへの流圧力は流速の2乗に比例するため、流速の増加に対して圧流距離が急に大きくなる結果が説明できる。現地調査より着栈時には船体を栈橋にプロペラ推力で押し付けながら舵を一杯にする方法を取っているが、ここでは潮流の影響を比較するために舵力およびプロペラ推力の影響は考慮していない。流速が1.0m/s以上の場合には1分間の圧流距離が80mを超えており、熟練した操船技術をもってしても非常に制御困難と推測される。これは現場関係者のコメントとも概ね一致し、大潮期を中心に流速1.0～1.5m/sで卓越する潮流によって着栈が困難となる現象

が概ね再現できた。図-9は風による圧流影響を見るため、ケースB（潮流のみ）、G（風速5m/s）およびH（風速10m/s）における船体軌跡の変化を比較した。なお、風向については季節風として冬季に卓越するWとした。風速が5m/sの場合にはあまり大きな変化は見られないが、10m/sの場合には圧流距離が106mとなり、ケースBに比べて約30m増加することが分かる。これより、冬季に強風と強潮流が同時に発生する場合には操船がさらに困難となるため注意を要する。

5. 強潮流が卓越する離島の港湾計画のあり方

当該港湾の栈橋法線は卓越する潮流の流向に対してほぼ垂直に配置されている。大型船のバース計画等では潮流の出現頻度をもとに卓越する流向に極力平行となるよ

表-1 シミュレーションケースの外力条件

ケース	流向	流速	風向	風速	圧流距離
A	90°	0.5m/s	—	—	21m
B	90°	1.0m/s	—	—	77m
C	90°	1.5m/s	—	—	140m
D	-90°	0.5m/s	—	—	21m
E	-90°	1.0m/s	—	—	84m
F	-90°	1.5m/s	—	—	180m
G	90°	1.0m/s	135°	5m/s	83m
H	90°	1.0m/s	135°	10m/s	106m
I	0°	1.5m/s	—	—	0.6m

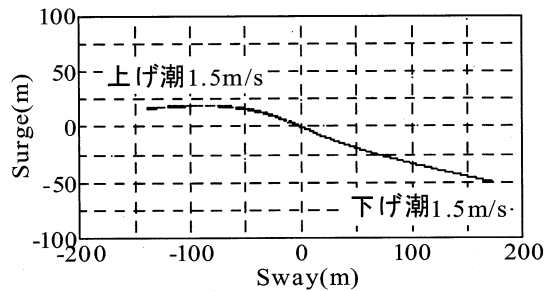


図-8 フェリーの移動軌跡(ケースA～F)

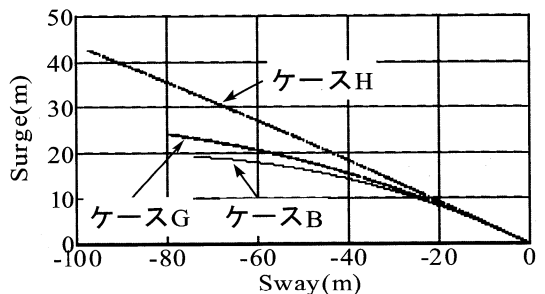


図-9 船体軌跡の変化の比較(ケースB, G, H)

う通常は配置計画される。ここでフェリーが卓越流向に対して平行に着岸すると仮定した場合(波向 0°)について、流速が 1.5m/s で検討した。図-10にケースD, E, F, Iの圧流距離を比較したものを示す。

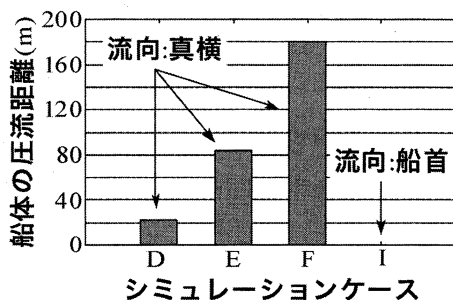


図-10 流向を変更した場合の圧流距離の変化

流向を船首方向とした場合、流速が 1.5m/s でも圧流距離はわずかに 0.6m であり、通常の操船技術で十分制御が可能である。T港のような瀬戸内海に多数存在するフェリーの桟橋計画においても、卓越する潮流の流向および流速を定量的に把握し、着岸時の船体運動を考慮した安全性評価に基づく港湾計画の必要性が明らかとなった。

6. 結論および今後の課題

本研究では瀬戸内海の離島部における海上輸送が強潮流によって運航困難となる現象について基礎的検討を行った。結論および今後の課題は以下のように要約される。

- (1) 対象港では潮流の流向に対しほぼ垂直となるバース配置で着岸を行い、操船の熟練技術で何とか対応している。しかし、潮流を含めた気象海象や船体運動に関するデータが存在せず、現場ではこれらのデータ観測とこれらに基づく対策検討を強く望んでいることが分かった。
- (2) 潮流の連続観測により、桟橋部分では流向がNW~SW~SE、流速は最大で 1m/s 程度であり、小型船による移動観測により桟橋の沖ではNE~SW、流速は最大で $1\sim 1.5\text{m/s}$ 程度であった。両者の違いは桟橋部分が陸に近いための地形影響のためと考えられる。
- (3) 潮流等の観測結果をもとに当該港まわりの潮流を数値シミュレーションにて解析したところ、流向および流速ともに桟橋沖にて観測した結果にほぼ同じであった。

これより流向NE~SW、流速 $1\sim 1.5\text{m/s}$ 程度の潮流の存在によりフェリー運航が困難となっているものと考えられ、現地での観測結果の妥当性が検証された。

(4) フェリー着岸時の船体運動をGPSにて観測し、この結果をもとにインパルス応答を考慮した船体運動の数値解析モデルを構築した。観測された潮流を外力として時系列解析にて検討した結果、流速が $1\sim 1.5\text{m/s}$ で1分間の圧流距離が $80\sim 180\text{m}$ となり、現地調査にて操船困難な状況が再現できた。

(5) 潮流を船首方向から受ける形と仮定して検討した場合、圧流距離は 0.6m までに激減され、操船上で十分な安全性を確保できる。瀬戸内海に多数位置する離島航路の港湾計画においても、潮流条件を正確に把握し、着岸時の船体運動を考慮した検討が必要である。

(6) 船体を桟橋に押しつけながら舵とプロペラを用いた操船の限界について、これらを正確に表現できるアルゴリズムを構築・改良する必要がある。また潮流による流圧力の計算方法も超大型船の係数を用いていることや潮流を定常外力として設定したことについても、今後データを蓄積し、周期特性や船舶の転覆現象についても再現できるようなアルゴリズムを考慮する必要がある。

(7) 本研究では一部の事例のみ検討しており、今後は多数の港湾および船舶について強潮流下の操船困難およびその対策について検討する必要がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、多大なご協力を頂いた山陽商船株式会社の方々に深く感謝の意を表する。また現地調査、海洋観測、データ整理の諸作業において広島商船高等専門学校・学生課実験実習係の竹内康二氏、同・商船学科学生の村上直侑生君、大重勝和君、同・専攻科学生の小林裕史君の助力を得たことに謝意を表する。

参考文献

- 海難審判庁 (2008): 狭水道の海難, 海難審判庁, 102p.
 日本海難防止協会 (1975): 超大型船操船の手引き, 成山堂書店, 129p.
 Cummins, W.E. (1962): "The Impulse Response Function and Ship Motions," Schiffstechnik, Bd.9, Heft 47, pp.101-109.
 John, F. (1950): On the Motion of Floating Bodies II, Comm. Pure & Appl. Math., Vol.3, No.1, pp.45-101.
 Sasa, K., Mizui, S., Nagai, T. and Hibino, T. (2005): Basic Research on Operational Troubles for Ships and Harbours Due to Abnormal Water Levels, Proceedings of the 15th International Conference of Offshore and Polar Engineering, Vol. III, pp.720-727.