

強潮流下の港湾への着棧操船時の船体運動による安全性評価について

Safety Evaluation of Berthing into Harbours under Strong Currents from Viewpoint of Ship Motions

笹 健児¹・日比野忠史²・金キョンヘ³

Kenji SASA, Tadashi HIBINO and Kyunghoi KIM

The influence of ship operation due to tidal currents has not studied in detail. The first step of this study reveals that present port planning is quite insufficient for ships to berth in strong tidal currents. The field observation of sea water and tidal current around T Port makes obvious that grasp of water environment is inevitable, especially in places with complicated density flow. Furthermore, numerical simulations of berthing ship motions are fully improved to evaluate the safety of berthing in strong tidal currents and winds. Simulated results can almost reproduce observed ship motions. It also makes the definition of berthing criterion possible numerically. Finally, new evaluation method of port planning is proposed from viewpoint of berthing ship motions in strong tidal currents.

1. 研究の目的

港湾計画においては構造強度や海洋環境など様々な観点から多面的に検討されるが、その中でも最も重要な指標の一つに港内静穏度、特に波浪や風による影響がある。外洋に面した海域の場合、港内波の低減や係留船舶の動揺を抑制するような研究（白石ら, 1995；土田ら, 1998）が実施され、港内静穏度の定義も段階的に改良されてきた。一方、瀬戸内海など外洋に面していない海域の場合、波浪条件が静穏なため安全性の検討が十分であるとはいえない。著者らは瀬戸内海の港湾において、強潮流時に船舶が運用困難となる事例から潮流影響も詳細に検討する必要性を示した（笹ら, 2008）。笹ら（2008）では潮流による船体運動への影響評価として、静止した船舶が潮流を受けた場合に移動する距離を比較検討した。しかし、実際には船体が棧橋に着棧する局面では舵とプロペラの力を用いて姿勢制御を行う操船方法であり、これらを考慮した船体運動は未検討であった。潮流が卓越する港湾の運用限界を定量的に評価するため、操船制御の動作を考慮した船体運動の解析手法へ改良する必要がある。本研究では瀬戸内海の船舶運航者を対象に潮流下での運用の困難度をアンケート調査で把握し、港湾運用の現状を改めて整理した。これをもとに潮流影響が顕著な離島航路のフェリー港湾まわりの潮流・水質調査を大潮日に数回実施した。さらに潮流中における着棧操船時の船体運動について、舵力、プロペラ推力、ポンツーン衝突時のエネルギー吸収などの影響を再現できる数値計算法の

開発を実施し、再現精度を検証するとともに強潮流下における港湾での新たな運用限界の検討方法を提案した。

2. 強潮流下における港湾運用の実態調査

笹ら（2008）は瀬戸内海の一港湾を対象に潮流による船舶運航への影響を調査したが、ここでは同様に潮流の影響がある中で船舶運航していると思われる瀬戸内海の短距離フェリー会社30社にアンケート調査を実施した。図-1に潮流の流圧力による着棧困難を感じる度合および着棧時における潮流の卓越角度をまとめた結果を示す。

約1/4である24%の回答者が潮流による着棧困難を感じており、運航者が苦慮している状況が窺える。また24%の港湾が潮流との角度が45°～90°であり、港湾計画にて望ましいとされる潮流と平行な角度と回答したのは12%のみであった。具体的な操船方法としては、着棧時に港湾施設への衝突速度を低減させるために機関を停止した惰力状態で接近し、微速後進をかけながら着棧する方法や舵とプロペラの組み合わせによって姿勢制御する経験的な方法を採用していることが分かった。ただし、これらの操船方法は潮流による船体運動から見た安全性を定量的に評価した結果として確立されたものでなく、操船者の熟練した技量と経験に基づくものである。以上から潮流が卓越する海域の港湾の多くは着棧する船舶の運動などから定量的な安全性を評価する形で計画・運用

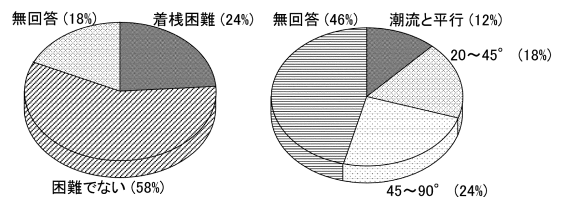


図-1 潮流による着棧困難の有無と着棧時の潮流の卓越角度

1 正会員 博(商船) 大島商船高等専門学校准教授 商船学科
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 正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科社会環境システム専攻

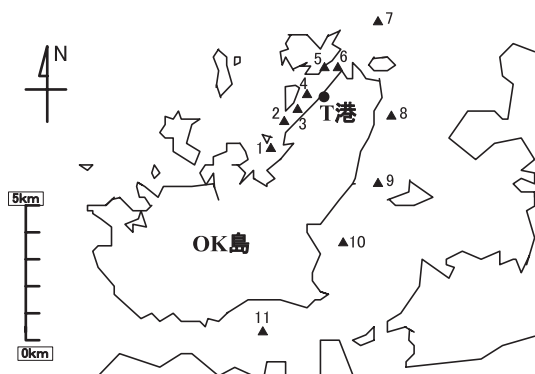


図-2 OK島, T港および水質観測点の位置図

されていないことが分かる。

3. 強潮流が卓越する港湾まわりの潮流・水質調査

本研究では図-2に示す瀬戸内海の離島であるOK島を対象とし、特にフェリーが着岸するT港では狭水道となっているため潮流の影響が顕著である。

笹ら(2008)ではT港付近の潮流を計測した結果から特性を考察したが、OK島は南東側に来島海峡、西側に安芸灘が位置し、当該海域は海水の流出入が複雑になっていると考えられる。このため、島まわりの水質特性を時空間で把握した上でT港まわりの潮流特性を改めて考察する必要があると考えた。図-1に示すOK島周りの11点で冬と春の大潮日であった2007年12月11日および2008年5月23日の下げ潮時を中心に小型船でポイント1～11まで移動・往復を繰り返しながらSTD計および流向流速計を用いた観測を行い、当時の海象特性の分析した。図-3に2007年12月11日の10:24～12:03に観測した11点の水温および塩分濃度の空間鉛直分布を示す。

水温および塩分ともポイント7の左右領域、すなわちOK島北端を境に東側(8～11)と西側(1～6)で連続性が喪失した複雑な水環境となっている。島の東側は来島海峡からの水塊が、西側は安芸灘からの水塊が移動してきたものと推定され、OK島北端で水温や塩分の異なる状態で共存している。図-3にT港の近傍で観測した2日間の最強時刻を含む下げ潮時の潮流ベクトルをプロットしたものとOK島まわりの地形条件を計算領域に設定し、

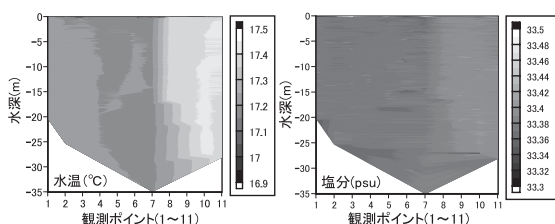


図-3 OK島まわりの水温および塩分の鉛直空間分布(2007年12月11日, 大潮満潮前後)

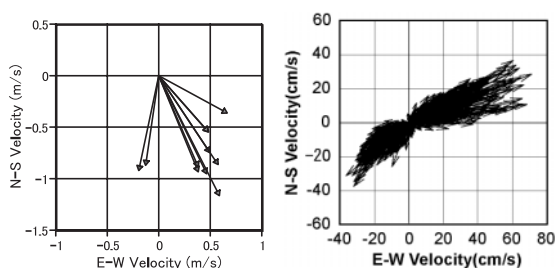


図-4 T港近傍で観測した潮流ベクトル(大潮下げ潮時)および潮流の数値解析結果(2週間)

Navier-Stokesの方程式によって潮汐周期(2週間)分の潮流をT港近くの計算点にて数値解析した結果を示す。

下げ潮最強時の流速は1m/sを超えており、流向はSSE～SSWであった。数値解析の結果では下げ潮時にはSW方向に流れが卓越しているが、実際には岸から数メートルの範囲では本流と逆の向きに流れる「ワイ潮」(本田, 1982)が影響していると推察される。現地観測では上げ潮最強時の潮流を観測できなかったが、計算結果では下げ潮時の約1.5倍の流速であり、これを参考とすれば上げ潮時の最強流速は約1.5m/sと推測される。T港の配置からこの潮流を横方向から受ける形となり、船体運動を検討する前段階に対象海域の水温、塩分等から構成される密度場と卓越する潮流特性を十分把握する必要がある。

4. 潮流下における着岸時の船体運動について

笹ら(2008)では船舶が静止した状態で潮流により、着岸に要する平均時間である1分間の流圧距離にて評価していた。しかし、実際には潮流中を減速しながら桟橋に接近し、最終的には舵とプロペラを用いて姿勢制御を行っている。このため、これらの操船制御を数値的に再現・考慮したモデルでなければ本当の意味での着岸限界を求めることができない。本研究では船体運動の観測結果をもとに実際の操船パターンを以下の手順でモデル化した。

(1) 着岸時の船体運動の現地観測

対象とした船舶要目は垂線間長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。図-5に2007年12月11日におけるT港付近における着離桟時の速力変化を示す。フェリーはT港の約50m手前で船体速度を約2.5m/sに減速し、接近しながら10m手前で0.2～0.5m/sに速度制御している。

T港は図-6に示すとおり、海底から前後5本のチェーンにて係留された浮体式構造物であるが、フェリーはこれに向かって45°の角度で約2.5m/sから0.2～0.5m/sまで減速した後に船体を衝突させる。その後、プロペラ推力で船体をポンツーンに押しつけながら舵を一杯に切り船

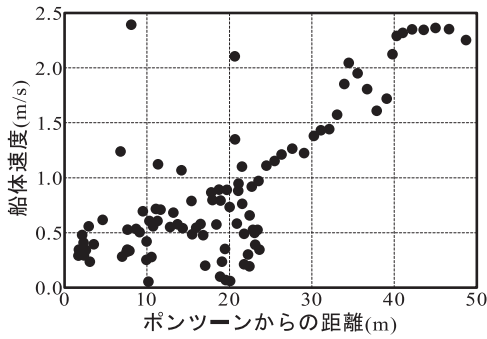


図-5 着離棧時の速力変化 (T港, 2007年12月11日)

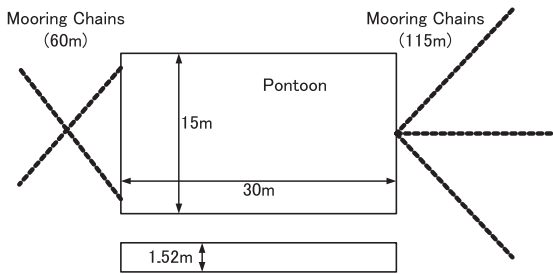


図-6 T港のポンツーン平面図

がポンツーンに直角となるように約 45° 回転させる姿勢制御を行っている。

(2) 着岸操船パターンの数値モデル化

着岸時に船はポンツーンに一旦衝突し、舵とプロペラを用いて姿勢制御を行うが、これを再現するには一連の操船動作を数値モデルに考慮しなければならない。舵やプロペラを使用する場合、船体周りに複雑な流体力が発生し、過去に船舶海洋工学の分野で多くの推定式が提案されている(小川ら, 1977; 小瀬ら, 1979)。船体運動を解析する運動方程式を以下のように構成した。

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ii} + m_{ij}(\infty)) \ddot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{X}_j(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^6 C_{ij} \dot{X}_j(t) = F_j(t) + T_j(t) + R_j(t) \quad \dots\dots(1)$$

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 は復原力定数、 X は船体変位、 t は時間、 i および j は運動モード(1: sway, 2: surge, 3: heave, 4: pitch, 5: roll, 6: yaw)を示す。不変付加質量および遅延関数は三次元グリーン関数法(John, 1950)にて求めた流体力係数のインパルス応答を計算した(Cummins, 1962)。外力 F は潮流の流圧力または風圧力であり、 T はプロペラ推力、 R は舵圧力および舵モーメントを示す。

$$T_j = \begin{cases} (1-t_D) \rho_w n^2 D^4 K_T \left(\frac{u_p}{nD} \right) \dots\dots(j=2) \\ 0 \dots\dots(j \neq 2) \end{cases} \quad \dots\dots(2)$$

$$R_j = \begin{cases} (1+a_H) F_N \cos \delta \dots\dots(j=1) \\ (y_R + a_H y_H) F_N \cos \delta \dots\dots(j=6) \\ 0 \dots\dots(j=2,3,4,5) \end{cases} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 t_D は流体抵抗による推力減衰率、 ρ_w は海水密度、 n はプロペラの回転数、 D はプロペラの直径、 K_T はプロペラの推力係数、 a_H は舵によって船体に生じる力と舵力の比、 y_R は重心位置から舵の圧力中心までの距離、 y_H は重心位置から舵の作用によって船体に生じる力の着力点までの距離、 δ は舵角を示す。 u_p および F_N はプロペラへの有効流速および舵直圧力であり、次式にて表される。

$$u_p = \left\{ (1-w) + \tau \left(\dot{X}_2 + C_p \left| \dot{X}_1 \right| \dot{X}_1 + y_p \dot{X}_6 \right)^2 \right\} \dot{X}_2 \quad \dots\dots(4)$$

$$F_N = \frac{1}{2} \rho_w A_R U^2 f(\Lambda, \alpha_R) \left(\frac{u_R}{\dot{X}_2} \right)^2 \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 w は直進中の伴流係数、 τ および C_p は実験的に求められる係数、 y_p は重心位置からプロペラまでの距離、 A_R は舵面積、 u_R は舵への前後流入速度、 α_R は舵への有効迎角、 Λ は舵高さの二乗と舵面積の比(アスペクト比)、 $f(\Lambda, \alpha_R)$ は次式で表される関数である。

$$f(\Lambda, \alpha_R) = \frac{6.13\Lambda}{\Lambda + 2.25} \alpha_R \quad \dots\dots(6)$$

また舵への左右流入速度 v_R 、 u_R 、 α_R は以下のように推定できる。

$$v_R = \dot{X}_1 + C_R \left| \dot{X}_1 \right| \dot{X}_1 + y_R \dot{X}_6 \quad \dots\dots(7)$$

$$u_R^2 = u_p^2 \left(1 + \frac{8}{\pi} \frac{K_T}{u_p^2} n^2 D^2 \right) \quad \dots\dots(8)$$

$$\alpha_R = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{v_R}{u_R} \right) \quad \dots\dots(9)$$

ここで、 C_R は実験的に求められる係数であるが、本研究では影響は微小であるとしてゼロとした。時刻 t の舵力および舵モーメント $R(t)$ は実際は舵を切ってから効き始めるまである程度の時間差が生じる(広田, 1982)。これは時定数 T_R と呼ばれ、舵を切った時刻を t_0 とすれば、 $t < t_0 + T_R$ の場合、 $R(t)$ の値は次式のとおりに徐々に立ち上がる。

$$R(t) = R(t_0) \left(1 - e^{-(t-t_0)/T_R} \right) \quad \dots\dots(10)$$

船体は着岸前に微速でポンツーンに衝突し、速力と方位を制御している。これはポンツーンをばねとダンパーからなる質点系、船の衝突力を外力とした振動問題と近似できる(藤田, 2005)。ポンツーンに衝突する局面は船体の接岸エネルギーがポンツーンの運動エネルギー、ば

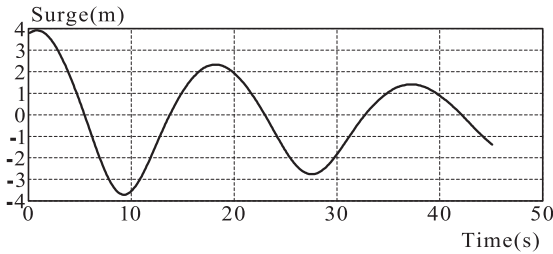


図-7 ポンツーンの自由振動における変位時系列

ねエネルギーおよび減衰エネルギーと次式のように釣り合うと仮定すれば、衝突直後の船体速度が求められる。

$$\frac{1}{2}(M_{22} + m_{22}(\infty))C_{es} \dot{X}_2^2 = \frac{1}{2}(M_p + m_p(\infty))C_{ep}C_{mp}\dot{X}_p^2 + \frac{1}{2}k_p X_p^2 - \int c_p \dot{X}_p^2 dx \quad \dots\dots (11)$$

ここで M_p および $m_p(\infty)$ はポンツーンの質量および前後方向への不変付加質量、 C_e および C_m は船舶およびポンツーンの偏心率係数および仮想質量係数、 k_p は振動系のばね定数、 c_p は振動系の減衰係数、 X_p はポンツーンの変位量を示す。図-7はポンツーンを前後方向に自由振動させた場合における数値解析の結果を示す。

初期変位 X_{p1} が 4m であり、正方向への次のピーク変位 X_{p2} は 2.33m、振動周期 T_p は 18s であった。これより、ばね定数 k_p および減衰係数 c_p の値は次式で求められる。

$$k_p = (M_p + m_p) \left(\frac{2\pi}{T_p} \right)^2 \quad \dots\dots (12)$$

$$c_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{(M_p + m_p)k_p} \log \frac{X_{p1}}{X_{p2}} \quad \dots\dots (13)$$

式 (12) および (13) より、 $k_p = 231.2 \text{ kN/m}$ 、 $c_p = 126.5 \text{ kN/s}$ と求められる。これより、衝突時に式 (11) にて衝突後の船体速度および変位量を求め、これと同時に舵とプロペラによる姿勢制御を行うアルゴリズムとした。

(3) 船体運動の再現結果

観測された潮流条件をもとに流向および流速を変化させながら着岸時の船体運動を数値解析した。図-8は潮流条件を外力なし、上げ潮時（流向90°）の流速が0.5m/s、1m/s、1.5m/sとそれぞれ変化させた場合におけるフェリー着岸時の重心軌跡を比較したものを示す。

流速0.5m/sの場合、外力なしの計算結果に対して1~2m横方向に流されているが、全体的にはポンツーン前面でも舵とプロペラで潮流影響を支障なく制御できている。しかし、流速1m/sの場合には約10mの横流れが生じ、流速1.5m/sの場合は12m近く流され、計算開始から5分後にもポンツーンに直角となる姿勢制御ができていない。これは現場の状況を良好に再現していると考えられ、舵とプロペラを用いた場合でも流速が1m/sを超えると着岸が非常に困難となることが分かる。風の影響についても、

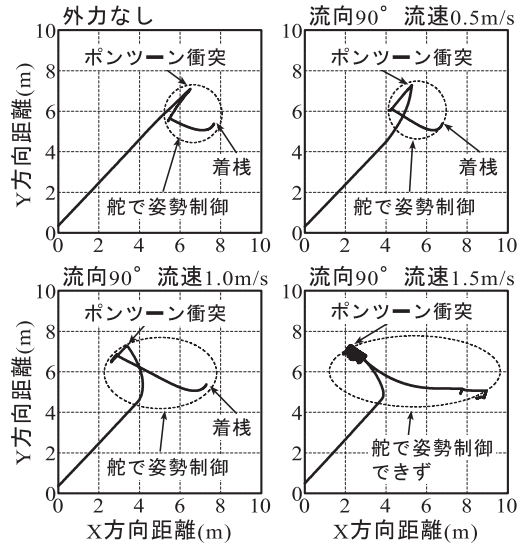


図-8 潮流条件ごとにおける着岸時の計算結果の比較

図-9に潮流の流向45°、流速0.5m/sで風なし、平均風速10m/s（風向135°）とした場合の計算結果を示す。

風が同時に作用した場合の方がポンツーン前面で1.5m程度前方に流されているが、全体的には着岸時の航跡としては大きな違いは発生していない。笹ら（2008）にて船が静止した状態で風圧力作用させた場合には20m近くの違いが見られたが、舵とプロペラの制御動作を行った影響によりその違いが小さくなっていると推察される。

5. 着岸困難度からみた港湾計画のあり方

潮流条件を3流向（0°、45°、90°）×3流速（0.5m/s、1.0m/s、1.5m/s）にて着岸時の船体運動を計算し、図-10は横軸に計算開始から姿勢制御が完了するまでの着岸時間、縦軸は着岸制御時に必要とした船の回頭直径をプロットしたものを示す。

流向0°（船尾方向）の場合は流速が1.5m/sでも回頭直径が2.6m、着岸時間が90sであり、問題なく着岸できる。一方、流向が45°の場合、流速0.5m/sでは回頭直径、着岸時間とも着岸可能な範囲内であるが、流速が1m/sの場合

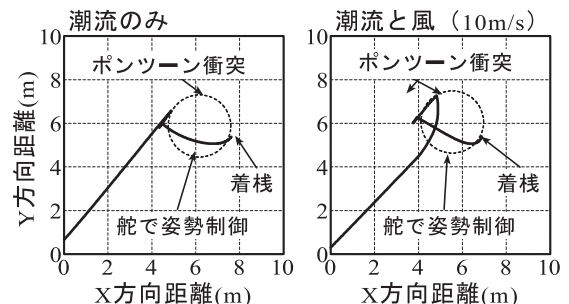


図-9 風の影響の有無での着岸時の計算結果の比較

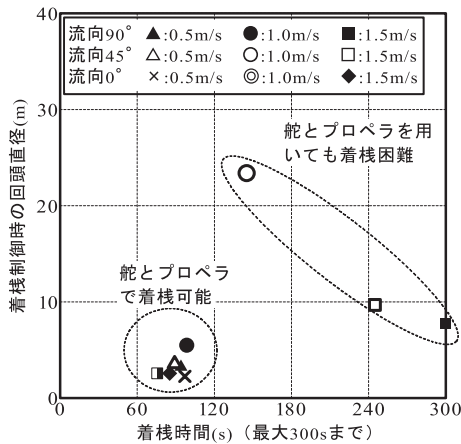


図-10 着岸時間と着岸制御時の回頭直径の関係

は着岸時間が145s、回頭直径が23.4mとなり着岸困難となる。流向が90°の場合、流速が1m/sでは着岸可能な範囲内にあり、流向が斜め方向で操船が最も厳しくなっている。これは45°の時にYaw方向の流圧モーメントが最大となることに起因していると考えられる。当該港湾の場合、着岸時間が2分以内かつ回頭直径が10m以下となる場合が着岸可能、それ以上では着岸困難と見なせる。流向が0°の場合には1.5m/sでも着岸可能であるが、45°では0.5m/s、90°の場合は1.0m/sが運用限界と定義できる。アンケート調査で潮流と相対角度を45～90°と回答事例が多いが、シミュレーション結果からは最も望ましくない角度で運用していることになる。強潮流下における港湾計画では、対象海域の水質・潮流特性、船舶の操縦性能、港湾設備などを総合的に考慮した船体運動（潮流静穏度と名付ける）による安全性検討が必要であり、今後の評価指標として組み込む必要がある。

6. 結論および今後の課題

- アンケート調査の結果、全体の24%の回答者が潮流による着岸困難を感じており、同じく24%が着岸時の潮流と船体の相対角度が45～90°であると回答している。これは現状の港湾計画では実際の運用困難を検討し切れていないことを示唆している。
- T港での下げ潮時の最大流速は約1m/sであった。潮流計算より、上げ潮時の流速は1.5倍程度のため、上げ潮時の最大流速は1.5m/s前後と推察される。水温・塩分の観測結果より、OK島北端を境に連続性が失われ、複雑な水温・密度環境にて潮流が卓越している。

- 着岸時の船体運動の観測結果をもとに、船体を微速でボンツーンに衝突させた後、舵とプロペラを用いた姿勢制御を行う数値解析モデルに改良した。この結果、観測された状況を概ね再現できることが確認された。
- 潮流の流向・流速を変化させながら検討した結果、流向45°の場合は0.5m/s、90°の場合は1.0m/sが着岸限界であり、0°の場合は1.5m/sでも着岸可能であることが分かった。着岸時間と回頭直径の関係で見ると、着岸時間が120s以下かつ回頭直径が10m以下になるような港湾計画の詳細な検討が必要である。
- 本研究では水深方向に流速が一定の流れとして流圧力を検討したが、観測結果より複雑な密度場が形成され、密度流による影響を考慮する必要がある。さらに陸岸付近は本流と逆向きの流れとなるワイ潮や水深方向に不均一な湧昇流などのモデル化を検討する必要がある。

謝辞：船体運動の現地観測、数値解析の資料提供に助力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。また船舶運航のアンケート調査および現地観測にあたり、広島商船高等専門学校学生（当時）の保毛津林太郎君、大野修君、森下辰郎君の助力を得たことに感謝する。

参考文献

- 小川陽弘・小山健夫・貴島勝郎（1977）：操縦運動の数学モデルについて、日本造船学会誌、第575号、pp.192-198。
 小瀬邦治・佐伯敏朗（1979）：操縦運動の新しい数学モデルについて、日本造船学会論文集、第146号、pp.229-236。
 笹 健児・日比野忠史・金キョンヘ・水井真治（2008）：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、海岸工学論文集、第55巻、pp.1356-1360。
 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹（1995）：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。
 土田 充・大山 巧・平石哲也・富田孝史（1998）：港内係留船舶の長周期動揺に基づく静穏度評価法について、海岸工学論文集、第45巻、pp.321-325。
 広田 実（1982）：船舶制御システム工学、成山堂書店、pp.48-49。
 藤田勝久（2005）：振動工学、森北出版、pp.25-84。
 本田啓之輔（1986）：操船通論、成山堂書店、pp.76-78。
 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.