

外洋性港湾における入出港時の着離岸作業障害に関する研究

笹 健 児* ・ 久 保 雅 義** ・ 白 石 悟*** ・ 永 井 紀 彦****
趙 翼 順***** ・ 水 井 真 治***** ・ 小 林 豪*****

外洋性港湾で船舶が入出港するときの安全性を検討することは大変重要である。しかし、現在まで波浪時の船体動揺を考慮し港湾計画・運用で港内静穏度として検討された事例は存在しない。本研究では大型フェリーが港湾に入出港するときの安全性を対象に船体動揺および波浪の現地観測を実施し、着離岸するときに Roll が顕著となり作業困難となる状況を定量化できた。さらに港外からの波浪伝播と港内の船体動揺の解析モデルを組み合わせた数値モデルを構築し、その精度を検証した。この結果、実測値をある程度再現できており、作業障害の主要因は波高 0.5～0.6 m, 周期 10～15 s 程度のうねり成分が港内で存在するためであることが分かった。

1. 研究の目的

太平洋や日本海などに位置する外洋性港湾における波浪中の係留問題について数多くの調査研究が実施されてきた(松良ら, 1994; 白石ら, 1995)。これより、従来から定義されていた岸壁前面での港内有義波高による港内静穏度の評価のみでは実際の安全性を評価し切れておらず、波高 0.1～0.4 m, 周期 1～3 分程度の長周期波を考慮した港内静穏度を再定義する必要性が明らかとなった。一方、港湾での船舶運用を考える場合、係留中の安全性だけでなく入港時および出港時の安全性・効率性も無視することのできない要素である。過去に冬季日本海の漁港を対象に、漁船の荒天入港に関する安全性が検討された事例があるが(久保ら, 1997), 大型船舶や太平洋に面した港湾における入出港時の船体動揺に関する定量的なデータにより船舶の安全性や港湾計画が検討された事例は存在しない。また操船シミュレーターを用いた入出港時の安全性も数多く検討され、港湾計画で回頭操船に必要な水域幅などが検討されている。しかし、これらは風や潮流など静的な外力による圧流現象のみが対象とされ、波浪による船体動揺の影響を正確に考慮したものではない。従って波浪中で生じる船体動揺による操船の困難さを港内静穏度の指標として正確に考慮した事例は殆ど見られない。本研究では太平洋に面した S 港に入出港する大型フェリーを対象とし、まず波浪中での運用上の問題点をヒアリング調査した。さらに大型フェリーが台風時にうねりが伝播する状況において港湾へ入出港する局面の船体動揺について船体運動測定装置により現地観測した。これより船体動揺による操船困難が定量的に

明確となり、操船の危険度を簡易的に評価した。また船舶の入出港時で最も問題となる岸壁近くでの船体動揺を再現できる数値モデルを構築し、船体動揺が卓越する主要因に関して考察を行った。

2. 大型船舶の入出港に関する問題点

久保ら (1997) は冬季日本海における漁船入港時の安全性を調査し、港口部での反射波によって変針時の操船が非常に危険となることを明らかにした。本研究ではこのような調査結果をもとに、大型船が入出港する時の問題点について外洋ルートを航行するフェリー関係者を対象にヒアリング調査を行った。表-1 にヒアリング内容およびコメントを示す。

表-1 主なヒアリングの事例

項目	コメント
入出港が困難となることはあるか?	台風時にうねりが伝播する状況で非常に困難となる
入出港が困難となる要因は何か?	波浪・うねりによる船体動揺が卓越するため
どの状況で操船が困難となるか?	岸壁に着離岸する局面と港口付近で動揺が大きくなる

これより、大型船が外洋性港湾に入出港する局面においても、波浪による船体動揺が運用に深刻な影響を与えていることが分かる。対象とした S 港は太平洋に面した海域に位置しているため、台風からのうねりや風波が伝播してくる状況で運用が厳しくなり、港口付近だけでなく港内の岸壁近くの水域においても大きな船体動揺が発生する点が今までの研究では見られなかった現象であると言える。

3. 船体動揺の現地観測

ここでは台風からのうねりが伝播する状況における船体動揺を実際に現地観測し、入出港の困難度に関して定量的なデータによる評価を試みた。本研究では太平洋に面した S 港に入出港する 12,000 DWT 級の大型フェ

* 正会員 博(商船) 広島商船高等専門学校講師 商船学科
** 正会員 工 博 神戸大学教授 海事科学部
*** 正会員 博(工) (財)沿岸開発技術研究センター 第二調査部長
**** 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究室長
***** 神戸大学大学院 博士後期課程
***** 博(商船) 広島商船高等専門学校助教授 商船学科
***** 博(商船) 広島商船高等専門学校助手 商船学科

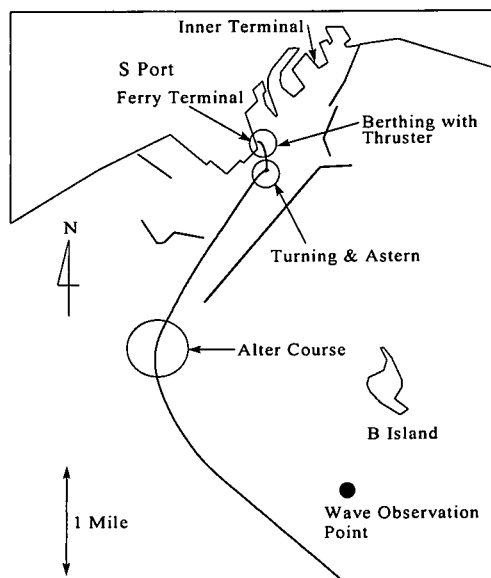


図-1 S港の配置図および入港パターン

リーを観測対象とし、夏季～秋季で台風からうねりの伝播が予想される時期に2001年～2002年の2年間にわたり数回実施した。図-1にS港の配置図、港外での波浪観測点および典型的な入港ルートを示す。

図より港口付近で入港するために大角度の変針を行った後、岸壁近くで回頭し機関を後進にしながらスラスターを用いて着岸する操船パターンを取っている。図に示す港外から港内に至る一連の局面で発生する船体動揺および港外波浪に関して以下の方法にて観測した。

(1) 観測時の海象条件

対象としたS港の沖には図-1に示すとおりナウファスの波浪観測地点が設置されており、2時間ごとに水位の連続データが観測されている。ここでは顕著なうねりの伝播が見られた2002年のデータを中心に分析した。図-2にS港沖での有義波高および有義周期の変化を示す。

これより、港外波高が2m、周期が10sを超えたのが4回存在し、図中に示すようにうねりの伝播が見られた時期に3回ほど現地観測を実施した。これらはいずれも台風に起因しており、台風が日本に接近する前の段階で1.5～3m、12s程度の状況であった。その他、8月および9月にも現地観測を1回ずつ実施したが、この期間中は波浪データが欠測しており、解析対象としていない。

(2) 船体動揺の現地観測

船体動揺の現地観測については、フェリーの船内に船体運動測定装置を一式搭載した状態で計測を実施した。船体運動測定装置はGPS、光ジャイロおよびジャイロコンパスの3系統から構成され、入出港時のように移動速

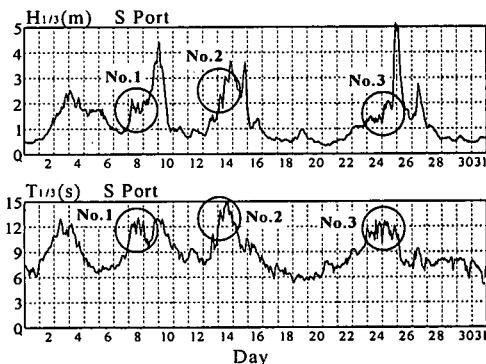


図-2 有義波高および有義周期の変化 (2002年7月)

度を持った船舶の動揺を計測することが可能である点に特徴がある(笹ら, 2001)。本研究では太平洋を航行し、S港に入出港する12,000 DWT型大型フェリー(垂線間長:170m、幅:25.5m、実験時の平均喫水:6.0m、排水量:14,121t、メタセンター高さ:3.24m)を実験対象とした。現地観測の結果より、特にPitchおよびRollといった船体動揺量について詳細に解析した。図-3および図-4に7月8日8:00の入港時と7月14日12:20の緊急出港時におけるPitchおよびRollの船体動揺量の時系列波形を示す。

これらよりPitchおよびRollが港口付近と係留岸壁の近くで大きくなっていることが分かる。港口付近では出港時にPitchが非常に大きくなっている点が特徴的

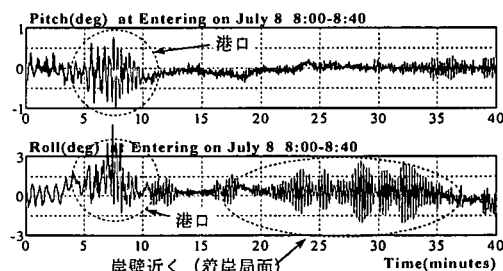


図-3 入港時の船体動揺波形 (7月8日 8:00～8:40)

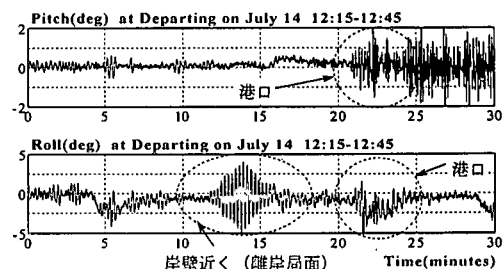


図-4 出港時の船体動揺波形 (7月14日 12:15～12:45)

あり、Roll は大角度変針時に働く遠心力によって船体傾斜を生じたものと推定できる。一方、港内水域においても岸壁に着岸または離岸する時に Roll が非常に大きくなっている状況が観測されている。波高が防波堤などにより低減されている港内で動揺が顕著となるところが今までの研究では見られなかった現象である。

4. 入出港時における船体動揺からみた着離岸障害に関する状況

ヒアリング調査および現地観測により、岸壁に着離岸する局面で大きな Roll が発生していることが明らかとされた。着離岸する局面では船内で作業する乗組員にとって最も緊張し神経を集中した作業が必要となる（河村ら, 2001）。そこで船が着離岸する作業の困難度について船体動揺量から評価を実施した。船が着離岸する局面で Roll によってどのような作業困難が発生するかを考えてみる。Roll のような重心周りの回転運動の場合、重心位置からの距離が大きい場所での作業に最も影響が出ると考えられる。この場合では船橋のウィング（端の位置）で作業を行う船長および航海士が Roll による影響を最も受けると推定できる。ここでは船橋の作業位置における上下および水平方向への作業位置の移動量を次式にて求め、最大両振幅を現地観測した 5 ケースについて求めた。

$$DZ = L_z(1 - \cos \alpha) + \frac{B}{2} \sin \alpha \cdots \cdots (1)$$

$$DX = L_z \sin \alpha \frac{B}{2} \cos \alpha \cdots \cdots (2)$$

ここで、 DZ : Roll および Pitch による鉛直方向の移動量、 DX : Roll および Pitch による水平方向の移動量、 L_z : 重心から作業位置までの高さ (26.9 m)、 B : 船幅、 α : Roll 角をそれぞれ示す。またフェリーの Roll 時における固有周期 T_R は次式によって求められる。

$$T_R = \frac{0.8B}{\sqrt{GM}} = \frac{0.8 \times 25.5}{\sqrt{3.24}} = 11.3(\text{s}) \cdots \cdots (3)$$

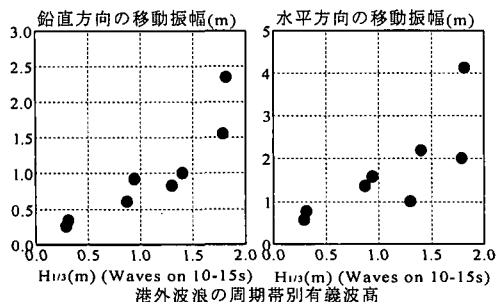


図-5 作業位置の最大両振幅と周期 10～15 s の周期帯別港外波高との関係

これより、Roll の固有周期に近い成分の港外波高と作業位置の移動量の比較を行った。図-5 に作業位置の最大両振幅と周期 10～15 s の周期帯別港外波高(永井, 2000)との関係を示す。港外でのうねり成分が 1 m を超える状況で概ね鉛直方向の移動振幅が 1 m 以上、水平方向の移動振幅が 1.5 m 以上となっており、うねり成分が 1.5 m 以上となると移動振幅も非常に大きくなっていることが分かる。

5. 着離岸時における船体動揺に関する数値解析モデルの開発および検証

入出港時の船体動揺を考える場合、船舶自体が移動しながら動揺しているため、船まわりの波浪場が時々刻々と異なる点が特徴的である。このため、港外からの港内へ波浪が伝播する状況を正確に再現し、これをもとに船体動揺を解析する必要がある。港外の波浪観測点から港内水域に波浪が伝播する過程で構造物の反射、回折さらに水深変化が詳細に考慮できるブシネスク方程式の平面モデル(平山, 2002)を用いた。入射波を港外での波浪観測点での水位データとし、SSE 方向から一方向不規則波が港内に伝播していくものとした。ここで方向分散を考慮しなかったのは、S 港が湾内に位置しており、SSE 以外の波向成分の波浪が入射しにくい形状となっているためである。また入射境界の水深は -35 m であり、港内の岸壁近くでは約 -10 m まで水深が変化し中での波浪伝播をまず求めた。計算領域は港外から港内までの領域を対象とし、計算メッシュ間隔は 10 m、時間ステップは 0.2 s とした。ここでは Roll の動揺が最も大きく発生した 2002 年 7 月 14 日 12:20 の緊急出港時の状況を再現した。図-6 に入射境界での波浪観測値と港内岸壁から 100 m 離れた離岸水域での波浪スペクトルの計算値を比較したものを示す。

これより、港内では周期が 1 分以上の長周期波成分が 0.4 m 程度と非常に卓越していることと周期 10～15 s 程度のうねり成分は波高が 0.5～0.6 m 程度に低減している結果となった。両者を比較すると、長周期波成分は港内でやや増幅しており、周期 10～15 s 程度のうねり成分は 1/4 程度に減衰し、さらに周期が短い成分についてはほとんど減衰している。つぎにこの波浪条件を入射波とした船体動揺の解析モデルを検討した。ここでは最も操船上に問題の生じていた着離岸作業の局面を対象とし、流体力および波浪強制力は離岸水域における波浪に対して三次元グリーン関数法を用いて計算した。流体力成分は周波数に依存しない遅延関数を用いた時系列シミュレーション法(白石ら, 1999)を次式のように構築し解析した。

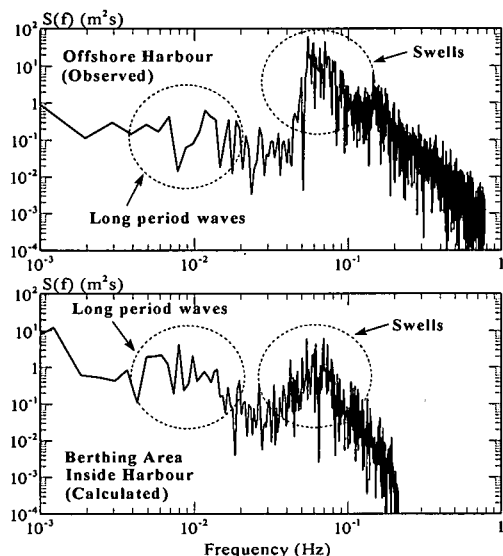


図-6 入射境界と港内水域でのスペクトルの比較

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^6 (M_{ii} + m_{\dot{u}}(\infty)) \ddot{X}_i(t) \\ & + \sum_{i=1}^6 \left(\int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{X}_j(\tau) d\tau + D_j(t) \right) \\ & + \sum_{i=1}^6 C_{ij} \dot{X}_j(t) = F_j(t) \quad (j=1 \sim 6) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 M ：船体質量および慣性モーメント、 m ：不変付加質量および付加慣性モーメント、 $L(t)$ ：遅延関数、 C ：復原力係数、 $F(t)$ ：波浪などの外力、 t ：時刻および $X(t)$ ：船体動揺量を示す。添え字 i, j は船体動揺のモードを示している。また $D(t)$ は Roll 時に発生する粘性抵抗力を示し、式 (5) のように表される。

$$D_j(t) = A \dot{X}_j(t) + B |\dot{X}_j(t)| \dot{X}_j(t) \quad (j=5 \text{ のみ}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで A および B は係数 a および b と以下のような関係がある。なお、添字の 5 は Roll であることを示す。

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{A}{4(M_{55} + m_{55}(\infty))} T_R \\ b &= \frac{4B}{3(M_{55} + m_{55}(\infty))} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここでは類似した船型に対するデータをもとに $a=0.1$ 、 $b=0.05$ とした。また図-6 より港内では長周期波とうねり成分が両方とも同じオーダーで存在することが分かったので、波浪のどの成分によって Roll が卓越しているかを確認するため、①全周期成分を考慮した波浪強制力で検討、②周期 20 s 以上の波浪成分のみを外力とした場合、③周期 20 s 未満の波浪成分のみを外力とした場合の 3 通りで計算を行った。図-7 に岸壁より 50~100 m 離れた港内水域で離岸作業を行っているフェリーの Roll に関する計算値の比較を示す。

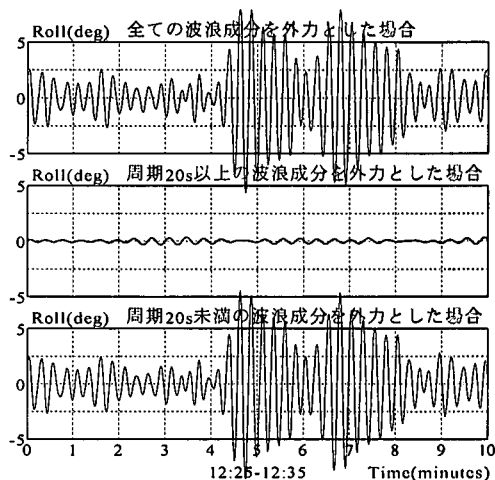


図-7 Roll の計算値の比較 (出港時)

計算値は実測値よりもやや大きいのが、包絡波形の特性を含めて操船困難となる Roll の実測状況を概ね再現できていると考えられる。ただし計算値において包絡波形が 2 つ連続して生じている点については、港内での波向設定や入射波の設定に若干の課題を残していると思われる。また外力を長周期波のみとした場合には Roll は殆ど発生せず、うねり成分のみを考慮した場合には固有周期が 12 s に近いため、全波浪成分を考慮して計算した値とほぼ同じであった。このようにブシネスク方程式による波浪伝播モデルと自由浮体に対する船体動揺の解析モデルを組み合わせることにより、着離岸時に発生する船体動揺による作業障害を数値的に再現できることが示された。また着離岸時に卓越する Roll に起因した大型船の操船困難は港内に侵入する波高 0.5~0.6 m、周期 10~15 s 程度の波浪成分が主要因であると推定できる。

6. 入出港時の着離岸障害からみた港内静穏度

港湾での船舶運用および港湾施設の計画を考える場合、係留船舶の動揺とともに船舶が入出港する時の波浪による動揺も特に着離岸という局面で作業が非常に困難であることが本研究で明らかとなり、港湾を計画・運用する上で無視できない問題であることを示した。なぜならば船が安全に着離岸できなければその後の乗客の乗降、荷役・係留作業も実施できないからである。数値モデルによる検討結果より岸壁前面での波浪の影響だけでなく、船舶が港内および港口で入出港作業を行うための安全性からみた水域の確保についても港内静穏度のパラメーターとして今後検討していく必要がある。

7. 結論および今後の課題

主要な結論および今後の課題は以下のとおりである。

(1) 外洋性港湾に入出港するフェリー関係者を対象にヒアリング調査を実施した。この結果、入出港時に最も困難となるのは台風から伝播する波浪による船体動揺であり、特に港内の岸壁近くの水域で着離岸する局面で Roll が卓越し、作業が非常に困難であるとのコメントを得た。

(2) 台風時に入出港する局面の船体動揺を現地観測した結果、うねりが伝播する状況で入出港時に船体動揺が港口および港内の岸壁近くで船体動揺が大きくなる。特に岸壁近くで Roll が大きくなる現象が定量的にされ、着離岸時に $\pm 2 \sim 5^\circ$ 程度の Roll が 10~15 分近く連続して発生し、着離岸作業が非常に困難となっている。

(3) 着離岸時の作業困難度を Roll の観測値から船橋作業位置の上下および左右方向への変位振幅を求め、評価を行った。これより、港外で周期 10~15 s の波高が 1 m を超える場合に上下および左右方向に両振幅 1 m および 2 m 以上の変位が生じ、最も緊張が高まる局面での作業に大きな支障を及ぼしている。

(4) 港外からの波浪伝播と港内での船体動揺の数値解析から構成される着離岸時の船体動揺に関する数値解析モデルを新たに構築し、観測値との比較を行った。計算値は実測値よりやや大きくなる傾向があるものの、Roll の包絡波形の特性を含めて概ね再現できていると考えられる。また計算の結果、着離岸作業障害を引き起こしている主要因は波高 0.5~0.6 m、周期 10~15 s 程度のうねり成分であり、港外でのうねりが 2 m を超えるような状況でこのような波浪条件となり、着離岸が困難となる。

(5) 着離岸作業障害に関する困難度をより詳細に検討し、新たな港内静穏度の指標として評価できるものとする必要がある。また港口部で発生する船体動揺についても Pitch による底触など重要な問題が残されている。この点についても総合的に考慮できる入出港時の船体動揺に関する数値解析モデルを構築・改良する必要がある。

謝辞： 本研究を実施するにあたり、ブルーハイウェイライン西日本株式会社 野口國明部長および「さんふらわあさつま」の船長をはじめ乗組員方々、事務所の方々には現地観測時に終始暖かいご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を示す次第である。また数値モデルの構築にあたり、波浪伝播の部分に関して「平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究、港湾空港技術研究所資料、No. 1036, 162 p., 2002 年」を参考とした。なお本研究は平成 14 年度科学研究費補助金（基盤研究(C)）(1) 研究代表者：神戸商船大学 久保雅義教授の交付を受けて実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 河村義頭・庄司邦明・南 清和・世登順三 (2001): 脈拍測定による船上での作業環境調査, 日本航海学会論文集, 第 104 号, pp. 243-249.
- 久保雅義・水井真治・井上和博・橘 英敏・芳田利春 (1997): 波浪下における入港漁船の安全性評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 851-855.
- 笹 健児・久保雅義 (2001): 船体運動測定装置を活用した全天候型海上輸送システム構築へ向けての基礎的研究, 海洋開発論文集, Vol. 17, pp. 235-240.
- 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動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 941-945.
- 白石 悟・久保雅義・榊原繁樹・笹 健児 (1999): 長周期船体動揺の数値計算による再現性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 861-865.
- 永井紀彦 (2002): スペクトル解析に基づく波向と長周期波の観測情報の高度化, 平成 12 年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 103-118.
- 平山克也 (2002): 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No. 1036, 162 p.
- 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲 (1994): 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.