

波浪下における入港漁船の安全性評価に関する研究

久保 雅義* ・ 水 井 真 治** ・ 井 上 和 博***
橘 英 敏**** ・ 芳 田 利 春*****

1. はじめに

多くの産業都市機能が集積している港湾は、高度成長期に地方振興の使命のもとに外洋に面した各地に数多く建設されてきた。これら地方港湾は自然環境(波浪、風)の厳しい立地条件にあり、海陸輸送の転換点である港湾機能が十分発揮されていない面がある。著者らは、港湾における船舶入港時の安全向上問題を漁港を事例として取り上げ、実務者に対するヒアリング調査(久保ら、1992;1993)や海難調査(久保ら、1995)を過去に行った。その結果、漁港の安全性を確保するため港口の沖合いに防波堤が設置されても、より一層の入港操船の安全向上を望む声が根強く残っていることが分かった。自然環境の厳しい漁港において入港時の安全性評価のため、こうした漁港における船舶動揺の計測が必要であると考えた。ところが、波浪下における入港船舶の船体動揺の計測例は、著者らの知るかぎり見当たらない。その理由は、計測自体が危険を伴い、波浪下において船舶の動揺を確実に計測可能な装置がないことが考えられる。そこで、新たに、船内と船外から2種類の測定装置を併用した動揺測定装置の開発を行った。開発した装置を利用して、冬季日本海に面する漁港に赴いて、実務者が問題とする波浪下における入港局面の計測を行い、漁船の入港容易度について現地観測値からモデル化を行った。波浪下における船舶の入港容易度は、港内静穏度と同じように、港湾建設時の評価項目になると考えられる。得られた現地計測値からいくつかの知見が得られたので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験場所と使用漁船

実験は、図-1に示す日本海に面する兵庫県香住漁港において、地元の漁業共同組合・漁港管理者の協力を得て平成8年11月21日～23日に3日間行った。同漁港で実験を行った理由は、過去に実務者に対するヒアリング

調査などを行っており、また、稼働している小型漁船の協力が容易に得られたことによる。

図-2に示した小型漁船は、20 G.T.型巻き網漁船であり実験のため借用したものである。漁船の主要寸法及び船内装置の搭載位置と陸上装置用反射プリズムの位置関係を図-2に示す。漁船と装置の位置関係及び自由振動試験結果から重心位置を推定した。船内装置は重心位置より上下位置は上方約0.55 m、前後位置は後方約0.64 m、左右位置は船体中心線上での機器配置にて実験を行った。反射プリズムは、図-2のとおり、船内装置よりさらに上方3.4 mの断面位置に設置した。使用漁船の自由振動試験より、横揺れ平均周期は約3.9 secであった。

2.2 実験装置とその配置

入港する漁船の正確な移動変位を得るために自動追尾式レーザ測位装置、漁船に搭載した動揺測定装置及び港

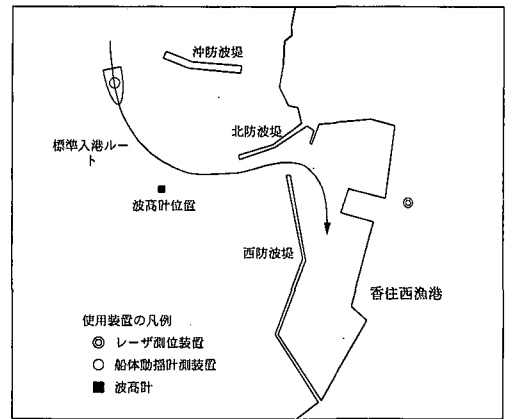


図-1 実験海域図

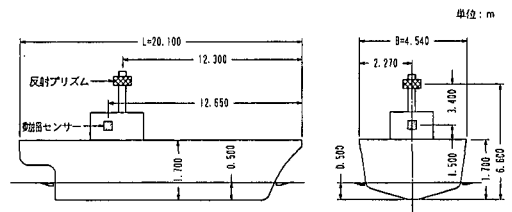


図-2 漁船の主要寸法と船内装置の配置

* 正会員 工博 神戸商船大学教授 船貨輸送研究施設
** 広島商船高等専門学校助教授 商船学科
*** 三井造船(株)特機設計部
**** 正会員 東洋建設(株)総合技術研究所 水域環境室長

口付近の波高と主波向きを観測するため波高計・電磁流速計を使用した。使用した装置の配置概要を図-1に示している。

開発した動揺測定装置は、波浪下における入港運動という極めて時間的に限られた操船局面を対象とし、入港船舶の移動変位及び船体動揺を短い測定時間間隔で測定が可能であるよう設計を行った。すなわち、漁船の移動変位は、自動追尾式レーザ測位装置（陸上装置）により漁船に取り付けた反射プリズムを陸上の追尾局から計測し、一方、船体動揺量は船上に搭載した3軸加速度・3軸角度測定装置（船上装置）で計測した。この陸上／船上装置を併用することにより双方の利点を活用し、欠点を補う装置設計となっている。また、陸上／船上装置間の時間同期機構はGPS受信機を、モニター表示機構はデジタル電話回線を利用したシステムを採用した。

さらに、海底設置型の波高計を港口付近に設置し、表面波の超音波波高・海底部での二次元流速分布の測定を行った。なお、波高計設置位置は、追尾局位置を測位原点とし、レーザ追尾局位置より三次元位置を極座標で出力させたのち、波高計設置位置を計算原点とした二次元平面に座標変換できるようあらかじめ測量を行った。これらの計測装置は、実験前に時刻の同期を取り、サンプリング間隔を0.2 secに統一し、計測を行った。

2.3 実験シナリオ

実験は、前半に使用漁船の横揺れの自由振動測定及び速力別の緊急停止距離の測定を行った。後半に、あらかじめ想定した入港コース及び漁船実務者に判断をゆだねた入港コースによる動揺測定を合計20回行った。

3. 実験結果の概要

3.1 観測波浪

図-1に示した港口の変針点付近に設置した超音波波高計により固定点の波高変化を測定した。図-3に主要な実験を行った11月22日10時から14時までの観測波浪の2時間経過毎の観測波のスペクトルを示している。11月22日12時前後に波浪はうねり性が強く、波スペク

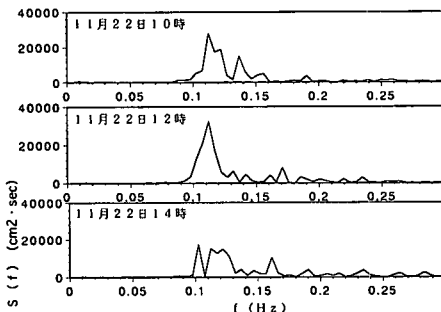


図-3 観測波のスペクトル変化

トルの分布が時間経過とともに徐々に減衰していることがわかる。主要な実験を行った11月22日10時から14時の間に港口付近の有義波は、 $T_{1/3}$ は約9(sec)、 $H_{1/3}$ は約1.0(m)の波浪が観測された。

3.2 出会い波と船体動揺について

観測波高は、固定点での観測波形を入港する漁船の移動点上で受ける波形（以下出会い波と略称する。）に換算を行い、計測した動揺との対応関係を検討した。以下に出会い波の算定方法を示す。

はじめに、各時刻における観測波高 H_m を次式に示す有限フーリエ級数に近似する。

$$H_m = \frac{A_0}{2} + \sum_{j=1}^{N/2-1} [A_j \cos(\sigma_j t) + B_j \sin(\sigma_j t)] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos(\sigma_{N/2} t),$$

σ_j は各成分波の周波数、 t は経過時間、 N はデータ数を表す。また、係数 A_j , B_j はフーリエ係数を表す。

つぎに、次式により、 H_m と同一時刻の x, y 位置における出会い波高 (H_{mx}) を算定する。

$$H_{mx} = \frac{A_0}{2} + \sum_{j=1}^{N/2-1} [A_j \cos(\sigma_j(t-t_0) + k_j x \cos \alpha + k_j y \sin \alpha)] + \sum_{j=1}^{N/2-1} [B_j \sin(\sigma_j(t-t_0) + k_j x \cos \alpha + k_j y \sin \alpha)] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos(\sigma_{N/2}(t-t_0) + k_{N/2} x \cos \alpha + k_{N/2} y \sin \alpha);$$

ここで、 k_j は各成分波の波数、 x, y はレーザ測位装置で得られた波高計位置を原点とし、真東を x 軸、真北を y 軸とした時の x 距離 (m)、 y 距離 (m)、さらに、 α は電磁流速計より得られた二次元流速分布から推定した主波向きを表す。 t_0 は図-4に示すとおり、漁船が受けた最初の波が位相速度 (C) で規則に到達したとすれば波高計設置位置に到達する時間遅れ (t_0) は図-4のとおり推定で

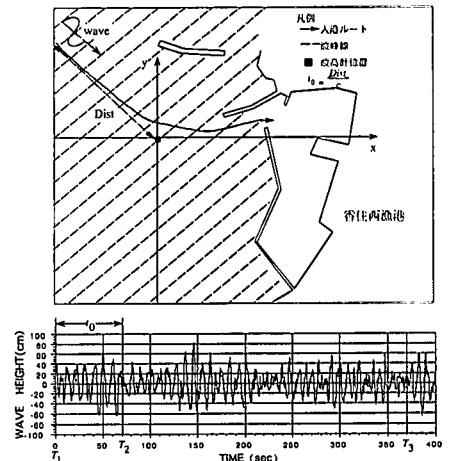


図-4 出会い波算定の時間遅れ (t_0) について

きる。

観測波と同一時刻の出会い波の算定例を図-5に示した。図-5より、漁船の受けた出会い波周期は、固定点での観測波周期より長くなることが分かる。図-5の例では観測波周期約8.2 secに対し出会い波周期は約20 secである。多くの防波堤配置は、主波浪の波の遮蔽を目的に建設されていることから、港口付近で入港漁船が受けている出会い波波向は、多くの場合、船体の後方又は斜め後方となり、出会い波周期は、発生している波浪の周期より長くなる特徴を有していると考えられる。従来、室内実験で指摘されていた出会い波の特徴(高石, 1992)を現地計測により示すことができた。

図-5は、観測波、算定した出会い波の時系列とともに同一時刻の上下加速度とその低周波成分波も示した。低周波成分波は、出会い波の半周期以下の高周波成分をカットしている。図-5より上下加速度の低周波成分は、わずかな位相差があり出会い波と振幅符号が反転し、対応関係があることがわかる。また、算定した出会い波の平均周期及び平均振幅より上下加速度の平均振幅の概算と実測例の対応を表-1に示した。加速度概算値は加速度の実測平均振幅値をほぼ説明することができる。

さらに、出会い波の半周期以上の低周波成分をカット

した高周波成分波は、図-6に示すとおり、ピッチングの角加速度とほぼ対応関係がある。

4. 実験結果の考察

4.1 コースの違いによる動揺の特徴

コースの違いにより動揺量がどのような特徴を持つかを検討した。図-7は、港口付近で急変針入港した実験を代表例として示している。港口前の100 sec間の出会い波の振幅、ロール角、船首方位の変化を示している。

図-7は、0 sec～約50 secまでの間、追い波状態であり出会い波周期が長く、変針後斜め横波状態となり、出会い波周期が短くなることを表している。出会い波に対応した横揺れ及び船首揺れをしている様子がよく分かる。図-7に示した例のように、小型漁船の危険な動揺は、横揺れ及び船首揺れが同時に起こるような斜め追い波状態に起こる動揺ではないかと考えられる。今後、様々な波浪条件の現地計測により、危険な動揺について検証する必要がある。

4.2 入港容易度の提案

得られた現地観測結果より、港外から港内に至る間の入港漁船の動揺に着目した入港容易度の評価指標について検討を加えた。ここでは、漁船の入港容易度を、波浪下において危険となる要因を評価指数に換算する手法を提案する。

はじめに、港外の変針前の直進局面の動揺は、前進方向の加速度、速度及び変位が危険要因と考えられるので、a) から c) の項目の加速度指数、ブローチング指数及び障害物接近指数を定義する。つぎに、港口の変針前後の変針局面の動揺は、横揺れと船首揺れに着目し、d) と e) の項目で横傾斜指数及び船首揺れ指数を定義する。

a) 加速度指数

式(1)で定義した加速度指数は、波位相速度と波浪中の平均速度の差を $T/2\pi$ で除して得られた最大前後加速度と観測した前後加速度の比を示している。このように実測加速度 a を無次元化すれば、航走中の漁船の危険性を指標化できる。式(1)の分母は、波浪中を航走している漁船が波により $2\pi/T$ の角周波数で加速されて、位相速度 C になれば危険になることを想定した加速度である。

$$\text{Index 1} = a_s / \{(C - V) / T / 2\pi\} \dots\dots\dots (1)$$

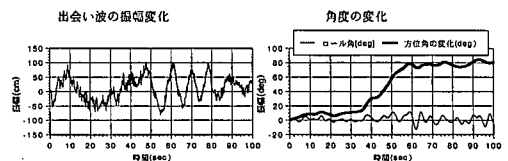


図-7 出会い波と動揺角の対応例

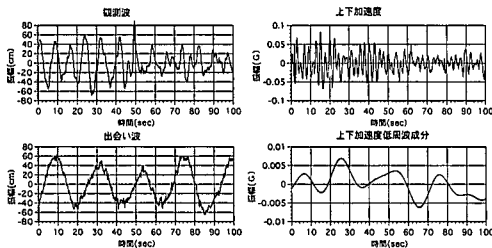


図-5 出会い波と上下加速度の対応例

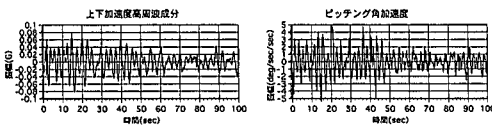


図-6 上下加速度とピッチング角加速度の対応例

表-1 上下加速度振幅の概算値と実測値の比較

番号	出会い波周期 (sec)	出会い波振幅 (m)	加速度概算値 (G)	加速度実測振幅 (G)
1	22.1	0.57	0.0049	0.0036
2	10.45	0.38	0.014	0.015
3	11.06	0.52	0.0171	0.022
4	12.7	0.56	0.014	0.015
5	25.95	0.46	0.0028	0.0038
6	15.4	0.63	0.0107	0.014
7	22.1	0.61	0.005	0.007

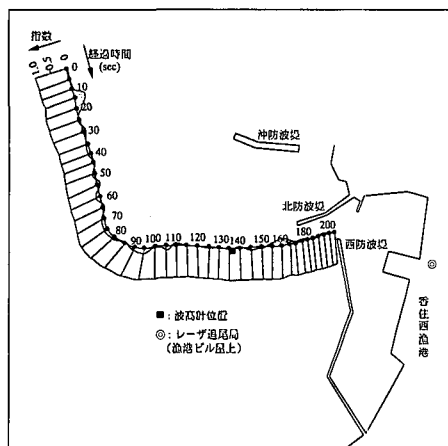


図-8 加速度指数の計測例

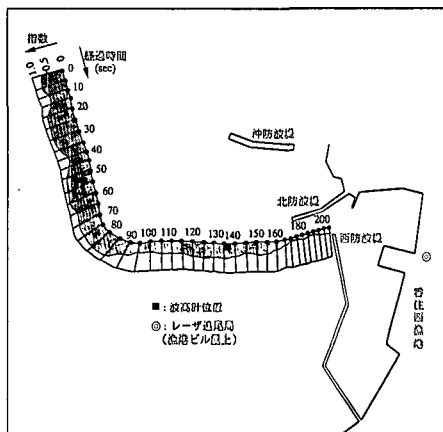


図-9 ブローチング指数の計測例

$$C = \sqrt{g \cdot L \cdot \tanh(2\pi h/L) / 2\pi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 α_s は観測した前後加速度 (m/sec²)、 C は式(2)で得られる波位相速度 (m/sec)、 V は漁船の平均速度 (m/sec)、 T は観測した有義波周期 (sec)を表す。追い波を受けながら急変針入港した場合の加速度指数の変化を図-8に示す。図-8はレーザ測位装置より得られた漁船軌跡を示し、この軌跡の外向き法線方向にいずれも指数の時系列変化を図表化している。以下の図-8～図-12も同様である。図-8より、沖防波堤から変針までの間に追い波を受けて入港船の前後加速度が変動している様子がわかる。

b) ブローチング指数

ブローチング指数は、式(3)により定義した時系列の観測速力と観測時の波位相速度の比で示した速力変化の割合を表す指数である。ブローチング指数が1になれば波乗り現象を起こし、危険が生じることになる。

$$\text{Index 2} = V_i \cdot \cos(\beta_i) / C \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 V_i は漁船の時系列の測定速力 (m/sec)、 C は式(2)で得られる波位相速度 (m/sec)、 β_i は主波向きと時系列船首方位とのなす角度 (deg)を表す。ブローチング指数は、実験時の波浪がうねり性であったことより、波の方向分布までは考慮せず、波乗りの程度を表す近似指数として指標化した。追い波を受けながら急変針入港した場合の各指数変化を図-8と同様に図-9に図表化した。ブローチング指数は、うねり性の有義周期約9secの波浪により沖防波堤から変針点までの間において指数値が大きく、入港船の前後速度から見た危険度を指標化している。

c) 障害物接近指数

式(4)で定義する障害物接近指数は、漁船の緊急停止距離と防波堤までの接近距離を自船正面で1、自船真後ろで0、となるような重み関数 $\cos(\theta/2)$ で除して得ら

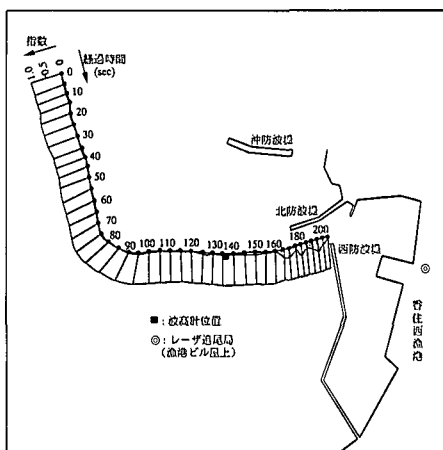


図-10 障害物接近指数の計測例

れる実質的危険距離との比で防波堤までの接近の度合いを示す指数である。

$$\text{Index 3} = D_s / \{D_i / \cos(\theta/2)\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 D_s は事前実験で得られた漁船の緊急停止距離 (m)、 D_i は漁船から最も近い防波堤までの時系列距離 (m)、 θ は漁船から防波堤へ下ろした垂線と船首尾線とのなす角度 (deg)を表す。

追い波を受けながら急変針入港した場合の各指数変化を図-10に示す。図中の障害物接近指数は、船首揺れが主原因と考えられる変動を示しながら主防波堤が接近するほど増加していることがわかる。

d) 横傾斜指数

港口に到着する前の変針局面の動揺量は、横揺れ角度が危険要因であると考えられるので、式(5)により、横傾斜指数を定義する。横傾斜指数は、観測した横傾斜角度と通常状態の漁船限界横傾斜角度の比で波浪中の横傾斜の限界傾斜までの割合を表す指数である。

$$\text{Index 4} = \theta_r / \theta_{r_{\max}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

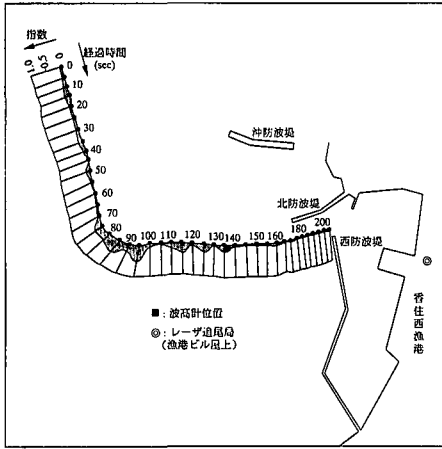


図-11 横傾斜指数の計測例

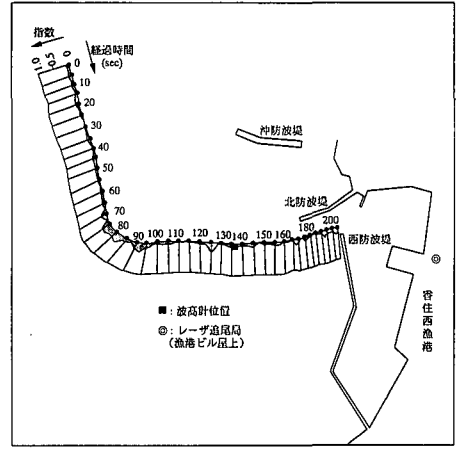


図-12 船首揺れ指数の計測例

ここに、 θ_r は観測した横傾斜角度(deg)、 θ_{rmax} は船舶復原性規則(運輸省監修, 1996)で定められている限界横傾斜角(deg)を表す。

図-8～図-10と同様に追い波を受けながら急変針入港した場合の指数分布を図-11に図表化した。追い波を受けて急変針入港した場合の横傾斜指数は、一時的に急角度変針による外方傾斜と波浪による傾斜が重なり、変針前後に、横傾斜指数の分布が高いことがよくわかる。

e) 船首揺れ指数

港口に到着する前の変針局面の動揺量は、横揺れ角と同様に船首揺れ角度も危険要因であると考えられるので、式(6)により、船首揺れ指数を定義する。

$$\text{Index } 5 = \theta_y / \theta_{y\max} \quad \text{..... (6)}$$

ここに、 θ_y は観測した船首揺れ角度、 $\theta_{y\max}$ は漁船の保針可能な船首揺れ角度を表す。

船首揺れ指数は、横傾斜指数と同様に、観測船首揺れ角度(deg)と限界船首揺れ角度(deg)の比で表した波浪中の保針不可能になる船首揺れ角度までの割合を表す指数である。図-8～図-11と同様に追い波を受けながら急変針入港した場合の船首揺れ指数分布を図-12に図表化した。図-11と同様に変針前後に、横傾斜指数の分布が高いことがよくわかる。

5. 結 語

今回の現地計測をもとに得られた結果を以下のとおり要約することができる。

5.1 入港漁船が受けた出会い波は、固定点での観測波高、レーザ測位装置で得られた二次元移動変位、電磁流速度計データより得られた主波向きを用いて算定することができる。本論で示した例では、観測波周期約8.2 secに対し出会い波周期は約20 secである。防波堤配置は、主波浪の波の遮蔽を目的に建設されていることから、港口

付近で入港漁船が受けている出会い波の方向は、ほぼ船体の後方となり、出会い波周期は発生している波浪の周期より長くなる特徴を有している。

5.2 上下加速度の低周波成分と出会い波はわずかな位相差があり、振幅符号が反転し、対応関係があることが明らかになった。

5.3 港外から港内に至る間の入港漁船の動揺に着目した入港容易度の評価指標について検討を加えた。漁船の入港容易度を、波浪下において危険となる5つの要因について評価指数に換算する手法を提案した。港外の変針前の直進局面の動揺は、前進方向の加速度、速度及び変位が危険要因と考えられるので、①加速度指数、②ブローチング指数及び③障害物接近指数の指標化を行った。さらに、港口の変針局面の動揺は横揺れと船首揺れに着目し、④横傾斜指数及び⑤船首揺れ指数を指標化した。この入港容易度の指標化により、漁船入港時の安全性をより明確に評価できることが明らかになった。

最後に、荒天時の困難な現地計測に、絶大な協力と便宜を図っていただいた香住町漁業協同組合の小柴公二参事、漁船船主の中村和雄氏に対して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 久保雅義・斎藤勝彦・岡田 学 (1992): 漁港の入港問題について, 日航論文集, 第87号, pp. 39-46.
- 久保雅義・斎藤勝彦・岡田 学 (1993): 冬期日本海沿岸漁港における入港問題の現地調査, 日航論文集, 第89号, pp. 133-139.
- 久保雅義・松原雄平・水井真治・世登順三 (1995): 漁船の海難構造解明に関する基礎的研究, 日航論文集, 第93号, pp. 69-77.
- 高石敬史 (1992): 斜め追い波の危険出会い群波現象に対する一考察, 日航論文集, 第86号, pp. 161-167.
- 運輸省監修 (1996): 海事六法 (96年度版), pp. 508-513.