

津波来襲時における船舶の漂流挙動・衝突力評価モデルの開発

東北大学大学院 学生会員 ○橋本 貴之
東北大学大学院 正 会 員 越村 俊一
神戸大学大学院 非 会 員 小林 英一
東電設計株式会社 正 会 員 藤井 直樹

1. 序論

津波氾濫に伴う漂流物が構造物等に衝突して被害が拡大するため、臨海都市域では深刻な事態が予想される。特に2004年インド洋津波時には大型船を含む漂流船舶により甚大な被害をもたらした。津波漂流物に関する研究は多くの事例があり、最近では後藤ら(2009)などが精緻な数値解析を行っているが、広範囲における予測の実施には計算機容量の問題がありきわめて難しい。

そこで本研究では計算負荷が小さい小林ら(2005)の船舶漂流モデルを拡張して、藤井ら(2005)の船舶漂流実験を解析・検証することによってその妥当性を評価した。

2. 船舶漂流のモデル化

(1) 津波の流況計算

津波の流況は、浅水理論式(式(1)–(3))を支配方程式としたStaggered Leap-frog有限差分法によって解く。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x_0} + \frac{\partial N}{\partial y_0} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_0} \left(\frac{M^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y_0} \left(\frac{MN}{H} \right) = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x_0} - \frac{gn^2}{H^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_0} \left(\frac{MN}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y_0} \left(\frac{N^2}{H} \right) = -gH \frac{\partial \eta}{\partial y_0} - \frac{gn^2}{H^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3)$$

ここで、 η :水位変動量、 t :時間、 x_0, y_0 :水平座標、 h :静水深、 H :全水深($=\eta+h$)、 M, N :流量フラックス、 g :重力加速度、 n :Manningの粗度係数(合成等価粗度)である。

(2) 船舶の漂流計算

漂流船舶の運動方程式は、漂流運動が水平方向に卓越して波の傾斜による影響が小さく、主たる運動がSurge, Sway, Yawのみと仮定して定式化する。

船舶の漂流計算では、津波の流速成分を空間固定座標系(x_0, y_0)から船体重心を原点とする船体移動座標系(x, y)に座標変換を行い、船体移動座標系の津波流速(u_c, v_c)と船速(u, v)との相対速度は $u_s = u - u_c, v_s = v - v_c$ と表す。

漂流船舶の運動方程式は式(4)のように表記でき、左辺はオイラー式で右辺は小林ら(2005)が提案した式である。

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr) = -m_x \dot{u}_s + m_y v_s r + X_{vr} v_s r + X_H + X_F \\ m(\dot{v} + ur) = -m_y \dot{v}_s - m_x u_s r + Y_H + Y_F \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = N_D + N_R \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 m :船の質量、 m_x, m_y :付加質量、 I_{zz} :慣性モーメント、 J_{zz} :付加慣性モーメント、 r :重心回りの回転角速度、 X_{vr} :前後力補正係数、 X_H, Y_H :流体力、 X_F, Y_F :海底摩擦力、 N_D :船体分割による回頭モーメント、 N_R :船舶の回頭運動による抵抗モーメントである。

船体に働く流体力はモリソン式に基づき式(5)で表す。

$$\begin{cases} X_H = \frac{\rho}{2} L d U_c^2 C_{DX}(\theta_c) + C_{MX} \rho \dot{u} V \\ Y_H = \frac{\rho}{2} L d U_c^2 C_{DY}(\theta_c, H/d) + C_{MY} \rho \dot{v} V \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 ρ :海水密度、 L :船長、 d :船の喫水、 U_c :進行方向における津波流速と船速との相対速度、 θ_c :船体に対する津波の入射角度、 C_{DX}, C_{DY} :船体抵抗係数、 C_{MX}, C_{MY} :慣性力係数、 V :船体の浸水体積である。なお C_{DX} はシェンヘル式、 C_{DY} は既往の類似船型実験に基づき設定される。

水深が船の喫水よりも小さい場合は海底摩擦力 $F_f = (m - \rho V)g\mu$ が働き、各成分 X_F, Y_F に分けられる。ここで、 V :船の体積、 g :重力加速度、 μ :摩擦係数である。

船長などの船体スケールが計算の空間格子間隔よりも大きい場合、局所的かつ複雑な津波の流れ場を考慮する必要がある。そこで、船体を複数のセグメントに分割して各々で流体力および海底摩擦力を求め、 N_D を算定する。

船体が回転することで生じる抵抗モーメント N_R は、小林ら(2005)より実験的に求められた回頭モーメント係数と船側方向の平均的な抵抗係数を用いて簡便に表される。

(3) 衝突後の船舶の漂流挙動

衝突後の船速および回頭角速度は運動量保存則により算定し、漂流船舶の衝突力 F_c は水谷ら(2005)により提案された式(6)で近似する。

$$F_c = \rho d L v_i^2 + \frac{m v_i}{dt} \quad (6)$$

ここで、 v_i ：接触位置における船速である。

3. 津波漂流船舶実験との比較検証

(1) 計算条件

本解析では、防波堤のない場合と港湾内の場合を実験に対して検証する。津波の流況計算は入射波条件を波高0.10m, 周期90sec, 押し波入射とし、 $dx=0.05m$, $dt=0.005sec$ と設定する。船舶の漂流計算は箱形の模型船(主要目はTable1)を対象に解析を行い、船舶の初期位置および入射波に対する初期船首方位角を防波堤のない場合には護岸から2.0m前方で45°, 港湾内の場合には護岸から3.5m前方で90°とした。なお、陸上部には内陸0.5m地点に細い棒状の被衝突物を固定配置している。

Table 1 模型船の主要目

Length [m]	Breadth [m]	Draft [m]	Weight [kg]
0.544	0.115	0.022	1.28

(2) 解析結果および考察

船舶の漂流計算を行う前に、実験時の流れ場の再現性を確認するため波形を比較する。その結果、実験波形と計算波形がほぼ一致したため再現できたと判定する。

次に上記流れ場における船舶の漂流挙動を解析し検証を行う。船舶の漂流航跡をFig.1, Fig.2に示す。実験結果と計算結果の船の動跡を比較すると、防波堤のない場合における陸上部での衝突後の挙動や港湾内の複雑な流れ場での漂流挙動に関して整合性が認められる。しかしながら、船体の初動過程や漂流速度に関して相違点が見られるため更なる改善が必要となる。また、Fig.1での漂流船舶の最大衝突力は1.09Nと算定され、このときの衝突作用時間は0.032sec, 衝突速度は0.028m/sであった。

4. 結論

本研究では、船体座礁時の挙動・船体分割による回頭運動・モリソン式に基づく流体力・衝突後の漂流挙動および衝突力を新たに定式化し、津波による船舶漂流モデルを拡張した。さらに、藤井ら(2005)により行われた船舶漂流実験データをもとに、漂流挙動を再現することで本モデルの妥当性を検証した。

本解析により良好な結果を得られたことから、衝突を伴う一様流の流れ場および港湾内での複雑な流れ場における船舶の漂流挙動は本モデルによって再現可能である

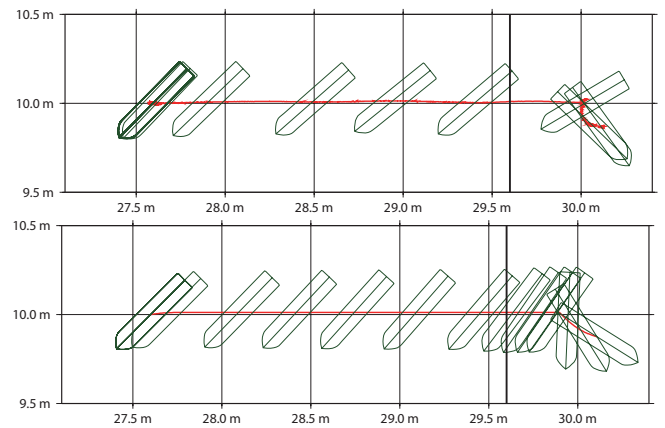


Fig. 1 防波堤がない場合の船舶の漂流軌跡(上:実験, 下:解析)

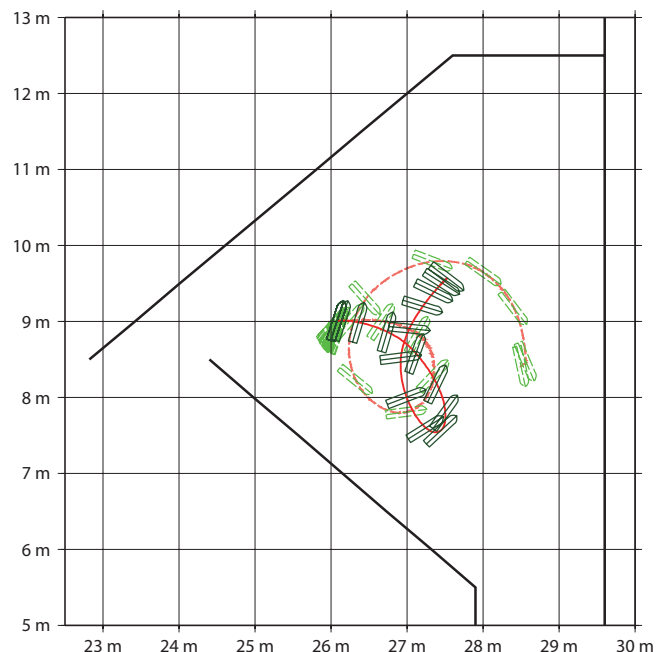


Fig. 2 港湾内の場合の船舶の漂流軌跡(破線:実験, 実線:解析)

と分かった。しかし、適切な衝突力の算定には実験結果との照合も含めた様々な衝突形態を検討する必要がある。

謝辞：実験データの提供など東京電力(株)のご協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 後藤仁志, 五十里洋行, 殿最浩司, 柴田卓詞, 原田知弥, 溝江敦基(2009): 粒子法によるエプロン上のコンテナ漂流挙動追跡のシミュレーション, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No. 1, pp. 261-265.
- 小林英一, 越村俊一, 久保雅義(2007): 津波による船舶の漂流に関する基礎研究, 関西造船協会論文集, 第243号, pp.49-56.
- 藤井直樹, 大森政則, 池谷 毅, 朝倉良介, 武田智吉, 柳沢賢(2005): 港湾における津波漂流物の解析, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 296-300.
- 水谷法美, 高木祐介, 宮島正悟, 富田孝史, 白石和睦: エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究(2005), 海岸工学論文集, 第52巻, pp.741-745.