津波来襲時における船舶漂流・座礁モデルを用いた 臨海都市域危険度マップの開発

Development of Hazard Map in Waterfront Area by Ship Drifting and Grounding Model in Tsunami

橋本貴之¹ · 越村俊一² · 小林英一³ · 藤井直樹⁴ · 高尾 誠⁵

Takayuki HASHIMOTO, Shunichi KOSHIMURA, Eiichi KOBAYASHI Naoki FUJII and Makoto TAKAO

Not only hydrodynamic forces of tsunami current cause serious damage, but also driftage by tsunami may cause additional damage in a port and harbor area. Especially, in the 2004 Indian Ocean Tsunami, many stranded ships were observed. Therefore, when considering disaster prevention, the identification of expansion mechanisms of tsunami damage caused by drifted ships is very important. This study aims to develop a practical model to analyze the ship drifting and grounding motion by tsunami current. The simulated ship locus was consistent with the evidenced ship locus. And, as a hazard map, the potential damage due to ship drifting was evaluated by incorporating the possibility of collision with drifted ship.

1. 序論

津波氾濫流に伴う漂流物が陸上域に到達し,家屋や構 造物等に衝突することにより被害が拡大する.2004年イ ンド洋津波災害時には,大型船を含む数多くの漂流船舶 が基大な被害をもたらしたことが確認されている.特に, 人口・財産が集中する臨海都市域においては深刻な事態 が予想されるため,津波による大型船舶の漂流被害の予 測や危険回避のための停泊地の検討は,津波防災・減災 対策上きわめて重要となる.

津波による漂流物に関する研究は、最近では米山ら (2009) や後藤ら(2009) が固体・液体の連成問題とし て数値解析的に取り組むなど、木材・瓦礫等の漂流物挙 動を精度良く再現できる数値モデルが開発されている. しかし、これらの数値モデルは広範囲の船舶漂流などマ クロな視点で漂流物の挙動を扱う場合、計算時間や計算 機容量の制約を受ける.

そこで本研究では、計算負荷が小さい小林ら(2005) のモデルを拡張した橋本ら(2009)のモデルを改良し、 津波による船舶の漂流・座礁・衝突の挙動を評価できる 数値解析モデルの開発を目的とする.モデルの妥当性は、 藤井ら(2005)の船舶漂流実験を用いて計算格子間隔や 船舶の空間スケールとの関連で検証する.さらに、船舶 の停泊位置の違いによる漂流軌跡の拡がりや、構造物へ の衝突の危険性を示すことで漂流船舶による被害評価の

$ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} $	正会員 正会員	修(工) 博(工) 工博	大成建設(株) 東北大学准教授 神戸大学教授	土木設計部 大学院工学研究科 大学院海事科学研究科
4	正会員	博(工)	東電設計(株)	社会基盤推進部
5	正会員	工修	東京電力(株)	原子力設備管理部

ための要件を検討し,船舶の陸上域への漂流や構造物へ の衝突被害が予想される臨海都市域における船舶漂流危 険度マップを試作・提案する.

2. 船舶漂流のモデル化

本研究では、津波氾濫流の流況を数値計算により求め、 その流体力学的な諸量を境界条件として船舶漂流の運動 方程式を逐次解くこととする.以下に概説する.

(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.

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

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

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

ここで、 η :静水面からの水位変化,t:時間, x_0,y_0 :水 平座標,h:静水深,H:全水深 (= η +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

船舶の漂流計算には、上記の津波伝播・遡上モデルで 求められた流れ場から船体に作用する力およびモーメン トを求め、逐次船体の運動方程式を解き、船舶の漂流軌 跡および座礁位置を求める.

漂流船舶の運動方程式は,漂流運動が水平方向に卓越 し,波の傾斜による影響が小さく,主たる運動がSurge



(前後), Sway (左右), Yaw (鉛直軸回りの回転)のみ と仮定して定式化する.

津波の流況計算で求められた津波流速 (u_{c0},v_{c0}) を空間 固定座標系 (x_{0},y_{0}) から,図-1の船体重心を原点とする 船体移動座標系 (x,y)の津波流速 (u_{c},v_{c}) に座標変換を 行い,船速 (u,v) との相対速度は $u_{s}=u-u_{c}v_{s}=v-v_{c}$ と表す.

a) 漂流船舶に関する運動方程式の導出

漂流船舶の運動方程式は式(4)で表記され,左辺は理 論式で右辺は小林ら(2005)が提案した実験式である.

$$m(\dot{u} - vr) = -m_x \dot{u}_s + m_y v_s r + X_{vr} v_s r + X_H + X_F$$

$$m(\dot{v} + ur) = -m_y \dot{v}_s - m_x u_s r + Y_H + Y_F$$
 (4)

$$(I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = N_D + N_R$$

ここで, m:船の質量, $m_{xr}m_{y}$: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} :船体の回転による抵抗モーメントである. なお,船体座礁時における挙動を解析するために, y方向の付加質量 m_{y} および付加慣性モーメント J_{zz} につい ては浅水効果の影響を考慮して船舶位置の水深により 変化させる(日本造船学会, 1970).

b) 漂流船舶に働く作用力

船体に作用する流体力は橋本ら(2009)を拡張し,局 所的かつ複雑に変化する流れ場に適用できるように慣性 力を考慮してモリソン式に基づく式(5)で表す.

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

ここで、 ρ :海水密度、L:船長、d:船の喫水、 U_s :船 体進行方向の津波流速と船速との相対速度 (= $\sqrt{u_s^2 + v_s^2}$)、 θ_c :船体に対する津波の入射角、 C_{DX} , C_{DY} :船体抵抗係 数, C_{MX},C_{MY}:慣性力係数(=1.0), V:船体の浸水体積 である.なお,船体抵抗係数に関してC_{DX}はシェンヘル 式に基づく抵抗値を用い,C_{DY}は浅水効果の影響を考慮 して既往の類似船型実験値(日本海難防止協会編,1976) などを参考に設定する.

水深が船の喫水よりも小さい場合には海底摩擦力 $F_{f=}$ $(m-\rho V)g\muが作用し、各成分<math>X_{F},Y_{F}$ に分けられる.ここで、 μ :摩擦係数(動摩擦係数:0.8,静摩擦係数:0.7)である.

c) 漂流船舶に働く作用モーメント

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,漂流船舶の回頭運動を精度良く表現するた めに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セグ メントごとに流体力および海底摩擦力を求める.さらに, 船体長軸方向の中心線上に各セグメントの重心があると 仮定し,各セグメントに働く力の大きさとその位置から 船体分割による回頭モーメントN_Dを式(6)により算定 する.

ここで、 n_D : 船体分割数、 Y_i : 各セグメントに働く作用 力、 l_i : 船体重心から各セグメントの重心までの距離で ある. なお、船体分割数 n_D は船体のスケールと空間格子 間隔との相互関係により設定する.

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 N'_r と船側方向の平均的な抵抗係数 C_{Ds} を用いて式 (7)で簡便に表される.

$$N_R = \frac{\rho}{2} L^2 dU_s N'_r r - \frac{\rho}{64} L^4 dC_{Ds} r |r| \qquad (7)$$

d) 船体衝突後の漂流挙動

本モデルでは、橋本ら(2009)を拡張して船体衝突後 の漂流挙動を新たに定式化する.

漂流船舶と陸上構造物との衝突後の船速および回頭角 速度は運動量保存則により式(8)で算定される.

$$\begin{cases} m(u_f - u_p) = e_x X dt \\ m(v_f - v_p) = e_y Y dt \\ I_{zz}(r_f - r_p) = e_y X_a Y dt \end{cases}$$
(8)

ここで, u_p, v_p, r_p :衝突前の船速および回頭角速度, u_f, v_f, r_f :衝突後の船速および回頭角速度, e_x, e_y :力積が作用する方向の単位ベクトル,dt:時間格子間隔, x_a :船体重心からの衝突点の位置,X, Y:水平作用力である.

3. 船舶漂流実験との比較

藤井ら(2005)は、一様流による単純な流れ場と港湾



表-1								
台長 [m]	船幅 [m]	喫水 [m]	重量 [kg]					
0.544	0.115	0.022	1.28					

内での複雑な流れ場における船舶の漂流挙動実験を実施 した.この実験により得られた結果を用いて船舶の漂流 挙動を解析し、本モデルによる再現精度を検証する.

(1) 計算条件

本解析では、図-2の実験装置で行われた船舶漂流実験 のうち、防波堤のない場合と港湾内の場合を対象に検証 する.津波の流況計算では、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.船舶の漂流計算では、船首尾方向に対称な箱形浮 体の模型船(主要目は表-1)を対象に解析を行い、 dx=0.05m、dt=0.0001secとする.船舶の初期位置および入 射波に対する初期船首方位角は、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設置している.

(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 を確認するため実験と計算の波形を比較する.防波堤の ない場合は陸上護岸から2.0m,0.5m前方位置,港湾内の 場合は陸上護岸から3.5m,0.1m前方位置における実験と 計算の波形比較を図-3,図-4にそれぞれ示す.これらの 図より,実験波形と計算波形がほぼ一致したため,防波 堤のない場合における一様流および港湾内の場合におけ る複雑な流れ場を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.船舶の漂流航跡を図-5,図-6に示す.実験と計算 の船の動跡を比較すると,防波堤のない場合における陸 上部での衝突挙動や港湾内の場合における複雑な流れ場 での漂流挙動に関して整合性が認められる.したがって, 本モデルによる船舶漂流の再現精度は妥当と言える.し かし,船の初動過程や漂流速度に関して実験と計算の相



(上:実験,下:解析)

違点が見られるため、モデルの更なる改善が必要となる.

さらに,計算に用いた空間格子間隔をdx=0.05,0.08, 0.10,0.20m(船体分割数は12,8,6,4)と変化させ,港湾 内の複雑な流れ場において船舶の漂流挙動を解析した. 図-7の結果から,計算に用いる空間格子間隔が小さいも しくは船体分割数が大きいほど実験時の漂流軌跡を捉え られていることが確認できる.ただし,計算に用いる空 間格子の適切な選択には詳細な検証が必要である.

4. 船舶漂流危険度マップの試作

本研究では、津波の陸上遡上に伴う大型船舶の漂流・ 座礁や構造物等への衝突を考慮した臨海都市域の危険度 マップを試作することで、津波による船舶漂流被害の新 たな評価手法を提案する.

(1) 計算条件

2004年インド洋津波の被災地であるインドネシア・バ ンダアチェにおいて,海岸線から約2.4km陸上へ流され た大型発電船(主要目は表-2)の漂流事例を検証対象と して取り上げ,初期停泊位置の違いによる漂流軌跡のば らつきを1000ケースの計算試行により算定し,その分布 範囲を包絡するように危険地域を特定・可視化する.こ



のとき,船舶漂流の危険度を表す指標には船舶通過率と いう新しい尺度を導入し,通過率の低い箇所を除いて船 体衝突による被害の影響を受けやすい地域を特定する. ここで船舶通過率は,全計算ケースにおいて計算領域の メッシュ (23m)内を漂流船舶が通過した回数をカウン トし,全計算試行回数で除することにより求める.

津波の流況計算では、Koshimuraら (2009) による波 源モデルを初期条件として与え、ネスティングした計算 格子を利用する.特にバンダアチェでは、高分解能地形 データ (dx=23m)を用いて浸水計算を実施する.船舶の 漂流計算では、衛星画像により判読した発電船の原位置 から変位幅を西方向へ0.05m,北方向へ0.10mとして計算 試行し、初期停泊位置の違いによる漂流軌跡のばらつき を検証する.また、被災後の構造物分布データを使用す ることで船体衝突後の挙動変化を考慮する.ただし、建 物は剛体と見なし、衝突時の船体破壊および構造物の破 壊はないものと仮定する.なお、津波の流況計算および 船舶の漂流計算に用いた時間格子間隔は、それぞれ dt=0.25, 0.20secとする.

(2) 解析結果および考察

試作した船舶漂流の危険度マップの一例を図-8に示 す.このときに得られた全ての漂流軌跡から,漂流船舶 が衝突する構造物の総棟数は667棟(ただしメッシュ数) と算定され、マップ内にCollided Building(灰色)で表す. この結果を,実際の構造物の位置と照合することによっ て,漂流船舶の衝突による構造物の被害棟数を推定予測 することが可能となる.さらに,Collided Buildingを包括 するように線で囲むことで構造物への衝突被害の範囲 (At-risk Building:図-8の横線で示す範囲)を定める.一



表-2 大型発電船の主要目

船長 [m]	船幅 [m]	喫水 [m]	重量 [ton]
63.0	19.0	2.6	2,500

方,構造物への衝突により大きく拡がる漂流軌跡から船 舶通過率をメッシュ単位で算定し,0.1%以下を除外して 表示することによって船舶の漂流範囲(Drifting Area: 図-8の点で示す範囲)を特定した.

以上のように,船舶漂流・座礁モデルを活用すること で船舶漂流危険度マップを作成し,臨海都市部において 被害拡大の危険性が高い領域を明らかにすることができ た.しかし,船舶漂流による被害の適切な評価には,漂 流船舶の衝突力や構造物自体の強度を具体的に算定する 必要がある.実験結果との照合も含めた様々な衝突形態, 衝突力の評価や構造物強度との関連性を検討することが 今後の課題である.

5. 結論

本研究では、モリソン式に基づく流体力、構造物への 衝突後の漂流挙動を新たに定式化することによって津波 による船舶漂流モデルを拡張した.本検証で得られた結 論を以下に示す.

本モデルの再現精度を検証するため、藤井ら (2005) の船舶漂流実験データをもとに船舶の漂流挙動を解析し た.実験と計算の比較から良好な整合性を得られたため、 衝突を伴う一様流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と 分かった.また、計算に用いる空間格子間隔が小さいほ ど解析精度が向上することが確認できた.



図-8 インドネシア・バンダアチェの事例で試作した船舶漂流の危険度マップ

2004年インド洋津波によるインドネシア・バンダアチ ェでの船舶漂流事例において,初期停泊位置の違いによ る船舶の漂流軌跡の拡がりを検証し,船舶の通過確率か ら被害の拡大が予想される地域を特定するため,船舶漂 流の危険度マップを作成した.本モデルを発展させるこ とで,津波による漂流船舶が及ぼす被害を定量的に評価 することが可能である.

最後に,残された課題を解決した船舶の漂流解析モデ ルを我が国の想定津波に適用することにより,臨海都市 部における大型船舶の漂流および被害の拡大過程および 広域予測に関して詳細な検討が期待できる.例えば,岸 壁や橋脚等への大型船舶の衝突を考慮した耐津波性能の 評価や,市街地への漂流による構造物被害の算定,船舶 漂流による被害拡大を軽減するための避泊地の検討など に発展させることが本研究の最終的な目標である.

謝辞:本研究の一部は,科学研究費補助金基盤B (21360430,代表:小林英一)および同基盤S(19101007, 代表:河田惠昭)の補助を受けて実施された.ここに謝 意を表す.

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(2005):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.
- 日本海難防止協会編(1976):超大型船操船の手引き,成山堂 書店, p. 39.
- 日本造船学会(1970):第2回操縦性シンポジウムテキスト, p. 69.
- 橋本貴之・越村俊一・小林英一 (2009):津波による大型船舶 の漂流挙動解析ーインドネシア・バンダアチェにおける 事例ー,土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No. 1, pp. 316-320.
- 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.
- 米山 望・永島弘士 (2009):複雑な移動・回転を考慮した津 波漂流物の三次元数値解析手法の開発,土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No. 1, pp. 266-270.
- Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura (2009) : Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, JSCE, Vol.51, No.3, pp.243-273.