

津波による大型船舶の漂流挙動解析 - インドネシア・バンダアチェにおける事例 -

Analysis of Large Ship Drifting Motion by Tsunami - A Case Study in Banda Aceh, Indonesia -

橋本貴之¹・越村俊一²・小林英一³

Takayuki HASHIMOTO, Shunichi KOSHIMURA and Eiichi KOBAYASHI

Hydrodynamic forces of tsunami current may cause additional damage by drifting ships or vessels in a harbor area. This study focuses on the damage mechanisms of drifted large ship, and aims to develop a model to analyze the large ship drifting motion by tsunami current. The model is implemented to Banda Aceh, Indonesia, to simulate the drift of a 2500-ton power plant barge of 63m-long which was drifted approximately 2.4 km inland by the 2004 Indian Ocean tsunami. In the model, the ship started drifting by the first wave, toward several kilometers inland from the original position. We found that the simulated grounding position was consistent with the evidenced position in the middle of Banda Aceh city.

1. 序論

津波の遡上に伴って漂流物が陸上へ流されることにより、沿岸域の被害が拡大する。特に、1993年北海道南西沖地震津波による奥尻島での被害や2004年インド洋津波による大災害では、数多くの漁船や大型船が市街地内に打ち上げられ、甚大な被害をもたらしたことが確認されている。したがって、漂流船舶による津波被害の拡大過程を予測することは、防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、これまで多くの事例がある。たとえば、藤井ら(2005)は漂流物を個別要素法で表し、モリソン式で算定した流体力との関連で漂流物の位置を計算する手法を開発した。得られた計算結果は実験による結果とほぼ一致しており、再現性が高い。また、牛島ら(2006)、川崎ら(2006)は、三次元および鉛直二次元解析を用いた津波に伴う漂流物の挙動予測を実施している。さらに、川崎ら(2007)は3次元気液多相乱流モデルを用いて漂流物の動的解析を、東野ら(2007)は津波の流れと漂流物および構造物との相互作用について移動境界を用いた精緻な解析を行っている。

しかしながら、米山ら(2008)が指摘しているように、これらの既往研究は高精度な漂流物の挙動予測が可能であるものの、広範囲での予測を行うには多大な時間を要するため、実用上は困難であると考えられる。現段階では、津波による船舶漂流のダイナミクスを簡便に評価できるモデルは数少ない。その中でも、小林ら(2005)は浮体の漂流とその位置を逐次算定する計算負荷の少ない簡便な方法を提案している。陸上まで

漂流した船舶の座礁挙動を考慮していないことや、局所的かつ複雑な津波の流れ場における浮体の挙動を十分に表現できないという問題が残されているが、この手法を発展させることで船舶の漂流・座礁挙動の予測モデルが得られると考える。

本研究は、小林ら(2005)のモデルを拡張して上記課題を解決した船舶の漂流解析モデルを開発し、インドネシア・バンダアチェにおける2004年インド洋津波時の漂流船舶の実例を再現することで、本モデルの妥当性を評価することを目的とする。

2. シミュレーションモデル

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 差分法によって解く。

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

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

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

ここで、 η : 静水面からの水位上昇, t : 時間, x_0, y_0 : 水平座標, h : 静水深, H : 全水深 (= $\eta + h$), M, N : x_0, y_0 方向の流量フラックス, 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

船舶の漂流運動に関する運動方程式は、漂流船舶の運

1 学生会員 東北大学 大学院工学研究科
2 正会員 博(工) 東北大学准教授 大学院工学研究科
3 工博 神戸大学教授 大学院海事科学研究科

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。

船舶の漂流計算では、船体重心を原点とする移動座標系を用い（図-1）、空間固定座標系 (x_0, y_0) における津波の流速成分 (u_{c0}, v_{c0}) から、船体移動座標系 (x, y) における津波の流速成分 (u_c, v_c) を式（4）の通り定義する。

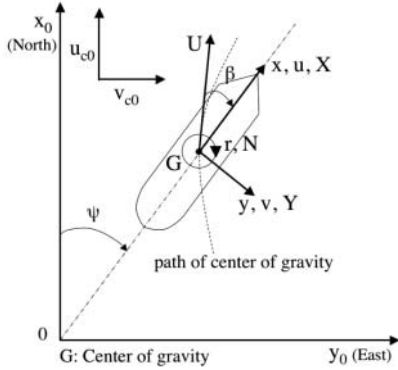


図-1 船舶の漂流計算に用いる座標系

$$\begin{cases} u_c = u_{c0} \cos \psi + v_{c0} \sin \psi \\ v_c = -u_{c0} \sin \psi + v_{c0} \cos \psi \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

したがって、船体移動座標系の船速成分 (u, v) と津波の流速成分との相対速度は、 $u_s = u - u_c, v_s = v - v_c$ と表す。

a) 漂流船舶の水平移動

津波によって船体に作用する水平力 X, Y は、式（5）のように表記できる。

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr) = X \\ m(\dot{v} + ur) = Y \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

一方、小林ら（2005）より既往の研究・実験から船体に作用する水平力は式（6）で表現しており、両者を統合して式（7）のように書き換える。

$$\begin{cases} X = -m_x \dot{u}_s + m_y v_s r + X_{vr} v_s r + X_H + X_F \\ Y = -m_y \dot{v}_s - m_x u_s r + Y_H + Y_F \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{cases} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y + X_{vr}) vr \\ -(u_{c0} \sin \psi - v_{c0} \cos \psi) (m_y - m_x + X_{vr}) r = X_H + X_F \\ (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) ur \\ -(u_{c0} \cos \psi + v_{c0} \sin \psi) (-m_y + m_x) r = Y_H + Y_F \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 m ：船の質量、 m_x, m_y ： x, y 方向の船の付加質量、 u, v ： x, y 方向の船速成分、 r ： z 軸回りの回転角速度、 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ ： u, v, r の時間微分（加速度）、 X_{vr} ：前後力補正係数、 X_H, Y_H ： x, y 方向の船体に及ぼす流体力、 X_F, Y_F ： x, y 方向の海底摩擦力（別項参照）である。

なお、船舶の座礁時における挙動を解析するために、 y 方向の船の付加質量 m_y に関しては、浅水効果の影響も考慮して水深により変化させる（日本造船学会、1970）。

さらに、津波の流れは船体近傍では一定方向であると仮定すると、船体に及ぼす流体力 X_H, Y_H は流れによる抗力の式に基づき、式（8）のように表される。

$$\begin{cases} X_H = \frac{\rho}{2} L d U_c^2 C_{DX}(\theta_c) \\ Y_H = \frac{\rho}{2} L d U_c^2 C_{DY}(\theta_c, H/d) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 ρ ：海水密度、 L ：船の長さ、 d ：船の喫水、 U_c ：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、 C_{DX}, C_{DY} ： x, y 方向の船体抵抗係数である。

また、式（8）右辺の船体抵抗係数に関して、 C_{DX} については浅水効果の影響は考慮せずにシェンヘル式に基づく抵抗値を用い、 C_{DY} については浅水効果の影響を考慮して類似船型の実験値（日本海難防止協会編、1976）などを参考に設定する。

b) 漂流船舶の回頭運動

船体のスケールが津波の流況計算に用いる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は、局所的に複雑な津波の流況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、セグメントごとに流体力および海底摩擦力を求め、船体に与える z 軸回りのモーメント N を算定することで漂流船舶の回頭運動を表現する。このとき、船体分割数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（図-2）。各セグメントに働く作用力 Y_i は、流体力および海底摩擦力 Y_{Fi} （別項参照）を考慮して算定する（式（9））。

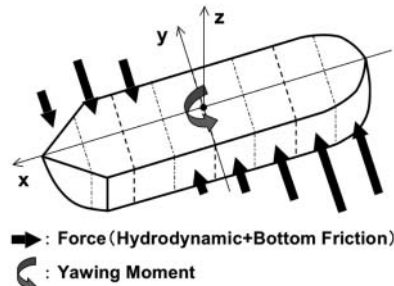


図-2 船体分割による回頭運動（8等分の場合）

$$Y_i = \frac{\rho}{2} A_{Di} v_{si} |v_{si}| C_D + Y_{Fi} \quad (i = 1, \dots, N_{DI}) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 A_{Di} ：各セグメントの鉛直平面への投影面積、 v_{si} ：各セグメントにおける y 方向の船速と津波流速との相対速度、 C_D ：抗力係数（=1）、 N_{DI} ：船体分割数である。

さらに、式（9）で用いられる津波の流速成分 (u_{c0i}, v_{c0i}) は、各セグメントの重心位置でそれぞれ読み取る。なお、

前項で導出される運動方程式の津波特性値（水位変化、水平流速）は、各セグメントで読み取られた値を、容積に関して重み付けすることにより平均化して用いる。

z軸回りのモーメントNは、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（ l_i ：船体重心から各セグメント重心までの距離）から式（10）で算定する。

$$N = \sum_{i=1}^{N_{DI}} (Y_i \times l_i) \dots\dots\dots (10)$$

c) 海底摩擦による船舶の座礁

全水深が船の喫水よりも小さい場合、船底は海底地盤に接触して船体は座礁する。このとき、船体には海底面からの摩擦力が働き、海底摩擦力 F_f およびx,y方向の各成分 X_F, Y_F は式（11）で算定される。

$$F_f = \mu g (m - \rho V)$$

$$\left(X_F = F_f \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, Y_F = F_f \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、V：船の体積、 μ ：摩擦係数である。

3. 計算条件

(1) 船舶の漂流解析モデルの初期検討

船舶の漂流挙動を規定するのは、流れによって船体に働く水平力とモーメントであり、特に水平力は船体抵抗係数に依存する。このとき、計算に用いる空間格子間隔を50m、波の入射角を-180~180°までの範囲で15°刻みとし、各入射角について船舶の漂流距離を算定することにより、船舶の初期位置と波の入射角による漂流挙動のばらつきに関するレーダー図を作成する。

さらに、船首と船尾で流況の異なる流れ場での船舶の回頭運動を精度良く再現するために、空間格子間隔の適切な選択を行う必要がある。このことから、空間格子間隔を25,50,100mと変化した場合の船舶の漂流挙動を検証する。

なお、どちらも一定水深、押し波入射の条件（表-1）のもと、箱形と仮定したモデル船（主要目は表-2）を用いる。

(2) バンダアチェにおける漂流船舶の解析・検証

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る。また、計算結果の十分な精度を確保するために、計算領域の格子をネスティングする。特にバンダアチェでは、高分解能地形データ（ $dx=23m$ 、図-3）を用いて浸水計算を実施する。

船舶の漂流計算では、上記の非線形長波理論による津波伝播・遡上モデルで求められた流れ場から船体に作用する力を求め、逐次船体の運動方程式を解き、船舶の漂

表-1 入射波条件

| Depth [m] | Amplitude [m] | Period [min] |
|----------------|------------------|-----------------|
| 30.0(Constant) | 2.5 | 20.0 |

表-2 モデル船の主要目

| Length [m] | Breadth [m] | Draft [m] | Displacement [tonnage] |
|---------------|----------------|--------------|---------------------------|
| 50.0 | 15.0 | 1.5 | 900 |

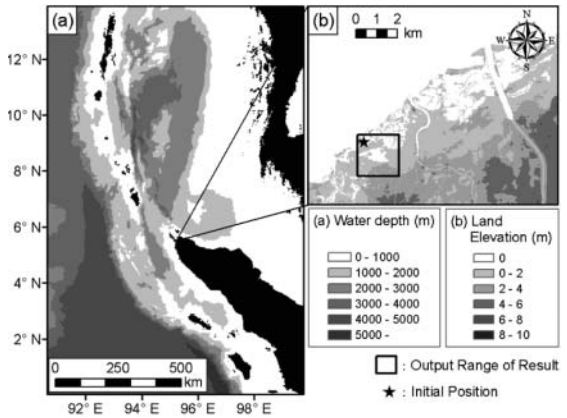


図-3 計算領域

表-3 船舶の主要目

| Length [m] | Breadth [m] | Draft [m] | Displacement [tonnage] |
|---------------|----------------|--------------|---------------------------|
| 63.0 | 19.0 | 2.6 | 2,500 |

流軌跡および座礁位置を求める。なお漂流船舶は、2004年インド洋津波により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-3）を対象とし、船体形状を箱形と仮定して、津波来襲前の船舶の初期位置は衛星画像から判読した。

4. 結果および考察

(1) 船舶の漂流解析モデルの初期検討

局所的な津波の流れ場における船舶漂流モデルを新たに開発し、基礎的な特性を検証した。

波の入射角に対する船舶の漂流距離の変化を図-4に示す。図-4より、波の入射角が0°もしくは180°の場合（船の正面もしくは真後から波を受けた場合）、船舶の漂流距離は極めて小さくなるのが確認できる。このことから、船舶の漂流距離は津波の入射方向に対する船舶の初期位置が大きく影響することが分かる。さらに実現象への適用には、船舶の初期位置と向き、津波外力の正確な評価が不可欠であると言える。

船首尾で流況の異なる流れ場での空間格子間隔による

船舶の漂流挙動の変化を図-5に示す。上図は船舶の漂流軌跡を表しており、下図は漂流中における船首方位角の時系列変化を表している。図-5上図より、空間格子間隔が100mの場合のみ他と異なる漂流軌跡を示している。同様に図-5下図より、空間格子間隔が100mの場合のみ他と比較して船体が回転していないことが確認できる。このことから、船舶の回頭運動を良好に再現するために、船舶の漂流解析モデルと連動する津波数値計算の空間分解能は、船体の空間スケールよりも数倍小さい格子を選択することが望ましいことが分かった。ただし、その精度の評価は実験等を通じて詳細に行う必要がある。

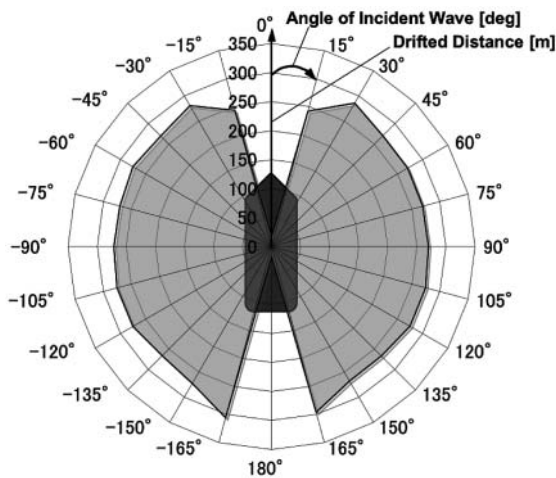


図-4 波の入射角に対する船舶の漂流距離

(2) バンダアチェにおける漂流船舶の解析・検証

2004年インド洋津波における発電船の漂流事例をもとに、大型船舶の漂流挙動を再現して検証を行った。本解析の結果として、船舶の漂流航跡を図-6に示す。

地震発生後、津波の第一波の到達により船舶は、来襲前に停泊していた初期位置から陸側（南東方向）へ流され、地面に着底しながら漂流したことが分かる。その後、徐々に船速をおとし船首を左右方向に揺らしながら（図-7）漂流した船舶は、最終的にバンダアチェの市街地中心部で停止した。計算での船舶の漂流時間は、地震発生後約40分から約69分後までである。また計算による停止位置は、実際の位置よりも約300m離れているが、その漂流距離は整合している。このことから、本モデルによって大型船舶の漂流過程を良好に再現できることが分かった。

以上より、大型船舶の漂流距離については、ある程度の再現が可能である。しかし、船舶の座礁および停止位置の正確な予測には、漂流経路上の家屋や構造物等への衝突による船舶の運動量や軌道の変化、地形の起伏による抵抗則などをさらに考慮して、モデルを改良する必要がある。

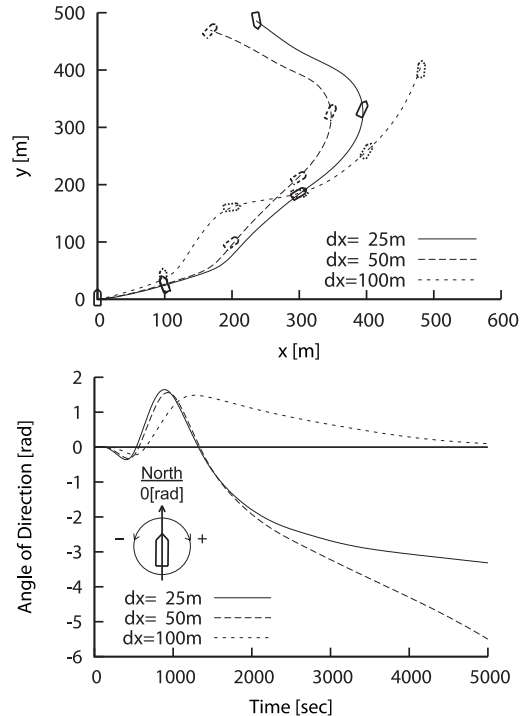


図-5 空間格子間隔による船舶の漂流挙動の変化

5. 結論

本研究では、船体の着底移動および船体分割による回頭運動を新たに定式化することにより、大型船舶の漂流解析モデルを拡張した。さらに、2004年スマトラ島沖地震津波におけるインドネシア・バンダアチェの漂流船舶を対象に、津波による大型船舶の漂流挙動解析を行う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、簡便な計算で構成される本モデルは、大型船舶の漂流挙動を再現するにあたり実用的であると判断できる。

さらに、前章で示した課題を解決した船舶の漂流解析モデルを、わ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：河田恵昭）の補助を受けて実施された。ここに謝意を表す。

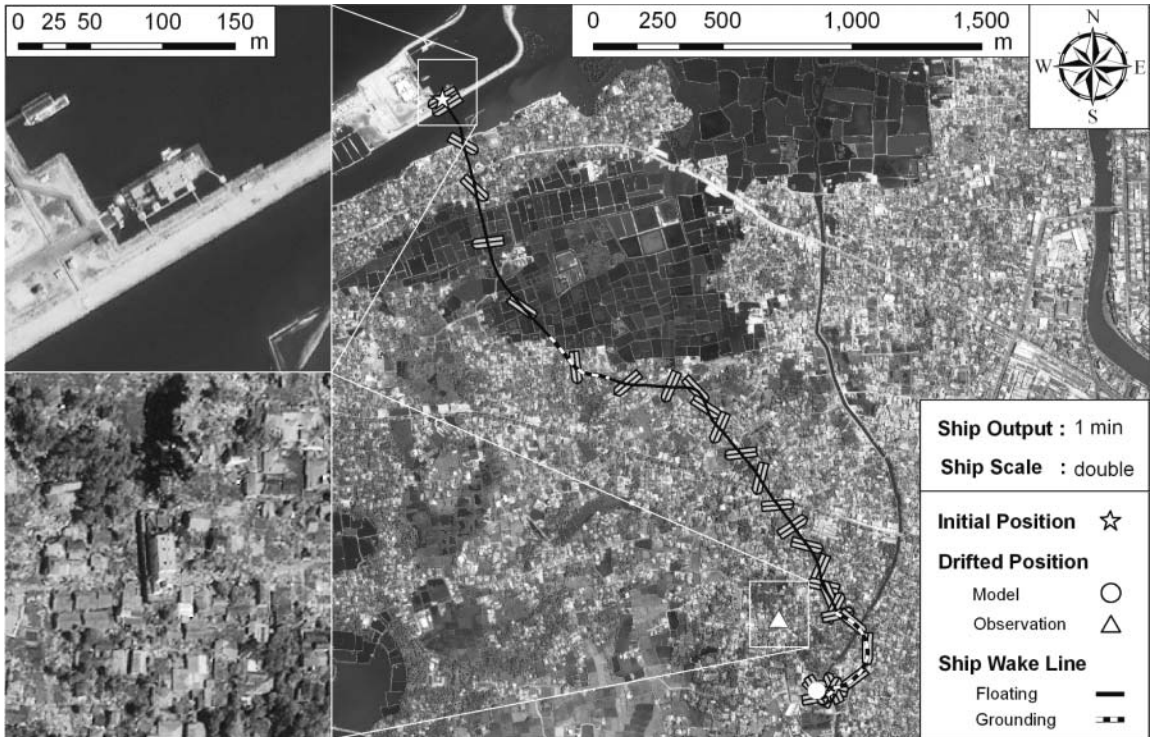


図-6 船舶の初期位置・座礁位置および津波による船舶の漂流軌跡 (インドネシア・バンダアチェ)

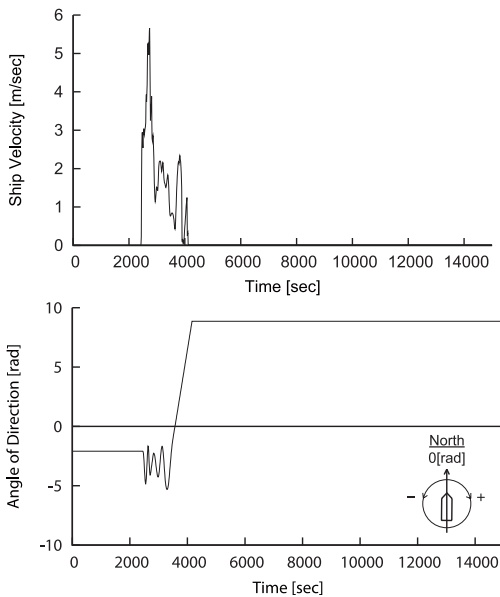


図-7 漂流中における船速および船首方位角の時系列変化

参 考 文 献

牛島 省・山田修三・藤岡 奨・禰津家久 (2006) : 3次元自由表面流れによる物体輸送の数値解析法 (3D MICS) の提案と適用性の検討, 土木学会論文集, No.810/II-74, pp.79-89.

川崎浩司・山口 聡・袴田充哉・水谷法美・宮島正悟 (2006) : 段波と矩形物体の衝突・漂流過程における作用波圧特性, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.786-790.

川崎浩司・袴田充哉 (2007) : 3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の開発と波作用下での漂流物の動的解析, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 31-35.

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.

東野洋司・富田孝史・有川太郎・本多和彦 (2007) : 漂流物解析のための移動境界を用いた流体と剛体の連成計算手法, 第62回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, No.2-290, pp.579-580.

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・戸田圭一 (2008) : 津波来襲時の漂流物挙動解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.886-890.

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, in press.