

多数の津波漂流物を解析する数値モデルの開発

NUMERICAL MODELING OF TSUNAMI DRIFTED BODIES

本多和彦¹・富田孝史²・西村大司³・坂口 章⁴

Kazuhiko HONDA, Takashi TOMITA, Daiji NISHIMURA and Akira SAKAGUCHI

¹正会員 修(工) (独)港湾空港技術研究所 津波防災研究センター (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 津波防災研究センター (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 埼玉県 総合政策部 総合政策課 (〒330-9301 さいたま市浦和区高砂3-15-1)

⁴正会員 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所
(〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町1-57-3)

Port and harbor areas are vulnerable to tsunamis, because of high population and business activities as well as low-lying areas. Tsunami causes various damages which include inundation and destruction of structures as well as drift of vessels, cars, containers and others. The tsunami-drifted bodies have the potential to collide with houses and buildings and then to cause secondary damage to them. In this study, a numerical model has been developed for estimation of behavior of multiple tsunami-drifted bodies. In the present model, a drifted body due to the tsunami is moved in terms of drag and inertia forces on the body, which are calculated by fluid velocity distributing on side faces of the body. Furthermore, this model includes the model of collision between drifted bodies and between the drifted body and structure. The present model is verified qualitatively in comparison with some simple model tests and applied to the calculation in an actual coastal area.

Key Words : *Tsunami, numerical simulation, drifted ships, drifted containers, collision of ship, collision of container*

1. はじめに

沿岸部に来襲する津波は、建物の破壊や浸水などの被害を発生させるだけではなく、船舶、自動車、コンテナ等押し流し、それら漂流物が建物等に衝突することによって被害が発生することがある。

本研究では、津波による船舶等の被害を推定するための基礎ツールとして、まず多数の船舶等が津波により漂流する挙動を計算可能な数値計算モデルを開発した。開発したモデルの特徴は、i)多数の漂流物を扱えること、ii)流れによる漂流物の並進運動だけでなく回転運動を考慮できること、iii)漂流物同士や漂流物と構造物あるいは地面との接触や衝突を考慮できること、および iv)係留の破断等による漂流開始条件を導入したことである。

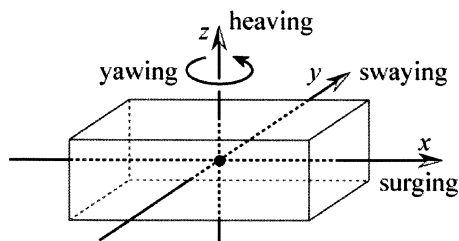


図-1 物体運動の概要

簡単なモデルケースを対象に、漂流物計算モデルの妥当性を検証した。さらに、実地形を対象とした津波漂流計算を実施し、その適用性を検討した。

2. 漂流物計算モデル

数十あるいは数百の多数の漂流物を扱うことができるように、本モデルでは予め計算しておいた津波の水位や流速の時・空間変動データから、抗力係数および慣性力係数を用いて流体から物体に作用する力を評価し、漂流物の運動を計算する手法を採用した。物体は直方体の剛体として扱った。物体の3軸方向の並進運動と3軸回りの回転運動のうち、図-1に示すx軸方向およびy軸方向の並進運動、並びにz軸回りの回転運動を、運動方程式より直接評価する。なお、z軸方向には、水位変化に追従して喫水を保ちながら並進運動するものとし、x軸およびy軸回りの回転運動はないものとする。

(1) 漂流物の運動

流体から物体に作用する力の評価方法として、箱型台船を対象とした池谷ほか¹⁾による評価モデルを参考とした。この評価モデルはモリソン式を拡張し

たものであり、抗力と慣性力を考え、船首尾方向の力 F_x 、舷側方向の力 F_y および z 軸まわりのモーメント M_z の3成分について、次式で評価するモデルである。なお、図-2 および図-3 に変数の定義および座標系の定義を示す。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= (1-\omega)F_{DX1} + \omega F_{DX2} + F_{MX} \\ F_y &= (1-\omega)F_{DY1} + \omega F_{DY2} + F_{MY} \\ M_z &= (1-\omega)M_{DZ1} + \omega M_{DZ2} + M_{MZ} \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\omega = \begin{cases} 1.0 - \frac{0.95}{0.2} \left(\frac{h}{D} - 1.0 \right) & : 1 < \frac{h}{D} \leq 1.2 \\ 0.05 & : 1.2 < \frac{h}{D} \end{cases} (2)$$

ここで、 B 、 L 、 h および D は、それぞれ物体の幅、長さ、水深および喫水を表している。式 (1) 中の右辺第1項は流れが鉛直方向に変化することによって生じる抗力を、右辺第2項は流れが平面内で変化することによって生じる抗力を、右辺第3項は慣性力を表している。これらのうち、右辺第1項および第3項の評価式では、物体の側面における相対流速の分布を取り入れている。そのため、物体よりも小さなスケールで変化する流速の影響も考慮できる。

原論文中的 M_{DZ1} の評価式をそのまま採用すると、一様流れの中を物体が相対速度0で運動しながら回転運動する場合は M_z が0となり、回転を永久に続けてしまう。そこで、本数値モデルでは、座標系の対称性を考慮し、次式のように修正したものを採用した。

$$\left. \begin{aligned} M_{DZ1} &= -\frac{\rho}{2} \iint_{sm} C_{DX1,sm} U_{sm} |U_{sm}| Y dY dZ \\ &\quad -\frac{\rho}{2} \iint_{sn} C_{DX1,sn} U_{sn} |U_{sn}| Y dY dZ \\ &\quad +\frac{\rho}{2} \iint_{ps} C_{DY1,ps} V_{ps} |V_{ps}| X dX dZ \\ &\quad +\frac{\rho}{2} \iint_{sb} C_{DY1,sb} V_{sb} |V_{sb}| X dX dZ \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで、式 (3) の各項にある $C_{DX1,sm}$ 、 $C_{DX1,sn}$ 、 $C_{DY1,ps}$ および $C_{DY1,sb}$ の係数は抗力係数である。

その他の項の評価式および抗力係数、慣性力係数等の各種係数は原論文に倣った。

式 (1) から求まる力やモーメントを用いて、 x - y 平面内の並進および z 軸回りの運動方程式の差分式を解き、その結果を時間積分することで漂流物の運動を求めた。

(2) 漂流物の衝突

漂流物と地面や建物との衝突および漂流物相互の衝突を表現する次のような衝突モデルを導入した。

図-4 に示すように、水平方向には長さ L の線分からの距離 R (影響半径) の位置に壁面を有し、鉛直方向には喫水 D を有する形状を仮定し、衝突処理を実施した。また、地形や建物形状については、格子状に与えた地形および建物の標高データを用いて、その標高値を持つ直方体を各格子に配置した。

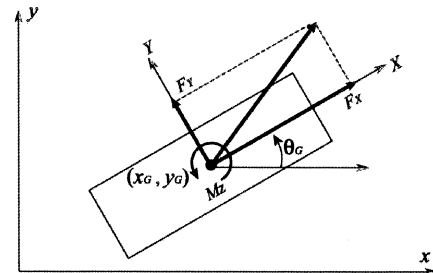


図-2 力およびモーメントの定義

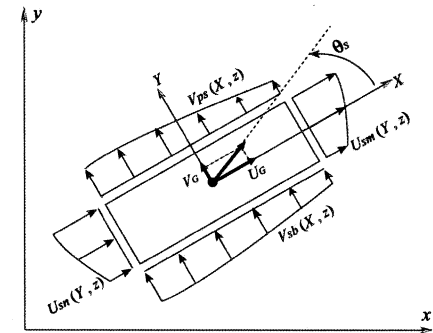


図-3 相対流速の定義

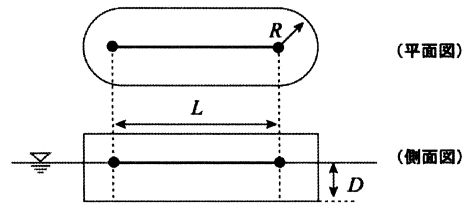


図-4 接触判定における物体の形状

差分された運動方程式および角運動量式を時間積分することで、漂流物の運動を求めるため、微小時間経過後に、物体が重なってしまうことがある。そこで、衝突時には、物体の位置を補正することで非接触状態を再現する、また、運動量を補正することで、衝突後の速度や角速度の変化を評価する。

衝突タイプは、乗り上げ、物体相互の衝突、地形・建物側面との衝突の3タイプに分類される。本研究では、それぞれの衝突タイプについて、以下のようにモデル化を行った。

a) 乗り上げ

水位の低下によって物体が地面や建物に乗り上げた場合には、その水平方向の運動も鉛直方向の運動も停止させ、底面の座標を接触した地面や建物の高さにも補正する。

b) 物体相互の衝突

それぞれの物体の中心に位置している線分 L_1 および L_2 の最短距離を考え、その最短距離を与える各線分上の2点を結ぶ向きで反発しあう方向を、衝突に伴う反力が作用する方向とする (図-5)。

位置補正については、それぞれの物体を反力が作用する方向に平行移動させる。その移動距離の比は、 R_1 と R_2 の比と等しくなるように決定する。

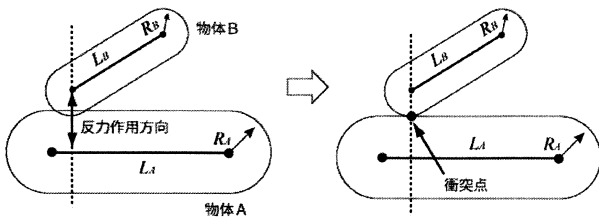


図-5 物体同士の補正イメージ (平面図)

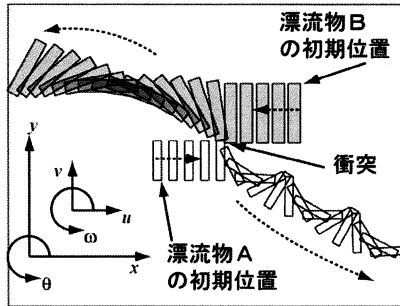


図-6 漂流物同士の衝突

運動量の補正については、次式で表わされる並進運動の運動量保存式および回転運動の角運動量保存式より行う。ここで、 m 、 I 、 u 、 v 、 u' 、 v' および ω は、それぞれ質量、慣性モーメント、 x 方向の衝突前の重心速度、 y 方向の衝突前の重心速度、 x 方向の衝突後の重心速度、 y 方向の衝突後の重心速度および角速度を表す。 F_t は物体 B から物体 A に作用する力積を表し、その力積が作用する方向の単位ベクトルを (e_x, e_y) とする。また、 (x', y') は物体の重心を基準とした衝突点の位置を表す。下添え字 A および B は、それぞれ物体 A および物体 B の諸量を示す。

$$\left. \begin{aligned} m_A(u'_A - u_A) &= F_t e_x \\ m_A(v'_A - v_A) &= F_t e_y \\ m_B(u'_B - u_B) &= -F_t e_x \\ m_B(v'_B - v_B) &= -F_t e_y \\ I_A(\omega'_A - \omega_A) &= x'_A F_t e_y - y'_A F_t e_x \\ I_B(\omega'_B - \omega_B) &= -x'_B F_t e_y + y'_B F_t e_x \end{aligned} \right\} (4)$$

それぞれの物体の衝突点において、その相対速度の反力方向成分が衝突後に 0 となると仮定する。これにより次式を得る。

$$\begin{aligned} &(u'_A - \omega'_A y'_A - u'_B + \omega'_B y'_B) e_x \\ &+ (v'_A + \omega'_A x'_A - v'_B - \omega'_B x'_B) e_y = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式 (4) および式 (5) から、各物体の衝突後の速度および角速度を求める。

c) 地形・建物側面との衝突

本モデルでは、船舶等の衝突による地形や建物の変形や破壊は考慮しない。この場合、漂流物が衝突しても地形や建物は動くことがないので、地形や建物の質量を仮想的に無限大と仮定する。この仮定により、前述の物体相互の衝突と同様の処理により、衝突後の物体の速度および角速度を求めることができる。

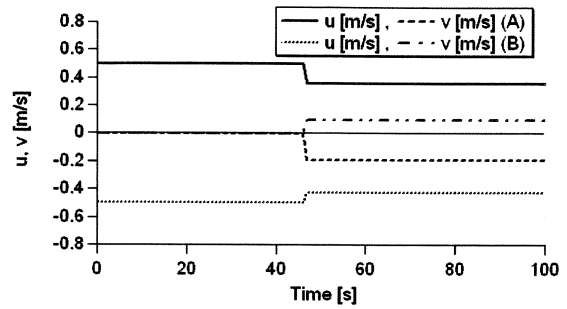


図-7 漂流物の速度変化

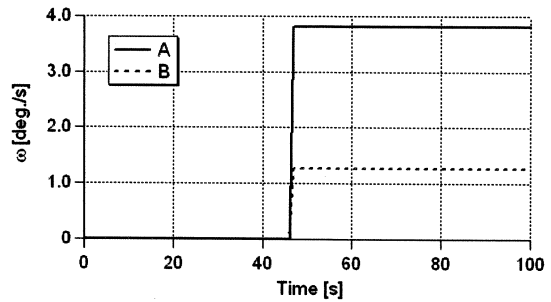


図-8 漂流物の角速度

3. テスト計算

漂流物同士の衝突処理の結果を確認するため、流れ場から作用する力は考慮せず、2体の漂流物の衝突を対象に、衝突する位置や角度、質量比を変化させ、7ケースのテスト計算を実施した。漂流物同士の衝突計算の一例として、質量が異なる2体の漂流物が衝突する条件の計算結果を図-6に示す。漂流物Aの長さ、幅、喫水および質量は、それぞれ10 m、2 m、0.5 m および 10 t であり、漂流物Bの長さ、幅、喫水および質量は、それぞれ15 m、3 m、0.444 m および 20 t である。漂流物AおよびBのx軸正方向の初期速度は、それぞれ-0.5 m/s および +0.5 m/s である。いずれの漂流物も、y軸方向の初期速度は0 m/s、初期角速度は0 rad/s である。漂流物AおよびBの衝突点は、それぞれ漂流物の端部から1.2 m および 0.8 m の箇所であり、また、漂流物AおよびBの影響半径R(図-4)は、それぞれ1.0 m および 1.5 m となるので、いずれも図-4に示す半円形の部分で衝突する。図-7 および図-8に、漂流物の速度および角速度の計算結果を示す。式(5)による衝突後の相対速度に関する仮定を用いて、式(4)に示す運動量および角運動量の保存式から解析的に求まる漂流物の速度および角速度は、漂流物Aでは、 $u'_A = 0.356$ m/s、 $v'_A = -0.192$ m/s、 $\omega'_A = 0.0665$ rad/s (3.81 deg/s) であり、漂流物Bでは、 $u'_B = -0.428$ m/s、 $v'_B = 0.096$ m/s、 $\omega'_B = 0.0222$ rad/s (1.27 deg/s) である。衝突後の運動は、解析解と計算結果が一致している。ただし、式(5)に示す衝突後の相対速度に関する仮定の妥当性を検証する必要がある。

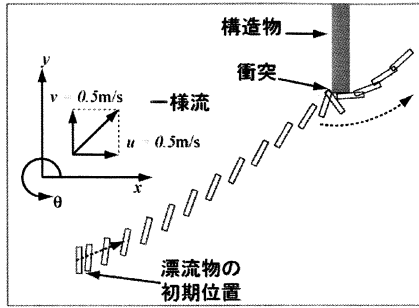


図-9 漂流物と構造物との衝突

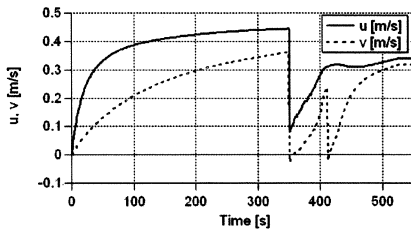


図-10 漂流物の速度変化

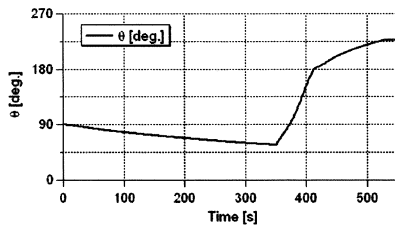


図-11 漂流物の回転角の時間変化

漂流と構造物との衝突を組み合わせた条件下での計算結果を図-9に示す。これは、 x 方向流速が $u = 0.5 \text{ m/s}$ 、 y 方向流速が $v = 0.5 \text{ m/s}$ である流れ場に、 y 軸に平行に物体を置いたケースである。物体は、長さ 15 m 、幅 3 m 、喫水 1 m および質量 45 t である。図には漂流物の初期位置から 30 s の時間間隔で、物体の位置と向きを描画している。船首尾方向が流れに沿うように回転しながら、流れに追従するように加速する。その後、構造物に船首の先端近くが衝突し、衝突に伴う反力により、時計回りに回転を伴う運動になり、さらに、漂流物の側面が構造物に衝突する。図-10 および図-11に、それぞれ漂流物の速度および回転角の時間変化を示す。1回目に衝突する 350 s までは、流れの向きである 45° に漸進し、また、速度も流れ場の値に漸進する。 350 s および 410 s の衝突時は運動量が減少する。

この他にも、一様流中を漂流する物体運動を対象とした計算を行った。物体の向きを流れの方向に対して4ケースの条件で、さらに、流速分布を考慮するための物体表面の分割幅や水深喫水比も変化させ、合計8ケースの計算を実施し、一様流の方向や速度と漂流物の方向や速度が収束する値を比較して本モデルの妥当性を定性的に確認した。さらに、流れ場から作用する力は考慮せず、構造物に衝突する位置や角度を変化させた6ケースの計算を実施し、それらの衝突に伴う運動の変化をスナップショットから、構造物との衝突モデルの妥当性を定性的に確認した。

4. 実地形への適用

本モデルの適用性を検討するため、1つのモデルケースとして、ある実地形を対象とする漂流物計算を実施した。

(1) 津波計算モデル

本研究で使用する津波計算モデルは、富田・柿沼²⁾が開発した、大洋の津波伝播を解析する静水圧多層レベルモデル (STOC-ML) と、多数の構造物が存在する臨海部の津波挙動を解析する3次元流動モデル (STOC-IC) を接続した高潮津波シミュレータ (STOC) である。基礎方程式はポアラスモデルを導入した RANS 方程式および連続式であり、水表面の算出には水表面の位置は連続式を鉛直方向に積分した式を用いている。これらを基礎方程式として、staggered 格子で空間を離散化し、leap-frog 法により時間発展させたモデルとなっている。本モデルの妥当性や精度については、富田・本多³⁾により、模型実験との比較により検証されている。

(2) 計算条件

a) 津波計算

図-12に対象地の概要を示す。図中に矩形で示した領域の計算格子は 2 m とし、STOC-ICを適用した。その外側の領域の計算格子は 6 m とし、STOC-ML (単層) を適用した。湾口部分に入射する津波は、津波高 2 m 、周期 20 分程度である。湾口部分に防波堤を設置した場合に、それが船舶漂流にどのような影響を及ぼすのかを確認するため、ここでは、断面積が約 $27,000 \text{ m}^2$ の湾口部に何も設置しない場合 (ケース1) と、図-12のように湾口部の開口断面積 $1,800 \text{ m}^2$ (開口率 6.7%) に狭くした場合 (ケース2) の計算を実施した。

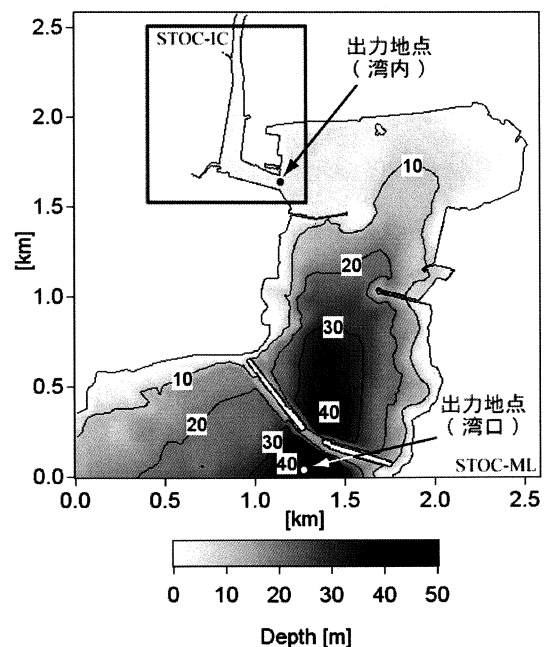


図-12 地形の概要

表-1 再現船舶の概要

分類	長さ[m]	幅[m]	喫水[m]
起重機	41.0	15.5	0.6
土運船	29.0	8.0	0.5
漁船	大	21.8	4.0
	中	17.2	3.9
	小	13.1	2.9
	極小	8.3	2.0

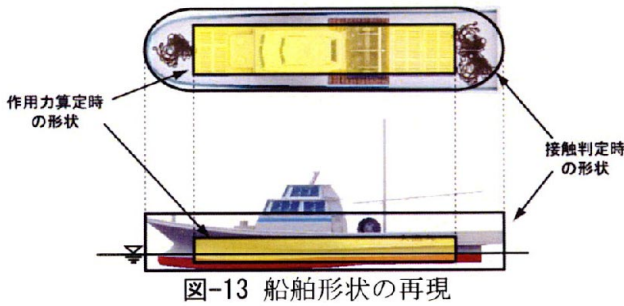


図-13 船舶形状の再現

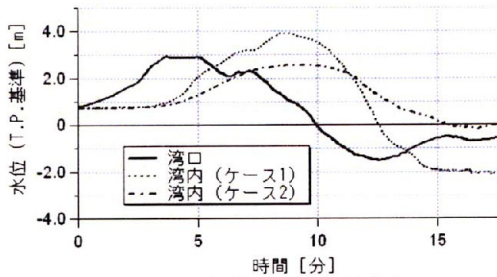


図-14 水位の時系列変化

b) 漂流物計算

現地調査の結果から、表-1 に示す船舶の種類を対象に、図-12 中の矩形で示した範囲にある 158 隻の船舶を再現した。

物体運動のモデル化では物体を直方体と仮定しているため、表-1 に示している長さ、幅および喫水をそのまま用いると、実際の船舶の没水部分を過大に評価し、流体から船舶に作用する力も過大評価となる。そこで、図-13 に示すように、作用力を評価するときの船舶の大きさと、衝突判定時の船舶の大きさを分けて評価した。

現地調査の結果から、各係留船舶の係留耐力を設定した。漂流物計算モデルから求まる掃流力が係留耐力に達すると漂流を開始するものとした。また、水位変化に追従して船舶が鉛直方向に変化し、それに伴って生じる係留策の張力が係留耐力に達する場合にも、漂流を開始するものとした。

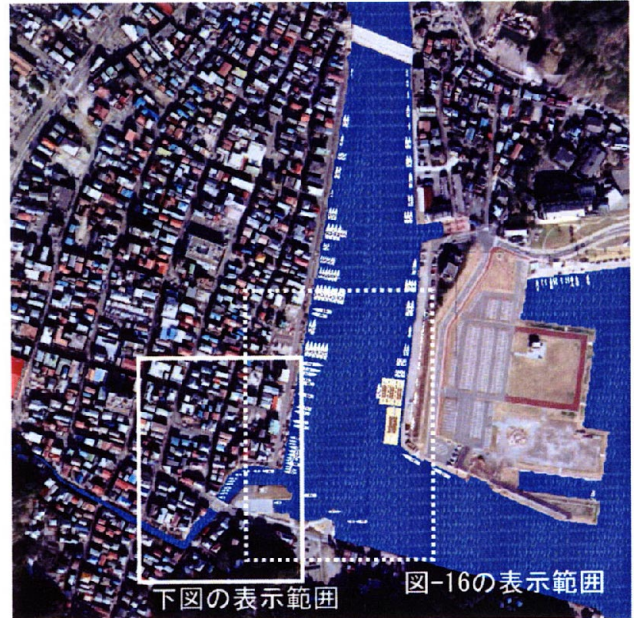
漂流物側面を約 0.5 m 間隔で分割し、相対流速の分布を評価した。

(3) 計算結果

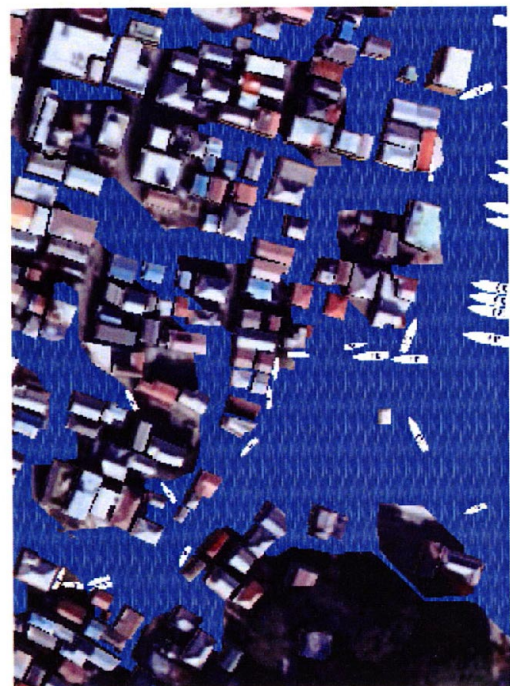
図-12 中の出力地点での水位の時系列変化を図-14 に示す。図の時間軸は湾口に津波が到達した時刻を基準とする。ケース 1 では津波により T.P. 上 4

m にまで水位が上昇し（津波高 3.3 m）、56 隻の船舶が漂流した。一方、ケース 2 では津波による水位上昇は T.P. 上 2.5 m（津波高 1.8 m）に低減し、陸上に置かれた 7 隻の船舶以外に漂流した船舶はなかった。

図-15 にケース 1 の計算結果を可視化したスナップショットを示す。津波が陸上に遡上し浸水被害が生じ、さらに水位が上昇し初期潮位上約 2 m に達すると、係留系が破断し船舶の漂流が生じ始める。空間解像度 2 m の地形・建物データを使用しているため、道路上を通過して内陸に漂流し家屋に衝突する船舶が再現できる。

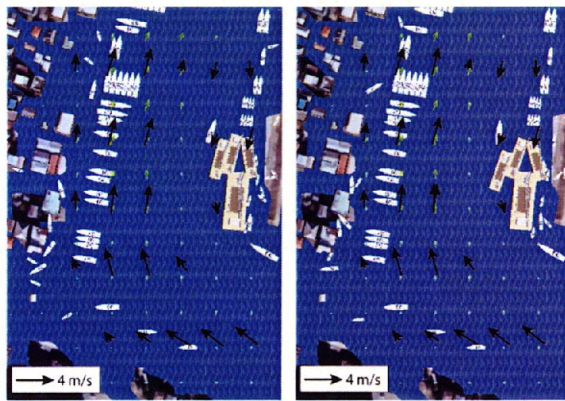


（船舶初期位置）

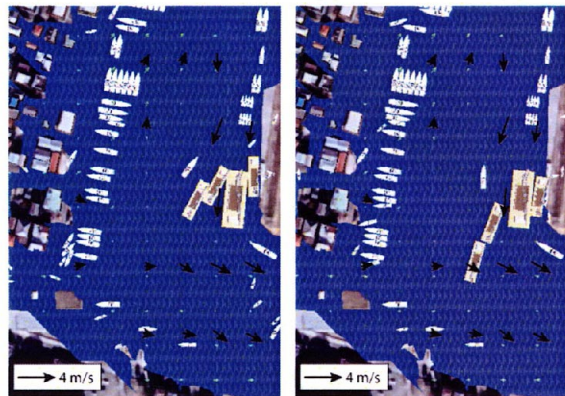


（湾口部に津波到達後 10 分、漂流開始後 3 分）

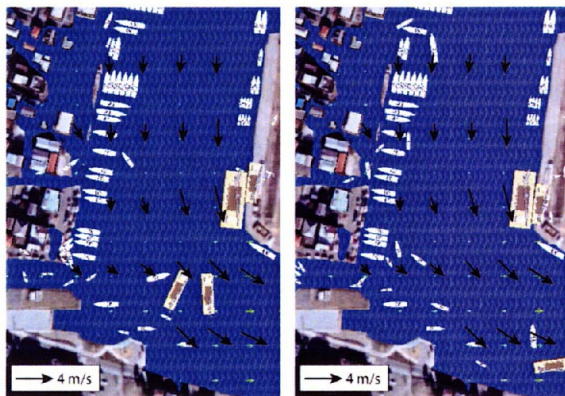
図-15 実地形を対象とした計算結果



(漂流開始後 3.5 分)



(漂流開始後 5.0 分)



(漂流開始後 6.5 分)

図-16 船舶の漂流位置および流速ベクトル
(左図：ケース 1a, 右図：ケース 1b)

相対流速の分布を取り入れた効果を確認するため、ケース 1 を対象に、漂流物側面での相対流速の分布を 0.1 m 間隔で評価した場合（ケース 1a）と、重心位置での相対流速を用いて評価した場合（ケース 1b）の比較を行った。なお、ここでは空間解像度 6 m の津波の計算結果を用いた。

ケース 1a の漂流船舶は 59 隻であり、ケース 1b では 58 隻である。各漂流船舶の漂流開始時刻の差は最大で 3 s 程度である。このように差異が小さいのは、係留系が破断するまでは鉛直運動に限定していることと、今回の計算では流れ場の時間変化や空間分布が緩やかであることから、船舶に作用する流体力に大きな差が生じないためである。図-16 に船

舶の漂流位置および流速ベクトルの計算結果の比較を示す。表示範囲は図-15 中の点線で示した範囲である。ケース 1a とケース 1b の船舶の漂流位置の計算結果は大きく異なる。これらの結果の妥当性を検証する必要があるものの、流れ場の時空間変化が緩やかであっても、相対流速分布の考慮の有無によって回転運動に差が生じ、その後の漂流挙動が変化するため、注意が必要である。

5. おわりに

本研究では、津波によって漂流する船舶、コンテナ等が建物等に衝突することで生じる被害を推定するための基礎ツールとして、多数の船舶等の漂流・衝突挙動を解析可能な数値計算モデルを開発した。

漂流物計算モデルの妥当性を検証するため、漂流物の運動や衝突に関するテスト計算を実施し、定性的に妥当な結果となることを確認した。

実地形をモデルケースとして漂流物計算を実施した。道路を遡上する船舶や湾内に流出する船舶を再現した。また、相対流速分布を考慮することによって漂流挙動が変化することを確認した。

今後、相対流速分布を取り入れた効果等を実験結果との比較により、定量的に検証する必要がある。また、鉛直方向の並進運動、ロールおよびピッチの回転運動について運動方程式による解析を行っていないので、水面勾配が大きくなる場合の精度が低くなることが考えられるため、物体に作用する浮力分布の考慮や漂流物周辺の流体の圧力場を積分することによる運動方程式を用いたモデル改良も、今後の課題として挙げられる。

謝辞：航空レーザ測定の測量成果を使用させて頂いた国土地理院地理調査部社会地理課に謝意を表す。本研究は、科学研究費補助金基礎研究(B) (研究代表者：水谷法美，課題番号：19360222，研究課題名：津波漂流物対策のための漂流物の挙動特性の解明と衝突力算定モデルの構築)による研究の一部であることをここに付記する。

参考文献

- 1) 池谷 毅・朝倉良介・藤井直樹・大森政則・武田智吉・柳沢 賢：浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 761-765，2005
- 2) 富田孝史・柿沼太郎：海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用，港空研報告，第 44 巻，第 2 号，pp. 83-98，2005
- 3) 富田孝史・本多和彦：臨海部における津波解析への 3 次元非静水圧流動モデルの適用，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 231-235，2008