

漂流物による建物破壊や道路閉塞 を考慮した津波被害推定

TSUNAMI DISASTER ESTIMATION INCLUDING STRUCTURE DESTRUCTION AND ROAD BLOCKAGE BY TSUNAMI-DRIFTED BODIES

富田孝史¹・本多和彦²・廉慶善³

Takashi TOMITA, Kazuhiko HONDA, Gyeong-seon YEOM

¹正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 アジア・太平洋沿岸防災研究センター
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 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 愛知県名古屋市南区東又兵衛町1丁目57-3)

³正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 アジア・太平洋沿岸防災研究センター
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

A tsunami causes inundation as well as drift of vessels and others. The tsunami-drifted bodies have potential to collide with and destroy houses, and to block narrow roads and rivers. A numerical model has been developed to estimate and understand tsunami damage including the floating-body induced damage. The model consists of tsunami fluid model, which is composed of a hydrostatic sub-model and non-hydrostatic sub-model, and a tsunami-drifted body model. The coupling of the fluid model and drifted-body model provides estimation of tsunami damage including effects of drifted bodies. After validation calculation of simple test runs, the numerical model has been applied to an actual bay. The model is useful to find out critical points to expand and exacerbate tsunami damage if a structure there is destroyed by the tsunami and drifted body

Key Words : Tsunami, disaster estimation, debris, floating body, destruction, road blockage

1. はじめに

沿岸部の堅牢な構造物や建物がその背後地における津波被害を軽減する一方で、大津波は建物を破壊する力を持っていることは良く知られている。さらに、大津波は浸水だけではなく、船舶、コンテナ、自動車、丸太などを漂流させる。流された船舶などは建物等に衝突してそれを破壊し、また道路や河川を閉塞することがある。建物等が津波の流体力や漂流物の衝突によって破壊され、あるいは道路等が船舶等の漂流物によって閉塞されると、津波による浸水過程が変化し、それにより被害様相も変化する。

本研究では、これまで開発してきた、建物等を津波の伝播・遡上に対する障害物として考慮する津波の流体計算モデルと、それによる計算結果を使って多数の漂流物の挙動を計算するモデルとを連成し、津波の流体力や漂流物による建物破壊や漂流物による道路等の閉塞を考慮した数値計算モデルを開発した。また、建物等の破壊基準を、既往の研究成果などを参考にして定めた。簡単な数値実験を行ってモデルの妥当性を検討し、さらに実地形への適用性を明らかにした。

2. 数値計算モデル

(1) 流体モデル

津波による水位や流速の変化を計算する流体モデルは、これまで開発してきたSTOCである¹⁾。このモデルは、非静水圧モデルSTOC-ICと静水圧モデルSTOC-MLを必要に合わせて組み合わせることができる。両モデルは共に建物等の構造物を津波の流れに対する障害物として計算の中に取り入れることが可能であり、計算空間に構造物を精度よく配置するためにポーラスモデル²⁾を導入している。

本研究で対象とする数値計算では、津波の流体力や漂流物の衝突による建物破壊や漂流物による道路等の閉塞を考慮するので、計算途中で境界条件が変化する。このため、圧力計算を行わない静水圧モデルSTOC-MLを流体モデルに使用することとした。

(2) 漂流物モデル

船舶等が津波によって漂流し、漂流物同士あるいは漂流物と構造物が衝突する現象はSTOC-DMにより計算可能である³⁾。本研究では、これと前記のSTOC-MLとを連成させて、漂流物の衝突による構

造物の破壊や道路等の閉塞に伴う津波の流れの変化を計算可能にした。

(3) 構造物破壊のモデル化

図-1の破壊前と記された概略図に示すように、STOC-MLでは、計算格子の中の地盤高や構造物の高さがその格子の標高データとして考慮され、それらが格子内に存在する面積や高さに応じて、計算格子におけるポラスモデルの体積多孔率および面透過率を設定する。構造物がある計算格子において、後述する破壊基準を満たす場合に、その格子の標高データを構造物の高さから地盤高に変更し、それに伴って体積多孔率および面透過率を修正することとした（図-1の破壊後と記された概略図）。これにより、構造物が破壊された計算格子では、障害物として存在していた構造物が消失したことを再現する。なお、構造物が無くなった後でも基礎等が残存していることが多いため、道路上よりも流体は流れ難いと想定される。そこで、そこにはマンシングの粗度係数 n を設定し、遡上計算で用いる道路の値 ($0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$) よりも大きい値 $0.050 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ とした。

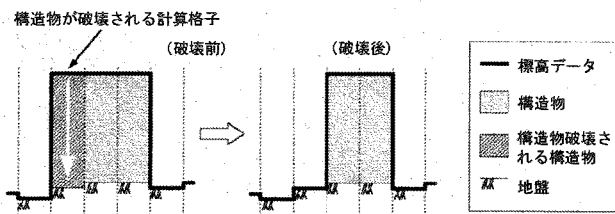


図-1 計算で考慮される標高データの概略図

(4) 破壊基準

a) 津波の流体力による破壊

構造物破壊に対しては、水流圧力（浸水深と流速の二乗の積）による指標⁴⁾や浸水深による指標⁵⁾などがある。本研究では中央防災会議における津波被害想定でも使用される浸水深に基づいた破壊指標を採用し、木造建物は浸水深 2m、鉄筋コンクリート造建物は 20m で全壊するとした。

b) 漂流物衝突による破壊

漂流物が構造物に衝突した際の破壊判定では、漂流物が構造物に衝突した計算格子において、漂流物の運動エネルギーが衝突によって減少する量 ΔE (式(1a))が、構造物外壁部材の曲げ強度から算出される弾性エネルギーの限界値 E_{lim} を超えた場合に構造物が破壊したと判定した。

$$\Delta E = E_p - E_f \quad (1a)$$

$$E_p = \frac{1}{2} m V_p^2 + \frac{1}{2} I \omega_p^2 \quad (1b)$$

$$E_f = \frac{1}{2} m V_f^2 + \frac{1}{2} I \omega_f^2 \quad (1c)$$

ここに、 ΔE は衝突時のエネルギー減少量であり、 E , m , I , V および ω はそれぞれ漂流物の運動エネ

ルギー (J), 質量 (kg), 慣性モーメント (kgm^2), 並進速度 (m/s) および回転角速度 (s^{-1}) であり、添字 p および f はそれぞれ衝突前および衝突後の量を示す。STOC-DMでは漂流物の衝突処理³⁾によって衝突前後の並進速度および回転角速度を求めることができるため、式(1a)～(1c)から衝突による漂流物の運動エネルギー減少量を算出する。

構造物の破壊判定に使用する構造物外壁部材の弾性エネルギー吸収量 E_{lim} は、漂流物から構造物外壁部材に作用する荷重が水平方向に線的に様に分布すると仮定したときの曲げ強度時の弾性エネルギーである。漂流物衝突による構造物の破壊の有無を詳細に検討するためには、構造物と漂流物両方の詳細構造諸元が必要なだけでなく、衝突時の漂流物の位置、衝突面積、衝突角、衝突箇所等が条件として必要であるが、本研究では個々の構造物の破壊判定よりも、構造物などが破壊されることによる地域の被害の変化を想定することを目的としたため上記のような簡略化を行った。

弾性エネルギー吸収量 E_{lim} は、木造建物を想定して構造物外壁部材をラワン合板とすると、日本合板工業組合連合会の構造用合板の手引き⁶⁾に記載されている標準寸法や強度等から、スパン長 $L_w = 2.73 \text{ m}$, 幅 $B_w = 9.10 \times 10^{-1} \text{ m}$, 厚さ $D_w = 2.40 \times 10^{-2} \text{ m}$, 曲げ強度 $\sigma_{\text{max}} = 4.50 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ およびヤング率 $Y = 8.05 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ の場合には、 $E_{\text{lim}} = 8.33 \times 10^2 \text{ J}$ となる。以下の計算ではこの値を使用した。

(5) 閉塞モデル

地盤上に乗り上げた、あるいは構造物等の間に捕捉された漂流物は、津波の流れを阻害するものとして取り扱い、以下の閉塞処理を行った。

図-2に、構造物の間に捕えられた漂流物に対して閉塞処理を行う計算格子（閉塞セル）を示す。図中の斜線部分が閉塞セルであり、後述する閉塞判定された漂流物の一部を含む計算格子である。閉塞セルでは、閉塞前の x および y 方向の面透過率と漂流物による閉塞を表す面透過率 γ_M とを比較し、その最小値を閉塞後の面透過率として新たに設定した。

なお、閉塞セルにおいて体積多孔率を変化させると流体の質量保存が成立しなくなるため、本モデルでは体積多孔率を変化させないこととした。

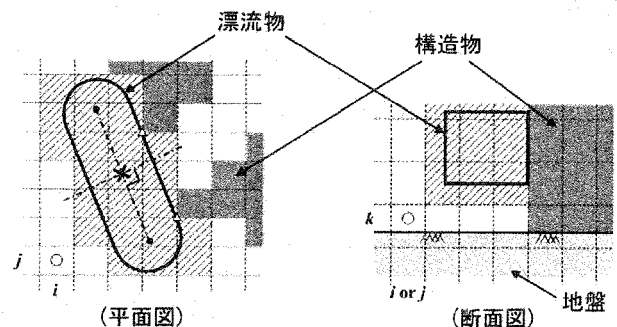


図-2 閉塞処理の概略図

(6) 閉塞判定

a) 乗り上げに伴う閉塞判定

漂流物が地盤上に乗り上げて停止すると、津波によって水位が漂流物の喫水まで再び上昇するまで、漂流物は流れを阻害するものとして扱うこととした。

b) 建物等への衝突に伴う閉塞判定

まず、漂流物が構造物の間に補足されるとき2つの衝突点（図-2の平面図中の△印）の検出を次のように行った。これまでに開発した漂流物モデルSTOC-DM³⁾では、その衝突判定の手法によって、ある瞬間の衝突点は1つしか存在しない。そこで、衝突判定の対象時間 T_{bl} を設定し、ある衝突が生じた時刻から T_{bl} 時間が経過するまでに別の衝突が発生した場合に、その衝突点を閉塞を引き起こすための2つ目の衝突点とした。閉塞や跳ね返り状況を確認するための試計算の結果から、 T_{bl} を漂流計算の時間間隔の10ステップ分とした。

つぎに、2つの衝突点と漂流物の重心との位置関係から閉塞判定を次のように行った。図-3に示すように、漂流物の重心（図中の×印）を通り漂流物の船首尾方向の中心線（図中の点線）と、それに直交する側舷方向の線（図中の一点鎖線）に対する2つの衝突点（図中の△印）の位置関係は、4つのパターンに分類できる。これらの内のパターン3およびパターン4は構造物間に補足されて閉塞を引き起こすものではない。また、パターン1では、漂流物は重心まわりに回転運動を行い、閉塞状況とはならない。すなわち、パターン2になるような場合のみを漂流物が閉塞を引き起こすと判定した。

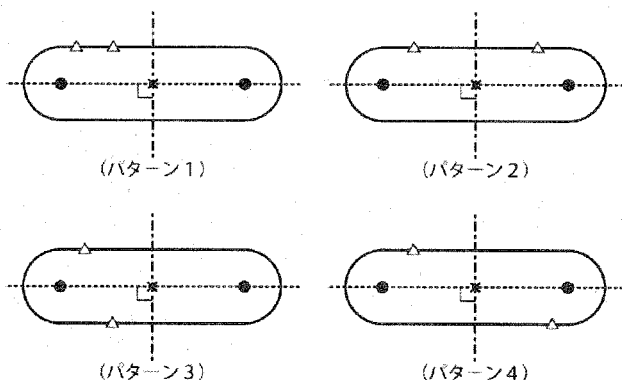


図-3 閉塞判定の概略図

3. 単純な水深・地形における計算

図-4に示す、単純な水深および地形を対象に数値計算を2種類行った。地形はy方向に一樣なステップ地形であり、陸上に構造物（長さ60m、幅60m）を設置した。津波は流れによって模擬し、一樣水深部の左端の底面よりy方向単位幅あたり $8\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ の流量を与えた。行った2種類の計算は、初期水位 $z=2.0\text{m}$ で漂流対象の船舶を用いないCase-1と、 $z=0.0\text{m}$ で漂流対象の船舶を用いるCase-2と、 $z=0.0\text{m}$ で漂流対象の船舶を用いるCase-2と、 $(x, y)=(100\text{m}, 100\text{m})$ の位置に漂流物（長さ11.2m、

幅2.5m、喫水0.4m）を船首尾方向がx軸正方向となるように設置したCase-2である。

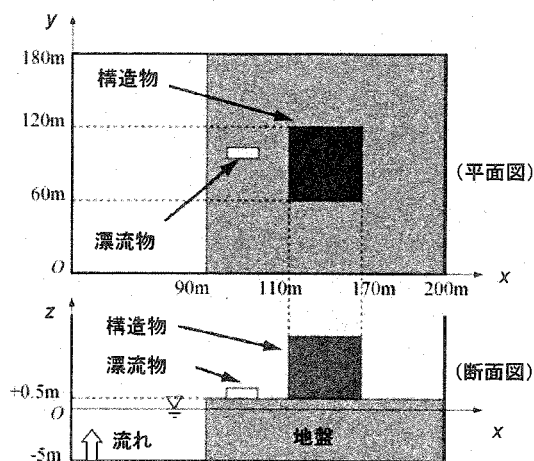


図-4 数値実験の実験水槽の概略

Case-1において、構造物全体が津波の流体力により1計算ステップ(0.05s)で破壊すると仮定した場合の計算結果のスナップショットを図-5に示す。ここで、長さ60mの建物が1計算ステップで全体破壊することは非現実的であるが、その影響を見るために行った仮想的なものである。この場合、構造物全体の消失により、ダムブレイクによる流れのように津波は構造物の外周からその中心に向かって速い流れを生じさせ、中心に集まった流れが極めて高い水位を発生させた。一方、破壊と判定された構造物の部分毎に構造物を消失させた場合では、極めて高い水位が発生することはない。本研究で採用した破壊モデルの妥当性が定性的に確かめられた。

上記の破壊モデルを適用したCase-2の計算結果のスナップショットを図-6に示す。計算開始から約30sで船舶の初期位置に津波が到達し、49sには漂流した船舶が構造物に衝突する。この際、衝突に伴う漂流物のエネルギー減少量が構造物の許容エネルギー吸収量（ラワン合板を仮定）を超えたため、構造物の一部が破壊した。その後、漂流物の衝突によって破壊された部分や構造物の外周部分において、浸水深が構造物の破壊限界の水深（ここでは木造を仮定して2mとした）を超えたため、津波の流体力により破壊が拡大する結果となった。これも定性的に妥当な結果といえよう。

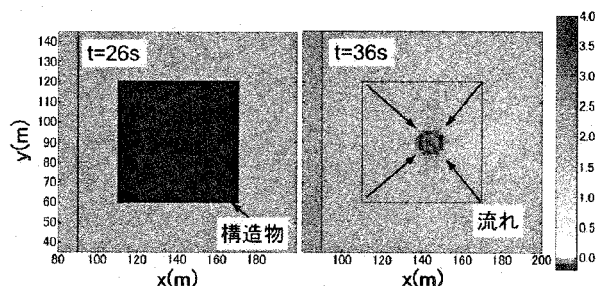


図-5 構造物が一瞬で破壊する場合の水位の変化

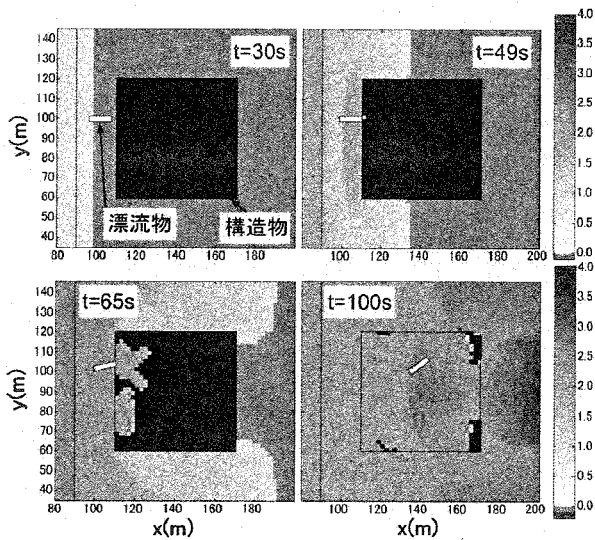


図-6 漂流物の衝突による構造物破壊

4. 実水深・地形における計算

(1) 計算条件

a) 地形、水深、建物分布

計算で適用した水深、標高および建物の分布を図-7に示す。計算では沖合にある津波の波源域から沿岸に向けて伝播する津波を、7段階に計算格子が細くなる計算領域を設定して計算した。紙面の都合により第6領域と第7領域を図-7(b)に示した。それぞれの計算格子サイズは6mと2mである。

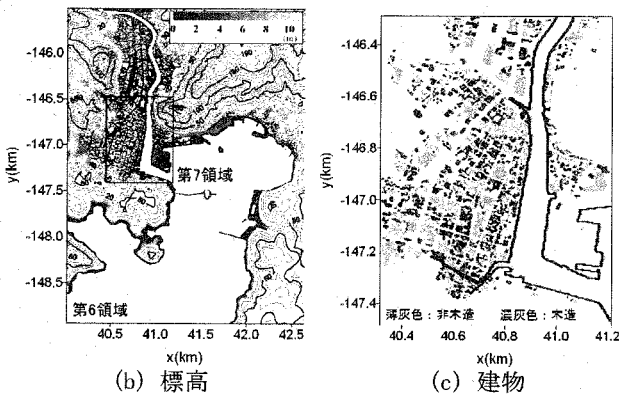
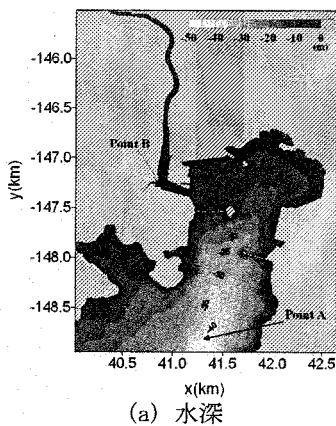


図-7 水深、標高および建物分布

陸上の建物は、第1領域から第5領域では土地利用に合わせて粗度係数を設定して再現した。第6領域と第7領域では、航空レーザ測量成果を基に2mの空間解像度で建物の形状や高さを再現し、破壊しなければ津波流れに対する障害物として建物は機能する。

建物種別について現地調査したところ、主要な大型建物（非木造）を除くと、木造と非木造の建物数の比は概ね2:1であった。そこで、今回の数値計算では、主要な大型建物に該当する計算格子は非木造とし、それ以外の建物に該当する計算格子は、一様乱数を用いて割合が2:1となるように、木造と非木造の建物を設定した（図-7(c)）。

b) 漂流物

現地調査によると、第7領域に158隻の船舶が係留されていたので、これを対象にして漂流計算を行った。表-1に示すように、これらの船舶を種類や大きさにより、起重機船、土運船、特大漁船、大型漁船、中型漁船、小型漁船、極小漁船と7種類に分類した。

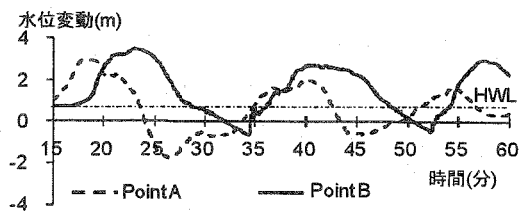
表-1 船舶の分類

分類	長さ (m)	幅 (m)	高さ (m)	喫水 (m)	重量 (t)	係留索の 太さ (mm)
起重機	41.0	15.5	5.0	0.6	334.0	50.0
土運船	29.0	8.0	5.0	0.5	90.0	50.0
漁船	特大	32.7	6.7	6.5	1.0	60.0
	大	21.8	4.0	5.5	0.8	20.0
	中	17.2	3.9	4.8	0.6	20.0
	小	13.1	2.9	3.5	0.5	20.0
	極小	8.3	2.0	2.1	0.3	20.0

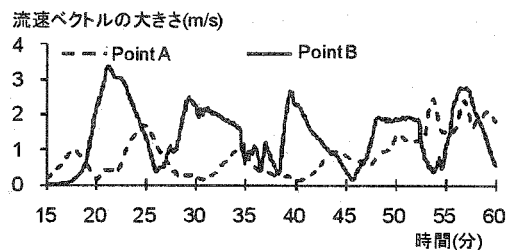
係留船舶の漂流開始条件は以下のように設定した。対象船舶の全ては陸上のビットや金属リング（以下、ビット群）にロープで係留されており、さらに1つのビット群には複数の船舶が係留されていたので、ビット群の耐力はロープの耐力よりも小さくなった。そこで、ビット群の耐力を係留船舶数で除して1隻あたりの係留耐力を求め、流れから船舶に作用する水平力がこの値を超えたときに、その船舶は漂流を開始するとした。また、鉛直方向については、水位変化に伴って上下する船舶の係留ロープの張力を計算し、その張力が前述の1隻あたりのビット群の耐力を超えたときに漂流が始まるとした。

c) 津波条件

想定波源域から計算した津波による、図-7(a)に示したPoint AおよびBにおける水位および流速ベクトルの大きさの変化を図-8に示す。なお、この地域における朔望平均満潮位（TP上約0.7m）を計算の初期水位としたので、水位変動は0mから始まっていない。最大水位は、Point Aでは3.0m、湾奥部のPoint Bでは3.5mに達しており、ともに第1波目で発生している。第1波の周期は約20分である。流速の最大値は、Point Bで3.4m/sである。これが発生するのは、第1波の押し波の時刻である。

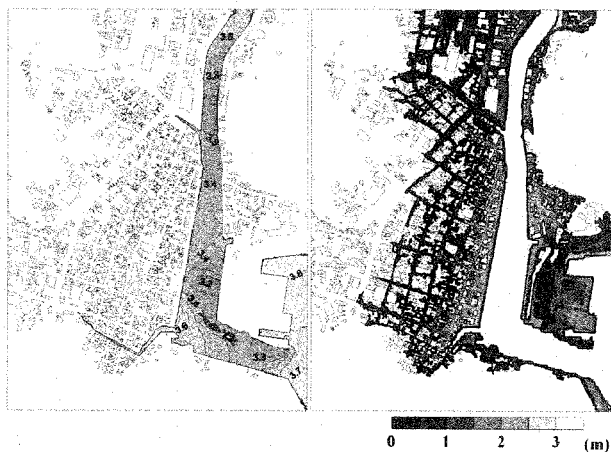


(a) 水位 (TP基準)



(b) 流速ベクトルの大きさ

図-8 Point AおよびBにおける水位および流速ベクトルの大きさの時間変化



(a) 最大津波高 (b) 最大浸水深

図-9 最大津波高および最大浸水深

(2) 計算結果

a) 最大津波高および最大浸水深

図-9に第7領域の最大津波高および最大浸水深の分布を示す。これらは津波や船舶衝突による建物の破壊や船舶による閉塞を考慮した結果である。

最大浸水深は、特に市街地につながる河川の右岸側では2～2.5mになっており、内陸に進むにつれて浅くなっている。ただし、海岸から内陸に向かう道路では、その脇の建物が密集している部分よりも最大浸水深が深くなる所もあった。これは建物密集により海水が浸入しにくかったことを意味している。このような分布形状は建物破壊や閉塞を考慮しない計算の結果とほぼ同様であった。

b) 最大流速

図-10に、第6領域における流速ベクトルの大きさの最大値の分布を示す。6～8m/sの速い流速が湾の凹凸形状に沿って湾の中央部に蛇行して現れている。とくに、湾奥で断面積が狭くなる河口において速い流速となっている。図には示さないが、時々刻々に変化する流速ベクトルは、湾の凹凸により発生する

渦を含む複雑な流動場が形成されている様子が認められた。その流動場が海上における漂流船舶の挙動を支配する。

c) 船舶漂流

図-11に船舶位置を10分間隔で示した。図中の時間は図-8における時刻と対応している。158隻の約2/3に相当する106隻（陸上に上架された10隻を含む）が漂流した。津波の第1波の押し波時に係留系が破断して漂流を開始し、市街地の中を漂流する船舶もあった。また、第1波の引き波により発生する強い流れは、押し波では漂流しなかった船舶の幾つかを漂流させた。このとき、押し波により漂流した船舶と合わせて多数の船舶が河川部から湾内へ流出した。

なお、日本海中部地震津波のときには、漁港における係留船舶は漁港内の遡上高が2mを超えると被害が発生し、3.8m前後で被害率は60%程度であった⁷⁾。今回の計算では遡上高は4.3mであり、漂流した船舶の割合は61%（上架の船舶を除く）であったので、この日本海中部地震時の被害状況とは調和的である。

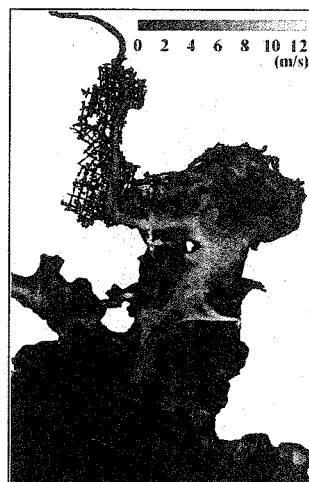


図-10 最大流速 (第6領域)

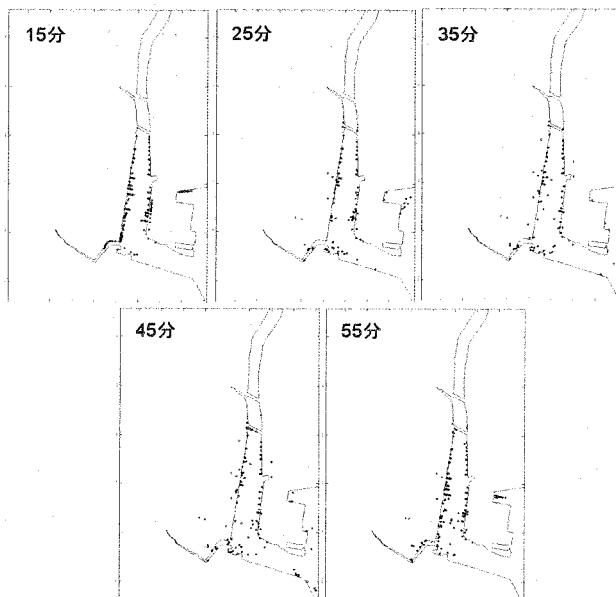


図-11 船舶の漂流挙動

d) 建物破壊と閉塞の効果

まず、津波や船舶衝突によって破壊された建物の敷地面積（破壊面積）を算出した。破壊面積は、建物を再現した計算格子1つあたりの面積（ $2\text{m} \times 2\text{m}$ ）に建物破壊の格子数を乗じたものである。第7領域では、木造建物の全敷地面積 $1.12 \times 10^5 \text{m}^2$ のうちの約7%にあたる $0.08 \times 10^5 \text{m}^2$ が破壊面積であった。さらにそのうちの 8m^2 が船舶衝突によるものであった。すなわち、破壊建物のほぼ全ては浸水深が 2m 以上に達したことによる破壊である。

また、建物破壊や閉塞は、漂流船舶の数にほとんど影響を及ぼさず、破壊などを考慮することにより3隻だけ漂流船舶数が増加する結果となった。このことから、陸上における分散的な建物破壊は、その周辺の海域における津波の水位や流速を大きく変動させることがないので、船舶の漂流の有無にも大きな影響を与えることがないと考えられる。

今回の計算で漂流した船舶は極小や小型の重量の軽いものであった。小さな慣性の船舶は、津波の流れに容易に乗って建物の間を流れるので、建物を破壊するような激しい衝突を起こすことは少ない。これが、今回の計算において船舶による建物破壊が少なかった原因と考えられる。一方、計算の中で考慮された重量の重い土運船は、その係留系が小型船舶等に比べて強固であったので、第1波の押し波では漂流しなかったが引き波時の強い流れにより漂流を開始した。しかし、引き波時に漂流を開始したので、土運船は陸上に遡上することはなく海域に流れていき、さらにその後の津波は第1波目よりも小さかったため、陸上の建物破壊に寄与することはなかった。

表-2に津波や船舶衝突による建物破壊や船舶による閉塞を考慮した場合と考慮しなかった場合の浸水面積を示す。前述したように最大浸水深の分布に大きな差異が認められなかったように、浸水面積にも両者の間に大きな差異は現れなかった。換言すれば、ある建物が消失することによりその背後地の浸水被害が増大するという浸水クリティカルポイントにお

ける破壊が少なかったということができる。しかし、図-12に例示するように、浸水クリティカルポイントにある建物（図中黒色）が消失すると、その建物の存在により浸水しなかった（あるいは軽微な浸水で済んだ）場所に津波は遡上し、引き波時に別のルートから水域に戻ることににより浸水被害が拡大（灰色部分）する。このような浸水クリティカルポイントの検出とその防護性能強化が重要である。

5. まとめ

本研究では、これまで開発してきた津波による流体運動を計算する数値計算モデルとその計算結果を使って船舶等を漂流させる数値計算モデルとを連成することにより、漂流物の衝突による建物等の破壊や漂流物による道路等の閉塞を考慮できる数値計算モデルを開発した。これと合わせて津波の流体力による建物等の破壊も考慮できるようにしている。また、建物等の破壊基準についても既往の研究成果などを参考にしてモデル化した。しかし、数値計算結果の定量的な精度検証は今後の重要な課題である。

本研究により開発したような数値計算モデルにより、建物等の破壊による浸水被害の拡大を想定できるだけでなく、浸水クリティカルポイント（その建物が消失することによりその周辺の浸水被害を拡大する所）を見出すことができ、その点の強化により津波に強いまちづくりを進展させることができよう。

謝辞：本研究の成果の一部は科学研究費補助金 基礎研究(B)（課題番号19360222）によるものである。また、航空レーザ測量成果は国土地理院地理調査部社会地理課より提供いただいた。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 榊山 勉，阿部宣行，鹿島遼一：ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析，海岸工学論文集，第37巻，pp. 554-558，1990。
- 3) 本多和彦，富田孝史，西村大司，坂口章：多数の津波漂流物を解析する数値モデルの開発，海洋開発論文集，第25巻，pp. 39-44，2009。
- 4) 羽鳥徳太郎：津波による家屋の破壊率，地震研究所集報，Vol. 59，pp. 433-439，1984。
- 5) 首藤伸夫：津波強度と被害，津波工学研究報告，第9号，pp. 101-136，1992。
- 6) 日本合板組合連合会：構造用合板の手引き，<http://www.jpma.jp/data/index.html>（2010年3月30日参照）。
- 7) 山本正昭，中山哲蔵，坂井淳，三橋宏次：日本海中部地震津波による漁港内の漁船被害，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 460-464，1985。

表-2 浸水面積の比較

計算モデル	第6領域 ($\times 10^5 \text{m}^2$)	第7領域 ($\times 10^5 \text{m}^2$)
建物破壊と閉塞を考慮	8.76	3.95
建物破壊と閉塞を考慮せず	8.77	3.93

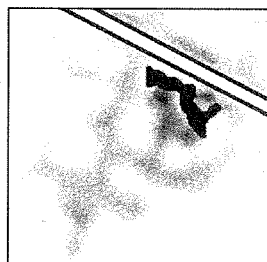


図-12 建物破壊の場所（黒色）と建物破壊により最大浸水深が増大した場所（灰色）（図中の平行線は水路の位置を示す）