津波漂流物のシミュレーションと被害想定

NUMERICAL SIMULATION OF FLOTSAM AND ESTIMATION OF DAMAGE IT CAUSED IN A TSUNAMI

櫻庭雅明 *・後岡寿成 *・伊勢 正 **
Masaaki SAKURABA, Hisanari USHIROOKA and Tadashi ISE

Fukura Harbor was devastated by the Ansei Nankai Earthquake Tsunami in 1854. The last Nankai Earthquake was in 1946, and there is a danger that the next one could be in the first half of this century. A numerical simulation was applied to Fukura Harbor in order to predict the behavior of drifting objects such as cars, ships and so on in the water produced by the Ansei Nankai Earthquake Tsunami. The numerical results were used to estimate the damage caused by collisions with drifting objects and destruction of the objects themselves. These results will be used to help develop integrated countermeasures against tsunami. In the future, the analysis will be repeated using a tsunami of a scale larger than the Nankai Earthquake Tsunami.

Keywords : *Fukura Harbor, tsunami, drifting objects, numerical simulation, damage estimation*

1. はじめに

切迫する東南海・南海あるいは想定東海地震が発生した場合、それに伴う津波によって沿岸域は甚大な被害を受けることが予想されている。その中で、津波が港湾に来襲した場合、船舶や木材等の漂流物による沿岸・海域構造物への衝突による被害の発生が懸念される。2004 年 12 月のインド洋大津波で見られたように漂流物が津波とともに陸上域を漂流し、津波波力に漂流物による衝突力が加わり作用波力が増大することにより構造物を破壊する被害が懸念されている。このような漂流物による被害を推定することは、津波防災対策上重要である。

本論文は、津波による漂流物の被害を推定することを目的として津波・漂流物のシミュレーションを実施し、それぞれの漂流物による被害想定を試算し、津波対策案を検討したものを報告する。漂流物の移動過程の予測には、津波シミュレーションから得られる流速と水位の時系列分布を用いて、慣性、水流の圧力勾配、付加質量、流水抵抗等を表現する数値シミュレーションを用いた。被害想定の試算にあたっては、対象となる漂流物の原単位を設定し、衝突過程を踏まえて陸域と海域の被害についてそれぞれ行った。対象地域は、**図－1** に示す兵庫県南あわじ市の福良港を対象とし、想定安政南海地震における津波漂流物被害の推定ついて検討した。

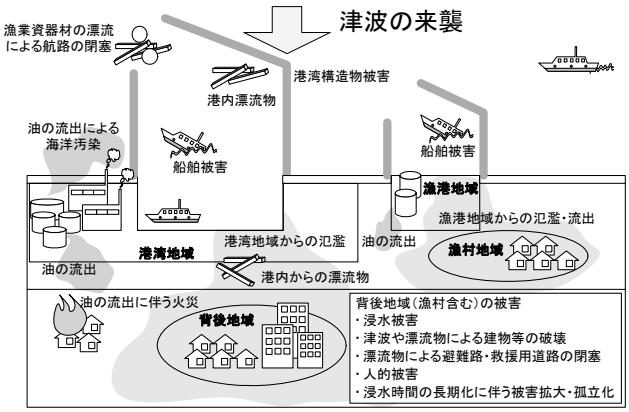
*　技術本部 中央研究所 総合技術開発部
**　コンサルタント国内事業本部　社会システム事業部　統合情報技術部

図－1　福良港位置図

2. 津波漂流物の被害想定の考え方

(1) 漂流物被害想定の必要性

津波が来襲した際に考えられる港湾周辺での被害の分類を**図－2** に示す。津波による被害は、浸水被害以外にも漂流物による構造物の被害や陸上の建物の破壊や道路の閉鎖等、また油の流出による海洋汚染被害が考えられる。福良港でも浸水被害以外に漂流物による被害が多く考えられ、漂流物の挙動の傾向と被害の状況の把握が必要となる。しかしながら津波漂流物の対象は挙動や被害規模について不明な点が多い。海域および陸上にて考えられる漂流物の分類、想定される被害について**表－1** に示す。この表より、漂流物の被害はおおむね陸域構造物の破損、海域での荷役被害が主たるものと考えられる。とくに福良港周辺では、車両および係留船舶に関する漂流被害が考えられる。また、福良港は漁業が盛んであり、養殖筏も漂流物の対象となる。本検討では、福良港において漂流物となり得る対象に条件を付与して被害想定の試算を実施した。



図－2　津波による港湾被害の分類[1)]

表－1　漂流物の分類および被害例[1)]

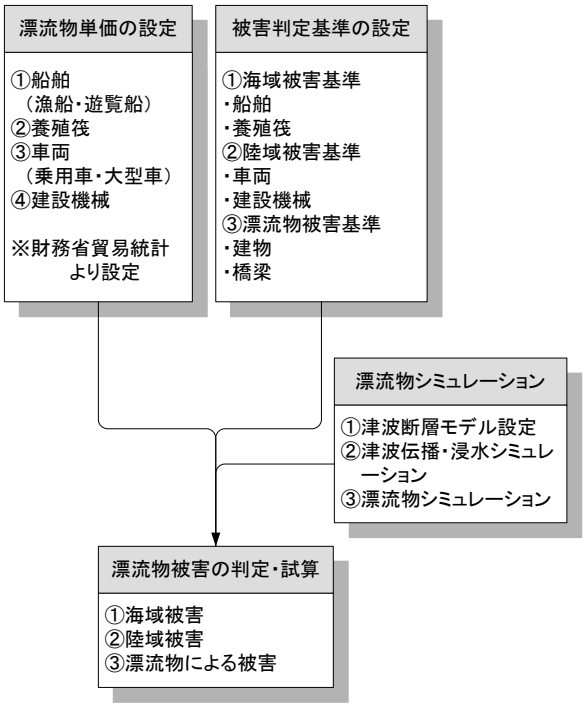
項目	漂流物（例）	想定される被害状況（例）
車両	トラック 普通乗用車 フォークリフト	海：港内水域に流出、荷役被害、物流被害 陸：人・施設に衝突・破損
係留船舶	漁船 プレジャーボート 放置船舶	海：係留索の切断にともなう船舶の流出、他船との接触・破損、沈没 陸：岸壁への乗り上げ、陸上施設への衝突
木材	貯木 流木	海：海域への多量の流出、拡散 陸：陸上施設への衝突
物流資材	コンテナ パレット	海：船舶の座礁、転覆等により積荷および関連機材が流出する。 陸：岸壁に置かれている資材が流出
危険物	石油 ガス	海：座礁した船舶からの燃料の流出 陸：電力会社、ガス会社等の施設からの危険物の流出、石油の流出

(2) 既往の漂流物シミュレーション・被害想定

津波漂流物に関する研究としては、流木を対象とした衝突力の実験的な検討[2)]、木材漂流のシミュレーション例[3)]がある。また、最近では、漂流物の並進、回転および相互衝突を考慮できるような力学モデルが開発されている[4)]。漂流物の被害想定にあたっては、できる限り漂流物となりうる対象の形状や力学過程を考慮できる数値シミュレーションを実施することが望ましいが、漂流物の形状を考慮して計算することが現状では困難である。また、漂流物の形状、数量を精密な力学モデルで計算することは膨大なデータ量を準備することとなり、実海域への具体的な適用は困難である。なお、漂流物による陸上や海域での被害を推定する事例は基礎実験では存在するが、実海域での漂流物による構造物被害の算定事例は見られない。漂流物の被害想定にあたっては、広域の漂流物のシミュレーションと計算結果に基づく被害想定の方法を工夫する必要がある。

(3) 津波漂流物による被害想定の考え方

漂流物被害想定のフローを**図－3**に示す。漂流物の被害想定の試算にあたっては、①漂流物の状況を示す数値シミュレーション、②被害の基準判定の設定、③漂流物単価の設定結果を合わせて最終的に算出した。また、①の数値シミュレーションは津波シミュレーションと漂流物シミュレーションから構成される。次にそれぞれの手法について示す。



図－3　漂流物被害想定の検討フロー

3. 津波および漂流物のシミュレーション

(1) 津波シミュレーション

地震津波の条件としては、当該地域での想定最大と考えられている想定安政南海地震津波を対象とした。想定安政南海地震は安政南海地震津波（M8.4、1854年）を基本の津波として、南海トラフに沿って震源位置を東西に移動させて津波を発生させて、周辺地域で被害が最大となるようなケースを採用した。計算範囲は、**図－4**に示すように5段階のネスティング構成とした。計算格子幅等の津波計算の条件は**表－2**に示すとおりである。断層条件の計算については想定安政南海地震の断層モデルに対してMansinha and Smylieの方法[5)]により鉛直変位の計算を行い、初期波形を作成した。津波の伝播・浸水計算は平面2次元の浅水流モデルを差分法に基づく数値計算で行っているが、詳しい計算法については文献[6)]に具体的に示されているので本論では割愛する。

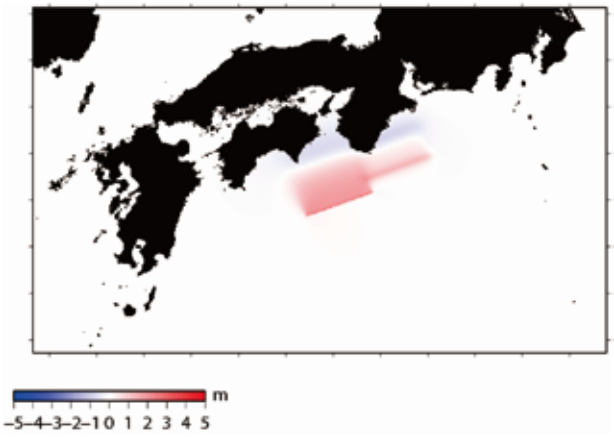
断層モデルから計算された津波の初期波形を**図－5**に、地震発生30分後の広域での波形（水位変化量）を**図－6**に示す。30分後には四国、和歌山、三重および静岡県

に到達している状況となる。福良港に第 1 波が到達するのは約 70 分後であるが、詳細の計算（領域 5 の計算結果）は次の漂流物シミュレーションと合わせて説明する。なお、津波の伝播計算（領域 1 ～ 5 を同時に実施）は Intel® Core 2 Quad Q9550, RAM4GB のスペックの PC で OpenMP を用いたスレッド数 4 つの並列計算 [7] にて実施している。計算時間は 3 時間の伝播計算を行うのに 2 時間程度であった。

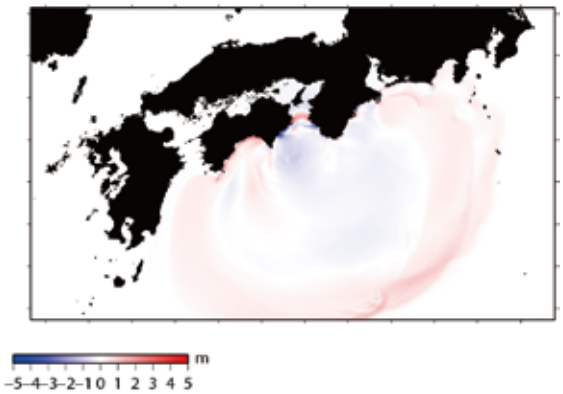
図－ 4　津波計算の範囲

表－ 2　計算条件一覧

項目	内容
計算格子間隔 分割数	領域 1:1,350m（900 × 550 分割） 領域 2：450m（413 × 458 分割） 領域 3：150m（899 × 878 分割） 領域 4：50m（623 × 434 分割） 領域 5：25m（210 × 200 分割）
時間増分間隔	すべての領域で Δ t = 0.1 秒
基礎方程式	非線形長波方程式
計算手法	時間：リープフロッグ法
	空間：スタッガード格子
沖合境界条件	領域 1 で自由透過 各領域間は水位・流量を接続
海底摩擦	Manning の粗度係数 =0.025 領域 5 の陸域は中央防災会議データ
陸側境界条件	領域 1 ～ 4 は反射境界 領域 5 で遡上境界
越流計算	領域 5 にて本間公式により越流
潮位条件	T.P.+0.75m(H.W.L)
計算再現時間	地震発生から 3 時間



図－ 5 初期波形の分布



図－ 6　地震発生 30 分後の津波波形

(2) 漂流物シミュレーション

1) 漂流物挙動を表現する計算モデル

津波による漂流物の挙動をモデル化するにあたっては、後藤の方法 [2] を採用した。この方法は、漂流物の形状は粒子として表現するために概略的な方法となるが、広域での津波挙動に対する漂流状況を表現することに適している。漂流物の水平方向の運動は、慣性、水流の圧力勾配、付加質量、流水抵抗そして拡散により記述できる。計算は拡散を除く 4 種類の力の釣り合いを決定論的に扱い、拡散は決定論的に定まる漂流物の位置からのずれと考え確率論的に扱う。時刻 $t=0$ に座標 X_0 に存在していた漂流物が t 時間後、座標 X 移動したものとする。決定論的な力の釣り合いは、u_t,u をそれぞれ漂流物および水粒子の速度とすると、次式の関係が成立する。

$$\rho_t V \frac{d\mathbf{u}_t}{dt} = \rho V \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \rho(C_M - 1)V\left(\frac{d\mathbf{u}}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_t}{dt}\right) - \frac{1}{2}\rho C_D \mathbf{A}(\mathbf{u}_t - \mathbf{u})|\mathbf{u}_t - \mathbf{u}| \tag{1}$$

ここで、ρ_t, ρ はそれぞれ漂流物および水の密度、V は漂流物の体積、A は漂流物接水投影面積、C_M, C_D はそれぞれ漂流物の付加質量係数および抵抗係数である。漂流物の拡散によるずれ（複数の漂流物の平面的なばらつき）は、拡散係数 κ を満足する散らばりとなるように一様乱数 ξ を用いて定めるものとして次式のようになる。なお、拡散係数は文献と同様に 1×10^{-4} とした。

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \int_0^t \mathbf{u}_t dt + \sum_{k=0}^{n\Delta t} \sqrt{24\kappa\Delta t}\left(\xi_k - \frac{1}{2}\right) \tag{2}$$

計算は式（1）、（2）を差分化して行う。k を時間ステップ、j を漂流物につけた番号とすると、速度および漂流物の位置は次式のとおりである。

$$\mathbf{u}_{t,j}^{k+1} = \frac{1}{1+\mu}\left[(1-\mu)\mathbf{u}_{t,j}^{k-1} + 2\Delta t\alpha\left(\frac{d\mathbf{u}}{dt}\right)_j^k + 2\mu\mathbf{u}_j^k\right] \tag{3}$$

$$\mathbf{X}_j^{k+1} = \mathbf{X}_j^k + \Delta t\mathbf{u}_{t,j}^k + \sqrt{24\kappa\Delta t}\left(\xi_j^k - \frac{1}{2}\right) \tag{4}$$

ここで各係数は次式のとおりである。

$$\mu = \beta \Delta t C_D \frac{\mathbf{A}}{V} \left| \mathbf{u}_t - \mathbf{u} \right|, \quad \alpha = \frac{C_M}{\rho_t / \rho + C_M - 1},$$

$$\beta = \frac{1}{2(\rho_t / \rho + C_M - 1)}$$

漂流物の抵抗係数、付加質量係数漂流物の形状により様々になり、一般的な数値で表現することは困難である。ここでは、後藤らの実験成果[2]を用いて次式とした。

$$C_D = \left[0.91 + 32.5 R_e^{-1/2} \right]^2 + 0.1 F_\gamma^{0.25} \tag{5}$$

$$C_M = 1.78 \tag{6}$$

ここに、R_e と F_r はそれぞれレイノルズ数およびフルード数である。実際の計算を行うにあたっては、津波のシミュレーションと同時に行うのではなく、津波シミュレーション結果（津波高さ、流速のメッシュごとの値）を用いて、漂流物に作用する流速等を該当するメッシュ内で空間・時間内挿入を行うものとした。

2）漂流物の条件

漂流物シミュレーションは、漂流物の種類、形状および初期の位置等を条件設定することが必要である。しかしながら、数多くの種類の漂流物の位置や形状、重量等を明確に把握することは困難であるため、本検討においては**図－7**に示すような福良港周辺の空中写真を用いて漂流物として考えられる代表的なものを抽出した。漂流物になる可能性の高いものとしては、海域で養殖筏と船舶、陸域では車両と建設機械が複数存在することが確認できたため、これらを漂流物の対象とした。また、それぞれの位置関係については、複数のシナリオが考えられるが本検討では写真の位置関係を初期位置と仮定し、GIS 上に位置関係のデータベースを作成した。この結果より、福良港周辺における入力個数はそれぞれ、①養殖筏：301 枚、②船舶 621 艘、③車両：1,911 台、④建設機械：35 機となった。

漂流物は水位または流速の変化により漂流を開始・停止する。この条件は**表－3**に示すとおりとした。養殖筏としては永野ら[8]によるチリ地震津波の事例、船舶の条件は係留ロープの条件が考慮されている日本海難防止協会の提案[9]、車両および建設機械は、河川の洪水時の事例で用いられている須賀[10]による提案を用いた。

表－3　漂流物の条件

漂流物	条件
養殖筏	漂流開始条件（案）：流速 1m/s 以上 漂流停止条件（案）：流速 0.5m/s 未満
船舶	係留が弱い場合（老朽化や不完全な係留）：流速 2m/s 以上 係留方法が改善した場合：流速 4m/s 以上 漂流開始条件：水深 1.5m 以上（小型船舶の場合） 漂流停止条件：水深 1.5m 未満
車両 建設機械	漂流開始条件：水深 0.5m 以上 漂流停止条件：水深 0.5m 未満

図－7　福良港周辺の空中写真（全体および拡大）

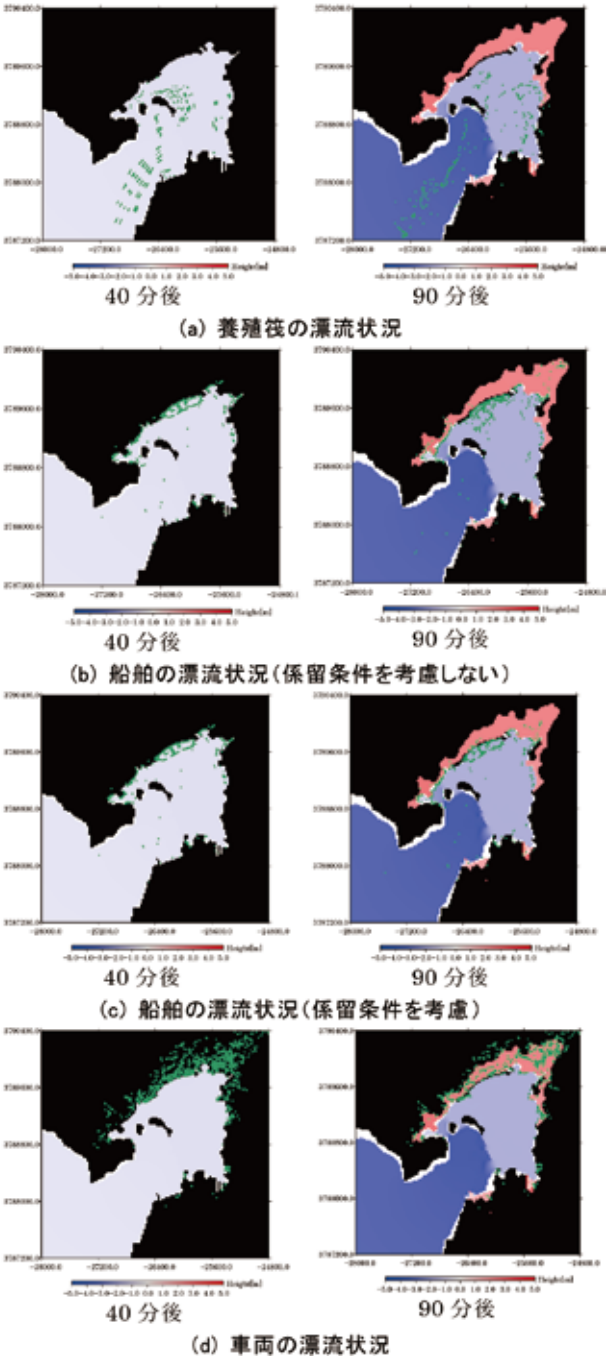
3）計算結果

図－8に計算結果の一例として、養殖筏、船舶および車両の漂流状況とそのときの津波の水位変化について示す。左図は地震発生後 40 分後の結果、右図は第 1 波が来襲して、その後引き波となった地震発生 90 分後の結果である。

養殖筏の結果（**図－8(a)**）は押し波および引き波の繰り返しにより、沖合に拡散しながら移動する状況となる。とくに沖合の養殖筏は引き波での漂流が大きく、沖へ流失する。

船舶の漂流（**図－8(b)、(c)**）については、係留索を一切利用しない場合（浮いているだけの条件）、係留索がある場合の条件について計算を行った。この結果では陸上に打ち上げられる様子が見てとれる。**図－8(c)**は係留索を考慮したケースに関する結果であるが、この場合はほとんどの船舶が漂流しない結果となる。これは、船舶の係留された位置が比較的流速が遅い場所であることが理由として考えられる。

車両の漂流（**図－8(d)**）は、陸上を遡上するケースおよび海上へ流失するケースの両者が存在することがわかる。とくに湾奥の浸水深の最大となるような場所に車両が大きく移動することがわかる。なお、陸上に車両が遡上するケースでは、本来であれば建物の影響を受けて遡上を阻止するか、もしくは一旦遡上したものが静止することが考えられる。しかしながら、津波の計算を行うにあたっては陸上の建物を粗度係数で代表させて計算を行っているため、遡上した車両が海側に戻る現象がより多く見られる可能性がある。建物の影響を表現する方法として、水深 0.5m を境界にして漂流開始・停止条件を考慮しているが、漂流停止条件については、今後の課題となる。なお、建設機械については対象となる総数が少ないため、結果の表示は割愛した。



図－8　漂流物シミュレーション結果

4. 漂流物による被害の算定

(1) 漂流物単価の設定

漂流物の原単位は現地で単価を調査することが最も精度が高いが、車両や船舶の各々の単価を細かく調査することは現実的でない。ここでは、代表的な原単位を設定して被害想定の基準として用いることとした。原単位の設定に関しては、**表－4** に示すものを対象として、財務省貿易統計[11]から 2007 年に輸出された品目の平均単価を設定した。ただし、養殖筏については、筏本体だけでなく漁業損失の影響が考えられるため、現地でアンケートを実施して原単位を設定した。アンケートでは、養殖筏が全壊した場合の損失額（漁業損失を含む）と制作費について調査して、1 台あたりの価格を確認した。**表－5** に原単位（ただし、小型船に対する比）の一覧を示す。

表－4　漂流物の原単位設定対象

対象	原単位設定対象
小型船	○漁船および工船その他漁獲物の加工用または保存用の船舶 ※大きさにばらつきがあるため 5.0 トン型に変換した価格を採用
大型船	○客船、遊覧船その他これらに類する船舶（主として人員の輸送用に設計したものに限る。）およびフェリーボート ○その他の貨物船および貨客船
養殖筏	○膨脹式いかだ
乗用車	○乗用自動車その他の自動車（ステーションワゴンおよびレーシングカーを含み、主として人員の輸送用に設計したものに限るもの）
大型車	○貨物自動車（ダンプカー）
建設機械	○クレーン ○ブルドーザー、アングルドーザー ○ショベルローダー

表－5　漂流物の原単位

漂流物	漂流物単価比
小型船	1
大型船	24
いかだ	0.9
乗用車	0.1
大型車	0.4
建設機械	0.6

(2) 漂流物被害判定基準

漂流物による被害は、陸上・海域における浸水破損・接触破損が考えられる。被害判定については**表－6** に示すとおりとした。衝突については、陸上では構造物との衝突も考慮した。衝突を受けた漂流物は買い換えることを考えて金額を算定するものとした。なお、船舶は結果の危険側を考え、係留条件を考慮しない場合を対象とした。

表－6 漂流物の被害判定基準

漂流物	被害判定基準	
小型船	海域被害	他漂流物との接触 陸上構造物との接触
大型船		
養殖筏		
乗用車	陸域被害	他漂流物との接触 基準浸水深以上の浸水 構造物との接触
大型車		
建設機械		

漂流物の判定基準を**表－7**～**表－8** に示す。海域・陸域ともに他漂流物および構造物と接触した場合は被害を受けるとした。海域にある船舶およびいかだが陸上へ遡上して構造物に接触した場合、陸域にある車両や建設機械が浸水した場合も被害を受けるとした。家屋への漂流物については、福良地区の家屋平均床面積（85.6m^2）および平均家屋階数（1.7 階）から、1 階部分の平均床面積（50.4m^2）

を算出し、家屋 1 辺あたり 7.0m として、家屋の中心点より 3.5m 以下に接近した場合を衝突判定と設定した。ただし、上記の方法では家屋に近接して駐車している車両もカウントされてしまうため、津波発生直後から接近している漂流物はカウントせず、漂流物による被害のみをカウントした。また、家屋は福良地区による調査資料に基づき、木造・非木造に分けた。なお、被害の程度は津波浸水時の被害の考え方にならい、木造の場合は半壊、非木造の場合は軽微な被害とした。なお、被害度合を示す被害率については治水経済調査マニュアル[12] の数値を基準とした。また、漂流物同士の衝突および浸水（車両および建設機械）の被害基準は、**表－8** に示すとおり、それぞれの漂流物の大きさの平均的値の半分の数値と基準として距離が基準以下となった場合は、衝突被害を受けるものとした。

表－7　漂流物の被害基準（漂流物と構造物の接触）

対象	被害基準	被害度合		
家屋	漂流物の衝突	木造家屋	半壊	被害率：0.382
		非木造家屋	軽微	被害率：0.205

表－8　漂流物の被害基準（漂流物同士の接触・浸水）

漂流物	被害基準
養殖筏	筏の大きさの半分として中心から 5m 以下
船舶	小型船：専用漁船の平均全幅 2.5m 以下 大型船：福良港の大型船舶平均全幅 7m 以下
車両 建設機械	浸水被害：乗用車 0.3m、大型車、0.5m、建設機械 0.5m 以上になった場合 衝突被害：車両中心から 1.7m 以下（車両・建設機械とも）

(3) 被害想定算出結果

漂流物被害判定基準および原単位を基本として、被害想定の算出を行った結果を**表－9 ～表－10** に示す。漂流物被害額比は小型船舶 1 隻比の約 800 倍となった。また、津波により漂流物となりうるものは、ほぼ半数以上が損失することが確認された。また、漂流物の影響により、家屋は約 2 割が損壊する結果となった。

5. おわりに

本論文では、兵庫県の福良港を対象として、想定される南海地震の津波を対象とした場合の漂流物による挙動を推定する数値シミュレーションとシミュレーション結果を用いた被害想定の算定について示した。漂流物の挙動を詳細に推定する数値シミュレーション技術は開発途上であり、その精度や妥当性については今後さらに検討を要するものである。また、各々の被害を推定する方法については、数多くのシナリオ設定が考えられる。本検討では、このような状況の中で想定される最大津波が来襲した場合の考えられるシナリオ検討として得られた結果であり、現象の傾向および被害額については精度と妥当性を今後さらに検討する必要がある。

今後は、漂流物シミュレーションのモデルの高度化（個々の漂流物モデルの高精度化等）や被害想定に関する原単位および判定基準等の規準化が課題として挙げられる。

表－9　漂流物被害総数・被害額比

漂流物	総数	被害数	漂流物単価（比）	被害総額（比）
小型船	583	348	1	348
大型船	38	4	24	96
いかだ	301	221	0.9	198.9
乗用車	1,830	1,144	0.1	114.4
大型車	81	61	0.4	24.4
建設機械	35	25	0.6	15
合計（小型船 1 隻比）				796.7

表－10　漂流物被害額（家屋単価を 1 とした場合の比）

家屋単価比	総数		被害数	被害総額（比）
1	木造	2,782 棟	573 棟	219
	非木造	1,697 棟	348 棟	71
合計（家屋 1 棟比）				290

参考文献

1) 例えば、岡本 修、小田勝也、熊谷兼太郎：港湾の背後地域における間接被害を含めた津波被害波及過程及びその評価方法、国土技術政策総合研究所資料、No.306、2006
2) 池野正明、田中寛好：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究、海岸工学論文集、第 50 巻、pp.721-725、2003
3) 後藤智明：津波による木材の流出に関する計算、第 30 回海岸工学講演会論文集、pp.594-597、1983
4) 川崎浩司、袴田充哉：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、2007
5) Mansinha, L. and Smylie, D. E.：The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971
6) 後藤智明、小川由信：Leap-Frog 法を用いた津波の数値計算法 , 東北大学工学部土木工学科、52p, 1982
7) 牛島 省：OpenMP による並列プログラミングと数値計算法 , 丸善 , 138p, 2006
8) 永野修美、今村文彦、首藤伸夫：数値計算による沿岸域でのチリ津波の再現性、海岸工学論文集、第 36 巻、pp.183-187、1989
9) （社）日本海難防止協会：日本海北部海域における津波発生時の港湾在泊船舶の安全確保に関する調査研究、pp65-67、1998
10) 須賀撓三：利根川の洪水、山海堂、1995
11) 財務省貿易統計：http://www.customs.go.jp/toukei/info/index.htm
12) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル、112p、2005