

広域の漂流物挙動特性の把握と被害推定手法

ESTIMATION OF DAMAGE FROM TSUNAMI WRECKAGES OVER A LARGE AREA BASED ON THE CHARACTERISTIC OF DRIFT MOTION

野島 和也 *・櫻庭 雅明 *・小園 裕司 *
Kazuya NOJIMA, Masaaki SAKURABA and Yuji KOZONO

This paper proposes an application for tsunami wreckage simulation and damage estimation. A previous paper focused on determining the volume of wreckage and some parameters such as conditions of wreckage motion. Some properties of wrecks such as the position and type of wreckage were defined by using GIS extension functions. For the presented study, tsunami wreckage simulation and damage estimation of Nankai Trough Quake were carried out. The validity of the application for damage estimation for tsunami wreckage is confirmed in this paper.

Keywords : tsunami wreckage, damage estimation, hazard map, Nankai Trough quake

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波より、漂流物が広範囲に発生した。漂流物の種類は、コンテナ、船舶、危険物貯留施設、自動車、木材、家屋の瓦礫等多種にわたるものであった。また、漂流物の滞留に伴う火災や建物への衝突による被害および車両や家屋の流出、船舶の座礁が多数発生している。

津波による各種被害を受けて、今後想定される津波被害を軽減することを目的として、国内各地で津波の浸水予測・被害想定が行われており、最大クラスの津波レベルにおける津波浸水想定や被害想定の結果が公表されている¹⁾。津波被害の推定を行うにあたっては、浸水被害のみでなく浸水に伴う、火災の発生、ライフラインの系統被害を推定する必要がある。これらの被害を推定するにあたっては浸水による要因でなく、津波で発生した漂流物による滞留、衝突および流出なども考慮する必要がある。津波による漂流物の影響による被害については、漂流物となった自動車等による建物衝突による被害、瓦礫化した漂流物による引火に伴う火災被害、コンテナの散乱・流出による物流のダメージ、船舶の流出や座礁など様々である。しかしながら、これらの動態を予測して被害を精度良く求めることは現状では困難とされている。

一方、漂流物の移動・衝突・流出の状況を予測する方法はこれまで各種の研究が行われている。特に被害を推定するためには数値シミュレーションによる方法が挙げられる。近年では、後藤による個別要素法を用いたシミュレーション²⁾、橋本らによる船舶の形状と移動過程を表現した方法³⁾などによる、

漂流物の形状を詳細に表現するものや、衝突や回転を考慮するシミュレーション手法が開発されている。実務的な観点として、対象の分布範囲や数量が大きく、個々の漂流物の挙動に対して複雑な処理を行う手法については、非常に計算負荷が高い。漂流物による被害推定には、個々の漂流物の挙動の把握よりも、漂流物の広域的な挙動の把握が重要となることから、本研究では、比較的処理負荷の小さい後藤⁴⁾による方法を基本モデルとした。この方法は漂流物を粒子で表現し、粒子に抗力・付加質量としてモデル化し移流・拡散過程を表現できる方法で、比較的簡易な方法として広い対象範囲で計算することができる。しかし、粒子に代表させるための漂流物の体積や投影面積などの代表スケールおよび移動開始や停止などの条件が必要となるが、これらの条件が文献などで示される例は少ない。

本研究は、広域に分布する多種の漂流物の移動経路や滞留状況を推定する方法を提案するものである。複数の種別の津波漂流物に対して、それらを表現するためのパラメータ（体積、移動開始・停止条件）を一般化し、航空写真を活用し現在の状態に近い条件で漂流物のシミュレーションを行った。また、漂流物に伴う推定される被害を分類し、シミュレーション結果からその影響度合いを試算した。これらの結果を津波漂流物の被害推定マップとして作成することを試みた。

2. 漂流物シミュレーション

本研究では、津波の浸水シミュレーションの結果を用いて、各種の漂流物の移動、滞留、流出の過程を算定する。漂流物の諸元算定方法について以下に示す。

* 技術本部 中央研究所 総合技術開発部

(1) 漂流物シミュレーションモデル

本研究では漂流物の移動状況をモデル化するために、できるだけ複数の種類の漂流物を簡便に取り扱うことを主眼においた。シミュレーションのモデルとして、後藤による木材流出過程をモデル化した手法を採用した⁴⁾。この方法は、漂流物の運動を、慣性、水流の圧力勾配、付加質量、流水抵抗により記述できる方法である。また、個々の漂流物は粒子として取り扱うが、漂流物の投影面積および体積をパラメータとして与える必要がある。本研究では、各種漂流物において、パラメータの値の設定を実施した。詳細については次に示す。

なお、津波の浸水シミュレーションは2次元の浅水流モデルを Leap Frog 法により計算している⁵⁾。浸水シミュレーションから得られる流速は、深さ方向に平均化された流速である。漂流物の移動は水面付近の流速が影響するが、津波においては水面付近の流速と平均化された流速が小さいと考えることが出来るため、浸水シミュレーションによる流速を用いて漂流物の移動を算出した。

(2) 漂流物のモデル化

漂流物となり得る物体は場所により異なるが、津波が来襲する沿岸域では、家屋、車両、船舶等様々な津波漂流物となり得るものが存在する。本研究では、考えられる漂流物のうち周辺に大きな被害が生じるものと考えられる船舶（小型～大型）、車両（乗用車、バス・トラック）、ヘリコプター、コンテナ、木材、プレハブおよび屋外燃料タンクを対象とした。漂流物の諸元の仮定を行うにあたっては、代表的な値を用いるものとして以下のように設定している。

1) 船舶

船舶はボート、漁船、タンカー、客船など大きさが様々である。漂流物の設定条件として、小型船舶（長さ 6.5 ～ 15m 程度、ボートや小型漁船）、中型船舶（長さ 15 ～ 40m 程度、中型漁船）および大型船舶（40 ～ 80m 程度、タンカーや客船など）の3種類に大別した。代表的な寸法については、既往の論文⁶⁾で設定されている値を採用した。船の喫水については船舶メーカーの諸元表から、小型船舶:1m、中型船舶:2m、大型船舶:2.6mとした。

2) 車両

車両については、軽自動車、普通乗用車、バス・トラックなどがある。各車両の大きさについては自動車メーカーの資料を参考にした。なお、車両については水没を考慮した。水没条件としては、東北地方太平洋沖地震の映像記録等から浸水開始後 10 分で水没すると仮定し、その後漂流しないものとした。

3) コンテナ

コンテナは 20 ft および 40 ft の規格寸法を採用した。なお、コンテナについては海上で水没することが考えられる。水没過程は様々な事象が考えられるが本研究では、浸水開始後 4 時

間で水没することとした。

4) 航空機・ヘリコプター

漂流被害の検討地域には、航空機やヘリコプターが対象となる場合が考えられる。航空機やヘリコプターについては、航空写真から読み取れるものについて判断し、メーカーの HP から見られる諸元表や自衛隊の装備年鑑を参考にして概略的に設定した。

5) 屋外燃料タンク

屋外燃料タンクが津波により漂流物となり、火災が発生することが考えられる。屋外燃料タンクは、消防庁の被害報告⁷⁾によると浸水深が 7m で漂流することが確認されている。本研究では簡単のため、直径 10m のタンクが 1m 水をかぶり移動するものと仮定した。

6) その他

その他考えられる漂流物としては、木材、プレハブ小屋などが挙げられる。本研究では、木材については太さ 0.12m の柱材を仮定した。プレハブについては 15 畳程度のプレハブの大きさを仮定した。

(3) 漂流物属性の設定

1) 漂流物の位置情報

漂流物の位置については、時間や時期について様々である。シミュレーション実施にあたっては、ある任意の時期における情報を初期条件とする必要がある。本研究では、航空写真で確認できる対象物を入力した。なお、属性入力の煩雑さを解消するために、QGIS の OpenLayers のプラグインの機能⁸⁾によりインターネット上の航空写真や地図を読み取り、属性情報を作成した。その一例を図-1に示す。この方法によりインターネット上の航空写真・地図の位置（緯度・経度）を最初から GIS 上で指定でき、さらにその他の情報（X,Y 座標、種類、諸元）を一元に取り扱うことが可能となる。

2) 漂流物の移動開始・停止の条件

陸上における各種漂流物は、浸水深や流速により移動開始・

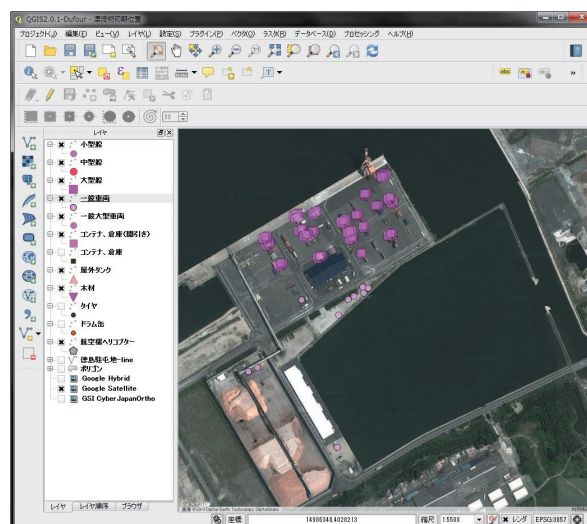


図-1 QGISによる漂流物の入力例

表－１ 各種漂流物代表的パラメータ

種別	移動開始・停止水深(m)	面積 (m ²)	体積 (m ³)
小型船舶	1.00	2.40	6.00
中型船舶	2.00	12.60	60.00
大型船舶	2.60	163.00	2500.00
小型乗用車	0.40	1.32	2.50
バス・トラック	0.70	4.95	12.30
ヘリコプター	0.60	1.90	4.20
コンテナ (20ft)	0.40	2.10	2.10
コンテナ (40ft)	0.30	4.00	3.70
木材	0.06	0.36	0.04
屋外タンク	7.00	10.00	80.00

停止の条件が異なる。船舶については船の喫水により移動開始・停止条件を設定することが可能であり、前述の喫水により陸上の漂流開始・停止条件とした。その他の漂流物については、漂流物の重量より浮力が上回るときの深さを逆算して移動開始・停止条件を設定した。具体的には、浸水時における水面下の体積を次式のように設定して、未知量となる移動開始水深を次式のように求めた。

$$d = h_m + \frac{W}{\rho_w BL} = h_m + \frac{V_w}{BL} \quad (1)$$

ここに、d : 移動開始水深

h_m : 最低地上高

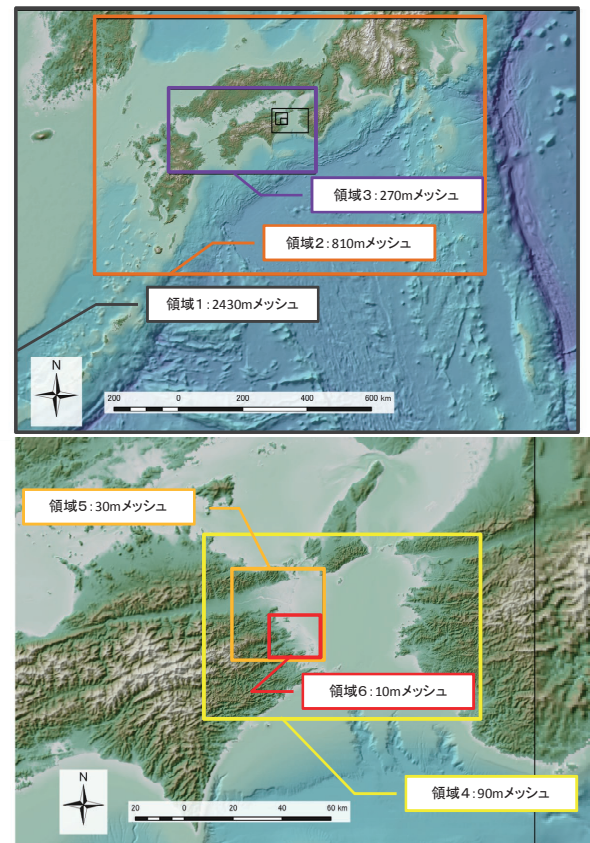
V_w : 水面下の体積

W : 総重量

B : 平面上の幅

L : 平面上の長さ

最低地上高は車両の移動開始水深を設定するために、与えたものである。なお、コンテナの場合は 0m となる。また、ここで便宜的に総重量が水面下に集中的に作用していることを仮定している。ここで得られた移動開始水深より浸水深が上回る場合を漂流開始、下回る場合漂流停止とした。船舶については、係留索の破断条件を適用する必要がある。日本海難防止協会⁹⁾によると、流速 4.0m/s 以上で係留索破断が生じるとされる。本検討では、係留索の老朽化や不完全な係留状況においてより小さな流速で係留索が破断する場合を考慮し、流速 2.0m/s を破断条件とした。なお、前述のとおり屋外燃料



図－２ 津波の計算範囲

タンクについてはこの方法を採用せず、浸水深 7m で移動開始するものとした。

以上の条件を踏まえて、それぞれの漂流物の体積、投影面積および移動開始・停止条件を表－１に示す。

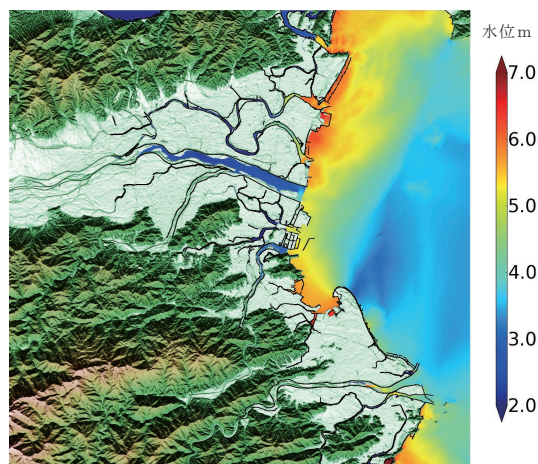
3. 計算結果

(1) 津波の伝播状況

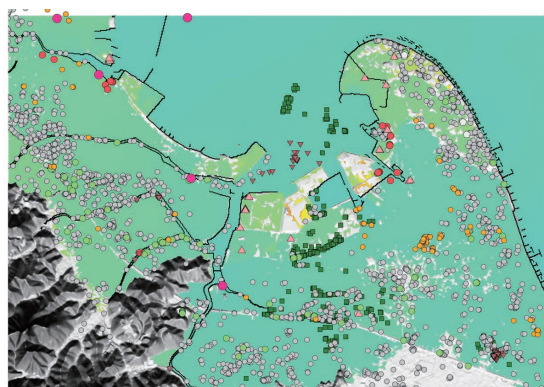
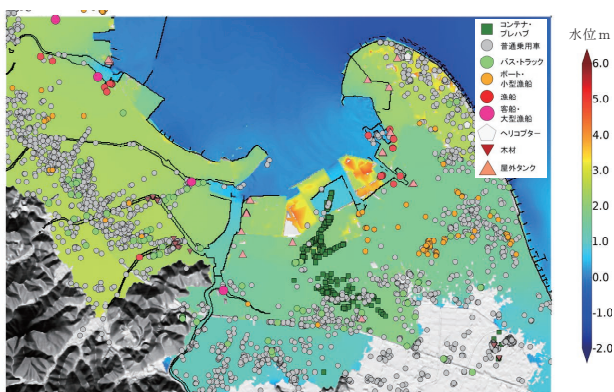
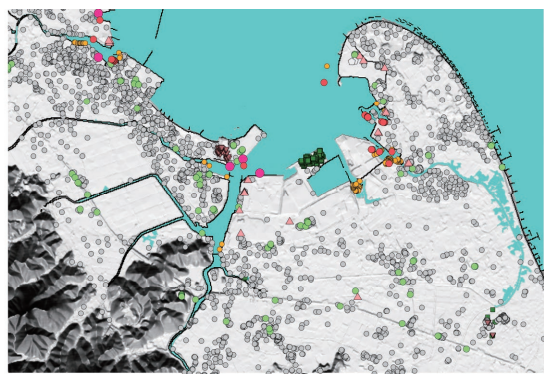
漂流物の被害リスクの検討対象としては、徳島県の小松島周辺（図－２参照）を採用した。津波条件は、中央防災会議による南海トラフの巨大地震モデルのケース③¹⁾を対象とした。計算範囲は図－２に示すとおりであり、波源を含む領域には 2430m、小松島周辺には 10m の計算格子を用いた。地形モデルについては、前述の中央防災会議¹⁾の提供するデータを用いた。堤防などの構造物は漂流物被害が最大となることを想定して、地震時にすべて破壊する条件とした。潮位は年間最高潮位である T.P.+1.15m、計算対象時間は地震発生から 6 時間までとした。この条件における小松島周辺の最大津波高さの分布を図－３に示す。対象とした地域周辺では最大津波高さが 6m 程度であり、最大波の到達時間は概ね地震発生後 55 分程度である。

(2) 漂流物の移動状況

この結果の流速の時刻歴を入力値として漂流物シミュレーションを実施した。対象とした漂流物は、①船舶（小型～大

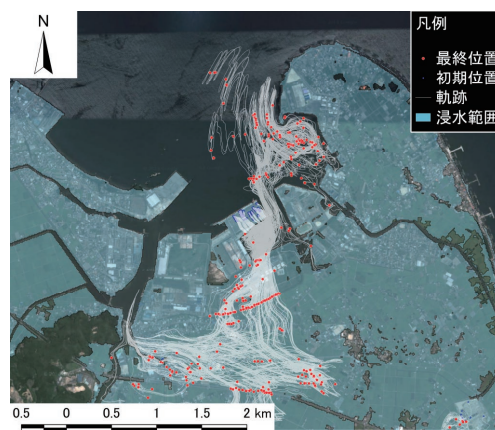


図－3 最大津波高さの分布（単位 T.P.m）

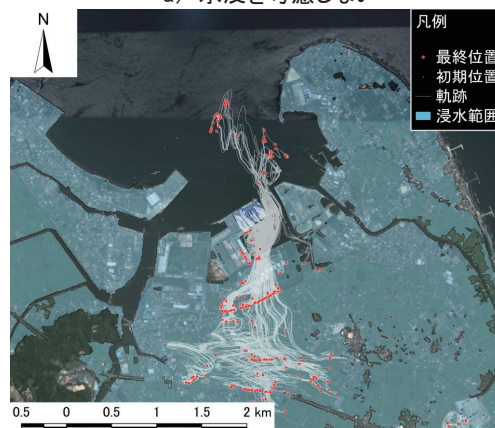


図－4 対象となる漂流物の移動状況
（上：初期位置、中：80 分後、下：6 時間後）

型)、②車両 (乗用車、バス・トラック)、③ヘリコプター、④コンテナ、⑤木材、⑥プレハブ、⑦屋外燃料タンクとした。漂流物のパラメータについては前述の表－1 に示すとおりである。図－4 に対象となる漂流物の移動状況の一部を示す (初期位置および地震発生から 80 分後) を示す。この結果より、陸域内で広く漂流物が移動している。なお、地震発生後 80 分後は、ほぼ津波の最大波が来襲し陸上に遡上し始めた時間に相当する。この時間帯が最も広く大きい移動となり、その後滞留する漂流物や引き波により沖合に移動する漂流物などが存在する。コンテナ、車両、および船舶の漂流軌跡を図－5 ～図－7 に示す。図中の白線が漂流物の移動軌跡を示し、赤い点が漂流物の最終位置を示す。コンテナおよび車両については、水没仮定を考慮した場合と考慮しない場合の両方について計算を行っている。この結果より、水没を考慮した結果については、河川および海域で流出する傾向が見られる。陸上においては、津波 (押し波) の影響により漂流物が遠くまで押し流されるのではなく、浸水に伴う水没の影響により、平野部で漂流物が滞留する傾向が見られている。船舶については、押し波の影響により陸上部 (沿岸から 1000m 程度陸上) に係留索が破断して、移動・滞留しており、この地点で概ね座礁していることがわかる。なお、今回の対象では係留された船舶が比較的少ないことから、座礁した箇所は限定的であるが、船舶が分散するような場合については陸上で広く座礁する可能性がある

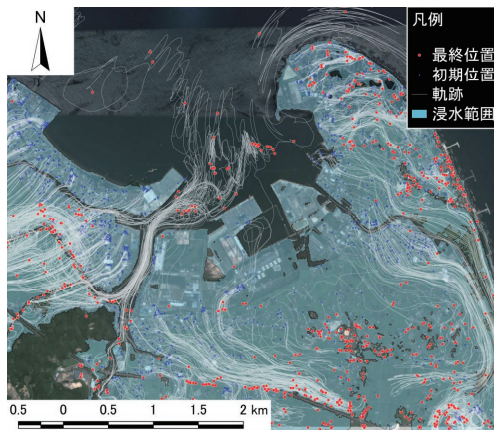


a) 水没を考慮しない

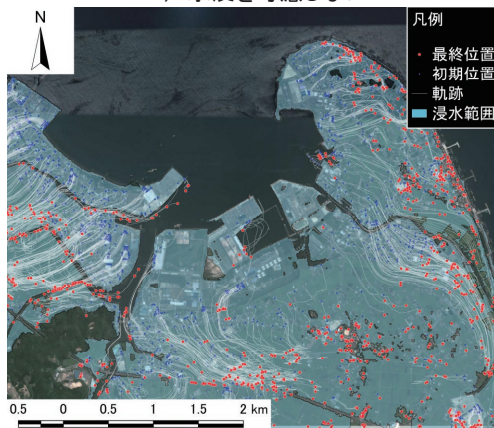


b) 水没を考慮

図－5 漂流物の軌跡 (コンテナ)



a) 水没を考慮しない



b) 水没を考慮

図－6 漂流物の軌跡（車両）



図－7 漂流物の軌跡（船舶）

ため、今後複数のケースでの検討が必要である。

4. 漂流物の被害推定マップの作成

(1) 漂流物の被害分類

本研究では津波および漂流物シミュレーションの結果を参考にして、漂流物の被害推定を試みた。この結果を踏まえ、被害推定マップの試作版を作成した。

津波による漂流物の被害は複数考えられるが、本研究では被害を①流出（海域で水没）、②座礁、③滞留、④衝突などによる破損に大別した。③については、滞留そのものは被害

ではないが、漂流物が多く集まることにより何らかの理由により引火して火災が発生することが懸念される。④の衝突については漂流物同士の衝突や漂流物と構造物等の衝突が考えられる。本研究では、漂流物が周辺に影響する度合いを推定することを目的として、漂流物と構造物等との衝突の危険性を対象とした。

なお、上記①～④をシミュレーションの結果により定量的に算定することは困難である。シミュレーション結果から得られる軌跡の範囲と周密度合いを考察した結果を被害推定として考え、マップにその分布図を記載することにとどめた。衝突の影響については、地図上の建物の分布と漂流軌跡の重なる部分を区域として設定した。

(2) 漂流物被害推定マップの作成

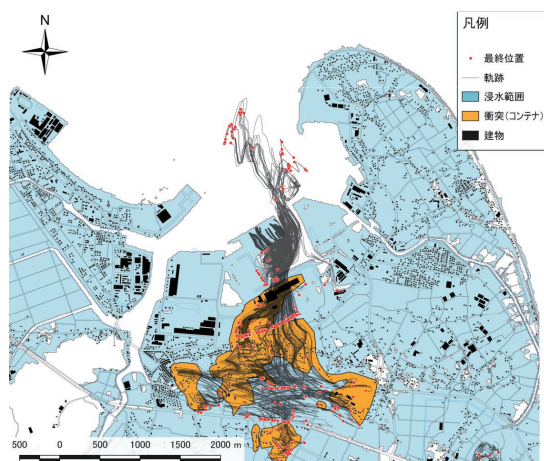
各漂流物に対する各種被害範囲を示したものを図－8に示す。船舶については、対象とした船舶が限定的であったために、座礁する範囲は対象地域の中でも一部となる。

また、車両とコンテナについては水没の有無の両方を条件としてシミュレーションしているため、この違いによる影響をある程度明確に記載することができる。さらに、水没を考慮することにより滞留するエリアが平地であることが説明できるようになるため、漂流物は津波で押し流されるが、水没により途中滞留する恐れがあり、その後火災等のリスクも考えられることがわかる結果となった。衝突の影響については、漂流軌跡と建物の集積の重ね合わせにより影響の大きいところを推定することが可能となった。

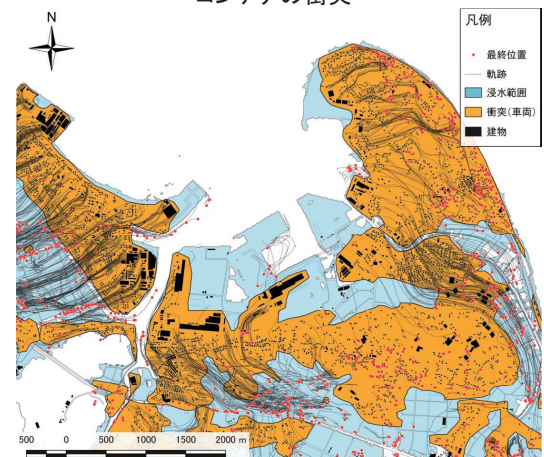
5. おわりに

本研究では、津波で発生する漂流物による被害を推定することを目的として、想定される漂流物の分類、諸元・条件の設定および移動過程のシミュレーションを行った。また、シミュレーション結果を用いて、津波漂流物被害推定マップの試作を行った。この結果、以下の結論が得られた。

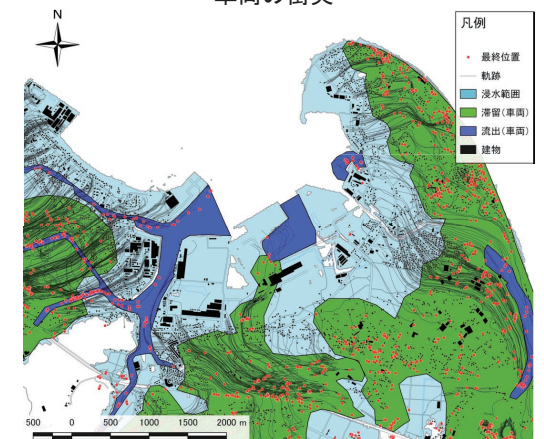
- 代表的な漂流物に対し、種別ごとに大きさ、移動開始・停止条件を一般化して、実務的な津波漂流物被害推定の基礎条件を作成した。これにより、多種の漂流物をシミュレーションで扱うことが可能となった。
- 漂流物シミュレーションおよび被害推定マップの試作の結果、定性的ではあるが広域（たとえば小松島の場合は港湾背後地全体）の複数の漂流物の移動を推定できる結果となった。
- 本手法では、「津波浸水想定設定の手引き¹⁰⁾」に示されている計算方法、地形データに加えて航空写真からデータを入力するのみで沿岸数十 km レベルの範囲における津波来襲・浸水に伴う漂流物の移動・滞留状況を推定することが可能となった。
- 車両とコンテナについては水没を考慮して軌跡と滞留



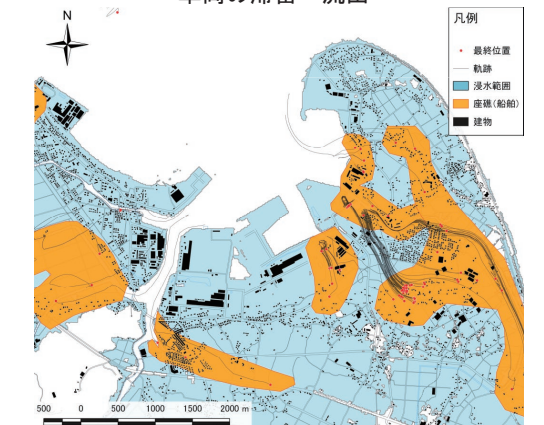
コンテナの衝突



車両の衝突



車両の滞留・流出



船舶の座礁

図-8 漂流物被害推定マップ

箇所を算出した結果、水没を考慮しない場合と比較して、滞留箇所が一箇所に固まらずに分布することを確認し、水没が結果に影響することを明らかにした。

今後の課題として、以下に取り組むことを予定している。

- 家屋等の漂流物による倒壊を考慮し、建物と漂流物の衝突をモデル化した問題
- 漂流物同士の衝突や漂流物の回転を考慮した場合の被害想定への影響の調査

参考文献

- 1) 内閣府、南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）、<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html>、2012
- 2) 後藤仁志、五十里洋行、柴田卓詞、小倉和己、殿最浩司、志方建仁：津波来襲時のコンテナ群漂流・水没シミュレーション、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol. 66、No.1、pp.806-810、2010
- 3) 橋本貴之、越村俊一、小林英一、藤井直樹、高尾誠：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、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol. 66、No.1、pp. 236-240、2010.
- 4) 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
- 5) 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、p.52、1982
- 6) 橋本貴之、越村俊一、小林英一：津波による大型船舶の漂流挙動解析－インドネシア・バンダアチエにおける事例－、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol. B2-65、No.1、pp.316-320、2009
- 7) 消防庁危険物保安室・特殊災害室：東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討報告書（第3章）、http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h23/2312/231222_1houdou/02/index.pdf、2011.
- 8) QGISホームページトレーニングマニュアル、http://docs.qgis.org/2.2/ja/docs/training_manual/qgis_plugins/plugin_examples.html.
- 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
- 10) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室、国土交通省国土技術政策総合研究所河川部海岸研究室：浸水想定設定の手引き Ver.2.00、https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/saigai/tsunami/shinsui_settei.pdf、2012.