

建物破壊状況に応じた時間発展型合成等価粗度モデルの検討

林 里美¹・Bruno Adriano¹・Erick Mas²・越村 俊一²

1. 序論

津波の遡上速度（津波先端部の移動速度）および氾濫流速に関する情報は、その流体力学的特性を把握する上で重要な要素である。また、津波による建物被害想定のために、津波被害関数（建物被害程度と津波外力の関連性を表す式）を活用する際は、遡上津波力が建物の破壊においてより支配的にはたらくという理由から、津波氾濫流速や作用波力に対応した関数を用いることが望ましい。したがって、陸域を遡上する津波氾濫流速および作用波力の推定手法の高度化は、津波による建物被害予測の精度向上において不可欠である。しかし、津波遡上速度および氾濫流速の実測例が少なく、検証材料が不足していることから、津波数値計算による実地形上の流速値の推定精度は、未だに検証が不十分である。

そこで本研究では、現行の津波数値シミュレーション

における流速再現性の向上、および津波流況の高精度予測を可能にする津波数値解析手法の整備を目的に掲げる。具体的には、津波遡上速度および流速の実測値と計算値を比較することで、現在の流況再現性を把握するほか、シミュレーションに最適な陸域遡上計算条件を選定する。そして、建物破壊を考慮した新たな抵抗則付与手法（以下、時間発展型合成等価粗度モデル）を構築することで、津波数値計算による流速推定精度の向上と数値解析手法の高度化を図る。

2. 流速再現に望ましい陸域遡上計算条件の検討

陸上域の最終計算格子間隔を 10 m として、仙台市若林区藤塚・名取市関上・名取市小塚原（図 1）における 2011 年東北地方太平洋地震津波の遡上計算を実施し、津波遡上速度

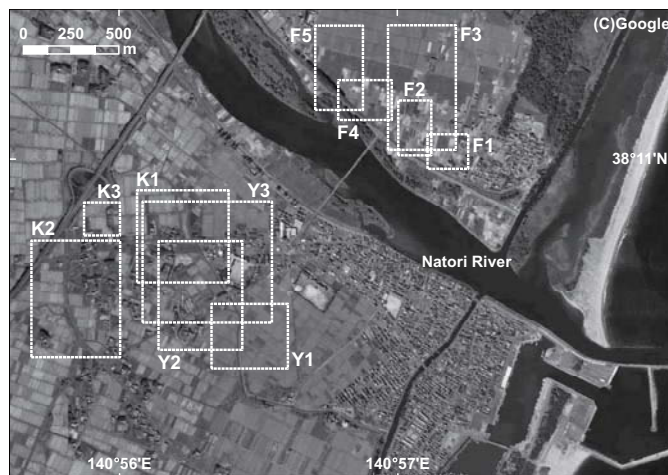


図 1 実測流速情報の取得地域および本研究の解析対象領域。(F) 仙台市若林区藤塚, (Y) 名取市関上, (K) 名取市小塚原

¹ 東北大学大学院工学研究科

² 東北大学災害科学国際研究所

および流速を算定する。そして、同領域における遡上速度・流速の実測値（林・越村, 2012）を用いて、現行の津波数値計算における流況再現性を評価する。特に、陸域遡上計算条件が異なる複数のシナリオ下で再現計算を行い、数値解析に適した計算条件について論ずる。

本研究では初期条件として、Satake et al. (2013) の津波波源モデルを使用した。これは、実際に観測された津波波形を基にインバージョン解析を行うことで、断層の滑り量分布を推定したモデルである。仙台平野における本モデルの津波波形・浸水域・浸水深などの再現性に関しては、良好であることが確認されている（Satake et al., 2013；Hayashi and Koshimura, 2013）。

2.1 陸域遡上計算条件の設定

津波遡上速度・流速に関する再現性に着目した既往の検討（林・越村, 2012）では、土地利用状況および建物の存在を考慮した津波氾濫解析を行う必要性が指摘されている。本研究では、土地利用状況や建物の存在を考慮するために合成等価粗度モデルを導入し、複数の遡上計算シナリオ（被災前条件、被災後条件）に基づいた検証を行う。

2.1.1 異なる合成等価粗度モデルの適用

合成等価粗度モデルとは、構造物による抵抗をそれと等価な Manning 粗度係数で置き換える手法である。油屋・今村（2002）の合成等価粗度 n_{ab} は、Morison 式にならい、流水に作用する力が底面摩擦力と家屋抵抗力の合力であるとして、式 (1) のように導かれる。

$$n_{ab} = \sqrt{n_0^2 + \frac{C_D}{2gk} \times \frac{\theta}{100-\theta} \times D^{4/3}} \quad (1)$$

ここで、 n_0 ：底面粗度係数、 D ：水深、 k ：家屋幅（本稿では $k = 10.0$ m）、 θ ：家屋占有率、 C_D ：抗力係数（本稿では $C_D = 1.5$ ）である。本研究では、小谷ら（1998）や Koshimura et al. (2009) を参考にして、底面粗度係数 n_0 を表 1 のように設定した。

表 1 小谷ら（1998）による底面粗度係数 n_0

防潮林（松林）	0.030
田畑域	0.020
その他（水域含む）	0.025

しかし、式 (1) は家屋占有率 $\theta = 100$ % の場合に適用できず、さらに家屋占有率が小さい場合のみ使用が可能である。したがって、今井ら（2013）は合成等価粗度モデルの汎用性向上のため、新しい合成等価粗度係数 n_{im} として式 (2) を示した。

$$n_{im} = \sqrt{\frac{100-\theta}{100} \times n_0^2 + \frac{C_D}{2gk} \times \frac{\theta}{100} \times D^{4/3}} \quad (2)$$

ここで、各パラメータの諸元は式 (1) と同様である（ただし、抗力係数 $C_D = 0.5$ ）。本研究では、油屋・今村（2002）および今井ら（2013）のモデルを用いて津波数値計算を実施し、両者の比較を行うことで、望ましい粗度係数付与手法を明らかにする。

2.1.2 実現象に基づいた遡上シナリオの設定

本研究では、Manning 粗度係数の与え方によって生じる、津波遡上速度・流速の整合性の変化を確認するため、異なる陸域状況を想定した津波遡上シナリオを考案した。ただし、津波来襲時の土地利用状況を把握することは困難であるため、被災前と被災後の状況を粗度係数分布に反映させ、その中間に実現象が存在するものと仮定した。

(1) Case A：被災前条件（防潮林＋全ての建物を考慮）

「被災前条件」として、津波が来襲する直前の建物位置情報（国土交通省都市局, 2011）および土地利用状況（国土交通省国土政策局, 2009）を GIS 上で把握し、当時の状況を表現する。本研究では、海岸線沿いの防潮林と全建物が存在する状況を「被災前条件」と仮定した（図 2 (a)）。そして、10 m 格子あたりの家屋占有率 θ （図 2 (b)）・底面粗度係数 n_0 ・計算浸水深データ D から、合成等価粗度係数 n_{ab} および n_{im} を算出した。

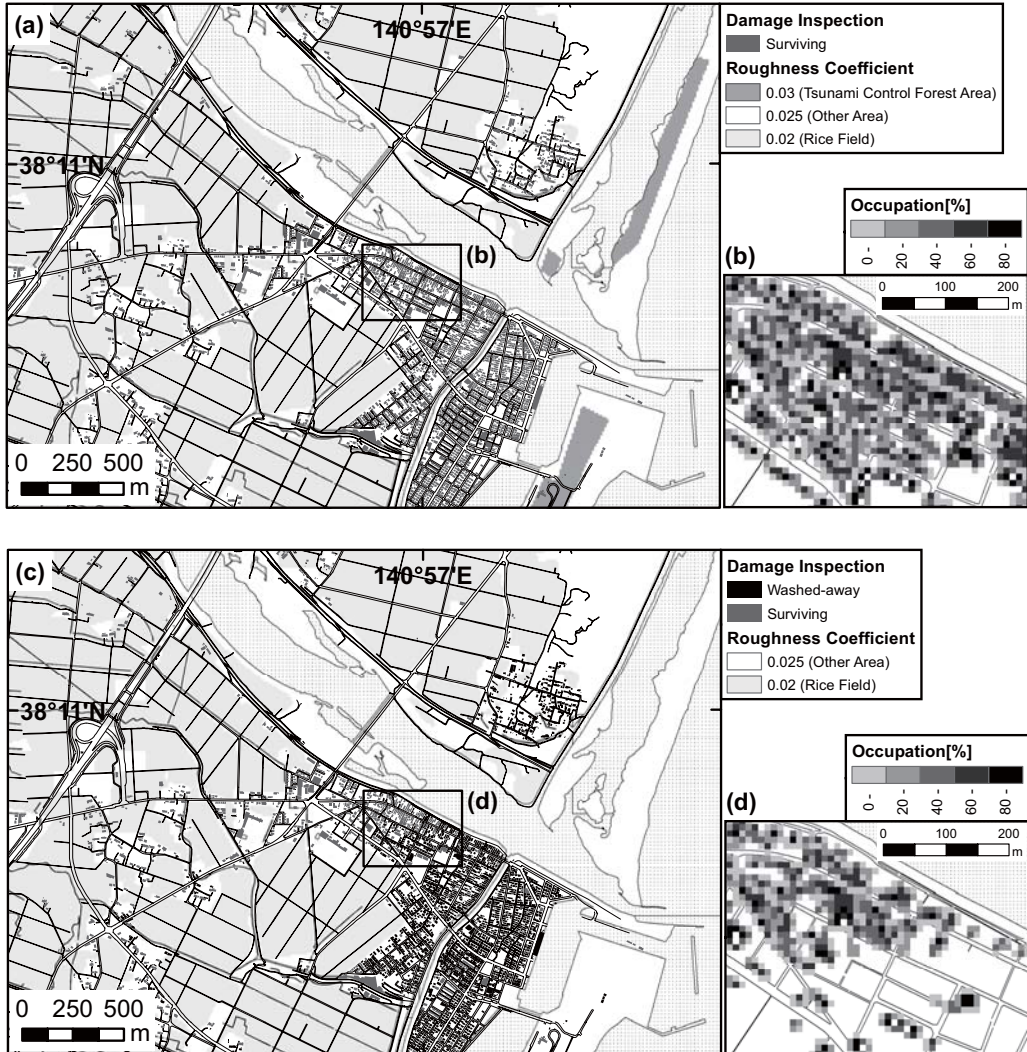


図2 Case A (被災前条件)における (a) 底面粗度係数分布と建物被害分布 (Surviving: 残存), (b) 10 m メッシュ家屋占有率分布. Case B (被災後条件)における (c) 底面粗度係数分布と建物被害分布 (Washed-away: 流失, Surviving: 残存), (d) 10 m メッシュ家屋占有率分布

(2) Case B: 被災後条件(残存建物のみ考慮)

「被災後条件」として、津波の来襲によって全ての防潮林と一部の建物が流失した状況を定義する。Case A と同様に、被災後の土地利用情報 (国土交通省国土政策局, 2009) および建物被害情報 (国土交通省都市局, 2011) を GIS 上で展開し、建物の「流失」あるいは「残存」を反映させた当時の状況を把握した (図 2 (c))。そして、10 m 格子あたりの家屋占有率 θ (図 2 (d))・底面粗度係

数 n_0 ・計算浸水深データ D から、合成等価粗度係数 n_{ob} および n_{im} を算出し、津波来襲後の陸域を再現した。

2.2 津波氾濫流速の再現性検証

複数の遡上シナリオに対して実施した計算結果のうち、津波遡上速度と流速の再現に望ましいと判断された結果について、実測値との比較図を図 3・図 4 に示す。

遡上速度に関しては、油屋・今村 (2002)

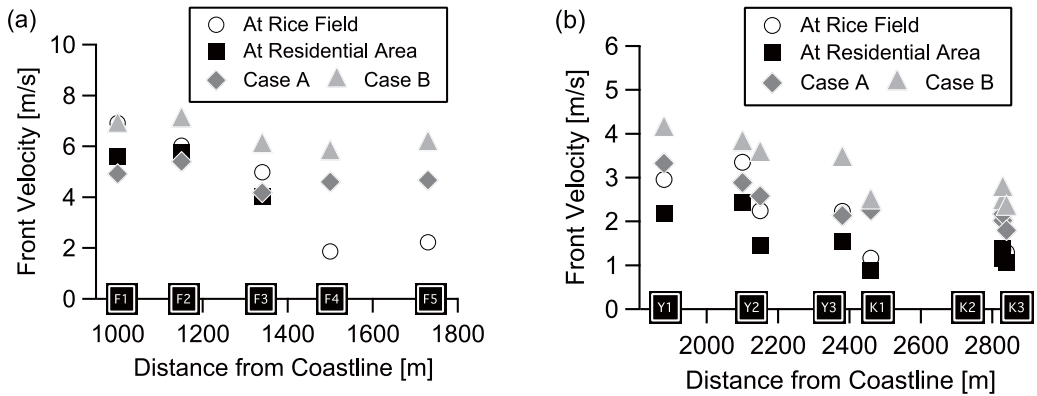


図3 油屋・今村 (2002) の抵抗則による遡上速度の計算値 (Case A, Case B) と実測値 (At Rice Field, At Residential Area) の比較。(a) 藤塚地区, (b) 関上・小塚原地区

の合成等価粗度モデルを用いたケースが、最も良好な整合性を示すことが明らかになった (図3)。また、Case A (被災前条件) の再現性が高く、構造物や土地利用状況による津波減衰効果を十分に表現できている。したがって、数値シミュレーションから津波遡上速度を「再現」する場合は、油屋・今村 (2002) の抵抗則かつ被災前条件下で計算を行うべきであることが分かった。

ただし、Case Aにおいても内陸部では2～3倍程度の過大評価となることが確認され、陸域遡上計算条件のみの変更では実現象を再現しきれないことが明らかになった。これは、津波の内陸浸入に伴う段階的な建物流失の効果、および津波先端部に巻き込まれる瓦礫漂

流物の影響を、従来の津波数値解析手法では考慮していないためである。

一方、氾濫流速の整合性は、今井ら (2013) の抵抗則の適用により向上することが確認された (図4)。また、全ての計算パターンで高い再現性を有しており、特に Case B (被災後条件) における計算結果が、最も実測値と整合していることが分かる。これは、現行の津波数値計算によって、家屋などが流失・破壊された後の流れ場を良好に再現できることを示している。したがって、津波数値計算から氾濫流速を「再現」する場合は、今井ら (2013) の合成等価粗度モデルおよび被災後条件を適用した方が良いと言える。

しかしながら、藤塚地区 (F1 領域) では、いずれの抵抗モデルにおいても流速再現性が低下した。この原因として、局所的かつ瞬間的に実測値と計算値を比較したことが挙げられる。現段階では、実測値の測定時間と同じタイミングで計算値を抽出しているが、実現象に比べ、シミュレーション上では緩やかに流速が上昇したため、過小評価の傾向を示した。

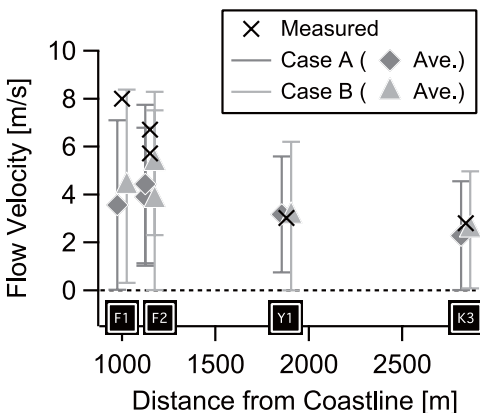


図4 今井ら (2013) の抵抗則による氾濫流速の計算値 (Case A, Case B) と実測値 (Measured) の比較

3. 時間発展型合成等価粗度モデルの構築

以上の検証から、津波流況の再現に望ましい陸域遡上計算条件が分かり、建物流失を考慮した抵抗則を設定する重要性が明らかになった。特に、被災前条件・被災後条件のみ

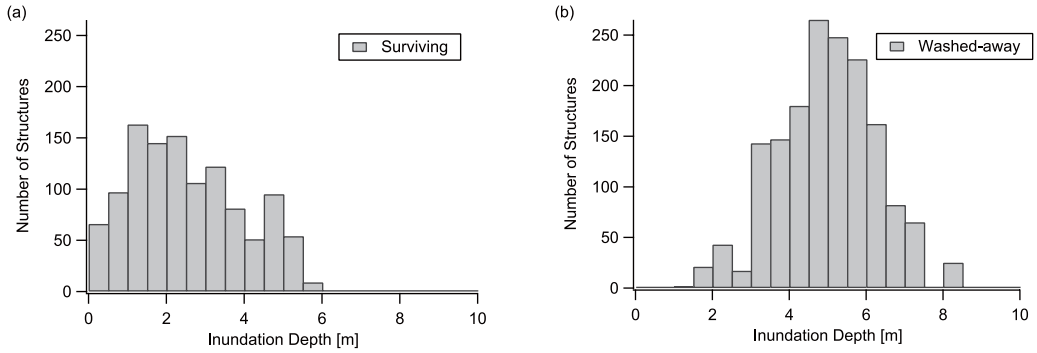


図5 対象領域内の木造構造物に対する (a) 残存棟数と最高浸水深との関係, (b) 流失棟数と最高浸水深との関係

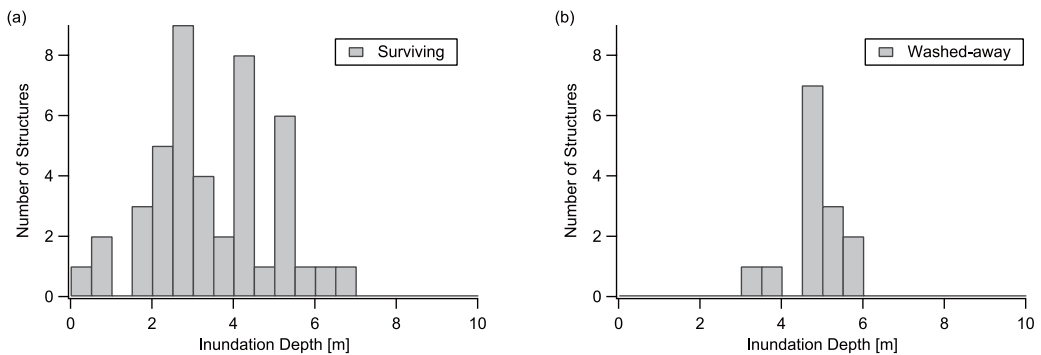


図6 対象領域内の鉄骨造構造物に対する (a) 残存棟数と最高浸水深との関係, (b) 流失棟数と最高浸水深との関係

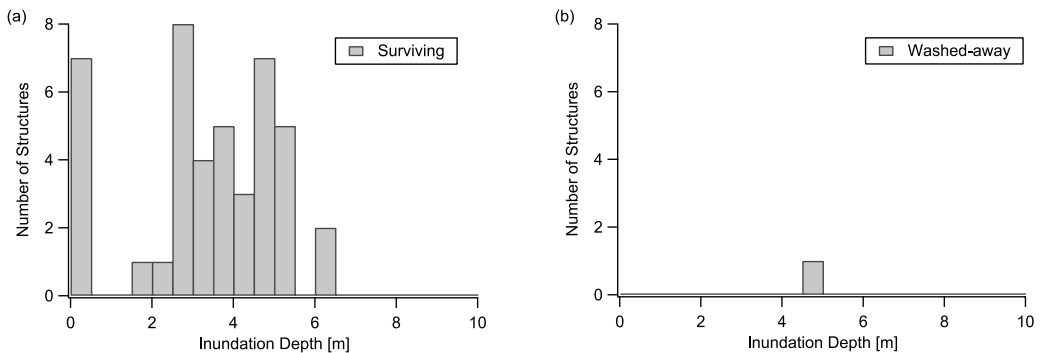


図7 対象領域内のRC造構造物に対する (a) 残存棟数と最高浸水深との関係, (b) 流失棟数と最高浸水深との関係

では、津波の氾濫に伴う建物破壊および抵抗力の変化を考慮できないため、現在の粗度係数決定手法では推定精度向上に限界があることが分かった。

そこで本研究では、高精度な数値解析手法の開発に向け、時間発展型合成等価粗度モデルの構築に取り組む。具体的には、津波の浸

水状況に応じて建物を流失させることで、より実現に近い抵抗則を逐次設定する手法を提案する。本稿では、はじめに、津波外力と建物被害程度の関連性について論じた既往研究、および今次津波が引き起こした実際の建物破壊状況を踏まえて、建物構造別に流失条件の検討を行う。そして、破壊条件にしたがっ

て建物を流失させる新しい抵抗則を数値解析に適用し、その妥当性および問題点について論じる。

3.1 建物の実被害程度と津波外力値の関連性

3.1.1 建物破壊基準に関する既往の知見

既往津波の現地調査結果や数値シミュレーションによる推定結果を通じ、多くの既往研究にて、津波の陸域氾濫に伴う家屋被害と津波外力との関連性が論じられてきた。代表的な津波外力として、浸水深や流速、津波流体力などが挙げられるが、羽鳥 (1984) や首藤 (1992) では、津波による家屋被害程度は主に流体力 (抗力) によって左右されると指摘している。

しかしながら、実際に発生した津波抗力は、現地調査から実測値を得ることが不可能である。したがって、実測値を取得しやすい浸水深と家屋破壊状況を関連づけることにより、被害程度が定性的に評価されるようになった。松富・首藤 (1994) では、過去の調査と知見に基づき、浸水深 $h = 2.0$ m を境界として木造家屋が流失しやすくなる傾向にあると報告している。さらに、この浸水深基準を拡張することで、木造家屋やコンクリート・ブロック造家屋、RC 造構造物に対する、流速・抗力の破壊基準も算定された (例えば、飯塚・松富, 2000; 松富, 2007)。

3.1.2 今次津波の最高浸水深と建物被害程度の関係

以上を踏まえ、国土交通省都市局 (2011) による最高浸水深データと詳細な建物調査データを対応づけることで、今次津波における建物被害程度と津波外力値の関連性を把握した。本研究では、藤塚地区・閑上地区・小塚原地区の全建物を対象として分析を実施し、時間発展型合成等価粗度モデルの家屋破壊基準決定における参考にした。その結果を図 5 (木造)、図 6 (鉄骨造)、図 7 (RC 造) に示す。

木造家屋の被害程度について整理した図 5 から、名取川河口周辺地域では、浸水深 $h =$

3.0 m を境として流失棟数が急激に上昇することが判明した。また、浸水深 $h \geq 6.0$ m においては、全ての木造家屋が流失したことが確認された。

一方、RC 造・鉄骨造建物に関しては、浸水深の値によって被害程度の特徴を明確に区別することが困難であった (図 6, 図 7)。これは、浸水深のみでは、RC 造および鉄骨造建物の破壊条件を論じられないことを示唆している。なお、岩手県・宮城県・福島県を対象として、今次津波の RC 造・鉄骨造建物の大破基準を検討した松富ら (2013) においても、本研究と同様の知見が得られている。

これらの検討から、木造家屋に関しては、浸水深 $h \geq 3.0$ m を流失基準として採用できる可能性が明らかになった。しかし、RC 造・鉄骨造構造物に対しては、浸水深のみでの破壊判定実施が困難であり、浸水縦断面積や前面壁面の開口率などの要因についても、被害程度との関連を検討する必要性が示された。

3.2 建物流失手法および構造別建物流失条件の決定

津波の氾濫に伴う建物被害の拡大を再現するためには、各計算ステップにおいて建物の流失判定を行い、被害状況を粗度係数として反映・更新する必要がある。具体的には、津波被害関数を導入することで流失させる建物棟数を決定した後、建物破壊条件に基づいて流失対象となる建物をピックアップする。

3.2.1 流失限界棟数 N の算定

本研究では、Adriano et al. (2014) による流失建物棟数の算定手法を採用し、各計算ステップにおいて流失させる建物の限界棟数 N を決定することとした。

まず、各計算ステップの浸水深分布と、浸水深に関連した仙台市の津波被害関数 (林ら, 2013) を照合することで、浸水深 1m ごとの浸水棟数 n 、およびその浸水深に対する建物流失率 P_D を把握する。そして、条件付き確率の考えに基づいて、同時に流失する可能性の高い棟数 N を算出し、これを流失させる

べき建物棟数の限界値とした。

3.2.2 防潮林および建物の流失条件

(1) 防潮林の流失条件

時間発展型合成等価粗度モデルでは、家屋と同様、津波の氾濫状況に応じて、藤塚地区・関上地区の海岸線に位置する防潮林を流失させる。防潮林の津波に対する効果と限界に関しては、首藤（1985）により、直径 10 cm 以下の樹木は浸水深 $h = 4.0$ m に到達すると倒伏・折損することが示唆されている。また、今次津波の海岸線被害の詳細な調査を踏まえ、浸水深 $h \leq 6.0$ m であれば津波流勢が緩和する一方、浸水深 $h = 10.0$ m を超えた場合は津波減災に対して無効果であることが報告されている（今井, 2013）。

本研究では、首藤（1985）の知見に基づいて、浸水深 $h \geq 4.0$ m となった際に防潮林を流失させることとした（表 2）。

(2) 木造建物の流失条件

前述した通り、既往津波の現地調査結果から、木造建物の被害程度および破壊基準は、主に浸水深や氾濫流速と関連づけて論じることが可能である。飯塚・松富（2000）は過去の事例に基づいて、津波氾濫流と建物被害程度を関連づけた被害判断基準を提案した。この基準では、浸水深 $h = 2.0$ m、流速 $u = 4.9$ m/s、抗力 $F = 27.4$ kN/m を境に木造家屋が大破するとされる。

また、浸水深と木造建物被害の関連性は、今次津波においても同様の傾向が報告されている。3.1.2 の検証から、名取川河口付近の対象領域では、浸水深 $h \geq 3.0$ m にて流失棟数が急激に上昇することが確認された。よって本稿では、浸水深 $h = 3.0$ m を閾値として流失対象建物を選定し、抗力の降順に流失させることとした（表 2）。

(3) 鉄骨造建物の流失条件

鉄骨造構造物に関しては、3.1.2 および松富ら（2013）の検討から、浸水深や氾濫流速、抗力のみで被害程度を論じることが困難であると示唆されている。しかし、松富ら（2013）の論文では、浸水縦断面積を用いることに

表 2 本研究にて用いた建物流失基準 (F [kN/m]: 抗力, A_c [m²]: 浸水縦断面積, h [m]: 浸水深)

防潮林	$h \geq 4.0$
木造建物	$h \geq 3.0$
鉄骨造建物	$A_c \leq 6.8 \times h$
RC 造建物	$F \geq 332.0$

よって、建物の残存と移動・転倒が良好に分類されることが確認された。そして、浸水縦断面積と浸水深の関連性から、次式の被害限界式が導かれた。

$$A_c = 6.8 \times h \quad (3)$$

ここで、 A_c : 津波氾濫方向の浸水縦断面積、 h : 浸水深である。この式から、鉄骨造建物が移動・転倒しないためには、6.8 m 以上の奥行きが必要であることが明らかになった。

以上を踏まえて、本研究では、浸水縦断面積 A_c に関連づけられた被害限界式 (3) を流失基準と定め、抗力の降順に流失させることとした（表 2）。

(4) RC 造建物の流失条件

RC 造建物に対する被害程度と津波外力値の関連性の把握は、木造建物と同様、過去の津波被害調査に基づいて実施されている。飯塚・松富（2000）の被害判断基準によると、RC 造構造物は浸水深 $h \geq 7.0$ m、流速 $u \geq 9.1$ m/s、抗力 $F \geq 332.0$ kN/m において大破する。

しかし、3.1.2 の検証から、名取川河口付近の対象領域では、浸水深による破壊基準の設定が困難であることが確認されている。よって本稿では、抗力 $F = 332.0$ kN/m を閾値として流失対象建物を選定し、抗力の降順に流失させることとした（表 2）。

3.3 本モデルによる津波流況再現性の検証

上記の建物破壊基準を用いて時間発展型合成等価粗度モデルを構築し、津波数値計算を実施した。表 2 に基づく解析結果として、氾濫流速の再現性とその時系列変化 (F1 領域) を図 8、建物の推定流失被害分布を図 9、建

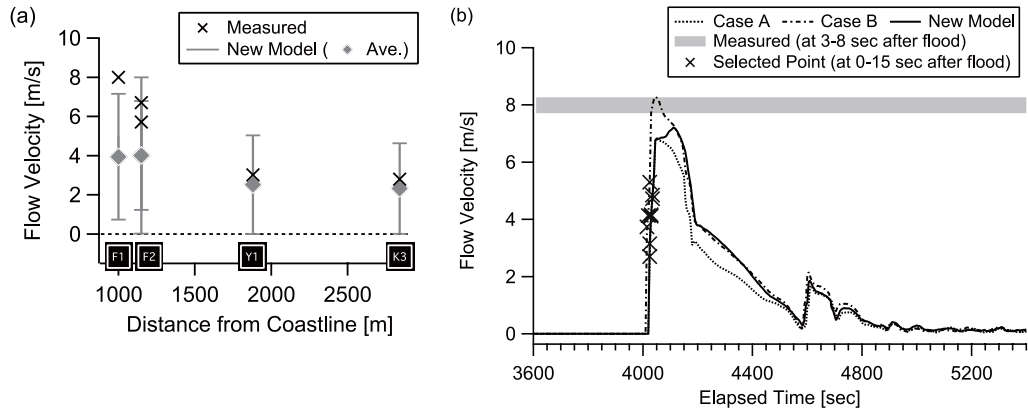


図 8 時間発展型合成等価粗度モデルを用いた解析結果. (a) 流速計算値 (New Model) と実測値 (Measured) の比較, (b) F1 領域 (藤塚地区) における流速時系列変化 (Selected Point : 実測値と同じ測定タイミングにおいて抽出した計算値)

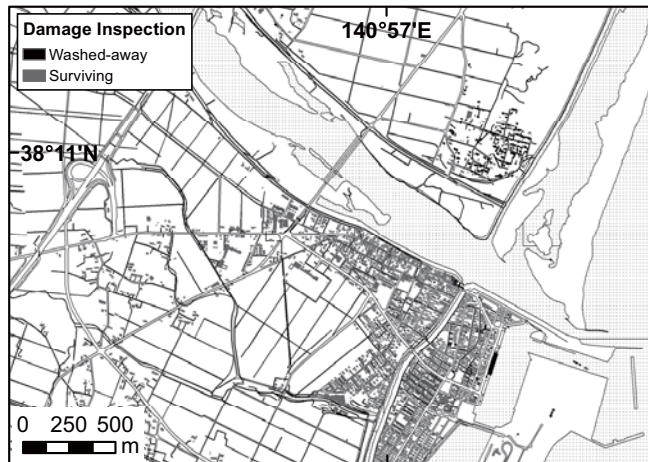


図 9 時間発展型合成等価粗度モデルにより推定された建物流失被害分布 (Washed-away : 流失, Surviving : 残存)

物流失率の推定値と実測値の比較を表 3, 数値計算による最大抗力分布を図 10 に示す。

図 8 (a) より, 流速再現性は概ね良好であるが, 藤塚地区における推定精度には依然問題があることが分かった。また, F1 領域内の流速時系列変化を示した図 8 (b) より, 時間発展型合成等価粗度モデルによる計算結果は, 被災前条件 (Case A) と被災後条件 (Case B) の中間に位置することが確認されたものの, 本解析ではシミュレーション上の流速最高値が実測値に到達していないことが明らかになった。

この原因について考察を行うため, はじめに, 建物流失状況について推定結果と実被害

表 3 推定建物流失率と現地調査結果に基づく建物流失率の比較

	名取川左岸 (藤塚地区)	名取川右岸 (閑上・小塚原地区)
推定結果	27.9 %	2.9 %
実被害結果	59.9 %	63.6 %

状況を比較した (図 2 (c), 図 9, 表 3)。その結果, 藤塚地区を含む名取川左岸では, 流失と判定された建物棟数が実被害の半数程度に達することが分かった一方, 閑上・小塚原地区を含む右岸では, 実現象に反してほとんどの建物が残存すると推定された。

次に, シミュレーション上における最大抗力分布を確認したところ, 名取川右岸と左岸

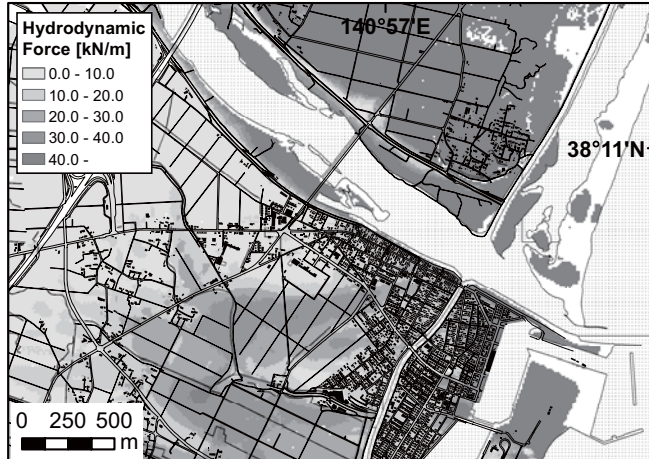


図 10 時間発展型合成等価粗度モデルにより推定された最大抗力分布

では大幅な乖離が生じていることが確認された（図 10）。この原因として、藤塚地区では、地震発生により名取川左岸の河口に位置する井戸浦潟が沈降・海域化し、津波のエネルギーが減衰せずに陸域を遡上したことが挙げられる。したがって、右岸に比べて最大抗力分布が大幅に増加する結果となった。

以上の検証より、図 8 にて確認された氾濫流速の過小評価は、建物破壊状況の再現が不十分であるために生じたものと考えられる。そして、建物被害推定が不十分である理由としては、名取川右岸・左岸における津波氾濫流速の地域特性を考慮しないまま、対象領域内の全構造物に対して表 2 の破壊基準を一律適用し、抗力の降順に流失させたことが挙げられる。図 10 に示す通り、藤塚地区では閑上・小塚原地区に比べてより大きな津波抗力を有する傾向にあるため、藤塚地区から優先的に家屋が流失し、最終的に図 9 の結果を得たものと考えられる。

これらの結果および考察から、本研究で構築した時間発展型合成等価粗度モデルでは、流失対象となる構造物のサンプリング、および建物破壊基準の設定に問題があることが確認された。特に、名取川の右岸と左岸では津波の氾濫流速特性が大きく異なることから、解析対象領域の全建物に対して一律の家屋流失基準を適用すべきではないという見解が得

られた。したがって、今後は、各地区において浸水深や抗力などの津波流況特性を把握し、それに応じた適切な建物流失基準を決定することで、建物被害推定精度および流速再現性の向上を図る。

4. 結論

本研究では、津波流況の高精度予測を可能にする津波数値解析手法の開発を目的として、氾濫流速の再現性検証を通じて適切な陸域遡上計算条件を決定し、建物破壊を考慮した新たな抵抗則付与手法を検討した。

まず、複数の陸域遡上計算条件下における数値解析結果と実測データを比較することで、津波遡上速度および流速の再現に望ましい計算ケースを選定した。その結果、遡上速度に関しては、油屋・今村（2002）の抵抗則かつ被災前条件下における再現性が最も高い一方、流速に関しては、今井ら（2013）の抵抗則かつ被災後条件下における整合性が極めて高くなった。同時に、建物の存在・破壊状況を考慮した抵抗則の設定が重要であることが明らかになった。

これを受けて、津波の浸水に伴う段階的な建物流失状況を粗度係数として逐次付与する、時間発展型合成等価粗度モデルを構築した。その結果、新しいモデルにおいて一定の

妥当性は確認されたものの、一部領域では流速が過小評価されており、氾濫流況の地域特性に応じた破壊基準を設ける必要性が明らかになった。今後は、流失判定基準に関して詳細な検討および設定を行うことで、より実現象に近い建物被害状況の再現、および氾濫流速の整合性向上を試みる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（課題番号：26・7122）の補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 油屋貴子, 今村文彦: 合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.276-280, 2002.
- 飯塚秀則, 松富英夫: 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.381-385, 2000.
- 今井健太郎: 海岸林の被害と減災効果, 東日本大震災を分析する 1—地震・津波のメカニズムと被害の実態, pp.165-177, 明石書店, 2013.
- 今井健太郎, 今村文彦, 岩間俊二: 市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_311-I_315, 2013.
- 国土交通省国土政策局: 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ 土地利用細分メッシュ 第 2.3 版 (平成 21 年度版), <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>, 2009, 2014 年 1 月 10 日閲覧.
- 国土交通省都市局: 東日本大震災からの津波被災市街地復興手法検討調査のとりまとめについて, <http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi-hukkou-arkaibu.html>, 2011, 2013 年 5 月 18 日閲覧.
- 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.356-360, 1998.
- 首藤伸夫: 防潮林の津波に対する効果と限界, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.465-469, 1985.
- 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.
- 羽鳥徳太郎: 津波による家屋の破壊率, 地震研究所彙報, vol.59, pp.433-439, 1984.
- 林 里美, 越村俊一: 映像解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の流速測定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_366-I_370, 2012.
- 林 里美, 成田裕也, 越村俊一: 東日本大震災における建物被害データと数値解析の統合による津波被害関数, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_386-I_390, 2013.
- 松富英夫: 津波氾濫流と関連課題, 日本地震工学会誌, No.6, pp.19-25, 2007.
- 松富英夫, 決得元基, 齋藤雅大: 開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_326-I_330, 2013.
- 松富英夫, 首藤伸夫: 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.246-250, 1994.
- Adriano, B., E. Mas, and S. Koshimura: An integrated GIS-based model to evaluate the tsunami vulnerability of building using fragility function and tsunami simulation, 平成 25 年度土木学会東北支部研究発表会講演概要集 (CD-ROM), II-74, 2014.
- Hayashi, S., and S. Koshimura: The 2011 Tohoku tsunami flow velocity estimation by the aerial video analysis and numerical modeling, Journal of Disaster Research, Vol.8, No.4, pp.561-572, 2013.
- Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa, and F. Imamura: Developing fragility curves for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda

- Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, Vol.51, No.3, pp.243-273, 2009.
- Satake, K., Y. Fujii, T. Harada, and Y. Namegaya: Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data, Bulletin of the seismological society of America, Vol.103, No.2B, pp.1473-1492, 2013.