複数の移動形態を考慮した災害がれきの発生・移動予測モデルの開発

小園 裕司¹・高橋 智幸²・桜庭 雅明³・野島 和也⁴

¹ 正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail: kozono-yj@n-koei.jp

² 正会員 関西大学教授社会安全学部 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7番1号)

E-mail: tomot@kansai-u.ac.jp

³ 正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail: sakuraba-ms@n-koei.jp

⁴ 正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail: nojima-kz@n-koei.jp

2011年東北津波では、車両や船舶などの漂流、建物倒壊に伴うがれきが大量に発生した。災害がれきの発生量および集積箇所を適切に予測することは、災害後の救助・復旧対策に役立つ。災害がれきは、漂流、滑動、転動、跳動など複数の移動形態が考えられ、これらの移動形態を包括的に考慮する必要がある。本研究は、災害がれきの複数の移動形態を踏まえた災害がれきの発生・移動予測モデルを構築し、既往実験との比較および数値実験を行い、モデルの基本性能の確認を行った。また、同モデルを東北津波で甚大な被害が生じた気仙沼市に適用した。その結果、正確ながれきや浸水予測には建物の形状・倒壊、がれきの抵抗を考慮する必要があることを明らかにした。

Key Words : tsunami simulation, disaster debris, the 2011 Tohoku tsunami, Kesennuma city

1. はじめに

2011年東北津波では、浸水被害に加え、車両、船舶の漂流、建物の倒壊や、それに伴う大量の災害がれきが発生した。陸上に集積した災害がれきは、発災直後の人命救助や、都市の復旧・復興の妨げとなり、津波の引き波によって海洋流出した災害がれきは、広域にわたって海洋環境に様々な影響を及ぼした。今後の津波対策においては、浸水域・浸水深のみならず、災害がれきの発生量・集積箇所等を想定し、事前事後における十分な津波防災・減災対策を講じておくことが重要である。

津波により生じるがれきの移動は、木材、車両や船舶等の漂流移動するものや、コンクリートくずや金属くずのように底面移動（滑動、転動、跳動）するものなど、がれきの特性や流況に応じて移動形態が異なる。一方、がれきの移動予測に関する研究事例として、木材の漂流予測を対象とした後藤や広域を対象とし多種多様な漂流物の予測を行う野島らなど活発な研究¹⁾²⁾³⁾がなされている。また、底面移動に関する研究事例として、野路ら⁴⁾や大窪ら⁵⁾などが津波石を対象とした移動予測を検討している。ただし、これらの研究事例は、「漂流移動」あるいは「底面移動」のいずれかを対象としているのが現

状である。多種多様の災害がれきを予測するにあたっては、漂流移動のみ、あるいは底面移動のみ、のような限定的なモデル化ではなく、漂流移動、底面移動（滑動、転動、跳動）等の移動形態が混在した実現象に近いモデル化を行う必要があると考えられる。

本研究は、以上の背景を踏まえ、災害がれきの複数の移動形態を考慮した、がれき発生・移動予測モデルを構築し、既往実験との比較および数値実験に基づき、モデルの基本性能の確認を行った。また、同モデルを東北津波で甚大な被害が生じた気仙沼市に適用し、モデルの再現性について検証を行った。

2. 災害がれきの発生・移動予測モデルの概要

本研究では、小園ら⁶⁾の津波波力に基づく建物倒壊を考慮した津波浸水予測モデルを拡張して、がれきの発生・移動予測モデルを構築した。津波波力に基づく建物倒壊を考慮したモデルは、流体の計算にはStaggered格子を用いたLeap-frog法に基づく2次元浅水流であり、個々の建物の形状・高さをモデルの地形として取り扱い、波力に応じて建物倒壊を考慮したモデルとなっている。また、個々に建物の倒壊状況を評価し、建物倒壊に伴うが

図-1 面積・体積・密度の取り扱い

図-2 実験概要

れきの発生が予測可能なモデルとなっている。

一方、がれきの挙動をモデル化するにあたっては、大窪ら⁹⁾の津波石移動モデルを採用した。式(1)にがれき移動予測モデルの運動方程式を示す。

$$\rho_t V \frac{du_t}{dt} = \rho V \frac{du}{dt} + \rho(C_M - 1)V \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_t}{dt} \right) + \frac{1}{2} \rho C_D A (u_t - u) |u_t - u| - f_b - f_g \quad (1)$$

ここで、 u_t 、 u および ρ_t 、 ρ はがれきおよび水の流速、密度、 V はがれきの体積、 A はがれきの面積、 C_M 、 C_D はがれきの付加質量係数および抗力係数を示す。また、 f_b 、 f_g はがれきを受ける底面摩擦と重力成分であり以下の式(2)、(3)となる。

$$f_b = \mu(\rho_t - \rho)Vg \cos \theta \frac{u_t}{|u_t|} \quad (2)$$

$$f_g = (\rho_t - \rho)Vg \sin \theta \quad (3)$$

ここで、 μ は摩擦係数、 g は重力加速度、 θ は地形勾配を示す。

式(2)における摩擦係数は、流況に応じて変化する滑動、転動、跳動等の移動形態を表現するために、流速の関数となる次式(4)、(5)で示される。

$$\mu = \mu_0 \frac{2.2}{\beta^2 + 2.2} \quad (4)$$

$$\beta^2 = \frac{u_t^2}{(1 - \rho/\rho_t)gH} \quad (5)$$

ここで、 μ_0 は滑動時の動摩擦係数、 H はがれきの高さ(代表スケール)を示す。がれきの移動速度が大きくなると、滑動より転動、さらに大きくなると転動より跳動といった移動形態をとりやすくなると考えられる。このことから同式は、がれきの移動速度に比例して、がれきと底面の接地時間が小さくなり、がれきが底面から受ける抵抗も小さくなるという考えに基づいている。

面積・体積・密度は、従来の方法では、完全水没状態の仮定に基づき一定値としているが、本研究では災害がれきの複数の移動形態(漂流、滑動、転動、跳動)を連続的・包括的に扱うため、計算上におけるがれきの面積・体積は、図-1に示す通り浸水深に応じた面積と体積とし、これに伴い見かけの密度を導入した。

$$\rho_t = \rho_{org}(H/h) \quad (6)$$

ここで、 ρ_{org} は元のがれきの密度、 h はがれきに作用する浸水深を示す。水よりも密度が大きいがれきについては、 $h/H \leq 1.0$ とし、増減水中、完全水没中の底面移動を取り扱う。一方、水よりも密度が小さく、浸水深が喫水深未満の場合は、がれき密度が水よりも大きい場合と同様に底面移動形態として取り扱い、浸水深が喫水深以上となったがれきは、がれきの密度を水の密度と等しくし、喫水部分の面積、体積を計算上で取り扱う。このような取り扱いをすることで、式(2)、(3)の底面摩擦と重力成分がゼロとなり、底面移動形態(喫水深未満の浸水深の場合)から漂流移動形態(喫水深以上の浸水深の場合)を連続的に取り扱うことを可能としている。また、同モデルでは、建物倒壊に伴うがれきの発生と、がれきの影響を流れの抵抗としての相互干渉を考慮して、式(1)中の質量力および抗力を流体の運動方程式に付加している。

3. モデルの基本性能の確認

(1) 検討内容

本研究で構築したモデルの基本性能を確認するため、大窪ら⁹⁾が実施した津波石の底面移動を対象とした既往実験と比較を行った。なお、本モデルはがれきの諸元(面積、体積、密度)の取り扱いが従来の手法と異なるため、従来モデルと同様の性能を有していることを確認する位置づけで実施したものである。また、底面移動のみではなく、漂流移動と底面移動の相互の移動形態を考慮可能であることを確認するために数値実験を実施した。

(2) 既往実験との比較および数値実験

図-2に既往実験の概要を示す。実験はタンクの水(初期水深は15, 20, 25, 30cmの複数条件)をゲート急開によって段波を発生させ、スロープ手前に設置したブロックの押し波・引き波による最大移動位置、最終移動位置を整理している。ブロックのサイズは3.2cm、密度は

図-3 実験結果の比較

(上段：最大移動位置，下段：最終移動位置)

1.55g/cm³である。実験は5回実施しており、それぞれの位置の平均とばらつきを整理している。計算条件は、実験水路、勾配、初期水深など実験条件に基づき設定し、計算格子間隔は2cmとした。また、計算ケースは、従来の面積、体積、密度を一定としたものと、面積、体積、密度を変動にしたもの（本モデル）を実施した。

図-3に本解析より得られた、初期水深毎の最大移動位置、最終移動位置について比較を行ったものを示す。本結果より、押し波によって生じる最大移動位置については、良好に再現できていることを確認した。引き波による最終移動位置については、初期水深が大きくなるケースほど、実験と比べて汀線側に近い位置で停止し過大評価となるものの、概ねばらつきの範囲内で再現出来ている。また、従来モデルと変動モデルに大きな違いが生じないことを確認した。このことから、本モデルは、ブロックの諸元を変動として扱っても、底面移動に関して適切に評価可能であることが確認された。なお、最終移動位置の過大評価については、数値計算における引き波時（特に微小水深時）に流速を過大評価していることが考えられる。また、初期水深が大きくなるケースほど、引き波の作用時間が長いため、その影響が顕著に現れているも

図-4 数値実験の結果

のと考えられる。

次に、本モデルが密度の違いにより生じる漂流移動、底面移動を取り扱うことが可能であることを確認するため、大窪ら⁹⁾の実験をベースにブロックの密度を様々な値に変化させた場合の数値実験を行った。数値解析の基本的な条件は既往実験との比較で示したものと同様である。数値実験で用いたブロックの密度は、木材から金属までを想定し、0.3～4.2g/cm³の間から0.2刻みで設定した。

図-4は初期水深毎の各ブロックの密度と最大移動距離の関係を示したものである。ブロックの密度1.0g/cm³を境に移動形態が異なる漂流移動と滑動、転動、跳動の移動量は滑らかに接続しており、密度の大きさに比例して移動量が変化することが確認された。以上の既往実験および数値実験の2つの検討から、本モデルが、移動に関する基本的な性能を有しつつ、複数の移動形態を包括的かつ連続的に取り扱えることを確認した。

4. 気仙沼市街地への適用

(1) 検討条件

本研究では、車両、船舶および建物倒壊に伴うがれきを再現計算の対象とした。実績被害となる車両、船舶の漂着位置については、発災後の航空写真（平成23年4月撮影）の判読によって整理した。また、建物倒壊によって発生したがれきは、震災前後（平成21年、平成23年4月実施）の航空測量の差分を取得し、それらの結果を参考に街区毎に、街区面積に対する災害がれきの占有率に応じてレベル別に整理を行った。図-5に震災後の車両、船舶および市街地に集積したがれき状況を示す。船舶は、鹿折南地区や川沿いに集積しており、車両は浸水域の先端に集積する傾向が得られた。また建物ががれきについては、建物背後（図中黄色枠：集積レベル3周辺）に集積する傾向が得られた。また、がれきの集積区分毎の集積状況の一例を図-6（レベル0で集積なし、レベル1で10～

図-5 災害がれきの実績の集積状況
(左：車両・船舶，中央：航空測量の差分より得られた標高差，右：がれきの集積状況)

図-6 レベル別におけるがれき集積状況

図-7 計算における災害がれきの初期位置

30%程度の軽微な集積，レベル2で50%前後の集積，レベル3で大部分集積）に示す。

次に，再現計算を行うにあたり，車両，船舶および建物の諸元・初期位置等の条件について整理した。初期位置は航空写真（平成21年撮影）の判読や国土地理院の基盤地図情報で公開されているGISデータ⁷⁾より整理した。図-7に再現計算に用いた災害がれきの初期位置を示す。なお，写真判読に用いた航空写真や測量データは国土地理院より収集した。車両，船舶の諸元は，各メーカーのWebサイトより整理し，建物の倒壊に伴って発生するがれきについては，代表長さとして0.5mとし，密度につい

ては，混合ゴミと仮定し，災害がれきの水害時および仮置き時の嵩比重⁸⁾の平均 0.75t/m^3 とした。浸水計算における地形・外力等の条件は，小園ら⁹⁾が検討した計算条件と同様であり，対象津波は2011年東北津波とし，地形条件は津波来襲時とした。建物の取り扱いは，建物の有無による災害がれきの集積状況の差を確認するため，従来同様に粗度係数で表現した場合（Case-1）と，建物を地形で表現し，波力に応じて倒壊を考慮した場合（Case-2：本モデル）の2ケースを検討した。また，建物がれきの発生のタイミングは，Case-1では津波来襲前の初期段階から，Case-2では建物が倒壊したと判定された場合とした。

(2) 再現計算結果

図-8に本解析結果より得られたがれきの移動予測結果を示す。再現計算結果の建物がれきの図中には，10分の1に間引いた建物がれきの軌跡（白色線）も示す。本結果から，船舶については，鹿折南地区や，川沿い（図中の黄色枠）に集積しており，実績の傾向を再現している。一方，車両については，市街地全体に集積しており，浸水域の先端に集積する実績とは異なる傾向を示した。これは，航空写真の写真判読で設定した初期位置が，船舶においては大きく異なることに対して，車両については，避難行動に用いられたため計算等の初期条件と大きく異なることが考えられる。車両，船舶については，初期分布に依存していることから，今後可能な限り，津波来襲時の分布等を収集・整理して再現性を向上していく予定である。建物がれきについては，Case-1，Case-2のいずれの結果も市街地全体で集積しているが，建物の形状・倒壊を考慮した結果（Case-2）は，建物の背面（図中の黄色枠：図-5中の黄色枠と同様）で集積しやすく，実績の傾向を再現している。建物の形状を考慮することにより，より実現に近い水位・流速分布が再現でき，建物背後地における集積状況の向上が図れたと考えられる。最後に，図-9に痕跡水位と計算水位との比較を示す。痕跡の比較位置については小園ら⁹⁾と同様である。

図-8 災害がれきの再現結果

(左から、車両・船舶の計算結果、建物がれきの計算結果 (Case-1)、建物がれきの計算結果 (Case-2))

図-9 痕跡水位の比較

表-1 建物倒壊後のがれきのスケール・密度条件

Case No.	がれきスケール $H(m)$	がれき密度 $\rho_t (t/m^3)$
H-1	0.10	0.75
H-2	0.30	
H-3	0.50	
H-4	0.70	
H-5	0.90	
R-1	0.50	0.50
R-2		0.75
R-3		1.00
R-4		1.25
R-5		1.50

図中には痕跡値と計算値の空間的な適合度を示す指標として相田ら⁹⁾による幾何平均 K および幾何標準偏差 κ と、一般的な目安も合わせて示す。いずれの結果も高い再現性を示したが、Case-2のみ、 K および κ の目安を満足しておりCase-1、Case-2間で有意な差が得られた。以上のことから、建物の倒壊およびがれきの抵抗を考慮することで、より正確な浸水予測が可能であることを確認した。

(3) がれきのスケール・密度に関する感度分析

実際の現象においては、がれきのスケールや、密度にはばらつきがあり、一定値ではないと考えられる。そこ

で本研究では、がれきと密度に関して、感度分析を行い、その傾向について把握を行った。表-1に感度分析のケース一覧を示す。Case-H-1～5はがれきの密度を一定とし、スケールを変化させた場合、Case-R-1～5はがれきのスケールを一定とし、がれきの密度を変化させた場合である。

図-10に地震発生53分後(市街地に津波遡上中)の全ケースの感度分析の結果を示す。これらの結果からがれきのスケールが小さくなるほど、また、がれきの密度が小さくなるほど移動が大きくなる傾向が確認され、先端に集積しやすいことが確認された。スケールや密度といった諸元の違いにより大きく結果が異なってくることから、がれき諸元のばらつきを考慮した解析を実施することが望ましいことを示した。

5. おわりに

本検討では、複数の移動形態を考慮したがれき発生・移動予測モデルを構築し、既往実験との比較および数値実験を実施し、移動に関するモデルの基本性能について確認を行った。さらに同モデルを気仙沼市へ適用した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・既往実験と比較した結果、本研究で構築したモデルが、実験結果と良好に一致した。また、従来のモデルと同等の再現性を有していることを確認した。さらに、数値実験の結果より、災害がれきの特性である複数の移動形態を包括的かつ連続的に取り扱えることを確認した。
- ・気仙沼市で再現計算を実施した結果、定性的ではあるものの、実績被害のがれき状況を概ね再現し、がれきの移動再現には建物の形状・倒壊を考慮する必要があることを明らかにした。
- ・気仙沼市を対象に、災害がれきのスケールおよび密度に関する感度分析を行った結果、がれきの諸元のばらつきを考慮する必要があることを示した。

図-10 スケール、密度の異なる建物がれきの移動状況（地震発生から53分後）

今後は、がれき同士の衝突や、がれきのスケールや密度に関してばらつきを考慮した検討を行いモデルの再現性の向上を図る予定である。

謝辞：本研究を実施するに当たり、国土地理院から航空写真等のデータ提供を受けた。また、本研究の一部は公益財団法人計算科学振興財団研究教育拠点 (COE) 形成推進事業の補助を受けて行われた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 後藤智明：津波による木材の流出に関する計算，海岸工学講演会論文集，vol.30, pp.594-597, 1983.
- 2) 野島和也，櫻庭雅明，小園裕司：水没を考慮した実務的な津波漂流物による被害リスク算定，土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.1_261-I_265, 2014.
- 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) 野路正浩，今村文彦，首藤伸夫：津波石移動計算手法の開発，海岸工学論文集，vol. 40, pp.176-180, 1993.
- 5) 大窪慈生，菅原正宏，今村文彦：移動特性を考慮した津波石の水理実験と数値解析手法の改良，海岸工学研究報告，vol.21, pp.41-47, 2004.
- 6) 小園裕司，高橋智幸，桜庭雅明，野島和也：津波波力に基づく建物倒壊を考慮した津波解析の検討，土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp.1_163-I_168, 2015.
- 7) 国土交通省国土地理院：基盤地図情報，<http://fgd.gsi.go.jp/download/>，参照 2016-03-01.
- 8) 国立環境研究所：災害廃棄物の発生原単位について，http://www.nies.go.jp/shinsai/genntanni_no1_110628.pdf，参照 2016-03-01.
- 9) 相田勇：三陸沖の古い津波シミュレーション，地震研究彙集，Vol.52, pp.71-101, 1977.

(2016.3.16 受付)

DEVELOPMENT OF TSUNAMI NUMERICAL MODEL CONSIDERING GENERATION AND VARIOUS TRANSPORT FORM OF THE DISASTER DEBRIS

Yuji KOZONO, Tomoyuki TAKAHASHI, Masaaki SAKURABA and Kazuya NOJIMA

A lot of debris by tsunami, such as cars, ships and collapsed buildings were generated in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. It is useful for rescue and recovery after tsunami disaster to predict the amount and final position of disaster debris. The transport form of disaster debris varied such as drifting, rolling and sliding. These transport form needs to be considered comprehensively in tsunami simulation. In this study, the proposed numerical model considering disaster debris was compared with experiment for verification. And, the numerical model was applied for Kesennuma city where serious damage occurred by the 2011 Tohoku tsunami. As a result, the proposed model showed that it is necessary to take the disaster debris into account in order to predict tsunami inundation accurately.