2011年東北地方太平洋沖地震津波来襲時の気仙沼湾を対象とした 津波移動床モデルの再現性向上

Accuracy improvement of movable bed model for tsunamis by applying for Kesennuma bay
when the 2011 Tohoku tsunami arrived.

森下 祐¹・高橋智幸²

Yu MORISHITA and Tomoyuki TAKAHASHI

As a model to estimate sediment transport and topography change by tsunamis, Takahashi et al. (1999) proposed a movable bed model theoretically and experimentally. In this paper, the model was applied to Kesennuma bay when the 2011 Tohoku Tsunami arrived. It was able to simulate erosion around the narrow area and deposition in the inner part of the bay, however, whole profile was not enough reproduced and deformation volume was underestimated. To improve an accuracy of the model, parameter study was carried out and three dominant factors were found. They are non-dimensional shear stress, coefficients of sediment transport equations, and saturated suspended sand concentration. A model improving the factors is proposed and the model was made remarkable progress for the sediment transport distribution from the entrance to the narrow area of Kesennuma bay.

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震による津波（以下、2011東北津波）は、基礎部の侵食に伴う構造物の倒壊や復旧活動の妨げ等、間接的に津波被害を助長し、土砂変動に起因する多くの諸問題を提起した。2011東北津波での経験は、多角的な視点での検討が求められる津波のリスク評価において、津波波高や浸水想定に加えて津波による土砂変動の評価も重要な因子であることを示唆し、津波移動床モデルの一層の高度化が求められている。

高橋ら（1999）は、従来より津波による土砂変動の評価の重要性を指摘し、津波特有の現象である大量の砂の巻上げと沈降との非平衡性を考慮できる津波移動床モデルを提案している。高橋ら（1999）モデルは、1960年チリ津波による気仙沼湾での地形変化に適用され、狭窄部周辺での再現性の向上を示す一方で、湾内全体の変動分布や土砂変動量の再現性に課題を残す結果となった。

こうしたなか、高橋ら（1999）モデルの特性として、玉田ら（2009）は、津波の土砂移動量が飽和浮遊砂濃度の影響を受けること、掃流砂量や巻上げ砂量が粒径依存性を有していることを報告しており、モデルの改良に繋がる知見を蓄積している。また、原口ら（2012）は、2011東北津波来襲時の気仙沼湾において、津波による地形変動状況を詳細に整理しており、津波移動床モデルの高度化に不可欠である実績データの整備も進んでいる。

そこで、本研究では、前述の実績データを活用し、津

波の性質や最新の知見を踏まえて、高橋ら（1999）モデルの高度化を図ることを目的とする。具体的には、①2011東北津波来襲時の気仙沼湾を対象に再現計算を実施し、モデルの課題を再整理した。その後、②高橋ら（1999）モデルの基本概念を踏襲した上で、土砂変動への影響が大きい因子を対象に改良を行った。

2. 高橋ら（1999）モデルの概要

高橋ら（1999）モデルでは、津波特有の現象である大量の砂の巻上げと沈降との非平衡性を考慮できるように、掃流砂層と浮遊砂層を独立して扱い、掃流層内で流砂運動が完結する掃流砂量と掃流砂層から浮遊砂層へ供給される巻上げ砂量を考慮している。ここで、掃流砂量や巻上げ砂量は、一般的に知られている次式を用いて表す。

$$\Phi = a(\tau_* - \tau_{*c})^n \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Φ は無次元掃流砂量あるいは無次元巻上げ砂量、 τ_* はシールズ数（無次元掃流力）、 τ_{*c} は限界シールズ数、 a および n は定数であり、掃流砂では、係数 a は21、乗数 n は1.5、巻上げ砂では、係数 a は0.012、乗数 n は2を採用している。

また、掃流砂量については、渡辺ら（1984）の底面勾配の影響を考慮した次式を用いて補正している。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 z_b は底面高さ、 q_x は流砂量、 ε_s は係数であり、2.0を用いることが一般的である（例えば、田中ら、1989）。

浮遊砂濃度については、巻上げ砂量と沈降砂量の差分および浮遊砂層内の移流成分から算定している。ここで、

1 正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社
2 正会員 博(工) 関西大学教授社会安全学部安全マネジメント学科

表-1 計算条件

項目	計算条件
基礎式	非線形長波理論
差分法	リーブ・フロッグ法
移動床モデル	高橋ら (1999)
計算メッシュ	格子間隔: 10m, 格子数451×401
地形データ	海域: 2011年東北津波発生2ヶ月前に計測 (原口ら, 2012) したデータから作成 陸域: 国土地理院の5m標高メッシュから作成
粗度係数	0.025
粒径	0.3mm
再現時間	2.5時間
初期潮位	T.P.+0.00m
外力条件	高川・富田 (2012) の波源モデルから二次元非線形長波理論により推定した湾口の津波波形 (最大津波高: 5.75m)

高橋ら (1999) モデルでは非平衡状態を前提としていることから、浮遊砂層に無限に巻上げ砂が供給される可能性があるため、飽和浮遊砂濃度を上限に浮遊砂層内の浮遊砂濃度を調整している。なお、本モデルの詳細は、高橋ら (1999) などの論文を参照にされたい。

3. 2011東北津波の再現性検証

(1) 解析対象領域と計算条件

解析対象領域とする気仙沼湾では、2011東北津波前後の詳細な深浅測量結果に基づく地形変動データを有しており、津波移動床モデルの検証には最適である。

計算条件は表-1に示すとおりであり、地形モデルは、津波来襲前の深浅測量結果および基盤地図情報を用いて、陸域を含む10mメッシュで構築した。また、粗度係数は、小谷ら (1998) が提案する水域の粗度係数0.025を全域に適用し、粒径は0.3 mmを採用した。なお、陸域では、コンクリートによる舗装が成されているため、初期標高以下には侵食されない条件とした。

また、対象外力である2011東北津波では湾内に侵入した実際の津波波形を計測できていないため、波源の時間発展を考慮した高川・富田 (2012) の提案モデルを用いて、二次元の非線形長波理論に基づく津波解析により推定した。この時、複数のGPS波浪計での津波波形が、高川・富田 (2012) の推定波形とほぼ一致することを確認しており、津波解析の妥当性を裏付けている。

(2) 浸水域および地形変化の検証

推定した津波波形を境界条件に、高橋ら (1999) モデ

図-1 2011東北津波の検証(上:津波高、下:浸水範囲)

ルによる地形変化の再現性を検証した。なお、検証に先立ち、固定床計算を実施し、相田 (1977) の手法を用いて浸水実績の再現性を評価した。この結果、図-1に示すとおり K および κ とも所定の適合性を満足しており、津波外力や高橋ら (1999) モデルの流況解析に大きな問題はないと判断した。

図-2に、2011東北津波による地形変化の実績および高橋ら (1999) モデルによる計算結果を示す。実績では、湾口から湾奥にかけて滞筋を形成しており、特に狭窄部では局所的な侵食が生じている。また、滞筋周辺には幅広い堆積域を形成しており、湾内全体では堆積量が多く、堆積卓越の土砂変動傾向を示している。これに対し、計算結果は、狭窄部での侵食や湾奥での堆積など定性的には再現できているものの、湾全体の変動分布は再現性にやや劣る。定量的な比較を表-2に示すが、計算による土砂変動量は、実績に比して過小に評価されている。また、堆積率(=堆積量÷侵食量)も計算結果では0.28と極めて小さく、実績とは逆の強い侵食卓越を示すなど、改善すべき課題が多い結果となった。

4. 津波移動床モデルの再現性向上方策

(1) 支配的因子の抽出

高橋ら (1999) モデルの高度化にあたっては、実務面への適用性に配慮し、現モデルに比して計算負荷が上がる可能性のある差分スキームや移動床モデルの改良は行わず、土砂移動に支配的な影響を及ぼす因子(以下、支配的因子)に着目して検討した。高橋ら (1999) モデルの支配的因子は、事前に土砂変動に影響を及ぼす可能性のある5つの因子(無次元掃流力、流砂量式係数、飽和浮遊砂濃度、沈降速度、底面勾配)を抽出し、感度分析により土砂変動への応答特性を確認した。それぞれの基本ケースとしては、無次元掃流力(case1)ではマニング則に基づき算定した値、流砂量式係数(case2)では高橋

図-2 2011東北津波による地形変化の実績および高橋ら(1999)モデルによる計算結果

ら(1999)が提案した実験値、飽和浮遊砂濃度(case3)では経験的に用いられることの多い0.01、沈降速度(case4)では粒径0.3mmからRubey(1933)の式を用いて算定した0.04m/s、底面勾配(case5)では渡辺ら(1984)の式に用いる係数2.0を採用した。また、感度分析では、それぞれ基本ケースの因子を3倍～5倍に変化させて実施し(例えば、無次元掃流力では、マニング則に基づき算定した値を3倍する)、底面勾配のみ基本ケースの前後に変化させた。感度分析の結果を表-3に示すが、底面勾配を除く4つの因子では、土砂移動の応答性が高く、改良により土砂移動の精度向上に繋がる可能性があるため、これら4因子を支配的因子として抽出した。

(2) 支配的因子の改良

a) 無次元掃流力

無次元掃流力は、これを規定する摩擦速度に着目した。ここで、高橋ら(1999)モデルにおける摩擦速度は、マニング則に基づく底面せん断力から算定しており、津波特有の性質である圧力勾配の影響を考慮していない。このため、瀬田ら(1995)が提案する圧力勾配の影響を考慮したLog-wake則を適用し、藤井ら(1998)の方法に従い摩擦速度を算定した。ここで、摩擦速度の算定に必要な相当粗度 k_s は、マニングの粗度係数から換算した46mmを用いている。なお、Log-wake則の詳細については、瀬田ら(1995)、藤井ら(1998)の文献を参照にされたい。

b) 流砂量式係数

高橋ら(1999)モデルの流砂量式係数に対し、高橋ら(2012)は、式(1)の係数 a が津波外力や底質条件に依存していると考え、津波に対する係数 a の粒径依存性を大型水理実験により確認している。この結果、係数 a は掃流砂・巻上げ砂ともに粒径依存性が確認され、3種類の粒径に応じた係数 a の関係が得られている。本研究では、これら3種類の関係性から、気仙沼湾の粒径0.3mmに対応する係数 a を対数近似により推定し、掃流砂量につ

表-2 高橋ら(1999)モデルによる土砂変動量の検証結果

	堆積量 (万m^3)	侵食量 (万m^3)	堆積率
実績	91.13	66.18	1.38
高橋ら(1999)モデルによる再現	32.48	82.38	0.28

表-3 支配的因子による土砂変動量の感度分析結果

因子の感度分析		堆積量 (万m^3)	侵食量 (万m^3)	堆積率
case1: 無次元掃流力 (基本ケースはマニング則)	底面せん断力 3倍	33.20	80.10	0.30
	底面せん断力 5倍	50.64	86.17	0.42
case2: 流砂量式係数 (基本ケースは掃流砂: 21、巻上げ砂:0.012)	掃流砂3倍	70.54	133.16	0.68
	巻上げ砂量 3倍	53.18	117.60	0.32
case3: 飽和浮遊砂濃度 (基本ケースは0.01)	0.030	117.88	235.23	0.36
	0.050	215.70	341.35	0.39
case4: 沈降速度 (基本ケースは0.04m/s)	3倍	94.47	139.79	0.46
	5倍	105.18	141.64	0.44
case5: 底面勾配 (基本ケースは渡辺式 の係数0.20)	0.10	33.34	80.98	0.56
	0.30	32.62	82.51	0.33

いては3.56、巻上げ砂量については 3.43×10^{-5} を採用した。

c) 飽和浮遊砂濃度

飽和浮遊砂濃度は、水中に浮遊できる砂の限界量であり、非平衡状態を前提とする高橋ら(1999)モデルにおいては、浮遊砂濃度を算定する際に過大な砂の巻上げを抑制する上限値として考慮している。飽和浮遊砂濃度に関する定量的な知見が得られていないため、従来の適用例の多くは経験則から0.01と仮定し、時間的な変化も考慮していない(例えば、近藤ら, 2012; Gusmanら, 2012; Sugawara and Takahashi, 2014)。しかし、飽和浮遊砂濃度は、乱れが砂粒子を浮遊状態に保持できる能力に関係しており、水の乱れに追従して変化することが推測される。ここで、水の乱れを示す乱流強度については、Nezuら(1993)により以下の重要な普遍分布式が提案されており、摩擦速度や水深等により評価されている。

$$\frac{u'}{U_*} = D_u \exp\left(-C_k \frac{z}{h}\right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{v'}{V_*} = D_v \exp\left(-C_k \frac{z}{h}\right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 u' 、 v' は乱流強度、 U_* 、 V_* は摩擦速度、 h は水深を示し、開水路乱流では、 $C_k=1.0$ 、 $D_u=2.30$ 、 $D_v=1.63$ が与えられている。

よって、本来であれば、飽和浮遊砂濃度は摩擦速度の関数で表されるべきである。しかし、本研究では、試行的な検証を主目的としていることから、より簡易な式でのモデル化を検討することとし、摩擦速度を規定する流速の関数として次のように定式化を行った。

図-3 各支配的因子の改良による土砂変動の計算結果

$$C_{sat} = \alpha \times \sqrt{U^2 \times V^2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 C_{sat} は飽和浮遊砂濃度、 U 、 V は断面平均流速成分 (m/s)、 α は飽和浮遊砂濃度と流速とを関連付ける係数とし、本研究では簡単のため、流速10m/sで飽和浮遊砂濃度が0.1となるように、係数0.01で設定した。

d) 沈降速度

高橋ら (1999) モデルにおける沈降速度は、静水中を前提としたRubey (1933) の式より評価していた。しかし、乱流中における浮遊粒子の平均沈降速度は、静水中に比べて異なることが古くから知られており、特に津波のような乱流卓越場では適用限界を大きく超えていることが推測される。このため、本研究では、川西ら (2005) が乱流強度のみで評価した次式を使用した。

$$\frac{w_p}{w_0} = \frac{1 + \frac{1}{2.5} \left(\frac{\sigma_f}{w_0} \right)^2}{1 + \frac{\sigma_f}{w_0}} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 w_p は乱流中の沈降速度、 w_0 は静水中の沈降速度、 σ_f は乱流強度を示す。なお、乱流強度は、前述の欄津津らが示した式 (3)、(4) を用いて水深方向に積分して算定した。

5. 津波移動床モデルの再現性向上結果

改良を試みた4つの因子に対し、個別に2011東北津波を適用した結果を図-3に示し、高橋ら (1999) モデルを適用した基本ケース (図-2(b)) と比較・検証する。無次元掃流力を改良したcase 1 (図-3(a)) では、狭窄部入り口周辺での変動分布に変化が生じ、実績に近い分布パターンを再現できている。加えて、土砂変動量についても改善が見られ、特に堆積量が増加しており、堆積が卓越している実績の変動傾向に近づく結果が再現できている。

また、流砂量式係数を改良したcase 2 (図-3(b)) では、狭窄部での侵食や湾口での堆積分布が、実績の変動分布と定性的に良く一致し、また堆積率も飛躍的に増加する

など再現性の向上が確認できる。その一方で全体的な土砂変動量は、基本ケースに比べても、さらに過小に評価する結果となった。これは、流砂量式係数の大幅な縮小が原因と推測されるが、特に巻上げ砂量式係数の縮小が顕著である。このため、計算結果の特徴は概ね掃流砂に依存しているといえ、土砂変動分布の再現性の向上は、掃流現象が一層卓越したことによる影響の可能性が唆される。

続いて、飽和浮遊砂濃度を改良したcase 3 (図-3(c)) では、基本ケースに比べて土砂変動量が著しく増加している。また、これに伴い狭窄部の侵食や湾口・湾奥の堆積が助長され、土砂変動分布は実績に近づく傾向となっている。これらの要因として、流速増大時には強い乱れに連動して飽和浮遊砂濃度が上昇し、これまで制限されていた巻上げ砂量を再現できていることや、流速減少時には飽和浮遊砂濃度が低下し、浮遊砂の速やかな沈降を再現できていることが一つの可能性として考えられ、巻上げ・沈降現象が活性化され土砂変動が促進されたと推測される。このことから、飽和浮遊砂濃度の改良は、土砂変動量を大幅に促進させる可能性のある因子といえる。

最後に、沈降速度を改良したcase 4 (図-3(d)) では、基本ケースと大差ない結果となった。これは、沈降速度の変化が、土砂変動に直結する掃流砂量や巻上げ砂量に直接的に影響しないためであると考えられる。加えて、感度分析時のように沈降速度が大きい状態が常に維持されるわけではなく、流況に追随して時系列的に増減するため、沈降速度は土砂変動に対して限定的にしか影響しないと推測される。

以上の考察を踏まえ、津波移動床モデルの精度向上においては、土砂変動分布や堆積率、土砂変動量を同時に改善できる可能性のあるcase 1～case 3を同時に考慮したモデルを構築し、2011東北津波に再適用した。この結果を図-4に示すが、土砂変動分布はcase 2での改良効果が支配的に発現しつつも湾口での凹凸は、case 2に比べてさ

図-4 提案モデルによる土砂変動の計算結果

らに強調され、湾口から狭窄部にかけての再現性を、著しく向上することが確認できた。加えて、堆積率は飛躍的に増加し、実績の堆積率に近づく傾向となった。

一方で、土砂変動量が依然として過小に評価されており、この課題に直結する流砂量式係数については、更なる精査が必要である。また、本研究では、各支配的因子が土砂変動に及ぼす影響を個別に評価しており、各因子間の相互影響までは検討していない。しかし、例えば、土砂変動への影響が限定的であった沈降速度が巻上げ砂量の増加により土砂変動を助長させる可能性もある。よって、物理的な相互間の影響特性を把握・考慮した上で、改良モデルの最適化を行うことも重要であるといえる。

6. 結論

本研究では、津波移動床計算でよく用いられている高橋ら（1999）モデルを対象に、土砂変動に支配的な影響を及ぼす因子に着目し、最新の知見を踏まえたモデルの改良を行った。また、改良モデルを2011東北津波来襲時の気仙沼湾の地形変化に適用し、改良モデルの妥当性を検証した。以下に、主要な結論を示す。

- 1) 2011東北津波来襲時の気仙沼湾に高橋ら（1999）モデルを適用した結果、狭窄部での侵食など定性的に再現できている一方、湾全体のマクロな変動分布は再現性にやや劣り、土砂変動量は実績に比して過小に評価された。
- 2) 高橋ら（1999）モデルにおいて、土砂変動に支配的に寄与する因子を感度分析的に確認し、改良対象とする4つの因子（無次元掃流力、流砂量式係数、飽和浮遊砂濃度、沈降速度）を抽出した。
- 3) 支配的因子を対象にモデルの改良を行った結果、無次元掃流力は土砂変動分布と量の両者に、流砂量式係数は変動分布に、飽和浮遊砂濃度は変動量に対して実績の再現性を向上させた。
- 4) 津波移動床モデルの精度向上に寄与する可能性のある3つの因子を同時に改良したモデルを提案した。提案モデルは、従来の高橋ら（1999）モデルによる再現性に比べて、湾口から狭窄部にかけての土砂変

動分布を著しく向上させるとともに、堆積率を飛躍的に増加させ、実績の堆積率に近づく結果となった。

謝辞：本研究の一部は原子力規制庁からの委託業務「平成25年度 津波堆積物に基づく津波波源推定手法の開発（代表：関西大学 高橋智幸）」により実施したものである。

参考文献

- 相田 勇（1997）：陸上に溢れる津波の数値実験－高知県須崎および宇佐の場合－，地震研究所彙報，第52号，pp.441-460。
- 川西 澄・塩崎遼平（2005）：乱流境界層における固体粒子の沈降速度，海岸工学論文集，第52巻，pp.371-375。
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫（1998）：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。
- 近藤武司・森本 徹・藤本典子・殿最浩司・志方建仁（2012）：港湾での津波による土砂移動計算の再現性評価，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 68（2012）No. 2。
- 高川智博・富田孝史（2012）：時間発展を考慮した津波波源逆解析と観測点地盤変動量のリアルタイム推定，土木学会論文集B2（海岸工学）Vol.68，No.2，I_311-I_315。
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔（1999）：掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発，海岸工学論文集，Vol.46，pp.606-610。
- 高橋智幸・黒川貴博・藤田将孝・島田広昭（2011）：津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，pp.I_231-I_235。
- 玉田 崇・田村 保・高橋智幸・佐々木元（2009）：河川での津波防災検討における津波移動床モデルの適用性に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 65，No. 1，pp.301-305。
- 田中 仁・吉竹豊尚・首藤伸夫（1989）：波・流れ共存場における低質分級の数値計算，海岸工学論文集，第36巻，pp.264-268。
- 瀬津家久・門田章宏・戸田孝史・中川博次（1995）：加速流および減速流の解析手法とその乱流特性，土木学会論文集，II-30，pp.89-97。
- 原口 強・岩松 暉（2011）：東日本大震災津波詳細地図 上巻 青森・岩手・宮城，古今書院，図版46気仙沼。
- 原口 強・高橋智幸・久松力人・森下 祐・佐々木いたる（2012）：2010年チリ中部地震津波および2011年東北地方太平洋沖地震津波による気仙沼湾での地形変化に関する現地調査，土木学会論文集B2（海岸工学）Vol.68，No.2，I_231-I_235。
- 藤井直樹・大森政則・高尾 誠・金山 進・大谷英夫（1998）：津波による海底地形変化に関する研究，海岸工学論文集，第45巻，pp.376-380。
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉（1984）：構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル，第31回海岸工学講演会論文集，pp.406-410。
- Gusman, A. R., Tanioka, Y. and Takahashi, T. (2012) : Numerical experiment and a case study of sediment transport simulation of the 2004 Indian Ocean tsunami in Lhok Nga, Banda Aceh, Indonesia, Earth Planets Space, Vol.64, pp.817-827.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993) : Turbulence in open-channel flows, IAHR Monograph, Balkema.
- Rubey, W.W. (1933) : Settling velocities of gravel, sand and silt particles, American Journal of Science, Vol.25, No.148, pp.325-338.
- Sugawara, D. and Takahashi, T. (2014) : Numerical Simulation of Coastal Sediment Transport by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake Tsunami, Tsunami Events and Lessons Learned, pp 99-112.