

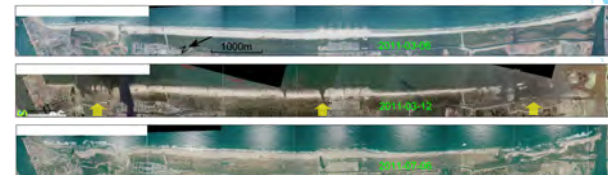
津波数値シミュレーションに使用する 新しい非定常抵抗則の提案

Proposal of a new friction law for tsunami numerical simulation

田中 仁
東北大学大学院工学研究科 教授
土木工学専攻

はじめに 津波による地形変化シミュレーション

仙台海岸

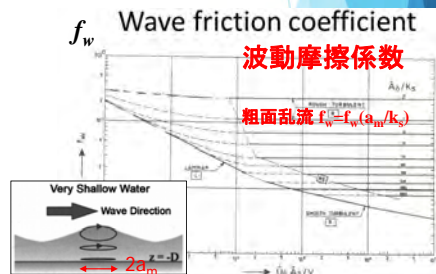
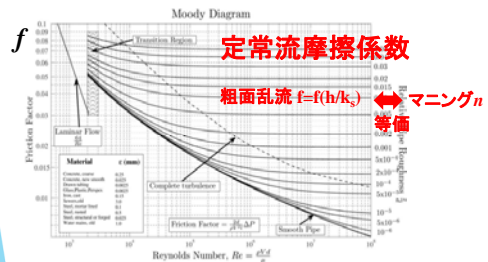


津波の摩擦係数に関する課題:

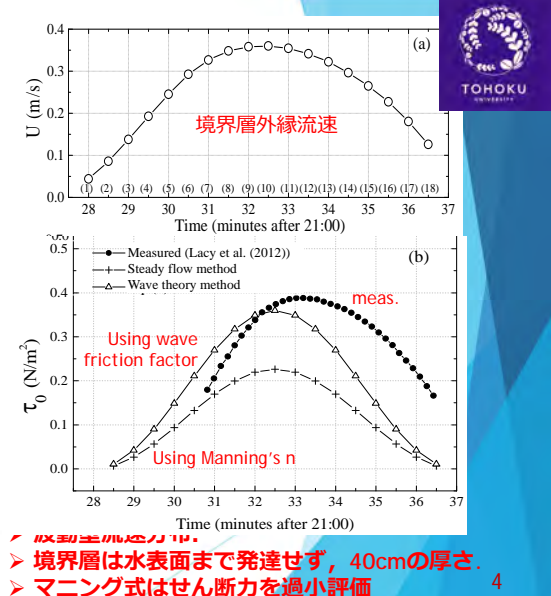
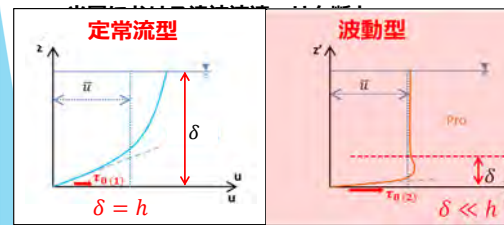
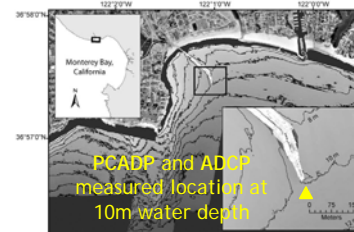
- たとえ長波でも、定常流摩擦係数を使用できない。
- 津波に対して波動摩擦係数の適用方法が不明。

既往研究

- **通常の津波の数値計算**: 平面二次元モデル (浅水流方程式) に基づき、定常流抵抗則 (マンニングの n や f) を使用。
- **孤立波底面境界層に関する実験**: 定常流の乱流構造とは大きく異なり、むしろ波動境界層に類似した非定常特性 (Liu et al., 2007; Sumer et al., 2010; Tanaka et al., 2012)。
- **Lacy et al. (2012) 津波による底面境界層の現地観測**: 波動境界層に類似した非定常特性

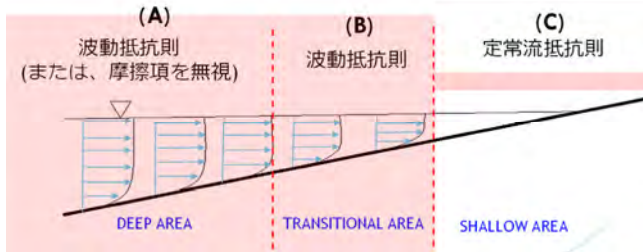
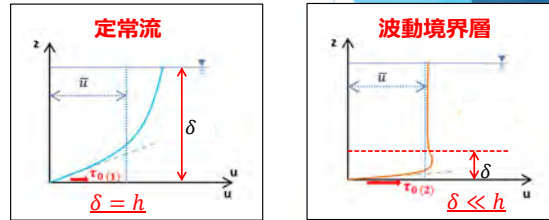


既往研究 Lacy et al. (2012)



- 收到断面断力 τ_0
- 境界層は水表面まで発達せず、40cmの厚さ。
- マニング式はせん断力を過小評価

- 津波の下での底面境界層は、定常流よりむしろ波動境界層に類似。
- したがって、底面せん断力の評価には、波動摩擦係数を使用すべき (Region (A) & (B)) .



▶ 一次元浅水流方程式 $\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0$ (1)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau/\rho = 0$$
 (2)

▶ マニング式による摩擦項. $\tau = \tau_c = \frac{\rho g n^2}{h^{1/3}} U|U| = \rho \frac{f_c}{2} U|U|$

▶ 新しい粗度係数:
新しい摩擦項:

$$n_0 = a n$$

$$\tau = \tau_w = \rho \frac{f_w}{2} U|U| = \frac{\rho g n_0^2}{h^{1/3}} U|U| = \frac{\rho g a^2 n^2}{h^{1/3}} U|U|$$

▶ 修正係数a:

$$a = \begin{cases} \sqrt{\frac{f_w}{f_c}} & \text{if } f_w > f_c \\ 1 & \text{if } f_w < f_c \end{cases}$$

where $f_w = \exp \left\{ -7.53 + 8.07 \left(\frac{30a_m}{k_s} \right)^{-0.100} \right\}$ $f_c = \frac{2\kappa^2}{[\ln(\frac{h}{z_0}) - 1]^2}$
(Tanaka, 1992)

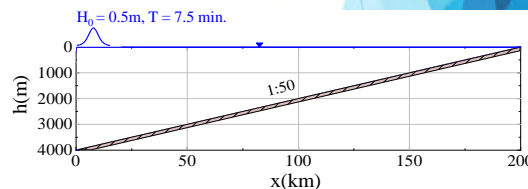
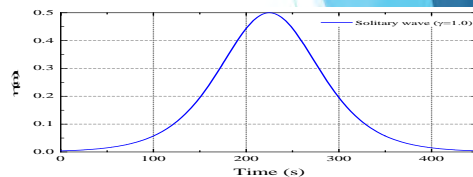
境界条件

孤立波:

$$\eta = \eta_0 \operatorname{sech}^2(\gamma \sigma t)$$

計算条件

波源水深	$h_0 = 4000\text{m}$
波源波高	$H_0 = 0.5\text{m}$
周期	$T = 7.5 \text{ min}$
海底勾配	1/50
格子間隔	$\Delta x = 200\text{m}$
時間刻み	$\Delta t = 0.5\text{s}$
底質粒径	$d_{50} = 3\text{mm}$

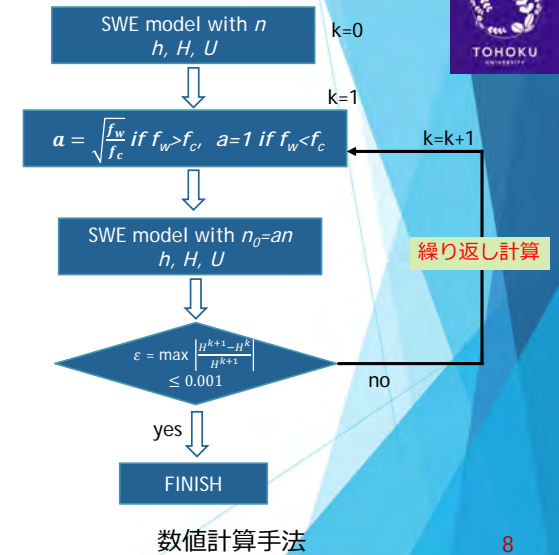
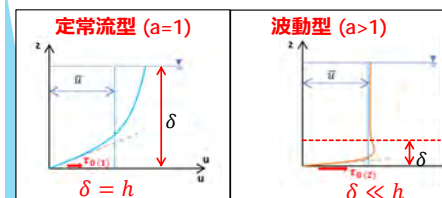


修正係数 a を用いた 1次元浅水流方程式による数値計算

$$n_0 = a n$$

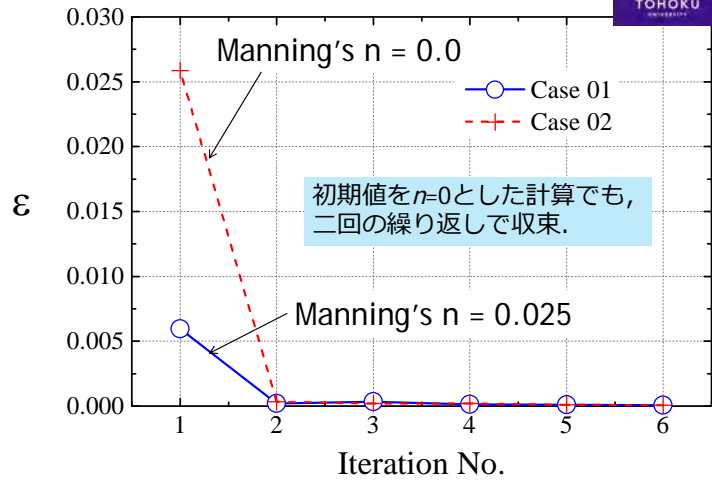
$$a = \begin{cases} \sqrt{\frac{f_w}{f_c}} & \text{if } f_w > f_c \\ 1 & \text{if } f_w < f_c \end{cases}$$

$a = \sqrt{\frac{f_w}{f_c}}$: 波動摩擦係数
 $a = 1$: 定常流摩擦係数



数値計算手法

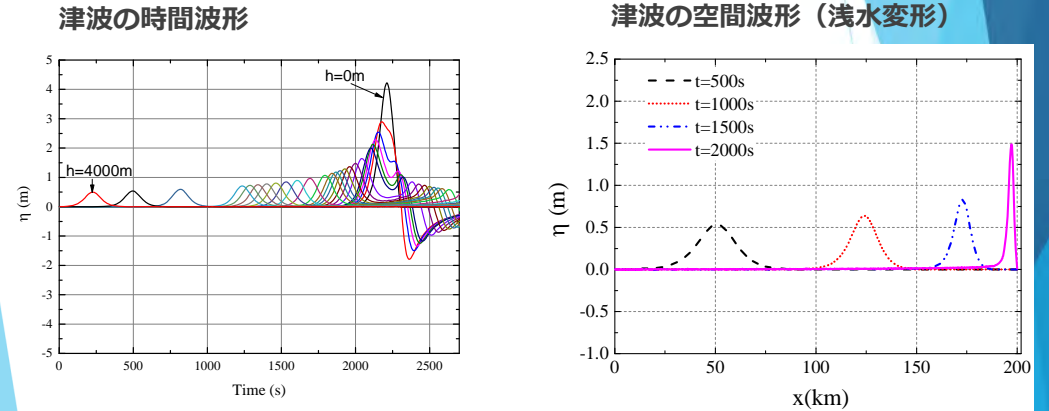
結果 浅水流方程式による計算結果 – 収束過程 –



誤差評価

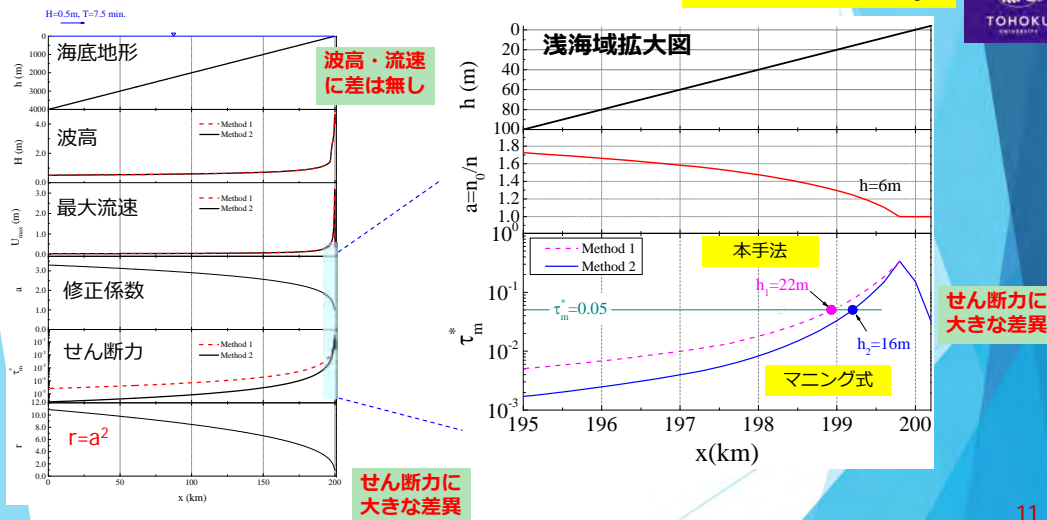
$$\varepsilon = \max \left| \frac{H^{k+1} - H^k}{H^{k+1}} \right| \leq 0.001$$

結果 浅水流方程式による計算結果

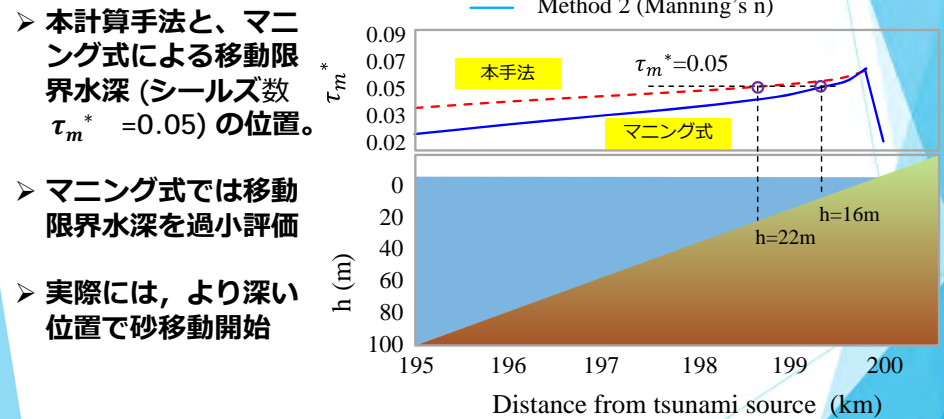


結果 浅水流方程式による計算結果

Method 1: 新しい提案手法
Method 2: 従来のManning式



結果 シールズ数 (無次元掃流力)



- 本計算手法と、マニング式による移動限界水深 (シールズ数 $\tau_m^* = 0.05$) の位置。
- マニング式では移動限界水深を過小評価
- 実際には、より深い位置で砂移動開始

まとめ

- ▶ 浅水流方程式において、新しい底面せん断力計算法を用いた孤立波の浅水変形数値計算。
- ▶ 摩擦係数の遷移 (f_w から f_c へ) は、水深 $h=5$ から 6m に生じる。
- ▶ 本計算による底質移動限界水深は、 Manning式によるそれに比べてはるかに深く、土砂移動シミュレーションには本計算法が有効。
- ▶ 平面二次元シミュレーションにおいても同様な結果。
- ▶ **今後**: 土砂移動モデルへの本手法の適用。

13

ご清聴ありがとうございました。

主な発表論文

1. Nguyen Xuan Tinh, 田中 仁, 宋 文正: 津波の下での底面せん断力特性, 津波工学研究報告, 第36巻, pp.119-125, 2019.
2. Nguyen Xuan Tinh, 田中 仁, 宋 文正: 乱流モデルを用いた津波の下での底面境界層数値解析, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.75, No.2, p.L13-L18, 2019.
3. Nguyen Xuan Tinh, 田中 仁, 西脇 遼, 渡辺一也: 摩擦係数の遷移特性を考慮した津波伝搬の一次元数値計算, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.L697-L702, 2019.
4. 田中 仁, Nguyen Xuan Tinh, 西脇 遼, 渡辺一也: 孤立波の伝搬に伴う底面せん断力の変化特性, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.76, No.2, pp.L150-L155, 2020.
5. 田中 仁, Nguyen Xuan Tinh, Nguyen Trong Hiep: 2011年東日本大震災津波後の野蒜海岸回復過程, 土木学会論文集C(環境), Vol.76, No.5, pp.L43-L48, 2020.
6. 田中 仁, Nguyen Xuan Tinh: 津波の下での底面境界層のflow regimeに関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.76, No.2, pp.L397-L402, 2020.
7. Hitoshi Tanaka, Nguyen Xuan Tinh and Ahmad Sana: Improvement of the full-range equation for wave boundary layer thickness, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.8, Issue 8, 573, 2020. (IF=2.458)
8. Hitoshi Tanaka, Nguyen Xuan Tinh and Ahmad Sana: Transitional behavior of a flow regime in shoaling tsunami boundary layers, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.8, Issue 9, 2020. (IF=2.458)
9. Hitoshi Tanaka, et al. : Intrusion distance and flow discharge in rivers during the 2011 Tohoku Tsunami, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.8, Issue 11, 882, 2020. (IF=2.458)
10. Hitoshi Tanaka and Nguyen Xuan Tinh: Necessity of using a wave friction factor in tsunami numerical simulation, Proc. the 8th International Conference of Physical Modeling in Coastal Science and Eng., pp.348-353, 2020. (Keynote lecture)
11. Nguyen Trong Hiep, Hitoshi Tanaka and Nguyen Xuan Tinh: Centennial to multi-decadal morphology change and sediment budget alteration after the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami along the Nobiru Coast, Japan, Journal of Marine Science and Engineering, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.9, Issue 3, 265, 2021. (IF=2.458)

14