

## 第31回 研究報告会

# プレート間地震津波の特性化波源モデルの改良 —地殻変動の水平変位が津波初期水位に与える影響 に係る実験及び解析の比較検討—

令和3年10月14日

原子力規制庁  
長官官房技術基盤グループ  
地震・津波研究部門

道口 陽子

本資料で示した内容は著者等の見解であり、原子力規制委員会の見解を示したものではありません。

令和3年11月2日日本原子力研究開発機構「安全研究センター報告会」にて、講演予定。



# 目次

---

1. 背景
  2. 課題・研究目的
  3. 実施内容
  4. 解析及び実験結果
  5. 比較検討
  6. 結論
- 参考文献



# 背景

- ・平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波（以下「東北地震津波」という。）による福島第一原子力発電所の事故が契機となり、原子力発電所に対する津波の影響評価が重要となった。
- ・現行の規制基準では、津波に関係する要求事項として「基準津波の策定」及び「超過確率の参照」等が加わった。
- ・原子力規制の継続的な高度化のためには、これらの要求事項に係る種々の評価手法を継続的に改善していくことが重要である。
- ・NRAの津波研究では、関連審査ガイド及び安全評価の高度化に資すること、また、将来の規制活動への反映に向けた科学的・技術的知見を蓄積することを目的として実施している。

## 海溝軸付近で発生するプレート間地震津波を対象とした特性化波源モデルの改良に関する研究について報告

- 1) 道口陽子他、“地殻変動の水平変位による津波初期水位への影響に関する実験的検討”、土木学会論文集B2(海岸工学)、2019.
- 2) Michiguchi, Y. et al., “Comparative Study of Experiments and Analyses on Tsunami Generation by Horizontal Crustal Deformation”, 17WCEE, 2020.



# 背景

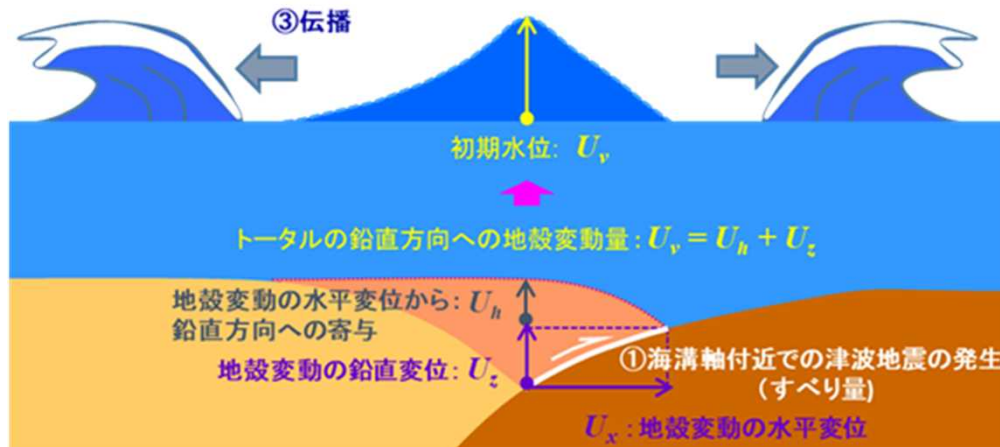
- プレート間地震による津波は、地殻変動に伴う鉛直変位及び水平変位によって生じる。
- 地震調査研究推進本部から2017年1月に公開された「津波レシピ」<sup>3)</sup>において、津波予測計算の際の初期水位分布の推定に当たっては、海底の地殻変動の鉛直変位に加え、**地殻変動の水平変位からの鉛直方向への寄与(以下「水平変位による寄与分」という。)**を考慮することが記されており、Tanioka & Sateke(1996)<sup>4)</sup>の考え方が一般的になりつつある(以下「TS法」という。)
- 特に海溝軸付近で発生するプレート間地震による津波では、水平変位による寄与分が津波の発生において重要であることが報告されている(Tanioka & Satake, 1996)<sup>4)</sup>。

$$u_v = u_z + u_h$$

$$u_h = u_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

②海面の変動

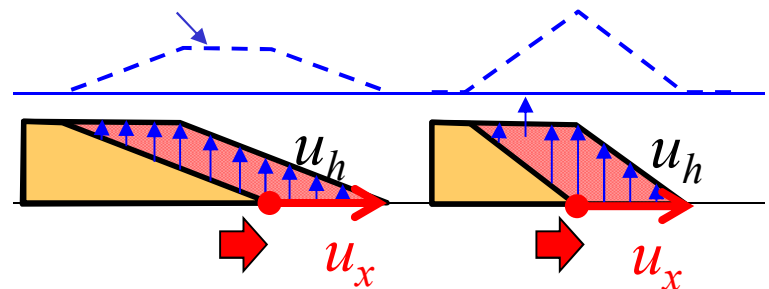
③伝播



TS従来法によるプレート間地震津波の評価の考え方

$u_v$  : 鉛直方向への総地殻変動量(m)  
 $u_z$  : 地殻変動量の鉛直方向成分(m)  
 $u_h$  : 地殻変動量の水平変位からの鉛直方向への寄与分(m)  
 $u_x$  : 地殻変動量の水平変位  
 $h$  : ある地点での水深(m)

海水面上昇



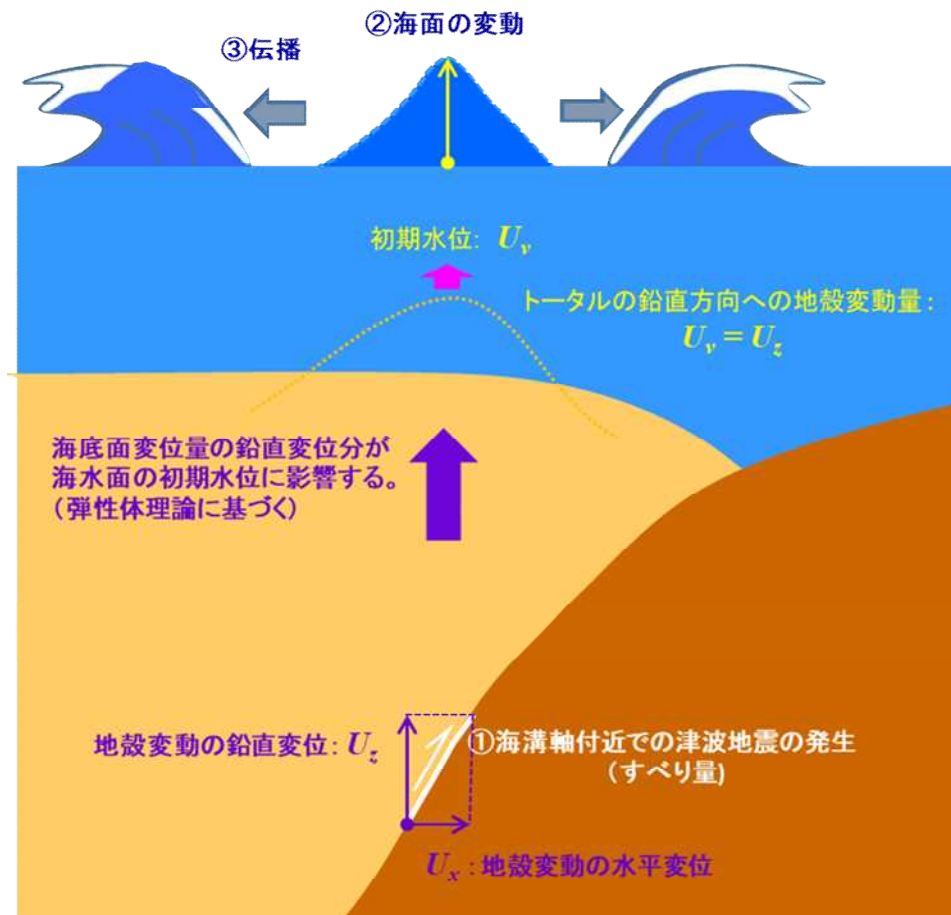
水平変位の寄与分と斜面勾配の影響

急勾配の地形の場合等、地殻変動の水平変位が海底面の鉛直変位に影響し、海水面の初期水位にも影響する。



# 背景

- これまでの津波の評価手法は、**地殻変動量の鉛直変位による寄与分のみを初期水位分布**とする(以下「従来法」という。)のが一般的であった。



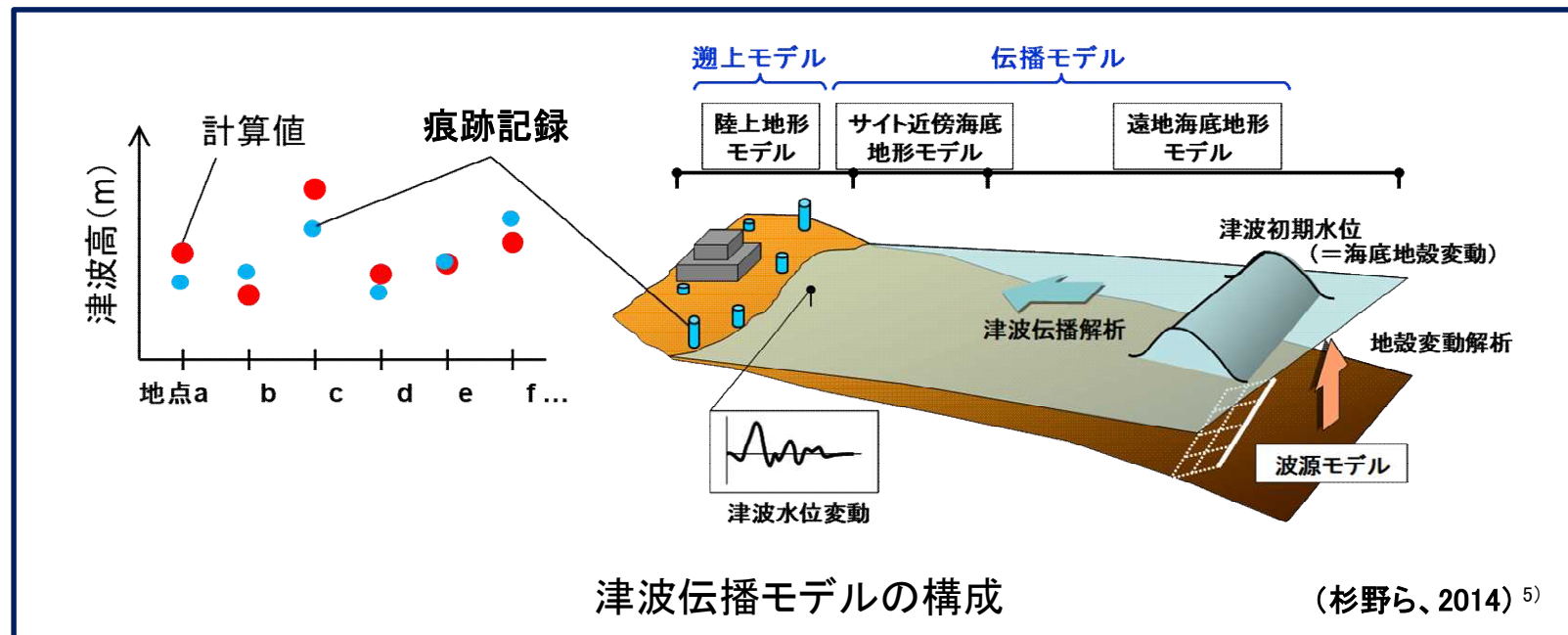
従来法によるプレート間地震津波の評価の考え方



# 背景

## 【従来法による津波評価】

- 実際に観測された既往津波の痕跡記録に対して再現解析を行い、すべり量が検証されている。
  - ・ 痕跡記録に合うように波源モデルのすべり量が設定されている。
  - ・ 痕跡記録には地殻変動の水平変位の影響が含まれているため、結果的に従来法でも、水平変位による寄与分の効果を、波源モデルのすべり量の割り増しによって考慮してきたといえる。

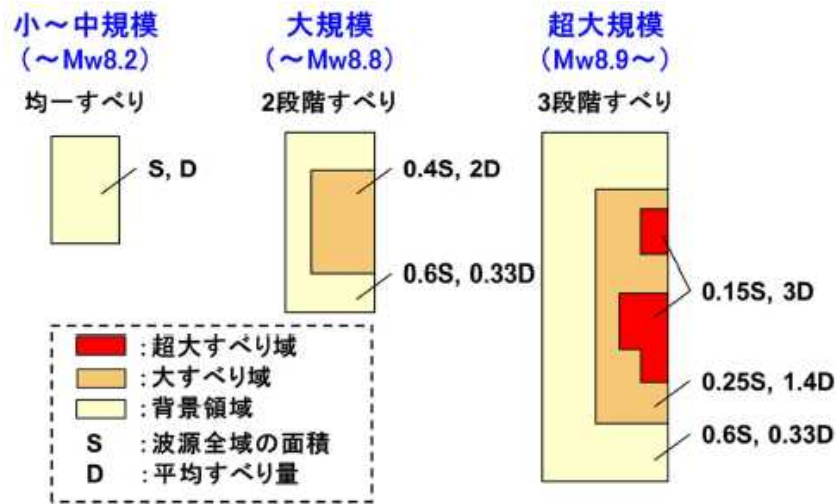




# 背景

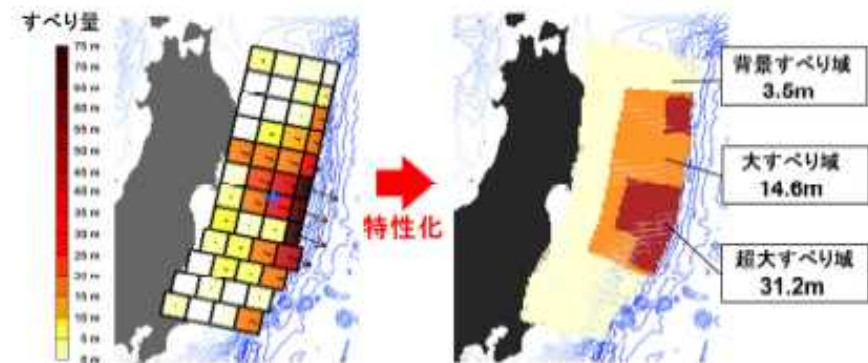
- 沿岸部での津波評価を標準化するために、津波波源としての特性を主要なパラメータで簡略化した「特性化波源モデル」においても、再現解析と同様に、水平変位による寄与分は、波源モデルのすべり量の割り増しによって考慮されている。

津波レシピどおりに、従来法により設定したすべり量はそのままとした上で、更にTS法を用いて水平変位による寄与分を取り入れることは重複となるため、津波水位の評価として適切ではない。



(杉野ら、2014)<sup>5)</sup>

杉野らの特性化波源モデルの地震規模別のすべり分布



(杉野ら、2014)<sup>5)</sup>

東北地震津波の再現用波源モデル(左)と特性化波源モデル(右)



# 課題 ・ 研究目的

---

## <課題>

- ・ TS法を用いて水平変位による寄与分を考慮した津波想定を行う場合は、従来法のようにすべり量の割り増しをせず、その方法に見合ったすべり量等の設定方法が必要である。
- ・ TS法を用いて津波を精度良く評価するためには水平変位による寄与分の津波水位への影響を把握する必要があるが、海溝軸付近の地殻変動による初期水位を直接観測した例はなく、水平変位による寄与分の水位への影響を直接的に評価できない。

## <目的>

本研究の目的は次のとおり。

**今回の説明範囲**

- TS法を用いた解析及び海底の地殻変動の水平変位を模擬した水理実験から水平変位による寄与分の津波水位への影響を把握する。
- TS法を踏まえた「水平変位による寄与分を考慮した特性化波源モデルの設定方法」を提案する。

## <実施体制>

東北大学、東北学院大学及び規制庁の3者の共同研究(H30～R2年度)として実施





# 実施内容

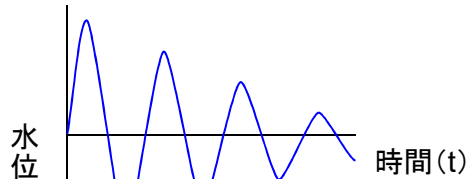
- ① Tanioka and Satake (1996)<sup>4)</sup>の初期水位設定方法を取り入れた津波解析コードSANNAMI(+TUNAMI)を用いて、以降に示す実験と同条件の解析を行った。
- ② 海底地形を模擬した可動式斜面模型が水平に移動する水理模型実験装置を開発・製作し、可動式斜面模型が水平移動した際の水面での水位変化(水平変位による寄与分)を測定した。
- ③ ①と②の結果から、水平変位による寄与分が津波水位に与える影響を確認した。

## ①解析概要

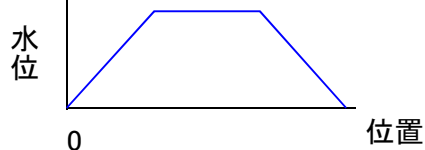
水理実験と同じ条件で津波伝播解析を実施する。

<得られる結果>

【ある地点での水位変化】

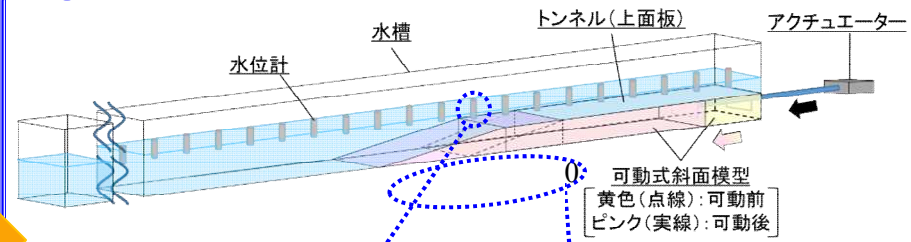


【ある時間での水位変化】



③解析結果と実験結果から、水平変位による寄与分が津波水位に与える影響を確認

## ②実験概要

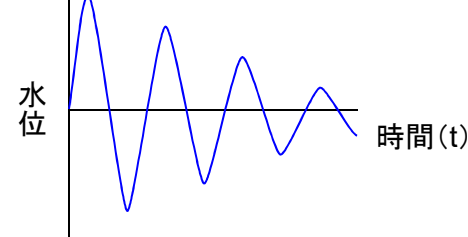


水位変化や水面形状を測定

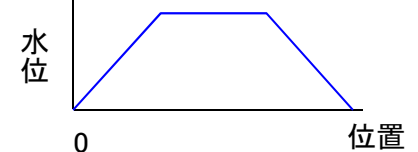
⇒ 水位計を用いて測定する。

<得られる結果>

【ある地点での水位変化】



【ある時間での水位変化】





# 実施内容 ①解析概要

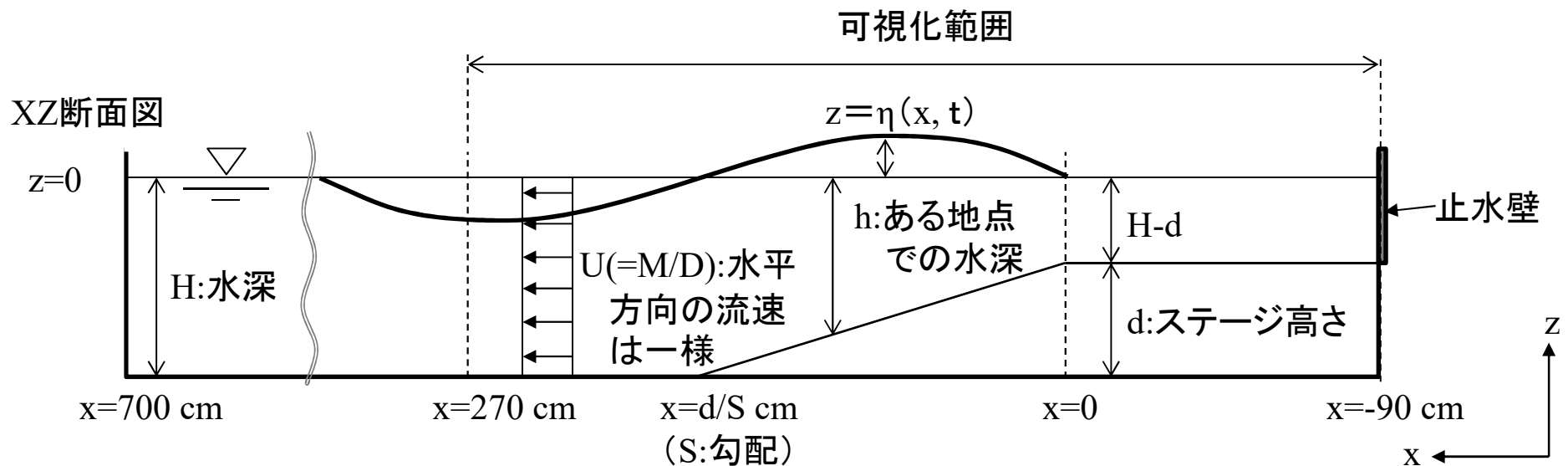
## 1) 津波伝播解析方法の概要

➤ 水平1次元の津波伝播解析(非線形長波理論に基づく数値解析手法)

$$\text{連続方程式: } \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0$$

$$\text{運動方程式: } \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M|M| = 0$$

$D$  : 全水深 ( $\eta + h$ ) (m)  
 $\eta$  : 水位 (m)  
 $h$  : ある地点での水深 (m)  
 $M$  : 流量フラックス ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $x$  : 水平方向  
 $g$  : 重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )  
 $n$  : マニングの粗度係数 ( $\text{m}^{-1/3}\text{s}$ )  
※本研究では、 $n$  は  $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$



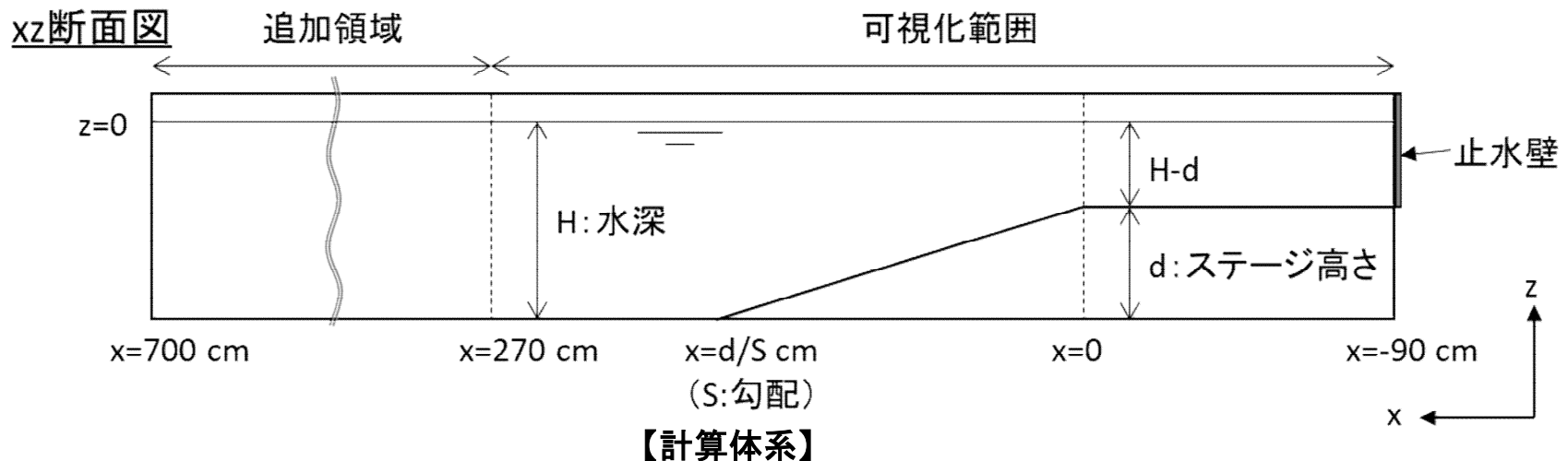
【計算体系】



# 実施内容 ①解析概要

## 2) 津波生成方法の概要

- Tanioka and Satake (1996)<sup>4)</sup>による初期水位の設定(水平変位による寄与分)
- ある時刻 $t$ における連続方程式及び運動方程式の差分方程式を解いて各メッシュ(0.5cm)での水位を求め、次いで、その水位にTanioka and Satake (1996)<sup>4)</sup>の式で算出した $\Delta t$ (0.0005 s)の間の垂直方向変位を加え、それをその時刻での水位と定義し、次のタイムステップ以降、これを繰り返しながら伝播解析を実施
- 入力条件は、以降に説明の水理実験と同条件(可動式斜面模型の実測動作データを使用)
- 津波伝播解析の実施に当たりフルード相似則を考慮し、実寸サイズに変換した海底地形モデルを使用(水理実験と実地形との縮尺比は $R=28,900(=170^2)$ )



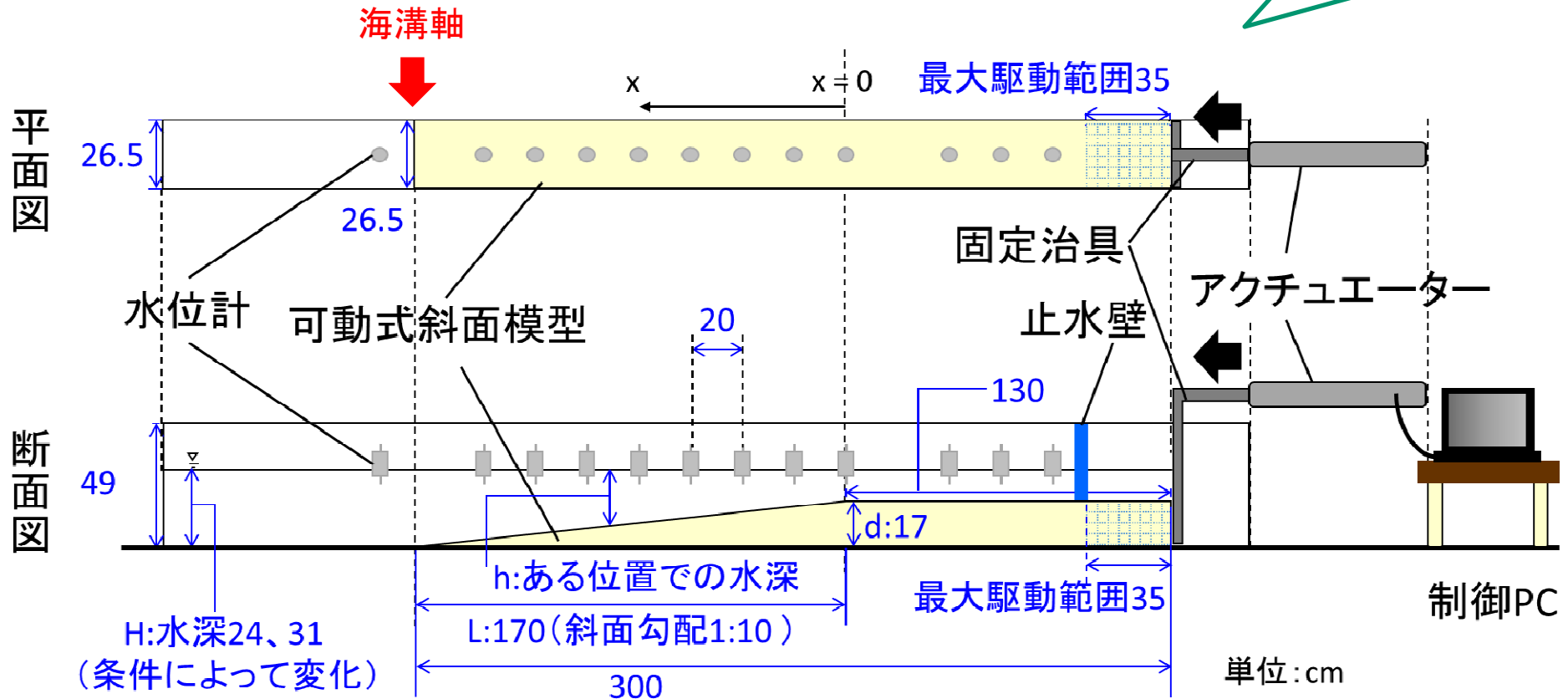


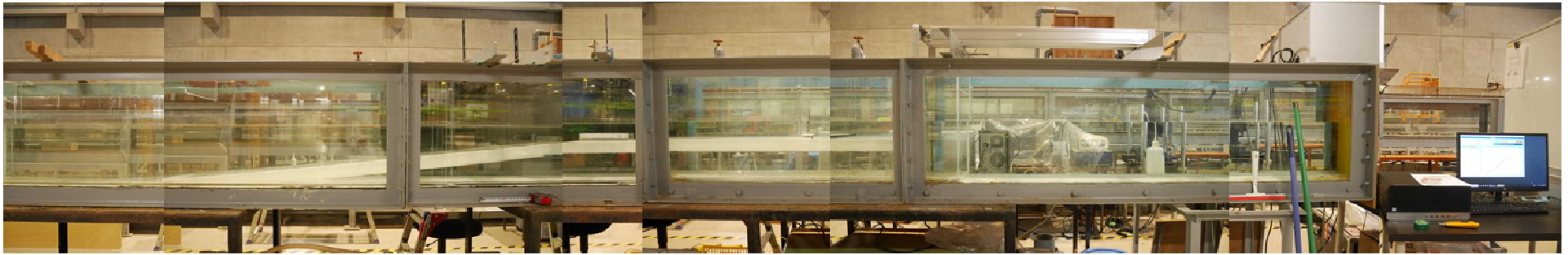
# 実施内容 ② 水理模型実験概要

## 1) 水理実験の概要及び水理実験装置の開発

海底の地殻変動の水平変位を模擬した水理実験を実施

実地形の1/28,900スケール  
(水深約24、31cmは、実地形の海溝  
水深約7,000m、約9,000mに相当)

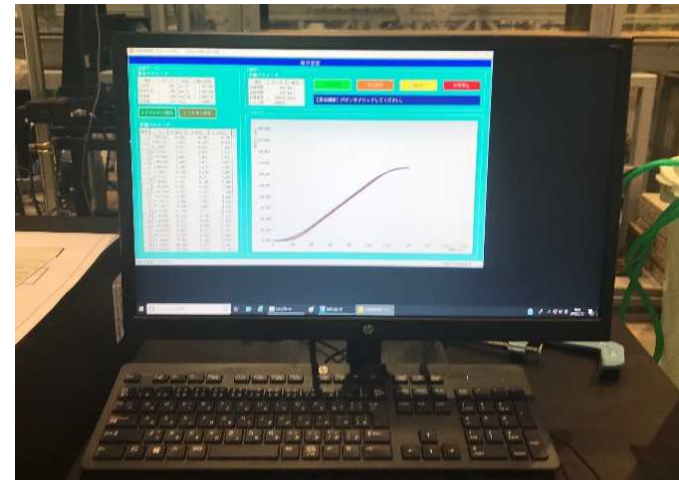




水理実験装置の概観1



水理実験装置の概観2



アクチュエータの動作を制御するPC



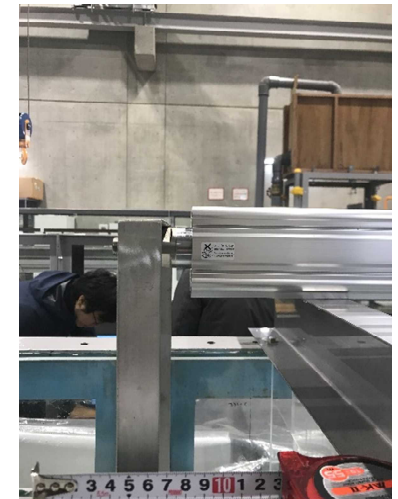
水位計



止水壁



アクチュエータと斜面模型  
をつなぐ固定治具



アクチュエータと  
固定治具の設置部分

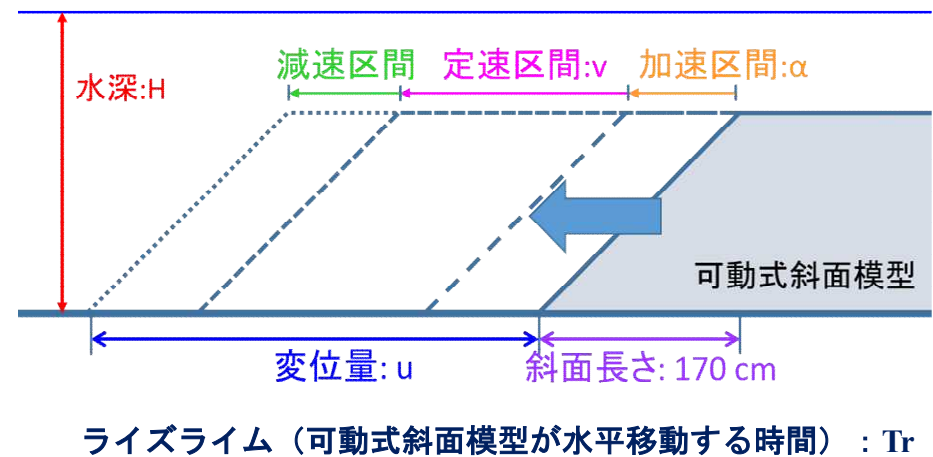


# 解析及び実験の条件

可動式斜面模型の水平移動の条件は、速度、加速度、総変位量及び水深とした。

表 解析及び水理実験条件

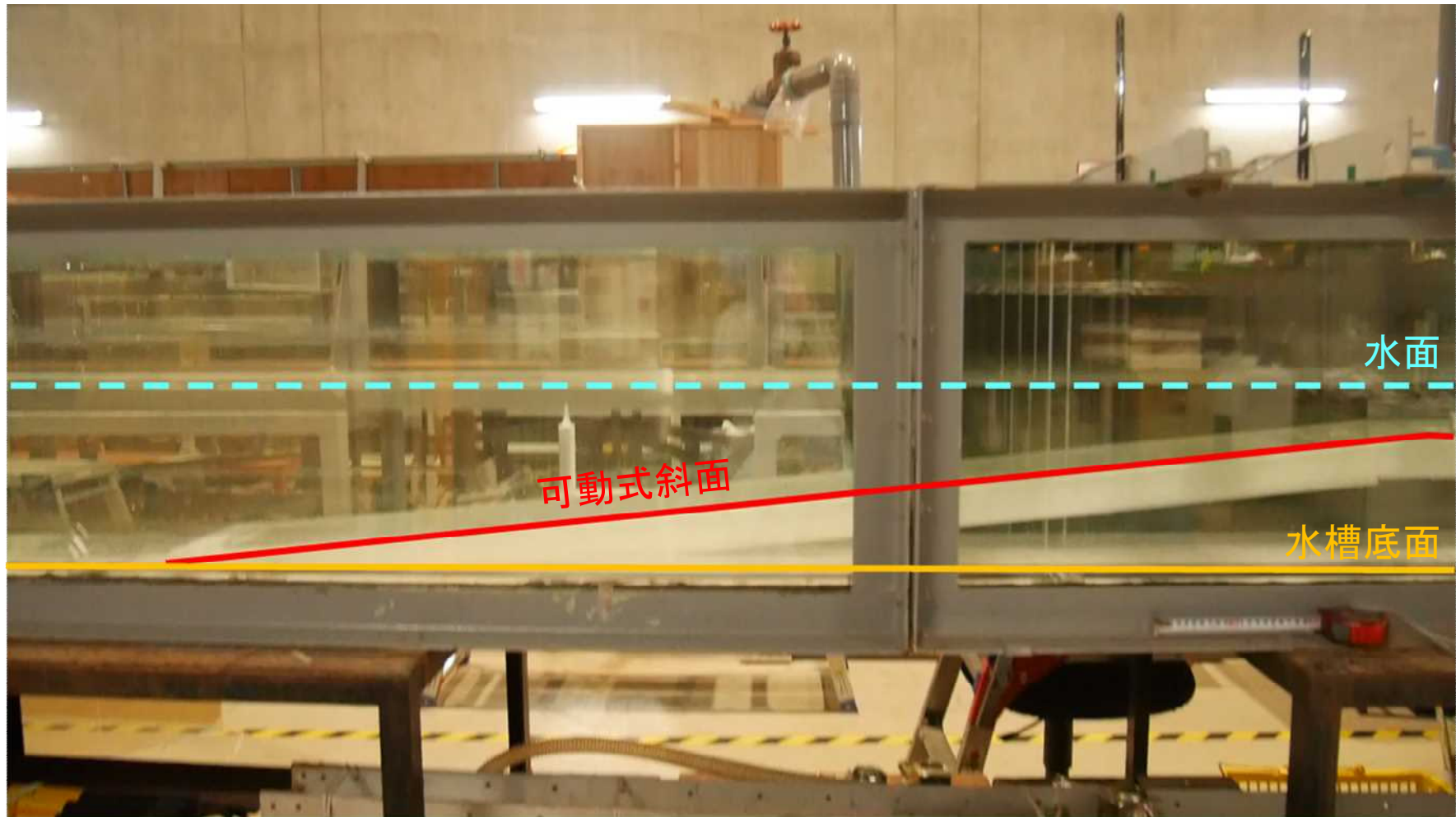
Case No.	速度 $v$ (cm/s)	加速度 $\alpha$ (cm/s <sup>2</sup> )	変位量 $u$ (cm)	ライズ タイム $Tr$ (s)	水深 $H$ (cm)
case1 (基本ケース)	20	50	20	1.4	24
case2	15	50	20	1.63	
case3	25	50	20	1.3	
case4	20	30	20	1.53	
case5	20	100	20	1.3	
case6	20	50	10	0.9	
case7	20	50	30	1.9	
case8	20	50	20	1.4	31
case9	15	50	20	1.63	
case10	25	50	20	1.3	
case11	20	30	20	1.53	
case12	20	100	20	1.3	
case13	20	50	10	0.9	
case14	20	50	30	1.9	



各条件の定義



# 実験動画





# 実験動画

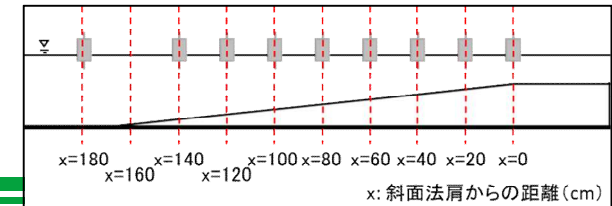




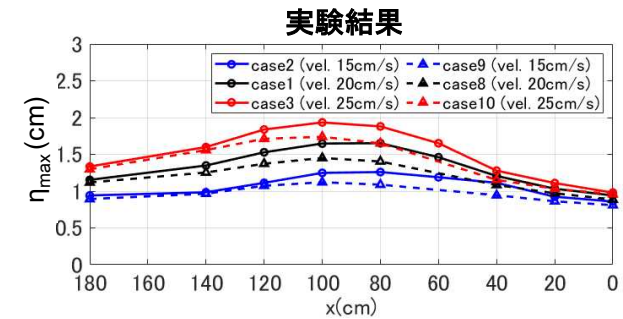
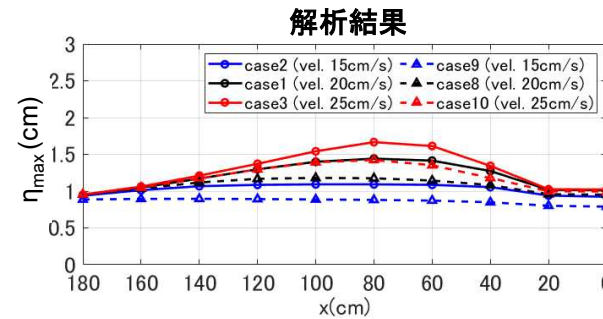


# 解析及び実験結果

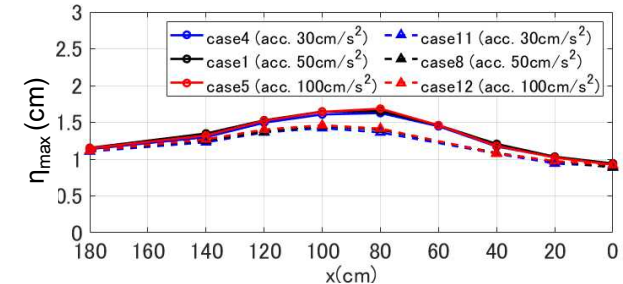
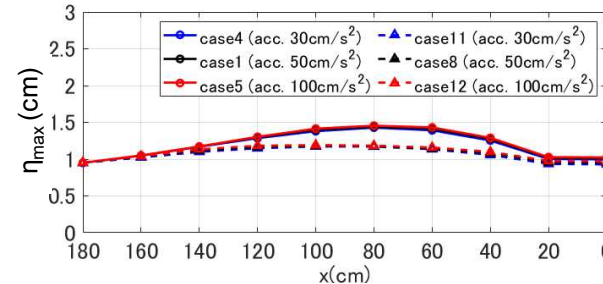
## 最大水位分布の比較



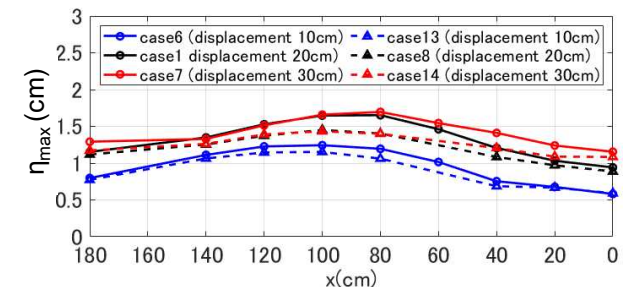
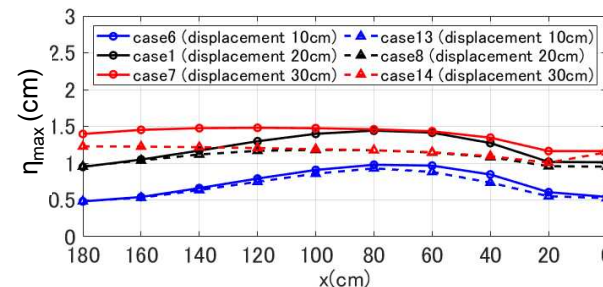
速度を変化させた場合



加速度を変化させた場合



変位量を変化させた場合

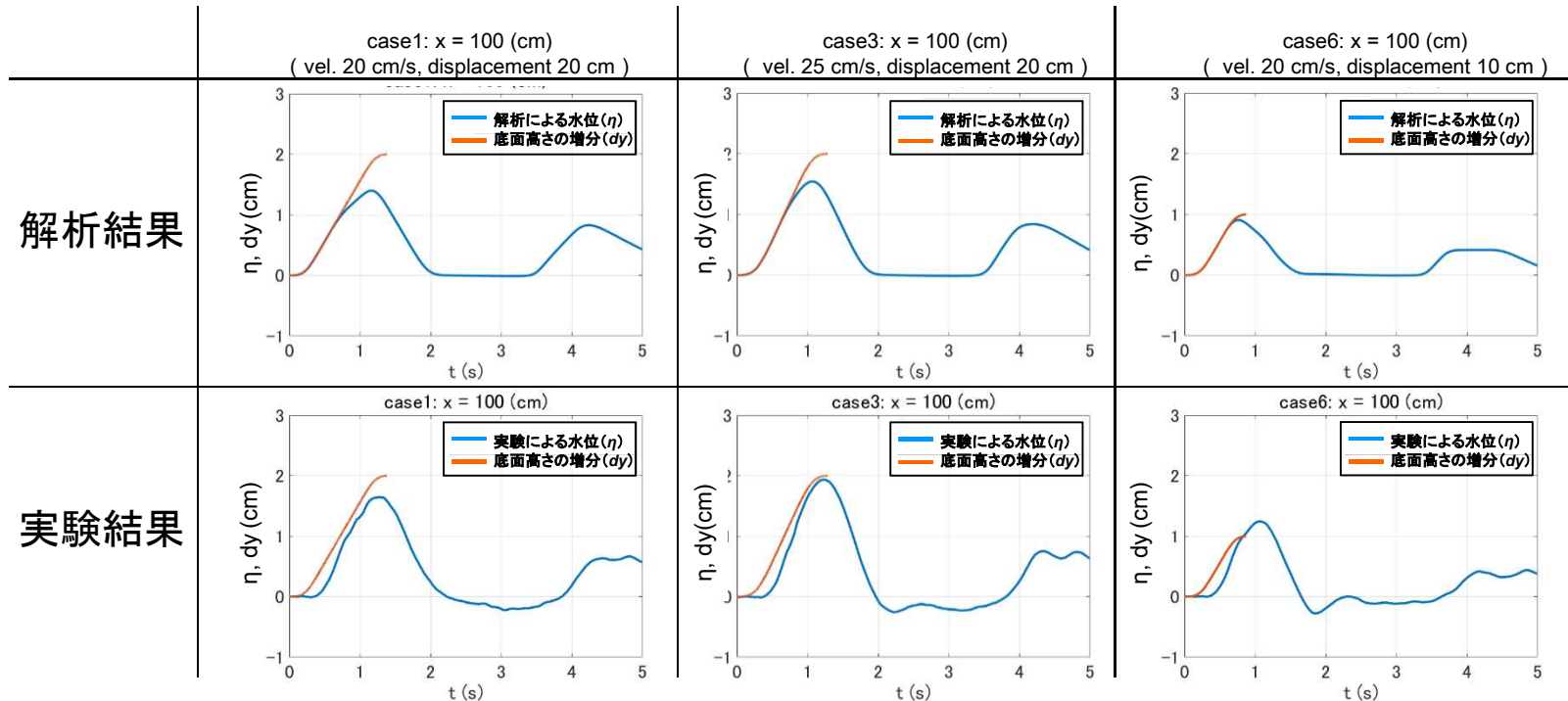
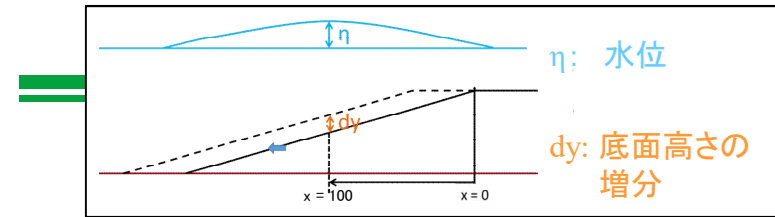


- 解析結果及び水理実験結果共に、各条件での最大水位の変化は、両者で同じ傾向を示す。最大水位が高くなる条件は、水深が浅く、速度のみを速くしたcase 3で、最大水位が発生する位置が可動式斜面の斜面中央部付近であることが分かった。
- ただし、解析による最大水位は、水理実験による最大水位より低く、可動式斜面模型の斜面中央部において水理実験結果の80%程度であった。



# 解析及び実験結果

## 可動式斜面模型の水平移動に伴う底面高さの増分と水位の時刻歴波形



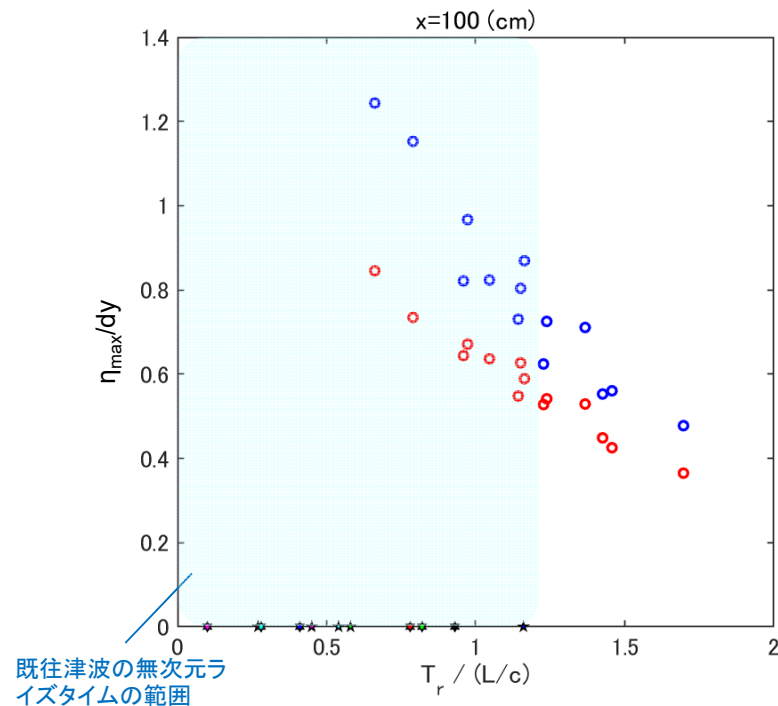
計測位置が $x=100$  cm地点におけるcase1、case3、case6での可動式斜面模型の水平移動に伴う底面高さの増分と水位の時刻歴波形

- 解析と水理実験では、波形や、水位 ( $\eta$ ) と底面高さの増分 ( $dy$ ) との関係は類似している。
- 解析と水理実験では、水面の水位上昇の開始時間に差が生じた。
- case6及び13の水理実験の場合において、底面高さの増分 $dy$ より水位上昇量が大きくなり、解析結果と整合しない。

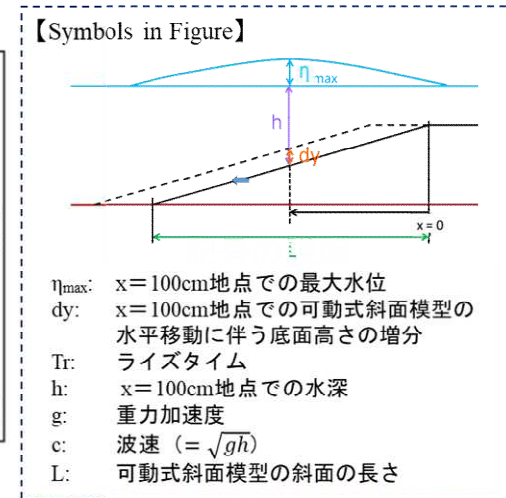


## 比較検討(無次元化による傾向分析)

最大水位  $\eta_{max}$  と可動式斜面模型の水平移動に伴う底面高さの増分  $dy$  の比と、ライズタイム  $Tr$  と斜面上で波が伝播する時間(以下「無次元ライズタイム」という。)で整理した。



- 実験値
- 解析値
- ★ 1896年明治三陸地震①
- ★ 1896年明治三陸地震②
- ★ 1933年三陸地震
- ★ 2011年東北地方太平洋沖地震①
- ★ 2011年東北地方太平洋沖地震②
- ★ 1960年チリ地震
- ★ 1964年アラスカ地震
- ★ 2004年スマトラ沖地震①
- ★ 2004年スマトラ沖地震②
- ★ 2011年東北地方太平洋沖地震③
- ★ 2011年東北地方太平洋沖地震④



縦軸: 斜面法肩 $x=100\text{cm}$ の地点での最大水位  $\eta_{max}$  と可動式斜面模型の水平移動に伴う底面高さの増分  $dy$  の比 ( $\eta_{max}/dy$ )  
横軸: Kajiura<sup>6)</sup>を参考に、ライズタイム  $Tr$  と斜面上で波が伝播する時間  $T$  ( $T=L/c$ , 斜面長さ:  $L$ , 波速:  $c(=\sqrt{gh})$ ) の比 ( $Tr/T$ )

➤ 全体の傾向として、解析結果及び水理実験結果共に、無次元ライズタイムが大きくなるにしたがい、 $\eta_{max}/dy$  が小さくなる傾向があることが分かったが、 $\eta_{max}/dy$  は、解析結果の方が水理実験結果より全体的に低く、その差は、無次元ライズタイムが小さくなる程顕著になっている。



# 解析結果と実験結果の差の要因について

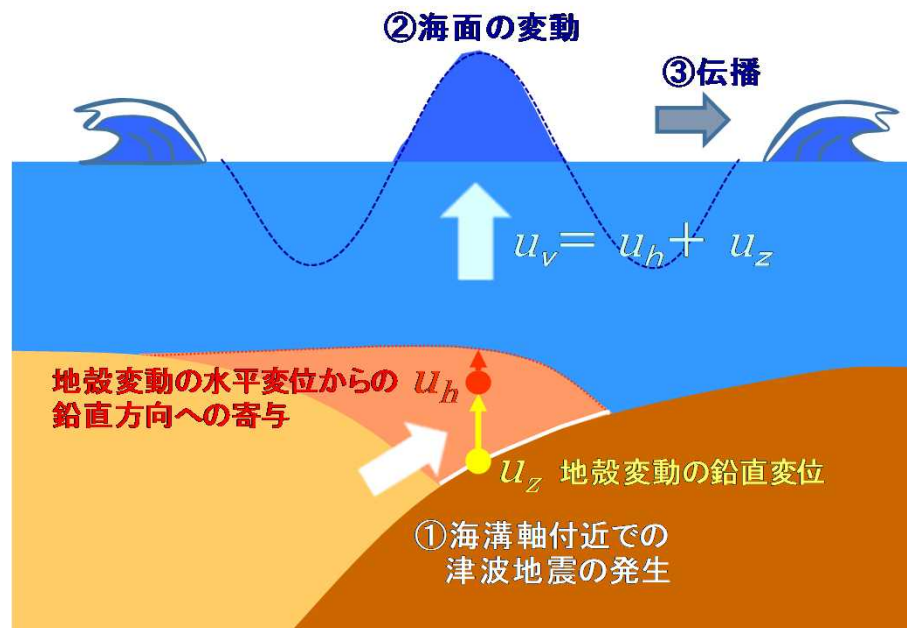
現在の解析方法に取り入れられていない効果

津波の初期水位の設定方法について

- 斜面の摩擦、流体の粘性による影響

⇒

- 実験スケールでの三次元解析を実施し、水位に影響を与えるパラメータの検討
- 実スケールでの津波生成モデルの改良を検討





## 結論

- TS法を用いた解析及び海底の地殻変動の水平変位を模擬した水理実験によって水平変位による寄与分の津波水位への影響の主な特徴を把握した。
- 解析及び水理実験を実施した結果、水位が大きくなるcaseは水深が浅く、かつ速度が大きい場合であった。また、津波の最大水位を説明できるパラメータとして無次元ライズタイムが考えられる。
- 解析と水理実験の結果から、(1)最大水位、(2)解析では地殻変動の水平変位による海底面の鉛直変位への寄与分が水位として現れるまでの時間差、(3)実験では  $\eta_{\max}/dy$  が1を超えるという違いがあることが分かった。
- 水位の違いについては、斜面の摩擦、流体の粘性の影響等が考えられるため、今後実験スケールでの三次元解析を実施し、水位に影響を与えるパラメータの検討する。

## 今後の課題

- 実スケールでの津波生成モデルの改良を検討する。
- TS法を踏まえた「水平変位による寄与分を考慮した特性化波源モデルの設定方法」を提案する。



## 参考文献

---

1. 道口陽子、三戸部佑太、杉野英治、田中仁、“地殻変動の水平変位による津波初期水位への影響に関する実験的検討”、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol. 75、No. 2、I\_343-I\_348、2019.
2. Michiguchi, Y., Mitobe, Y., Sugino, H. and Tanaka, H., “Comparative Study of Experiments and Analyses on Tsunami Generation by Horizontal Crustal Deformation”, 17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE), 2020.
3. 地震調査研究推進本部地震調査委員会、“波源断層を特性化した津波の予測手法(津波レシピ)”、2017.
4. Tanioka, Y. and Satake, K., “Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom”, Geophysical Research Letters, Vol. 23, No. 8, pp.861–864, 1996.
5. 杉野英治、岩渕洋子、橋本紀彦、松末和之、蛭沢勝三、亀田弘行、今村文彦、“プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案”、日本地震工学会論文集、Vol. 14、No. 5、2014.
6. Kajiura, K., “Tsunami source, Energy and the directivity of wave radiation”, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 48, pp.835–869, 1970.