

ブラインドコンテストを通じて得られた 津波シミュレーション技術に関する知見

Nanyang Technological University 渡部真史

(一財)電力中央研究所 木原直人

中央大学 有川太郎



背景



- ・2011年東北沖地震津波では、多大な犠牲者が生じ、多くもの構造物が津波によって破壊された(e.g., Suppasri et al, 2013).
- ・この災害から、将来的な津波防災・減災のために、津波の遡上とその被害を予測することの重要性が示唆された。

ブラインドコンテストの目的



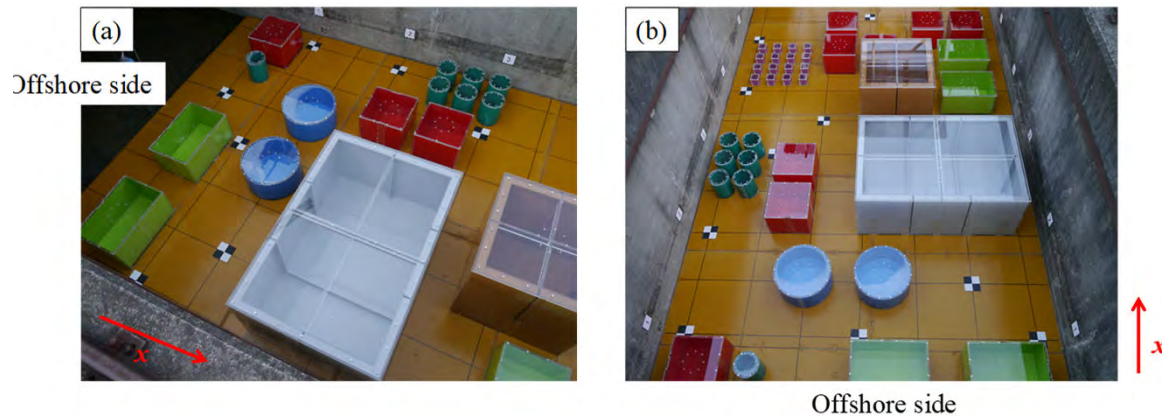
・津波の遡上とその影響を評価するために、これまで多くの数値計算モデルが開発されてきた。しかし、それらの精度を直接的に比較し、検証した事例は存在しない。
→そこで、第17回世界地震工学会(17WCEE)で、津波遡上と津波影響に関するブラインドコンテストを開催した (Arikawa et al., 2021).

ブラインドコンテストの概要・ルール

- ・コンテスト参加者は個人もしくは複数人から成るチームとする。
- ・参加者は種類の津波波形(Tsunami A, B)と造波板の変位のみから、実験値の水位、流速、浸水深、構造物に作用する波力を評価することを求められる。
- ・参加者は解析方法を任意に決めることができ、コンテストの締め切りまでに、
計算結果と解析方法などをまとめたtechnical report
をコンテスト事務局までに提出することが求められる。
- ・提出された解析結果の精度はコンテスト事務局によって評価され、
現状の津波数値計算モデルの精度を検証した。
- ・コンテスト参加者は答えを知らない。
→計算値を実験値と一致させるためのパラメータ調整ができない。

水路実験

水路内に設置された模型(Kihara et al. 2021)



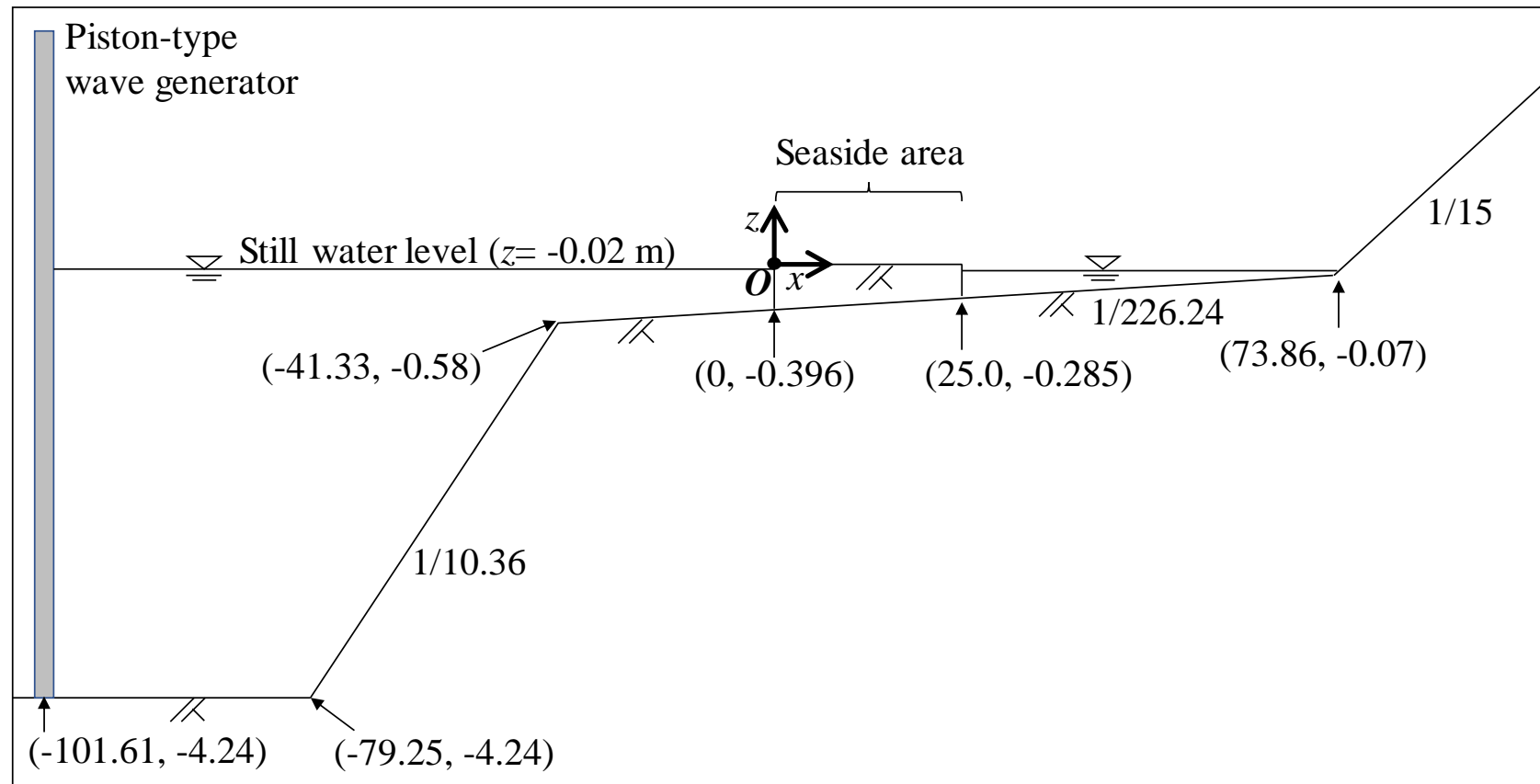
17WCEE The 1st Tsunami Blind Prediction Contest
(URL; <https://sites.google.com/view/wcee2019/english>)

・ブラインドコンテストに使用する検証データとして、電力中央研究所の大型造波水路で行われた水路実験結果を使用した。実験は1/50のスケールで実施され、津波の波高、流速、浸水深、波力が計測された (Kihara et al., 2021).

水路実験

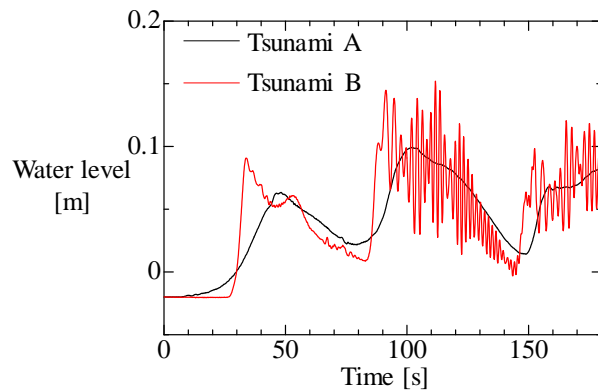
実験水路の全体図

図面はKihara et al. (2021)から一部修正後に転載

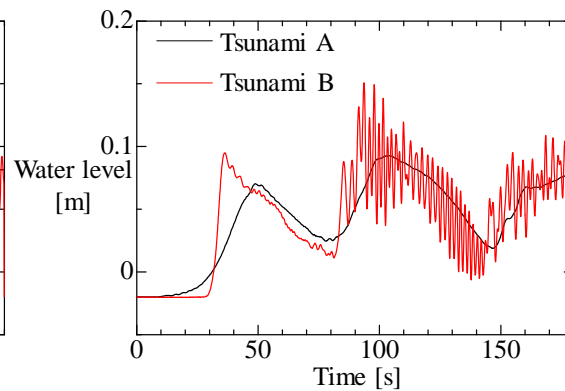


Tsunami A、Tsunami Bの入射波形

(a) WG1



(b) WG2

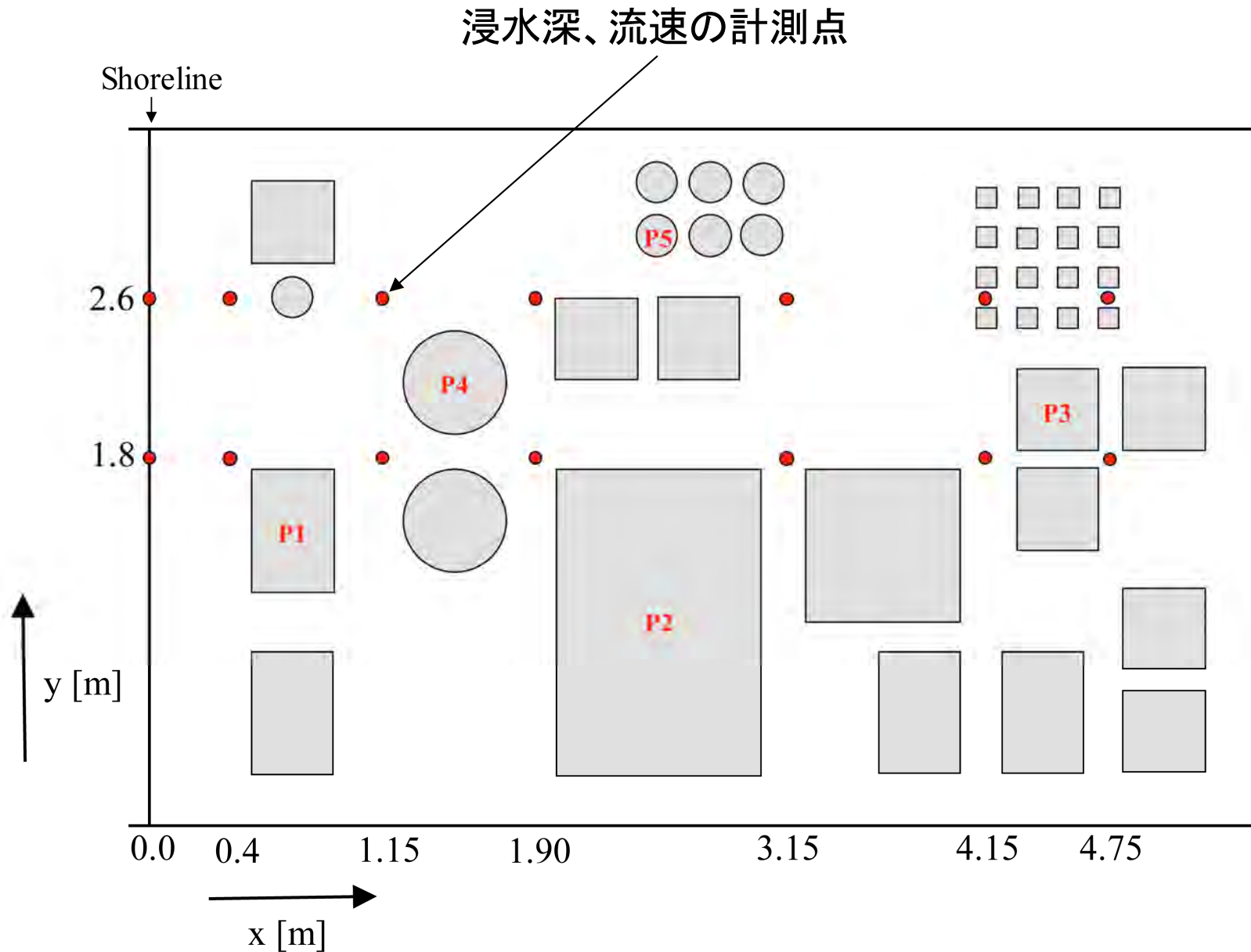


水位計測点の位置

計測点	x [m]	y [m]
WG1	-91.88	1.70
WG2	-78.52	1.70
WG3	-41.54	1.70
WG4	-30.00	1.70
WG5	-20.00	1.70
WG6	-10.00	1.70
WG7	-5.00	1.70
WG8	0.00	1.70

水路実験

図面はKihara et al. (2021)から転載

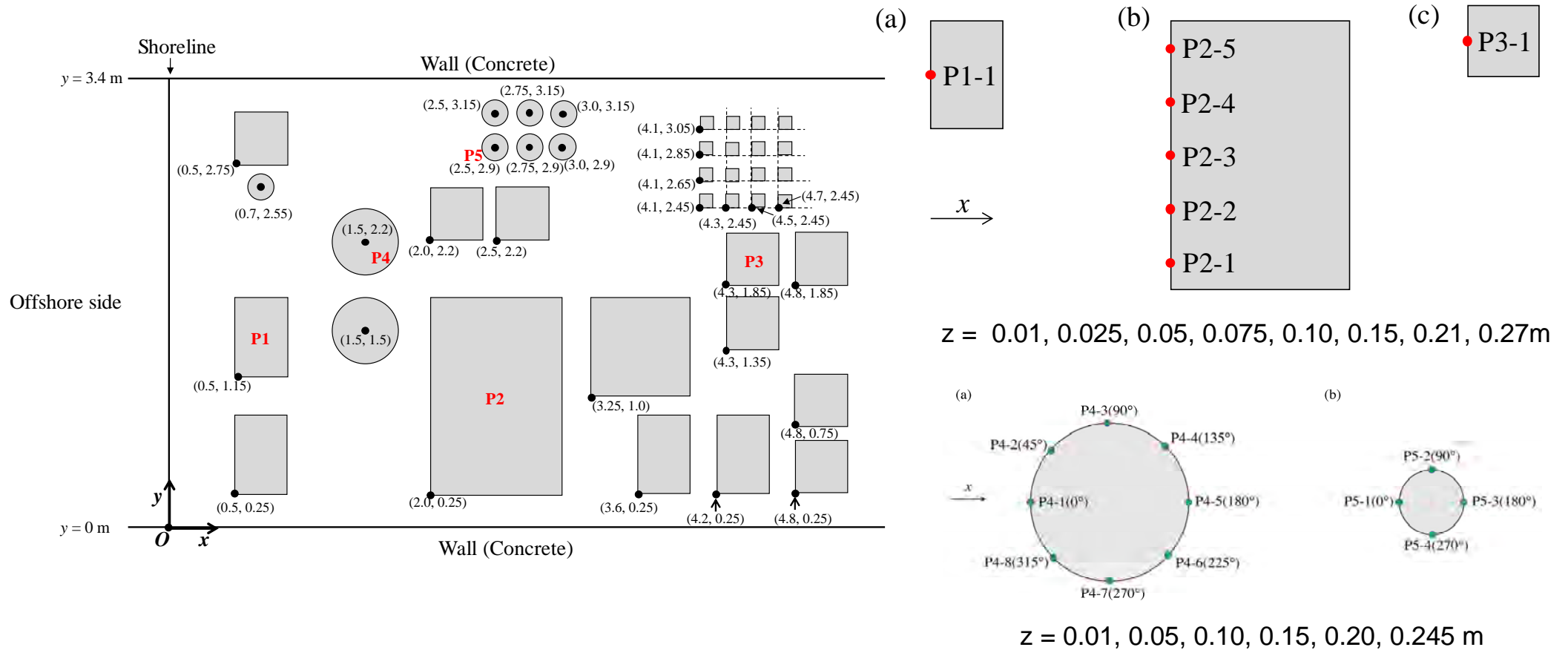


実験では、合計14点で浸水深、流速を実験で観測した。

水路実験

図面はKihara et al. (2021)から転載

津波波圧の観測点 (P1, P2, P3, P4, P5)



P1, P2, P3, P4, P5の構造物の前面、周囲で津波波圧を観測した。

実験映像(Tsunami A)



実験映像(Tsunami B)

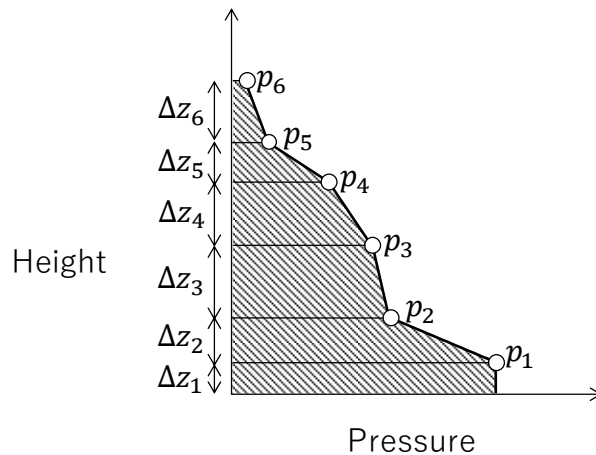


計算結果の分析方法

図面はKihara et al. (2021)から転載

- 全体分析; 全モデルを対象に全地点での最大水位、最大流速、最大浸水深、最大波力を計算値と実験値で比較をした。
- 詳細分析; 3次元流体計算モデル、非線形長波モデル、Boussinesqモデルで O/C (=計算値/実測値), K 値, κ 値, $RMSE$ 値を算出。

$$F = p_1 \Delta z_1 + \frac{1}{2} (p_1 + p_2) \Delta z_2 + \frac{1}{2} (p_2 + p_3) \Delta z_3 + \cdots + \frac{1}{2} (p_{n-1} + p_n) \Delta z_n$$



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O - C)^2}$$

$$\log(K) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{O}{C}\right)$$

$$\log(\kappa) = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\log\left(\frac{O}{C}\right) \right)^2 - n(\ln K)^2 \right\} \right]^{1/2}$$

O; 観測値, C; 計算値, n; データ数

全体分析に使用したデータ

使用モデル	3次元非圧縮性流体計算モデル	3次元圧縮性流体計算モデル	非線型長波モデル	SPHモデル	3次元非静水圧モデル	3次元静水圧モデル	ビジネスモデル
計算ケース	23	1	8	3	1	1	1
解像度 (m) (x, y, z)	0.006-0.10, 0.006-0.10, 0.005-0.25	0.006-0.10, 0.006-0.10, 0.005-0.25	0.005-0.05, 0.005-0.05	Particle diameter; 0.01-0.06 m	0.02, 0.02, 0.05-0.15	0.02, 0.02, 0.05-0.15	0.02, 0.02
乱流モデル	Laminar, LES (Smagorinsky model, dynamic k equation model), RANS (k- ϵ model, k- ω model)	LES (Smagorinsky model)	-	Eddy viscosity model	-	-	-
Free surface	VOF method	VOF method	-	-	-	-	-
Wall boundary	Velocity; Spalding formula, Neumann condition, No Slip Pressure; Neumann condition, Dirichlet condition, Fixed Flux	Velocity; No Slip Pressure; Fixed Flux	-	Fixed wall ghost particle (FWGP) approach	-	-	-
底面摩擦	-	-	Manning's roughness coefficient (0.009-0.015 s/m ^{1/3})	-	-	-	Manning's roughness coefficient (land: 0.01 s/m ^{1/3} , offshore: 0.01 s/m ^{1/3})
圧力の計算方法	-	-	Arimitsu et al. (2012)	-	-	-	Arimitsu et al. (2012)

Watanabe et al. (2022)から一部修正後に転載

ブラインドテストの参加者は個人参加者, チーム参加者の合計14組であり, 合計38ケースの計算結果を集計することができた。

詳細分析に使用したデータ

使用モデル	3次元圧縮性/非圧縮性流体計算モデル (3次元モデル)	非線型長波モデル	ブジネスクモデル
計算ケース	19	8	1
解像度 (m) (x, y, z)	0.006-0.10, 0.006-0.10, 0.005-0.25	0.005-0.05, 0.005-0.05	0.02, 0.02
乱流モデル	Laminar, LES (Smagorinsky model, dynamic k equation model), RANS (k - ϵ model, k - ω model)	-	-
Free surface	VOF method	-	-
Wall boundary	Velocity; Spalding formula, Neumann condition, No Slip Pressure; Neumann condition, Dirichlet condition, Fixed Flux		
底面摩擦	-	Manning's roughness coefficient (0.009-0.015 s/m ^{1/3})	Manning's roughness coefficient (land: 0.01 s/m ^{1/3} , offhore: 0.01 s/m ^{1/3})
圧力の計算方法	-	Arimitsu et al. (2012)	Arimitsu et al. (2012)

Watanabe et al. (2022)から一部修正後に転載

詳細解析は、3次元流体計算モデル、非線型長波モデル、ブジネスクモデルで、かつ計算値が概ね実験値に一致しているケースを対象とした。

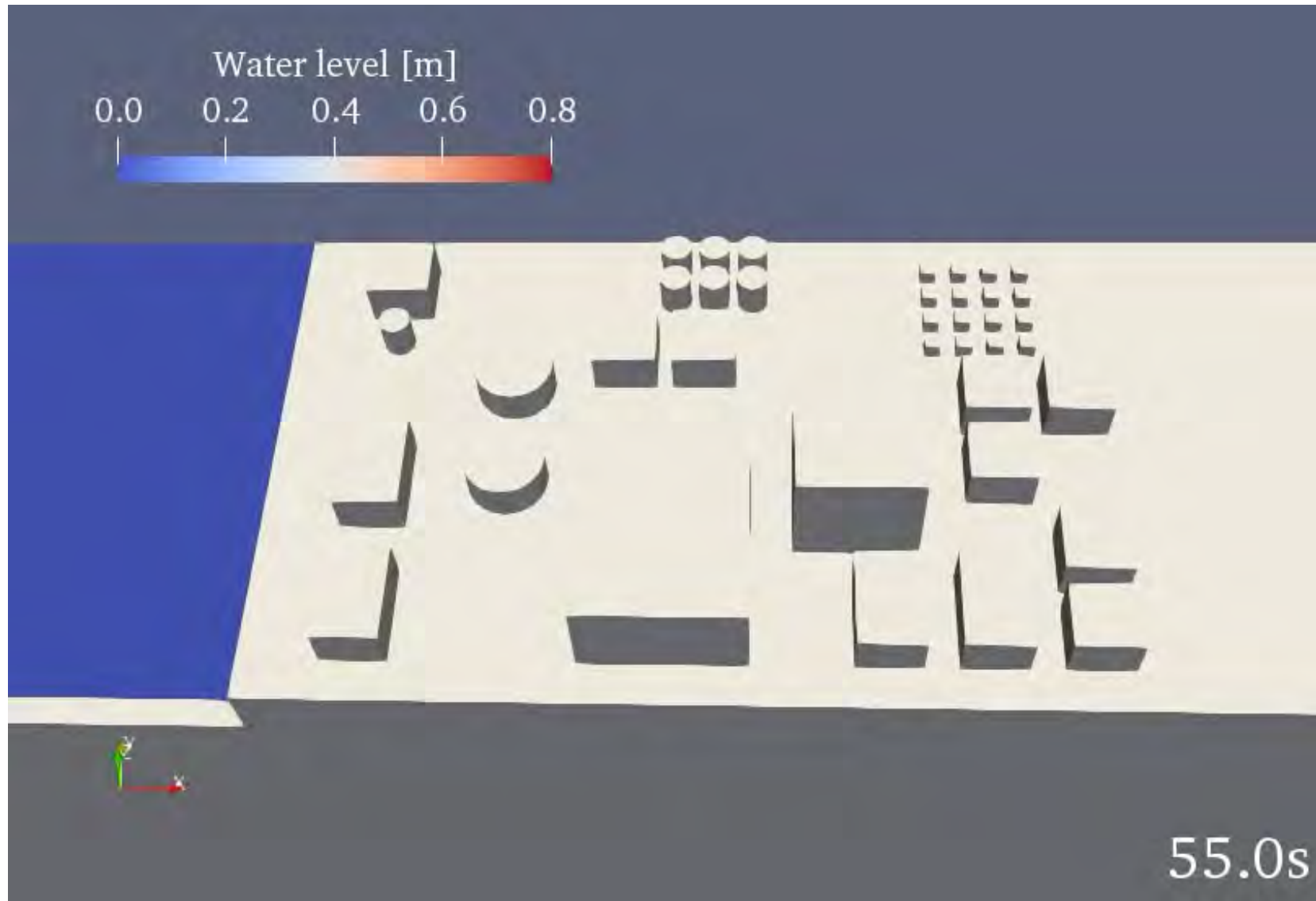
実験の再現計算の例(Kihara et al., 2020)

対象ケース; Tsunami B

数値計算モデル; OpenFOAM(Solver: interIsoFoam)

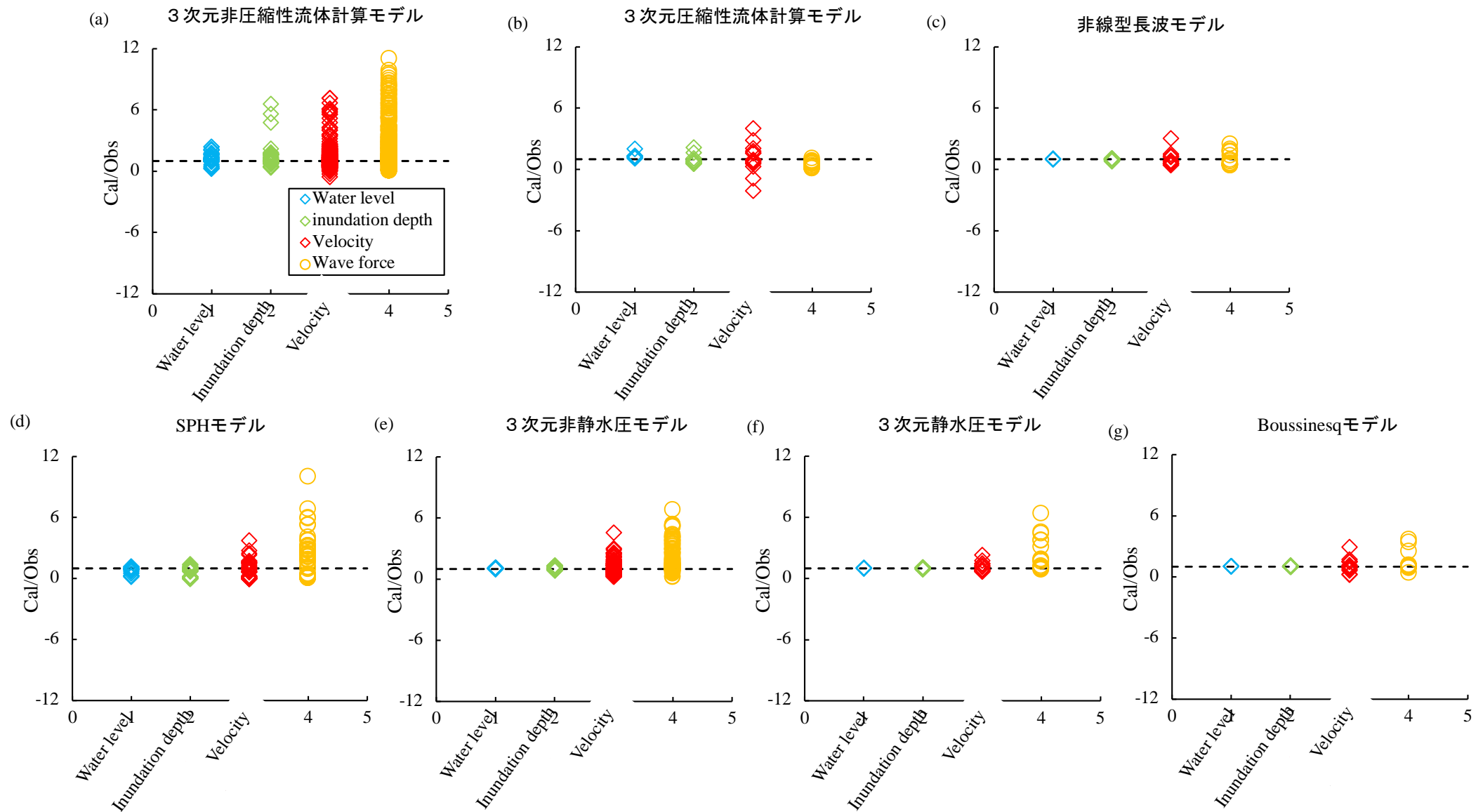
乱流モデル; stabilizing k - ω SST model(Larsen et al., 2018)

計算格子: 0.02 m (x, y方向), 0.01 m (z方向)



全体分析の結果(Tsunami A)

図面はWatanabe et al. (2022)から修正後に転載

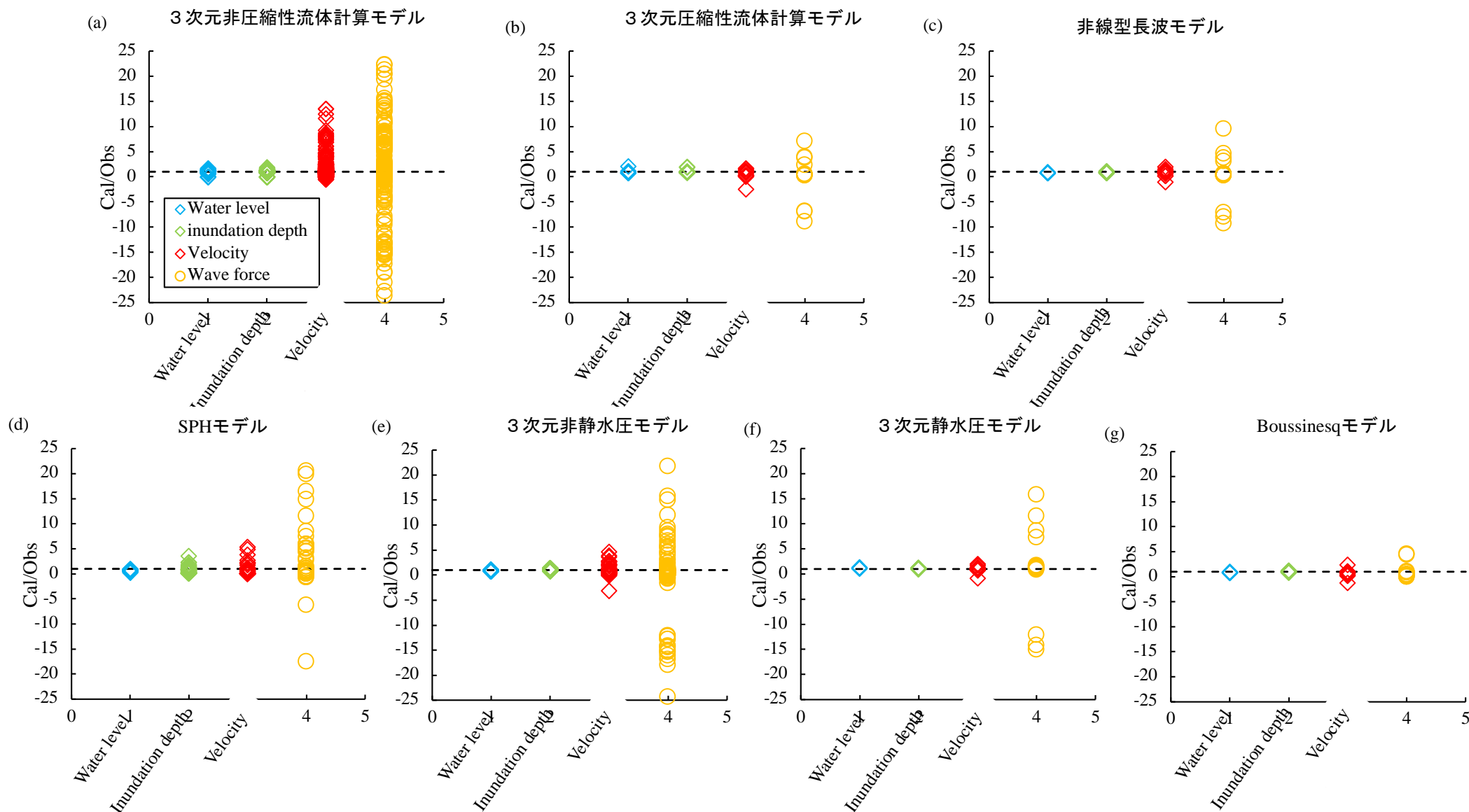


計算ケースにもよるが、3次元非圧縮性モデル、SPHモデルで計算値/実測値のばらつきが大きい。非線形長波モデルのばらつきは小さい。

全体分析の結果(Tsunami B)

Tsunami B

図面はWatanabe et al. (2022)から修正後に転載

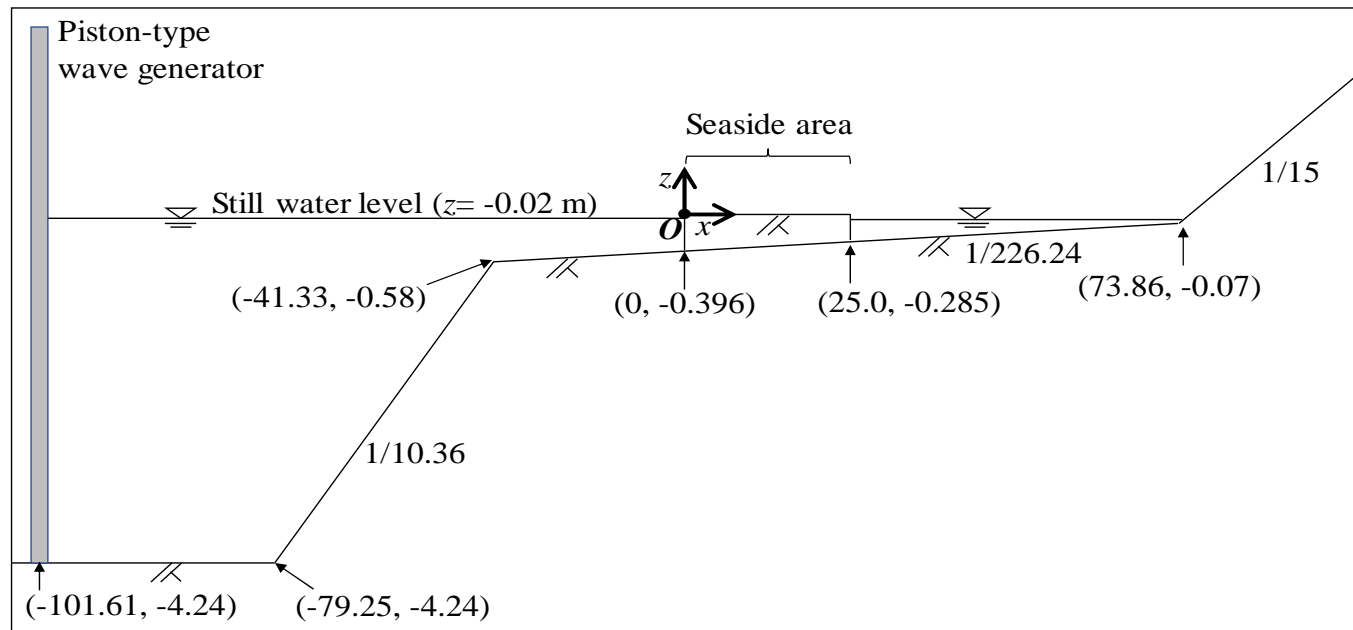


TsunamiBでも同様に、3次元非圧縮性モデルとSPHモデルで計算値/実測値のばらつきが大きい。非線形長波モデルのばらつきは小さい。

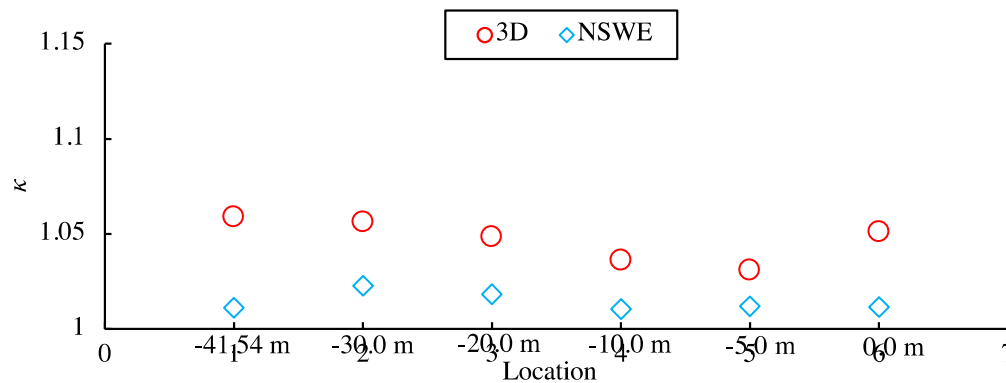
詳細分析の結果(水位)

3D; 3次元圧縮/非圧縮性流体計算モデル
NSWE; 非線形長波モデル

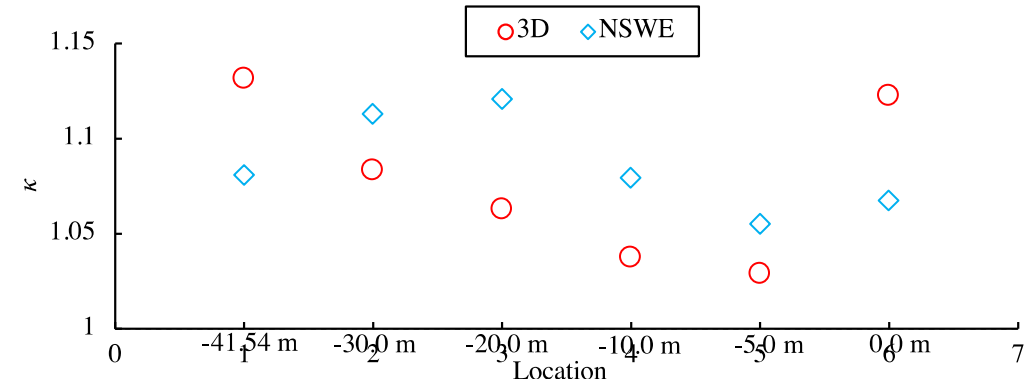
図面はKihara et al. (2021)、Watanabe et al. (2022)から転載



Tsunami Aの水位の κ 値



Tsunami Bの水位の κ 値

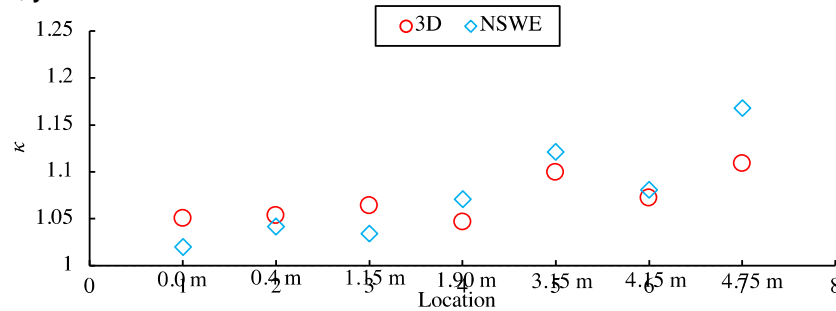


ソリトン分裂が発生しているTsunami Bでは、3次元モデルの方が
非線形長波モデルよりも高精度に予測ができています。

詳細分析の結果(浸水深)

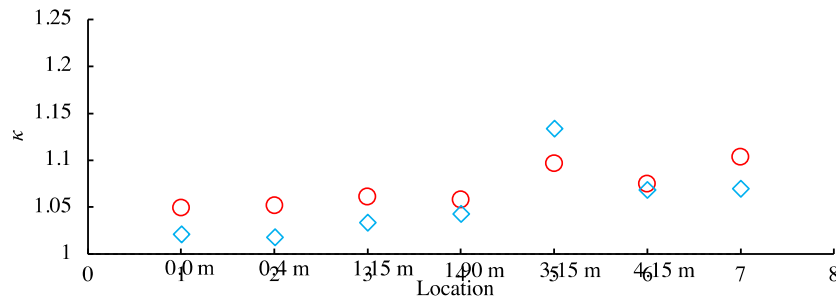
3D; 3次元圧縮/非圧縮性流体計算モデル, NSW; 非線形長波モデル

tsunami A, $y = 1.8$ m地点

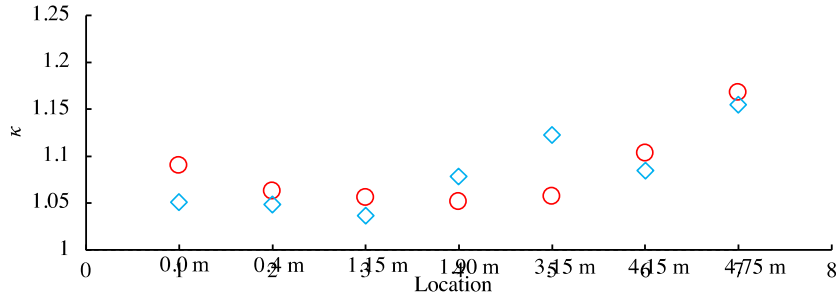


図面はKihara et al. (2021)、Watanabe et al. (2022)から転載

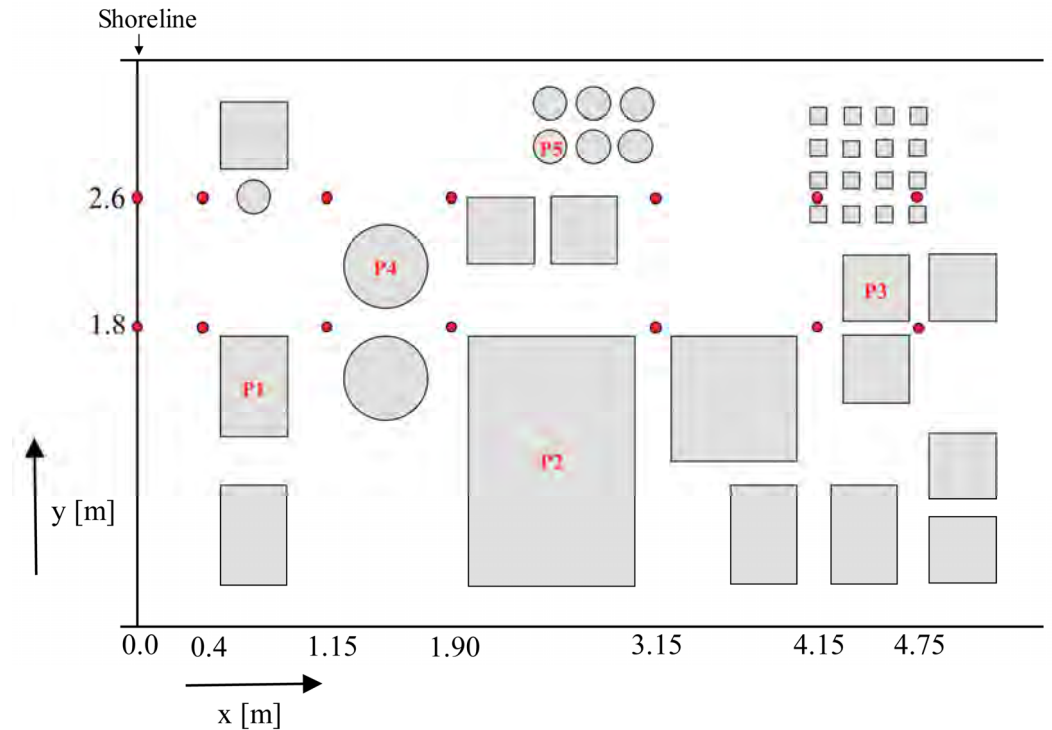
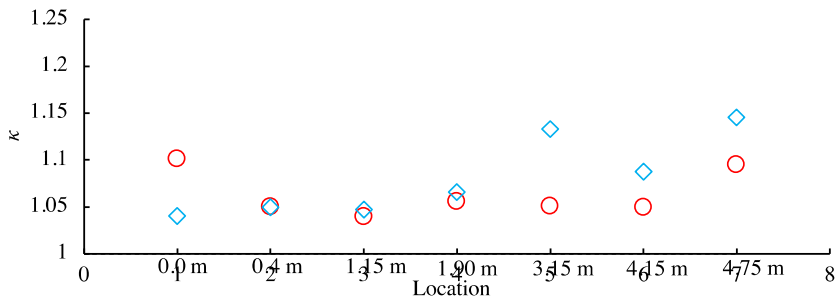
tsunami A, $y = 2.6$ m地点



tsunami B, $y = 1.8$ m地点



tsunami B, $y = 2.6$ m地点

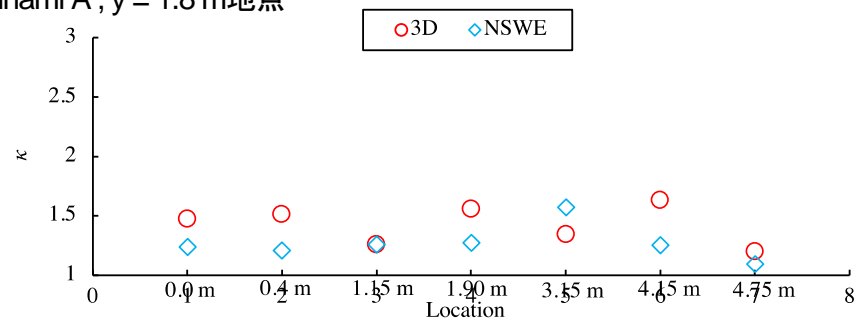


浸水深に関しては、建物間の津波遡上は3次元的な現象であるため、3次元モデルの方が非線形長波モデルよりも精度が良い。

詳細分析の結果(流速)

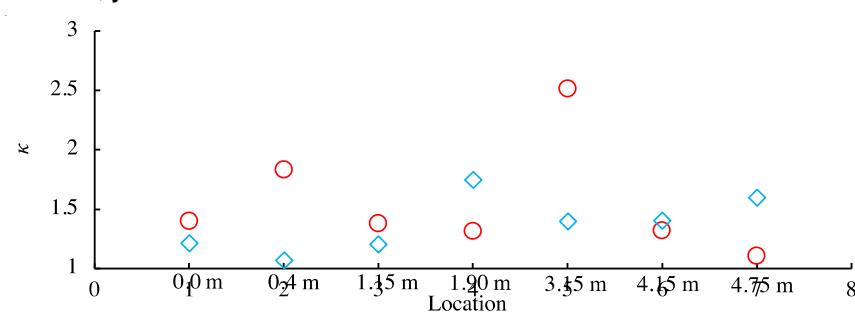
3D; 3次元圧縮/非圧縮性流体計算モデル, NSWE; 非線形長波モデル

tsunami A, $y = 1.8$ m地点

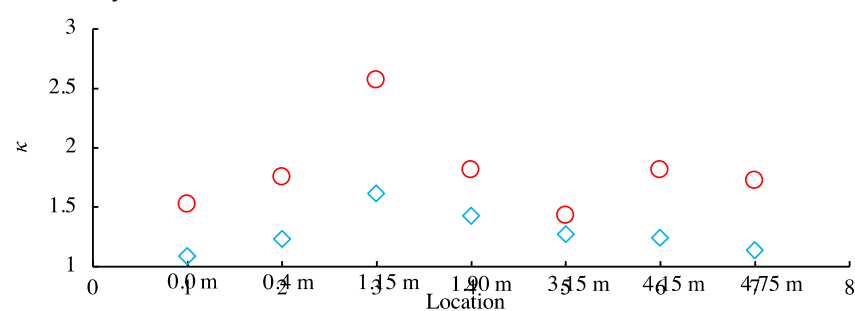


図面はKihara et al. (2021)、Watanabe et al. (2022)から転載

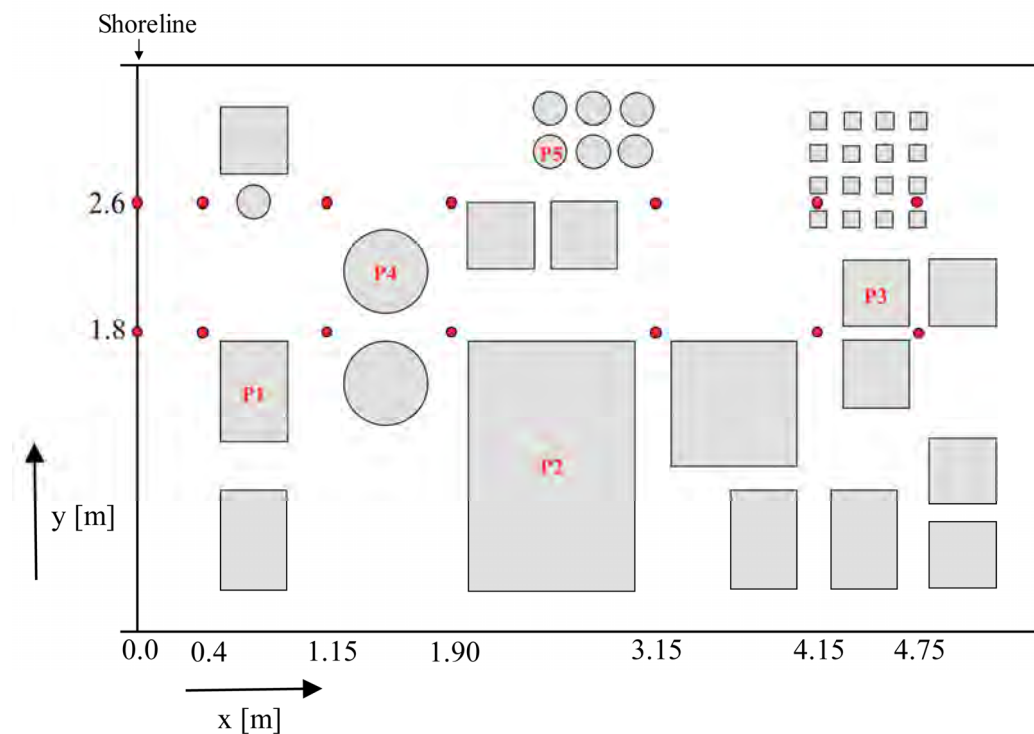
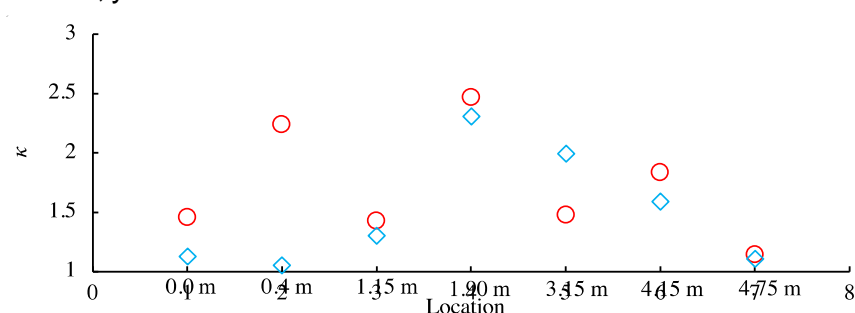
tsunami A, $y = 2.6$ m地点



tsunami B, $y = 1.8$ m地点



tsunami B, $y = 2.6$ m地点

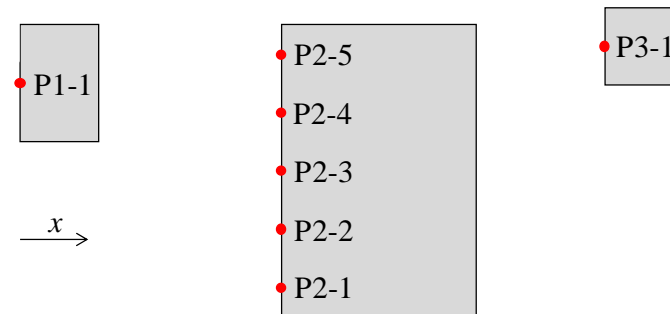
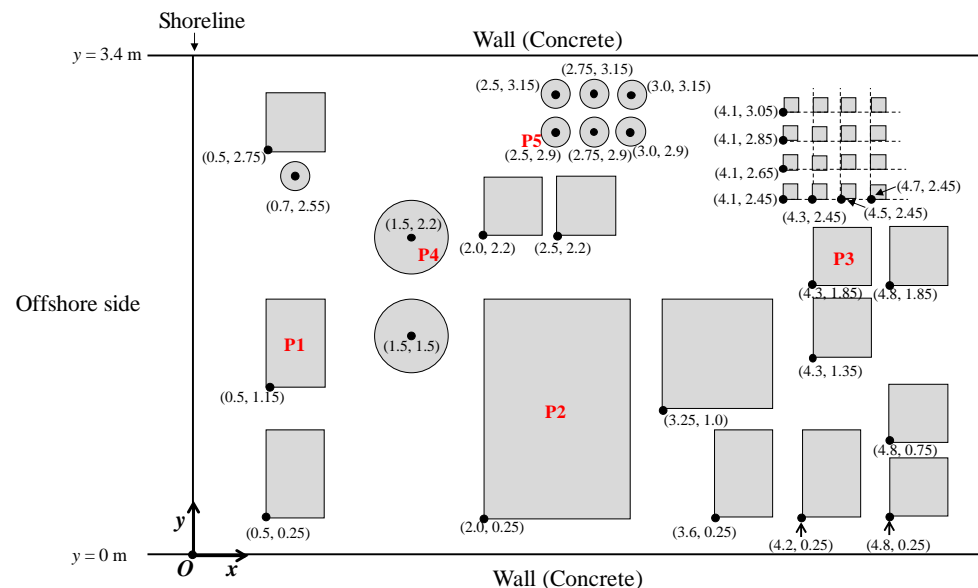
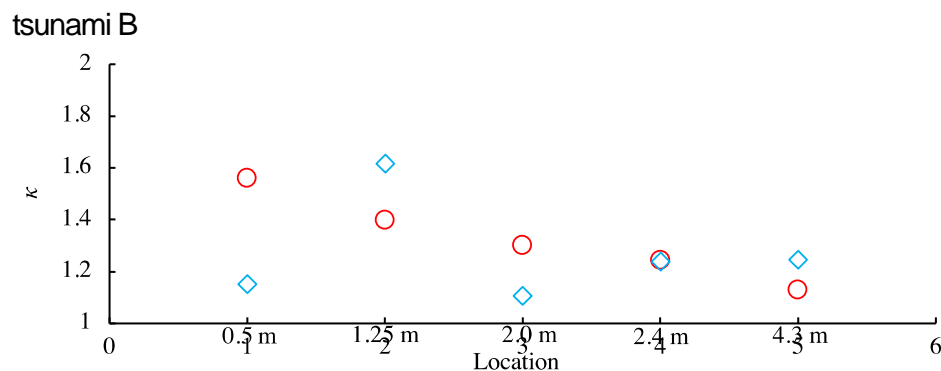
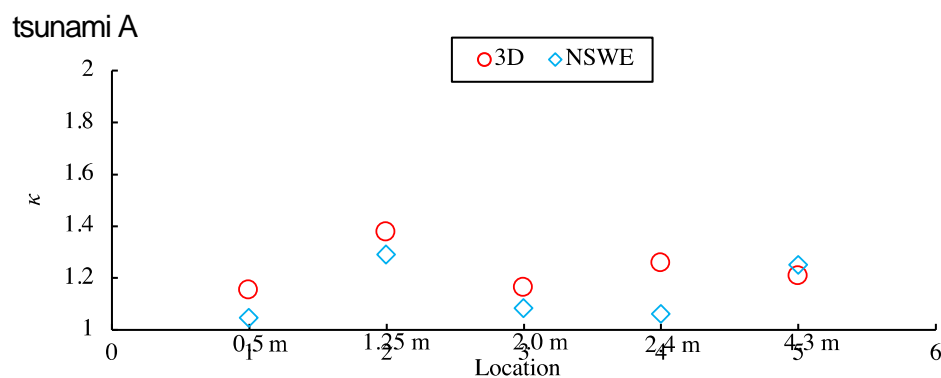


陸上部の流速値に関しては、非線形長波モデルの方が3次元モデルよりも精度が良い。

詳細分析の結果(波力)

3D; 3次元圧縮/非圧縮性流体計算モデル, NSWE; 非線形長波モデル

図面はKihara et al. (2021)、Watanabe et al. (2022)から転載

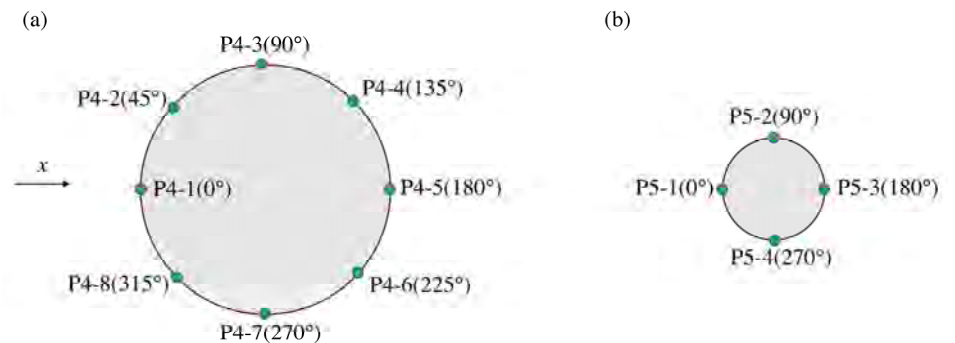
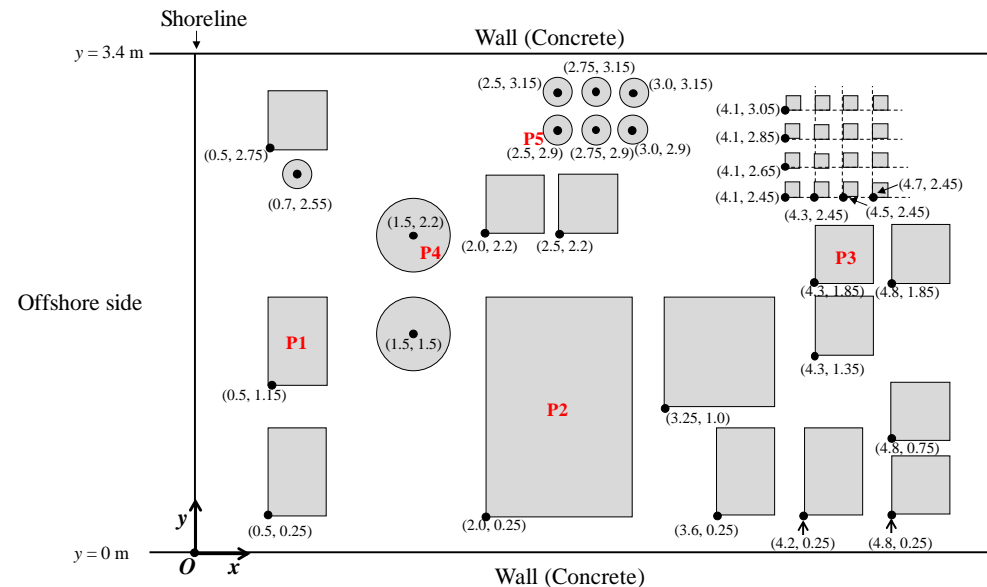
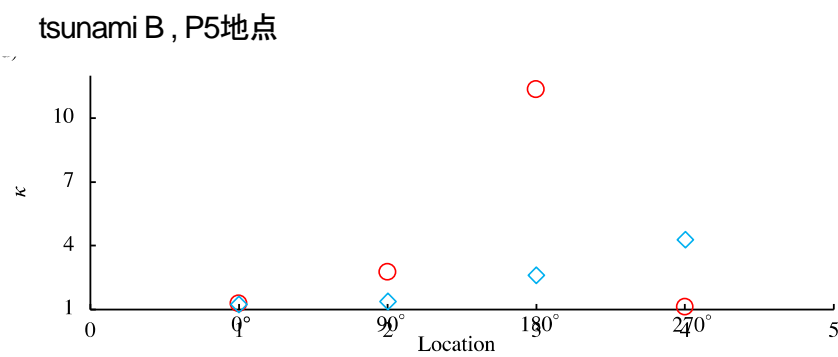
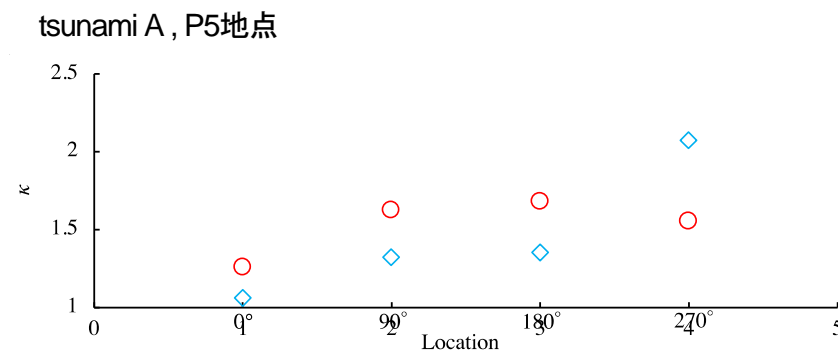
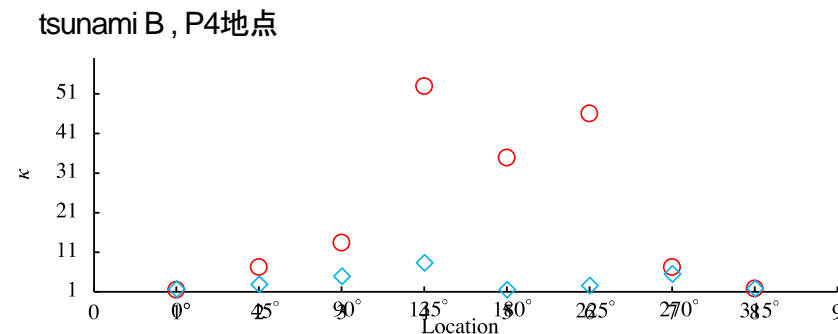
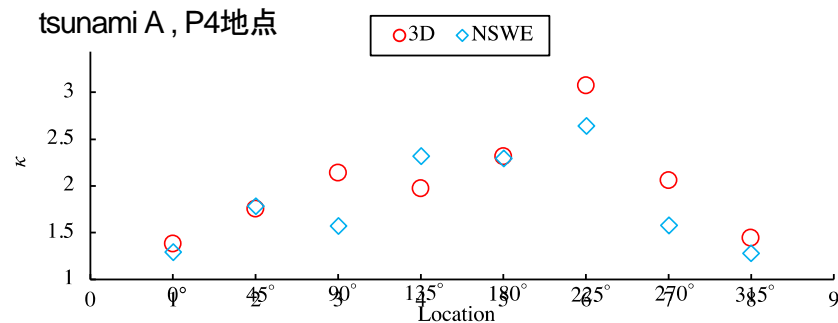


海岸線からの距離と波力の κ 値との関係性を算出した結果、構造物前面の波力は非線形長波モデルの方が3次元モデルよりも、ばらつきは小さい

詳細分析の結果(波力, 円柱周り)

3D; 3次元圧縮/非圧縮性流体計算モデル, NSWE; 非線形長波モデル

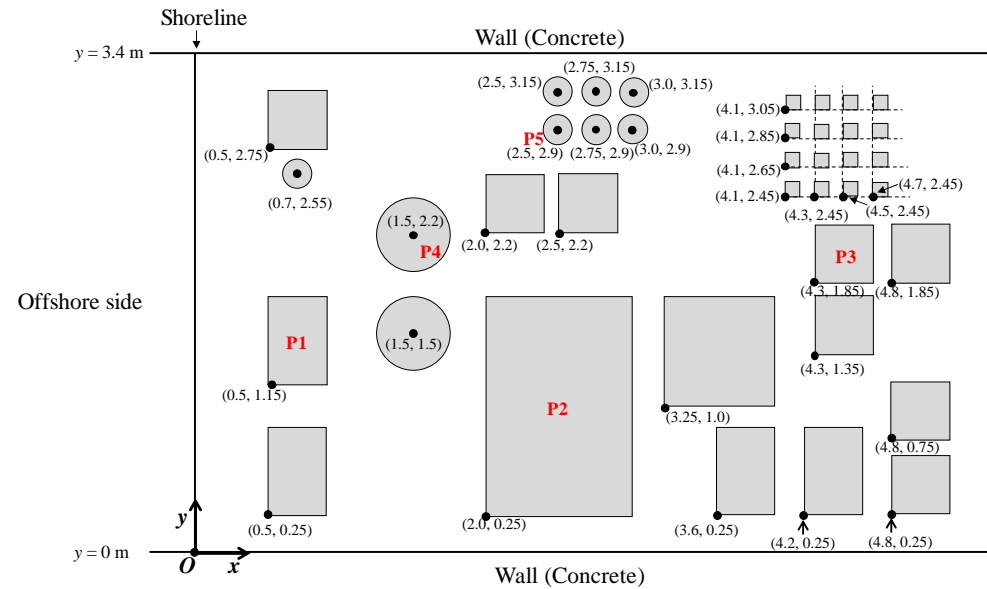
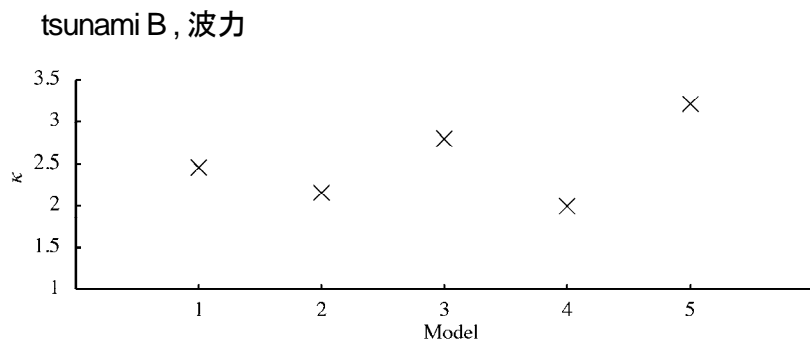
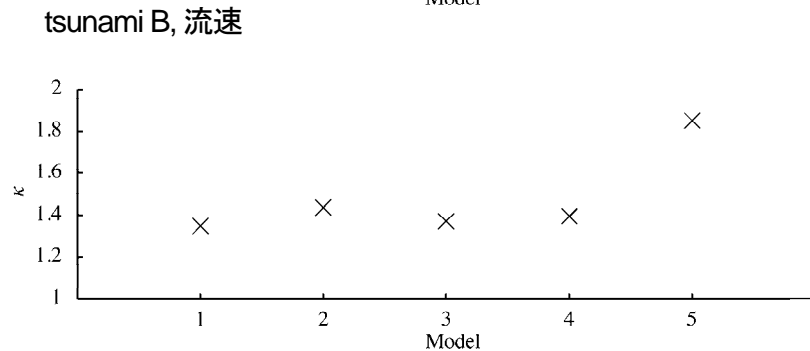
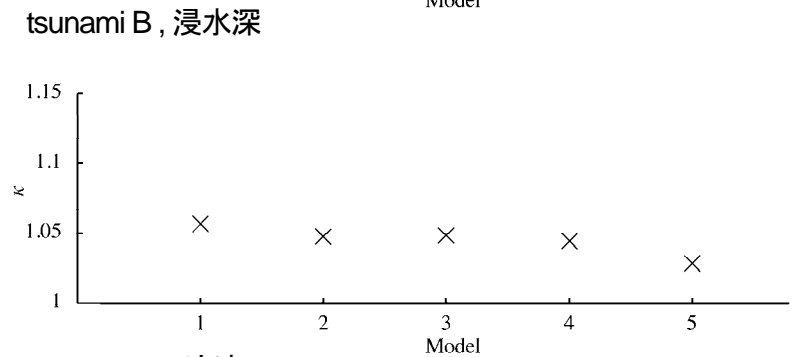
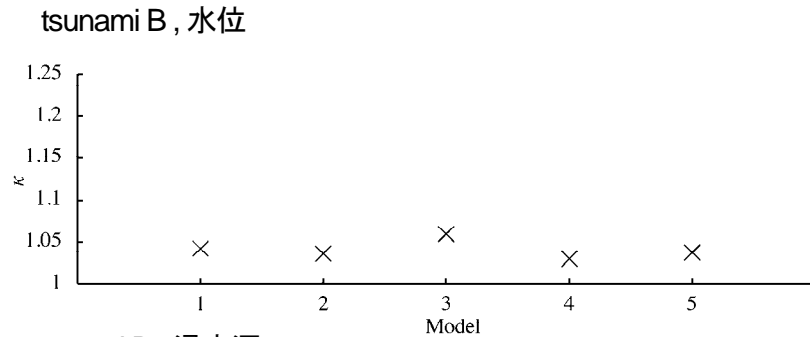
図面はKihara et al. (2021)、Watanabe et al. (2022)から転載



円柱構造物周りの波力は非線形長波モデルの方が3次元モデルよりも精度が良い。

詳細分析の結果(乱流モデル)

図面はKihara et al. (2021)、Watanabe et al. (2022)から転載



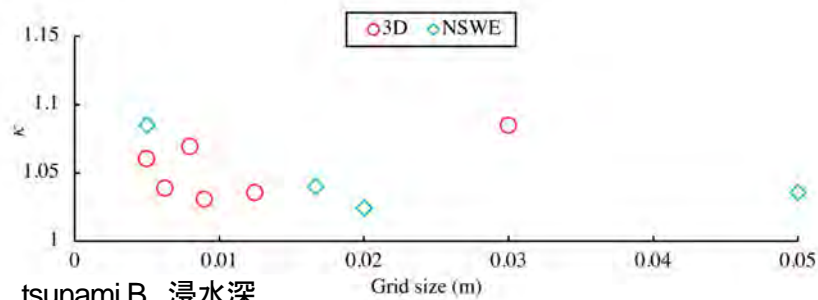
- 1; 層流
- 2; dynamic k equation model (LES)
- 3; Smagorinsky model (LES)
- 4; standard k- ϵ model (RANS)
- 5; stabilized k- ω (RANS)

LESモデルではdynamic k equation model、
RANSモデルではstandard k- ϵ modelの方が
波力のばらつきは小さい。

詳細分析の結果(計算格子間隔)

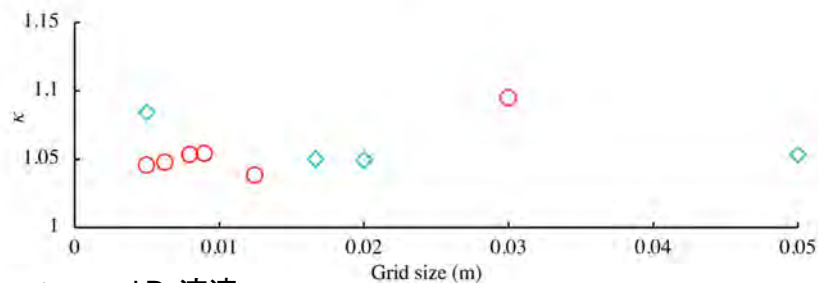
3D; 3次元圧縮/非圧縮性流体計算モデル, NSWE; 非線形長波モデル

tsunami B, 水位

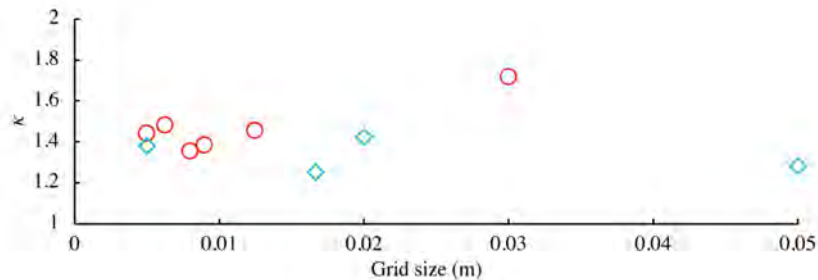


図面はKihara et al. (2021)、Watanabe et al. (2022)から転載

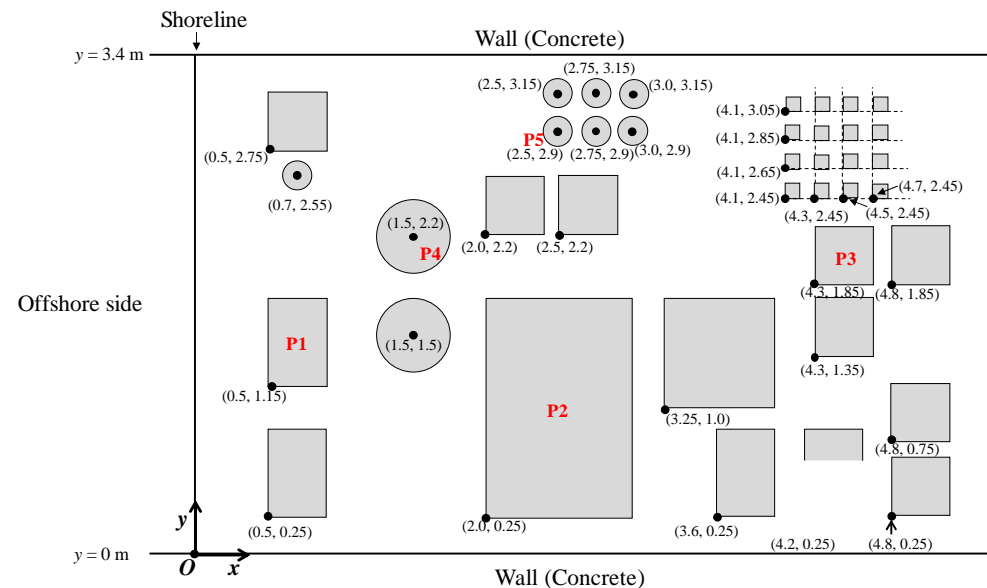
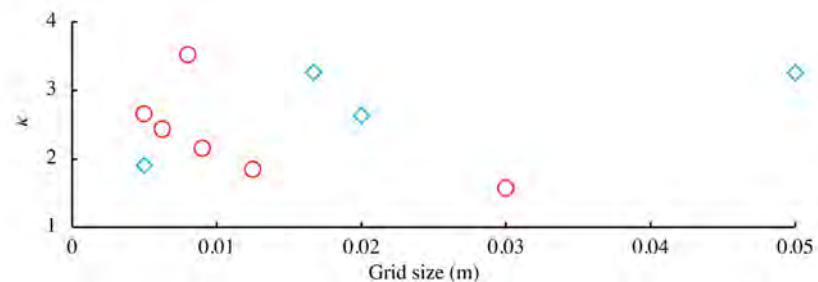
tsunami B, 浸水深



tsunami B, 流速



tsunami B, 波力



計算格子が小さければ、
κ値が小さくなる関係性は見えない。
→計算精度は計算格子のみで、決まらない。

ブラインドテストを通じて得られた知見

- ・ ソリトン分裂が発生したときの津波の水位の再現性は、非線型長波モデルよりも3次元モデルの方が精度は高い。
- ・ 陸上部における津波の浸水深については、構造物間の浸水は3次元的な問題であることから、非線型長波モデルよりも3次元モデルの方が予測精度は高い。
- ・ 陸上部の建物に作用する波力や建物間の速度値の再現性は非線型長波モデルが最も高精度であった。衝撃波圧が生じている津波波力に関しても、非線型長波モデルの予測精度が3次元モデルよりも高い。
- ・ 背後構造物の波力の計算値のばらつきも、3次元モデルの方が非線型長波モデルより有意に大きかった。

今後の課題

- 3次元モデルやSPHモデルのような波力を直接解くことができる数値計算モデルのさらなる開発と精度の向上。
- 津波波形や波力を高精度に再現可能な入力パラメータの検証。

ブランドコンテストを通じて得られた成果

ブランドコンテストの全体内容・結果を記載した論文

・ Arikawa, T., Kihara, N., Watanabe, M., Tsurudome, C., Hasebe, M., Shigihara, Y., Asai, T., Ikeya, T., Inoue, S., Matsutomi, H., Nakano, Y., Okuda, Y., Okuno, S., Ooie, T., Shoji, G., Tateno, T., 2021, BLIND PREDICTION CONTEST FOR TSUNAMI INUNDATION AND IMPACT. *Proceeding of 17th World Conference on Earthquake Engineering 2021*, Sendai, September.

ブランドコンテストの検証データとした水路実験に関する論文

・ Kihara, N., Arikawa, T., Asai, T., Hasebe, M., Ikeyae, T., Inoue, S., Kaida, H., Matsutomi, H., Nakano, Y., Okuda, Y., Okuno, S., Ooie, T., Shigihara, Y., Shoji, G., Tateno, T., Tsurudome, C., Watanabe, M., 2021, A physical model of tsunami inundation and wave pressures for an idealized coastal industrial site. *Coastal Engineering*, **169**, 103970.

*ブラインドコンテストのHP(ルール, スケジュール, 受賞者などの詳細が記載されています。)

<https://sites.google.com/view/wcee2019>

ブランドコンテストを通じて得られた成果

ブランドコンテストで集計した計算結果の分析に関する論文

・ Watanabe, M., Arikawa, T., Kihara, N., Tsurudome, C., Hosaka, K., Kimura, T., Hashimoto, T., Ishihara, F., Shikata, T., Morikawa, D.S., Makino, T., Asai, M., Chida, Y., Ohnishi, Y., Marras, S., Mukherjee, A., Cajas, J.C., Houzeaux, G., Paolo, B.D., Lara, J.L., Barajas, G., Losada, Í. L., Hasebe, M., Shigihara, Y., Asai, T., Ikeya, T., Inoue, S., Matsutomi, H., Nakano, Y., Okuda, Y., Okuno, S., Ooie, T., Shoji, G., Tatenno, T., 2022, Validation of tsunami numerical simulation models for an idealized coastal industrial site. *Coastal Engineering Journal*, **64(2)**, 302-343.

*著者順； ブラインドコンテスト主催者，ブラインドコンテスト参加者，津波荷重の評価技術と体系化の心得に関する研究委員会委員

ブラインドコンテスト主催者

Chair; 有川太郎, 中央大学

Co-Chair; 木原直人, (一財)電力中央研究所

Secretariat: 渡部真史, 中央大学 (現所属； Nanyang Technological University)

Secretariat; 鶴留千晶, (一財)電力中央研究所

ブランドコンテストに参加してくださった方々

個人参加者

氏名	所属
Daniel Shiguelo Morikawa	Kyushu University
Fumitaka Ishihara	UNIC Corporation
Taiga Makino	Kyushu University
Tatsuto Kimura	Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.
Yoshinori Shigihara	National Defense Academy
Yu Chida	Port and Airport Research Institute

チーム参加者

チーム名	所属
AdvanceSoft Corporation	AdvanceSoft Corporation
ID21-IHCantabria	IHCantabria- Institute de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria
NJC	Newjec Inc.
NJIT-UNAM-BSC	ENES- Unidad Mérida, Universidad Nacional Autónoma de México, New Jersey Institute of Technology, New Jersey Institute of Technology, Barcelona Supercomputing Center
Taisei Corporation	Taisei Corporation
Yachiyo	Yachiyo Engineering Co., Ltd.

上記のブラインドコンテストの個人・チーム参加者の方々が計算データをご提供くださったおかげで、本成果を得ることができました。記して感謝を申し上げます。