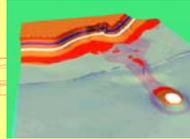
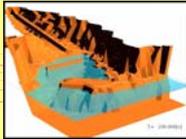


これからの津波挙動予測 —東日本大震災の経験を踏まえて—



京都大学防災研究所
米山 望

東日本大震災からの教訓

- 大量の放射能放出は、津波が原因か？
 - 津波が電源喪失等を引き起こしたのは恐らく事実。
 - 電源喪失から放射能大量放出に至る過程において、防ぐ手立てがなかったのかについては、調査中（？）
- しかし、津波が進入しなければ、放射能大量放出は起きなかったのは明らか。

東日本大震災からの教訓

- 「津波が進入しなければ、放射能大量放出は起きなかった。」とすると、

(1)なぜ、津波が敷地へ進入したのか？

(2)なぜ、津波到達を想定していなかったか？

(1)なぜ、「敷地へ津波が進入し」たのか。

- 福島での津波
 - 津波想定高さ 5.7m (敷地前面)
 - 敷地高さ 10.0m
 - 来襲津波 13.1m (敷地前面, 東電解析)
- 4.3mの余裕を持っていたが、敷地に進入。
 - 津波想定が甘かったのか
 - 余裕が足りなかったのか

そもそも、津波高さ＝海底地盤の動きを予測できるのか。

(2)なぜ、「敷地への津波到達を想定」していなかったのか

想定津波高さの過信

- ←現在の津波想定(or 自然科学)における構造的な問題 (これまでに起きた事象からしか想定できない)
- ←最大の津波を想定しているとの誤解 (実際には、条件付き最大)
- ←想定津波を超えた事例に乏しい (大規模な津波はまれに発生するため、経験がなかった)

整合性への配慮

- ←敷地高さは、津波想定を上回る高さに設定するため津波の到達に関する検討は要しない。

- 敷地への津波到達を想定していれば防げたのか？

これから検討すべきこと

- 想定津波高さをより精度よく設定すること (このあと、説明有り)
- 津波が敷地に到達したときの津波氾濫挙動を適切に予測評価すること。

具体的には

1. (これまで十分検討されてこなかった) 遡上域・陸域での津波挙動を十分説明できる、解析モデルの整備。
2. さらに、津波氾濫に伴う漂流物 (これまで未検討) の影響を考慮できるモデル、衝撃力を評価できるモデルの整備

(原子力に限らず)なぜ遡上域, 陸域の津波挙動について十分な検討がされてこなかったか

● 現行の津波評価手順

1. 波源モデルを作成
2. 津波計算し, 痕跡高と比較
3. 誤差があれば波源モデルを調整

→ 痕跡高との誤差の原因を波源モデルに求める.

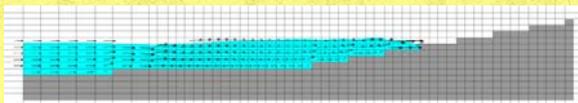
このことから, 遡上域の津波挙動を十分検討する機会が失われていた(?)

遡上域・陸域の津波挙動解析手法

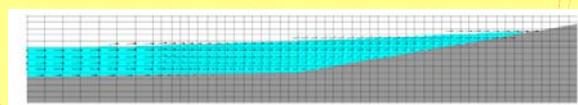
- 現行の津波解析モデルを遡上域・陸域に適用する際の問題点(1)
 - 海底および地形形状は階段状で表現.
 - ← 予測精度が格子サイズに大きく依存
 - ← 斜面をさかのぼることが苦手.

底面地形が遡上に与える影響

● 考慮しない場合



● 考慮する場合



→ 地形形状の取り扱いにより結果が異なる.

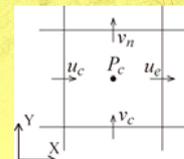
遡上域・陸域の津波挙動解析手法

- 現行の津波解析モデルを遡上域・陸域に適用する際の問題点(2)
 - 現行は, 海洋での津波伝播(平面二次元)解析手法に津波先端の処理を加えて遡上域の計算に適用.
 - ← 防波堤を越えた後の流れの三次元性を考慮できない.
 - 具体的には
 - 1) 地形を乗り越える際の鉛直方向の運動
 - 2) 地形から受ける形状抵抗
- 氾濫域・遡上域では三次元的解析手法の適用が必要.

三次元津波解析手法の適用例 1) 北海道南西沖地震津波

解析手法の概要(基礎式)

以下の基礎方程式を連立させ, 各計算格子での流速, 水の存在割合を算定する.



<連続方程式(質量保存式) (i=1,2,3)>

$$\frac{\partial \gamma_j \bar{u}_j}{\partial x_i} = 0$$

<運動方程式(水平二方向と鉛直方向) (i=1,2,3)>

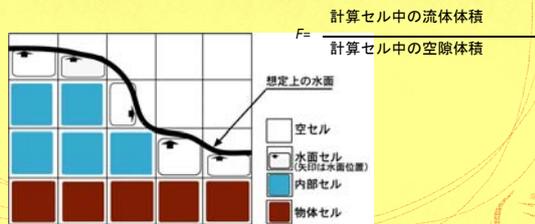
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \gamma_j^a \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \right)$$

<VOF法(Volume of Fluid)にもとづく水面方程式>

$$\gamma_j \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^a \bar{u}_j F}{\partial x_j} = 0$$

解析手法の概要（水面）

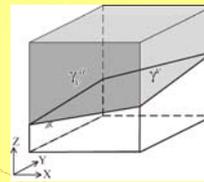
- VOF (Volume of Fluid) 法での流表現法
 - 計算セル内の流体配置を流体充填率 F で表す
 - 水面向きを周囲のセルによって決める



流解析手法の概要（地形形状の表現）

- 計算セルの空隙率および計算セル境界面の開口率によって地形形状を認識させる。

空隙率 $\gamma^v = \frac{\text{計算セル中の物体以外の体積}}{\text{計算セルの体積}}$



開口率 $\gamma^a = \frac{\text{計算セル境界の物体以外の面積}}{\text{計算セル境界の面積}}$

北海道南西沖地震津波



最大遡上地点航空写真1

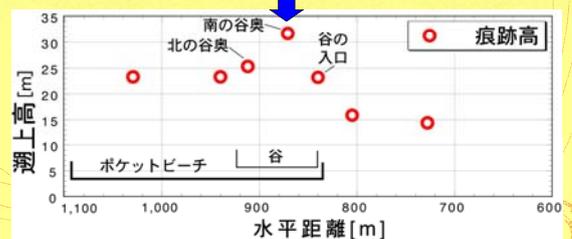


最大遡上地点航空写真2

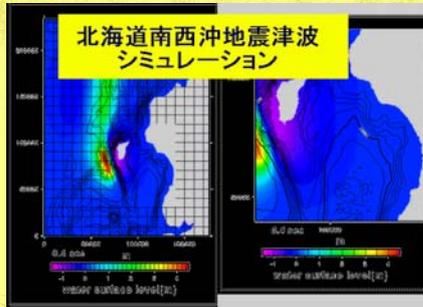


奥尻島での津波遡上高分布の特徴

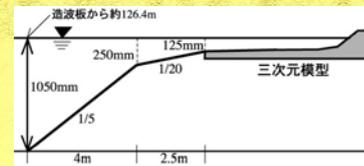
- 最大遡上高が非常に高い(31.7m)
- 最大遡上高が局所的に発生(南の谷奥)



藻内地区までの津波伝播の様子

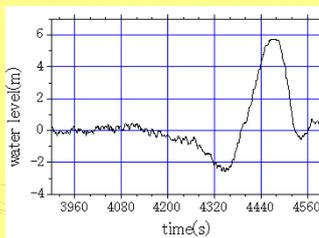


津波遡上実験

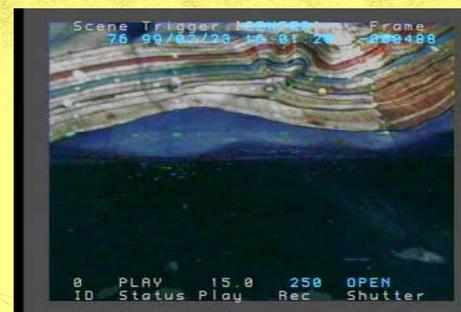


実験の概要

- 電力中央研究所の大型造波水路(長さ205m)
- 縮尺は1/400 : 時間縮尺1/20(フルード相似則)
- 入力波は波源を含めた計算結果より作成



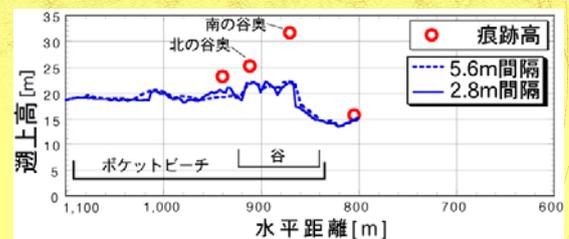
高速ビデオによる撮影1



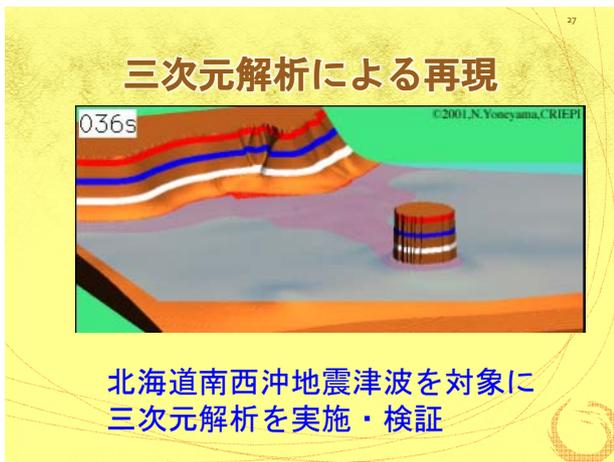
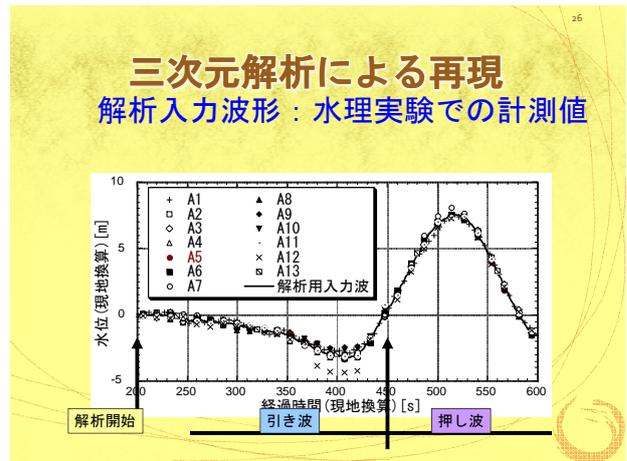
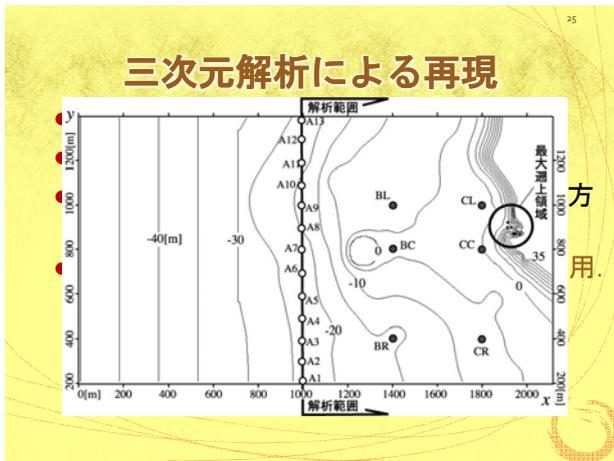
高速ビデオによる撮影2



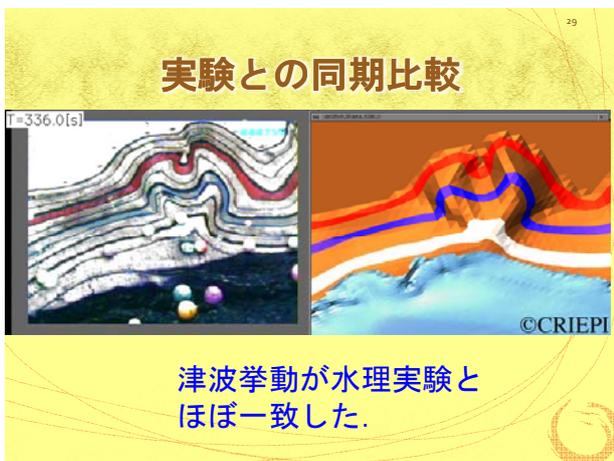
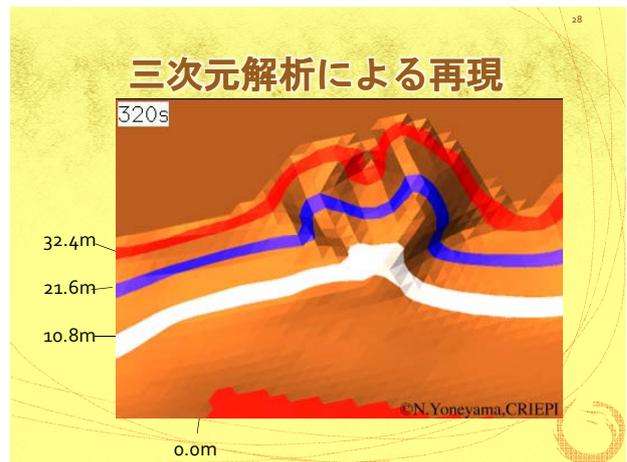
平面二次元解析での遡上高



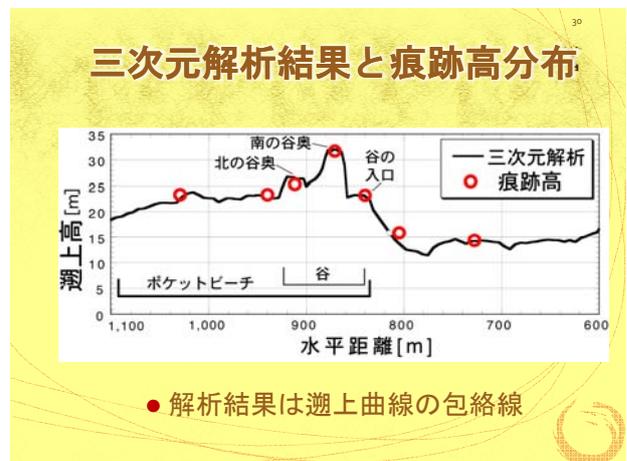
- 解析結果は、最大遡上時の遡上位置



北海道南西沖地震津波を対象に
三次元解析を実施・検証

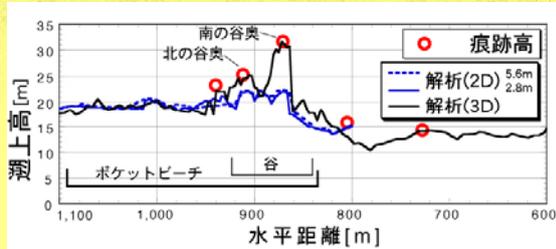


津波挙動が水理実験と
ほぼ一致した。

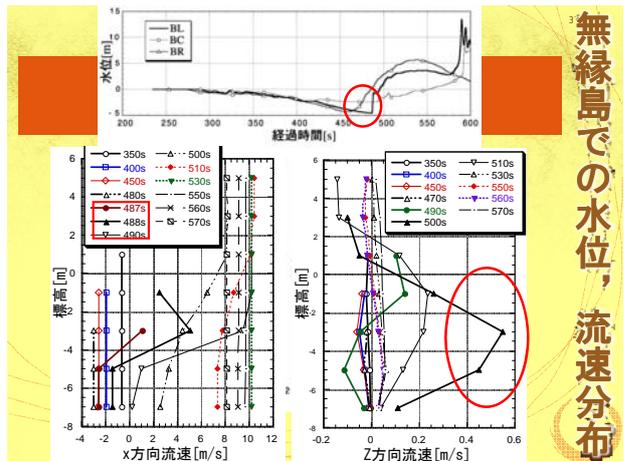


● 解析結果は遡上曲線の包絡線

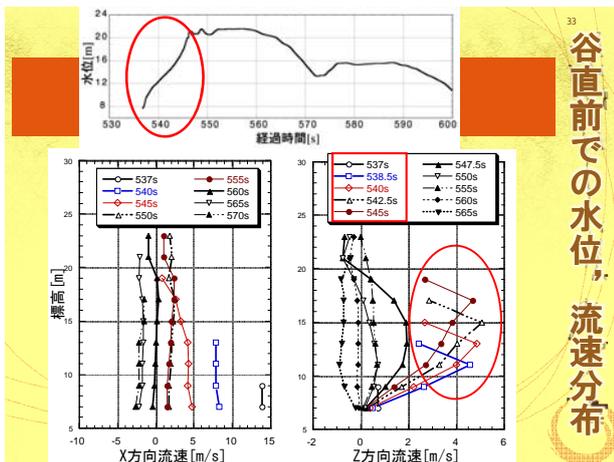
三次元解析と二次元解析の比較



● 解析結果は、最大越上時の越上位置



無縁島での水位、流速分布



谷直前での水位、流速分布

三次元津波解析手法の適用例 2) 津波漂流物挙動

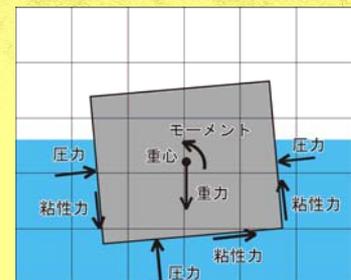
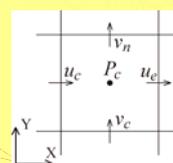
漂流物の解析法 (認識方法)

- 平面で囲まれた物体を対象とする
- 計算セルの空隙率 γ_v と開口率 γ_i の時間変化を考慮する

空セル	空セル	空セル	空セル
$\gamma_v = 0.8$	$\gamma_v = 0.5$	$\gamma_v = 0.1$	$\gamma_v = 0.6$
$F = 0.0$	$F = 0.0$	$F = 0.0$	$F = 0.0$
水層セル	物体セル	物体セル	水層セル
$\gamma_v = 0.5$	$\gamma_v = 0.0$	$\gamma_v = 0.0$	$\gamma_v = 0.4$
$F = 0.6$	$F = 0.0$	$F = 0.0$	$F = 0.6$
内部セル	内部セル	内部セル	内部セル
$\gamma_v = 0.7$	$\gamma_v = 0.1$	$\gamma_v = 0.2$	$\gamma_v = 0.5$
$F = 0.0$	$F = 1.0$	$F = 0.0$	$F = 0.0$

外力の評価方法

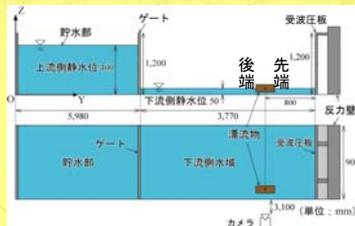
- 評価する外力
 - 重力
 - 流体の圧力
 - 流体の粘性力



水理模型実験への適用 (水上)

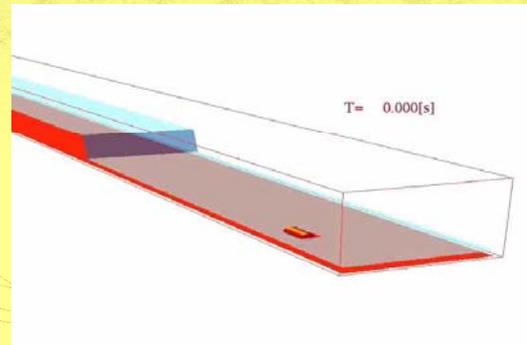
砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, 池野ら (2002)

- ゲート引き上げ急開により段波を発生させる

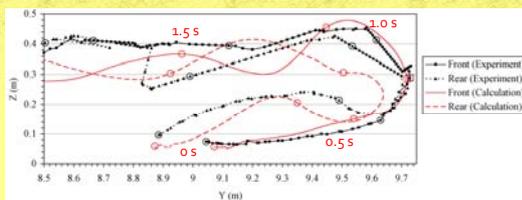


漂流物: 直径8cm・長さ20cmの円柱
密度0.5g/cm³
計算格子: X 6cm・Y 6.5cm・Z 3cm

漂流物挙動の三次元解析 (1)



結果の比較 (1)



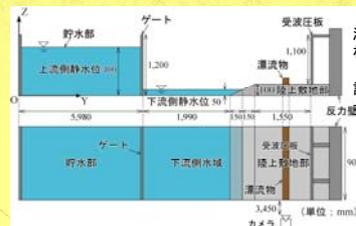
漂流物先端と後端の鉛直二次元移動軌跡の比較

漂流物の移動軌跡はほぼ一致

水理模型実験への適用 (陸上)

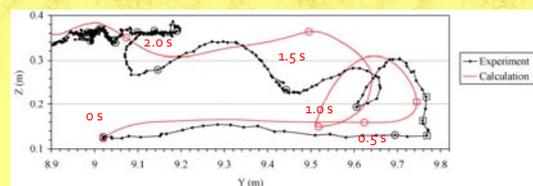
陸上遡上津波と衝突力に関する実験的研究, 池野ら(2003)

- 高さ10cmの陸上敷地部がある。



漂流物: 4cm四方・長さ89cmの角柱
密度0.5g/cm³
計算格子: X 6cm・Y 6.5cm・Z 3cm

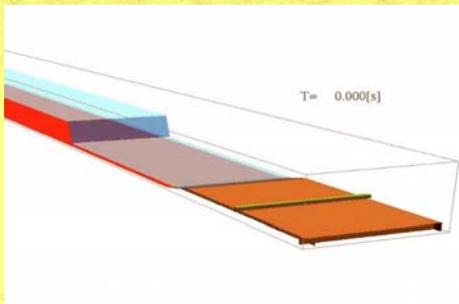
結果の比較 (2)



漂流物重心の鉛直二次元移動軌跡の比較

漂流物重心の移動軌跡はほぼ一致

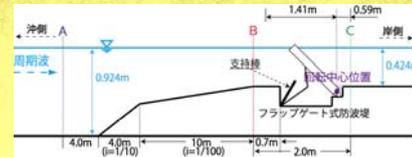
漂流物挙動の三次元解析 (2)



三次元津波解析手法の適用例 3) 可動式防波堤

水理実験の概要 (木村ら2010)

水理実験概要図 (模型縮尺1/30) 水路幅: 1.0m



造波板により周期波を与える

地点A, B, Cでの水位変化
および
フラップゲートの扉体角度
を測定

三次元解析概要

地点Aから沖側10.5m位置に造波境界を
地点Cから岸側9.5m位置に反射境界を設定

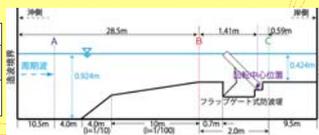
フラップゲートは回転中心位置まわりの一軸回転運動のみ
扉体角度は初期状態42.4°

最小38.6° から最大90° の範囲を回転

造波境界に流速を与え、周期波とする

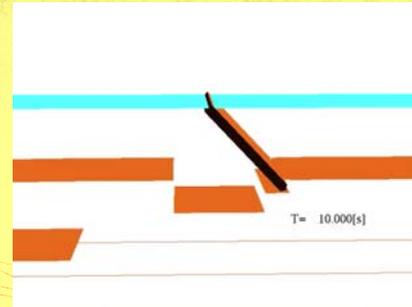
計算時間間隔 $\Delta t = 0.005$ (秒) で60秒間の解析を行う

条件	周期	波高	初動
Case1	30秒	約11cm	押波初動
Case2	40秒	約7.5cm	引波初動

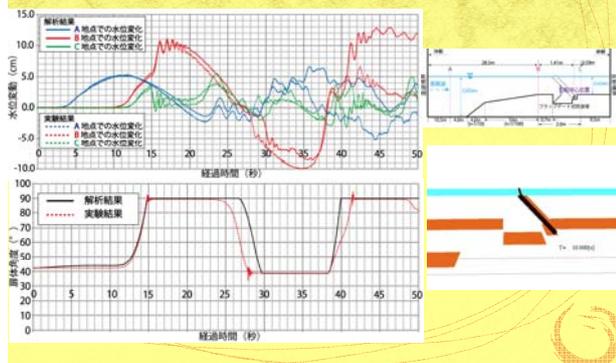


解析結果 (Case1)

周期: 30秒 波高: 約11cm 初動: 押波初動

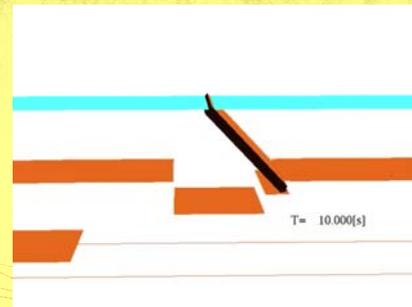


実験結果との比較 (Case1)

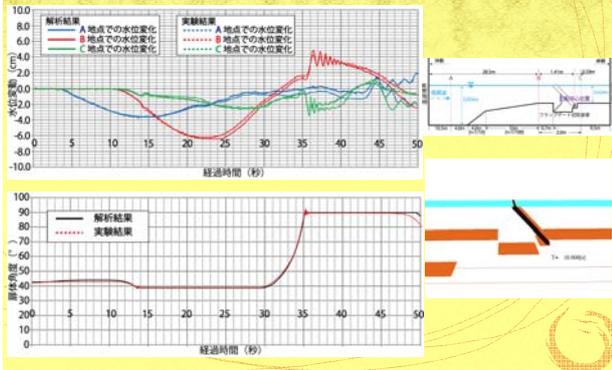


解析結果 (Case2)

周期: 40秒 波高: 約7.5cm 初動: 引波初動



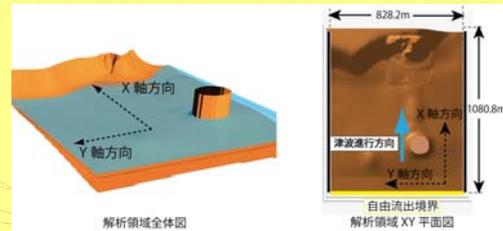
実験結果との比較 (Case2)



実地形への適用

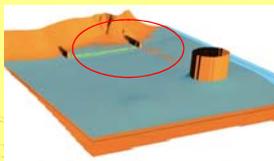
フラップゲート式防波堤を実地形に適用し、解析を行う

解析対象領域は北海道奥尻島藻内地区
(北海道南西沖地震津波により多大な被害 (1993年))

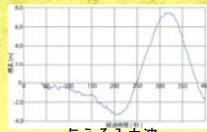


解析条件

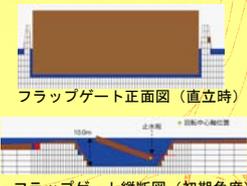
- 入力条件
北海道南西沖津波を再現する入射波高を自由流出境界に与える
- 解析地形
フラップゲートを設置するために設置位置の地形を低くし、扉体の左右に側壁となる地形を作成



解析領域全体概要 (初期角度)



与える入力波

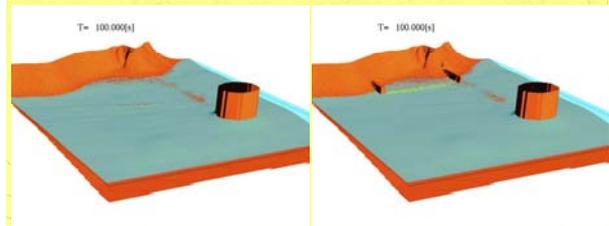


フラップゲート正面図 (立直時)

フラップゲート縦断面図 (初期角度)

解析結果

フラップゲートの有無によるそれぞれの解析結果

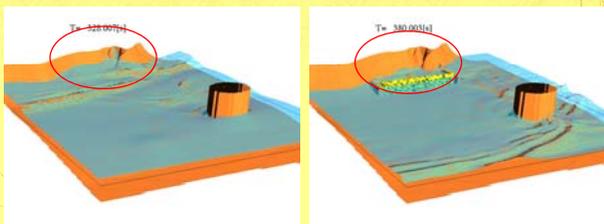


フラップゲートなし

フラップゲートあり

波高最大時の様子

フラップゲートの有無による解析結果の比較
津波の最大遡上高さの様子



フラップゲートによって
津波の遡上高さが明らかに低減されている

三次元解析まとめ

- 沿岸まで平面二次元手法を用い、サイト近傍から三次元津波氾濫解析することは今の技術で可能。
 - これにより津波から受ける流体力 (静圧, 動圧など) も予測可能。
- 漂流物は、基礎モデルが確立した段階、今後も研究を継続する必要あり。
- さらに、陸上部において、津波から受ける衝撃力については、別途検討が必要。

おわりに

- これからの原子力防災では、敷地周辺及び敷地内の津波流動の精度良い予測が不可欠である。
- そのためには、海域津波用解析手法の遡上域・陸域への拡張では不十分であり、その流動場に適した手法を用いるべきである。
- 高精度なモデルは、ほとんどの場合、膨大な計算時間を必要とするが、それを理由に、精度の劣る手法を用いることは、今回の大震災を目の当たりにすれば、ナンセンスである。(特に原子力において。)