

NATECH 2016

# **Study for structural assessment method of cylindrical storage tank against large-scale earthquake and tsunami**

Takashi Ibata, Isho Nakachi, Dr. Kazuo Ishida, Junichi Yokozawa  
IHI Corporation

2016.1

In order to propose the soundness evaluation method for storage tanks against large-scale earthquakes including tsunamis, the following activities are carried out.

## Study for Tsunami Evaluation

Investigation for the feasibility of new evaluation methods by SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)

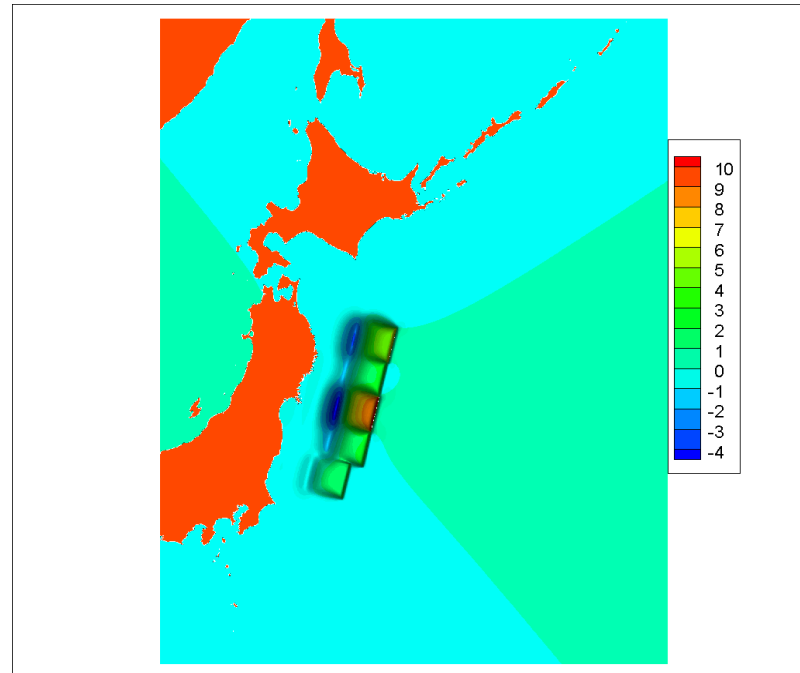
## Study for Seismic Motion Evaluation

Simulation by the nonlinear time history analysis when the tank shell-to-bottom joint is uplifted.

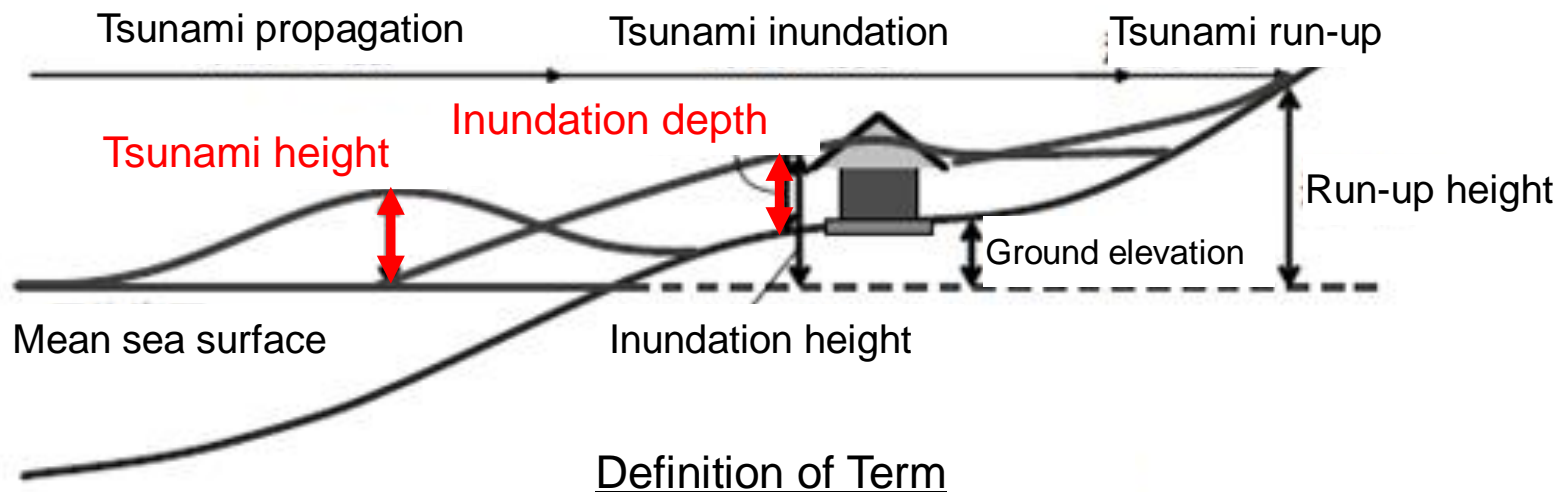
1. Damages of the storage tanks due to the tsunami
2. Validation of the simplified evaluation method by FDMA (Fire and Disaster Management Agency of Japan)
3. Prediction of damage due to tsunami for LNG tank
4. Analysis between tsunami and tanks by SPH method
5. Conclusion

## 2. Damages of the storage tanks due to the tsunami

### 1.1 Tsunami of 2011 Tohoku Earthquake



(Simulated by IHI)



## 1.2 Examples of damaged storage tanks



(出典:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の被害及び消防活動に関する報告書  
(第1報), 消防研究所資料第82号)

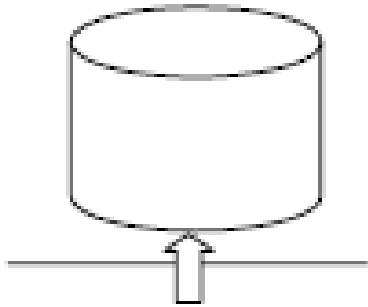
**167基の油タンクが損傷**

**LNGタンク(地上タンク)の被害はなし**

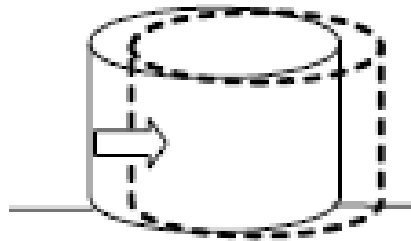
**(顕著に浸水した地域に、LNG地上タンクはなかった)**

# 1.3 Various types of damages

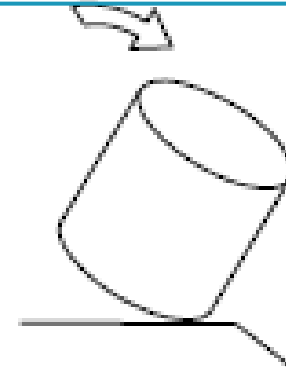
## Typical damage for oil storage tanks



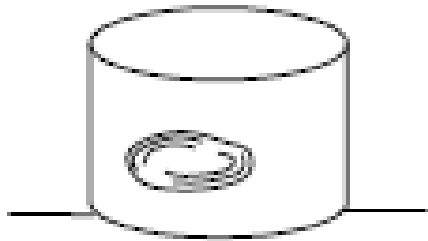
Floating



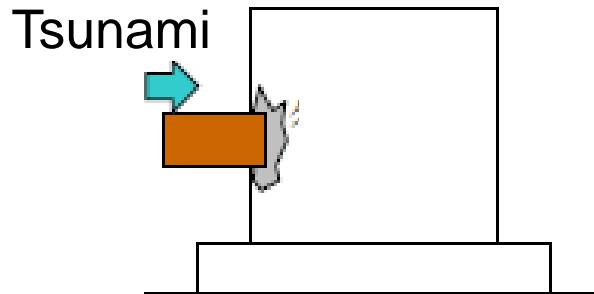
Sliding



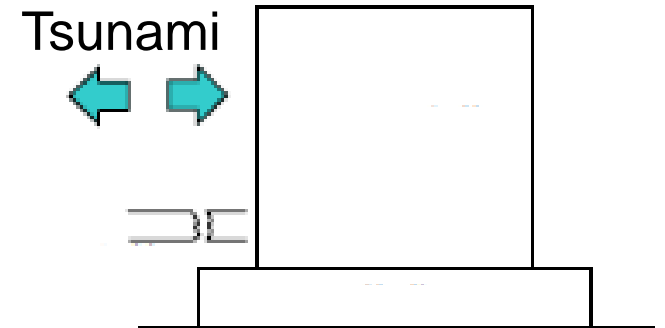
Overturning



Buckling due to external water pressure



Collision with floating object



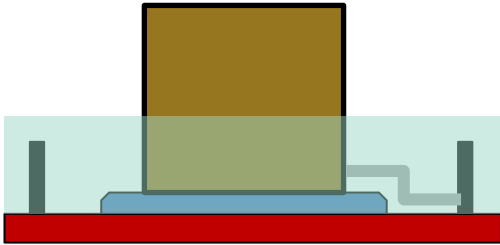
Damage to piping

(出典: 総務省消防庁, 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書)

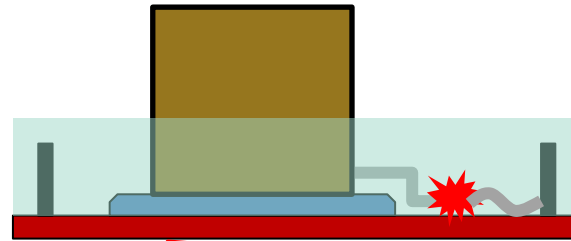
# 1.4 Relationship between inundation depth and damage types **IHI**

Realize your dreams

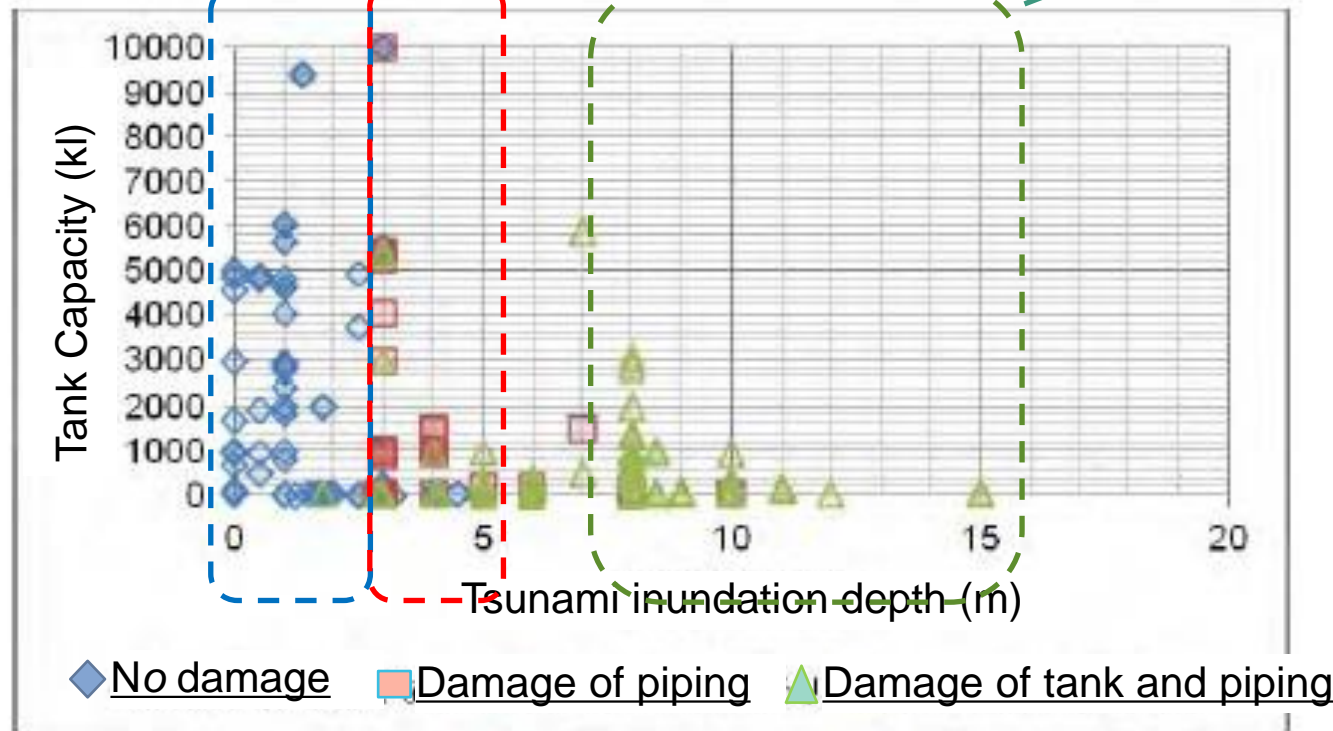
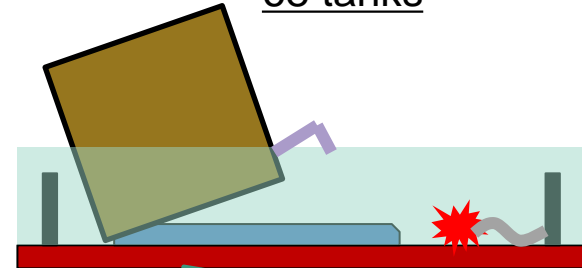
No damage  
116 tanks



Damage of piping  
60 tanks



Damage of tank and piping  
68 tanks



(出典:“石油タンクの津波被害について”, 消防庁 消防研究センター 第15回消防防災研究講演会資料)



## 1.5 円筒タンクの津波評価手法の確立に関する動向

### ☆消防法適用タンク

消防庁の「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討会」において、屋外貯蔵タンク(平底円筒タンク)に作用する津波波力の算定方法、被害予測手法を提案

⇒ 総務省消防庁「危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書」  
(平成21年)

### ☆高圧ガス保安法適用タンク

高圧ガス保安協会の「高圧ガス施設の津波対策検討調査委員会」において、高圧ガス保安法適用の各種貯槽に対して、FEMA(アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁)の津波波力の算定式の妥当性検証

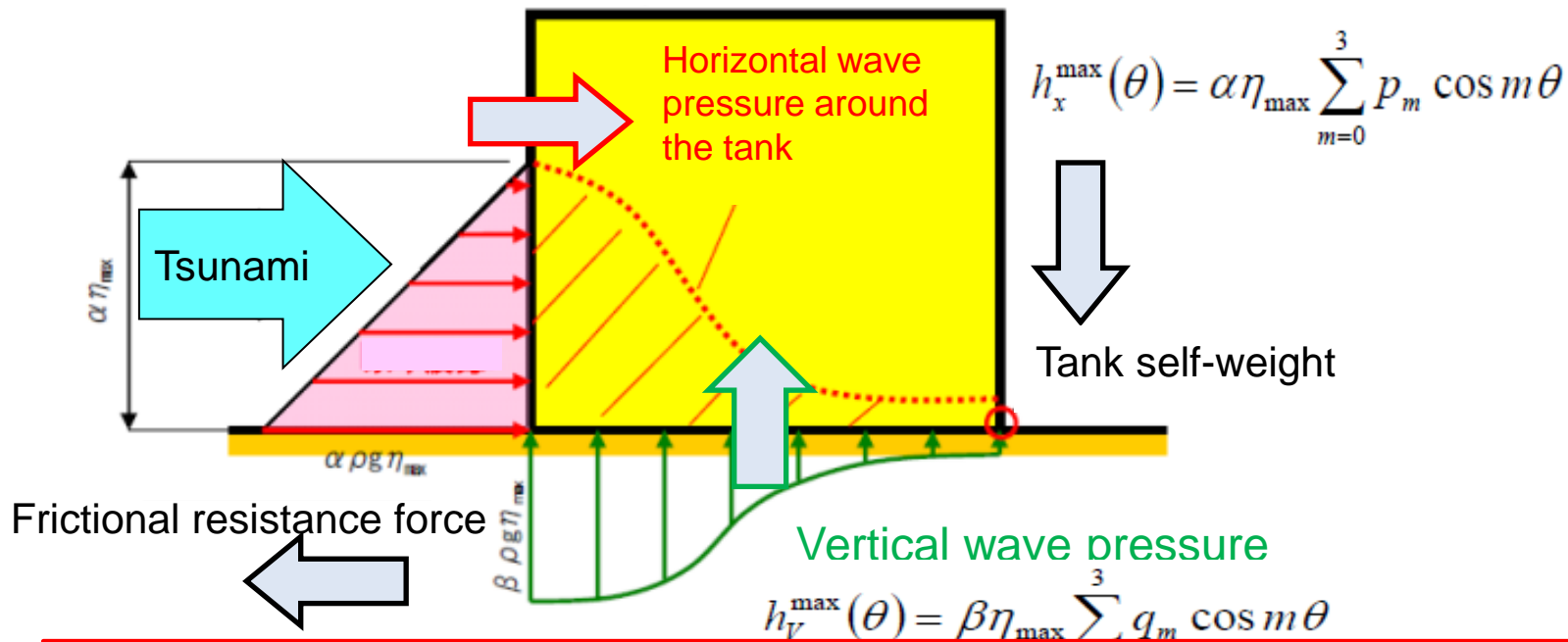
⇒ 高圧ガス保安協会「平成26年度 石油精製業保安対策事業(高圧ガス取締施設における地震・津波時の対応に関する調査)(2)津波の波力、設備の浮力、漂流物の影響等の評価手法の検討 報告書」(平成27年)



# 2. Validation of the simplified evaluation method by FDMA **IHI**

## 2.1 FDMA method derived from the hydraulic model experiment

Cylindrical tank

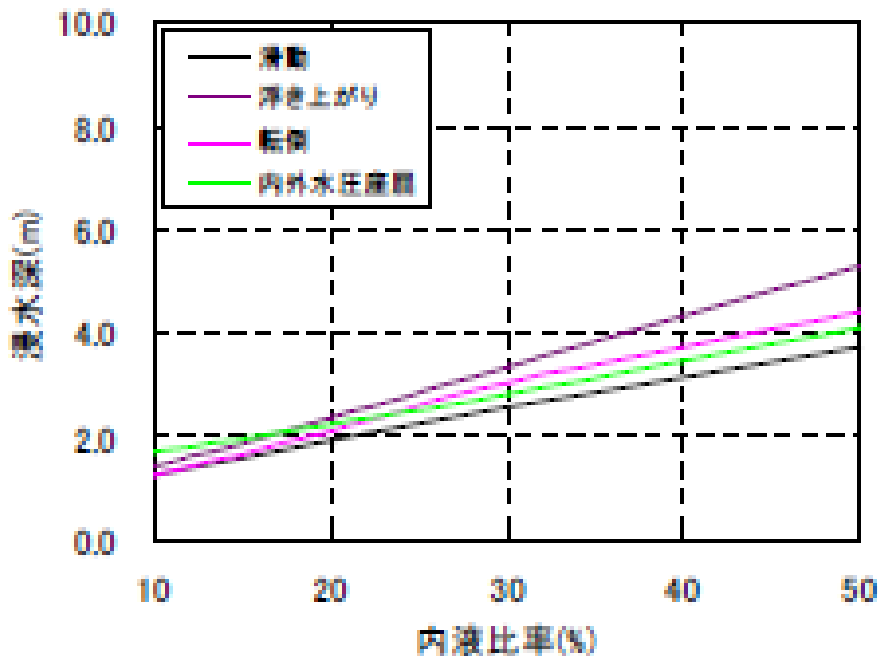


$F_{tH} >$  Frictional resistance force  $\rightarrow$  Moving (Sliding)

$F_{tV} >$  Tank self-weight (including internal liquid)  $\rightarrow$  Moving (Floating)

## 2.1 (参考) 実際に浸水したタンクに対する評価結果

1000kタンク



10000kタンク

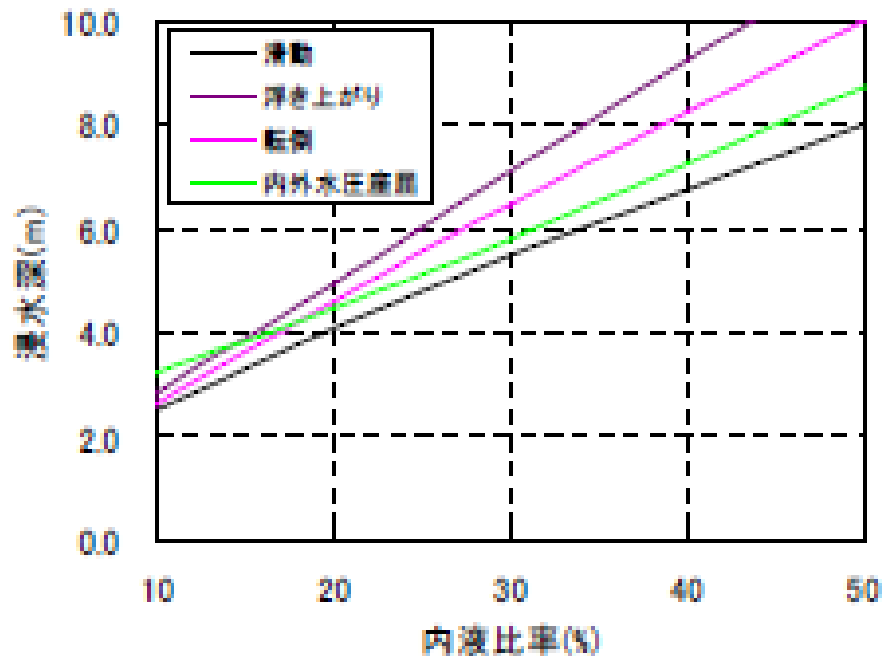


図 40 代表的と考えられる諸元を有するタンクに対する被害発生のおそれの評価結果

実際に移動の被害が発生したタンク  
移動被害発生は68基  
滑動発生との評価が62基

被害  
損

で、滑動

移動の被害が発生しなかったタンク  
移動被害発生なしは176基、  
滑動発生なしと評価が138基

それがある

的中率 約90%

的中率 約80%

(出典: 総務省消防庁, 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書)

## 2.2 Issues of FDMA method



- 1) 津波のタンク底板からの高さ: 約3.5m
- 2) 配管の折れ曲がりや危険物の漏洩
- 3) 防油堤の損傷大
- 4) スロッシング波高は約1m→浮き屋根上に油が漏洩

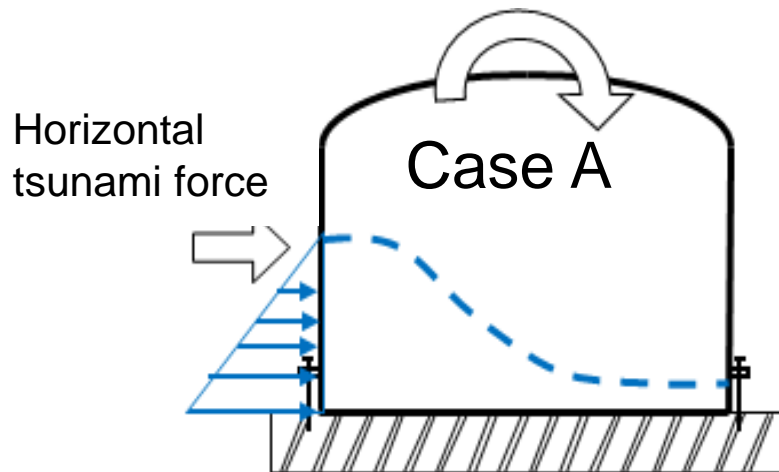
写真1

- ①津波はタンク底板から約 3.5m まで到達、当該タンクは空であったが浮上や移動の現象は見られない。
- ②、③多数の配管の折れ曲がり、危険物の漏洩
- ④護岸、棧橋、防油堤の損傷大
- ⑤スロッシング波高は約 1m→浮き屋根上に油が漏洩

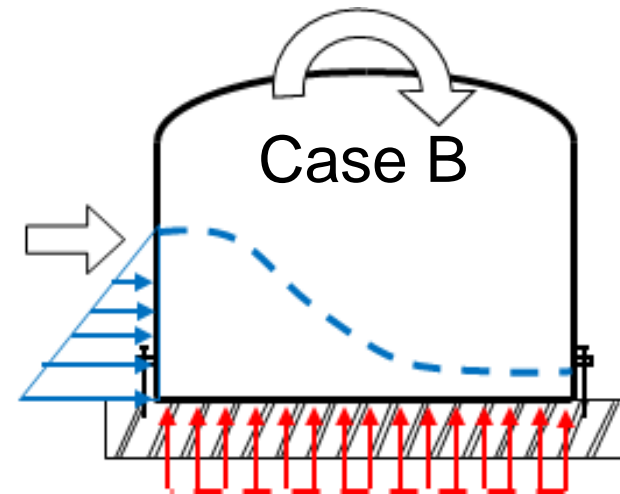
Reliability of FDMA method : 80~90%

### Case Study for Vertical Force Calculation

Overturning moment



Overturning moment

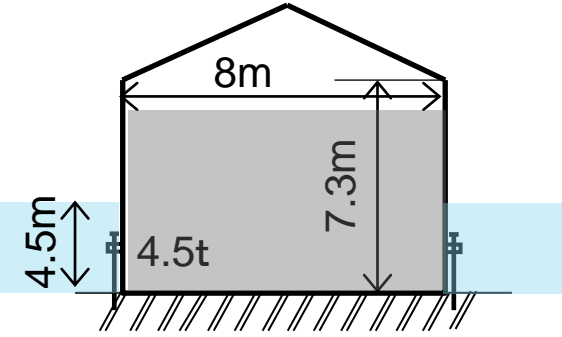
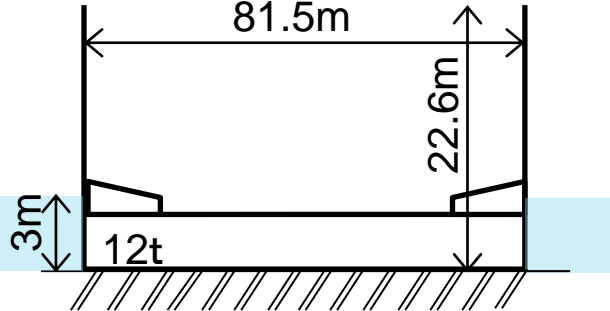


Case A: Vertical force is not applied.

(No inundation under the tank bottom)

Case B: Uniform vertical force is applied due to gradual inundation

## 2.3 Case study for no damaged tanks

	Tank-3	Tank-4
Actual Damage of Tank	No damage	No damage
Tank Outline	350 kl fuel oil tank	110,000 kl Petroleum tank
Actual Inundation Depth		
Evaluation Results		
Well buckling buckling		
	No damage (○)	Moving (△)

The intrusion of tsunami water into the gap between the tank bottom plate and foundation should be accurately taken into account



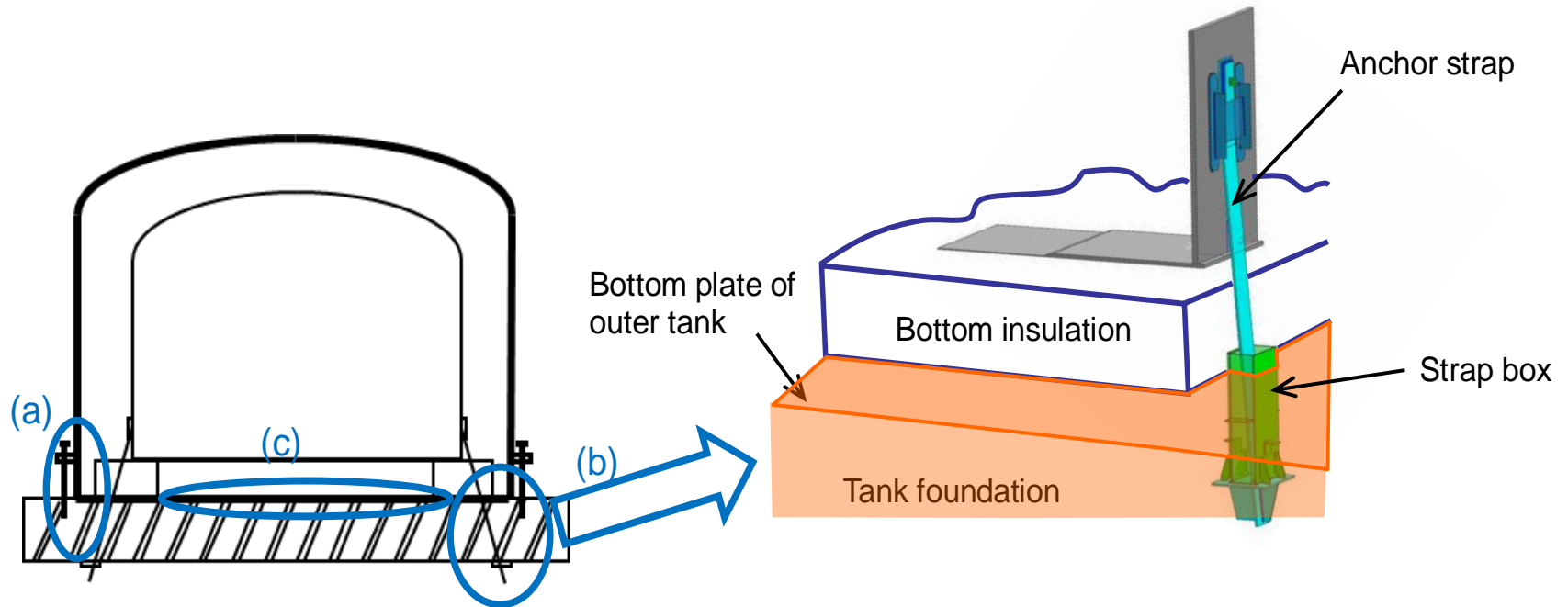
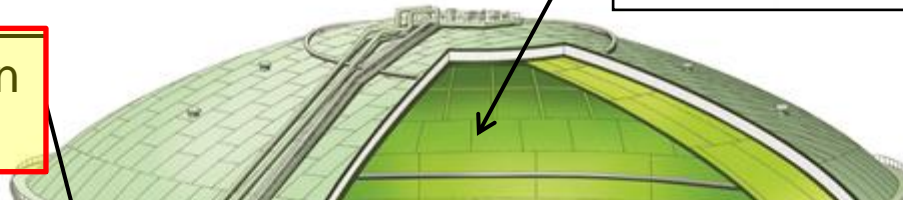
# 3. Prediction of damage due to tsunami for LNG tank

## Single containment LNG tank (metal outer wall)

Buckling, deformation of outer wall

Depression of heat insulation capacity due to inundation into annular space  
→ Increase of boil off gas

Buckling, deformation of inner wall



### **SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)**

SPH calculates the hydrodynamic behavior modeling the continuous media of the tsunami as an assembly of particles of water.

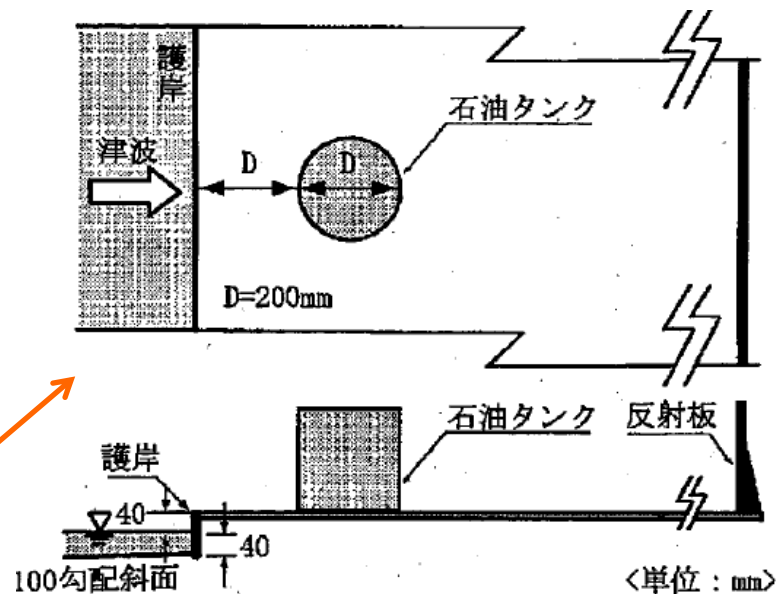
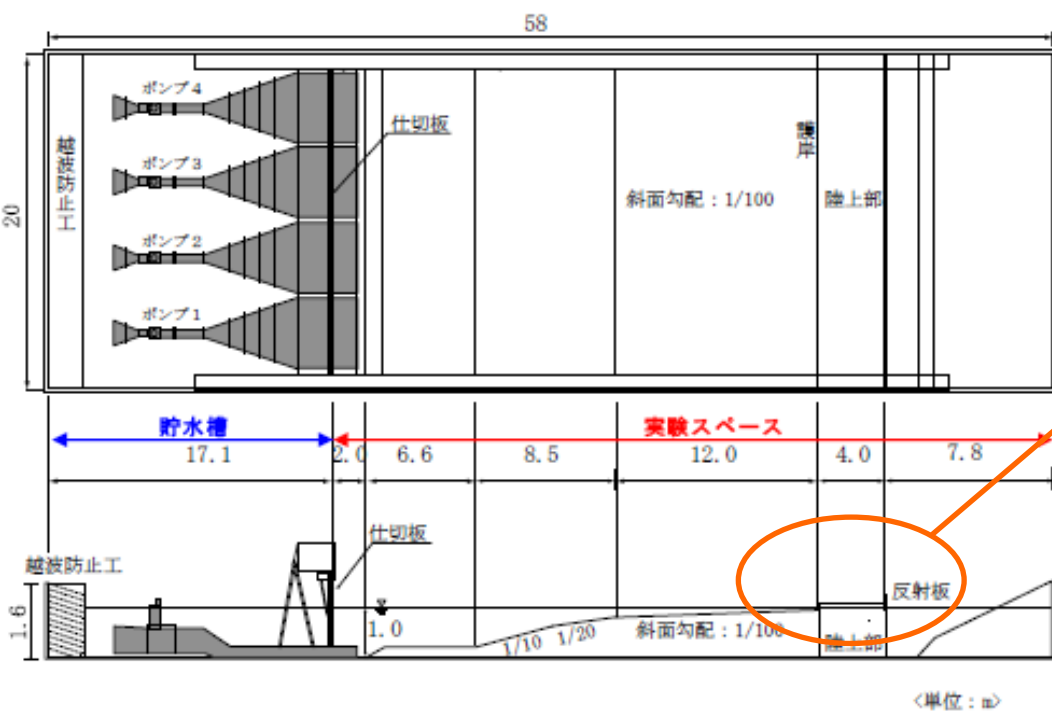
- FEMのようなメッシュ(格子)を必要としないため複雑形状のデータ作成が容易。
- メッシュ破綻が発生しないため非常に大きな変形(超大変形)まで解析が可能

### 水理模型実験との比較解析により有効性を確認

- 過去に実施された水理模型実験との比較により、津波解析の可否検討ならびに精度レベルを確認する。
- タンクは剛体とみなし、タンク廻りの津波高さ分布、波力、波圧分布を実験結果と比較することによって、タンクに作用する津波荷重の傾向と精度を確認する。



# 4.1 Outline of FDMA experiment



	想定する津波と タンクの概要	模型実験における 津波とタンクの概要	模型実験の縮尺 (フルード相似則による)
津波の浸水深	3 m (タンク手前位置)	0.03 m (タンク手前位置)	長さ: 1/100 荷重: 1/100 <sup>3</sup>
タンク形状	直径: 20m 側部高さ: 20m	直径: 0.2m 側部高さ: 0.2m	時間: 1/10 圧力: 1/100

出典: 総務省消防庁(2009) : 危険物施設の津波・浸水対策に関する調査検討報告書

## 4.2 Outline of IHI analysis model

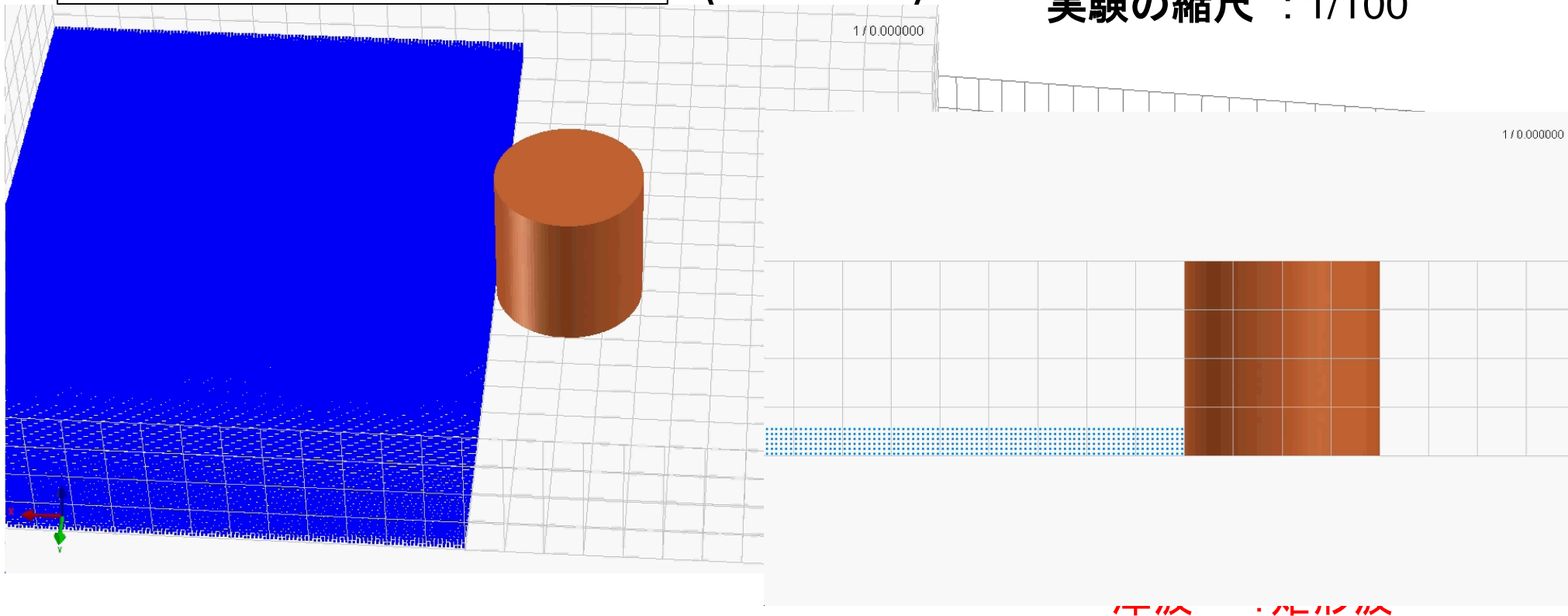
### Model of tsunami

Inundation depth : 3.0 m  
Flow velocity : 5.0 m/s  
Diameter of particle: 500 mm

### Dimension of model tank

Diameter (D): 20 m  
Wall height (H): 20 m  
H/D: 1.0

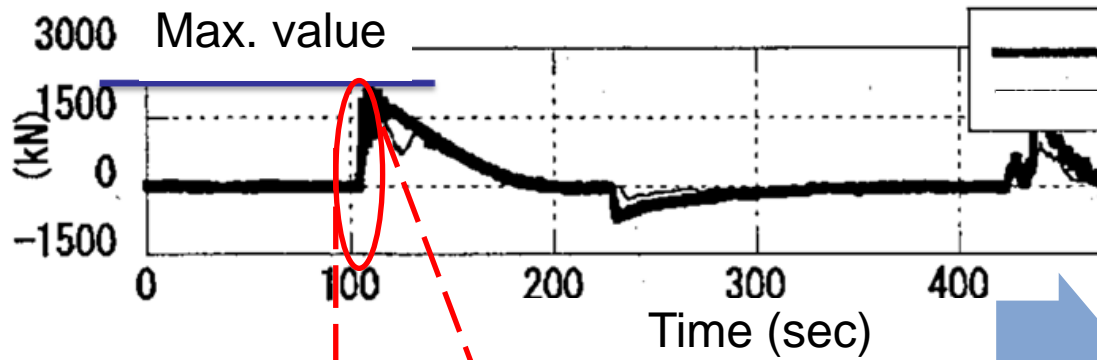
実験の縮尺 : 1/100



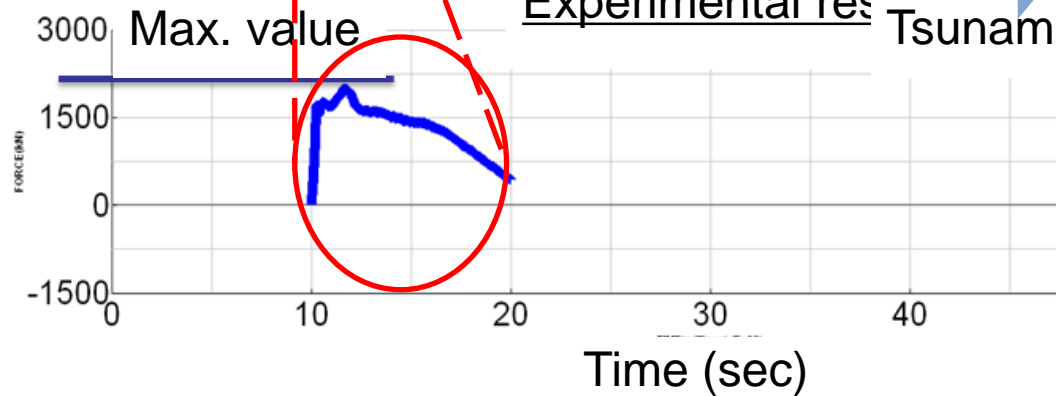
## 消防庁による水理模型実験に対するSPH法解析モデル

# 4.3 Comparison and validation between IHI analysis and FDMA experiment

Horizontal tsunami forces

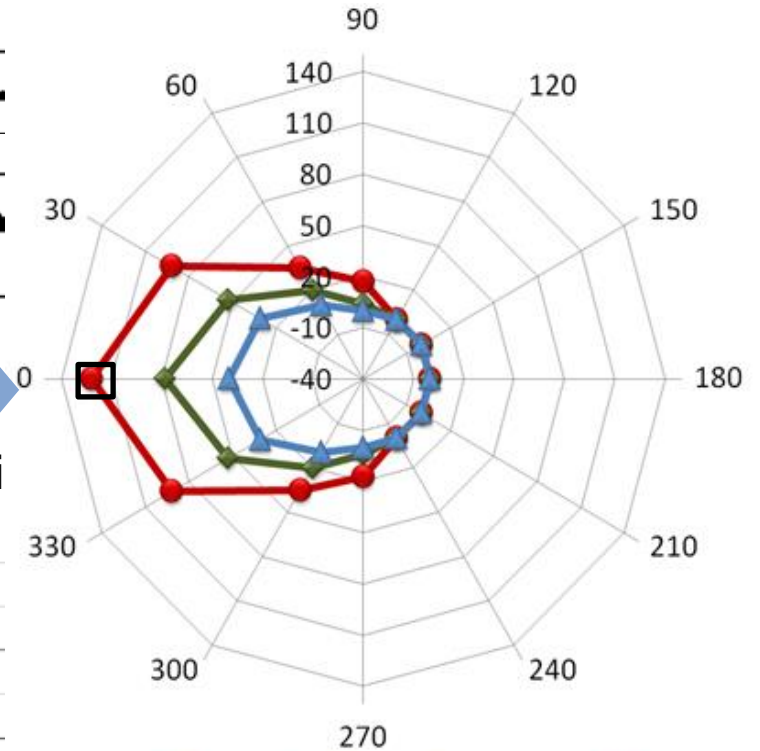


Experimental result



Analysis result by SPH

Tsunami pressure at tank lower part



Result of analysis by SPH

- Analysis
- Experiment

## 5. Conclusion

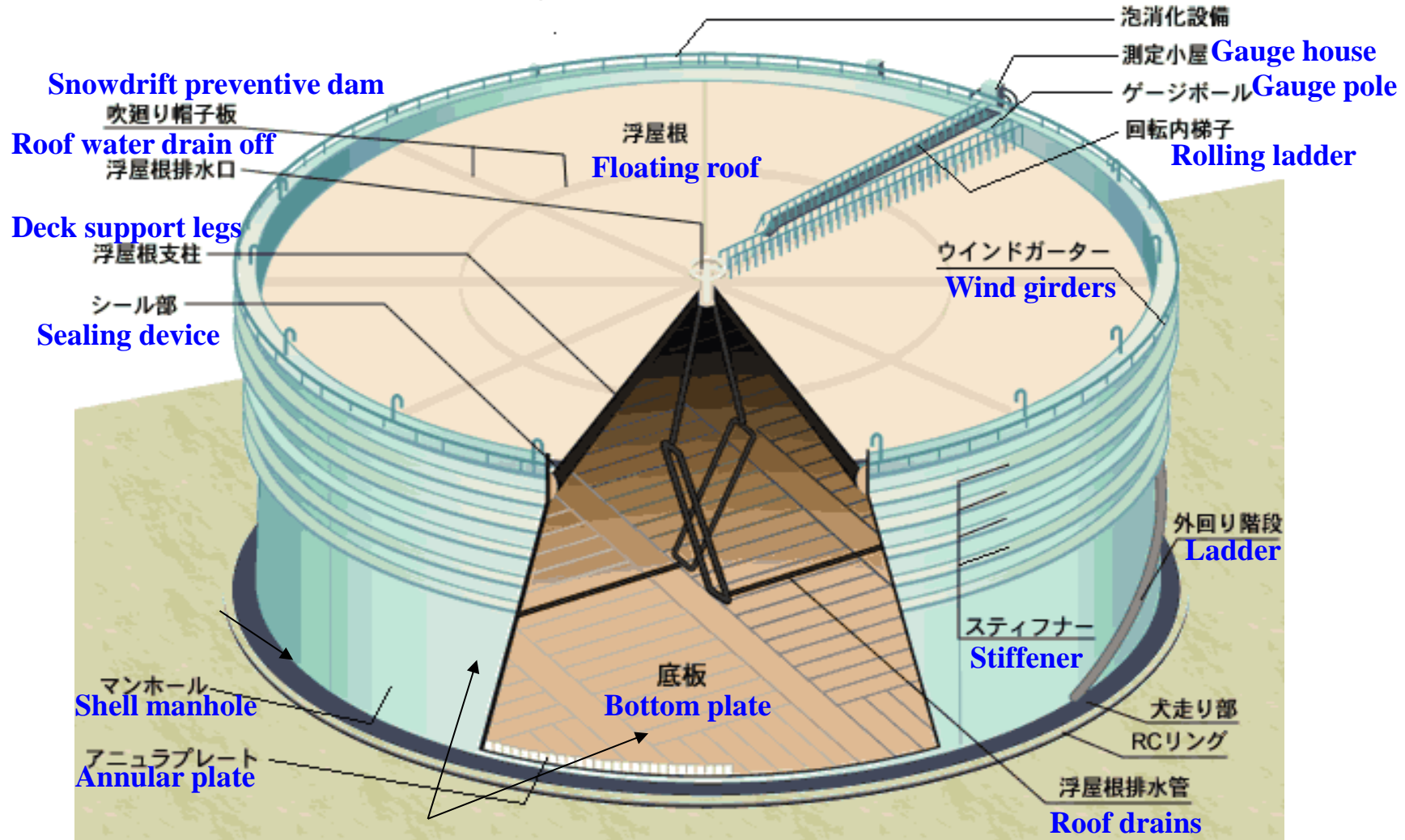
- 1) Existing assessment method has been verified by IHI case study.
- 2) SPH method can be used to check the structural integrity of tanks against tsunami forces.

### Remaining issues

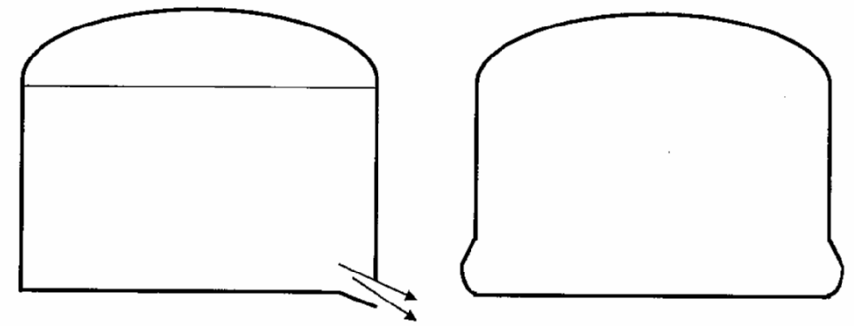
- 1) How to determine an accurate initial condition of the tsunami for analysis (including the effect of a dike)
- 2) How to determine the vertical wave force corresponding to the intrusion of water into the gap between tank bottom and foundation

1. Outline of oil storage tank
2. Typical damage mode of oil storage tank due to earthquake
3. Purpose of this study
4. Method of seismic response analysis
5. Analysis object tank
6. Analysis result
7. Conclusion

# 1. Outline of oil storage tank



## 2.1 円筒タンクの 主な地震損傷モード

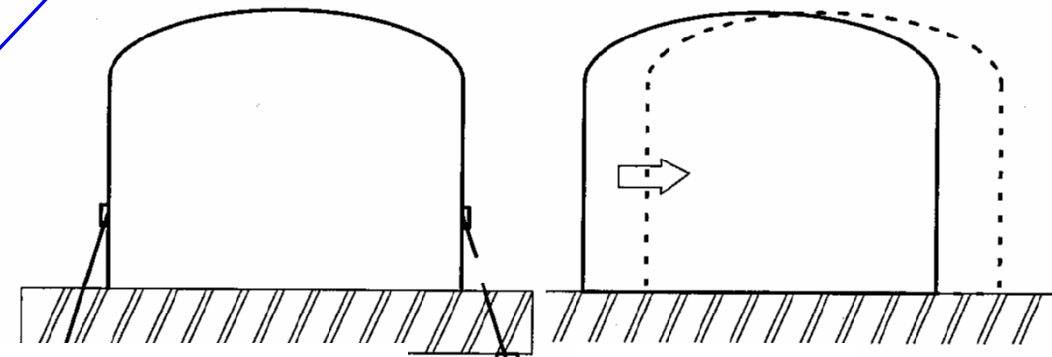


側板と底板接合部の破断

側板の象の足変形や弾性座屈等

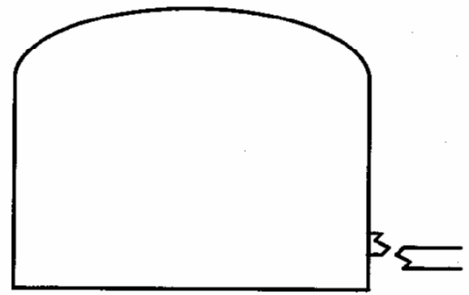
スロッシング(液面揺動)による損傷を除外

左上の側板と底板接合部の破断は、  
内容液の大量漏洩につながる。

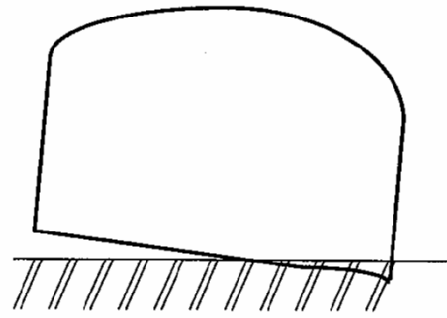


アンカ-ボルトの破断

内槽横滑り



側部ノズルの破損、  
配管フランジからの漏洩

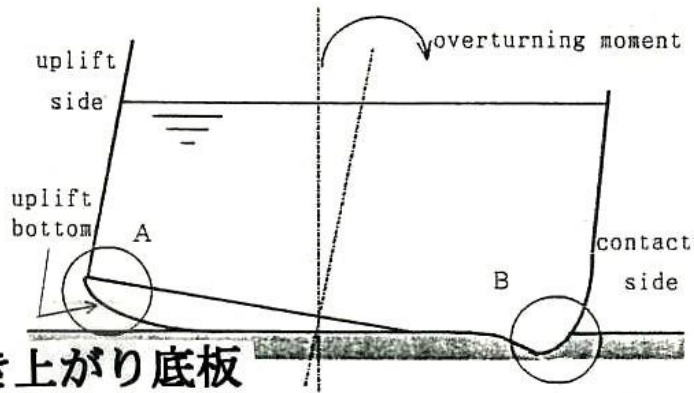


ロッキング



## 2.2 アニューラ板の地震損傷例

地震時の転倒モーメントによる片浮き上がり → 隅角部に割れ発生(1978年宮城県沖地震損傷例)



T-218 タンク

容量 31,500kl

地震時油量 23,705kl

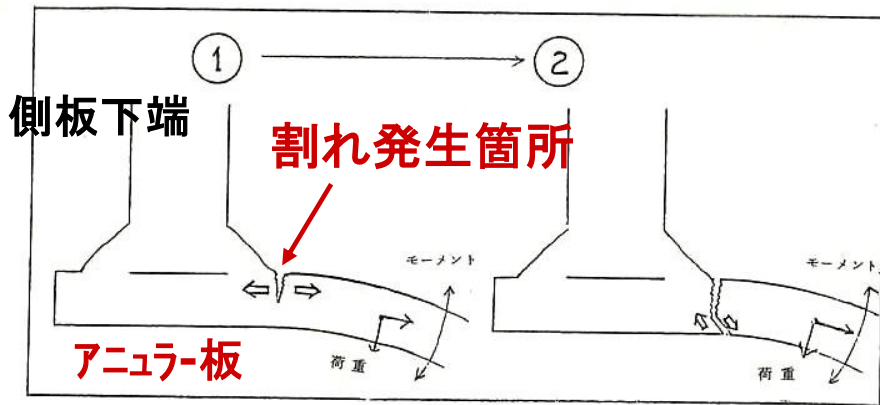
直径(内径)×高さ 43,588φ × 21,855H<sub>mm</sub>

側板最下段外周 1° = 380.71mm

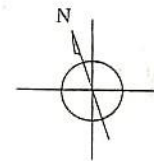
浮き上がり底板

ロッキング浮き上がり挙動

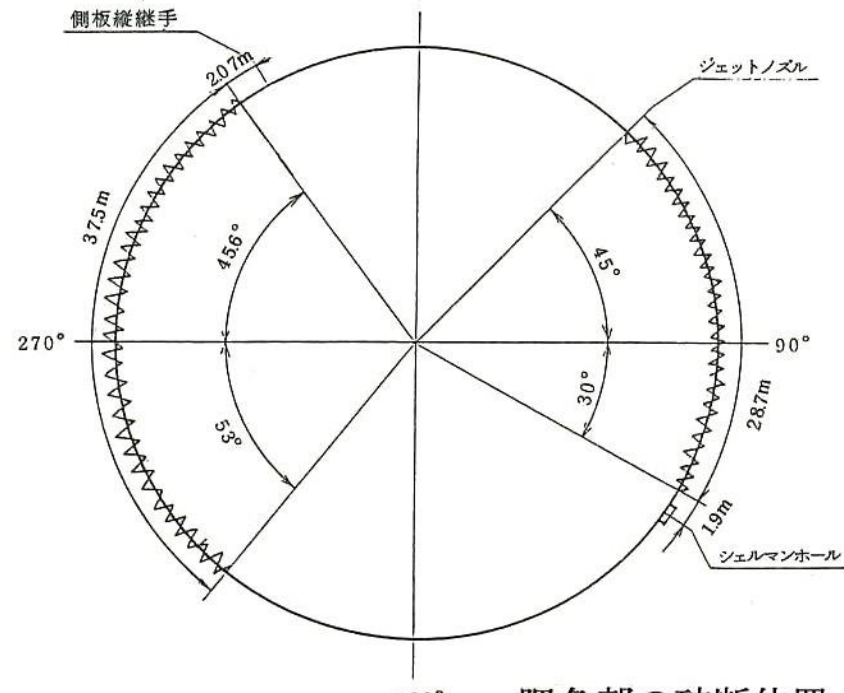
隅角部のアニューラ板のき裂進展の概念図



アニューラ板裏面の腐食減肉のモデル化



1978年宮城県沖地震：31,500kl タンク  
東西の波線部が破断範囲



破断長さ 東側 28.7m  
西側 37.5m

隅角部の破断位置 (波線部)

### 3. Purpose of this study

#### JOGMEC調査研究：陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討の一部

今後予想される大規模地震に対し、大型石油タンクの健全性を検討する

(大量漏洩につながる側板下端部・隅角部の健全性の評価を行う。)

#### 研究のフロー

(1) 石油備蓄基地における大規模地震・継続余震の設定

(A地点の石油備蓄基地を対象) 本震(M9) 下北沖  
余震(M8クラス) 三陸沖北部

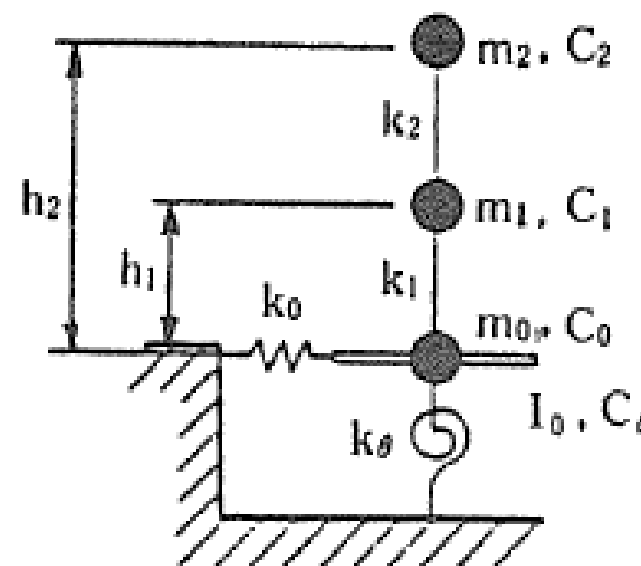
(2) タンクの隅角部の浮上り地震応答検討

(多質点系非線形ばねモデル:IHIモデル)

(3) 隅角部隅肉溶接部の塑性ひずみ検討

軸対称ソリッド要素の弾塑性大変形解析

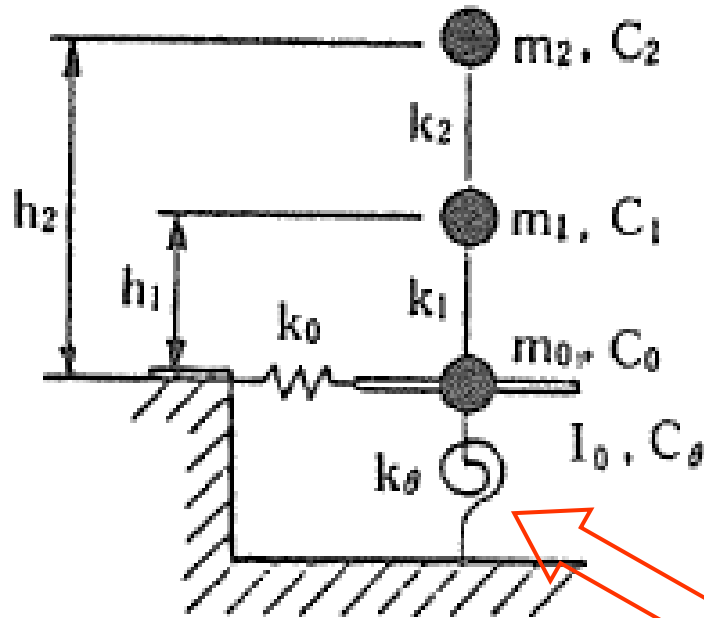
(4) 塑性ひずみの繰り返しに対する疲労強度評価



Dynamic analysis model mass-spring system



# 4.2 Dynamic analysis model of mass-spring system

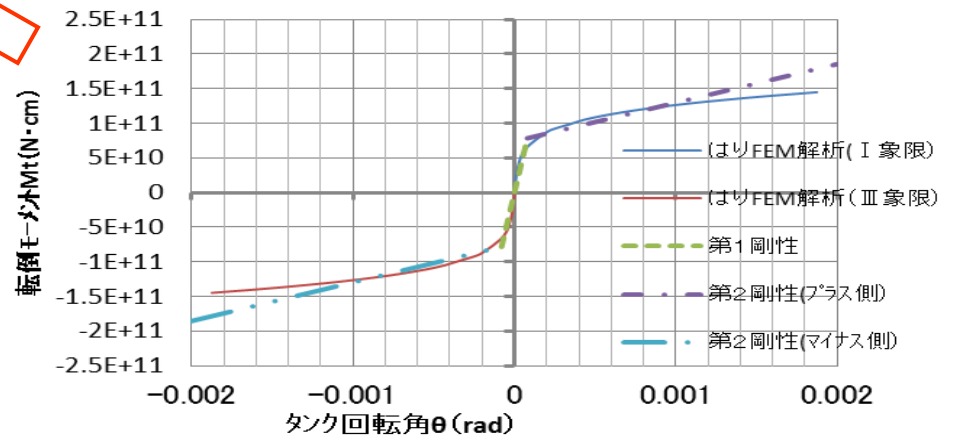


解析モデル

- $m_0$ : 底部仮想質量  
タンク底板質量 + 固定液質量 (タンク剛体運動)  
- 連成液質量 (側板弾性変形)
- $m_1$ : タンク側板の弾性変形 (バルジング) に伴う質量  
タンク側板質量 + 連成液質量 (側板弾性変形)
- $m_2$ : 自由水質量 (スロッシング)
- $I_0$ : 回転慣性質量 (ロッキング)  
タンク側板および内容液の回転慣性

ロッキング復元力特性をバイリニアで近似

タンク回転角 $\theta$ と転倒モーメント $M_t$   
(むつ小川原基地11万kl石油タンク)



# 5. Analysis object tank and input earthquake motion

## 5.1 Outline of analysis calculated tank

### Tank dimension

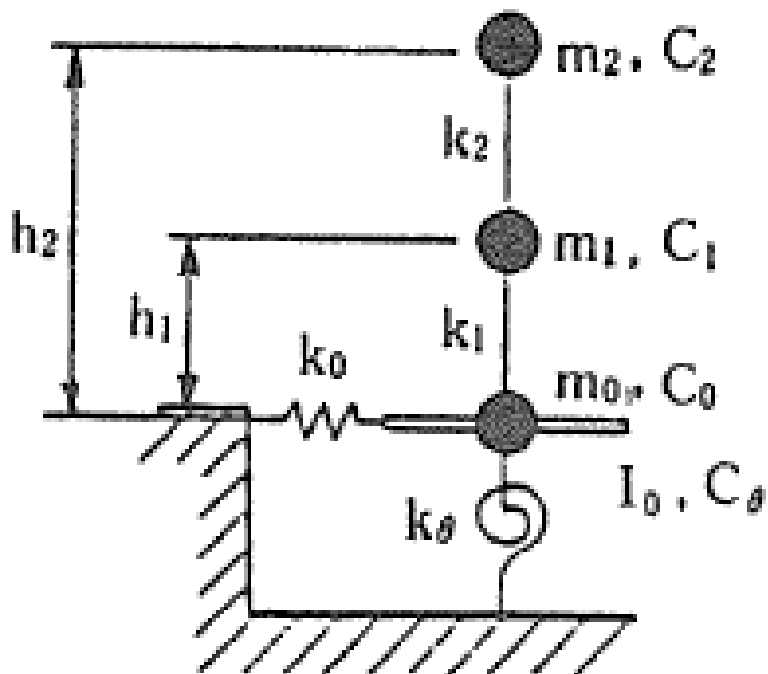
Capacity (kl)	110,000
Diameter (mm)	81,500
Height (mm)	24,000
Liquid height (mm)	20,688
Specific gravity of Liquid	0.841
Number of shell course	10
Shell thickness and material (1st course - 8th course)	JIS SPV490Q 36mm - 13mm
Shell thickness and material (9th course - 10th course)	JIS SM400C 36mm - 13mm
Annular plate thickness and material	JIS SPV490Q 21 mm
Bottom plate thickness and material	JIS SM400B 12mm
Coeff. of subgrade reaction	294 N/cm <sup>3</sup>

### Material property

	Material	
	JIS SPV490Q	JIS SM400B/C
Young's modulus E (MPa)	205,800	205,800
Poisson's ratio $\nu$	0.3	0.3
Yield stress (MPa)	490	235

Natural Period of tank without uplift  
0.42 sec

## 5.2 Analysis model data



### Analytical condition

項目		パラメータ
Mass	$m_0$ (kg)	$6.517 \times 10^8$
	$m_1$ (kg)	$1.860 \times 10^7$
	$m_2$ (kg)	$4.187 \times 10^7$
	$I_0$ (kg·cm <sup>2</sup> )	$8.551 \times 10^{12}$
Height of mass	$h_1$ (cm)	953
	$h_2$ (cm)	1114
Spring constant	$k_0$ (N/cm)	$5.148 \times 10^{13}$
	$k_1$ (N/cm)	$4.403 \times 10^7$
	$k_2$ (N/cm)	$1.363 \times 10^5$
	$k_{\theta 1}$ (N·cm/rad)	$1.000 \times 10^{15}$
	$k_{\theta 2}$ (N·cm/rad)	$5.687 \times 10^{13}$
Damping constant	$C_0$ (N·s/cm)	$3.715 \times 10^9$
	$C_1$ (N·s/cm)	$5.724 \times 10^5$
	$C_2$ (N·s/cm)	$4.786 \times 10^3$
	$C_{\theta}$ (N·s/cm)	$3.187 \times 10^{12}$

※Damping ratio.

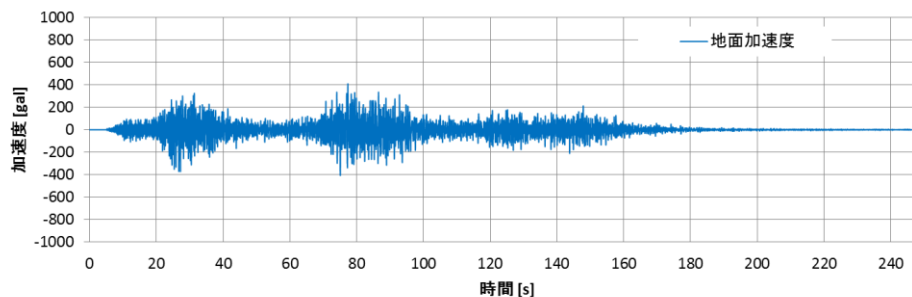
$m_1$ (スウェイ) : 10%

$m_2$ (スロッシング) : 1%

$I_0$ (ロッキング) : 10%

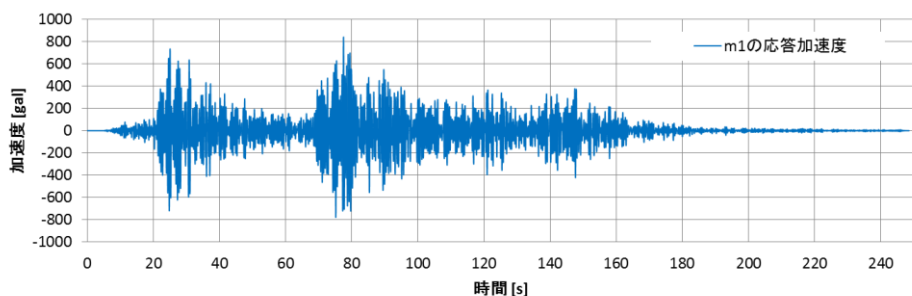
# 6. Analysis result (Main quake, EW)

Ground acceleration  
(地面加速度)



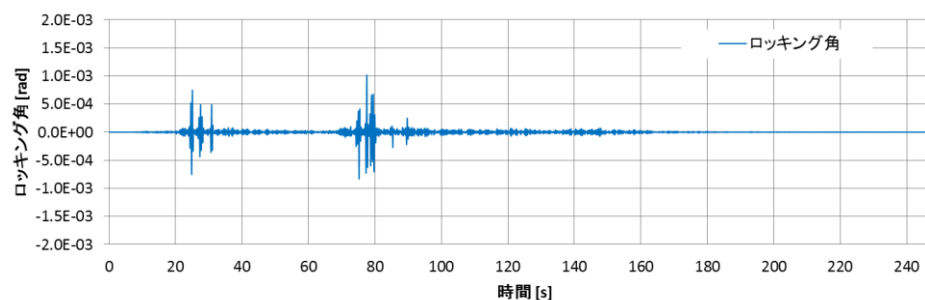
Max. 409.9 Gal

m1 Response acceleration  
(m<sub>1</sub>応答加速度)



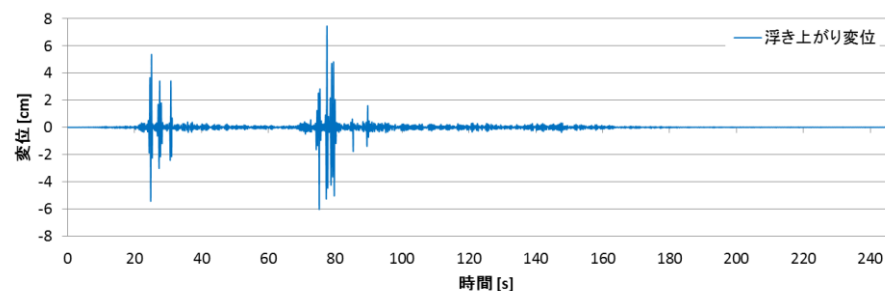
Max. 840.9 Gal

Rocking angle  
(ロッキング角)



Max.  $1.016 \times 10^{-3}$  [rad]

Uplift displacement  
(浮上り変位)

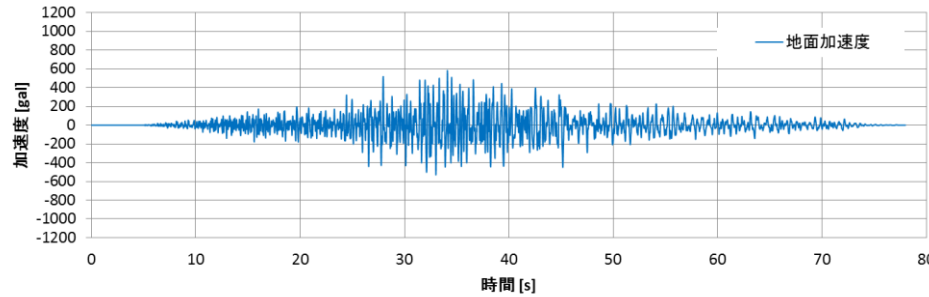


Max. 7.45 [cm]



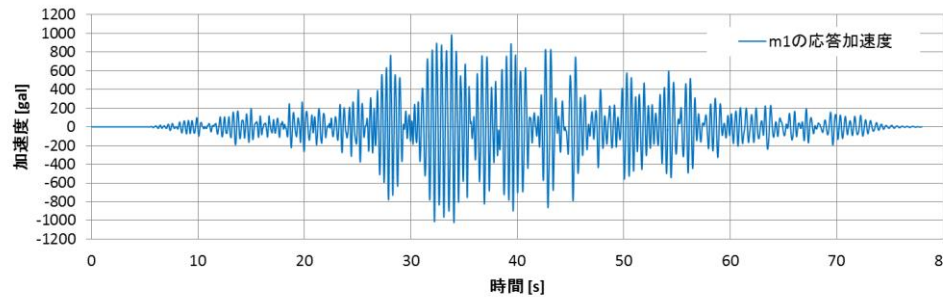
# 6. Analysis result (After quake, EW)

Ground acceleration  
(地面加速度)



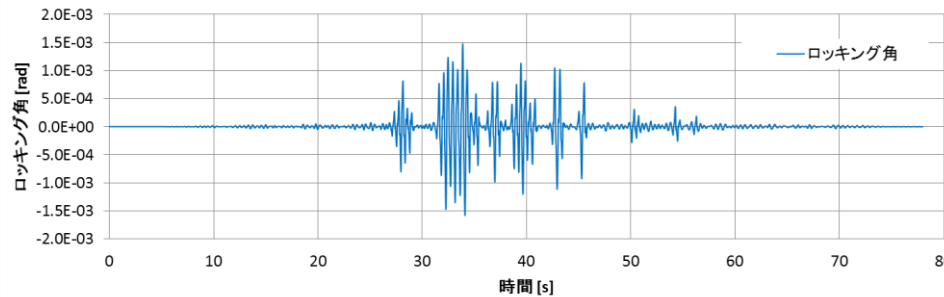
Max. 582.6Gal

m1 Response acceleration  
(m<sub>1</sub>応答加速度)



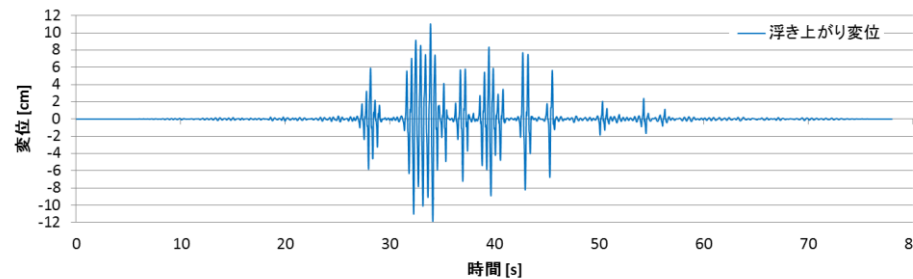
Max. 1023.5Gal

Rocking angle  
(ロッキング角)



Max.  $1.580 \times 10^{-3}$ [rad]

Uplift displacement  
(浮上り変位)



Max. 11.86 [cm]

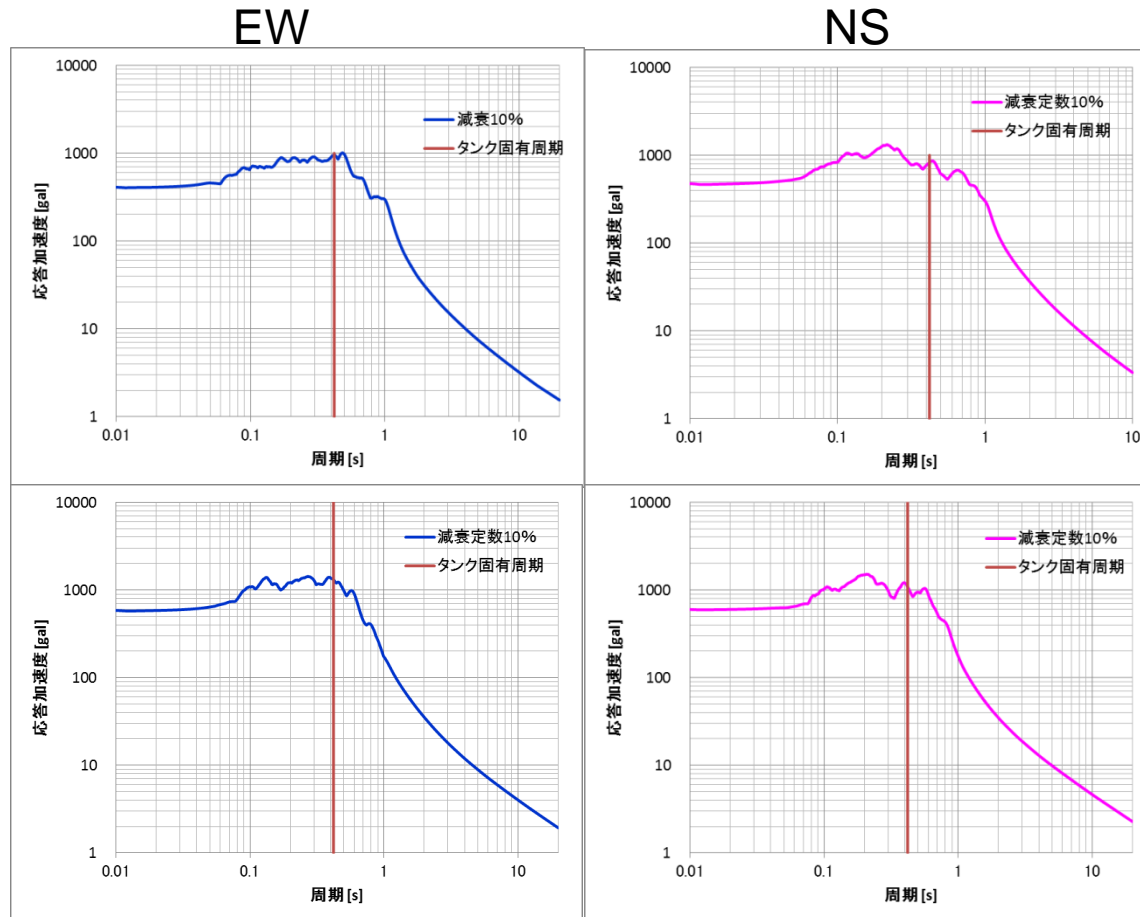
## 6. Analysis result (Maximum value)

項目	本震EW	本震NS	余震EW	余震NS
地表面加速度 $\alpha_0$ (gal)	409.9 77.37sec	473.1 83.59sec	582.6 34.11sec	599.2 34.65sec
$m_1$ の応答加速度 $\alpha_1$ (gal)	840.9 77.49sec	761.7 76.06sec	1023.5 34.04sec	858.5 36.37sec
ロッキング回転角 (rad)	1.016E-03 77.55sec	7.898E-04 76.11sec	1.580E-03 34.10sec	1.072E-03 36.43sec
側板浮上り変位 (cm)	7.45 77.55sec	5.70 76.11sec	11.86 34.10sec	7.88 36.43sec
加速度応答倍率 $\alpha_1/\alpha_0$	2.051	1.610	1.757	1.433
$m_2$ の応答変位 (cm)	2.16 85.29sec	2.69 85.00sec	2.56 45.17sec	2.43 36.08sec

# 6. Analysis result

## (加速度応答スペクトルに関する考察)

Main  
quake



After  
quake

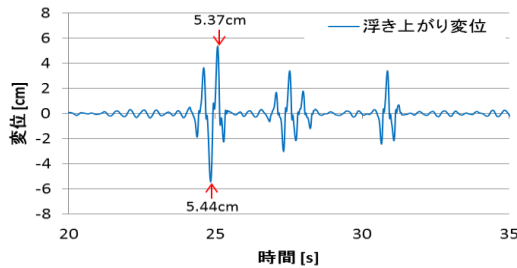
本震および余震の加速度応答スペクトル(減衰比10%)

- 本震, 余震ともに, EW方向の方が応答が大きくなったのは, 地震動の特性による.
- 余震における応答が比較的大きな応答となった理由は, 本震よりも応答加速度が大きくなっていることによる.
- スロッシング( $m_2$ )の応答が小さくなった理由は, 長周期成分が少ないことによる. (地震波作成手法の課題.)

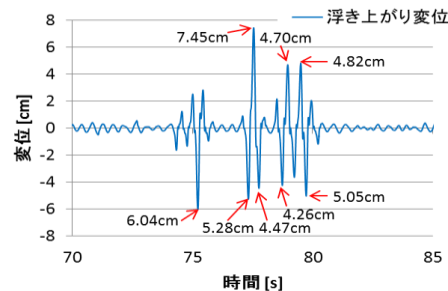
# 6. Analysis result (Number of uplifting)

浮上り変位	本震EW		
	0° 側	180° 側	合計
10cm以上	0	0	0
8~10cm	0	0	0
6~8cm	1	1	2
4~6cm	3	5	8
2~4cm	7	6	13

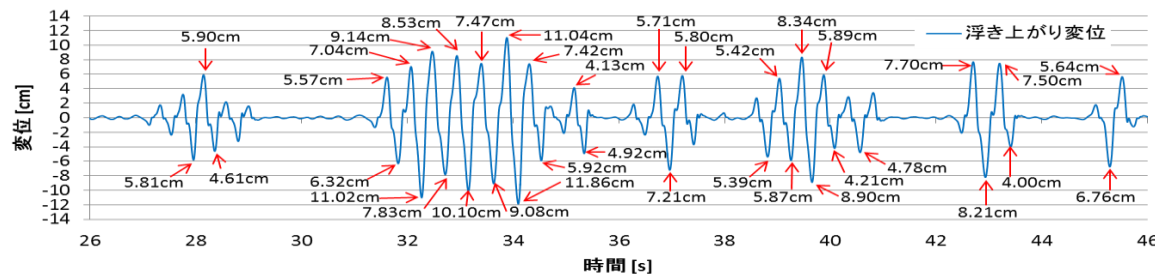
浮上り変位	余震EW		
	0° 側	180° 側	合計
10cm以上	1	3	4
8~10cm	3	3	6
6~8cm	5	4	9
4~6cm	8	9	17
2~4cm	7	6	13



(a-1) 本震EW (20~35秒)



(a-2) 本震EW (70~85秒)



(b) 余震EW (26~46秒)

- 本震, 余震ともに, EW方向の浮上り変位と回数が多くなっている。
- 余震における応答は, 本震に比べて大きくなっている。

主に, A地点と震源の間の距離に関し、余震の方が本震より、相対的に近くなっているためと考えられる。

## 本震および余震における浮上り回数(浮上り変位の時刻歴応答波形)

## 7. Conclusion

- 1) The uplift behavior of the tank shell-to-bottom joint during the large-scale earthquakes could be simulated by the nonlinear time history analysis using a mechanical model of mass spring system.
- 2) The uplift of the tank shell-to-bottom joint was observed several times during the artificial seismic wave predicted in the future, and the maximum displacement by uplifting is about 12cm.

Thank you for your attention!

**IHI**

**Realize your dreams**