

安全研究成果報告（案）  
安全研究プロジェクトの中間評価用資料  
説明資料

# 津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究 事後評価 説明資料

令和3年4月

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

## 目次

1. 研究概要
  2. 研究期間を通じた主要成果
  3. まとめ
  4. 成果の活用について
  5. 成果の公表等
  6. 成果目標に対する達成状況
  7. 今後の展開
- 文献

# 1. 研究概要

## (1) 研究プロジェクト(PJ)の背景

- ・ 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、本PJ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。
- ・ これまでの安全研究では、主にプレート間地震を対象に津波波源モデルの改良等を実施してきたが、津波発生に係る地震の規模や発生頻度のモデル化（津波発生モデル）に係る不確かさの取扱い及び内陸地殻内地震や地震以外の津波発生要因の特性も踏まえて、確率論的津波ハザード評価（以下「PTHA\*1」という。）手法に反映していくことが必要である。

PTHA : Probabilistic Tsunami Hazard Assessment

## (2) 研究プロジェクトの目的

本プロジェクトでは、以下の研究課題の解決を図り、関連審査ガイド<sup>1)</sup>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する。

### (1) 地震起因の津波の確率論的ハザード評価手法の信頼性向上

- a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備
- b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築  
(共同研究：東北大学＋東北学院大学＋NRA)
- c. 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証

### (2) 地震以外の発生要因の津波の確率論的ハザード評価手法の整備

- a. 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備  
(一部を委託研究：日本大学)



## 2. 研究期間を通じた主要成果

## 課題(1)a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備

### 【背景】

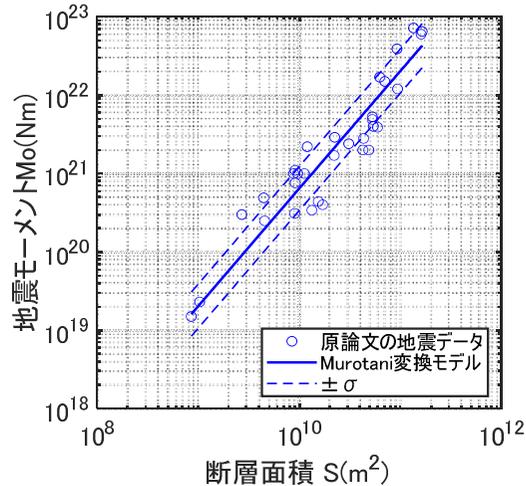
- 現行の適合性審査では、策定された基準津波による津波高がどの程度の超過確率に相当するのか確認するために、確率論的津波ハザード評価（PTHA）手法<sup>2)</sup>が用いられている。
- PTHA手法<sup>2)</sup>は、「安全性の向上のための評価」の確率論的リスク評価でも利用されるものである。津波発生に係る不確かさを適切に評価して、同評価手法の信頼性を向上させていくことが重要である。
- PTHA手法<sup>2)</sup>では、津波波源の位置、規模、地震発生頻度等の津波発生モデル及び津波伝播モデルが用いられ、これらのモデル化には不確かさが伴う。不確かさの要因は多様であるが、従来手法ではその不確かさをモデルに反映していないものがある。
- これらの不確かさは、評価結果に影響することが予想され、より詳細に検討を行い、これらの影響を評価しておくことが必要である。

### 【目的及び実施内容】

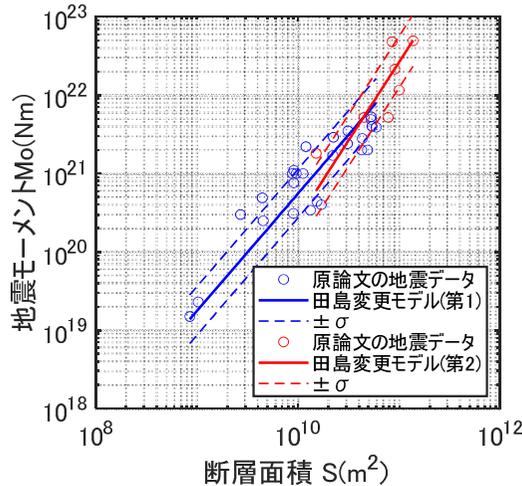
- プレート間地震による津波を対象に、**地震規模に係るスケーリング則**、G-R則<sup>3)</sup>及び津波伝播における砕波現象を考慮した限界波高に着目し、地震データや水理実験データに基づいてモデル化上の不確かさを定量的に評価し、確率モデルを設定する。
- これらの確率モデルを導入したPTHA手法を整備する。
- 上記のPTHA手法を用いてモデルサイトの試解析を実施し、各不確かさ要因が解析結果に及ぼす影響を明らかにする。

## ■ 津波発生・伝播に係る不確かさ要因と確率モデルの構築

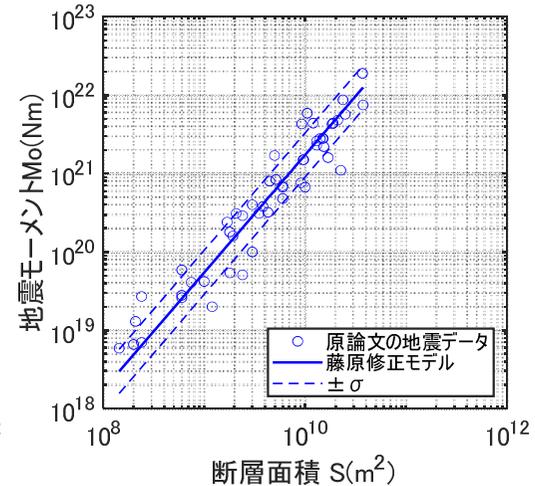
- 既往研究<sup>4)-7)</sup>の地震モーメント $M_0$ と断層面積 $S$ のスケーリング則について、比較のため、 $S$ の関数で表し、地震データとの誤差に由来する不確かさを標準偏差 $\sigma_{\ln(M_0)}$ として算定した。
- $\sigma_{\ln(M_0)}$ には、式(1)の $M_0$ 算定時に剛性率 $\mu$ のばらつきが含まれるため、これを除外した。
- 式(2)より平均すべり量 $D$ のばらつき $\sigma_{\ln(D)}$ を算定し、 $D$ と $S$ のスケーリング則を導出する。



Murotani et al.(2013)<sup>4)</sup>引用



田島ら(2013)<sup>5)</sup>引用



藤原ら(2015)<sup>6)</sup>引用

$$M_0 = \mu \cdot D \cdot S \quad \dots (1)$$

$M_0$ :地震モーメント[Nm]、

$\mu$ :剛性率[N/m<sup>2</sup>]

$D$ :平均すべり量[m]、 $S$ :断層面積[m<sup>2</sup>]

正規分布の加法定理より

$$\sigma_{\ln(M_0)}^2 = \sigma_{\ln(\mu)}^2 + \sigma_{\ln(D)}^2 \quad \dots (2)$$

$\sigma_{\ln(\cdot)}$ :各パラメータの対数標準偏差

## □ スケーリング則の不確かさ算定結果一覧

スケーリング則		$\sigma_{\ln(M_0)}$	$\sigma_{\ln(\mu)}$	$\sigma_{\ln(D)}$
Murotani変換モデル		0.647	0.199	0.616
田島変更モデル	第1ステージ	0.713	0.215	0.680
	第2ステージ	0.756	0.0862	0.751
藤原修正モデル		0.647	0.278	0.584

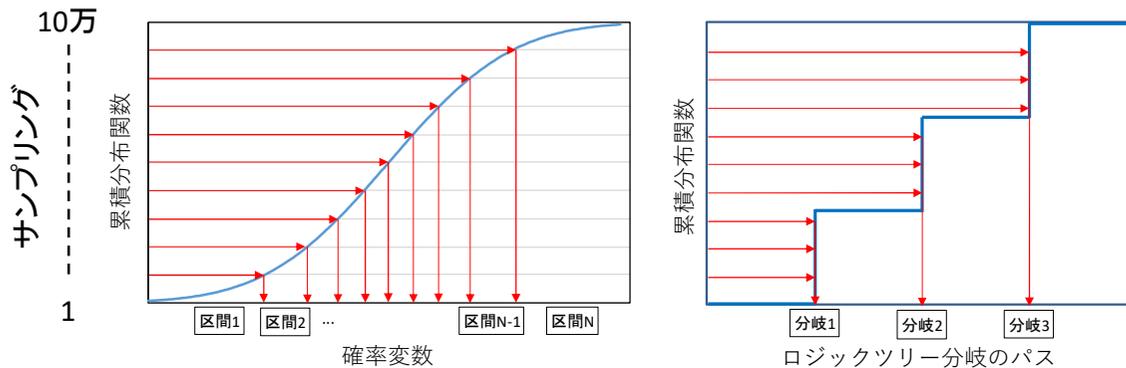
## ■ 確率モデルを用いたPTHA手法 –層別サンプリング法の適用–

- 従来<sup>2)</sup>のPTHA手法では、認識論的不確かさに分類された要因のロジックツリーの分岐の数のハザード曲線で表現され、偶然的不確かさは1本のハザード曲線の中で表現される。
- 地震規模に係るスケーリング則の例では、モデル化上の不確かさを認識論的か、偶然的か、どちらに分類するか議論が分かれるところである。
- 不確かさ要因がどちらに分類されても、同じ土俵で表現できるような方法として、層別サンプリング法とラテン超方格（LHS）法を組み合わせた方法を採用する。

### □ 地震規模に係るスケーリング則のロジックツリー



### □ 層別サンプリング法の概念図



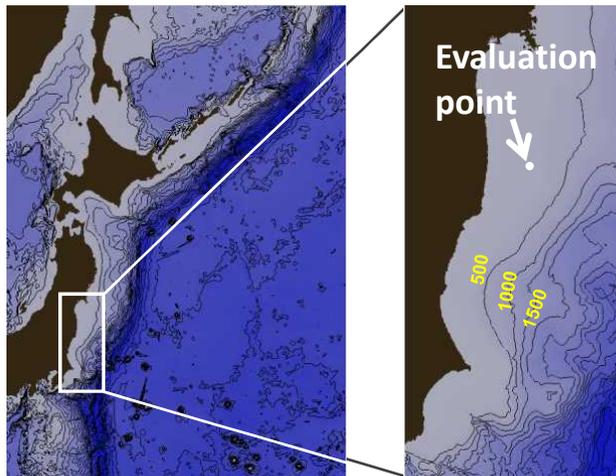
連続的な累積分布関数の場合

離散的な分岐で表す場合

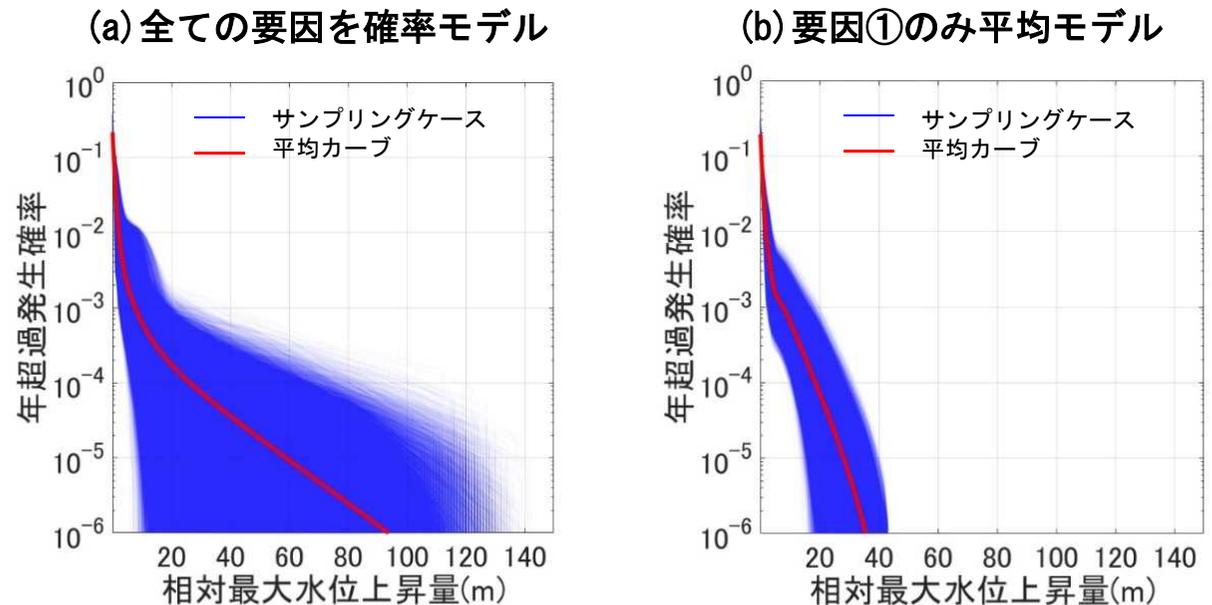
## ■ モデルサイトにおける適用例

- プレート間地震による津波を対象に、要因①地震規模に係るスケーリング則、②G-R則、③限界波高モデル及び④不均一すべり分布の配置パターンについて、それぞれ不確かさを考慮して、確率モデルを設定し、福島県沖をモデルサイトとしてPTHA解析を実施した。
- 評価基準日は2011年3月10日とした。解析条件は杉野ら<sup>8)</sup>を参照した。

### □ 解析対象地点(水深150m)



### □ PTHA解析結果の一部抜粋



- PTHA解析結果に及ぼす不確かさ要因の影響を分析したところ、上記要因の中では、地震規模に係るスケーリング則の不確かさの影響が最も大きいことを確認した。
- 以上より、津波発生に係る地震規模及び発生頻度等のモデル化上の不確かさを反映したPTHA手法を提案し、これらの影響を定量的に把握した。

## 課題(1)b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築

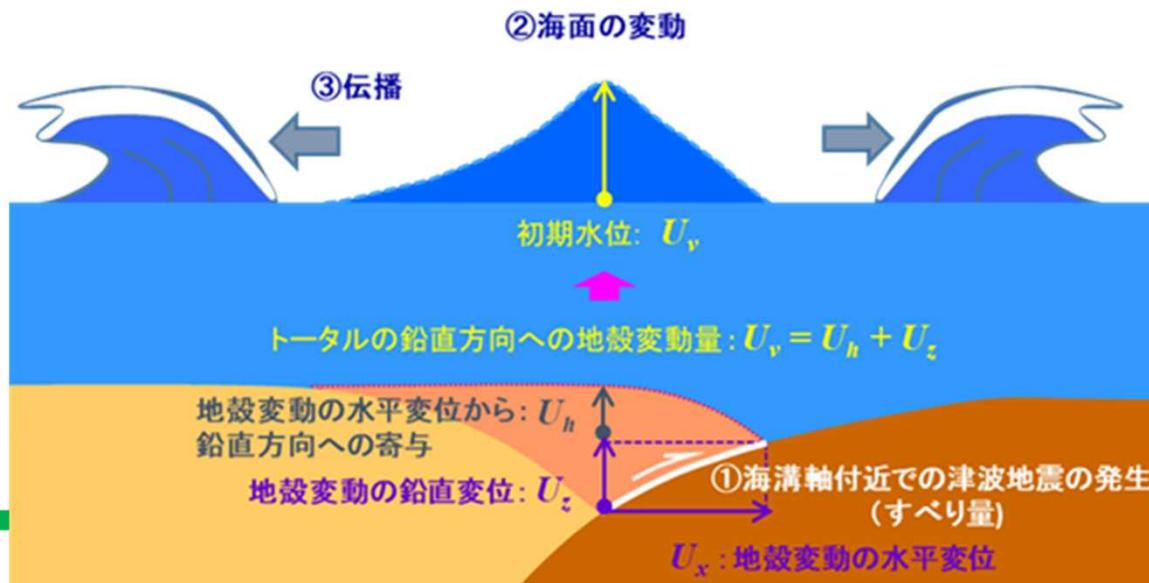
### 【背景】

- 津波レシピ<sup>9)</sup>では、Tanioka and Sateke<sup>10)</sup>の「地殻変動の水平変位による鉛直成分への寄与を考慮する方法」(以下、TS法という。)が採用され、一般的になりつつある。
- 従来の特性化波源モデル<sup>例えば11)</sup>ではすべり量を割り増して水平変位の寄与分を考慮してきた。
- 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、その方法に見合うすべり量等の設定方法による特性化波源モデルが必要である。

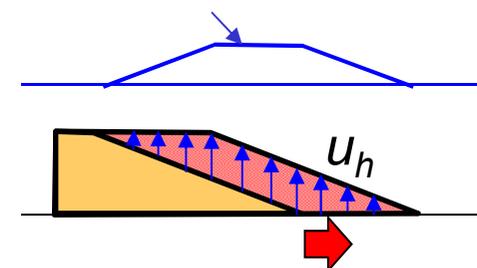
### 【目的・実施内容】

- 海底の地殻変動の水平変位を模擬した水理実験及びTS法を用いて、その手法の再現性の程度を明らかにする。⇒【7. 今後の展開で説明】
- TS法による「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。

### □ 津波初期水位設定のイメージ



海水面上昇



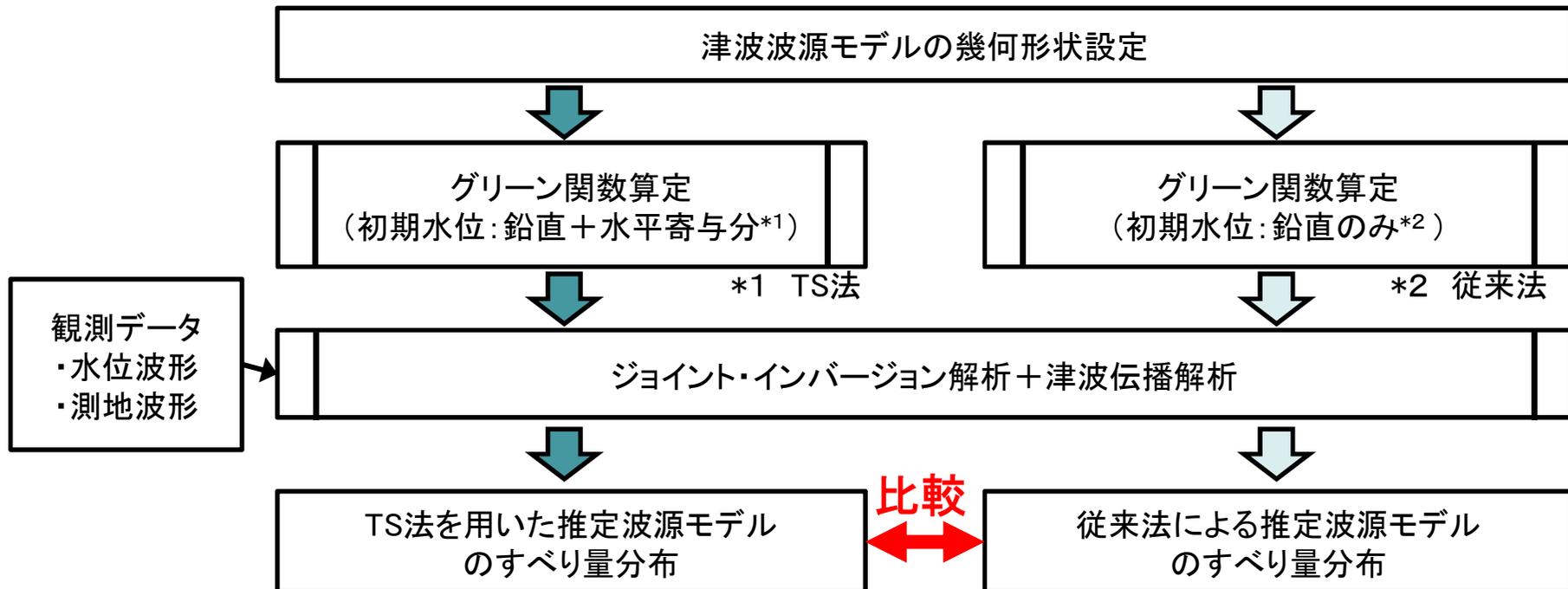
TS法による地殻変動の水平変位による鉛直成分への寄与

## ■ 水平変位による寄与分を考慮した特性化波源モデルの構築

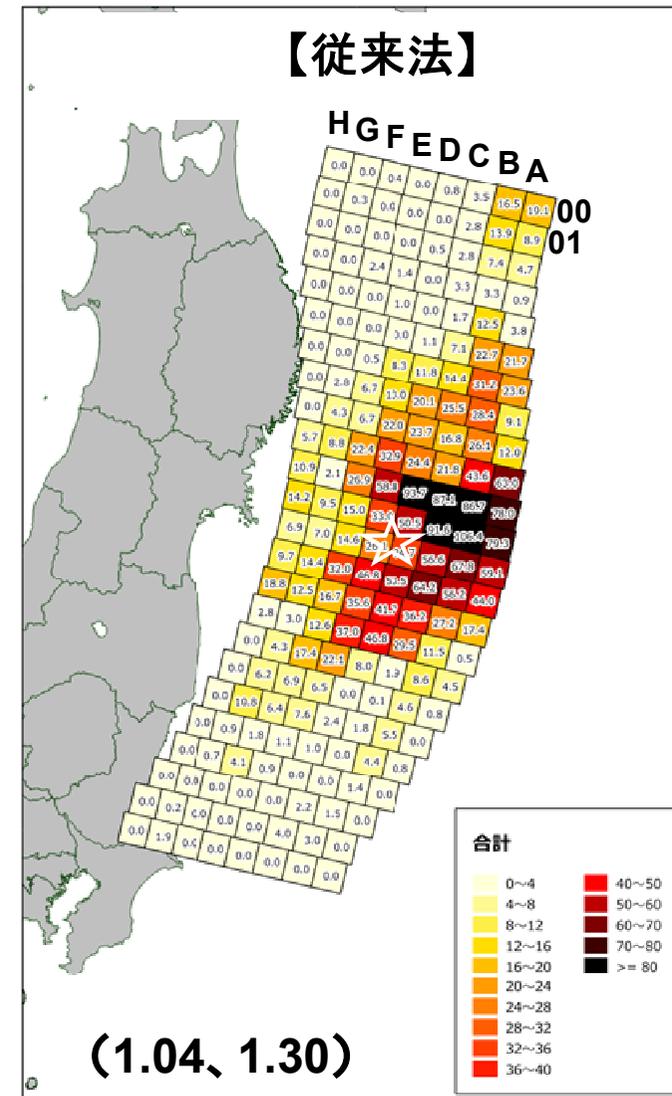
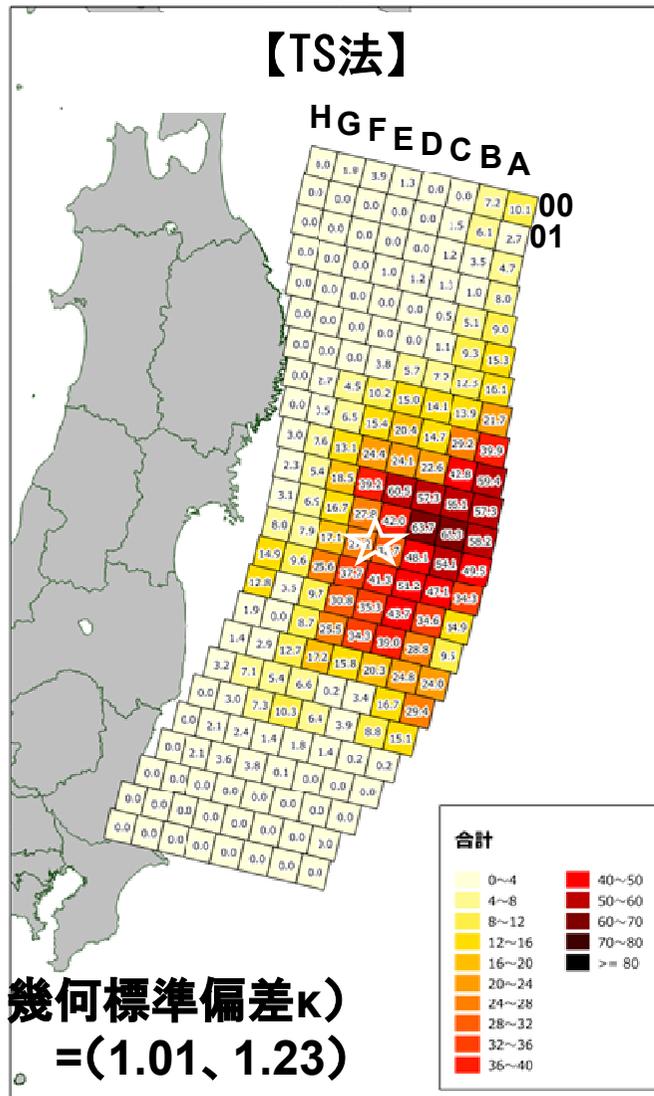
### ① 推定津波波源モデルによるすべり量分布の比較

- 同一形状の津波波源モデルを用いて、①TS法を用いて水平変位の寄与分を考慮する場合と②従来法の鉛直変位のみを考慮する場合で、それぞれグリーン関数を作成する。
- 同一条件（2011年東北地震津波の観測データ）で上記①、②のジョイント・インバージョン解析及び津波伝播解析を実施し、それぞれの推定波源モデルのすべり量分布を推定し、両者を比較する。

### □ 津波波源モデルのすべり量の推定手順



□ 推定津波波源モデル



- TS法の場合は、従来法の場合と比較して、以下のパラメータが全体的に小さい。  
(すべり面積95%、平均すべり量90%、地震モーメント84%、最大すべり量60%)

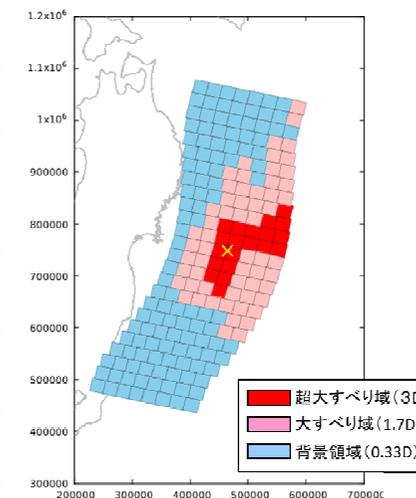
## ②TS法による水平寄与分を考慮した特性化波源モデルの設定方法の提案

### □ 特性化波源モデルにおけるすべりの面積比及びすべり量

領域		TS法を用いた場合			従来法の場合(杉野ら <sup>11)</sup> )		
		面積比	すべり量	Mw	面積比	すべり量	Mw
波源全体		100% (125,000km <sup>2</sup> )	D (10.1m)	9.1	100% (134,593km <sup>2</sup> )	D (10.4m)	9.1
内訳	超大すべり域	10%	3D		15%	3D	
	大すべり域	30%	1.7D		25%	1.4D	
	背景すべり域	60%	0.33D		60%	0.33D	

D:平均すべり量

### □ すべり量分布



(K=1.05、κ=1.29)

- TS法を用いた推定波源モデルのすべり量分布を基に、超大すべり域及び大すべり域の面積比やすべり量等の設定方法を提案し、この方法で作成した特性化波源モデルを2011年東北地震津波の再現解析に適用したところ、良好な再現性を確認した。
- 従来法による杉野ら<sup>11)</sup>の特性化波源モデルと比較すると、①波源全体の面積が小さい、②超大すべり域の面積比が小さい、③大すべり域の面積比及びすべり量が大きい、という特徴が示された。

## 課題(1)c. 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証

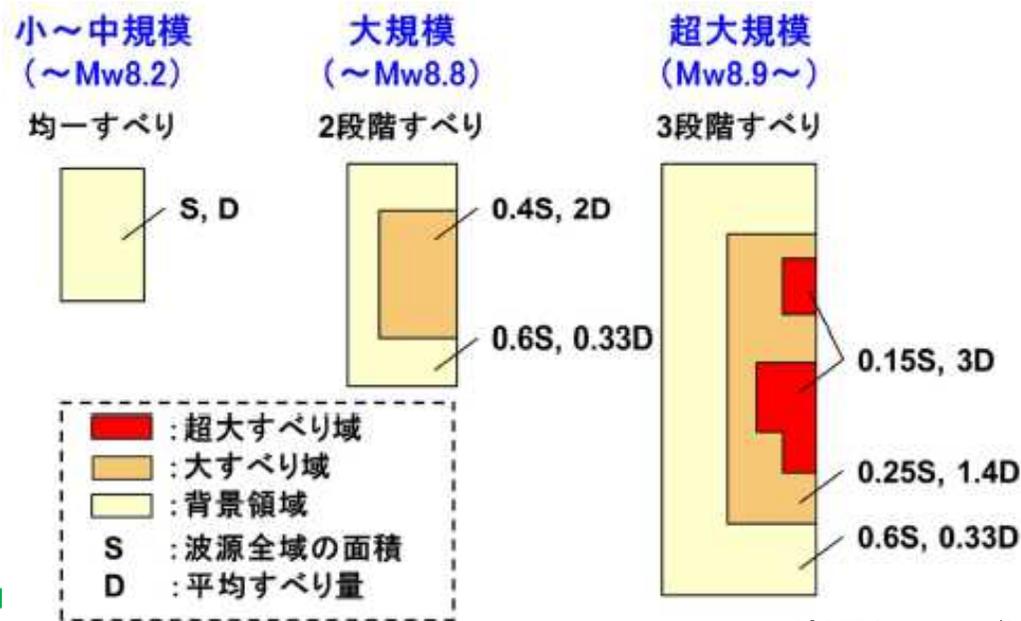
### 【背景】

- 杉野ら<sup>11)</sup>は、プレート間地震津波を対象に、地震規模別に三つの区分を設けて、それぞれの特性化波源モデルを提案した。
- そのうちMw8.9以上の超大規模クラスについては、2011年東北地震津波に対して一定程度の再現性を確認したが、それより小さい規模については今後の課題とした<sup>11)</sup>。
- 特性化波源モデルの再現性（定量値）は、PTHAにとって重要な不確かさ情報となる。

### 【目的】

- Mw8.8以下のプレート間地震津波の特性化波源モデルによる再現性を定量的に示し、同規模の特性化波源モデルの適用性を把握する。

### □ 杉野ら<sup>11)</sup>の特性化波源モデルの地震規模別のすべり分布



(杉野ら、2019<sup>11)</sup>)

## 【実施内容】

過去に日本近海で発生したMw8.8以下のプレート間地震津波を対象に、杉野ら<sup>11)</sup>の方法を用いて特性化波源モデルを作成し、津波伝播解析を行い、再現性を定量的に評価する。

### ■ 対象地震

1854年安政東海地震 ( $M_w8.3$ )、1854年安政南海地震 ( $M_w8.3$ )、1707年宝永地震 ( $M_w8.4$ )  
1944年昭和東南海地震 ( $M_w8.1$ )      \*  $M_w$ 値は既往研究による。

### ■ 対象地震の特性化波源モデルの作成手順

各対象地震の  $M_w$  ⇒ 地震モーメント ( $M_o$ ) ⇒ 断層面積 ( $S$ ) ⇒ 平均すべり量 ( $D$ )

式①

式②

式③

$\log M_o = 1.5M_w + 9.1$	…式①
$M_o = 16/(7\pi^{3/2}) \cdot \Delta\sigma \cdot S^{3/2}$	…式②
$D = M_o/(\mu \cdot S)$	…式③

⇒ 断層の位置設定(既往研究を参考)

⇒ 不均一すべり分布(すべり量及び面積比)の設定と複数パターンの配置

⇒ 再現性の改善のために断層面積( $S$ )を調整し、上記の関係式に沿ってパラメータ設定

## ■ 津波解析の主な条件

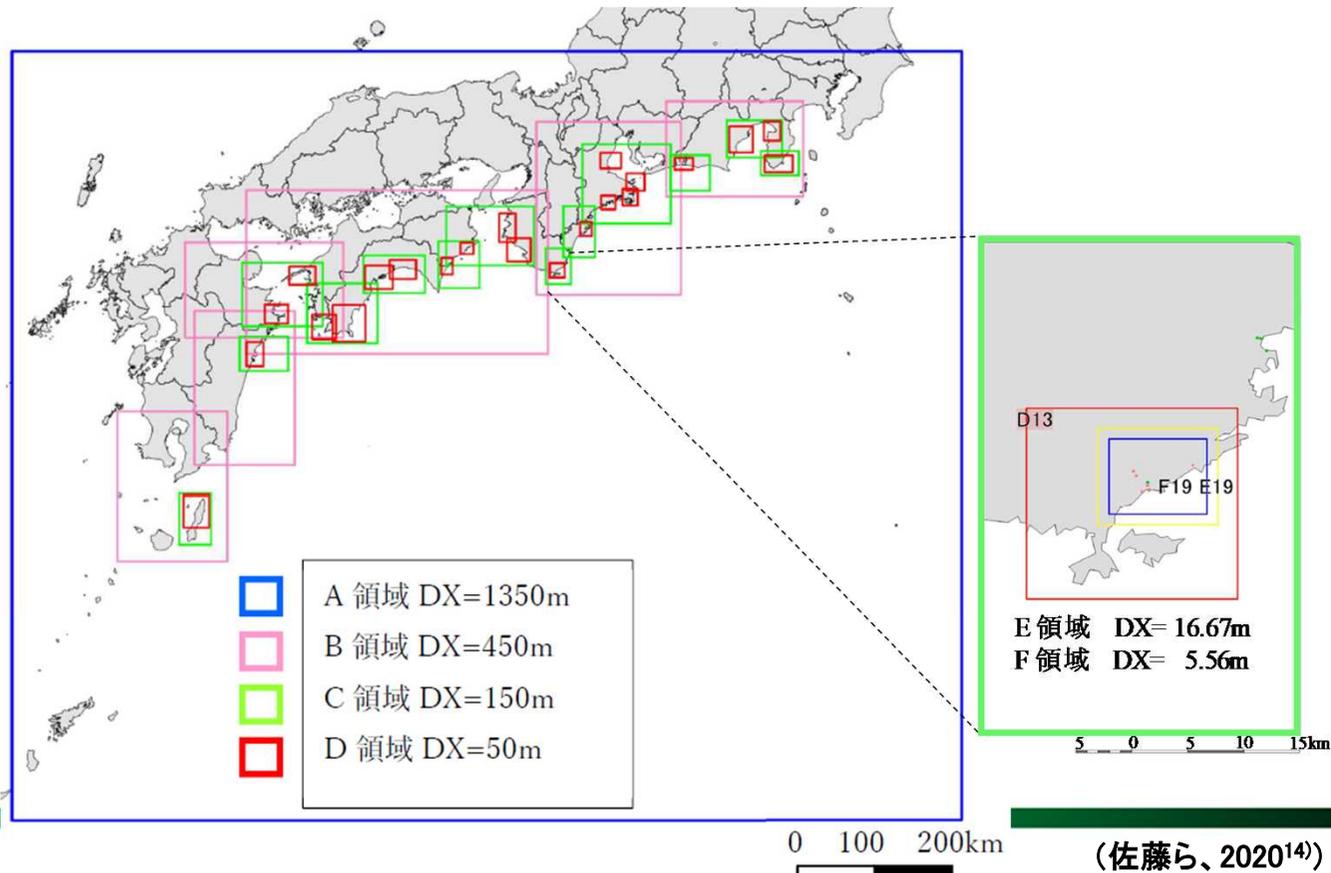
津波伝播解析：(海域)非線形長波理論、(陸域)小谷ら<sup>12)</sup>の方法

既往津波の痕跡情報：「津波痕跡データベース」<sup>13)</sup>の痕跡高及び痕跡地点(信頼度A、B)

計算津波高の評価地点：上記の痕跡地点に近い汀線位置

地形モデル：A領域(1350m)～F領域(5.56m)

### □ 津波解析モデルの解析領域及び格子分割

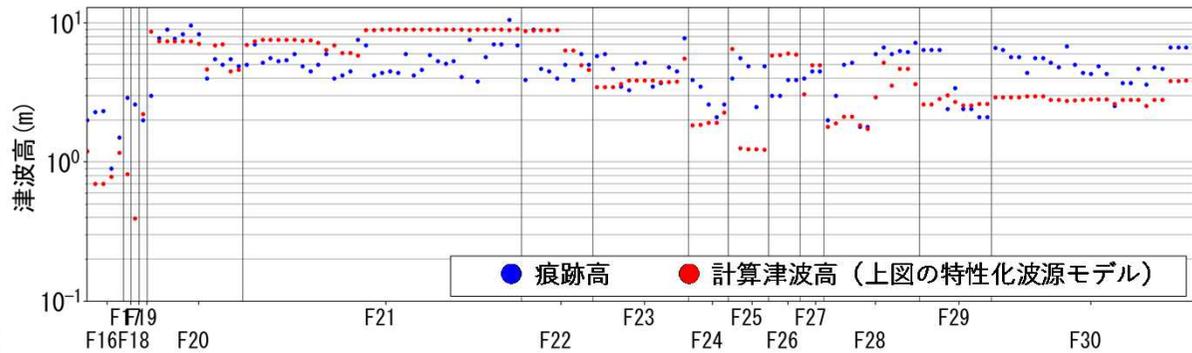
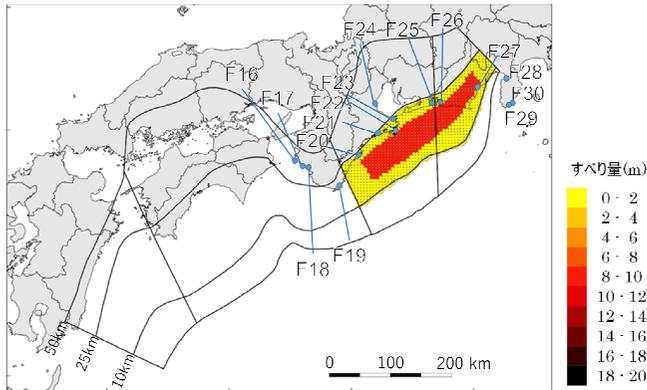


## ■ 津波解析の結果

各対象地震津波において、複数の配置パターンの中から相田<sup>15)</sup>の指標(幾何平均 $K$ 、幾何標準偏差 $\kappa$ )が比較的良好なものを選定した。

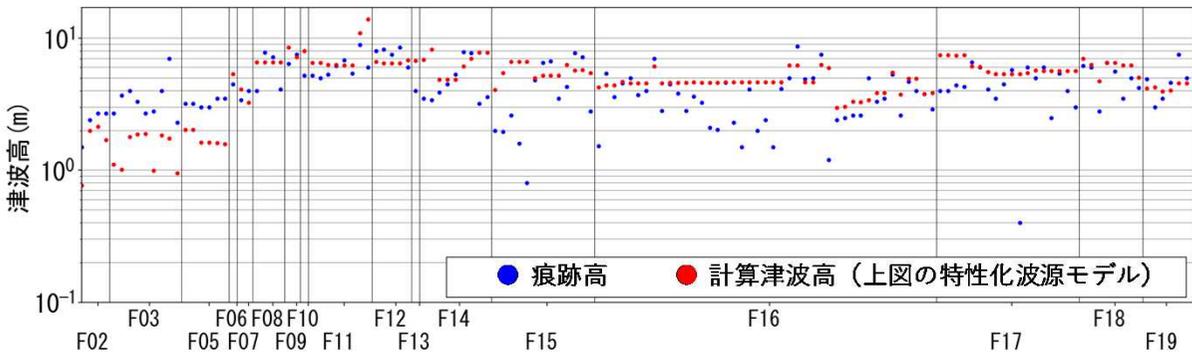
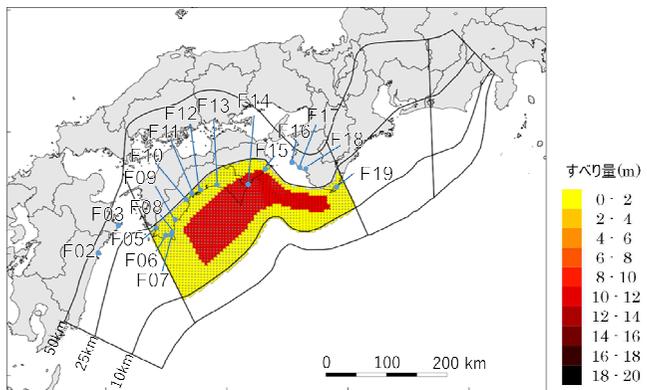
### □ 1854年安政東海地震( $M_w8.3$ )

$(K, \kappa) = (1.12, 1.74)$  23ケース中



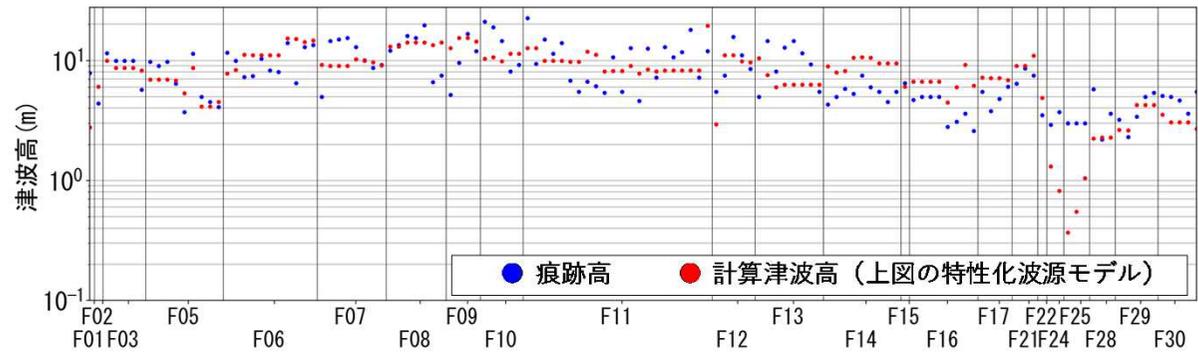
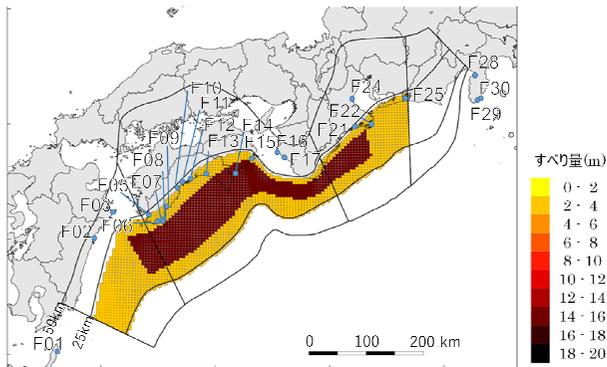
### □ 1854年安政南海地震( $M_w8.3$ )

$(K, \kappa) = (0.87, 1.76)$  26ケース中



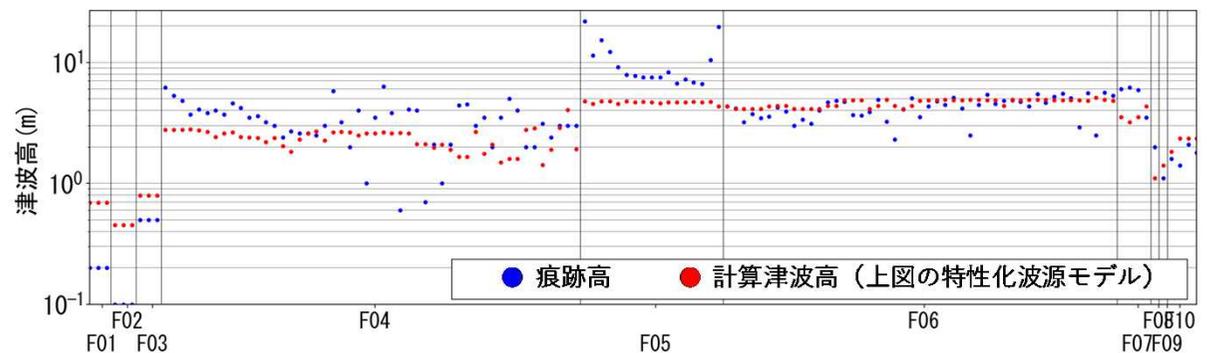
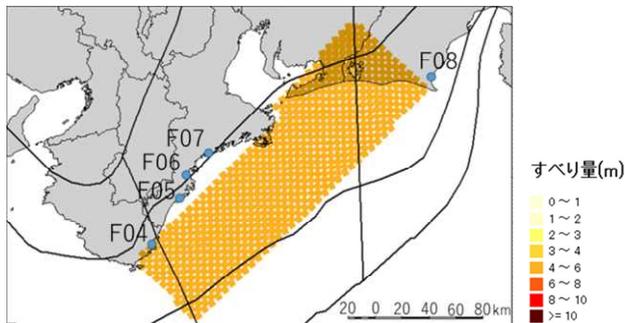
□ 1707年宝永地震( $M_w8.4$ )

$(K, \kappa) = (1.02, 1.69)$  60ケース中



□ 1944年昭和東南海地震( $M_w8.1$ )

$(K, \kappa) = (1.09, 1.78)$  2ケース中



- 再現解析の結果、 $\kappa$ は、東北地震津波 ( $M_w9.0$ ) の1.30に比べて大きくなった。これは、痕跡情報の位置精度や当時の地形の再現精度が低いこと、津波高の低い流況は地形の起伏の影響を受けやすいこと、評価点が汀線位置とし痕跡情報の位置と異なることが原因と考える。
- 大規模及び中小規模では $\kappa$ が大きくなることから、PTHAの精緻化のためには、地震規模に応じた計算津波高の不確かさを設定する必要性が示唆されたと考える。

## 課題(2)a. 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備

### 【背景】

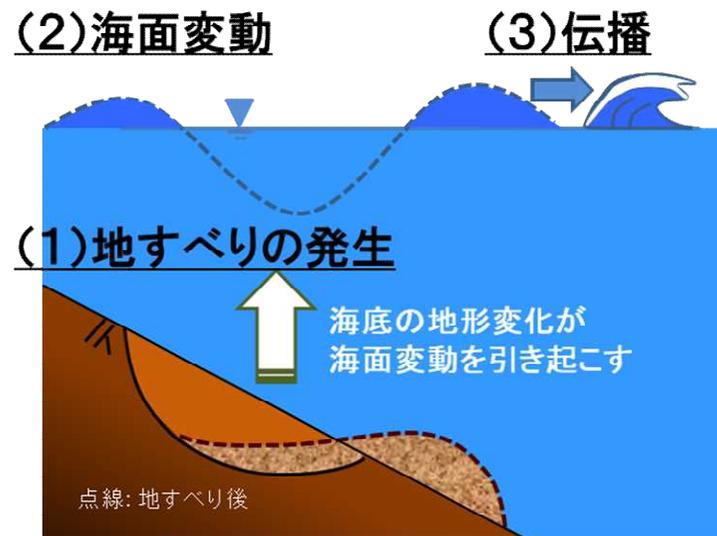
- 新規制基準では、基準津波の水位の超過確率の参照を求めており、PTHA手法が用いられる。
- 土木学会のPTHA手法<sup>2)</sup>が一般に知られているが、評価対象は、地震起因の津波のみである。
- 津波の発生要因には、地震以外にも海底の地すべりもあり、PTHA手法における津波発生要因を拡張していくことが必要である。

### 【目的・実施内容】

- 以下の手法を組合せた「海底地すべり起因津波のPTHA手法」を提案し、モデル海域での適用事例を示す。
  - ①海底地すべり危険度判定手法<sup>16)</sup>の改良版
  - ②津波初期水位算定手法
  - ③津波伝播解析手法
  - ④ハザード曲線算定手法

注) 海底地すべり危険度判定手法は、H28年度までの安全研究成果であり、論文にて公表済み

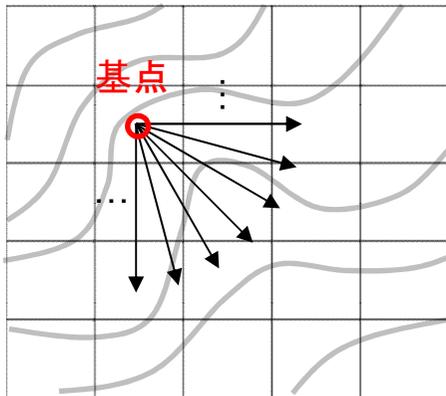
### □ 海底地すべり起因の津波のイメージ



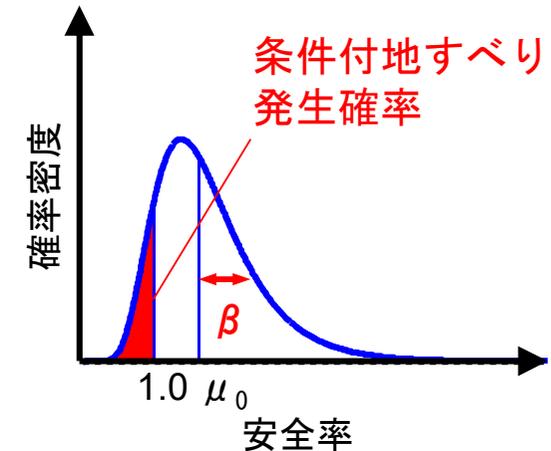
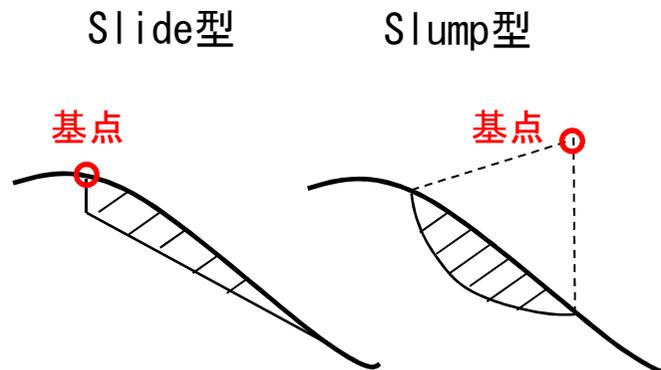
## ■ 海底地すべり起因津波のPTHAの主な特徴

### ① 海底地すべり発生危険度判定手法

- 格子状に作成した地形モデルの全格子中心で全方位に複数パターンの地すべり長さと同幅を持った地すべりを生成し、地すべり形状として成立するか検定する。
- 修正フェレニウス法を用いて地震外力に対する安全率  $\mu_0$  を算定し、その値が中央値となる確率分布（対数正規分布を仮定）を設定し、1.0を下回る面積を条件付地すべり発生確率とする。
- 上記の対数正規分布の標準偏差  $\beta$  は、遠心模型実験の結果（委託研究）を利用する。



矢印は地すべり方向を示す。



- ② 津波初期水位算定手法 ⇒ Watts et al.<sup>17)</sup> の方法
- ③ 津波伝播解析手法 ⇒ グリーンの法則<sup>18)</sup>、距離減衰式<sup>19)</sup>
- ④ ハザード曲線算定手法 ⇒ 従来<sup>8)</sup>の方法

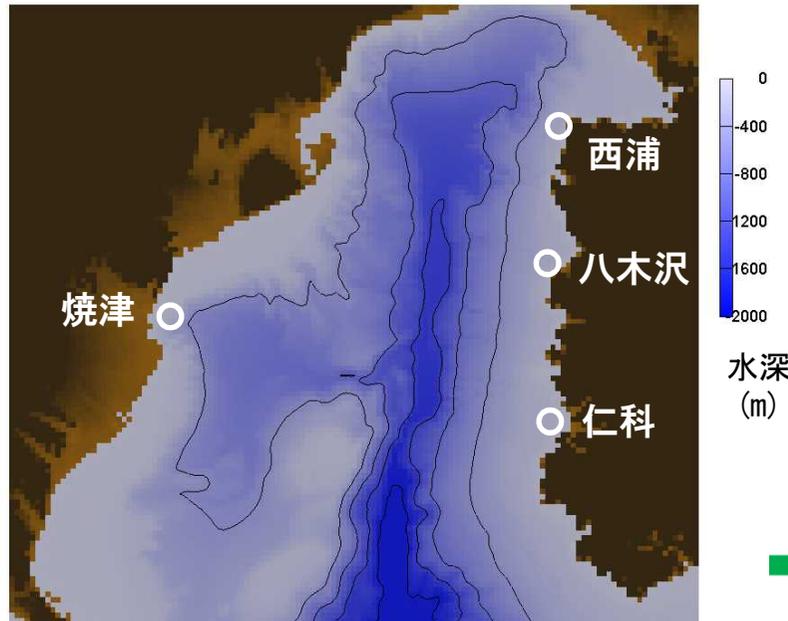
## ■ モデル海域での適用事例(解析条件)

- 過去に海底地すべりが発生したことが確認されている駿河湾の海域を対象とした。
- 内閣府の「南海トラフの巨大地震検討会」<sup>20)</sup>の公開データを基に海底地形モデルを作成した。
- 「日本の地質 増補版」<sup>21)</sup>の駿河湾における底質分布図を基に海底の地質区分モデルを作成した。
- 地震外力は、当該沿岸域の確率論的地震ハザード解析J-SHIS<sup>22)</sup>の算定結果を参照した。

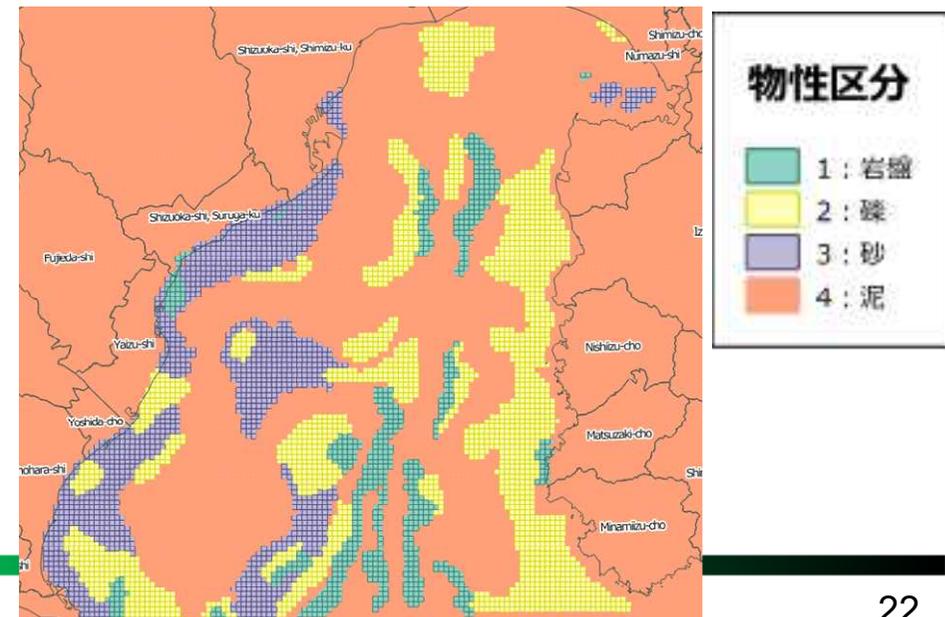
## □ 地震動強さと発生確率

年超過確率 P	年発生確率 p	加速度(gal)	水平震度
$10^{-1}$	$9.0 \times 10^{-2}$	24.4	0.02485
$10^{-2}$	$9.0 \times 10^{-3}$	294.6	0.30059
$10^{-3}$	$9.0 \times 10^{-4}$	501.9	0.51219
$10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-5}$	688.3	0.70240
$10^{-5}$	$10^{-5}$	812.4	0.82903

## □ 海底地形モデル(格子間隔200m)



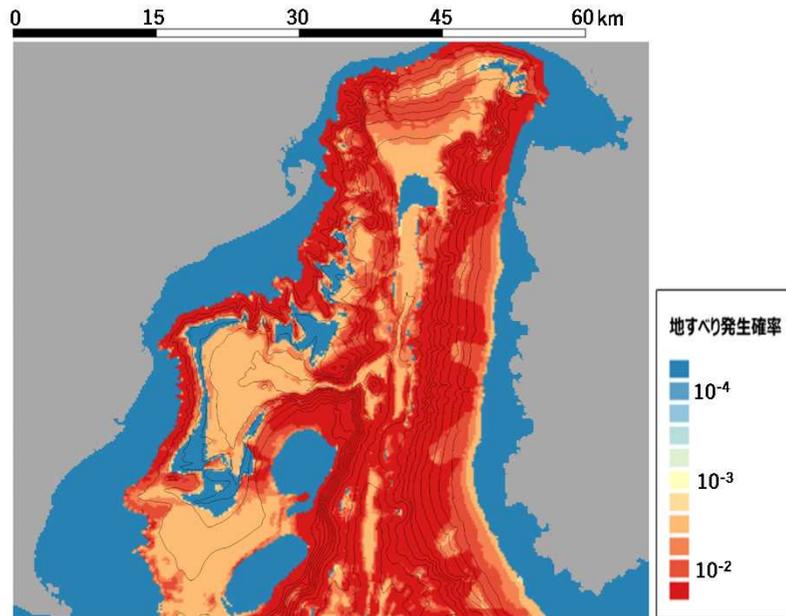
## □ 地質区分モデル(格子間隔200m)



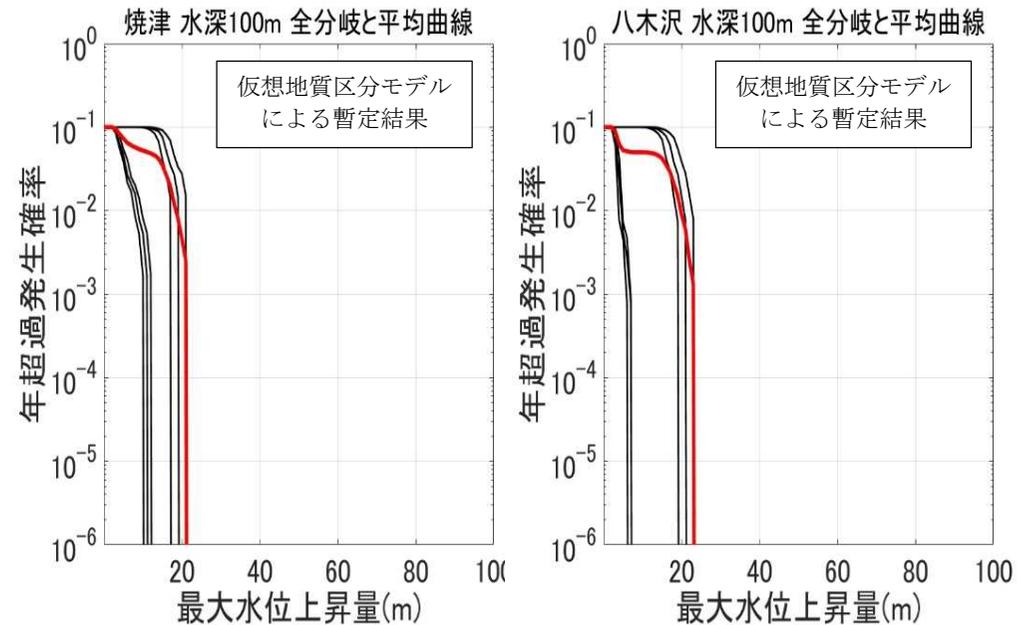
## ■ モデル海域での適用事例(解析結果)

- 海底地すべり危険度判定手法を用いてハザードマップを作成し、面的に評価した。
- 海底地すべり (Slide型とSlump型) を等重みで平均した。

### □ 海底地すべりハザードマップ



### □ 津波ハザード曲線



- 地すべりの発生確率は、海底の地質区分によらず、急勾配な地点ほど高くなった。斜面の勾配の影響が大きい結果となった。
- 焼津と八木沢の津波ハザード曲線を比較すると大きな違いはないものの、地震起因の津波ハザード曲線 (J-THIS<sup>23</sup>) と比較するといずれも大きい結果となった。
- 海底地すべり起因津波の確率論的ハザード評価手法を提案できたが、実用化のためには、更なる手法の精緻化が必要と考える。

## 3. まとめ

- (1) 地震起因の津波の確率論的ハザード評価手法の信頼性向上
  - a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備
    - プレート間地震による津波を対象に、津波発生モデルの不確かさを定量的に評価して確率モデルを設定し、これらの確率モデルを取り入れたPTHA手法を提案した。
    - 上記手法をモデルサイトに適用し、今回検討した不確かさ要因の中では、地震規模に係るスケーリング則の不確かさがPTHAの結果に最も大きく影響することを確認した。
  - b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築
    - 海底の地殻変動の水平変位による鉛直方向への寄与分を考慮する方法としてTanioka and Satake<sup>10)</sup>の方法を適用した場合の特性化波源モデルの設定方法を提案した。
    - 上記手法を東北地震津波の再現に適用し、良好な再現性を確認した。
  - c. 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証
    - Mw8.8以下のプレート間地震津波として、過去に発生した4地震を対象に、杉野ら<sup>11)</sup>の手順に基づく特性化波源モデルを作成し、各津波の再現解析を実施した。
    - その結果、同規模の特性化波源モデルではMw8.9以上に比べて、痕跡高との誤差が大きくなることを確認した。
- (2) 地震以外の発生要因の津波の確率論的ハザード評価手法の整備
  - a. 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備
    - 佐藤ら<sup>16)</sup>の「海底地すべり危険度判定手法」を改良し、「津波初期水位」及び「津波伝播」に係る簡易的な既往手法<sup>17-19)</sup>と組み合わせて、海底地すべり起因津波の確率論的ハザード評価手法を提案した。
    - 上記手法をモデル海域に適用し、津波ハザード曲線を試算して同手法の可用性を確認した。

## 4. 成果の活用について

研究課題	PJ期間内	今後の見通し
(1)a.津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備	—	国内論文:1編
(1)b.津波地震による津波の特性化波源モデルの構築	国内論文:1編 <sup>24)</sup> 国際会議:1編 <sup>25)</sup>	国内論文:2編
(1)c.中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証	国内論文:1編 <sup>14)</sup>	—
(2)a.海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備	国内論文:1編 <sup>26)</sup> (委託先発表)	国内論文:1編

(注) 国内論文は全て査読付きである。

## 5. 成果の公表等

### ■ 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

- 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)、2019.
- ② 佐藤太一、杉野英治、“Mw8.8以下のプレート間地震津波に対する特性化波源モデルの再現性”、土木学会論文集B2(海岸工学)、2020.
- ③ 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.

### ■ 委託先による公表

- ① 齋藤和寿、仙頭紀明、中村晋、“動的な遠心載荷実験に基づく海底斜面の地震時安定性評価”、土木学会論文集B3(海洋開発)、2020.

## 6. 成果目標に対する達成状況

下記のとおり、4つの研究課題について、平成29年度から令和2年度までの4年間の実施計画に基づいて実施し、すべての研究項目の当初目的を達成した。

### (1) a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備

- プレート間地震による津波を対象に、津波発生モデルの不確かさを定量的に評価して確率モデルを設定し、これらの確率モデルを取り入れたPTHA手法を提案した。

### (1) b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築

- 海底の地殻変動の水平変位による鉛直方向への寄与分を考慮する方法としてTanioka and Satake<sup>10)</sup>の方法を適用した場合の特性化波源モデルの設定方法を提案した。

### (1) c. 中小規模及び大規模津波の特性化波源モデルの適用性検証

- Mw8.8以下のプレート間地震津波として、過去に発生した4地震を対象に、杉野ら<sup>11)</sup>の手順に基づく特性化波源モデルを作成し、各津波の再現解析を実施し、再現性を定量的に評価した。

### (2) a. 海底地すべり起因津波の確率論的津波ハザード評価手法の整備

- 佐藤ら<sup>16)</sup>の「海底地すべり危険度判定手法」を改良し、「津波初期水位」及び「津波伝播」に係る簡易的な既往手法と組み合わせて、海底地すべり起因津波の確率論的ハザード評価手法を提案した。

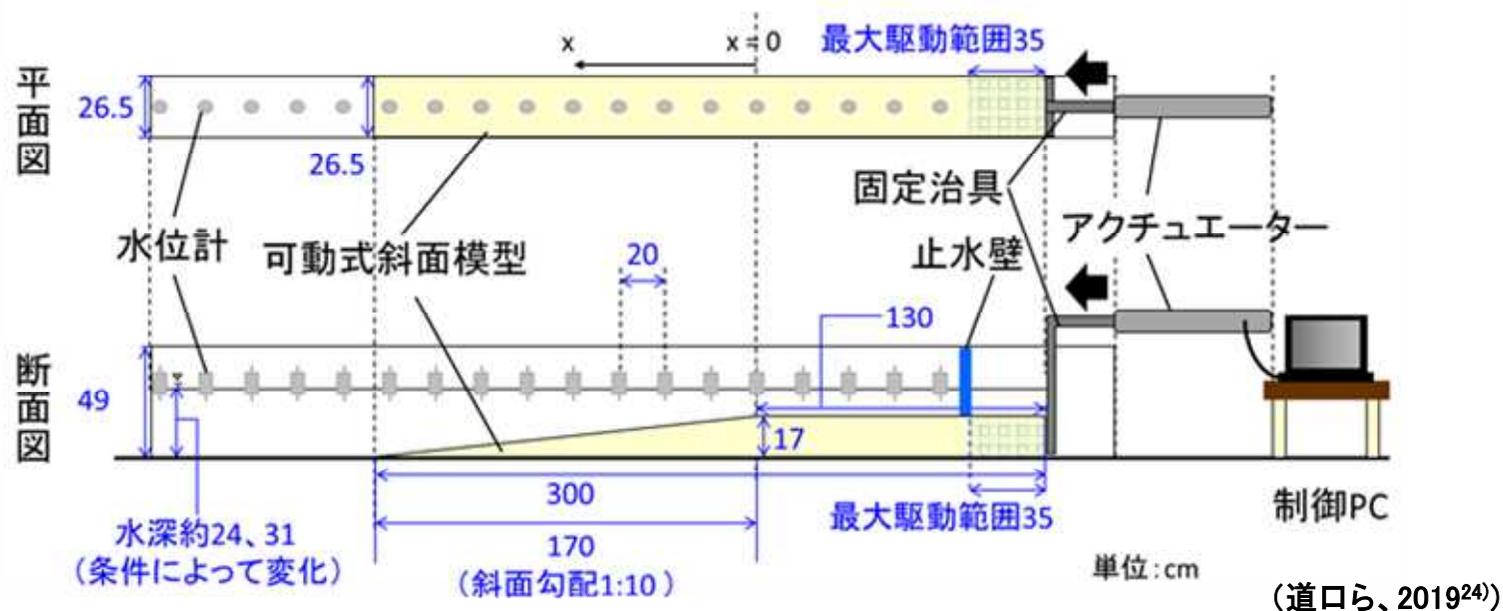
## 7. 今後の展開

### (1)b. 津波地震による津波の特性化波源モデルの構築

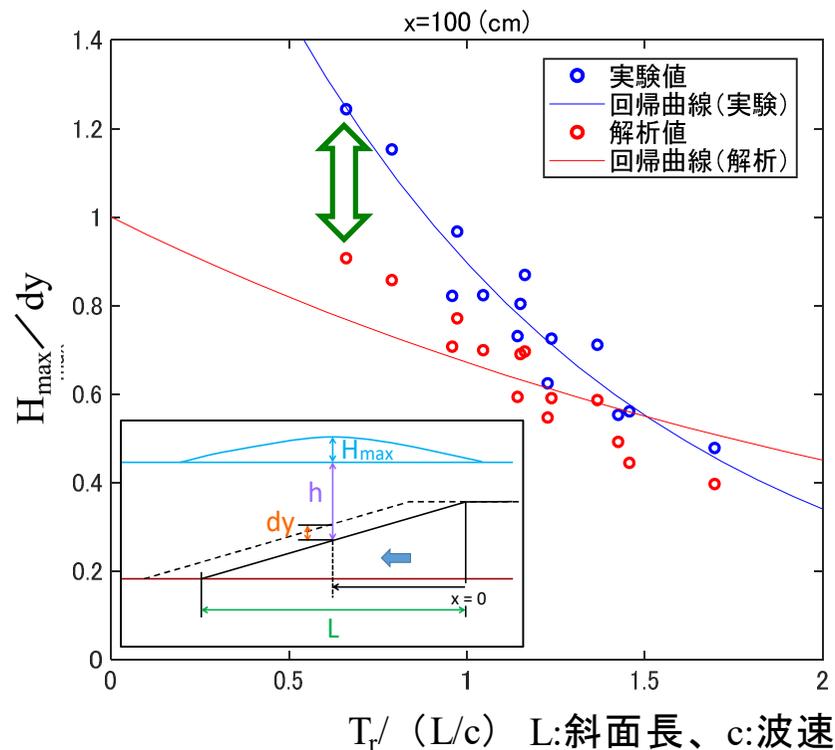
#### 【目的・実施内容】

- ① 海底の地殻変動の水平変位を模擬した水理実験及びTS法を用いて、その手法の再現性の程度を明らかにする。⇒ 新たに課題を得たので次PJで解決を図る。
- ② TS法による「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。⇒ 本PJで達成済みである。

#### ■ 水理実験装置の概要



## ■ 水理実験結果とTS法による解析結果の比較



- 海溝軸付近で発生する津波については、水理実験の結果からTS法による初期水位の設定方法では十分に再現できない現象が見られたことから、津波初期水位の設定方法を改良・精緻化する必要がある。

⇒課題(1)：海溝軸付近で発生する津波の初期水位設定方法の改良

## 参考文献

- 1) 原子力規制委員会、“基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド”、2013.
- 2) 土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会、“原子力発電所の津波評価技術2016”、2016.
- 3) Gutenberg, R. and Richter, C.F., “Frequency of earthquakes in California”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 34, pp. 185–188, 1944.
- 4) Murotani, S., Satake, K. and Fujii, Y., “Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for  $M \sim 9$  subduction zone earthquakes”, Geophysical Research Letters, Vol. 40, pp. 5070–5074, 2013.
- 5) 田島礼子、松元康広、司宏俊、入倉幸治郎、“内陸地殻内および沈み込みプレート境界で発生する巨大地震の震源パラメータに関するスケーリング則の比較研究”、地震第2輯、Vol. 66、pp. 31–45、2013.
- 6) 藤原広行、平田賢治、中村洋光、長田正樹、森川信之、河合伸一、大角恒雄、青井 真、松山尚典、遠山信彦、鬼頭 直、村嶋陽一、村田泰洋、井上拓也、斎藤 龍、秋山伸一、是永真理子、阿部雄太、橋本紀彦、“日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討”、防災科学技術研究所研究資料、Vol. 400、2015.
- 7) Murotani, S., Miyake, H. and Koketsu, K., “Scaling of characterized slip models for plate–boundary earthquakes”, Earth Planets and Space, Vol. 60, pp. 987–991, 2008.
- 8) 杉野英治、岩渕洋子、阿部雄太、今村文彦、“確率論的津波ハザード評価における津波想定の影響”、日本地震工学会論文集、Vol. 15、No. 4、pp. 40–61、2015.
- 9) 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.
- 10) Tanioka, Y. and Satake, K., “Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom”, Geophysical Research Letters, Vol. 23, No. 8, pp.861–864, 1996.
- 11) 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.

- 12) 小谷美佐、今村文彦、首藤伸夫、“GISを利用した津波遡上計算と被害推定法”、土木学会、海岸工学論文集、Vol. 45、pp.356-360、1998.
- 13) 東北大学災害科学国際研究所、原子力規制庁技術基盤グループ、“津波痕跡データベース”。
- 14) 佐藤太一、杉野英治、“Mw8.8以下のプレート間地震津波に対する特性化波源モデルの再現性”、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.76、No.2、pp.I\_337-I\_342、2020.
- 15) 相田勇、“三陸沖の古い津波のシミュレーション”、地震研究所彙報、Vol.52、pp.71-101、1977.
- 16) 佐藤太一、杉野英治、“確率論的手法を用いた海底地すべり危険度判定手法の構築”、日本地震工学会論文集、第19巻、第6号、pp.283-295、2019.
- 17) Watts, P., Grilli, S.T., Tappin, D.R., Fryer, G.J., “Tsunami generation by submarine mass failure. II: predictive equations and case studies”, J.Waterw. Port Coast. OceanEng., pp. 298-310, 2005.
- 18) 首藤伸夫、“海の波の水理(新体系土木工学24)”、技報堂出版、1981.
- 19) 羽鳥徳太郎、“日本海沿岸における2011年東日本地震津波と青森・秋田県沿岸の歴史地震津波”、歴史地震、第29号、pp.11-16、2014.
- 20) 内閣府、“南海トラフの巨大地震モデル検討会において検討された震度分布・浸水域等に係るデータ提供について”。
- 21) 日本の地質増補版編集委員会、“日本の地質 増補版、共立出版株式会社”、2005.
- 22) 国立研究開発法人防災科学技術研究所、“地震ハザードステーション J-SHIS”。
- 23) 国立研究開発法人防災科学技術研究所、“津波ハザードステーション J-THIS”。
- 24) 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.
- 25) 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).
- 26) 齋藤和寿、仙頭紀明、中村晋、“遠心載荷実験を用いた海底斜面の地震時安定性評価とその再現解析”、日本地震工学会論文集、第20巻、第1号、pp.133-146、2020.

地震津波及びその他の外部事象等に係る  
施設・設備のフラジリティ評価に関する研究  
事後評価 説明資料

令和3年4月  
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

## 目次

1. 研究概要
2. 研究期間を通じた主要成果
3. まとめ
4. 成果の活用について
5. 成果の公表等
6. 成果目標に対する達成状況
7. 今後の展開

# 1. 研究概要

## 1.1 背景

平成25年7月に施行された「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」(平成25年原子力規制委員会規則第5号)において、「地震による損傷の防止」(第4条)のみならず「津波による損傷の防止」(第5条)が強化されるとともに、地震・津波以外の「外部からの衝撃による損傷の防止」(第6条)が明記された。また、「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」(昭和53年12月28日総理府令第57号)において、特別の試験条件として「核燃料輸送物が最大の破損を受けるよう」落下試験を実施した場合の要件が規定されている。一方、平成25年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、事業者に対する安全性の向上のための評価の実施が規定された。安全性向上評価においては、外部事象に係る確率論的リスク評価(PRA)の活用が見込まれる。

このため、地震・津波等の外部事象に関するリスク評価の精度向上の観点から、施設・設備の脆弱性に係る評価手法を精緻化することが重要である。また、地震・津波以外の外部事象に対しても、解析精度の向上のための新たな技術的知見の収集を行い、衝突・衝撃に対する構造健全性評価手法に反映していくことが重要である。

## 1.2 目的

本プロジェクトでは、外部事象に係る確率論的リスク評(PRA)に関する科学的・技術的知見の蓄積及び関連評価ガイド策定のための知見の拡充に資するため、また、将来の規制活動への反映に向けて地震時亀裂進展に係る知見を蓄積することを目的とする。

目的を達成するために以下の課題に係る研究を行う。

- (1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討
  - a. 防潮堤の津波に対する応答評価
  - b. 地震との組合せを考慮した構築物等の津波フラジリティ評価
- (2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討
  - a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価
  - b. 地震時の埋立地盤の液状化評価
  - c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価
- (3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討
  - a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価
  - b. 輸送容器の落下による衝撃挙動に係る構造健全性評価
- (4) 地震時亀裂進展評価手法の検討
  - a. 地震時亀裂進展評価

## 1.3 行程

本研究は平成29年度から令和2年度にかけて実施したものである。全体行程を以下に示す。

研究課題	平成 29年度	平成 30年度	令和 元年度	令和 2年度
(1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討				
a. 防潮堤の津波に対する応答評価	——	——	——	——
b. 地震との組合せを考慮した構築物等の津波フラジリティ評価	——	——	——	——
(2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討				
a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価	——	——	——	——
b. 地震時の埋立地盤の液状化評価	——	——	——	——
c. 地震に対する耐震重要設備の耐力評価	——	——	——	——
(3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討				
a. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る応答・耐力評価	——	——	——	——
b. 輸送容器の落下による衝撃挙動に係る構造健全性評価	——	——	——	——
(4) 地震時亀裂進展評価手法の検討				
a. 地震時亀裂進展評価	——	——	——	——

—— 委託作業

----- 職員作業・請負作業

## 2. 研究期間を通じた主要成果

本書では、「安全研究成果報告書」の概要を記す。

なお、以下の項目毎に、前記の課題に対する主要な成果を示す。

- 2. 1 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価 (研究課題(1)a.b.)
- 2. 2 地震に対する建屋のフラジリティ評価 (研究課題(2)a.)
- 2. 3 地震に対する地盤の液状化に係るフラジリティ評価 (研究課題(2)b.)
- 2. 4 地震に対する設備の耐力評価に係るフラジリティ評価 (研究課題(2)c.)
- 2. 5 地震に対する設備の亀裂進展に係るフラジリティ評価 (研究課題(4)a.)
- 2. 6 飛翔体等の衝突による衝撃に対する建屋のフラジリティ評価 (研究課題(3)a.)
- 2. 7 飛翔体等の衝突による衝撃に対する設備のフラジリティ評価 (研究課題(3)a.)
- 2. 8 落下による衝撃に対する核燃料輸送容器のフラジリティ評価 (研究課題(3)b.)

## 2.1 津波に対する防潮堤の脆弱性評価

### <背景>

- 「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」では、「津波による荷重(波圧、衝撃力)の設定」に関して、下記が求められている。
  - ・漂流物の衝突についても考慮されていることを確認すること。
  - ・(砂移動に伴う津波防護)機能へ及ぼす影響を考慮して荷重設定が行われていることを確認すること。
  - ・越流時の耐性にも配慮した上で、入力津波に対する津波防護機能が十分に保持できるよう設計すること。

### <目的>

防潮堤の津波により生じる様々な影響の荷重評価手法を整備する。

#### ○漂流物影響

- ・防潮堤に作用する漂流物衝突荷重について、衝突の可能性評価手法及び、既往評価式の適用性に係る考え方を整理する。

#### ○砂移動影響

- ・前面に砂丘等を有する防潮堤に作用する砂移動荷重について、一般的な流体密度を用いた評価の考え方を整理する。

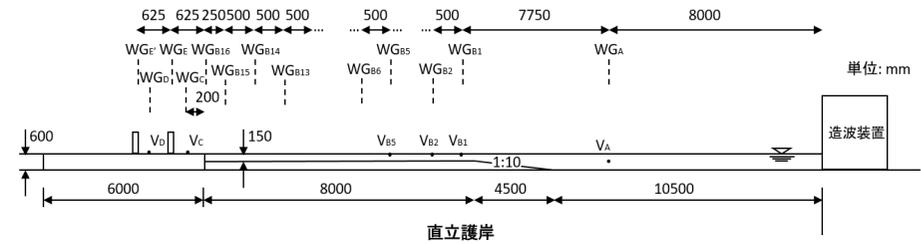
#### ○波圧影響

- ・防潮堤を津波が越流する場合まで含め、防潮堤に生じる最大波力/波圧を評価する手法についての体系的な考え方を整理する。

## <漂流物影響>

### ○実施概要

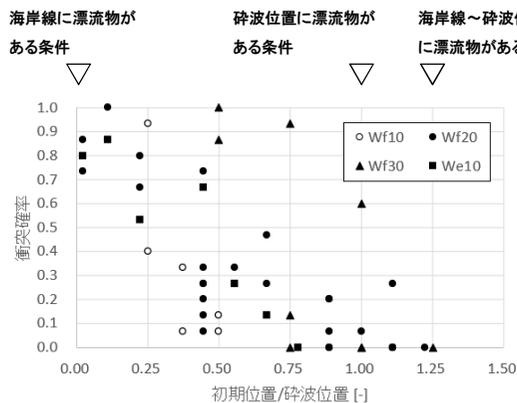
- ・水理試験を実施し、漂流物の初期位置や波の砕波位置等が漂流物衝突の可能性を評価した。また、計測した衝突荷重と既往式を用いた評価荷重を比較した。
- ・既往式として比較的良好に知られている、FEMA II 式<sup>1)</sup>及び道路橋示方書式<sup>2)</sup>について、適用性を確認した。



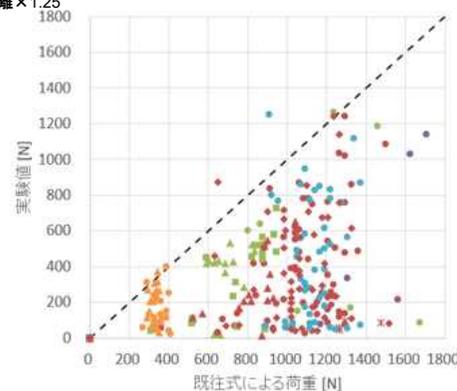
水理試験設備の概要\*

### ○研究成果

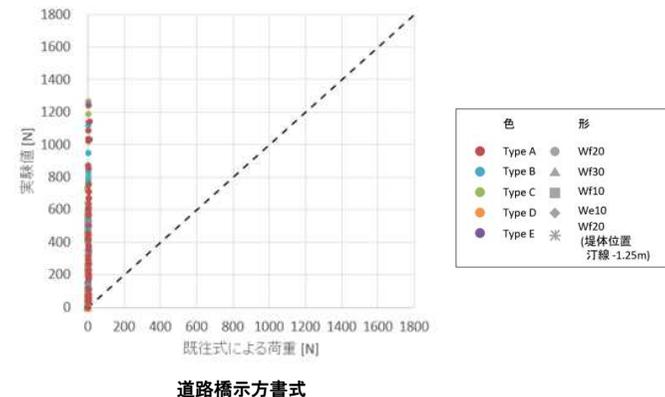
- ・漂流物の衝突可能性は、漂流物の初期位置（漂流物の沿岸からの距離）が沿岸から遠くなるにつれて衝突しにくく、砕波位置付近で確率は零に近づく。具体的には初期位置／砕波位置が1.25よりも漂流物が沿岸側にある場合に、衝突の可能性があると考えられる。
- ・試験値と既往式による評価値の比較から、水上の漂流物が漂流し、防潮堤に衝突する場合を想定した漂流物衝突式としては、FEMA II 式を用いることができると考えられる。
- ・道路橋示方書式は、衝突の可能性が否定できない初期位置に存在する津波漂流物の衝突荷重の評価において過小評価となり得ることから、適用条件や適用範囲は限定的になると判断される。具体的には、漂流物の初期位置が沿岸から遠く防潮堤に衝突する可能性が低いもののその可能性を否定できない場合等、限定的な条件での道路橋示方書式の適用の可能性が考えられる。



砕波位置と衝突確率の関係\*



FEMA II  
既往式による衝突荷重と試験による衝突荷重の比較\*



\*大成建設株式会社、「耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験（漂流物影響）（令和2年度分）」、令和2年度原子力規制庁委託成果報告書、2020。

1) Federal Emergency Management Agency, "Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Second Edition", FEMA P-646, 2012.

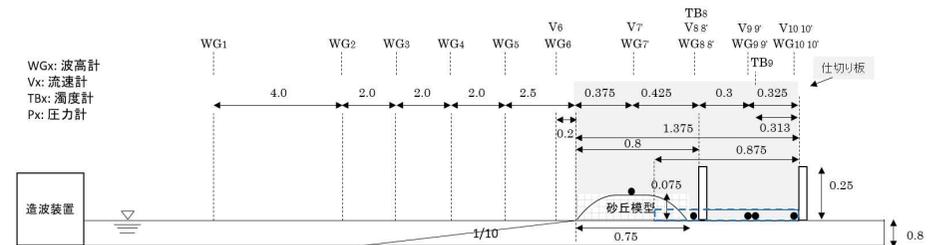
2) 社団法人日本道路協会、「道路橋示方書・同解説」、2002。

## <砂移動影響>

### ○砂移動影響

防潮堤前面に砂丘等を有する場合を想定し、津波によって砂丘の砂に移動が生じた場合に、防潮堤に作用する荷重影響について、評価の考え方を整理した。

- ・砂有のケース(6号珪砂、 $\rho = 2560\text{kg/m}^3$ )及び、砂無のケースの試験を実施し、堤体作用荷重の比率を計測した。ただし、形状の違いがでないよう、砂無のケースでは木製の砂丘模型を用いた。



水理試験設備の概要\*

### ○研究成果

- ・今回の試験結果では、砂の有無による最大持続波荷重の比率(砂有のケース/砂無のケース)は最大でも1.11であった。
- ・本研究の条件範囲内においては、防潮堤前面の陸域の砂丘の砂移動が、津波荷重に与える影響については、一般的な流体密度として真水の密度に、海水密度( $\rho \approx 1.03$ )を含め、1.2倍程度( $\rho = 1.2$ )の余裕を含めることで、保守的に評価可能であることが分かった。

砂の有無による荷重の増加比率\*

条件	最大持続波荷重の比率	
波形	防潮堤位置 [cm]	
孤立波	-137.5	1.11
	-80	1.08
長周期波	-137.5	0.86
	-80	0.94

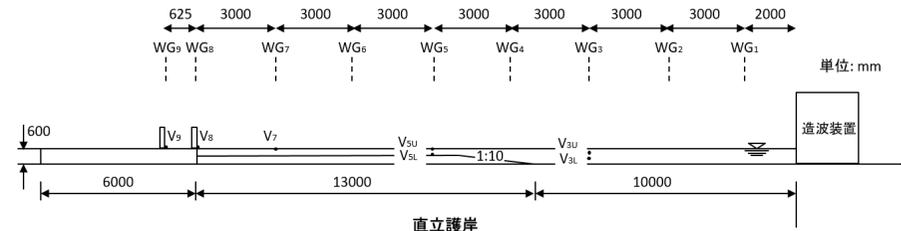
\*)国立大学法人京都大学、“耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験(砂移動影響) (令和2年度分)”、令和2年度原子力規制庁委託成果報告書、2020。

## <波圧影響>

### ○実施概要

防潮堤を越流する場合まで含めた波圧影響について、水理試験を実施し、防潮堤に作用する最大持続波力評価の考え方を整理した。

- ・越流を生じさせる堤体高さAと、非越流となる堤体高さBの、高さの異なる2種類の堤体を用いた。



水理試験設備の概要\*

### ○研究成果

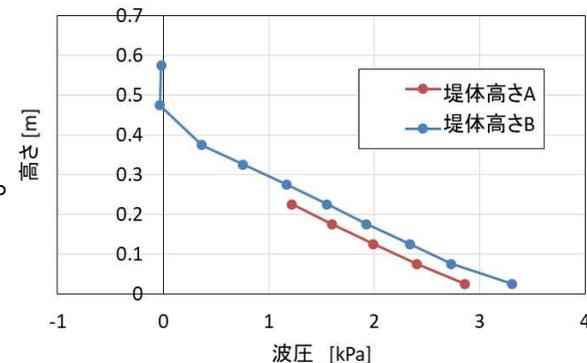
- ・高さの低い堤体高さAの方が、越流によってエネルギーが堤体後方に逃げる影響により、波圧/波力が減少した。
- ・越流による波圧/波力の低減効果を低減係数として考慮し、越流時まで含めた最大持続波力評価手法を提案した。

堤体位置の最大比エネルギー ( $E_{max}$ ) と防潮堤高さ ( $h_d$ ) から評価できる越流度合 ( $E_{max}/h_d$ ) が1を超える場合が堤体を越流する条件として整理し、越流度合 ( $E_{max}/h_d$ ) が1を超える場合は、低減係数を考慮した下式を用いて、最大持続波力を評価する手法を提案した。

$$F = \frac{\rho g h_d^2}{2} \left( \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \sqrt{3 \left( \frac{E_{max}}{h_d} \right)^2 - 2} \right)$$

また、越流度合 ( $E_{max}/h_d$ ) が1を超えない場合として、下式を提案した。

$$F = \frac{\rho g h_d^2}{2} \left( \frac{E_{max}}{h_d} \right)^2$$



堤体高さの異なる波圧分布比較\*

\*) Toriyama T., Ishida N., "A METHOD FOR EVALUATING TSUNAMI LOADING ON SEAWALLS DURING OVERFLOW", Proceedings of 36v Conference on Coastal Engineering, papers. 61, 2020.

## <研究成果まとめ>

平成29年度から令和2年度にかけて、防潮堤の津波により生じる様々な影響について、荷重評価手法を整備した。今回の試験結果における、主な成果は以下の通り。

- 漂流物影響について、漂流物の初期位置(漂流物の沿岸からの距離)及び波の碎波位置を用いた衝突可能性評価を提案し、既往の衝突荷重評価式として、FEMA II式を用いることができることを明らかにした。
- 砂移動影響について、一般的な流体密度として真水の密度に、1.2倍程度( $\rho=1.2$ )の余裕を含めることで、保守的に評価可能であることを示した。(海水密度( $\rho \approx 1.03$ )を含む)
- 越流時まで含めた波圧影響について、越流による波圧/波力の低減効果を考慮した評価式を用いて、最大持続波力を評価する手法を提案した。

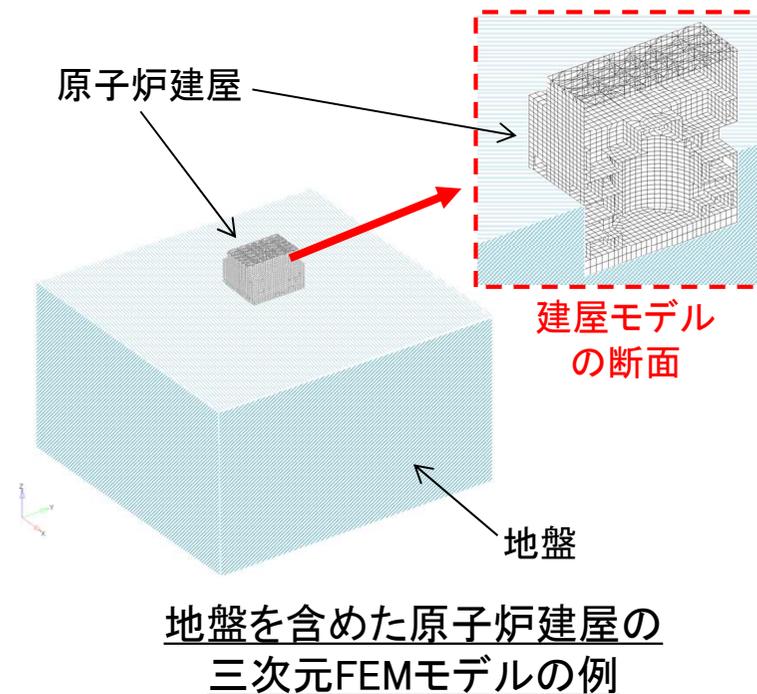
## 2.2 地震に対する建屋の脆弱性評価

### <背景>

- 原子炉建屋等の地震応答解析は、これまで質点系モデルにより解析が行われている。しかし、新規規制基準を踏まえ、建屋の耐震安全性に係る新たな検討(建屋の三次元挙動)として、三次元FEMモデルによる地震応答解析結果が議論されるようになっている。
- また、原子炉建屋の脆弱性に係る評価の精度向上に関して、基準地震動 $S_s$ を上回る大きさの地震動に対し、建屋の三次元挙動等を考慮した地震応答評価が必要であり、現実的な応答の評価に関する技術的知見の蓄積も重要な研究課題となっている。

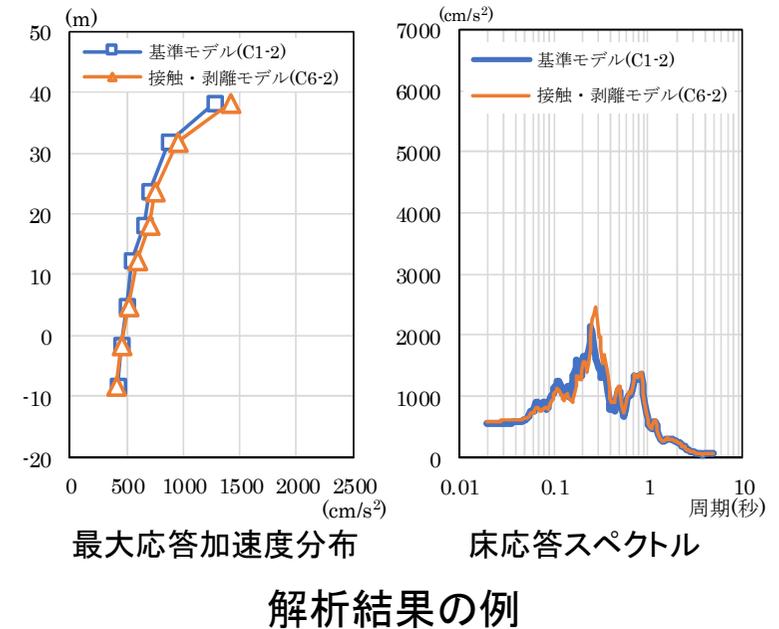
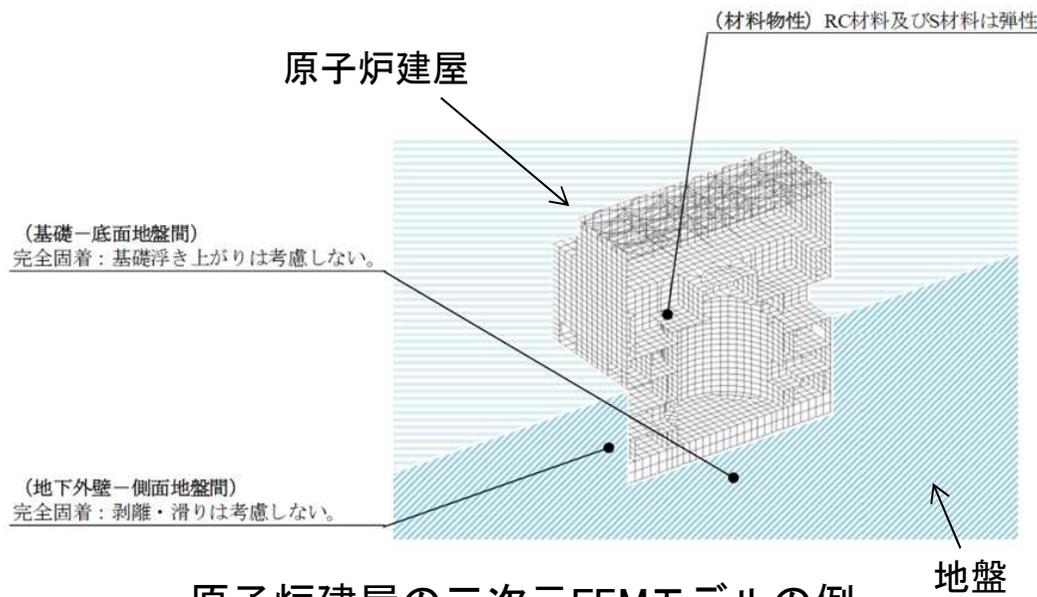
### <目的・実施内容>

- 三次元FEMモデルによる原子炉建屋の地震応答解析から建屋の地震時挙動の精緻な推定に資する技術的知見の取得を目的に下記を実施した。
  - 建屋の応答特性に影響を及ぼす可能性のある三次元FEMのモデル化(モデル化因子)が建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討した。
  - 鉄筋コンクリート材料(RC材料)の非線形性を考慮した建屋の三次元FEMモデルを用いた地震応答解析を行い、解析モデル及び解析手法について検討した。



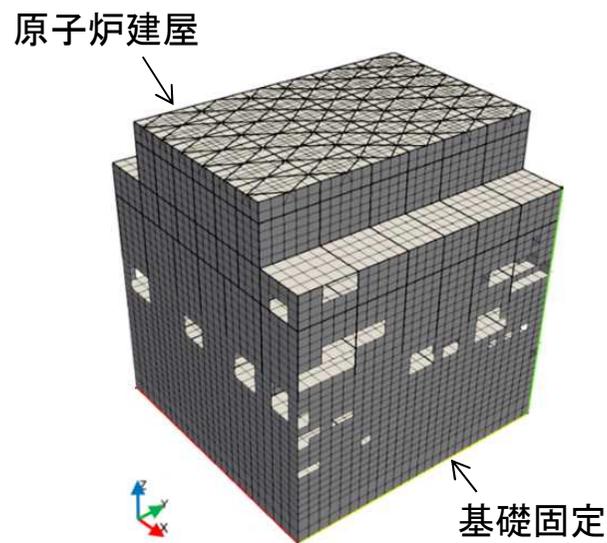
## ＜研究成果①＞原子炉建屋三次元FEMモデルのモデル化因子が地震応答解析に与える影響

- 原子炉建屋の三次元FEMモデルに関する各種モデル化因子が地震応答解析結果に与える影響について文献調査を行い、建屋の三次元挙動に及ぼす影響が大きいと思われるモデル化因子を同定した。
- 仮想サイトを対象としたモデル化因子に対する感度解析では、建屋－地盤間の接触・剥離現象に係るモデル化、有限要素タイプ、メッシュサイズ、RC材料の非線形挙動に係るモデル化及び減衰のモデル化の影響が大きかった。
- 実サイトを対象とした地震観測記録の再現解析では、水平方向の建屋応答については観測記録と整合性の高い解析結果が得られたが、鉛直方向については入力地震動の作成方法や建屋部材のモデル化手法の影響により整合性のある結果が得られなかった。

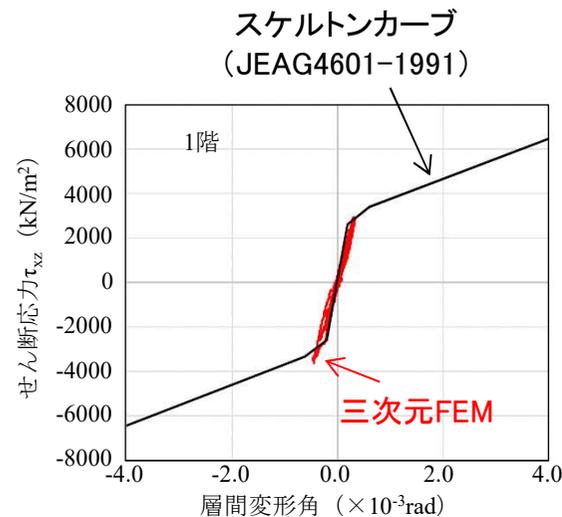


## ＜研究成果②＞ 基準地震動 $S_s$ を超える地震動を入力とする原子炉建屋の地震応答解析

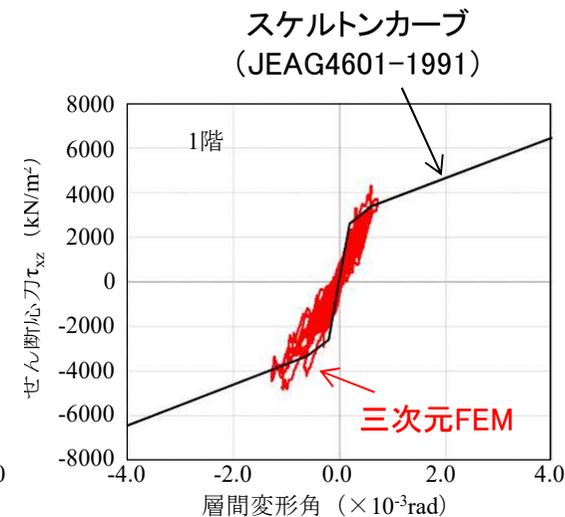
- 研究成果①で検討した解析モデルをベースに地盤部分を除いた原子炉建屋の三次元FEMモデルを用い、建屋が非線形応答を示す地震動を入力とする地震応答解析を実施し三次元解析モデル等の適用性について検討した。
- 非線形応答を示す建屋の場合、スケルトンカーブと三次元FEMの解析結果には差異が見られ、RC材料の非線形性を考慮した原子炉建屋の地震応答解析では、実際の複雑な建屋形状に関するモデル化手法、RC材料の非線形挙動に係るモデル化手法、解析精度等に特に留意する必要があると考えられる。



原子炉建屋の三次元FEMモデルの例  
地盤無し(基礎固定条件)



観測記録の2倍入力



観測記録の4倍入力

解析結果(せん断応力—層間変形角関係)の例

出典)「日本原子力研究開発機構、平成31年度原子力施設等防災対策委託費(高経年化を考慮した建屋・機器・構造物の耐震安全性評価手法の高度化)事業報告書、2020」を編集

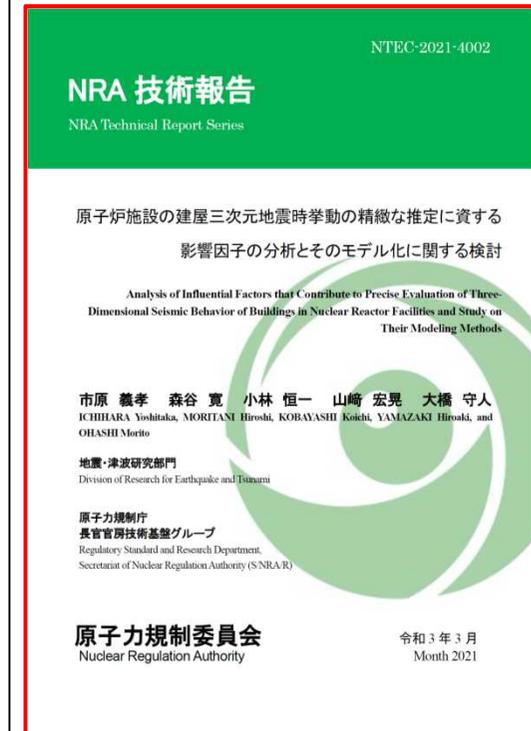
## ＜研究成果まとめ＞

(1) 建屋の三次元FEMモデルのモデル化因子が建屋の耐震安全性及び床応答に与える影響を検討し、下記の技術的知見を取得した。

- 建屋－地盤間の接触・剥離現象に係るモデル化、有限要素タイプ、メッシュサイズ、RC材料の非線形挙動に係るモデル化及び減衰のモデル化については、解析の目的に応じて適切な設定になっていることを感度解析等により確認が必要であると考えられる。
- 鉛直方向の建屋応答については、入力地震動の作成手法、雑壁や小梁のモデル化手法等の詳細なモデル化手法に関する更なる検討が必要であると考えられる。

(2) RC材料の非線形性を考慮した建屋の三次元FEMモデルを用いた地震応答解析を行い、解析モデル及び解析手法について検討し、下記の技術的知見を取得した。

- 複雑な建屋形状のモデル化手法、材料の非線形挙動に係るモデル化手法、解析精度等に留意が必要であるため、解析結果を使用する際には試験結果や他の解析プログラムによる解析結果と比較する等、モデル化の妥当性について検討する必要があると考えられる。



**本研究の成果は  
NRA技術報告で公表**

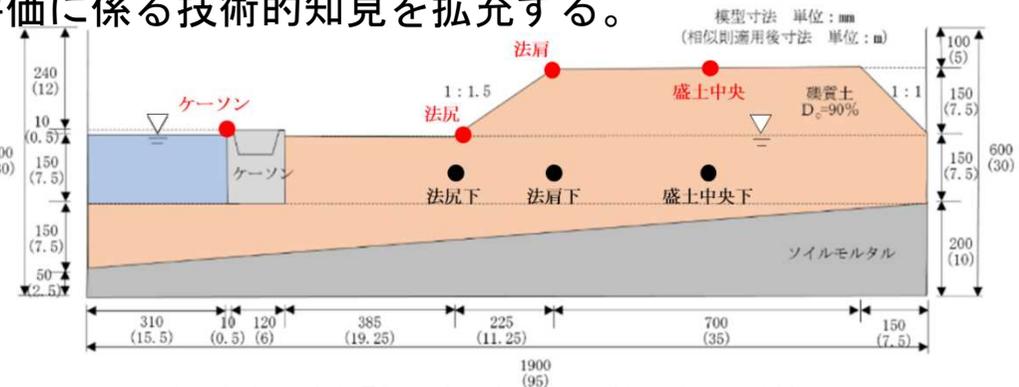
## 2.3 地震に対する地盤の液状化に係る fragility 評価

### <背景>

- 津波に対する防護設計が規制要件化され、多くの原子力発電所では防潮堤等の設置が進められているが、それらの設置場所の多くが、堆積土や礫質土等の地盤で埋め立てられており、地震時の液状化が懸念される。
- 礫質土の液状化に係る既往の研究として、材料挙動の検討例はあるが、原子力発電所敷地沿岸部の様な複雑な地盤条件における礫質土地盤の詳細挙動を対象とした検討例は少ない。

### <目的・実施内容>

- このため、原子力発電所敷地沿岸部を想定対象に地震時における礫質土地盤の過剰間隙水圧の蓄積や変形挙動等を確認し、液状化評価に係る技術的知見を拡充する。
- 密な礫質土地盤の液状化評価に係る技術的知見を拡充するため、遠心模型実験、材料試験（中空ねじり試験）及びシミュレーション解析を行い、礫質土地盤の過剰間隙水圧の蓄積や変形挙動等を確認した。



遠心模型実験における模型地盤の形状\*

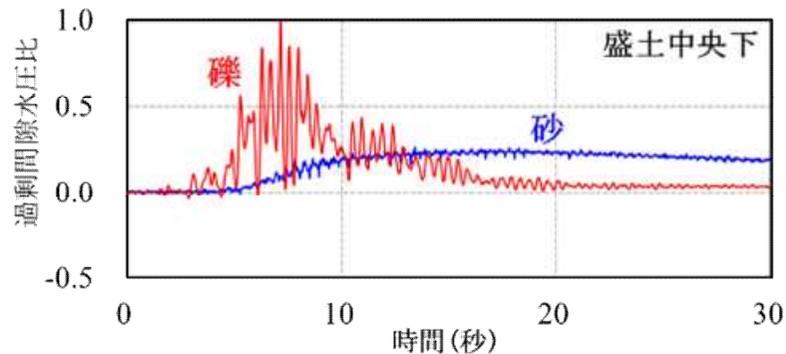
[ ● : 変位の計測位置、● : 過剰間隙水圧の計測位置 ]

\* 出典) 国立大学法人東北大学、“平成31年度原子力施設等防災対策等委託費（防潮堤等の基礎地盤の液状化の影響評価に関する実験的検討及び解析的検討）事業成果報告書”、2020。

## <研究成果>

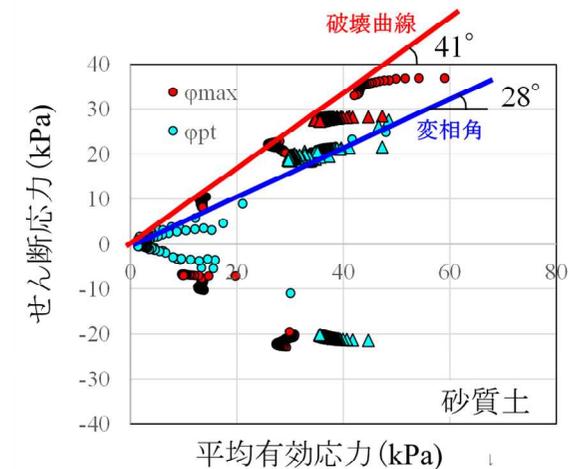
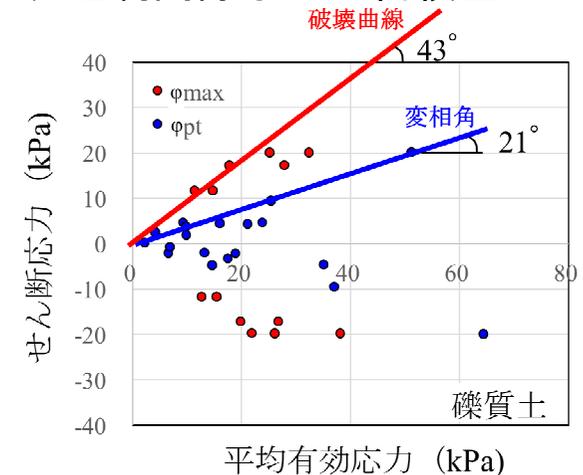
遠心模型実験及び中空ねじり試験により以下を確認した。

- 遠心模型実験の結果によると、礫質土は砂質土に比べて、過剰間隙水圧比の上昇及び消散が速く、瞬間的には大きな過剰間隙水圧が発生するが、過剰間隙水圧の蓄積量が小さかった。
- 中空ねじり試験による分析の結果、礫質土の変相角は砂質土に比べて小さく、礫質土の方が小さな応力比からモビリティ（剛性の回復）が発生しやすかった。
- 礫質土地盤は、変相角が小さいため、砂質土に比べてサイクリックモビリティにより剛性が回復がし易い等、砂質土地盤と異なった過剰間隙水圧や変形挙動が確認された。



礫と砂の比較（過剰間隙水圧比）\*

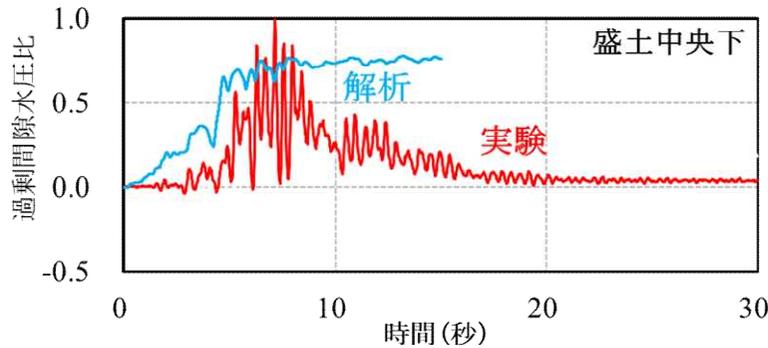
\* 出典) 国立大学法人東北大学、“令和2年度原子力施設等防災対策等委託費（防潮堤等の基礎地盤の液状化の影響評価に関する実験的検討及び解析的検討）事業成果報告書”、2021。



中空ねじり試験結果（礫と砂の比較（変相角））\*

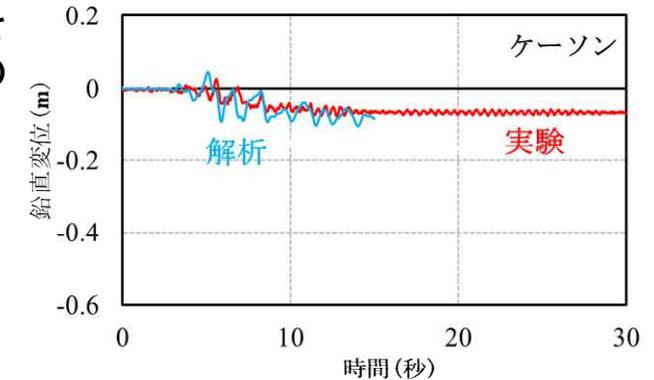
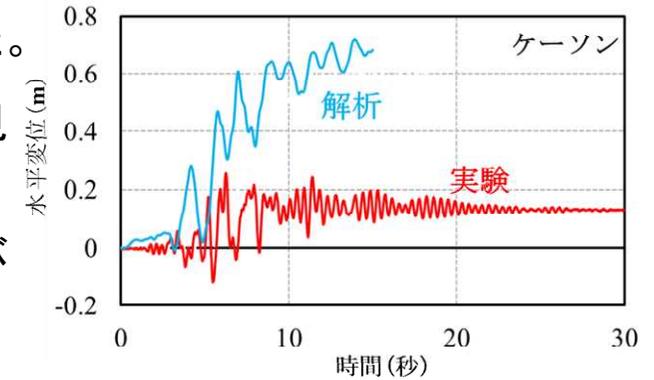
遠心模型実験のシミュレーション解析により以下を確認した。

- 有効応力解析の結果、沈下量についてある程度整合が見られたが、水平変位は差異が大きかった。
- 過剰間隙水圧の上昇の程度は同様であったが、消散及び蓄積の程度は異なっていた。
- 遠心模型実験では、土槽壁の影響を極力除いた試験体による実験を実施したものの、土槽壁が少なからず影響を与えている可能性があり、平面ひずみ場である2次元の有効応力解析と実験結果の相違の一因と考えられる。

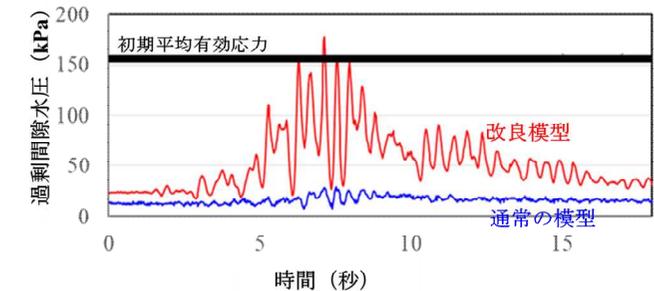


実験と解析の比較（過剰間隙水圧比）\*

\* 出典) 国立大学法人東北大学、“平成31年度原子力施設等防災対策等委託費（防潮堤等の基礎地盤の液状化の影響評価に関する実験的検討及び解析的検討）事業成果報告書”、2020.に解析結果を重ねて作図、及び一部編集



実験と解析の比較（水平変位・沈下量）



通常の模型と改良模型の比較\*  
（過剰間隙水圧）

## ＜研究成果まとめ＞

原子力発電所敷地沿岸部の代表的な地形を想定し、礫質土及び砂質土でモデル化した遠心模型実験、材料試験（中空ねじり試験）及び数値シミュレーション解析を行い、比較検討を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- 今回の試験条件による礫質土地盤の実験結果によると、礫質土の変形挙動や過剰間隙水圧の蓄積傾向は砂質土と異なることが確認された。この一因としては、礫質土と砂質土の中空ねじり試験を分析した結果、礫質土は砂質土に比べて、小さい応力レベルでサイクリックモビリティが発生しやすい等によるものと考えられる。
- 有効応力解析による数値シミュレーション解析の結果、全体的な傾向は解析においても確認できたが、過剰間隙水圧の上昇及び消散が速い等の礫質土特有の挙動については、今後更なる検討が必要と考える。また、遠心模型実験における境界処理等についても検討が必要と考える。

## 2.4 地震に対する設備の耐力評価に係るフラジリティ評価

### <背景>

地震に対する設備のフラジリティ評価において、新たな耐震設計評価を導入することで、安全性向上評価に用いられる耐力値の精度を向上させることは重要である。従って、より精緻に耐力を評価するためには、設備の損傷モードを踏まえながら耐震試験や耐震性評価方法の知見を整理し、既往振動試験のデータ等を活用することにより知見を拡充することが必要となってくる。

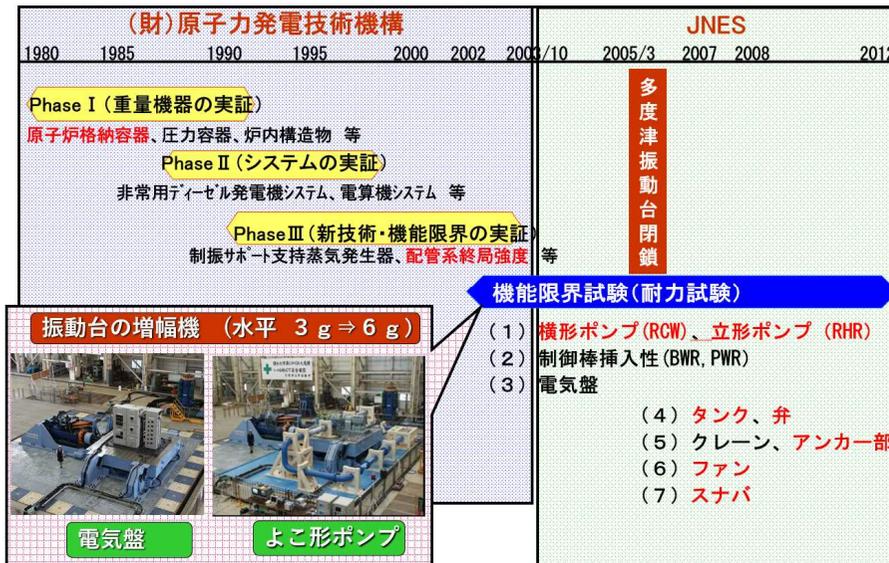
### <目的>

これを踏まえて、既往振動試験のデータから放射性物質の拡散を防護する観点より選定した設備の現実的耐力について、静的設備と動的設備を横断的に見てデータベースを作成し、地震に対する損傷モードや評価部位に対する事例より知見を収集し、耐震重要設備の現実的耐力の分析・評価を実施する。

## ＜既往試験データの分析・整理の実施概要と研究成果＞

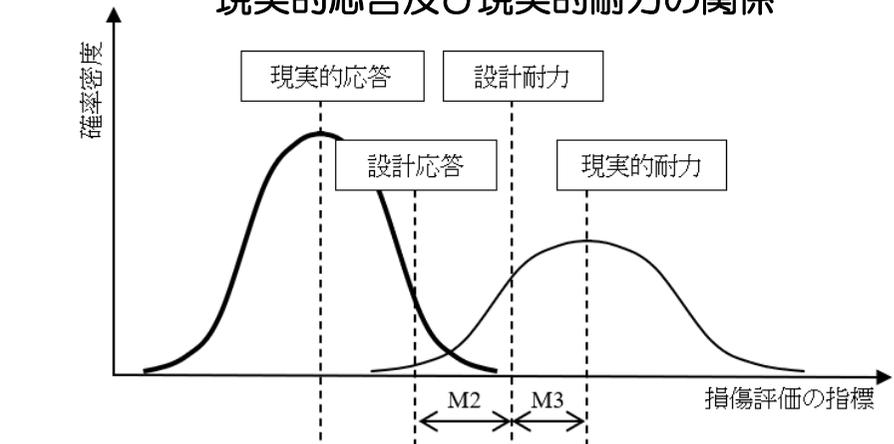
NUPEC及びJNESで実施された耐震試験より、放射性物質の拡散を防護する観点より選定した設備の耐力値と設計許容値の比を調査

### 既往試験の調査



赤字：選定した既往試験

### 現実的応答及び現実的耐力の関係



現実的耐力と現実的応答の定義並びに設計裕度(M2)、設計耐力(M3)における保守性に係る定義は、日本原子力学会の「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015」に準拠する。

調査した設備でM2に該当する設備：原子炉格納容器

その他設備はM3に該当

今回調査した静的設備と動的設備に係る耐力値と設計許容値の比の最小値をそれぞれ示す

静的設備：1.08 (PWR原子炉格納容器の座屈)

動的設備：1.4 (大型立形ポンプの動的機能維持)

ただし、静的設備に分類される支持構造物（機器アンカー部、スナバ、基礎ボルト等）の耐力値と設計許容値の比は、追設等による対策より荷重負荷の軽減が図れるため、参考とする。

# ＜既往試験の知見を活用した詳細評価の実施概要と研究成果＞

## 耐震信頼性実証試験の知見を活用し、JEAG4601の座屈評価式より現実的な評価が可能となるFEMモデルを用いた座屈評価を実施

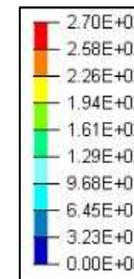
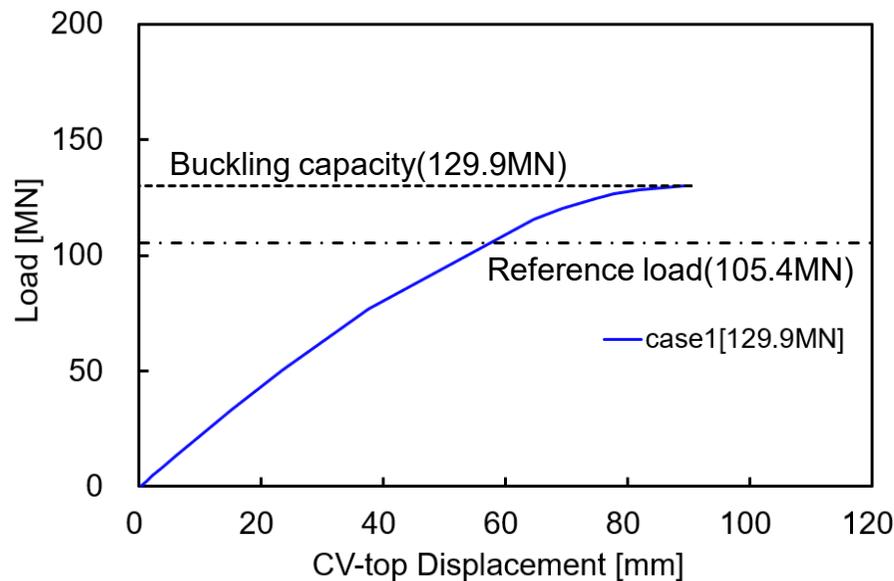
FEMモデルは試験体を実機サイズに変更、入力波は改良標準化高地震帯用地震動S2の応答波を使用  
初期不整量、初期不整形形状及び応カーひずみ曲線は、規格や参考文献に従いパラメータ量を設定

PWR-CVの座屈耐力評価結果

初期不整量	初期不整形形状	応カーひずみ	基準荷重	座屈耐力	座屈耐力比
100mm	座屈モード	E:201GPa Sy:258MPa	105.4MN	129.9MN	<b>1.23</b>

基準荷重は、JEAGによる座屈評価が1.096のとき質点系モデルより得られるせん断力が115.44 MNであったため、せん断力を1/1.096より補正したものである。

荷重変位曲線及び限界荷重時のMises応力コンター図



[MPa]

Max 270MPa



## <研究成果まとめ>

放射性物質の拡散を防護する観点より選定した設備について、過去に実施した既往試験より動的設備と静的設備に分類し、現実的耐力に係る知見を整理した。

この結果、各設備の試験から得られた耐力値と設計許容値の比は、下記となった。

- ・静的設備：PWR原子炉格納容器の座屈評価より1.08
- ・動的設備：大型立形ポンプの動的機能維持より1.4

ここで、PWR原子炉格納容器については、現実的な耐力を把握するためFEMによる座屈評価を行ったところ、耐力値と設計許容値の比が1.23となった。

以上より、今回の検討範囲において選定した設備は、仮に応答が設計許容値と同等であっても、1.2倍程度まで機能維持できるものと考えられる。

ただし、PWR原子炉格納容器の座屈評価において、あらかじめFEMによる座屈評価を適用している場合、この限りではない。

今後は、新規制基準への対応より新たに導入された設備に対する耐力を整理することが必要となる。

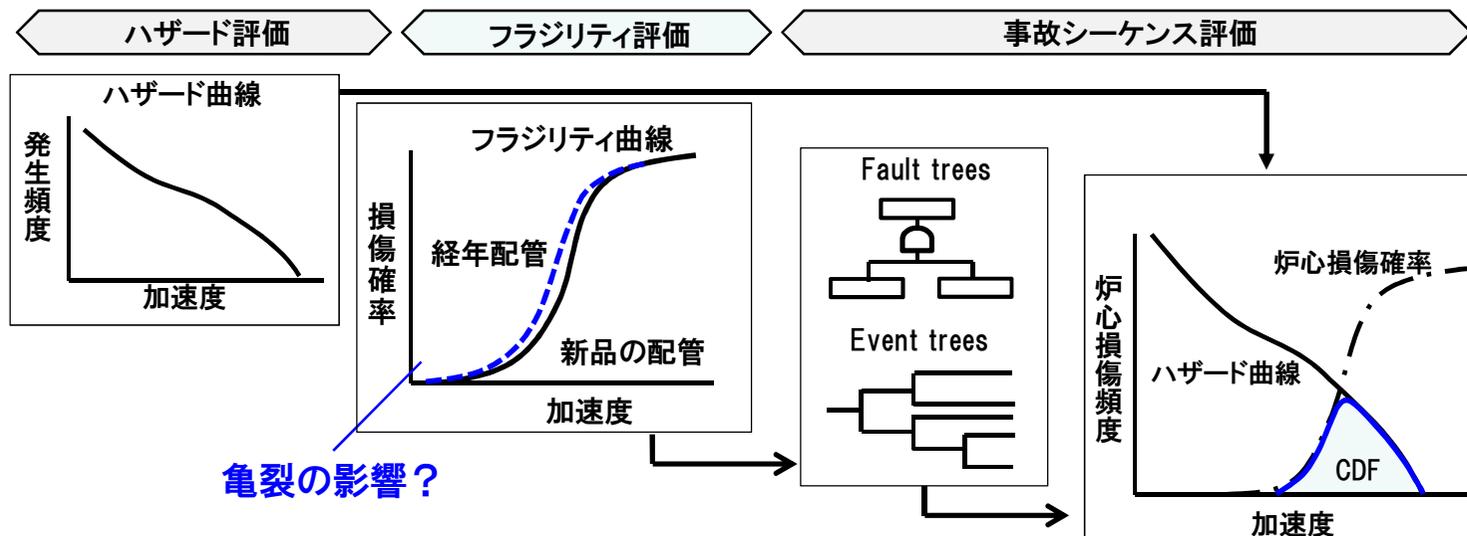
## 2.5 地震に対する設備の亀裂進展に係るフラジリティ評価

### 〈背景〉

- 「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」の参考資料1によれば、確率論的リスク評価（PRA）実施手法の一例として、地震等の外部事象PRAのフラジリティ評価において、「経年劣化が既にある設備の現実的耐力評価においては、減肉及び亀裂進展等の経年劣化モードを考慮する」ことが示されている。
- 特に余震を含む複数回の地震による繰り返し荷重を受ける条件では、亀裂の進展が損傷確率に影響する可能性があるが、このような経年劣化の効果がフラジリティ曲線に及ぼす影響は明確でない。

### 〈目的〉

- 本研究では、設計を超える地震動を受ける経年機器・配管系のフラジリティ評価に必要な知見を拡充するため、複数回の設計を超えるレベルを含む地震荷重を想定した亀裂進展試験及びフラジリティ評価を行った。\*



\*本研究の一部は、学校法人新潟工科大学（前プロジェクト）及び国立研究開発法人日本原子力研究開発機構に委託して実施した。

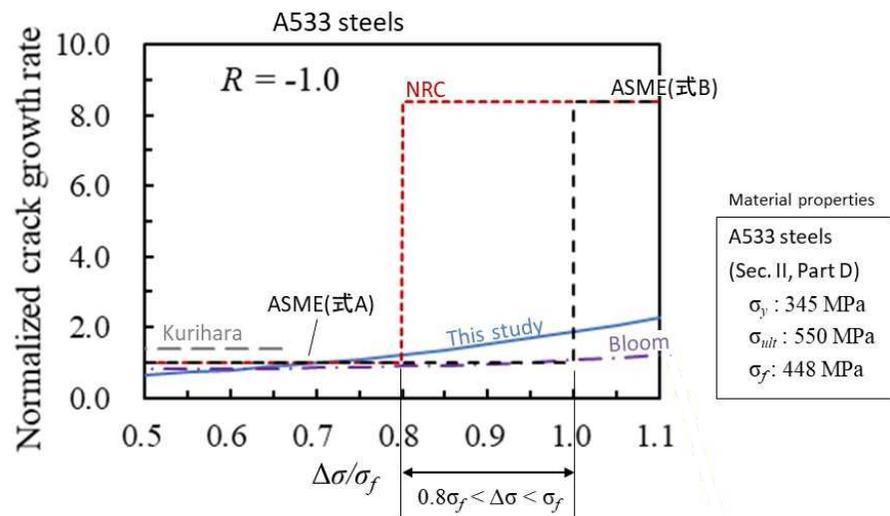
## 設計を超える地震時の亀裂進展評価

### <実施概要>

- プラントの運転中のサイクル荷重を受ける設備に存在する亀裂では、疲労亀裂進展が観測される。小規模降伏条件を満たす場合、疲労亀裂進展速度は亀裂先端の応力状態は応力拡大係数 $K$ によって定義されるが、小規模降伏条件を超える場合には、評価方法が確立されておらず、既往の評価手法の適用性について十分に検証する必要がある。
- 本研究では、設計を超える地震を想定した繰り返し荷重によるフェライト鋼の亀裂進展試験を実施し、荷重レベルと亀裂進展速度の関係を整理した。

### <研究成果>

既往のフェライト鋼の疲労亀裂則の適用範囲を明らかにした。\*



負荷応力範囲が $0.8\sigma_f$ 以下、又は  
亀裂周辺の拘束が強い条件  
⇒ASMEの亀裂進展則が適用できる。

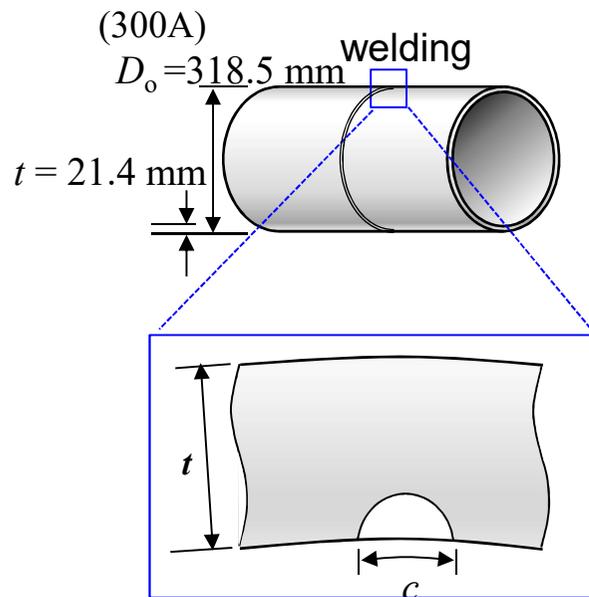
負荷応力範囲が $0.8\sigma_f$ 以上、かつ  
亀裂周辺の拘束が弱い条件  
⇒本研究で提案したモデル、又は保守的にNRCのモデルで評価することを推奨

\* K. Azuma, S. Hidaka, Y. Yamazaki, "Effects of crack closure on the fatigue crack growth rates of ferritic steels subjected to severe reversing loads," J. Pressure Vessel Technol., 142(6): 061503, 2020

## 複数回の設計を超える地震荷重を受ける経年配管のフラジリティ評価

### <実施概要>

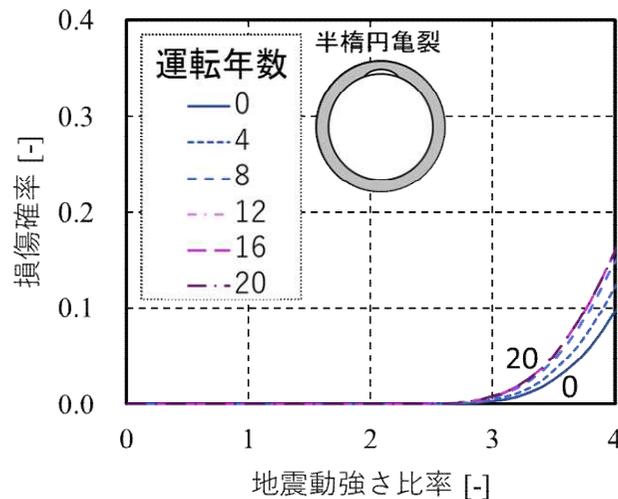
- 一般に応力腐食割れ等の亀裂の発生が確認された配管等の設備については、亀裂の発生及び進展が設備の耐震安全性に影響しないように維持管理がされているが、複数回の設計を超えるレベルを含む地震荷重を想定した場合に、このような経年劣化と維持管理が、当該設備のフラジリティに及ぼす影響は明らかではない。
- 本研究では、地震時の亀裂進展の影響、及び経年劣化の影響並びに維持管理の効果を確認するため、オーステナイト系ステンレス鋼配管の溶接熱影響部の損傷確率を評価した。\*



解析コード	確率論的破壊力学評価コード (PASCAL-SP)
配管系	BWR PLR溶接部 1箇所
材料	SUS316L
亀裂の種類	周方向内表面に発生する半楕円亀裂又は全周亀裂
亀裂の発生モデル	深さ5mmの初期亀裂、又はランダムに発生する亀裂
荷重条件	内圧、機械荷重、地震時の曲げ荷重
破壊条件	溶接部における亀裂の貫通、又は弾塑性破壊力学評価による破壊
維持管理	検査及び応力緩和

\* K. Azuma, Y. Yamaguchi, Y. Li, " Pilot study on seismic fragility evaluation for degraded austenitic stainless steel piping using probabilistic fracture mechanics code PASCAL-SP, Proceedings of the ASME 2021 Pressure Vessels and Piping Conference, 2021

## ＜研究成果＞



- 複数回の設計を超えるレベルを含む地震荷重を想定した fragility 評価を行い、地震時の疲労亀裂進展では、fragility 曲線はほとんど変化しないことを確認した。\*
- SCCによる亀裂進展の影響は、適切な維持管理を行うことで十分に低減することが可能であり、特に基準地震動で想定される応力の範囲では、経年配管の損傷確率が運転年数によって変化しないことを確認した。

## ＜研究成果まとめ＞

H31年度までに亀裂評価に係る試験及び解析を実施し、複数回の設計を超えるレベルを含む地震荷重を受ける経年機器・配管系の fragility 評価に必要な知見を拡充した。主な成果は以下の通り。

- 負荷応力範囲が大きく、かつ亀裂周辺の拘束が弱い条件においても、疲労亀裂進展速度を予測できる評価手法を提案した。
- 適切な維持管理が行われている配管であれば、地震時の亀裂進展及び運転期間中の経年劣化が、配管溶接部の fragility に影響しないことを確認した。

これらの知見は、設計を超える地震動を受ける構造物の fragility を評価するための技術的知見として活用されることが期待される。

\* K. Azuma, Y. Yamaguchi, Y. Li, " Pilot study on seismic fragility evaluation for degraded austenitic stainless steel piping using probabilistic fracture mechanics code PASCAL-SP, Proceedings of the ASME 2021 Pressure Vessels and Piping Conference, 2021

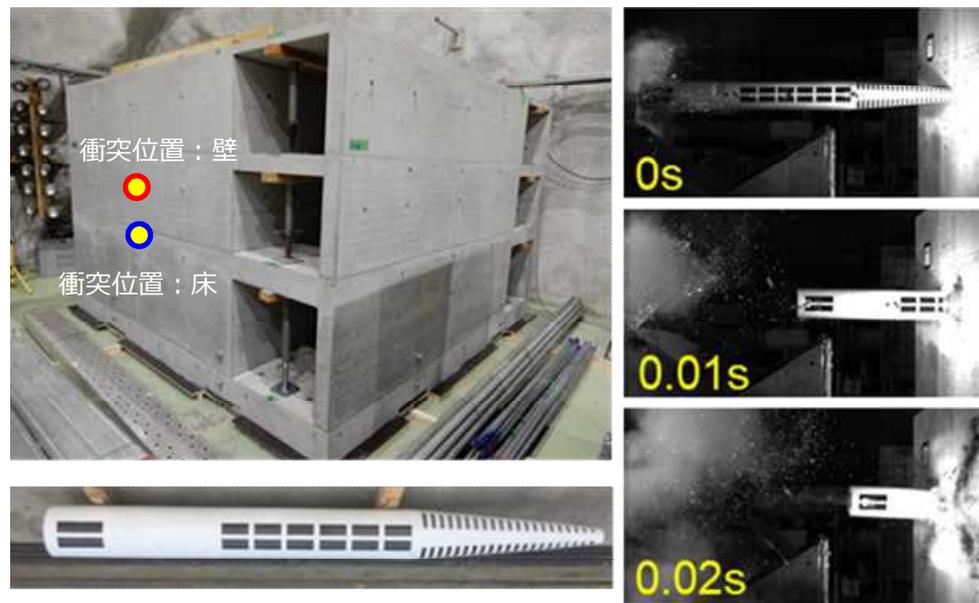
## 2.6 飛翔体等の衝突による衝撃に対する建屋のフラジリティ評価

### <背景>

- 新規制基準では、原子力施設に対して竜巻飛来物や火山噴石等の衝突に係る評価が追加された。
- 原子力分野においては、古くからトルネードミサイルやタービンミサイル等の衝突に係る研究が行われ、構造物の局部破壊(貫入・貫通・裏面剥離)に係る知見は多数報告されている。
- 一方、衝撃荷重の作用により構造物内を伝播する応力波に関する研究はほとんど見られない。

### <目的・実施内容>

衝撃作用を受ける構造物の挙動を明確にするとともに、その評価手法を確認することを目的に、鉄筋コンクリート製構造物(以下「模型構造物」という。)への、剛及び柔飛翔体の衝突実験を実施し、衝突時に発生する模型構造物の加速度応答の分析と、衝突実験の再現解析を行うことにより、実験及び解析の両面から応力波の伝播及び衝撃荷重の影響について検討した。さらに、周辺地盤による衝撃作用を受ける構造物の衝撃挙動への影響について実験から確認した。

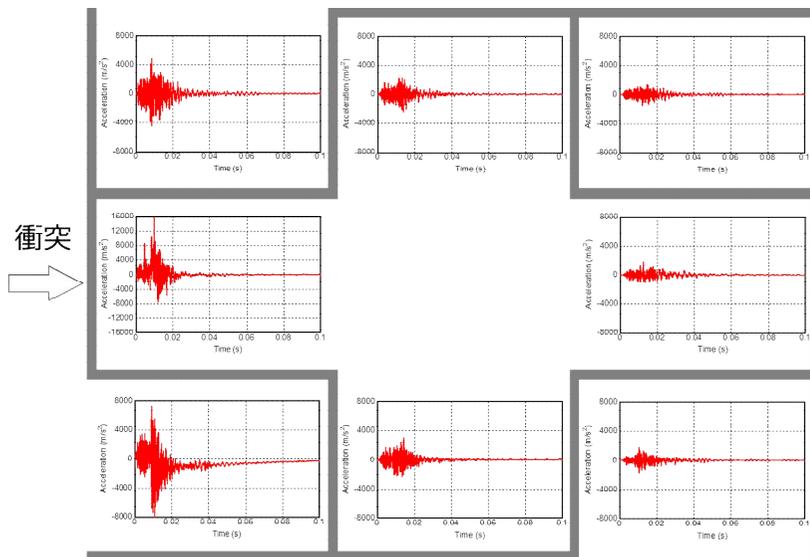


模型構造物及び柔飛翔体の外観と衝突の状況

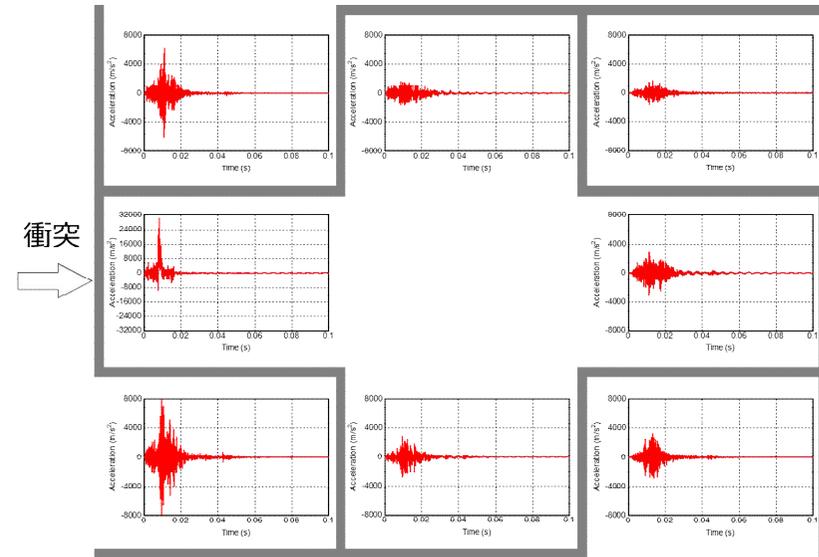
出典)「鹿島建設株式会社、「平成30年度原子力施設等防災対策等委託費(衝突に伴う構造物の衝撃伝搬に関する基礎的研究)事業委託成果報告書」、2019。」を編集

## 〈成果①〉飛翔体衝突に伴う構造物の衝撃伝播に関する研究

- 大型模型構造物への剛・柔飛翔体の衝突実験を実施し、その結果から得られた成果の一例を示す。
- 壁部衝突における3階床の自由端中央の面外方向の加速度時刻歴は、遠いほど、床の振動開始時刻が遅れ振幅が小さくなることが確認できる。一方、ほぼ同距離にある床では、模型構造物が衝突軸に対して非対称であるため差異が生じるが、同程度の振幅を示す。
- 床部衝突衝突における2階床の自由端中央の面外方向の加速度時刻歴は、衝突面側2階床で、正側に片ぶれしたパルス的な性状となっているのに対し、その他の床では正負でおおむね同振幅の波形になっている。これは、模型構造物で剛な箇所である床に剛飛翔体が衝突することにより、模型構造物・飛翔体の両方で損傷によるエネルギー損失がなく、衝突エネルギーが模型構造物に伝達し瞬間的に大きな加速度が生じたものと考えられる。

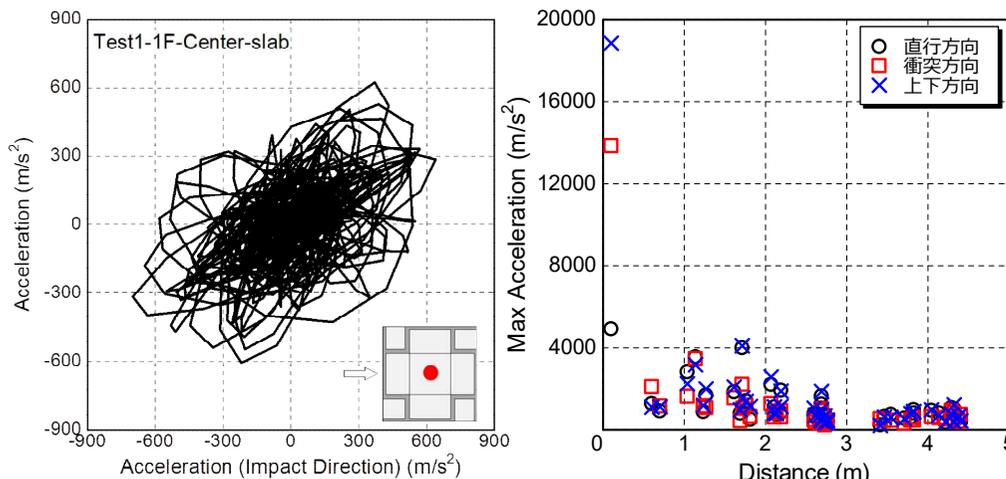


2階壁部衝突における3階各部床での面外加速度時刻歴  
(ステンレス製柔飛翔体、衝突速度150.7m/s)



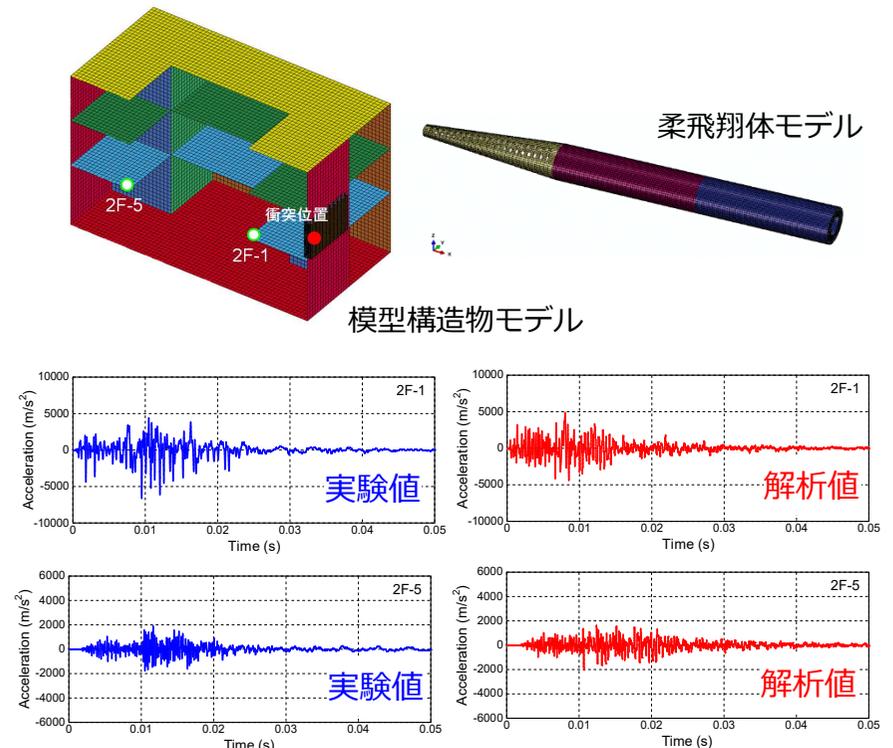
2階床部衝突における2階各部床での面外加速度時刻歴  
(ステンレス製柔飛翔体、衝突速度150.3m/s)

- 大型模型構造物への剛・柔飛翔体の衝突実験を実施し、その結果から模型構造物の衝撃挙動の分析及び再現解析を実施した。得られた成果の一例を示す。
- 解析結果の一例として、壁部衝突時の2階床の面外加速度結果を示す。位置2F-5では、加速度波形及び最大加速度値をおおむね再現出来ている。
- 1階中央床の加速度オービットは、衝撃力に方向性があるため衝突方向に延びた応答を示している。また、模型構造物が回転対称体であるため若干衝突方向からずれている。最大加速度と距離の関係では、衝突位置からの距離に応じて大きな低減が見られる。



ステンレス製柔飛翔体、衝突速度52.5m/sにおける1階中央床の加速度オービット(左図)及び最大加速度と距離の関係(右図)

出典)「鹿島建設株式会社、“平成30年度原子力施設等防災対策等委託費(衝突に伴う構造物の衝撃伝搬に関する基礎的研究)事業委託成果報告書”、2019。」のデータを基に原子力規制庁が作図

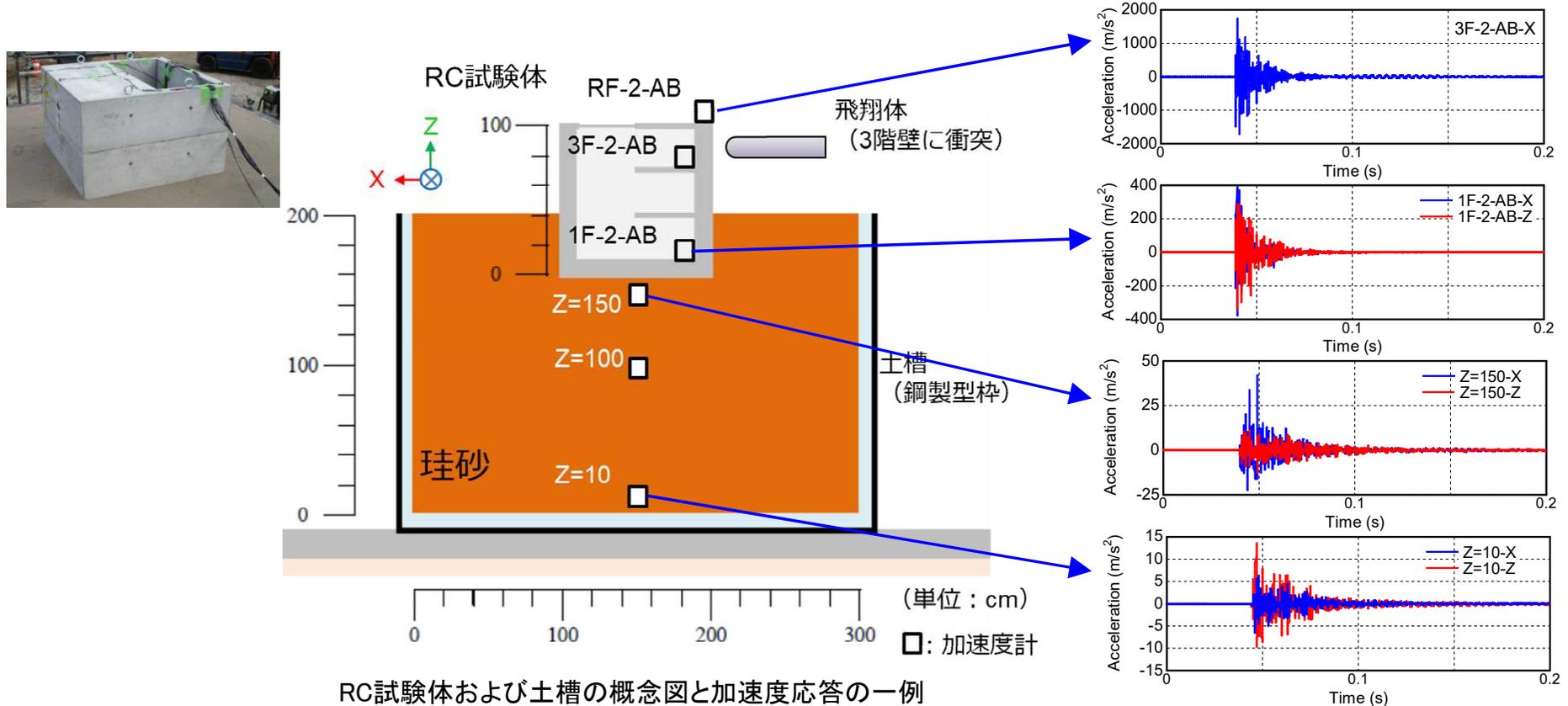


解析モデルと解析結果の一例

出典)「鹿島建設株式会社、“平成30年度原子力施設等防災対策等委託費(衝突に伴う構造物の衝撃伝搬に関する基礎的研究)事業委託成果報告書”、2019。」を編集

## 〈成果②〉衝撃挙動に対する境界条件確認実験

- 衝撃荷重を受ける構造物の応答に地盤条件が与える影響を確認するための実験を実施した。実験は、鉄筋コンクリート製試験体（以下「RC試験体」という。）を地盤上に設置又は地盤に埋込設置し、飛翔体を衝突させた。その際のRC試験体の挙動及び地盤内の挙動を計測し、埋込効果や地盤への逸散効果について確認した。
- RC試験体1階の最大加速度値は衝突位置真裏の最大加速度値に対して1/4程度になっている。



## ＜研究成果まとめ＞

- ・ 模型構造物の壁中央及び床部に対する飛翔体を衝突させる実験を実施した。壁中央に衝突させたケースと比べ、床部への衝突では、衝撃によって模型構造物の衝突面近傍に生じた加速度は大きかった。ほぼ同距離にある壁や床では、同程度の振幅であり、衝突面から遠いほど、揺れ始めが遅れ、振幅が減少した。壁と比べ床の振動時間は長い。
- ・ 実験結果の再現解析においては、加速度応答を個別地点で詳細に精査するとそれぞれ実験結果と解析結果に差異はあるものの、加速度波形をおおむね再現出来た。
- ・ RC試験体の1階部分を土槽に埋込み、剛飛翔体を衝突させた際の実験では、RC試験体1階の最大加速度値は衝突位置真裏の最大加速度値に対して1/4程度になった。さらに、RC試験体裏側から地盤内10cm位置の最大加速度値はRC試験体1階の最大加速度値に対して1/10程度になった。また、地盤内では深度方向に大きな減衰がみられた。今後、埋込条件の異なる実験結果についてさらに分析し論文等で公表していく予定である。

## 2.7 飛翔体等の衝突による衝撃に対する設備のフラジリティ評価

### <背景>

- 飛翔体等の衝突により建屋に高周波成分を有する衝撃荷重が伝播した場合、建屋内設備への影響が懸念される。新規制基準<sup>1)</sup>では、重大事故等に対処するための設備に大型航空機の衝突に対してその機能を損なわれないことを要求している。
- 航空機衝突の衝撃荷重による振動に対する建屋内設備の機能維持評価を行うにあたり、海外の判断基準 (NEI 07-13 Revision 8P Table3-3<sup>2)</sup>、以下「NEI07-13」という。)に加えて、国内で使用されている設備について衝撃荷重による振動に対する損傷加速度限界に関する知見収集が望まれている。

### <目的>

国内で使用されている設備を対象に加振試験を実施し、飛翔体衝突時の建屋内設備の機能維持評価に係るデータを取得する。

### <実施概要>

- ・評価対象設備の選定
- ・衝撃荷重による振動を想定した加振試験によるデータの取得
- ・既往知見における耐力との比較
- ・衝撃振動を想定した加振試験により耐力評価を行う上での留意事項の取りまとめ

1)原子力規制委員会、“実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈”、2013。

2) Nuclear Energy Institute, “Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs(NEI 07-013 Revision 8P)”, 2011.

## ○評価対象設備

以下を参考に対象設備を選定

- ・旧JNESの耐震実証試験<sup>3)</sup>で耐力が小さいと評価された設備
- ・NEI 07-13で最小の耐力カテゴリーに分類された設備
- ・EPRIの高周波地震に対する設備の耐力評価における機器選定<sup>4)</sup>

## 試験対象設備

分類	設備
電気品	パワーリレー
	補助リレー
	タイマーリレー
	キープリレー
	6.6kV回路用接地型計器用変圧器
	電動弁駆動部(電気品部位)

## ○試験条件

### (1) 入力波

周期帯域(20-200Hz)で卓越する加速度時刻歴波形(ショック波<sup>5)</sup>、ランダム波)を使用

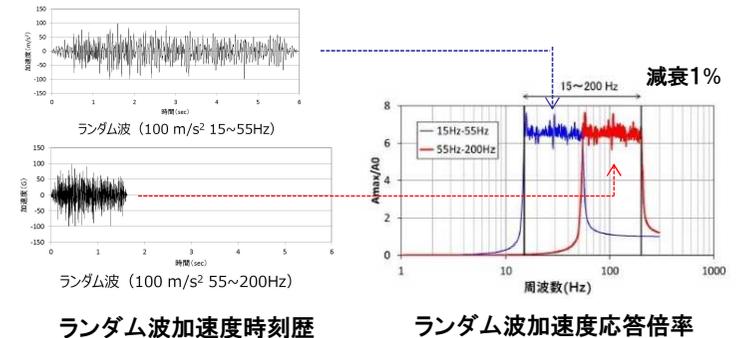
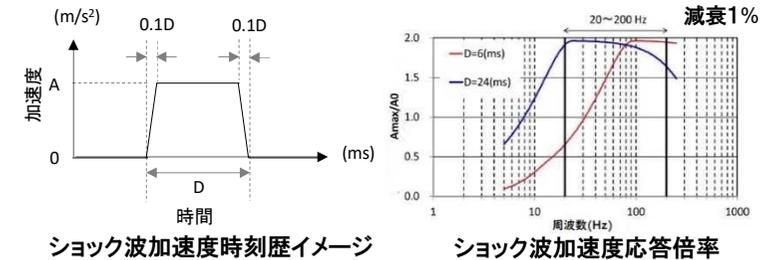
### (2) 試験方法

上下、左右、前後の3方向毎に単軸加振。試験体が機能異常するまで、もしくは振動装置の限界まで加振

### (3) 判定条件

加振後に正常に動作すること

※NEI07-13の耐力の最小カテゴリーの加速度を参考に振動台上の目標加速度30G程度を目安に実施



## 入力波の例

3) 独立行政法人原子力安全基盤機構、“平成14~15年度 原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 機器耐力その1(横型ポンプ、電気品)”, 2003.

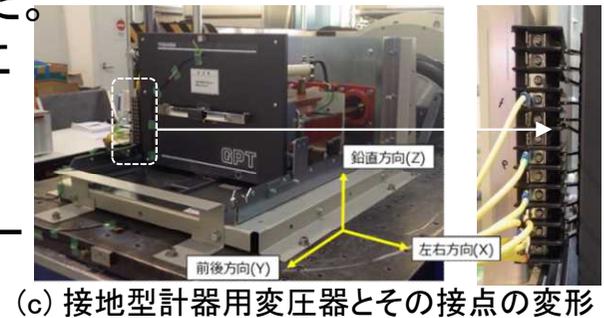
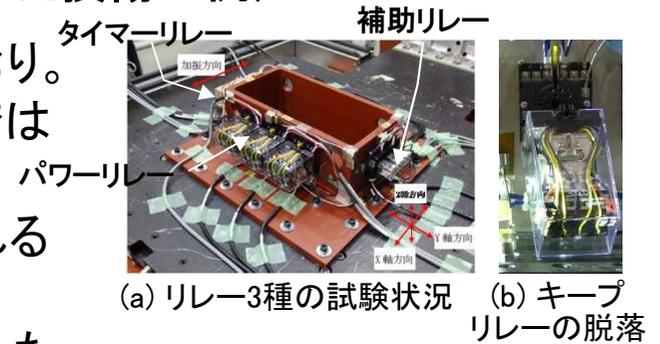
4) Electric Power Research Institute, “Hi-Frequency Program TECHNICAL REPORT”, 2014.

5) 日本工業規格、“環境試験方法—電気・電子—第2-27部:衝撃試験方法(試験番号: Ea) JIS C 60068-2-27”, 2011.

## <研究成果>

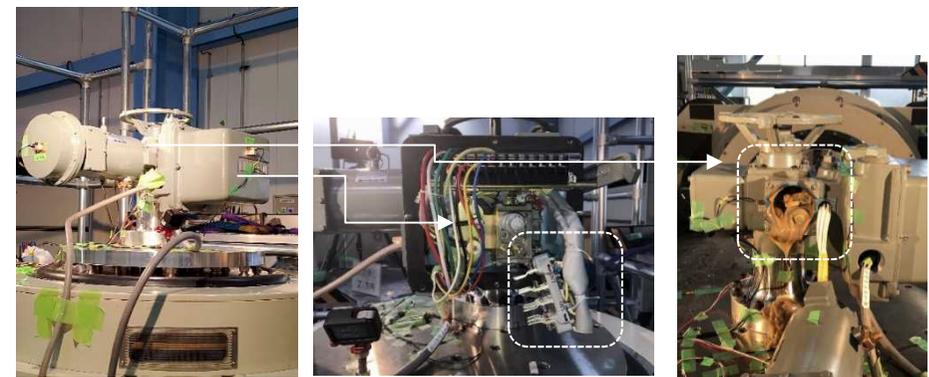
### ○加振試験によるデータの取得(機能維持した加速度と発生した損傷の例)

- ▶ 試験体が機能維持した振動台上の加速度値は下表のとおり。
- ▶ パワーリレー、補助リレー、タイマーリレー：今回の試験では損傷は確認されず加振後も正常に動作した(a)。
- ▶ キープリレー：試験体の取付支持部の咬み合わせが外れることによる脱落が発生した(b)。一部のケースで取付支持部のプラスチック製部材が損傷した。
- ▶ 接地型計器用変圧器：変圧器を登載している台車の挙動により、変圧器と台車を収納するユニット間の接点の変形(c)、接点の離れが生じた。⇒ ガタの影響
- ▶ 電動弁駆動部：樹脂製のリミットスイッチ、鋳鉄製のモーター・フレームが損傷した(d)。



試験体が機能維持した加速度

対象設備	試験体が機能維持した加速度	
	ショック波で機能維持した加速度(G)	ランダム波で機能維持した加速度(G)
パワーリレー	50	30
補助リレー	50	30
タイマーリレー	50	30
キープリレー	27	17
接地型計器用変圧器	2	2
電動弁駆動部(電気品部位)	30	24



試験体と損傷事例

### ○既往知見 (NEI07-13) における耐力との比較

- ショック波試験では、NEI07-13の最小カテゴリーの値27Gにほぼ相当する結果が得られていると考えられる(接地型計器用変圧器を除く)。
- ランダム波試験では、試験体の取付支持機構の外れ(キープリレー)、構成部材の弱部に損傷(電動弁駆動部)が発生し、NEI07-13の値を下回る結果となった。
- 接地型計器用変圧器のような設備がガタを有する場合は、NEI07-13との比較対象にはならないと推察され、設備の設置・使用状況を踏まえた評価が必要。

### ○衝撃振動を想定した加振試験により耐力評価を行う上での留意事項の取りまとめ

- 本研究の加振試験の経験を踏まえ、設備の衝撃振動に対する耐力評価を行う上での留意事項を、地震に対する耐力評価との比較等の観点から抽出し整理した。

#### <研究成果まとめ>

平成29年度から令和2年度にかけて、国内で使用されている設備を対象に加振試験を実施し、飛翔体衝突時の建屋内設備の機能維持評価に係るデータを取得した。主な成果は以下の通り。

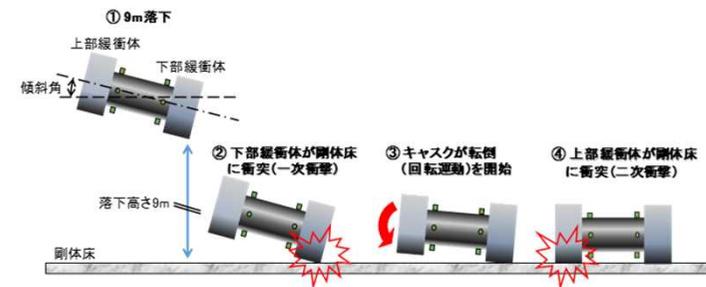
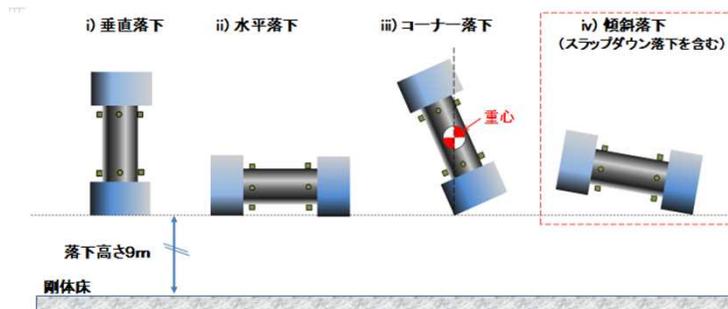
- 設備が台車構造のようなガタを有する場合、設備の設置状況の確認の必要性を明らかにした。
- 設備を構成する部材に脆性材料の使用がある場合、衝撃振動に対する弱部として考慮の必要性を明らかにした。

今後は、①設備の設置状況を踏まえた、設備への入力と設備の応答の関係に着目した各々の評価方法について既往評価手法の適用性を検討、②衝撃振動と部材の材質の関係に着目した検討、を実施する。

## 2.8 落下による衝撃に対する核燃料輸送容器のフラジリティ評価

### <背景>

- 「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」及び「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示」は、輸送貯蔵兼用キャスク等に対して、特別の試験条件下において、最大線量当量率及び放射性物質の漏えい量が基準を満たすことを要求している。
- この特別の試験条件の一つとして、9m落下試験がある。「車両運搬確認申請書、容器承認申請書及び核燃料輸送物設計承認申請書に添付する説明書の記載要領」は、この9m落下試験について、下左図に示すような垂直落下、水平落下、コーナー落下、傾斜落下試験後の輸送物の状況について説明するとともに、密封機能維持等への影響の観点から、それぞれの落下姿勢における最大損傷の状態と最大損傷を受ける条件について評価することを求めている。また、傾斜落下に対する評価においては、アスペクト比(容器長さ/容器外径)が5以上の高アスペクト比のキャスクの場合は、下右図に示すような転倒による二次衝撃(スラップダウン落下)について説明することも求めている。



### <目的>

- スラップダウン落下に関しては、高アスペクト比のキャスクに対してのみ注意が払われてきたが、ドイツの連邦材料試験研究所(Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM)は、アスペクト比が2.3程度の低アスペクト比のキャスクに対して最大損傷が生じる落下姿勢に着目したスラップダウン落下試験を実施し、本体胴に作用する二次衝撃による加速度が一次衝撃加速度に対して約2.2倍大きくなることを報告している。
- このため、低アスペクト比のキャスクについて、スラップダウン落下の影響を確認することを目的に、スケールモデルを用いた低アスペクト比のキャスクの水平落下試験及びスラップダウン落下試験を実施した。

## ＜実施概要＞

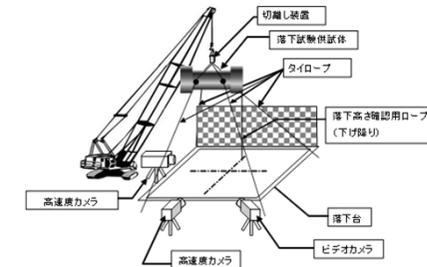
- スケールモデルを用いた低アスペクト比のキャスクの水平落下試験及びスラップダウン落下試験を実施し、その落下による衝撃に対するキャスクの挙動に係る各種データ(胴部加速度等)を計測し、比較を行った。
- また、現行の設計承認に係る審査では、低アスペクト比のキャスクについて、参考評価の位置付けで、静的解析に基づく構造健全性評価がなされている。そこで、上述の水平落下試験及びスラップダウン落下試験の結果を用いて、この静的解析に基づく構造健全性評価手法の適用性や評価上の配慮等について、併せて検討した。

## ＜落下試験＞

- 供試体を所定の落下姿勢にクレーンで吊り上げ、高さ9mから落下台に自由落下させることで試験を実施した。落下試験の概要を下図に示す。落下台はIAEA No.SSG-26の要件を満たす。また、試験ケースを下表に示す。

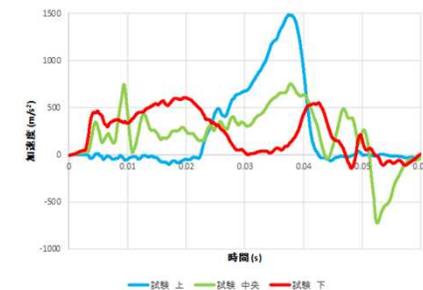
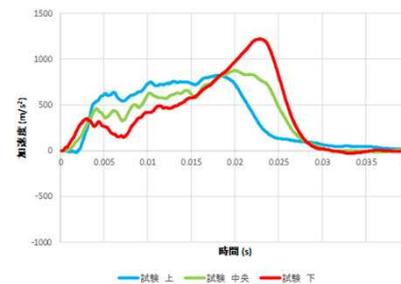
## ＜落下試験の研究成果＞

- 水平落下試験時の胴部の加速度時刻歴(上向きを正)を下左図に示す。下部の加速度が減少し上部が大きくなったが、それ以降に再び下部が大きくなり、加速度が最大となった。
- スラップダウン落下試験時の胴部の加速度時刻歴(上向きを正)を下右図に示す。胴上部、中央部及び下部は、一次衝突において胴下部の加速度が最大となった。その後、胴下部の加速度が減少している途中に上部緩衝体が落下試験台に二次衝突し、胴上部の加速度が最大となった。二次衝突による最大加速度(胴上部:  $1486\text{m/s}^2$ )は、一次衝撃による最大加速度(胴下部:  $605\text{m/s}^2$ )に対して約2.5倍大きくなった。この結果から、上述のBAMの報告と同様の傾向であることを確認した。



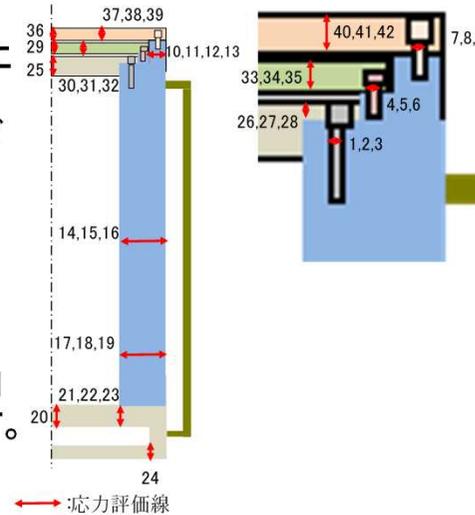
No.	落下姿勢	落下高さ	傾斜角
1	水平落下	9m	0°
2	スラップダウン落下	9m	8°

- キャスクの密封機能維持の観点から、両試験時に蓋密封部(胴上部)で発生した最大加速度を比較すると、スラップダウン落下試験時の二次衝突による最大加速度(胴上部:  $1486\text{m/s}^2$ )は、水平落下試験時における最大加速度(胴上部:  $825\text{m/s}^2$ )に対して約1.8倍大きくなった。

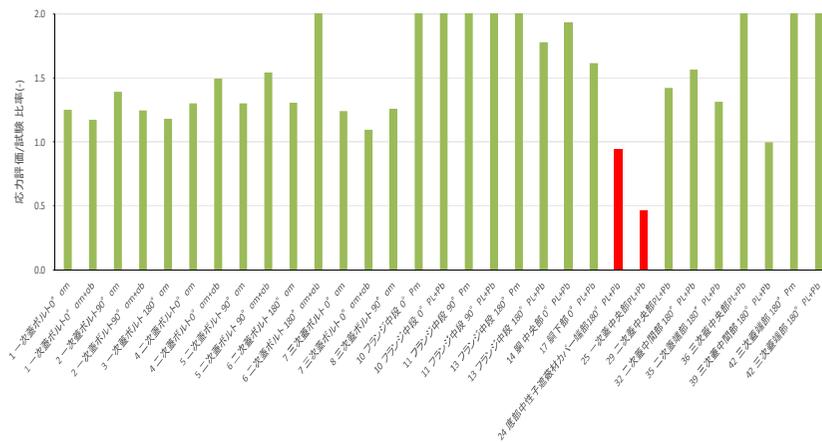


## <構造健全性評価手法の適用性>

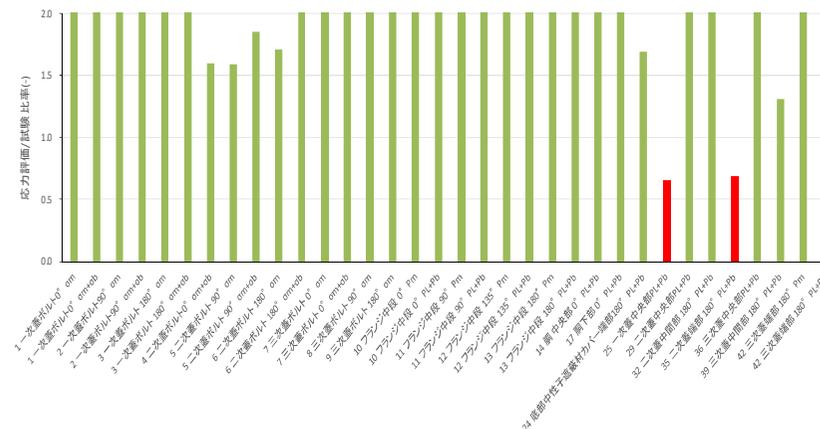
- 現行の設計承認に係る審査では、低アスペクト比のキャスクについて、参考評価の位置付けで、静的解析に基づく構造健全性評価がなされている。そこで、水平落下試験及びスラップダウン落下試験の結果を用いて、この静的解析に基づく構造健全性評価手法の適用性や評価上の配慮等について検討した。
- 構造健全性評価時における応力評価位置を右図に示す。
- 水平落下試験とスラップダウン落下試験とCRUSHコードの加速度を入力条件とした静解析結果との応力比較を下図に示す。現行の手法は、おおむね、保守的であることが分かった。



評価断面 No.	部位	評価断面 No.	部位
1	一次巻ボルト 0°	24	底部中性子遮蔽材力バネ端部 180°
2	一次巻ボルト 90°	25	一次巻中央部
3	一次巻ボルト 180°	26	一次巻端部 0°
4	二次巻ボルト 0°	27	一次巻端部 90°
5	二次巻ボルト 90°	28	二次巻端部 180°
6	二次巻ボルト 180°	29	二次巻中央部
7	三次巻ボルト 0°	30	二次巻中間部 0°
8	三次巻ボルト 90°	31	二次巻中間部 90°
9	三次巻ボルト 180°	32	二次巻中間部 180°
10	フランジ中段 0°	33	二次巻端部 0°
11	フランジ中段 90°	34	二次巻端部 90°
12	フランジ中段 135°	35	二次巻端部 180°
13	フランジ中段 180°	36	三次巻中央部
14	胴中央部 0°	37	三次巻中間部 0°
15	胴中央部 90°	38	三次巻中間部 90°
16	胴中央部 180°	39	三次巻中間部 180°
17	胴下部 0°	40	三次巻端部 0°
18	胴下部 90°	41	三次巻端部 90°
19	胴下部 180°	42	三次巻端部 180°
20	胴(底板)中央部		
21	胴(底板)端部 0°		
22	胴(底板)端部 90°		
23	胴(底板)端部 180°		



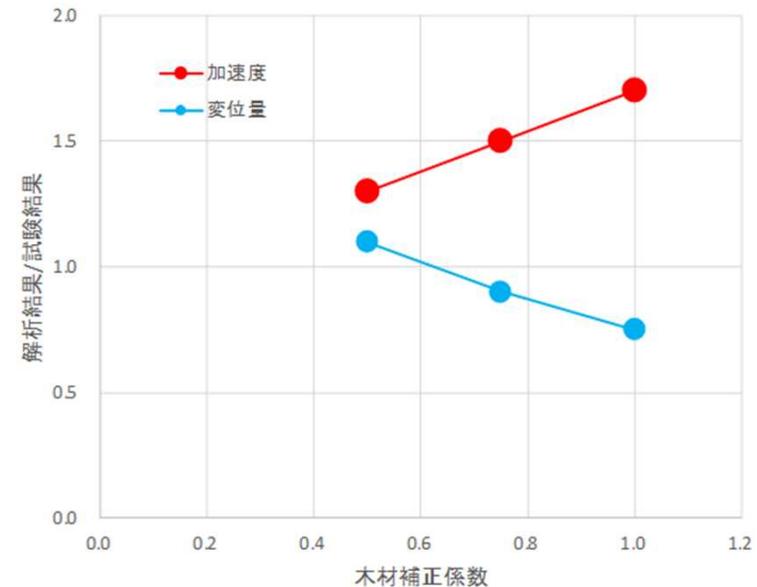
1) 水平落下試験結果とABAQUSコード解析結果



2) スラップダウン落下試験結果とABAQUSコード解析結果

## ＜構造健全性評価手法の適用性の研究成果＞

- 現行の設計承認に係る審査では、スラップダウン落下時の加速度設定においては、CRUSHコードによる水平落下の加速度に対して割り増し係数を乗じている。したがって、割り増し係数は大きな影響を及ぼす。
- CRUSHコードを用いた加速度の評価において、木材の応力-ひずみ曲線の形状の差異が解析結果に大きく影響を及ぼすことを確認した。
- 電中研が実施した拘束型木材単体試験方法による木材の応力-ひずみ曲線を1とした場合の木材補正係数の効果を下図に示す。なお、図中にはキャスクの重心の加速度、及び緩衝体の変位を示している。
- 木材の応力-ひずみ曲線の形状に影響を与えるパラメータとして、下記の3つの設定に注意が必要である。
  - ▶温度(高温になると木材補正係数が低下する)
  - ▶ひずみ速度依存性による割増し(高ひずみ速度では木材補正係数が上昇する)
  - ▶材料試験と実機における木材の組合せ・構造の差異(衝撃緩衝体内部では材料試験と拘束状況が異なり、木材補正係数が低下する)



## <研究成果まとめ>

- 低アスペクト比のキャスクについて、スラップダウン落下の影響を確認すること目的に、1/2.3スケールモデルを用いた低アスペクト比のキャスクの水平落下試験及びスラップダウン落下試験を実施し、その落下による衝撃に対するキャスクの挙動に係る各種データを計測し、比較を行った。
- その結果、スラップダウン落下時の本体胴に作用する二次衝撃による加速度は、一次衝撃加速度に対して約2.5倍大きくなった。よって、本試験条件(供試体形状、構造等)の範囲内においては、低アスペクト比のキャスクについても、スラップダウン落下の影響が大きいことが分かった。
- キャスクの落下試験結果に対して、静的解析に基づく構造健全性評価を実施した結果、評価結果はその試験結果を概ね保守的に評価できることを確認した。また、木材緩衝材の応力-ひずみ曲線の形状の差異が解析結果に大きく影響を及ぼすことを確認するとともに、評価時の留意点を整理した。

### 3. まとめ※

各研究課題に対するまとめを以下に記す。

#### (1) 津波に対する防潮堤のフラジリティ評価手法の検討

- a. 防潮堤の津波に対する応答評価においては、津波による漂流物が衝突する可能性を、津波の碎波位置に基づいて評価を行うとともに、既往の衝突荷重算定式の適用性を整理した。また、防潮堤前面の陸域に砂丘が存在する地形に対して、津波によって砂が移動した場合に津波が防潮堤に与える荷重への影響を評価した。さらに、津波が防潮堤に作用する持続波圧について、評価方法を整理した。
- b. 地震との組合せを考慮した構築物等の津波フラジリティ評価においては、地震によって防潮堤の一部が損傷する等で防潮堤の高さが低下することを想定し、津波が越流した場合の津波波圧の検討を行った。

#### (2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討

- a. 地震時の建屋・構築物等の三次元挙動評価においては、建屋の三次元FEM解析のモデル化に関して、建屋－地盤間の接触・剥離、減衰等のモデル化が建屋応答に比較的大きな影響を及ぼすことの知見を得た。また地震観測記録の再現解析を行い、水平方向の建屋応答について観測記録との整合性がとれていることを確認した。
- b. 地震時の埋立地盤の液状化評価においては、礫質土に対する液状化実験を行い、砂質土地盤よりも過剰間隙水圧の上昇及び消散が速く、全体の蓄積量も小さいという知見を得た。これについては、間隙比やサイクリックモビリティ等による原因であると推察された。
- c. 地震時に対する耐震重要設備の耐力評価においては、既往試験結果から、現実的耐力を整理した。また、PWR原子炉格納容器を対象として耐震信頼性実証試験による試験体の振動特性を反映させたFEMモデルを用いた座屈評価を行った。

### (3) 外部事象等による衝突・衝撃挙動に対する評価手法の検討

- a-1. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る建屋の評価においては、建屋模型への衝突実験で得られた衝撃力の伝播に対する再現解析を行い、加速度応答を個別地点で詳細に精査するとそれぞれ実験結果と解析結果に差異はあるものの、加速度波形をおおむね再現出来ることを確認した。また、周辺地盤への逸散に関する実験を行い、地盤による減衰効果を確認した。
- a-2. 飛翔体等による衝突・衝撃挙動に係る設備の評価においては、衝撃振動による加振試験を実施し、その結果を踏まえて、衝撃振動を想定した加振試験を行う上での留意事項を整理した。
- b. 輸送容器の落下による衝撃挙動に係る構造健全性評価においては、低アスペクト比のキャスクに対する落下実験を行い、スラップダウン落下の影響が大きいことを確認した。さらに、既往の方法を用いた構造健全性評価を行い、当該実験よりも保守的な結果であることを確認した。

### (4) 地震時亀裂進展評価手法の検討

- a. 地震時亀裂進展評価においては、地震による強い繰り返し荷重を受ける条件であっても、本研究のモデルにより精度良く亀裂進展速度を評価することができることを確認した。また、複数回の設計を超える地震荷重を受ける経年配管のフラジリティ評価を行い、フラジリティ曲線はほとんど変化しないことを確認した。

## 4. 成果の活用について

### ➤ 新規制基準の適合性審査等への活用

(1) 以下の技術情報検討会において、研究で得られた知見を公表し、規制庁及び事業者  
者に情報共有を行い、審査における技術的知見として活用されることが期待され  
る(プロジェクト期間内)。

・「キャスクのスラップダウン落下試験から得られた最新知見について」

令和元年9月4日 第38回技術情報検討会

・「接地型計器用変圧器の支持部にガタが有る場合の衝撃耐力に係る試験結果につ  
いて」

令和2年10月29日 第43回技術情報検討会

(2) 研究担当者は、新規性基準に係る適合性審査の審査会合や審査ヒアリング等に  
参加し、研究で得られた知見を審査等の場で反映している(プロジェクト期間内)。

(3) 研究担当者は、研究で得られた知見を反映して、外部事象のフラジリティ評価に関  
連する新規制基準や審査ガイドの改訂作業を行っている(プロジェクト期間内)。

### ➤ 論文等の公表

研究で得られた知見は、NRA技報(1件)や査読付論文・国際会議プロシーディングス  
(10件)、その他学会発表等(11件)で公表し、審査における技術的知見として活用さ  
れることが期待される(プロジェクト期間内)。

## 5. 成果の公表等

### ➤ NRA技術報告

- ・原子炉施設の建屋三次元地震時挙動の精緻な推定に資する影響因子の分析とそのモデル化に関する検討、NTEC-2021-4002、令和3年3月

### ➤ 査読付論文、国際会議プロシーディングス

- ・Toriyama T. and Ishida N. 2020. A METHOD FOR EVALUATING TSUNAMI LOADING ON SEAWALLS DURING OVERFLOW, Proceedings of 37th Conference on Coastal Engineering.
- ・ICHIHARA Yoshitaka, NAKAMURA Naohiro, MORITANI Hiroshi, CHOI Byunghyun, NISHIDA Akemi, 3D FEM Soil—Structure Interaction Analysis Considering Separation and Sliding of Soil from Sidewalls of Kashiwazaki—Kariwa Nuclear Power Plant Unit 7 Reactor Building Subjected to the 2007 Niigataken Chuetsu—oki Earthquake ,Frontiers in Built Environment, Frontier in Build Environment; Earthquake Engineering (投稿中)
- ・市原義孝、中村尚弘、森谷寛、堀口朋裕、崔 炳賢、“鉄筋コンクリート耐震壁に対する等価線形解析の適用性検討”、日本原子力学会和文論文誌(投稿中)
- ・日高慎一郎、東喜三郎、庄司学、藤本滋、“耐震信頼性実証試験に基づくPWR鋼製原子炉格納容器の耐震性評価に関する検討(PWR-CVの座屈に対する解析に基づく設計評価に係る知見拡充)”、日本機械学会論文集、2021.(投稿中)
- ・S. Hidaka, K. Azuma, G. Shoji, “Evaluation of Buckling Criteria for Reactor Containment Vessels under Seismic Loadings,” 17th World Conference on Earthquake Engineering(17WCEE), 2021 .(投稿中)
- ・Y. Li, K. Azuma, K. Hasegawa, “Failure bending moment of pipes containing multiple circumferential flaws with complex shape,” International Journal of Pressure Vessels and Piping 171, pp.305–310, 2019.
- ・K. Azuma, S. Hidaka, Y. Yamazaki, “Effects of crack closure on the fatigue crack growth rates of ferritic steels subjected to severe reversing loads,” J. Pressure Vessel Technol., 142(6): 061503, 2020.
- ・K. Azuma, Y. Yamaguchi, Y. Li, “Pilot study on seismic fragility evaluation for degraded austenitic stainless steel piping using probabilistic fracture mechanics code PASCAL-SP”Proceedings of the ASME 2021 Pressure Vessels and Piping Conference, 2021(投稿中)
- ・太田良巳、松澤遼、鈴木哲夫、吉田匡佑、“国際ベンチマーク解析プロジェクトIRIS3フェーズAに係る鉄筋コンクリート構造物の衝撃評価に関する基礎的研究”、土木学会、第12回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2019.
- ・太田良巳、澤田祥平、山田和彦、紺谷修、二階堂雄司、岡安隆史、金子貴司、日向大樹、石木健士朗、相馬和貴、安本宏、“衝撃作用を受ける構造物の衝撃挙動評価に関する取り組み”、日本建築学会シンポジウム「耐衝撃設計の合理化に向けて—現状と新しい流れ、今後の課題—」、pp.135-144、2019.

## 6. 成果目標に対する達成状況

本プロジェクトでは、外部事象に係る確率論的リスク評(PRA)に関する科学的・技術的知見の蓄積及び関連評価ガイド策定のための知見の拡充に資するため、また、将来の規制活動への反映に向けて地震時亀裂進展に係る知見を蓄積することを目的としており、下記のとおり、平成29年度から平成2年度までの実施期間において当初の目的を達成した。

### (1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討

- a. 津波漂流物が防潮堤に衝突する際の荷重算定式の妥当性確認や防潮堤前面に存在する砂丘の防潮堤へ作用する津波波力への影響評価及び防潮堤に作用する津波の持続波圧について評価方法を整理した。
- b. 地震によって防潮堤の一部が損傷する等で防潮堤の高さが低下することを想定し、津波が越流した場合の津波波圧の検討を行った。

### (2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討

- a. 建屋の三次元FEM解析のモデル化に関して、建屋－地盤間の接触・剥離、減衰等のモデル化が建屋応答に比較的大きな影響を及ぼすことの知見を得た。
- b. 地盤の液状化に関して、礫質土の液状化発生時の過剰間隙水圧等の詳細な挙動について知見を得た。
- c. 設備の耐力について、既往試験結果から現実的耐力を整理した。また、PWR原子炉格納容器を対象に、FEMモデルを用いたより現実的な座屈評価を行った。

(3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討

- a. 衝撃力の建屋応答に対する再現解析を行い、全体的には振動特性を概ね評価可能であることを確認した。また、周辺地盤への逸散に関する実験を行い、地盤の減衰効果を確認した
- b. 衝撃振動による設備の加振試験を実施し、その結果を踏まえて、衝撃振動を想定した加振試験を行う上での留意事項を整理した。
- c. 低アスペクト比のキャスクに対する落下実験を行い、スラップダウン落下の影響が大きいことを確認した。さらに、既往の評価方法が、当該実験よりも保守的な結果であることを確認した。

(4) 地震時亀裂進展評価手法の検討

- a. 強い繰り返し荷重を受ける条件であっても、本研究のモデルにより精度良く亀裂進展速度を評価することができることを確認した。また、経年配管のフラジリティ評価には、複数回の設計を超える地震荷重はほとんど寄与しないことを確認した。

## 7. 今後の展開

### (1) 津波に対するフラジリティ評価手法の検討

・東北地方太平洋沖地震に伴う津波の経験等から、海底面にヘドロ状の堆積物が存在する沿岸海域に津波が来襲した際、このヘドロ状の堆積物が混入した津波(以下「黒津波」という。)が発生する場合があります、特に、港湾や防波堤等の入口の様な狭窄部を通過する津波は、この傾向が顕著になることが知られている。そこで、沿岸海域の地形効果やヘドロ状の堆積物の堆積量等に着目し、水理試験やシミュレーション解析を実施、黒津波の発生条件等を検討し、その知見を拡充する。

### (2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討－1

・低接地率状態の建屋の応答評価及び、高温状態等の影響を受けた建屋の地震荷重作用時の応答特性に与える影響評価に関する既往知見の調査並びに関連する試験や解析による応答特性の把握から、非線形挙動を示す建屋の耐震安全性評価手法の適用性に係る知見を拡充する。さらに、建屋の精緻な三次元挙動を把握するため、実建屋における地震観測等の記録を計測・分析及びその記録のシミュレーション解析等を実施し、地震応答解析モデルの精緻化に係る知見を拡充する。

・防潮堤や屋外重要土木構造物等の施設の周辺地盤を対象に、原子力発電所特有の条件として地震動、礫質土等の地盤材料、地形等の特性を踏まえた液状化実験やシミュレーション解析等を実施し、礫質土地盤の液状化による施設への影響評価に係る技術的知見を拡充する。

## (2) 地震に対するフラジリティ評価手法の検討－2

・過去に大きな地震を経験した配管系の基準地震動を超える地震荷重における耐震性を把握するため、試験片を用いた材料試験及び配管要素試験体を用いた振動試験を行い、試験で観測された繰り返し荷重下での弾塑性挙動及び疲労強度について、有限要素法等によって詳細に評価し、既往の疲労評価手法の適用性を確認する。さらに、新規制基準に適合した既設プラントの耐震性を把握するため、新たに導入された設備やその構造・機構に着目して振動試験を行い、その現実的な耐力やばらつきを評価する。また、衝撃力等により生じる高振動領域での振動試験も併せて行い、外力の振動領域の違いが設備の現実的な耐力やばらつきに及ぼす影響も把握する。

## (3) 外部事象等による衝突・衝撃に対する評価手法の検討

・岩盤内設置等の設置状況や構造物の複雑な形状を考慮した局部損傷に関する評価手法の適用性を検討する。具体的には、岩石供試体への衝突実験及び実構造物で見られる形状を模擬した試験体への衝突実験を実施し、実験結果の分析および実験の数値シミュレーション解析を通して、衝突時の応答に係る知見を拡充する。

・衝撃力に対する設備の応答等に係る知見を拡充するため、電気品等のキャビネットに着目し、その基本構造及びそれにガタ・摩擦系等を加えた試験体を制作、その衝撃振動試験を実施する。また、ガタ・摩擦系等を含む設備の応答評価手法を検討するため、既往知見に基づき衝撃応答解析を実施し、衝撃振動試験結果と比較することにより、その適用性を確認する。

## (4) 地震時亀裂進展評価手法の検討

(本課題については、目的を達したため研究は終了とする。)

# 大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究 中間評価 説明資料

令和3年4月

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

## 目次

1. 研究概要
2. 研究期間を通じた主要成果
3. まとめ
4. 成果の活用について
5. 成果の公表等
6. 成果目標に対する達成状況

# 1. 研究概要

## ① 研究プロジェクトの背景

これまでに、過去に長期の休止期間があり大規模噴火を起こした火山の活動評価手法を整備するための知見や国内外の巨大噴火を起こした火山の噴火直前のマグマ溜まりの深度、当該深度領域の地下構造を探查する手法について知見が蓄積されつつある。一方、巨大噴火を起こすソースとなる巨大なマグマ溜まり生成のプロセスやマグマが蓄積する時間的なスケールについての知見は海外の研究事例が基本となっている。

## ② 研究プロジェクトの目的

本研究プロジェクトでは、巨大噴火を起こした火山を中心に、過去の大規模噴火に至るまでの準備・開始プロセスとして巨大噴火に至るまでの詳細な活動履歴や噴火シーケンス、マグマの変遷についての知見を基に、過去に巨大噴火を起こしたカルデラ火山の長期的な活動を評価するとともにマグマ・火山活動に関するデータを蓄積すること、国内の活動的なカルデラ火山の地下構造やマグマ活動に伴う種々の事象を観測し、火山活動を捉えるための観測項目及びそれらの関係についての考え方の整理・提案を行うことを目的としている。

### ③ 研究プロジェクトの全体行程

実施内容	R1	R2	R3	R4	R5
(1) 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究 a. 大規模噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究	▽ボーリング等 (阿寒)		コア&噴出物サンプル (洞爺、阿寒)		
		洞爺、始良等の地質学的調査			
b. 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測		古地磁気学的検討 (阿寒、洞爺、始良)		▽論文投稿	
		降灰プロセス等の検討			
(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究	▽ラマン導入	岩石学的検討 (屈斜路、洞爺、始良、鬼界、十和田)			
		鉱物分析、高温高压実験	マグマの定置位置、滞留時間の情報		
(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究 a. カルデラ火山の地下構造調査	▽ネットワークMT設置 (阿蘇)				
		地震波、MT法による地下構造探査 (始良、十和田)			
b. カルデラ火山の地球化学的調査	▽ICP-MS導入				
		マグマ起源の流体分析による地下構造の調査			
c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査		マグマ、地下構造に関する情報に基づく数値実験			
				▽製作・施工	▽海底地殻変動観測開始
(4) 観測項目の検討及びそれら関係についての考え方の検討		海底地殻変動観測手法検討 基本設計、詳細設計検討			
					▽NRA技報 考え方の提案

## 2. 研究期間を通じた主要成果

- (1) 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究
  - a. 大規模噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究  
(委託研究、NRA)
  - b. 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測  
(共同研究(京都大学+産業技術総合研究所+NRA)、NRA)
  - c. 単成火山の形成に関する文献調査
- (2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究  
(委託研究、共同研究(東北大学+NRA))
- (3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究  
(委託研究)
  - a. カルデラ火山の地下構造調査
  - b. カルデラ火山の地球化学的調査
  - c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査
- (4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討  
(NRA)

## (1) 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究

### a. 大規模噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究

#### <研究内容>

国内のカルデラ火山について、過去の火山活動に関する詳細な噴火履歴を噴出物の分布や層序を地質調査やボーリング調査から詳細に解析し、噴火進展プロセス等の火山の特性について知見を蓄積する。(R1~5)

### b. 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測

#### <研究内容>

降灰時の火山灰の空間密度、凝集効果と粒径に関する特性を地質調査や観測から詳細に解析し、降灰時のプロセス等の知見を蓄積する。(R1~3)

### c. 単成火山の形成に関する文献調査

#### <研究内容>

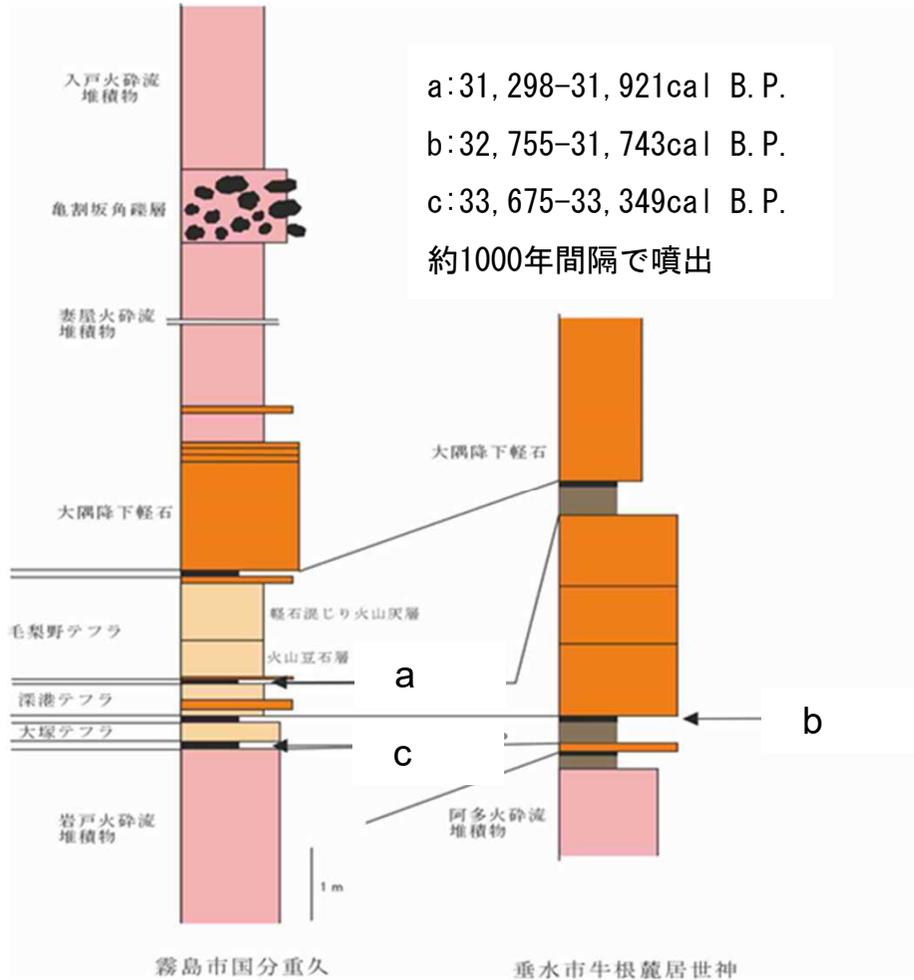
国内外の文献を収集し活動評価の知見を取りまとめる。

## (1) 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究

### a. 大規模噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究

洞爺-支笏エリア、始良及び阿蘇カルデラの地質学的な調査結果として以下の知見が得られた。

- 洞爺カルデラ形成噴火（約11万年前）では、古地磁気学的検討においても識別できない短時間でイベントが進展した可能性があること、従来の見解とは異なる噴火後期（Unit 4-6に相当）で大規模な噴火が発生したことが示唆された。
- 始良カルデラでは、入戸火砕流噴火（約3万年前）に至る過程として、約1000年の比較的等間隔で珪長質マグマが噴出したことが確認され、入戸火砕流噴火のケースでは、珪長質マグマが巨大噴火直前には噴出しない、あるいは巨大噴火直前に断続的に噴出するようなパターンではないことが確認された（次ページ、図1参照）。
- 阿蘇カルデラについては、4回の大規模噴火の直前の活動履歴の詳細な調査を行い、例として、阿蘇3噴火では、阿蘇3直下の土壌には火山灰成分が少ないことから、噴火前の数千年間は比較的火山活動が穏やかであった可能性があること、阿蘇4噴火では、従前の研究では知られていなかった阿蘇4に先行する降下軽石や小規模な火砕流があることが確認された（次ページ、表1参照）。



a: 31, 298-31, 921cal B.P.  
b: 32, 755-31, 743cal B.P.  
c: 33, 675-33, 349cal B.P.  
約1000年間隔で噴出

図1 先入戸火砕流噴火\*噴出物の模式層序と得られた14C年代

出典) AIST (2020)に加筆

\*先入戸火砕流噴火は約三万年前の始良カルデラの形成噴火と考えられている

表 1 阿蘇カルデラの噴火推移

噴火サイクル	サブユニット	年代	VEI	本質物	有色鉱物	全岩化学組成
阿蘇4以降 (VEI 4以上の テフラのみ)	山崎第15スコリア(YmS15)	22-21 ka	4	sc	px, ol	53%
	山崎第18スコリア(YmS18)	22-21 ka	4	sc	px, ol	50%
	山崎第20スコリア(YmS20)	22-21 ka	4	sc	px, ol	52%
	草千里ヶ浜軽石(Kofa)	30 ka	5	pm	px	66%
	水ノ元第1軽石(MzP1)	42 ka	4	pm	px	66%
阿蘇4	阿蘇中央火口丘第4軽石(ACP4)	51 ka	4	pm	px	65%
	阿蘇中央火口丘第5軽石(ACP5)	55 ka	4	pm	bi, px	
	阿蘇中央火口丘第6軽石(ACP6)	60 ka	4	pm	px	63-66%
	山崎第5軽石~山崎第1軽石(YmP5-YmP5)	68-67 ka	4	pm	px	59-62%
	野尻軽石(NP)	84 ka	5	pm	px, hb, bi	
	阿蘇4B火砕流堆積物			pm>>sc	hb, px	64-70, 54%
	阿蘇4KS火砕流堆積物(九ノ峰スコリア流)			sc	hb, px, ol	50-52%
	阿蘇4T火砕流堆積物			pm	hb, px	67-69%
	阿蘇4BS火砕流堆積物(井利スコリア流)			sc>pm	hb, px, ol	51-67%
	阿蘇4M火砕流堆積物(用木軽石流)			pm	hb, px	67-70%
	阿蘇4Y火砕流堆積物(八女軽石流)			pm	hb, px	67-70%
	阿蘇4H火砕流堆積物(鳩平軽石流)			pm	px, hb	
	阿蘇4K火砕流堆積物(肥猪火山灰流)	88 ka	8	pm	px	
	阿蘇4O火砕流堆積物(小谷軽石流)			pm>>sc	hb, px	64-69, 52%
	阿蘇4A火砕流堆積物			pm>>sc	hb, px	67-70, 52%
阿蘇4Tk火砕流堆積物(高尾野火砕流)			pm>>sc	hb, px	50, 60%	
阿蘇4S火砕流堆積物(猿丸火砕流)			pm	px > hb	67-71%	
阿蘇4L降下火山灰			ash	-		
阿蘇4X火砕流堆積物/降下軽石層			pm	bi, px, hb	68-69%	
阿蘇4/3	大峰火山(大峰火砕丘、高遊原溶岩)			lava, pm	hb, px	63-65%
	Y降下軽石層	89.9 ka	4	pm	bi, px, hb	68%
	ABCD降下軽石層	97.7 ka	5	pm	px	62-65%
	EF降下軽石層	99.4 ka	5	pm	bi, px, hb	67-71%
	G降下軽石層	101 ka	4	pm	px	66%
	HI降下軽石層	103 ka	5	pm	px	65-66%
	JKL降下軽石層	104 ka	5	pm	px	64-66%
	MN降下軽石層	106 ka	5	pm	px	66%
	Z2降下軽石層	107 ka	4	pm	px	69%
	Z6降下軽石層	108 ka	4	pm	px	65%
	Z15降下スコリア層	112 ka	4	sc	px, ol	51%
	Z20降下スコリア層	114 ka	4	sc	px, ol	56%
	Z27降下スコリア層	116 ka	4	sc	px, ol	56%
	Z28降下スコリア層	120 ka	4	sc	px, ol	51%
	Z29降下スコリア層	128 ka	4	sc	px, ol	53%
阿蘇3	阿蘇3C火砕流堆積物			sc	px	55-56%
	阿蘇3B火砕流堆積物	133 ka	7	sc>pm	px	57-67%
	阿蘇3A火砕流堆積物			pm>>sc	px	63-69%
	阿蘇3W降下軽石層			pm	px	69%
阿蘇3/2	U降下軽石層		4	pm	px	
	OPQ降下軽石層		5	pm	px	68%
	R降下軽石層		4	pm	px	66%
	S降下軽石層		5	pm	px	64%
阿蘇2	阿蘇2T降下スコリア層			sc	px	57%
	阿蘇2B火砕流堆積物			sc	px	56-60%
	阿蘇2A火砕流堆積物			sc, pm	px	66%
	阿蘇2TL降下軽石層	146 ka	6	pm	px	63-66%
	阿蘇2R火砕流堆積物			pm	px	
阿蘇2/1	阿蘇2V降下スコリア層			sc	px	61%
	赤井火山(赤井火砕丘、砥川溶岩)			lava, sc	px	58-60%
	玉来川溶岩、秋田溶岩、的石溶岩など			lava	px	
阿蘇1	降下火砕物		4	sc, pm	px	
	阿蘇1C降下軽石層			pm	px	
	阿蘇1B火砕流堆積物	260 ka	7	sc	px	55%
先阿蘇1	阿蘇1A火砕流堆積物			pm	px	66-68%
	阿蘇1P降下軽石層			pm	px	
先阿蘇1	先阿蘇1テフラ		4?	pm	px	
	古閑溶岩	270 ka		pm	px	69%

珪長質マagmaに変化

出典) AIST (2020)

## (1) 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究

### b. 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測

- 桜島火山において降灰発生時の火山灰濃度を推定するための粒子の粒径分布、落下速度等の観測を実施し、降灰時の直接観測データ（13ケース）を蓄積した。データ解析の結果、多くのケースで降灰時に粒子が凝集して落下していることが示唆される結果が得られた。
- Tephra2等の降灰シミュレーションに用いるパラメータの推定手法の検討と実際の地質調査で得られるデータの特性把握の2つの観点での研究を進めた。その結果、既存の初期粒径分布推定手法と比べてばらつきの少ない推定手法を考案した。また、地質調査からは火口から遠方域において火山灰粒子が凝集して落下したことが示唆される結果が得られた。

### c. 単成火山の形成に関する文献調査

- 噴火メカニズムや産出状況等に特徴を持つ単成火山に関する知見を収集し、国内外で実施されている単成火山の活動評価等についての知見をとりまとめた。

## (2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究

### <研究内容>

過去に大規模な噴火（カルデラ形成噴火）をした火山が噴火に至るまでのマグマプロセスを解明するため、マグマの温度・圧力条件や組成の変化からマグマの時空間変化（深さ、滞留時間）を調べ、噴火の準備段階におけるマグマ状態の変化に関する知見を蓄積する。（R1～5）

## (2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究

洞爺・支笏エリア、十和田、始良及び鬼界カルデラ等の噴出物の岩石学的調査結果として以下の知見が蓄積された。

- 洞爺カルデラ形成噴火（約11万年前）噴出物の岩石学的特徴として、斑晶量やカリウム含有量、希土類元素組成等が異なる4タイプの軽石（CP, CR, Band, Gray）があるが、CRタイプは、CPタイプと比べてストロンチウム同位体比が低く、両者の起源マグマが異なることを示唆しているとともに、噴火後期に噴出している（図2参照）。
- 十和田カルデラの約3.7万年前のカルデラ形成噴火のマグマ溜まりの温度・圧力条件は、850 °C、1.7 kb（深度約6 km）の条件と推定された（図3参照）。
- 始良カルデラのカルデラ形成噴火（約3万年前）直前のマグマ溜まりの温度・圧力条件は、740～770 °C、100±50 MPaであると推定された。また、入戸火砕流噴火以降には、組成の異なる別の流紋岩マグマが活動していることが示唆された。
- 鬼界カルデラの鬼界葛原噴火（約9.5万年前）でのマグマ溜まりの温度・圧力条件は、810 °C以上、100–230 MPa（深さ4–9 kmに相当）、小瀬田火砕流（約58万年前）が噴火した際のそれは850 °C以上、110–190 MPa（深さ4–8 kmに相当）の圧力下にあることが推定された。

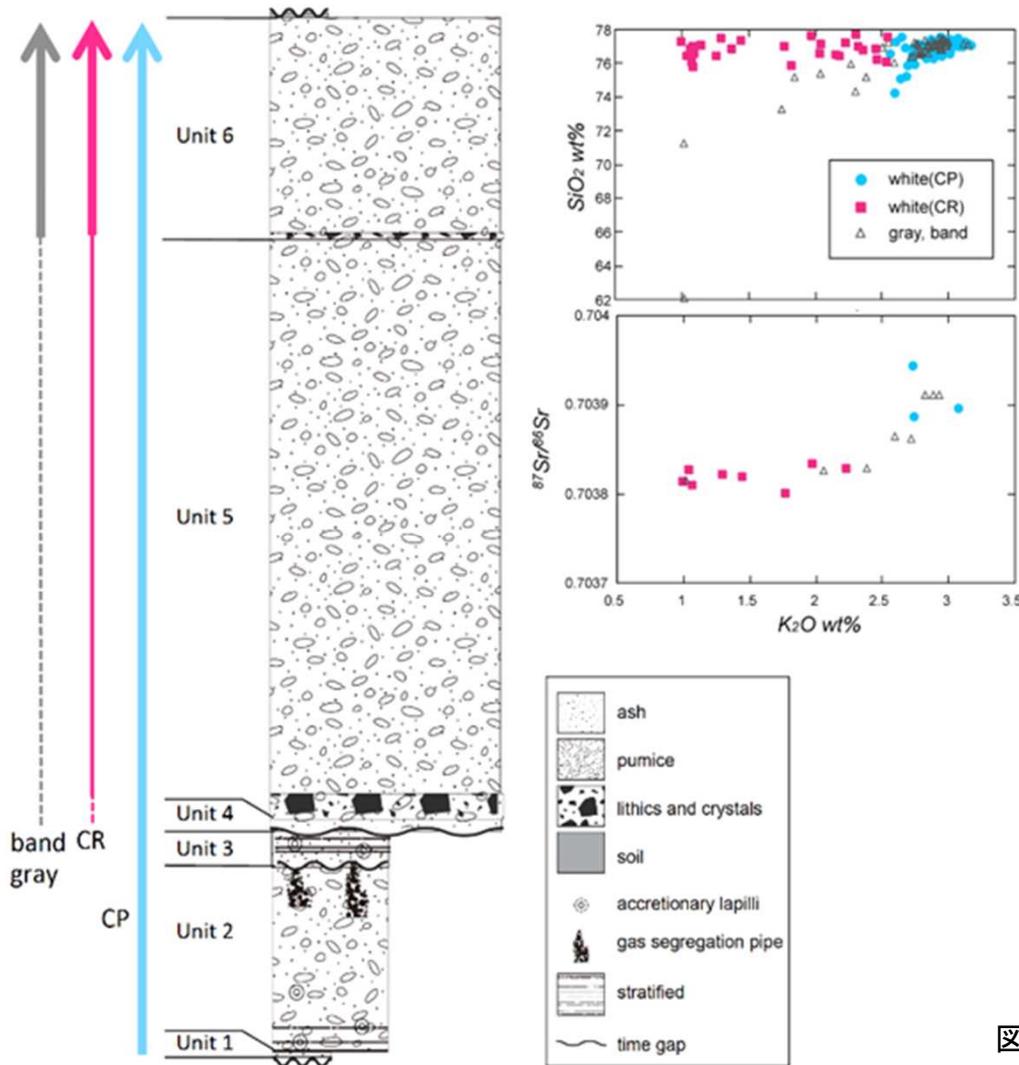


図2 洞爺カルデラ形成噴火噴出物の総合柱状図と全岩化学組成  
出典) AIST (2021)

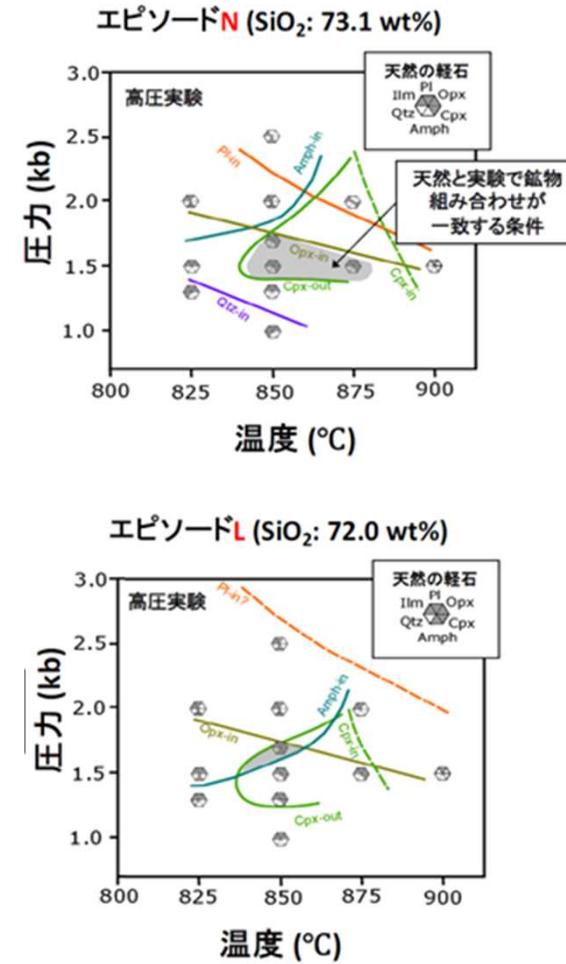


図3 十和田火山カルデラ形成期噴火エピソードNおよびLの珪長質端成分マグマの相平衡図

出典) AIST (2021)

### (3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究

#### ＜研究内容＞

地球物理及び地球化学的手法に基づくカルデラ火山の観測手法に関する知見を蓄積する。具体的には以下の項目について検討する。

#### a. カルデラ火山の地下構造調査

始良カルデラにおいて地震波トモグラフィによる地下構造探査、阿蘇カルデラにおいて、ネットワークMTによる地下構造探査を行う。(R1～5)

#### b. カルデラ火山の地球化学的調査

カルデラ火山周辺の深部流体の化学組成を分析し地下のマグマの状態を推定する手法を新たなモニタリング手法としての適用性を検討する。(R1～5)

#### c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

始良カルデラにおいて観測される地殻変動からマグマの状態変化を評価するための探査手法及びシミュレーションモデルを構築する。さらに、海底下や湖底下の地下構造を観測する手法を検討する。(R1～5)

### (3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究

#### a. カルデラ火山の地下構造調査

阿蘇及び始良カルデラの地下構造調査結果として以下の知見が蓄積された。

- 始良カルデラでは、これまでに得られた地震観測データを基に空間解像度が4 kmの地震波速度構造が得られ、これにより深さ約15kmに64~125 km<sup>3</sup>の広がりを持つS波の低速度領域が存在することが示唆された（図4参照）。連続反射法探査の基礎観測実験により、上記の低速度領域に相当する深さ約13.6 kmの反射体（反射面）からのPS変換波が観測された（図5参照）。
- 阿蘇カルデラでは、周期の長い磁場変動のデータ取得に有利なネットワークMT法観測を実施し、15 km以深の比抵抗構造を明らかにする観測を開始した（詳細は報告書に記載）。

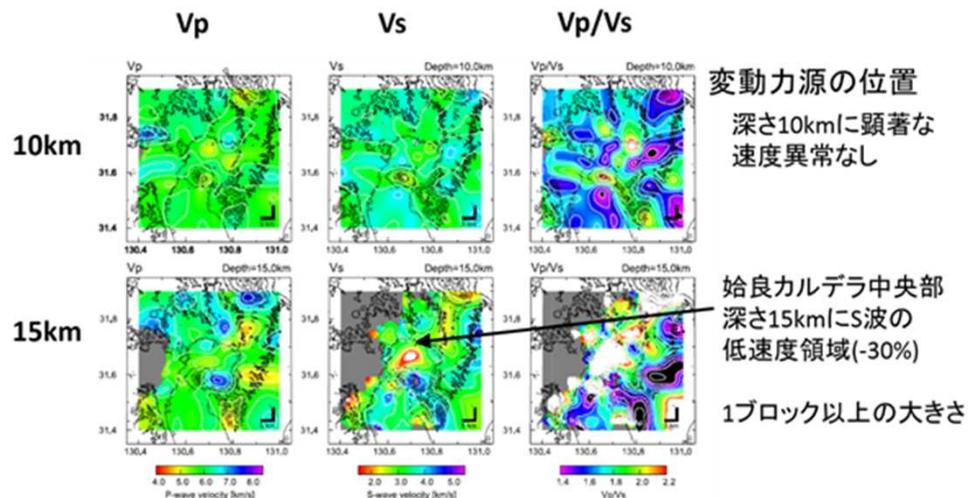


図4 始良カルデラ深部の地震波速度構造

出典) DPRI (2021)



図5 始良カルデラにおける反射法探査の概要

出典) DPRI (2021)

### (3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究 b.カルデラ火山の地球化学的調査

マグマ起源の揮発性物質の同定手法としてC/Cl比に加え、化学形態や同位体組成比等を用いたマグマの種別判定に資する指標としての適用性の検討を進めている。

- 九重火山の活動期を踏まえた噴出物分布と地下水のC/Cl比を精査したところ、C/Cl比が10-10,000の範囲では、最近の苦鉄質マグマの供給活動、1-100の範囲では、苦鉄質マグマの供給による珪長質マグマの発生・溶融状態、0.01-10の範囲では、新しいマグマの供給がなくマグマは固化している状態にそれぞれ対応すると推定した。
- 一方、海水起原のClが地下水に混入することが予想される始良カルデラ等では、C/Cl比を用いた手法の適用のみでは判別が難しいため、希土類元素組成の分析や酸素や塩素の同位体比の分析を組み合わせた検討を進めている。

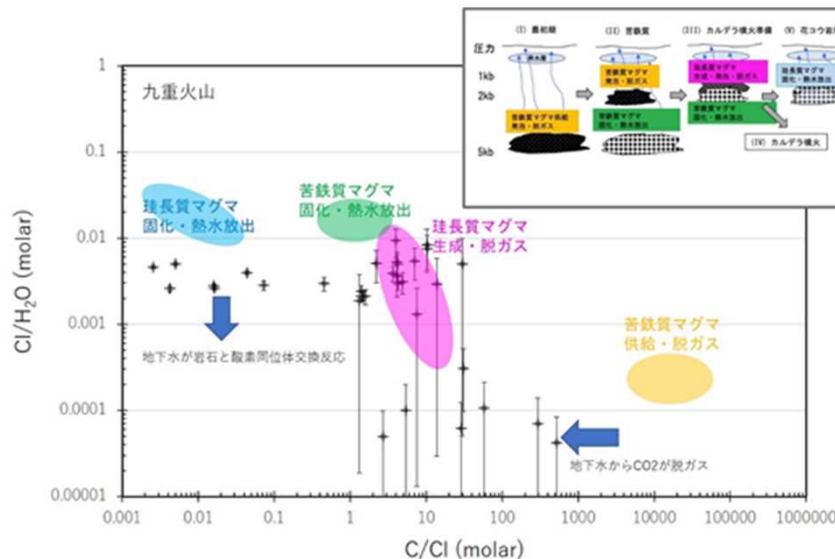


図6 九重火山におけるCl/H<sub>2</sub>O-C/Cl法の適用の例

出典) AIST (2021)

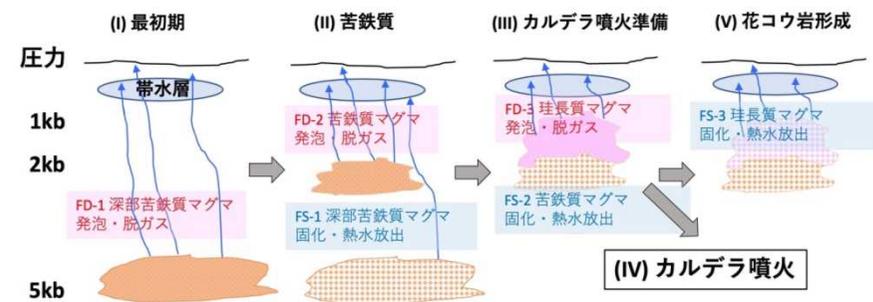


図7 マグマ溜まりの進化モデル (AIST考案)

出典) AIST (2019)

### (3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究 c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

始良カルデラ及びその周辺の地殻変動を詳細に把握するため、カルデラ内の無人島やカルデラ周辺での広域な地殻変動観測を行うとともに、変動力源解析を行い以下の知見が蓄積された。

- 広域的な地殻変動の観測データを基に、弾性体及び粘弾性体モデルによる変動力源の位置及び供給率解析を行った。その結果、始良カルデラの変動力源は、深さ：約11 km、マグマ供給率は、弾性体モデルで $7.6 \times 10^6 \text{ m}^3$  (2010~2019年)、粘弾性体モデルでは $6.9 \sim 10.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$  (1995年~)という結果が得られた。なお、粘弾性体モデルでは、地殻の粘性率は $5 \times 10^{18} \sim 10^{20} \text{ Pa s}$ で制約された。
- 海底地殻変動観測については、錦江湾の気象、水深、海底地質、海域の活動状況等を考慮した設置場所の検討、観測機材や保安部品等の仕様に基づく詳細設計を行った。

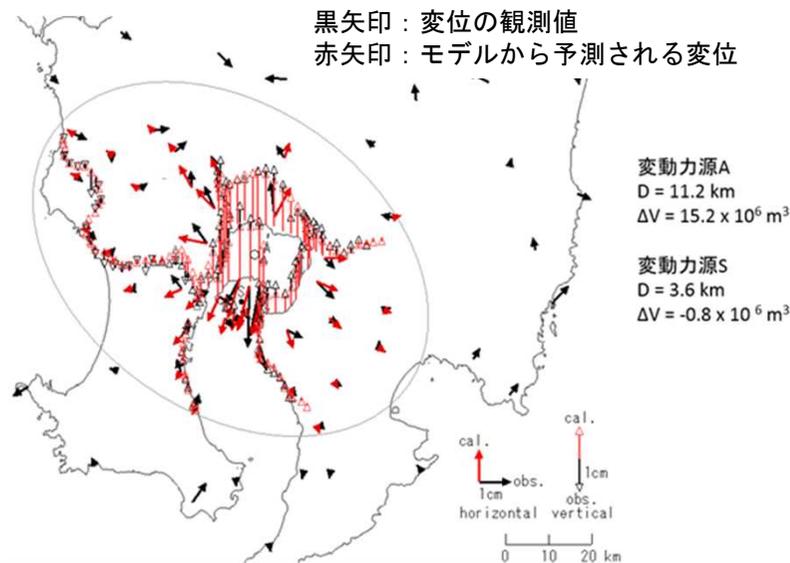


図8 茂木モデルによる変動力源解析（水平変位と鉛直変位の統合） 出典）DPRI（2021）

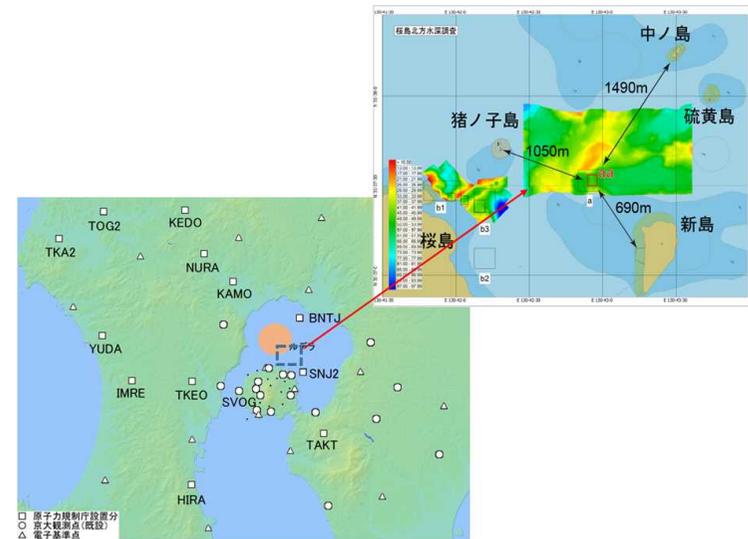


図9 始良カルデラ周辺のGNSS観測点配置と海底地殻変動観測予定エリア

出典）DPRI（2021）

## (4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討

### <研究内容>

研究項目（1）～（3）の知見に基づいて、過去に巨大噴火を起こしたカルデラ火山の長期的な活動を評価するとともに観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討を行う。（R1～5）

## (4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討

これまでに得られている知見を基に、過去に巨大噴火を起こした火山の噴火に至る準備過程及び過去に巨大噴火を起こした火山の現状評価の検討を行った。

### <過去に巨大噴火を起こした火山の噴火に至る準備過程の検討>

- 巨大噴火発生前の先カルデラ期火山活動は火山毎に異なり多様性を示す。
- 一方で、巨大噴火で噴出するマグマは珪長質マグマであること、大量のマグマを短時間で噴出し噴火後には大規模なカルデラ地形が形成される等、巨大噴火特有の共通の現象がある。
- 巨大噴火を起こす火山では、大規模なマグマ溜まりを地表から4~10 km程度の深さに形成する。マグマ溜まりは単一とは限らず、複数のマグマ溜まりが生成し、何らかのトリガーでこれらが混合、又は各マグマ溜まりが同時に噴出することにより、巨大噴火に至ると考えられる。

### <過去に巨大噴火を起こした火山の現状評価の検討>

- 始良カルデラ事例とすると、地下11~15 km付近に推定体積100 km<sup>3</sup>程度のマグマ溜まりが定置していると推定される。現在観測されている始良カルデラの広域な地殻変動は、主にこのマグマ溜まりの体積変化と考えられている。その主な理由は、1914年の大正噴火や1946年の昭和溶岩の噴火等桜島火山で起こったイベントと地殻変動が連動していることにある。
- 始良カルデラの現状評価としては、カルデラ内にマグマの蓄積と推定される低速度領域（100 km<sup>3</sup>程度）が観測され、その体積変化（又は上昇）に伴う地殻変動が観測されているものの、前述の巨大噴火の準備過程である蓄積深度及び桜島火山噴出物の組成から推察して、巨大噴火が差し迫っている状態ではないと考えられる。

## 3. まとめ

- ◆ 地質学及び岩石学的調査・研究を行い、噴火の準備段階から噴火に至るまでの、火山活動の変遷、噴出物の組成変化からマグマの蓄積過程を推定した。
- ◆ 先カルデラ期からカルデラ形成期への火山活動の変遷や組成の変化はいくつかのバリエーションがあるが、マグマの蓄積過程や物理化学的条件には共通性があることが示唆された。
- ◆ 広域な火山性地殻変動が生じている始良カルデラ火山における地球物理学的調査・研究により、変動力源やマグマ溜まりの描像を捕らえつつある。
- ◆ 地球化学的調査・研究では、活動的なカルデラ火山の深部流体中のC/Cl比、希土類元素のパターン等を組み合わせてマグマ起源物質を判別し、地下のマグマの状態を推定することの可能性が示された。
- ◆ 現時点で得られている知見を基に、巨大噴火のマグマプロセスと噴火に至るシナリオ、始良カルデラを事例とした現状評価の考え方を報告書で提案した。

## 4. 成果の活用について

現在は、本プロジェクトの中間段階であり、今後、成果を公表論文にすることで、原子力発電所の火山影響評価ガイドへの追記・改定等の活用が期待される。

## 5. 成果の公表等

### ➤ 公表論文

- なし

### ➤ 学会発表

- 広井良美、安池由幸「十和田火山八戸噴火のマグマ溜まりの温度圧力条件の推定」、日本火山学会2020年秋季大会 神戸大学、令和元年9月（一部前フェーズの成果を含む）
- 西来邦章、永田直己、広井良美「等層厚線図を利用したテフラの初生粒径分布の推定手法の検討」、日本火山学会2020年秋季大会 神戸大学、令和元年9月（一部前フェーズの成果を含む）
- 佐藤勇揮、広井良美、宮本 毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その1 カルデラ形成期の岩石学的検討」、日本火山学会2020年秋季大会 オンライン、令和2年10月
- 広井良美、佐藤勇揮、宮本 毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その2 カルデラ形成期中規模噴火」、日本火山学会2020年秋季大会 オンライン、令和2年10月

### ➤ 国際会議等の発表

- なし

## 6. 成果目標に対する達成状況

### (1) 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究

始良カルデラ、洞爺・支笏火山エリア及び阿蘇カルデラにおいて、噴出物の分布や層序を地質調査から詳細に解析し、噴火進展プロセス等の火山の特性について知見のいくつかを蓄積できた。R3年度以降は、洞爺・支笏火山エリア等の調査を継続する。また、阿寒カルデラについては、R2年度に取得したボーリングコアの分析を行う。

降下火山灰に対する地質調査や観測から、降灰時の火山灰の空間密度、凝集効果と粒径に関する特性に関する知見のいくつかを蓄積できた。R3年度は降灰観測を継続し、データを取りまとめる。

### (2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究

始良カルデラ、洞爺・支笏火山エリア、十和田カルデラ、阿蘇カルデラ及び鬼界カルデラの噴出物を研究対象として、マグマの温度・圧力条件や組成の変化からマグマの時空間変化を調べ、噴火の準備段階におけるマグマ状態の変化（深さ、滞留時間）に関する知見のいくつかを蓄積できた。R3年度以降も調査を継続、マグマ滞留時間の知見を中心に蓄積する。

## 6. 成果目標に対する達成状況

### (3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究

始良カルデラを研究対象として、地震波速度構造の解像度の向上、長期連続反射法探査の有効性が確認できた。また、地殻変動シミュレーションでの検討を進めた。地球化学的手法に関しては、マグマ種別判別方法の精度向上を図った。R3年度以降も観測・調査を継続し、さらに解像度の高い地下構造、変動力源の解析、マグマ種別推定手法の検討を行う。また、MT法による十和田カルデラの調査に着手する。

### (4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討

上記の(1)～(3)の知見に基づいて、過去のカルデラ火山の長期的な活動を評価すると共に観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方が整理できはじめた。

R3年度以降も適宜検討を行う予定であるが、R5年度に火山活動を捉えるための観測項目及びそれらの関係についての考え方の整理・提案を行う最終的に取りまとめる。