

# 原子力発電所の 津波評価技術 2016

平成28年9月

講習会資料



## 「原子力発電所の津波評価技術 2016」講習会（東京）

土木学会原子力土木委員会（委員長：丸山久一 長岡技術科学大学名誉教授）では、原子力発電所の津波に対する安全性評価技術を高度化・提案することを目的として、津波評価小委員会（委員長：高橋智幸 関西大学教授）を設置し、これまで活動を継続してきました。

本講習会は、2003 年度以降の津波評価小委員会における検討成果および 2011 年東北地方太平洋沖地震津波で得られた知見等を踏まえ、2001 年度に刊行した「原子力発電所の津波評価技術」を改訂したことから、その内容を紹介するために企画されたものです。

日 時：2016 年 9 月 30 日（金）13:00～17:30

会 場：土木学会講堂

主 催：土木学会原子力土木委員会 津波評価小委員会

参加費：会員 8,000 円、非会員 10,000 円（テキスト代を含む）

プログラム（進行：電中研 松山昌史）

- 13:00 ～ 13:05 (0:05) 開会挨拶（長岡技術科学大学 丸山久一）
- 13:05 ～ 13:30 (0:25) 津波評価小委員会の活動および第 2 章「津波評価の概要」（電中研 松山昌史）
- 13:30 ～ 13:50 (0:20) 第 3 章「津波評価に必要な調査」（関西電力 村上嘉謙）
- 13:50 ～ 14:50 (1:00) 第 4 章「決定論的津波評価手法」（エングローブコンサルタント 木場正信）
- 14:50 ～ 15:00 (0:10) 休憩
- 15:00 ～ 16:00 (1:00) 第 5 章「確率論的津波評価手法」（東電設計 栗田哲史）
- 16:00 ～ 16:40 (0:40) 第 6 章「数値計算手法」①（東電設計 藤井直樹）
- 16:40 ～ 17:25 (0:45) 第 6 章「数値計算手法」②（東電設計 藤井直樹）
- 17:25 ～ 17:30 (0:05) 閉会挨拶（関西大学 高橋智幸）

以上

## 「原子力発電所の津波評価技術 2016」講習会（大阪）

土木学会原子力土木委員会（委員長：丸山久一 長岡技術科学大学名誉教授）では、原子力発電所の津波に対する安全性評価技術を高度化・提案することを目的として、津波評価小委員会（委員長：高橋智幸 関西大学教授）を設置し、これまで活動を継続してきました。

本講習会は、2003 年度以降の津波評価小委員会における検討成果および 2011 年東北地方太平洋沖地震津波で得られた知見等を踏まえ、2001 年度に刊行した「原子力発電所の津波評価技術」を改訂したことから、その内容を紹介するために企画されたものです。

日 時：2016 年 10 月 14 日（金）13:00～17:30

会 場：関西大学梅田キャンパス

主 催：土木学会原子力土木委員会 津波評価小委員会

共 催：関西大学社会安全学部

参加費：会員 8,000 円、非会員 10,000 円（テキスト代を含む）

プログラム（進行：電中研 松山昌史）

- |                      |  |
|----------------------|--|
| 13:00 ～ 13:05 (0:05) | 開会挨拶（関西大学 高橋智幸）                        |
| 13:05 ～ 13:30 (0:25) | 津波評価小委員会の活動および第 2 章「津波評価の概要」（電中研 松山昌史） |
| 13:30 ～ 13:50 (0:20) | 第 3 章「津波評価に必要な調査」（関西電力 村上嘉謙）           |
| 13:50 ～ 14:50 (1:00) | 第 4 章「決定論的津波評価手法」（エングローブコンサルタント 木場正信）  |
| 14:50 ～ 15:00 (0:10) | 休憩                                     |
| 15:00 ～ 16:00 (1:00) | 第 5 章「確率論的津波評価手法」（東電設計 栗田哲史）           |
| 16:00 ～ 16:40 (0:40) | 第 6 章「数値計算手法」①（東電設計 藤井直樹）              |
| 16:40 ～ 17:25 (0:45) | 第 6 章「数値計算手法」②（ユニック 佐藤嘉則）              |
| 17:25 ～ 17:30 (0:05) | 閉会挨拶（電中研 松山昌史）                         |

以上

# 原子力発電所の津波評価技術2016 第2章津波評価の概要

原子力土木委員会 津波評価小委員会 幹事長  
松山昌史(電力中央研究所)

## 概要

- ▶ 原子力土木委員会及び津波評価小委員会
- ▶ 改定の目的, 経緯, スタンス
- ▶ 本書全体の構成
- ▶ 第2章の概要

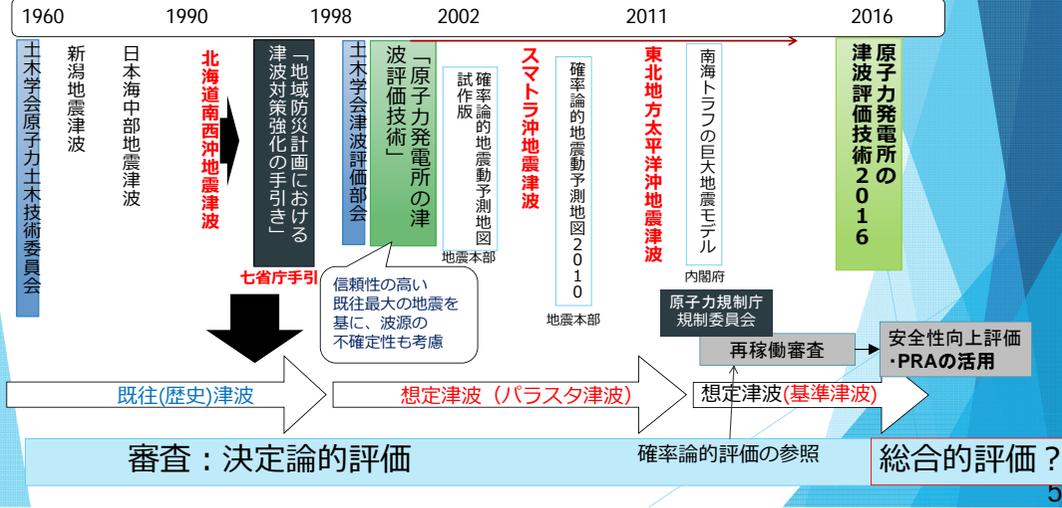
## 原子力土木委員会

- ▶ 原子力利用についての土木技術に関する問題の調査研究を行い, 学術, 技術の進展に寄与することを目的として1970年に設立
- ▶ 現在5つの小委員会が活動中
  - ▶ 断層活動性評価の高度化小委員会
  - ▶ 地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会
  - ▶ 津波評価小委員会
  - ▶ 地盤安定解析高度化小委員会
  - ▶ 断層変位評価小委員会

## 原子力土木委員会 現委員長：丸山久一名誉教授(長岡技大)

年	出版物
1985.8	原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法
1992.9	原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル
1996.3	原子力発電所の立地多様化技術
1999.3	原子力発電所の立地多様化技術 (追補版)
2002.2	原子力発電所の津波評価技術
2002.5	原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針
2005.6	原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針[改訂版]
2008.7	原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン
2012.10	原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン2012
2016.9	原子力発電所の津波評価技術2016

## 津波評価の経緯



## 津波評価小委員会の活動

- 第I期(H11~12年度)**  
⇒「原子力発電所の津波評価技術」を刊行(2002)
- 第II期(H15~H17年度), 第III期(H18~H20年度)**  
・確率論的津波ハザード解析手法  
・砂移動評価手法  
・分散性と砕波を考慮した数値モデル  
・津波による威力評価手法の検討  
⇒委員会報告として土木学会論文集に投稿
- 第IV期(H21~23年度)**  
・最新の知見、波力・砂移動・確率論的津波ハザード解析の体系化  
⇒「原子力発電所の津波評価技術」改訂版・延期  
→ 東北地方太平洋沖地震津波に関する課題抽出
- 第V期(H24~27年度上期), 第VI期(H27下期~29年度)**  
⇒「原子力発電所の津波評価技術2016」策定  
断層運動以外の要因による津波評価手法

原子力土木委員会ウェブサイトで公開

- 原子力発電所の津波評価技術(2002)
- 上記英語版公開(2006)  
Tsunami Assessment Method for Nuclear Power Plants in Japan (NUREG/CR-6966 (2008)に引用)
- 津波評価手法の高精度化研究(2008) 土木学会論文集B : 確率論的評価, 分散性と砕波モデル
- 「確率論的津波ハザード解析の方法」公開(2011)

原子力発電所の津波評価技術2016

## 改訂版の趣旨

東北地方太平洋沖地震等の2002年以降の新たな知見

- 津波の想定に関連する要素技術を取りまとめる。
  - 他学協会等の安全性向上の考え方に従い、原子力発電所の安全性評価のための津波評価を行う際の最新の知見・要素技術を織込んだ**技術参考書**
- 敷地浸水も考慮し、波力等に関する各種評価手法についても取りまとめる。
  - 設備に対する津波の作用(浸水深や波力等)評価に有用な要素技術を記述
  - 原子力発電所全体の安全性を検討するには広範囲の専門家の知見が必要

## 改訂版作成の工程

- 本編
  - 2015年土木学会全国大会研究討論会
    - 改訂版の方針と概要
  - 原子力土木委員会・津波評価小委員会の意見募集
  - 意見公募**：2015年11月 → 対応提示：2016年4月
- 付属編・レビュー編
  - 原子力土木委員会・津波評価小委員会の意見募集

一般向けの説明と意見募集：2回  
関係識者への内容確認

## 意見公募：意見概要

意見概要	
①	津波による洗掘事例・表面被覆の有効事例の追加など
②	確率論の位置付け・深層防護や危機耐性と被害との関係の明確化など
③	I A E A 深層防護の文献の追加、ロジックツリーの必要性の明確化など
④	ロジックツリーの位置付けの明確化など
⑤	津波による波圧の特徴・波力や波圧の考え方の追加など
⑥	確率論の位置付け・適用範囲の明確化、国の基準類との整合など
⑦	固有地震説の否定、海底地すべりの文献の追加、万寿3年の津波の基準化、地震調査研究推進本部の扱い、最新研究成果の反映など

▶ 本編・付属編の修正に反映

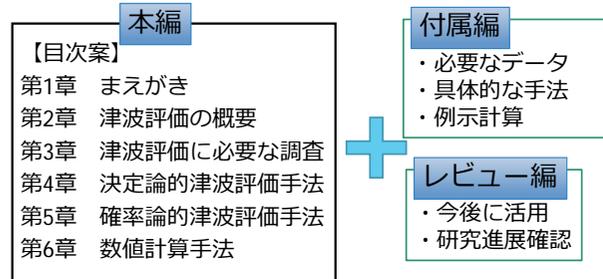
## 本書の利用にあたって

- ▶ 本書は、本編、付属編およびレビュー編によって構成されており、これらは原子力発電所において想定津波を設定するための**評価の考え方**、活用可能な**要素技術**および**それらの適用事例**をとりまとめたものである。
- ▶ 本書で示したこれらの評価の考え方あるいは適用事例は、社会において津波防災・減災等を目的として想定される様々な津波の**普遍的な上限規模を示すものではなく**、同時に、**想定津波として最低限必要な水準を示すものでもない**。
- ▶ 土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会では、津波の想定にあたって必要となる諸条件について、設計対象や用途等に応じ、関連知見に基づいて個別に設定されるべきものであると考える。

## 構成

### ▶ 趣旨

▶ 津波の想定に関連する**要素技術**を取りまとめた**技術参考書**



## 本編目次

<b>第1章 まえがき</b> <b>第2章 津波評価の概要</b> 2.1 東北地方太平洋沖地震の教訓 2.2 本書の背景と目的 2.3 評価対象となる波源 2.4 評価対象とする津波の作用 2.5 本書の構成 2.6 用語の定義 <b>第3章 津波評価に必要な調査</b> 3.1 既往津波に関する調査 3.2 津波の伝播経路に関する調査 3.3 津波の波源モデル設定に関する調査 3.4 津波による土砂移動・堆積に関する調査 3.5 津波漂流物に関する調査	<b>第4章 決定論的津波評価手法</b> 4.1 基本事項 4.2 検討用津波の作成 4.3 想定津波の選定 <b>第5章 確率論的津波評価手法</b> 5.1 確率論的津波評価手法の概要 5.2 確率論的津波ハザード解析 5.3 確率論的ハザード解析の手順 <b>第6章 数値計算手法</b> 6.1 津波伝播・遡上計算 6.2 海底での地すべり、斜面崩壊、山体崩壊等に起因する津波の計算 6.3 取放水設備の水位変動計算 6.4 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定 6.5 波力評価 6.6 砂移動計算 6.7 漂流物評価
--	--

改訂版で追加

## 付属編目次

- ・必要なデータ
- ・具体的な手法
- ・例示計算

- |  |  |
|--|--|
| <b>第1章 津波に対する安全性確保の考え方現状</b><br>学協会等から提案されている安全性確保の考え方を紹介  | <b>第5章 確率論的評価手法に関する知見</b><br>津波水位のばらつきや 専門家活用の考え方等 |
| <b>第2章 津波波源設定に関する検討</b><br>地震学的知見, 地球物理学的知見等を海域ごとに整理       | <b>第6章 決定論的評価手法の適用事例</b>                           |
| <b>第3章 津波波源の不確実性が水位に及ぼす影響検討</b><br>津波波源に関する不確実性の考慮に関する計算事例 | <b>第7章 確率論的評価手法の適用事例</b>                           |
| <b>第4章 津波伝播計算に関する検討</b><br>津波水位等の数値計算手法や事例(取放水設備内の水位計算)    | <b>第8章 波力評価, 砂移動計算, 漂流物衝突力に関する検討</b>               |

本書の決定論の適用事例：実際の原子力発電所を想定したものではない。実際の実務作業を構成する各要素技術単体の手法と結果の特徴の例示

13

## 第2章 津波評価の概要

1. 東北地方太平洋沖地震の教訓
2. 本書の背景と目的
3. 評価対象となる波源
4. 評価対象とする津波の作用
5. 本書の構成
6. 用語の定義

14

## 東北地方太平洋沖地震の教訓

本編 2.1 P.5-6

付属編 1.1

### ▶ 福島第一原子力発電所の事故の主要因

- ▶ 津波により敷地内に遡上した海水
- ▶ 原子力建屋に侵入し, 全電源喪失や安全系の機能喪失

### ▶ 学会の提言

土木学会 危機耐性という性能の維持

日本原子力学会 「自然災害への対応不備」, 「過酷事故対策への不足」, 「緊急時対応の混乱」

日本機械学会 「大規模システムのシステム・インテグレーション」, 「デザインベースの考え方, “Beyond”への対応」, 「リスクコミュニケーションの課題」

技術者(研究者)はPRAなどのリスクマネジメントを必須知識に

15

4 / 60

## 1. 東北地方太平洋沖地震の教訓

本編 2.1 P.5-6

- A) 設計基準を超える津波に対する備えが不十分
- B) 設計基準となる津波水位の高さが不十分

- i. 設計基準を超える津波に対する備え
- ii. 設計基準となる津波水位に不確かさを適切に考慮

### ▶ 新規制基準とも調和的

1. 設計基準外の事象に対しても重大事故に至らないための対策の強化
2. 安全機能が一齐に喪失しないように大規模な自然災害に対する対策の強化

16

## 本書の背景と目的

安全性向上の一つの考え方

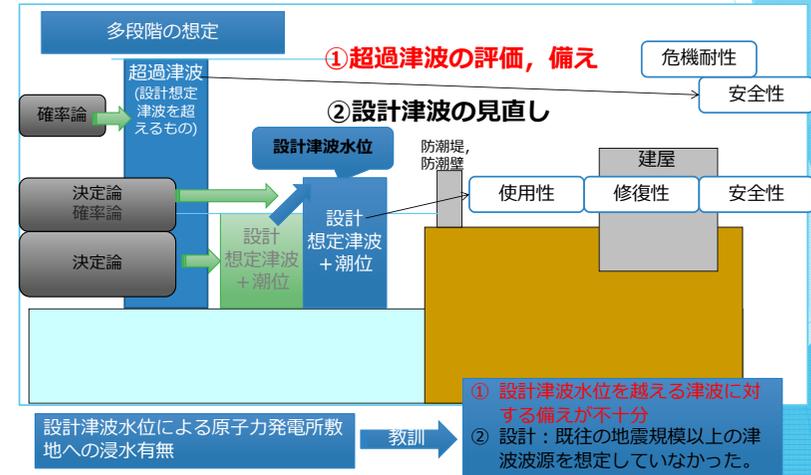
### ▶ 深層防護(IAEA)と津波対策

深層防護レベル	目的	津波に対する対応方針	津波対策	
プラントの当初設計	レベル1	異常運転や故障の防止	敷地高, 防潮堤等	
	レベル2	異常運転の制御および故障の検知		
	レベル3	設計基準内への事故の制御		
設計基準外	事故の進展防止及びシビアアクシデントの影響緩和を含む, 過酷プラント状態の制御	①設計基準を超える津波に対する備え	建屋浸水防止, 排水機能, 代替機器等	
緊急時計画	レベル5	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和		住民避難

目的 安全性向上の考え方を実践するために必要な技術を取りまとめる。

津波に関する設計基準の設計や照査, 機器影響と関連技術

## 今後の津波防護の考え方の例(案)



## 評価対象となる波源

- ▶ 地震
  - ✓ プレート境界付近で発生する地震
  - ✓ 陸域の浅い地震
- ▶ 地震以外
  - ✓ 海底地すべり
  - ✓ 斜面崩壊
  - ✓ 火山現象 (山体崩壊, カルデラ陥没等)
- ▶ 発生要因の組み合わせ
  - ✓ 因果関係を有する波源の組み合わせ

改訂版で追加

## 評価対象とする津波の作用

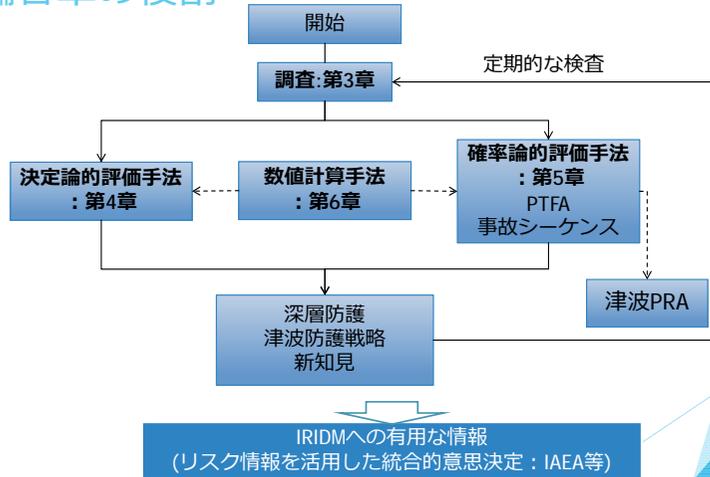
2002年度版では敷地近傍の水位評価に大きな比重

- ▶ 水位上昇による浸水, 被水, 没水
- ▶ 取水に影響を及ぼす水位下降
- ▶ 津波による流体力(圧力, 波力, 浮力等)
- ▶ 砂移動による地形変化(侵食, 堆積, 洗掘)
- ▶ 漂流物発生と漂流, その衝突

改訂版で追加

### 本編各章の役割

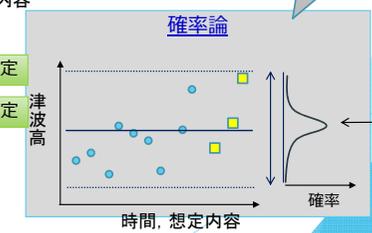
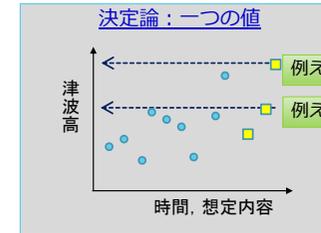
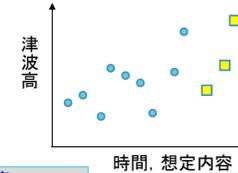
本編 2.5 P.10-11



### 決定論と確率論のイメージ

▶ いろんな見方があるので、あくまで一つの例(私見)

● 過去  
■ 想定した結果



(\*)防波堤の耐津波設計ガイドライン(2013), 国交省

港湾における津波対策の基本的考え方(\*)  
・最大クラスの津波  
・発生頻度の高い津波  
確率的な考慮

### 決定論と確率論

本編 2.5 P.10

▶ 原子力発電所に対して、必要な不確定性を考慮して

	決定論的手法	確率論的手法
波源	最大級の影響が考えられる一つ選定	一定の影響が考えられる複数選定
津波作用(水位, 波力等)	定量化	発生確率を定量化
活用例	外郭施設的设计, 健全性評価, 他	津波PRA, 他のリスク(地震, 内部溢水等)との比較, 決定論的評価結果の参照, 他
評価コスト	中	高

両者とも重要なリスク情報  
統合的意思決定(IRIDM: IAEA)に有用

津波PRA: 津波を起因とした確率論的リスク評価 Probabilistic Risk Assessment  
IAEA: 国際原子力機関

### まとめ

- ▶ 2002年以降の研究成果を含めた技術参考書
  - ▶ 意見公募等による透明性の配慮
- ▶ 今後の原子力発電所の安全性確保の考え方に有用な知見
  - ▶ Beyond designへの対応, 設計津波水位
  - ▶ 決定論, 確率論, その他
- ▶ 新たな評価項目
  - ▶ 断層運動以外の要因による津波
  - ▶ 発電所敷地内に浸水した津波の評価に有用な知見

## 原子力発電所の津波評価技術2016 第3章 津波評価に必要な調査

原子力土木委員会 津波評価小委員会 幹事  
村上嘉謙(関西電力)

### 概要

- ▶ 本編第3章の位置付け
- ▶ 本編の記載内容の紹介
  - ✓ 既往津波、伝播経路、波源モデル、砂移動、漂流物
- ▶ 付属編の記載内容紹介
  - ✓ 断層運動以外を要因とする津波の既往事例
  - ✓ 津波漂流物の事例

### 本章の位置付け

- ▶ 津波を発生させる要因は多岐にわたる。
  - ✓ 断層運動（プレート境界型地震、内陸型地殻内地震）
  - ✓ 海底地すべり
  - ✓ 陸上の斜面崩壊（地すべり）
  - ✓ 火山現象（山体崩壊、カルデラ陥没等）

➡ 津波評価にあたっては、評価地点の地理的特性や津波の発生要因の関連性を踏まえ、適切な調査を実施することが必要

- ▶ 旧・津波評価技術（2002）においては、本編の波源の設定に関する章や数値計算の条件設定の章の冒頭部分に、活用可能な文献や地形データとして一部紹介。

➡ 考慮する津波要因の増加に伴い、実施すべき調査項目も増えたため、津波評価に必要な調査全体が概観できるよう、章として独立させる構成とした

### 本章の主な記載内容

- ▶ 津波評価に必要な調査として、その目的に応じて、
  - ✓ **既往津波**に関する調査
  - ✓ **津波の伝播経路**に関する調査
  - ✓ **津波波源モデルの設定**に関する調査
  - ✓ **津波による砂移動**に関する調査
  - ✓ **津波漂流物**に関する調査の5つに大別して詳述した。

## 既往津波に関する調査（本編3.1）

### ▶ 文献調査

- ✓ 津波痕跡、津波堆積物、伝承を含む歴史記録、地震発生履歴等
- ✓ 遠地津波・・・チリ沖またはカスケード地域のプレート境界付近で想定される地震に伴う津波の記録
- ✓ 近年発生した津波・・・水位観測記録
- ✓ 朔望平均潮位・・・気象庁の最寄りの検潮所等

### ▶ 津波堆積物調査

- ✓ 既往津波の痕跡高について、古記録等による文献調査以外の情報を得るために、必要に応じて実施
- ✓ 文献調査および地形調査により、現地調査の有効性・場所を検討
- ✓ 縄文海進以降の堆積物を対象として、掘削調査等により試料採取を実施
- ✓ 堆積学的な分析、年代分析、古生物学的分析等を適切に組み合わせ、堆積構造、堆積厚さ、粒度分布、堆積物の分布標高および平面的な分布、海起源の含有物の有無、堆積環境変化や地殻変動との同時性等の分析・検討を実施
- ✓ 歴史記録との対比、諸機関調査結果との対比

4

## 津波の伝播経路に関する調査（本編3.2）

- ▶ 津波評価に係る波源から評価地点周辺（陸域遡上を考慮する）までの伝播経路および地形的特徴を把握する
- ▶ 公刊の各種地形データ（デジタルデータ含む）
- ▶ 港湾・漁港等の平面図、深淺測量結果
- ▶ 解析領域が非常に広域の場合は、地球全体を対象として整備された地形データ
- ▶ 必要に応じて古地図等により変更前の過去の地形データを復元して用いる

5

## 津波波源モデルの設定に関する調査（本編3.3）

### ▶ 文献調査

- ✓ （国内・海外問わず）過去に発生した敷地へ影響を及ぼしたと考えられる地震
- ✓ 活断層の位置、形状、活動性、長さ（端部）等に関する既往の文献等の知見・海上音波探査記録の再解析
- ✓ 地震地体構造区分の枠組み（確率論的評価）
- ✓ 産総研の海底地質図等（海底での地すべり）
- ✓ 防災科研の地すべり地形分布図データベース等（山体（斜面）崩壊）
- ✓ 産総研・気象庁の活火山データベース等（火山現象による津波）

### ▶ 海域における調査

- ✓ 内陸型地殻内地震・・・活断層の位置、形状、活動性、長さ（端部）等
- ✓ 敷地周辺海域の海底地形、地質層序、地層分布、地質構造等に関する調査
- ✓ （敷地周辺の）海底地すべりの場所や規模、崩壊・堆積範囲

### ▶ その他の知見の収集・分析

- ✓ 事業者が行う地震観測、地殻変動観測等

6

8 / 60

## 津波による砂移動に関する調査（本編3.4）

- ▶ 海底地形変化予測モデルによる砂移動計算に用いるパラメータを得る
- ▶ 文献調査、評価地点前面海域における現地調査等によって、底質の分布およびその特徴を把握
- ▶ 海底の試料（砂）を採取し、粒度分布、比重等のデータを取得

7

## 津波漂流物に関する調査（本編3.5）

- ▶ 津波漂流物となりうる物体の想定や、その物理量の推定を行う
- ▶ 発電所周辺を航行する漁船等の船舶や、発電所周辺の津波遡上域に設置されている構造物の一部、各種木材等のほか、敷地内の想定浸水域にある構造物や車両等を考慮
- ▶ 発電所施設への衝突による影響が考えられる物体を抽出し、大きさ、重量、比重等、漂流物の衝突力の算定に必要な物理量を推定

8

付属編 4-96~103

## （付属編）断層運動以外を要因とする津波の既往事例

- ▶ **火山現象（山体崩壊）による津波**
    - ✓ 1792年 有明海津波（島原大変肥後迷惑）
    - ✓ 1741年 渡島大島津波
    - ✓ 1640年 北海道駒ヶ岳津波
  - ▶ **火山現象（カルデラ陥没）による津波**
    - ✓ 1883年 インドネシア・クラカタウ火山爆発に伴う津波
  - ▶ **海底での地すべりによる津波**
    - ✓ 1771年 明和八重山地震津波
  - ▶ **山体（斜面）崩壊による津波**
    - ✓ 1958年 米国・リツヤ湾津波
  - ▶ **その他の要因による津波**
    - ✓ 1998年 パプアニューギニア地震津波
    - ✓ 1999年 トルコ・コジャエリ地震津波
- について、概要および既往研究例を例示的に紹介

9

## （付属編）津波漂流物の事例

- ▶ 東北地方太平洋沖地震津波における調査事例を収集

### ① 港湾空港技術研究所資料

- ✓ 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報
- ✓ 被災地域全域に渡る船舶や流木、コンテナなどの漂流物に関する被害報告

### ② 電中研チームによる津波被害調査報告

- ✓ 仙台塩釜港でのコンテナの漂流に関する事例

### ③ 東北電力による女川原子力発電所における津波漂流物事例調査報告

- ✓ 女川原子力発電所敷地内における漂流物の調査事例

### ④ 東京電力による福島第一および第二原子力発電所の被害状況報告

- ✓ 福島第一・第二原子力発電所敷地内における漂流物の調査事例

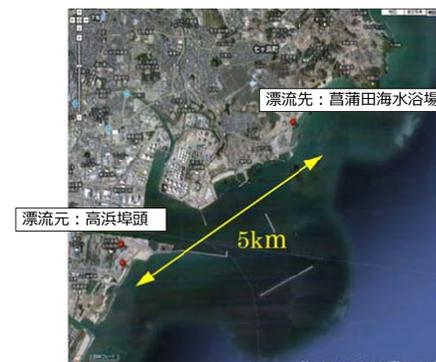
付属編 8-89~107

10

9 / 60

## （付属編）津波漂流物の事例

- ▶ ②電中研チームによる津波被害調査報告の例



コンテナの漂流元と漂流先



漂着したコンテナ

付属編 8-100

11

# 原子力発電所の津波評価技術2016 第4章 決定論的津波評価手法

原子力土木委員会 津波評価小委員会 幹事  
木場正信 (エングローブコンサルタント)

## 内容

- ▶ 決定論関連の記述構成及び改訂のポイント
- ▶ 【総論】 本編第4章の概要
- ▶ 【関連知見】 付属編第2章の概要
- ▶ 【パラメータ影響評価】 付属編第3章の概要
- ▶ 【適用事例】 付属編第6章の概要

## 決定論的評価手法とは

### ▶ 決定論的評価手法

- ▶ 必要な不確定性を考慮して津波波源を設定し、それによって発生する津波による**発電所周辺における作用**を数値計算等によって算出する。
- ▶ DTHA (Deterministic Tsunami Hazard Analysis)

### ▶ 確率論的評価手法

- ▶ 対象とする原子力発電所に対して、一定の影響が考えられる津波の発生要因を複数選定し、必要な不確定性を考慮して津波水位に関する**発生確率**を算出する。
- ▶ PTHA (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis)

本編 P.10

例：評価地点に想定される津波の水位は○○mである。

例：評価地点で津波の水位が□□mを超える確率は年あたり○○である。

## 決定論関連の記述構成

総論

**本編**

第4章 決定論的津波評価手法

- 4.1 基本事項
- 4.2 検討用津波の作成
- 4.3 想定津波の選定

関連知見  
(確率論にも関連)

付属編  
第2章 津波波源設定に関する検討

パラメータ  
影響評価  
(確率論にも関連)

付属編  
第3章 津波波源の不確定性が津波水位に及ぼす影響の検討

適用事例

付属編  
第6章 決定論的評価手法の適用事例

## 改訂の主なポイント

項目	2002年版	2016年版
評価対象	設計想定津波	想定津波
津波の原因	断層運動	断層運動及び断層運動以外
評価の流れ	基本とするモデル + 不確定性の考慮	同左
地震規模	既往最大を基本	限定しない *評価主体の判断
プレート間巨大地震 (典型的なプレート間地震 + 津波地震)	記載なし	評価方法を提示
想定津波の妥当性	「既往津波の痕跡高を上回る十分な高さを有するものと考えられる」	既往津波の痕跡高を上回るとは「必要条件」 *評価主体の判断
記述形式	箱書き + 解説	箱書き無し

5

## 【総論】 本編第4章の概要

## 本編第4章の構成

### 第4章 決定論的津波評価手法

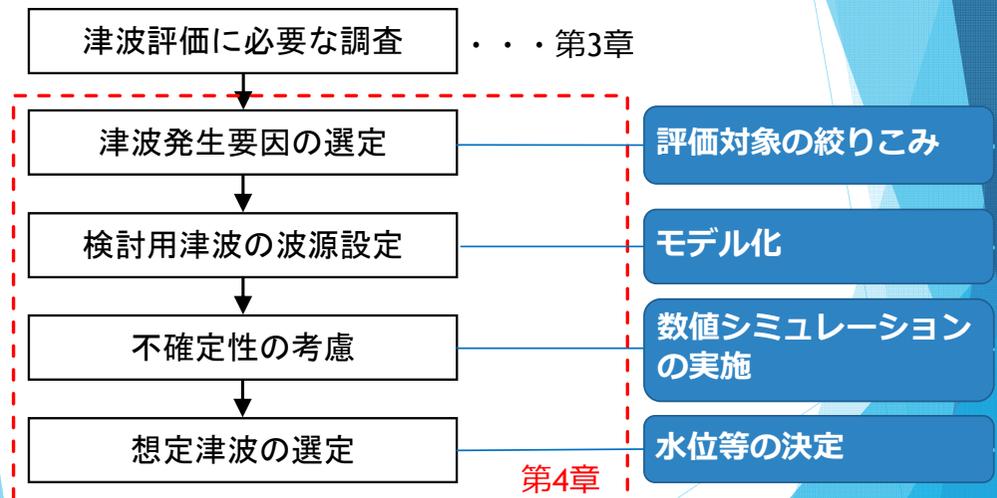
- 4.1 基本事項
  - 4.1.1 決定論的津波評価の流れ
  - 4.1.2 津波の発生要因の選定
  - 4.1.3 不確定性の考慮
- 4.2 検討用津波の作成
  - 4.2.1 断層運動に起因する津波
    - 4.2.1.1 断層運動に起因する検討用津波の波源設定の基本方針
    - 4.2.1.2 プレート境界付近に想定される地震に伴う津波の波源の設定
    - 4.2.1.3 日本海東縁部に想定される地震に伴う津波の波源の設定
    - 4.2.1.4 海域活断層に想定される地震に伴う津波の波源の設定
  - 4.2.2 断層運動以外の要因による津波
    - 4.2.2.1 断層運動以外を要因とする検討用津波作成の基本方針
    - 4.2.2.2 波源の選定
  - 4.2.3 不確定性の考慮
    - 4.2.3.1 断層運動による津波に関する不確定性
    - 4.2.3.2 その他の不確定性
- 4.3 想定津波の選定

7

11 / 60

## 決定論的津波評価の流れ (本編4.1.1)

本編 P.21



8

## 津波の発生要因の選定 (本編4.1.2)

### 用語

- ▶ 将来発生する可能性があるもののうち、敷地への影響が最大となる可能性があると考えることが適切な津波を**検討用津波**とする

- ▶ 検討用津波の集合体を**検討用津波群**という

### 津波の発生要因の選定

- ▶ 調査結果に基づき敷地への影響が大きいと考えられるものを**複数選定**

### 簡易予測手法による絞り込み

- ▶ 断層運動による津波：阿部(1989)等
- ▶ 斜面崩壊：Huber and Hager(1997)

評価は数値シミュレーションによる

- 最大となる可能性がないものを排除
- 数値シミュレーションのケースを低減

本編 P.21



9

## 発生要因の選定：断層運動に起因する津波 (本編4.2.1)

### 評価対象

#### 1) プレート境界付近で発生する地震

##### 1-1) プレートの沈み込みによるプレート間地震

1-1-a) 典型的なプレート間逆断層地震 右図B~C

1-1-b) 津波地震 右図A

##### 1-2) 沈み込むプレート内の地震

1-2-a) 正断層地震

1-2-b) 逆断層地震

#### 2) 内陸型地殻内地震

2-1) 日本海東縁部で発生する地震

2-2) 海域活断層で発生する地震

### 必要に応じこれらの組合せ

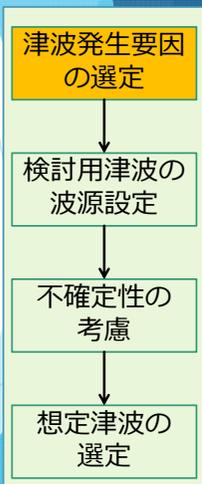
### 必要に応じ遠地津波

Figure 15. of Lay, T., H. Kanamori, C.J. Ammon, K.D. Koper, A.R. Hutko, L. Ye, H. Yue, and T.M. Rushing(2012) : Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults, Journal of Geophysical Research, Vol.117, B04311.  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JB009133/abstract>

付属編 P.2-3

プレート境界の深さ方向の領域分け (Lay et al., 2012)

本編 P.23



10

## 発生要因の選定：断層運動以外の要因による津波 (本編4.2.2)

### 評価対象

- ▶ 海底での地すべり、斜面崩壊、火山現象（山体崩壊、カルデラ陥没等）
- ▶ 現象の規模と敷地の位置関係等や簡易予測手法に基づき選定できる

### 波源位置等

- ▶ 進行方向へのエネルギーの**指向性**が高いことが知られているため、敷地との位置関係を考慮し、影響が大きいと考えられる波源を選定する。

断層運動以外の要因による津波の波源設定については、数値解析手法と一体であるため6.2に記載

本編 P.28



11

## 断層運動に起因する津波 (本編4.2.1)

### 位置と規模

- ▶ 地殻構造、活断層の分布、固着の状況、既往地震の発生状況等を踏まえた現在の応力状態等を考慮

### 断層パラメータの設定

- ▶ 地殻構造、海域の特性、津波をもたらす地震の発生様式等に応じた**適切なスケーリング則**を適用することができる

### すべり量の不均質性

- ▶ 断層面上におけるすべり量の不均質性を設定できる場合には、これを考慮することが望ましい。

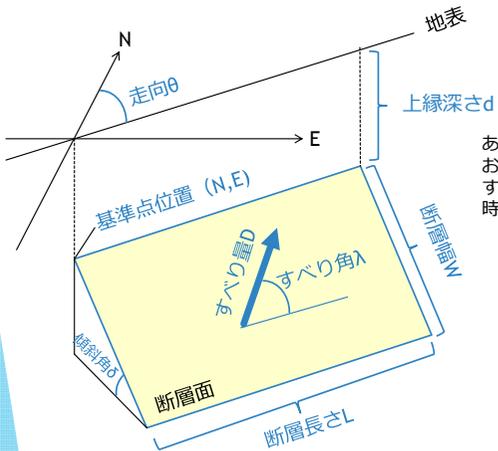
本編 P.23



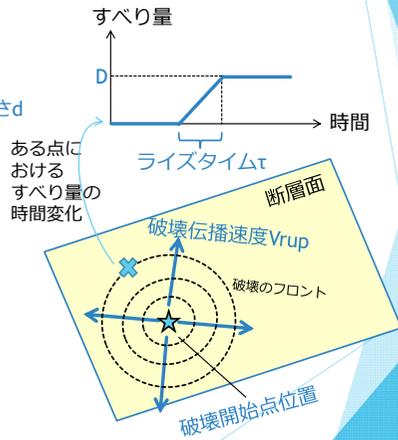
12

補足：断層パラメータ

静的パラメータ



動的パラメータ



スケーリング則 (付属編2.1.2)

付属編 P.2-11

▶ モーメントマグニチュードと地震モーメント

$$\log M_0 (N \cdot m) = 1.5 M_w + 9.1, \quad M_0 = \mu L D W$$

$M_0$ : 地震モーメント,  $M_w$ : モーメントマグニチュード

$\mu$ : 震源周辺媒質の剛性率 (付属編2.1.1(3)参照),

$L$ : 断層長さ,  $W$ : 断層幅,  $D$ : すべり量

→  $M_w$ が0.1増加すると $M_0$ は $10^{0.15}$ 倍となる

▶ 地震規模に関するスケーリング則

① 断層長さ $L$ , 断層幅 $W$ , すべり量 $D$ のいずれにも限界を設定しない方法

$M_w$ が0.1増加すると $L, W, D$ がいずれも $10^{0.05}=1.12$ 倍となる。

② 断層幅 $W$ のみに限界を設定する方法 (Lモデル)

$M_w$ が0.1増加すると $L, D$ がいずれも $10^{0.075}=1.19$ 倍となる

③ 平均すべり量 $D$ と断層幅 $W$ に限界を設定する方法 (Wモデル)

$M_w$ が0.1増加すると $L$ が $10^{0.15}=1.41$ 倍となる。



静的応力降下量 (付属編2.1.2)

付属編 P.2-11

- ▶ 静的応力降下量 = 断層運動の開始前と完了後のせん断応力の差分
  - ▶ 応力降下量大きい = 断層長さや断層面積あたりのすべり量大きい

▶ 代表的な応力降下量の式

▶ Eshelby(1957)による円形断層の式

$$\Delta\sigma = (7/16) M_0 / (S/\pi)^{1.5}$$

$\Delta\sigma$ : 応力降下量,  $M_0$ : 地震モーメント (=  $\mu D S$ ),

$S$ : 断層面積 (=  $L \cdot W$ )

→  $D \propto S^{0.5}$  →  $D \propto L \propto W$  の関係 (①のスケーリング則)

面積 $S$ と応力降下量 $\Delta\sigma$ が決まれば, 平均すべり量 $D$ が得られる

プレート間巨大地震の発生位置

付属編 P.2-1

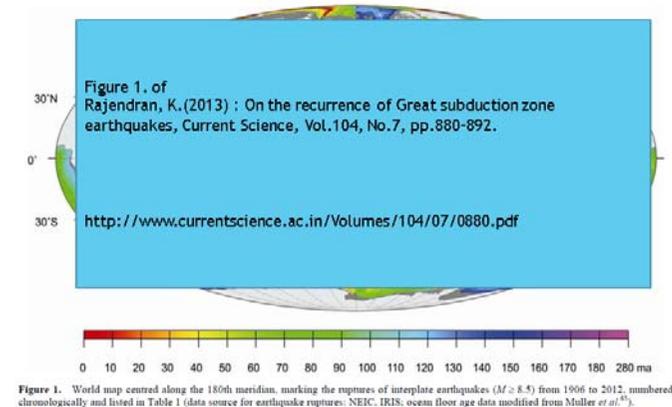


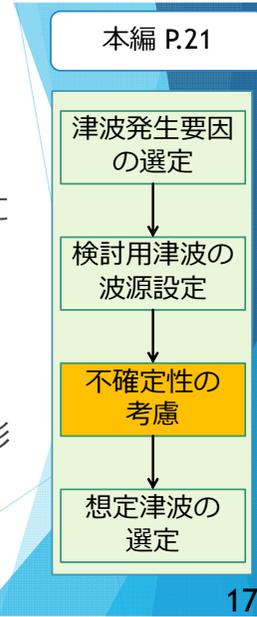
Figure 1. of Rajendran, K.(2013): On the recurrence of Great subduction zone earthquakes, Current Science, Vol.104, No.7, pp.880-892. http://www.currentscience.ac.in/Volumes/104/07/0880.pdf

1906年に発生したM8.5以上の地震の震源域 (Rajendran, 2013)

M8.5以上のプレート間地震の震源域は互いに重複していない

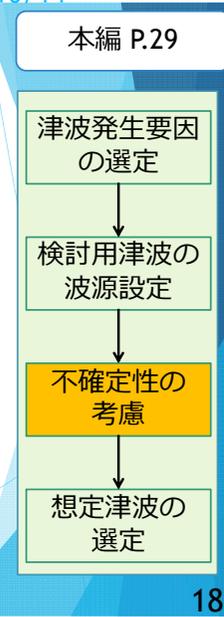
不確定性の考慮 (本編4.1.3)

- ▶ 津波発生の不確定性を検討する
  - ▶ 基本断層モデルに対する**パラメータスタディ**
  - ▶ 断層運動とその他の要因による津波がほぼ同時に発生する可能性 (**重畳**)
- ▶ 着目点
  - ▶ **最大水位上昇量, 最大水位下降量** (敷地状況によっては取水に影響を与える時間)
  - ▶ (必要に応じ) **波の周期**や**海底地形変化**等への影響についても検討する



断層運動による津波に関する不確定性 (本編4.2.3.1)

- ▶ パラメータスタディの手順
  - ▶ **より支配的と考えられる因子**に関するパラメータスタディを行った後, **その他の従属的な因子**に関するパラメータスタディを行うことを基本とする
- ▶ パラメータスタディの因子
  - ▶ 相対的に**不確定性が大きいと判断される因子**について行うことを原則とする。
  - ▶ 波源の広がり非常に大きなプレート間地震においては, その影響度に応じて断層運動の時間変化を表す**動的なパラメータ** (破壊伝播速度, 破壊開始点等) についても考慮する。



パラメータスタディの因子 (原則実施する項目)

付属編 P.3-2

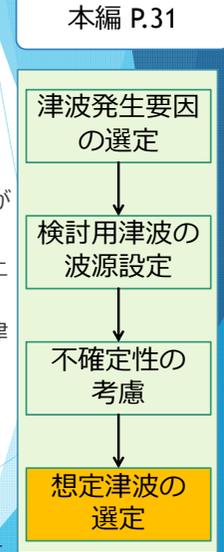
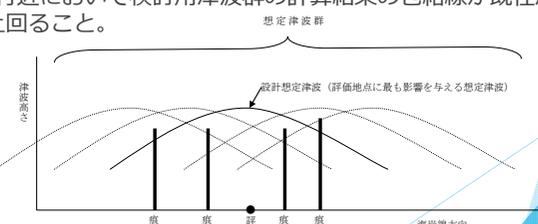
海域または地震のタイプ	静的パラメータ							動的パラメータ		
	位置	大すべり領域位置	走向	傾斜角	傾斜方向	すべり角	上縁深さ	破壊開始点	破壊伝播速度	ライズタイム
プレート間逆断層地震と津波地震の連動			-	-	-	○	-	○	○	○
プレート間逆断層地震 (不均質モデルの場合)	○	-	○	○	-	○	○	-	-	-
プレート間逆断層地震 (均質モデルの場合)	○	-	○	○	-	○	○	-	-	-
日本海溝沿い (プレート内正断層)	○	-	○	○	-	○	○	-	-	-
日本海溝沿い (津波地震) (均質モデルの場合)	○	-	○	○	-	○	○	-	-	-
日本海東縁部 (地殻内地震)	○	○	○	○	○	-	○	-	-	-
海域活断層 (上部地殻内地震)	-	○	-	○	○	○	○	-	-	-

○ : パラメータスタディを原則実施する因子

想定津波の選定 (本編4.3)

- ▶ 必要条件
  - ▶ 少なくとも, 以下の「(A)」または「(B-1)および(B-2)の両方」のいずれかを満足することを確認する。
    - ▶ (A) 評価地点に大きな影響を与えたと考えられる既往津波の痕跡高が存在し, 想定津波の計算結果がそれを上回ることを。
    - ▶ (B-1) 評価地点において想定津波の計算結果が既往津波の計算結果を上回ることを。
    - ▶ (B-2) 評価地点付近において検討用津波群の計算結果の包絡線が既往津波の痕跡高を上回ることを。

= 想定津波の水位上昇量が, 評価地点において少なくとも既往津波の痕跡高を上回ること



付属編第2章の構成

第2章 津波波源設定に関する検討

2.1 津波波源設定に関する基本事項

2.1.1 地震の発生領域と地盤物性

- (1) 既往地震の発生位置
- (2) 地震発生層
- (3) 震源付近の媒質の剛性率
- (4) プレート相対運動および境界形状
- (5) プレート間の固着と地震規模

2.1.2 スケーリング則および応力降下量

- (1) 地震規模に関するスケーリング則
- (2) 静的応力降下量
- (3) プレート間地震のスケーリング則と応力降下量に関する知見
- (4) 断層面上のすべり量分布の不均質性

付属編第2章の構成

2.2 プレート境界付近に想定される地震

2.2.1 2011年東北地方太平洋沖地震より得られた知見

- (1) 地震規模と破壊領域のひろがり
- (2) 海溝軸付近の大きなすべり
- (3) 蓄積応力の解放
- (4) 地震前に得られる情報と地震時の現象の対応
- (5) 破壊の時間変化
- (6) 水平地殻変動の津波生成に対する寄与

2.2.2 津波波源の地域別特徴 (太平洋プレートの沈み込みに関係した海域)

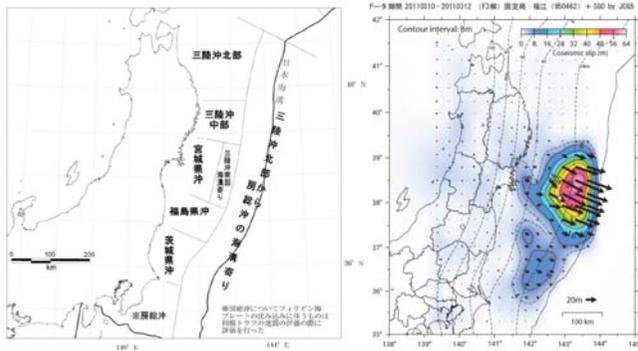
- (1) 千島海溝沿い海域
- (2) 日本海溝沿い海域
- (3) 伊豆・小笠原海溝沿い海域

2.2.3 津波波源の地域別特徴 (フィリピン海プレートの沈み込みに関係した海域)

- (1) 相模トラフ沿い海域
- (2) 南海トラフ沿い海域
- (3) 琉球海溝沿い海域

日本海溝～千島海溝

▶ 想定津波の位置



付属編 P.2-17, P.2-18

複数の区分された領域にまたがる破壊を考慮する

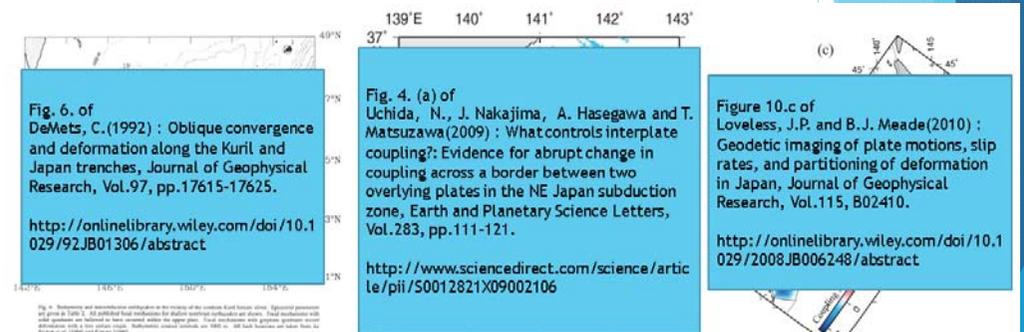
面積Sを先に決めるうえで参考となるプレート間固着や構造的不連続に関する知見を紹介  
→ 付属編2.2.2

地震本部(2011) による領域区分

2011年東北地方太平洋沖地震のすべり量分布 (国土地理院・海上保安庁, 2011)

日本海溝～千島海溝

▶ プレート間の固着や構造的不連続に関する知見の例



付属編 P.2-20, P.2-26, P.2-31

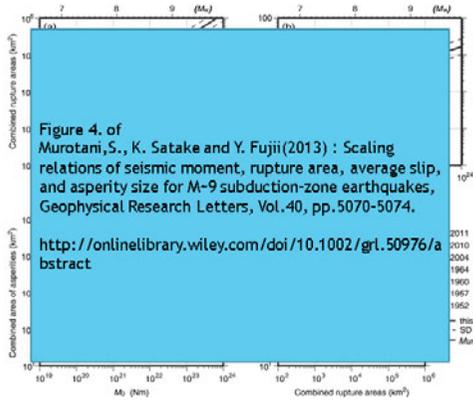
千島海溝沿いの前弧スリバ (DeMets, 1992)

プレート境界地震のすべりベクトル (矢印) とフィリピン海プレートの北東限 (破線) (Uchida et al., 2009)

1997～2000年のGPSデータに基づくプレート間カップリング率 (Loveless and Meade, 2010)

スケーリング則および応力降下量  
(付属編2.1.2)

▶ プレート間地震のスケーリング則と応力降下量に関する知見



Murotani et al. (2013) :  
世界のプレート間地震の断層モデルを分析  
面積 $S=1.34 \times 10^{-10} M_0^{2/3}$   
平均すべり量 $D=1.66 \times 10^{-7} M_0^{1/3}$   
アスペリティ面積 $S_a=2.81 \times 10^{-11} M_0^{2/3}=0.25$

標準偏差を考慮したとき、応力降下量は $1.57/1.91=0.82 \sim 1.57 \times 1.91 = 3.00(\text{MPa})$ の範囲となり、これは $M_w \pm 0.2$ の範囲にほぼ相当する。

付属編 P.2-13

付属編第2章の構成

2.2 プレート境界付近に想定される地震 (続き)

2.2.4 津波波源の地域別特徴 (遠地津波)

- (1) チリ～ペルー沖
- (2) 北米カスケード沈み込み帯
- (3) アラスカ～アリューシャン～カムチャッカ
- (4) スマトラ沖～アンダマン海
- (5) 東南アジア～オセアニア

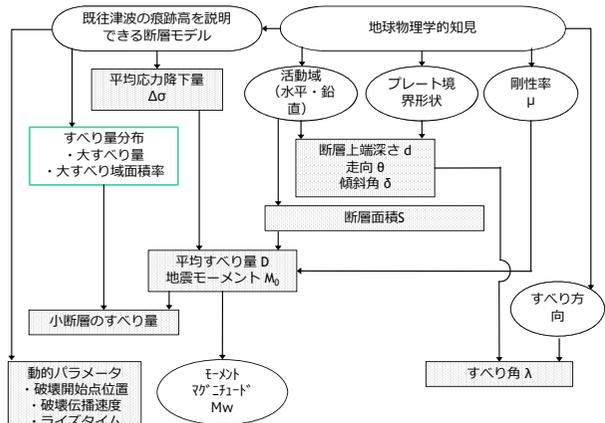
2.2.5 基本断層モデル設定方法等の事例

- (1) プレート間巨大地震を想定する場合
- (2) 既往津波の断層モデルに基づき海域ごとに設定する場合

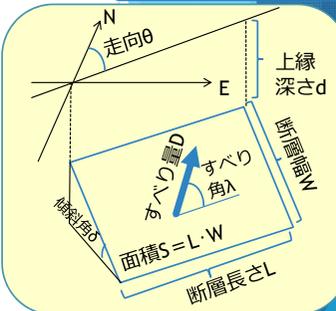
2.2 プレート境界付近に想定される地震

▶ 想定津波の基本断層パラメータ設定方法

▶ プレート間巨大地震を想定する場合



付属編 P.2-65

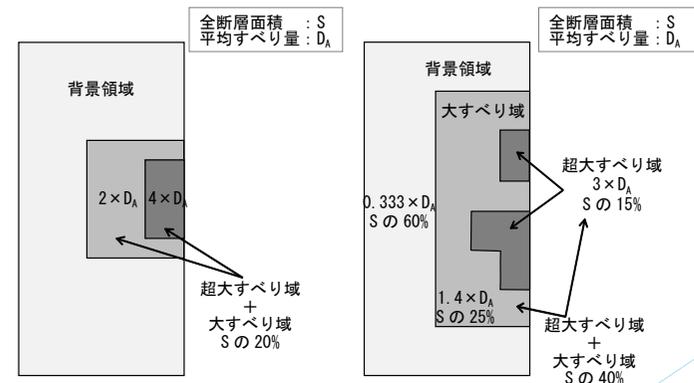


すべり方向はプレート相対運動方向、走向・傾斜角はプレート境界形状のデータに基づき設定可能 (付属編 2.1.4(4))

2.2 プレート境界付近に想定される地震

▶ 想定津波の基本断層パラメータ設定方法

▶ すべり量分布の設定事例



(1) 内閣府(2012)の方法

(2) 杉野ほか(2014)の方法 ( $M_w 8.9$ 以上)

付属編 P.2-63

付属編第2章の構成

2.3 日本海東縁部に想定される地震

2.3.1 基本断層モデル設定根拠等の詳細

- (1) 日本海東縁部の既往津波等に関する知見
- (2) 地殻構造からみた日本海東縁部の地震規模

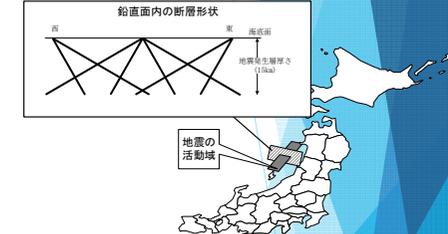
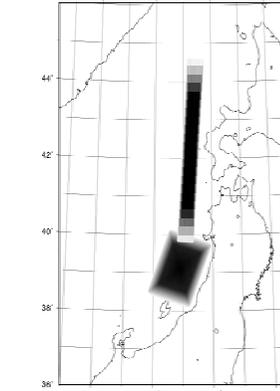
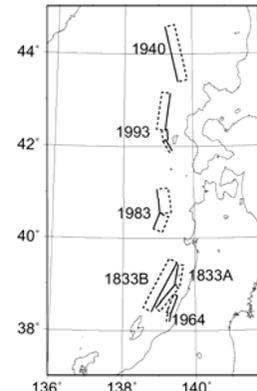
2.3.2 基本断層モデル設定方法等の事例

- (1) 断層長さとMwの関係に基づく設定事例
- (2) 断層面積とMwの関係に基づく設定事例

日本海東縁部 (付属編2.3)

付属編 P.2-95,P.2-98, P.2-100

▶ 日本海東縁部の大地震領域の設定



傾斜角・傾斜方向の設定方針

海域における活断層長さに準拠せず、 $M_w$ を先に与える手順を提示。

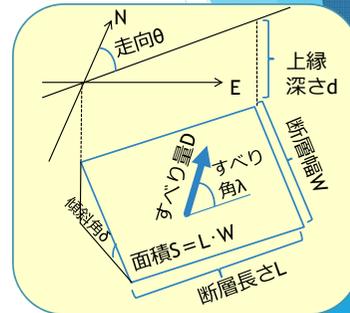
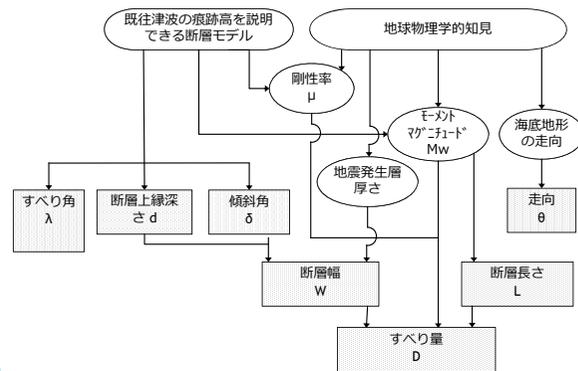
既往津波の波源モデル 大地震領域 (2011年版確率論と同様)

日本海東縁部 (付属編2.3)

付属編 P.2-99

▶ 想定津波の基本断層パラメータ設定方法

▶ 断層長さとモーメントマグニチュードの関係に基づく手順



・2002年版と同様  
・スケーリング則は武村(1998)

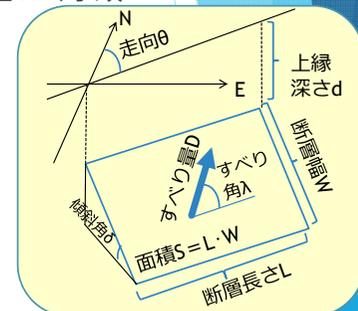
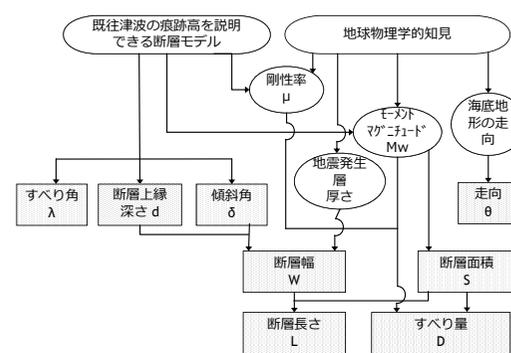
長方形は津波計算に必要な断層パラメータを、影付きの項目はパラメータ設定に先立って必要な情報を表す。

日本海東縁部 (付属編2.3)

付属編 P.2-104

▶ 想定津波の基本断層パラメータ設定方法

▶ 断層面積とモーメントマグニチュードの関係に基づく手順



・スケーリング則は入倉・三宅(2001)にすべり量の上限を考慮  
・すべり量の不均質性を想定した断層モデルに適用する

長方形は津波計算に必要な断層パラメータを、影付きの項目はパラメータ設定に先立って必要な情報を表す。微視的パラメータの記述は省略している。

日本海東縁部 (付属編2.3)

▶ 想定津波の基本断層パラメータ設定方法

▶ 基本断層パラメータの設定例

項目	単位	内容			
		②断層面積とモーメントマグニチュードの関係		①断層長さともモーメントマグニチュードの関係	
モーメントマグニチュード	$M_w$	8.00	8.00	7.85	7.85
地震モーメント	$M_0$ (N・m)	$1.26E+21$	$1.26E+21$	$7.50E+20$	$7.50E+20$
断層長さ	L (km)	199.8	346.1	131.1	131.1
傾斜角	$\delta$ (度)	30.0	60.0	30.0	60.0
地震発生層厚さ	$H_s$ (km)	20.0	20.0	15.0	15.0
断層幅	W (km)	40.0	23.1	30.0	17.3
剛性率	$\mu$ (N/m <sup>2</sup> )	$3.50E+10$	$3.50E+10$	$3.50E+10$	$3.50E+10$
断層面積	S (km <sup>2</sup> )	7,993	7,993	3,932	2,270
すべり量 (平均)	D (m)	4.50	4.50	5.45	9.44

方法①: 均質すべりモデルとする

方法②: 不均質すべりモデルとする。断層を走向方向に4等分し、そのうちの1ヶ所に大すべり域を配置する。大すべり域のすべり量は平均すべり量の2倍とする。

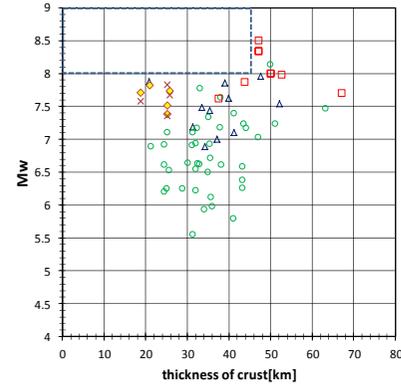
平均すべり量は4.5mで飽和しており、これは国土交通省ほか (2014) の $\mu$  (平均) 式による

付属編 P.6-30

地殻構造からみた日本海東縁部の地震規模 (付属編2.3)

▶ 世界の内陸地震のモデルを収集, 分析

▶ 震央位置の地殻厚さをグローバルな地殻構造モデルCrust1.0より抽出



地殻の厚さと内陸型地殻内地震のMwの関係

- 地殻厚さが約40km未満の領域では、Mw8を超える地震は発生していない。
- Mw8を超える地震はモンゴル周辺で発生している。
- 過去に発生した日本海東縁部の大地震の余震域は、概ね20km程度の深さに及んでいる。大陸に比べると地殻は薄くなっている。この構造は地殻熱流量が大きいことで説明できる。

付属編 P.2-80

付属編第2章の構成

2.4 海域の活断層に想定される地震

2.4.1 基本断層モデル設定根拠等の詳細

- (1) 西南日本周辺海域の既往津波等に関する知見
- (2) 長大断層に対するスケーリング則

2.4.2 基本断層モデル設定方法等の事例

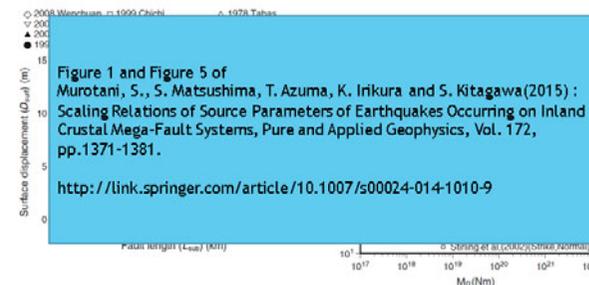
2.4.3 想定津波の波源設定方法

- (1) 基本的考え方
- (2) 広域応力場と断層面角度の関係に基づくすべり角の設定方法
- (3) 想定津波の基本断層パラメータ設定方法

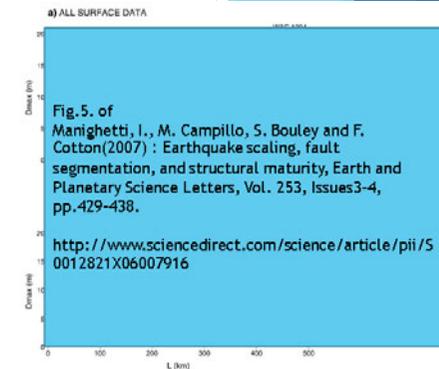
海域の活断層に想定される地震 (付属編2.4)

付属編 P.2-107, P.2-111

▶ 長大断層に対するスケーリング則



(Murotani et al., 2015)



(Manighetti et al., 2007)

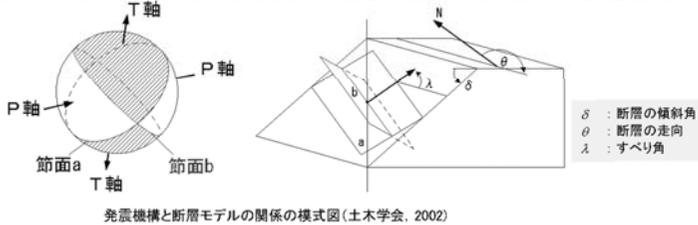
長大な断層では、すべり量が頭打ちとなるスケーリング関係が有力となりつつある。

海域の活断層に想定される地震 (付属編2.4)

付属編 P.2-116

▶ 広域応力場と断層面角度の関係に基づくすべり角の設定方法

「すべり角は、発震機構の原理に基づき、活断層周辺の応力場と走向・傾斜角から幾何学的に推定できる。主圧力軸(P軸)と主張力軸(T軸)は2枚の節面から45°の傾きをもち、スリップベクトルは補助面(実際の断層面でない節面)の法線の方向に一致する。」(土木学会(2002))



- P軸の向きは、西南日本で90~120度、中越地方で110~140度程度(いずれも北から時計まわり)の範囲に収まっていると考えられる。

断層パラメータ設定方法は、日本海東縁部と同様。ただし、断層長さからスタートする。

【パラメータ影響評価】  
付属編第3章の概要

付属編第3章の構成

- 第3章 津波波源の不確定性が津波水位に及ぼす影響の検討
  - 3.1 断層運動による津波に関する不確定性
    - 3.1.1. パラメータスタディにおける代表的な因子
  - 3.2 パラメータスタディにおける不確定性が比較的大きい因子の範囲
  - 3.3 津波波源の不確定性が津波水位に及ぼす影響の検討例
    - 3.3.1 モーメントマグニチュードの影響
    - 3.3.2 波源の平面位置の影響
      - (1) 日本海溝沿い海域の例
      - (2) 日本海東縁部海域の例
    - 3.3.3 断層上縁深さの影響
    - 3.3.4 走向の影響
    - 3.3.5 傾斜方向および傾斜角の影響
    - 3.3.6 すべり角の影響
    - 3.3.7 地震発生層の厚さの影響
    - 3.3.8 複数のセグメントの組み合わせの影響

付属編第3章の構成

- 3.3 津波波源の不確定性が津波水位に及ぼす影響の検討例 (続き)
  - 3.3.9 断層面の形状および応力降下量の影響
  - 3.3.10 断層面のすべり量の不均質性の影響
  - 3.3.11 チリ津波(遠地津波)の波源位置・走向の影響
  - 3.3.12 動的パラメータが津波水位に及ぼす影響の検討
    - 3.3.12.1 南海トラフ沿い海域
    - 3.3.12.2 日本海東縁部

動的パラメータが津波水位に及ぼす影響の検討  
日本海東縁部 (付属編3.3.12.2)

▶ 日本海東縁部を対象に、破壊開始点、破壊伝播速度、ライズタイムが津波水位に与える影響について検討

▶ 本検討では均質すべりモデルとした。

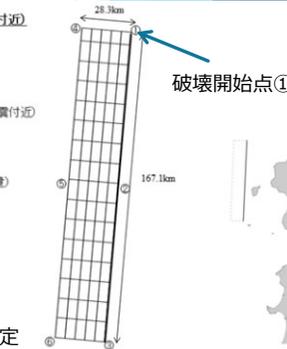
検討項目	破壊開始点	破壊伝播速度	ライズタイム
破壊開始点の影響	①~⑥の6地点	3.0km/s	0秒
破壊伝播速度の影響	①	2.5, 3.0, 3.5km/s	0秒
ライズタイムの影響 (同時破壊)	-	∞	0, 10, 30, 60秒 ※ゼロは瞬時破壊
ライズタイムの影響 (破壊伝播考慮)	①	3.0km/s	0, 10, 30, 60秒

E1C2(北海道南西沖地震付近)

- ・長さ167.1km
- ・幅28.28km
- ・傾斜角=45°
- ・走向=183° (西傾斜)
- ・位置: E1C2(北海道南西沖地震付近)
- ・長さ方向16分割(10.44km)
- ・幅方向5分割(5.66km)
- ・すべり量: 4.53m(平均すべり量)

断面モデルの設定

付属編 P.3-41, P.3-44



動的パラメータが津波水位に及ぼす影響の検討  
日本海東縁部 (付属編3.3.12.2)

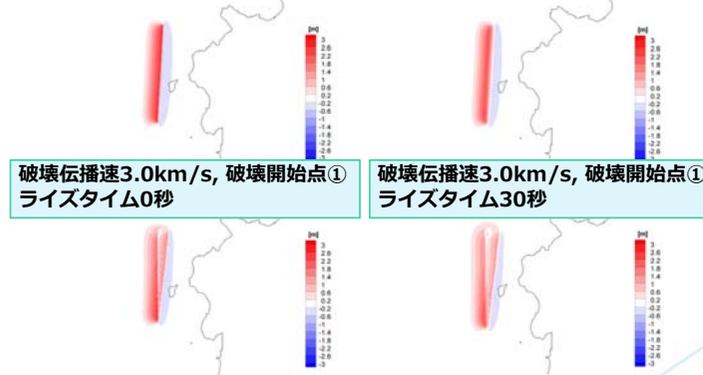
▶ 水位空間分布の比較 (地盤変動終了時)

破壊伝播速度∞  
ライズタイム0秒

破壊伝播速度∞  
ライズタイム30秒

破壊伝播速3.0km/s, 破壊開始点①  
ライズタイム0秒

破壊伝播速3.0km/s, 破壊開始点①  
ライズタイム30秒



付属編 P.3-44

動的パラメータが津波水位に及ぼす影響の検討  
日本海東縁部 (付属編3.3.12.2)

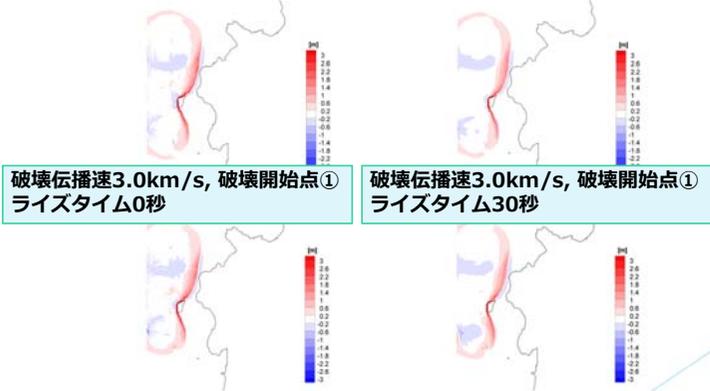
▶ 水位空間分布の比較 (5分後)

破壊伝播速度∞  
ライズタイム0秒

破壊伝播速度∞  
ライズタイム30秒

破壊伝播速3.0km/s, 破壊開始点①  
ライズタイム0秒

破壊伝播速3.0km/s, 破壊開始点①  
ライズタイム30秒



付属編 P.3-45

動的パラメータが津波水位に及ぼす影響の検討  
日本海東縁部 (付属編3.3.12.2)

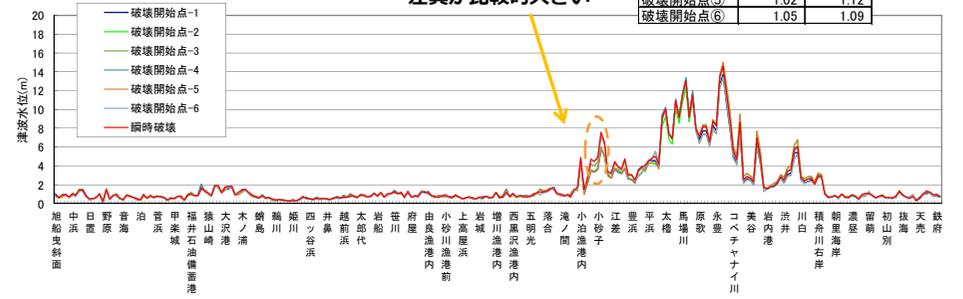
▶ 破壊開始点の影響

E1C2(北海道南西沖地震付近)

- 【破壊開始点の検討】
- ・破壊開始点6箇所(①~⑥)

瞬時破壊の計算結果を観測値とみなして算出した相田(1979)によるK, Kc

破壊開始点	K	Kc
破壊開始点①	1.04	1.12
破壊開始点②	1.02	1.12
破壊開始点③	1.05	1.09
破壊開始点④	1.03	1.12
破壊開始点⑤	1.02	1.12
破壊開始点⑥	1.05	1.09



沿岸水位の比較 (京都~北海道)

付属編 P.3-46

動的パラメータが津波水位に及ぼす影響の検討  
日本海東縁部（付属編3.3.12.2）

付属編 P.3-41, P.3-42

- ▶ 動的パラメータの影響に関するまとめ
  - ▶ 瞬時に全体が破壊する場合に比べ、動的パラメータを考慮すると全体的に水位が小さくなる傾向
  - ▶ ただし、以下のような特徴を有する地点では傾向が変わることがある
    - ▶ 波源に近い地点
    - ▶ 島の影響を大きく受ける地点
    - ▶ 岬、半島の影響を大きく受ける地点
    - ▶ 湾内にあり、反射波の影響を大きく受ける地点

【適用事例】付属編第6章の概要

付属編第6章の構成

第6章 決定論的評価手法の適用事例	6.3 日本海東縁部海域
6.1 千島海溝から日本海溝沿いの海域	6.3.1 基本事項
6.1.1 基本事項	6.3.2 基本断層モデルの設定
(1) 検討方法	6.3.3 概略パラメータスタディ
(2) 数値シミュレーションの解析条件	6.3.4 詳細パラメータスタディ
(3) 計算領域と格子サイズ	6.4 日本海溝沿いの海溝軸付近に想定する津波
6.1.2 基本断層モデルの設定	6.4.1 基本事項
6.1.3 概略パラメータスタディ	6.4.2 基本断層モデルの設定
6.1.4 詳細パラメータスタディ	6.4.3 概略パラメータスタディ
(1) 破壊開始点および破壊伝播速度の影響	6.4.4 詳細パラメータスタディ
(2) ライズタイムの影響	6.4.5 詳細格子分割による検討
6.1.5 まとめ	6.5 海域活断層
6.2 南海トラフ沿い海域	6.5.1 基本事項
6.2.1 基本事項	6.5.2 基本断層パラメータの設定
6.2.2 基本断層モデルの設定	6.5.3 概略パラメータスタディ
6.2.3 概略パラメータスタディ	6.5.4 詳細パラメータスタディ
6.2.4 詳細パラメータスタディ	

適用事例の位置づけ

付属編 P.6-1

「適用事例の掲載にあたって」

本章で提示する決定論的津波評価手法の適用事例は、津波の発生位置や規模等が条件として与えられていることを前提に、本編第4章で示した基本断層モデルの設定および不確定性を考慮するためのパラメータスタディの手順およびその結果を例示したものである。

以上の主旨から、本適用事例は、将来発生する可能性のある津波の発生要因、発生位置、規模等を具体的に規定するものではなく、他の評価手順を否定するものではないことに留意いただきたい。また、この適用事例で示したパラメータ等はあくまでも例示であり、実務にあたっては評価におけるパラメータ設定等の妥当性について十分検討することが必要である。

南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 地震発生領域と断層モデルの設定範囲

付属編 P.6-20

着目する水位評価地点は室戸岬とする

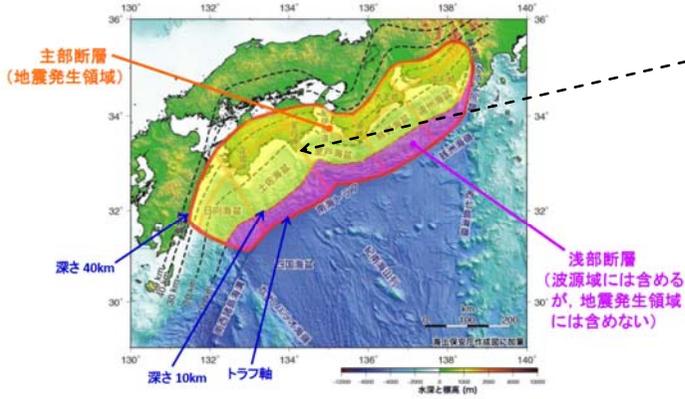


図1 南海トラフの評価対象領域とその区分け  
 ・赤線は最大クラスの地震の震源域を示す。  
 ・薄い赤線は震源域を類型化するために用いた領域分けの境界線を示す。  
 ・破線は本評価で用いたフィリピン海プレート上面の等深線を示す。

地震本部(2013)に加筆

南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 検討方法

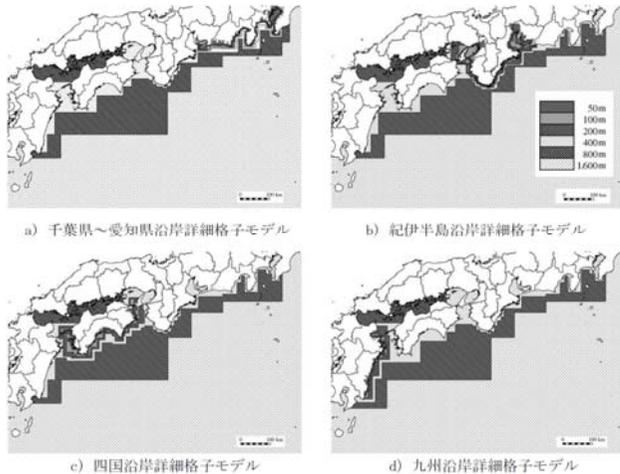
付属編 P.6-17

検討ステップ	検討項目およびその内容	備考
①基本断層モデルの設定	杉野ほか(2014)の考え方で大すべり域、超大すべり域を設定	-
②概略パラメータスタディ	大すべり域の半分が重なるように移動 (門廻・高橋(2014)の手法)	ライズタイム: 60秒※ 破壊伝播速度: 2.5km/s※ 破壊開始点: 紀伊半島沖※ ※内閣府(2012)を参考に設定
③詳細パラメータスタディ	破壊伝播速度	1.0km/s, 2.0km/s, 2.5km/s, 3.0km/s ライズタイム: 60秒固定 破壊開始点: 紀伊半島沖に固定
	破壊開始点	大すべり域周辺部および超大すべり域内に計6か所設定 ライズタイム: 60秒固定 破壊伝播速度: 2.5km/sで固定
	ライズタイム	60秒, 120秒, 180秒, 300秒 破壊伝播速度: 2.5km/sで固定 破壊開始点: 紀伊半島沖に固定

南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 計算格子分割: 50m~1600m間隔

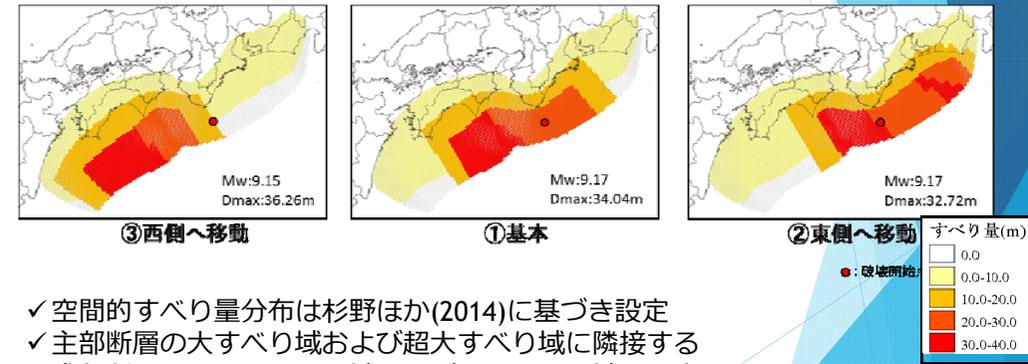
付属編 P.6-18



南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 基本断層モデルおよび概略パラメータスタディの断層モデル

付属編 P.6-20



- ✓空間的すべり量分布は杉野ほか(2014)に基づき設定
- ✓主部断層の大すべり域および超大すべり域に隣接する浅部断層にも、大すべり域および超大すべり域を設定

南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 基本断層モデルの諸元

付属編 P.6-19

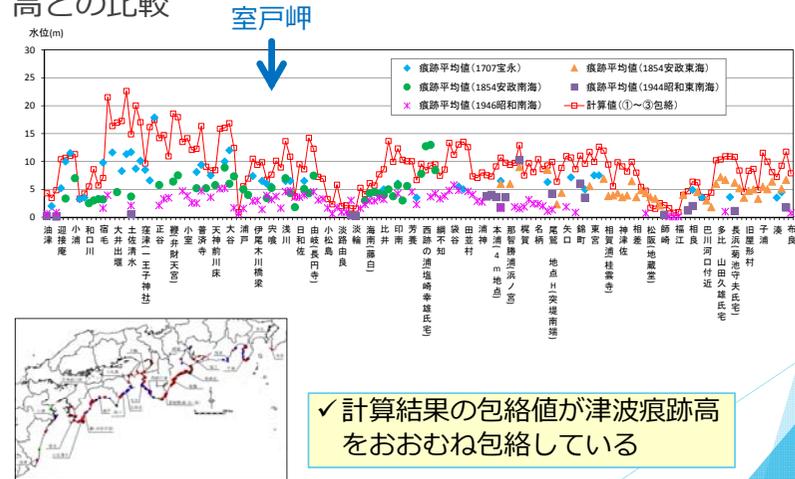
項目	内容
断層面積 (万km <sup>2</sup> )	13.4
超大すべり域+大すべり域面積率 (%)	50.9 (主部断層のみ: 40.2)
全域平均すべり量 (m)	12.9
超大すべり域のすべり量 (m)	34.0~25.7
大すべり域のすべり量 (m)	17.5~11.3
背景領域のすべり量 (m)	4.4~1.2
M <sub>w</sub>	9.2
平均応力降下量 Δσ (MPa)	3.0
小断層数	5,242

53

南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 概略パラメータスタディの計算結果包絡値と津波痕跡高との比較

付属編 P.6-22

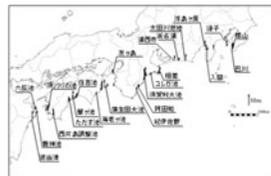
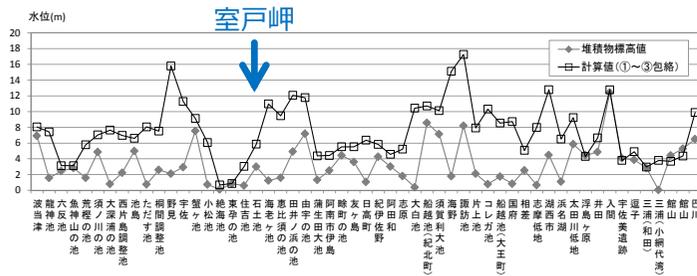


54

南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 概略パラメータスタディの計算結果包絡値と津波堆積物調査地点の標高値との比較

付属編 P.6-23



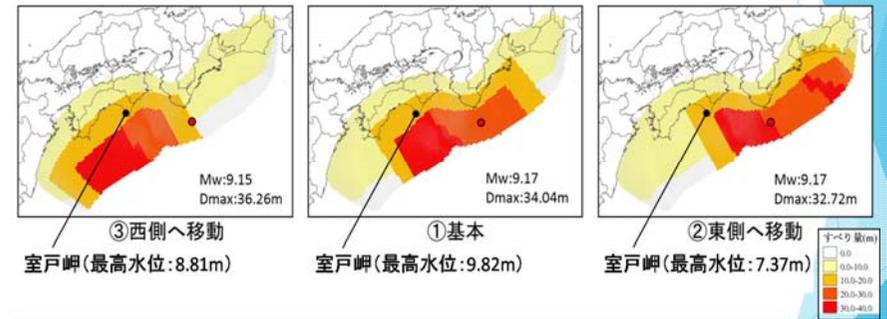
✓ 計算結果の包絡値が津波堆積物調査地点の標高値をほぼ上回っている

55

南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 概略パラメータスタディの計算結果 (室戸岬)

付属編 P.6-25

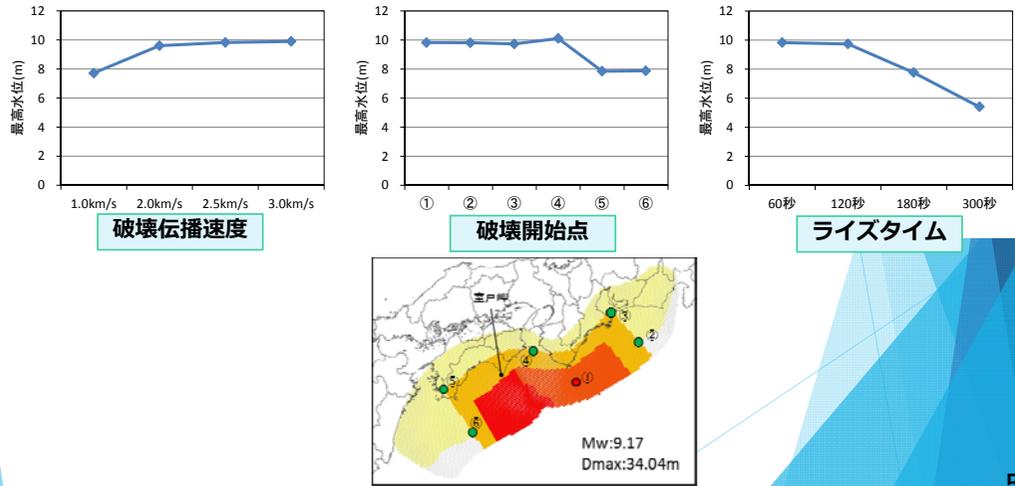


✓ 室戸岬を評価地点とした場合、大すべり位置①のとき最大となる。

56

南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 詳細パラメータスタディの結果 (室戸岬)



付属編 P.6-26

南海トラフ沿い海域の適用事例 (付属編6.2)

▶ 詳細パラメータスタディの結果 (室戸岬)

破壊伝播速度	1.0km/s	2.0km/s	2.5km/s	3.0km/s			破壊開始点① ライズタイム60秒
室戸岬 最高水位(m)	7.72	9.60	9.82	9.90			
破壊開始点	①	②	③	④	⑤	⑥	破壊伝播速度2.5km/s ライズタイム60秒
室戸岬 最高水位(m)	9.82	9.81	9.73	10.11	7.85	7.88	
ライズタイム	60秒	120秒	180秒	300秒			破壊開始点①
室戸岬 最高水位(m)	9.82	9.73	7.76	5.40			破壊伝播速度2.5km/s

※ 斜字体は概略パラメータスタディで実施済みの結果(詳細パラメータスタディの基準ケース結果)を示す。  
 ※ 赤字表示の数値は、各パラメータスタディ内での最大値を示す。

付属編 P.6-25

適用事例の概要 (付属編6章) その1

海域	対象地震	Mw	スケーリング則	すべり量分布	パラメータスタディ項目	備考
千島海溝から日本海溝沿い	千島海溝(南部)沿いのプレート間地震	9.2	円形断層の式, 平均応力降下量 3MPa	内閣府 (2012)	大すべり域位置 破壊開始点 破壊伝播速度 ライズタイム	
南海トラフ沿い	東海~日向灘のプレート間地震	9.2		杉野ほか (2014)		
日本海溝沿いの海溝軸付近	津波地震	8.3	(既往津波の痕跡高を再現できる断層モデル)	均質	波源位置, 走向, 傾斜角, すべり方向	2022年版と同じ
	プレート内正断層地震	8.6			波源位置, 走向, 傾斜角, 断層上縁深さ	

適用事例の概要 (付属編6章) その2

海域	対象地震	Mw	スケーリング則	すべり量分布	パラメータスタディ項目	備考
日本海東縁部	日本海東縁部の大地震	8.0	S-MO関係, すべり量に上限あり	走向方向の1/4を大すべり域	波源位置, 傾斜方向, 傾斜角, 大すべり域位置	2002年版記載の方法 (L-MO関係, 均質すべり, Mw 7.85) でも評価
海域活断層	中越沖の活断層の活動	6.5			大すべり域位置, 主圧力軸の向き, 断層上縁深さ	

# 原子力発電所の津波評価技術2016 第5章 確率論的津波評価手法

原子力土木委員会 津波評価小委員会 幹事  
栗田哲史(東電設計)

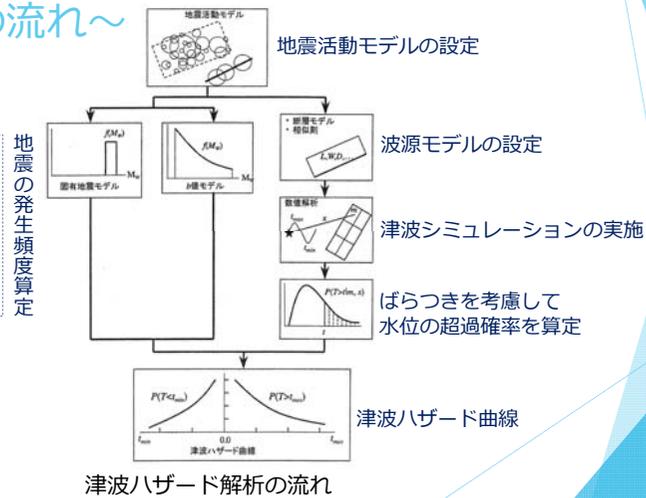
## 確率論的津波評価手法とは (本編 2.5)

▶ 対象とする原子力発電所に対して、一定の影響が考えられる津波の発生要因を複数選定し、必要な不確定性を考慮して津波水位に関する発生確率を算出する。

利用法の例

- ▶ 炉心損傷頻度等の津波リスクを算出する津波PRA(Probabilistic Risk Assessment)の入力として用いる。
- ▶ 決定論で設定した津波水位の発生確率を確認する。

## 確率論的津波ハザード解析とは ～解析の流れ～



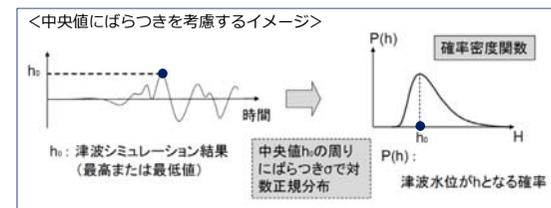
【固有地震モデル】  
特定の震源の地震活動が、同規模、同間隔で繰り返す。

【b値モデル】  
ある広がりを持つ領域内で発生する地震の規模と頻度が、ある関係式（b値で特徴付け）であらわされる。

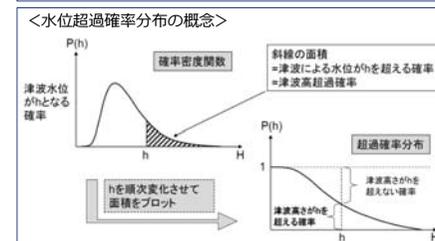
地震の発生頻度算定

## 確率論的津波ハザード解析とは ～超過確率の算定～

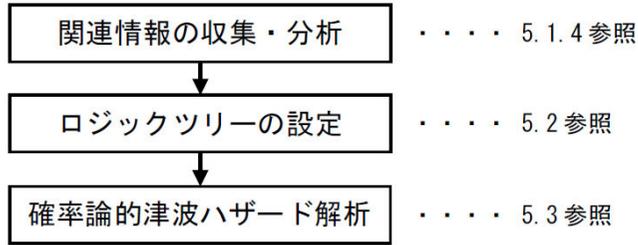
①津波シミュレーション結果の最高（最低）水位にばらつきを考慮



②水位の超過確率算定



## 確率論的津波ハザード評価手法の流れ (本編 5.1.1)



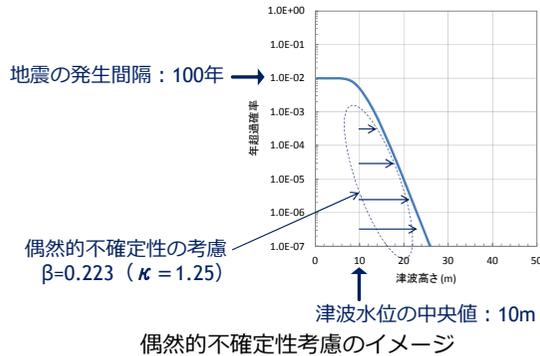
確率論的津波ハザード評価の基本的な流れ

## 関連情報の収集・分析 (本編 5.1.4)

- ▶ 津波を発生させる地震発生様式（活断層、過去の地震など）に関する情報収集
- ▶ 認識論的不確定性をロジックツリーの分岐として表すために、専門家から情報収集することも有効
- ▶ 最新知見などが公開された場合には適切に反映させる必要が有る

## 2種類の不確定性(本編 5.1.2)

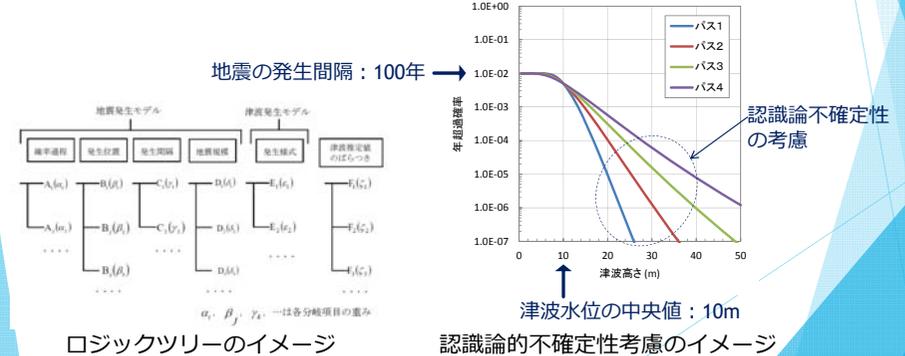
- ▶ (1) 偶然的な不確定性 (aleatory uncertainty)
  - ▶ 物理現象固有のランダム性に起因する不確定性
  - ▶ 予測不可能
  - ▶ 1本の津波ハザード曲線の中で考慮



偶然的不確定性考慮のイメージ

## 2種類の不確定性(本編 5.1.2)

- ▶ (2) 認識論的不確定性 (epistemic uncertainty)
  - ▶ 知識や認識不足に起因する不確定性
  - ▶ 研究が進捗すれば確定させることができるが現状では予測不可能なもの
  - ▶ ロジックツリーの分岐として考慮し、複数の津波ハザード曲線で表現

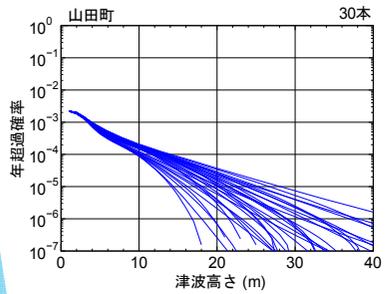


ロジックツリーのイメージ

認識論的不確定性考慮のイメージ

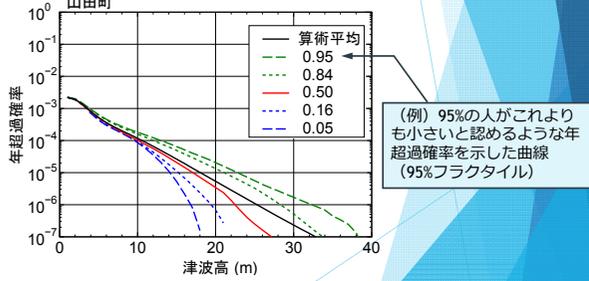
## 2種類の不確定性(本編 5.1.2) ～認識論的不確定性の評価事例～

ある津波高さを超える1年あたりの確率



ロジックツリーの全パスのハザード曲線

ある津波高さを超えないとみなす専門家の  
のコンセンサスの割合



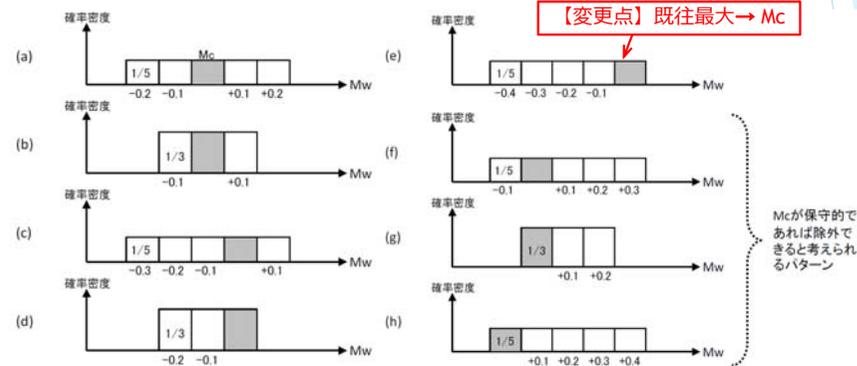
フラクタイルハザード曲線と  
算術平均ハザード曲線

(例) 95%の人がこれより  
も小さいと認めるような年  
超過確率を示した曲線  
(95%フラクタイル)

## モデル化の基本的考え方 (本編 5.2)

- ▶ 震源を特定できる地震のモデル化 (5.2.1) ← **Gutenberg-Richter(G-R)式によるモデル化の考え方を追加**
- ▶ 背景的地震のモデル化 (5.2.2)
- ▶ 津波高さ分布の評価(5.2.3)
- ▶ ロジックツリーの分岐の分類および重みの設定方法(5.2.4)

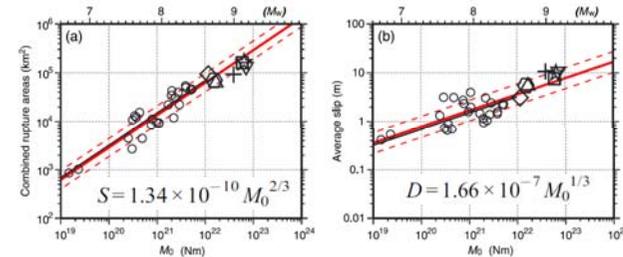
## マグニチュード分布(本編 5.2.1 (2)) ～マグニチュードの分布幅～



Mcが保守的であれば除外できると考えられるパターン

マグニチュードの分布幅に対する中央マグニチュード (Mc) の位置の可能性

## マグニチュード分布(本編 5.2.1 (2)) ～応力降下量による設定～



プレート間地震のパラメタ関係 (Murotani et al., 2013)

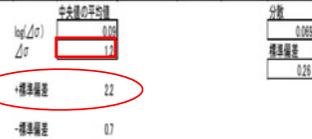
- 《円形クラックモデルを適用》
- ・応力降下量の平均値 :  $\Delta\sigma=1.57\text{MPa}$
  - ・ばらつきを考慮 (平均±標準偏差) :  $\Delta\sigma=0.82\sim 3.00\text{MPa}$  (= Mw: ±0.2)
  - (平均±0.5標準偏差) :  $\Delta\sigma=1.14\sim 2.17\text{MPa}$  (= Mw: ±0.1)

### マグニチュード分布(本編 5.2.1 (2)) ～応力降下量による設定～

Earthquake	Reference	data	M0 (N m)	Mw	S (km <sup>2</sup> )	$\sigma$ (MPa)	$\ln(10/\sigma)$	地震別中央値	地震別平均MPa	地震別分散	標準	
2003 Takachiho	Tanaka et al. (2004)	Ts	1.00E+21	8.1	9900	2.6	-0.41	0.41	2.60	0.00	0.000	0.008
1946 Nankai	Satake (1993)	Ts, G	3.80E+21	8.3	54000	0.7	-0.15			0.01		
	Kato and Ando (1997)	Ts, G	4.00E+21	8.3	54000	0.6	-0.10	-0.05	0.89	0.00	0.006	0.018
	Tanaka and Satake (2001a)	Ts	5.30E+21	8.4	52650	1.1	0.04			0.01		
	Sabe et al. (2002)	Ts	4.80E+21	8.4	52650	1	0.00			0.00		
1944 Tonankai	Satake (1993)	Ts, G	2.00E+21	8.1	49800	0.5	-0.30			0.01		
	Kato and Ando (1997)	Ts, G	2.80E+21	8.2	43200	0.6	-0.10	-0.22	0.60	0.02	0.004	0.095
	Tanaka and Satake (2001b)	Ts	2.00E+21	8.1	42525	0.6	-0.22			0.00		
東北地方太平洋沖地震	内閣府	Tsunami+GPS	4.21E+22	9.0	1.20E+05	2.5	0.39	0.39	2.47	0.00	0.000	0.093
2010年千代田	Lorin et al. (2011)	GPS+Tsunami+SHR	1.55E+22	8.8	130000	0.8	-0.08	-0.08	0.83	0.00	0.000	0.029
2004年スマトラ地震	Lorin et al. (2010)	GPS+Tsunami+衛星	6.63E+22	9.15	315000	0.6	-0.03	0.07	1.17	0.01	0.009	0.000
	Fuji and Satake	Tsunami+衛星	6.00E+22	9.12	220000	1.5	0.19			0.01		

・海溝型地震の平均応力降下量  
・中央防災会議での海溝型地震の津波検討で用いていた

応力降下量 ( $\Delta\sigma$ ) = 3MPaを適用

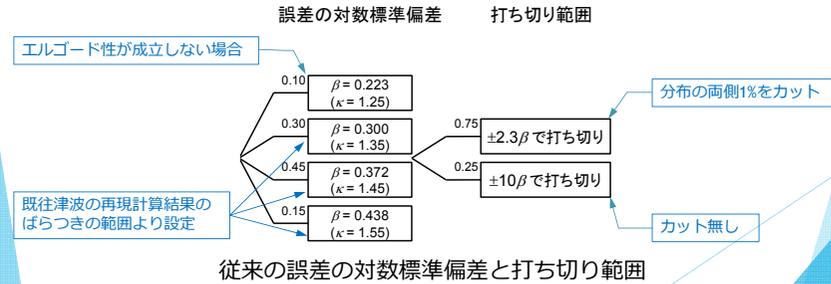


津波観測データを用いた解析による平均応力降下量の整理 (内閣府, 2012)

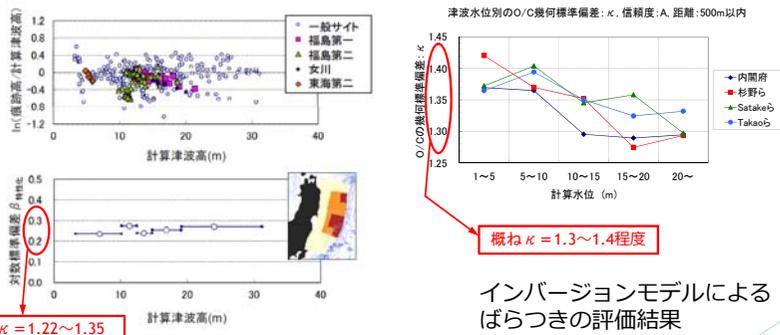
### 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))

【基本的な考え方】

- 津波水位の不確定性是对数正規分布あるいは打ち切りのある対数正規分布で表現
  - ・パラメータ：対数標準偏差 ( $\beta$ )、打ち切り範囲
  - ・対数標準偏差は相田(1977)の幾何標準偏差 ( $\kappa$ ) より次式で算定  $\ln(\kappa) = \beta$



### 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3)) ～3.11以降の検討によるばらつきの評価(1)～

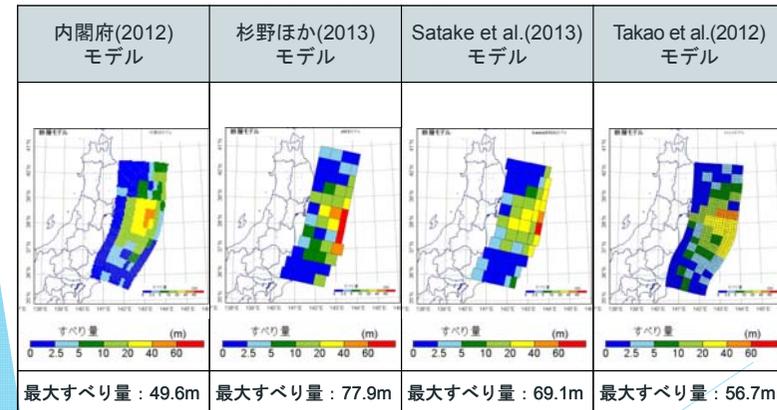


インバージョンモデルによる  
ばらつきの評価結果  
(栗田ほか, 2013)

注) 特性化波源モデル×地形モデルの最小格子サイズ 5.5m  
特性化波源モデルによるばらつき評価検討  
結果 (杉野ほか, 2014)

### 誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3)) ～3.11以降の検討によるばらつきの評価(2)～

分析に使用した波源モデル



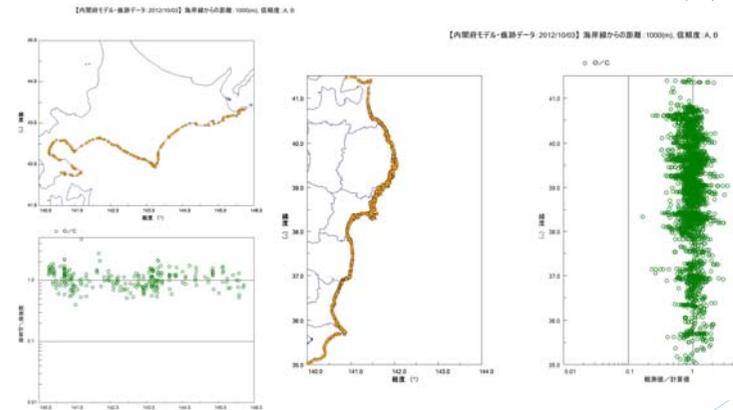
誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(3)~

解析領域内の痕跡データの信頼度別内訳

信頼度	痕跡点数
A (信頼度大)	3,207
B (信頼度中)	763
C (信頼度小)	100
D (信頼度極小)	16
X	1
NA	118
—	1
合計	4,206

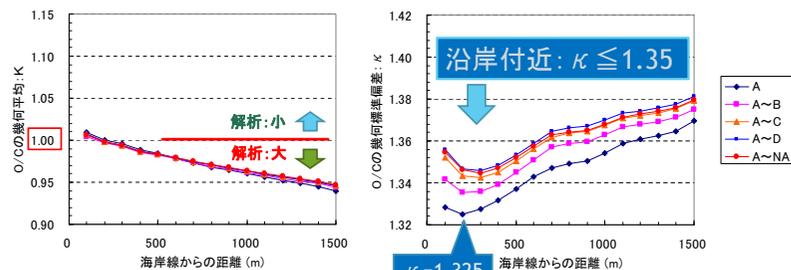
注)痕跡高:1m以上, 遡上距離:1.5km以内に限定

誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(4)~



O/Cの分布図 - 内閣府(2012)モデル -

誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(5)~



(a) O/Cの幾何平均値(K)

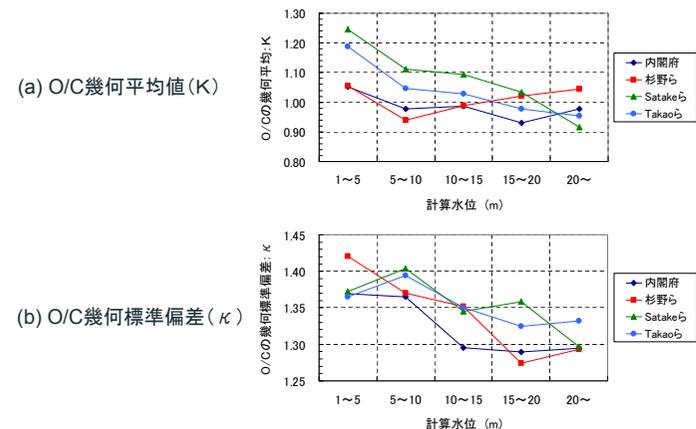
《広域の再現計算では0.95 < K < 1.05が目安》

(b) O/Cの幾何標準偏差(κ)

《広域の再現計算ではκ < 1.45が目安》

海岸線からの遡上距離別(累積)の集計結果  
 - 内閣府(2012)モデル -

誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(6)~



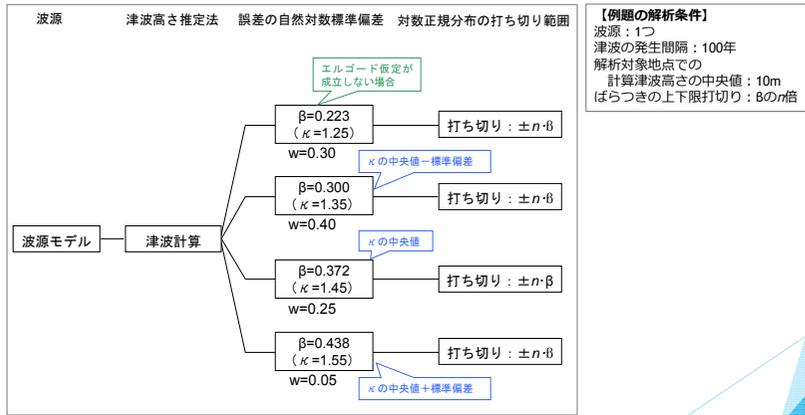
(a) O/C幾何平均値(K)

(b) O/C幾何標準偏差(κ)

計算水位の大きさに応じたばらつきに関する検討結果

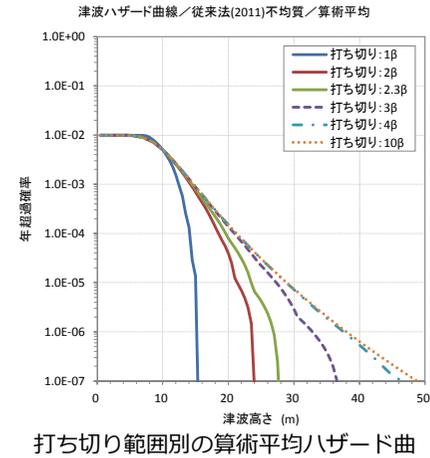
原子力土木委員会 津波評価小委員会

誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(7)~

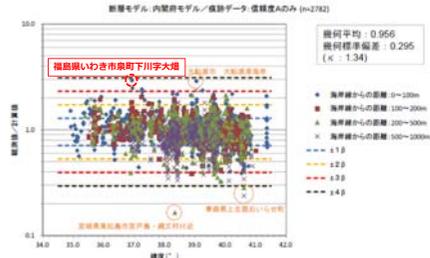
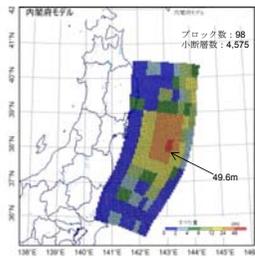


※ ロジックツリーの重みはアンケート調査結果に基づく重みのうち不均質すべりモデルの場合  
 従来法: 確率的津波ハザード解析の方法(2011)のロジックツリー

誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(8)~



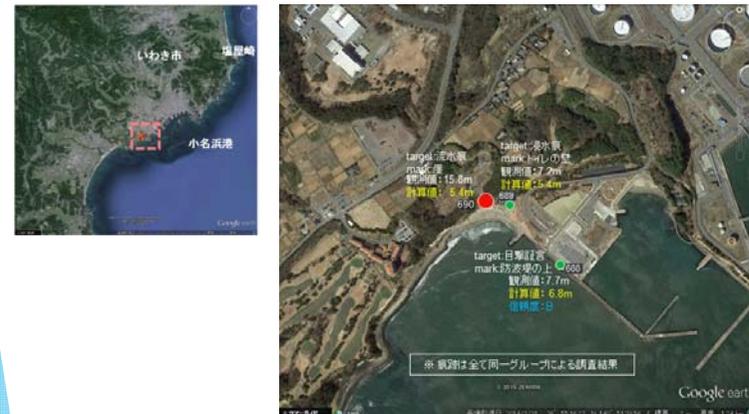
誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(9)~



内閣府のインバージョンモデル

東北地方太平洋沖地震の再現計算  
 結果の観測値/計算値の分布

誤差の標準偏差と打ち切り範囲(本編 5.2.3 (3))  
 ~3.11以降の検討によるばらつきの評価(10)~



福島県いわき市泉町下川字大畑の痕跡地点 (信頼度: A, No.690)

## ロジックツリーの分岐の重み設定方法 (本編 5.2.4)

重みは将来の正しさの可能性に対する現時点での判断を示すものであり、自然科学的な意味での正しさとは直接関係しないと考えられる。

### 【重みの設定方法】

- ▶ アンケートに基づく方法
  - 現時点での専門家集団の見解の分布
- ▶ アンケートに基づかない場合の重み配分の方法
  - 例えば、下表のように設定する

重みの配分 (2分岐の場合)	前提条件
0.5 : 0.5	現時点の知見で重み付けを判断するのが困難な場合
0.3 : 0.7	関連情報に基づけば片方の重みが高いと考えられる場合
0.1 : 0.9	関連情報に基づけば分岐を設ける必要が無いと考えられるが、分岐として成立する可能性を考慮する場合

25

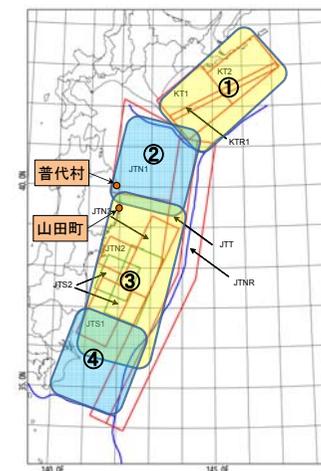
## 確率論的ハザード解析の手順 (本編 5.3)

- ▶ 計算手順(5.3.1)
  - ▶ ① 地震の発生確率の計算
  - ▶ ② 津波高さ分布の計算
  - ▶ ③ 潮位分布の考慮
  - ▶ ④ 津波水位ハザード曲線の作成
  - ▶ ⑤ フラクタイルハザード曲線の作成
- ▶ 地震の発生確率の算定(5.3.2)
- ▶ 地震発生モデル・津波伝播モデルの設定(5.3.3)
- ▶ 津波高さ分布の計算(5.3.4)
- ▶ 潮位分布の考慮(5.3.5)
- ▶ フラクタイル曲線の作成(5.3.6)

26

## 確率論的津波評価の適用事例 (付属編 第7章) ～千島海溝から日本海溝沿いの海域～

## 評価地点および検討対象とする波源域

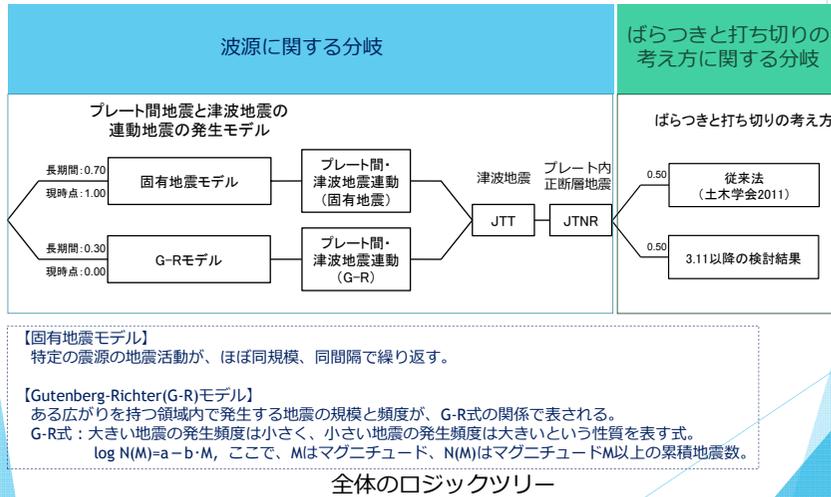


- プレート間地震と津波地震の運動地震
- ・①十勝沖～根室沖
  - ・②三陸沖北部
  - ・③三陸沖中部～茨城県沖  
(東北地方太平洋沖型)
  - ・④茨城県沖～房総沖
- 津波地震
- ・JTT
- 海洋プレート内の正断層地震
- ・JTNR

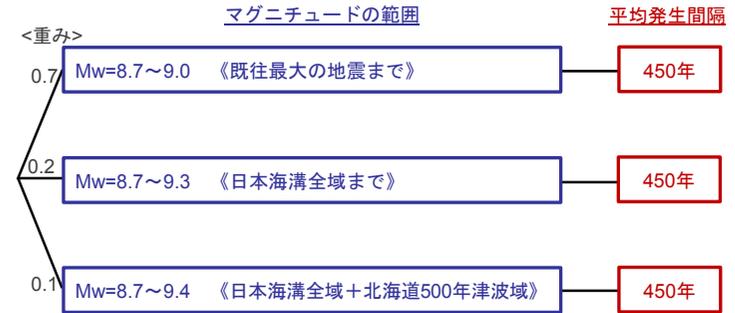
27

28

## ロジックツリーの構築



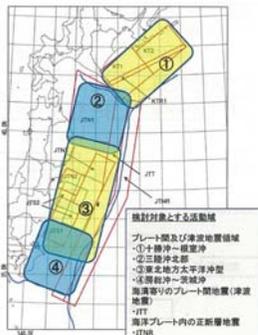
## Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震のロジックツリー～



千島海溝～日本海溝のM9級巨大地震発生ロジックツリー

## Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～GRモデルのマグニチュード範囲～

各領域のMw ( $\Delta\sigma=3\text{MPa}$ として、領域面積から算定)



領域番号	Mw
①	8.8
②	8.7
③	9.0
④	8.7

最小マグニチュードをMw=8.7とする。

### マグニチュードの範囲

マグニチュードの範囲	領域
Mw=8.7~9.0	既往最大の地震まで (③)
Mw=8.7~9.3	日本海溝全域まで (②+③)
Mw=8.7~9.4	日本海溝全域+北海道500年津波域 (①+②+③)

断層モデル：0.1刻みの各Mwに対応する特性化震源モデルを用い、大滑り域を移動させる。

日本海溝の巨大地震発生領域

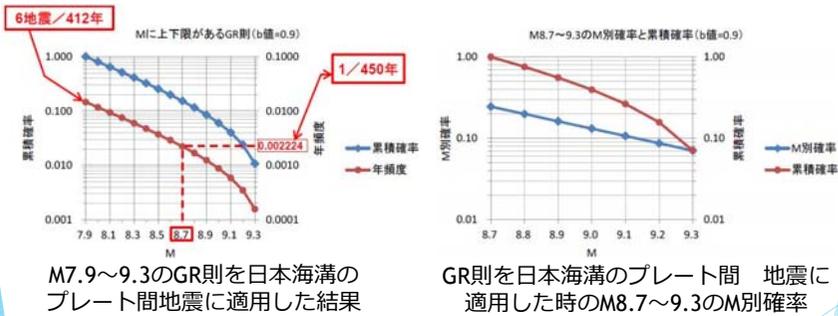
## Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震の発生頻度(1)～

1600年～2011年までの412年間に日本海溝で発生したM7.9以上のプレート間地震(津波地震を除く)

No.	地震発生領域	地震発生日月	地震規模 (M)
1	三陸沖北部	1677年4月13日	7.3 <sub>14</sub> ~8.0*
2	三陸沖北部	1763年1月29日	7.9*
3	三陸沖北部	1856年8月23日	7.8~8.0*
4	三陸沖北部	1968年5月16日	8.3 (Mw)
5	三陸沖南部海溝寄り	1793年2月17日	7.9
6	東北地方太平洋沖型	2011年3月11日	9.0 (Mw)

\* 宇佐美(1996)にある記述。津波等の記録から1968十勝沖と似ておりこれらのMとなる可能性を指摘している。  
出典：地震調査研究推進本部：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(第二版)、平成23年11月25日。

## Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震の発生頻度(2)～



※ b値は日本周辺の平均としてb=0.9としている (地震調査研究推進本部)

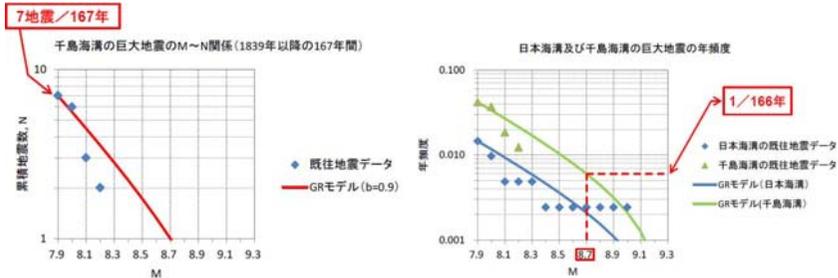
## Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震の発生頻度(3)～

1839年～2005年までの167年間に千島海溝で発生したM7.9以上のプレート間地震

No.	地震発生領域	地震発生日月日	地震規模 (M)
1	十勝沖	1843年4月25日	8.0
2	十勝沖	1952年3月4日	8.2
3	十勝沖	2003年9月26日	8.0
4	根室沖	1894年3月22日	7.9
5	色丹島沖	1969年8月12日	8.2 (Mw)
6	択捉島沖	1918年9月8日	8.0
7	択捉島沖	1963年10月13日	8.1

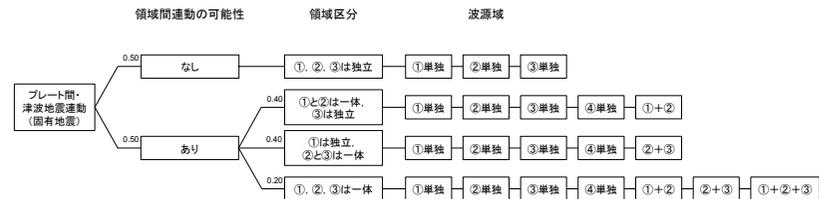
出典：地震調査研究推進本部：千島海溝沿いの地震活動の長期評価（第二版），平成16年12月20日。

## Gutenberg-Richter (G-R) モデル ～M9クラス巨大地震の発生頻度(4)～



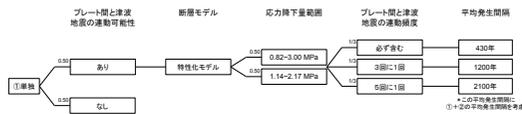
千島海溝のデータを適用することは難しいと判断

## 固有地震モデル ～連動に関するロジックツリー～



固有地震モデルのロジックツリー (領域間の連動に関する分岐)

# 固有地震モデル ～単独地震のロジックツリー(1)～

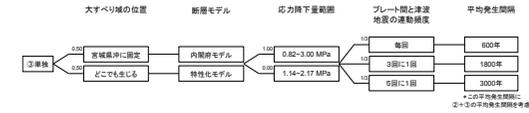


①単独 (十勝沖～根室沖) のロジックツリー

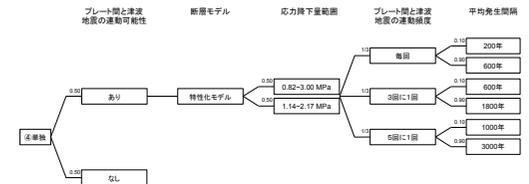


②単独 (三陸沖北部) のロジックツリー

# 固有地震モデル ～単独地震のロジックツリー(2)～

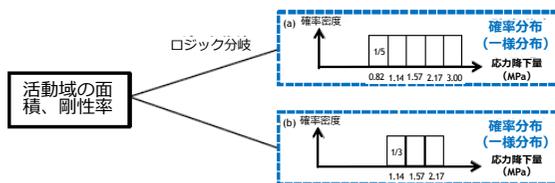


③単独 (三陸沖中部～茨城県沖) のロジックツリー



④単独 (茨城県沖～房総沖) のロジックツリー

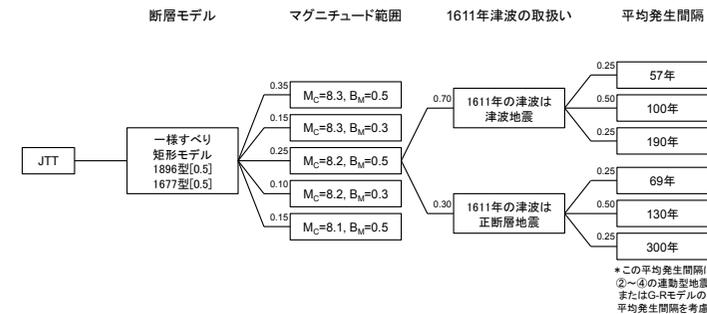
# 固有地震モデル ～応力降下量のロジック分岐～



Murotani et al. (2013)による応力降下量の1×標準偏差の範囲:  
1.57/1.91=0.82 ~ 1.57×1.91=3.00  
← Mw±0.2の範囲にほぼ相当

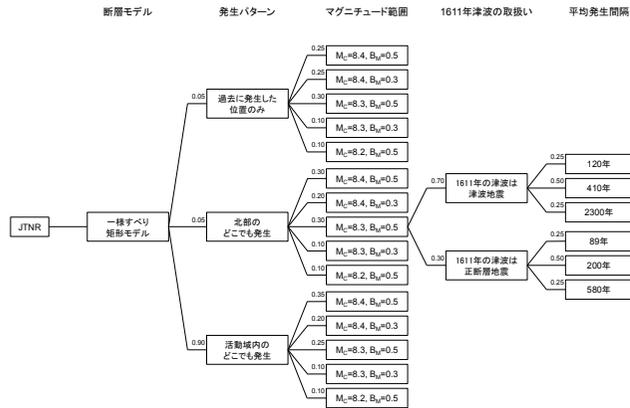
Murotani et al. (2013)による応力降下量の0.5×標準偏差の範囲:  
1.57/1.91<sup>0.5</sup>=1.14 ~ 1.57×1.91<sup>0.5</sup>=2.17  
← Mw±0.1の範囲にほぼ相当

# 固有地震モデル ～その他の地震のロジックツリー(1)～



JTT (津波地震) のロジックツリー

# 固有地震モデル ～その他の地震のロジックツリー(2)～



JTRN (海洋プレート内の正断層地震) のロジックツリー

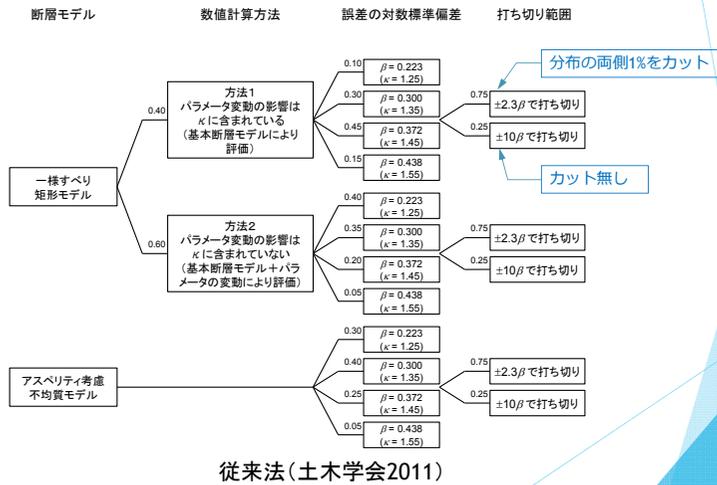
# ばらつきと打ち切りの考え方に関する分岐(1)

ばらつきと打ち切りの考え方

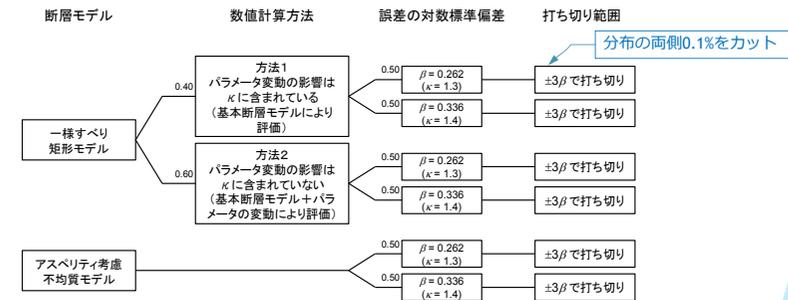


ばらつきと打ち切りの考え方に関する分岐

# ばらつきと打ち切りの考え方に関する分岐(2)

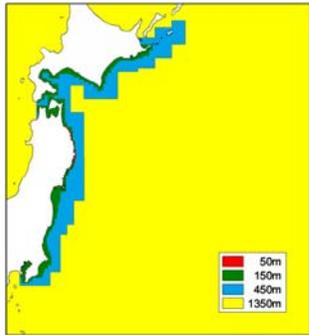


# ばらつきと打ち切りの考え方に関する分岐(3)



3.11以降の検討結果

### 確率論的津波ハザード解析結果 ～計算条件(1)～

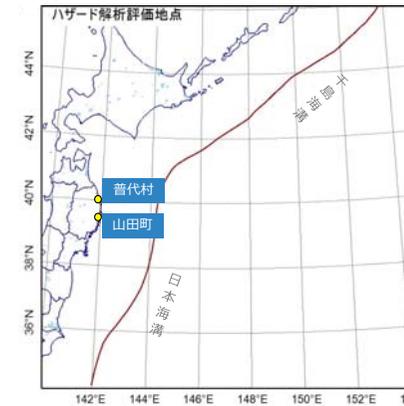


計算格子

#### 計算条件

項目	内容
解析領域	北海道から千葉までの太平洋
計算格子サイズ	沖合1350 m→450 m→150 m→沿岸域50 m
基礎方程式	非線形長波理論
海底の初期変位量	Mansinha and Smylie(1971)の方法 (特性化モデルでは水平変位による造波を考慮)
境界条件	沖側：自由透過， 陸側：完全反射
越流条件	防波堤：本間公式
水平渦動粘性係数	考慮せず
摩擦係数	マンングの粗度係数 海域：0.03 m <sup>1/3</sup> ・s
潮位条件	T.P. ±0.0 m
計算時間間隔	0.5秒
再現時間	地震発生後240分間（4時間）
ライズタイム	30秒

### 確率論的津波ハザード解析結果 ～計算条件(2)～



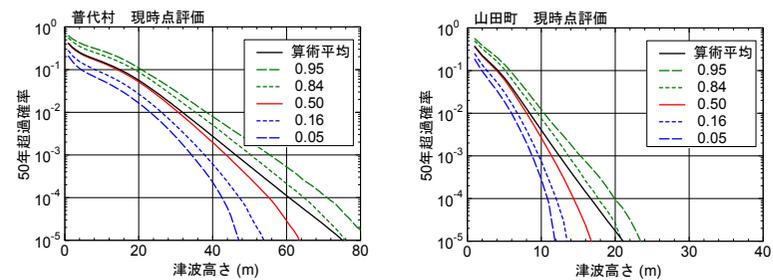
確率論的ハザード解析の評価地点

### 確率論的津波ハザード解析結果 ～計算条件(3)～

#### 地震発生確率の算定方法

波源域	発生確率の算定方法
①単独	ポアソン過程
②単独	ポアソン過程
③単独	更新過程（BPT分布） 最新発生時期：2011/3/11
④単独	ポアソン過程
①+②	ポアソン過程
②+③	ポアソン過程
①+②+③	ポアソン過程
JTT	ポアソン過程
JTNR	ポアソン過程

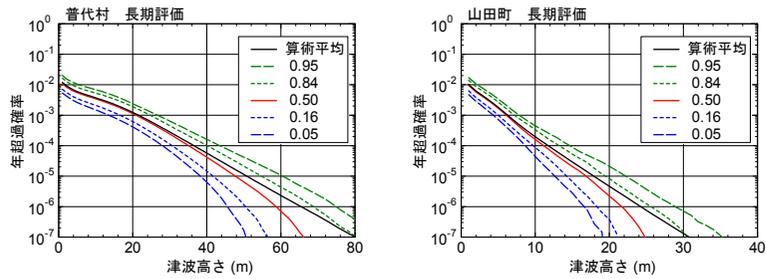
### 確率論的津波ハザード解析結果 ～現時点評価～



現時点評価の算術平均およびフラクティル曲線（縦軸：50年超過確率）  
（2016年1月1日起点）

<現時点評価とは、評価時点の地震発生頻度に基づく超過頻度を用いる方法（更新過程に基づく方法）。>

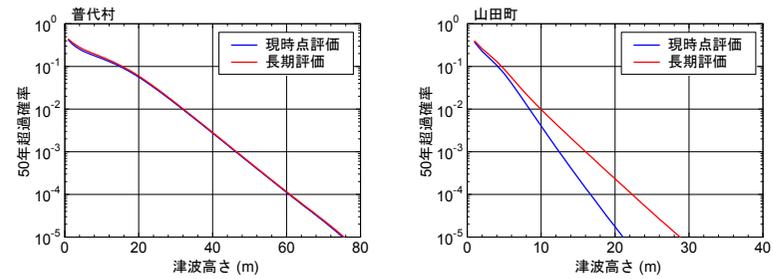
## 確率論的津波ハザード解析結果 ～長期評価～



長期評価の算術平均およびフラクティル曲線（縦軸：年超過確率）

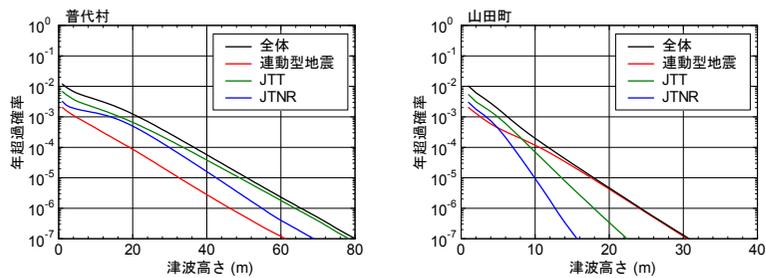
<長期評価とは、ポアソン過程による平均的な地震発生頻度に基づく年超過頻度を用いる方法。>

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～現時点評価と長期評価の比較～



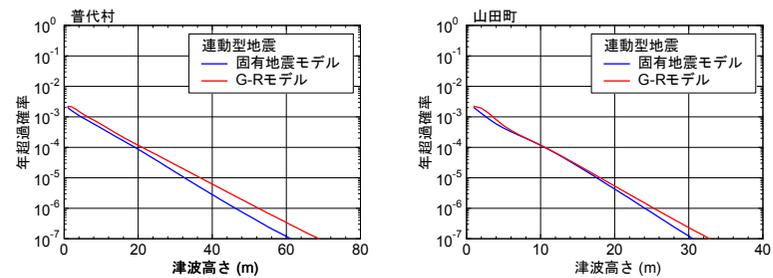
現時点評価と長期評価の算術平均の比較（縦軸：50年超過確率）

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～ロジック分岐の影響評価(1)～



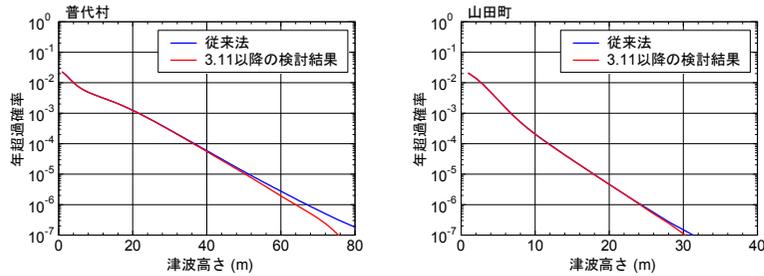
長期評価の波源別算術平均ハザード曲線

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～ロジック分岐の影響評価(2)～



プレート間地震と津波地震の連動地震(①～④)の発生モデルに関する分岐の影響

## 確率論的津波ハザード解析結果 ～ロジック分岐の影響評価(3)～



ばらつきと打ち切りに関する分岐の影響

53

## 確率論的津波評価手法に関する知見 (付属編 第5章)

54

## 確率論的津波評価手法に関する知見

- ▶ 誤差の標準偏差と打ち切り範囲 (5.1)
  - ▶ 計算結果と痕跡高のばらつきの統計的性質 (5.1.1)
  - ▶ 津波高さ推定値のばらつきに関する検討 (5.1.2)
- ▶ 専門家の活用 (5.2)
  - ▶ 日本原子力学会標準の考え方 (5.2.1)
  - ▶ SSHACレポートの方法 (5.2.2)
- ▶ G-R式のb値に関する既往知見 (5.3)
- ▶ 確率論的津波ハザード解析結果に高潮が及ぼす影響 (5.4)
  - ▶ 検討対象 (5.4.1)
  - ▶ 確率台風モデルの設計 (5.4.2)
  - ▶ 台風の理論最大強度の計算 (5.4.3)
  - ▶ 津波ハザード解析に高潮が与える影響 (5.4.4)
  - ▶ まとめ (5.4.5)

55

38 / 60

## 確率論的津波評価手法に関する知見 ～専門家の活用(5.2)～

日本原子力学会標準の考え方 (日本原子力学会(2012))

専門家活用水準	概要
専門家活用水準1	不確かさへの影響が比較的小さい水準を想定し、ロジックツリーの技術的な纏め役が自らロジックツリーを作成する。
専門家活用水準2	不確かさの影響が比較的大きいことを想定し、ロジックツリーの技術的な纏め役がモデルの提案者および関連する専門家に接触して見解を聴取、又は専門家を一堂に集めて討論などを通じて、コミュニティ分布を評価してロジックツリーを作成する。
専門家活用水準3	不確かさの要因が多岐に亘り、重要かつ複雑と判断されることを想定し、モデル提案者でなく不確かさの客観評価者として専門家を活用し、纏め役が編成した専門家によるパネルが評価したコミュニティ分布を公平に集約してロジックツリーを作成する。

56

## 確率論的津波評価手法に関する知見 ～専門家の活用(5.2)～

SSHACレポート (NRC, 1997) の検討レベルおよび検討方法 (日本原子力学会(2015))

検討レベル	課題の程度	検討方法
レベル1	ハザードへの影響度が小さい場合	TIが文献レビュー、経験に基づきモデルを評価し、コミュニティの分布を見積もる。
レベル2	ハザードに影響、意見の違いがある場合	TIがモデル提案者や関連の専門家と接触し、見解や根拠を聞き、コミュニティの分布を見積もる。
レベル3	ハザードに最も影響、意見の違いあり、複雑な場合	TIがモデル提案者や関連の専門家を一同に集めて討論をもち、提案の改善、絞り込みを行い、コミュニティの分布を見積もる。
レベル4	同上 (より組織的に実施する場合)	TFIが専門家パネルを組織し、議論の焦点を絞る。各評価者のコミュニティ分布の見積もりを引き出し、集約する。

TI : Technical Integrator (ロジックツリーの技術的なまとめ役)

TFI : Technical Facilitator/Integrator (ロジックツリーの技術的なまとめ役であり、専門家の意見統合の世話役)

コミュニティ分布 : 専門家集団が総合的に評価する時点での不確定性の客観的分布

# 原子力発電所の津波評価技術2016

## 第6章 数値計算手法 ①

原子力土木委員会 津波評価小委員会 幹事  
藤井直樹 (東電設計)

## 「第6章 数値計算手法」の概要

- ▶ 第4章、第5章の津波を評価する上で必要となる津波の数値計算手法について詳述する。
- ▶ 津波の作用としての波力・砂移動・漂流物の評価手法について取りまとめる。

## 第6章「数値計算手法」 目次

- 6.1 津波伝播・遡上計算 (一部修正、追記)
- 6.2 海底での地すべり, 斜面崩壊, 山体崩壊等に起因する津波の計算 (新規)
- 6.3 取放水設備の水位変動計算 (新規)
- 6.4 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定 (新規)
- 6.5 波力評価 (新規)
- 6.6 砂移動計算 (新規)
- 6.7 漂流物評価 (新規)

## 第6章「数値計算手法」 目次

- 6.1 津波伝播・遡上計算 (一部修正、追記)
- 6.2 海底での地すべり, 斜面崩壊, 山体崩壊等に起因する津波の計算 (新規)
- 6.3 取放水設備の水位変動計算 (新規)
- 6.4 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定 (新規)
- 6.5 波力評価 (新規)
- 6.6 砂移動計算 (新規)
- 6.7 漂流物評価 (新規)

## 「6.1 津波伝播・遡上計算」の構成

### 6.1.1 基本的考え方

### 6.1.4 三次元モデル (新規)

### 6.1.2 数値計算モデルの選定

#### 6.1.2.1 基礎方程式と計算スキーム

#### 6.1.2.2 初期条件

#### 6.1.2.3 境界条件の設定

### 6.1.3 数値計算の実施

#### 6.1.3.1 数値計算領域の設定

#### 6.1.3.2 計算格子間隔の設定

#### 6.1.3.3 地形データの作成

#### 6.1.3.4 構造物データの作成

#### 6.1.3.5 諸係数等の設定

#### 6.1.3.6 計算時間および計算時間間隔の設定

#### 6.1.4.1 基本的考え方

#### 6.1.4.2 代表的な三次元モデル

#### 6.1.4.3 数値計算の実施

5

## 「6.1 津波伝播・遡上計算」

本編 p.80-86

### 6.1.2 数値計算モデルの選定

#### (1) 基礎方程式と計算スキーム : 近海伝播、遠方海域からの伝播

① 線形長波理論、② 非線形長波理論 (浅水理論)

③ 分散波理論 : 分散性の影響 (柳澤ほか, 2012), 波数分散効果 (岩瀬ほか, 2002)

#### (2) 初期条件

##### 1) 海底面の鉛直変位分布

① Mansinha and Smylie(1971)の方法, Okada(1985)の方法

② 三次元不均質構造を考慮できる海底地殻変動解析による方法 (レビュー編1.2)

##### 2) 断層変位の継続時間 (ライズタイム),

破壊開始点から断層の破壊が伝わる速度 (破壊伝播速度)

##### 3) 初期条件の設定

① 海底面の鉛直変位分布

② 海底斜面の水平変位による水位への影響の考慮 (Tanioka and Satake, 1996)

#### (3) 境界条件の設定 : 沖側境界条件, 陸側境界条件, 越流境界条件

6

## 「6.1 津波伝播・遡上計算」

本編 p.87-94

### 6.1.3 数値計算の実施

#### (1) 数値計算領域の設定

#### (2) 計算格子間隔の設定 : 計算格子間隔の異なる部分領域の接続

#### (3) 地形データの作成 (本編3.2)

- 海域地形データ, 陸域地形データ, 過去の地形データ

#### (4) 構造物データの作成

1) 建物等の構造物および二次元構造物 (線の構造物)

2) 耐震性・耐津波性の考慮

3) ゲートやカーテンウォール等の水中部に開口がある構造物

#### (5) 諸係数等の設定

1) 摩擦項に関する係数

2) 水平渦動粘性係数

3) 津波先端に関する水深

#### (6) 計算時間および計算時間間隔の設定

7

## 「6.1 津波伝播・遡上計算」

本編 p.95

### 6.1.4 三次元モデル

#### (1) 基本的考え方

▶ 三次元モデルは、構造物周辺等の津波の三次元的な流況を再現する場合や、波力をより精密に評価する場合の有用な手段として用いることができる。

▶ ただし、津波の発生、海洋伝播、陸上遡上の3つの過程をすべて三次元モデルで実施するには膨大な計算資源が必要。

▶ そのため、計算領域の限定、現象の再現時間の適切な設定、平面二次元モデルとの適切な連結等の工夫が必要。

8

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(2) 代表的な三次元流体解析コード

解析コード名	出典
1 CADMAS-SURF/3D	沿岸技術研究センター(2010): 数値波動水槽の研究・開発: CADMAS-SURF/3D: 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会報告書, 沿岸技術ライブラリー, No.39.
2 OpenFOAM	OpenFOAM Foundation: OpenFOAM User Guide, <a href="http://www.openform.org/docs/">http://www.openform.org/docs/</a> (2016年4月参照).
3 高潮津波シミュレータ (STOC: Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Costal Areas)	富田孝史・柿沼太郎(2005): 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, 第44巻, 第2号, pp.83-98. 高橋研也・富田孝史(2013): 3次元非静水圧流動モデルを用いた久慈湾における東北地方太平洋沖地震津波の再現計算, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.1166-1170.
4 DOLPHIN-3D	川崎浩司・袴田充哉(2007): 3次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dの開発と波作用下での漂流物の動的解析, 海洋工学論文集, 第54巻, pp.31-35.
5 津波複合災害予測モデル	米山望・永島弘士(2009): 複雑な移動・回転を考慮した津波漂流物の三次元数値解析手法の開発, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.65, No.1, pp.266-270.
6 C-HYDRO3D	木原直人・松山昌史(2010): 津波による土砂移動問題に対する静水圧3次元津波解析システムC-HYDRO3D Tsunamiの適用性の検討-インド洋大津波によるKirinda港周辺における土砂移動解析-, 電力中央研究所報告, N09004.

本編 p.96-97

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル レビュー編1.1.1 (1) CADMAS-SURF/3D

レビュー編 p.1-1,p.1-3

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> <li>三次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式およびナビエ・ストークス方程式をポラスモデルに基づき拡張したものを基礎方程式とした非静水圧三次元モデル</li> <li>時間方向の離散化はオイラー法, 運動方程式と連続式の連成はSMAC法, 自由表面解析モデルにVOF法を使用</li> <li>陸上遡上した津波の挙動, 波圧の計算のほか, 気体・地盤・固体との連成も可能</li> </ul>	流体挙動および波圧について, 遡上津波に関する模型実験結果との比較から妥当性を検証(有川ほか, 2005)

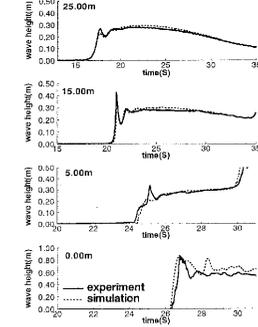


図-6 波高の時系列分布

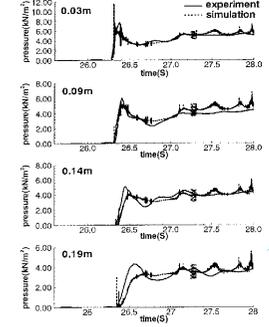


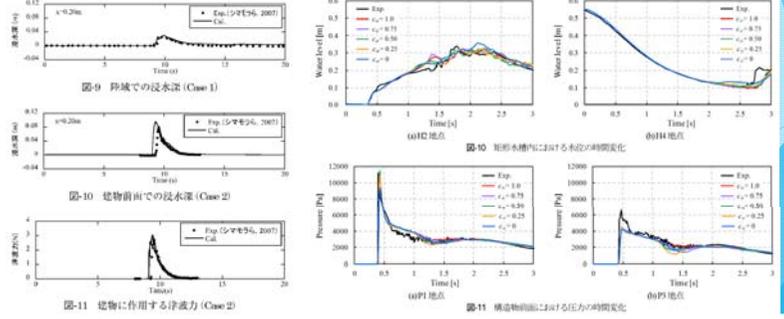
図-7 護岸に作用する圧力

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル レビュー編1.1.1 (2) OpenFOAM

レビュー編 p.1-1, p.1-3,p.1-4

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> <li>水と空気の不混和流体の非圧縮性の二相流を対象とした解析コード(interFoamソルバ)</li> <li>非圧縮性流体の連続式およびナビエ・ストークス方程式を基礎方程式として, 有限体積法によって離散化し, PISO法を用いて流速と圧力を計算</li> <li>気液界面の追跡にはVOF法を使用</li> <li>遡上津波等の沿岸の津波挙動が計算可能</li> </ul>	水柱崩壊問題, 遡上津波物理実験の再現計算にOpenFOAMを適用し, 流体挙動や波圧の実験結果と比較検証(ファムほか, 2012; 川崎ほか, 2013)



「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル レビュー編1.1.1 (3)高潮津波シミュレータ

レビュー編 p.1-1,p.1-5

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> <li>STOC-ICにSTOC-MLを必要に応じて接続できるハイブリッドモデル</li> <li>遠地津波および近地津波の伝播・遡上, ソリトン分裂, 構造物との干渉, 津波漂流物の解析が可能</li> <li>STOC-IC: 非静水圧三次元モデル, 砕波モデルに時間発展型ボアモデルを準用</li> <li>STOC-ML: 計算領域を鉛直方向に多層に分割し, 各層で静水圧を仮定した準三次元モデルで単層での計算も可能</li> </ul>	斜面上の津波に関する模型実験, 長方形堰の越流実験, 津波防波堤に関する模型実験, 実地形による模型実験との比較から, モデルの妥当性や精度を検証(富田・柿沼, 2005; 富田・本多, 2008; 高橋・富田, 2013)

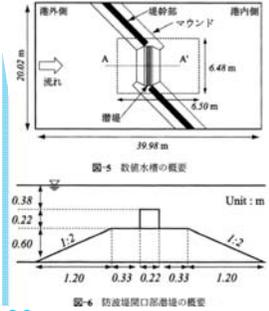


図-5 数値水槽の概要

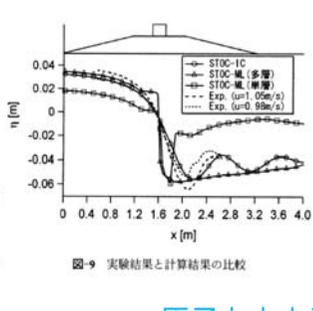


図-9 実験結果と計算結果の比較

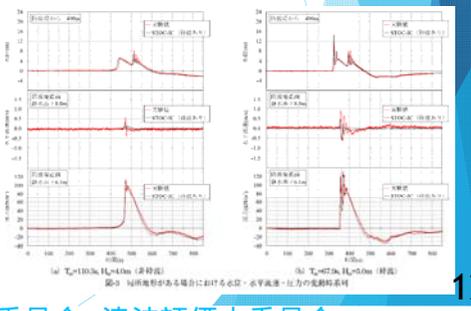


図-10 斜面に作用する津波高

# 「6.1 津波伝播・遡上計算」

## 6.1.4 三次元モデル

### レビュー編1.1.1 (4) DOLPHIN-3D

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> <li>不等間隔格子、複数剛体の運動解析手法、ダイナミック二変数混合モデルDTMを導入したCIP法と拡張SMAC法に基づく三次元固気液多層乱流数値モデル</li> <li>遡上津波等の挙動、構造物と津波の相互干渉、漂流物の動的挙動を計算可能</li> </ul>	流体挙動および波圧について、水柱崩壊に伴う段波と矩形剛体の衝突・漂流に関する模型実験結果と比較検証 (川崎ほか, 2006; 川崎・袴田, 2007)

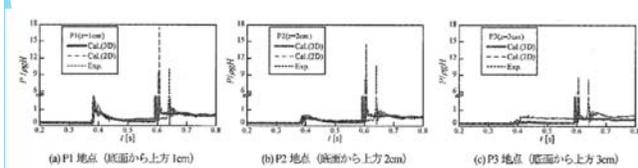


図-5 非固定剛体に作用する波圧の時系列変化

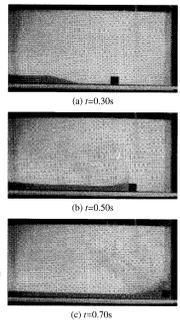


写真-1 水面形の撮影画像

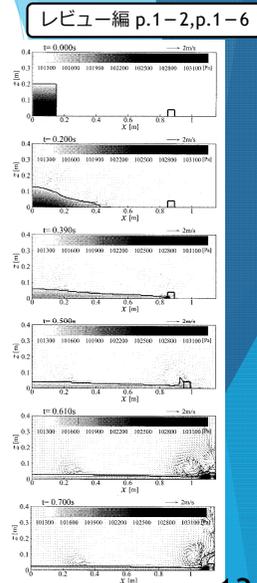


図-7 段波と非固定剛体形状の衝突・遡上過程の計算結果

# 「6.1 津波伝播・遡上計算」

## 6.1.4 三次元モデル

### レビュー編1.1.1 (5)津波複合災害予測モデル

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> <li>非圧縮流体を対象として、水面挙動の予測にVOF法、境界形状の取扱いにFAVOR法を用いた非静水圧三次元モデル</li> <li>基礎方程式は連続方程式、レイノルズ方程式、流体体積の移流方程式、乱流評価式で構成され、これらを直交座標系上で離散化してSIMPLE法に基づいて解析</li> <li>流体運動のほか、船舶運動、係留索張力の計算が可能</li> </ul>	模型実験結果との比較から、遡上津波の挙動や漂流物挙動の妥当性を検証 (米山ほか, 2008; 米山・永島, 2009)

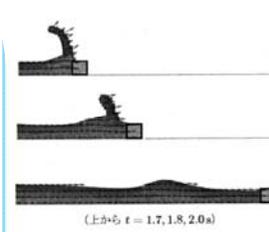


図-9 実験との比較解析結果の例

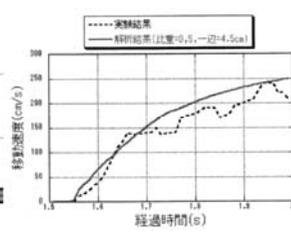


図-10 実験結果との比較

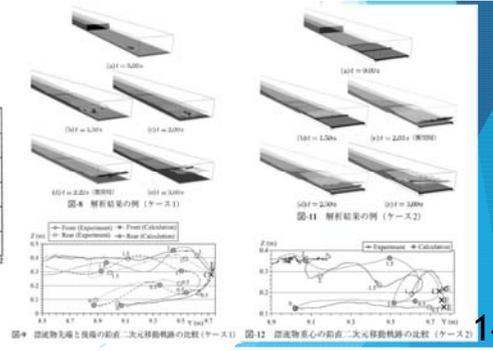


図-11 浮体結果の例 (ケース1)

図-12 浮体物重心の移動 二次元移動軌跡の比較 (ケース2)

# 「6.1 津波伝播・遡上計算」

## 6.1.4 三次元モデル

### レビュー編1.1.1 (6) C-HYDRO3D

概要	妥当性確認事例
<ul style="list-style-type: none"> <li>地形準拠座標系に基づく局所的な連続式、路床から水面まで鉛直積分した連続式、静水圧近似を用いた水平方向の運動方程式を基礎方程式とし、静水圧近似を仮定した三次元数値モデル</li> <li>乱流モデルには、鉛直方向にMellor・Yamada level2モデル、水平方向にSmagorinskyモデルを採用</li> <li>基礎方程式の離散化に有限差分法、変数の配置にスタッガード配置、時間発展に半陰解法であるFSC法を使用</li> <li>津波波源域から沿岸に至る津波伝播、越流・遡上流れの計算のほか、津波による地形変化、漂流物の運動の計算も可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>模型実験および、2004年スマトラ沖地震津波によるスリランカの港湾周辺を対象に、津波挙動、地形変化の再現性を検証</li> <li>移動床開水路実験との比較により、浮遊砂濃度の鉛直分布を検証 (木原・松山, 2010; Kihara et al., 2012)</li> </ul>

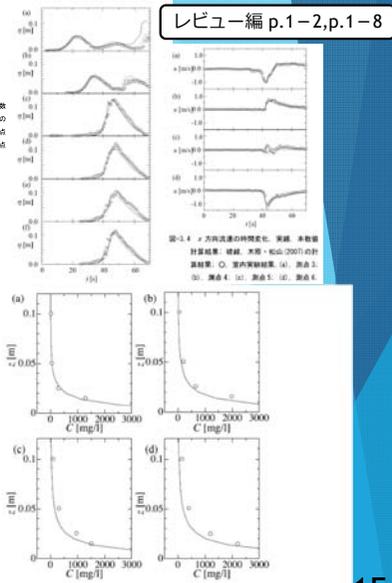
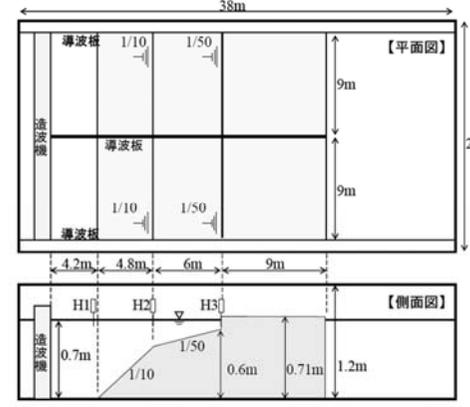


図-2 水位の変位量の時系列変化。実験、本数値計算結果。横軸、木原・松山(2010)の計算結果。○: 室内実験結果。(a) 測点1; (b) 測点2; (c) 測点3; (d) 測点4; (e) 測点5; (f) 測点6; (g) 測点7

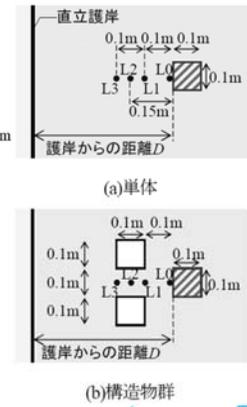
# 「6.1 津波伝播・遡上計算」

## 6.1.4 三次元モデル

### (3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)



有光ほか(2013)の実験装置および構造物模型の配置



「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)

平面二次元モデルの計算条件

項目	設定値	
基礎方程式	非線形長波理論式および連続式	
空間格子間隔	1cm, 2cm, 2.5cm, 3.33cm, 5cm, 10cmの6パターン	
時間格子間隔	CFL条件を十分に満足するように設定	
境界条件	沖側境界 陸側境界	海域部: 孤立波 (津波高3cm) 水路側壁: 完全反射条件 陸域部: 自由透過
	陸側境界	陸上遡上を考慮
粗度係数	$n=0.010 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$	
計算時間	15秒	

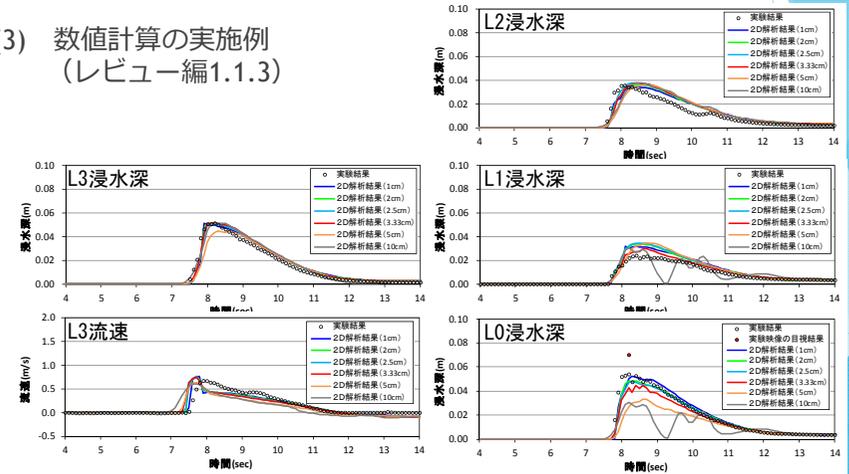
三次元モデルCADMAS-SURF/3Dの計算条件

項目	設定値	
格子間隔	$\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$	構造物周辺では以下の4パターン ・ 0.5cm×0.5cm×0.25cm ・ 0.5cm×0.5cm×0.5cm ・ 1cm×1cm×0.5cm ・ 2cm×2cm×1cm
	時間ステップ	自動
	計算時間	15s
	造波モデル	孤立波 (津波高3cm)
差分スキーム	VP-DONOR	
境界条件	流速・圧力	SLIP
	スカラー量	FREE
物性値	密度	1,000kg/m <sup>3</sup>
	重力加速度	9.8m/s <sup>2</sup>
	粘性	なし
オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
	水滴落下速度	自由落下

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)



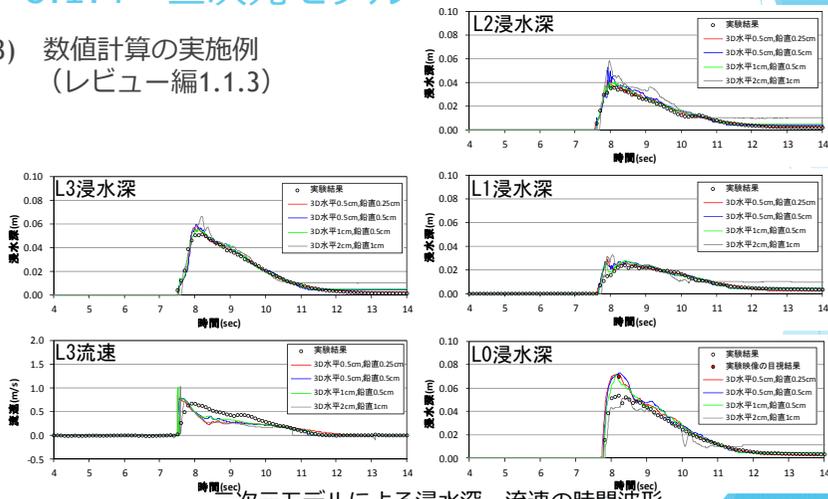
平面二次元モデルによる浸水深・流速の時間波形

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)

レビュー編 p.1-20



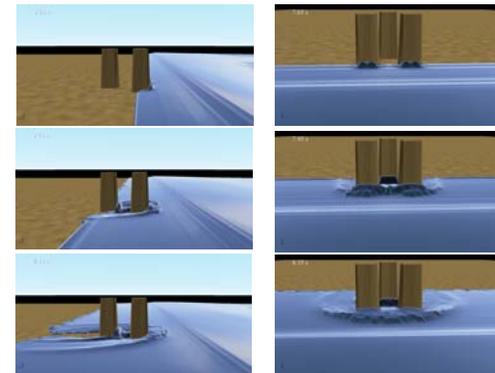
三次元モデルによる浸水深・流速の時間波形

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)

レビュー編 p.1-21



(a) 側面視点

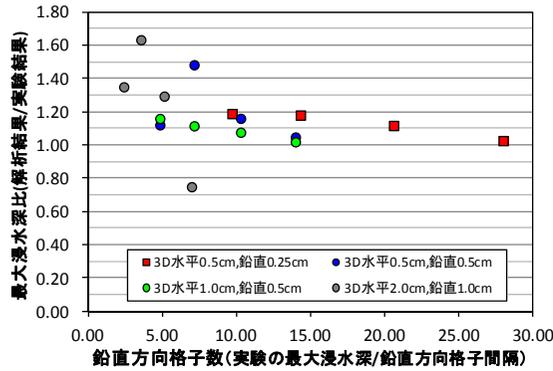
(b) 正面視点

三次元モデルによる構造物周辺の津波挙動のスナップショット (水平方向格子間隔1cm・鉛直方向格子間隔 0.5cmのケース)

「6.1 津波伝播・遡上計算」

6.1.4 三次元モデル

(3) 数値計算の実施例 (レビュー編1.1.3)



三次元モデルによる構造物間の最大浸水深比と鉛直方向格子数の関係

「6.2 海底での地すべり、斜面崩壊、山体崩壊等に起因する津波の計算」の構成

6.2.1 基本的考え方

▶ 本編6.1の津波の伝播・遡上計算に関する要件を踏まえたうえで、特に津波の発生過程のモデル化や解析条件の設定に留意が必要。

6.2.2 数値計算モデルの選定

▶ 断層運動に起因して発生する津波と比べて適用事例が少ない。そのため、手法の選定にあたっては、各手法が想定する現象と適用範囲に注意。

▶ 計算手法が有する不確定性を考慮するための方法として、想定する現象に対して複数の手法を選定して適用することが考えられる。複数の計算結果を相互に比較する等により手法の選定や設定の妥当性を確認する必要がある。

6.2.3 数値計算の実施

- 数値計算領域および計算格子間隔の設定
- 計算時間間隔の設定
- 地形条件
- 諸係数等

6.2.2 数値計算モデルの選定

地すべり等に起因して発生する津波の数値計算モデル

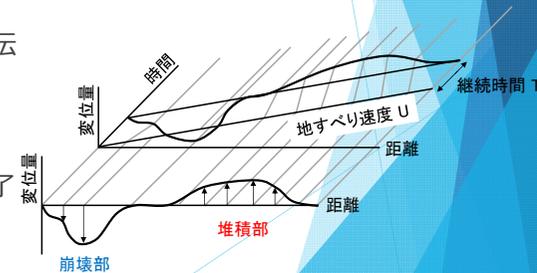
	モデル名称	概要
1	流量モデル	崩土の海中への流入を海岸線における海水流量として与える方法
2	円弧すべり法	円弧すべり法により抽出される不安定斜面の地すべり前後の地形を与え、海面水位に反映する方法
3	Kinematic Landslideモデル	地すべり前後の地形、地すべりの移動速度、地すべりの継続時間から海底地形変化を求め、海面変動として時系列的に与える方法
4	地すべり運動解析モデル	地すべり運動を解析モデル（例えばLSFLOW, TITAN2D, FLOW3D）で解くことにより得られる崩土の層厚変化を海面変動として時系列的に与える方法
5	二層流モデル	土砂を下層、海水を上層とする上下二層の浅水方程式を層間の相互作用を考慮して解く方法
6	Watts et al. (2005)の初期水位推定式	海底での地すべりを対象として波源域での津波の最大振幅・波長を与える予測式と津波水位の平面2次元分布を与える式を組み合わせる初期の水位分布を推定する方法
7	個別要素法	固相を個別要素法で扱い、流体抗力を相互作用として流体相（粒子法）とカップリングする二相流モデルを用いる方法

6.2.2 数値計算モデルの選定

Kinematic Landslideモデル

- ▶ 海底地すべりによる津波の評価方法の一つとして、佐竹・加藤（2002）による運動学的地すべりモデル（KLSモデル）がある。佐竹らは、KLSモデルを用いて、1741年寛保津波を渡島大島の山体崩壊で説明。
- ▶ KLSモデルの概要

- ✓ 地形変化はすべり伝播速度U（破壊伝播速度）と継続時間T（破壊継続時間）で規定
- ✓ 各地点の地形変化は、地すべり前後の地形から求め、継続時間Tで完了
- ✓ ここで求めた時間刻みあたりの地形変化量を海面水位と海底地形に反映



## 6.2.2 数値計算モデルの選定 二層流モデル

- ▶ Kawamata(2005)は、土砂流の流れを再現する二層流モデルを用いて1741年寛保津波を渡島大島の山体崩壊で説明。
- ▶ 本モデルは、上層（海水）と下層（土砂流）の流体運動ならびに両層の界面に作用する力をモデル化し、地すべりに起因する界面変位を与えるもの。

上層（海水）の支配方程式

$$\frac{\partial(\eta_1 - \eta_2)}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) = -gD_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + v_1 \left( \frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) + FD_1 + INTF_1$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_1^2}{D_1} \right) = -gD_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} + v_1 \left( \frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right) + FD_1 + INTF_1$$

下層（土砂流）の支配方程式

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) = -gD_2 \left( a \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{\partial h_1}{\partial x} \right) + v_2 \left( \frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_x}{\rho_2} - aFD_2 - aINTF_2$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_2^2}{D_2} \right) = -gD_2 \left( a \frac{\partial D_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_2}{\partial y} - \frac{\partial h_1}{\partial y} \right) + v_2 \left( \frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_y}{\rho_2} - aFD_2 - aINTF_2$$

底面摩擦力  $\frac{\tau_x}{\rho_2} = \frac{gn^2}{D_2^{1/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2}$ ,  $\frac{\tau_y}{\rho_2} = \frac{gn^2}{D_2^{1/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2}$

形状抵抗力  $FD_x = \frac{1}{2} C_D \rho_1 u \sqrt{u^2 + v^2} \delta_m$ ,  $FD_y = \frac{1}{2} C_D \rho_1 v \sqrt{u^2 + v^2} \delta_m$

界面抵抗力  $INTF_x = f_{int} u \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $INTF_y = f_{int} v \sqrt{u^2 + v^2}$

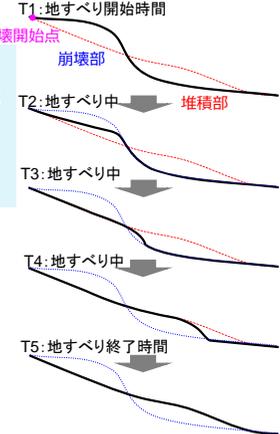
※ 式中の変数の定義は付属編第4章を参照

## 6.2.2 数値計算モデルの選定

### Kinematic Landslideモデル

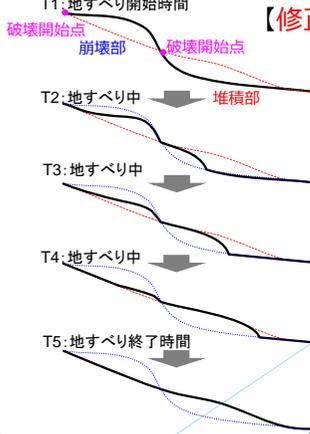
- ▶ 崩壊部・堆積部ともに水面下の現象となる大規模海底地すべりにKLSモデルを適用するにあたっての課題である『土砂収支』に着目し、殿最ほか(2015)は、崩壊と堆積が同時に進行するモデルを提案（レビュー編1.3）

【KLSモデル】



- ・破壊開始点は崩壊部に1つ設定
- ・地すべり前面が堆積部に到達するまで、堆積が始まらない
- ・土砂収支がとれていない

【修正KLSモデル】



- ・崩壊部と堆積部に破壊開始点を設定
- ・崩壊と堆積を同時に進行させることで、土砂収支が改善される
- ・地すべり終了時間\*はKLSモデルと同じ

※KLSモデルと修正KLSモデルのT1~T5は同時刻である

## 6.2.2 数値計算モデルの選定 二層流モデル

- ▶ Kawamata(2005)は、土砂流の流れを再現する二層流モデルを用いて1741年寛保津波を渡島大島の山体崩壊で説明。
- ▶ 本モデルは、上層（海水）と下層（土砂流）の流体運動ならびに両層の界面に作用する力をモデル化し、地すべりに起因する界面変位を与えるもの。

上層（海水）の支配方程式

$$\frac{\partial(\eta_1 - \eta_2)}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) = -gD_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + v_1 \left( \frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) + FD_1 + INTF_1$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_1^2}{D_1} \right) = -gD_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} + v_1 \left( \frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right) + FD_1 + INTF_1$$

下層（土砂流）の支配方程式

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) = -gD_2 \left( a \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{\partial h_1}{\partial x} \right) + v_2 \left( \frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_x}{\rho_2} - aFD_2 - aINTF_2$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_2^2}{D_2} \right) = -gD_2 \left( a \frac{\partial D_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_2}{\partial y} - \frac{\partial h_1}{\partial y} \right) + v_2 \left( \frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_y}{\rho_2} - aFD_2 - aINTF_2$$

底面摩擦力  $\frac{\tau_x}{\rho_2} = \frac{gn^2}{D_2^{1/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2}$ ,  $\frac{\tau_y}{\rho_2} = \frac{gn^2}{D_2^{1/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2}$

形状抵抗力  $FD_x = \frac{1}{2} C_D \rho_1 u \sqrt{u^2 + v^2} \delta_m$ ,  $FD_y = \frac{1}{2} C_D \rho_1 v \sqrt{u^2 + v^2} \delta_m$

界面抵抗力  $INTF_x = f_{int} u \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $INTF_y = f_{int} v \sqrt{u^2 + v^2}$

※ 式中の変数の定義は付属編第4章を参照

## 6.2.2 数値計算モデルの選定 二層流モデル

二層流モデルの適用事例と諸係数の設定

【凡例】 - : 設定値の記載なし  
\* : 基礎方程式に含まれない

事例（文献）	諸係数の設定						備考
	$\alpha$	$\frac{n}{(m^{-1/3} \cdot s)}$	$\frac{\nu}{(m^2/s)}$	$f_{inter}$	$C_D$	$\beta$	
1998年バブアニューギニア津波 (橋・今村, 2000)	-	-	-	-	-	-	基礎方程式や諸係数の設定値が論文に示されていない。
1741年寛保津波 (松本ほか, 1998)	-	-	*	0.025	2.0	3.0	底面摩擦係数はダイラント流体と仮定して求めたとしている。
1741年寛保津波 (Kawamata et al., 2005)	-	0.25, 0.4, 0.6	0.1	0.0	2.0	*	n=0.4のときに再現性が最も良かったとしている。
1792年眉山崩壊 (柳澤ほか, 2014)	-	*	*	0.01, 0.05, 0.10, 0.20	*	*	下層の底面摩擦にはクローン式を適用。
水理模型実験 (今村ほか, 2001)	-	0.08, 0.10, 0.12	0.005, 0.01, 0.02, 0.03	0.0, 0.05, 0.20, 1.00	*	*	n=0.12, $\nu=0.01$ が最適であったとしている。
水理模型実験 (Kawamata et al., 2005)	-	気中: 0.01 水中: 0.12	0.01	0.2	10	*	

## 6.2.2 数値計算モデルの選定 二層流モデル

- ▶ Kawamata(2005)は、土砂流の流れを再現する二層流モデルを用いて1741年寛保津波を渡島大島の山体崩壊で説明。
- ▶ 本モデルは、上層（海水）と下層（土砂流）の流体運動ならびに両層の界面に作用する力をモデル化し、地すべりに起因する界面変位を与えるもの。

上層（海水）の支配方程式

$$\frac{\partial(\eta_1 - \eta_2)}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) = -gD_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + v_1 \left( \frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) + FD_1 + INTF_1$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_1^2}{D_1} \right) = -gD_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} + v_1 \left( \frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right) + FD_1 + INTF_1$$

下層（土砂流）の支配方程式

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) = -gD_2 \left( a \frac{\partial D_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_2}{\partial x} - \frac{\partial h_1}{\partial x} \right) + v_2 \left( \frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_x}{\rho_2} - aFD_2 - aINTF_2$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_2^2}{D_2} \right) = -gD_2 \left( a \frac{\partial D_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_2}{\partial y} - \frac{\partial h_1}{\partial y} \right) + v_2 \left( \frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_y}{\rho_2} - aFD_2 - aINTF_2$$

底面摩擦力  $\frac{\tau_x}{\rho_2} = \frac{gn^2}{D_2^{1/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2}$ ,  $\frac{\tau_y}{\rho_2} = \frac{gn^2}{D_2^{1/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2}$

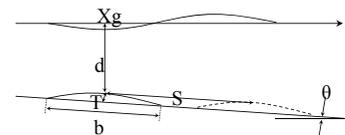
形状抵抗力  $FD_x = \frac{1}{2} C_D \rho_1 u \sqrt{u^2 + v^2} \delta_m$ ,  $FD_y = \frac{1}{2} C_D \rho_1 v \sqrt{u^2 + v^2} \delta_m$

界面抵抗力  $INTF_x = f_{int} u \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $INTF_y = f_{int} v \sqrt{u^2 + v^2}$

※ 式中の変数の定義は付属編第4章を参照

## 6.2.2 数値計算モデルの選定 Watts et al.(2005)の初期水位推定式

- ▶ 海底地すべりによる津波の簡易評価方法の一つとして、Wattsら(2005)の方法で初期水位分布を設定して津波伝播計算を行うモデル（Wattsモデル）がある。
- ▶ Wattsら(2005)が提案する初期水位波形の予測式は、次式で表される。



$$a_0 = g \sin \theta \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + C_m} \right) \left( 1 - \frac{\tan \Psi}{\tan \theta} \right) \quad u_r = \sqrt{gd} \sqrt{\frac{B \sin \theta \pi (\gamma - 1)}{2 C_d} \left( 1 - \frac{\tan \Psi}{\tan \theta} \right)} \quad S_0 = \frac{u_r^2}{a_0}, \quad t_0 = \frac{u_r}{a_0}, \quad \lambda_0 = t_0 \sqrt{gd}$$

$$\eta_{0,2D} = S_0 (0.0574 - 0.0431 \sin \theta) \left( \frac{T}{b} \right) \left( \frac{b \sin \theta}{d} \right)^{1.25} (1 - e^{-2.2(\gamma-1)})$$

$$\eta(x) = -\frac{\eta_{0,2D}}{\eta_{min}} \left[ \exp \left\{ - \left( \frac{x - x_0}{\lambda_0} \right)^2 \right\} - \kappa \exp \left\{ - \left( \frac{x - \Delta x - x_0}{\lambda_0} \right)^2 \right\} \right]$$

※ 式中の変数の定義は付属編第4章を参照

※1 Grilli, S.T., and P. Watts (2005): Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. I: Modeling, Experimental Validation, and Sensitivity Analysis. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.283-297.  
※2 Watts, P., S.T. Grilli, D.R. Tappin, and G.J. Fryer (2005): Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, pp.298-310.

### 6.2.3 数値計算の実施

#### (1) 数値計算領域および計算格子間隔の設定

- ▶ 地すべり等の発生を想定する波源域では、崩壊域・堆積域の大きさや発生する津波の波長を考慮して、選定した数値計算モデルに応じた適切な計算格子間隔を設定。（参考情報 付属編4.6.2）

#### (2) 計算時間間隔の設定

- ▶ 計算結果の妥当性や収束を確認することで判断が必要。

#### (3) 地形条件

- ▶ 地すべり等に起因して発生する津波の数値計算の入力条件として、崩壊土砂量や崩壊前後の地形、すべり面の地形といった地すべりに係る地形条件が必要になる場合がある。（参考資料 本編3.3.1）

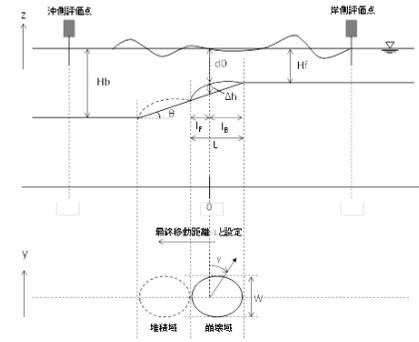
#### (4) 諸係数等

- ▶ 付属編4.6.1：既往検討における諸係数の設定値
- ▶ 付属編4.6.3：地形条件や諸係数が計算津波水位に与える影響

### 6.2.3 数値計算の実施

#### 付属編4.6.2 適切な格子間隔に関する検討

- ▶ 海底地すべりを模式化した仮想的な地形を作成し、二層流モデルとKLSモデルを適用



模式化地形のパラメータ設定

パラメータ	設定値
Δh (m)	30
Hf (m)	500
Hb (m)	Hf + 2Ltanθ
θ (°)	3, 6, 12
κ (= l <sub>F</sub> /l <sub>B</sub> )	1.0
L	600
W	600
γ (= ρ <sub>s</sub> /ρ <sub>water</sub> )	1.85
b	0.5L

海底地形，地すべり地形の模式化（海底地すべり）

### 6.2.3 数値計算の実施

#### 付属編4.6.2 適切な格子間隔に関する検討

#### ▶ 計算条件

項目	設定値
空間格子間隔 (m)	15,30,60,120
計算時間間隔 (s)	0.05
海水・海底間のマニング粗度係数 (m <sup>-1/3</sup> s)	0.03
海水の渦動粘性係数 (m <sup>2</sup> /s)	10.0

モデル	パラメータ	記号 (単位)	設定値
二層流	下層（土砂層） 底面のマニング粗度係数	n (m <sup>-1/3</sup> s)	0.2, 0.3, 0.4
	下層（土砂層）の渦動粘性係数	ν (m <sup>2</sup> /s)	0.01
	抗力係数	C <sub>D</sub> (-)	0
	界面抵抗係数	f <sub>inter</sub> (-)	0
KLS	水平方向伝播速度	U (m/s)	10, 20, 40
	継続時間	T (s)	120, 240, 480

### 6.2.3 数値計算の実施

#### 付属編4.6.2 適切な格子間隔に関する検討

- ▶ 計算結果（最大水位と最小格子間隔ケースとの差）

斜面勾配は6度，土砂層の粗度係数nは0.4m<sup>-1/3</sup>・s 斜面勾配は6度，伝播速度Uは40m/s，継続時間Tは120s

#### 二層流モデル，沖側評価点

格子間隔 Δx (m)	最大水位 (m)		Δx=15mケースとの差	
	上昇量	下降量	上昇量	下降量
15 (=L/40)	0.05219	-0.00679	-	-
30 (=L/20)	0.05453	-0.00748	+4.5%	10.2%
60 (=L/10)	0.04963	-0.00779	-4.9%	14.7%
120 (=L/5)	0.03675	-0.02206	-29.6%	224.9%

#### KLSモデル，沖側評価点

格子間隔 Δx (m)	最大水位 (m)		Δx=15mケースとの差	
	上昇量	下降量	上昇量	下降量
15 (=L/40)	0.05057	0.06758	-	-
30 (=L/20)	0.0496	0.07097	-1.9%	+5.0%
60 (=L/10)	0.05327	0.06701	+5.3%	-0.8%
120 (=L/5)	0.06338	0.05289	+25.3%	-21.7%

#### 二層流モデル，岸側評価点

格子間隔 Δx (m)	最大水位 (m)		Δx=15mケースとの差	
	上昇量	下降量	上昇量	下降量
15 (=L/40)	0.00703	-0.04920	-	-
30 (=L/20)	0.00916	-0.04801	+30.3%	-2.4%
60 (=L/10)	0.01685	-0.04158	+139.7%	-15.5%
120 (=L/5)	0.02347	-0.02750	+233.9%	-44.1%

#### KLSモデル，岸側評価点

格子間隔 Δx (m)	最大水位 (m)		Δx=15mケースとの差	
	上昇量	下降量	上昇量	下降量
15 (=L/40)	0.0176	-0.03334	-	-
30 (=L/20)	0.01758	-0.03372	-0.1%	1.1%
60 (=L/10)	0.01797	-0.0388	2.1%	16.4%
120 (=L/5)	0.01968	-0.03807	11.8%	14.2%

二層流モデルの解は指向性が強く出るため，沖側評価点では上昇側が，岸側評価点では下降側が支配的となる。

二層流モデル，KLSモデルともに，本計算例においては，空間格子間隔を地すべり域の大きさLの1/20程度とした場合に最大水位変化量が概ね収束した。

# 原子力発電所の津波評価技術2016 第6章 数値計算手法 ②

原子力土木委員会 津波評価小委員会 幹事  
佐藤嘉則 (ユニック)  
藤井直樹 (東電設計)

## 第6章「数値計算手法」 目次

- 6.1 津波伝播・遡上計算 (一部修正、追記)
- 6.2 海底での地すべり, 斜面崩壊, 山体崩壊等に起因する津波の計算 (新規)
- 6.3 取放水設備の水位変動計算 (新規)
- 6.4 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定 (新規)
- 6.5 波力評価 (新規)
- 6.6 砂移動計算 (新規)
- 6.7 漂流物評価 (新規)

## 「6.3 取放水設備の水位変動計算」の構成

- 6.3.1 基本的な考え方
  - (1) 計算の目的
  - (2) 数値計算手法の選定
  - (3) 取放水設備のモデル化と数値計算の実施
- 6.3.2 数値計算手法の選定
  - 6.3.2.1 水路部分の計算手法
    - (1) 全区間が常時管路流れの場合
    - (2) 全区間が常時開水路流れの場合
    - (3) 開水路流れの区間と管路流れの区間が共存する場合
  - 6.3.2.2 取放水水槽や立坑部分の計算手法
- 6.3.3 取放水設備のモデル化と数値計算の実施
  - (1) 取放水設備のモデル化
  - (2) 水路の摩擦損失および形状損失の考慮
  - (3) 越流堰等の構造物の取り扱い
  - (4) 取放水流量, 潮位条件等を考慮した水位変動計算の実施
  - (5) 取放水設備からの溢水を考慮した敷地への浸水解析

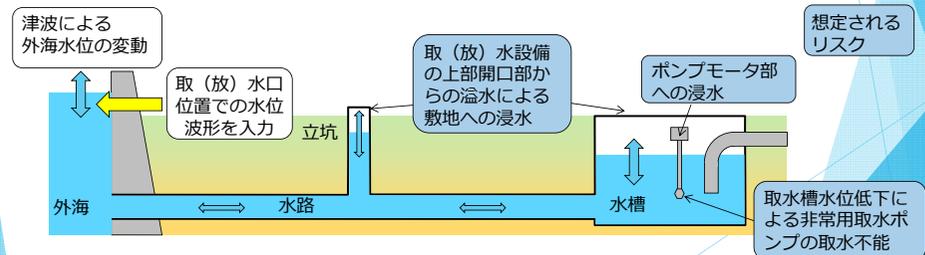
## 「6.3 取放水設備の水位変動計算」

本編 p.101-p.102

### 6.3.1 基本的な考え方

#### 1) 計算の目的

- ▶ 取放水設備に関連したリスク (設備からの溢水による敷地への浸水、ポンプモーター部への浸水、ポンプ取水不能等) に対して、取放水設備の水位変動計算を実施し、設備内の水位の挙動を把握する。
- ▶ 設備内での水位変動が増幅しないことが明らかな場合は、計算を省略することができる。



取放水設備に関連したリスクと水位変動計算の概要

# 「6.3 取放水設備の水位変動計算」

## 6.3.1 基本的な考え方

### 2) 数値計算手法の選定

- ▶ 取放水口位置での水位波形を境界条件（入力波形）として使用。
- ▶ 取放水路内の流れは、水路に沿った一次元流れとして取り扱うことができ、開水路流れや管路流れといった流況を精度よく計算可能な手法を適用。

### 3) 取放水設備のモデル化と数値計算の実施

- ▶ 入力波形に設備の固有周期程度の成分が含まれていると、取放水槽等の水位変動が増幅される場合があり、設備形状を精度よくモデル化することが重要。
- ▶ 設備の構造図面等に基づき水路や水槽の形状等を設定するとともに、水路の摩擦損失や形状損失（屈折・曲がり等）、設備内構造物（スクリーン、越流堰等）の適切な設定が必要。

# 「6.3 取放水設備の水位変動計算」

## 6.3.2 数値計算手法の選定

### 取放水設備の水位変動計算手法

#### (1)水路部分の計算

- (a)全区間が**常時管路流れ**の場合：管路流れの一次元不定流モデル
- (b)全区間が**常時開水路流れ**の場合：
  - ①開水路流れの一次元不定流モデル ②平面二次元モデル
- (c)開水路流れの区間と管路流れの区間が**共存する場合**：
  - ①スロットモデル ②開水路区間と管路区間を分離する計算手法

#### (2)取放水槽や立坑の計算

- ①水槽内の水容積変化のみを考慮したモデルによる計算手法
- ②一次元水路モデルによる計算手法
- ③平面二次元モデルによる計算手法
- ④三次元モデルによる計算手法

いずれの計算手法も水路部分との連成問題として取り扱う必要がある

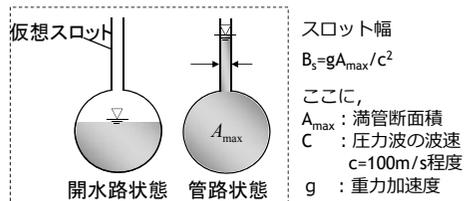
# 「6.3 取放水設備の水位変動計算」

## 6.3.2 数値計算手法の選定

開水路流れの区間と管路流れの区間が共存する場合の水路計算手法

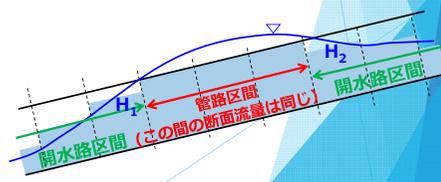
### ①スロットモデルによる計算

管の上部に**仮想スロット**を設定することにより、**管路区間も開水路流れとして取り扱うことができる**。したがって、開水路区間と管路区間を区別する必要がなくなり、全区間で開水路の一次元不定流の式を適用する手法である。スロット幅は、満管断面積と圧力波の波速(100m/s程度)によって設定される。



### ②開水路区間と管路区間を分離する計算手法

微小区間に分割した**水路の各部分が、開水路状態か管路状態かを逐次判定**し、管路区間はその上下流端の開水路区間の水位（自由水面の水位）を境界条件として、管路区間の流量計算を行う（管路区間では圧力波の波速を無限大と仮定する）。開水路区間は、開水路の一次元不定流の式を適用する。



# 「6.3 取放水設備の水位変動計算」

## 6.3.2 数値計算手法の選定

### 基礎方程式

#### 水路モデルの基礎方程式

<開水路流れ> 「①スロットモデル」と「②開水路管路分離モデルの開水路区間」

洪水流等に用いられる不定流の基礎方程式

- a) 連続式  $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$  (1)
- b) 運動方程式  $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left( \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} + \frac{1}{L} f \frac{|v| v}{2g} \right) = 0$  (2)

<管路流れ> 「②開水路管路分離モデルの管路区間」

式(1)の左辺第1項、式(2)の左辺第2項を0と仮定

- a) 連続式  $\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$  (3)
- b) 運動方程式  $\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left( \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} + \frac{1}{L} f \frac{|v| v}{2g} \right) = 0$  (4)

池モデル（立坑・水槽など）の基礎方程式 「①水槽内の水容積変化のみを考慮したモデルによる計算手法」の場合

$$A_p \frac{dH_p}{dt} = Q_s \quad (5)$$

t: 時間, Q: 流量, v: 流速,  
R: 径深  
x: 管底に沿った座標, z: 管底高  
H: 圧力水頭+位置水頭（管路の場合）  
位置水頭（開水路の場合）  
n: マニングの粗度係数  
A: 流水断面積, g: 重力加速度  
L: 管路の流れ方向の長さ  
f: 局所損失係数  
A<sub>p</sub>: 水槽平面積, H<sub>p</sub>: 水槽水位  
Q<sub>s</sub>: 水槽へ流入する流量の総和

「6.3 取放水設備の水位変動計算」

本編 p.105-p.106

6.3.3 取放水設備のモデル化と数値計算の実施

①モデル化に必要となる構造諸元

- 水路部：水路底高、水路勾配、水路長、水路断面形状（高さ、幅等）
- 水槽部：湛水エリアの断面形状（高さ、幅等）、高さ別の水面面積または水容積、水槽上部からの溢水高さ

取放水設備内の水位変動の大小に密接に関わってくるものが取放水設備の水理応答特性（固有周期）である。外海の津波による卓越周期と固有周期が同程度の場合は、設備内の水位変動が増幅される場合がある。

→ 設備の構造図面等に基づいた適切なモデル化が非常に重要となる。

設備の固有周期の式（単一水路と水槽の単純構造の場合）

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Al}{ga}}$$

ここに、T：固有周期(sec), A：水槽平面積(m<sup>2</sup>), a：満管断面積(m<sup>2</sup>)  
l：満管区間の水路長(m), g：重力加速度(m/s<sup>2</sup>), π：円周率

電力土木技術協会編(1995)より

②水路の摩擦損失および形状損失の考慮

- 水路の摩擦損失の式（マンギング則）

$$h_f = n^2 \cdot V^2 \frac{L}{R^{4/3}}$$

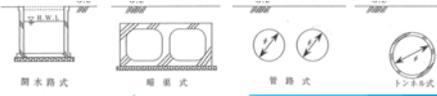
h<sub>f</sub>：摩擦損失水頭(m), n：マンギングの粗度係数(m<sup>-1/3</sup>s)

V：断面流速(m/s), L：水路長(m), R：径深(m)

- 曲がりや屈折等の形状損失

→電力土木技術協会編(1995)や土木学会編(1999)等に示される公式を適用し、モデル化に反映。

取水路の形式	断面流速	貝等の付着代	粗度係数
暗渠	0.8~2.2m/s	0~20cm (0.5, 10cmが多い)	0.014~0.027 (0.015, 0.020が多い)
管路	2.0~3.6m/s	0~10cm	0.015~0.018



「6.3 取放水設備の水位変動計算」

本編 p.107

6.3.3 取放水設備のモデル化と数値計算の実施

③越流堰等の水理構造物の取り扱い

→越流堰やゲート等の水理構造物を有する場合には、これらの水理特性をモデル化に含めた数値計算が必要。

④取放水流量、潮位条件等を考慮した水位変動計算の実施

- 取放水流量

→津波到達前の初期水位や水理応答特性に影響を及ぼす可能性がある。

- 潮位条件

→潮位によって設備内の水面高さが変化し、水理応答特性が変化する可能性があるため、取放水口の津波波形に潮位を考慮した計算が必要。

- 地殻変動量

→地殻変動の考慮に当たっては、対象設備に対して安全側の評価となるようにする等、評価方法に応じて適切な方法の選択が必要。

⑤取放水設備からの溢水を考慮した敷地への浸水解析

→敷地を含めた平面二次元モデル上の溢水箇所、取放水設備の水位変動計算で求まる溢水量を流量境界条件として付加（排水も考慮する場合は連成問題となる）。

「6.3 取放水設備の水位変動計算」

付属編 p.4-105 ~p.4-106

付属編4.7.2 例示計算条件

取放水設備構造モデル

以下の文字色は時系列グラフ表示地点を示す  
・水位表示地点、流量表示地点

モデルA

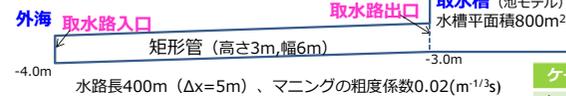
満管時の固有周期：189秒（約3分）



モデルB

（モデルAの管底高を7m上昇、管高さを3mに変更）

満管時の固有周期：268秒（約4.5分）

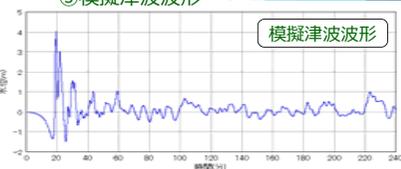


計算手法

- 水路部分：②開水路区間と管路区間を分離する計算手法
- 水槽部分：①水槽内の水容積変化のみを考慮したモデルによる計算手法

境界条件

- 外海水位データ（下記3種類）
  - ①周期30秒、片振幅2mの正弦波
  - ②周期20分、片振幅2mの正弦波
  - ③模擬津波波形



その他計算条件

- ・計算時間間隔0.05秒
- ・ポンプ取水量ゼロ

ケース	構造モデル	外海水位データ	流況
ケース1	モデルA	正弦波（周期30秒）	常時管路流れ
ケース2	モデルA	正弦波（周期20分）	常時管路流れ
ケース3	モデルA	模擬津波波形	常時管路流れ
ケース4	モデルB	模擬津波波形	開水路管路混在流

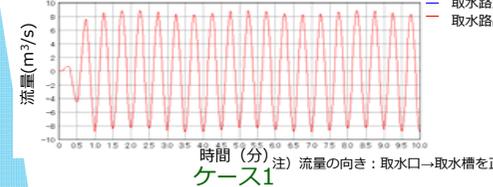
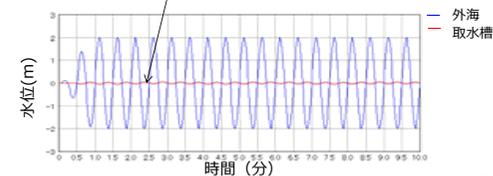
「6.3 取放水設備の水位変動計算」

付属編 p.4-106 ~p.4-107

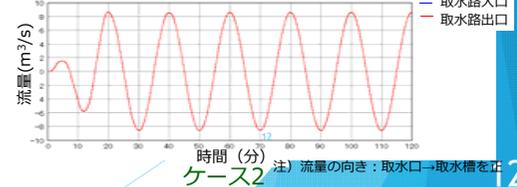
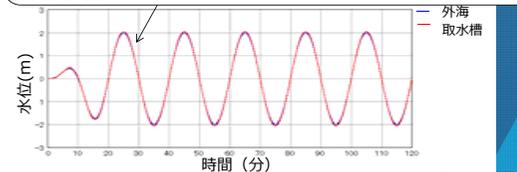
付属編4.7.3 例示計算結果

ケース1、ケース2（モデルA、外海：正弦波）

- ・外海水位：①周期30秒、片振幅2mの正弦波  
→設備の固有周期（=3分程度）よりも外海水位波形が短周期側となるほど、水槽の水位変動は小さくなる。



- ・外海水位：②周期20分、片振幅2mの正弦波  
→設備の固有周期（=3分程度）よりも外海水位波形が長周期になるほど、水槽の水位変動は外海水位と同程度となる。

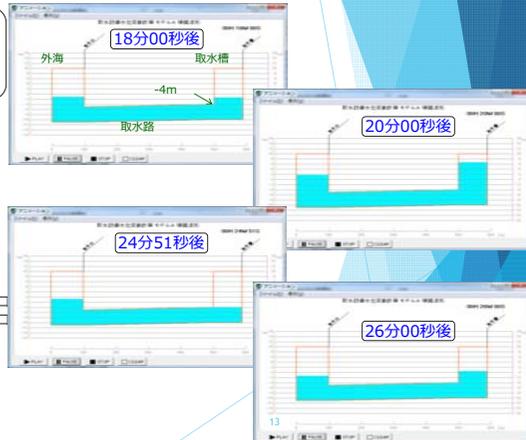
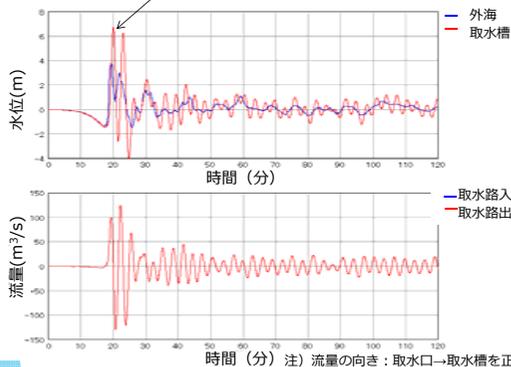


## 「6.3 取放水設備の水位変動計算」

### 付属編4.7.3 例示計算結果

ケース3 (モデルA、外海：模擬津波波形)

- ・外海水位：模擬津波波形
- 外海水位に含まれる周期3分程度 (=設備の固有周期)の成分が水槽側で増幅される。



付属編 p.4-106  
~p.4-107

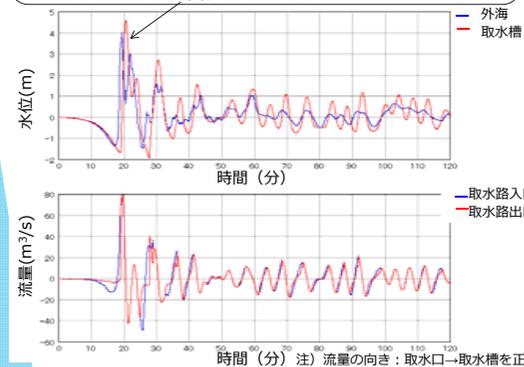
13

## 「6.3 取放水設備の水位変動計算」

### 付属編4.7.3 例示計算結果

ケース4 (モデルB、外海：模擬津波波形)

- ・外海水位：模擬津波波形
- 初期の引き波によって全区間が開水路状態となり、その後の急激な押し波によって管路内に段波が形成され、一気に満管状態となる。



付属編 p.4-106  
~p.4-107

14

## 「6.4 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定」の構成

### 6.4.1 計算モデルの適合度の評価

- (1) 評価基準
- (2) 地形再現の必要性
- (3) 痕跡地点と対比する計算遡上高の選択方法
- (4) 留意事項

### 6.4.2 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定

- (1) 一般
- (2) 文献で提案されている断層モデル
- (3) 津波インバージョン解析による断層モデルの策定
  - ① 非線形インバージョン手法
  - ② 線形インバージョン解析
  - ③ 浅水変形効果を考慮した線形インバージョン解析

15

51 / 60

### 6.4.1 計算モデルの適合度の評価

#### (1) 評価基準

- ▶ 相田(1977)による幾何平均Kおよび幾何標準偏差κ

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i \quad K_i = R_i / H_i \quad n : \text{地点数}$$

$$\log \kappa = \left[ \frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - n (\log K)^2 \right\} \right]^{1/2} \quad R_i : i\text{番目の地点での痕跡高}$$

$$H_i : i\text{番目の地点での計算値}$$

#### (2) 地形再現の必要性

- ▶ 津波痕跡地点周辺の地形は、可能な限り津波発生時の実地形を反映したモデル。
- ▶ 海岸付近の地形の変貌や、港湾・漁港の整備状況等を調査し、津波発生時の地形条件の設定を行うことが望ましい。

#### (3) 痕跡地点と対比する計算遡上高の選択方法

- ▶ 計算遡上高は痕跡地点の含まれる格子付近の値を用いることが原則。ただし、計算における津波遡上範囲が痕跡地点にまで及ばなかった場合やモデル化における地形表現上の制約がある場合、痕跡地点に近い計算遡上高で代用させてもよい。
- ▶ 遡上計算を実施していない場合においては、想定される痕跡地点への進入経路となる海岸線の格子周辺の値を用いる。また、痕跡高のデータ分布数に地域的な偏りがあり総合的な再現性が得られないと考えられる場合、これらの影響を排除する工夫を施すことが望ましい。

本編 p.108-p.109

16

原子力発電所の津波評価技術2016 講習会  
6.4.1 計算モデルの適合度の評価

本編 p.108-p.109

- (4) 留意事項 (付属編4.8.1および4.8.2参照)
- ▶ 痕跡高の信頼性が疑わしいものについては、出典等に立ち戻り痕跡高記録の精度の再検討を実施し、信頼性が低い場合には適合度の評価において除外することができる。
  - ▶ なお、津波の周期と検潮儀の応答特性等によっては、検潮記録は痕跡高よりも小さくなることもある。痕跡高と検潮記録の系統的な違いについて十分留意が必要。
  - ▶ 津波堆積物調査結果は過去の津波の最低限の高さもしくは遡上範囲の拡がりに係る情報であるため、計算結果はこれを上回る結果となっている必要がある。

津波痕跡高の信頼度の分類 (1960年チリ地震津波以降)

判断基準	
信頼度	A 信頼度大なるもの。痕跡明瞭にして、測量誤差最も小なるもの。
	B 信頼度中なるもの。痕跡不明につき聞き込みにより、周囲の状況から信頼ある水位を知るもの。測量誤差小。
	C 信頼度小なるもの。その他方法によって異常に波がはい上がったと思われるもの。あるいは測点が海辺より離れ測量誤差が大なるもの。
	D 信頼度極小なるもの。異常潮、台風などの影響で痕跡が重複し、不明瞭なもの。

日本の検潮井戸の構造 (Satake et al., 1988)



Figure 8. of Kajiuira, K. (1983) : Some statistics related to observed tsunami heights along the coast of Japan, Tsunamis-Their Science and Engineering, Iida, K. and T. Iwasaki (ed.), pp. 131-145.

検潮儀記録と遡上高の関係 (Kajiura, 1983)

Figure 1. of Satake, K., M. Okada, Ku. Abe (1988) : Tide gauge response to tsunamis: Measurements at 40 tide gauge stations in Japan, Journal of Marine Research, Vol. 46, pp. 557-571. <http://www.ingentaconnect.com/content/jmr/jmr/1988/00000046/00000003/art00005?crawler=true>

6.4.2 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定 (1)

本編 p.109-p.110

(1) 一般

- ▶ 広域のKおよびkについては、次の条件を目安とする (土木学会, 2002)。  
 $0.95 < K < 1.05$   
 $k < 1.45$
- ▶ 広域にわたる痕跡高分布の全体的傾向を説明できるようにすることが重要であるとともに、**評価地点周辺**で良好な再現性を持つことにも留意すべきである。

(2) 文献で提案されている断層モデル

- ▶ 断層モデル: 「佐藤編(1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック」
- ▶ 出典が古いものは、計算格子間隔が粗く精度の低い津波解析となっている場合もあるので、必要に応じて断層モデルのパラメータを修正。

6.4.2 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定 (2)

本編 p.110-p.111

(3) 津波インバージョン解析による断層モデルの策定

既往津波に対する適切な断層モデルが提案されていない場合、津波インバージョン解析によって断層モデルを策定する方法が有効。

① 非線形インバージョン手法 (中央防災会議, 2003)

ガウス-ニュートン法による非線形モデルの線形近似反復法であり、数値計算モデルとして非線形長波理論を用いることができるが、計算時間が膨大となる。中央防災会議(2003)はこの手法を応用して使用。

② 線形インバージョン解析 (Satake, 1987)

数値計算モデルを線形長波理論とした線形インバージョン解析は、計算が高速であり容易に計算できるが、非線形性を考慮できない。

③ 浅水変形効果を考慮した線形インバージョン解析 (安中ほか, 1999)

浅水変形効果を除去した観測値を目標値として、グリーン関数を用いたインバージョン解析の繰り返しに、非線形長波理論による順解析を組み合わせて非線形効果を考慮した波源モデルとして収束させていく手法である。

6.4.2 既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルの策定 (3)

本編 p.110-p.111

(3) 津波インバージョン解析による断層モデルの策定

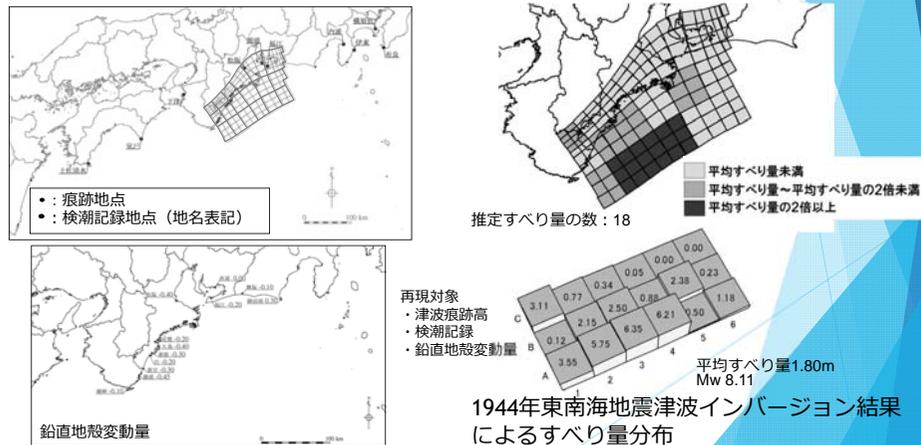
- ▶ 津波インバージョン解析で推定するパラメータは、**すべり量**とするのが一般的である。走向、傾斜角、すべり角等はあらかじめ地震学的知見等に基づき設定しておき、想定される波源域を包絡する領域を複数の小断層に分割し、個々の**小断層のすべり量分布**をインバージョン解析によって求める。
- ▶ 津波インバージョン解析の再現対象には、**津波検潮記録**や**津波痕跡高**、**地殻変動記録**等が用いられ、これらの観測値と計算値との残差二乗和が最小となるような断層すべり量を最適解として求める。
- ▶ 東北地方太平洋沖地震の津波インバージョン解析では、十分な観測記録が得られていることもあり、断層面上の**破壊伝播**や**タイムラグ**を考慮した**インバージョン解析**を行った事例として、Satake et al.(2013)、杉野ほか(2013)、Takao et al.(2012)等が報告されている。

原子力発電所の津波評価技術2016 講習会  
 「6.4 既往津波の痕跡高を説明できる  
 断層モデルの策定」

付属編4.8.3 津波インバージョン解析

▶ 1944年東南海地震津波を対象としたインバージョン解析の事例

付属編 p.4-115



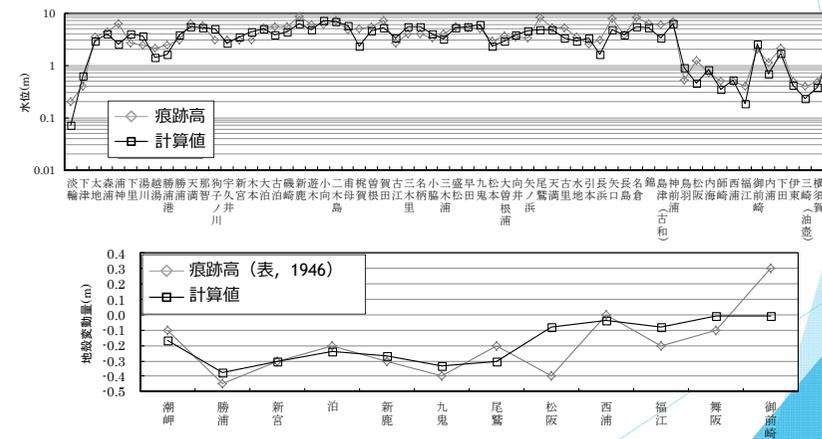
21

東京2016/9/30 大阪2016/10/14

「6.4 既往津波の痕跡高を説明できる  
 断層モデルの策定」

付属編4.8.3 津波インバージョン解析

▶ 再現結果



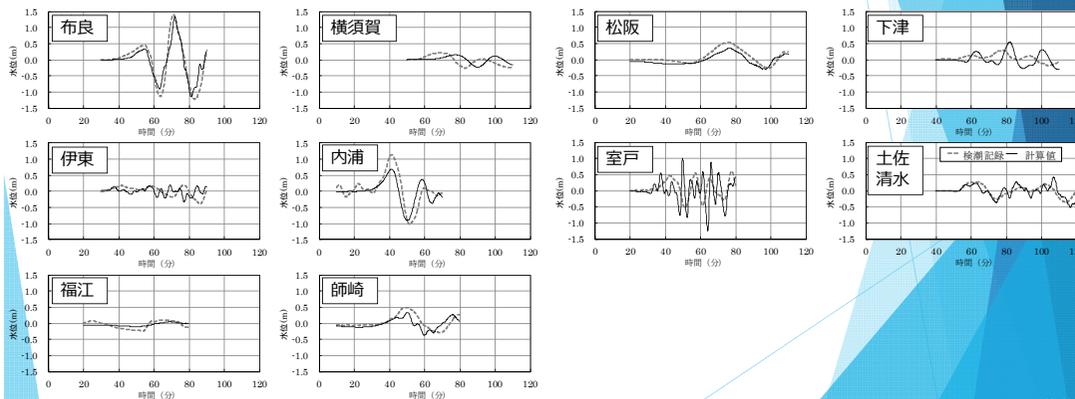
22

「6.4 既往津波の痕跡高を説明できる  
 断層モデルの策定」

付属編4.8.3 津波インバージョン解析

▶ 再現結果

付属編 p.4-116



23

「6.5 波力評価」の構成

6.5.1 基本的考え方

6.5.2 波力の算定

- (1) 波力の算定に用いる水理量
- (2) 波圧の種類
- (3) ソリトン分裂の有無
- (4) 対象構造物の形状

6.5.3 波力評価式の特徴

6.5.3.1 海中構造物に作用する津波波力

- (1) 直立型の海中構造物に作用する津波波力評価式の分類
- (2) 傾斜型の海中構造物に作用する津波波力評価式の分類

6.5.3.2 陸上構造物に作用する津波波力

- (1) 陸上構造物に作用する津波波力評価式の分類
- (2) 遡上計算における対象構造物の有無と評価式の適用方法

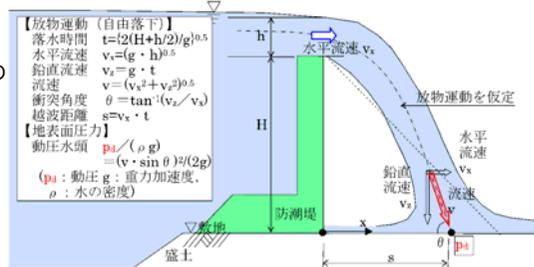
24

「6.5 波力評価」

6.5.1 基本的考え方

- ▶ 防潮堤、建屋等に津波が到達する場合、その施設へ津波が及ぼす影響を把握するために、津波波力を適切に算定することが必要。
- ▶ 構造物の設置位置（海中、陸上）を踏まえたうえで、津波水位、浸水深、流速の時間変化等の情報に基づき、適切な評価式を用いて波力を算定。
- ▶ 既往の評価式の適用が困難と考えられる場合等には、水理模型実験や三次元数値解析を行うことがある。
- ▶ 構造物近傍の地盤に作用する波力の研究事例（レビュー編2.1）

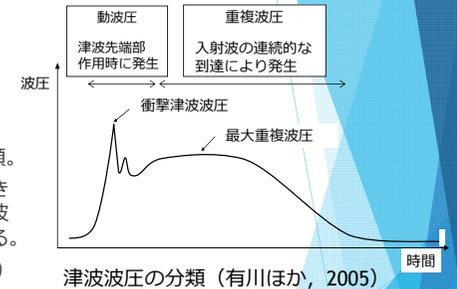
大村ほか(2014)による  
越流水の地表面圧力の  
簡易計算



本編 p.112

「6.5 波力評価」  
6.5.2 波力の算定

- (1) 波力の算定に用いる水理量
  - ▶ 水位（海中構造物の場合）もしくは浸水深（陸上構造物の場合）
  - ▶ 水位もしくは浸水深に加え、流速
- (2) 波圧の種類
  - ▶ 有川ほか(2005)は、直立壁に作用する津波波圧を分類。
  - ▶ 評価式には、時系列的に動波圧と重複波圧が評価できるもの、最大重複波圧のみを対象としているもの、波圧の種類に関係なく最大波圧を評価するもの等がある。
  - ▶ 傾斜型の構造物に作用する波圧の分類（付属編8.1.1）
- (3) ソリトン分裂の有無
  - ▶ ソリトン分裂の発生が予想される場合にはそれが考慮されている評価式を用いる。
- (4) 対象構造物の形状
  - ▶ 建屋のような三次元構造物と、防潮壁のような二次元構造物（線の構造物）に分類。



津波波圧の分類（有川ほか，2005）

本編 p.112-p.113

「6.5 波力評価」

6.5.3 波力評価式の特徴（1）

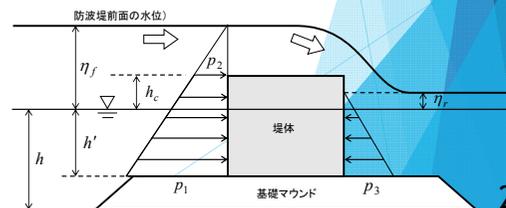
- ① 海中構造物に作用する津波波力
  - ▶ 直立型の海中構造物に作用する津波波力評価式（付属編8.1.1）「防波堤の耐津波設計ガイドライン」（国土交通省，2013）
  - ▶ 傾斜型の海中構造物に作用する津波波力評価式（付属編8.1.2）福井ほか(1962)，水谷・今村(2000)，水谷・今村(2002)

② 陸上構造物に作用する津波波力

- ▶ 陸上構造物に作用する津波波力評価式の分類
- ▶ 遡上計算における対象構造物の有無と評価式の適用方法

■ 波力評価式の妥当性確認事例  
（付属編8.1.3）

国土交通省(2013)の評価式  
（静水圧差による式）の考え方



本編 p.114-p.116

「6.5 波力評価」

6.5.3 波力評価式の特徴（2）

① 海中構造物に作用する津波波力

▶ 直立型の海中構造物に作用する津波波力評価式の分類

津波波力評価式	津波計算における対象構造物の有無	波力算定に用いる水理量	波圧の種類	ソリトン分裂の有無	対象構造物の形状	越流の有無
池野ほか(2005)	構造物あり	最大津波水位	衝撃津波波圧	分裂	二次元構造物	越流・非越流
谷本ほか(1984)	構造物あり	最大津波水位	衝撃津波波圧	非分裂	二次元構造物	非越流
国土交通省(2013)	構造物あり	最大水位差	最大重複波圧	非分裂	二次元構造物	越流

▶ 傾斜型の海中構造物に作用する津波波力評価式の分類

津波波力評価式	津波計算における対象構造物の有無	波力算定に用いる水理量	波圧の種類	ソリトン分裂の有無	対象構造物の形状	越流の有無
福井ほか(1962) 水谷・今村(2000) 水谷・今村(2002)	構造物なし	入射波高・波速	段波波圧・衝撃段波波圧	非分裂	二次元構造物	非越流
水谷・今村(2000)	構造物なし	入射波高・波速	遡上波圧	非分裂	二次元構造物	非越流
水谷・今村(2000)	構造物なし	入射波高・波速	重複衝撃波圧・衝撃重複衝撃波圧	非分裂	二次元構造物	非越流
水谷・今村(2002)	構造物あり	天端最大流速	越流波圧・衝撃越流波圧	非分裂	二次元構造物	越流

※水谷・今村(2000)、水谷・今村(2002)による分類

本編 p.114

「6.5 波力評価」

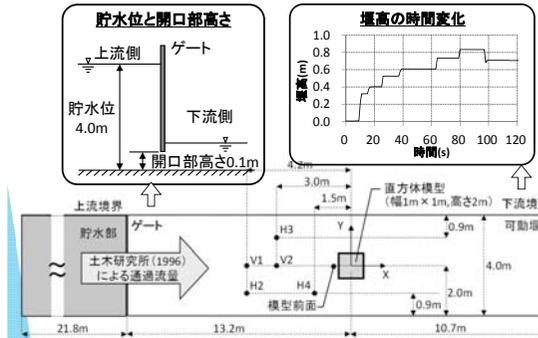
6.5.3 波力評価式の特徴 (3)

②陸上構造物に作用する津波波力の分類

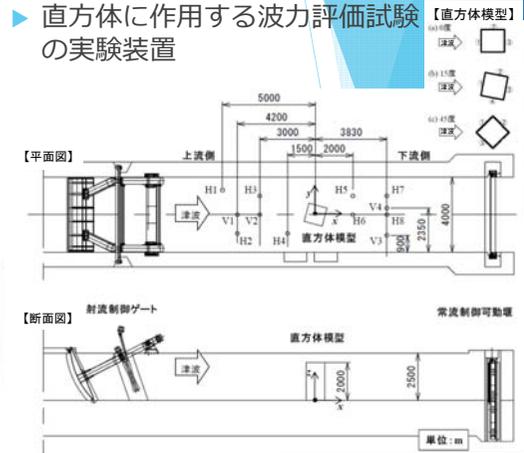
津波波力評価式	津波計算における対象構造物の有無	波力算定に用いる水理量	波圧の種類	ソリトン分裂の有無	対象構造物の形状
朝倉ほか(2000)	構造物なし	最大浸水深	衝撃津波波圧・最大重複波圧	分裂・非分裂	二次元構造物
池野ほか(2006)		最大浸水深	衝撃津波波圧・最大重複波圧	分裂・非分裂	二次元構造物 三次元構造物
内閣府(2005)		最大浸水深	衝撃津波波圧・最大重複波圧	非分裂	三次元構造物
国土交通省(2012)		最大浸水深	衝撃津波波圧・最大重複波圧	非分裂	三次元構造物
消防庁(2009)		最大浸水深	衝撃津波波圧・最大重複波圧	非分裂	二次元構造物 (防油堤)
Asakura et al. (2002)		最大浸水深・流速	衝撃津波波圧・最大重複波圧	非分裂	二次元構造物 三次元構造物
榑山(2012)		最大浸水深・流速	衝撃津波波圧・最大重複波圧	非分裂	二次元構造物
大森ほか(2000)		浸水深・流速	動波圧・重複波圧(時系列)	非分裂	三次元構造物
飯塚・松尾(2000)		最大浸水深	最大重複波圧	非分裂	三次元構造物
有光ほか(2012)		構造物あり	浸水深・流速	動波圧・重複波圧(時系列)	非分裂
木原ほか(2012)	浸水深・流速		重複波圧(時系列)	非分裂	三次元構造物
高島ほか(2013)	浸水深・流速		重複波圧(時系列)	非分裂	二次元構造物

付属編8.1.3.4 平面二次元モデルの計算結果を用いた波力算定(1)

▶ 平面二次元モデルの数値実験水路

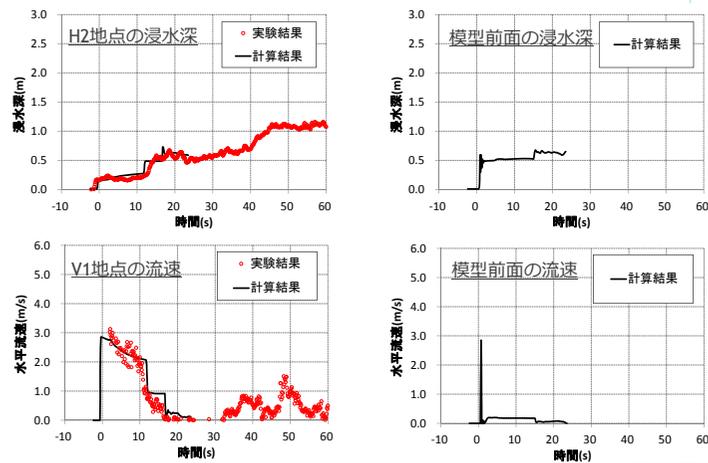


▶ 直方体に作用する波力評価試験の実験装置



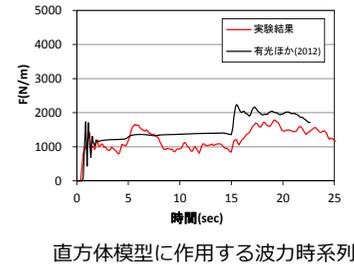
付属編8.1.3.4 平面二次元モデルの計算結果を用いた波力算定(2)

▶ 平面二次元計算結果

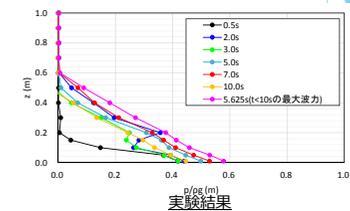


付属編8.1.3.4 平面二次元モデルの計算結果を用いた波力算定(3)

▶ 波力算定結果



直方体模型に作用する波力時系列



有光ほか(2012)の評価式による算定結果  
直方体模型に作用する波圧分布

## 「6.6 砂移動計算」の構成

- 6.6.1 基本的考え方
- 6.6.2 数値解析モデルの選定
  - ・底面せん断力の評価
  - ・流砂量式
  - ・巻上量算定式および沈降量算定式
- 6.6.3 計算条件および諸係数
  - (1) 初期砂層分布・堆積厚さ
  - (3) 浮遊砂上限濃度
  - (4) 空隙率
  - (5) 沈降速度
  - (6) 計算格子間隔

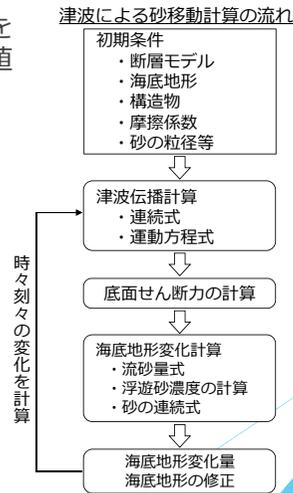
## 「6.6 砂移動計算」 6.6.1 基本的考え方

- ▶ 津波による砂の移動が原子力施設に与える影響
  - ✓ 取水口前面への砂の堆積による取水機能の低下
  - ✓ 防波堤等構造物周りの砂の洗掘による構造物の倒壊・流失
- ▶ 適切な海底地形変化予測モデルを用いて砂移動計算を実施し、取水口前面での砂の堆積、構造物周りでの洗掘を評価する。

## 「6.6 砂移動計算」 6.6.2 数値解析モデルの選定

- ▶ 津波による砂の侵食・堆積・洗掘をより精度良く計算できる適切な数値解析モデルを選定。

- ・底面せん断力の評価
- ・流砂量式
- ・巻上量算定式および沈降量算定式



## 「6.6 砂移動計算」 6.6.2 数値解析モデルの選定

### 各砂移動計算手法の概要

	藤井ほか(1998)の手法	高橋ほか(1999)(2011)の手法	池野ほか(2009)の手法
流砂量連続式	$\frac{\partial Z}{\partial t} + a \left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{E-S}{\sigma(1-\lambda)} = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{E-S}{\sigma} \right) = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{\partial Q}{\partial x} + E-S \right) = 0$
浮遊砂濃度連続式	$\frac{\partial C}{\partial t} + a \left( \frac{\partial UC}{\partial x} \right) - \frac{E-S}{D} = 0$	$\frac{\partial(C,D)}{\partial t} + \frac{\partial(MC_s)}{\partial x} - \frac{E-S}{\sigma} = 0$	$\frac{\partial \bar{C}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{C}M}{\partial x} - E+S = 0$
流砂量式	小林ほか(1996)の実験式 $Q = 80d^{2.5} \sqrt{sgd}$	高橋ほか(1999)の実験式 $Q = 21r^{2.5} \sqrt{sgd}$ 高橋ほか(2011)の実験式 $Q = 5.6r^{2.5} \sqrt{sgd}$ ( $d = 0.166mm$ ) $Q = 4.0r^{2.5} \sqrt{sgd}$ ( $d = 0.267mm$ ) $Q = 2.6r^{2.5} \sqrt{sgd}$ ( $d = 0.394mm$ )	芦田ほか(1972)の実験式 $\frac{Q}{\sqrt{sgd}} = 17r^{2.5} (1-\tau_r/r)  -(\tau_r/r)^{0.2} $
巻上量算定式	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_s \left[ 1 - \exp\left(-\frac{wD}{k_s}\right) \right]}$	高橋ほか(1999)の実験式 $E = 0.012r^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$ 高橋ほか(2011)の実験式 $E = 7.0 \times 10^{-3} r^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$ ( $d = 0.166mm$ ) $E = 4.4 \times 10^{-3} r^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$ ( $d = 0.267mm$ ) $E = 1.6 \times 10^{-3} r^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$ ( $d = 0.394mm$ )	$\frac{E}{\sqrt{sgd}} = a(v^2 / sgd)^{0.2} \left\{ w / \sqrt{sgd} \right\}^{0.4} (\tau_r/\sigma)^{0.2}$ ※係数aは既往の実験結果より0.1~0.2の範囲
沈降量算定式	$S = wC_s$	$S = wC_s \cdot \sigma$	$S = wC_s$
摩擦速度算定式	log-wake 則を鉛直方向に積分した式より算出	マニング則より算出 $u_* = \sqrt{gn^2 U^2 / D^{1/3}}$	log-wake 則を鉛直方向に積分した式より算出

「6.6 砂移動計算」

6.6.3 計算条件および諸係数

- (1)初期砂層分布・堆積厚さ
  - ▶ 平面的な砂層分布を確認。
  - ▶ 堆積厚さの情報が得られる場合には、侵食・洗掘限界厚さを設定。
  - ▶ 堆積厚さの情報が得られない場合には、侵食・洗掘限界厚さを無限厚さと設定することもできる。
- (2)粒径・密度 : 砂の中央粒径と密度を設定
- (3)浮遊砂上限濃度
  - ▶ 手法の特性を考慮し、既往研究の結果に基づいて、適切に設定。(付属編8.2.4.3)
  - ▶ 実海域における検証が行われており、藤田ほか(2010)は、浮遊砂上限濃度1~2%の場合に再現性が良好となる結果を得ている。
  - ▶ 今井ほか(2015)は、飽和浮遊砂濃度が水の乱れに追従して変化することを考慮するため、飽和浮遊砂濃度を流速の関数として定式化している。
- (4)空隙率 : 砂の空隙率は一般的な値から設定。高橋ほか(1992)では0.4。
- (5)沈降速度 : Rubey(1933)等から算定
- (6)計算格子間隔 : 津波流速の再現が可能となるよう、適切な計算格子間隔を設定

「6.6 砂移動計算」

付属編8.2.4.3 浮遊砂上限濃度に関する既往研究

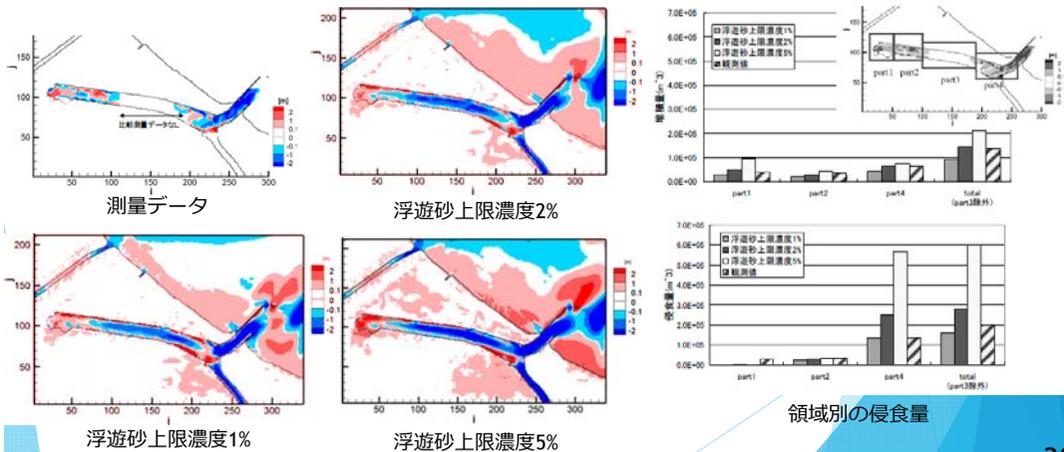
文献	実規模検証	砂粒径	計算格子	浮遊砂上限濃度	浮遊砂上限濃度に関する記載
高橋ほか(1999)	気仙沼湾※1	0.2mm	25m	-	-
玉田ほか(2009)	気仙沼湾※1	0.001m m~1mm	25m,5m	1%, 5%	詳細格子計算の結果、浮遊砂上限濃度5%では侵食深を過大評価
藤田ほか(2010)	八戸港※1	0.26mm	10.3m	1%, 2%, 5%	・浮遊砂上限濃度5%は過大評価 ・浮遊砂上限濃度1~2%の場合の再現性が良好
近藤ほか(2012)	宮古港※2	0.08mm	10m	1%	・全体的な土砂移動傾向は良く一致 ・最大洗掘深や断面地形も定量的に概ね良い一致
森下ほか(2014)	気仙沼湾※1	0.3mm	10m	1% 可変	$\alpha \times \sqrt{U^2 + V^2}$ U, Vは断面平均流速(m/s) αは流速10m/sで浮遊砂上限濃度が0.1となるよう0.01と設定
Sugawara and Takahashi(2014)	仙台平野 名取川周辺※2	0.25mm	-	1%	高橋ほか(2011)による浮遊砂上限濃度を1%とした設定で海岸付近と砂州の陸上部の侵食について、観測結果を非常によく表現
Sugawara et al.(2014)	仙台平野※2	0.166mm 0.267mm 0.394mm	最小5m	1%, 2%, 4%	高橋ほか(2011)により粒径や浮遊砂上限濃度等を変えたパラメータスタディを実施し、陸上遡上域を含め、上限2%で地形変化を良好に再現
山下ほか(2015)	陸前高田市 広田湾※2	0.267mm	-	可変	・高橋ほか(2011)により、地形変化量や海域における堆積土砂の分布傾向を良好に再現 ・高橋ほか(1999)では、砂の巻き上げ量が著しく過大で地形変化の再現が困難(学会口頭発表後のやりとりにて言及)
今井ほか(2015)	北上川 河口部※2	0.166mm 0.267mm 0.394mm	最小5m	可変	高橋ほか(2011)の手法に対して浮遊砂上限濃度を流速と水深に応じた関数で設定した解析モデルにより、地形変化を良好に再現

※1: 1960年チリ津波による地形変化, ※2: 2011年東北地方太平洋沖地震津波による地形変化

「6.6 砂移動計算」

付属編8.2.2 計算事例~八戸港

▶ 1960年チリ津波時の八戸港の海底地形変化量計算



「6.7 漂流物評価」の構成

6.7.1 漂流物の挙動

6.7.1.1 基本的考え方

6.7.1.2 漂流物解析手法に関する既往研究事例

6.7.2 漂流物による衝突力の算定

6.7.2.1 漂流物・被衝突物の選定

6.7.2.2 衝突力の算定方法

6.7.2.3 衝突力算定式の選定

「6.7 漂流物評価」

6.7.1 漂流物の挙動

6.7.1.1 基本的考え方

- ▶ 津波により発生する漂流物に関して、構築物・機器等への衝突や緊急時の取水経路等を閉塞する可能性が考えられる場合には、津波時の漂流物挙動について把握することが必要。
- ▶ 津波時の漂流物挙動については、非線形長波理論に基づいた平面二次元モデルから求まる浸水深、流速、流向等の時間変動の情報に基づき、適切に設定することを基本。
- ▶ 近年、津波の挙動と漂流物の挙動（浮遊、衝突、水没等）を同時に解析する手法の研究が進められており、これらの解析手法の適用性を確認したうえで用いることがある。

本編 p.121

「6.7 漂流物評価」

6.7.1 漂流物の挙動

6.7.1.2 漂流物解析手法に関する既往研究事例

レビュー編2.2 漂流物解析手法に関する既往解析事例(1)

文献名	対象物	解析モデル	解析方法の特徴	対象津波
後藤(1983)	木材	平面二次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 流木の水平方向の運動を、慣性、水流の圧力勾配、付加質量、流水抵抗、拡散で表現</li> <li>・ 拡散を除く4種類の力の釣り合いを決定論的に扱い、拡散は確率論的に扱う</li> <li>・ 付加質量係数<math>C_M = 1.78</math>、抵抗係数<math>C_D</math>はレイノルズ数とフルード数の関数で設定、拡散係数<math>K(u, h) = 0.032(u \cdot h)</math> (<math>u</math>: 摩擦速度, <math>h</math>: 全水深)</li> <li>・ 浅水理論による津波解析の水位と流速を使用</li> </ul>	十勝沖地震津波 (図2.2-1)
藤井ほか(2005)	船舶	平面二次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 船舶を個別要素法 (DEM) によりモデル化。船舶の挙動を並進および回転に関する6自由度の運動方程式により計算</li> <li>・ 漂流計算時の流体力はモリソン式を適用 (付加質量係数<math>C_M = 1.0</math>, 抵抗係数<math>C_D = 1.0</math>)</li> <li>・ 浅水理論による津波解析の水位と流速を使用</li> </ul>	模型実験との比較 (図2.2-2)
小林ほか(2005)	船舶	平面二次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 津波の流況計算は浅水理論による</li> <li>・ 船舶の漂流に関する運動方程式は主たる運動が前後、左右、ヨー方向 (鉛直軸回りの回転) のみとして定式化し、船体重心を原点とする船体移動座標系を使用</li> <li>・ 船前後方向の船体抵抗係数<math>C_{Dx}</math>は、シェンヘル式に基づき、船左右方向の船体抵抗係数<math>C_{Dy}</math>は浅水効果の影響を考慮して類似船形の実験値などを参考に設定</li> </ul>	中央防災会議 東南海・南海地震津波 (図2.2-3)

レビュー編p.2-7

「6.7 漂流物評価」

6.7.1 漂流物の挙動

6.7.1.2 漂流物解析手法に関する既往研究事例

レビュー編2.2 漂流物解析手法に関する既往解析事例(2)

文献名	対象物	解析モデル	解析方法の特徴	対象津波
本多ほか(2009)	船舶	平面二次元モデル (臨海部の一部に三次元モデルを適用)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 津波の流況計算は高潮津波シミュレータ (STOC) (富田・柿沼, 2005) による</li> <li>・ 船舶の漂流に関する運動方程式は、主たる運動が前後、左右、ヨー方向のみと仮定して定式化し、船体重心を原点とする船体移動座標系を使用</li> <li>・ 船舶の漂流計算に必要な流体力は、モリソン式を拡張したものに基づく (慣性力係数<math>C_M = 2.0</math>, 船体の抗力係数<math>C_{Dx} \cdot C_{Dy}</math>は建物に作用する風圧分布を参考)</li> <li>・ 漂流物と地面や建物との衝突および漂流物相互の衝突を考慮</li> </ul>	漂流物の運動や衝突に関するテスト計算および実地形への適用 (図2.2-4)
橋本ほか(2009)	船舶	平面二次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 津波の流況計算は浅水理論によるスタッガード・リーブフロッグ差分法で解く</li> <li>・ 船舶の漂流に関する運動方程式は、主たる運動が前後、左右、ヨー方向のみと仮定して定式化し、船体重心を原点とする船体移動座標系を使用</li> <li>・ 船体抵抗係数は小林ほか(2005)と同様の設定方法</li> <li>・ 船舶の回頭運動は船体を複数のセグメントに分割してz軸回りのモーメントを考慮することで表現し、海底摩擦による船舶の座礁も考慮</li> </ul>	2004年 インド洋津波 (図2.2-5)
橋本ほか(2010)	船舶	平面二次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 橋本ほか(2009)の改訂版</li> <li>・ 漂流船舶に作用する流体力は、モリソン式に基づく式で表現し、慣性力係数<math>C_M = C_{Mx} = 1.0</math>, 船体抵抗係数<math>C_{Dx}, C_{Dy}</math>は橋本ほか(2009)と同様の設定方法とする。</li> <li>・ 船体を複数セグメントに分割し、漂流船舶に働く回頭モーメントと、回転によって生じる抵抗モーメントを定式化し、運動方程式に適用</li> <li>・ 漂流船舶と陸上構築物との衝突後の挙動を新たに定式化</li> </ul>	藤井ほか(2005)の模型実験との比較 (図2.2-6)

レビュー編p.2-8

「6.7 漂流物評価」

6.7.1 漂流物の挙動

6.7.1.2 漂流物解析手法に関する既往研究事例

レビュー編2.2 漂流物解析手法に関する既往解析事例(3)

文献名	対象物	解析モデル	解析方法の特徴	対象津波
藤井・今村(2010)	船舶	平面二次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 藤井ほか(2005)の拡張個別要素法 (EDEM) による解析結果を使用</li> <li>・ 漂流挙動実験結果を考慮し、EDEMによる決定論的な位置と拡散による変動量の和として評価 (砕波前後の無次元拡散係数をそれぞれ0.001, 0.8と設定)</li> <li>・ 藤井ほか(2005)の結果における構造物への衝突時間が遅れる要因は、津波波力算定時のモリソン式中の係数が小さいことが考えられる。</li> </ul>	藤井ほか(2005)の模型実験との比較 (図2.2-7, 図2.2-8)
川崎ほか(2006)	矩形物体	断面二次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 二次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-2Dを使用</li> <li>・ 三次元固気液多相乱流数値モデルDOLPHIN-3Dを使用</li> <li>・ 乱流モデルはSmagorinskyモデルに基づくLESを採用</li> </ul>	模型実験との比較 (図2.2-9)
川崎・榎田(2007)	矩形物体	三次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 複数剛体の運動解析が可能 (個々の剛体に対する固相密度関数を導入)</li> <li>・ 乱流量をダイナミック二変数混合モデルDTMに基づくLESモデルで評価</li> </ul>	川崎ほか(2006)の模型実験との比較 (図2.2-10)
米山ほか(2008)	木材角柱	断面二次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水面を有する流動現象を精度良く再現するために、水面挙動の予測にVOF法、境界形状の取り扱いにFAVOR法を用いた非圧縮流体解析手法を使用</li> <li>・ 運動方程式はレイノルズ方程式とし、流体体積の移流方程式はVOF法に基づいて離散化し、移流はドナーアークセブタ法により実施</li> <li>・ 漂流物を剛体の移動境界として取り扱い、漂流物の移動は、まず漂流物重心の移動速度と回転速度を計算し、それに基づいて漂流物の位置と回転角を計算</li> </ul>	池野ほか(2003)の模型実験との比較

レビュー編p.2-9

「6.7 漂流物評価」

レビュー編p.2-9

6.7.1 漂流物の挙動  
6.7.1.2 漂流物解析手法に関する既往研究事例  
レビュー編2.2 漂流物解析手法に関する既往解析事例(4)

文献名	対象物	解析モデル	解析方法の特徴	対象津波
米山・永島 (2009)	木材 (円柱 および 角柱)	三次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・並進3自由度および回転3自由度を考慮した三次元数値解析手法を開発</li> <li>・流体の基礎方程式は米山ほか(2008)と同様</li> <li>・剛体運動は剛体の重心を原点とした慣性主軸座標系を設定し、漂流物重心の運動方程式と、漂流物重心回りの回転運動の運動方程式を定式化</li> <li>・漂流物が受ける流体力は圧力(流体内部の場合と水面を含む場合で区別)と粘着力を考慮し、漂流物の壁面への衝突も考慮</li> </ul>	池野ほか(2003)の模型実験との比較 (図2.2-11)
後藤ほか (2009)	コンテナ	三次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・津波によるコンテナの挙動および壁面への衝突力を検討するために、粒子法による三次元シミュレーションを実施</li> <li>・流体解析はMPS法を用い、運動方程式はナビエ・ストークス式を使用</li> <li>・コンテナは複数の固相粒子を剛体連結モデルによって構成し、コンテナに作用する流体力は剛体構成粒子を流体粒子と一緒に粒子間相互作用モデルに組み込むことで計算(固相粒子間の衝突力はバネ-ダッシュポットモデルを適用して計算)</li> </ul>	有川ほか(2007)の模型実験との比較 (図2.2-12)
池田・有川 (2014)	コンテナ	三次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・有川ほか(2011)による固気液三層モデル(CS-2DEM)を用いて、コンテナの漂流挙動を計算</li> <li>・固気液三層モデル(CS-2DEM)は、非圧縮性の気液二相流体に対応可能となるようCADMAS-SURF/3Dに改良を加えたもの(気液二相モデル)に個別要素法(DEM)を連成させている</li> </ul>	模型実験との比較 (図2.2-13)

「6.7 漂流物評価」

本編 p.121

6.7.2 漂流物による衝突力の算定  
6.7.2.1 漂流物・被衝突物の選定

- ▶ 本編3.5で示した津波漂流物に関する調査の結果および津波水位、流速等の水理量に基づき漂流物化する物体を選定する。
- ▶ 衝突力の算定に被衝突物の諸元が必要となる場合は、評価対象とする被衝突物の選定も併せて行う。

「6.7 漂流物評価」

本編 p.122  
付属編p.8-76

6.7.2 漂流物による衝突力の算定  
6.7.2.2 衝突力の算定方法

漂流物の衝突力算定式

- ▶ 漂流物の諸元および漂流速度から適切な衝突力算定式を用いて算定。
- ▶ 漂流速度については、非線形長波理論に基づく数値解析結果から得られる水理量(津波水位、浸水深、流速、流向等)を基に適切に設定。

	漂流物の種類	算定式
松富ほか (1999)	木材 (円柱)	$F_w (\gamma D^2 L) = (1.2-1.5) C_{uw} \left[ \frac{1}{2} \rho_w (\gamma D)^2 \right] (\sigma_w / \gamma L)^{0.4}$ <p><math>F_w</math>: 衝突力, <math>\gamma</math>: 流木の単位体積重量, <math>D</math>: 木材の直径, <math>L</math>: 木材の長さ, <math>g</math>: 重力加速度, <math>C_{uw}</math>: 見かけの質量係数(木の縦向きも加味), <math>\rho_w</math>: 衝突速度, <math>\sigma_w</math>: 木材の降伏応力</p>
池野・田中 (2003)	木材 (円柱, 角柱, 柱状体)	$F_w (\gamma g M) = S \cdot C_{uw} \cdot \gamma \cdot g \cdot (g D^2 L^2)^{0.5}$ <p><math>F_w</math>: 衝突力, <math>g</math>: 重力加速度, <math>M</math>: 漂流物の重量, <math>S</math>: 係数(<math>=0</math>), <math>C_{uw}</math>: 付加質量係数, <math>F_w</math>: 漂流物移動速度, <math>D</math>: 漂流物の直径(角柱の場合は正方形断面辺長), <math>L</math>: 漂流物の長さ</p>
日本道路協会 (2012)	流木等	$P = 0.1 W v$ <p><math>P</math>: 衝突力, <math>W</math>: 漂流物の重量, <math>v</math>: 表面流速</p>
FEMA (2012)	コンテナ	$F_c = 1.3 a_{max} \sqrt{k m_c (1+c)}$ <p><math>F_c</math>: 衝突力, <math>c</math>: 付加質量係数, <math>a_{max}</math>: 漂流物を運ぶ流体の最大流速, <math>m_c</math>: 漂流物の質量と有効軸半径</p>
水谷ほか (2005)	コンテナ	$F_c = 2 \rho_w B_d^2 \left( \frac{W v}{g d} \right) \cdot F_c \approx C_c = 2 \sqrt{g \rho_w}$ <p><math>F_c</math>: 衝突力, <math>g</math>: 重力加速度, <math>W</math>: コンテナの重量, <math>B_d</math>: コンテナ幅, <math>a_m</math>: 波上流の最大水位, <math>d</math>: 衝突時間, <math>\rho_w</math>: 水の密度, <math>F_c</math>: コンテナの漂流速度, <math>C_c</math>: 津波の懸上流速</p>
有川・警崎 (2010)	コンテナ, 流木	$F = \gamma_w x^2 \left( \frac{d}{m} \right)^{1/2} v^2 \quad x = \frac{4d}{3c} k + \frac{1}{3} \quad k = \frac{(1-U^2)}{2E} \quad \text{筋} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ <p><math>d</math>: 衝突面半径の1/2(ここではコンテナ衝突面の縦向き長の平均の1/4), <math>E</math>: コントラクトのヤング率, <math>U</math>: ボアソン比, <math>m</math>: 質量, <math>v</math>: 衝突速度, <math>\gamma_w</math>: 塑性によるエネルギー減衰効果, 符号1,2は衝突体と被衝突体を表す</p>
海洋学調査会 (1978)	船舶	$F = \frac{W v^2}{4 g D}$ <p><math>F</math>: 衝突力, <math>W</math>: 衝突船舶の重量, <math>v</math>: 衝突速度, <math>D</math>: 衝突船舶の停止距離</p>

「6.7 漂流物評価」

本編 p.122

6.7.2 漂流物による衝突力の算定  
6.7.2.3 衝突力算定式の選定

- ▶ 漂流物の衝突力については、流木やコンテナを対象とした各種算定式が提案されているものの、現状では十分に解明されていない点が多く、検証・実用例が限定的であり、定量的評価手法が確立されていない。
- ▶ したがって、漂流物による衝突力の算定にあたっては、漂流物の種類や漂流・衝突の状態等の各算定式の前提条件を吟味したうえで用いることが望ましい。

「6.7 漂流物評価」

6.7.2 漂流物による衝突力の算定

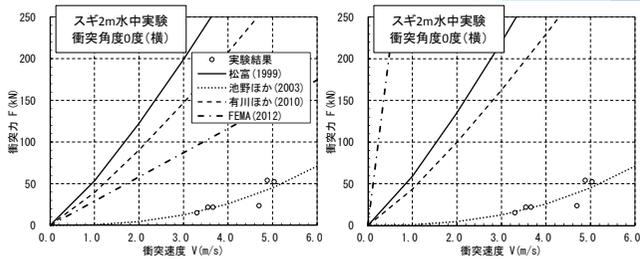
6.7.2.3 衝突力算定式の選定

付属編p.8-81,  
p.8-87

丸太漂流衝突試験



実験状況



(1) 既往の設定値を用いた場合 (2) 計測した物性値を用いた場合

衝突力算定式と実験結果の比較 (丸太水中実験)

※実験結果は衝突角度0度(横)による衝突力であるのに対し、松富(1999)、有川ほか(2010)の算定式は衝突角度90度(縦)を対象とした算定式であること、FEMA(2012)の有効軸剛性には衝突角度90度(縦)の値を用いていることに留意する必要がある。