2011/11/2 原子力土木委員会 津波成果報告会

#### 津波評価技術の概要

# 原子力土木委員会幹事 松山

概要

- これまでの津波の想定に関する小史
- ・「原子力発電所の津波評価技術」について
  - 東北地方太平洋沖地震津波の概要
  - 評価技術の概要と課題
- 津波計算手法の適用
- ・ 断層想定の拡張例
- 確率論的津波評価の概要
- 今後の課題

#### 日本の津波

# □世界有数の津波被災国 □世界で最も津波記録が多い > 長い歴史の中で200個以上の津波記録 > 1300年以上の歴史





→<u>インドネシア, チリ</u>, ペルー, PNG, アメリカ(西海岸), ニカラグア, etc



#### 日本の津波対策史

■江戸時代 ▶広村の津波防波堤 **■**1890~1945 ≻一部で高地移転 ■1960チリ津波 ▶津波防潮堤建設の契機 ■現在 ▶地震対策推進本部・中央防災会議 ▶防潮堤など構造物による対策に加えて

▶災害情報+避難活動が必須



濱口梧陵

ヤマサ醤油WPより http://www.yamasa.com/history/sevens.html

これまでの津波の想定に関する小史

1960	1990		2010
新潟地震津波	日本海中部地震津波 既往津波	スマトラ沖地震津波 「地域防災計画における 津波対策強化の手引き」 北海道南西沖地震津波 「地域防災計画における 市 「地域防災計画における 大省 本部 加速本部 に た た 加 、 本部 に た 、 本部 に 、 、 、 本 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	東北地方太平洋沖地震津波 2010 2010 進本部 日 ま たは? 最悪シナリオとは?
		性も考慮	確率論的評価、

#### 東北地方太平洋沖地震



#### 東京大学地震研究所

14:46~15:15:地震は岩手中部沖から茨城県沖にまたがる



10

5

M0=3.5E10×176E3×82E3×5.90=0.30E22 あわせて1.94E22Nm

10

5

(mhÊ

()

#### これまでの評価

- 地震調査研究推進本部
  - -「3月11日14時46分頃に三陸沖の深さ約25kmでマグニチュード(M)9.0の地震が発生した。今回の本震の規模はこれまでに日本国内で観測された最大の地震である。」



#### 東北地方太平洋沖地震 断層モデル

147 147 144



10 12 14 16 18 20 22 24 SRc(m)

津波記録を用いたインバージョンモデル



JNES作成

原子力安全・保安院 地震・津波に関する意見聴取会(第3回)-配付資料より

地震のまとめ

- 地震
  - プレート境界の低角逆断層を含む地震が<u>連動</u>
  - 日本国内で観測された最大の地震M9.0
- 断層
  - 断層の破壊域は500kmにわたり広大
  - 14:46~15:15の地震において、M7.4以上が4つ
  - 岩手中部沖から茨城沖
  - 断層域は広大だが、すべり量の大きな領域は一定の範囲に限られる。
  - <u>最大すべり量が20m以上と大きい</u> (50mや70m以上のモデルも!)



13

港湾空港技術研究所:港湾·空港·漁港技術講演会資料より

女川



相馬



観測された津波の波形

37° 51′28″140° 58′52 37.8578, 140.9811



3月11日

気象庁WPより





#### 東海村:日本原子力発電計測

断層から離れた場所 長時間に渡る水位変動 → 最大水位が数時間後に出現

津波の波形



### 河川:北上川







国土交通省 川の防災情報よりデータ取得

2011/3/11

#### 津波調査結果



これまでの津波の想定に関する小史

1960	1990		2010
新潟地震津波	日本海中部地震津波	スマトラ沖地震津波 「地域防災計画における 津波対策強化の手引き」 北海道南西沖地震津波 弾(加) 北海道南西沖地震津波 弾(加) 北海道南西沖地震津波 北海道南西沖地震津波 北海道南西沖地震津波	東北地方太平洋沖地震津波 2010 2010 推 進本部 たは?
決定論的評価 	既往津波	地震を基に, 地震を基に, 波源の不確定 性も考慮	(最悪ジナリオとは?)
			確率論的評価

20

# 「地域防災計画における津波対策強化の手引き」

- 七省庁 平成9年3月
- ・ 津波想定に関する新しい考え
   方

<u>想定しうる最大規模の地震津</u> <u>波を検討</u>し、既往最大津波との 比較検討を行った上で、常に<u>安</u> <u>全側の発想</u>から沿岸津波水位 のより大きい方を対象津波とし て設定するものとする。





# 津波評価部会における取り組み



#### 原子力発電所の津波評価技術(2002)



#### 津波設定法の全体フロー



津波水位の想定における課題

・津波評価における不確定性や誤差の評価



津波水位の想定における課題

・津波評価における不確定性や誤差の評価

①波源の不確定性	②数値解析上の誤差	③データの誤差	断層パラメータ Fault Parameters	
<ul> <li>・平面位置</li> <li>・走向</li> <li>・走向</li> <li>・断層上縁深さ</li> <li>・傾斜方向・角</li> <li>・すべり角</li> <li>・すべり角</li> <li>・(セグメントの 組み合わせ)</li> <li>・最大地震規模</li> <li>・スケーリング則</li> <li>・すべり量不均質性</li> <li>など</li> </ul>	<ul> <li>・基礎方程式</li> <li>・計算スキーム</li> <li>・初期条件</li> <li>・境界条件</li> <li>・計算格子分割</li> <li>・諸係数</li> <li>・再現時間</li> <li>の与え方など</li> </ul>	•海底地形, 海 岸地形データ の誤差など	(Lon, Lat): Origin of fault	

プレート境界付近と日本海東縁部 基準断層モデル



パラメータスタディ





#### 対象地点に、適切な痕跡高が無い場合



# 設計想定津波の妥当性



日本沿岸185地点の痕跡高で考え方の妥当性を検証ただし、全ての沿岸を網羅している訳ではない

#### 海外での活用

- 「原子力発電所の津波評価技術」本編の英語版を 作成
  - Tsunami Assessment Method for Nuclear Power Plants in Japan(2006)
  - 土木学会のウェブページよりダウンロード可能

- 海外での活用
- IAEAの安全指針ドラフト(2011年1月)
- 米国NRCの津波の影響評価報告書

#### IAEA(International Atomic Energy Agency)

- Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations(DS417)
- 「原子炉等施設の立地評価における水理学的及び気象 学的ハザード」(DS417)

		10 mark to 200	
128317 Deals 03	ACCURN IN AN ADDRESS OF THE YARD REAL REAL COMMENT PERFECTION BY NOME VERTICE	ASSESSMENT OF TAUNAME MAPARDS	The number shall be charging presenters. If the insults of held number
Bus: 2012-01-31	145N	CURRENT PRACTICE IN SOME SEATEST	Raitmaki da
IAEA SAFETY STANDARDS	L'HTEODATO-OF MENCA. D4	time in the second s	construction and paint
for protecting people and the environment	ANNEY HE TACKAME WARPENG SPEEDING 104	MENO	
the Broard and Broard and and an an and an an and an	CONTRACTOR OF THE CONTRACTORS SCHOOL AND A DESCRIPTION OF	11.1 This part of Assets II prevents an colliner of (2) the antibublicgy, asserby the	and the second s
Statur: STEP 13 - Eurobicking at an IAEA Solidy	OR AVEL TEN PERSONTENDENT & ACEANORAPER CONSERVED TACABLE	Tanana Aseranen Melcol fo Noine Poor Plant is Ique published to the Ique	This work is to be important
Mandards by the Public atom Committee.	Children compared when or bolt of the business county of the second state of the	beautry of Covel Degenerics in Petersony 2002 [3-1], and G] the system for measure surgering	
		and reasing operate by its spin. Subconfigure April 5 Units important interaction for many the surflocklopy we lish (E-3-D-17)	Li Li MP an Li L4 Land
	ANNES IT CLIMATE CRANES 10	Method for the everyopent of response for modest power plants in Japan.	The new of the pairing are
	CONTRACTORS TO DESETTING AND RETIRING	Overlying A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	
		The event policy for a method for the immunance of transmit the arches gover plant in	The during temperature in the local
Mateonological and Underlanded Harands	PODDS FOR THE IDERBIDIENT OF DATA CARTY IT DEDUCT	Japan at an Alderen	survey concerts formation in the
Meteorological and Hydrological Hazards		Tremanus scores for the design tumoni	
in Site Evaluation for Nuclear Installations		[1] Annual to reach possible commit frames in each over the rate change the	Search Dealer Automatic
		maximum vorus our and field to the target site his, to be related as the through turner. The	NA N
DRAFT SAFETY GUDE Na 196 x		design unter level a definit as dar une of the 'design transmi' unter level and as	
D541*		appropriate tabil result on	
		A condition policy with republic the incontinuities of common transmit	
		12.1. In tasks to take task account the uncertainties in the model regarding a transmi	
No. of Concession, Name		search a large number of innerecul calculation. See to be smooth not make success	A Contract of the second secon
Pere harry Gade		conditions of find specializing robust a maccoality range. This is indexed to se a parameter	kendunan
		right: Each worth of the parameters: right is twend to conserve transmit. For the modelling of	The second secon
		the taget use, the scenario humans causing the penderal damage to the larget use has to be	a to paras to to being reside
IAEA			
International Atomic Energy Aponcy		Stellard for the Splag file design branning	For E.3 Convert of within an of source durk and reconstrict study
EAsked at publiching sings [		124. The design transmit area to be vesilied by using the following unitere	call was counted in some data conversion and human a contr-
		<ul> <li>The design transmu length denied encoded all the recorded and published humanical biammic bength at the largest site;</li> </ul>	
1		400	
1662	12 C	Dr421	
	225.7		112

http://www.ansn.org/Common/Topics/OpenTopic.aspx?ID=9065

#### 米国NRC(Nuclear Regulatory Commission)

- Tsunami Hazard Assessment at Nuclear Power Plant Sites in the United States of America
- 米国内の原子力発電所に関する津波の影響評価報告書



http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6966/

まとめ

- 過去の信頼性の高い地震・津波データを基に、津波水位を 想定する手法
  - 2007年の国の指針を実現するために提案
  - 各領域において最大級の断層(基準断層)を設定
  - 断層に関するパラメータスタディで対象サイトに最も影響の大きい断層を探索
  - 津波水位に潮位変動を考慮して津波水位を決定
  - 既往の津波記録と比較して妥当性を確認
- 現在でも手法の考え方は有効

- 海外の機関も最新手法として参照・引用

- 東北地方太平洋沖地震の教訓・課題
  - 過去の記録以上の海洋性の巨大地震(再現期間1000年級)
  - 過去の地震記録からこのような巨大地震を想定可能か

#### 津波計算手法の適用

• 東北地方太平洋沖地震津波へ適用

# – 数値計算手法の適用性– 押し寄せる津波の高さは?

#### 福島第一原子力発電所における東北地方太平洋沖地震津波 の再現性検討

断層モデル



東京電力は、今回の地震・津波による広域(北海道~ 千葉県)の浸水高、遡上高、浸水域、検潮記録及び地殻 変動を最もよく説明できる津波波源の推定をインバージョ ン解析により実施し、広域再現モデルとしてM24モデル を作成している。

福島第一原子力発電所の津波再現検討に当たっては、 、再現性を向上させるためM24モデルのすべり量を1.23 倍したモデル(すべり量の上限は56.7m)、M45モデルを 作成している。

福島第二原子力発電所の津波再現検討に当たっては、広域再現モデルを用いている。

①M24モデル(広域再現モデル)

1255枚の小断層からなる断層モデル。

最大すべり量56.7m

②M45モデル(福島第一原子力発電所再現モデル)

M24モデルのすべり量を1.23倍したモデル

(最大すべり量56.7m)

いずれもモーメントマグニチュードMw9.1

(1)M24モデル

(2)M45モデル



福島第一原子力発電所の津波遡上再現性検討にお いてはこれらの断層モデルを用いた解析を実施
### 福島第一原子力発電所における東北地方太平洋沖地震津波 の再現性検討





### 福島第一原子力発電所における東北地方太平洋沖地震津波 の再現性検討



福島第一原子力発電所の計算モデル(遡上モデル)

計算条件



津波波形の比較(相馬・小名浜)



### 津波波形の比較(気仙沼広田港沖・宮古・大船渡・鮎川)



### 津波波形の比較(福島第一原子力発電所の実測)



**※**0.P.±0.0m=T.P.±0.0−0.74m

## 計算結果の比較





### 福島第一原子力発電所における津波の高さ



福島第一原子力発電所の最高津波水位分布(M45モデル)





福島第一原子力発電所の浸水深分布(M45モデル)

原子力安全·保安院資料

本計算

### 計算結果の検証



福島第一原子力発電所の浸水高、浸水深、浸水域および遡上高

## 計算結果の検証



福島第一原子力発電所の浸水高・遡上高との比較(M45モデル)

#### 津波の水位を算出する数値計算手法は 妥当な再現結果を算出

### ②福島第一原子力発電所 来襲した津波に関する検討

# 福島沿岸に押し寄せた津波の高さは?

[遡上高]:陸上において,津波が這い上がった地点の地盤高 [浸水高]:陸上において這い上がる途中での水面高さ。もしくは建屋等 の閉鎖空間に溢れた水の水面高さ

[浸水深]:浸水高における,固定面からの水面高さ,もしくは水の厚さ [痕跡高]:遡上高と浸水高のどちらかもしくは両方のこと



津波の事典より

### 空間波形の時間変化





# 測線C (検潮所を通る測線)



全体図

拡大図































津波の空間スケール

- ・津波の伝播速度 c = √gh

   水深h=100mで31m/s, h=20mでc=14m/s, h=10mで10m/s
- 津波の長さ(波長)
  - 水位上昇継続時間10分で6000m(*h*=10m) - 長さは沿岸域でも数kmの長さ



津波の空間スケール





-1000

0

-1700

-120m



- I=43min

# 沿岸での反射

- 津波は台地上の陸上地形で反射
- 反射すると、入射波と反射波が重なり水位が上昇



入射波+反射波による水位上昇範囲は沿岸数kmに影響

## 福島沿岸に押し寄せた 沖合の津波高さ



津波波形を重ねあわせた→最大水位(浸水高, 遡上高)

・沖合での津波の高さは6~7m
・→入射波として押し寄せた津波

まとめ

- 津波挙動を再現する数値モデルは信頼性が高い
   津波の再現計算を実施し、妥当な結果
- 福島第一の港湾や敷地での津波高さは入射波+
   反射波
  - 福島沿岸に多い沿岸の台地地形は津波が反射
- 福島沿岸に押し寄せた津波高さは沖で6~7m

## 断層における想定の拡張例

東北地方太平洋沖地震
 – 地震の連動





基準断層モデルの地震エネルギーはMw9.0に及んでいなかった.
検討内容

- 数値計算による概略評価
- 東北地方太平洋沖地震前の情報を基に
- 仙台平野~福島県沿岸を主に対象
  - 2011地震本震を含む断層域対象地域:仙台平野~茨城県南部
    - ・北緯33.5~38.3度を対象
- 津波評価技術2002の拡張
  - 断層1枚均質モデル
  - <u>地震の連動</u>, <u>すべり量が大きい</u>



検討内容

#### □ 検討案1:

- 津波評価技術2002の対象断層域の連動を考慮する.
- Mw:複数の領域を加えたものとする
- 断層の形状は領域5を採用
- Mwの増大はすべり量Dに反映





#### □ 検討案2:

- 津波評価技術2002の対象断層域の連動を考慮する.
- <u>断層面積:複数の領域を加える</u>
- 断層面積Sから地震エネルギー(Mo, Mw)を設定
- 断層の形状は領域5を採用
- すべり量DはMoとSから決定





## 連動の考え方

- 面積を足してそれからMoを求める
  - ・レシピのスケーリング
- 面積をそのままにすべり量を算出



スケーリング則	領域	面積 (km2)	Mo(Nm)	Mw	L(km)	W(km)	D(m)
佐藤	3+5+6+7	32890	1.33E+22	8.68	314.1	104.7	8.09

- 断層スケーリング則:佐藤(1989)
  - logS=2/3logMo-14.9
  - Mo= $(S \times 10^{14.9})^{3/2} \times 10^{-7} = (S/1.26 \times 10^{15})^{3/2} \times 10^{-7}$
  - $\underline{3+5+6+7}: S=210 \times 50 + 210 \times 70 + 26 \times 65 + 100 \times 60 = 32890 \text{km}^2$
  - L314.1km, W104.7km
  - Mo=1.33 × 10<sup>22</sup> Nm Mw8.68

悉巳	L	W	D	δ	λ	μ	Мо	Mw	備老	
	(km)	(km)	(m)	(°)	(°)	× 10 <sup>11</sup>	× 10 <sup>27</sup>	モデル	ت <sup>,</sup> n <del>u</del>	
1	130	100	3.5	20	115	5.0	22.8	8.17	1952年 Aida(1978)モデル	
2	150	100	6.0	20	80	5.0	45.0	8.37	1968年本研究	
3	210	50	9.7	20	75	3.5	35.6	8.30	1896年 本研究 補正谷岡・佐竹モデル	
4	185	50	6.6	45	270	/.0	42./	8.35	1933年 相田モデル	
5	210	70	4.0	15	85	5.0	29.4	8.25	1793年 本研究	
6	26	65	2.0	20	85	7.0	2.4	7.52	1978年 Aida(1978)モデル	
7	100	60	23	10	85	50	69	7 83	1938年 阿部モデル	
8	200	50	6.5	20	95	3.5	22.8	8.17	1677年 電力独自モデル	

剛性率 µの単位はdyne/cm<sup>2</sup>、地震モーメントMoの単位はdyne・cmである。



概略パラメータスタディ

- 3.11地震津波の痕跡高と比較
  - 概略パラメータスタディ

- 最小格子サイズ:約300m

- 計算結果は沿岸の地形を細かく再現していない
  - 詳細計算するとさらに計算結果が大きくなる可能 性あり

## 概略パラスタ結果



3.11以前には考慮されていなかった連動 → M8.7 概略パラスタ結果は、3.11地震の津波の高さを越えるケースが多い →地震の大きさが適切であれば、土木学会のパラスタ手法は有効である

## 確率論的評価法

•	「確率論的津波ハザード解析の方法	
	– 2007年版を公開(2009)	
•	リスクの定量評価	確率論的津波ハザード解析の方法
	- 設計津波の超過確率	
	– 地震の確率論的評価が先行	
•	津波評価における不確定性を処理	
	– 波源モデルの設定誤差	平成 23 年 9月
	- 数値計算,海底地形データ等の誤差	
	これらの成果は論文として発表	社団法人 土木学会
	土木学会論文集委員会報告(2007)	原子力土木委員会 津波評価部会
	地震工学シンポ 安中ら(2007) PAGEOPH Appaka at al(2007)	
	FAGEOFIT AIIIIaka el. al(2007)	

#### 評価フロー



不確定性の分類

- 偶然的不確定性
  - ランダムな性質: 地震の位置, 時刻, 等 - 確率分布を適切に与える

- 認識論的不確定性
   不充分なデータや知識
   ロジックツリーの分岐
  - 専門家のアンケート結果など基に重みを設定

ロジックツリー



ロジックツリーによる認識論的不確定性の評価 →アンケート調査により各分岐に重みを決定

- 長期間の平均的なハザード
  - 対数正規分布
  - 地震の単位時間あたりの平均発生回数
- 現時点でのハザードを評価
  - BPT (Brownian Passage Time)分布
  - 地震の単位時間あたりの平均発生回数
  - 最後に地震が発生してからの経過時間を考慮

- 津波の水位は数値計算法
- 断層モデルは1枚(一様すべり)もしくは複数について分岐
- 数値計算による津波の水位の推定値に不確 定性を考慮し、その大きさについて分岐

- 対数正規分布

-標準偏差βの値⇔κ(相田の指標)

- 打ち切り範囲±2.3β, ±10β

ロジックツリーの例: 貞観型





## 評価例

多くの数値計算ケースを実施し、以下の結果を得る



(a)近地津波+遠地津波(長期間) (b)遠地津波(長期間) (c)(長期間と今後50年の比較) 確率論的津波ハザード解析の評価例

東北地方太平洋沖地震の知見は未反映



## 新たな知見の導入:断層域



## 国などの最新の成果を反映

• 確率論的津波ハザード解析の方法 52ページ

表 5.1-1 日本海溝沿い及び千島海溝(南部)沿い海域の大地震の発生領域

コード	名称	地震の例		
KT1	十勝沖	2003年、1952年		
KT2	根室沖	1973年、1894年		
KT1+KT2 連動	十勝沖+根室沖	17世紀		
KTR1	沈み込んだプレート内のやや	(1994 年、1958 年): ただし、		
	浅い地震	隣接した領域で発生		
JTT	三陸沖北部から房総沖の海溝	1896年、1677年、1611年		田治三陸津波の
	寄りのプレート間大地震(津波		$\langle \rangle$	の市一陸牛成の
	地震)		N	<b>唄 奥 の 変 化</b>
JTNR	三陸沖北部から房総沖の海溝	1933年		
	寄りのプレート内大地震(正断			
	層型)			
JTN1	三陸沖北部プレート間大地震	1968年、1856年		
JTN2	宮城県沖	1978年、1936年		
JTN3	三陸沖南部海溝寄り	1897年		
JTN2+JTN3 連動	宮城県沖+三陸沖南部海溝寄	1793 年		
	り(連動)			
JTS1	福島県沖プレート間	1938年		貞観地震
JTS2	貞観型	869年		佐竹ら(2008)

まとめ

- 津波評価部会
  - 国の方針に従い,津波の評価について,最新の知見に基づき技術の高度化 や標準化
- 原子力発電所の津波評価技術
  - 最新知見を取り入れながら、既往の最大級の地震を基に、既往の津波記録
     以上の津波水位を設定 → 手法は有効
  - M9地震を設定できなかった:既往最大以上の地震を想定できず
  - 「確率論的津波ハザードの解析の方法」と本格的な手法を初めて構築
  - 国際的にも認められたもの
- 東北地方太平洋沖地震津波
  - 国や学会で想定以上の巨大地震と巨大津波
    - 自然災害に対する新たな課題
  - 福島県沿岸に押し寄せた津波は、沖合10kmで6~7mの高さ

# 今後の方向性:原子力発電所における津波の評価

- 東北地方太平洋沖地震津波の反映

   - 津波堆積物等による古津波研究の充実
- さらなる安全性の向上へ新たな枠組
  - <u>最新知見をもとに、ある海域における最大級の地震</u>を如何に 設定するのか。
    - ・複数の学会が一丸となって
  - 機械分野や原子カ分野からシビアアクシデントを起こす水位 設定
    - ・電気事業が一丸となって
- 水位以外の評価の充実
  - 津波流体力, 海底地形変化

