

女川原子力発電所2号炉 津波評価について

(令和元年9月27日審査会合資料 一部修正)

令和元年11月19日
東北電力株式会社

審査会合におけるコメント

No.	第750回審査会合におけるコメント(令和元年7月26日)
S188	<p>説明上の重要性及び申請書への記載を踏まえて、資料の構成を整理すること。</p> <ul style="list-style-type: none">• 東北地方太平洋沖型の地震について、各特性化モデルの断層パラメータ、設定フロー、パラメータスタディ範囲及び分岐断層・海底地すべりの考え方について、本資料に記載すること。• 徳山ほか(2001)に示されている福島県沖の海底地すべりに関する評価内容について、本資料に記載すること。• 剛性率の設定及び海底地すべりに関する内容について、重複が見られることから、説明可能な範囲で簡略化すること。
S198	海域活断層に伴う津波評価について、簡易評価の断層選定にあたってのスクリーニング根拠の説明性を向上すること。
S199	年超過確率の評価フローのうち検討対象領域の設定に、東北地方太平洋沖型の地震を追記すること。

津波評価の全体概要



【地震に起因する津波】
 既往津波に関する文献調査により、詳細検討を行う津波発生要因を選定。

1. 近地津波

- 日本海溝沿い
- 千島海溝沿い

東北地方太平洋沖型の地震

基準断層モデル①～③

破壊開始点, 破壊伝播速度

2. 遠地津波

- チリ
- カスケード
- アラスカ・アリューシャン
- カムチャッカ

津波地震

基準断層モデル

位置, 走向, 傾斜角, すべり角

海洋プレート内地震

基準断層モデル

位置, 走向, 傾斜角, 断層上縁深さ

海域の活断層による地殻内地震

F-2断層・F-4断層
F-6断層～F-9断層 他

簡易式による検討

基準津波の策定

年超過確率

砂移動評価

申請時から変更した項目

【地震以外に起因する津波】
 既往津波に関する文献調査及び地形判読調査等により、津波発生要因となり得る地形を抽出。

陸上地すべり及び斜面崩壊

敷地周辺陸域

海底地すべり

緩斜面及び大陸棚が含まれる水深1000m迄の範囲

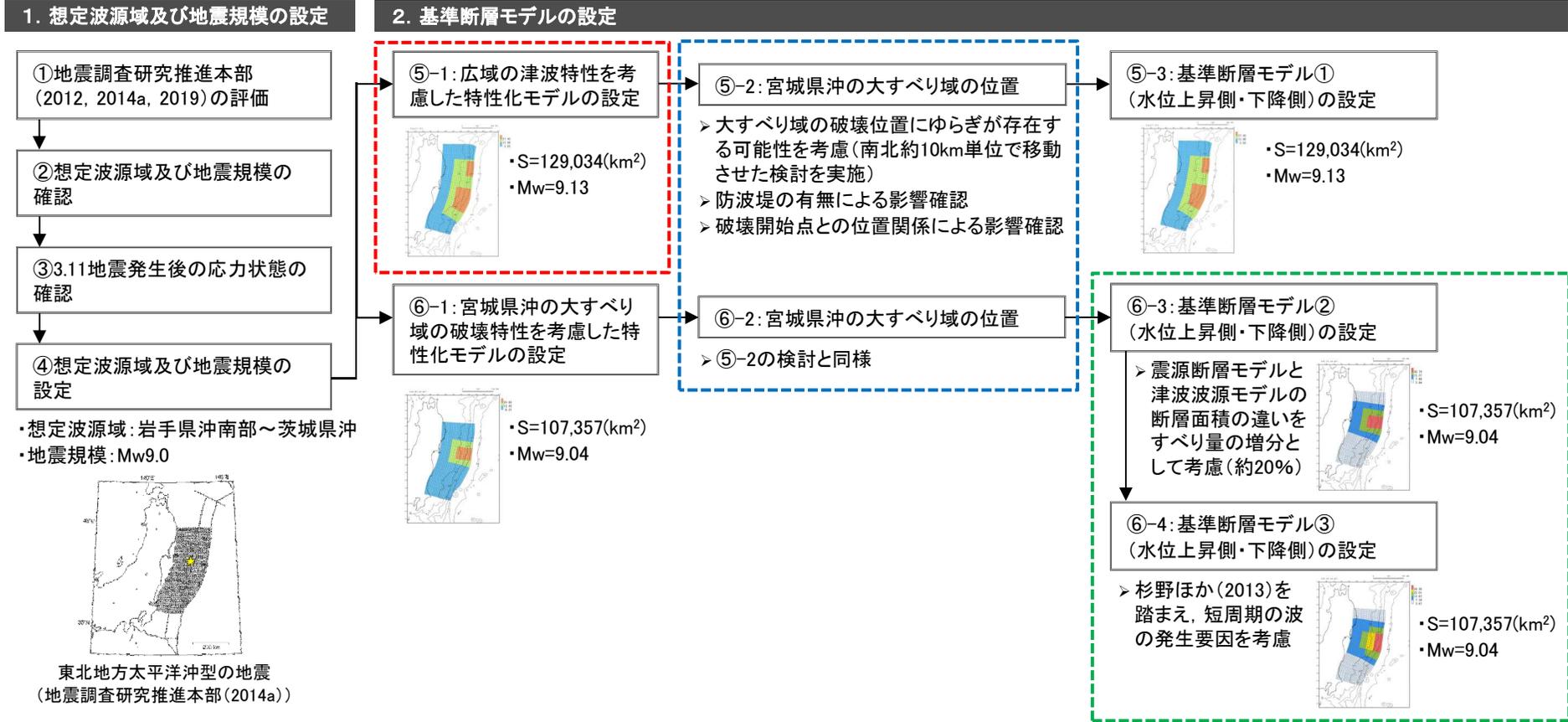
火山現象

敷地周辺及び前面海域

✓平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(以下、「3.11地震」という。)に伴う地殻変動※による影響を考慮する。
 ✓なお、地殻変動※による影響の考慮にあたっては、地震後、継続的な隆起傾向にあるが、保守的な評価を実施する観点から、敷地は一律に約1m沈下した状態として評価を行う。
 ※:敷地が一律に約1m沈下

【基準津波の策定:東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデルの設定)】

- 地震特性の観点から評価した「宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデル(下図:⑥-1)」に追加して、広域の津波特性をモデルに反映する観点から、想定波源域及び地震規模を大きくした「広域の津波特性を考慮した特性化モデル(下図:⑤-1)」を新たに設定した。
- 各基準断層モデルは、発電所の津波高さに与える影響が大きい宮城県沖の大すべり域の位置を抽出し、防波堤の有無や破壊開始点との位置関係による影響を確認した上で設定した。
- 宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデル(下図:⑥-1)については、震源断層モデルと津波波源モデルの断層面積の違い等を考慮して「すべり量割増モデル」を「基準断層モデル②(下図:⑥-3)」として、「海溝側強調モデル」を「基準断層モデル③(下図:⑥-4)」として位置付けを変更した。
- 申請時に基準断層モデルとして設定していた女川再現モデル・内閣府(2012a)モデルは、特性化モデル設定にあたって反映が必要な知見を整理する(基となる)モデルであることを踏まえ「基礎検討用モデル」に位置付けを変更した。また、既往津波の組合せモデルについては、土木学会(2002, 2016)で示される不確かさの考慮方法を適用した場合の影響を検討するモデルであることを踏まえ「影響検討用モデル」として位置付けを変更した。



申請時(H25.12.27)からの主な変更内容(2/6)

【基準津波の策定:東北地方太平洋沖型の地震(波源特性の不確かさの考慮)】

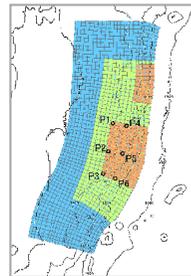
- 破壊開始点, 破壊伝播速度及びライズタイムが発電所の津波高さに与える影響を定量的に把握し, 破壊開始点に追加して破壊伝播速度の不確かさを考慮した。

3. 波源特性の不確かさの考慮

⑦大すべり域の破壊伝播特性に関する不確かさ

⑦-1: 破壊開始点の位置

- 大すべり域周辺に設定(6箇所)

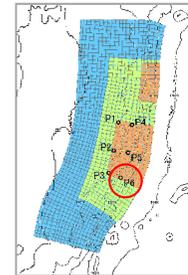


(例) 基準断層モデル①-1

破壊伝播速度: 2.0(km/s)
ライズタイム: 60(s)

⑦-2: 破壊伝播速度

- 最も影響が大きい破壊開始点を対象に検討を実施
- パラメータスタディ範囲:
1.0, 1.5, 2.0, 2.5(km/s)



(例) 基準断層モデル①-1

申請時(H25.12.27)からの主な変更内容(3/6) 【基準津波の策定:津波地震】

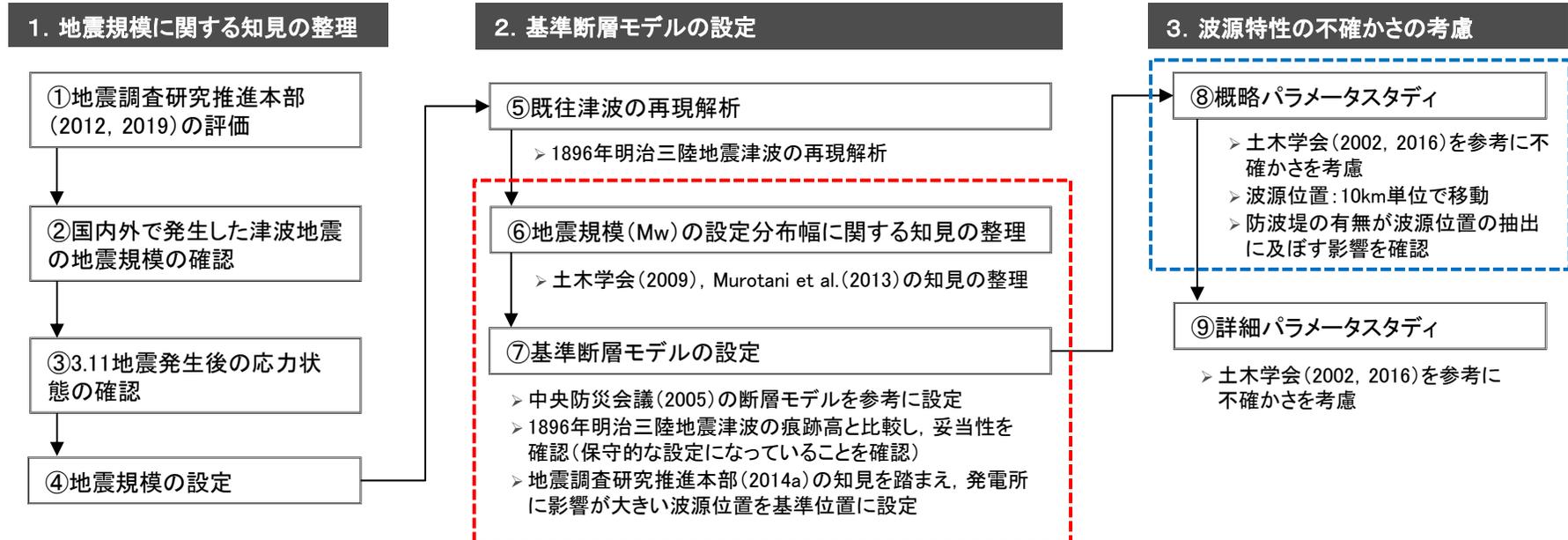
■ 基準断層モデル:地震規模の設定

申請時は、地震調査研究推進本部(2012)の評価及び国内外における津波地震の地震規模に関する知見から、1896年明治三陸地震津波の再現モデル(Mw8.28)を基本に、土木学会(2002)を参考としてMw8.3に設定したが※、地震調査研究推進本部(2012, 2019)では阿部(2003)が過大評価気味としたMt9.0を評価に取り入れたことに鑑み、保守性を確保する観点から地震規模の不確かさを考慮してMw8.5に設定した。

※:申請時の基準断層モデルを用いた評価の詳細は、補足説明資料「I. 第5章 5. 2. 4 申請時の基準断層モデルによる評価」に記載。

■ 波源特性の不確かさの考慮:波源位置の評価

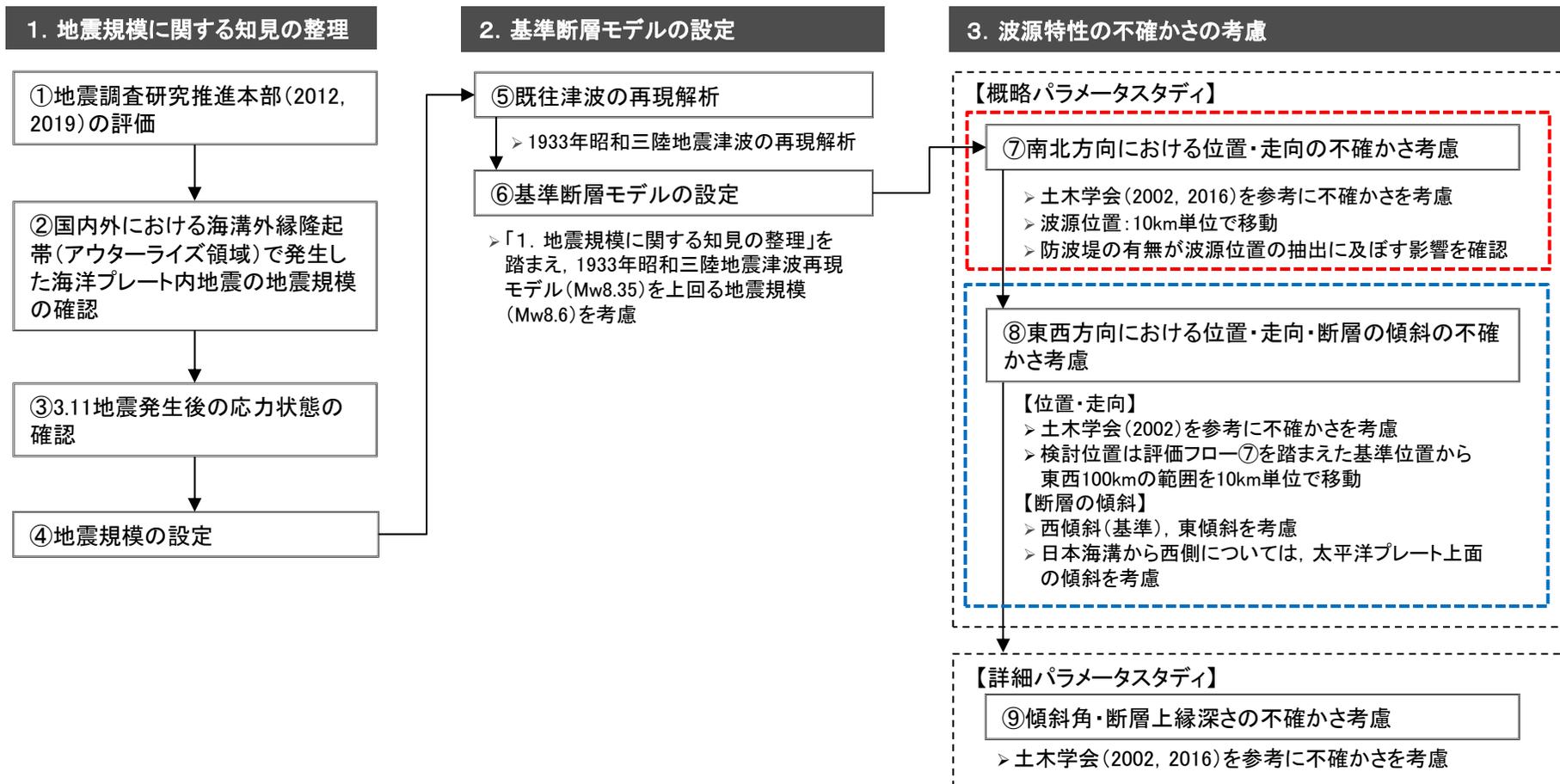
発電所に最も厳しい位置を評価するため、南北10km単位で移動させるとともに(申請時は20km単位)、防波堤の有無による影響を確認した上で評価した。



申請時(H25.12.27)からの主な変更内容(4/6)

【基準津波の策定: 海洋プレート内地震】

- 波源特性の不確かさの考慮: 南北方向における波源位置の評価
発電所に最も厳しい位置を評価するため、南北10km単位で移動させるとともに(申請時は20km単位)、港湾部の防波堤の有無による影響を確認した上で評価した。
- 波源特性の不確かさの考慮: 東西方向における波源位置及び断層の傾斜の評価
発電所に最も厳しい位置を評価するため東西10km単位で移動させるとともに、断層の傾斜に関する不確かさを考慮した。



申請時(H25.12.27)からの主な変更内容(5/6)

【年超過確率の参照】

- 日本原子力学会(2012)に準じて、津波ハザード評価に非常に大きな影響を及ぼす可能性がある申請以降に公表された最新知見を反映した。
- 基準津波の策定に関する審査結果、並びに海洋プレート内地震のMwの範囲を見直した。

変更理由	変更内容			
	対象領域	ロジックツリー	項目	変更概要
最新知見の反映	プレート間地震と津波地震の連動地震	津波発生モデル (認識論的不確実さ)	特性化モデルのMwの範囲	土木学会(2016)を踏まえ、Mc(中央マグニチュード)の設定に用いる平均応力降下量を3.0MPaから1.57MPaに変更。
	共通	津波高さの推定 (偶発的不確実さ)	<ul style="list-style-type: none"> 誤差の対数標準偏差(β) 対数正規分布の打ち切り範囲(σ) 	3.11地震から得られた知見を踏まえ、土木学会(2011)及びJNES(2014)等の設定方法を分岐として考慮。
審査結果等の反映	プレート間地震と津波地震の連動地震	津波発生モデル (認識論的不確実さ)	海洋プレート内地震のMwの範囲	地震規模、並びに各機関の評価事例に係る関連情報の収集結果を踏まえ、1611年の津波が正断層型地震の場合のMc(中央マグニチュード)を8.6から8.4に変更。
			波源モデル (特性化モデルの設定方法)	宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデルの設定方法から、広域の津波特性を考慮した特性化モデルの設定方法(杉野ほか(2014))に変更。
			波源モデル (既往津波の組合せモデルの取扱い)	既往津波の組合せモデルは、土木学会(2002, 2016)で示される不確かさの考慮方法を適用した場合の影響を検討するモデルであり、地震の破壊現象を表すモデルではないことを踏まえ分岐から削除。
	共通	津波高さの推定 (偶発的不確実さ)	矩形断層モデルの数値計算法	既往津波の再現解析、並びに土木学会(2009)の評価内容を踏まえ、方法1(1つのモデルのみで評価)を削除。

申請時(H25.12.27)からの主な変更内容(6/6) 【砂移動評価】

- 既往の検討事例を踏まえ、流砂量式、巻き上げ量の算定式等について以下のとおり変更した。

	藤井ほか(1998)		高橋ほか(1999)	
	申請時	最終評価	申請時	最終評価
流砂量式	小林ほか(1996)の実験式 $Q = 80 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	変更なし	高橋ほか(2011)の実験式 (d=0.166mmの場合) $Q = 5.6 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	高橋ほか(1999)の実験式 $Q = 21 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$
巻き上げ量の算定式	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z \left[1 - \exp\left\{\frac{-wD}{k_z}\right\} \right]}$	変更なし	高橋ほか(2011)の実験式 (d=0.166mmの場合) $E = 7.0 \times 10^{-5} \tau_*^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$	高橋ほか(1999)の実験式 $E = 0.012 \tau_*^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$
浮遊砂濃度上限値	1%	1%, 5%	1%	変更なし※

ここに、

Q : 単位幅, 単位時間当たりの掃流砂量 (m³/s/m) τ_* : シールズ数 $s := \sigma / \rho - 1$ σ : 砂の密度(kg/m³)
 ρ : 海水の密度(kg/m³) g : 重力加速度(m/s²) d : 砂の粒径(m) α : 局所的な外力のみに移動を支配される成分が全流砂量に占める比率
 w : 土粒子の沈降速度(m/s) λ : 空隙率 U : 流速(m/s) k_z : 鉛直拡散係数(m²/s) D : 全水深(m)

※: 影響評価として、浮遊砂濃度上限値を3%とした場合の評価を実施。詳細は、補足説明資料「V. 4. 高橋ほか(1999)の手法における浮遊砂濃度の影響評価」に記載。

これまでの審査会合からの変更内容(1/2)

1. 地震に起因する津波の評価

No.	第185回審査会合(H27.1.23), 第378回審査会合(H28.7.8), 第404回審査会合(H28.9.30)からの変更内容	該当箇所
1-1	土木学会(2016), 地震調査研究推進本部(2017, 2019)の内容を反映した。	・本資料 第I章 ・補足説明資料 第I章
1-2	千島海溝沿いの津波が発電所に及ぼす影響について、「千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第三版)(地震調査研究推進本部(2017))」の公表を踏まえ、十勝沖から択捉島沖を波源とする津波の数値シミュレーションを実施した。	・補足説明資料 第I章 第2節

2. 基準津波の策定

No.	第404回審査会合(H28.9.30)からの変更内容	該当箇所
2-1	基準津波(水位上昇側, 下降側)の津波波源の選定にあたり, 地震に伴う沈下量及び隆起量を考慮した相対的な津波水位で比較していることが分かるように比較表を整理した。	・本資料 第III章 第2.1節, 第2.2節

3. 年超過確率の参照

No.	第466回審査会合(H29.4.28)からの変更内容	該当箇所
3-1	地震調査研究推進本部(2019)の内容を反映した。	・本資料 第IV章 第2節 ・補足説明資料 第IV章 第1節
3-2	十勝沖・根室沖の連動地震のロジックツリーのうち平均発生間隔の分岐について、「千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第三版)(地震調査研究推進本部(2017))」を踏まえた分岐を用いてハザード評価を実施した。	・補足説明資料 第IV章 第4節

これまでの審査会合からの変更内容(2/2)

4. 基準津波に対する安全性(砂移動評価)

No.	第439回審査会合(H29.2.3)からの変更内容	該当箇所
4-1	高橋ほか(1999)による計算結果について、シールズ数が非常に大きな値になる要因を追記した。	<ul style="list-style-type: none"> ・本資料 第V章 第2.3節 ・補足説明資料 第V章 第4.3節
4-2	タービン補機冷却海水ポンプの取水停止水位について、ポンプ設計水位:O.P.-2.080mを用いて評価を実施していたが、耐津波設計方針に係る審査を進めるにあたり、安全運転限界水位:O.P.-2.980mに変更したことから、その影響を確認するため、非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さを再評価した。	<ul style="list-style-type: none"> ・本資料 第V章 第3.2節, 第3.3節 ・補足説明資料 第V章 第4.4節

目次

I . 地震に起因する津波の評価	p12
1 . 文献調査	p13
2 . 津波解析条件	p21
3 . 東北地方太平洋沖型の地震	p34
4 . 津波地震	p69
5 . 海洋プレート内地震	p84
6 . 海域の活断層による地殻内地震	p105
II . 地震以外に起因する津波の評価	p108
1 . 地すべり及び斜面崩壊	p109
2 . 火山現象	p120
III . 基準津波の策定	p123
1 . 策定方針	p124
2 . 各津波の評価	p126
3 . 基準津波の策定	p133
IV . 年超過確率の参照	p136
1 . 評価概要	p137
2 . 津波発生モデルのロジックツリー（認識論的不確実さの考慮）	p142
3 . 津波高さの推定に関するロジックツリー（偶発的不確実さの考慮）	p160
4 . 評価結果	p163
V . 基準津波に対する安全性（砂移動評価）	p167
1 . 評価方針	p168
2 . 海底地形変化	p170
3 . 海水ポンプ室における砂の堆積	p187
参考文献	p194

I. 地震に起因する津波の評価

1. 文献調査
2. 津波解析条件
3. 東北地方太平洋沖型の地震
4. 津波地震
5. 海洋プレート内地震
6. 海域の活断層による地殻内地震

I. 地震に起因する津波の評価

1. 文献調査
 - 1.1 近地津波に関する文献調査
 - 1.2 遠地津波に関する文献調査
 - 1.3 津波堆積物に関する文献調査
 - 1.4 文献調査のまとめ
 - 1.5 検討波源の選定
 - 1.6 潮位条件
2. 津波解析条件
3. 東北地方太平洋沖型の地震
4. 津波地震
5. 海洋プレート内地震
6. 海域の活断層による地殻内地震

I. 地震に起因する津波の評価 1. 文献調査

1.1 近地津波に関する文献調査: 日本海溝沿い・千島海溝沿い

- 日本海溝沿いでは主にプレート間地震及び海溝外縁隆起帯(outer rise)で正断層型の海洋プレート内地震が発生し、千島海溝沿いではプレート間地震及び沈み込んだ太平洋プレート内地震が発生している。
- 津波の大きさ、波源からの伝播距離及び津波被害の大きさから過去に敷地周辺に影響を及ぼしたと考えられる津波として、日本海溝沿いで発生した以下の5つの津波を抽出した。なお、敷地に襲来した津波の最高水位は3.11地震に伴う津波のO.P.※1約+13m(発電所の潮位計による観測記録)である※2。

※1: O.P.は女川原子力発電所工事用基準面であり、東京湾平均海面(T.P.)-0.74m。

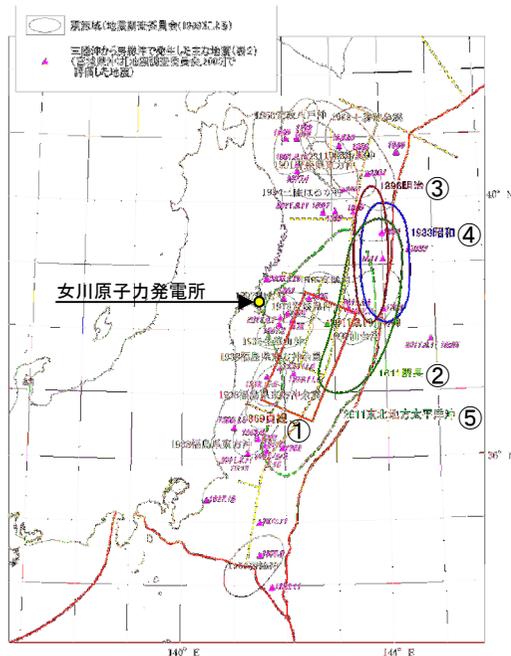
※2: 調査した文献、並びに3.11地震に伴う津波の観測記録の詳細は、補足説明資料「I. 1. 文献調査」に記載。

- ① 869年の津波(東北地方太平洋沖型の地震※3)
- ② 1611年の津波(津波地震※4)
- ③ 1896年明治三陸地震津波(津波地震)
- ④ 1933年昭和三陸地震津波(正断層型の海洋プレート内地震)
- ⑤ 3.11地震に伴う津波(東北地方太平洋沖型の地震※3)

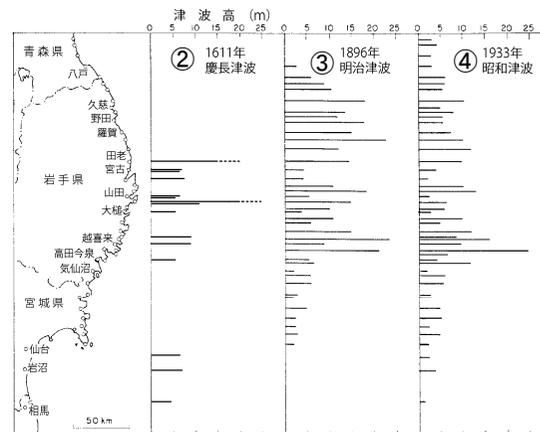
()は、地震調査研究推進本部(2019)が分類している地震のタイプ。

※3: 地震調査研究推進本部(2019)では、「超巨大地震(東北地方太平洋沖型)」としている。

※4: 地震調査研究推進本部(2019)では、1611年の津波を「津波地震」と評価しているが、「正断層型の海洋プレート内地震」の断層モデルも提案されている(土木学会(2002, 2016), 相田(1977)等)。

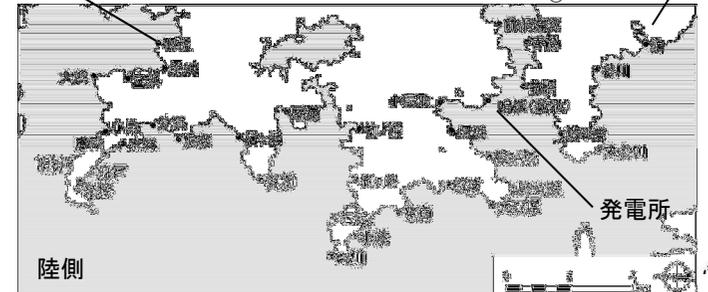
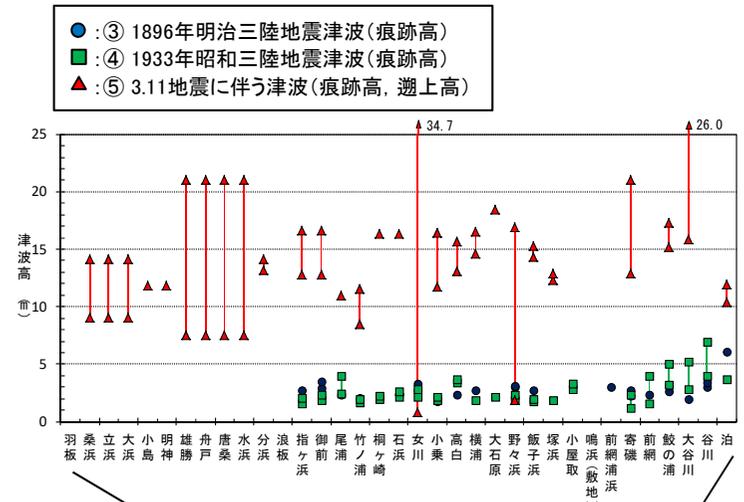


日本海溝沿いで発生した主な地震と震源域(地震調査研究推進本部(2012)の図に加筆)



3.11地震に伴う津波以前の三陸沿岸における津波高の比較※5 (羽鳥(2000)の図を修正加筆)

※5: 869年の津波と3.11地震に伴う津波を対象に津波堆積物に関する文献調査を実施した。津波堆積物に関する文献調査内容の詳細は、p17に記載。



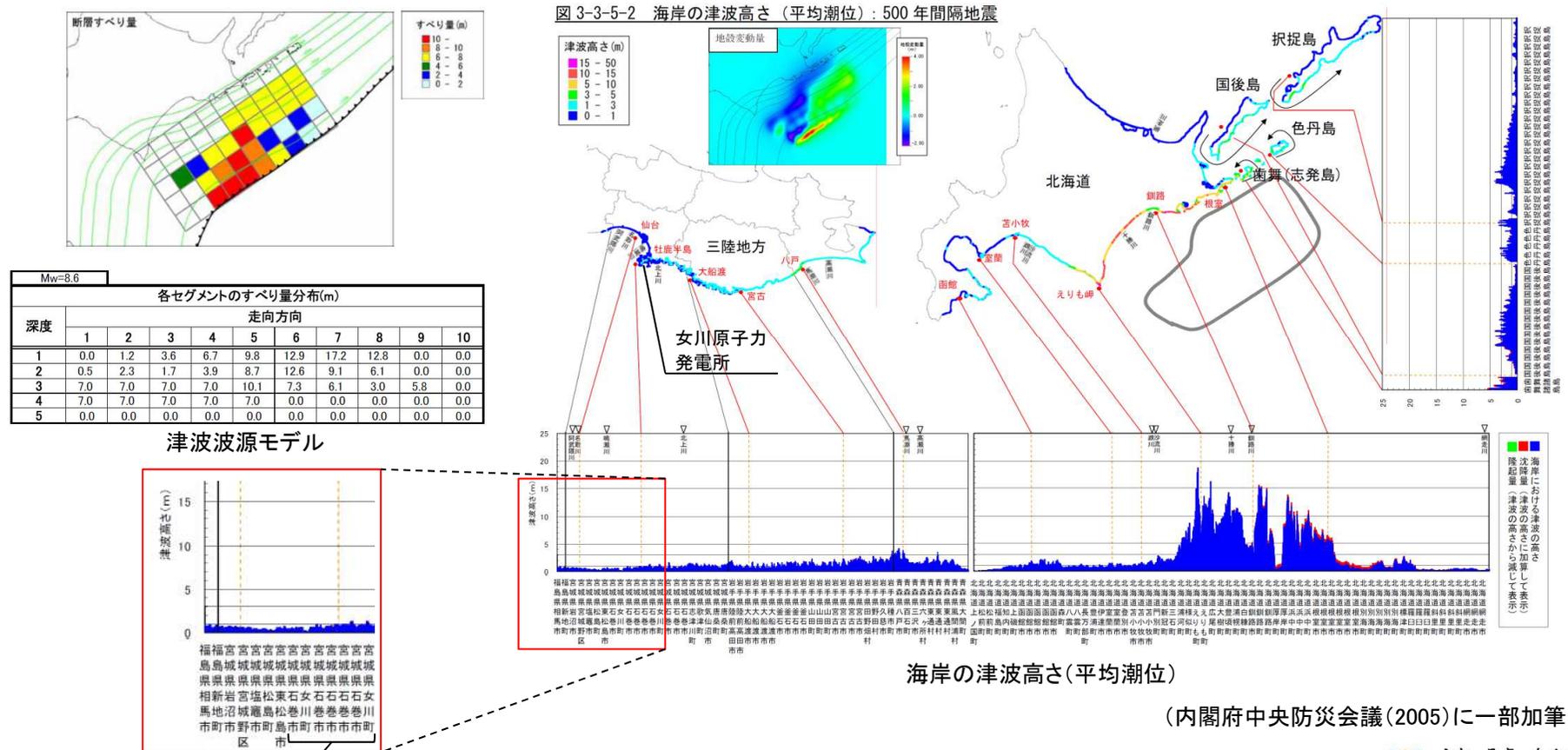
発電所敷地周辺における主な津波高の比較

1.1 近地津波に関する文献調査:千島海溝沿い

- 千島海溝沿いで発生している巨大地震が敷地に及ぼす影響について文献調査を実施した。
- 地震調査研究推進本部(2017)では、津波堆積物調査等から、北海道東部に巨大な津波をもたらすような地震を「超巨大地震(17世紀型)」と評価し、地震規模については、現時点で解明されている知見の中で最大の地震は17世紀の地震(Mw8.8)であるが、北方領土における津波堆積物の分布が不明瞭であり、規模がより大きくなる可能性があることを踏まえ、Mw8.8程度以上と評価している※1。
- 17世紀に発生した巨大地震について、内閣府中央防災会議(2005)による数値シミュレーション結果によれば、敷地周辺の津波高さは3m以下であり、3.11地震に伴う津波と比較して、敷地に与える影響は小さい。
- また、津波の伝播特性の検討※2からも、日本海溝沿いと比較して千島海溝沿いで発生する巨大地震の影響は小さいことを確認した。

※1:地震調査研究推進本部(2017)を参考に、保守的な評価の観点から、十勝沖から択捉島沖を波源とする巨大地震が発電所に与える影響を検討した。検討結果の詳細は、補足説明資料「I. 2. 千島海溝沿いで発生する津波の影響」に記載。

※2:津波の伝播特性に関する検討の詳細は、補足説明資料「Ⅲ. 4. 津波の伝播特性の検討」に記載。



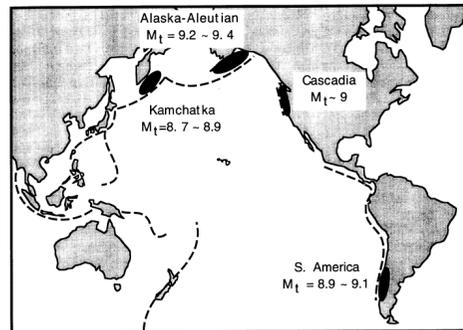
女川原子力発電所付近

I. 地震に起因する津波の評価 1. 文献調査

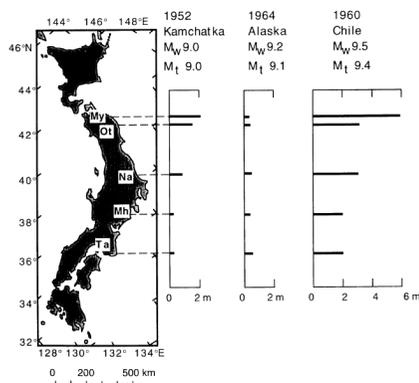
1.2 遠地津波に関する文献調査

- 過去に世界で発生したM9クラスの巨大地震のうち三陸沿岸に最も影響を及ぼした遠地津波は、1960年チリ地震(Mw9.5)に伴う津波であり、その津波高さは最大で6.1m(宮城県南三陸町)(痕跡高)である※1。
- 佐竹ほか(2014)は、3.11地震と過去の津波高さの定量的比較を行い、三陸沿岸における3.11地震に伴う津波の高さは、1960年チリ津波(Mw9.5)の約4倍、2010年チリ津波(Mw8.8)の約14倍であったことを示している。

※1:調査した文献の詳細は、補足説明資料「I. 1. 文献調査」に記載。

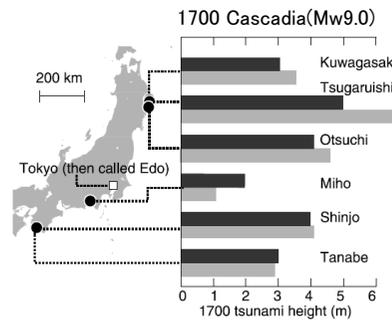


M9クラスの巨大地震発生位置(都司ほか(1998))



My: 宮古(岩手県), Ot: 大槌(岩手県), Na: 那珂湊(茨城県)
Mh: 三保(静岡県), Ta: 田辺(和歌山県)

都司ほか(1998)

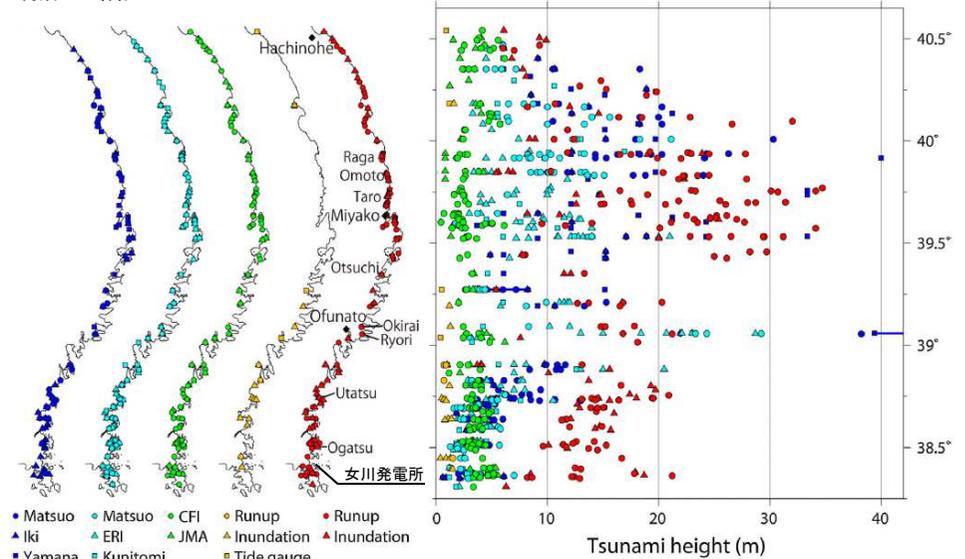


Estimated (Medium) height
Computed for Long-Narrow model
Average slip: 19 m in full-slip zone
14 m including partial-slip zone
M₀ 4.6 x 10²² Nm (M_w 9.0)
Error factor 1.33, correlation coefficient 0.98

Satake et al.(2003)に一部加筆

三陸沿岸に影響を及ぼしたM9クラスの巨大地震に伴う津波高さの比較

1896年 1933年 1960年 2010年 3.11地震
明治 昭和 チリ チリ



1960年及び2010年チリ津波と日本海溝沿いで発生した主な津波の津波高さの比較
(Tsuji et al.(2014)に一部加筆)

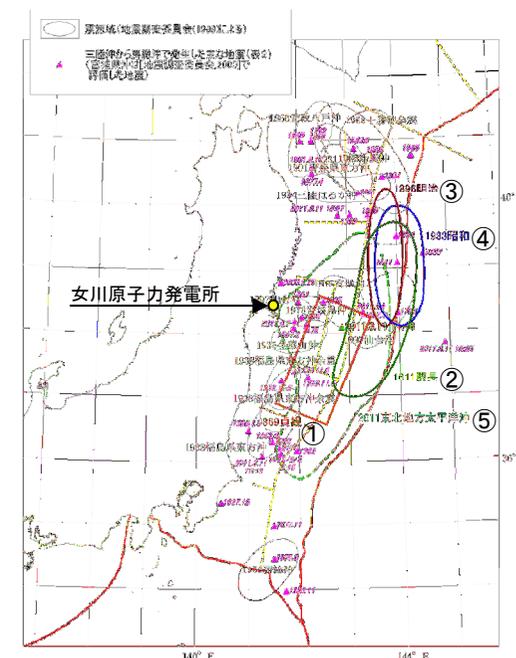
以上から、遠地津波は、日本海溝沿いで発生する近地津波を上回るものではないと評価した。

I. 地震に起因する津波の評価 1. 文献調査

1.4 文献調査のまとめ

- ・ 敷地に最も影響を及ぼしたと考えられる津波は、日本海溝沿いの津波で、敷地に来襲した津波の最高水位は3.11地震に伴う津波のO.P.約+13mである。

区分	地震種別		名称	文献調査結果
近地津波	日本海溝沿い	プレート間地震	①869年の津波	3.11地震に伴う津波と同等もしくは下回る規模。
			⑤3.11地震に伴う津波	敷地前面でO.P.約+13m(発電所の潮位計による観測記録)。
			②1611年の津波※	敷地近傍の記録はないが、三陸沿岸で最大25m程度(痕跡高)。
		津波地震	③1896年明治三陸地震津波	敷地近傍で2.7m(痕跡高)。(三陸沿岸で最大38m程度(痕跡高)。)
			②1611年の津波※(正断層型)	敷地近傍の記録はないが、三陸沿岸で最大25m程度(痕跡高)。
			④1933年昭和三陸地震津波(正断層型)	敷地近傍で約3.6m(痕跡高)。(三陸沿岸で最大29m程度(痕跡高)。)
	千島海溝沿い	プレート間地震	超巨大地震(17世紀型)	<ul style="list-style-type: none"> ・敷地周辺で3m以下(解析値)。 ・日本海溝沿いで発生する近地津波を上回るものではない。 ・津波伝播特性からも影響は小さい。
遠地津波	プレート間地震	1700年カスケード地震	敷地近傍の記録はないが、三陸沿岸で3m程度(痕跡高)で、宮古(岩手県)で津波の被害があったという。	
		1952年カムチャッカ地震	敷地近傍の記録はないが、三陸沿岸で数m程度で、漁業関係に被害あり。	
		1960年チリ地震	<ul style="list-style-type: none"> ・遠地津波として既往最大。 ・敷地周辺でT.P.+3.3m(痕跡高)。(三陸沿岸で最大6.1m(痕跡高)。) 	
		1964年アラスカ地震	敷地近傍の記録はないが、三陸沿岸で数m程度で、漁業施設に若干の被害あり。	
津波堆積物(日本海溝沿い)	プレート間地震 東北地方太平洋沖型の地震	①869年の津波と⑤3.11地震に伴う津波の比較	仙台平野と石巻平野における浸水域の比較から、3.11地震に伴う津波は869年の津波とほぼ同等、もしくは上回る規模。	



日本海溝沿いで発生した主な地震と震源域(地震調査研究推進本部(2012)の図に加筆)

※:地震調査研究推進本部(2019)では、1611年の津波を「津波地震」と評価しているが、「正断層型の海洋プレート内地震」の断層モデルも提案されている(土木学会(2002, 2016), 相田(1977)等)。

I. 地震に起因する津波の評価 1. 文献調査

1.5 検討波源の選定

- 文献調査の結果を踏まえ、検討波源は日本海溝沿いで発生する津波を選定した※1。
- また、海域の活断層について、既往津波の記録はないが、地質調査結果を基に敷地への影響を評価した。

※1:遠地津波は、近地津波と津波の特性(周期, 第1波以降の後続波の水位変動)が異なることを踏まえ、参考として地震規模、敷地と波源の位置関係から、敷地に与える影響が大きいと考えられる1700年カスケード地震、1960年チリ地震を対象に数値シミュレーションを実施した。検討内容の詳細は、補足説明資料「I. 3. 遠地津波の数値シミュレーション」に記載。

文献調査による検討波源の選定結果

区分	地震種別		敷地に影響を及ぼした可能性がある 既往津波
近地 (日本海溝沿い)	プレート間地震	東北地方太平洋沖型の地震	869年の津波※2 ----- 3.11地震に伴う津波
		津波地震	1611年の津波 ----- 1896年明治三陸地震津波
	海洋プレート内地震		1611年の津波(正断層型) ----- 1933年昭和三陸地震津波(正断層型)
	遠地	プレート間地震	1700年カスケード地震に伴う津波 ----- 1960年チリ地震に伴う津波

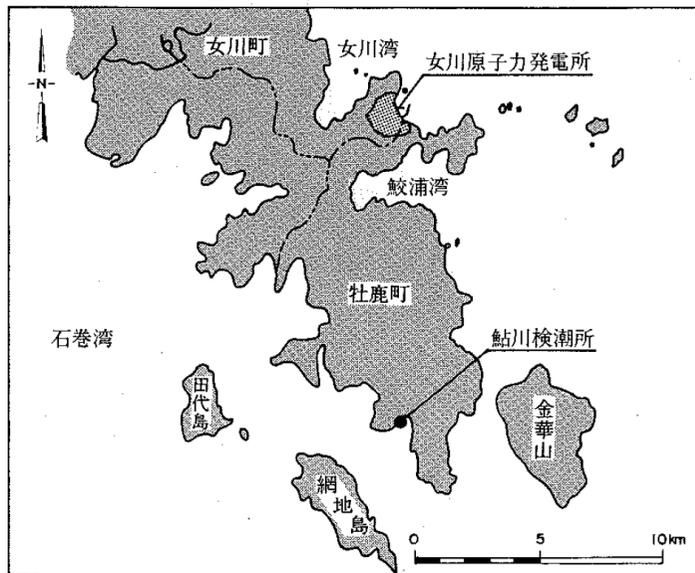
※2:869年の津波の波源域は3.11地震に伴う津波の波源域に包含されることから(p14)、再現性の確認は3.11地震に伴う津波を代表に実施。

I. 地震に起因する津波の評価 1. 文献調査

1.6 潮位条件

- 基準津波評価で考慮している朔望平均潮位は、敷地南方約11kmに位置する気象庁鮎川検潮所における1986年～1990年の観測記録を用いて算定した※。

※: 潮位条件の妥当性確認の詳細は、補足説明資料「Ⅲ. 1. 潮位条件」に記載。



発電所と鮎川検潮所の位置図

基準津波評価で考慮している朔望平均潮位

朔望平均満潮位	O.P.+1.43m
朔望平均干潮位	O.P.-0.14m

I. 地震に起因する津波の評価

1. 文献調査
2. 津波解析条件
 - 2.1 津波予測解析
 - 2.2 再現解析
 - 2.3 水位上昇側の評価方法
 - 2.4 水位下降側の評価方法
 - 2.5 津波水位の抽出位置
3. 東北地方太平洋沖型の地震
4. 津波地震
5. 海洋プレート内地震
6. 海域の活断層による地殻内地震

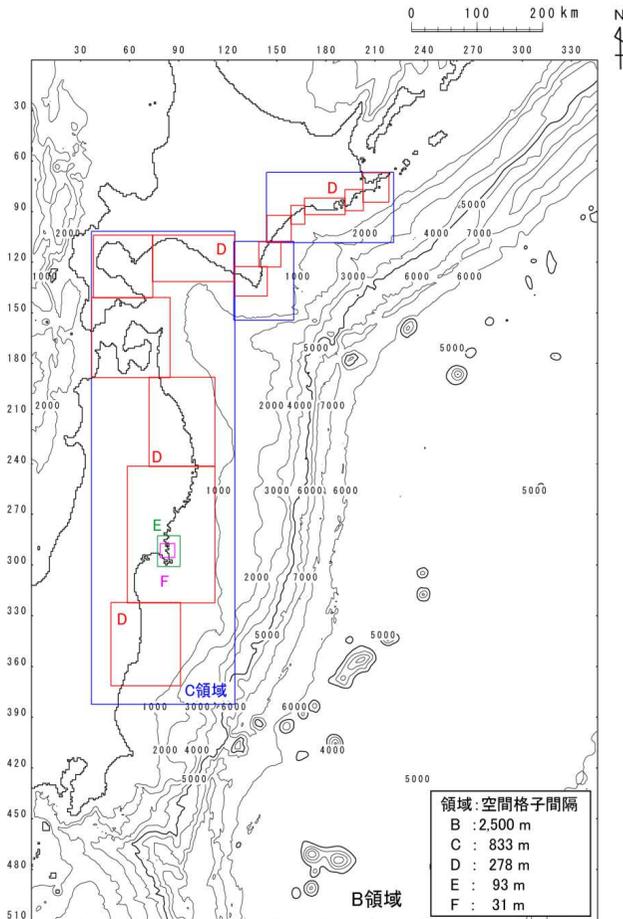
I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

2. 1 津波予測解析: 計算条件

- 下記の計算条件に基づき津波解析を実施した。

主な計算条件

	B領域	C領域	D領域	E領域	F領域	G領域	H領域
空間格子間隔※1 Δs	2.5 km	833 m (2500/3)	278 m (2500/9)	93 m (2500/27)	31 m (2500/81)	10m (2500/243)	5m (2500/486)
時間格子間隔※2 Δt	0.1秒						
基礎方程式	線形 長波式	非線形長波式(浅水理論)※3					
沖側境界条件	自由透過	外側の大格子領域と水位・流量を接続					
陸側境界条件	完全反射	完全反射 (海底露出を考慮)	小谷ほか(1998)の遡上境界条件				
初期海面変動	波源モデルを用いてMansinha and Smylie(1971)の方法により計算される鉛直変位を海面上に与える						
海底摩擦	考慮 しない	マンニングの粗度係数 $n = 0.03m^{-1/3}s$ (土木学会(2016)より)					
水平渦動粘性 係数	考慮しない						
潮位条件	T.P.±0.0m※4						
計算再現時間	地震発生後4時間※5						



計算領域※6とその水深及び格子分割

※1: 空間格子間隔の設定根拠の詳細は、補足説明資料「Ⅲ. 第2章 2. 1空間格子間隔の設定」に記載。

※2: 時間格子間隔の設定根拠の詳細は、補足説明資料「Ⅲ. 第2章 2. 2時間格子間隔の設定」に記載。

※3: 土木学会(2016)では、水深200m以浅の海域を目安に非線形長波式を適用するとしている。これを十分に満足するようC領域以下(水深1500m以浅)で非線形長波式(浅水理論)を適用した。

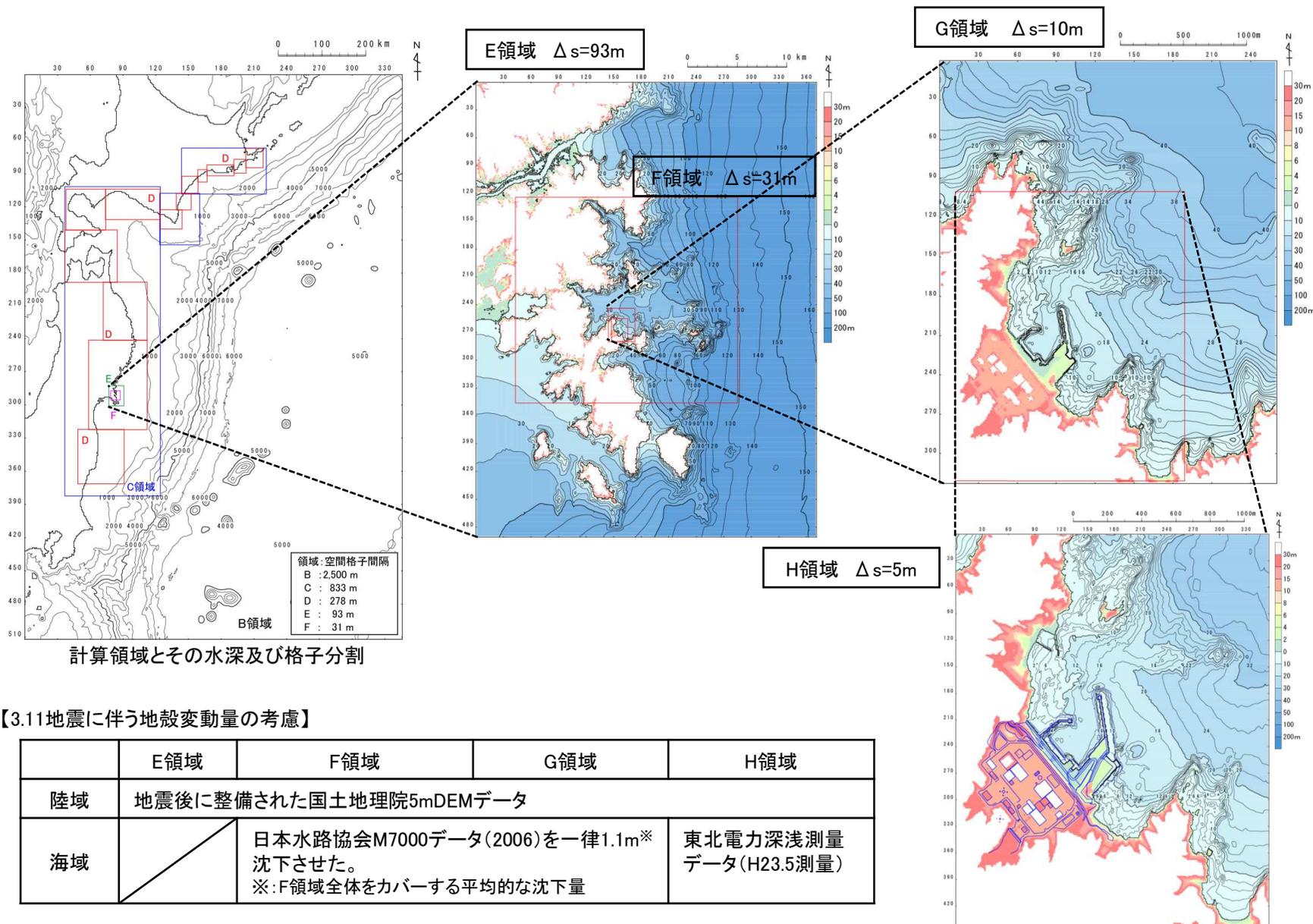
※4: T.P.±0.0m=O.P.+0.74m(O.P.は女川原子力発電所工事用基準面)

※5: 日本海溝沿いで発生する近地津波を評価するにあたって、十分な計算時間となるよう設定した。

※6: 計算領域範囲は、日本海溝沿い・千島海溝沿い南部の津波発生領域が含まれる範囲及び北海道・東日本沿岸からの反射波が発電所に与える影響を考慮して設定した(東西約870km, 南北約1,300km)。

I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

2. 1 津波予測解析: 計算領域とその水深



I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

2.2 再現解析: 津波高の再現性の評価指標

- 再現性の評価指標には、相田(1977)による既往津波高と数値シミュレーションにより計算された津波高との比から求める幾何平均値 K 及びばらつきを表す指標 κ を用いた。
- K 及び κ については、土木学会(2016)により、「 $0.95 < K < 1.05$, $\kappa < 1.45$ 」が再現性の目安とされている。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i, \quad \log \kappa = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - n(\log K)^2 \right\} \right]^{1/2}, \quad K_i = R_i / H_i$$

ここで、

n : 地点数, R_i : i 番目の地点での観測値(痕跡高), H_i : i 番目の地点での数値シミュレーション結果

I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

2.2 再現解析: 計算条件

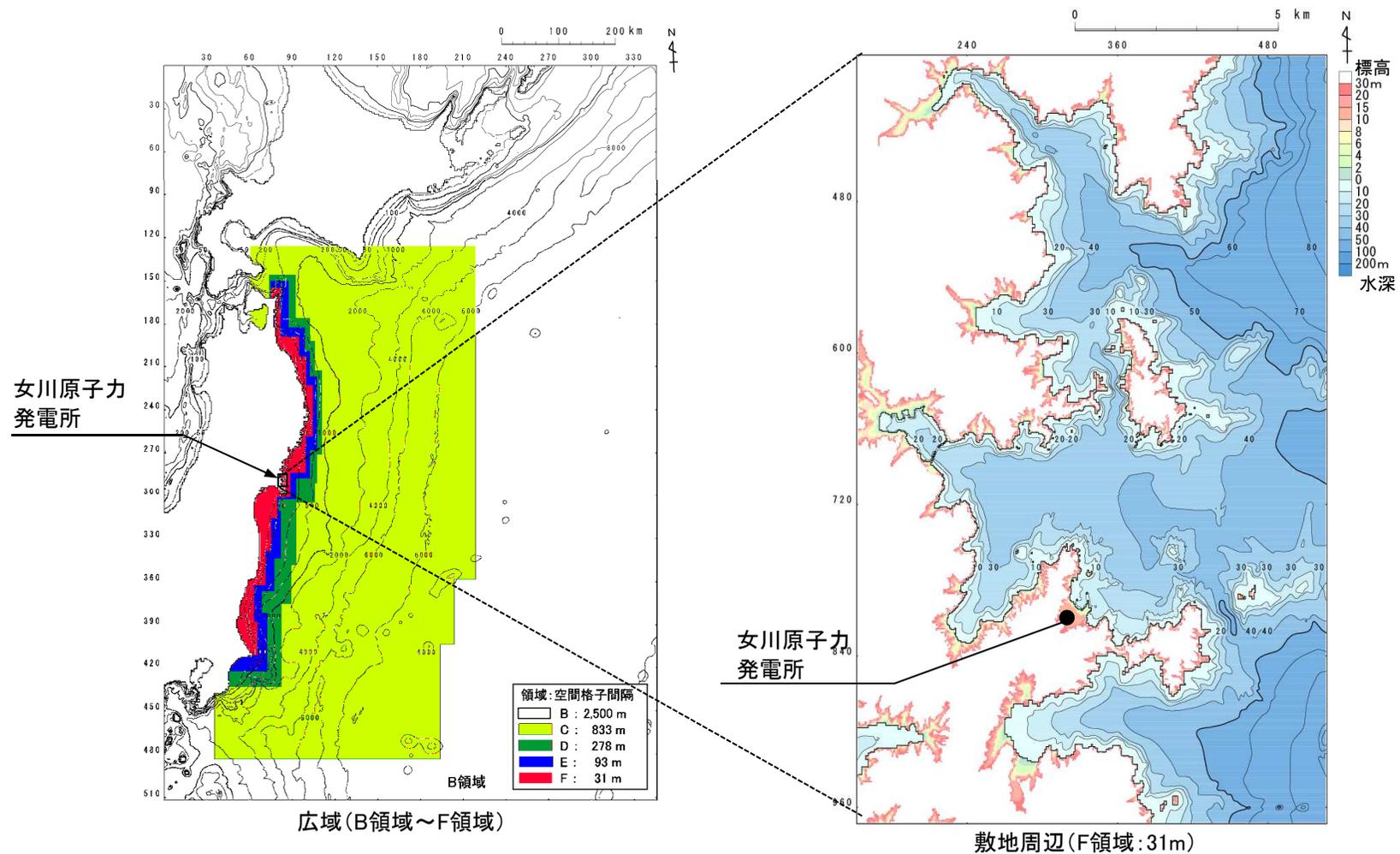
- 下表の計算条件に基づき、再現解析を実施した。

項目 \ 領域	B領域※	C領域	D領域	E領域	F領域	G領域	H領域
空間格子間隔 Δs	2.5 km	833 m (2500/3)	278 m (2500/9)	93 m (2500/27)	31 m (2500/81)	10m (2500/243)	5m (2500/486)
時間格子間隔 Δt	1896年明治三陸地震津波, 1933年昭和三陸地震津波: 1秒						
	1611年の津波(津波地震, 正断層型の地震): 0.5秒						
	3.11地震: 0.1秒						
基礎方程式	線形 長波式	非線形長波式(浅水理論)					
沖側境界条件	自由透過	外側の格子領域と水位・流量を接続					
陸側境界条件	完全反射	完全反射 (海底露出を考慮)	小谷ほか(1998)の遡上境界条件				
初期海面変動	波源モデルを用いてMansinha and Smylie(1971)の方法により計算される鉛直変位を海面上に与える						
海底摩擦	考慮 しない	マンニングの粗度係数 $n = 0.03\text{m}^{-1/3}\text{s}$ (土木学会(2016)より)					
水平渦動粘性係数	考慮しない						
潮位条件	1896年明治三陸地震津波, 1933年昭和三陸地震津波, 1611年の津波(津波地震, 正断層型の地震): T.P. $\pm 0.0\text{m}$						
	3.11地震: T.P. -0.4m						
計算再現時間	4時間						
計算区分	1896年明治三陸地震津波, 1933年昭和三陸地震津波						
	1611年の津波(津波地震, 正断層型の地震)						
	3.11地震						

※: 東西約870km, 南北約1,300km。

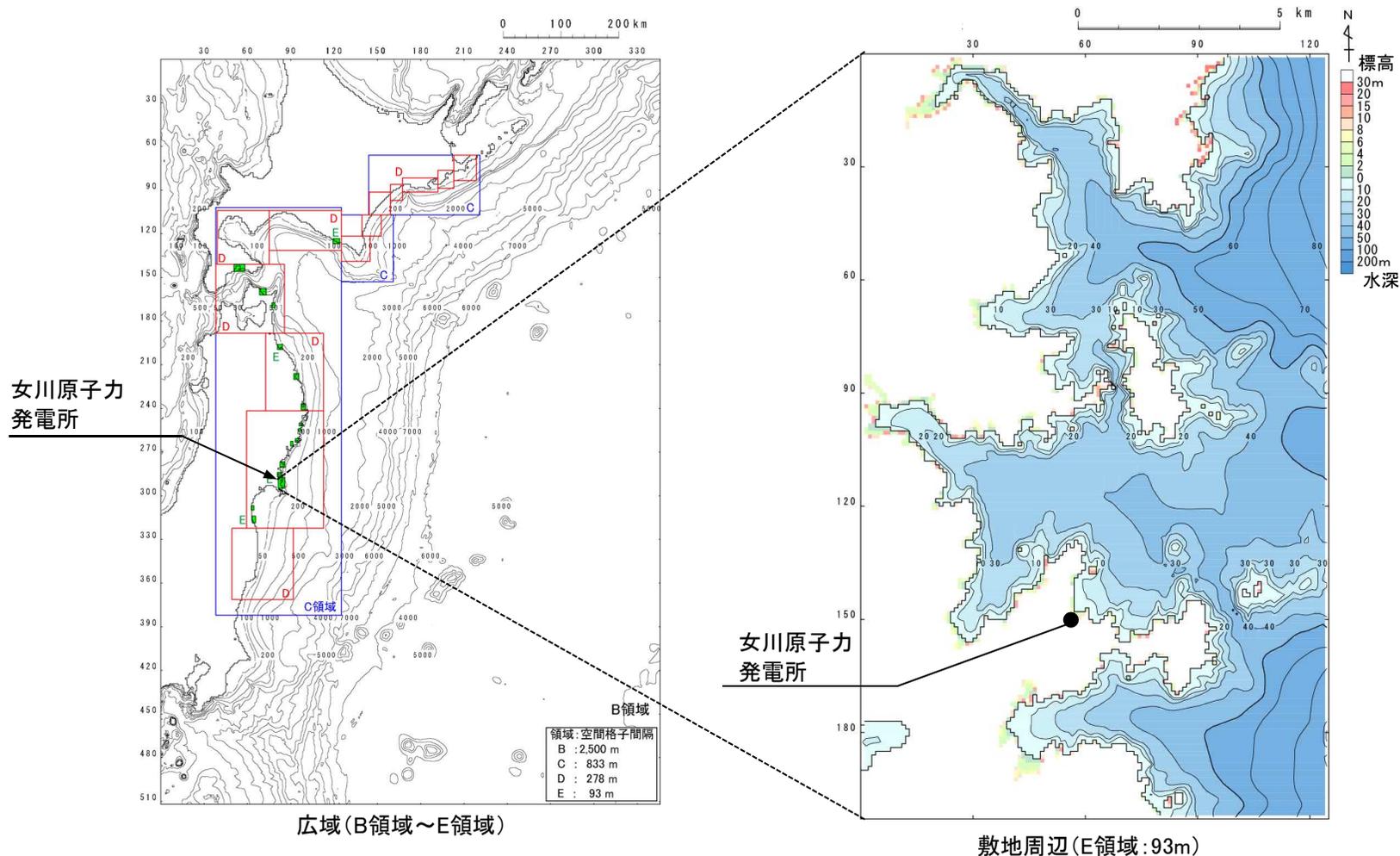
I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

2. 2 再現解析: 計算領域とその水深(3.11地震)



2. 2 再現解析: 計算領域とその水深

(1896年明治三陸地震津波, 1933年昭和三陸地震津波, 1611年の津波(津波地震, 正断層型の地震))



I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

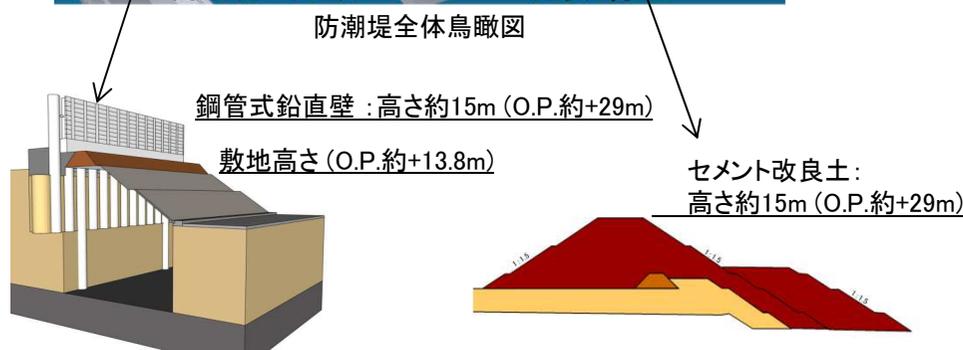
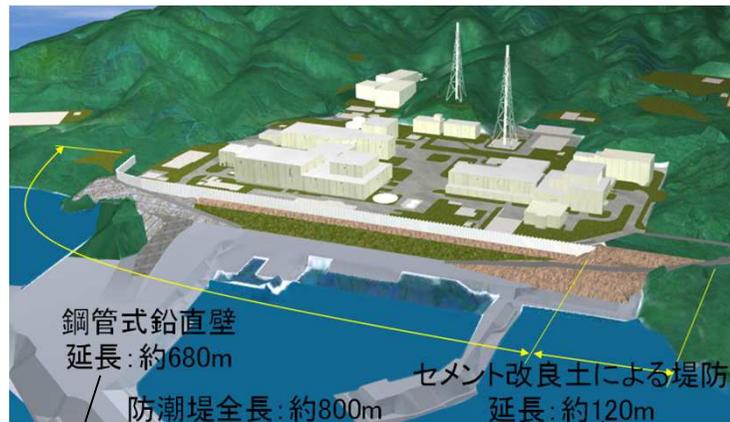
2.3 水位上昇側の評価方法: 敷地前面

■評価位置

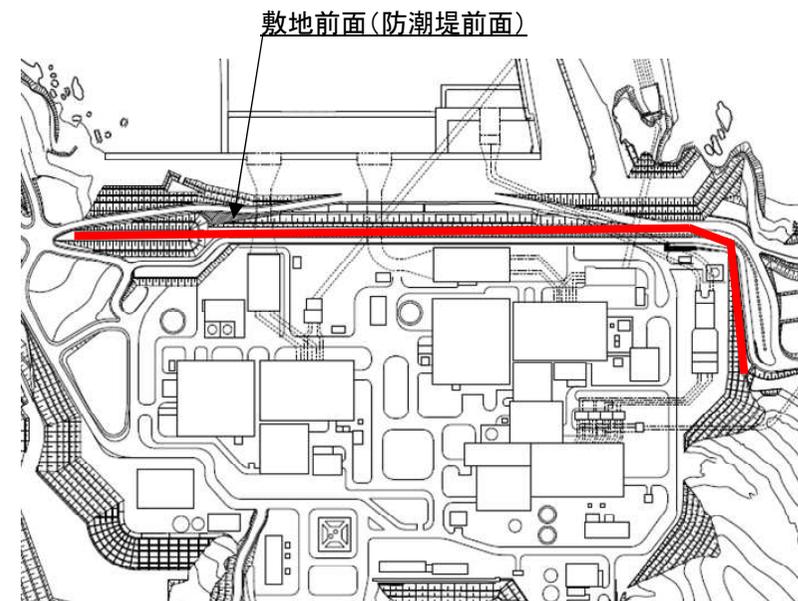
- 設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の津波防護対象設備(非常用取水設備を除く。)を内包する建屋及び区画が設置された敷地(O.P.約+13.8m)に基準津波による遡上波を到達, 流入させないため, 津波防護施設として防潮堤(標高: O.P.約+29m, 総延長: 約800m)を設置することから, 防潮堤前面(=本評価では「敷地前面」という。)を評価位置とした。

■最大ケースの選定方法

- 敷地前面の津波水位に着目して最大ケースを選定した。



防潮堤概観図(鋼管式鉛直壁)



I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

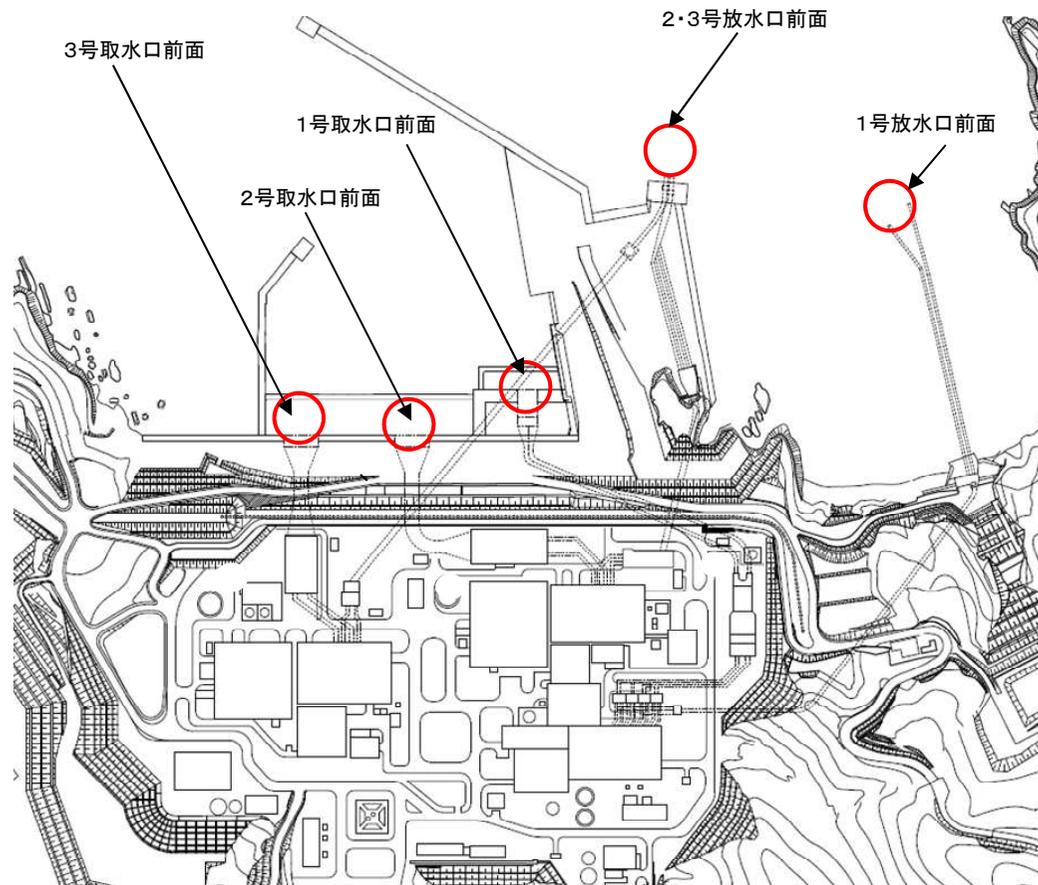
2.3 水位上昇側の評価方法: 取水口前面及び放水口前面

■評価位置

- 取水路, 放水路の経路から, 設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の津波防護対象設備(非常用取水設備を除く。)を内包する建屋及び区画が設置された敷地(O.P.約+13.8m)への津波の流入を評価するため, 1, 2, 3号取水口前面及び1号, 2・3号放水口前面を評価位置とした。

■最大ケースの選定方法

- 各取放水口前面の津波水位に着目して最大ケースを選定した。

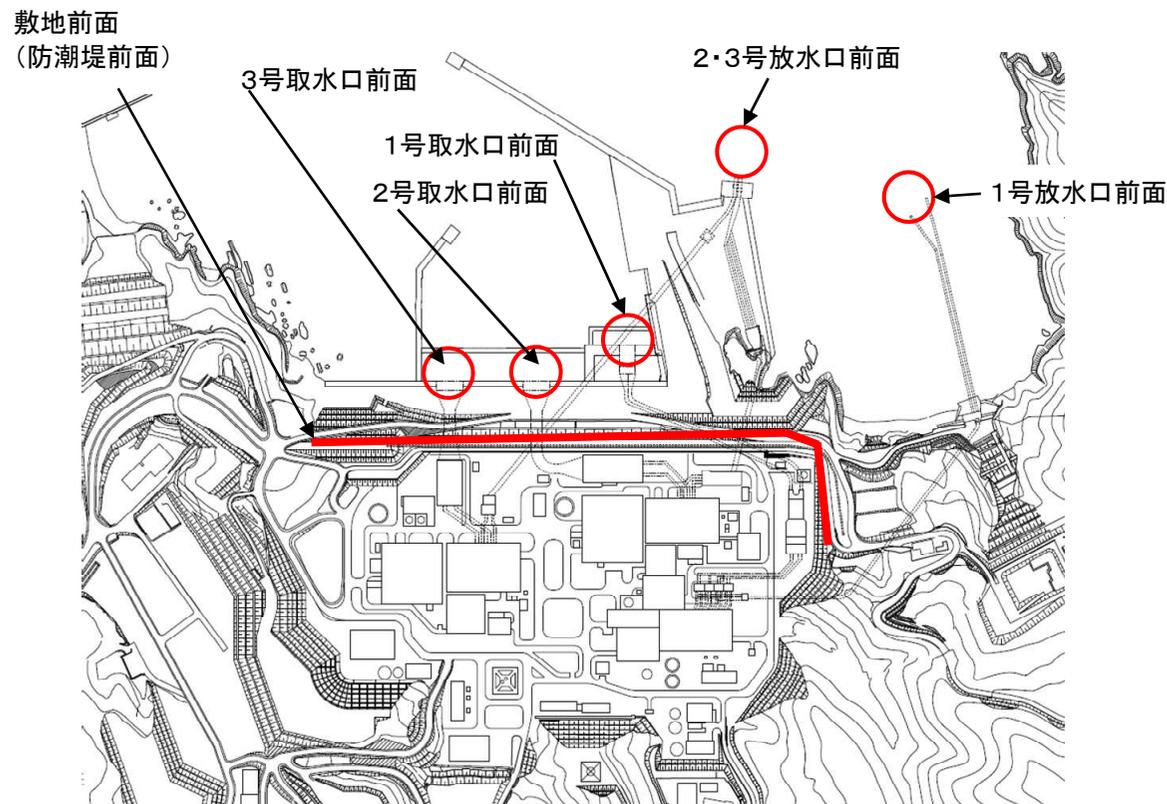


津波水位の評価位置

I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

2.3 水位上昇側の評価方法:まとめ

評価項目	敷地前面	取水口前面			放水口前面	
		1号	2号	3号	1号	2・3号
津波水位	○	○	○	○	○	○



津波水位の評価位置

I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

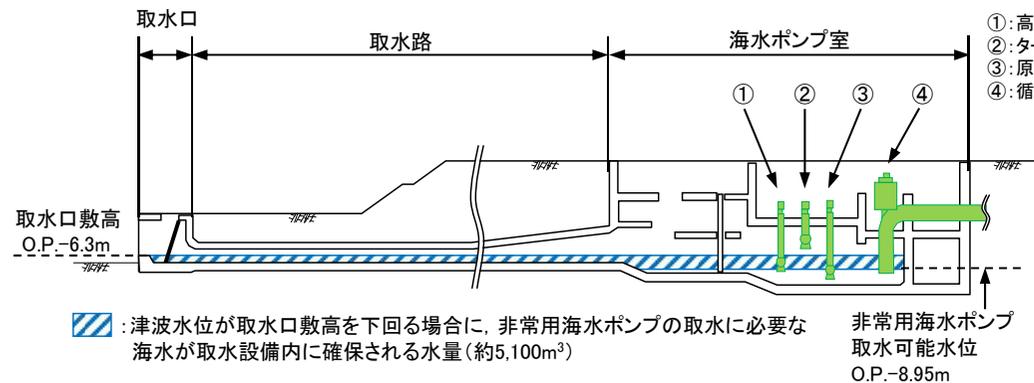
2.4 水位下降側の評価方法

■評価位置

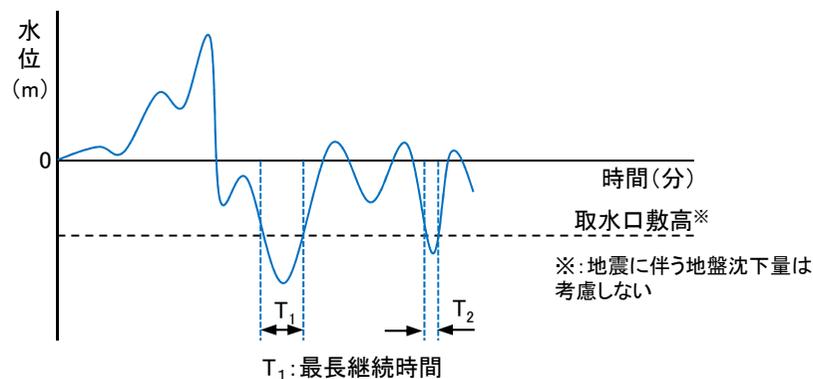
- 2号機非常用海水ポンプの取水性を評価するため、2号取水口前面を評価位置とした。

■最大ケースの選定方法

- 津波水位が取水口敷高を下回る場合における非常用海水ポンプの取水に必要な海水の貯留容量に関する評価、津波による砂の移動・堆積及び漂流物に対する取水路の通水性に関する評価の観点から、2号取水口前面の津波水位に着目して最大ケースを選定した。



2号取水設備断面図(概要)



取水口敷高を下回る継続時間(概念)

(参考)2号機非常用海水ポンプの運転可能継続時間

■前提条件

- 循環水ポンプは、海水ポンプ室内の水位がO.P.-5.95mまで低下した時点で、ポンプトリップインターロックが動作している状況にあるが、遊転時間分(トリップからポンプ停止までの時間)、定格流量で取水するものと仮定。

■2号機非常用海水ポンプの運転可能継続時間の算定

- (A)有効貯水量:約5,100(m³)
取水口敷高(O.P.-6.3m)から非常用海水ポンプの取水可能水位(O.P.-8.95m)までの容量
- (B)循環水ポンプが停止するまでに取水する水量:1,662(m³)
99,720(m³/hr)(定格流量)÷3,600×30(s)(遊転時間)×2(台)=1,662(m³)
- (C)非常用海水ポンプの取水に使用可能な水量:3,438(m³)
(A)-(B)=5,100(m³)-1,662(m³)=3,438(m³)
- (D)2号機非常用海水ポンプの運転可能継続時間:約26(分)
(C)/非常用海水ポンプの取水量=3,438(m³)/7,850(m³/hr)×60=約26分

非常用海水ポンプの取水量

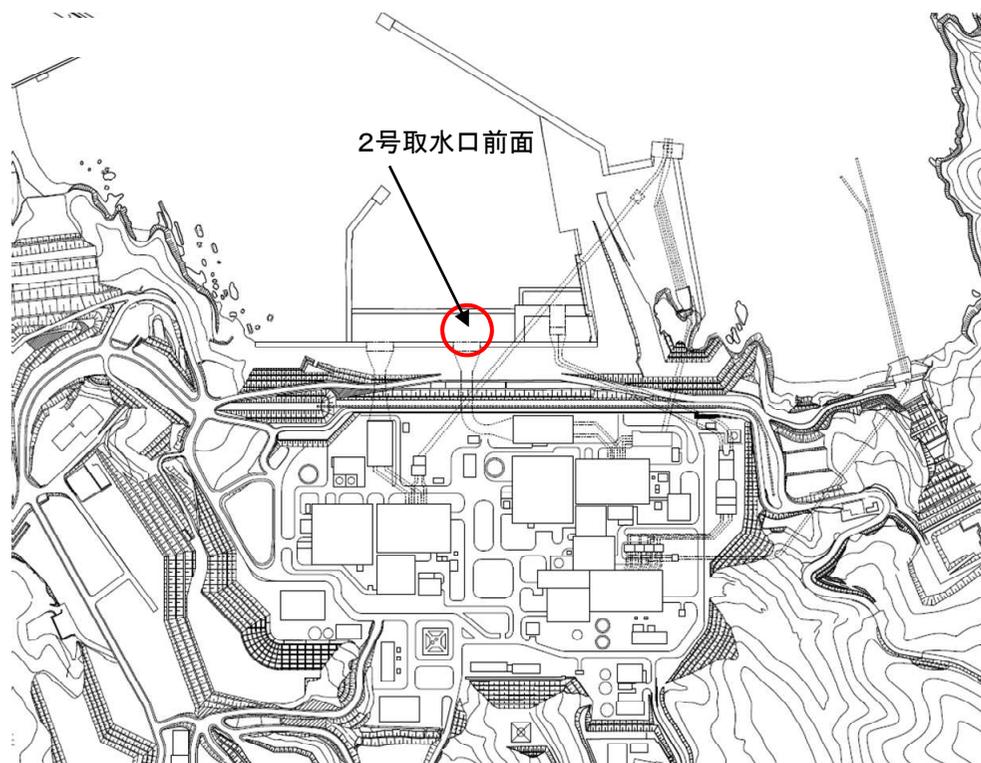
	運転台数※	流量	取水量
原子炉補機冷却海水ポンプ	2台×2系統	7,600(m ³ /hr)	7,850(m ³ /hr)
高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ	1台×1系統	250(m ³ /hr)	

※ 非常用海水ポンプの最大運転台数を考慮

I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

2. 4 水位下降側の評価方法:まとめ

評価項目	取水口前面
	2号
津波水位	○

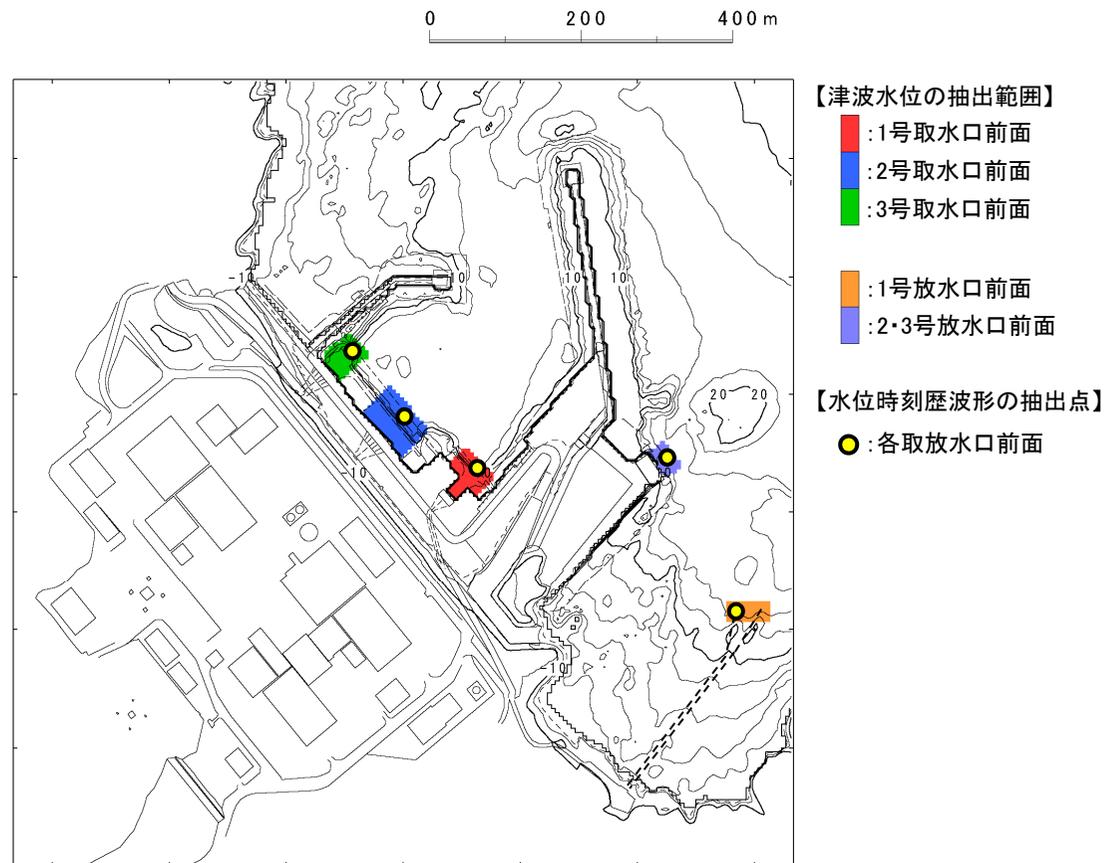


津波水位の評価位置

I. 地震に起因する津波の評価 2. 津波解析条件

2.5 津波水位の抽出位置

- 津波解析は波源特性の不確かさを考慮した多数のパラメータスタディを実施するが、各ケースによって発電所港内における津波の流れ場が異なることから、津波水位(最大水位上昇量・最大水位下降量)の抽出位置を下図のとおり設定した。
- 取放水設備の水理特性を考慮した水位変動解析等に用いる水位時刻歴波形の抽出位置は、上記の代表点として、各取放水口前面の中央位置とした。



津波水位の抽出位置

I. 地震に起因する津波の評価

1. 文献調査
2. 津波解析条件
3. 東北地方太平洋沖型の地震
 - 3.1 評価の全体概要
 - 3.2 想定波源域及び地震規模の設定
 - 3.3 基準断層モデルの設定
 - 3.4 波源特性の不確かさの考慮
 - 3.5 「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波の評価
4. 津波地震
5. 海洋プレート内地震
6. 海域の活断層による地殻内地震

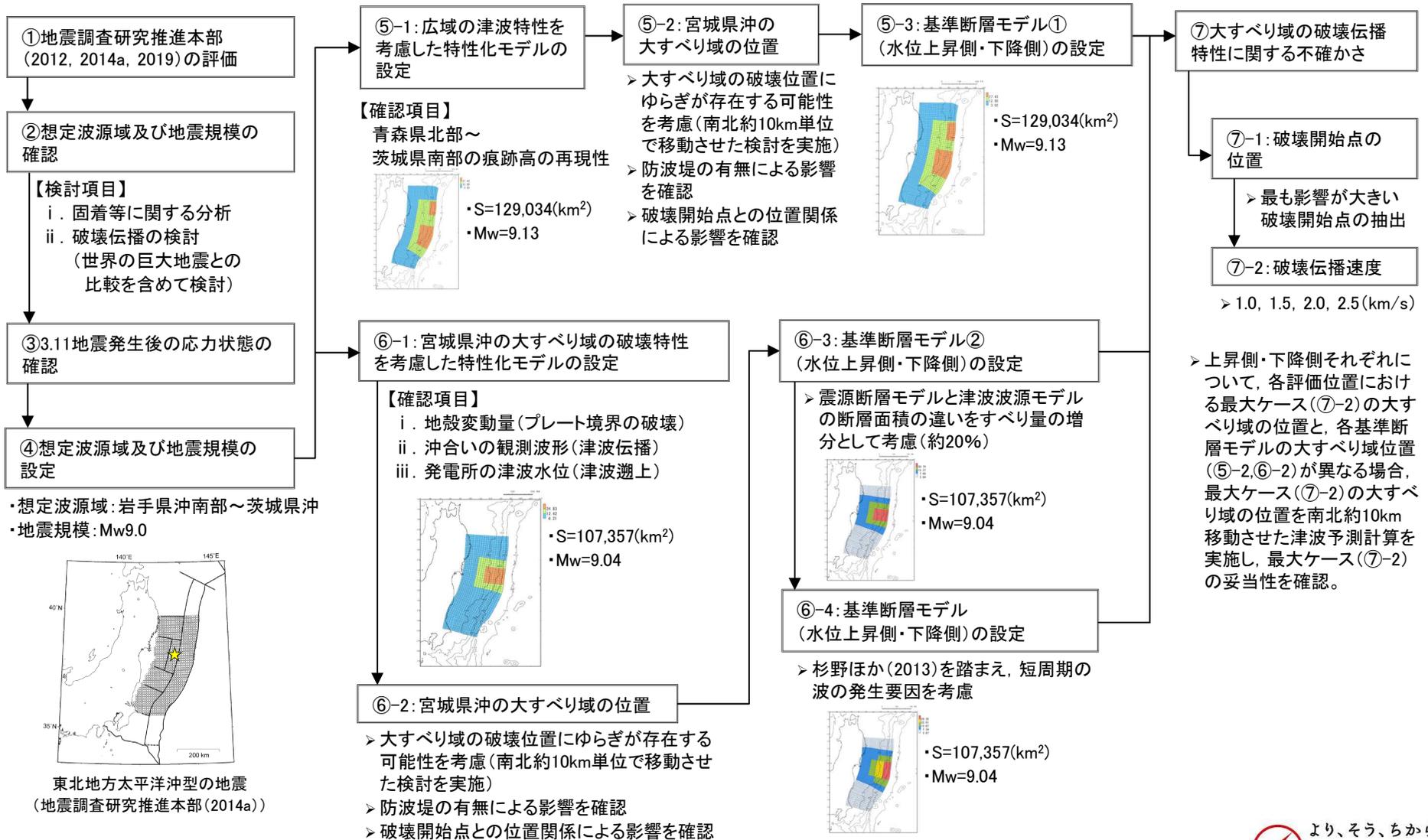
I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震

3. 1 評価の全体概要

1. 想定波源域及び地震規模の設定

2. 基準断層モデルの設定

3. 波源特性の不確かさの考慮



3.2.1 設定概要

地震調査研究推進本部(2012, 2014a, 2019)が評価した「東北地方太平洋沖型の地震(Mw9.0)」を上回る規模の地震発生可能性について、3.11地震、世界のプレート境界で発生しているM9クラスの巨大地震に係る地震学的・地質学的・測地学的知見を収集・分析し、その科学的・技術的知見に基づき、以下のとおり検討して、想定波源域及び地震規模の設定に反映する。

1. 地震調査研究推進本部の評価

- ✓ 地震調査研究推進本部の「東北地方太平洋沖型の地震」に関する評価の内容を整理する。

2. 日本海溝沿いのテクトニクス背景

- ✓ 日本海溝沿いのテクトニクス背景を整理する。

3. M9クラスの巨大地震を発生させる固着域に関する分析

- (1) M9クラスの巨大地震を発生させる固着域※1
 - ✓ 世界で発生しているM9クラスの巨大地震に係る知見に基づき、巨大地震を発生させる固着域を評価する。
- (2) 宮城県沖の固着域※1で蓄積する歪みの量
 - ✓ 3.11地震後の応力状態、過去の地震による浸水域の比較及び地震発生履歴から、宮城県沖の固着域で蓄積する歪みの量について評価する。
- (3) 世界の巨大地震発生履歴を踏まえた検証
 - ✓ 世界のM9クラスの巨大地震発生履歴に関する分析から、宮城県沖の固着域で蓄積する歪みの量に関する評価の妥当性を確認する。

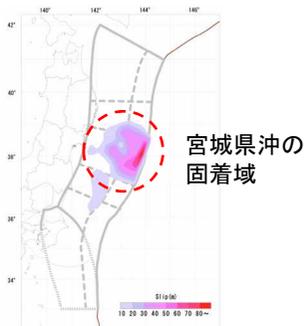
4. 破壊伝播の検討

- (1) 3.11地震の破壊過程
 - ✓ 破壊伝播の検討にあたり、3.11地震における宮城県沖の固着域の破壊過程に関する知見を整理する。
- (2) 青森県東方沖及び岩手県沖北部、岩手県沖南部、福島県沖・茨城県沖、房総沖の固着等
 - ✓ 地震発生履歴及び3.11地震の震源域・余震分布等から、宮城県沖に対する各領域の固着度(大小)※2等を分析する。
- (3) 破壊伝播の検討
 - ✓ 以上の分析結果に加え、活断層の連動時における断層間相互作用に関する知見も踏まえて、宮城県沖の固着域を起点(震源)とする破壊の伝播範囲(北端・南端)を検討する。
- (4) 世界の巨大地震との比較
 - ✓ テクトニクス背景、地震学的・測地学的見地等から、破壊の伝播範囲(北端・南端)に関する評価の妥当性を確認する。

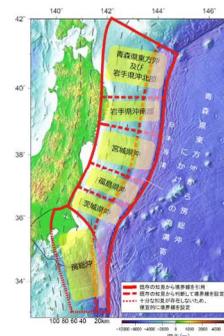
5. 想定波源域及び地震規模の設定

- ✓ 特性化モデル(基準断層モデル)の巨視的波源特性のうち想定波源域及び地震規模の設定に反映する。

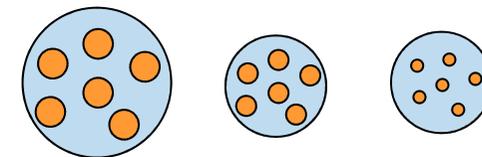
※1: M9クラスの巨大地震を発生させる固着の領域を「固着域」とする。
 ※2: M9クラスの巨大地震を発生させる固着の強さの度合い(大小)を「固着度」とする。



東北地方太平洋沖型地震の震源域(地震本部(2019))



地震発生領域区分(地震本部(2019))



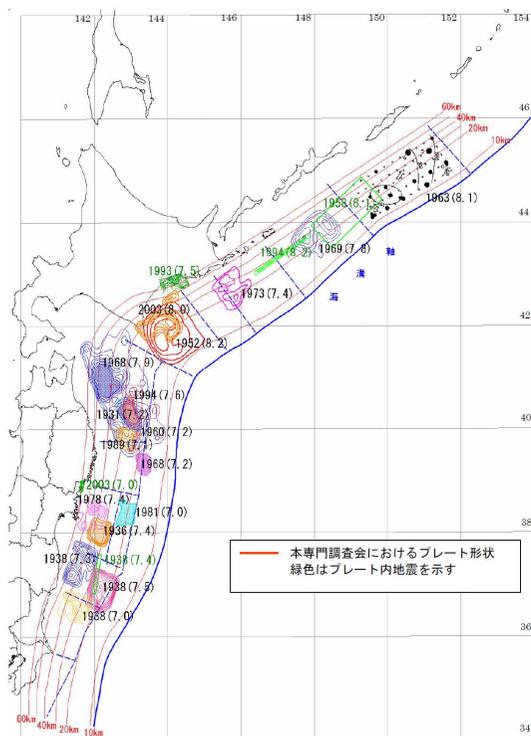
固着度:大 (M9クラス) 固着度:中 (M8クラス) 固着度:小 (M8クラス以下)

固着度のイメージ(Seno(2014)を参考に作成)

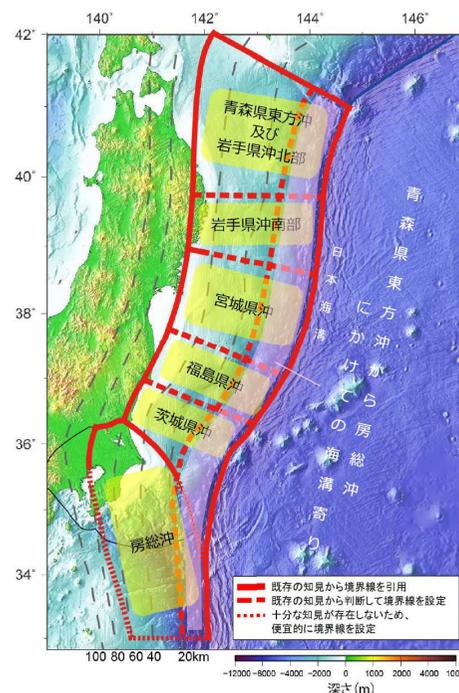
I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.2 想定波源域及び地震規模の設定

3.2.2 地震調査研究推進本部の評価

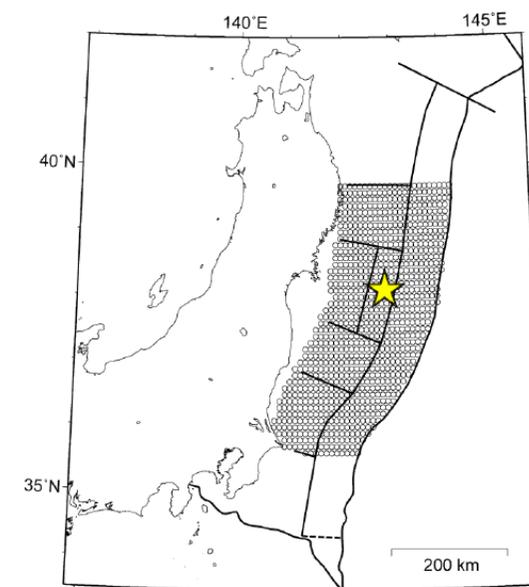
- 地震調査研究推進本部(2019)は、過去に発生した地震等を根拠に、青森県東方沖から房総沖にかけての評価対象領域を以下のとおり区分し(中央図)、地震活動の長期評価を実施している。
- 「東北地方太平洋沖型の地震」の次の地震の震源域については、3.11地震の知見から、「宮城県沖を必ず含み、隣接する領域(岩手県沖南部または福島県沖)の少なくとも一方にまたがり、場合によっては茨城県沖まで破壊が及ぶ超巨大地震である。」と評価している。また、地震規模については、「3.11地震を代表値としてM9.0程度。」と評価している。
- 地震調査研究推進本部(2014a)は、「東北地方太平洋沖型の地震」の想定波源域を岩手県沖南部～茨城県沖、その地震規模をMw9.0として、地震ハザードを評価している(右図)。



日本海溝・千島海溝沿いのこれまでの研究による
アスペリティの分布
(中央防災会議(2006))



地震調査研究推進本部による青森県東方沖から
房総沖にかけての評価対象領域の区分け
(地震調査研究推進本部(2019))

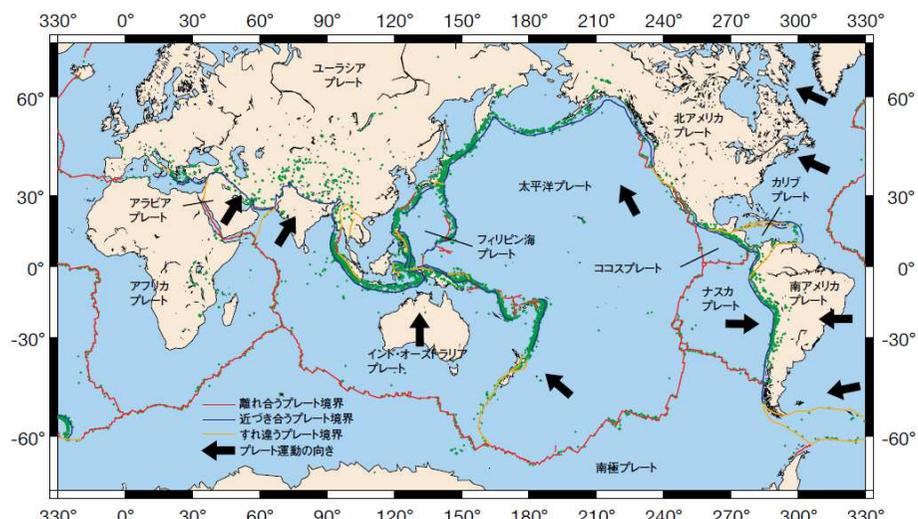


確率論的地震動予測地図の作成に用いた
「東北地方太平洋沖型の地震」の断面図
(地震調査研究推進本部(2014a))

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.2 想定波源域及び地震規模の設定

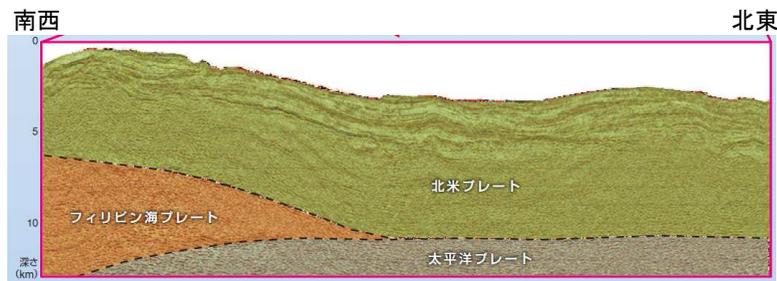
3.2.3 日本海溝沿いにおけるテクトニクスの背景

- 世界の地震は、プレート境界周辺に帯状に集中して発生しており、その約1割が日本の周辺で発生している(地震調査研究推進本部(2014b))。
- 日本列島は、主に陸のプレートである北米プレートとユーラシアプレートに位置し、太平洋プレートは東南東の方向から年間約8cmの速さで千島海溝、日本海溝、伊豆・小笠原海溝から沈み込み、フィリピン海プレートは、ほぼ南東の方向から年間3~5cm程度の速さで南海トラフ、南西諸島海溝から沈み込んでいる(地震調査研究推進本部(2014b))。
- 日本海溝の南端にあたる房総沖は、陸側のプレートの下にフィリピン海プレートが、さらに下方には太平洋プレートが沈み込んでおり、日本海溝の他領域とテクトニクスの背景に大きな違いがある(JAMSTEC(2011), 長谷川ほか(2010))。



震央(緑色の点)は、USGS(米国地質調査所)の資料をもとに、1998-2007年、M5以上、100kmより浅い地震を表示(気象庁作成)。プレート境界は、テキサス大学地球物理学研究所(The PLATES Project)の資料をもとに作成。

世界の地震分布とプレート境界(地震調査研究推進本部(2014b))



房総沖の地下構造(JAMSTEC(2011))

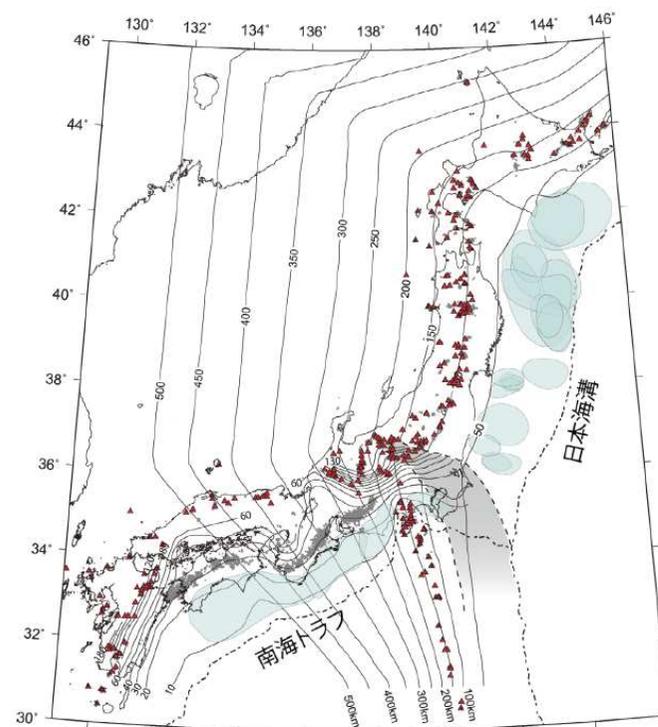
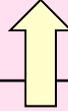
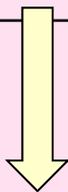


図1 日本列島下に沈み込む太平洋プレートおよびフィリピン海プレートの形状(Nakajima and Hasegawa, 2007; Hirose et al., 2008; Nakajima et al., 2009a; Kita et al. 2010). 太平洋プレートおよびフィリピン海プレート上面の深さをコンターで示す。二本の破線で囲った灰色の領域は太平洋プレートとフィリピン海プレートの接触域。プレート境界大地震の想定震源域あるいは余震域(文科省, <http://www.jishin.go.jp/main/index.html> [Cited 2009/09/09]; Wald and Somerville, 1995; Umino et al., 1990)を水色の楕円で示す。赤三角は第四紀火山、黒点は深部低周波地震。

日本列島下に沈み込む太平洋プレート及びフィリピン海プレートの形状(長谷川ほか(2010))

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.2 想定波源域及び地震規模の設定
 3.2.4 固着等に関する分析, 破壊伝播の検討結果

- 固着等に関する分析, 破壊伝播の検討から, 宮城県沖の固着域を起点(震源)とする破壊伝播の北端は岩手県沖南部, その南端は茨城県沖と評価した^{※1}。
^{※1}:各評価の詳細は, 補足説明資料「I. 第4章 4.1 固着域に関する分析, 4.2 破壊伝播の検討」に記載。

固着等に関する分析				破壊伝播の検討	
地震本部の領域区分	テクトニクスの背景	固着度	内容	破壊伝播範囲	内容
青森県東方沖及び岩手県沖北部	陸側のプレートの下に, 太平洋プレートが沈み込む。	中	<ul style="list-style-type: none"> アスペリティのうち, 1968年の地震と1994年の地震の共通アスペリティのカップリング率はほぼ100%(Yamanaka and Kikuchi(2004)他)。 個々のアスペリティが単独で動けばM7クラス, 連動するとM8クラスの地震が発生(Yamanaka and Kikuchi(2004)他)。 	北端  起点 ^{※2} (震源)  南端	<ul style="list-style-type: none"> M8クラスの地震で歪みは解放し, M9クラスの巨大地震を発生させる歪みは蓄積しない。
岩手県沖南部		小	<ul style="list-style-type: none"> プレート境界深部に, 非地震性のすべりにより歪みが解放される低地震活動域が存在(Ye et al.(2012))。 岩手県沖のカップリングが弱い領域は, 本震の破壊伝播を防ぐ領域(Uchida and Matsuzawa(2011))。 		<ul style="list-style-type: none"> プレート境界深部の低地震活動域が, 隣接する領域からの破壊伝播を防ぐ。
宮城県沖		大	<ul style="list-style-type: none"> M7~8クラスの地震サイクルの上に, より長い周期のサイクル(スーパーサイクル)が存在(佐竹(2011)他)。 世界のM9クラスの巨大地震発生履歴との比較から, 蓄積する歪みの量には限度があり, 3.11地震に伴う大きなすべり量は最大規模。 		<ul style="list-style-type: none"> 蓄積する歪みの量には限度があり, 3.11地震よりもさらに応力を高めることはできない。
福島県沖・茨城県沖		小	<ul style="list-style-type: none"> M7クラスの地震が発生。また, 「東北地方太平洋沖型の地震」の震源域に含まれる領域(地震調査研究推進本部(2019))。 プレート境界深部に, 「東北地方太平洋沖型の地震」の発生に至る一連のプロセスとなる長期的な非地震性すべりが発生(Yokota and Koketsu(2015)他)。 		<ul style="list-style-type: none"> プレート境界深部で発生する長期的な非地震性すべり領域が, 隣接する宮城県沖におけるM9クラスの固着の破壊を助長する。
房総沖		小	<ul style="list-style-type: none"> テクトニクスの背景の違いにより, カップリング率が大きく異なり, 福島県沖・茨城県沖よりも固着が弱い(Uchida et al.(2009))。 フィリピン海プレート北東端の位置と3.11地震の破壊域は一致。フィリピン海プレートは, 破壊伝播のバリアとして作用する重要な役割を果たす可能性がある(Shinohara et al.(2011))。 		<ul style="list-style-type: none"> フィリピン海プレートの北東端が, 隣接する領域からの破壊伝播のバリアとなる。

※2:3.11地震では, 地震発生前に宮城県沖の固着域の周辺において, 様々な非地震性すべり, 前震に伴う地震すべり・余効すべりが発生した後に破壊に至った。

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.2 想定波源域及び地震規模の設定

3.2.5 世界の巨大地震との比較

- 世界のプレート境界で発生しているM9クラスの巨大地震と日本海溝沿いで発生する巨大地震のテクトニクス背景、地震学的・測地学的見地等から、前節(3.2.4)宮城県沖の固着域を起点(震源)とする破壊の伝播範囲(北端・南端)の評価の妥当性を確認した*。

*:世界の巨大地震との比較結果の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.2 破壊伝播の検討」に記載。

(1)南端の破壊伝播範囲の評価

- 南米チリ沖、スマトラ島沖で発生している巨大地震の震源域(破壊のバリア)に関する知見から、同一のプレート境界面でも、地下構造に不連続性が認められる場合、それが破壊のバリアとして作用すると考えられる。
- 上記は、3.11地震の破壊が、太平洋プレートにフィリピン海プレートが接触している付近で停止したことと共通性が見られることから、茨城県沖と房総沖の間に構造境界(破壊のバリア)を想定することができる。
- 以上から、宮城県沖の固着域を起点(震源)とする破壊伝播の南端を茨城県沖と評価した。

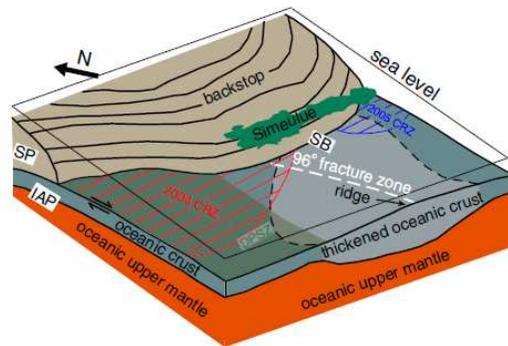


Figure 4. Cartoon illustrating the segmentation of the 2004–2005 megathrust rupture in the Sumatra subduction zone around Simeulue Island. The accretionary complex removed for simplicity. CRZ: coseismic rupture zone; SP: Sunda plate. Other labels same as in Figures 2 and 3.

スマトラ島沖における2004年と2005年の地震発生領域の境界部の地下構造(模式図)
(Tang et al.(2013))

(2)北端の破壊伝播範囲の評価

- 2004年スマトラ～アンダマン地震と同様の破壊伝播が生じる可能性を確認するため、スマトラ島～アンダマン諸島沖と日本海溝沿いで発生する巨大地震のテクトニクス背景、地震学的・測地学的見地及び地震発生様式の分類に関する見地から比較を行った。
- 震源からの破壊伝播範囲に影響を及ぼすテクトニクス背景及びプレート境界面における固着のばらつき・カップリング率には大きな違いがあり、巨大地震の破壊様式の分類も異なる。
- 以上から、日本海溝沿いで2004年スマトラ～アンダマン地震と同様の破壊伝播が生じる可能性は低い。即ち、M9クラスの巨大地震を発生させる宮城県沖の固着域を起点(震源)とする破壊が青森県東方沖及び岩手県沖北部まで伝播する可能性は低いと評価した。

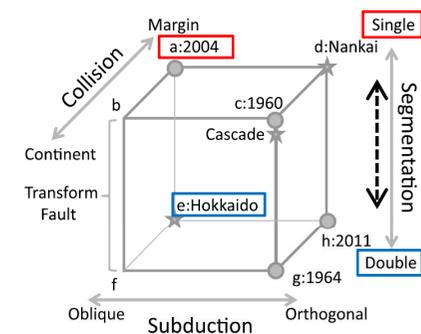


Fig. 7. Variability of megathrust earthquakes in terms of seismic segmentation (along-strike single segmentation, ASSS or along-dip double segmentation, ADDS), subduction zone geometry (orthogonal or oblique) and collision with continental plate or continental margin. Typical end-members of great earthquakes are plotted by solid circles with their year of occurrences. Possible future large earthquakes in Hokkaido and Nankai Trough (Fig. 1(b)) and the Cascade subduction zone are indicated by stars.

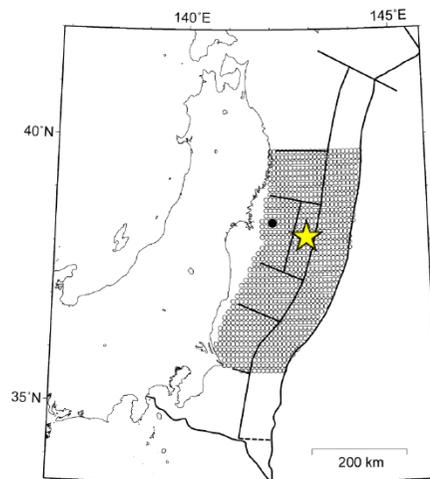
M9クラスの巨大地震の破壊様式の分類
(Koyama et al.(2012) に一部加筆)

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.2 想定波源域及び地震規模の設定

3.2.6 まとめ

- 以上から、地震調査研究推進本部(2012, 2014a, 2019)が評価した「東北地方太平洋沖型の地震(Mw9.0)」を上回る規模の地震が発生する可能性は低いと評価した。
- なお、3.11地震の地震特性を再現する各種の震源断層モデルのすべり領域は岩手県沖南部～茨城県沖であるのに対して、広域の津波特性を再現する津波波源モデルのすべり領域は青森県東方沖及び岩手県沖北部～茨城県沖であり、両者に違いが見られたことを踏まえ、広域の津波特性を考慮した波源領域(青森県東方沖及び岩手県沖北部～茨城県沖)と、宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した波源領域(岩手県沖南部～茨城県沖)を設定した。

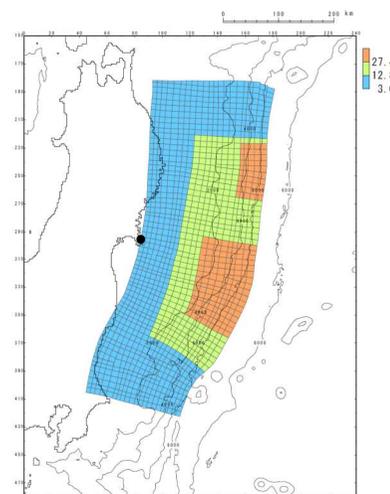
【地震調査研究推進本部(2012, 2014a, 2019)の評価】



確率論的地震動予測地図の作成に用いた「東北地方太平洋沖型の地震」の断層面(地震調査研究推進本部(2014a)に一部加筆)

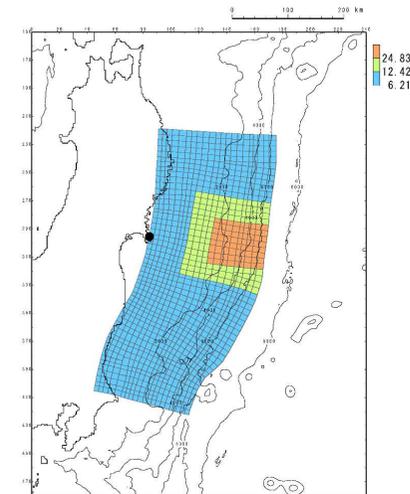
【特性化モデルの巨視的波源特性の設定】

■ 広域の津波特性を考慮した波源領域



- 波源領域: 青森県東方沖及び岩手県沖北部～茨城県沖
- 断層面積: 129,034 (km²)
- Mw: 9.13

■ 宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した波源領域



- 波源領域: 岩手県沖南部～茨城県沖
- 断層面積: 107,357 (km²)
- Mw: 9.04

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.1 設定概要(1/2)

- 3.11地震の地震特性を再現するモデル(震源断層モデル)と津波特性を再現するモデル(津波波源モデル)の比較等から得られた以下の知見を踏まえ※, 広域の津波特性をモデルに反映する観点から, 3.11地震を上回る規模の基準断層モデルを設定した。

※:3.11地震から得られた知見の整理結果の詳細は, 補足説明資料「I. 第4章 4. 3. 1 3.11地震から得られた知見の整理」に記載。

【知見 i】

広域に亘って, 時間的・空間的に複雑なすべり分布の不均一性が見られたが, 女川地点の津波高さに大きな影響を及ぼしたのは, 震源付近(宮城県沖)で生じた大きなすべり領域である(Satake et al.(2013), 杉野ほか(2013))。

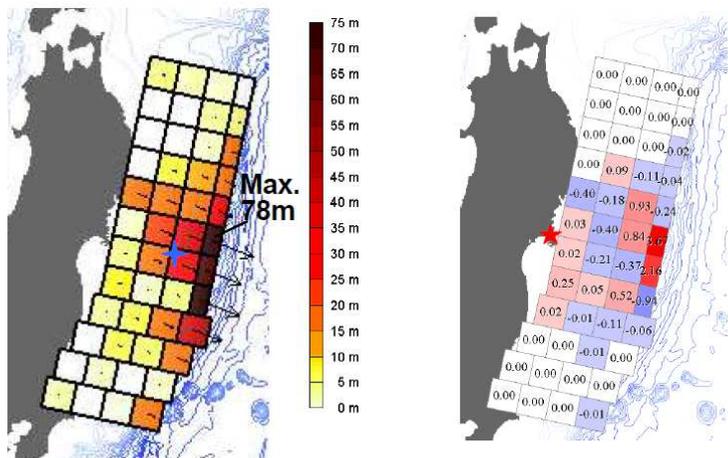
【知見 ii】

震源断層モデル(地震特性)と津波波源モデル(津波特性)の領域には違いが見られる(地震調査研究推進本部(2012)他)。

【知見 iii】

実現象に近い破壊メカニズム(=地震特性)を再現するモデルと, 広域沿岸部の痕跡高(=津波特性)を再現するモデルは異なり, 両モデルの差を埋めるのは, 今後検討すべき課題である(杉野ほか(2013))。

【知見 i の整理結果】

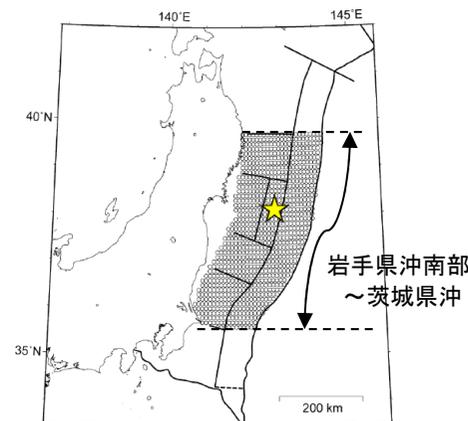


津波波源モデル
(杉野ほか(2013))

女川サイトの沖合150m水深点の
最大波高における小断層の波高
内訳(杉野ほか(2013))

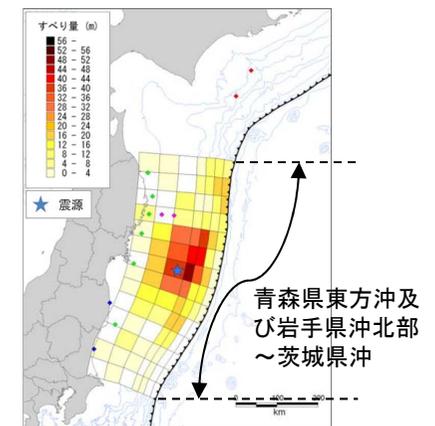
【知見 ii の整理結果】

■ 震源断層モデルのすべり領域



東北地方太平洋沖型の地震
(地震調査研究推進本部(2014a)に一部加筆)

■ 津波波源モデルのすべり領域



広域の津波特性を再現するすべり分布
(内閣府(2012a))

3.3.1 設定概要(2/2)

a. 知見 i, 知見 iii の反映

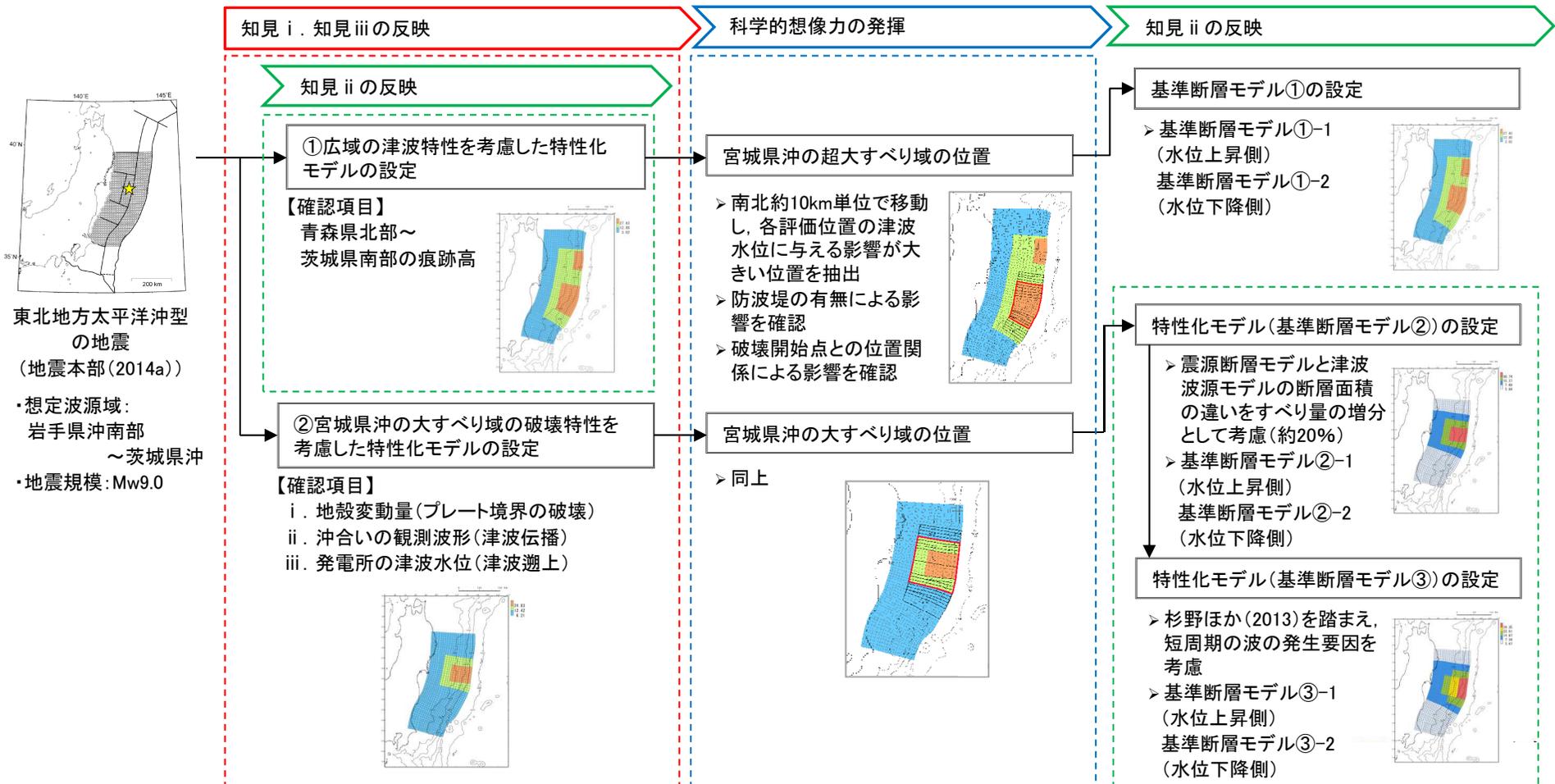
①津波特性の観点: 広域の津波特性(沿岸部の痕跡高)を考慮したモデル, ②地震特性の観点: 宮城県沖の大すべり域(固着域)の破壊特性を考慮したモデルの2つのモデルを設定した。

b. 科学的想像力の発揮

次の「東北地方太平洋沖型の地震」が、3.11地震と同様の破壊形態で発生するとは限らないことを踏まえ、発電所の津波高さに与える影響が大きい宮城県沖の大すべり域(固着域)の破壊位置にゆらぎが存在する可能性を考慮して、発電所に与える影響が大きい大すべり域・超大すべり域の位置を検討した。

c. 知見 ii の反映

広域の津波特性を基準断層モデルに適切に反映する観点から、上記①のモデルについては、波源域の北端を青森県東方沖及び岩手県沖北部まで拡大した。また、上記②のモデルについては震源断層モデルと津波波源モデルの断層面積の違いを大すべり域・超大すべり域のすべり量の増分(約20%)として考慮した。

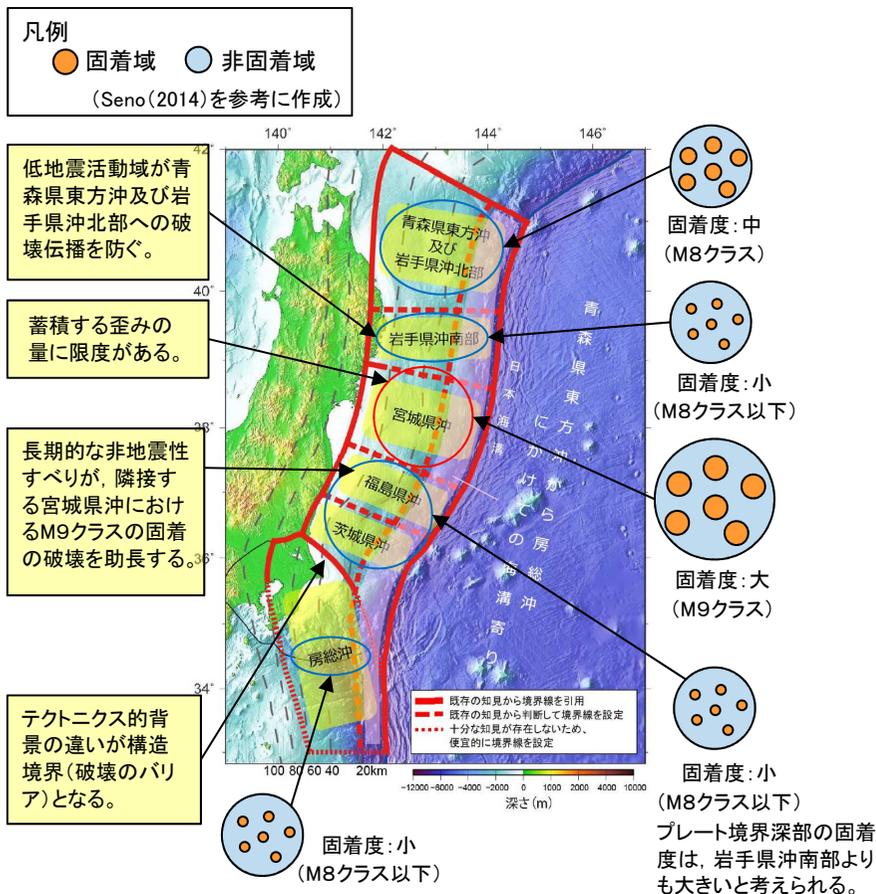


I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

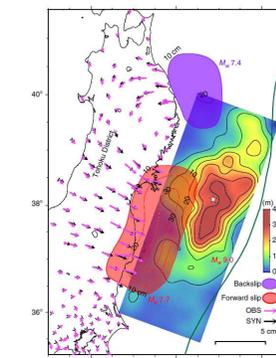
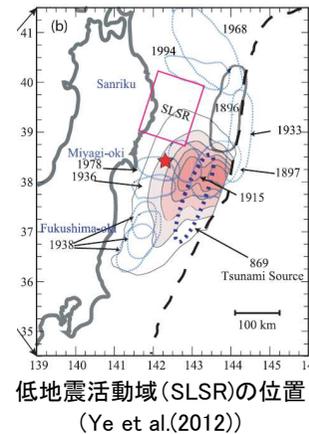
3.3.2 広域の津波特性を考慮した特性化モデル(1/3)※1

※1:設定方法等の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4. 3. 3 広域の津波特性を考慮した特性化モデル」に記載。

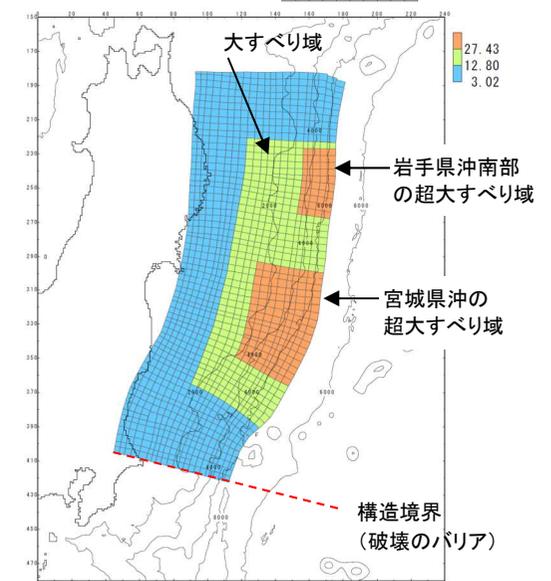
- 想定波源域は, 3.11地震に伴う津波の再現モデルのうち津波波形等をインバージョンした内閣府(2012a)モデル, Satake et al.(2013)55枚モデル, 杉野ほか(2013)モデルを参考に設定した。
- 大すべり域・超大すべり域は, 広域の津波特性(痕跡高)を考慮するため, 内閣府(2012b)で示されている大すべり域・超大すべり域の面積よりも大きい面積を示している杉野ほか(2014)を参考に設定した。
- また, 大すべり域・超大すべり域の位置は, 各領域の固着等に関する分析結果を踏まえて設定した。



各領域の固着度に関する分析結果
(地震調査研究推進本部(2019)に一部加筆)



- 超大すべり域の設定
 - 岩手県沖南部: 低地震活動域を考慮して, プレート間地震発生領域の浅部に設定。
 - 宮城県沖: 3.11地震時のすべり分布形状, 同領域の固着度並びに固着の破壊を助長する長期的な非地震性すべりの発生領域を考慮して, 福島県沖を含む範囲に設定。
- 大すべり域の設定
 - 岩手県沖南部・宮城県沖の超大すべり域を取り囲むように設定。



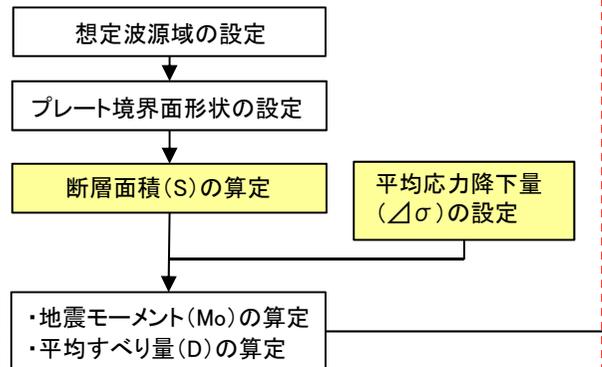
長期的なスロースリップの発生領域
(Yokota and Koketsu(2015))

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

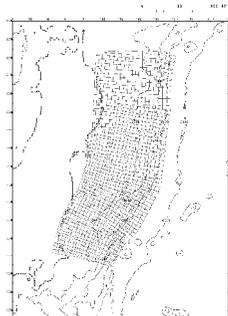
3.3.2 広域の津波特性を考慮した特性化モデル(2/3)

■ : 与条件

1. 巨視的波源特性の設定



スケーリング則の適用
(円形破壊面を仮定した関係式)



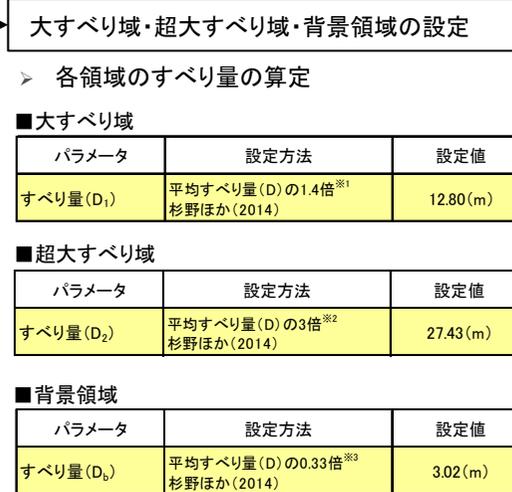
約10km四方の小断層(総数:1317)でプレート境界面を近似。

プレート境界面

各パラメーター一覧

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S)	青森県東方沖～茨城県沖	129,034(km ²)
地震発生深さ	地震調査研究推進本部(2012)	海溝軸～深さ60km
平均応力降下量(Δσ)	杉野ほか(2014)	3.1(MPa)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(Mo)	16/(7π ^{3/2})・Δσ・S ^{3/2}	5.90 × 10 ²² (Nm)
平均すべり量(D)	16/(7π ^{3/2})・Δσ・S ^{1/2} /μ	9.14(m)

2. 微視的波源特性の設定



各領域のすべり量の算定

■大すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
すべり量(D ₁)	平均すべり量(D)の1.4倍 ^{※1} 杉野ほか(2014)	12.80(m)

■超大すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
すべり量(D ₂)	平均すべり量(D)の3倍 ^{※2} 杉野ほか(2014)	27.43(m)

■背景領域

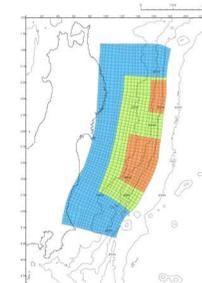
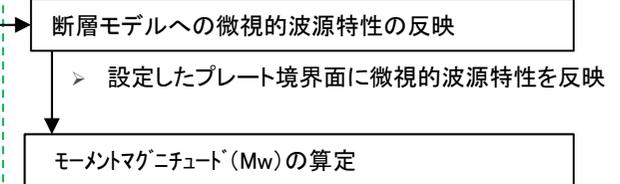
パラメータ	設定方法	設定値
すべり量(D ₀)	平均すべり量(D)の0.33倍 ^{※3} 杉野ほか(2014)	3.02(m)

※1: 全体面積の40%(超大すべり域を含む)に相当するすべり量

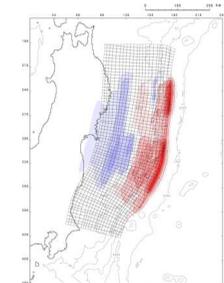
※2: 全体面積の15%に相当するすべり量

※3: 全体面積の60%に相当するすべり量

3. 基準断層モデルの設定



すべり量分布



地殻変動量分布

モーメントマグニチュード(Mw)	9.13
地震発生深さ	海溝軸～深さ60km
断層面積(S)	129,034(km ²)
地震モーメント Mo (=Mob+Mo1+Mo2)	6.21 × 10 ²² (Nm)
平均応力降下量(Δσ) (=7/16・Mo・(S/π) ^{-3/2})	3.26(MPa)
剛性率(μ)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
平均すべり量(D) (=16/(7π ^{3/2})・Δσ・S ^{1/2} /μ)	9.62(m)
すべり角 λ	太平洋プレートの運動方向に基づいて設定
ライズタイム τ	60(s)

領域	すべり量	断層面積(面積比率)	地震モーメント
背景領域	3.02(m)	72,841(km ²) (56.5%)	1.10 × 10 ²² (Nm)
	12.80(m)	35,497(km ²) (27.5%)	2.27 × 10 ²² (Nm)
大すべり域	27.43(m)	20,696(km ²) (16.0%)	2.84 × 10 ²² (Nm)
	12.80(m)	35,497(km ²) (27.5%)	2.27 × 10 ²² (Nm)

※: 超大すべり域を除いた面積比率

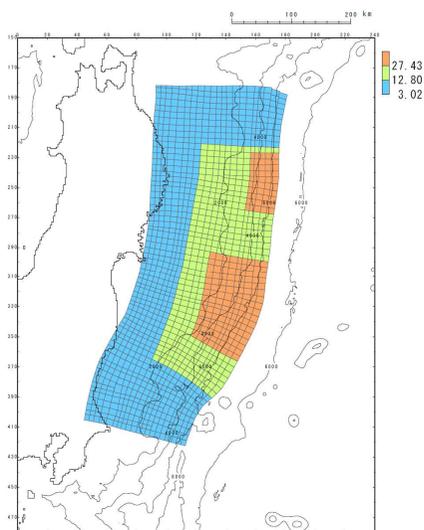
I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.2 広域の津波特性を考慮した特性化モデル(3/3)※1

※1:設定方法等の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4. 3. 3 広域の津波特性を考慮した特性化モデル」に記載。

- 設定した特性化モデルは、土木学会(2016)の再現性の目安を満足するとともに、津波高が大きい岩手県沿岸～福島県沿岸の痕跡高を良好に再現しており、広域の津波特性を適切に考慮していることを確認した。
- さらに、女川地点を含む宮城県周辺(北緯39°～北緯38°)については、痕跡高に対して計算値の方が大きく($K=0.86$, $\kappa=1.36$, $n=836$)、安全側のモデルになっていることを確認した。

【広域の津波特性を考慮した特性化モデル】

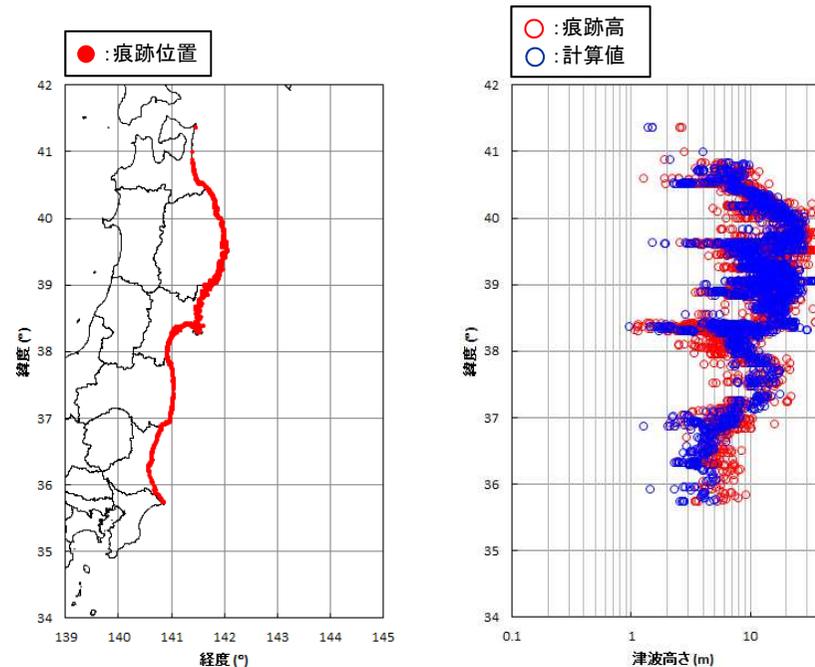


すべり量分布

【痕跡高の再現性の確認結果】

	K	κ	n
広域の津波特性を考慮した特性化モデル※2	0.98	1.39	2,686

※2:再現性の目安 $0.95 < K < 1.05$, $\kappa < 1.45$ (土木学会(2016))



痕跡高と計算値の比較

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.3 宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデル(1/3)※1

※1: 設定方法等の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.3.4 宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデル」に記載。

■ 想定波源域の設定

- 宮城県沖の大すべり域の破壊特性(地震特性)を特性化モデルに反映する観点から、想定波源域は、地震調査研究推進本部(2012, 2014a, 2019)による「東北地方太平洋沖型の地震」の想定波源域と同様に、岩手県沖南部～茨城県沖に設定した。

■ 大すべり域・超大すべり域の設定

- 国内外の巨大地震の解析事例の調査に基づき大すべり域・超大すべり域のすべり量及び全体面積に占める面積比率を示している内閣府(2012b)を参考に設定※1した。
 - 大すべり域: 津波断層の平均すべり量の2倍, 全体面積の20%程度(超大すべり域を含む)
 - 超大すべり域: 津波断層の平均すべり量の4倍, 全体面積の5%程度
- なお, 設定した特性化モデルの大すべり域・超大すべり域の面積は, 震源の全体的な破壊の動きを捉えていると考えられる長周期観測地震動に基づいて推定された震源断層モデル(Wu et al.(2012))のすべり分布を参考として(杉野ほか(2013)), 内閣府(2012b)に示されている面積比率よりも大きく設定※2した。

※2: 大すべり域: 20.7%(超大すべり域を含む), 超大すべり域: 7.5%

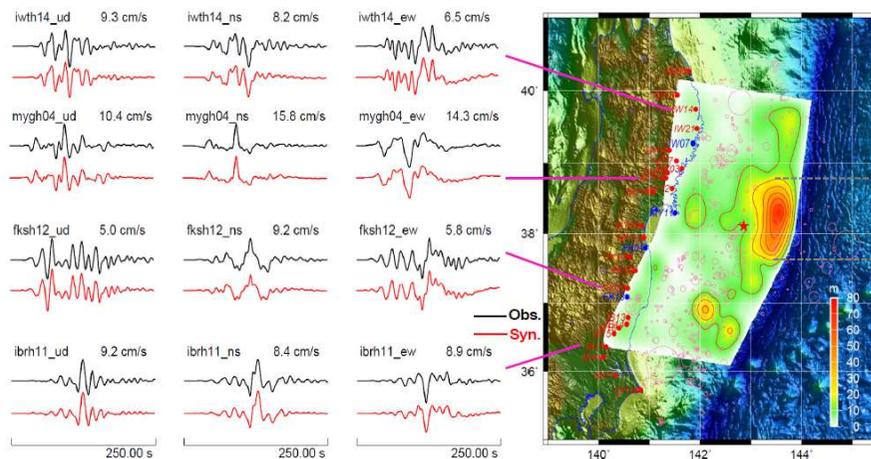
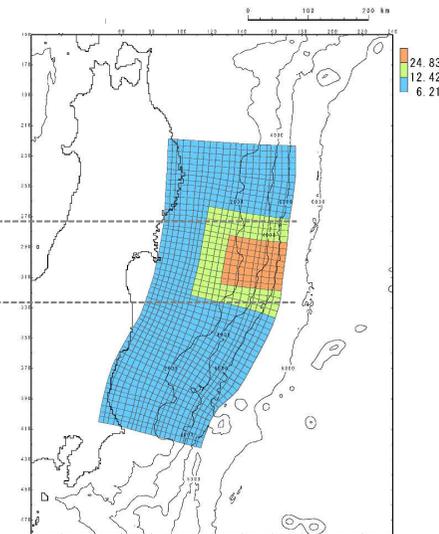


Figure 2. Waveform comparison and slip distribution map. Left: Comparison of synthetic waveforms (red) with the observation data (black); Right: Slip distribution inferred from the long-period seismic waves (<0.1Hz).

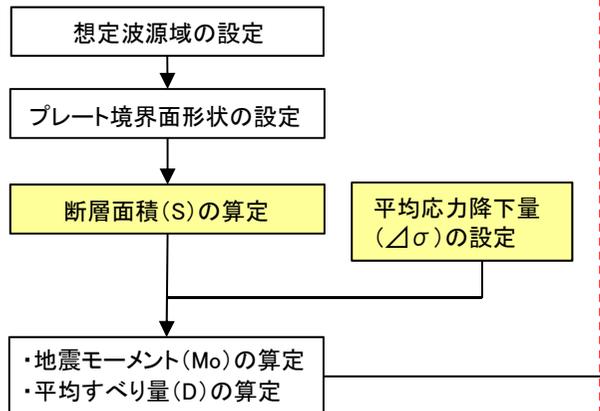
長周期地震動に基づくすべり分布(Wu et al.(2012)に一部加筆)



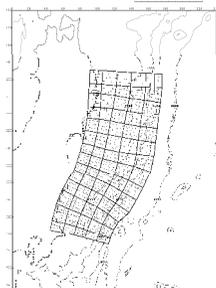
宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデルのすべり量分布

3.3.3 宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデル(2/3)

1. 巨視的波源特性の設定



スケーリング則の適用
(円形破壊面を仮定した関係式)



- 約10km四方の小断層(総数:1107)でプレート境界面を近似。
- すべり分布の設定にあたっては、小断層を約40km四方にブロック化(総数:70)し、各ブロックのすべり量を同一に与える。

プレート境界面
(すべり分布のブロック割図)

各パラメーター一覧

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S)	岩手県沖南部~茨城県沖	107,357(km ²)
地震発生深さ	地震調査研究推進本部(2012)	海溝軸~深さ60km
平均応力降下量(Δσ)	内閣府(2012b), Murotani et al.(2013)	3(MPa)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(Mo)	16/(7π ^{3/2}) · Δσ · S ^{3/2}	4.33 × 10 ²² (Nm)
平均すべり量(D)	16/(7π ^{3/2}) · Δσ · S ^{1/2} / μ	8.07(m)

2. 微視的波源特性の設定

(1) 大すべり域・超大すべり域の設定

- 断層面積(S₂, S₄)の算定
- すべり量(D₂, D₄)の算定
- 地震モーメント(M_{o2}, M_{o4})の算定

■ 大すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S ₂)	断層面積(S)の15%*	16,104(km ²)
すべり量(D ₂)	平均すべり量(D)の2倍 内閣府(2012b)	16.14(m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M _{o2})	μ · S ₂ · D ₂	1.30 × 10 ²² (Nm)

■ 超大すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S ₄)	断層面積(S)の5%	5,368(km ²)
すべり量(D ₄)	平均すべり量(D)の4倍 内閣府(2012b)	32.28(m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M _{o4})	μ · S ₄ · D ₄	8.66 × 10 ²¹ (Nm)

※: 大すべり域と超大すべり域をあわせた領域の面積比率は20%。

(2) 地震モーメントの調整(すべり量の調整)

(2)-1 基本すべり域の設定

■ 基本すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S _b)	断層面積の80%	85,885(km ²)
すべり量(D _b)	平均すべり量(D)	8.07(m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M _{ob})	μ · S _b · D _b	3.47 × 10 ²² (Nm)

(2)-2 各領域の地震モーメント(合計)の算定

Mo' = Mo2 + Mo4 + Mob' = 5.63 × 10²²(Nm)

(2)-3 地震モーメントの調整(すべり量の調整)

- Mo/Mo' = 4.33 × 10²²(Nm) / 5.63 × 10²²(Nm) = 0.77
- 上記倍率を用いて、基準断層モデルに反映する各領域のすべり量を一律に調整する。

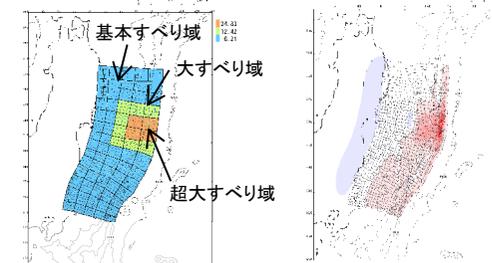
	調整前	調整後
基本すべり域	8.07(m)	6.21(m)
大すべり域	16.14(m)	12.42(m)
超大すべり域	32.28(m)	24.83(m)

3. 基準断層モデルの設定

断層モデルへの微視的波源特性の反映

- 設定したプレート境界面(すべり分布のブロック割図)に微視的波源特性を反映。

モーメントマグニチュード(Mw)の算定



すべり量分布		地殻変動量分布	
モーメントマグニチュード(Mw)	9.04	基本すべり域	すべり量 6.21(m)
地震発生深さ	海溝軸~深さ60km	大すべり域	断層面積(面積比率) 85,165(km ²) (79.3%)
断層面積(S)	107,357(km ²)	超大すべり域	すべり量 24.83(m)
平均応力降下量(Δσ) (=7/16 · Mo · (S/π) ^{-3/2})	3.13(MPa)		断層面積(面積比率)※ 22,192(km ²) (20.7%)
剛性率(μ)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)		すべり量 8.43(m)
地震モーメントMo	4.52 × 10 ²² (Nm)		断層面積(面積比率) 8,078(km ²) (7.5%)
すべり角λ	太平洋プレートの運動方向に基づいて設定		平均すべり量D
ライズタイムτ	60(s)		

※: 大すべり域と超大すべり域をあわせた領域の面積比率

与条件

コメントS188

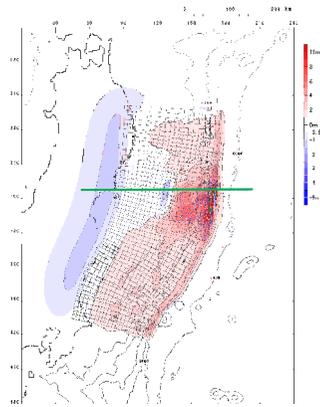
I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.3 宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデル(3/3)※

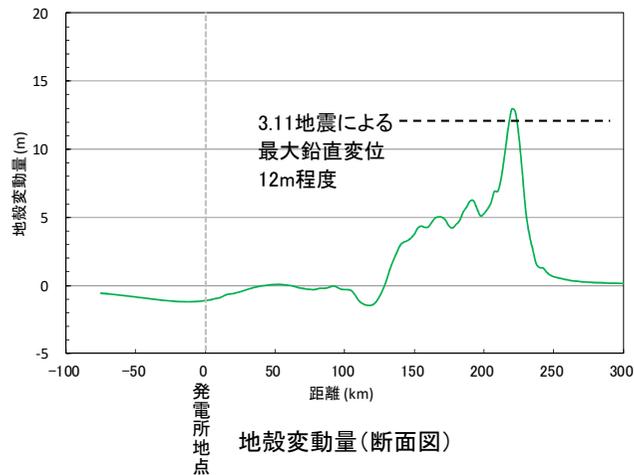
※: 設定方法等の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.3.4 宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデル」に記載。

- 設定した特性化モデルは、破壊特性が現れる地殻変動量(プレート境界の破壊)、沖合いの観測波形(津波伝播)及び発電所の津波水位(津波遡上)を良好に再現しており、宮城県沖の大すべり域の破壊特性を適切に考慮していることを確認した。

■地殻変動量(プレート境界の破壊)の比較

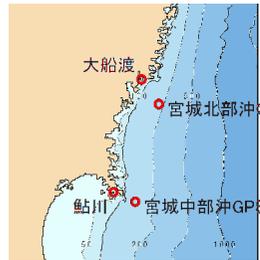


地殻変動量分布
(ライズタイム: 300(s)相当)

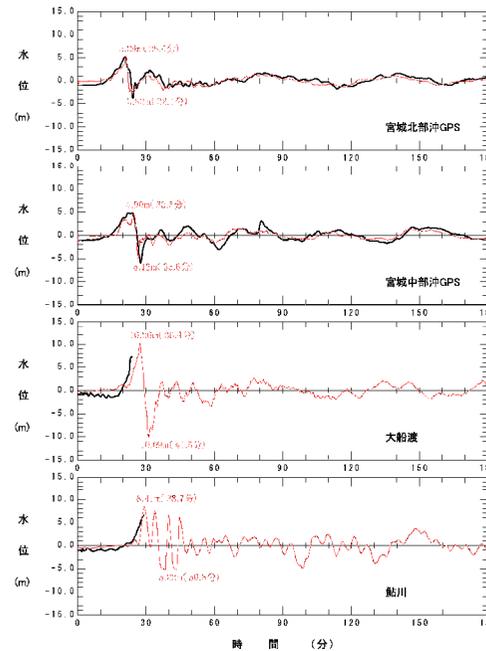


地殻変動量(断面図)

■沖合いの観測波形(津波伝播)の比較

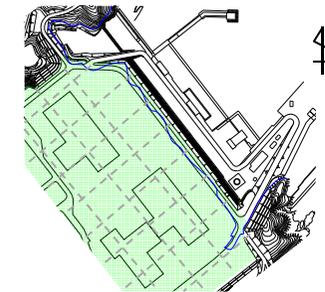
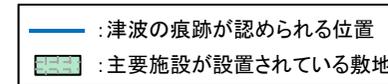


比較位置

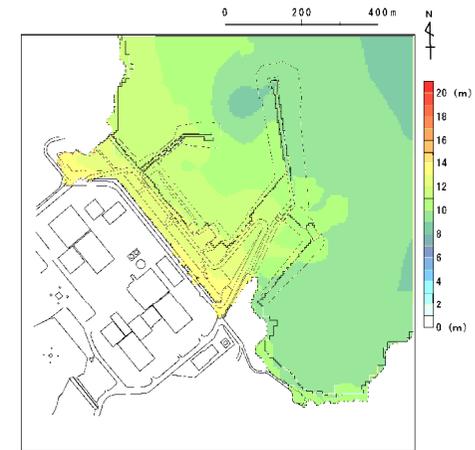


観測波形と計算波形の比較
(大船渡, 鮎川については地震発生直後に観測が停止している。)

■発電所の津波水位(津波遡上)の比較



発電所敷地における痕跡調査結果
(東北電力(2011)を一部修正)



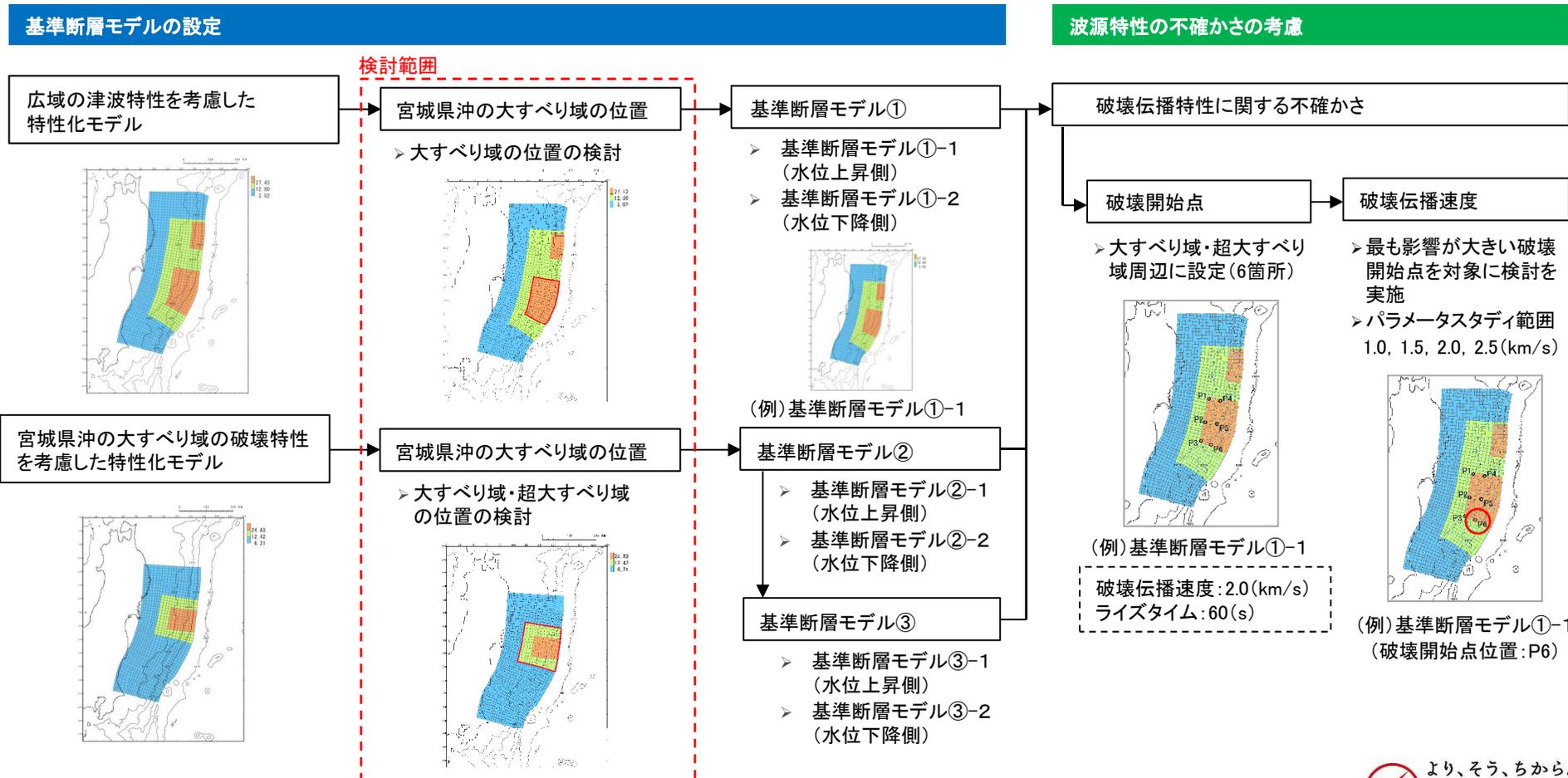
最大水位上昇量分布

1. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.4 宮城県沖の大すべり域・超大すべり域の位置の検討(1/3)

■ 検討方針

- 基準断層モデルの設定にあたり、次の「東北地方太平洋沖型の地震」が、3.11地震と同様の破壊形態で発生するとは限らないことを踏まえ、発電所の津波高さに与える影響が大きい宮城県沖の大すべり域(固着域)の破壊位置にゆらぎが存在する可能性を考慮して、大すべり域・超大すべり域の位置を南北約10km単位で移動させた検討を実施する。
- あわせて、上記検討で選定した大すべり域・超大すべり域の位置が①防波堤が無い場合でも選定位置として妥当であるか、②選定した大すべり域・超大すべり域を基に基準断層モデルを設定し、波源特性の不確かさ(破壊開始点、破壊伝播速度)を考慮することが妥当であるかについても確認する。



I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.4 宮城県沖の大すべり域・超大すべり域の位置の検討(2/3)

■大すべり域・超大すべり域の位置の検討

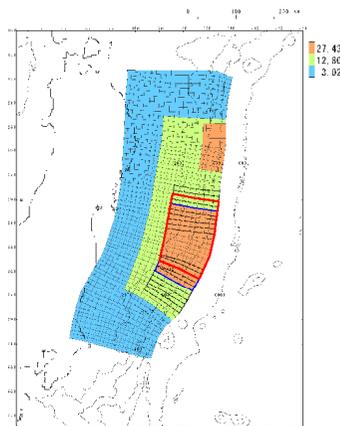
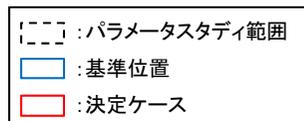
- 基準断層モデルの設定にあたり、次の「東北地方太平洋沖型の地震」が、3.11地震と同様の破壊形態で発生するとは限らないことを踏まえ、発電所の津波高さに与える影響が大きい宮城県沖の大すべり域(固着域)の破壊位置にゆらぎが存在する可能性を考慮して、大すべり域・超大すべり域の位置を南北約10km単位で移動させた検討を実施した。

※:検討内容の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.3.5 宮城県沖の大すべり域・超大すべり域の位置の検討」に記載。

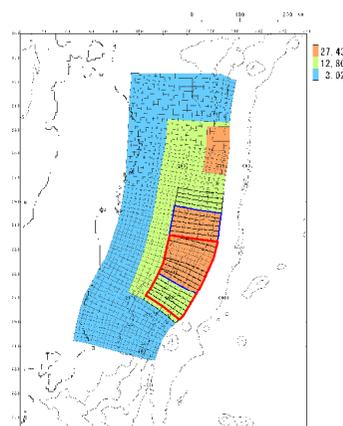
【検討結果】

■広域の津波特性を考慮した特性化モデル

	超大すべり域の位置
水位上昇側	北へ約30km移動
水位下降側	南へ約60km移動



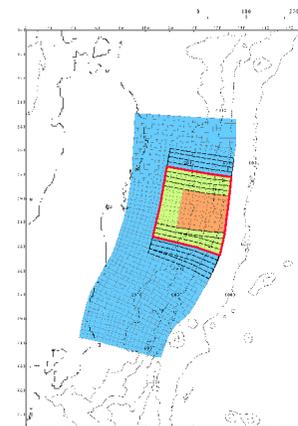
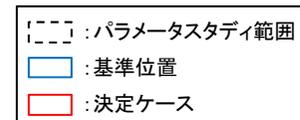
水位上昇側
(選定位置:北へ約30km移動)



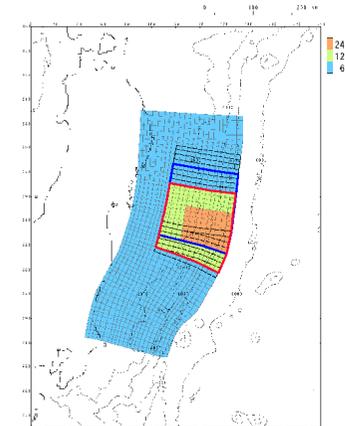
水位下降側
(選定位置:南へ約60km移動)

■宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデル

	大すべり域・超大すべり域の位置
水位上昇側	基準位置
水位下降側	南へ約40km移動



水位上昇側
(選定位置:基準位置)



水位下降側
(選定位置:南へ約40km移動)

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.4 宮城県沖の大すべり域・超大すべり域の位置の検討(3/3)

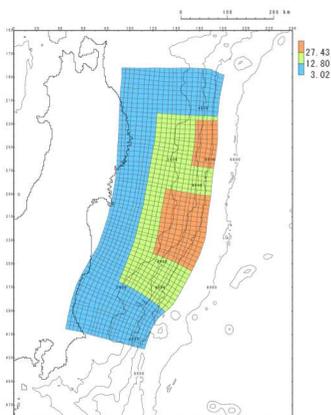
■ 港湾部の防波堤の有無、並びに大すべり域・超大すべり域と破壊開始点の位置関係に関する影響検討

- 選定した大すべり域・超大すべり域の位置が①防波堤が無い場合でも選定位置として妥当であるか、②選定した大すべり域・超大すべり域を基に基準断層モデルを設定し、波源特性の不確かさ(破壊開始点、破壊伝播速度)を考慮することが妥当であることを確認するため、各モデルの水位上昇側・下降側決定ケース、並びにその前後ケースを対象にパラメータスタディを実施した。広域の津波特性を考慮した特性化モデルの検討内容を以下に示す。
- 検討の結果、港湾部の防波堤の有無、並びに大すべり域と超大すべり域と破壊開始点の位置関係の違いが発電所の津波高さに及ぼす影響は極めて小さく、選定した大すべり域・超大すべり域の位置を基に基準断層モデルの設定することは妥当であることを確認した*。

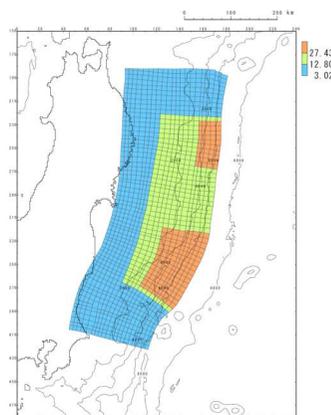
*:検討内容の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4. 3. 5 宮城県沖の大すべり域・超大すべり域の位置の検討」に記載。

① 港湾部の防波堤の有無に関する影響検討

	位置	備考
水位上昇側	北へ約40km移動	
	北へ約30km移動	選定位置(基準断層モデル)
	北へ約20km移動	
水位下降側	南へ約50km移動	
	南へ約60km移動	選定位置(基準断層モデル)
	南へ約70km移動	



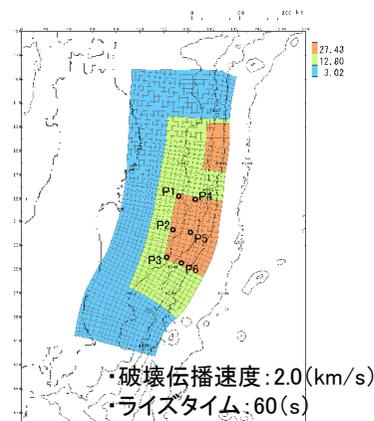
水位上昇側
(選定位置:北へ約30km移動)



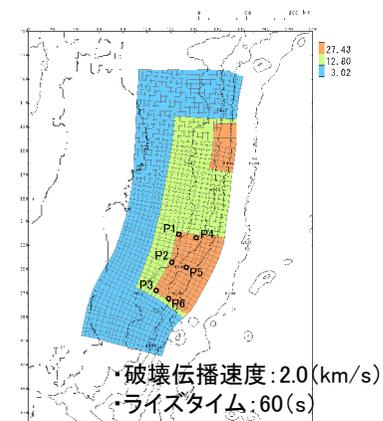
水位下降側
(選定位置:南へ約60km移動)

② 大すべり域・超大すべり域と破壊開始点の位置関係に関する影響検討

	位置	備考
水位上昇側	北へ約40km移動	
	北へ約30km移動	選定位置(基準断層モデル)
	北へ約20km移動	
水位下降側	南へ約50km移動	
	南へ約60km移動	選定位置(基準断層モデル)
	南へ約70km移動	



水位上昇側
(選定位置:北へ約30km移動)



水位下降側
(選定位置:南へ約60km移動)

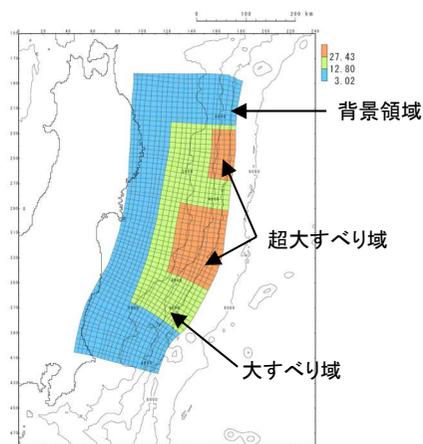
I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.5 基準断層モデルの設定: 基準断層モデル①※1

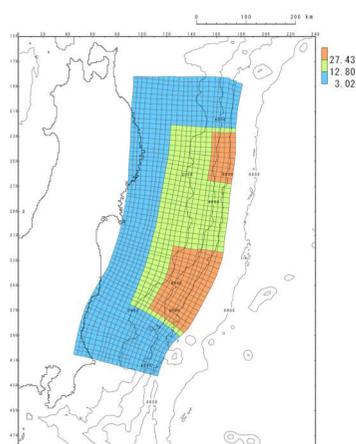
※1: 設定方法等の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.3.6 基準断層モデル①の設定」に記載。

■ 広域の津波特性を考慮した基準断層モデル①

- 宮城県沖の大すべり域・超大すべり域の位置の検討結果(3.3.4)から、広域の津波特性を考慮した特性化モデルのうち発電所の津波高さに与える影響が最も大きいケースを基準断層モデル①として設定した。



基準断層モデル①-1
(超大すべり域の位置: 北へ約30km移動)



基準断層モデル①-2
(超大すべり域の位置: 南へ約60km移動)

主な諸元

断層パラメータ		設定値
モーメントマグニチュード(Mw)		9.13
断層面積(S)		129,034(km ²)
平均応力降下量(Δσ)		3.26(MPa)
地震モーメント(Mo)		6.21 × 10 ²² (Nm)
剛性率(μ)		5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
すべり量	平均すべり量	9.62(m)
	背景領域 (面積及び面積比率)	3.02(m) (72,841(km ²), 56.5%)
	大すべり域 (面積及び面積比率)※2	12.80(m) (35,497(km ²), 27.5%)
	超大すべり域 (面積及び面積比率)	27.43(m) (20,696(km ²), 16.0%)
ライズタイム(τ)※3		60(s)

※2: 超大すべり域を除いた面積及び面積比率

※3: 国内外で発生した巨大地震の破壊伝播特性に関する知見及び相田(1986)によるM8クラスの地震を対象としたライズタイムを参考に設定した。詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.4.2 パラメータスタディ範囲の設定」に記載。

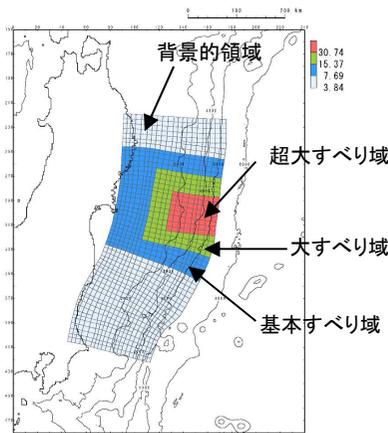
I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.5 基準断層モデルの設定:基準断層モデル②(1/2)※1

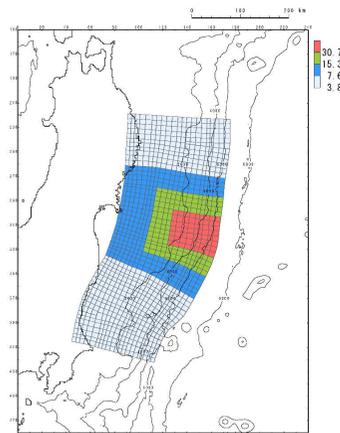
※1:設定方法等の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.3.7 基準断層モデル②の設定」に記載。

■宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した基準断層モデル②

- 3.11地震に伴う津波を広域に再現する津波波源モデルの断層面積(約11~12万(km²))は、宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデルの断層面積(約10.7万(km²))よりも大きいことを考慮して、宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデルの断層面積(約10.7万(km²))を保持した上で、発電所の津波高さに与える影響が大きい、大すべり域・超大すべり域のすべり量を約20%割増した基準断層モデル②を設定した。
- 各基準断層モデルは、宮城県沖の大すべり域・超大すべり域の位置の検討結果(3.3.4)を踏まえ、以下のとおり設定した。



基準断層モデル②-1
(大すべり域・超大すべり域の位置:基準)



基準断層モデル②-2
(大すべり域・超大すべり域の位置:南へ約40km移動)

主な諸元

断層パラメータ		設定値
モーメントマグニチュード(Mw)		9.04
断層面積(S)		107,357(km ²)
平均応力降下量(Δσ)		3.11(MPa)
地震モーメント(Mo)		4.49 × 10 ²² (Nm)
剛性率(μ)		5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
すべり量	平均すべり量	8.37(m)
	基本すべり域 (面積及び面積比率)※2	7.69(m) (49,872(km ²), 46.5%)
	背景的領域 (面積及び面積比率)	3.84(m) (57,485(km ²), 53.5%)
	大すべり域 (面積及び面積比率)※3	15.37(m) (22,192(km ²), 20.7%)
	超大すべり域 (面積及び面積比率)	30.74(m) (8,078(km ²), 7.5%)
ライズタイム(τ)※4		60(s)

※2:大すべり域と超大すべり域をあわせた領域の面積比率

※3:超大すべり域をあわせた領域の面積比率

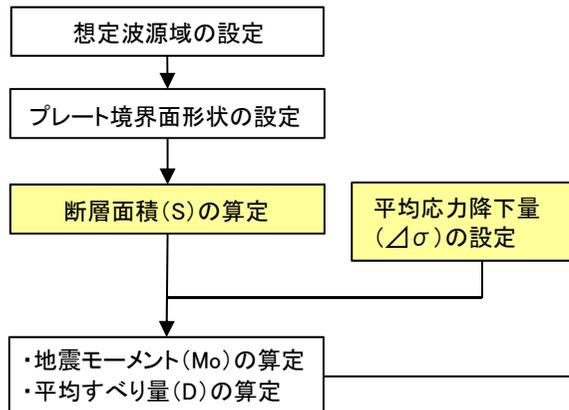
※4:国内外で発生した巨大地震の破壊伝播特性に関する知見及び相田(1986)によるM8クラスの地震を対象としたライズタイムを参考に設定した。詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.4.2 パラメータスタディ範囲の設定」に記載。

3.3.5 基準断層モデルの設定: 基準断層モデル②(2/2)

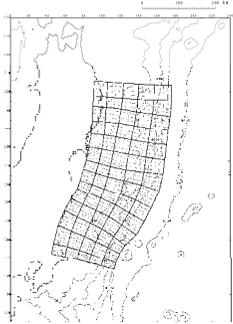
黄色 : 与条件

コメントS188

1. 巨視的波源特性の設定



スケールング則の適用
(円形破壊面を仮定した関係式)



- 約10km四方の小断層(総数:1107)でプレート境界面を近似。
- すべり分布の設定にあたっては、小断層を約40km四方にブロック化(総数:70)し、各ブロックのすべり量を同一に与える。

プレート境界面
(すべり分布のブロック割図)

各パラメーター一覧

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S)	岩手県沖南部~茨城県沖	107,357(km ²)
地震発生深さ	地震調査研究推進本部(2012)	海溝軸~深さ60km
平均応力降下量(Δσ)	内閣府(2012b), Murotani et al.(2013)	3(MPa)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(Mo)	16/(7π ^{3/2}) · Δσ · S ^{3/2}	4.33 × 10 ²² (Nm)
平均すべり量(D)	16/(7π ^{3/2}) · Δσ · S ^{1/2} / μ	8.07(m)

2. 微視的波源特性の設定

(1) 大すべり域・超大すべり域・背景的領域の設定

- 断層面積(S₂, S₄, S_{0.5})の算定
- すべり量(D₂, D₄, D_{0.5})の算定
- 地震モーメント(M_{o2}, M_{o4}, M_{o0.5})の算定

■大すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S ₂)	断層面積(S)の15%	16,104(km ²)
すべり量(D ₂)	平均すべり量(D)の2倍 内閣府(2012b)	16.14(m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M _{o2})	μ · S ₂ · D ₂	1.30 × 10 ²² (Nm)

■超大すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S ₄)	断層面積(S)の5%	5,368(km ²)
すべり量(D ₄)	平均すべり量(D)の4倍 内閣府(2012b)	32.28(m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M _{o4})	μ · S ₄ · D ₄	8.66 × 10 ²¹ (Nm)

■背景的領域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S _{0.5})	断層面積(S)の50%	53,678(km ²)
すべり量(D _{0.5})	平均すべり量(D)の0.5倍	4.04(m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M _{o0.5})	μ · S _{0.5} · D _{0.5}	1.08 × 10 ²² (Nm)

(2) 地震モーメントの調整(すべり量の調整)

(2)-1 基本すべり域の設定

■基本すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S ₁)	断層面積(S)の30%	32,207(km ²)
すべり量(D ₁)	平均すべり量(D)	8.07(m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M _{o1})	μ · S ₁ · D ₁	1.30 × 10 ²² (Nm)

(2)-2 各領域の地震モーメント(合計)の算定

Mo' = Mo2 + Mo4 + Mo0.5 + Mo1 = 4.55 × 10²²(Nm)

(2)-3 地震モーメントの調整(すべり量の調整)

- Mo/Mo' = 4.33 × 10²²(Nm) / 4.55 × 10²²(Nm) = 0.95
- 上記倍率を用いて、基準断層モデルに反映する各領域のすべり量を一律に調整する。

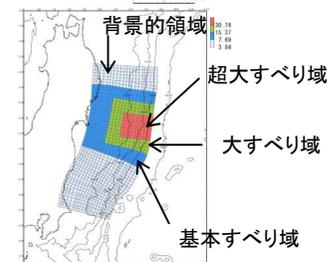
	調整前	調整後
背景的領域	4.04(m)	3.84(m)
基本すべり域	8.07(m)	7.69(m)
大すべり域	16.14(m)	15.37(m)
超大すべり域	32.28(m)	30.74(m)

3. 基準断層モデルの設定

断層モデルへの微視的波源特性の反映

- 設定したプレート境界面(すべり分布のブロック割図)に微視的波源特性を反映。

モーメントマグニチュード(Mw)の算定



パラメータ	設定値	パラメータ	設定値
モーメントマグニチュード(Mw)	9.04	基本すべり域 すべり量	7.69(m)
地震発生深さ	海溝軸~深さ60km	断層面積(面積比率)※1	49,872(km ²) (46.5%)
断層面積(S)	107,357(km ²)	背景的領域 すべり量	3.84(m)
平均応力降下量(Δσ) (=7/16 · Mo · (S/π) ^{-3/2})	3.11(MPa)	断層面積(面積比率)	57,485(km ²) (53.5%)
剛性率(μ)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)	大すべり域 すべり量	15.37(m)
地震モーメントMo	4.49 × 10 ²² (Nm)	断層面積(面積比率)※2	22,192(km ²) (20.7%)
すべり角λ	太平洋プレートの運動方向に基づいて設定	超大すべり域 すべり量	30.74(m)
ライズタイムτ	60(s)	断層面積(面積比率)	8,078(km ²) (7.5%)
		平均すべり量D	8.37(m)

※1: 大すべり域と超大すべり域をあわせた領域の面積比率

※2: 超大すべり域をあわせた領域の面積比率

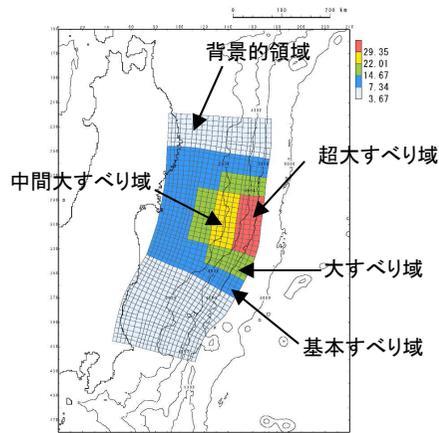
I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.5 基準断層モデルの設定: 基準断層モデル③(1/3)*1

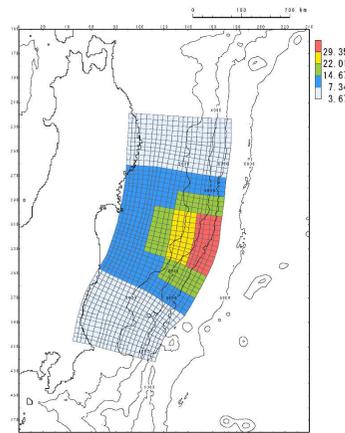
*1: 設定方法等の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.3.8 基準断層モデル③の設定」に記載。

■宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した基準断層モデル③

- 基準断層モデル②を基本として、杉野ほか(2013)の知見を参考に、短周期の波を発生させる要因と考えられる未知なる分岐断層や海底地すべり等が存在する可能性を考慮した基準断層モデル③を設定した。
- 各基準断層モデルは、宮城県沖の大すべり域・超大すべり域の位置の検討結果(3.3.4)を踏まえ、以下のとおり設定した。



基準断層モデル③-1
(大すべり域・超大すべり域の位置: 基準)



基準断層モデル③-2
(大すべり域・超大すべり域の位置: 南へ約40km移動)

主な諸元

断層パラメータ		設定値
モーメントマグニチュード(Mw)		9.04
断層面積(S)		107,357(km ²)
平均応力降下量(Δσ)		3.17(MPa)
地震モーメント(M ₀)		4.58 × 10 ²² (Nm)
剛性率(μ)		5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
すべり量	平均すべり量	8.53(m)
	基本すべり域 (面積及び面積比率)*2	7.34(m) (56,675(km ²), 52.8%)
	背景的領域 (面積及び面積比率)	3.67(m) (50,682(km ²), 47.2%)
	大すべり域 (面積及び面積比率)*3	14.67(m) (24,875(km ²), 23.2%)
	中間大すべり域 (面積及び面積比率)*4	22.01(m) (11,732(km ²), 10.9%)
	超大すべり域 (面積及び面積比率)	29.35(m) (6,201(km ²), 5.8%)
ライズタイム(τ)*5		60(s)

*2: 大すべり域, 中間大すべり域及び超大すべり域をあわせた領域の面積比率

*3: 中間大すべり域, 超大すべり域をあわせた領域の面積比率

*4: 超大すべり域をあわせた領域の面積比率

*5: 国内外で発生した巨大地震の破壊伝播特性に関する知見及び相田(1986)によるM8クラスの地震を対象としたライズタイムを参考に設定した。詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.4.2 パラメータスタディ範囲の設定」に記載。

3.3.5 基準断層モデルの設定: 基準断層モデル③(2/3)

□ : 与条件

コメントS188

1. 巨視的波源特性の設定

➢ 基準断層モデル②と共通のため、詳細は記載省略 (p125参照)

各パラメーター一覧

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S)	岩手県沖南部～茨城県沖	107,357 (km ²)
地震発生深さ	地震調査研究推進本部(2012)	海溝軸～深さ60km
平均応力降下量(Δσ)	内閣府(2012b), Murotani et al.(2013)	3 (MPa)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M ₀)	16/(7π ^{3/2}) · Δσ · S ^{3/2}	4.33 × 10 ²² (Nm)
平均すべり量(D)	16/(7π ^{3/2}) · Δσ · S ^{1/2} / μ	8.07 (m)

2. 微視的波源特性の設定

(1) 大すべり域・超大すべり域・背景的領域・中間大すべり域の設定

- 断層面積(S₂, S₄, S_{0.5}, S₃)の算定
- すべり量(D₂, D₄, D_{0.5}, D₃)の算定
- 地震モーメント(M₀₂, M₀₄, M_{00.5}, M₀₃)の算定

■ 大すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S ₂)	断層面積(S)の10%	10,736 (km ²)
すべり量(D ₂)	平均すべり量(D)の2倍 内閣府(2012b)	16.14 (m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M ₀₂)	μ · S ₂ · D ₂	8.66 × 10 ²¹ (Nm)

■ 超大すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S ₄)	断層面積(S)の5%	5,368 (km ²)
すべり量(D ₄)	平均すべり量(D)の4倍 内閣府(2012b)	32.28 (m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M ₀₄)	μ · S ₄ · D ₄	8.66 × 10 ²¹ (Nm)

■ 背景的領域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S _{0.5})	断層面積(S)の50%	53,678 (km ²)
すべり量(D _{0.5})	平均すべり量(D)の0.5倍	4.04 (m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M _{00.5})	μ · S _{0.5} · D _{0.5}	1.08 × 10 ²² (Nm)

■ 中間大すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S ₃)	断層面積(S)の5%	5,368 (km ²)
すべり量(D ₃)	平均すべり量(D)の3倍	24.21 (m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M ₀₃)	μ · S ₃ · D ₃	6.50 × 10 ²¹ (Nm)

(2) 地震モーメントの調整(すべり量の調整)

(2)-1 基本すべり域の設定

■ 基本すべり域

パラメータ	設定方法	設定値
断層面積(S ₁)	断層面積(S)の30%	32,207 (km ²)
すべり量(D ₁)	平均すべり量(D)	8.07 (m)
剛性率(μ)	土木学会(2016)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)
地震モーメント(M ₀₁)	μ · S ₁ · D ₁	1.30 × 10 ²² (Nm)

(2)-2 各領域の地震モーメント(合計)の算定

$$M_o' = M_{02} + M_{04} + M_{00.5} + M_{03} + M_{01} = 4.77 \times 10^{22} \text{ (Nm)}$$

(2)-3 地震モーメントの調整(すべり量の調整)

$$M_o / M_o' = 4.33 \times 10^{22} \text{ (Nm)} / 4.77 \times 10^{22} \text{ (Nm)} = 0.91$$

- 上記倍率を用いて、基準断層モデルに反映する各領域のすべり量を一律に調整する。

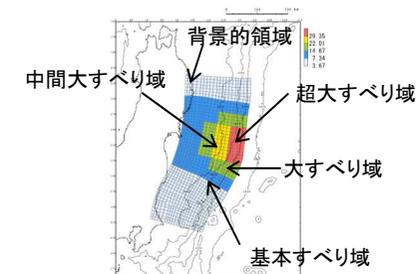
	調整前	調整後
背景的領域	4.04 (m)	3.67 (m)
基本すべり域	8.07 (m)	7.34 (m)
中間大すべり域	16.14 (m)	14.67 (m)
大すべり域	24.21 (m)	22.01 (m)
超大すべり域	32.28 (m)	29.35 (m)

3. 基準断層モデルの設定

断層モデルへの微視的波源特性の反映

- 設定したプレート境界面(すべり分布のブロック割図)に微視的波源特性を反映。

モーメントマグニチュード(Mw)の算定



モーメントマグニチュード(Mw)	9.04	すべり量	7.34 (m)
地震発生深さ	海溝軸～深さ60km	基本すべり域	断層面積 (面積比率)※1 56,675 (km ²) (52.8%)
断層面積(S)	107,357 (km ²)	すべり量	3.67 (m)
平均応力降下量(Δσ) (=7/16 · Mo · (S/π) ^{-3/2})	3.17 (MPa)	背景的領域	断層面積 (面積比率) 50,682 (km ²) (47.2%)
剛性率(μ)	5.0 × 10 ¹⁰ (N/m ²)	大すべり域	すべり量 (面積比率)※2 14.67 (m) (23.2%)
地震モーメントMo	4.58 × 10 ²² (Nm)	中間大すべり域	断層面積 (面積比率)※3 11,732 (km ²) (10.9%)
すべり角θ	太平洋プレートの運動方向に基づいて設定	超大すべり域	すべり量 29.35 (m)
ライズタイムτ	60 (s)	断層面積 (面積比率) 6,201 (km ²) (5.8%)	平均すべり量D 8.53 (m)

※1: 大すべり域、中間大すべり域及び超大すべり域をあわせた領域の面積比率

※2: 中間大すべり域・超大すべり域をあわせた領域の面積比率

※3: 超大すべり域をあわせた領域の面積比率

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.5 基準断層モデルの設定:基準断層モデル③(3/3)

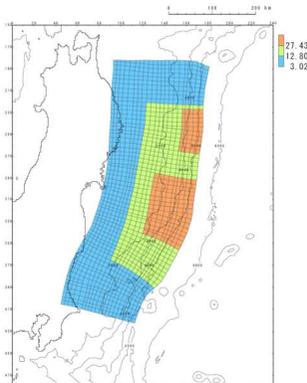
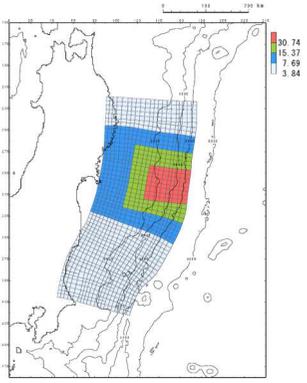
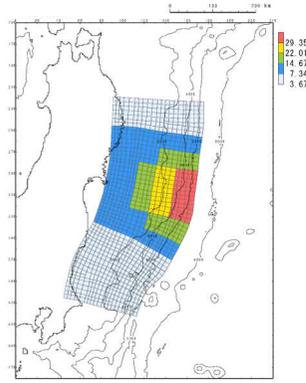
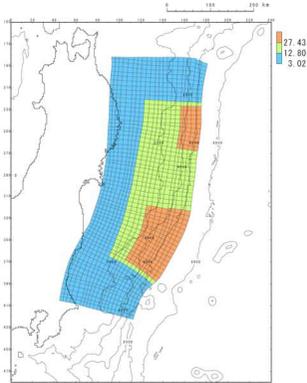
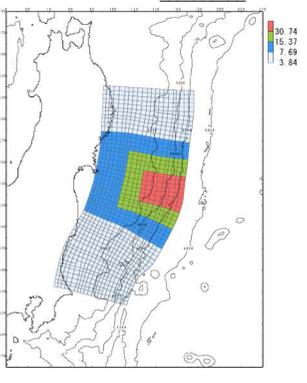
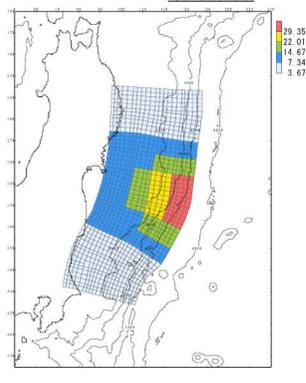
- 短周期の波を発生させる要因と考えられるその他の地震(分岐断層, 海底活断層)及び日本海溝付近の海底地すべりに起因する津波の津波特性に関する知見や発電所(沿岸)の津波高さに与える影響を整理し, 各知見等が基準断層モデル③に適切に反映されていることを確認した*。

※: 検討の詳細は, 補足説明資料「I. 第4章 4.7 各津波発生要因に関する評価とその知見の反映」に記載。

津波発生要因		知見の整理及び評価		基準断層モデル③の津波特性 (知見の反映)
その他の地震	分岐断層	知見の整理	南海トラフ沿いに認められる規模の分岐断層は存在しないものの, プレート境界地震に伴う副次的な活動で発生したと考えられる逆断層センスの変形構造を有する付加体が存在。	【地殻変動量分布】 南海トラフ沿いに認められる分岐断層に類似した地殻変動量分布を示す。 【周期特性】 短周期成分の波(8分~13分程度)が卓越する波形特性を有する。
		評価	プレート境界地震と比較して周期が短い。	
	海底活断層	知見の整理	3.11地震は, 岩手県沖南部から茨城県沖の海溝陸側斜面下部に連続する長大な海底活断層によるものと指摘する知見があるが(Nakata et al.(2012)), 「反射断面に認められている海底下の地質構造や, 3.11地震の変動については全く考慮していない。」との指摘もあるため(岡村(2012)), 今後の研究動向を引き続き注視する必要がある。	
		評価	短周期の波が卓越する。	
日本海溝付近の海底地すべり	日本海溝陸側斜面	知見の整理	・3.11地震によるプレートの運動(水平移動)によって, 不安定な状態が潜在していた海底地すべりが活動。 ・水深が7000~8000mと深いため, 海底地すべり位置の津波振幅は小さい。	
		評価	発電所の津波高さに与える影響は小さい。	
	海山	知見の整理	・第一鹿島海山には断層の活動に伴う小規模な崩壊地形が存在。 ・水深が4000m以深と深いため, 海底地すべり位置の津波振幅は小さいと考えられる。	
		評価	発電所の津波高さに与える影響は小さい。	

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定
3.3.5 基準断層モデルの設定:まとめ(1/2)

- 3.11地震から得られた知見を踏まえ、広域の津波特性をモデルに反映する観点から、3.11地震を上回る規模の基準断層モデルを設定した。
- 次頁に各モデルの計算結果を示す。

広域の津波特性を考慮した特性化モデル	宮城県沖の大すべり域の破壊特性を考慮した特性化モデル	
基準断層モデル①	基準断層モデル②	基準断層モデル③
 <p data-bbox="324 917 750 981">基準断層モデル①-1 (超大すべり域の位置:北へ約30km移動)</p>	 <p data-bbox="907 917 1332 981">基準断層モデル②-1 (大すべり域・超大すべり域の位置:基準)</p>	 <p data-bbox="1500 917 1926 981">基準断層モデル③-1 (大すべり域・超大すべり域の位置:基準)</p>
 <p data-bbox="324 1418 750 1482">基準断層モデル①-2 (超大すべり域の位置:南へ約60km移動)</p>	 <p data-bbox="907 1418 1332 1482">基準断層モデル②-2 (大すべり域・超大すべり域の位置:南へ約40km移動)</p>	 <p data-bbox="1500 1418 1926 1482">基準断層モデル③-2 (大すべり域・超大すべり域の位置:南へ約40km移動)</p>

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.3 基準断層モデルの設定

3.3.5 基準断層モデルの設定:まとめ(2/2)

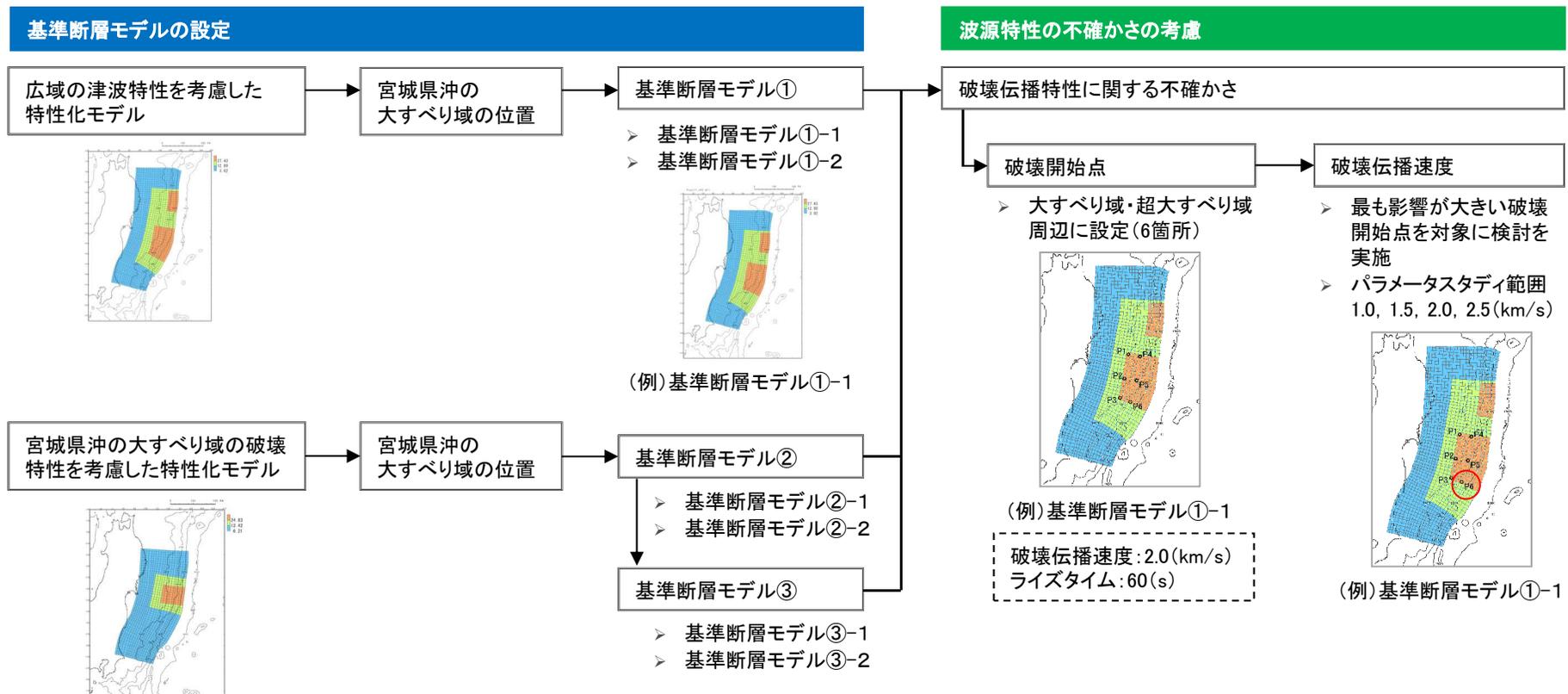
		最大水位上昇量(m)						備考 (大すべり域・超大すべり域の位置)
		敷地前面	1号取水口 前面	2号取水口 前面	3号取水口 前面	1号放水口 前面	2・3号 放水口前面	
広域の津波特性 を考慮した特性 化モデル	基準断層モデル①-1	18.42	17.33	17.32	17.15	16.04	16.20	北へ約30km移動
	基準断層モデル①-2	15.11	14.64	14.65	14.60	13.69	14.04	南へ約60km移動
宮城県沖の大す べり域の破壊特 性を考慮した特 性化モデル	基準断層モデル②-1	16.34	14.13	14.29	14.21	12.36	13.36	基準
	基準断層モデル②-2	11.80	11.20	11.31	11.34	9.75	10.84	南へ約40km移動
	基準断層モデル③-1	21.58	18.85	19.50	19.60	16.46	17.16	基準
	基準断層モデル③-2	18.19	16.44	16.71	16.57	14.08	15.75	南へ約40km移動

		最大水位下降量(m)	備考 (大すべり域・超大 すべり域の位置)
		2号取水口 前面	
広域の津波特性 を考慮した特性 化モデル	基準断層モデル①-1	-8.61	北へ約30km移動
	基準断層モデル①-2	-9.18	南へ約60km移動
宮城県沖の大す べり域の破壊特 性を考慮した特 性化モデル	基準断層モデル②-1	-7.72	基準
	基準断層モデル②-2	-8.96	南へ約40km移動
	基準断層モデル③-1	-8.98	基準
	基準断層モデル③-2	-8.78	南へ約40km移動

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震

3. 4 波源特性の不確かさの考慮

- 国内外で発生した巨大地震の破壊伝播特性に関する知見を収集するとともに、破壊開始点、破壊伝播速度、ライズタイムの不確かさが発電所の津波高さに与える影響を踏まえ※、津波高さに与える影響が大きい破壊開始点、破壊伝播速度の不確かさを以下のとおり考慮した。
※: 検討結果の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4. 4 波源特性の不確かさの考慮方法」に記載。



I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.5 「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波の評価

第378回審査会合(H28.7.8)
資料1-1 p184 一部修正

3.5.1 津波水位

- 波源特性の不確かさを考慮した津波予測計算の結果※、基準断層モデル③-1に波源特性の不確かさを考慮したケースが水位上昇側の決定ケースであり、基準断層モデル②-1に波源特性の不確かさを考慮したケースが水位下降側の決定ケースとなることを確認した。
 - なお、本評価は、地震調査研究推進本部(2019)が想定している地震規模及び波源域を包含しており、津波評価への影響はない。
- ※:津波予測計算結果の詳細は、補足説明資料「I. 第4章 4.5 津波予測計算」に記載。

【水位上昇側】

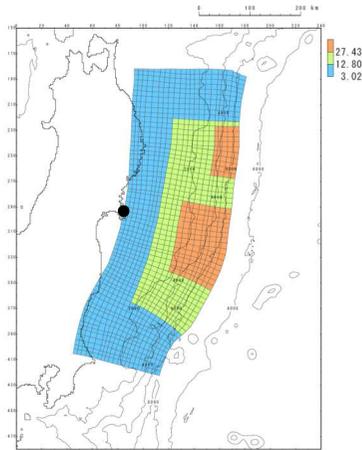
特性化モデル	大すべり域・ 超大すべり域 の位置	波源特性の不確かさ		最大水位上昇量(m)					
		破壊開始点	破壊伝播速度	敷地前面	1号取水口 前面	2号取水口 前面	3号取水口 前面	1号放水口 前面	2・3号 放水口前面
基準断層モデル ①-1	北へ約30km 移動	基準 (同時破壊)	基準 (同時破壊)	18.42	17.33	17.32	17.15	16.04	16.20
基準断層モデル ②-1	基準	P5	1.0(km/s)	18.86	17.03	17.40	17.55	15.50	15.34
基準断層モデル ③-1	基準	基準 (同時破壊)	基準 (同時破壊)	<u>21.58</u>	<u>18.85</u>	<u>19.50</u>	<u>19.60</u>	<u>16.46</u>	<u>17.16</u>

【水位下降側】

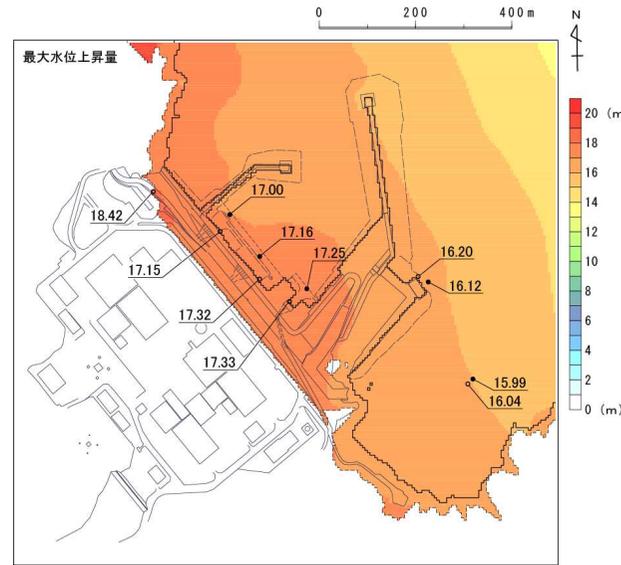
特性化モデル	大すべり域・ 超大すべり域 の位置	波源特性の不確かさ		2号取水口前面	
		破壊開始点	破壊伝播速度	最大水位下降量 (m)	取水口敷高を下回る 継続時間(分)
基準断層モデル ①-1	北へ約30km 移動	P6	1.0(km/s)	-10.22	2.6
基準断層モデル ②-1	基準	P5	1.0(km/s)	<u>-10.38</u>	2.6
基準断層モデル ③-1	基準	P5	1.0(km/s)	-9.78	2.9
2号機非常用海水ポンプの運転可能継続時間					約26

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.5 「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波の評価
 3.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形: 基準断層モデル①(水位上昇側)

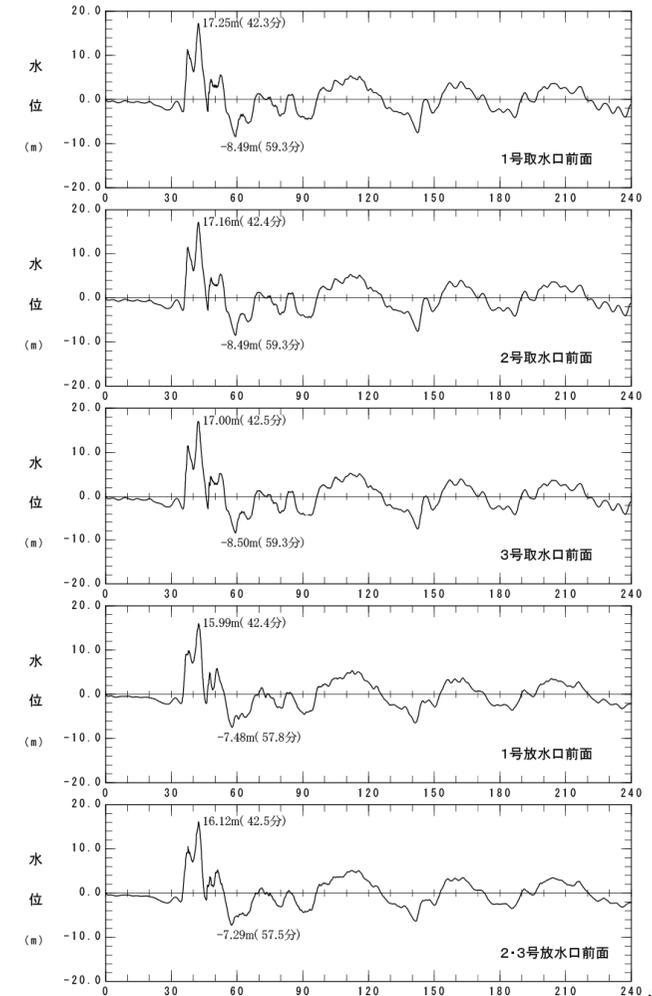
モデル	超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
基準断層モデル①-1	北へ約30km移動	基準 (同時破壊)	基準 (同時破壊)



すべり量分布



最大水位上昇量分布



時間 (分)
 水位時刻歴波形※

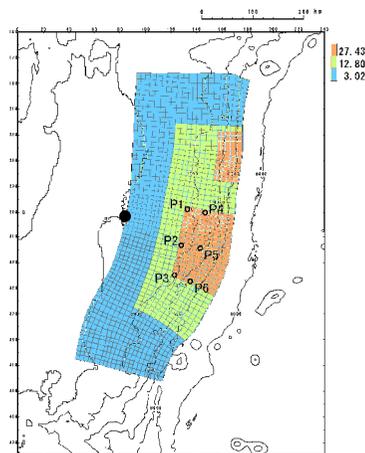
※: 水位時刻歴波形は, 各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は, 本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.5 「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波の評価

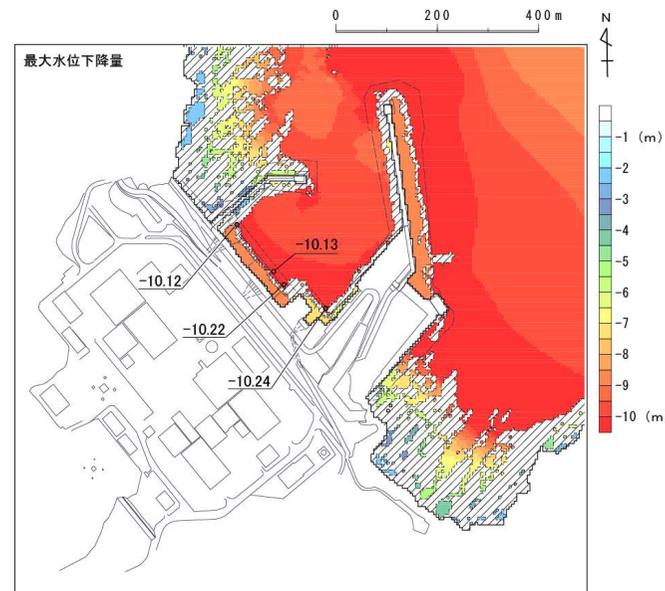
3.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形: 基準断層モデル①(水位下降側)

第378回審査会合(H28.7.8)
資料1-1 p186 再掲

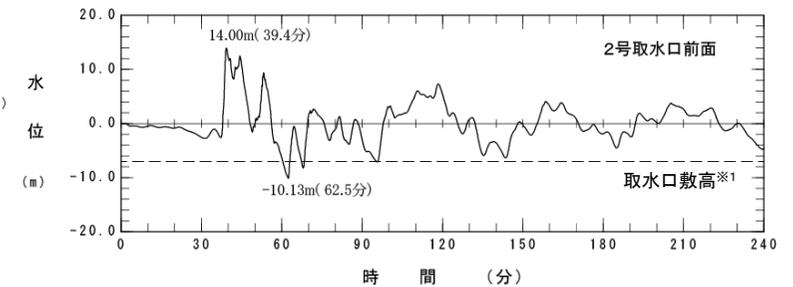
モデル	超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
基準断層モデル①-1	北へ約30km移動	P6	1.0(km/s)



すべり量分布, 破壊開始点位置



最大水位下降量分布



水位時刻歴波形※2

※1: T.P.-7.04m(O.P.-6.3m)

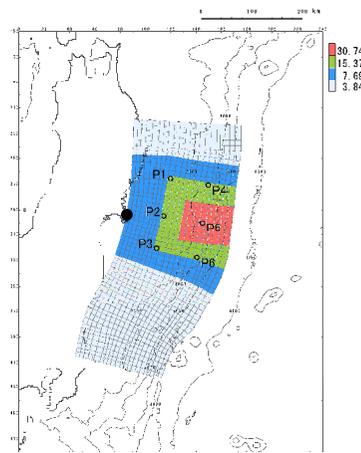
※2: 水位時刻歴波形は, 2号取水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は, 本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.5 「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波の評価

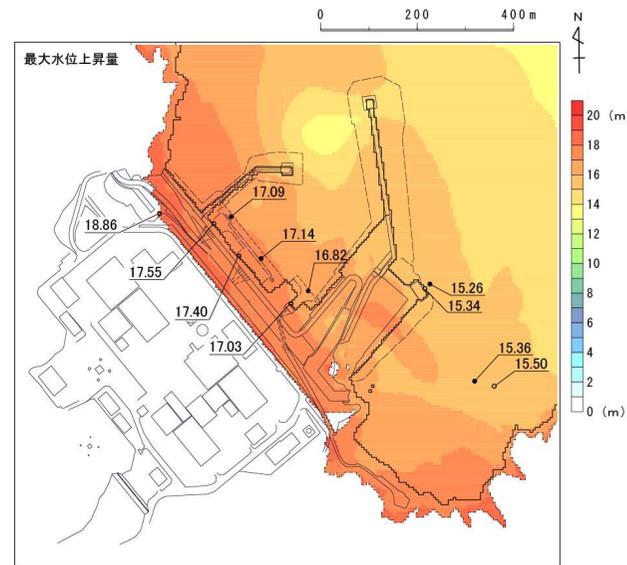
3.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形: 基準断層モデル②(水位上昇側)

第378回審査会合(H28.7.8)
資料1-1 p187 再掲

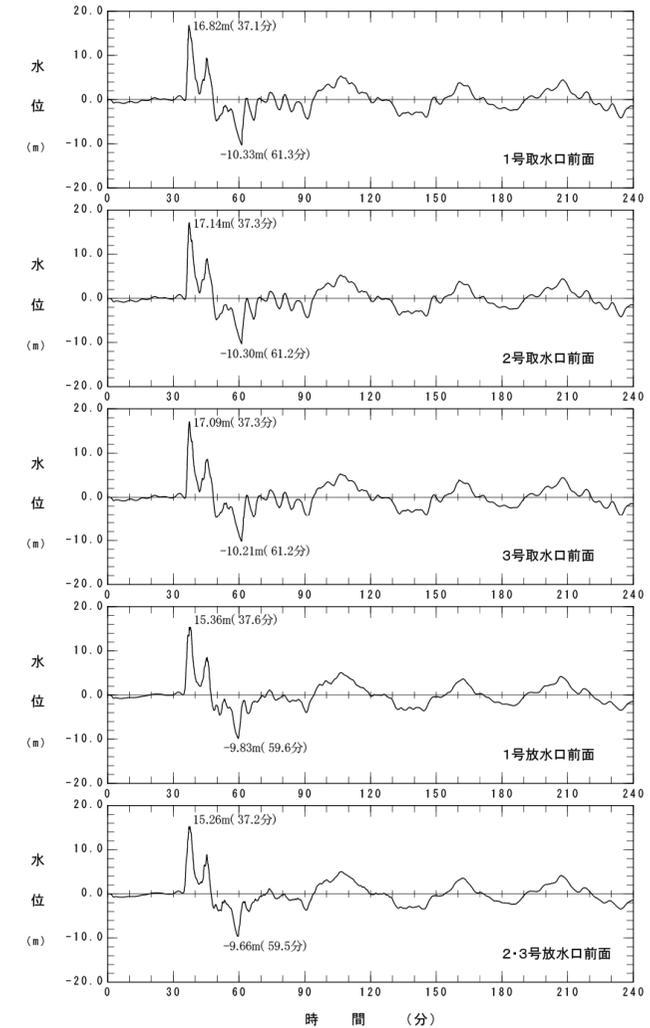
モデル	超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
基準断層モデル②-1	基準	P5	1.0(km/s)



すべり量分布



最大水位上昇量分布

時間 (分)
水位時刻歴波形※

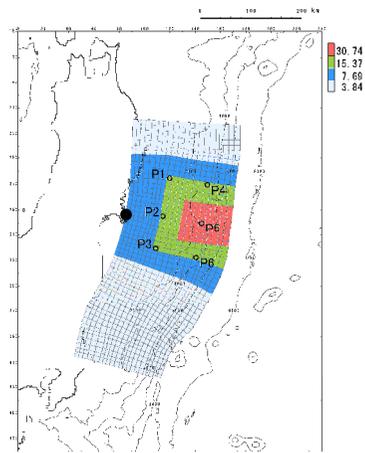
※: 水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.5 「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波の評価

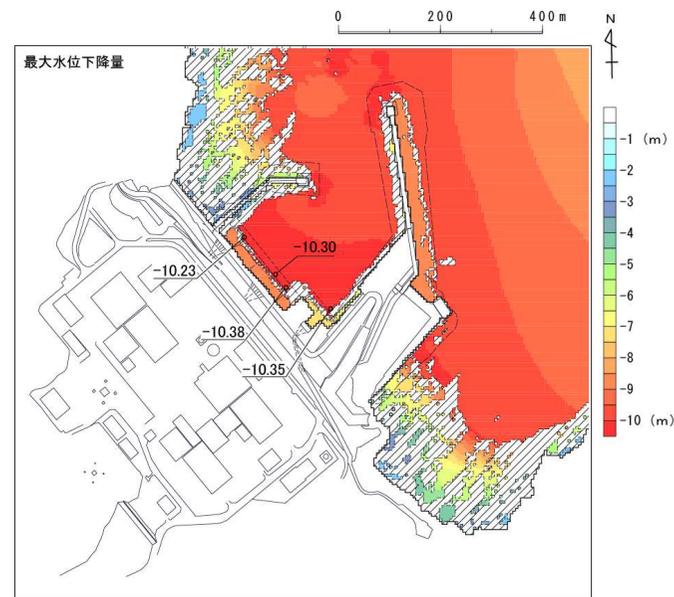
3.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形: 基準断層モデル②(水位下降側)

第378回審査会合(H28.7.8)
資料1-1 p188 再掲

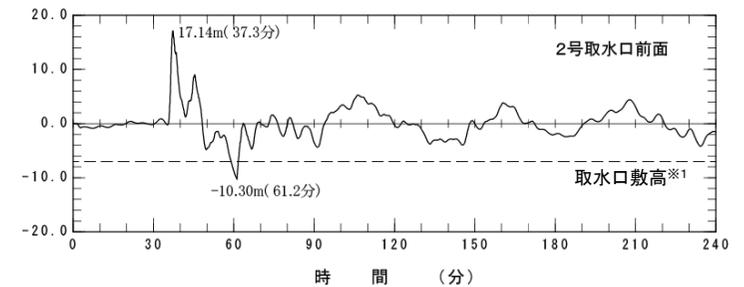
モデル	大すべり域・超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
基準断層モデル②-1	基準	P5	1.0(km/s)



すべり量分布, 破壊開始点位置



最大水位下降量分布



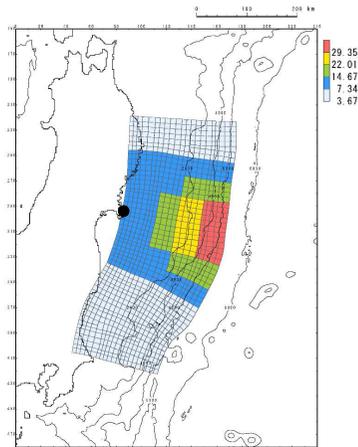
水位時刻歴波形※2

※1: T.P.-7.04m(O.P.-6.3m)

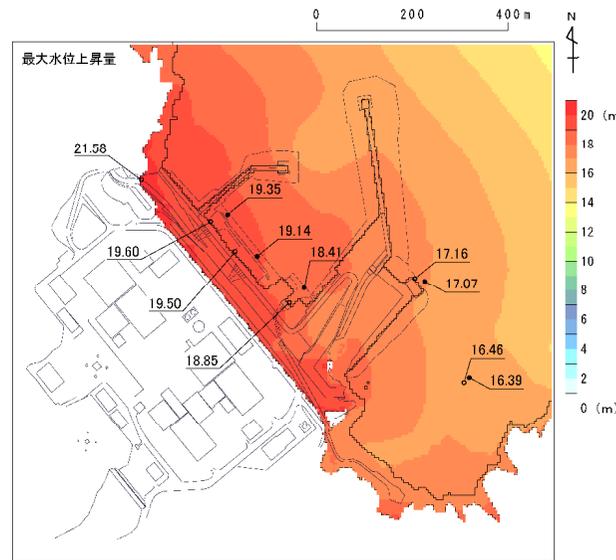
※2: 水位時刻歴波形は, 2号取水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は, 本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.5 「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波の評価
 3.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:基準断層モデル③(水位上昇側)

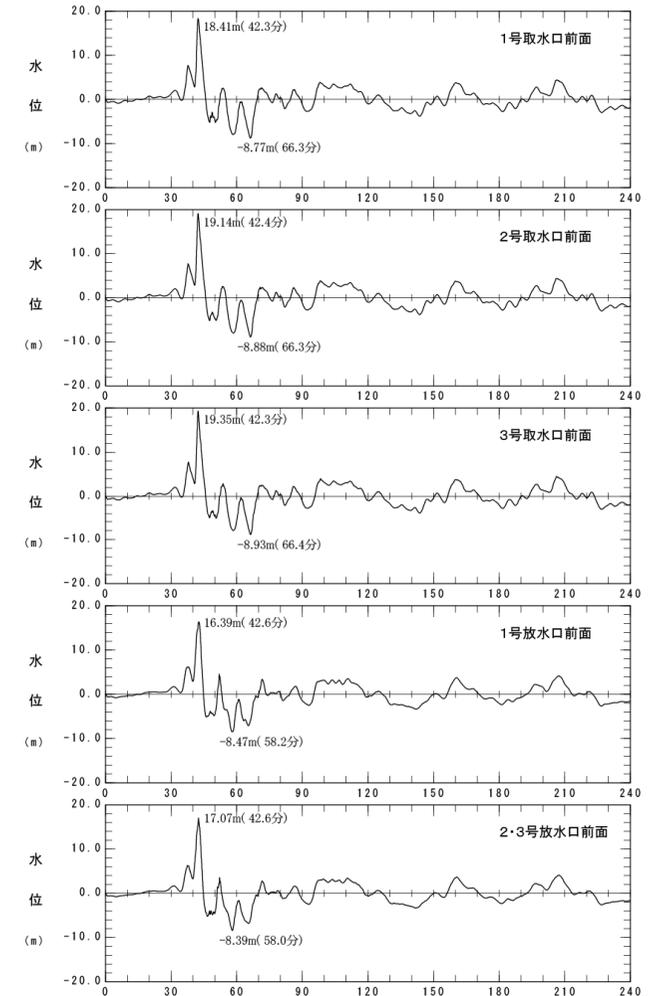
モデル	大すべり域・超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
基準断層モデル③-1	基準	基準 (同時破壊)	基準 (同時破壊)



すべり量分布



最大水位上昇量分布



時間 (分)
 水位時刻歴波形※

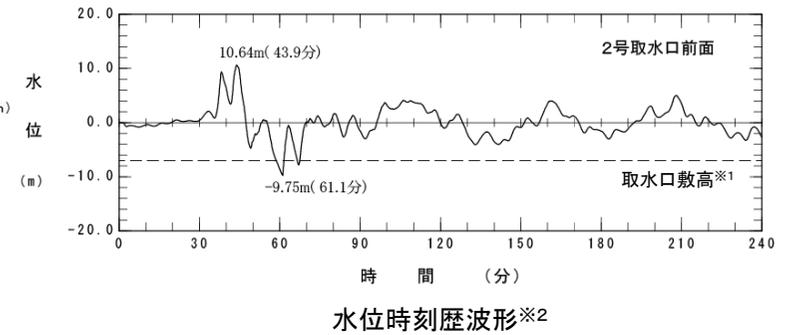
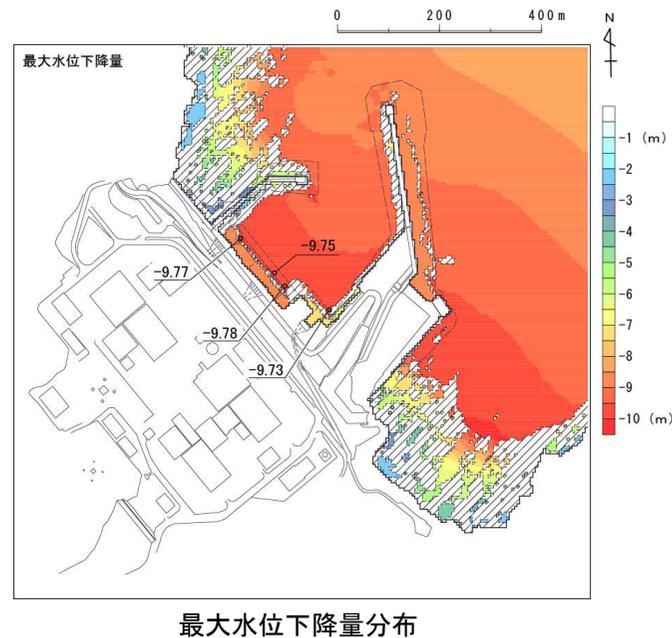
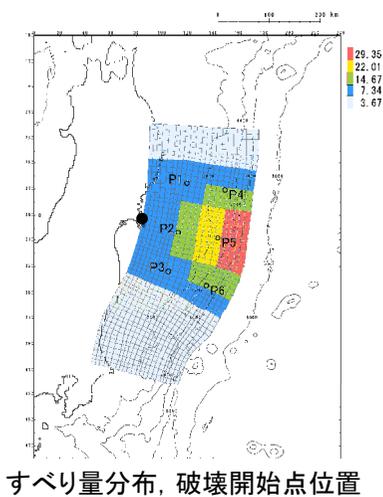
※: 水位時刻歴波形は, 各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は, 本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価 3. 東北地方太平洋沖型の地震 3.5 「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波の評価

3.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形: 基準断層モデル③(水位下降側)

第378回審査会合(H28.7.8)
資料1-1 p190 再掲

モデル	大すべり域・超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
基準断層モデル③-1	基準	P5	1.0(km/s)



※1: T.P.-7.04m(O.P.-6.3m)

※2: 水位時刻歴波形は, 2号取水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は, 本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価

1. 文献調査
2. 津波解析条件
3. 東北地方太平洋沖型の地震
4. 津波地震
 - 4.1 評価フロー
 - 4.2 地震規模に関する知見の整理
 - 4.3 基準断層モデルの設定
 - 4.4 波源特性の不確かさの考慮方法
 - 4.5 「津波地震」に起因する津波の評価
5. 海洋プレート内地震
6. 海域の活断層による地殻内地震

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震

4.1 評価フロー

- 以下のフローに基づき評価を実施した。



I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.2 地震規模に関する知見の整理

4.2.1 地震調査研究推進本部の評価

- 地震調査研究推進本部(2012, 2019)では、次の地震の規模を1896年明治三陸地震津波の規模(Mt8.6~Mt9.0)^{※1}とし、その信頼度を「A」と評価している。

※1: 地震調査研究推進本部(2012, 2019)では、1896年明治三陸地震津波の地震規模について以下のとおり評価している。

→ Mt8.6,9.0はともに阿部(2003)による値。阿部(2003)によると「遡上高の平均値に阿部(1999)のMt決定法を適用すると9.0が求められるが、この値は過大評価気味である」とのことであるが、本報告ではMt9.0も十分考えられると判断した^{※2}。

※2: 阿部(2003)の知見、並びにMtとMwの関係の詳細は、補足説明資料「I. 第5章 5.1 地震規模に関する知見の整理」に記載。

次の三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート間地震(津波地震)の発生確率等
(地震調査研究推進本部(2012))

項目	将来の地震発生確率等 ^{注2}	備考	評価の信頼度 ^{注4}
今後10年以内の発生確率 #	9%程度 (2%程度)	約412年間に顕著な津波を伴った地震が三陸沖北部から房総沖の海溝寄りに4回発生していると判断し、平均発生間隔を103年(=412年/4回)とし、ポアソン過程により三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのどこかで発生する確率を算出した。また、1896年の地震の断層長が三陸沖北部から房総沖の海溝寄り全体の0.25倍程度を占めることから、特定の海域では同様の地震が412年に1回発生するものとして、ポアソン過程から発生確率を算出した。	C
今後20年以内の発生確率 #	20%程度 (5%程度)		
今後30年以内の発生確率 #	30%程度 (7%程度)		
今後40年以内の発生確率 #	30%程度 (9%程度)		
今後50年以内の発生確率 #	40%程度 (10%程度)		
今後100年以内の発生確率 #	60%程度 (20%程度)		
今後300年以内の発生確率 #	90%程度以上 (50%程度)		
次の地震の規模	Mt8.6-Mt9.0 ^{注3}		

注2 評価時点がどの時点でもポアソン過程を用いているため確率は変化しない。

注3 Mの推定値のばらつきについて、「程度」及び「前後」を使用。「程度」は「前後」よりばらつきが大きい場合に使用した。

注4 評価の信頼度

■ 規模の評価の信頼度:A

想定地震と同様な過去の地震の規模から想定規模を推定した。過去の地震データが比較的多くあり、規模の信頼性は高い。

■ 発生確率の評価の信頼度:C

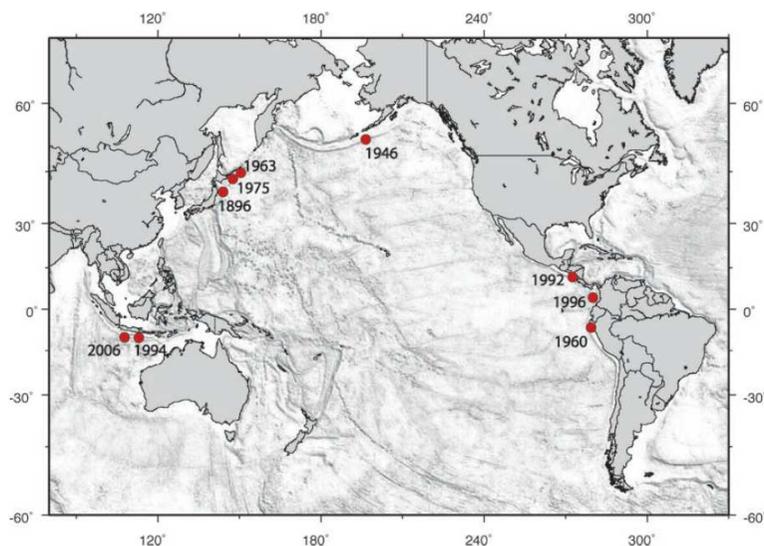
想定地震と同様な過去の地震データが少なく、必要に応じ地震学的知見を用いて発生確率を求めたため、発生確率の値の信頼性はやや低い。

今後の新しい知見により値が大きくなり得る。

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.2 地震規模に関する知見の整理

4.2.2 国内外で発生した津波地震の地震規模

- 1896年明治三陸地震津波(Mw8.3, 土木学会(2016))は, 国内外で発生した最大規模の津波地震である。



Date	Geographical Region	M_w	m_b	M_S	M_r	Deaths
1896/06/15	Japan			7.2	8.0	26360
1946/04/01	Aleutian Islands	8.2		7.3	9.3	165
1960/11/20	Peru	7.6	7.0	7.0		66
1963/10/20	Kurile Islands	7.8	7.1	7.2		
1975/06/10	Kurile Islands	7.5	5.6	7.0		
1992/09/02	Nicaragua	7.7	5.4	7.2		179
1994/06/02	Java	7.8	5.7	7.1		250
1996/02/21	Peru	7.5	5.8	6.6		12
2006/07/17	Java	7.7	6.2	7.2		668

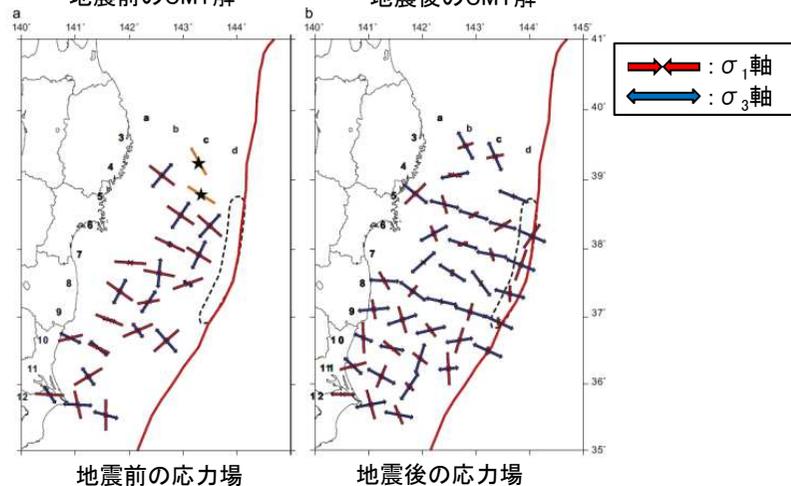
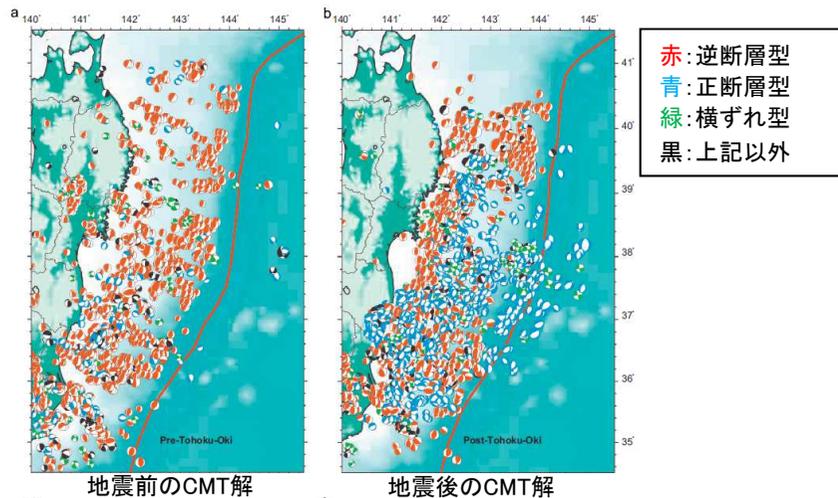
POLET and KANAMORI(2009)

Tsunami Earthquakes, Figure 1
Map of tsunami earthquakes (listed in Table 1). Location for 1896 earthquake from [2] and for 2006 earthquake from the Global CMT catalog. All other earthquake locations from the Centennial Earthquake Catalog [18]

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4. 2 地震規模に関する知見の整理

4. 2. 3 3.11地震発生後の応力状態

- 地震学的・地球物理学的見地から、3.11地震の発生により、それを引き起こした歪みはほぼ解放されたと考えられる(Hasegawa et al.(2012), JAMSTEC(2013)他)。また、JAMSTEC(2012)によれば、3.11地震発生前後の地下構造データの比較から、3.11地震は、「プレート境界付近をすべり面とした断層が海溝軸まで到達した。」としている。
- 地震調査研究推進本部(2012)では、「三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート間地震(津波地震)」の発生確率及び評価の信頼度を下表のとおり算定し、3.11地震の震源域に含まれる三陸沖中部から三陸沖南部海溝寄りに至る部分における将来の発生確率は他領域と比較して小さいと評価している。



応力テンソルインバージョンから得られた陸のプレートの応力場の変化 (Hasegawa et al.(2012))

次の三陸沖北部から房総沖にかけての海溝寄りのプレート間地震(津波地震)の発生確率等(地震調査研究推進本部(2012))

項目	将来の地震発生確率等 ^{注2}	備考	評価の信頼度 ^{注4}
今後10年以内の発生確率 #	9%程度 (2%程度)	約412年間に顕著な津波を伴った地震が三陸沖北部から房総沖の海溝寄りに4回発生していると判断し、平均発生間隔を103年(=412年/4回)とし、ポアソン過程により三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのどこかで発生する確率を算出した。また、1896年の地震の断層長が三陸沖北部から房総沖の海溝寄り全体の0.25倍程度を占めることから、特定の海域では同様の地震が412年に1回発生するものとして、ポアソン過程から発生確率を算出した。	C
今後20年以内の発生確率 #	20%程度 (5%程度)		
今後30年以内の発生確率 #	30%程度 (7%程度)		
今後40年以内の発生確率 #	30%程度 (9%程度)		
今後50年以内の発生確率 #	40%程度 (10%程度)		
今後100年以内の発生確率 #	60%程度 (20%程度)		
今後300年以内の発生確率 #	90%程度以上 (50%程度)		
次の地震の規模	Mt8.6-Mt9.0 ^{注3}	過去に発生した地震のMt等を参考にして判断した。津波地震であるためMtはMtより小さい。	A

以上の地震学的・地球物理学的見地から、3.11地震の発生に伴い、女川原子力発電所前面海域にこれまで蓄積された歪みはほぼ解放されたと考えられるものの、地震調査研究推進本部(2012)において、ある程度の地震発生確率を算定していることを踏まえ、「津波地震」を検討波源とした基準断層モデルを設定する。

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.2 地震規模に関する知見の整理

4.2.4 地震規模の設定

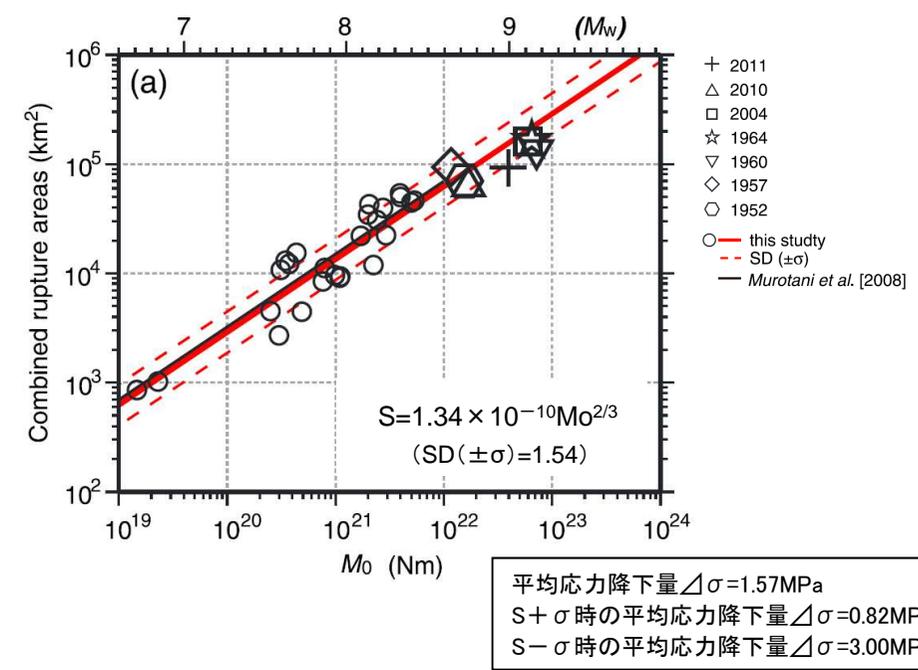
- 地震調査研究推進本部(2012, 2019)において次の地震の規模を1896年明治三陸地震津波と評価していること, 並びに同地震は国内外で最大規模の津波地震であることを踏まえ, 基準断層モデルの地震規模は, 1896年明治三陸地震津波を再現するモデルを上回る規模を考慮する。

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.3 基準断層モデルの設定
4.3.2 地震規模(Mw)の分布幅に関する知見の整理

- 土木学会(2009)では、日本付近でほぼ同じ領域が破壊したと考えられる過去の固有地震の規模範囲を整理し、「マグニチュードの決定精度に問題はあると思われるが、マグニチュード幅は0.3~0.6程度の範囲に分布している。」としている。
- Murotani et al.(2013)によるM7~9クラスまでに適用可能なスケーリング則($M_0 = 16 / (7 \cdot \pi^{3/2}) \cdot \Delta\sigma \cdot S^{3/2}$)から、破壊領域(S)と M_0 の関係式の平均応力低下量を算定すると1.57MPaであり、標準偏差SD($\pm\sigma$)を考慮すると最小で0.82MPa, 最大で3.0MPaとなる。
- 破壊領域(S)を固定した場合の各平均応力低下量のMwを算定すると、 $\Delta\sigma = 1.57\text{MPa}$ によるMwに対して $\Delta\sigma = 0.82\text{MPa}$ は-0.2, $\Delta\sigma = 3.00\text{MPa}$ は+0.2となる。
- 以上から、地震規模(Mw)の分布幅は、基準 ± 0.2 と整理される。

過去の固有地震の規模範囲
(土木学会(2009))

海域	M_j の範囲	M_t の範囲
宮城県沖: 5地震	7.3~7.5	—
三陸沖北部: 4地震	7.4~7.9	7.6 ~8.2
十勝沖: 2003, 1952, 1843	8.0~8.2	8.0~8.2
南海: 1946, 1854	8.0 ~8.4	8.1~8.3



破壊領域(S)と M_0 の関係 (Murotani et al.(2013))

上記知見、並びに1896年明治三陸地震津波は、国内外で発生した最大規模の津波地震であることを踏まえ、基準断層モデルの地震規模(Mw)は、1896年明治三陸地震津波再現モデルの地震規模(Mw8.28) + 0.2のMw8.5に設定した。

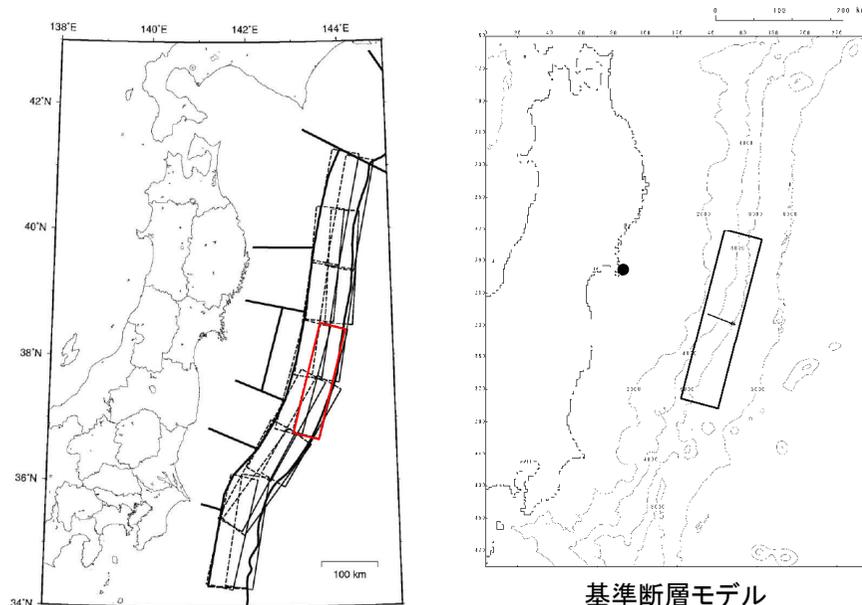
I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.3 基準断層モデルの設定

4.3.3 基準断層モデルの設定※1

※1:設定方法等の詳細は、補足説明資料「I. 第5章 5. 2. 3 基準断層モデルの設定」に記載。

- 1896年明治三陸地震津波の再現モデル, 中央防災会議(2005)の断層モデル※2のすべり分布を参考に, 土木学会(2016)に示されるMwに関連する断層パラメータのスケーリング則を適用して設定した。
- 波源位置は, 地震調査研究推進本部(2014a)による津波地震の断層面の設定方法を参考として, 発電所に影響が大きい位置を基準位置とした。

※2:断層モデルの詳細は、補足説明資料「I. 第5章 5. 2. 2 中央防災会議(2005)の断層モデル」に記載。



基準断層モデル
(波源位置:基準)

三陸沖北部から房総沖の海溝寄りの
プレート間地震(津波地震)の断層面
(地震調査研究推進本部(2014a)に一部加筆)

諸元

断層パラメータ		設定方法	設定値
モーメント マグニチュード	Mw	地震規模(Mw)の分布幅に関する知見, 国内外で発生した最大規模の1896年明治三陸地震津波の地震規模を踏まえて設定	8.5
長さ	L(km)	既往津波再現モデル, 中央防災会議(2005)のすべり分布を参考に, Mwに関連する断層パラメータのスケーリング則(限界を設定しない)を適用して設定。	271
幅	W(km)		64
すべり量	D(m)		11.60
剛性率	μ (N/m ²)	既往津波再現モデルに基づき設定。	3.5×10^{10}
地震モーメント	Mo(Nm)	μ LWD	7.08×10^{21}
走向	θ (°)	地震調査研究推進本部(2014a)の津波地震の断層面を参考に設定。	197
断層上縁深さ	d(km)	既往津波再現モデルに基づき設定。	1
傾斜角	δ (°)		20
すべり角	λ (°)	走向とすべり方向に基づき設定。	83.6
ライズタイム	τ (s)	既往津波再現モデルに基づき設定。	60

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震

4. 4 波源特性の不確かさの考慮方法

- 土木学会(2016)を参考として波源位置及び走向を変動させた概略パラメータスタディを実施し、各評価位置で水位上昇量及び水位下降量が最大となるケースについて、傾斜角及びすべり角を変動させた詳細パラメータスタディを実施した。
- 位置の変動範囲については、発電所に最も影響が大きい波源位置を評価するため、発電所の津波高さに与える影響が大きい範囲を対象に10km単位で移動させた。
- 走向、傾斜角、すべり角の変動範囲については、土木学会(2002, 2016)を参考に設定^{*}した。

^{*}:土木学会(2002)では、プレート間逆断層地震のハーバードCMTによる発震機構解(1976.1~2000.1に発生したMw6.0以上、深さ60km以下の地震)及び既往の断層モデルのばらつきから変動範囲を設定。

【概略パラメータスタディ】

項目	変動範囲
位置	基準 北へ10km, 20km, 30km, 40km, 50km移動 南へ10km, 20km, 30km, 40km, 50km移動
走向	基準, 基準±5°

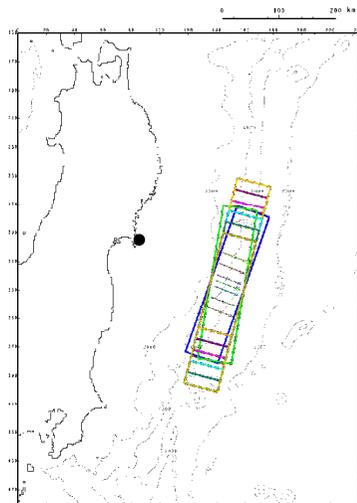
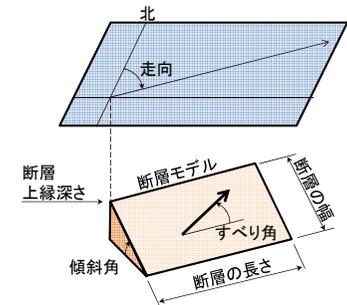
最大水位上昇量・
下降量最大ケース



【詳細パラメータスタディ】

項目	変動範囲
傾斜角	基準, 基準±5°
すべり角	基準, 基準±10°

(参考)断層パラメータ



位置、走向の不確かさの考慮方法

- 位置: 基準, 走向: 基準
- 位置: 基準, 走向: 基準+5°
- 位置: 基準, 走向: 基準-5°
- 位置: 北へ10km移動, 走向: 基準
- 位置: 北へ30km移動, 走向: 基準
- 位置: 北へ50km移動, 走向: 基準
- 位置: 南へ10km移動, 走向: 基準
- 位置: 南へ30km移動, 走向: 基準
- 位置: 南へ50km移動, 走向: 基準

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.5 「津波地震」に起因する津波の評価

4.5.1 津波水位

- 各評価位置における水位上昇側、水位下降側の最大ケースを以下に示す※。
- なお、地震調査研究推進本部(2019)では、青森県東方沖から房総沖にかけての海溝寄りの領域で過去に発生した地震(1611年・1677年・1896年・2011年)のMt等を参考にMt8.6~9.0の地震を想定しているが、津波地震である場合、MはMtより小さいとしている。本評価は、過去に発生した地震の地震規模を上回る基準断層モデルを設定し、さらに波源特性の不確かさを考慮している。このことから、地震調査研究推進本部(2019)の想定を包含しており、津波評価への影響はない。

※:津波予測計算結果の詳細は、補足説明資料「I. 第5章 5.3 津波予測計算」に記載。

【水位上昇側】

波源モデル	波源特性の不確かさ				最大水位上昇量(m)					
	位置	走向	傾斜角	すべり角	敷地前面	1号取水口前面	2号取水口前面	3号取水口前面	1号放水口前面	2・3号放水口前面
津波地震	基準	基準+5°	基準	基準+10°	<u>21.82</u>	15.80	16.39	16.80	13.98	<u>15.01</u>
	北へ10km	基準+5°	基準+5°	基準+10°	20.84	<u>17.21</u>	<u>17.61</u>	<u>17.20</u>	14.392	14.72
	基準	基準+5°	基準+5°	基準+10°	20.73	17.13	17.45	17.18	<u>14.393</u>	14.80

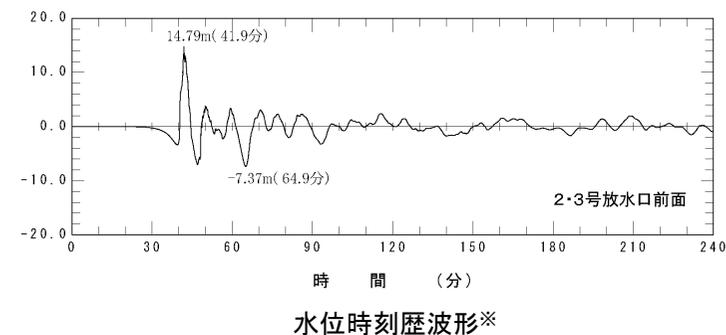
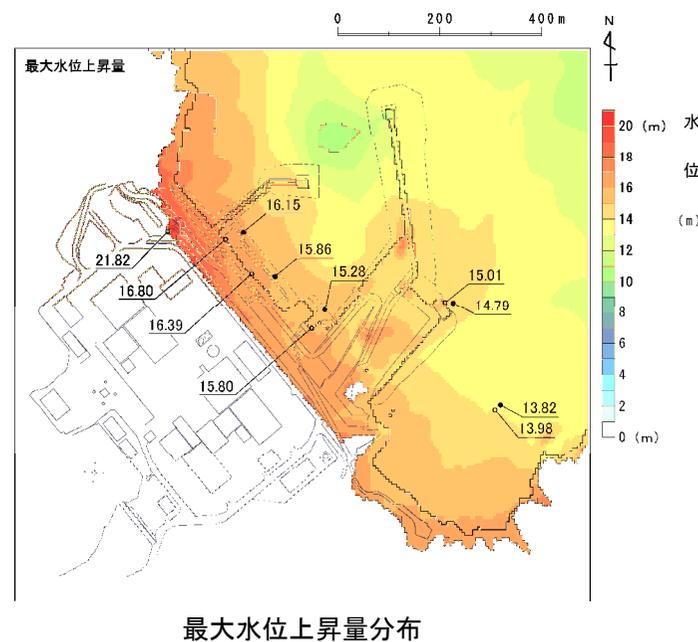
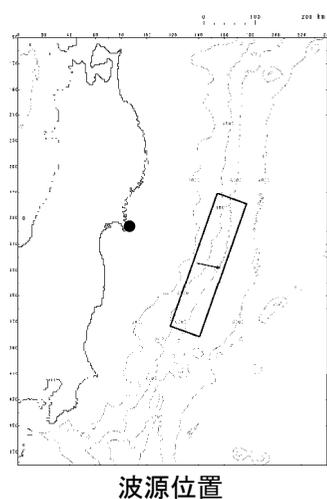
【水位下降側】

波源モデル	波源特性の不確かさ				2号取水口前面	
	位置	走向	傾斜角	すべり角	最大水位下降量(m)	取水口敷高を下回る継続時間(分)
津波地震	北へ10km	基準+5°	基準+5°	基準+10°	<u>-9.17</u>	1.9
2号機非常用海水ポンプの運転可能継続時間						約26

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.5 「津波地震」に起因する津波の評価

4.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位上昇側(1/3)

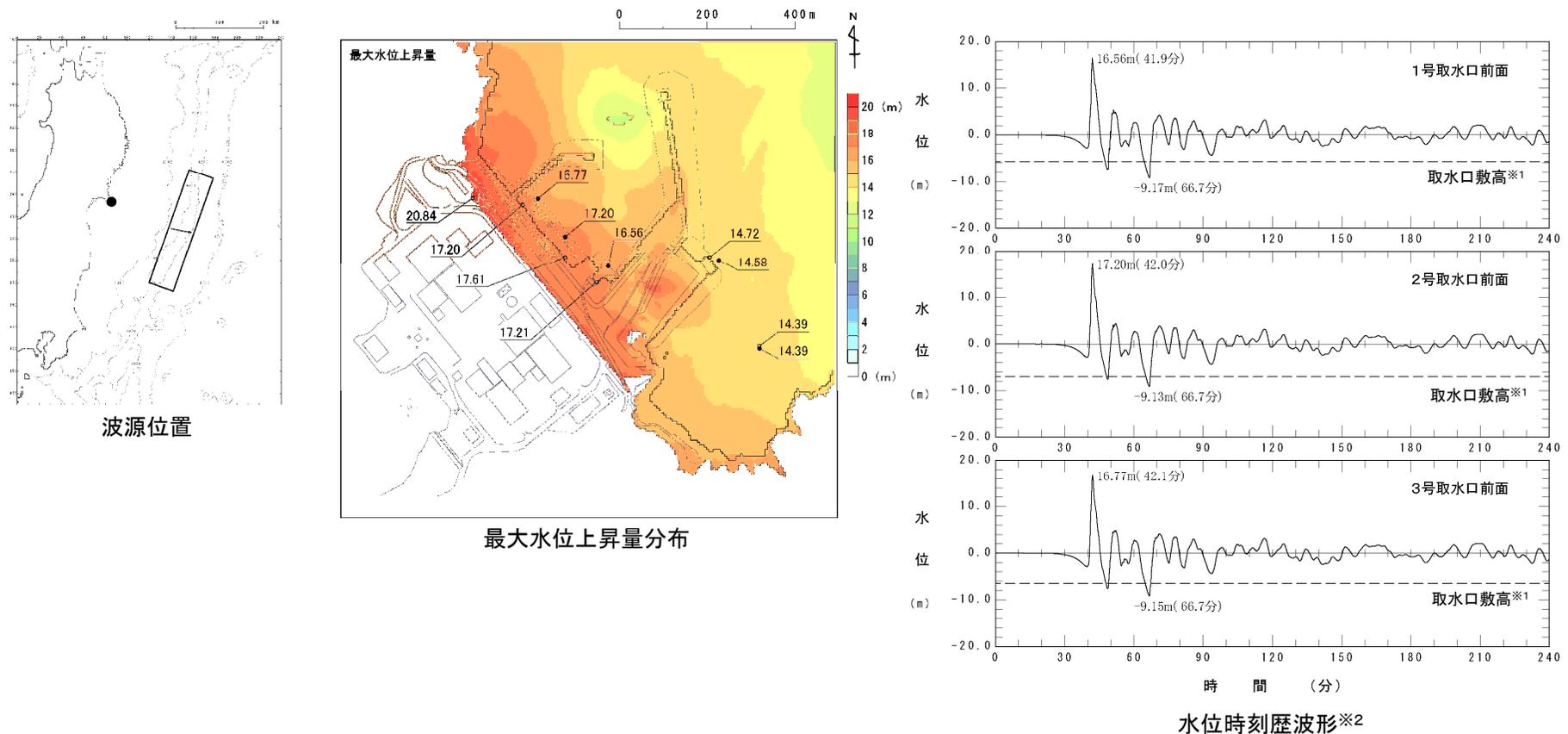
評価位置	位置	走向	傾斜角	すべり角
敷地前面 2・3号放水口前面	基準	基準+5°	基準	基準+10°



※: 水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.5 「津波地震」に起因する津波の評価
4.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位上昇側(2/3)

評価位置	位置	走向	傾斜角	すべり角
各取水口前面	北へ10km	基準+5°	基準+5°	基準+10°

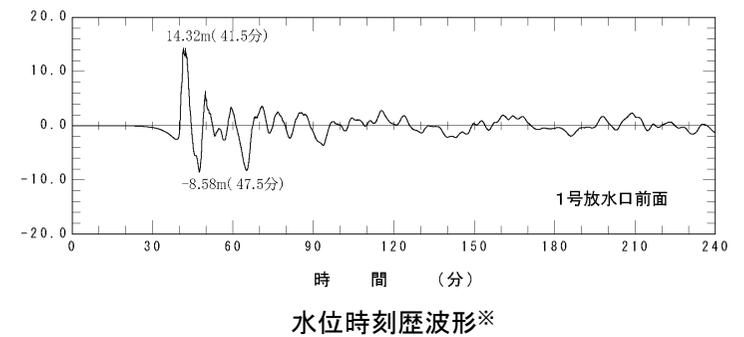
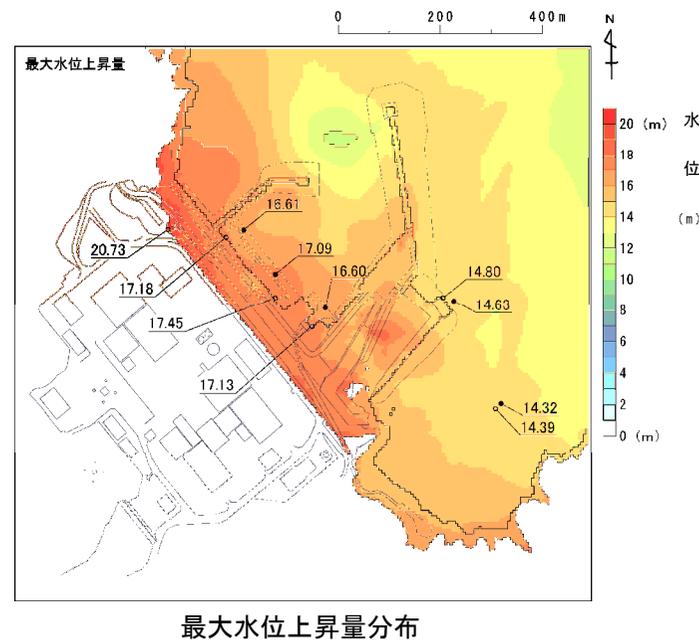
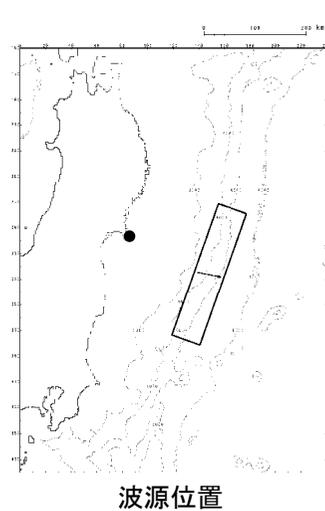


※1: 1号:T.P.-5.74m(O.P.-5.0m), 2号:T.P.-7.04m(O.P.-6.3m), 3号:T.P.-6.44m(O.P.-5.7m)

※2: 水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.5 「津波地震」に起因する津波の評価
4.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位上昇側(3/3)

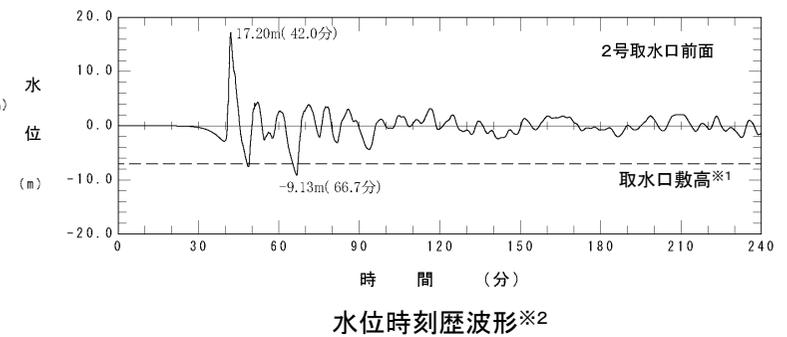
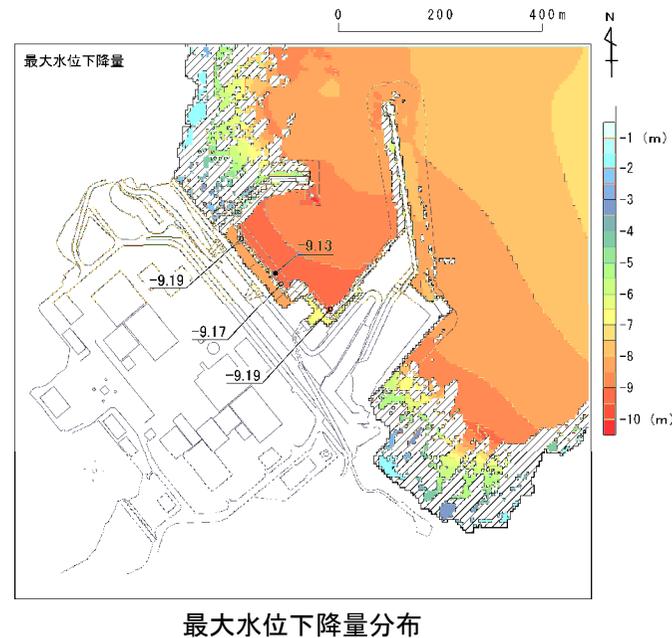
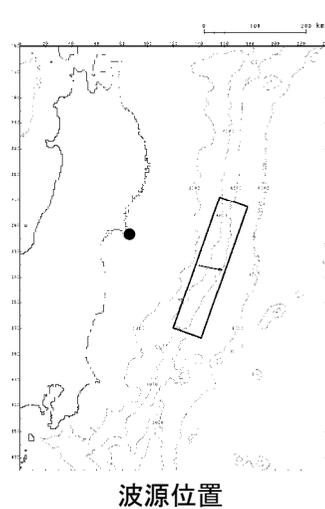
評価位置	位置	走向	傾斜角	すべり角
1号放水口前面	基準	基準+5°	基準+5°	基準+10°



※:水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価 4. 津波地震 4.5 「津波地震」に起因する津波の評価
4.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位下降側

評価位置	位置	走向	傾斜角	すべり角
2号取水口前面	北へ10km	基準+5°	基準+5°	基準+10°



※1:T.P.-7.04m(O.P.-6.3m)

※2:水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

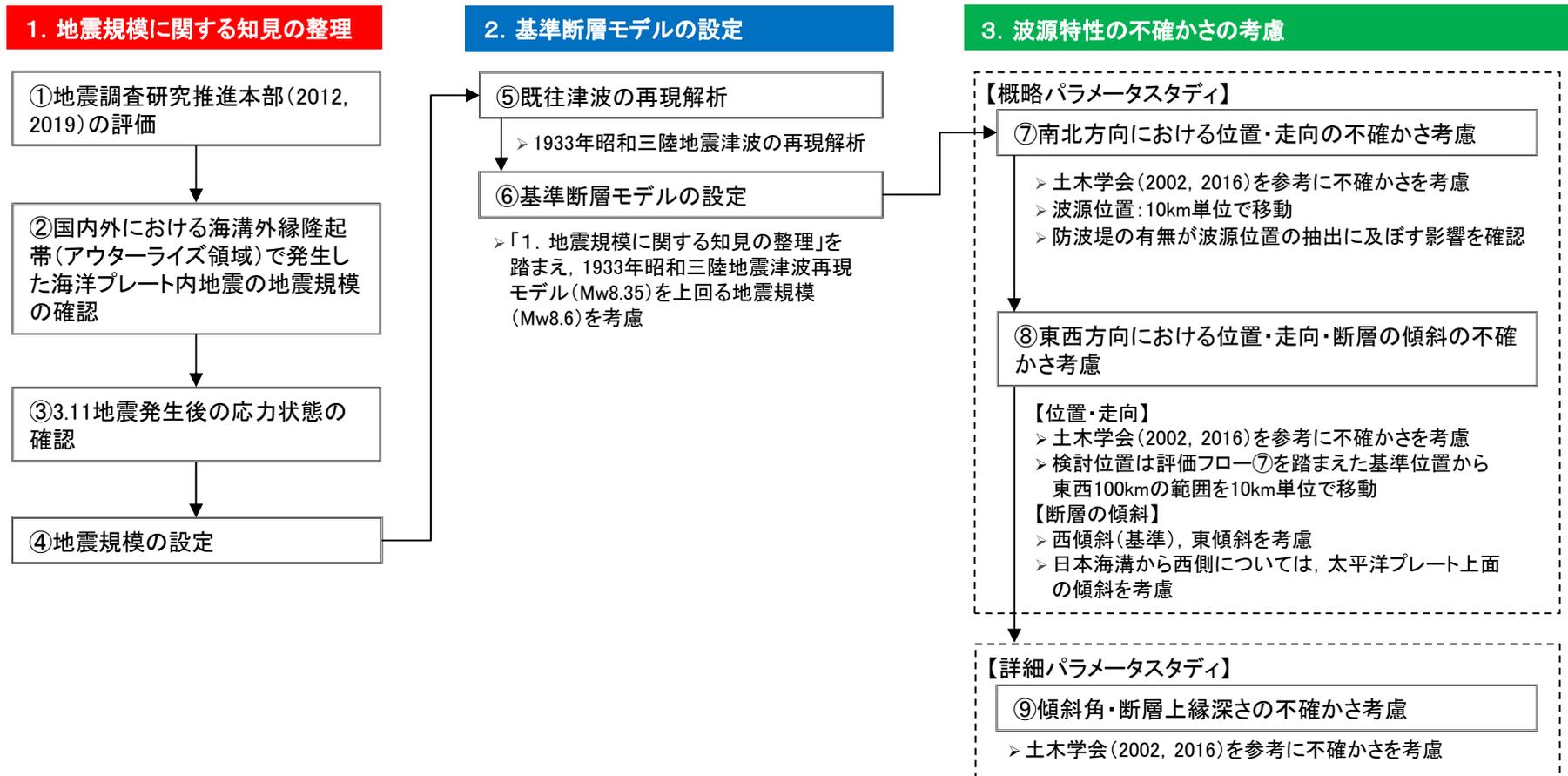
I. 地震に起因する津波の評価

1. 文献調査
2. 津波解析条件
3. 東北地方太平洋沖型の地震
4. 津波地震
5. 海洋プレート内地震
 - 5.1 評価フロー
 - 5.2 地震規模に関する知見の整理
 - 5.3 基準断層モデルの設定
 - 5.4 波源特性の不確かさの考慮方法
 - 5.5 「海洋プレート内地震」に起因する津波の評価
6. 海域の活断層による地殻内地震

I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震

5.1 評価フロー

- 以下のフローに基づき評価を実施した。



I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.2 地震規模に関する知見の整理

5.2.1 地震調査研究推進本部の評価

- 地震調査研究推進本部(2012, 2019)では、次の地震の規模を1933年昭和三陸地震津波のMから「M8.2前後」と評価している※。
- 地震調査研究推進本部(2012)では、上記評価の信頼度を「B」と評価している。

※:地震調査研究推進本部(2012)では、1933年昭和三陸地震津波の地震規模について以下のとおり評価している。

→プレート内の正断層型の地震については、過去400年間に1933年の昭和三陸地震の1例しかないことを踏まえ、次の地震の規模は、過去に発生した地震を参考にして、M8.2前後、Mt8.3前後と推定した。

次の三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート内地震(正断層型)の発生確率等
(地震調査研究推進本部(2012))

項目	将来の地震発生確率等 ^{注2}	備考	評価の信頼度 ^{注4}
今後10年以内の発生確率#	1%~2% (0.3%~0.6%)	M8程度のプレート内正断層型地震については、三陸沖北部~房総沖の海溝寄り全体では過去400年間に1933年の三陸地震の1例しかないことと、三陸沖海溝外縁の断層地形及び正断層地震の総モーメントの推定から、同様の地震が400~750年に1回発生するものとして、ポアソン過程により三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのどこかで発生する確率を算出した。また、1933年の地震の断層長が三陸沖北部から房総沖の海溝寄り全体の0.25倍程度を占めることから、特定の海域では同様の地震が1600~3000年に1回発生するものとして、ポアソン過程から発生確率を算出した。	C
今後20年以内の発生確率#	3%~5% (0.7%~1%)		
今後30年以内の発生確率#	4%~7% (1%~2%)		
今後40年以内の発生確率#	5%~10% (1%~2%)		
今後50年以内の発生確率#	6%~10% (2%~3%)		
今後100年以内の発生確率#	10%~20% (3%~6%)		
今後300年以内の発生確率#	30%~50% (10%~20%)		
次の地震の規模	M8.2前後 ^{注3} Mt8.3前後		

注2 評価時点がどの時点でもポアソン過程を用いているため確率は変化しない。

注3 Mの推定値のばらつきについて、「程度」及び「前後」を使用。「程度」は「前後」よりばらつきが大きい場合に使用した。

注4 評価の信頼度

■規模の評価の信頼度:B

想定地震と同様な過去の地震の規模から想定規模を推定した。過去の地震データが多くはなく、規模の信頼性は中程度である。

■発生確率の評価の信頼度:C

想定地震と同様な過去の地震データが少なく、必要に応じ地震学的知見を用いて発生確率を求めたため、発生確率の値の信頼性はやや低い。

今後の新しい知見により値が大きく変わり得る。

I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.2 地震規模に関する知見の整理

5.2.2 国内外における海溝外縁隆起帯で発生した海洋プレート内地震の地震規模

- 1933年昭和三陸地震津波は、国内外における海溝外縁隆起帯(outer rise)で発生した最大規模の海洋プレート内地震である。

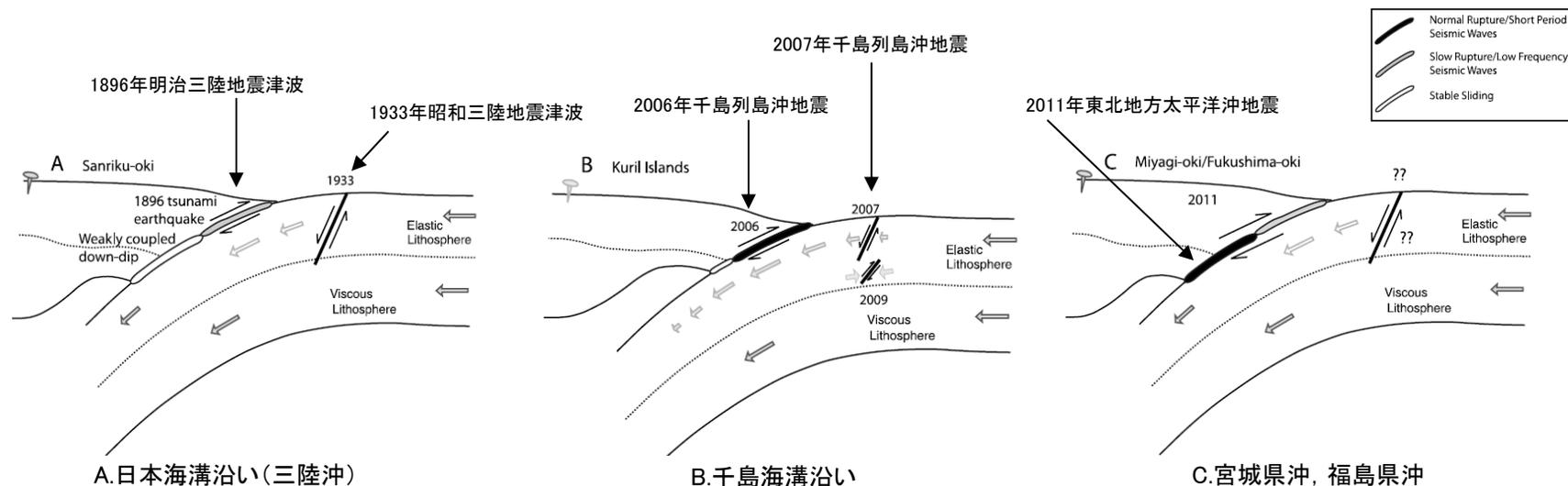
海溝外縁隆起帯で発生した主な海洋プレート内地震の断層パラメータ (Alvarez-Gomez et al.(2012))

Id.	Date dd/mm/yyyy	Place	M_w	Length km	Width km	Bottom km	Dip °	Slip m	Rigidity Nm^{-2}	Reference
a	03/02/1933	Sanriku	8.4	185	100	70	45	3.3	-	Kanamori (1971)
b	03/02/1933	Sanriku	8.4	220	35	25	45	8	7.0×10^{10}	Kirby et al. (2008)
c	30/03/1965	Rat Island	7.2	50	80	60	50	1.2	7.0×10^{10}	Abe (1972)
d	30/03/1965	Rat Island	7.2	50	40	30	50	6	5.0×10^{10}	Beck and Christensen (1991)
e	19/08/1977	Sunda	8.2	200	70	40	45	3	6.4×10^{10}	Gusman et al. (2009)
f	19/08/1977	Sunda	8.2	200	25	29	45	9	4.0×10^{10}	Spence (1986), Lynnes and Lay (1988)
g	04/05/1990	Mariana	7.3	40	25	29	48	3.4	4.0×10^{10}	Satake et al. (1992)
h	04/05/1990	Mariana	7.3	70	40	40	48	1.5	4.0×10^{10}	Satake et al. (1992)
i	04/05/1990	Mariana	7.3	70	40	-	48	-	-	Yoshida et al. (1992)
j	04/09/2001	Juan Fernandez Ridge	6.7	70	26	30	51	1	4.0×10^{10}	Fromm et al. (2006)
k	13/01/2007	Kuril	7.9	120	40	35	45	1.9	5.0×10^{10}	Fujii and Satake (2008)
l	13/01/2007	Kuril	8.0	130	30	-	37	6.4	4.0×10^{10}	Tanioka et al. (2008)

I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.2 地震規模に関する知見の整理

5.2.3 3.11地震後の応力状態

- 日本海溝沿い及び千島海溝沿いでは、プレート間地震の発生後(歪み解放後)に、海溝外縁隆起帯(outer rise)で正断層型の海洋プレート内地震が増加している。
- これは、海溝外縁隆起帯(outer rise)で発生する正断層型の海洋プレート内地震は、隣接するプレート境界面の歪みの解放と密接に関係があることを示唆している。
- 3.11地震の発生に伴い宮城県沖の固着域にこれまで蓄積された歪みがほぼ解放したことを踏まえると、今後、正断層型の海洋プレート内地震の発生が懸念される(Lay et al.(2011))。



A.日本海溝沿い(三陸沖)

B.千島海溝沿い

C.宮城県沖, 福島県沖

沈み込み帯の模式図
(Lay et al.(2011))に一部加筆)

3.11地震の発生に伴い、これまで蓄積された大きな歪みが解放されたことを踏まえると、基準断層モデルの地震規模(Mw)の設定にあたっては、保守性を確保する必要があると考えられる。

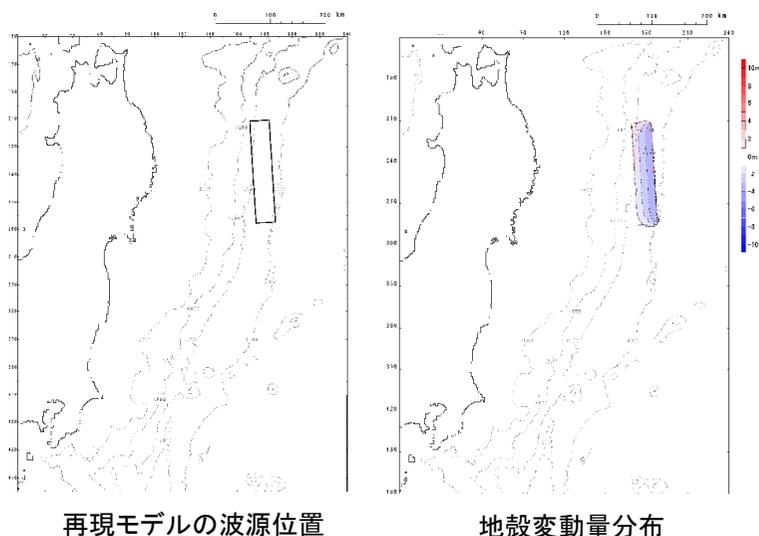
I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.2 地震規模に関する知見の整理

5.2.4 地震規模の設定

- 地震調査研究推進本部(2012, 2019)においては, 次の地震の規模を1933年昭和三陸地震津波と評価し, また, 同地震は国内外における海溝外縁隆起帯(outer rise)で発生した最大規模の海洋プレート内地震である。
- ただし, 地震調査研究推進本部(2012)では次の地震の規模の信頼度を「B」と評価していること, 並びに3.11地震後の応力状態から, 今後正断層型の海洋プレート内地震の発生可能性が懸念されることを踏まえ, 基準断層モデルの地震規模(Mw)の設定にあたっては, 保守性を確保する必要があると考えられる。
- 1611年の津波について, 地震調査研究推進本部(2012, 2019)では津波地震と評価しているものの, 土木学会(2002)では海洋プレート内地震であった場合, その地震規模をMw8.6と評価している。
- 以上から, 基準断層モデルの地震規模は, 1933年昭和三陸地震津波の痕跡高を再現するモデル(Mw8.35)を上回るMw8.6を考慮した。

■再現モデルの設定

- 土木学会(2002, 2016)を参考として, 1933年昭和三陸地震津波の再現モデルを設定した。



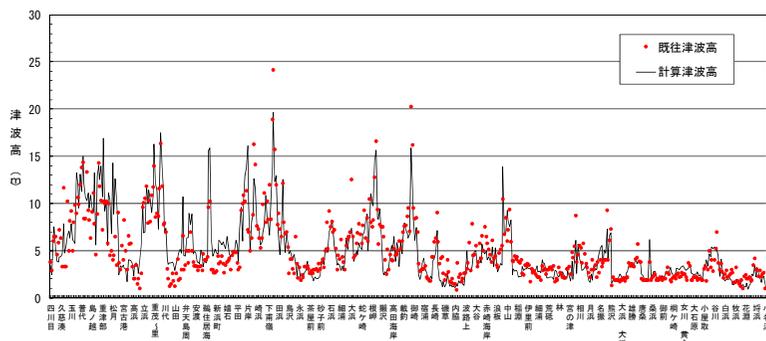
断層パラメータ		設定方法	設定値
モーメントマグニチュード*	Mw	$(\log M_0 - 9.1) / 1.5$	8.35
長さ	L(km)	土木学会(2016)	185
幅	W(km)	土木学会(2016)	50
剛性率	μ (N/m ²)	土木学会(2016)※1	7.0×10^{10}
すべり量	D_{\max} (m)	土木学会(2016)	6.6
地震モーメント	M_0 (Nm)	μ LWD	4.27×10^{21}
走向	θ (°)	土木学会(2002)	180
断層上縁深さ	d(km)	土木学会(2002)※2	1
傾斜角	δ (°)	土木学会(2016)	45
すべり角	λ (°)	土木学会(2016)	270
ライズタイム	τ (s)	相田(1986)※1	60

※1: 剛性率, ライズタイムの設定根拠の詳細は, 補足説明資料「I. 第6章 6. 1 剛性率, ライズタイムの設定」に記載。

※2: 断層上縁深さの設定根拠の詳細は, 補足説明資料「I. 第6章 6. 2 断層上縁深さの設定」に記載。

■再現性の確認結果

- 土木学会(2016)の目安を満足しており, 各断層パラメータの設定値が妥当であることを確認した。

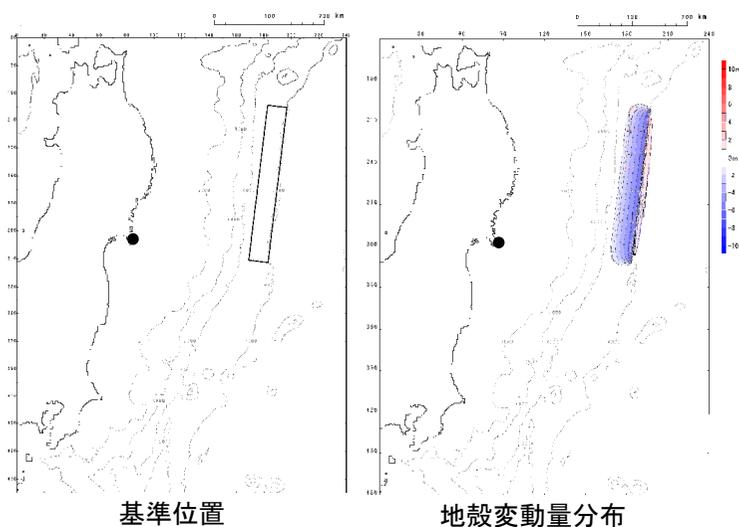


既往津波	K	κ	n	既往津波高
1933年昭和三陸地震津波	1.00	1.43	553	松尾(1933), 地震研究所(1934)

I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.3 基準断層モデルの設定

5.3.2 基準断層モデルの設定

- 基準断層モデルの地震規模(Mw)は、地震調査研究推進本部(2012, 2019), 土木学会(2016)の評価及び2011年東北地方太平洋沖地震発生後の応力状態を考慮して、国内外における海溝外縁隆起帯で発生した地震のうち最大規模の1933年昭和三陸地震津波を再現するモデル(Mw8.35)を基本として、これを上回るよう土木学会(2016)を参考にMw8.6にスケーリングして設定した。
- 波源位置は、土木学会(2016)を参考に、基準断層モデルの南端が北緯約38° 付近となるように設定した。



諸元

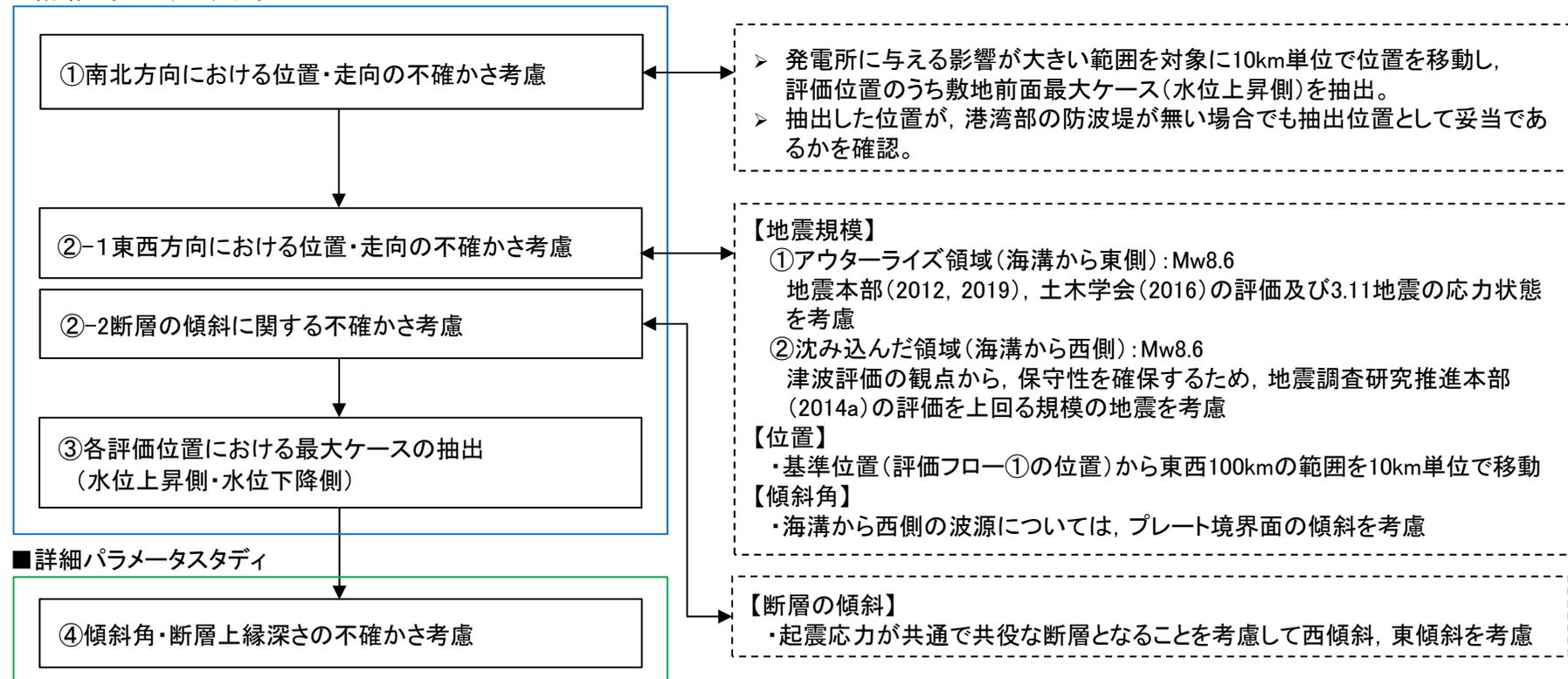
断層パラメータ		設定方法	設定値
モーメントマグニチュード	Mw	土木学会(2016)	8.6
長さ	L(km)	既往津波再現モデルに、Mwに関連する断層パラメータのスケーリング則(幅に限界あり)を適用して設定。	283
幅	W(km)		50
すべり量	D(m)		10.1
剛性率	μ (N/m ²)	既往津波再現モデルに基づき設定。	7.0×10^{10}
地震モーメント	M ₀ (Nm)	μ LWD	1.00×10^{22}
走向	θ (°)	日本海溝の形状に合わせて設定。	190
断層上縁深さ	d(km)	既往津波再現モデルに基づき設定。	1
傾斜角	δ (°)		45
すべり角	λ (°)	走向とすべり方向に基づき設定。	270
ライズタイム	τ (s)	既往津波再現モデルに基づき設定。	60

I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震

5.4 波源特性の不確かさの考慮方法: 検討方針

- 以下のフローに基づき、波源特性の不確かさを考慮した津波予測計算を実施する。

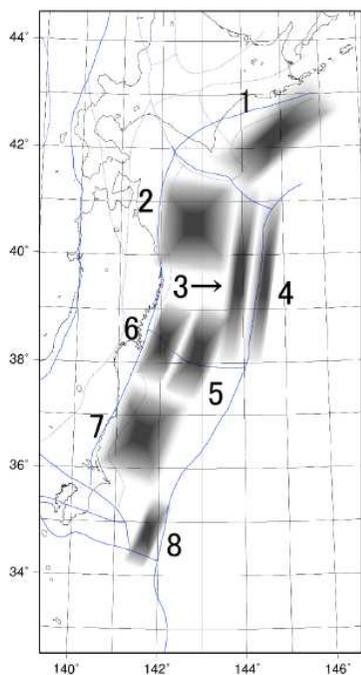
■ 概略パラメータスタディ



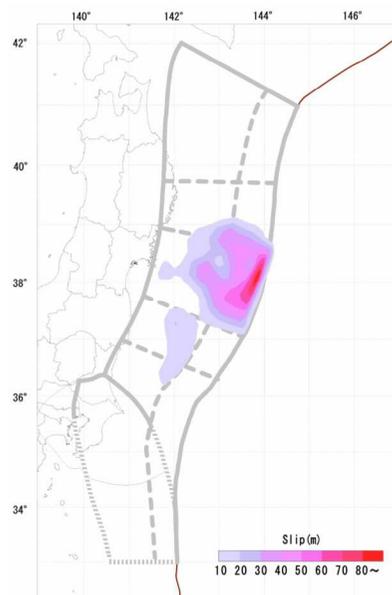
I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震

5.4 波源特性の不確かさの考慮方法: 位置の不確かさを考慮する領域

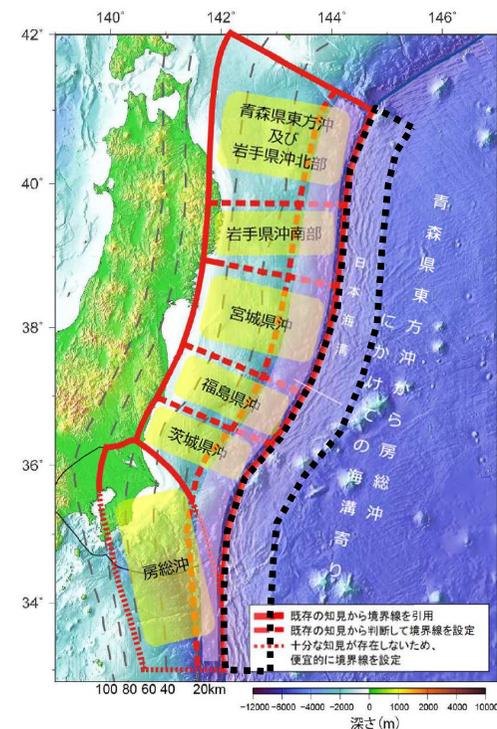
- 土木学会(2016)では、地震地体構造の知見、既往地震の発生履歴に基づき正断層型の海洋プレート内地震の発生領域を北緯約38°以北(領域4)に設定しているが、2011年東北地方太平洋沖地震では連動型地震であったものの、福島県沖でもすべりが生じたことや地震調査研究推進本部(2012, 2019)による正断層型の海洋プレート内地震の発生領域に関する評価を踏まえ、位置の不確かさを考慮する領域は、地震調査研究推進本部(2012, 2019)で示される青森県東方沖から房総沖の海溝寄りのどこでも発生するものとして設定した。



土木学会(2016)が設定した波源位置
(日本海溝沿い及び千島海溝(南部)沿い)



東北地方太平洋沖型地震の震源域
(地震調査研究推進本部(2019))



波源位置の不確かさを考慮する領域
(=地震発生領域)
(地震調査研究推進本部(2019))

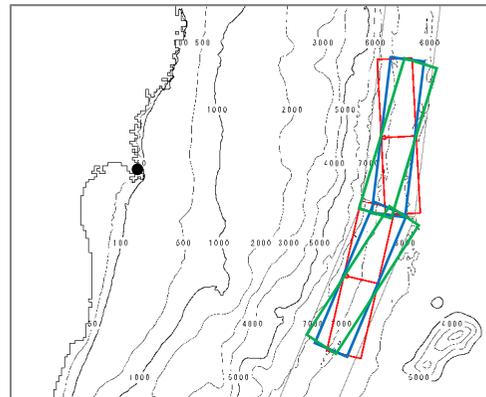
I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震

5.4 波源特性の不確かさの考慮方法:概略パラメータスタディ(南北方向)

- 位置の変動範囲については、発電所に最も影響が大きい波源位置を評価するため、発電所の津波高さに与える影響が大きい範囲を対象に10km単位で移動させた。
- 走向の変動範囲については、土木学会(2002, 2016)を参考に設定した。なお、日本海溝が北緯約38°を境に地下構造が変化する(Tsuru et al.(2002))ことを踏まえ、北緯約38°を跨ぐ津波波源については、科学的想像力を発揮して、発電所に与える影響が大きくなるように南北2枚の断層として考慮した。

【南北方向の位置, 走向の変動範囲】

項目	変動範囲
位置	基準, 北へ20km, 40km, 南へ20km, 40km, 60km, 80km, 100km, 110km, 120km, 130km, 140km, 150km, 160km, 170km, 180km, 190km, 200km, 220km, 240km, 260km, 280km, 300km移動
走向	基準, 基準±10°



走向の不確かさの考慮方法(概念)

I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震

5.4 波源特性の不確かさの考慮方法: 概略パラメータスタディ(東西方向)

■地震規模の設定

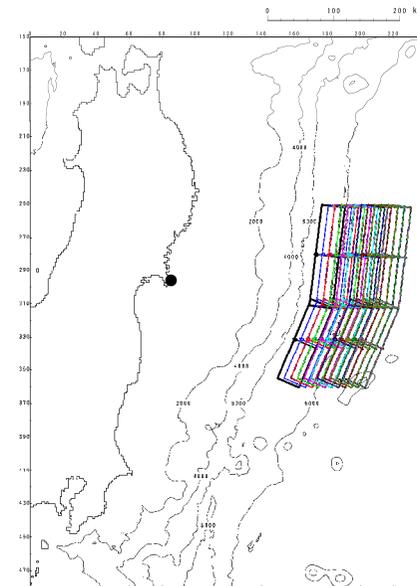
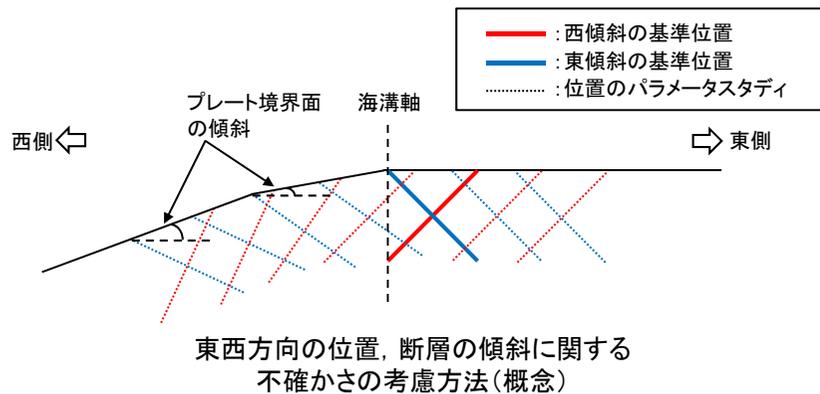
- 地震調査研究推進本部(2014a)の評価※から、西方向の位置・走向の不確かさを考慮する際の地震規模は、基準断層モデルの地震規模(Mw8.6)よりも小さいと考えられる。
- ただし、海溝付近で発生する地震に伴う津波は発電所に与える影響が大きいことを踏まえ、保守性を確保する観点から、基準断層モデルの地震規模(Mw8.6)を考慮する。

■位置の不確かさ考慮方法

- 地震調査研究推進本部(2014a)の評価※を踏まえ、基準位置から東西100km範囲を10km単位で移動させる。
- なお、沈み込んだ海洋プレート内地震の断層モデルの傾斜角は、プレート境界面の傾斜を考慮する。

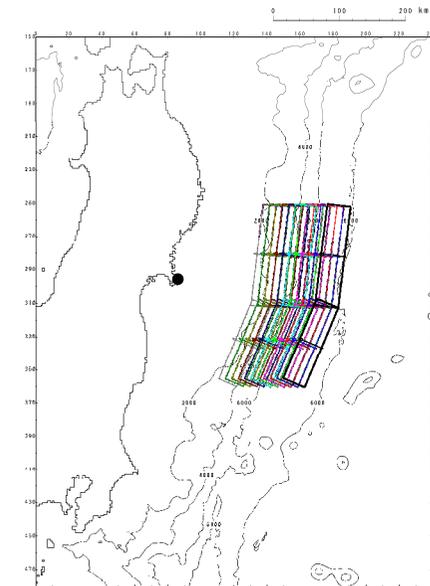
※:地震調査研究推進本部(2014a)による海洋プレート内地震(正断層型)の評価の詳細は、補足説明資料「I. 第6章 6.3 地震本部(2014)による海洋プレート内地震(正断層型)の評価」に記載。

項目	変動範囲
位置	基準, 東へ100kmまで10km単位で移動, 西へ100kmまで10km単位で移動
走向	基準, 基準±10°
断層の傾斜	西傾斜(基準), 東傾斜



東方向の位置に関する不確かさの考慮

- 位置(南北方向): 南へ130km移動
- 走向: 基準
- 断層の傾斜(西傾斜)



西方向の位置に関する不確かさの考慮

- 位置(南北方向): 南へ130km移動
- 走向: 基準
- 断層の傾斜(東傾斜)

I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震

5.4 波源特性の不確かさの考慮方法: 詳細パラメータスタディ

- 土木学会(2002, 2016)を参考として、概略パラメータスタディの各評価位置における最大水位上昇ケース、最大水位下降ケースを対象に、傾斜角及び断層上縁深さを変動させた詳細パラメータスタディを実施した。
- 各パラメータの変動範囲については、土木学会(2002, 2016)等を参考に設定^{※1, 2}した。

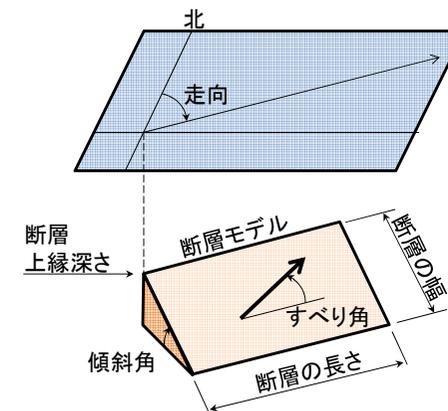
※1: 土木学会(2002)では、プレート間逆断層地震のハーバードCMTによる発震機構解(1976.1~2000.1に発生したMw6.0以上、深さ60km以下の地震)及び既往の断層モデルのばらつきから変動範囲を設定。

※2: 日本海溝沿いでは、2005年11月15日(Mw7.1), 2011年3月11日(Mw7.7)に海洋プレート内地震が発生しており、傾斜角はそれぞれ約45°(岩淵(2013)), 42°(Lay et al.(2011))である。

【詳細パラメータスタディ】

項目		変動範囲
傾斜角		基準, 基準±5°
断層上縁深さ	アウターライズ領域 (海溝から東側)	0km, 1km(基準), 2km
	沈み込んだ領域 (海溝から西側)	各波源位置のプレート境界面からの深さ: 0km, 1km(基準), 2km

(参考)断層パラメータ



I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.5 「海洋プレート内地震」に起因する津波の評価

5.5.1 津波水位

- 各評価位置における水位上昇側・水位下降側の最大ケースを以下に示す※。
- なお、地震調査研究推進本部(2019)では、青森県東方沖から房総沖の海溝軸の外側の領域でM8.2前後の地震を想定している。本評価は、地震調査研究推進本部(2019)の想定を包含しており、津波評価への影響はない。

※:津波予測計算結果の詳細は、補足説明資料「I. 第6章 6.4 津波予測計算」に記載。

【水位上昇側】

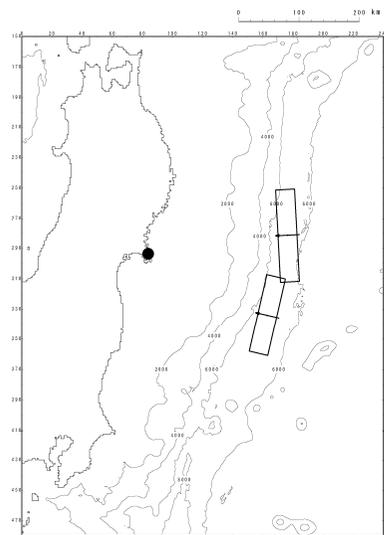
波源特性の不確かさ						最大水位上昇量(m)					
位置		断層の傾斜	走向	傾斜角	断層上縁深さ	敷地前面	1号取水口前面	2号取水口前面	3号取水口前面	1号放水口前面	2・3号放水口前面
南北方向	東西方向										
南へ 130km	西へ 10km	西傾斜	基準-10°	基準+5° (51°)	1km	<u>22.05</u>	12.14	15.19	15.01	14.12	12.05
南へ 130km	西へ 80km	西傾斜	基準-10°	基準+5° (58°)	9km	20.39	<u>12.92</u>	16.10	14.73	12.80	12.51
南へ 130km	西へ 50km	東傾斜	基準+10°	基準-5° (35°)	10km	18.12	11.79	<u>16.45</u>	13.48	11.69	11.00
南へ 130km	西へ 20km	西傾斜	基準-10°	基準+5° (52°)	2km	21.94	12.42	15.26	<u>15.12</u>	14.16	12.26
南へ 130km	西へ 10km	西傾斜	基準-10°	基準 (46°)	0km	21.30	11.86	14.85	14.11	<u>14.26</u>	11.84
南へ 130km	東へ 40km	西傾斜	基準-10°	基準+5° (50°)	2km	19.17	11.26	14.92	13.12	12.60	<u>12.74</u>

【水位下降側】

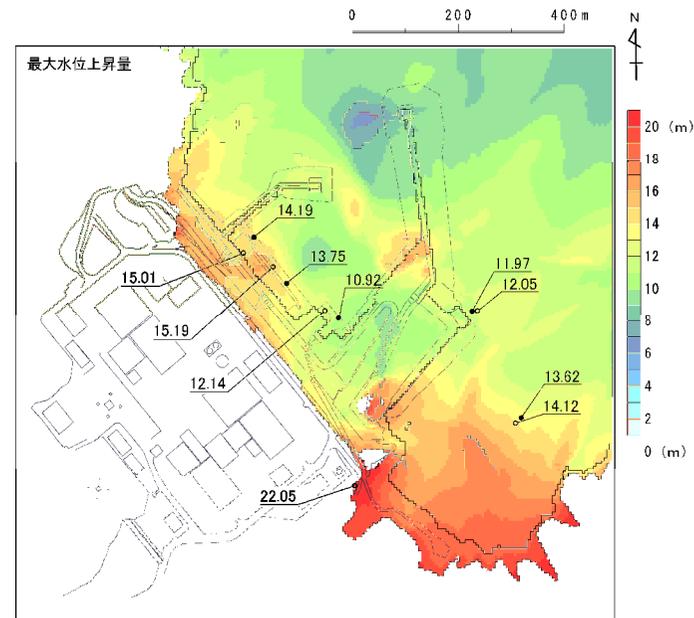
波源特性の不確かさ						2号取水口前面	
位置		断層の傾斜	走向	傾斜角	断層上縁深さ	最大水位下降量(m)	取水口敷高を下回る継続時間(分)
南北方向	東西方向						
南へ 130km	西へ 60km	東傾斜	基準	基準+5° (44°)	11km	<u>-10.13</u>	2.6
2号機非常用海水ポンプの運転可能継続時間							約26

I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.5 「海洋プレート内地震」に起因する津波の評価
5.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位上昇側(1/6)

評価位置	位置		断層の傾斜	走向	傾斜角	断層上縁深さ
	南北方向	東西方向				
敷地前面	南へ130km	西へ10km	西傾斜	基準-10°	基準+5° (51°)	1km



波源位置

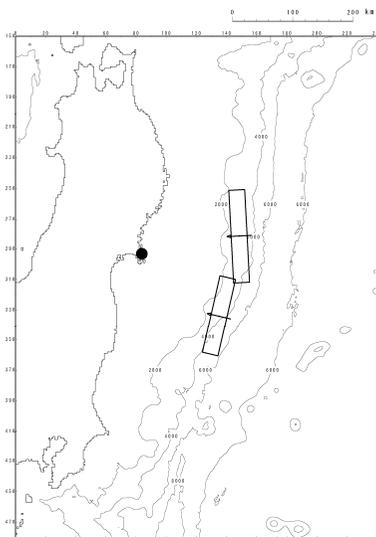


最大水位上昇量分布

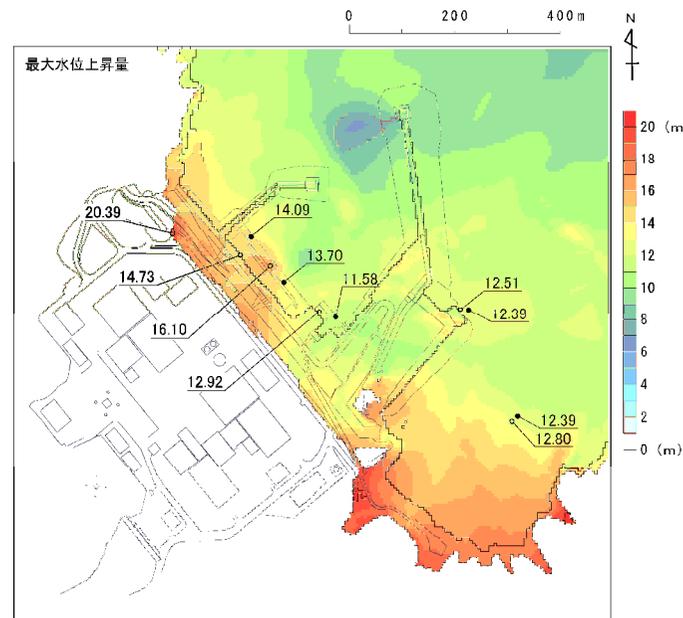
I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.5 「海洋プレート内地震」に起因する津波の評価

5.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位上昇側(2/6)

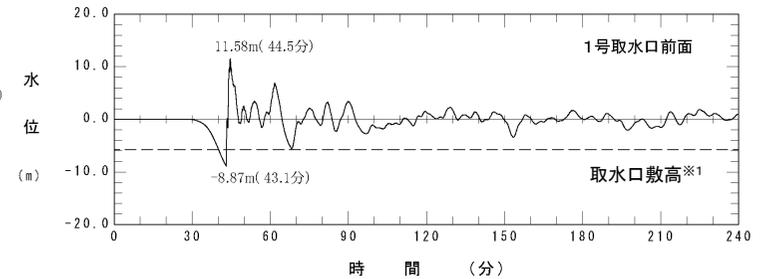
評価位置	位置		断層の傾斜	走向	傾斜角	断層上縁深さ
	南北方向	東西方向				
1号取水口前面	南へ130km	西へ80km	西傾斜	基準-10°	基準+5° (58°)	9km



波源位置



最大水位上昇量分布



水位時刻歴波形*2

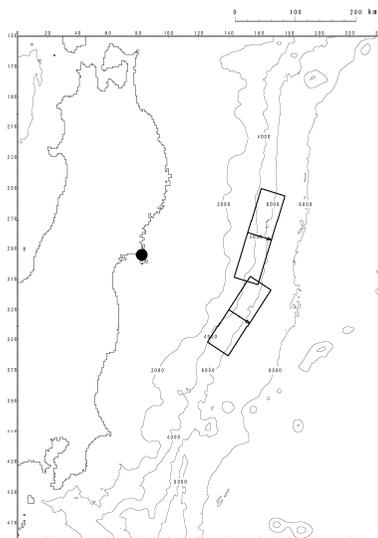
※1:T.P.-5.74m(O.P.-5.0m)

※2:水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

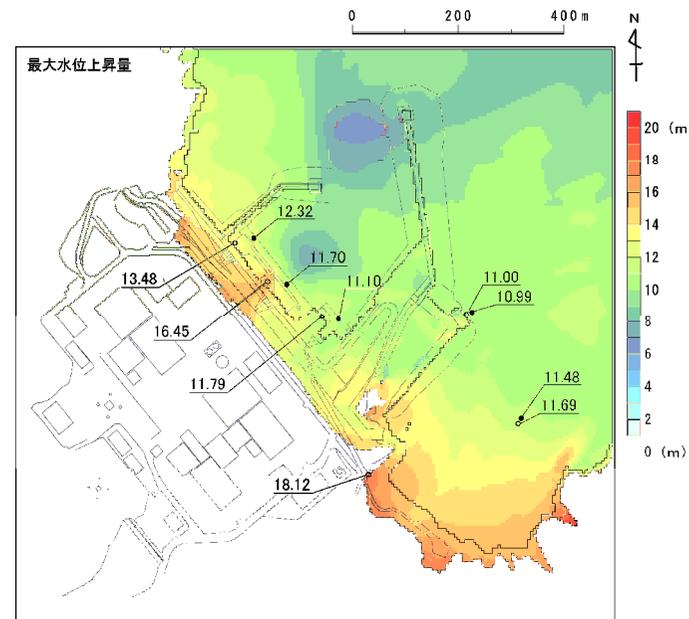
I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.5 「海洋プレート内地震」に起因する津波の評価

5.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位上昇側(3/6)

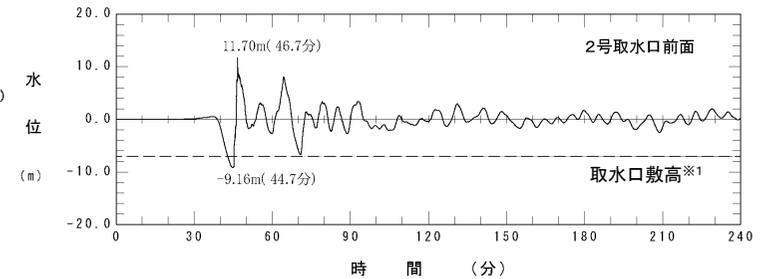
評価位置	位置		断層の傾斜	走向	傾斜角	断層上縁深さ
	南北方向	東西方向				
2号取水口前面	南へ130km	西へ50km	東傾斜	基準+10°	基準-5° (35°)	10km



波源位置



最大水位上昇量分布



水位時刻歴波形*2

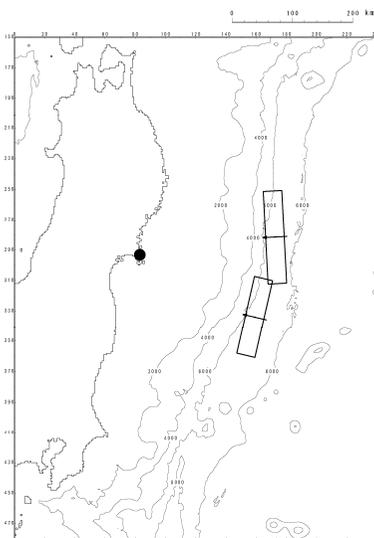
※1:T.P.-7.04m(O.P.-6.3m)

※2:水位時刻歴波形は、各取水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

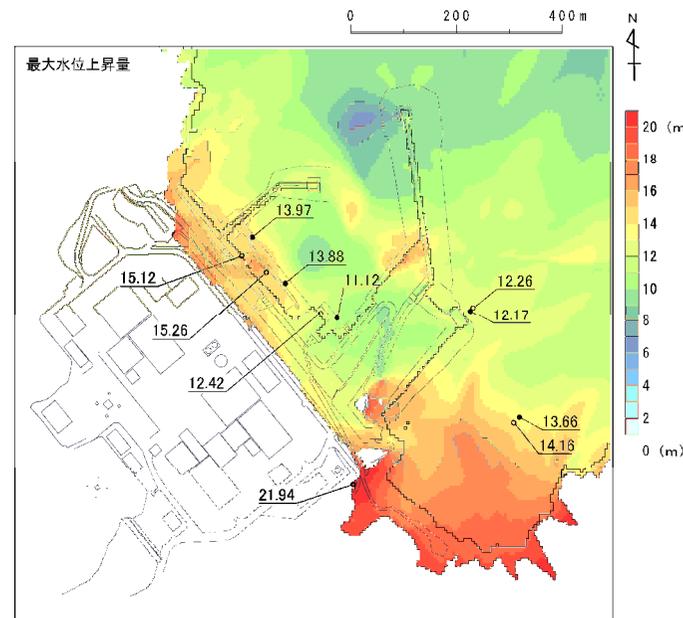
I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.5 「海洋プレート内地震」に起因する津波の評価

5.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位上昇側(4/6)

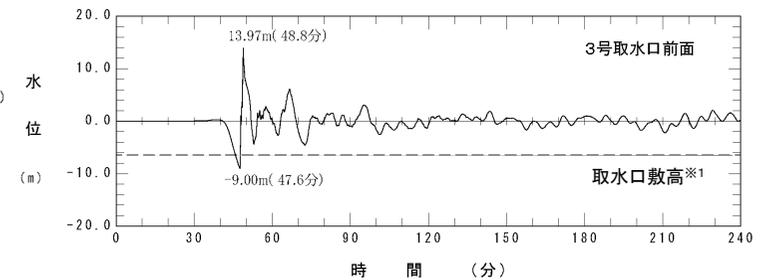
評価位置	位置		断層の傾斜	走向	傾斜角	断層上縁深さ
	南北方向	東西方向				
3号取水口前面	南へ130km	西へ20km	西傾斜	基準-10°	基準+5° (52°)	2km



波源位置



最大水位上昇量分布



水位時刻歴波形*2

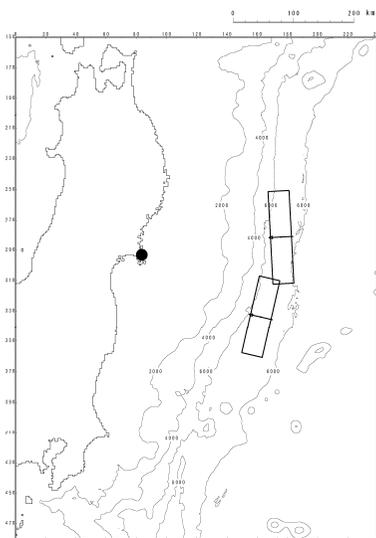
※1: T.P.-6.44m(O.P.-5.7m)

※2: 水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

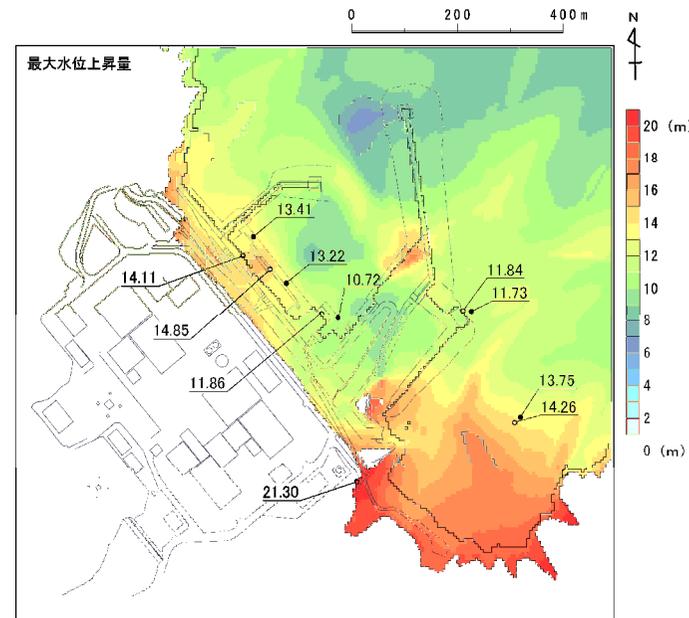
I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.5 「海洋プレート内地震」に起因する津波の評価

5.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位上昇側(5/6)

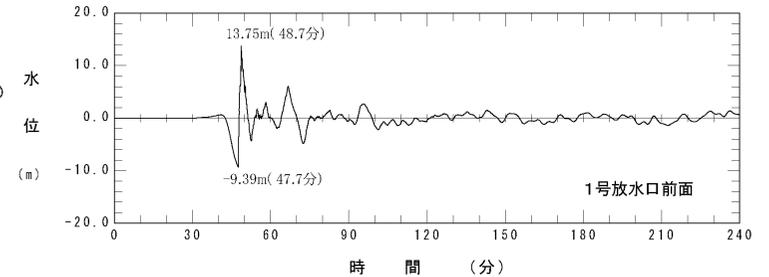
評価位置	位置		断層の傾斜	走向	傾斜角	断層上縁深さ
	南北方向	東西方向				
1号放水口前面	南へ130km	西へ10km	西傾斜	基準-10°	基準 (46°)	0km



波源位置



最大水位上昇量分布



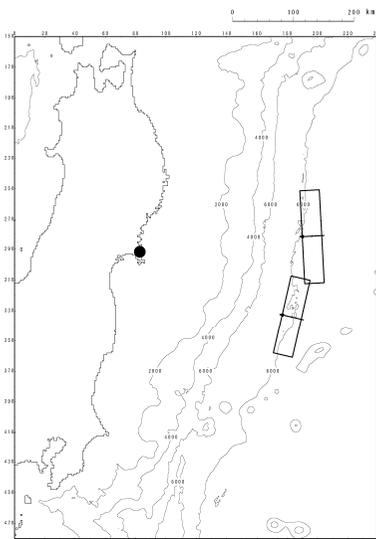
水位時刻歴波形※

※:水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

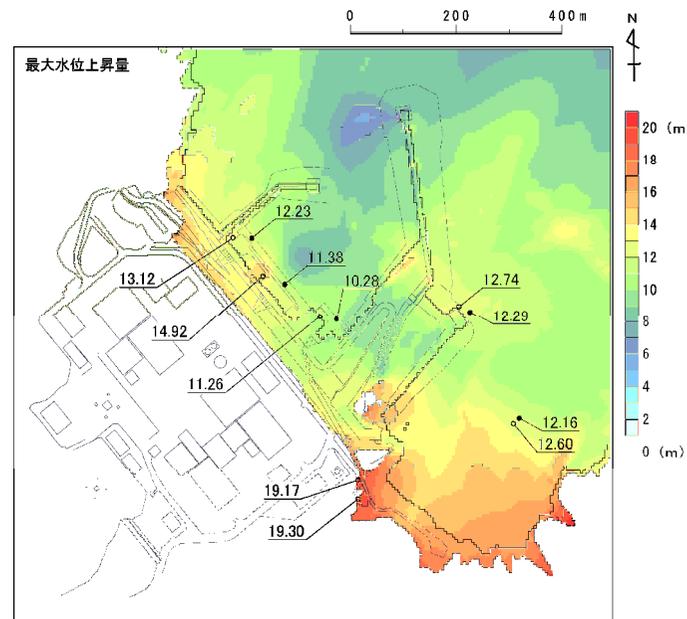
I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.5 「海洋プレート内地震」に起因する津波の評価

5.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位上昇側(6/6)

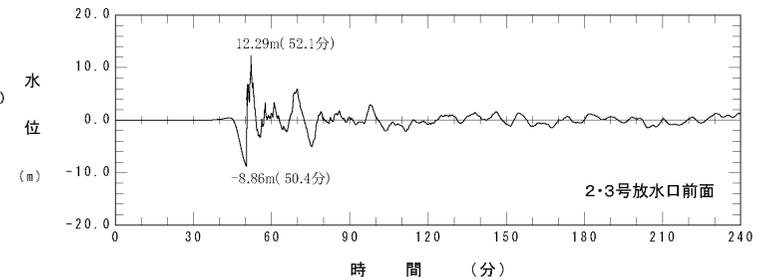
評価位置	位置		断層の傾斜	走向	傾斜角	断層上縁深さ
	南北方向	東西方向				
2・3号放水口前面	南へ130km	東へ40km	西傾斜	基準-10°	基準+5° (50°)	2km



波源位置



最大水位上昇量分布



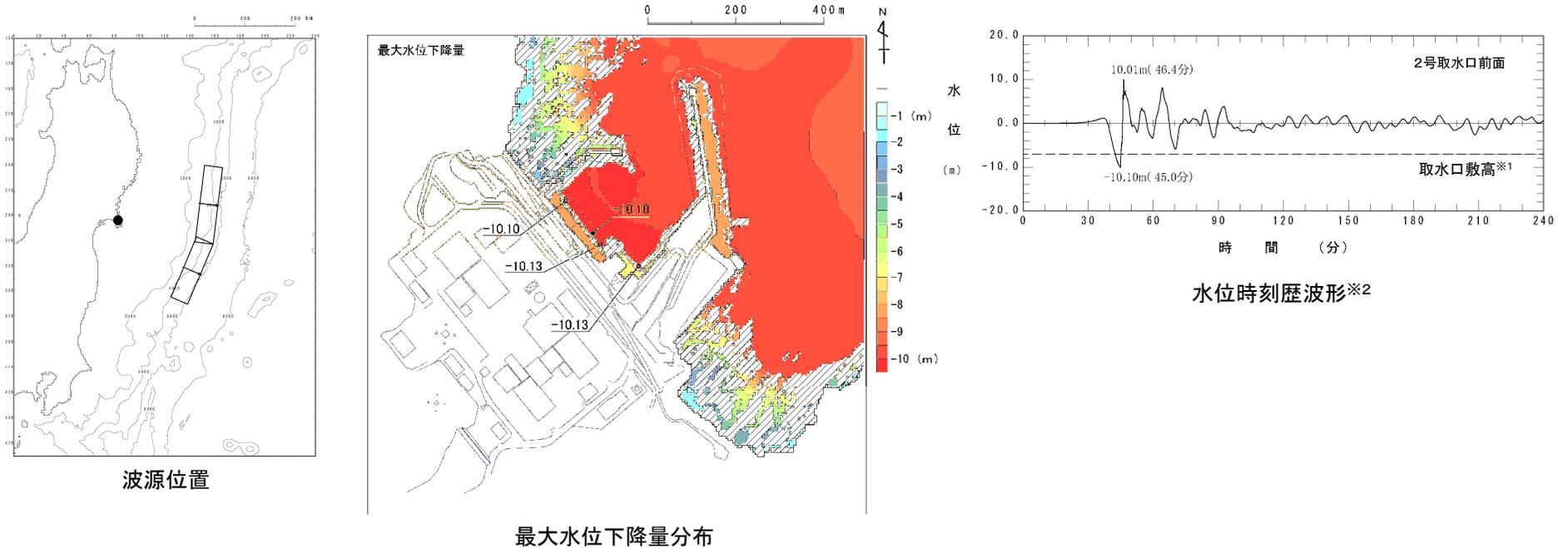
水位時刻歴波形※

※:水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

I. 地震に起因する津波の評価 5. 海洋プレート内地震 5.5 「海洋プレート内地震」に起因する津波の評価

5.5.2 水位分布及び水位時刻歴波形:水位下降側

評価位置	位置		断層の傾斜	走向	傾斜角	断層上縁深さ
	南北方向	東西方向				
2号取水口前面	南へ130km	西へ60km	東傾斜	基準	基準+5° (44°)	11km



※1: T.P.-7.04m (O.P.-6.3m)

※2: 水位時刻歴波形は、各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は、本資料p33に記載。)

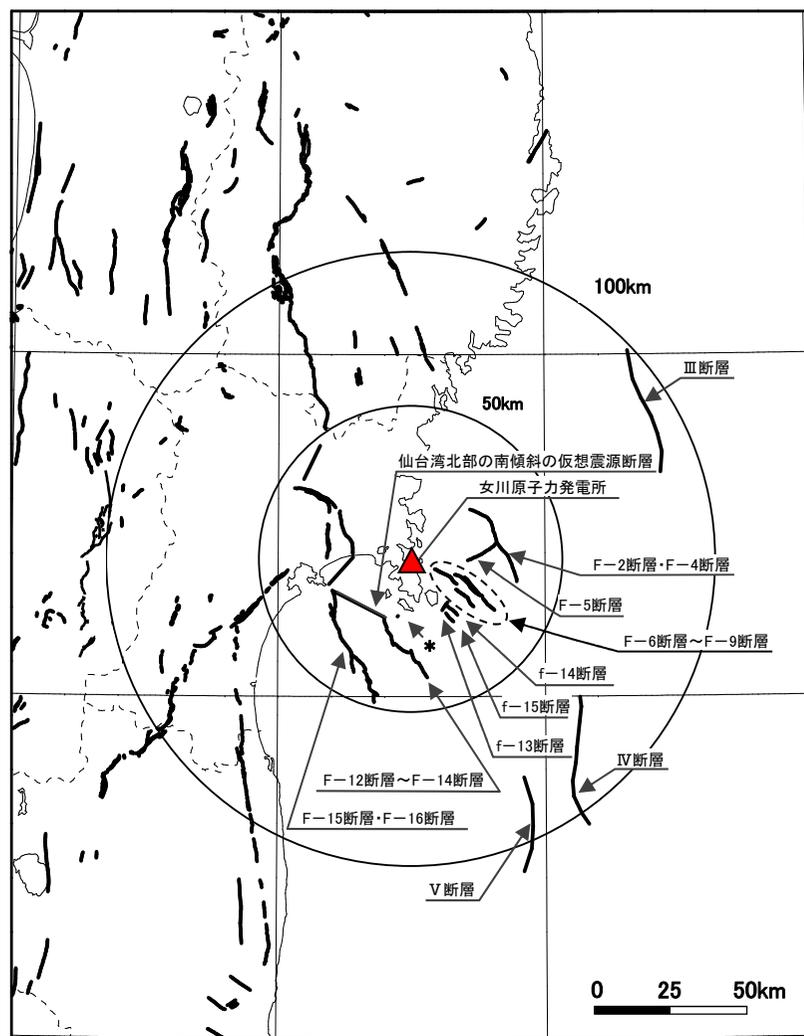
I. 地震に起因する津波の評価

1. 文献調査
2. 津波解析条件
3. 東北地方太平洋沖型の地震
4. 津波地震
5. 海洋プレート内地震
6. 海域の活断層による地殻内地震
 - 6.1 検討方針
 - 6.2 検討結果

I. 地震に起因する津波の評価 6. 海域の活断層による地殻内地震

6.1 検討方針

- ・ 敷地周辺の地質・地質構造において、後期更新世以降の活動性を考慮している断層を検討の対象とした。
- ・ 津波高さは、上記断層のうち発電所と断層の位置関係、断層長さ及び敷地からの距離を考慮し、F-2断層・F-4断層、F-5断層、F-6断層～F-9断層、Ⅲ断層、Ⅳ断層を対象に、阿部(1989)の簡易予測式を用いて算定した。



敷地周辺海域の活断層分布

断層名	断層長さ L(km)	敷地からの距離※ Δ(km)	備考 (推定津波高さの算定)
F-2断層・F-4断層	約27.8	27.0	
F-5断層	約11.2	23.2	
F-6断層～F-9断層	約23.7	19.8	
F-12断層～F-14断層	約24.2	28.3	発電所と断層の位置関係から検討対象外
F-15断層・F-16断層	約38.7	34.0	
f-13断層	約3.3	18.5	発電所と断層の位置関係及び断層長さが長いF-6断層～F-9断層で代表させる。
f-14断層	約5.1	20.8	
f-15断層	約3.7	22.4	
Ⅲ断層	約41	90.0	
Ⅳ断層	約43	86.2	
Ⅴ断層	約31	93.4	発電所と断層の位置関係及び断層長さが長いⅣ断層で代表させる。

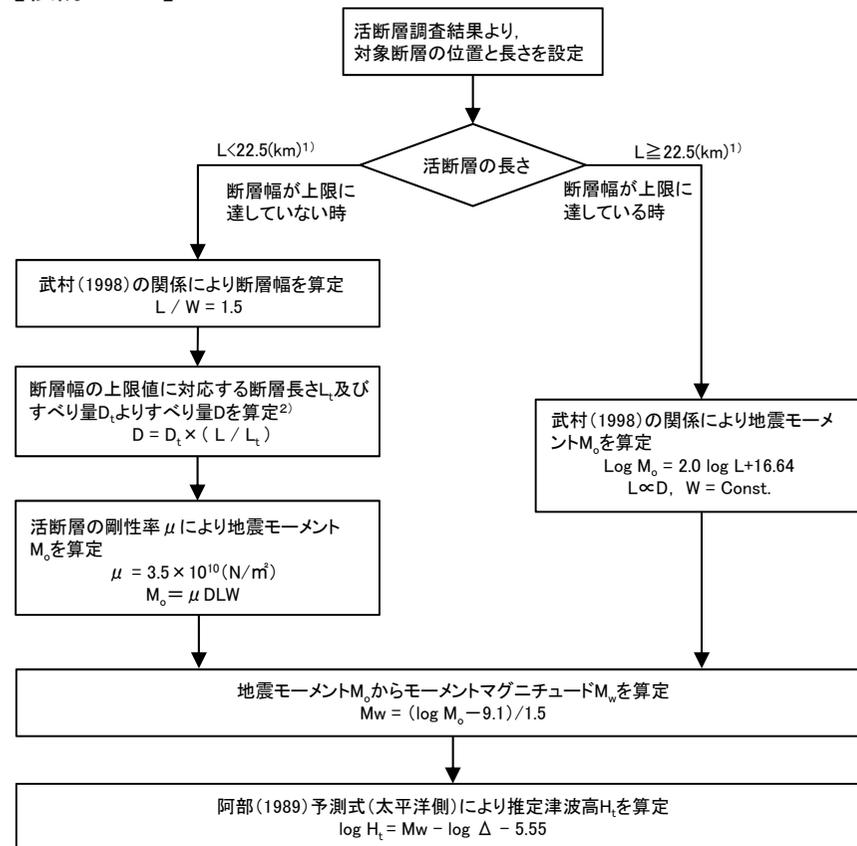
※:断層中心から敷地までの平面距離

I. 地震に起因する津波の評価 6. 海域の活断層による地殻内地震

6.2 検討結果

- 推定津波高は最大1.2mであり、プレート間地震及び海洋プレート内地震に起因する津波と比較して小さいことを確認した。

【検討フロー】



【検討結果】

断層名	Mw	断層長さ L(km)	断層幅 W(km)	すべり量 D(m)	地震モーメント Mo(N・m)	津波の伝播距離 Δ (km)	推定津波高 Ht(m)
F-2断層・F-4断層	7.0	27.8	15.0	2.31	3.37 × 10 ¹⁹	27.0	1.1
F-5断層	6.2	11.2	7.5	0.93	2.73 × 10 ¹⁸	23.2	0.2
F-6断層～F-9断層	6.9	23.7	15.0	1.97	2.45 × 10 ¹⁹	19.8	1.2
Ⅲ断層	7.2	41	15.0	3.41	7.34 × 10 ¹⁹	90.0	0.5
Ⅳ断層	7.2	43	15.0	3.57	8.07 × 10 ¹⁹	86.2	0.6

1) 断層幅の上限W_tは、地震発生層の厚さH₀を15kmとし、傾斜角δを90° (45～90°のうちM_wが最大となる値)とした際には、W_t=H₀/sin δ=15kmとなる。また、断層幅の上限に対応する断層長さL_tはL_t=1.5×W_t=22.5kmとなる。

2) 断層幅の上限に対応するすべり量D_tは、モーメントマグニチュードをM_{w,t}=(log L_t+3.77)/0.75=6.83、地震モーメントをM_{0,t}=10⁷×(1.5M_{w,t}+9.1)=2.21×10¹⁹N・m、剛性率をμ=3.50×10¹⁰N/m²とした際には、D_t=M_{0,t}/(μL_tW_t)=1.87mとなる。

Ⅱ．地震以外に起因する津波の評価

1. 地すべり及び斜面崩壊
2. 火山現象

Ⅱ. 地震以外に起因する津波の評価

1. 地すべり及び斜面崩壊
 1. 1 既往津波に関する文献調査
 1. 2 陸上地すべり及び斜面崩壊に起因する津波の評価
 1. 3 海底地すべりに起因する津波の評価
2. 火山現象

Ⅱ. 地震以外に起因する津波の評価 1. 地すべり及び斜面崩壊

1. 1 既往津波に関する文献調査

- 文献調査の結果、敷地周辺において陸上及び海底の地すべり、並びに斜面崩壊による歴史津波の記録はない。

【調査した文献】

- ① 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子(2013):日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会
- ② 渡辺偉夫(1998):日本被害津波総覧 [第2版], 東京大学出版会
- ③ 気象庁(1951~2017):地震月報ほか
- ④ 国立天文台(2019):理科年表2019, 平成31年, 第92冊, 丸善出版

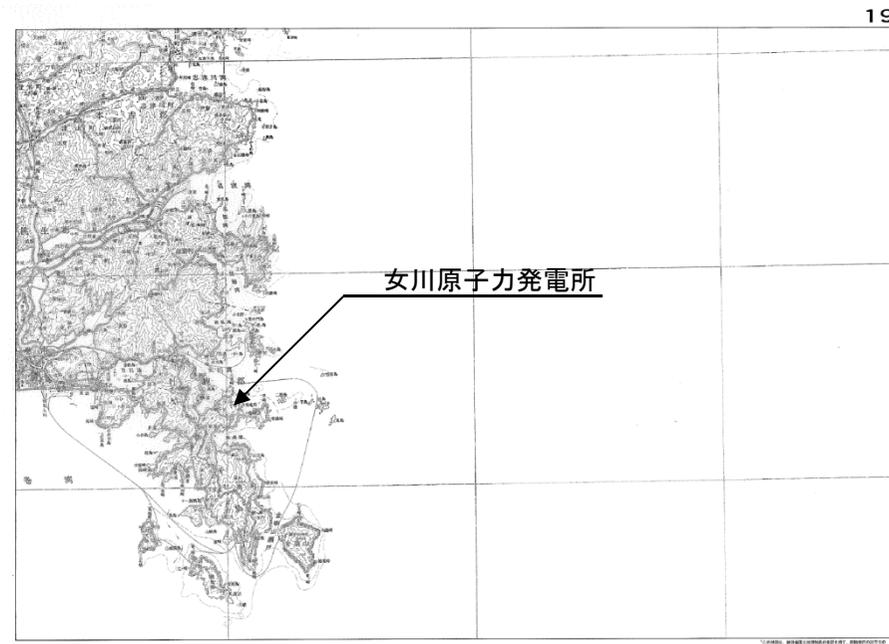
II. 地震以外に起因する津波の評価 1. 地すべり及び斜面崩壊

1. 2 陸上地すべり及び斜面崩壊に起因する津波の評価

- 防災科学技術研究所の地すべり地形分布図データベース, 日本地すべり学会東北支部による東北の地すべり・地すべり地形によれば, 敷地周辺陸域の地形について, 地すべり及び斜面崩壊地形は認められない。

北上 KITAKAMI LM-797	人首 HITOKABE LM-793	遠野 TONO LM-789	釜石 KAMAISHI LM-787
水沢 MIZUSAWA LM-798	陸中大原 RIKUCHUOHARA LM-794	盛 SAKARI LM-790	綾里 RYORI LM-788
一関 ICHINOSEKI LM-799	千厩 SENMAYA LM-795	気仙沼 KESENNUMA LM-791	【一関】
若柳 WAKAYANAGI LM-800	志津川 SHIZUGAWA LM-796	津谷 TSUYA LM-792	
涌谷 WAKUYA LM-804	登米 TOYOMA LM-802	大須 OSU LM-801	【石巻】
松島 MATSUSHIMA LM-805	石巻 ISHINOMAKI LM-803	寄磯 YORIISO (地すべり地形なし)	
塩竈 SHIOGAMA (地すべり地形なし)	金華山 KINKASAN (地すべり地形なし)		

□ : 敷地周辺



東北の地すべり・地すべり地形
(日本地すべり学会東北支部(1992)に一部加筆)

防災科学技術研究所 地すべり地形分布図データベース
(防災科学技術研究所(2009)に一部加筆)

以上から, 陸上の地すべり及び斜面崩壊に起因する津波の影響は極めて小さいと考えられる。

II. 地震以外に起因する津波の評価 1. 地すべり及び斜面崩壊 1.3 海底地すべりに起因する津波の評価

コメントS188

1.3.1 敷地周辺海域の海底地すべり: 検討フロー

- 以下の検討フローに従い、過去に敷地周辺に津波を来襲させた可能性のある海底地すべり地形の波源モデル設定に関する調査を実施した。

【検討フロー】

■ 広域的概査

① 敷地前面海域における海底地すべり地形の有無

■ 局所的精査

② 海底地すべり地形判読調査

日本水路協会M7000シリーズを用いて海底地形判読調査を実施し、海底地すべりを示唆する明瞭な海底地すべり地形を抽出する。

【事前検討】

i. 海底地すべりの特徴把握(=文献調査)※

海底地すべりの特徴、発生場所、発生要因に関する文献調査の実施

ii. 調査範囲の設定

上記文献調査及び津波伝播特性を踏まえて設定

③ 海底地すべり地形調査

上記②で抽出された海底地すべりを示唆する地形について、海上音波探査記録等を用いて、地すべり地形であるか否か、並びに地すべり地形の形状等を精査する。

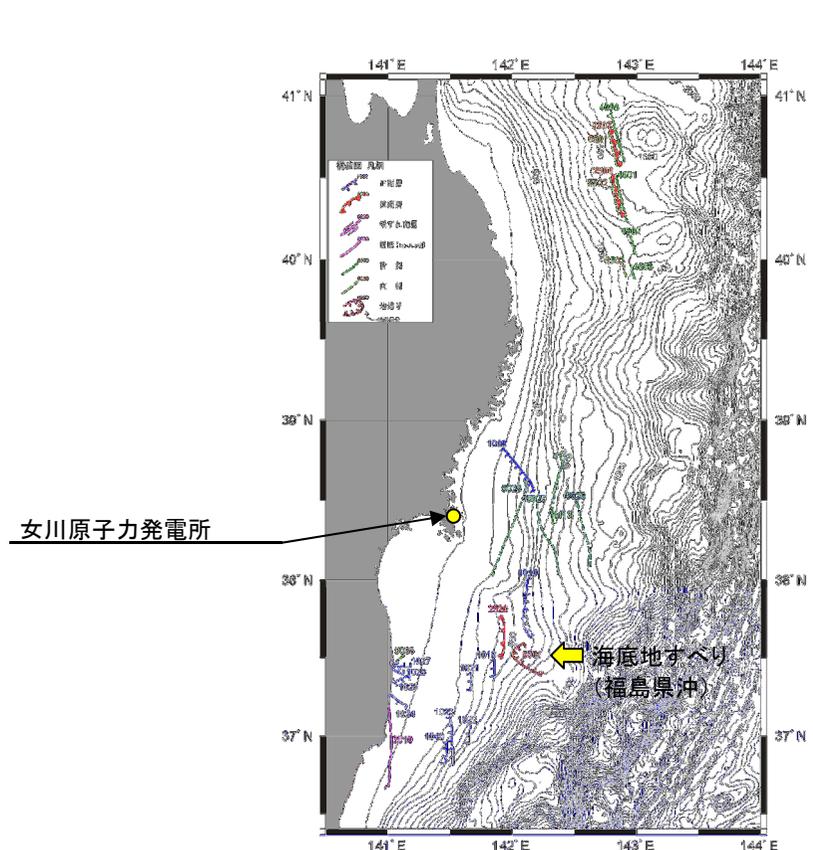
④ 波源モデルの設定

※: 文献調査結果の詳細は、補足説明資料「II. 1. 海底地すべりに関する文献調査」に記載。

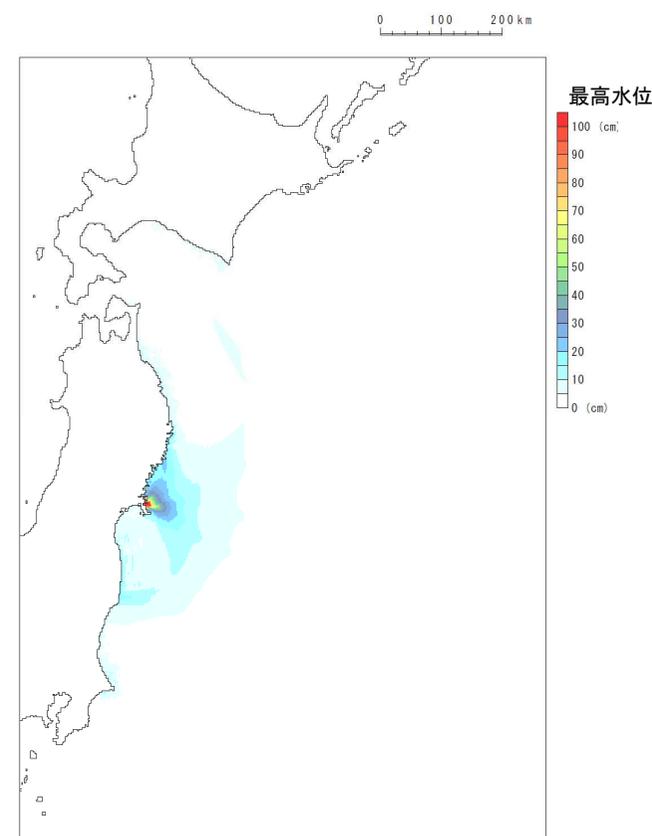
Ⅱ. 地震以外に起因する津波の評価 1. 地すべり及び斜面崩壊 1. 3 海底地すべりに起因する津波の評価

1. 3. 1 敷地周辺海域の海底地すべり: 広域的概査(1/2)

- 広域的概査は、徳山ほか(2001)による地質構造及び津波伝播特性検討結果を用いて実施した。
 - 三陸沖から常磐沖海域の地質構造および津波伝播特性検討による最高水位分布図を以下に示す。
 - 敷地前面から日本海溝までの範囲に、敷地に与える影響が大きいと考えられる海底地すべり地形は認められない※。
- ※: 徳山ほか(2001)に示される福島県沖の海底地すべりに関する調査結果の詳細は、補足説明資料「Ⅱ. 2. 福島県沖の海底地すべり」に記載。



三陸沖から常磐沖海域における海底地質構造
(徳山ほか(2001)に一部加筆)



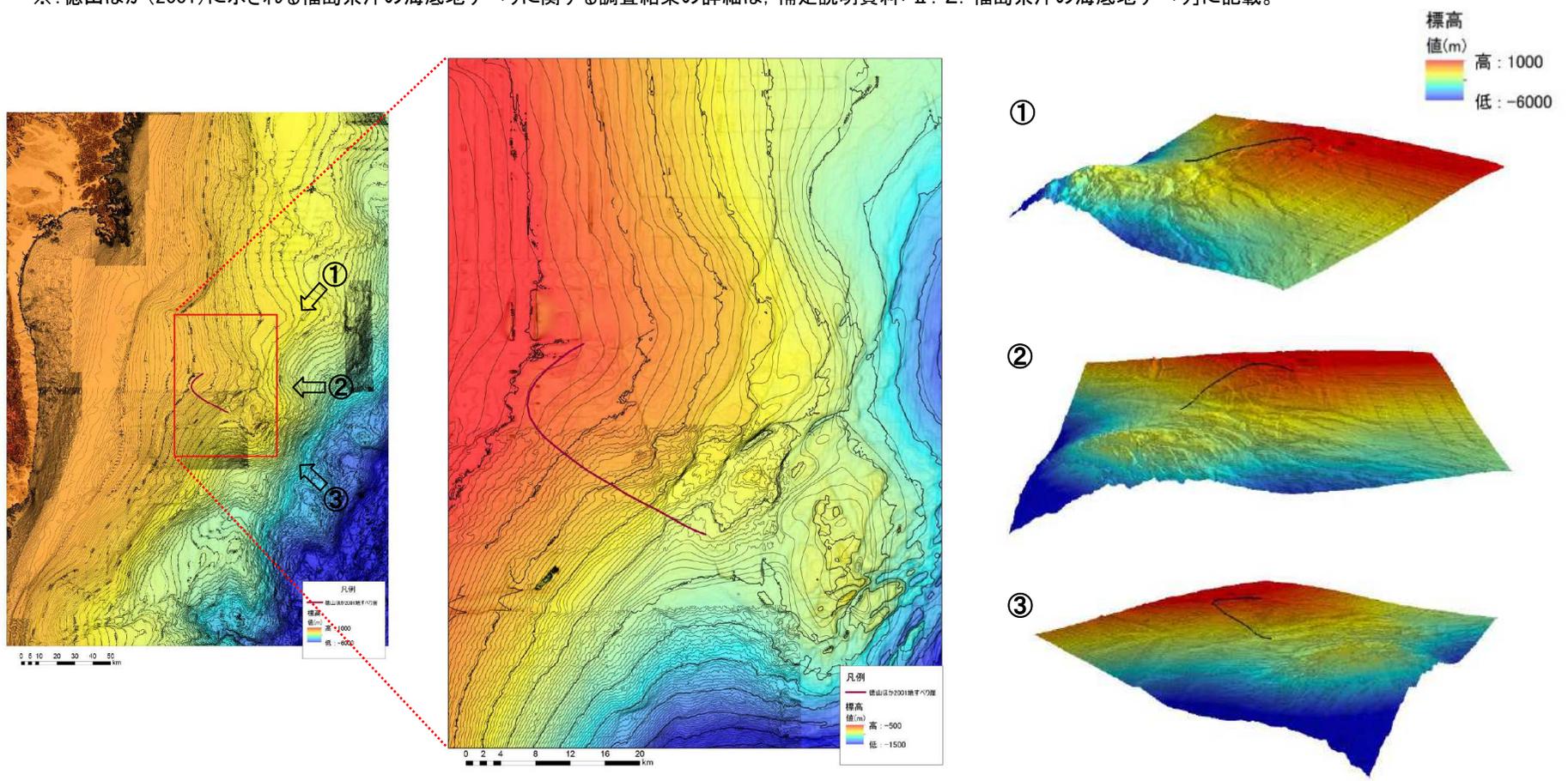
津波伝播特性検討による最高水位分布図

II. 地震以外に起因する津波の評価 1. 地すべり及び斜面崩壊 1.3 海底地すべりに起因する津波の評価

1.3.1 敷地周辺海域の海底地すべり: 広域的概査(2/2)

- 徳山ほか(2001)で示される福島県沖の海底地すべりについて、津波伝播特性の検討から敷地に与える影響は小さいと考えられるが、発電所に与える影響を定量的に把握するため、①海上音波探査記録を用いた地形精査、②150mグリッドDEMデータ等を用いた海底地すべり地形判読調査により、地形判読調査により、海底地すべり地形の精査を実施した。
- 検討の結果、徳山ほか(2001)で示される馬蹄形状を呈する明瞭な海底地すべり地形は認められないことを確認した※。
- 以下に、②海底地すべり地形判読調査結果を示す。

※: 徳山ほか(2001)に示される福島県沖の海底地すべりに関する調査結果の詳細は、補足説明資料「II. 2. 福島県沖の海底地すべり」に記載。

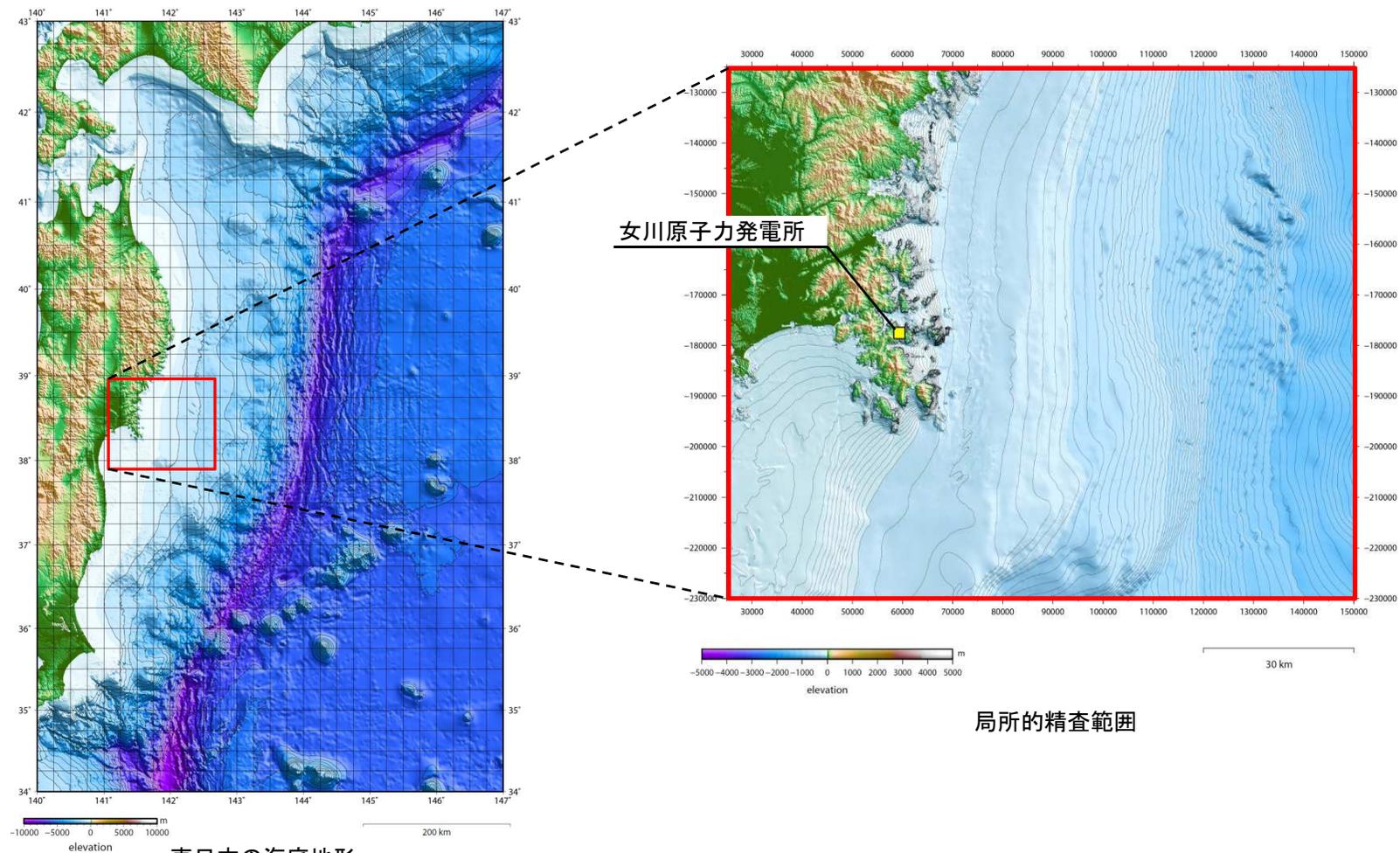


平面図

II. 地震以外に起因する津波の評価 1. 地すべり及び斜面崩壊 1.3 海底地すべりに起因する津波の評価

1.3.1 敷地周辺海域の海底地すべり:局所的精査

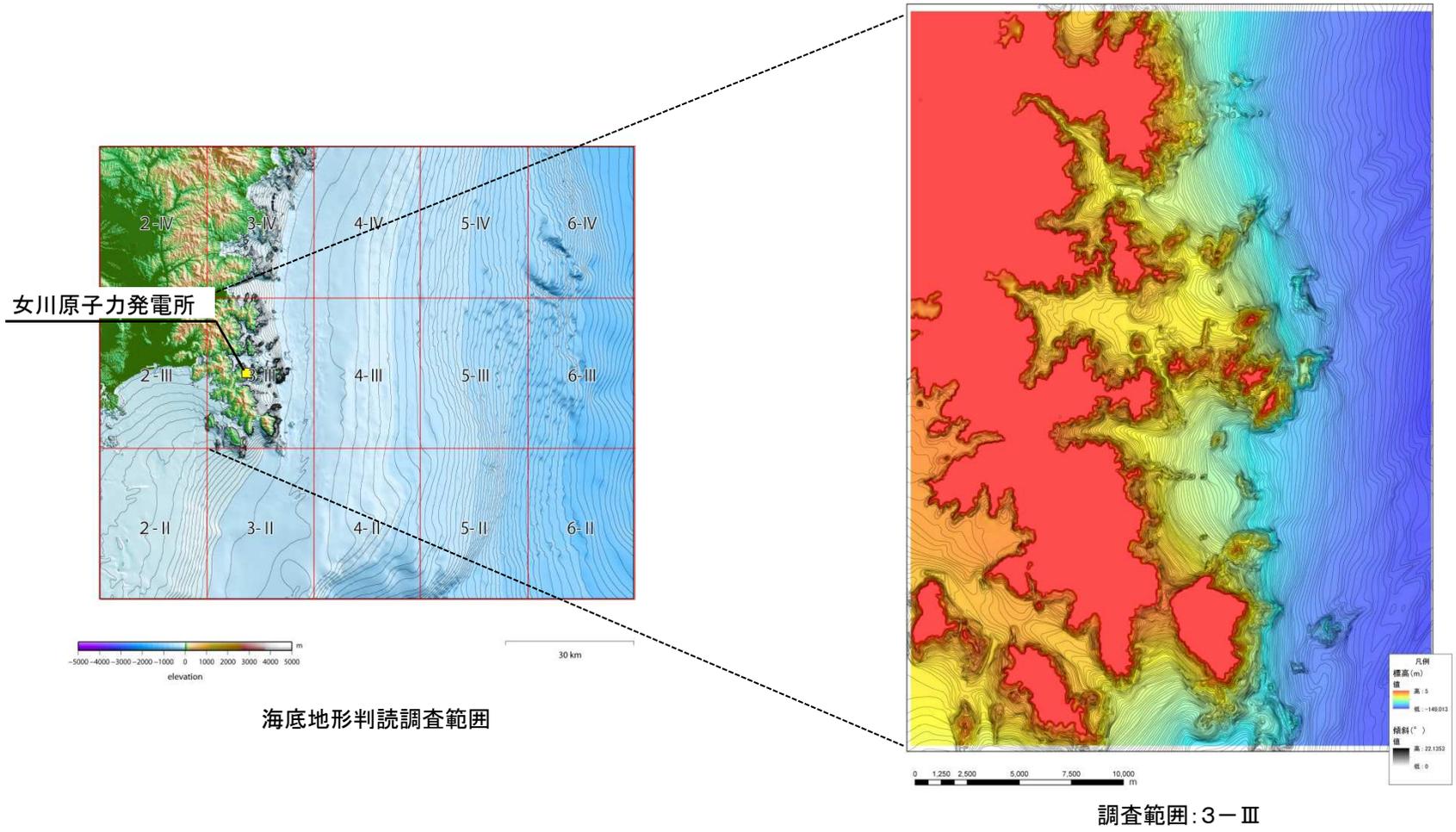
- 海底地すべりの特徴, 発生場所, 発生要因に関する文献調査, 並びに津波伝播特性の検討結果を踏まえ, 局所的精査範囲は, 緩斜面及び大陸棚が含まれる水深1000mまでとした。



II. 地震以外に起因する津波の評価 1. 地すべり及び斜面崩壊 1.3 海底地すべりに起因する津波の評価

1.3.1 敷地周辺海域の海底地すべり:評価結果

- 海底地すべり地形判読調査を実施した結果、海底地すべり地形の特徴である明瞭な馬蹄形を呈する地すべりを示唆する痕跡は認められない。



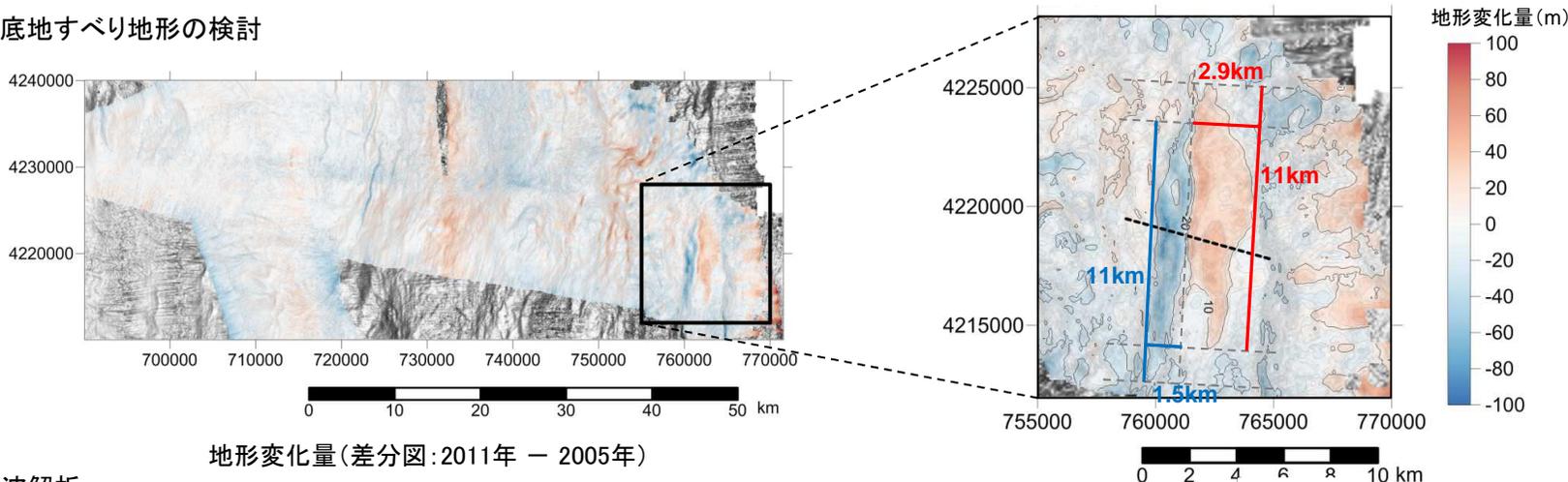
1.3.2 日本海溝付近の海底地すべり

第750回審査会合(R1.7.26)
資料1-5-2 p217~224 再掲(要約)

コメントS188

- 小平ほか(2012)は、3.11地震前後の海底地形データの比較から、日本海溝陸側斜面で海底地すべりが発生したとしていることを踏まえ、小平ほか(2012)と同様に、JAMSTEC(藤本(2005), 海宝(2011))によって取得された3.11地震前後のデータを用いて地すべり地形を検討し、海底地すべり位置の水深効果が考慮されているWatts et al.(2005)による予測式により算定される初期水位分布を用いて津波解析を実施した。
- 検討の結果、同海底地すべりによる最大水位上昇量は0.4m程度であり、発電所(沿岸)の津波高さに与える影響は小さいことを確認した。

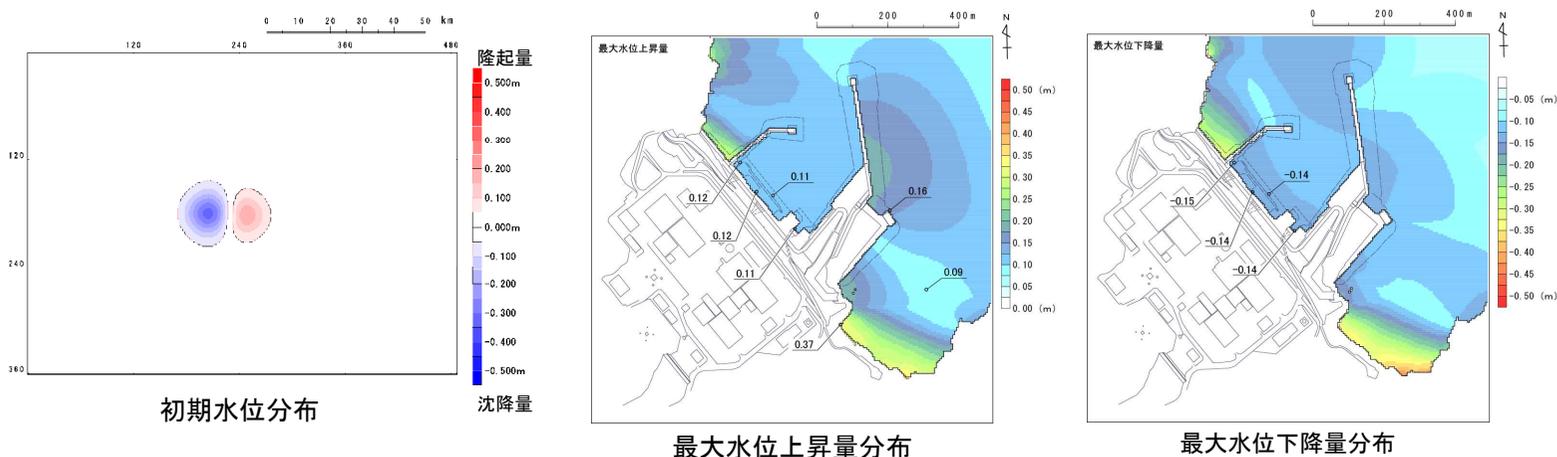
■海底地すべり地形の検討



■津波解析

波源振幅の推定値

$\eta_{0,2D}(m)$	0.56
$\eta_{0,3D}(m)$	0.32



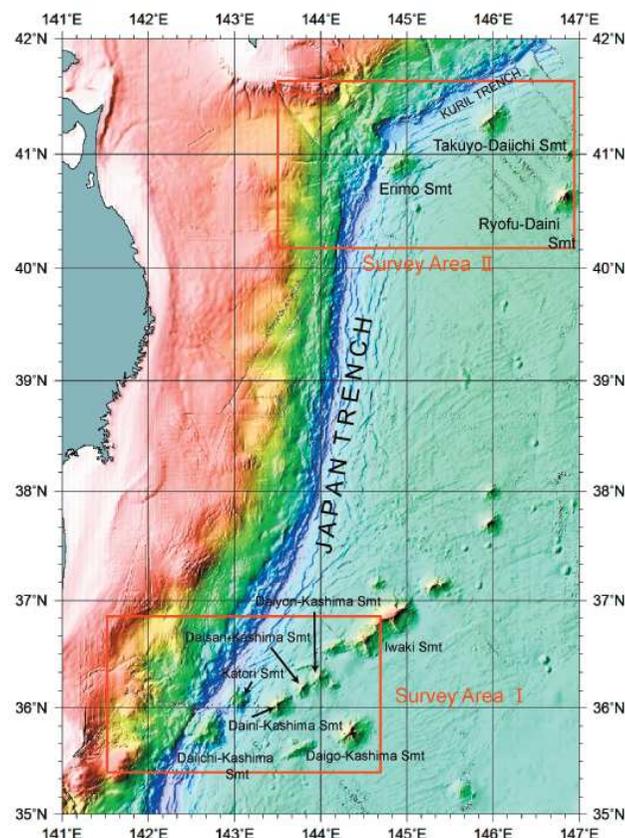
日本海溝陸側斜面で発生する海底地すべりに伴う津波は、水深が7000~8000mと深いために海底地すべり位置の津波振幅が小さく、発電所(沿岸)の津波高さに与える影響は小さい※。 ※:評価の詳細は、補足説明資料「II. 3. 日本海溝付近の海底地すべり」に記載。

1.3.3 日本海溝付近における海山付近の海底地すべり

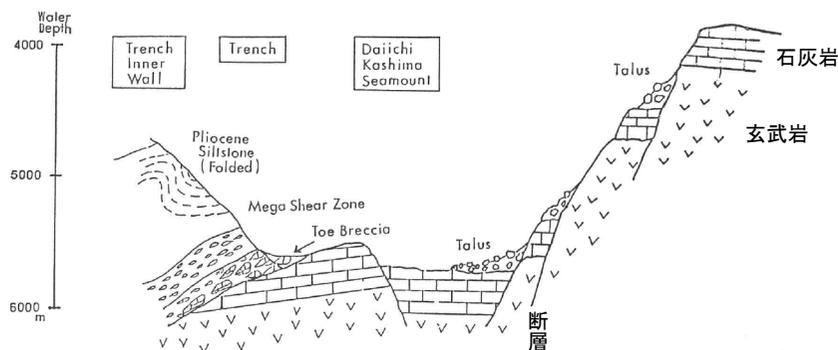
第750回審査会合(R1.7.26)
資料1-5-2 p225~229 再掲(要約)

コメントS188

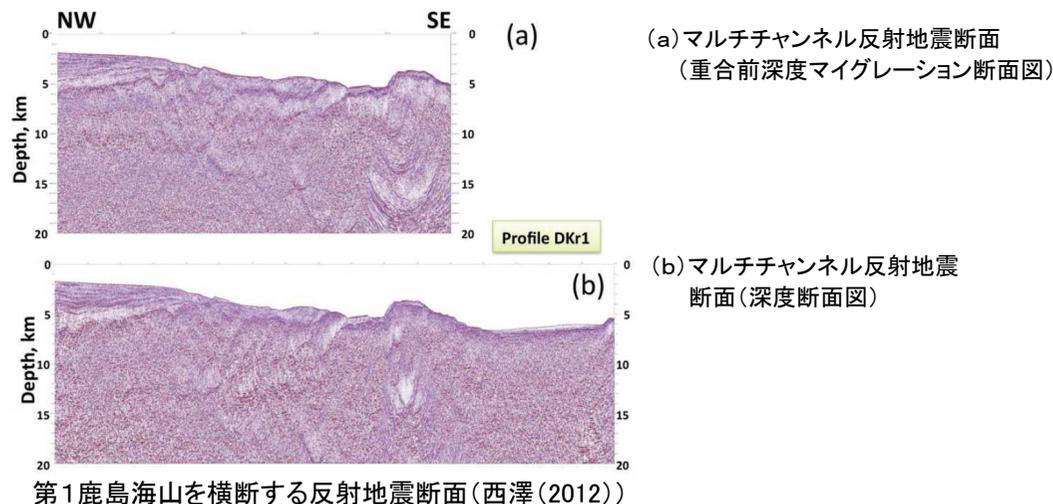
- 渡邊ほか(2017)は、日本海溝と伊豆・小笠原諸島日本海溝と伊豆・小笠原海溝の会合部付近に第1鹿島海山が存在し、その背後には、香取海山、第2～5鹿島海山、岩城海山といった一連の海山列が北東側へ続くとしている。また、日本海溝と千島海溝の島弧会合部付近には襟裳海山が存在し、その東側に広がる深海平坦面には拓洋第1海山、凌風第2海山等が分布するとしている。
- 第一鹿島海山、襟裳海山に関する最新の知見を収集した結果、両海山付近に大規模な海底地すべり地形は確認されないものの、第一鹿島海山には断層の活動に伴う小規模な崩壊地形が存在する。



日本海溝付近の海山(渡邊ほか(2007))



第1鹿島海山付近の模式地質断面(藤岡・平(1987)に一部加筆)



(a) マルチチャンネル反射地震断面
(重合前深度マイグレーション断面図)

(b) マルチチャンネル反射地震
断面(深度断面図)

第1鹿島海山を横断する反射地震断面(西澤(2012))

第一鹿島海山には断層の活動に伴う小規模な崩壊地形が存在するが、大規模な海底地すべりは確認されないとしている。以上から、日本海溝付近における海山付近の海底地すべりが発電所に与える影響は小さいと考えられる※。

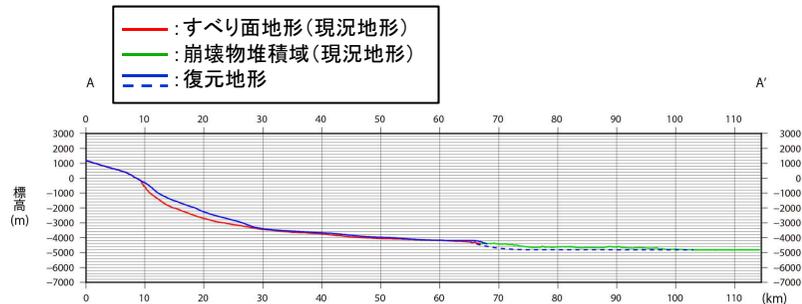
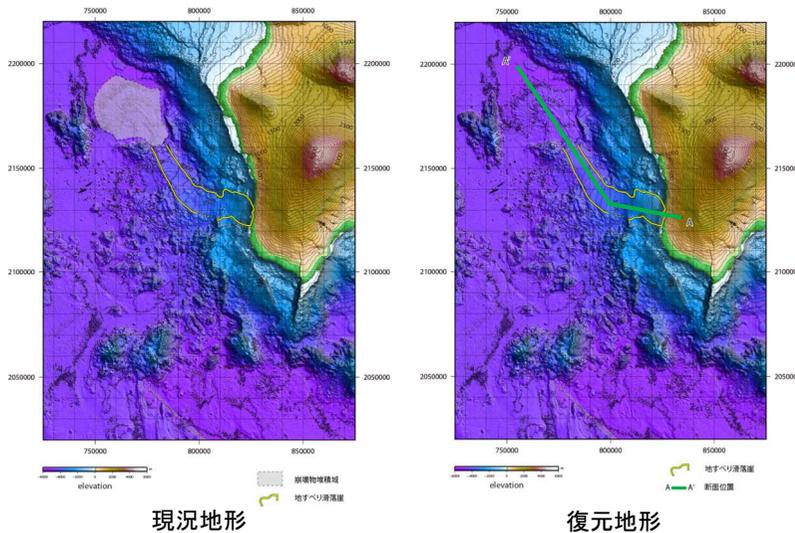
※: 評価の詳細は、補足説明資料「II. 4. 日本海溝付近における海山付近の海底地すべり」に記載。

1.3.4 ハワイ付近の海底地すべり

第750回審査会合(R1.7.26)
資料1-5-2 p330~337 再掲(要約)

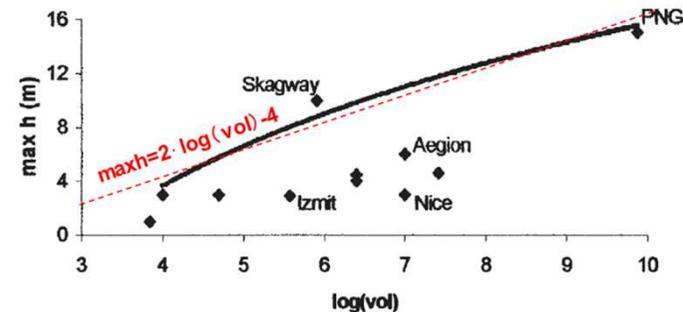
コメントS188

- ハワイ諸島で発生した海底地すべりの特徴, 発生年代に関する知見から(横瀬(2007, 2010), McMurtry et al.(2004), Moore et al.(1989)), 後期更新世以降に生じた海底地すべりのうち, 巨大津波を伴った可能性があり面積が大きい「Alika-2」の海底地すべりを評価対象として選定した。
- 選定した海底地すべりについて, ハワイ大学マノア校海洋地球科学技術学部(SOEST)による海底地形デジタルデータ(50mグリッド)を用いて, 地すべり崩壊前地形を復元し, 復元地形と現況地形との差から地すべり体積(土量)を算出した海底地すべりの体積(土量)は約105km³である。
- Papadopoulos and Kortekaas(2003)による20世紀以降に発生した世界の地すべり津波のデータ分析に基づく, 地すべり体積と沿岸の津波水位の関係から, 日本沿岸における津波水位は3.8m程度と推定される。



地形断面図(A-A断面, H:V=1:2.5)

「Alika-2」の海底地すべり地形



地すべり体積(m³)と沿岸における津波の最高水位の関係 (Papadopoulos and Kortekaas(2003)に加筆)

津波水位の推定結果※

1975年の日本沿岸における津波水位 h1	0.55m
Papadopoulos and Kortekaas (2003)に基づく比例定数 a	2
1975年の地すべり体積 V1	2.5km ³
Alika-2の地すべり体積 V2	105 km ³
Alika-2の日本沿岸における津波水位 h2	3.8m

※: 推定方法の概要

- 1975年Kalapana津波の地すべり体積: 2.5km³(Ma et al.(1999)), 同地すべりに伴う日本沿岸の津波水位(検潮記録): 55cm(鮎川検潮所, 最大全振幅)(羽鳥(1976))に設定。
- 地すべり1の体積をV1, 津波水位をh1, 地すべり2の体積をV2, 津波水位をh2とすると, Papadopoulos and Kortekaas(2003)の関係により, 「h2 = a * log(V2) + b」, 「h1 = a * log(V1) + b」
- 両式の差「h2 - h1 = a (log(V2) - log(V1))」から, 「h2 = h1 + a * log(V2/V1)」。

以上から, ハワイ付近の海底地すべりが発電所に与える影響は小さいと考えられる※。

※: 評価の詳細は, 補足説明資料「Ⅱ. 5. ハワイ付近における海山付近の海底地すべり」に記載。

Ⅱ．地震以外に起因する津波の評価

1. 地すべり及び斜面崩壊
2. 火山現象
 - 2.1 既往津波に関する文献調査
 - 2.2 火山現象に起因する津波の評価

Ⅱ. 地震以外に起因する津波の評価 2. 火山現象

2.1 既往津波に関する文献調査

- 文献調査の結果、敷地周辺において火山現象による歴史津波の記録はない。

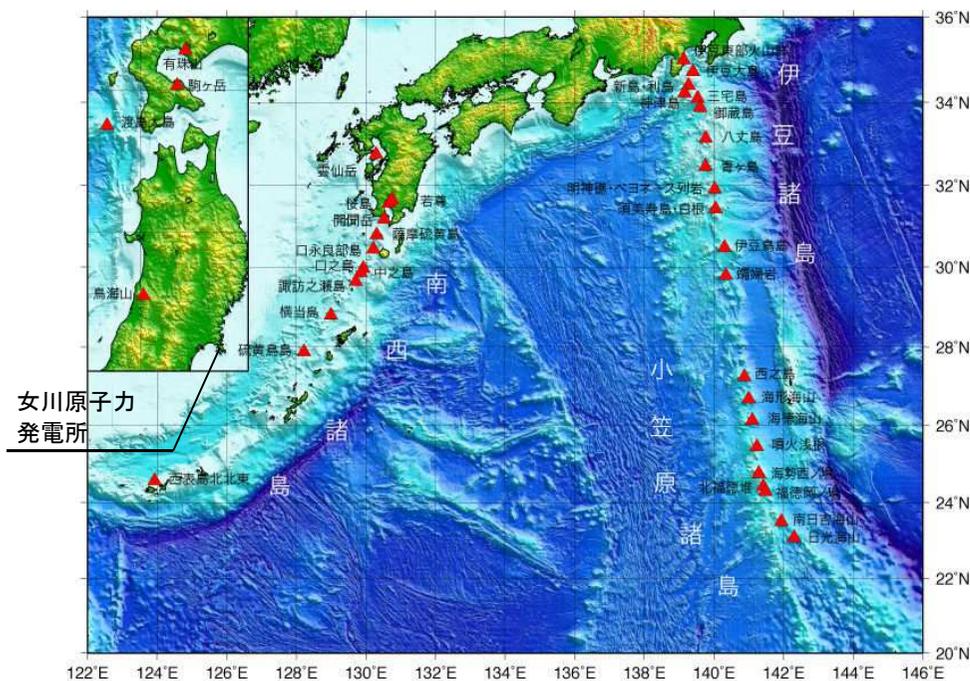
【調査した文献】

- ① 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子(2013):日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会
- ② 渡辺偉夫(1998):日本被害津波総覧 [第2版], 東京大学出版会
- ③ 気象庁(1951~2017):地震月報ほか
- ④ 国立天文台(2019):理科年表2019, 平成31年, 第92冊, 丸善出版

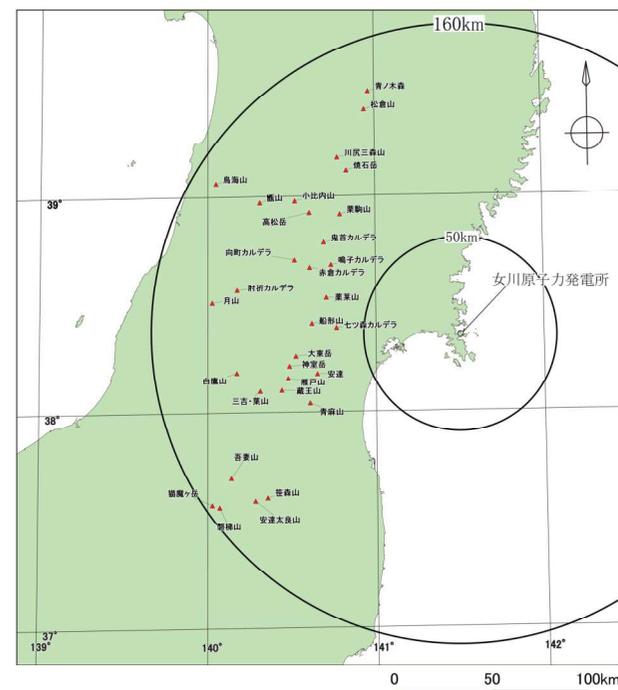
Ⅱ. 地震以外に起因する津波の評価 2. 火山現象

2.2 火山現象に起因する津波の評価

- 海上保安庁の海域火山データベース及び産業技術総合研究所の「日本の火山(第3版)」によれば、敷地周辺および前面海域に敷地に影響を及ぼす津波の要因となる海底火山は認められない。



海域の火山
(海上保安庁に一部加筆)



敷地を中心とする半径160km範囲の陸域の第四紀火山
(産業技術総合研究所(2013)に一部加筆)



以上から、火山現象に起因する津波の影響は極めて小さいと考えられる。

Ⅲ. 基準津波の策定

1. 策定方針
2. 各津波の評価
3. 基準津波の策定

Ⅲ. 基準津波の策定

1. 策定方針
2. 各津波の評価
3. 基準津波の策定

Ⅲ. 基準津波の策定

1. 策定方針

【水位上昇側】

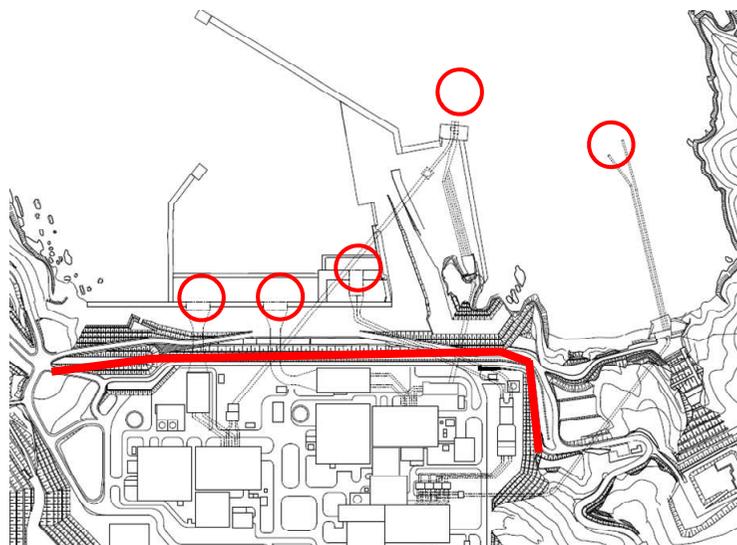
- ✓ 設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の津波防護対象設備(非常用取水設備を除く。)を内包する建屋及び区画が設置された敷地(O.P.約+13.8m)への基準津波の到達, 流入を防止するため, 津波防護施設(防潮堤, 防潮壁)を設置することから, 「最大水位上昇量」に「地震に伴う沈下量」を考慮した相対的な津波水位の最大ケースを『基準津波(水位上昇側)』とした。

【水位下降側】

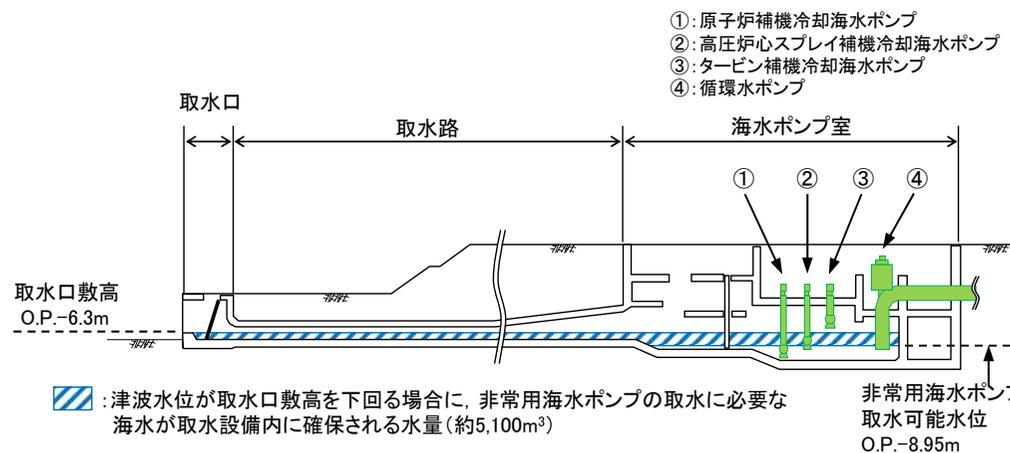
- ✓ 津波水位が取水口敷高を下回る場合における非常用海水ポンプの取水に必要な海水の貯留容量に関する評価, 津波による砂の移動・堆積に関する評価の観点から, 「最大水位下降量」に「地震に伴う隆起量」を考慮した相対的な津波水位の最大ケースを『基準津波(水位下降側)』とした。

評価位置

評価項目	敷地前面	1号取水口前面	2号取水口前面	3号取水口前面	1号放水口前面	2・3号放水口前面
水位上昇側	○	○	○	○	○	○
水位下降側	—	—	○	—	—	—



評価位置(平面図)



2号取水設備断面図(概要)

Ⅲ. 基準津波の策定

1. 策定方針
2. 各津波の評価
 - 2.1 水位上昇側
 - 2.2 水位下降側
3. 基準津波の策定

2.1 水位上昇側:最大水位上昇量

- 各津波の最大ケースの整理結果を下表に示す。
- 決定ケースは、「最大水位上昇量」に「地震に伴う沈下量」を考慮した相対的な津波水位上昇量が最大となる「東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル③)」に起因する津波である。

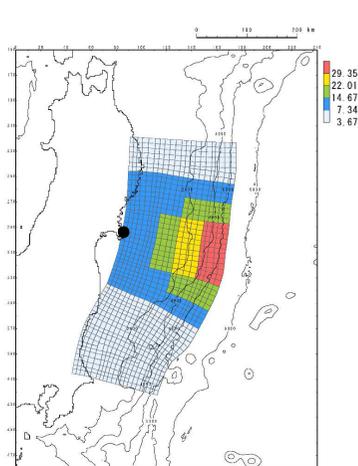
上段 最大水位上昇量, []:地殻変動量(+:隆起, -:沈下)
下段 最大水位上昇量に地震に伴う沈下量を考慮した相対的な津波水位

発生要因	種別	波源モデル	最大水位上昇量(m)						
			敷地前面	1号取水口前面	2号取水口前面	3号取水口前面	1号放水口前面	2・3号放水口前面	
地震	プレート間地震	東北地方太平洋沖型の地震	基準断層モデル①	18.42	17.33	17.32	17.15	16.04	16.20
				[-0.58]	[-0.58]	[-0.58]	[-0.58]	[-0.58]	[-0.58]
			19.00	17.91	17.90	17.73	16.62	16.78	
		基準断層モデル②	18.86	17.03	17.40	17.55	15.50	15.34	
			[-0.77]	[-0.77]	[-0.77]	[-0.77]	[-0.77]	[-0.77]	
			19.63	17.80	18.17	18.32	16.27	16.11	
	基準断層モデル③	21.58	18.85	19.50	19.60	16.46	17.16		
		[-0.72]	[-0.72]	[-0.72]	[-0.72]	[-0.72]	[-0.72]		
	津波地震	22.30	19.57	20.22	20.32	17.18	17.88		
		21.82	17.21	17.61	17.20	14.39	15.01		
海洋プレート内地震	正断層型の地震	[+0.03]	[+0.03]	[+0.03]	[+0.03]	[+0.03]	[+0.03]		
		21.82	17.21	17.61	17.20	14.39	15.01		
海域の活断層による地殻内地震	F-6断層~F-9断層	22.05	12.92	16.45	15.12	14.26	12.74		
		[-0.03]	[±0.00]	[-0.02]	[-0.03]	[-0.04]	[-0.03]		
			22.08						
			22.08						
			12.92						
			16.47						
			15.15						
			14.30						
			12.77						
地震以外	地すべり及び斜面崩壊		発電所へ与える影響は極めて小さい。						
	火山現象		発電所へ与える影響は極めて小さい。						
地震と地震以外に起因する津波の組合せ			地震以外に起因する津波が発電所へ与える影響は極めて小さいとともに、未知なる海底地すべりが存在する可能性を考慮した東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル③)を設定していることから評価しない。						

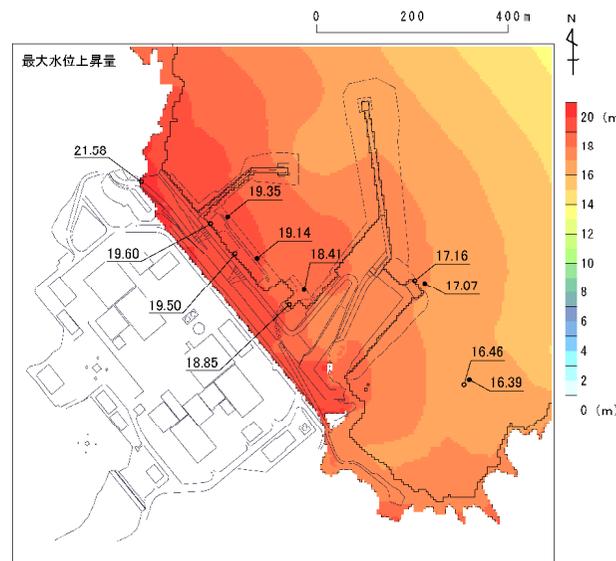
Ⅲ. 基準津波の策定 2. 各津波の評価

2.1 水位上昇側:水位分布及び水位時刻歴波形

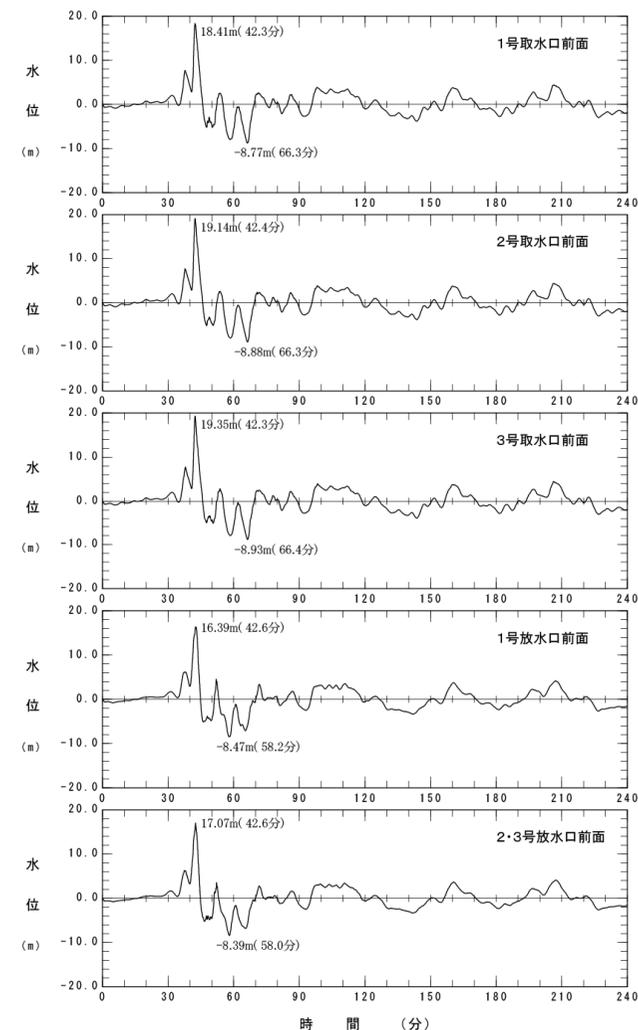
モデル	大すべり域・超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル③)	基準	基準(同時破壊)	—



すべり量分布



最大水位上昇量分布



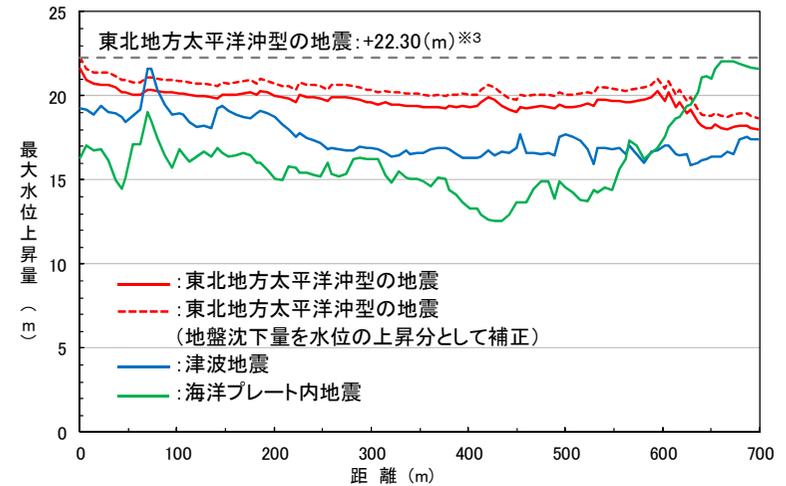
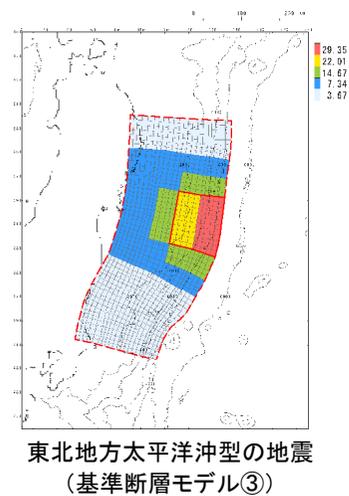
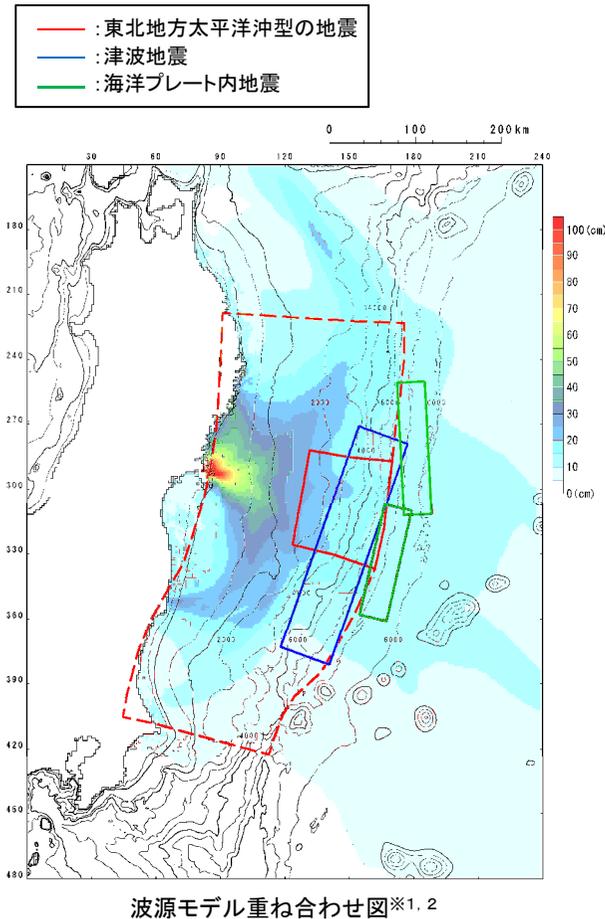
水位時刻歴波形※

※: 水位時刻歴波形は, 各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は, 本資料p33に記載。)

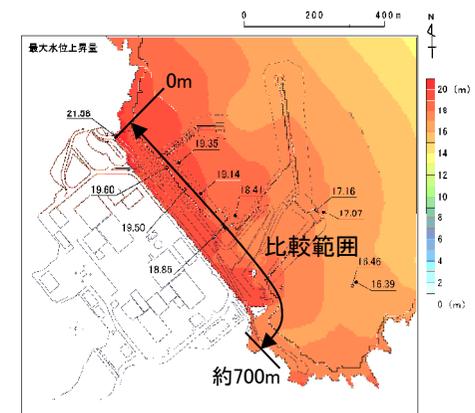
Ⅲ. 基準津波の策定 2. 各津波の評価

2.1 水位上昇側: 敷地前面における最大水位上昇量の比較

- 「東北地方太平洋沖型の地震」、「津波地震」及び「海洋プレート内地震」の敷地前面最大ケースを対象に、敷地前面における最大水位上昇量を比較した結果を下図に示す。



敷地前面における最大水位上昇量の比較



最大水位上昇量分布
(東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル③))

※1: 各地震の敷地前面最大ケース

※2: 背景は津波伝播特性の検討結果

※3: 最大水位上昇量(+21.58m)+地震に伴う地盤沈下量(-0.72m)=+22.30(m)

2.2 水位下降側:最大水位下降量

- 各津波の最大ケースの整理結果を下表に示す。
- 決定ケースは、「最大水位下降量」に「地震に伴う隆起量」を考慮した相対的な津波水位下降量が最大となる「東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル②)」に起因する津波である。

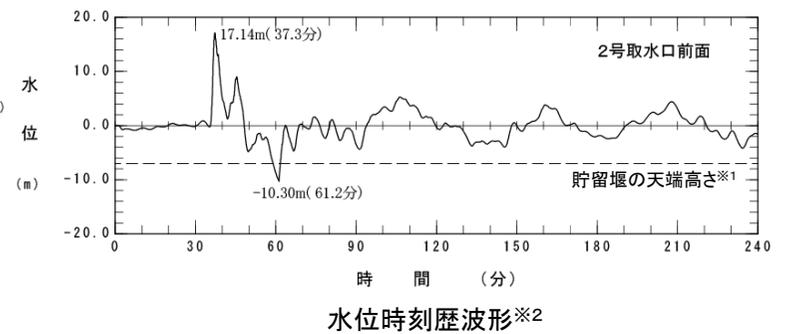
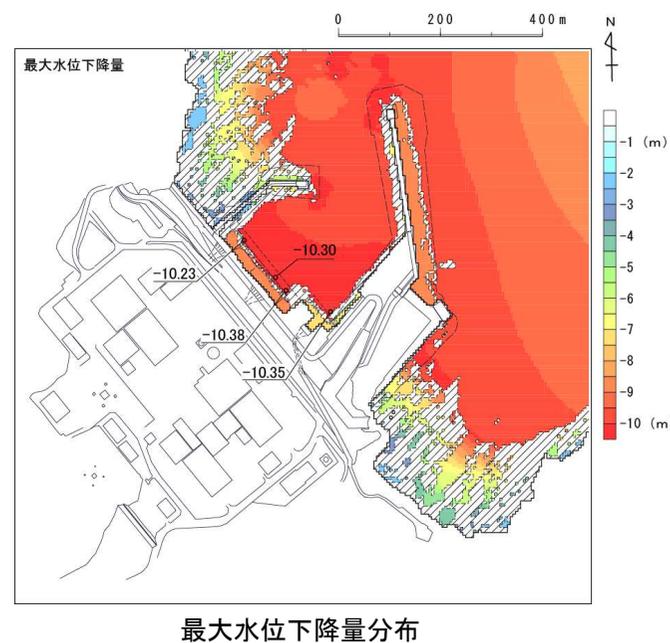
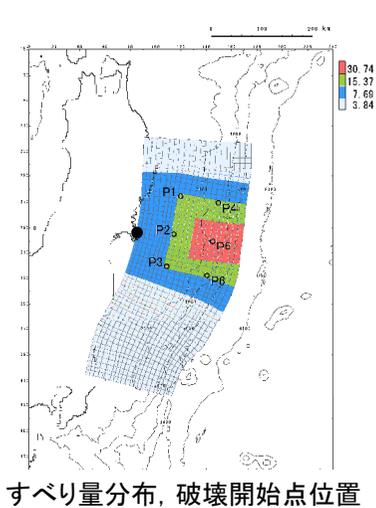
上段 最大水位下降量, []:地殻変動量(+:隆起, -:沈下)
下段 最大水位下降量に地震に伴う隆起量を考慮した相対的な津波水位

発生要因	種別	波源モデル		2号取水口前面		
				最大水位下降量(m)	取水口敷高を下回る継続時間(分)	
地震	プレート間地震	東北地方太平洋沖型の地震	基準断層モデル①	-10.22 [-0.58] -10.22	2.6	
			基準断層モデル②	-10.38 [-0.77] -10.38		2.6
			基準断層モデル③	-9.78 [-0.72] -9.78		
		津波地震		-9.17 [+0.03] -9.20	1.9	
		海洋プレート内地震	正断層型の地震	-10.13 [±0.00] -10.13		2.6
				海域の活断層による地殻内地震		
	地震以外	地すべり及び斜面崩壊		発電所へ与える影響は極めて小さい。		
火山現象		発電所へ与える影響は極めて小さい。				
地震と地震以外に起因する津波の組合せ				地震以外に起因する津波が発電所へ与える影響は極めて小さいとともに、未知なる海底地すべりが存在する可能性を考慮した東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル③)を設定していることから評価しない。		
2号機非常用海水ポンプの運転可能継続時間				約26		

Ⅲ. 基準津波の策定 2. 各津波の評価

2.2 水位下降側:水位分布及び水位時刻歴波形

モデル	大すべり域・超大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル②)	基準	P5	1.0(km/s)



※1:T.P.-7.04m(O.P.-6.3m)

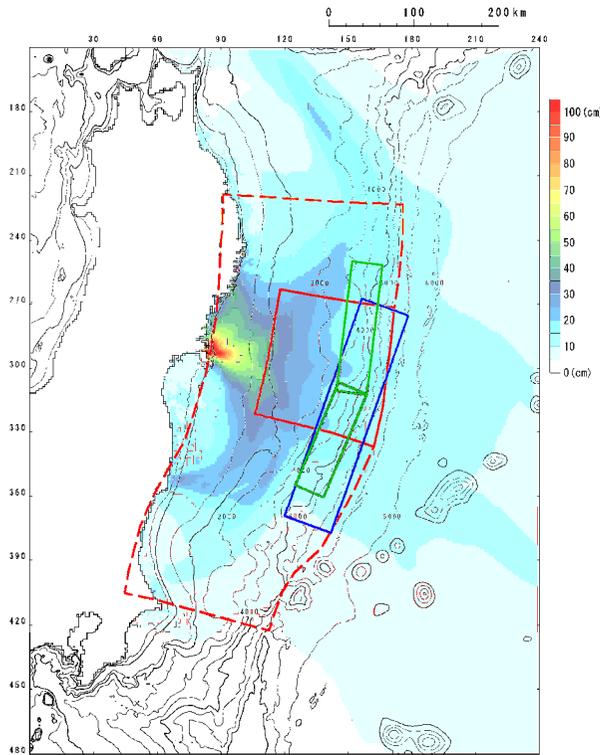
※2:水位時刻歴波形は,各取放水口前面の中央位置に該当するメッシュで抽出(抽出位置は,本資料p33に記載。)

Ⅲ. 基準津波の策定 2. 各津波の評価

2.2 水位下降側:取水口前面における最大水位下降量の比較

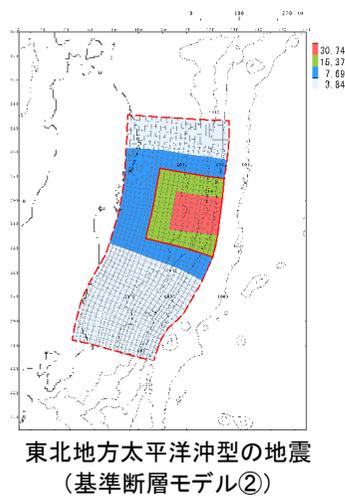
- 「東北地方太平洋沖型の地震」, 「津波地震」及び「海洋プレート内地震」の2号取水口前面最大ケースを対象に, 取水口前面における最大水位下降量を比較した結果を下図に示す。

— : 東北地方太平洋沖型の地震
— : 津波地震
— : 海洋プレート内地震

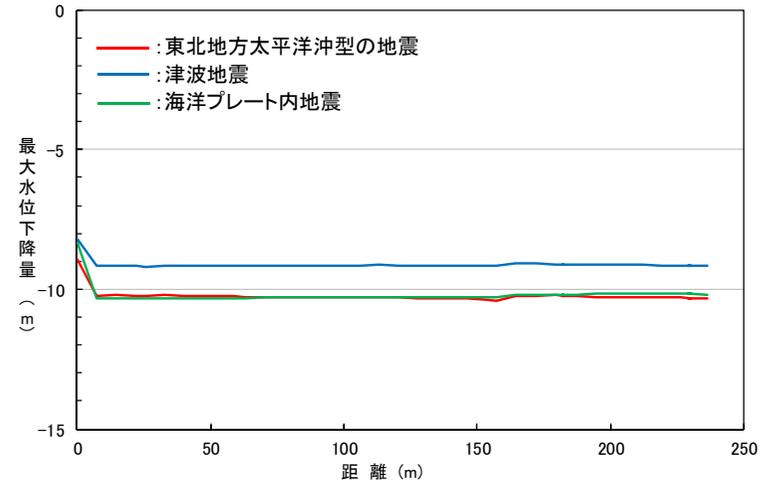


波源モデル重ね合わせ図※1, 2

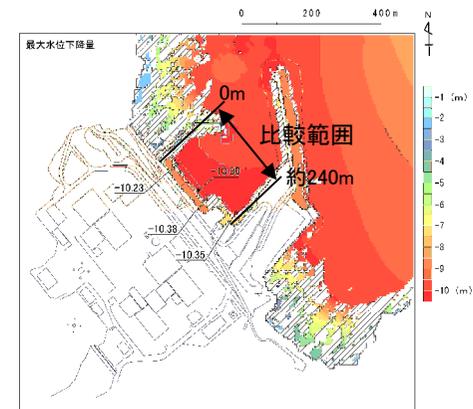
※1: 各地震の敷地前面最大ケース
※2: 背景は津波伝播特性の検討結果



東北地方太平洋沖型の地震
(基準断層モデル②)



取水口前面における最大水位下降量の比較



最大水位下降量分布
(東北地方太平洋沖型の地震(基準断層モデル②))

Ⅲ. 基準津波の策定

1. 策定方針
2. 各津波の評価
3. 基準津波の策定
 - 3.1 基準津波の策定
 - 3.2 基準津波策定位置における水位時刻歴波形

Ⅲ. 基準津波の策定 3. 基準津波の策定

3.1 基準津波の策定

- 各津波の評価結果を踏まえ、発電所に与える影響が最も大きい「東北地方太平洋沖型の地震」に起因する津波を基準津波とした。
- 基準津波の津波波源は、仙台平野及び石巻平野で数多く津波堆積物が確認されている869年の津波の規模とほぼ同等、もしくは上回っている2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を参考に基準断層モデルを設定し、さらに超大すべり域の位置や波源特性の不確かさを考慮している。このことから、基準津波は、地質学的証拠及び歴史記録等から推定される津波の規模を上回っている。
- 基準津波は、3.11地震に伴う津波の津波波形等をインバージョンした内閣府(2012a)による波源モデルから得られた知見を踏まえた基準断層モデルを設定し、さらに超大すべり域の位置や波源特性の不確かさを考慮している。このことから、敷地及び敷地近傍の基準津波による津波高さは、行政機関による既往評価を上回っている。なお、発電所が立地する宮城県では、3.11地震から得られた知見を踏まえた津波想定は行っていない。

■ 基準津波(水位上昇側)

発生要因	種別	波源モデル	最高水位 (敷地前面)
地震	東北地方太平洋沖型の地震	基準断層モデル③	O.P.+23.1m ^{※1}

※1:最大水位上昇量(+21.58m)に、朔望平均満潮位(O.P.+1.43m)を考慮した水位

■ 基準津波(水位下降側)

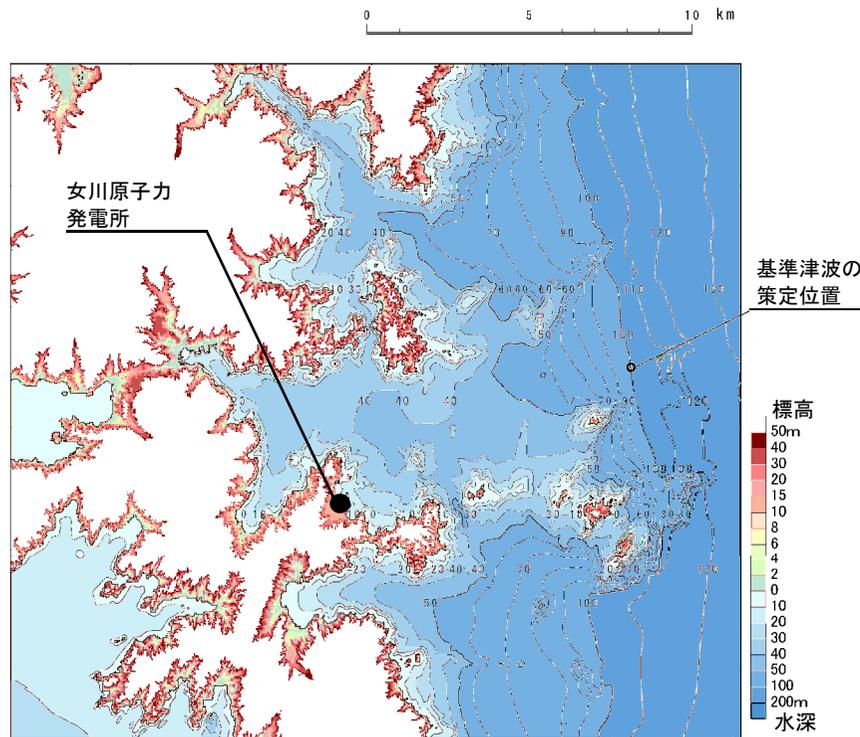
発生要因	種別	波源モデル	最低水位 (2号取水口前面)
地震	東北地方太平洋沖型の地震	基準断層モデル②	O.P.-10.6m ^{※2}

※2:最大水位下降量(-10.38m)に、朔望平均干潮位(O.P.-0.14m)を考慮した水位

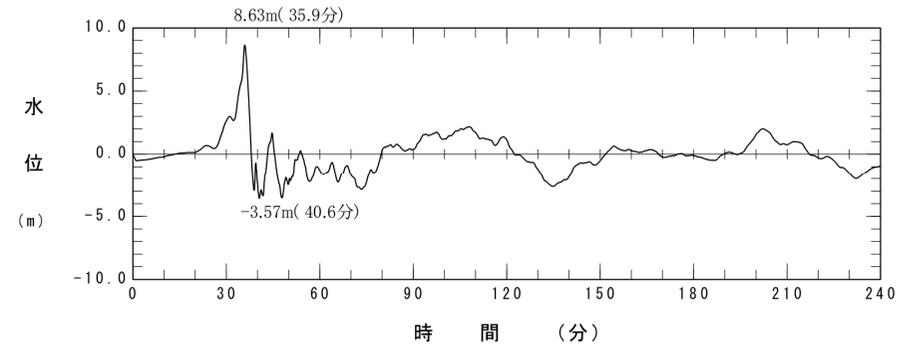
Ⅲ. 基準津波の策定 3. 基準津波の策定

3.2 基準津波策定位置における水位時刻歴波形

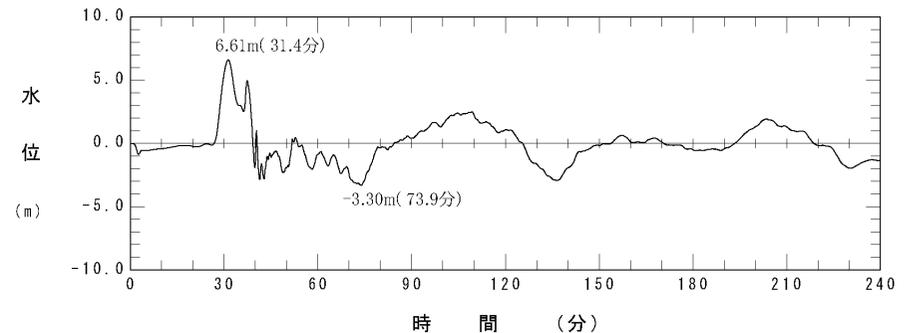
- 基準津波は、敷地前面の海底地形の特徴を踏まえ、時刻歴波形に対して施設からの反射波の影響が微小となるよう、敷地から沖合へ約10km離れた位置(水深100m)で策定した。



基準津波の策定位置



基準津波(水位上昇側)
(東北地方太平洋沖型の地震, 基準断層モデル③)



基準津波(水位下降側)
(東北地方太平洋沖型の地震, 基準断層モデル②)

IV. 年超過確率の参照

1. 評価概要
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)
3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的な不確実さの考慮)
4. 評価結果

IV. 年超過確率の参照

1. 評価概要

1.1 評価方針

1.2 ロジックツリーの作成

1.3 分岐の重み配分設定

2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

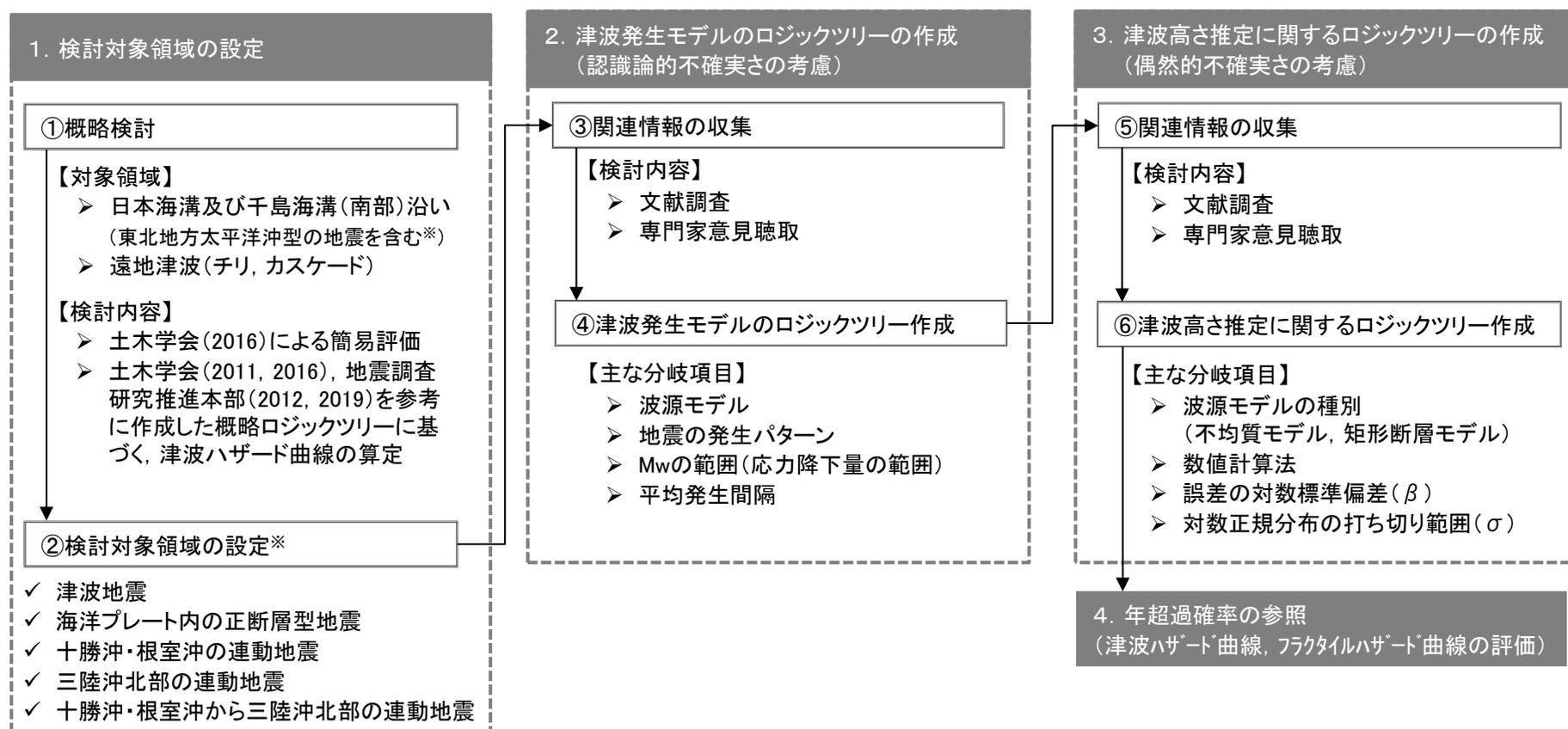
3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的な不確実さの考慮)

4. 評価結果

IV. 年超過確率の参照 1. 評価概要

1.1 評価方針

- ・ 確率論的津波ハザード評価は、日本原子力学会(2012)、土木学会(2011)、土木学会(2016)及び3.11地震から得られた知見等を踏まえて実施した。
- ・ また、3.11地震の発生に伴い、当該地震の発生領域に蓄積していたひずみはほぼ解消し、今後数百年オーダーの期間にプレート境界部で3.11地震と同程度の規模のすべりが発生する可能性が小さいことも考慮した。
- ・ 評価フローを以下に示す。



※: 東北地方太平洋沖型の地震の評価にあたっては、3.11地震の派生に伴い、今後数百年オーダーの期間にプレート境界部で3.11地震と同程度の規模のすべりが発生する可能性が小さいことを考慮した。

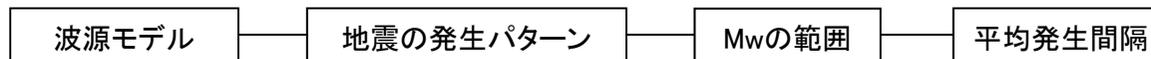
IV. 年超過確率の参照 1. 評価概要

1. 2 ロジックツリーの作成:概要

- ・ 認識論的不確実さは、波源モデル、地震の発生パターン、Mwの範囲及び平均発生間隔等を考慮した津波発生モデルのロジックツリーとして表現した。
- ・ 偶然的な不確実さは、数値計算法、誤差の対数標準偏差(β)及び対数正規分布の打ち切り範囲(σ)を考慮した津波高さ推定に関するロジックツリーとして表現した。

■認識論的不確実さの考慮:津波発生モデルのロジックツリー

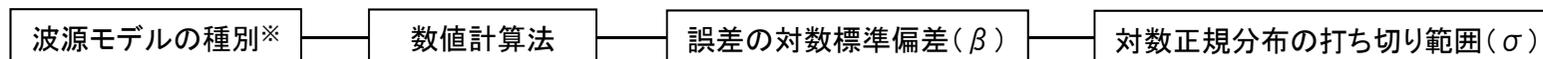
(1)各津波発生領域のロジックツリー



(2)津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

- ・ 3.11地震から得られた知見を踏まえ、これまで発生した記録、知見がない津波発生領域(セグメント)の連動を考慮した地震を評価することから、各連動地震の発生確率に関する重み付けを行うため、地震の組合せに関するロジックツリーを追加した。

■偶然的な不確実さの考慮:津波高さ推定に関するロジックツリー



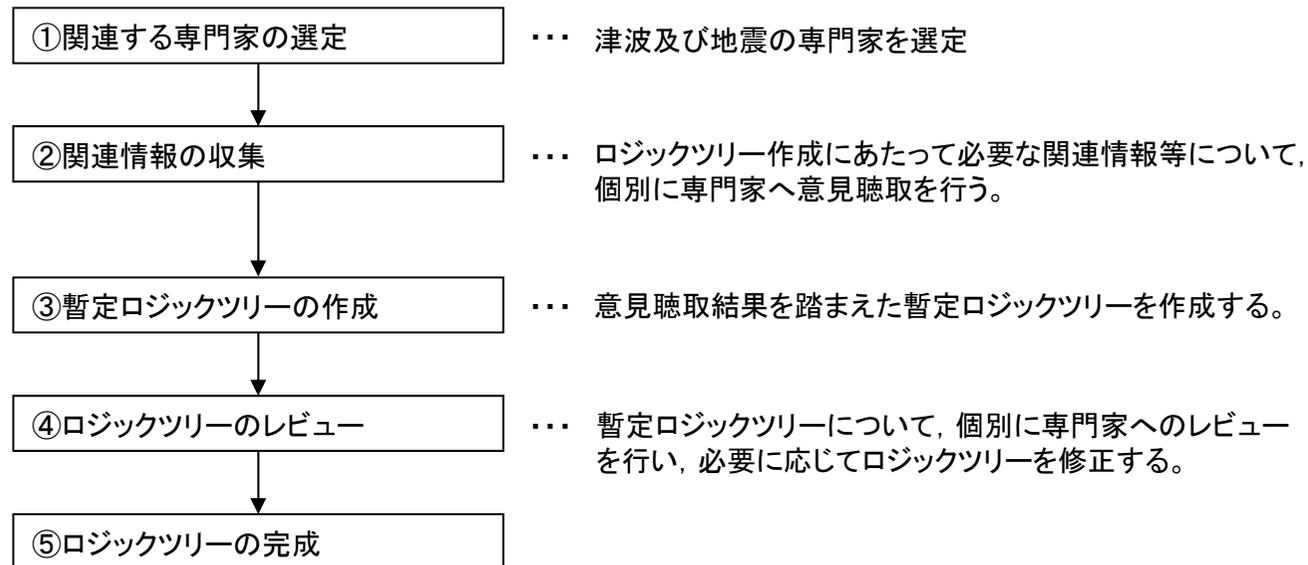
※:不均質モデル, もしくは一様すべりの矩形断層モデル(以下,「矩形断層モデル」という。)

IV. 年超過確率の参照 1. 評価概要

1. 2 ロジックツリーの作成: 専門家活用水準

- 3.11地震の発生に伴い分岐の項目、重み配分等について専門家意見が分かれることが想定されるため、日本原子力学会(2012)に示される専門家活用水準のうち専門家活用水準2を採用した。
- ロジックツリーの作成フローを以下に示す。

■ロジックツリーの作成フロー



IV. 年超過確率の参照 1. 評価概要

1.3 分岐の重み配分設定

- 日本原子力学会(2012), 土木学会(2011)の分岐を流用するものについては, 土木学会(2009)によるアンケート結果を踏まえた重みや, 土木学会(2011)による正規分布に対する分岐設定方法の重みを用いた。
- 新たに追加した分岐や修正した分岐の重みについては, 関連する情報を収集のうえ, 下表に示す考え方にに基づき設定した。

重みの配分設定方法

重みの配分 (分岐が2つの場合)	設定方法
0.5:0.5	現時点の知見で重み付けの判断が困難な場合は, 日本原子力学会(2012)に基づき, 均等配分とする。
0.3:0.7	地震調査研究推進本部, 土木学会等の評価や関連情報の収集結果から, 重みが大きいと考えられる分岐については, その重みを0.7とする。
0.1:0.9	関連情報の収集結果から, 基本的に分岐を設ける必要が無いと考えられるものの, 分岐として成立する可能性が残される分岐については, その重みを0.1とする。

IV. 年超過確率の参照

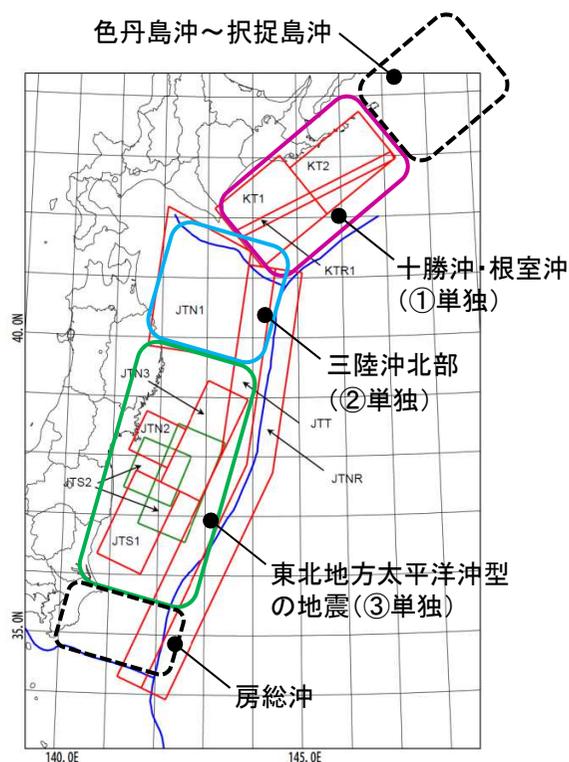
1. 評価概要
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)
 - 2.1 検討対象領域の設定
 - 2.2 津波地震, 海洋プレート内地震の正断層型地震
 - 2.3 十勝沖・根室沖の連動地震
 - 2.4 三陸沖北部の連動地震
 - 2.5 十勝沖・根室沖から三陸沖北部の連動地震
 - 2.6 地震の組合せに関するロジックツリー
3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的な不確実さの考慮)
4. 評価結果

IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.1 検討対象領域の設定:基本方針

- 3.11地震から得られた知見を踏まえ、日本原子力学会(2012)に示される日本海溝及び千島海溝(南部)沿いの津波発生領域に、プレート間地震と津波地震の連動地震を追加設定した。
- 検討対象領域(詳細検討を実施する領域)は、概略検討※により各津波波源が年超過確率に与える影響を把握し、年超過確率に与える影響が大きいと考えられる津波波源に該当する領域とした。

※:概略検討の詳細は、補足説明資料「IV. 1. 検討対象領域の設定に係る概略検討」に記載。



日本海溝及び千島海溝(南部)沿い海域
の津波発生領域区分
(日本原子力学会(2012)に一部加筆)

■ 検討対象領域の設定

■ : 検討対象とした領域

コード	名称	備考
JTN2	宮城県沖	概略検討領域
JTN3	三陸沖南部海溝寄り	概略検討領域
JTN2+JTN3	宮城県沖+三陸沖南部海溝寄り(連動)	概略検討領域
JTS1	福島県沖プレート間	概略検討領域
JTT	津波地震	概略検討領域
JTNR	海洋プレート内の正断層型地震	
①単独	十勝沖・根室沖の連動地震	
②単独	三陸沖北部の連動地震	
③単独	東北地方太平洋沖型の地震	概略検討領域
①+②	十勝沖・根室沖から三陸沖北部の連動地震	
択捉島沖～房総沖	択捉島沖から房総沖の連動地震	概略検討領域

IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

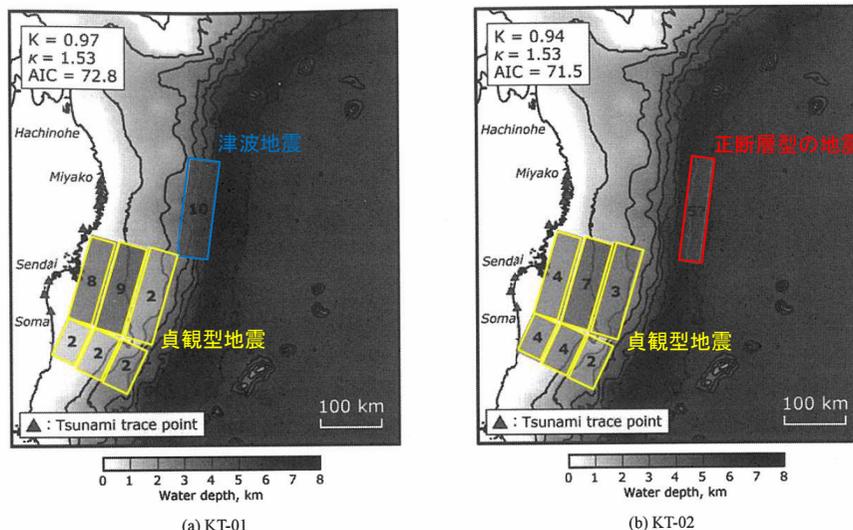
2.2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 1611年の津波の地震発生様式

- 土木学会(2011), 地震調査研究推進本部(2012, 2019)等では1611年の津波を津波地震と評価しているが, 土木学会(2002)では海洋プレート内の正断層型地震であった場合, その地震規模をMw8.6と評価している。
- 今井ほか(2012)は, 1611年の津波痕跡に基づく数値シミュレーション, 並びに史料記述の再解釈から, 1611年の津波が海洋プレート内の正断層型地震であった可能性を指摘している。
- 以上を踏まえ, 1611年の津波の地震発生様式に関する分岐(=津波地震/海洋プレート内の正断層型地震)を追加設定した。
- 上記分岐のうち海洋プレート内地震のMc(中央マグニチュード)は, 地震規模, 並びに各機関の評価事例に係る関連情報の収集結果を踏まえ8.4とした^{※1}。
- 重み配分については, 1611年の津波の発生様式に係る知見の収集結果から, 津波地震の重みを0.7, 海洋プレート内の正断層型地震の重みを0.3とした。
※1: 専門家意見聴取結果を踏まえて設定した。意見聴取結果の詳細は, 補足説明資料「IV. 3. 海洋プレート内の正断層型地震の地震規模に関する検討」に記載。

【今井ほか(2012)】

- ✓ プレート境界地震の断層面に加え, アウターライズ領域の正断層地震の断層面を考慮して痕跡高の逆解析を実施した結果, 以下の2つの地震モデル(KT-01, KT-02)が得られた^{※2}。
- ✓ 宮古由来記には, 津波来襲前に轟音が鳴り響いたといった宏観現象の記述が残されている。
- ✓ アウターライズ領域で発生する正断層型地震はプレート境界地震と密接に関係することも踏まえると, 正断層型地震の方がより矛盾なく解釈できるが, 津波地震を完全に否定することはできない。

※2: 逆断層地震と正断層地震の発生時間差は考慮していないが, 沿岸の津波高さに与える影響は小さいことを確認。



津波痕跡高から得られた1611年の津波のすべり量分布
(断層面内の数字はすべり量(m))
(今井ほか(2012)に一部加筆)

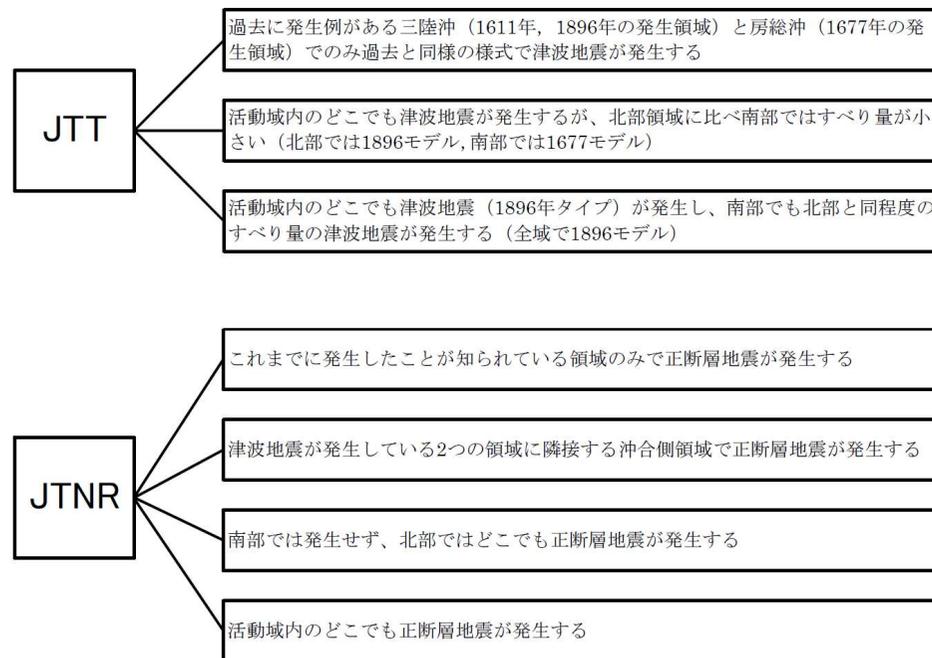
【1611年の津波の発生様式に係る知見の収集結果】

関連情報	1611年の津波の発生様式
相田(1977)	海洋プレート内の正断層型地震
土木学会(2002)	津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震
地震調査研究推進本部(2002)	津波地震
中央防災会議(2005)	津波地震
土木学会(2009)	津波地震
地震調査研究推進本部(2012, 2019)	津波地震
今井ほか(2012)	海洋プレート内の正断層型地震
岩淵(2013)	津波地震

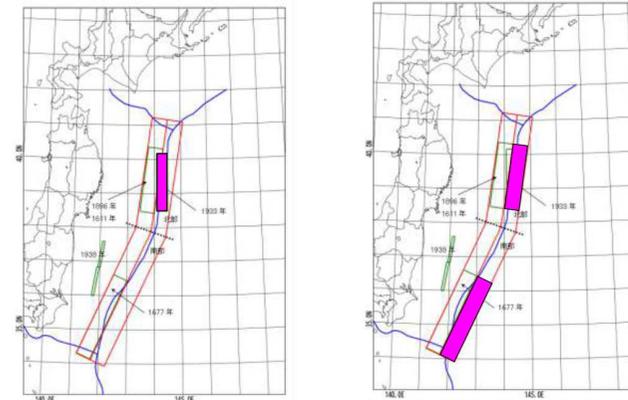
IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 地震の発生パターン

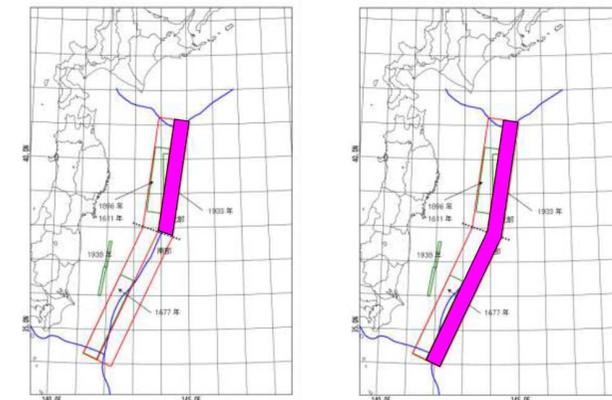
- 土木学会(2011)では, 地震の発生パターンに分岐を設定しているが, 地震調査研究推進本部(2012, 2019)の評価, 3.11地震で得られた知見を踏まえ, 日本海溝沿いのどこでも地震が発生する分岐のみとした。
- なお, 津波地震については, M9クラスの巨大地震と同様に, 3.11地震の応力解放範囲で発電所供用期間中に地震が発生する可能性は小さいと考えられるものの, 津波地震単独で活動する際に必要な歪みは, M9クラスの巨大地震と比較して小さいことを踏まえ, 応力解放範囲で津波地震が発生する場合の分岐を設定した。重み配分については, 重みの配分設定方法(p141)に基づき設定した。



地震の発生パターンに関する分岐
(JTT: 津波地震, JTNR: 海洋プレート内の正断層型地震)
(土木学会(2011))



①これまでに発生したことが知られている領域のみで発生する
②津波地震が発生している2つの領域に隣接する沖合側領域で発生する



③南部では発生せず, 北部ではどこでも発生する
④活動域内のどこでも発生する

海洋プレート内の正断層型地震の発生位置
(土木学会(2009))

IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2. 2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 平均発生間隔(1/2)

■基本方針

- 土木学会(2011), 土木学会(2016)と同様に固有地震モデルに基づく方法を用いて, 以下の考え方に基づき, 平均発生間隔を設定した。

津波発生領域	1611年の津波は津波地震			1611年の津波は正断層型地震		
	既往地震	中央マグニチュード (Mc)	発生間隔等	既往地震	中央マグニチュード (Mc)	発生間隔等
津波地震 (JTT)	1611年 1677年 1896年	8.3 (1896年)	1600年以降 約400年間におい て発生は4回 (3.11地震を含む)。	1677年 1896年	8.3 (1896年)	1600年以降 約400年間におい て発生は3回 (3.11地震を含む)。
海洋プレート内の 正断層型地震 (JTNR)	1933年	8.4 (1933年)	1600年以降 約400年間におい て発生は1回。	1611年 1933年	8.4 (1933年)	1600年以降 約400年間におい て発生は2回。

IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2. 2 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震: 平均発生間隔(2/2)

■津波地震の平均発生間隔の設定

- プレート間地震と津波地震の連動地震である東北地方太平洋沖型の地震, 三陸沖北部の連動地震の平均発生間隔と重複しないように(=連動サイクルを考慮して)設定した。
- 東北地方太平洋沖型の地震, 三陸沖北部の連動地震の平均発生間隔の設定方法を以下に示す。
- 重み配分については, 現時点の知見で判断するのは困難であることから, 均等配分とした。

【東北地方太平洋沖型の地震の平均発生間隔の設定】

- 600年間隔で, 毎回プレート間地震と津波地震が連動する。
- 15世紀の津波と869年の津波はプレート間地震単独であったとの前提に立ち, 3回に1回のサイクルで津波地震と連動する。
- 3.11地震より前の4回の地震は全てプレート間地震単独であったとの前提に立ち, 5回に1回のサイクルで津波地震と連動する。

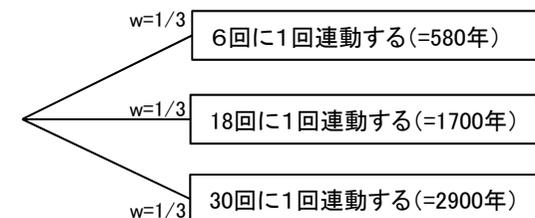
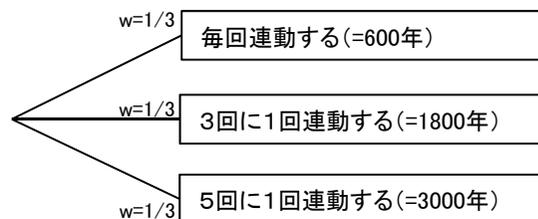
【三陸沖北部の連動地震の平均発生間隔の設定】

- プレート間地震と津波地震の連動地震が発生した記録が無いことを踏まえ, 東北地方太平洋沖型の地震(③単独)の平均発生間隔(600年)を参考に, プレート間地震(1677年, 1763年, 1856年, 1968年)の平均発生間隔(97年)の6回に1回(600年間隔に相当), 18回に1回(1800年間隔に相当), 30回に1回(3000年間隔に相当)のサイクルで津波地震と連動するとした。

地震調査研究推進本部(2012)による東北地方太平洋沖型の地震の評価

地震発生領域	地震発生日月日	地震の平均的発生頻度等 注1	地震規模			死傷者数注5	
			M 注2	Mt 注3	Mw 注4	死者	負傷者
東北地方太平洋沖型の地震	2011/ 3/11 14:46	平均発生間隔は600年程度	9.0 注2	9.1 ~ 9.4	9.0	16,019 行方不明 3,805	6,121
	15世紀 869/ 7/13 4-5世紀 紀元前3-4世紀		8.3		8.4~ 注4	多数	-

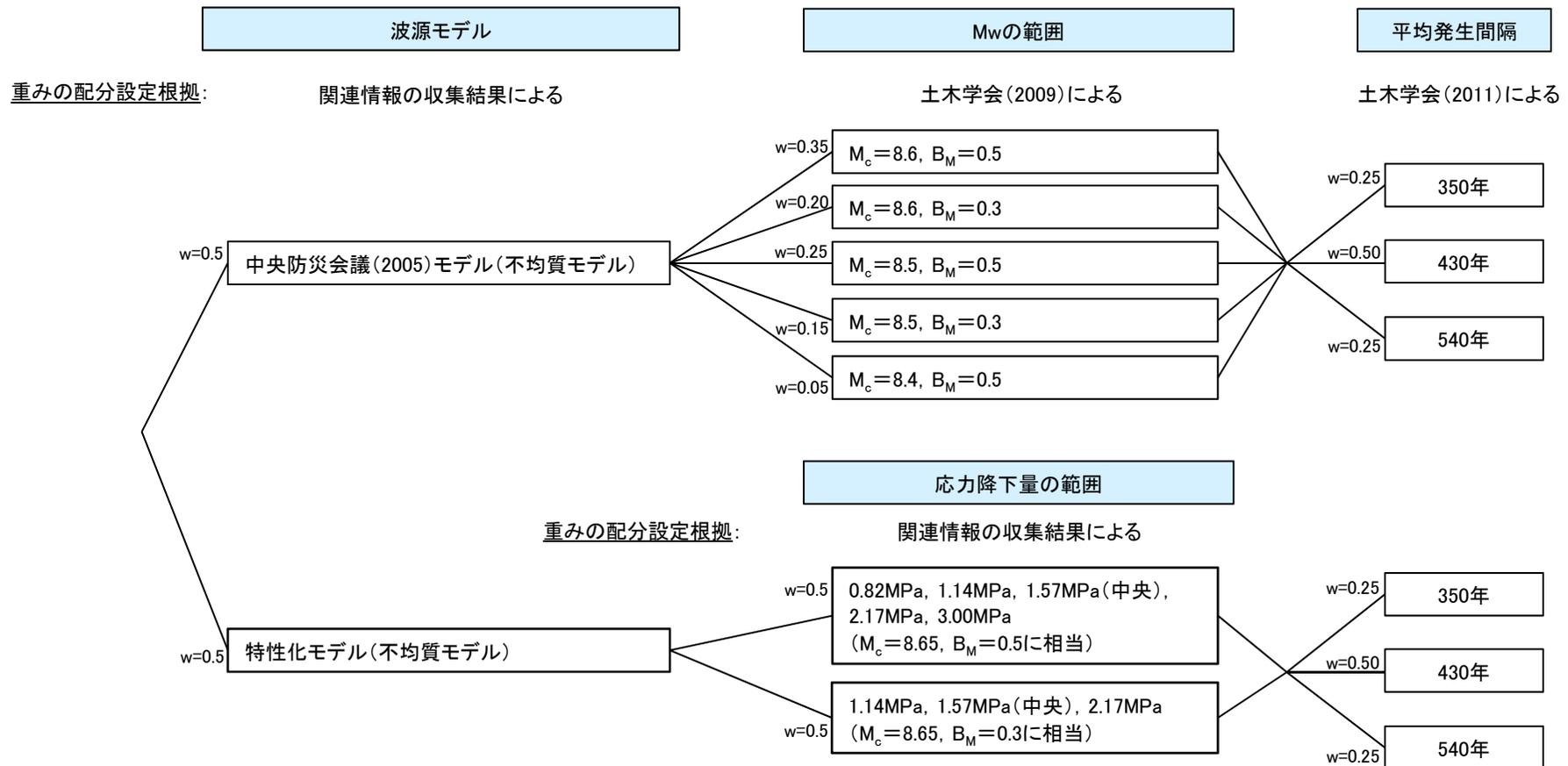
※:注1~注5の解説については省略



IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.3 十勝沖・根室沖の連動地震:ロジックツリー

: 土木学会(2011)からの変更箇所(新規設定)



IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.3 十勝沖・根室沖の連動地震: 平均発生間隔

■波源モデル

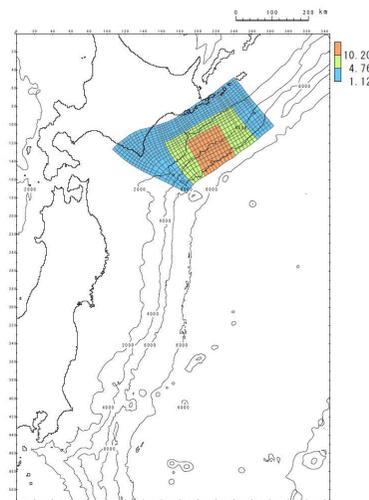
【中央防災会議(2005)モデル】

- 北海道太平洋岸で確認された津波堆積物から推定される津波高を用いたインバージョンモデル(Mw8.6)(詳細は次頁に記載)。

【特性化モデル】

- 広域の津波特性を考慮した特性化モデルの設定方法(以下、「杉野ほか(2014)の設定方法」という。)※1を用いた。

※1: 特性化モデルの設定方法の詳細は、本資料(p44)に記載。



特性化モデル
(Mw (Mc)=8.65)

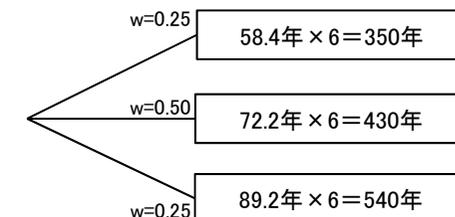
主な断層諸元

断層パラメータ	設定値	備考
モーメントマグニチュード (Mw)	8.65	
断層面積(S)	69,513 (km ²)	
平均応力降下量($\Delta\sigma$)	1.57MPa	Murotani et al.(2013)で示される平均値
地震モーメント(Mo)	1.18×10^{22} (Nm)	
すべり量	平均すべり量(D)	3.40 (m)
	大すべり域(1.4D)	4.76 (m)
	超大すべり域(3D)	10.20 (m)
	背景領域(0.33D)	1.12 (m)

■平均発生間隔※2

- 十勝沖, 根室沖, 色丹島沖, 択捉島沖で発生している各地震の平均発生間隔(72.2年)(地震調査研究推進本部(2004)), 並びに十勝沖の地震と根室沖の地震の連動サイクル(6回に1回連動)(土木学会(2011))を基に, 土木学会(2011)に示される固有地震の平均発生間隔の誤差を考慮して設定した。
- 重み配分については, 土木学会(2011)の正規分布に対する分岐設定方法を用いて設定した。

※2: 地震調査研究推進本部(2017)による平均発生間隔を用いた場合に津波ハザード曲線に与える影響検討の詳細は, 補足説明資料「IV. 4. 地震本部(2017)の知見が津波ハザード曲線に与える影響」に記載。

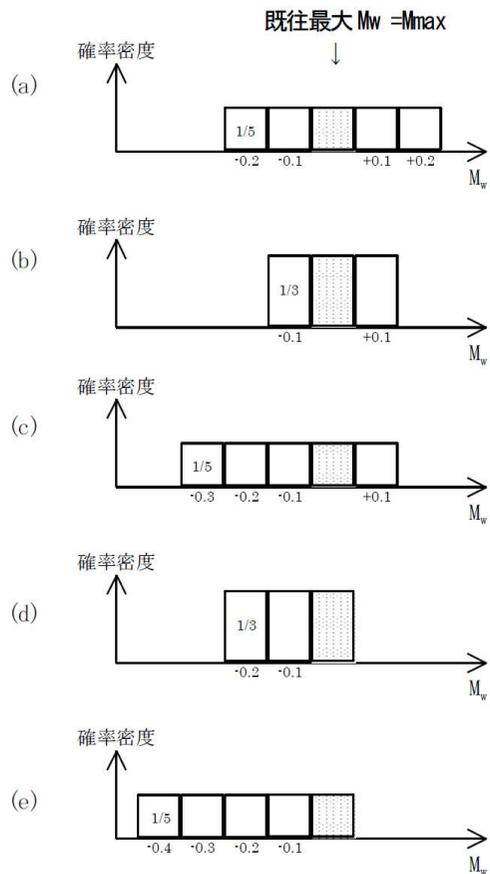


IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.3 十勝沖・根室沖の連動地震: Mwの範囲(1/2)

■中央防災会議(2005)モデル

- 土木学会(2011)を参考に, 中央防災会議(2005)モデルの地震規模(Mw8.6)をMc(中央マグニチュード)とし, Mwの範囲は0.3, 0.5とした。
- 重み配分については, 土木学会(2009)による十勝沖と根室沖の連動地震の重みを準用した。



Mwの範囲の分岐
(土木学会(2009))

十勝沖(KT1)と根室沖(KT2)の連動地震のMwの範囲の重みに関するアンケート結果
(土木学会(2009))

パターン	既往最大との関係	Mwの幅	Mwの範囲 (Mmax=8.6) 下段: すべり量(m)							重み【ご記入ください】
			8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	
			4.2	4.7	5.3	5.9	6.7	7.5	8.4	
a.	既往最大を上回る地震が発生する	0.5								0.35[0.40]
b.		0.3								0.20[0.15]
c.		0.5								0.25[0.20]
d.	既往最大を上回る地震は発生しない	0.3								0.15[0.20]
e.		0.5								0.05[0.05]
特記事項【できるだけご記入ください】									重みの合計 1.0	

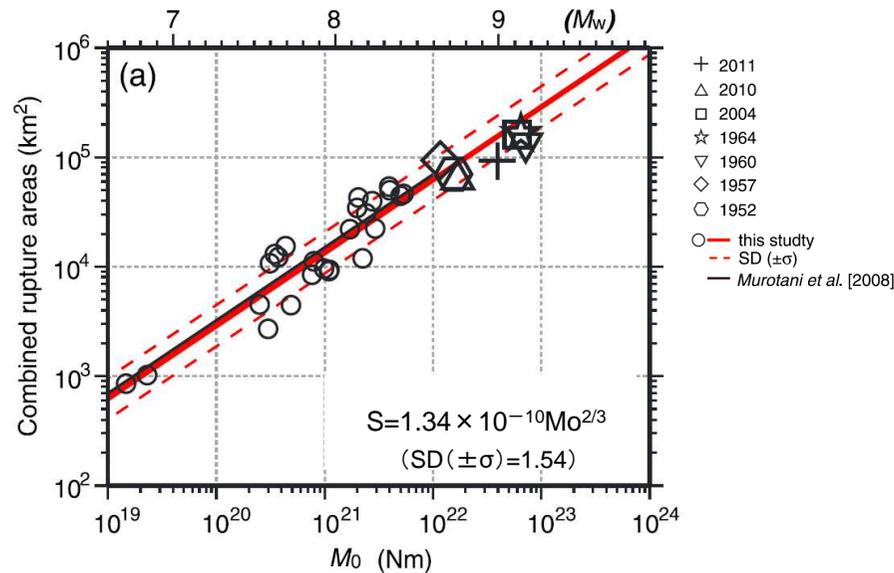
[]内の値はH16年度に実施した同じ設問に対する回答の平均

IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.3 十勝沖・根室沖の連動地震: Mwの範囲(2/2)

■特性化モデル

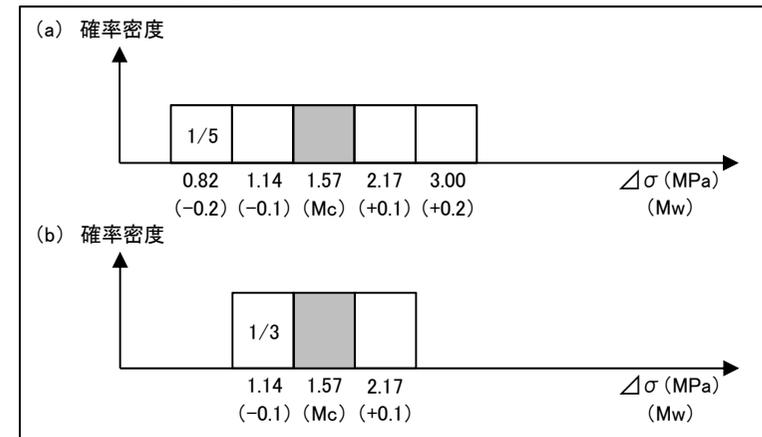
- 土木学会(2016)は, Murotani et al.(2013)のスケーリング則による応力降下量の平均値1.57MPaに, ばらつきとして±1σを考慮した場合の応力降下量の範囲は0.82~3.00MPa, ±0.5σを考慮した場合は1.14~2.17MPaであり, Mwの範囲としてそれぞれMw±0.2, Mw±0.1となるが, これは土木学会(2011)で採用しているMwの範囲にほぼ相当するため, ロジックツリーの分岐として考えることができるとしている。また, Murotani et al.(2013)の関係から応力降下量3.0MPaは, パラメータの標準偏差の範囲で上限的な応力降下量であるとしている。
- 以上から, 応力降下量の範囲(Mwの範囲)の分岐を以下のとおり設定し, 重み配分については均等配分とした。



平均応力降下量 $\Delta\sigma = 1.57\text{MPa}$
 $S+1\sigma$ 時の平均応力降下量 $\Delta\sigma = 0.82\text{MPa}$
 $S-1\sigma$ 時の平均応力降下量 $\Delta\sigma = 3.00\text{MPa}$
 $S+0.5\sigma$ 時の平均応力降下量 $\Delta\sigma = 1.14\text{MPa}$
 $S-0.5\sigma$ 時の平均応力降下量 $\Delta\sigma = 2.17\text{MPa}$

破壊領域(S)とMoの関係
(Murotani et al.(2013))

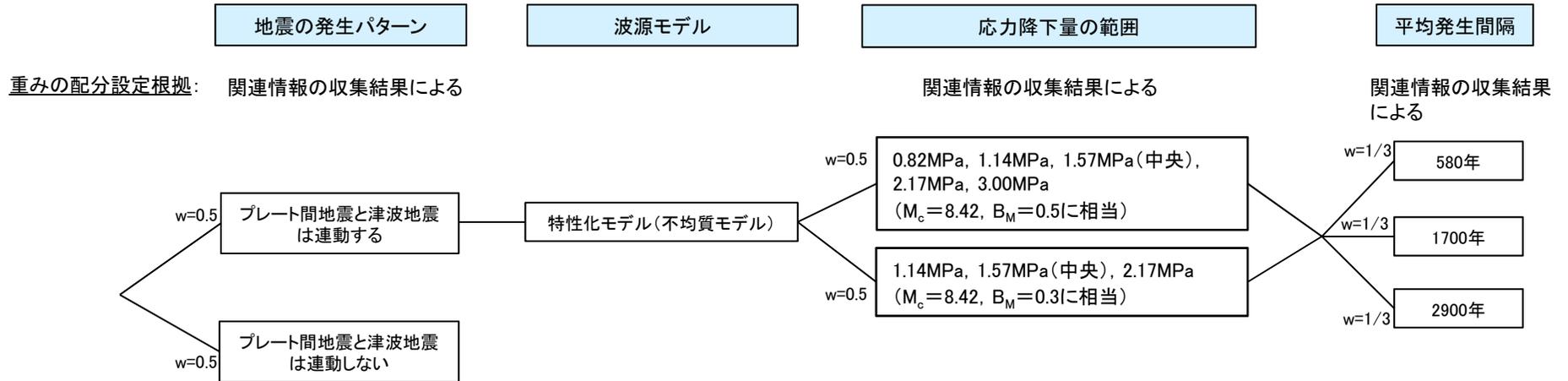
【応力降下量の範囲】



IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.4 三陸沖北部の連動地震:ロジックツリー

: 土木学会(2011)からの変更箇所



IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

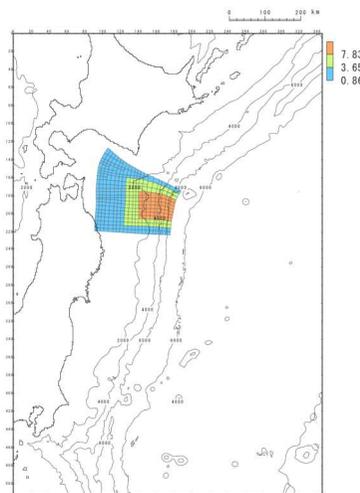
2. 4 三陸沖北部の連動地震: 地震の発生パターン, 波源モデル, 応力降下量の範囲, 平均発生間隔

■地震の発生パターン

- 本領域では、プレート間地震と津波地震の連動地震が発生した記録が無いことを踏まえ、地震発生様式に関する分岐(=プレート間地震と津波地震は連動する/連動しない)を追加設定した。
- 重み配分については、現時点の知見で判断するのは困難であることから、均等配分とした。

■波源モデル

- 十勝沖・根室沖の連動地震と同様に、杉野ほか(2014)の設定方法を用いた。



特性化モデル
($M_w(M_c)=8.42$)

主な断層諸元

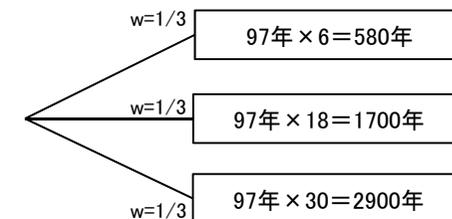
断層パラメータ	設定値	備考
モーメントマグニチュード (M_w)	8.42	
断層面積 (S)	40,959 (km ²)	
平均応力降下量 ($\Delta\sigma$)	1.57MPa	Murotani et al.(2013)で示される平均値
地震モーメント (M_0)	5.43×10^{21} (Nm)	
すべり量	平均すべり量 (D)	2.61 (m)
	大すべり域 (1.4D)	3.65 (m)
	超大すべり域 (3D)	7.83 (m)
	背景領域 (0.33D)	0.86 (m)

■応力降下量の範囲

- 十勝沖・根室沖の連動地震と同様の考え方で分岐・重みを設定した。

■平均発生間隔

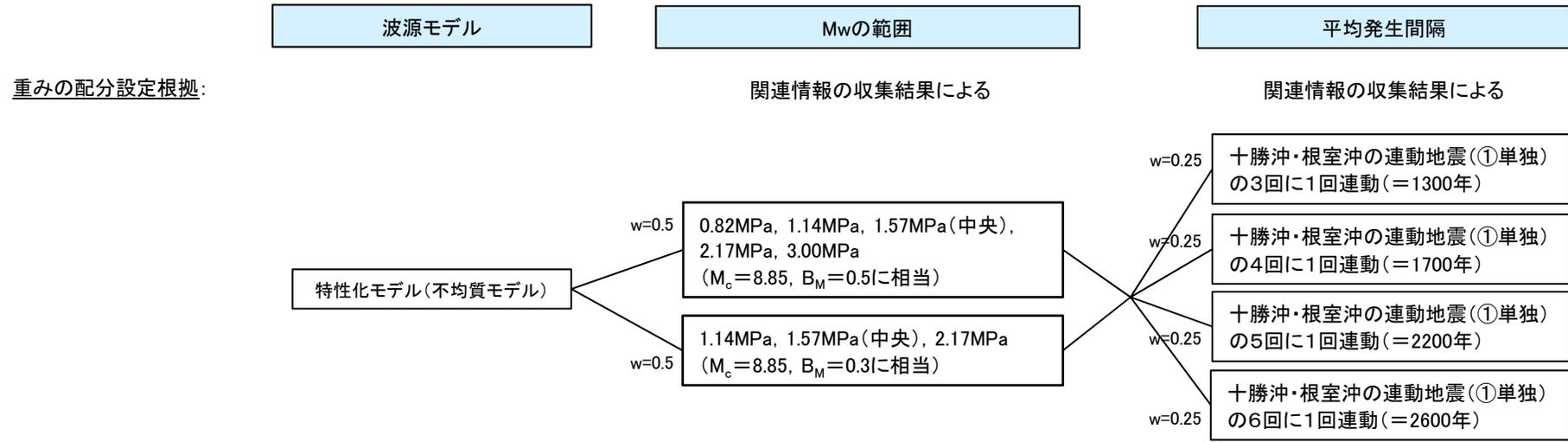
- 本領域では、プレート間地震と津波地震の連動地震が発生した記録がないことを踏まえ、東北地方太平洋沖型の地震の平均発生間隔(600年)を参考として、プレート間地震(1677年, 1763年, 1856年, 1968年)の平均発生間隔(97年)の6回に1回(600年間隔に相当), 18回に1回(1800年間隔に相当), 30回に1回(3000年間隔に相当)発生するとした。
- 重み配分については、現時点の知見で判断するのは困難であることから、均等配分とした。



IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.5 十勝沖・根室沖から三陸沖北部の連動地震:ロジックツリー

□ : 土木学会(2011)からの変更箇所

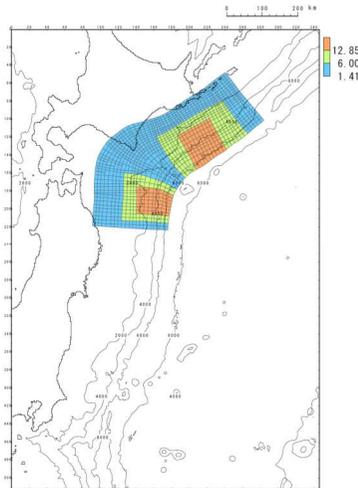


IV. 年超過確率の参照 2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.5 十勝沖・根室沖から三陸沖北部の連動地震: 波源モデル, 応力降下量の範囲, 平均発生間隔

■波源モデル

- 十勝沖・根室沖の連動地震と同様に, 杉野ほか(2014)の設定方法を用いた。



特性化モデル
($M_w(M_c)=8.85$)

主な断層諸元

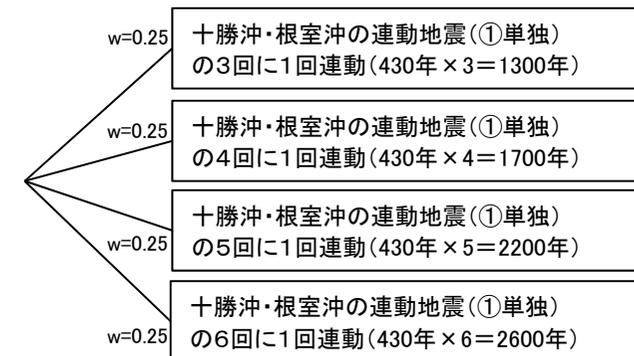
断層パラメータ	設定値	備考
モーメントマグニチュード (M_w)	8.85	
断層面積 (S)	110,472 (km^2)	
平均応力降下量 ($\Delta\sigma$)	1.57MPa	Murotani et al.(2013)で示される平均値
地震モーメント (M_0)	2.37×10^{22} (Nm)	
すべり量	平均すべり量 (D)	4.28 (m)
	大すべり域 (1.4D)	6.00 (m)
	超大すべり域 (3D)	12.85 (m)
	背景領域 (0.33D)	1.41 (m)

■応力降下量の範囲

- 十勝沖・根室沖の連動地震と同様の考え方で分岐・重みを設定した。

■平均発生間隔

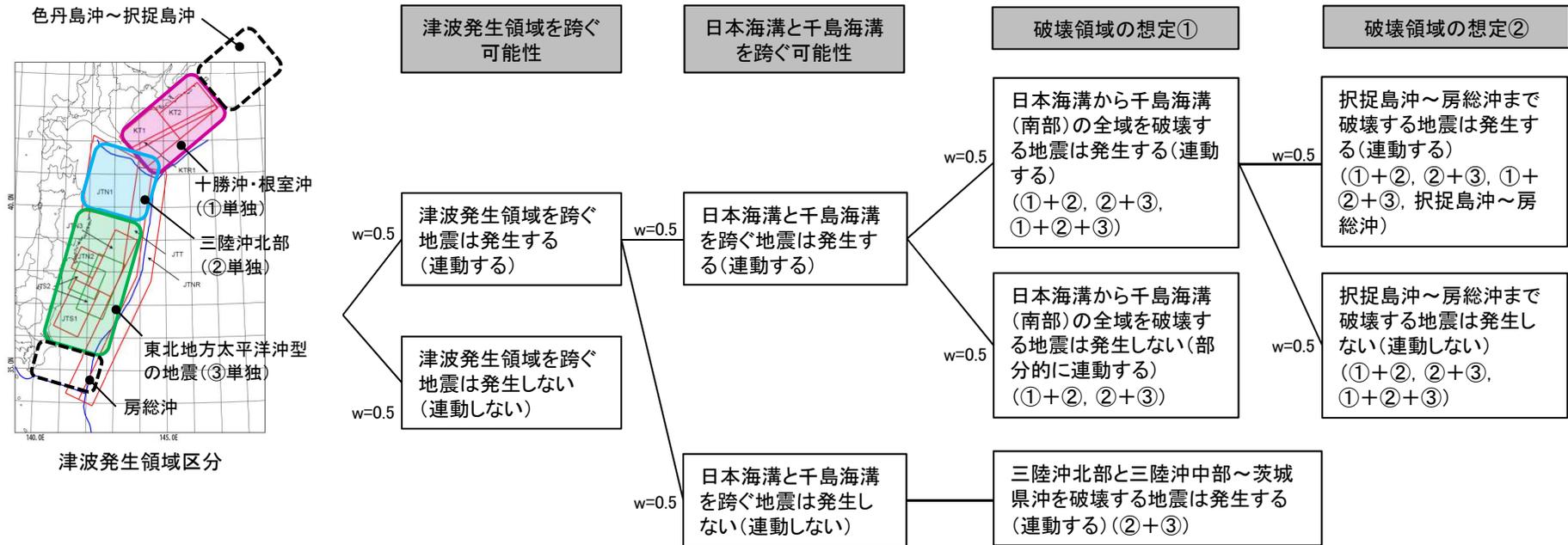
- 領域を跨ぐ連動地震が発生した記録・知見がないことを踏まえ, 以下の国内外の地震の連動サイクルを踏まえ, 十勝沖・根室沖の連動地震の平均発生間隔を基に設定した。
 - ✓ 南米チリの地震: 3回に1回連動
 - ✓ 十勝沖・根室沖の連動地震: 6回に1回連動
 - ✓ 宮城県沖と三陸沖南部海溝寄りの連動地震(1793年の地震): 5回に1回連動
- 重み配分については, 現時点の知見で判断するのは困難であることから, 均等配分とした。



2.6 地震の組合せに関するロジックツリー

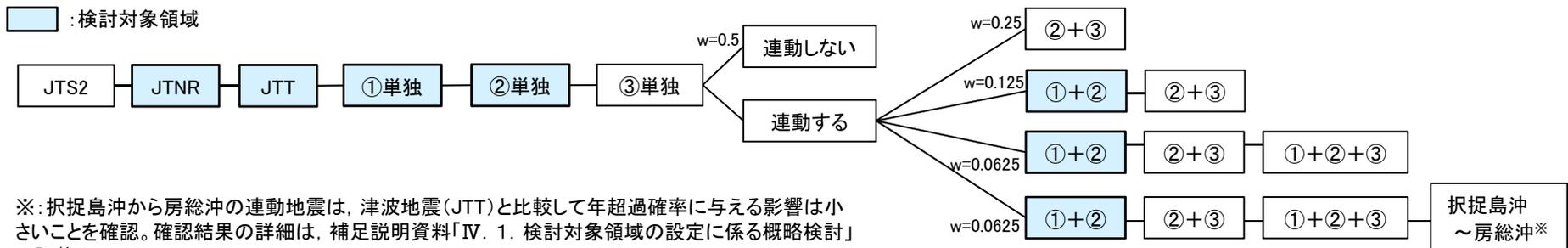
■津波発生領域の連動パターン

- 3.11地震から得られた知見を踏まえ、これまで発生した記録、知見がない津波発生領域(セグメント)の連動を考慮した地震を評価することから、各連動地震の発生確率に関する重み付けを行うため、以下のとおり、連動パターンを考慮した。
- 各分岐の重み配分については、現時点の知見で判断するのは困難であることから、均等配分とした。



■地震の組合せに関するロジックツリー

- 上記に基づき設定したロジックツリーを以下に示す。



※: 択捉島沖から房総沖の連動地震は、津波地震(JTT)と比較して年超過確率に与える影響は小さいことを確認。確認結果の詳細は、補足説明資料「IV. 1. 検査対象領域の設定に係る概略検討」に記載。

IV. 年超過確率の参照

1. 評価概要
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)
3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的な不確実さの考慮)
 - 3.1 津波高さ推定に関するロジックツリー
 - 3.2 誤差の対数標準偏差(β)等に関する分岐設定
4. 評価結果

IV. 年超過確率の参照 3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確実さの考慮)

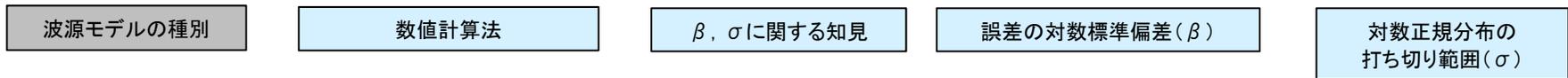
3.1 津波高さ推定に関するロジックツリー

- 偶然的不確実さ要因は、日本原子力学会(2012)、土木学会(2011)及び土木学会(2016)^{※1}を踏まえて、津波高さ推定に関するロジックツリーとして設定した^{※2}。

※1:土木学会(2016)のロジックツリーの詳細は、補足説明資料「IV. 5. 1 土木学会(2016)のロジックツリー」に記載。

※2:誤差の対数標準偏差に関する3.11地震から得られた知見、矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差等の分岐設定に係る検討の詳細は、補足説明資料「IV. 5. 2 誤差の対数標準偏差に関する3.11地震から得られた知見、5. 3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差等の分岐設定」に記載。

□ : 土木学会(2011)からの変更箇所

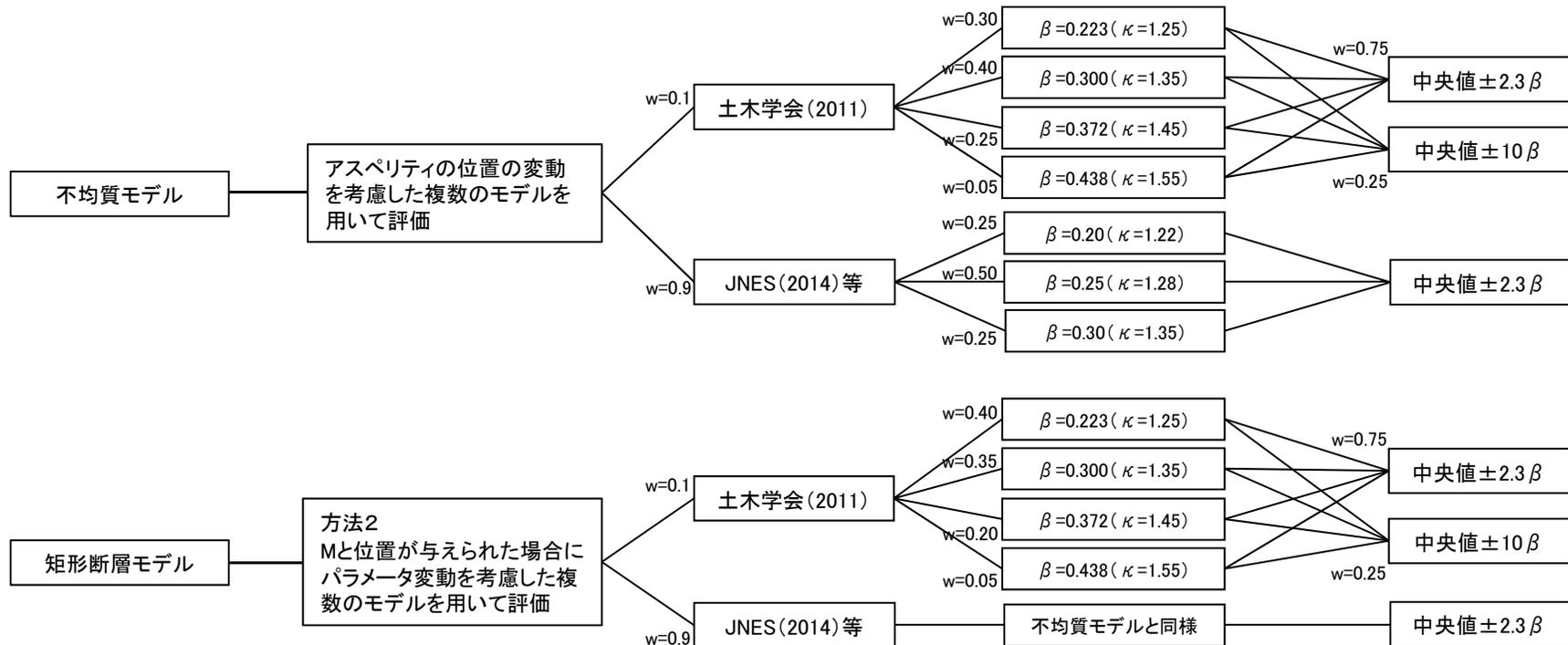


重みの配分設定根拠:

関連情報の収集結果による

土木学会(2011):土木学会(2009)による
JNES(2014)等:関連情報の収集結果による

土木学会(2009)による



IV. 年超過確率の参照 3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.2 誤差の対数標準偏差(β)等に関する分岐設定

- 誤差の対数標準偏差(β)に関する3.11地震から得られた知見の評価への反映について、評価に用いる解析条件等は、下表のとおり、JNES(2014)等にも示される設定方法を反映する条件を満足すると考えられることから、同知見を評価に反映した^{※1}。なお、杉野ほか(2014)の検討は、Mw8.9以上の巨大地震に分類される3.11地震の1ケースのみであり、これ以外の地震規模についても同様の検証が必要と考えられることから、土木学会(2011)の設定方法も分岐として考慮した^{※2}。
- β , σ に関する知見に関する分岐の重み配分については、重み配分設定方法(p141)に基づき、土木学会(2011)の重みを0.1、JNES(2014)等の重みを0.9とした。また、JNES(2014)等の β に関する分岐の重み配分については、土木学会(2011)の正規分布に対する分岐設定方法を用いた^{※2}。

※1: 誤差の対数標準偏差(β)に関する3.11地震から得られた知見の収集結果、矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差(β)等の分岐設定に係る検討の詳細は、補足説明資料「IV. 5. 2 誤差の対数標準偏差に関する3.11地震から得られた知見, 5. 3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差等の分岐設定」に記載。

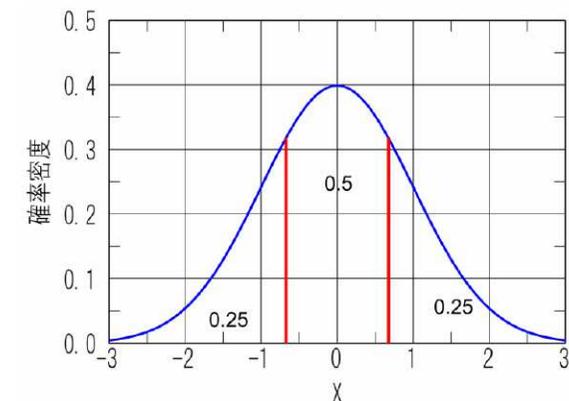
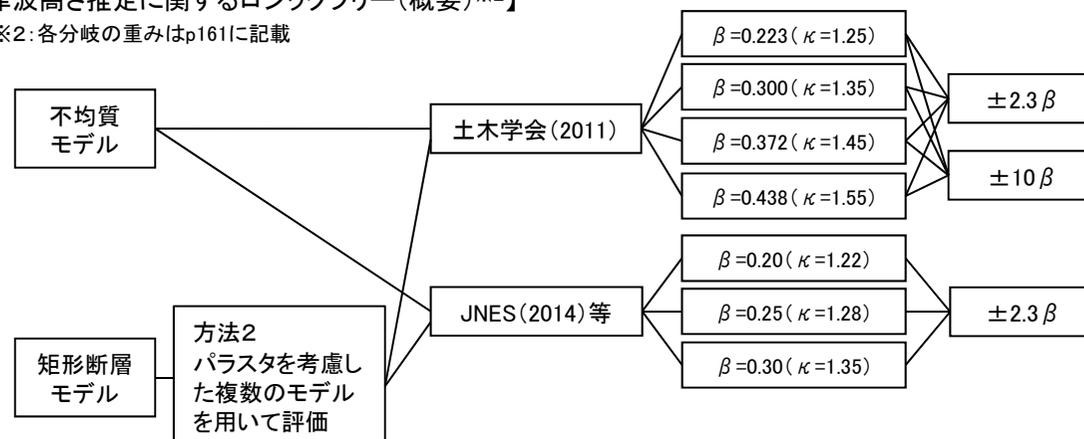
※2: 専門家意見聴取結果を踏まえてロジックツリー、重み配分を設定した。意見聴取結果の詳細は、補足説明資料「IV. 5. 4 専門家意見聴取結果」に記載。

【津波ハザード評価の解析条件等】

項目		設定内容
最小空間格子間隔		<ul style="list-style-type: none"> 5m(2500/486)。 発電所周辺及び津波の周期特性に関する検討から、計算水位に複雑な地形の影響が適切に考慮されていることを確認。
計算条件		各津波の再現解析により妥当性を確認。
津波波源モデル	特性化モデル	広域の津波特性を考慮できる杉野ほか(2014)を踏まえて設定。
	矩形断層モデル	既往津波の再現解析、土木学会(2009)の評価内容から、波源特性のばらつき($\beta_{波源}$)は、矩形断層モデルと不均質モデルで有意な差は無いことを確認。

【津波高さ推定に関するロジックツリー(概要)^{※2}】

※2: 各分岐の重みはp161に記載



正規分布に対する分岐設定方法
(土木学会(2011))

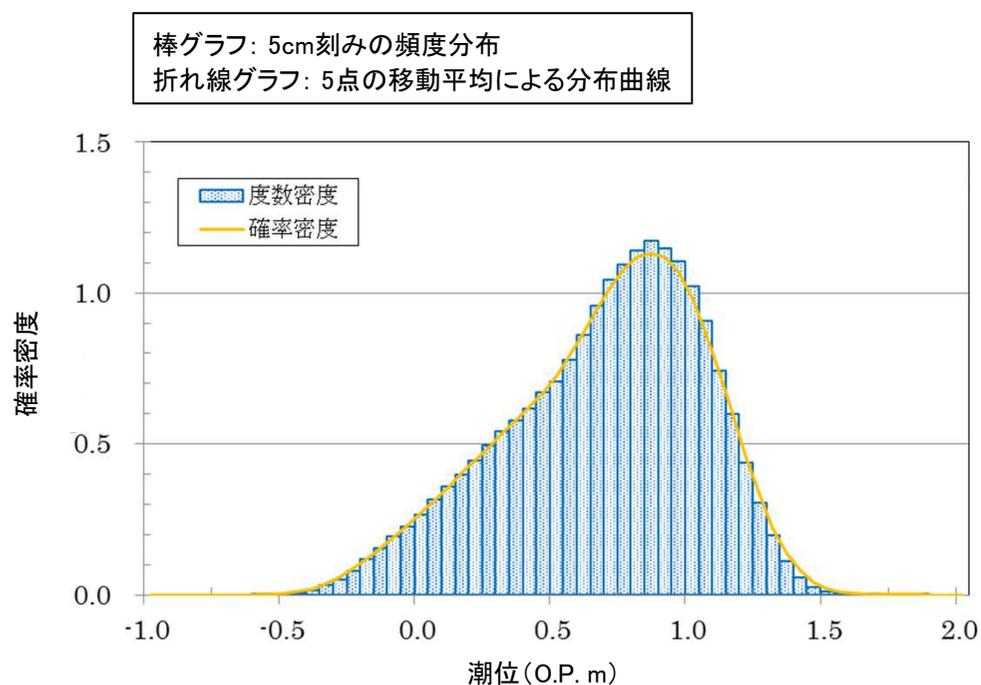
IV. 年超過確率の参照

1. 評価概要
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)
3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的な不確実さの考慮)
4. 評価結果
 - 4.1 津波ハザード曲線の評価概要
 - 4.2 年超過確率の参照

IV. 年超過確率の参照 4. 評価結果

4.1 津波ハザード曲線の評価概要

- 津波ハザード曲線は、津波発生領域毎に計算した全分岐に対するハザード曲線を組合せる際、モンテカルロ手法により5,000本のサンプルを抽出して算定した。
- 潮位の確率密度分布については、敷地南方約11kmに位置する気象庁鮎川検潮所における1970年～2010年の観測記録を用いて算定した。



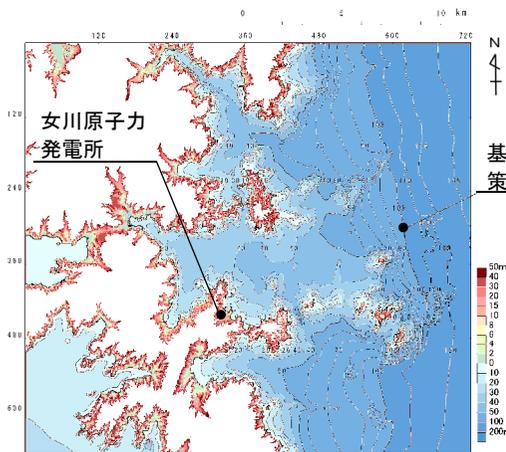
潮位の確率密度分布

IV. 年超過確率の参照 4. 評価結果

4. 2 年超過確率の参照

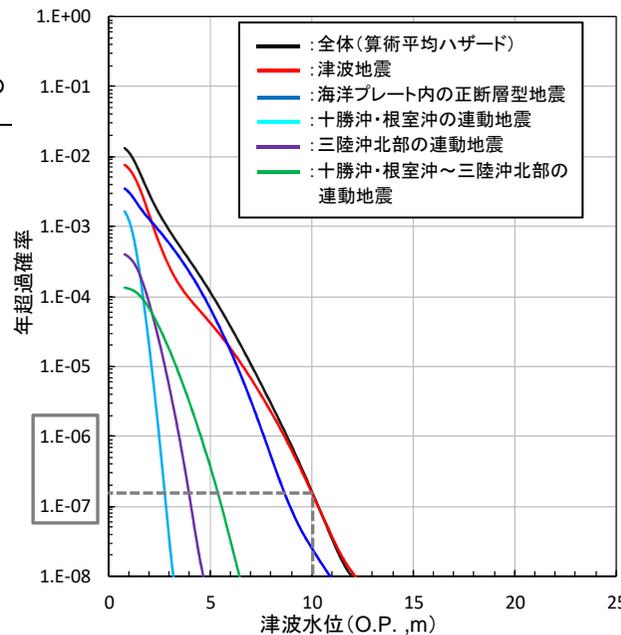
- 基準津波の年超過確率は、水位上昇側で $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 程度、水位下降側で $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度である※。

※：敷地前面(水位上昇側)、2号取水口前面(水位下降側)における津波ハザード評価結果は、補足説明資料「IV. 6. 敷地前面, 2号取水口前面における津波ハザード評価結果」に記載。



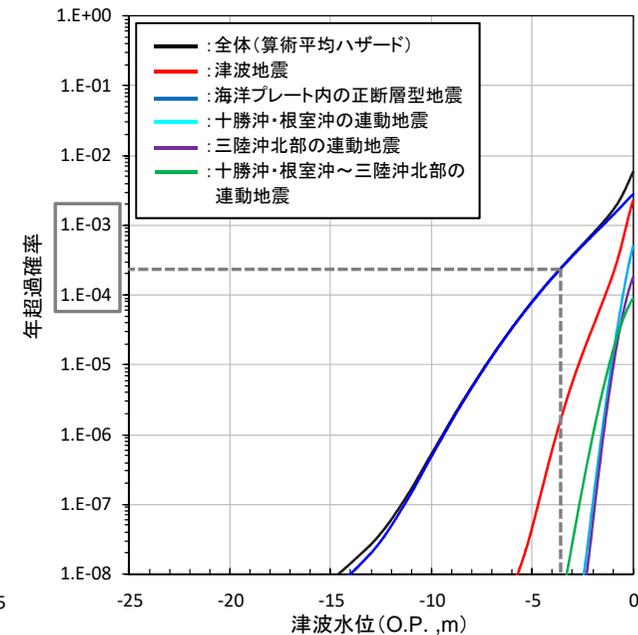
基準津波の策定位置

■ 水位上昇側



	津波水位
基準津波 (水位上昇側)	O.P.+10.1m

■ 水位下降側



	津波水位
基準津波 (水位下降側)	O.P.-3.5m

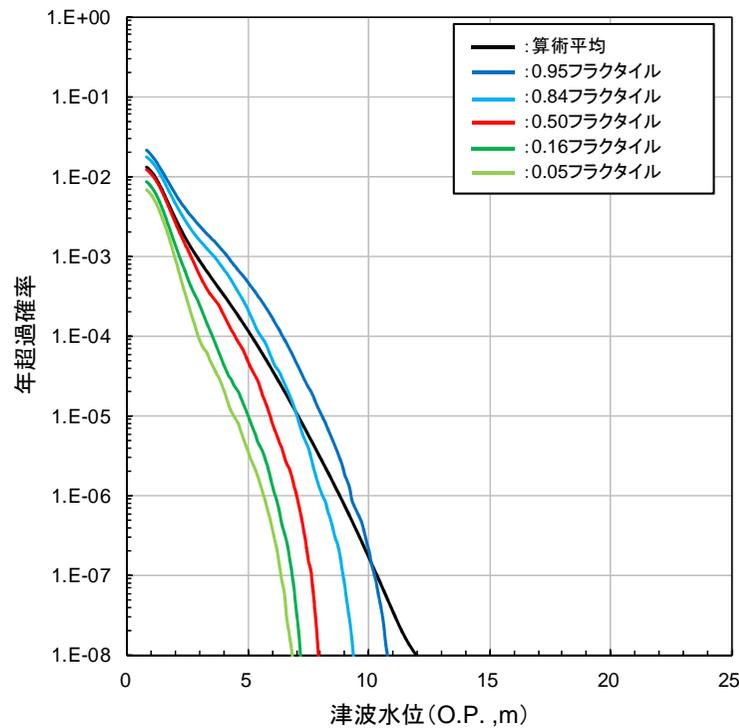
IV. 年超過確率の参照 4. 評価結果

4. 2 年超過確率の参照: フラクタイルハザード曲線

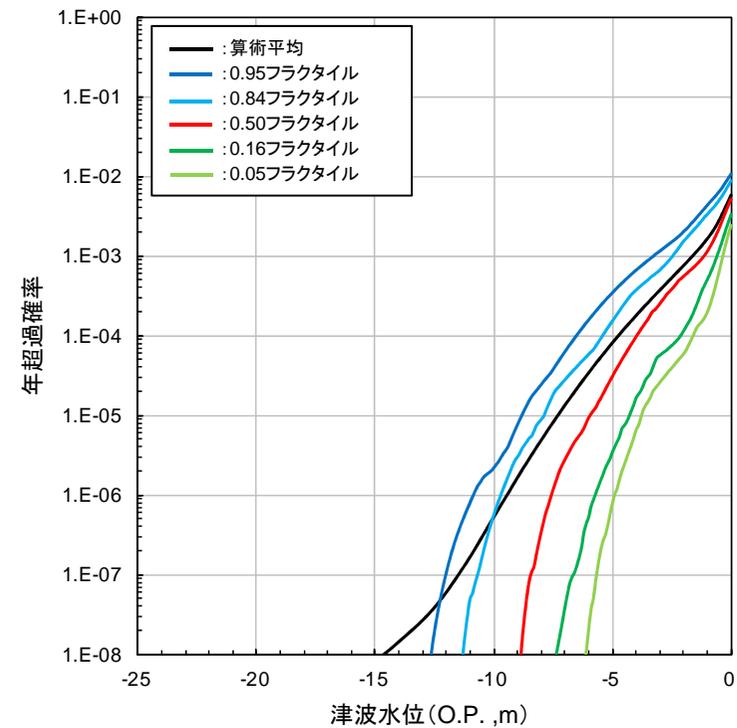
- 水位上昇側, 水位下降側のフラクタイルハザード曲線を以下に示す※。

※: 敷地前面(水位上昇側), 2号取水口前面(水位下降側)における津波ハザード評価結果は, 補足説明資料「IV. 6. 敷地前面, 2号取水口前面における津波ハザード評価結果」に記載。

■ 水位上昇側



■ 水位下降側



V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価)

1. 評価方針
2. 海底地形変化
3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価)

1. 評価方針
2. 海底地形変化
3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

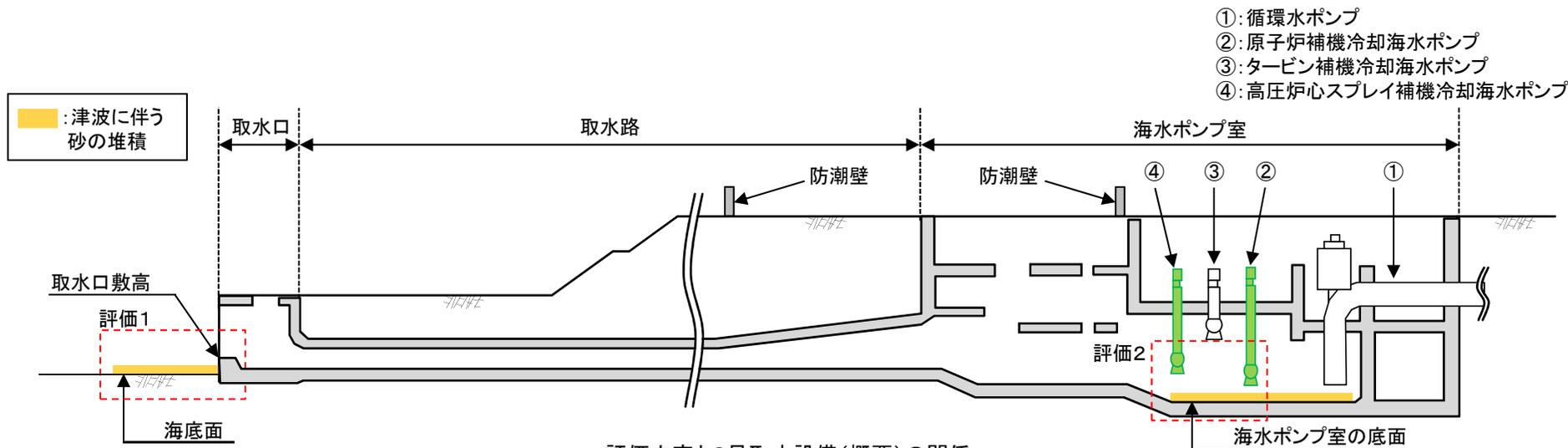
1. 評価方針

■海底地形変化(評価1)

- 基準津波に伴う砂移動(海底地形変化)を評価して、2号取水口前面の砂の堆積高さが取水口高さを上回らず(取水口敷高に到達せず)、非常用海水ポンプの取水に影響が無いことを確認する。
- 砂移動解析は、藤井ほか(1998)及び高橋ほか(1999)の手法を用いて実施する。

■海水ポンプ室内における砂の堆積(評価2)

- 2号海水ポンプ室内における砂の堆積高さを評価して、非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さが海水ポンプの高さを上回らず(海水ポンプの下端に到達せず)、非常用海水ポンプの取水に影響が無いことを確認する。
- 砂の堆積高さは、2号取水設備を1次元的にモデル化し、高橋ほか(1999)の手法を用いて算定する。
- なお、本検討は、海底地形変化の検討(評価1)において、取水口前面の砂の堆積高さが最も大きいケースを対象に実施する。



評価内容と2号取水設備(概要)の関係

取水口高さ, 非常用海水ポンプの高さ

		設定値	備考			
取水口高さ		1.20m	取水口敷高: O.P.-6.3m, 海底面: O.P.-7.5m			
非常用海水ポンプの高さ	原子炉補機冷却海水ポンプ	1.15m	海水ポンプの取水可能水位	O.P.-11.25m	海水ポンプ室の底面	O.P.-12.4m
	高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ	2.45m		O.P.-9.95m		

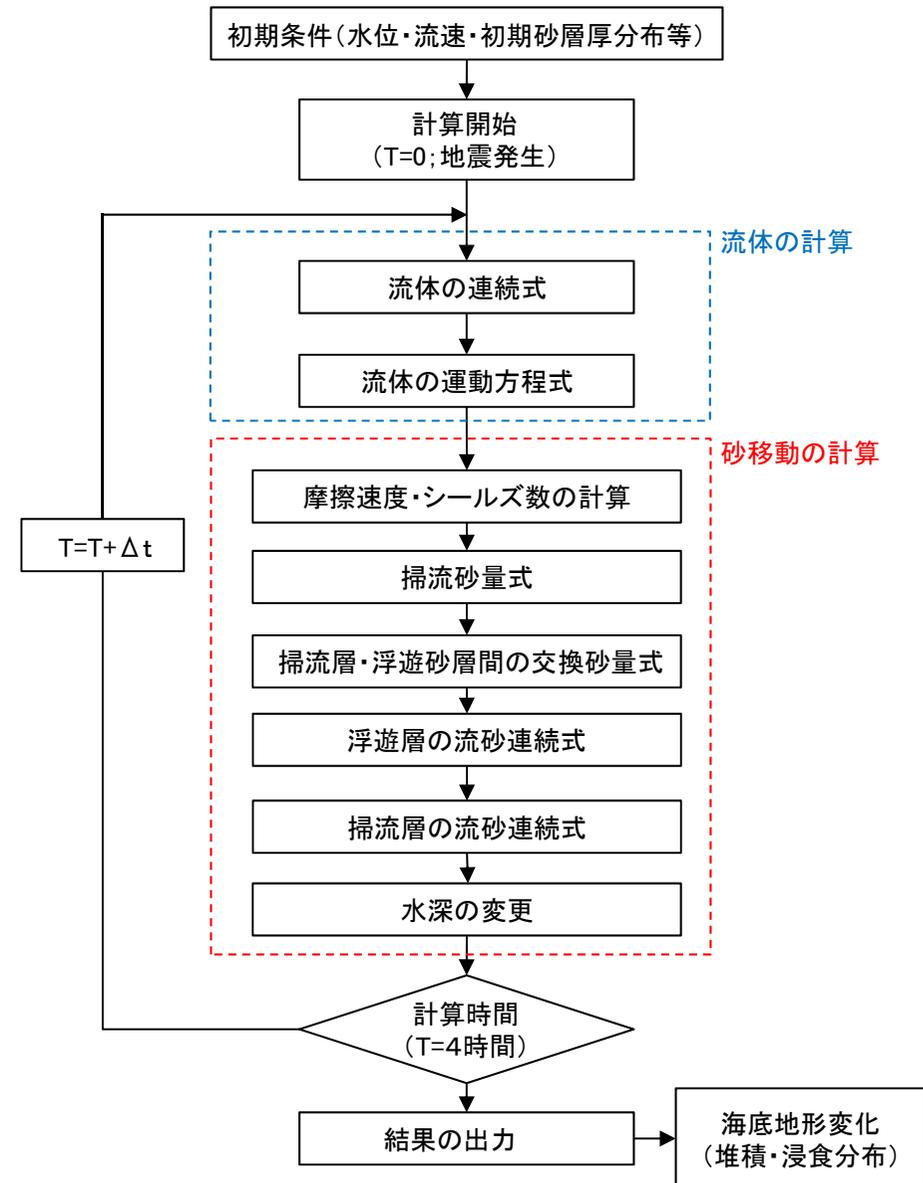
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価)

1. 評価方針
2. 海底地形変化
 - 2.1 評価概要
 - 2.2 計算条件
 - 2.3 評価結果
3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化

2.1 評価概要

- 藤井ほか(1998)及び高橋ほか(1999)の手法を用いて, 基準津波(水位上昇側・水位下降側)に伴う海底地形変化を評価した。
- 計算フローを右図に示す。

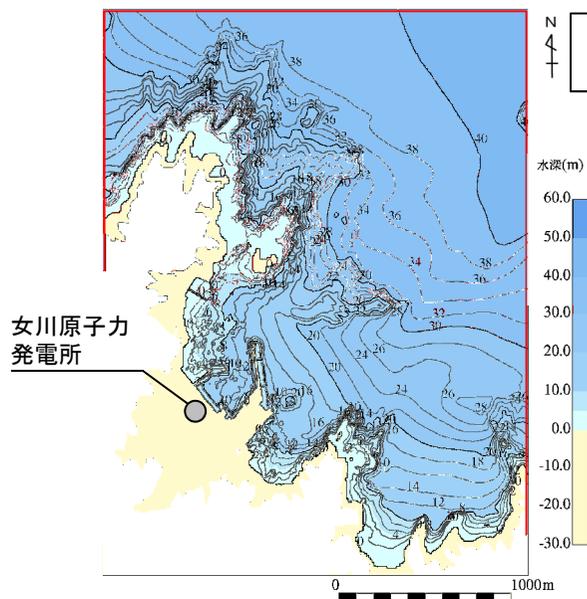


2.2 計算条件:流体

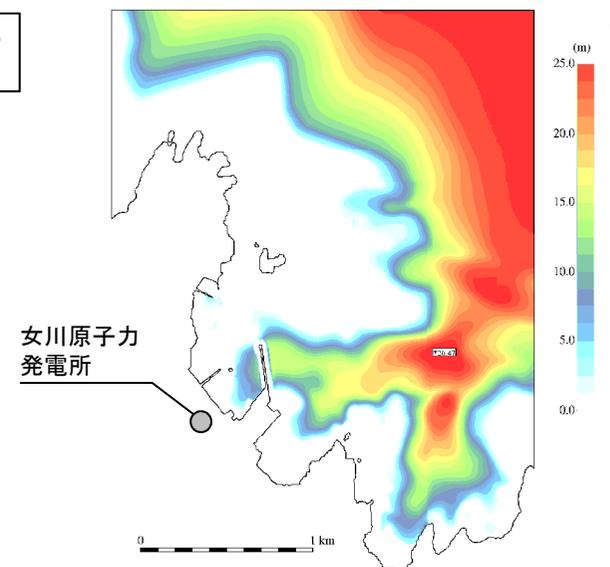
- 下記の計算条件に基づき流体の計算を実施した。

主な計算条件

項目	設定値
砂移動モデル	藤井ほか(1998), 高橋ほか(1999)
空間格子間隔 Δs	5m(2500/486)
時間格子間隔 Δt	0.05秒
沖側境界条件	<ul style="list-style-type: none"> 基準津波の数値シミュレーションで得られる水位及び線流量を境界条件として入力 解析領域境界での砂の流入出を考慮
陸側境界条件	小谷ほか(1998)の遡上境界条件
海底摩擦	マニングの粗度係数 $n = 0.03\text{m}^{-1/3\text{s}}$
潮位条件	T.P.±0.0
計算時間	地震発生後4時間



計算領域の水深と沖側境界条件の設定位置



初期砂層厚分布※

※: 当社調査による基盤等深線図(1980.9), 深浅測量図(2011.5)を基に作成

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化
2.2 計算条件:砂移動

- 各評価手法の計算条件を以下に示す。
- 砂の密度・粒径, 各評価手法に用いた浮遊砂濃度上限値の詳細は, 次頁以降に示す。

計算条件

項目	藤井ほか(1998)の手法	高橋ほか(1999)の手法
地盤高の連続式	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \alpha \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{E-S}{\sigma(1-\lambda)} = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{E-S}{\sigma} \right) = 0$
浮遊砂濃度連続式	$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} - \frac{E-S}{D} = 0$	$\frac{\partial(C_s D)}{\partial t} + \frac{\partial(MC_s)}{\partial x} - \frac{E-S}{\sigma} = 0$
流砂量式	小林ほか(1996)の実験式 $Q = 80 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$	高橋ほか(1999)の実験式 $Q = 21 \tau_*^{1.5} \sqrt{sgd^3}$
巻き上げ量の算定式	$E = \frac{(1-\alpha)Qw^2\sigma(1-\lambda)}{Uk_z \left[1 - \exp\left\{ \frac{-wD}{k_z} \right\} \right]}$	高橋ほか(1999)の実験式 $E = 0.012 \tau_*^2 \sqrt{sgd} \cdot \sigma$
沈降量の算定式	$S = wC_b$	$S = wC_s \cdot \sigma$
摩擦速度の計算式	log-wake則を鉛直方向に積分した式より算出	マンング則より算出 $u_* = \sqrt{gn^2 U^2 / D^{1/3}}$

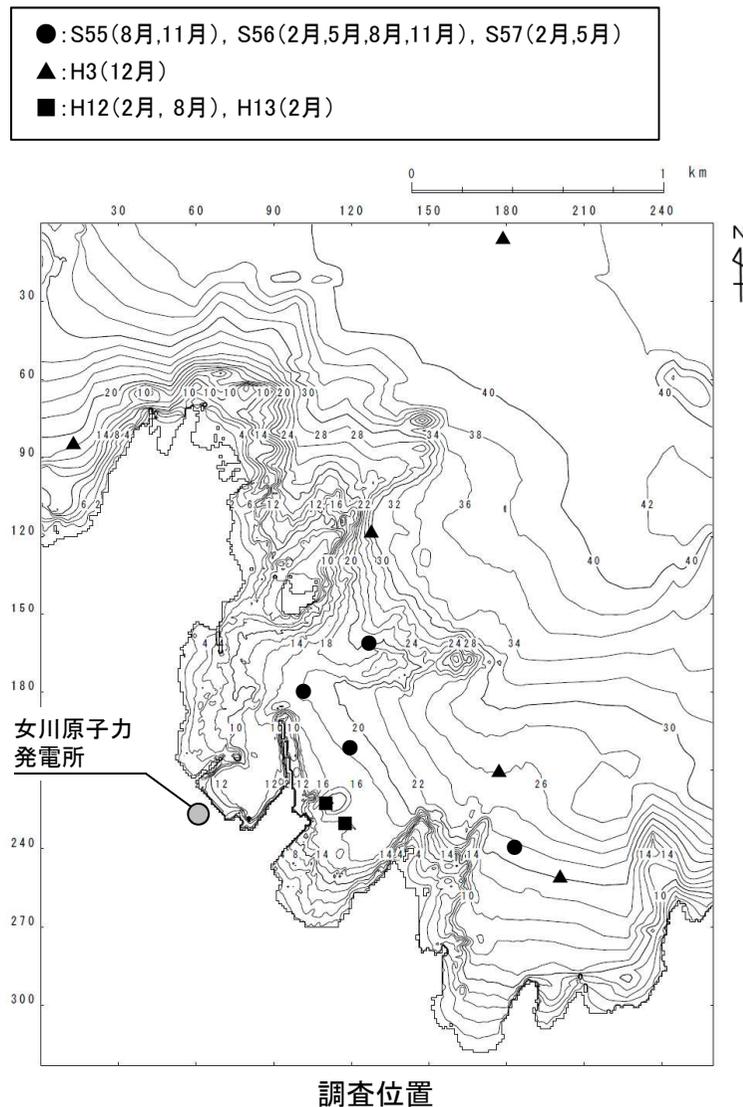
ここに,

- Z:水深変化量(m) t:時間(s) x:平面座標 τ_* :シールズ数 g:重力加速度(m/s²)
 Q:単位幅,単位時間当たりの掃流砂量 (m³/s/m) ρ :海水の密度(=1,030kg/m³, 一般値) σ :砂の密度(=2,716kg/m³, 調査結果より)
 d:砂の粒径(=2.15 × 10⁻⁴m(中央粒径), 調査結果より) λ :空隙率(=0.4, 藤井ほか(1998) 他より) s := $\sigma / \rho - 1$
 U:流速(m/s) D:全水深(m) M:U × D(m²/s) n:マンングの粗度係数(=0.03m^{-1/3}s, 土木学会(2016) より)
 α :局所的な外力のみに移動を支配される成分が全流砂量に占める比率(=0.1, 藤井ほか(1998) より) w:土粒子の沈降速度(Rubey式より算出)(m/s)
 Z₀:粗度高さ(=ks/30)(m) k_z:鉛直拡散係数(=0.2ku_{*}h, 藤井ほか(1998) より)(m²/s) ks:相当粗度(=(7.66ng^{1/2})⁶)(m) h:水深(m)
 κ :カルマン定数(=0.4, 藤井ほか(1998) より) C_s:浮遊砂体積濃度(浮遊砂濃度連続式より算出) u_{*}:摩擦速度(m/s)
 C, C_b:浮遊砂濃度, 底面浮遊砂濃度(浮遊砂濃度連続式より算出) (kg/m³)
 log-wake則:対数則 $u_* / U = \kappa / \{ \ln(h/Z_0) - 1 \}$ にwake関数(藤井ほか(1998)より)を付加した式

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化

2.2 計算条件:砂の密度, 粒径

- ・ 発電所周辺で実施した調査結果に基づき, 砂の密度, 粒径(中央粒径)を設定した。



■調査結果

調査年月	密度: ρ (g/cm ³)	中央粒径: D_{50} (mm)
S55.8	2.698	0.190
S55.11	2.706	0.200
S56.2	2.706	0.163
S56.5	2.699	0.195
S56.8	2.709	0.223
S56.11	2.696	0.240
S57.2	2.699	0.170
S57.5	2.714	0.320
H3.12	2.708	0.179
H12.2	2.703	0.179
H12.8	2.741	0.156
H13.2	2.810	0.368

■設定値※

	密度: ρ (g/cm ³)	中央粒径: D_{50} (mm)
設定値	2.716	0.215

※:各年の調査結果の平均値

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化

2.2 計算条件:浮遊砂濃度上限値

■基本方針

- 藤井ほか(1998)の手法では, 1%, 5%に設定した。
- 高橋ほか(1999)の手法では, 浮遊砂濃度上限値に関する文献調査^{※1}, 並びに発電所周辺における3.11地震津波による砂移動の再現解析^{※2}を踏まえ1%に設定した。

※1:高橋ほか(1999)の適用範囲と浮遊砂濃度上限, 高橋ほか(1999)と高橋ほか(2011)の掃流砂量・巻き上げ量の比較内容の詳細は, 補足説明資料「V. 1. 高橋ほか(1999)の手法に関する補足資料」に記載。

※2:発電所周辺における3.11地震津波による砂移動の再現解析結果の詳細は, 補足説明資料「V. 2. 3.11地震津波に伴う砂移動の再現解析」に記載。

2.3 評価結果

- 2号取水口前面における砂の堆積高さは最大で0.3m程度であり、取水口高さを上回らない。
- 以上から、非常用海水ポンプの取水への影響は無いことを確認した。
- 各検討ケースの最大堆積厚分布、4時間後の海底地形変化量分布及び2号取水口前面における海底地形変化量等の時刻歴データを次頁以降に示す。なお、高橋ほか(1999)の手法による解析結果については、最大シールズ数の空間分布も合わせて示す*。

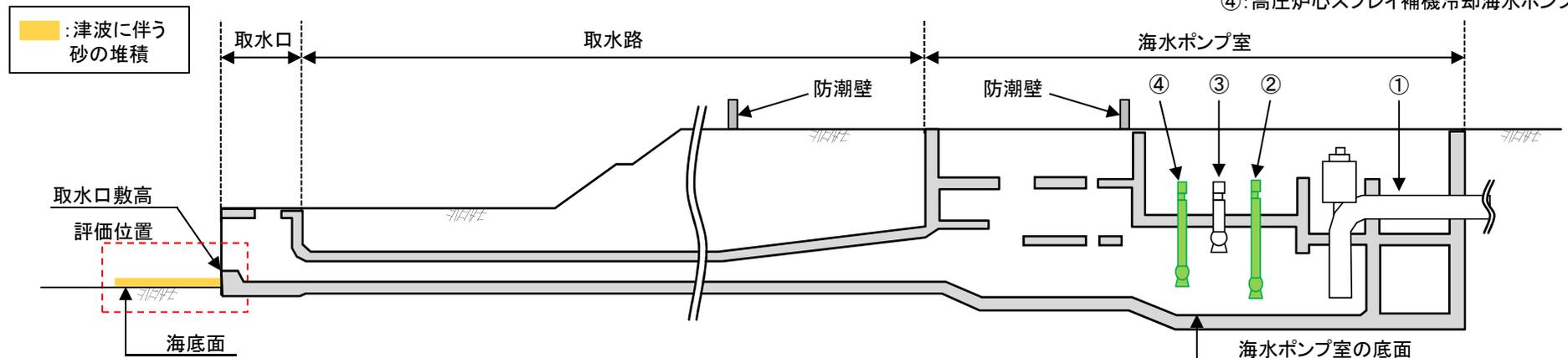
※:高橋ほか(1999)の手法による解析結果のうち水位、浮遊砂体積濃度のスナップショットについては、補足説明資料「V. 3. 高橋ほか(1999)による水位及び浮遊砂体積濃度のスナップショット」に記載。

評価結果

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度 上限値	2号取水口前面における 砂の堆積高さ(m)	取水口高さ (m)
水位上昇側	藤井ほか(1998)	1%	0.04	1.20*
	高橋ほか(1999)	5%	0.04	
水位下降側	高橋ほか(1999)	1%	<u>0.22</u>	
	藤井ほか(1998)	1%	0.04	
	藤井ほか(1998)	5%	0.04	
	高橋ほか(1999)	1%	0.18	

※:取水口敷高:O.P.-6.3m, 海底面:O.P.-7.5m

- ①:循環水ポンプ
- ②:原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③:タービン補機冷却海水ポンプ
- ④:高圧炉心スプレー補機冷却海水ポンプ

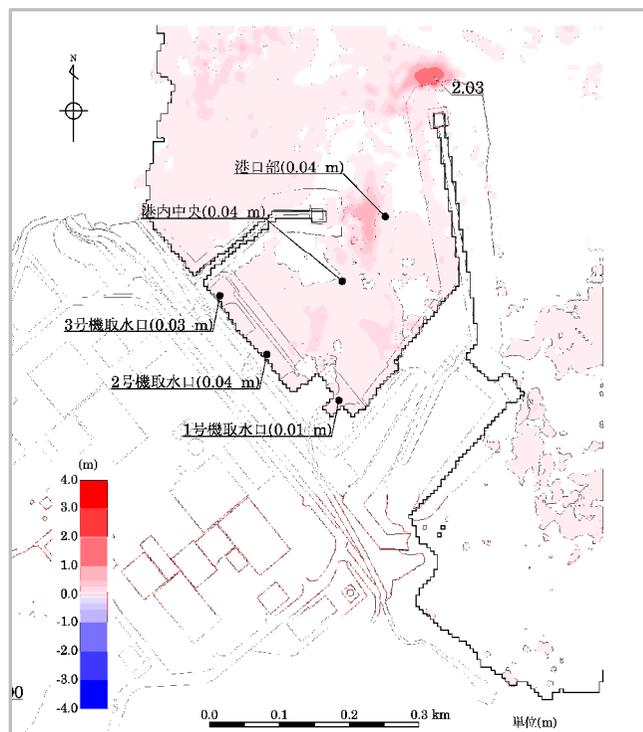


評価内容と2号取水設備(概要)の関係

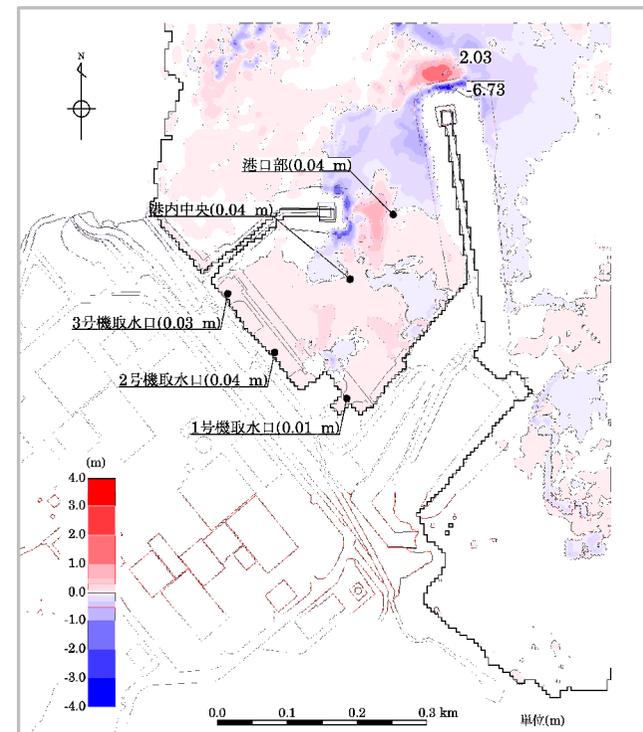
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化
2.3 評価結果:基準津波(水位上昇側)(1/5)

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位上昇側	藤井ほか(1998)	1%

■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布



最大堆積厚分布

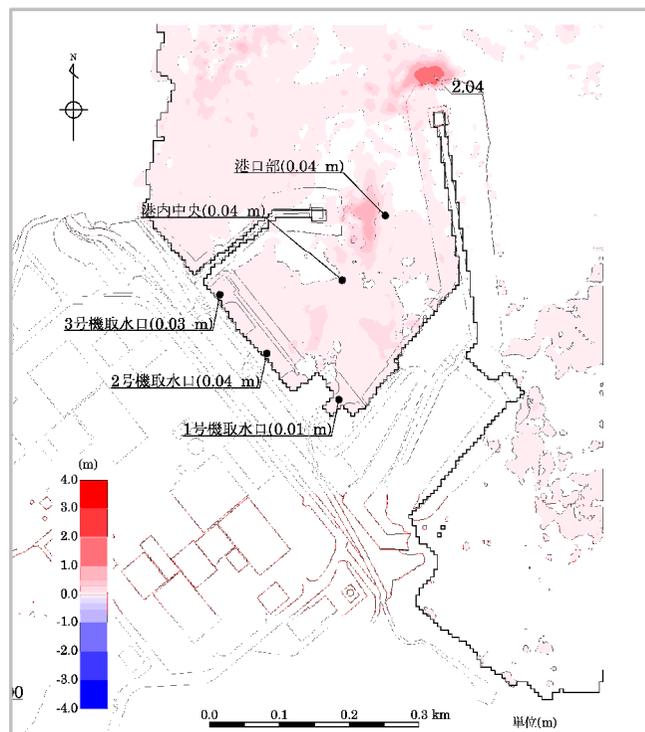


4時間後の海底地形変化量分布

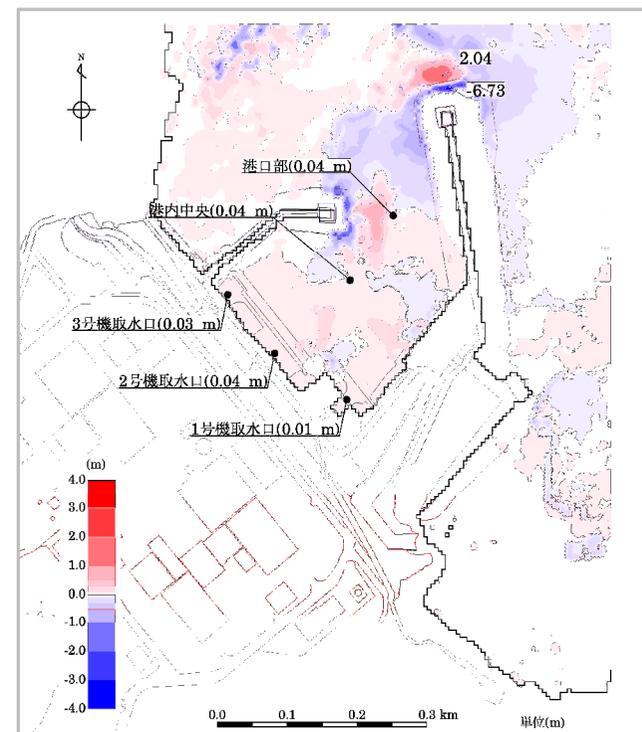
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化
2.3 評価結果:基準津波(水位上昇側)(2/5)

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位上昇側	藤井ほか(1998)	5%

■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布



最大堆積厚分布

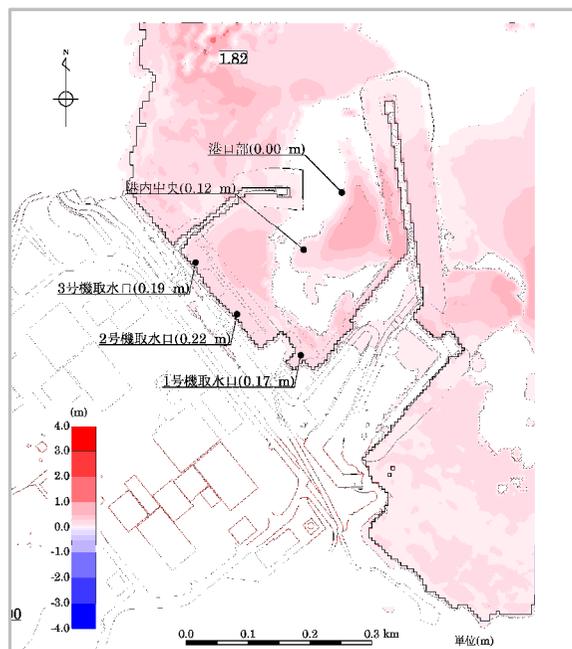


4時間後の海底地形変化量分布

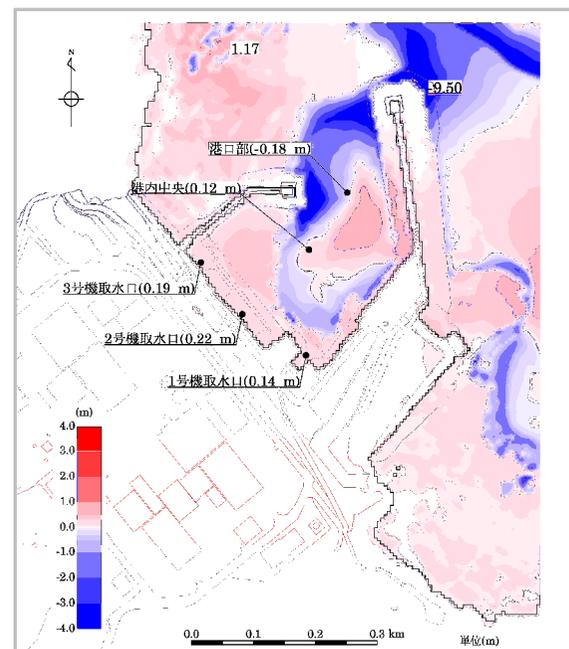
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化
2.3 評価結果:基準津波(水位上昇側)(3/5)

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位上昇側	高橋ほか(1999)	1%

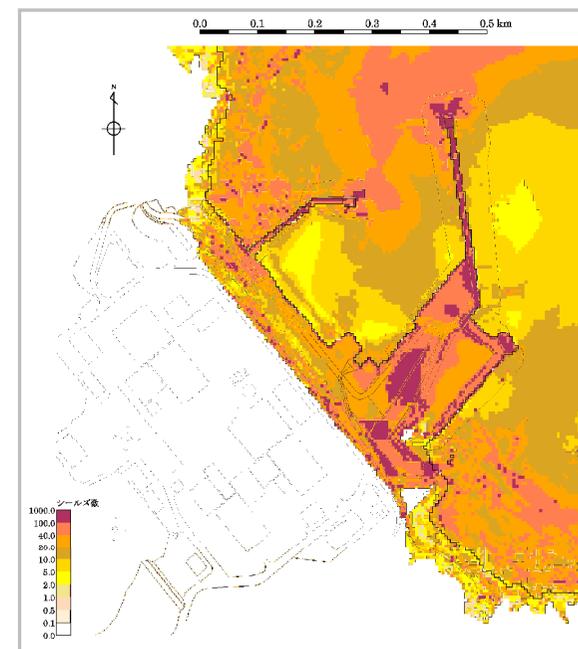
■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布, 最大シールズ数の空間分布



最大堆積厚分布



4時間後の海底地形変化量分布



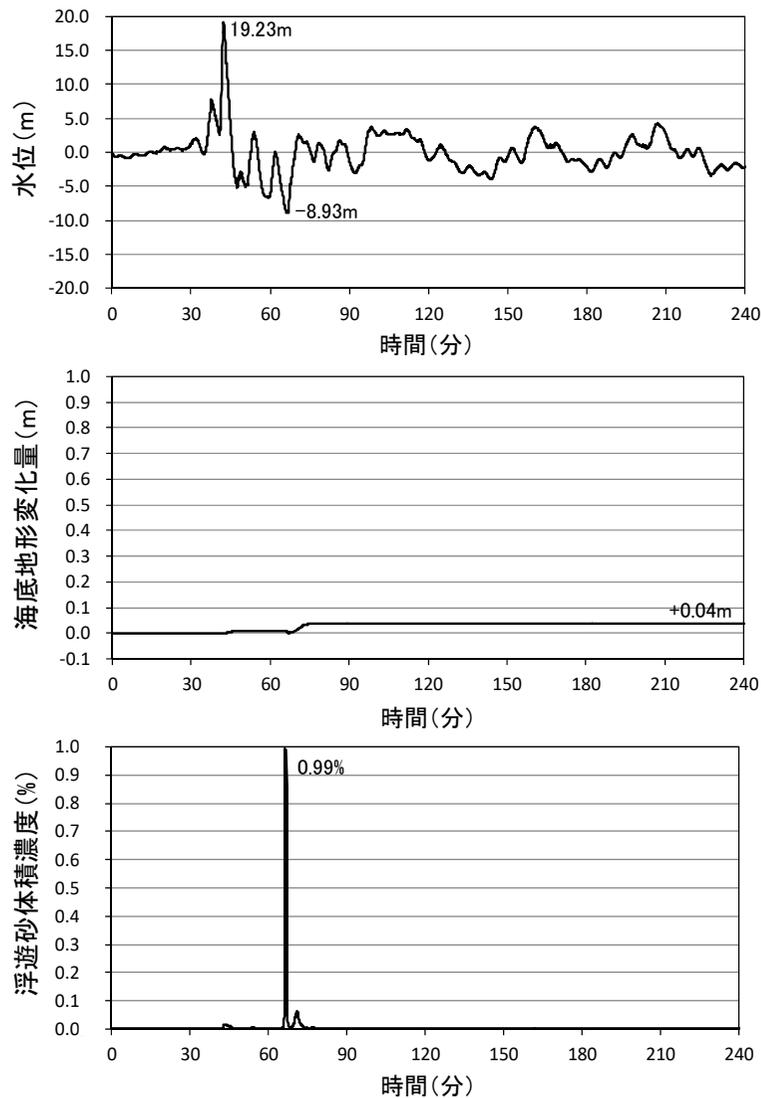
最大シールズ数の空間分布※

※:防波堤先端部等で見られる100を超えるシールズ数は解析的に生じるものであり, 高橋ほか(1999), 高橋ほか(2011)の水利模型実験によるシールズ数のオーダーは1桁である。

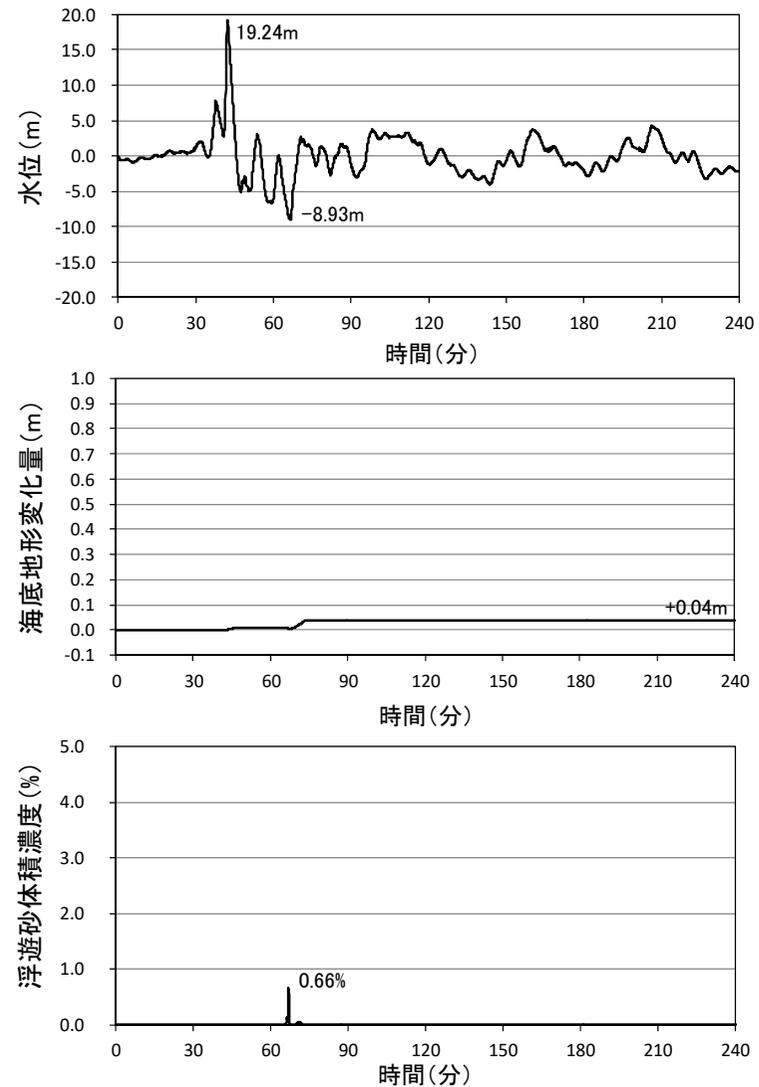
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化
2.3 評価結果: 基準津波(水位上昇側)(4/5)

■ 2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

【藤井ほか(1998), 浮遊砂濃度上限値: 1%】



【藤井ほか(1998), 浮遊砂濃度上限値: 5%】

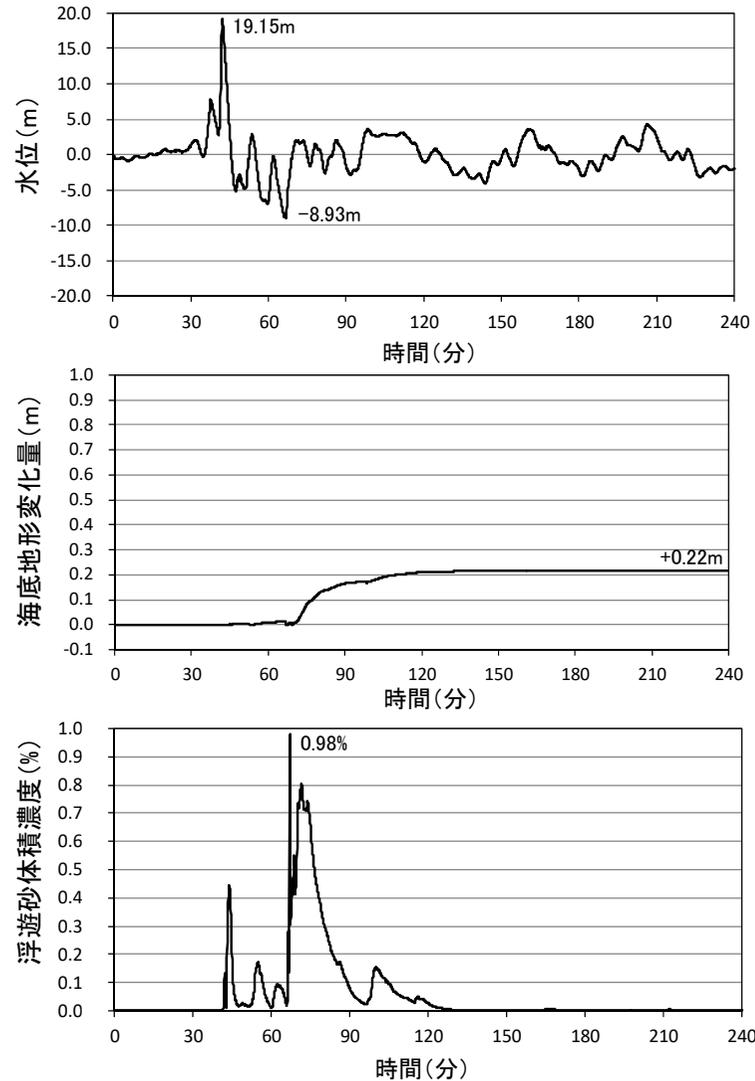


V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化

2.3 評価結果:基準津波(水位上昇側)(5/5)

■2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

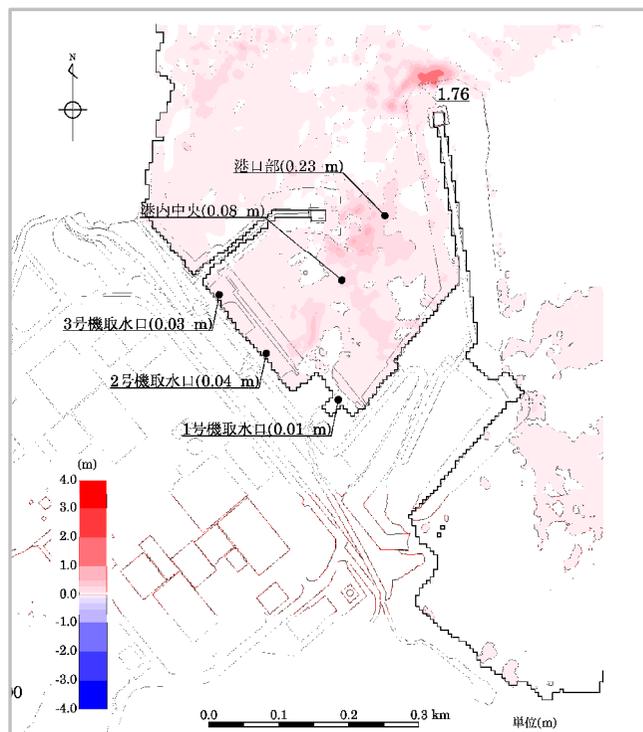
【高橋ほか(1999), 浮遊砂濃度上限値:1%】



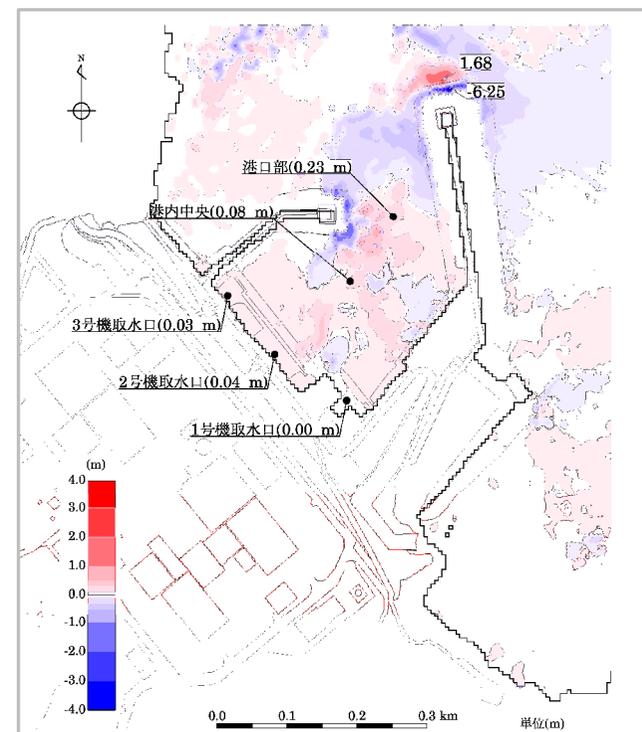
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化
2.3 評価結果:基準津波(水位下降側)(1/5)

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位下降側	藤井ほか(1998)	1%

■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布



最大堆積厚分布

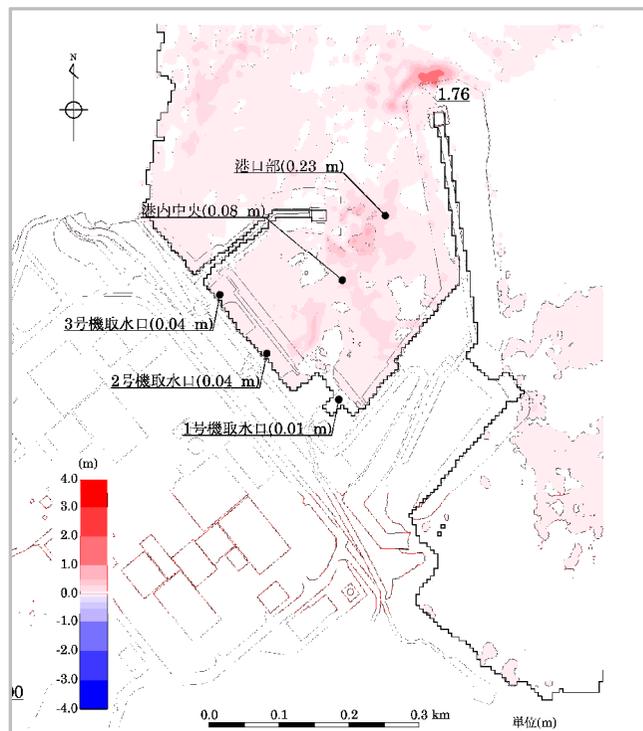


4時間後の海底地形変化量分布

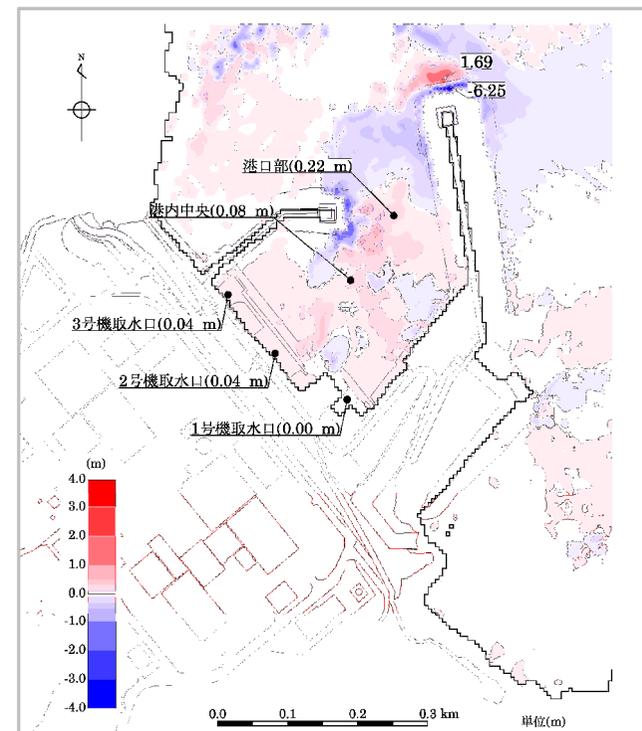
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化
2.3 評価結果:基準津波(水位下降側)(2/5)

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位下降側	藤井ほか(1998)	5%

■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布



最大堆積厚分布

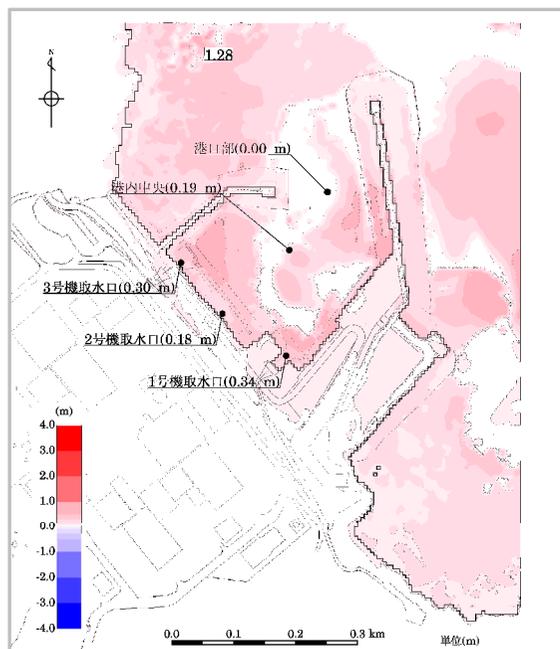


4時間後の海底地形変化量分布

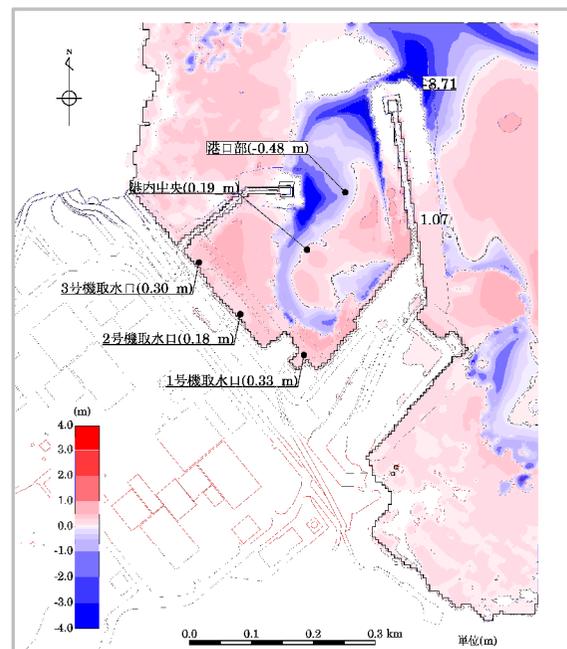
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化
2.3 評価結果:基準津波(水位下降側)(3/5)

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度上限値
水位下降側	高橋ほか(1999)	1%

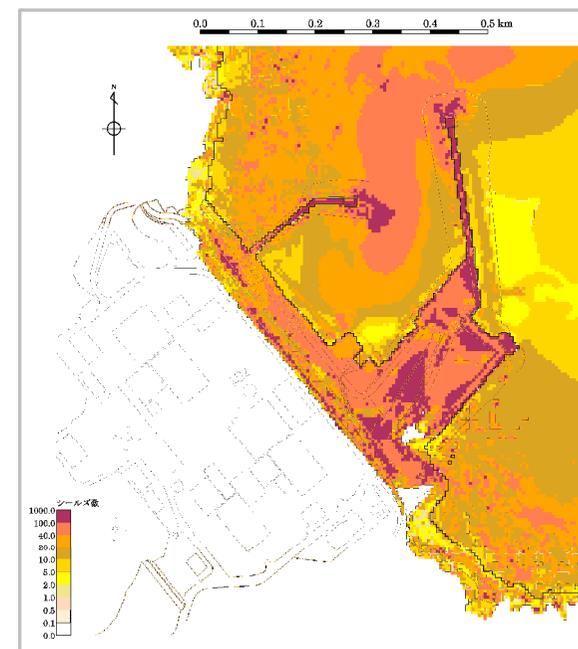
■最大堆積厚分布, 4時間後の海底地形変化量分布, 最大シールズ数の空間分布



最大堆積厚分布



4時間後の海底地形変化量分布



最大シールズ数の空間分布※

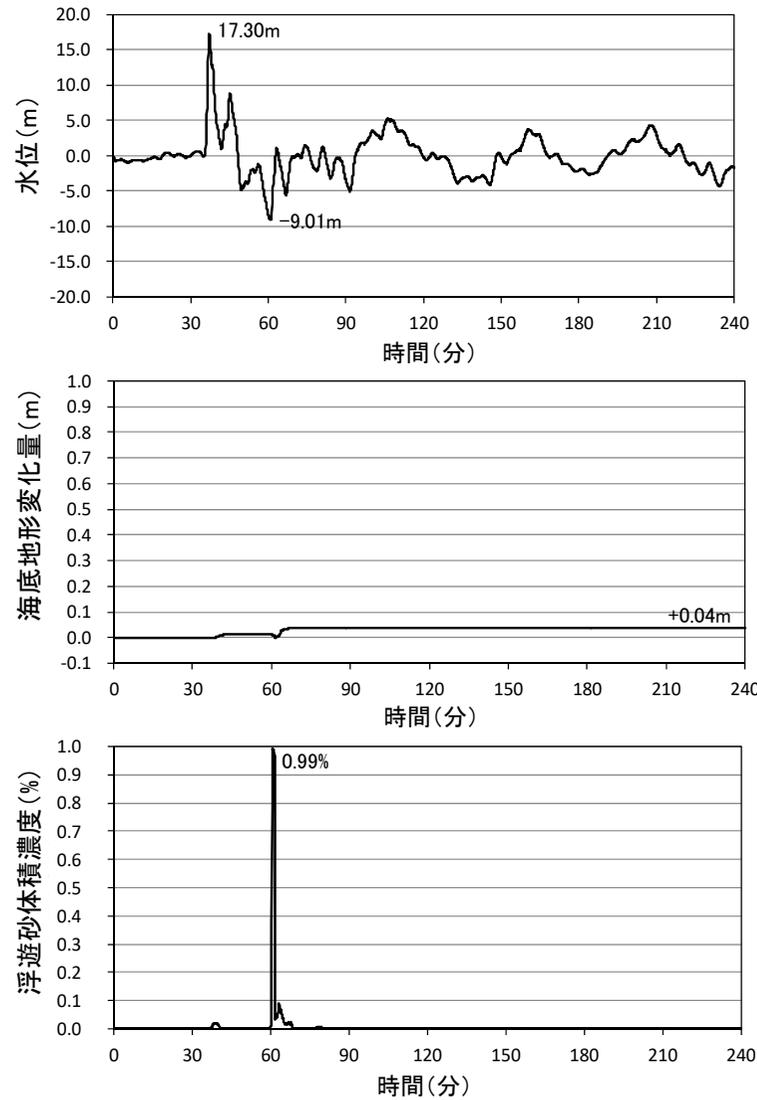
※:防波堤先端部等で見られる100を超えるシールズ数は解析的に生じるものであり, 高橋ほか(1999), 高橋ほか(2011)の水利模型実験によるシールズ数のオーダーは1桁である。

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化

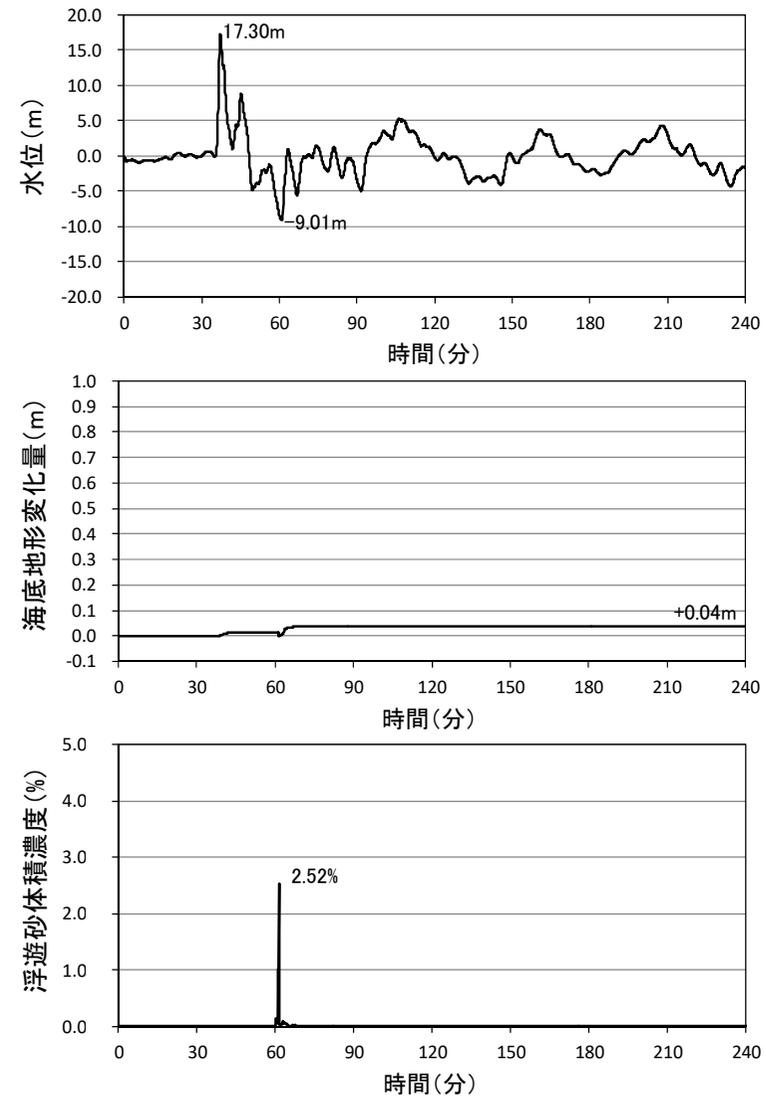
2.3 評価結果:基準津波(水位下降側)(4/5)

■2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

【藤井ほか(1998), 浮遊砂濃度上限値:1%】



【藤井ほか(1998), 浮遊砂濃度上限値:5%】

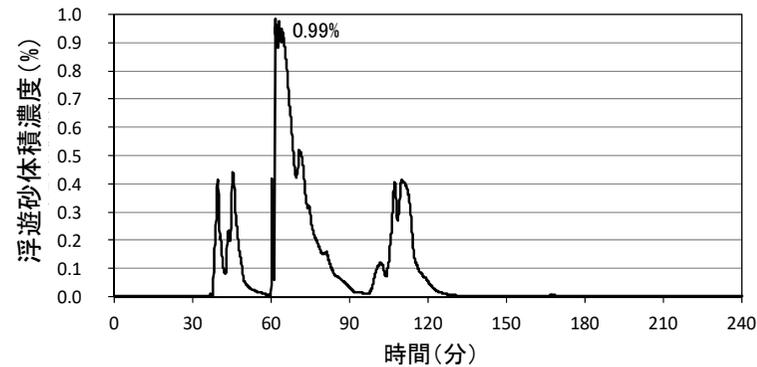
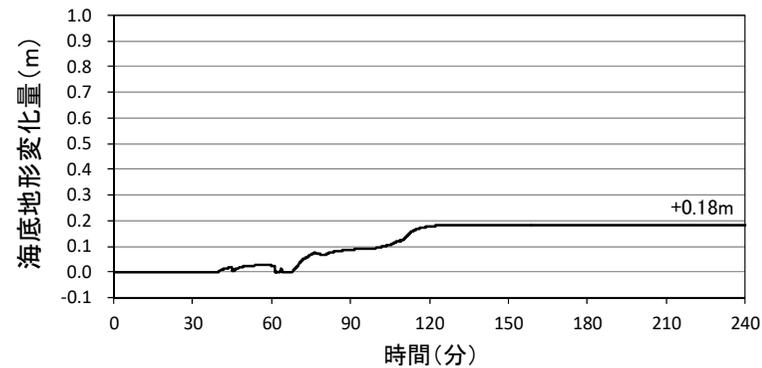
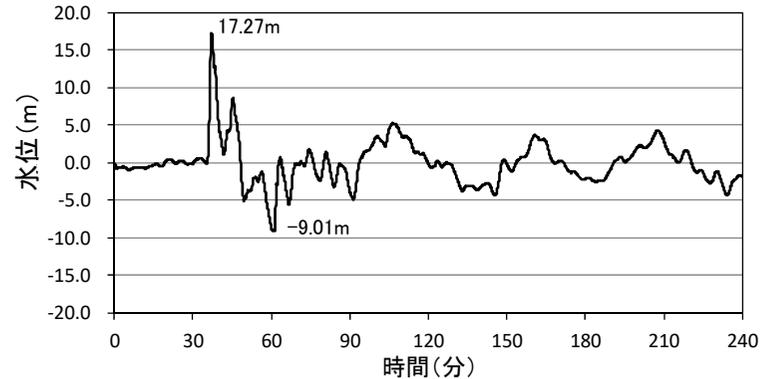


V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 2. 海底地形変化

2.3 評価結果:基準津波(水位下降側)(5/5)

■2号取水口前面における水位, 海底地形変化量, 浮遊砂体積濃度の時刻歴データ

【高橋ほか(1999), 浮遊砂濃度上限値:1%】



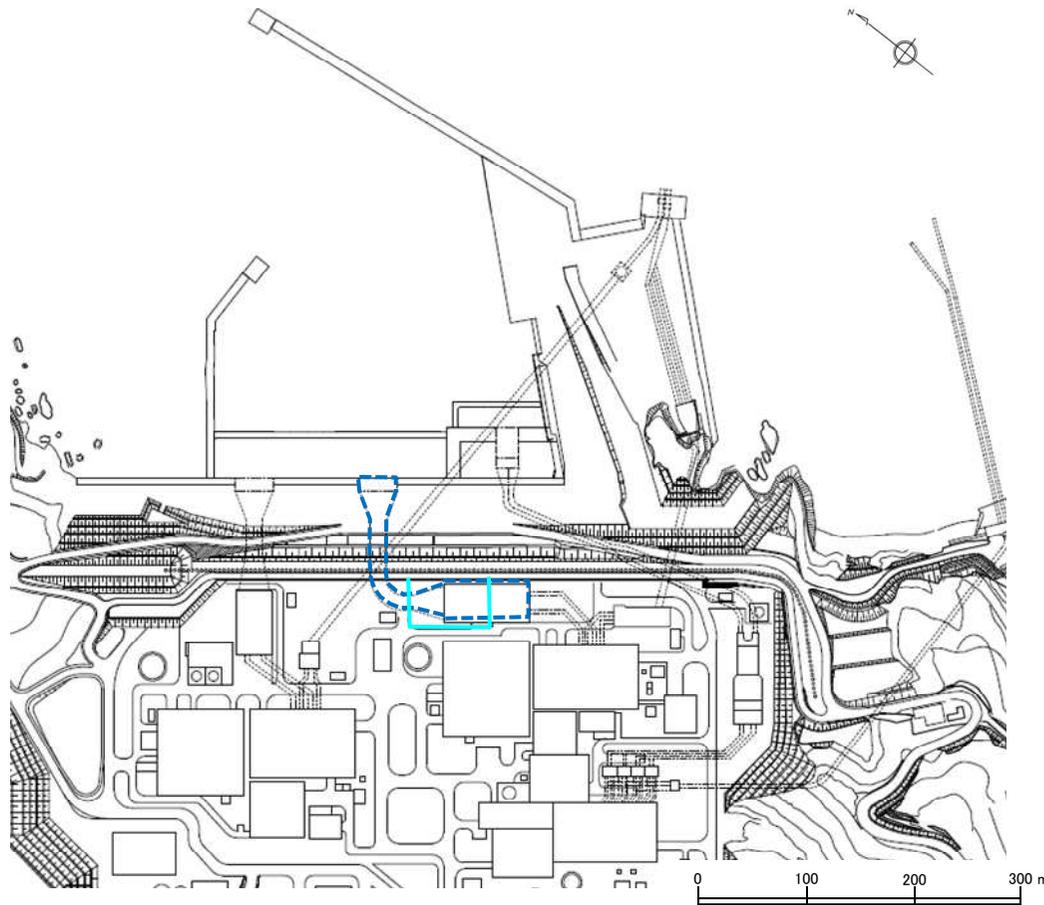
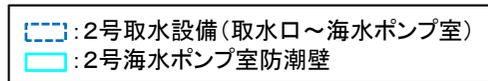
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価)

1. 評価方針
2. 海底地形変化
3. 海水ポンプ室内における砂の堆積
 - 3.1 評価概要
 - 3.2 計算条件
 - 3.3 評価結果

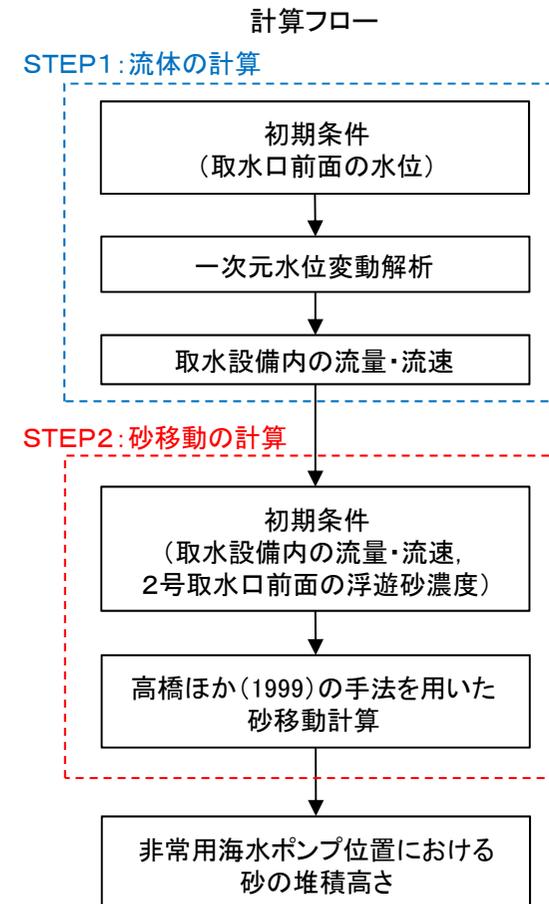
V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

3.1 評価概要

- 前項「2. 海底地形変化」の評価から得られる取水口前面の浮遊砂濃度を境界条件として、高橋ほか(1999)の手法を用いて砂移動解析を実施し、非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さを算定した。
- なお、上記評価に用いる取水設備内の流量及び流速は、取水設備の水理特性を考慮した一次元水位変動解析により算定した。
- 計算フローを右図に示す。



平面図



V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

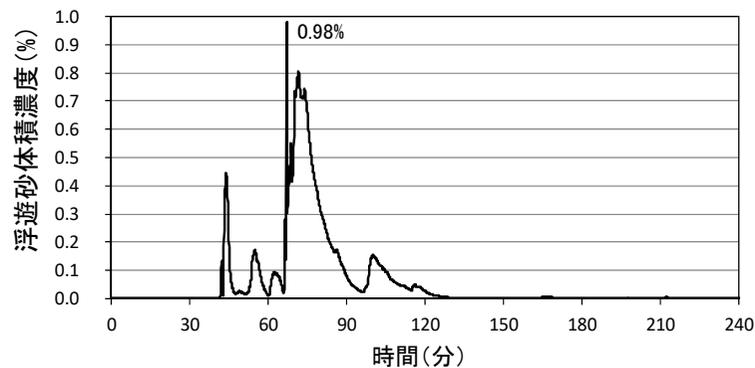
3.1 評価概要: 検討ケース

- 前項「2. 海底地形変化」の評価において、2号取水口前面における砂の堆積高さが最も大きい以下のケースを対象に実施した。

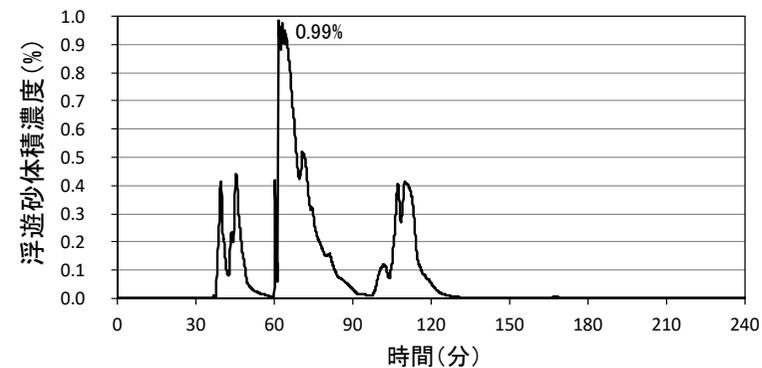
海底地形変化の評価結果

基準津波	評価手法	浮遊砂濃度 上限値	2号取水口前面における 砂の堆積高さ(m)	備考
水位上昇側	藤井ほか(1998)	1%	0.04	
		5%	0.04	
	高橋ほか(1999)	1%	0.22	検討ケース
水位下降側	藤井ほか(1998)	1%	0.04	
		5%	0.04	
	高橋ほか(1999)	1%	0.18	検討ケース

■2号取水口前面における浮遊砂濃度(評価手法:高橋ほか(1999), 浮遊砂濃度上限値:1%)



基準津波(水位上昇側)(p181再掲)



基準津波(水位下降側)(p186再掲)

3.2 計算条件:取水設備の水理特性を考慮した水位変動解析※

※:砂移動の計算条件(高橋ほか(1999)の手法)の詳細は本資料p173に記載。

- 下記の計算条件に基づき、取水設備の水理特性を考慮した水位変動解析を実施した。

項目	設定内容
基礎方程式	一次元開水路非定常流の連続式及び運動方程式
計算時間間隔	0.0001秒
計算格子間隔	0.5m
局所損失係数	千秋(1967), 土木学会(1999), 電力土木技術協会(1995) による
貝代	15cm
摩擦損失係数	$n=0.018m^{-1/3}s$
海水ポンプの取水条件	①循環水ポンプ: 停止 ②原子炉補機冷却海水ポンプ: 1900m ³ /hr × 2台 ③高圧炉心スプレィ補機冷却海水ポンプ: 停止 ④タービン補機冷却海水ポンプ: 2250m ³ /hr × 2台(海水ポンプ室内水位O.P.-2.980m以下で取水停止)
潮位条件	・水位上昇側: 朔望平均満潮位 O.P.+1.43m ・水位下降側: 朔望平均干潮位 O.P.-0.14m
基準津波による地盤沈下量	・水位上昇側: -0.72m ・水位下降側: 考慮しない
計算時間	地震発生後4時間

①基礎方程式:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left(\frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta L} f \frac{|v| v}{2g} \right) = 0$$

t : 時間(s) x : 底面に沿った座標 A : 流水面積(m²) Q : 流量(m³/s)
 H : 水位(m) g : 重力加速度(m/s²) v : 流速(m/s) R : 径深(m)
 n : マニングの粗度係数(m^{-1/3}s) f : 局所損失係数 ΔL : 局所損失区間の長さ(m)

②海水ポンプ室の連続式

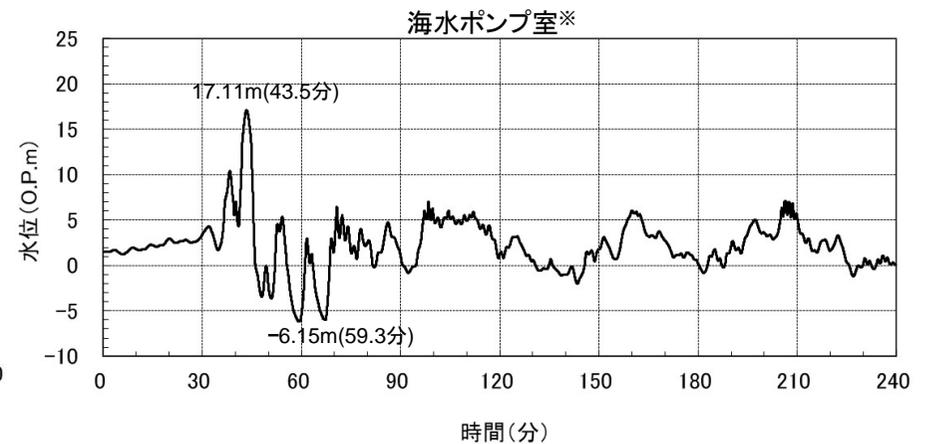
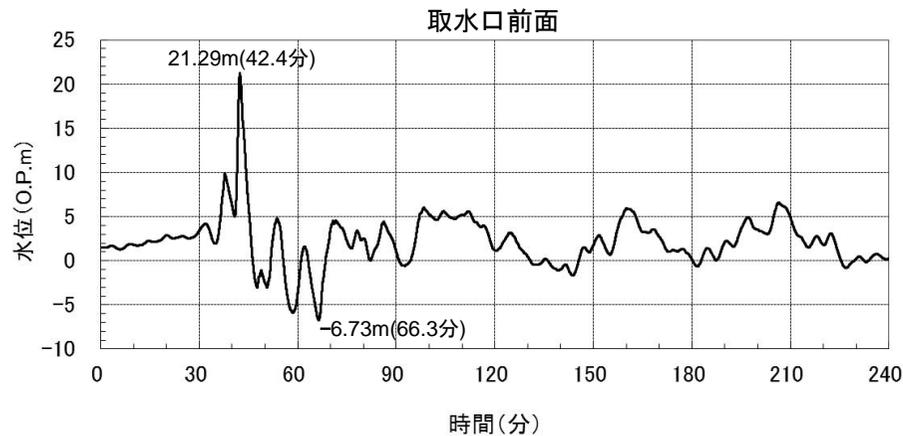
$$A_H \frac{dH_P}{dt} = Q_N - Q_P$$

H_P : 水位(m) Q_N : 流入量(m³/s) Q_P : ポンプ流量(m³/s)
 A_H : 海水ポンプ室内の水平面積(m²)

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

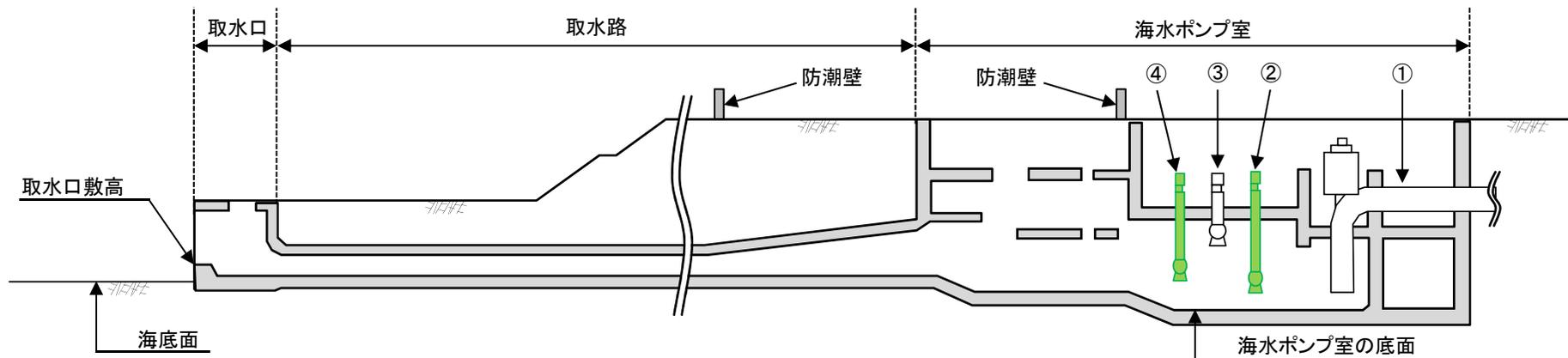
3.2 計算条件: 取水設備の水理特性を考慮した水位変動解析結果(基準津波(水位上昇側))

- 基準津波(水位上昇側)による取水口前面の水位時刻歴波形を用いて算定した海水ポンプ室の水位時刻歴波形を以下に示す。



※: 海水ポンプ室内の水平面積を鉛直方向に積算した水位-容積関係を用いて、海水ポンプ室内の津波の流入出量及びポンプ流量を考慮して算定した水位時刻歴波形(土木学会(2016))。

- ①: 循環水ポンプ
- ②: 原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③: タービン補機冷却海水ポンプ
- ④: 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ

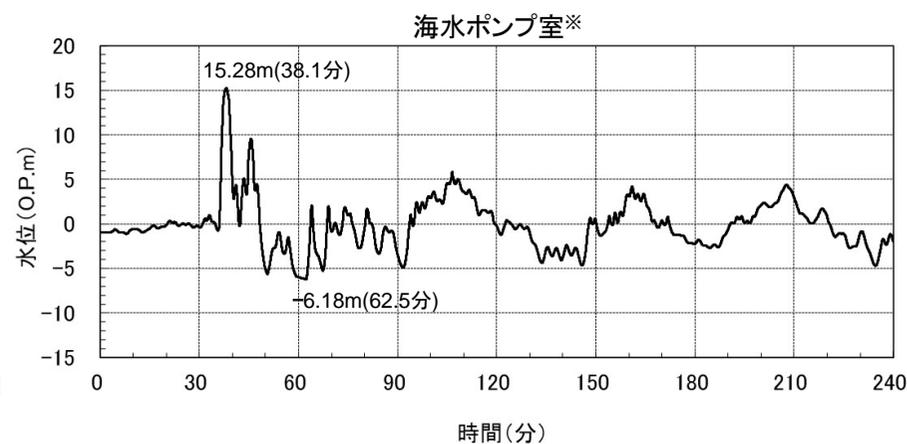
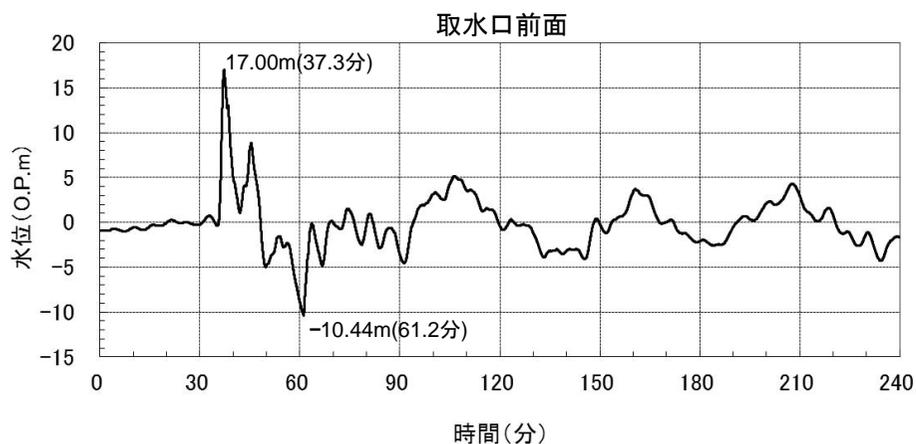


2号取水設備(概要)

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

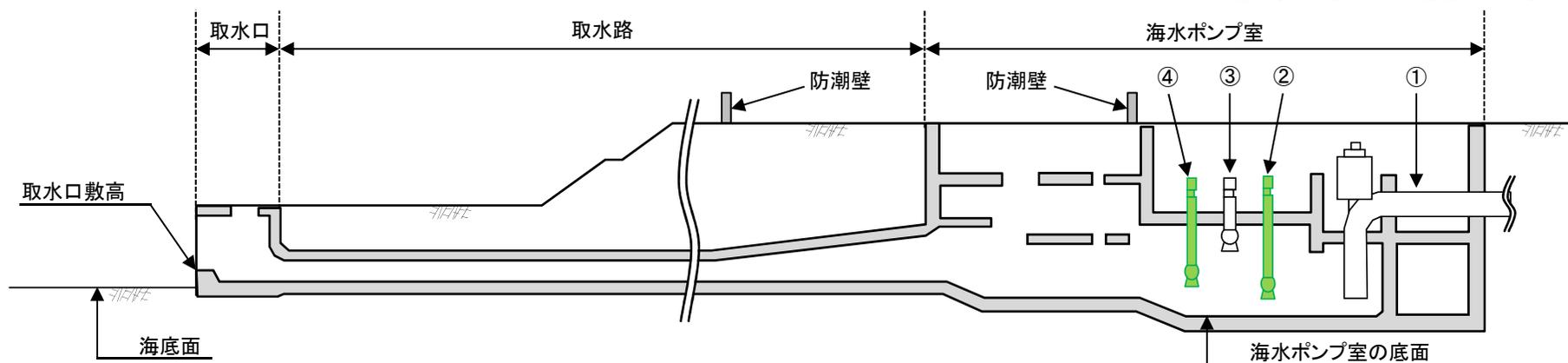
3.2 計算条件: 取水設備の水理特性を考慮した水位変動解析結果(基準津波(水位下降側))

- 基準津波(水位下降側)による取水口前面の水位時刻歴波形を用いて算定した海水ポンプ室の水位時刻歴波形を以下に示す。



※: 海水ポンプ室内の水平面積を鉛直方向に積算した水位-容積関係を用いて、海水ポンプ室内の津波の流入出量及びポンプ流量を考慮して算定した水位時刻歴波形(土木学会(2016))。

- ①: 循環水ポンプ
- ②: 原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③: タービン補機冷却海水ポンプ
- ④: 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ



2号取水設備(概要)

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価) 3. 海水ポンプ室内における砂の堆積

3.3 評価結果

- 各非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さは最大で0.1m程度であり、各海水ポンプの高さを上回らない。
- 以上から、非常用海水ポンプの取水への影響は無いことを確認した。

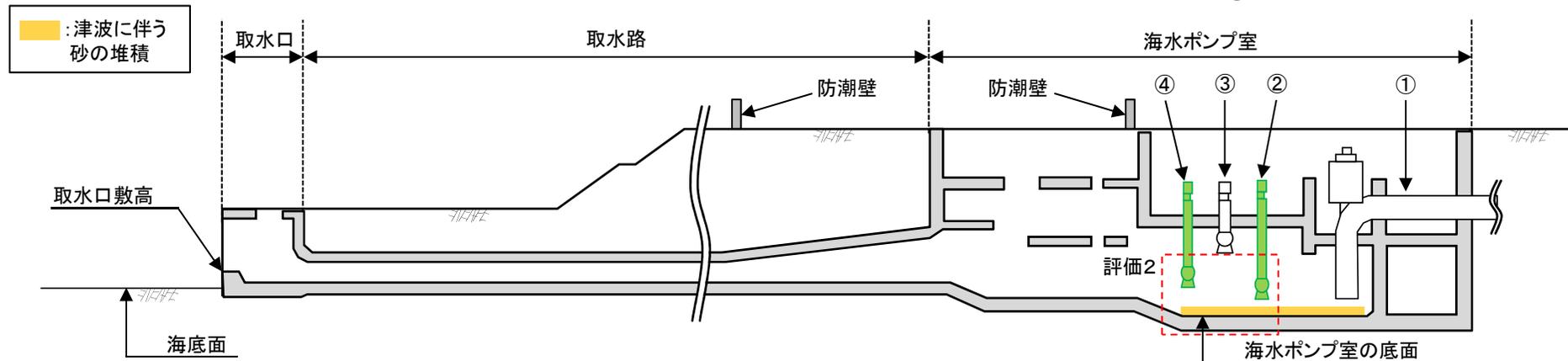
評価結果

基準津波	浮遊砂体積濃度		高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ		原子炉補機冷却海水ポンプ	
	評価手法	浮遊砂濃度 上限値	砂の堆積高さ (m)	海水ポンプの高さ (m)	砂の堆積高さ (m)	海水ポンプの高さ (m)
水位上昇側	高橋ほか(1999)	1%	0.05	2.45 ^{※1}	0.01	1.15 ^{※2}
水位下降側	高橋ほか(1999)	1%	0.10		0.02	

※1: 海水ポンプの下端: O.P.-9.95m, 海水ポンプ室底面: O.P.-12.4m

※2: 海水ポンプの下端: O.P.-11.25m, 海水ポンプ室底面: O.P. -12.4m

- ①: 循環水ポンプ
- ②: 原子炉補機冷却海水ポンプ
- ③: タービン補機冷却海水ポンプ
- ④: 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ



評価内容と2号取水設備(概要)の関係

参考文献(1/5)

1. 内閣府(2012a):南海トラフの巨大地震モデル検討会(第12回),参考資料1 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルについて
2. 社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002):原子力発電所の津波評価技術
3. 公益社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(2016):原子力発電所の津波評価技術2016
4. 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2012):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)について
5. 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2014a):全国地震動予測地図 2014年版~全国の地震動ハザードを概観して~付録-1
6. 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2019):日本海溝沿いの地震活動の長期評価
7. 杉野英治・呉長江・是真真理子・根本信・岩渕洋子・蛭沢勝三(2013):原子力サイトにおける2011東北地震津波の検証,日本地震工学会論文集,第13巻,第2号(特集号)
8. 阿部勝征(2003):津波地震とは何かー総論ー,月刊地球,Vol.25, No.5, pp.337-342
9. 社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2009):確率論的津波ハザード解析の方法(案)
10. Satoko Murotani, Kenji Satake, Yushiro Fujii(2013):Scaling relations of seismic moment,rupture area,average slip,and asperity size for M~9 subduction zone earthquakes, Geophysical Research Letters,Vol.40,pp.5070-5074
11. 内閣府中央防災会議事務局(2005):資料1 中央防災会議 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会(第10回)強震動及び津波高さの推計について
12. 一般社団法人日本原子力学会(2012):日本原子力学会標準 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2011
13. 社団法人土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2011):確率論的津波ハザード解析の方法
14. 独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES)(2014):確率論的手法に基づく基準津波策定手引き,2014年2月
15. 杉野英治・岩渕洋子・橋本紀彦・松末和之・蛭沢勝三・亀田弘行・今村文彦(2014):プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案,日本地震工学会論文集,第14巻,第5号
16. 藤井直樹・大森政則・高尾誠・金山進・大谷英夫(1998):津波による海底地形変化に関する研究,海岸工学論文集,第45巻,pp.376-380
17. 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅野大輔(1999):掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発,海岸工学論文集,第46巻,pp.606-610
18. 小林昭男・織田幸伸・東江隆夫・高尾誠・藤井直樹(1996):津波による砂移動に関する研究,海岸工学論文集,第43巻,pp.691-695
19. 高橋智幸・黒川貴博・藤田将孝・島田広昭(2011):津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.67, No.2, I_231-I_235
20. 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2017):千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第三版)
21. 相田勇(1977):三陸沖の古い津波のシミュレーション,東京大学地震研究所彙報,Vol.52, pp.71-101
22. 羽鳥徳太郎(2000):三陸沖歴史津波の規模の再検討,津波工学研究報告17, pp.39-48
23. 佐竹健治・都司嘉宣・原田智也・石辺岳男・西山昭仁・楠本聡(2014):2011年東北地方太平洋沖地震と過去の津波高さの定量的比較,日本地球惑星科学連合大会2014年大会, HDS27-03
24. 都司嘉宣・上田和枝・佐竹健治(1998):日本で記録された1700年1月(元禄十二年十二月)北米巨大地震による津波,地震第2輯,第51巻,pp.1-17
25. Kenji Satake, Kelin Wang, Brian F. Atwater(2003):Fault slip and seismic moment of the 1700 Cascadia earthquake inferred from Japanese tsunami descriptions, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,VOL.108, NO.B11,2535

参考文献(2/5)

26. YOSHINOBU TSUJI, KENJI SATAKE, TAKEO ISHIBE, TOMOYA HARADA, AKIHITO NISHIYAMA, and SATOSHI KUSUMOTO(2014): Tsunami Heights along the Pacific Coast of Northern Honshu Recorded from the 2011 Tohoku and Previous Great Earthquakes, *Pure and Applied Geophysics*
27. 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治(2011):地質学的データを用いた西暦869年貞観地震津波の復元について, *自然災害科学*, 29-4, pp.501-516
28. 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治(2013):貞観津波と東日本大震災の津波, *東日本大震災を分析する2 震災と人間・まち・記録*, 明石書店, pp.179-188
29. 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998):GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, *海岸工学論文集*, 第45巻, pp.356-360
30. Mansinha, L. and D.E. Smylie(1971):The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.61, No.5,pp.1433-1440
31. 財団法人日本水路協会(2006):海底地形デジタルデータM7000シリーズ
32. Tetsuzo Seno (2014): Stress drop as a criterion to differentiate subduction zones where Mw 9 earthquakes can occur , *Tectonophysics* 621,pp.198-210
33. 内閣府中央防災会議日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会(2006):日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会報告
34. 地震調査研究推進本部(2014b):地震がわかる!
35. JAMSTEC(2011):東北地方太平洋沖地震、震源域南限の地下構造, *プレスリリース*
36. 長谷川昭・中島淳一・内田直希・弘瀬冬樹・北佐枝子・松澤暢(2010):日本列島下のスラブの三次元構造と地震活動, *地学雑誌*, 第119巻, 第2号, pp.190-204
37. Yamanaka, Y. and M. Kikuchi (2004):Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, Vol.109,B07307,doi:10.1029/2003JB002683
38. Lingling Ye,Thorne Lay,and Hiroo Kanamori(2012): The Sanriku-Oki low-seismicity region on the northern margin of the great 2011 Tohoku-Oki earthquake rupture, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 117, B02305, doi:10.1029/2011JB008847
39. Naoki Uchida and Toru Matsuzawa(2011): Coupling coefficient, hierarchical structure, and earthquake cycle for the source area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake inferred from small repeating earthquake data, *Earth Planets Space*, 63, 675-679
40. 佐竹健治(2011):日本海溝の巨大地震のスーパーサイクル, *地震予知連絡会 会報*, 第86巻, 3-15
41. Yusuke Yokota and Kazuki Koketsu(2015):A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake, *NATURE COMMUNICATIONS*, DOI: 10.1038/ncomms6934
42. Naoki Uchida, Junichi Nakajima, Akira Hasegawa, Toru Matsuzawa(2009): What controls interplate coupling?: Evidence for abrupt change in coupling across a border between two overlying plates in the NE Japan subduction zone, *Earth and Planetary Science Letters* 283,111-121
43. Masanao Shinohara, Tomoaki Yamada, Kazuo Nakahigashi, Shin'ichi Sakai, Kimihiro Mochizuki, Kenji Uehira, Yoshihiro Ito, Ryusuke Azuma, Yuka Kaiho, Tetsuo No, Hajime Shiobara, Ryota Hino, Yoshio Murai, Hiroshi Yakiwara, Toshinori Sato, Yuya Machida, Takashi Shinbo, Takehi Isse, Hiroki Miyamachi, Koichiro Obana, Narumi Takahashi, Shuichi Kodaira, Yoshiyuki Kaneda, Kenji Hirata, Sumio Yoshikawa, Kazushige Obara, Takaya Iwasaki, and Naoshi Hirata(2011):Aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by using ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, 63, 835-840
44. Genyang Tang, Penny J. Barton, Lisa C. McNeill, Timothy J. Henstock, Frederik Tilmann, Simon M. Dean, Muhammad D. Jusuf, Yusuf S. Djajadihardja,Haryadi Permana, Frauke Klingelhoefer, and Heidrun Kopp(2013):3-D active source tomography around Simeulue Island offshore Sumatra: Thick crustal zone responsible for earthquake segment boundary, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 40, 48-53, doi:10.1029/2012GL054148
45. Junji Koyama, Kazunori Yoshizawa, Kiyoshi Yomogida, and Motohiro Tsuzuki(2012): Variability of megathrust earthquakes in the world revealed by the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Earth Planets Space*, 64, pp.1189-1198

参考文献(3/5)

46. Kenji Satake, Yushiro Fujii, Tomoya Harada, and Yuichi Namegaya(2013) : Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103, No. 2B, pp. 1473-1492, doi:10.1785/0120120122
47. 内閣府(2012b) : 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について(第一次報告) 巻末資料, 南海トラフの巨大地震モデル検討会
48. Lingling Ye, Thorne Lay, and Hiroo Kanamori(2012) : The Sanriku-Oki low-seismicity region on the northern margin of the great 2011 Tohoku-Oki earthquake rupture, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, B02305, doi:10.1029/2011JB008847
49. Changjiang Wu, Hideaki Tsutsumi, Hongjun Si, and Yusuke Saijo(2012) : Rupture Process of the 2011Mw9.0 Tohoku Earthquake And StrongMotion Simulation from the Viewpoint of NPP Seismic Design, 15th World Conference on Earthquake Engineering
50. 東北電力株式会社(2011) : 女川原子力発電所における平成23年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の調査結果に係る報告書, 2011年7月
51. Takashi NAKATA, Hideaki GOTO, Mitsuhsa WATANABE, Yasuhiro SUZUKI, Azusa NISHIZAWA, Noriaki IZUMI, Daishi HORIUCHI and Yukari KIDO(2012) : Active Faults along Japan Trench and Source Faults of Large Earthquakes, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, pp.254-262
52. 岡村行信(2012) : 地質から東北地方太平洋沖地震を考える, 地震予知総合研究振興会, 地震ジャーナル, 第54号, pp.1-12
53. 阿部勝征(1999) : 遡上高を用いた津波マグニチュードMtの決定-歴史津波への応用-, 地震第2輯, 第52巻, pp.369-377
54. JASCHA POLET and H. KANAMORI(2009) : Tsunami Earthquake, Encyclopedia of Complexity and Systems Science 2009
55. Akira Hasegawa, Keisuke Yoshida, Youichi Asano, Tomomi Okada, Takeshi Iinuma, Yoshihiro Ito(2012) : Change in stress field after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, Earth and Planetary Science Letters 355-356, pp.231-243
56. JAMSTEC(2013) : 東北地方太平洋沖地震における巨大地震・津波発生メカニズムの解明~地球深部探査船「ちきゅう」の科学的成果が「SCIENCE」誌に3編同時掲載~, プレリリース
57. JAMSTEC(2012) : 海溝軸まで及んだ東北地方太平洋沖地震の地震断層を確認, プレスリリース
58. 相田勇(1986) : 津波波源の推定, 水工学シリーズ86-B-2, 土木学会水理委員会
59. 伊木常誠(1897) : 三陸地方津浪実況取調報告, 震災予防調査会報告, 第11号, pp.5-34
60. 松尾春雄(1933) : 三陸津浪調査報告, 内務省土木試験所報告, 第24号, pp.83-112
61. Jose A. Alvarez-Gomez, Omar Q. Gutierrez Gutierrez, Inigo Aniel-Quiroga, M. Gonzalez(2012) : Tsunamiogenic potential of outer-rise normal faults at the Middle America trench in Central America, Tectonophysics 574-575, 133-143
62. Thorne Lay, Charles J. Ammon, Hiroo Kanamori, Marina J. Kim, and Lian Xue(2011) : Outer trench-slope faulting and the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, 713-718
63. 地震研究所(1934) : 昭和8年3月3日三陸地方津浪に関する論文及報告, 東京帝国大学地震研究所彙報, 別冊第1号
64. Tetsuro Tsuru, Jin-Oh Park, Seiichi Miura, Shuichi Kodaira, Yukari Kido, Tsutomu Hayashi(2002) : Along-arc structural variation of the plate boundary at the Japan Trench margin: Implication of interplate coupling, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL.107, NO. B12, 2357, doi:10.1029/2001JB001664
65. 岩淵洋(2013) : 日本海溝海側斜面における地殻伸張速度及びそこで発生する正断層地震について, 海洋情報部研究報告第50号

参考文献(4/5)

66. 阿部勝征(1989):地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測, 東京大学地震研究所彙報, Vol.64, pp.51-69
67. 武村雅之(1998):日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連—, 地震第2輯, 第51巻, pp.211-228
68. 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子(2013):日本被害地震総覧 599—2012, 東京大学出版会
69. 渡辺偉夫(1998):日本被害津波総覧[第2版], 東京大学出版会
70. 気象庁(1951～2017):地震月報ほか
71. 国立天文台(2019):理科年表2019, 平成31年, 第92冊, 丸善出版
72. 防災科学技術研究所(2009):地すべり形分布図 第40集「一関・石巻」, 防災科学技術研究所研究資料, 第325
73. 日本地すべり学会東北支部(1992):東北の地すべり・地すべり地形
74. 徳山英一・本座栄一・木村政昭・倉本真一・芦寿一郎・岡村行信・荒戸裕之・伊藤康人・徐垣・日野亮太・野原壯・阿部寛信・坂井眞一・向山建二郎(2001):日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史
75. 岸本清行(2000):海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成:Japan250m.grd, 地質調査所研究資料集353, 地質調査所
76. 小平秀一・富士原敏也・中村武史(2012):2011年東北地方太平洋沖地震:海底地形データから明らかにされた海底変動, 地質学雑誌, 第118巻, 第9号, pp.530-534
77. 藤本博巳(2005):深海調査研究船「かいれい」KR05-07 調査航海三陸沖日本海溝周辺海域クルーズレポート, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan
78. 海宝由佳(2011):R/V Kairei Cruise Report KR11-05 Leg2, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan
79. Philip Watts, Stéphan T. Grilli, M. ASCE, David R. Tappin and Gerard 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
80. 渡邊奈保子・田賀傑・西下厚志・河原木一・及川光弘・倉持幸志・泉紀明(2007):第1鹿島海山および襟裳海山周辺海域における精密地殻構造探査:DKr1 およびERr1測線, 海上保安庁, 海洋情報部技報, Vol.25, pp.40-50
81. 藤岡換太郎・平朝彦(1987):海山・島弧の衝突と付加テクトニクス—第一鹿島海山の衝突・付加—, 月刊海洋科学, Vol.19, No.7, pp.390-394
82. 西澤あずさ(2012):平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の概要, 海上保安庁, 海洋情報部研究報告第49号, pp.1-14
83. 横瀬久芳(2007):ハワイ諸島における巨大海底地すべり, 日本地質学会, 第114年学術大会, S-10
84. 横瀬久芳(2010):ハワイ諸島の巨大海底地すべり群と津波一流山の高さ分布におけるフラクタル次元—, 月刊地球, 号外No.61, pp.71-79
85. McMurtry G. M. P. Watts, S. T. Grilli and J. T. Kirby(2004): Giant landslides, mega-tsunamis, and paleo-sea level in the Hawaiian Islands, Marine Geology, Vol. 203, Issues 3-4, pp.219-233
86. Moore, J. G., D. A. Clague, R. T. Holcomb, P. W. Lipman, W. R. Normark, and M. E. Torresan(1989): Prodigious submarine landslides on the Hawaiian Ridge, J. Geophys. Res., 94(B12), pp.17465-17484, doi:10.1029/JB094iB12p17465
87. 羽鳥徳太郎(1976):1975年ハワイ島(Kalapana)津波と日本沿岸での挙動, 地震第2輯, 第29巻, pp.355-363. Nettles_2004_BSSA
88. Papadopoulos, G. A. and S. Kortekaas (2003): Characteristics of Landslide Generated Tsunamis from Observational Data, Submarine Mass Movements and Their Consequences, Volume 19 of the series Advances in Natural and Technological Hazards Research, pp.367-374

参考文献(5/5)

89. 海上保安庁: 海域火山データベース, 海洋情報部, (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/kaiikiDB/list-2.htm>)
90. 産業技術総合研究所(2013): 日本の火山(第3版)
91. 今井健太郎・菅原大助・今村文彦(2012): 津波痕跡と史料から解釈した1611年慶長地震, 第31回日本自然災害学会学術講演会, Ⅲ-2-2
92. 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2002): 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について
93. 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2004): 千島海溝沿いの地震活動の長期評価(第二版)について
94. 千秋信一(1967): 発電水力演習, 学献社
95. 社団法人土木学会(1999): 水理公式集[平成11年版]
96. 社団法人電力土木技術協会(1995): 火力・原子力発電所土木構造物の設計(増補改訂版)