

東通原子力発電所1号炉 敷地造成を反映した基準津波の年超過確率の参照について

2026年1月16日
東北電力株式会社

本日の説明内容

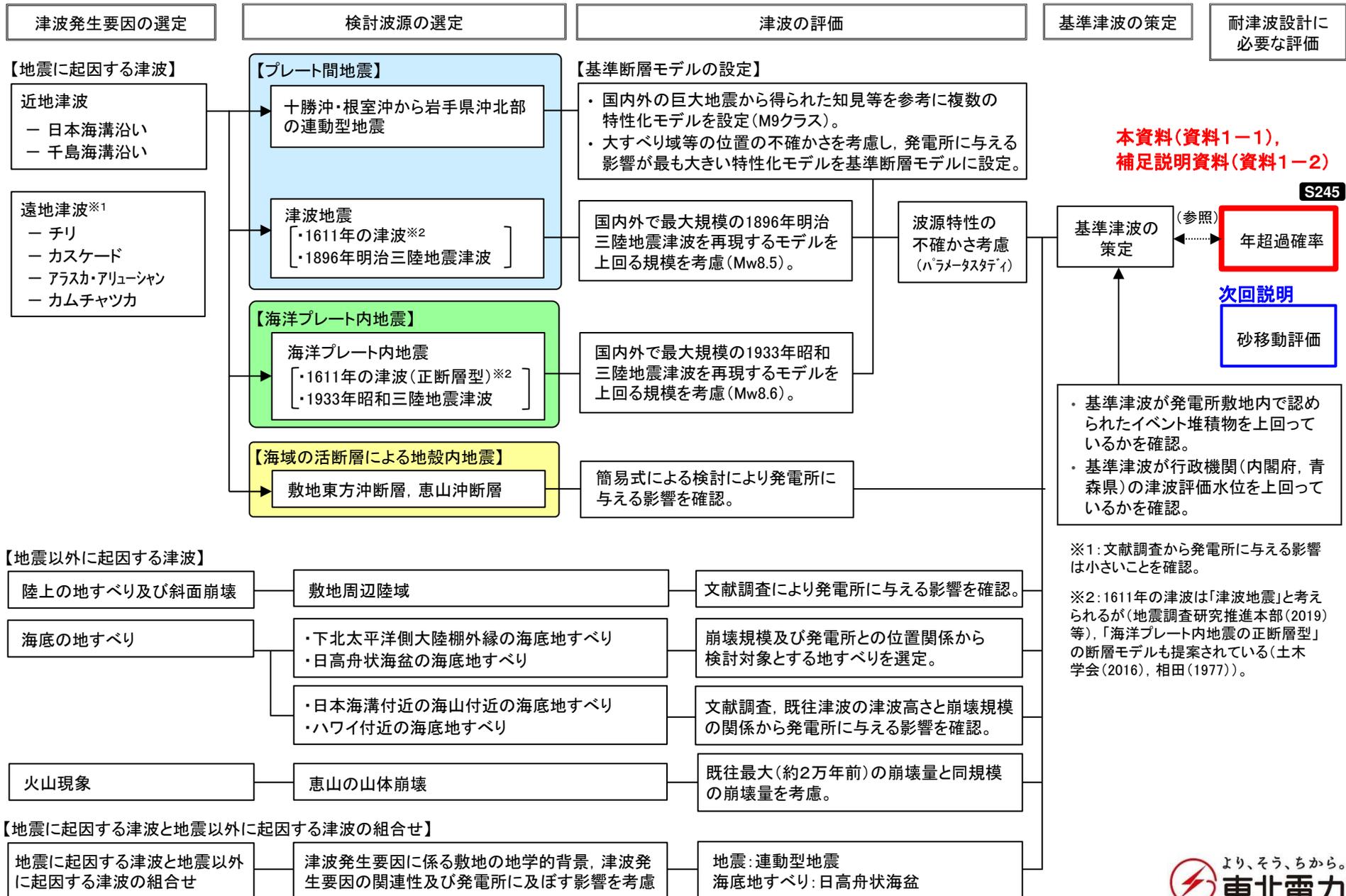
- 「基準津波の策定」、「基準津波の年超過確率の参照及び砂移動評価」については、それぞれ第1225回審査会合(2024年2月9日)及び第1270回審査会合(2024年7月19日)において、「概ね妥当」との評価を頂いた。
- その後、第1368回審査会合(2025年11月7日)「敷地造成を反映した基準津波の再評価」において、敷地造成を反映した基準津波の再評価について説明し、「概ね妥当」との評価を頂いた。
- 本日は、「敷地造成を反映した基準津波の年超過確率の参照」について、説明する。
- あわせて、第1270回審査会合(2024年7月19日)で頂いたコメントへの回答も行う。

審査会合におけるコメント

No.	コメント時期	コメント内容	説明資料
S245	2024年7月19日 第1270回審査会合	東北地方太平洋沖型の地震の年超過確率について、更新過程で算定していることがわかるように説明を追加することに加え、表現の適正化を行うこと。	1. 1評価方針 p.16 2. 1検討対象領域 p.30

説明資料の構成(基準津波評価フロー)

SO : 審査会合コメントNo.



本資料(資料1-1),
補足説明資料(資料1-2)

S245

※1: 文献調査から発電所に与える影響は小さいことを確認。

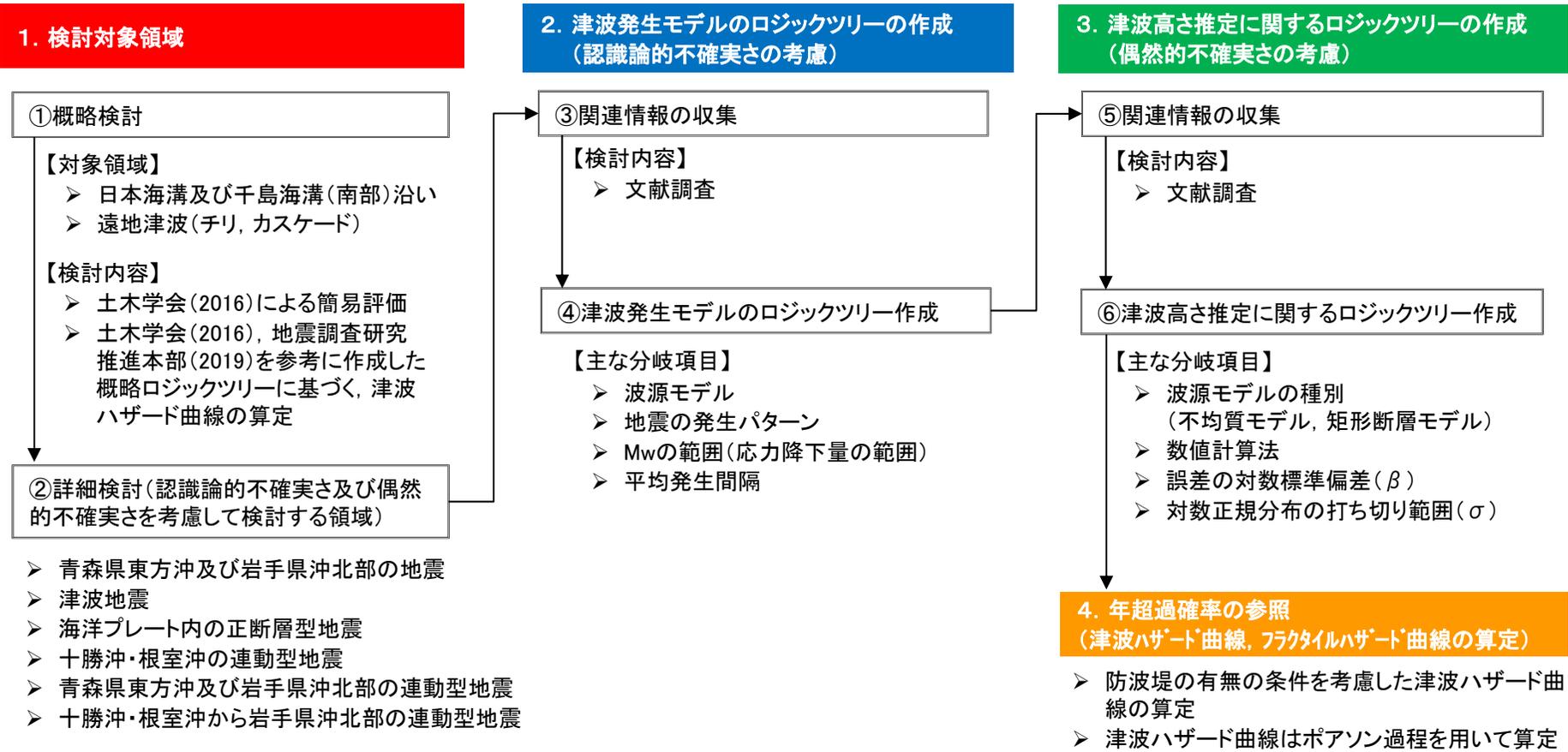
※2: 1611年の津波は「津波地震」と考えられるが(地震調査研究推進本部(2019)等), 「海洋プレート内地震の正断層型」の断層モデルも提案されている(土木学会(2016), 相田(1977))。

再評価結果の概要

1. 評価方針

S245

- ・ 確率論的津波ハザード評価は、日本原子力学会(2017)、土木学会(2011)、土木学会(2016)及び平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(以下、「3.11地震」という。)から得られた知見等を踏まえて実施する。
- ・ 再評価した基準津波について、基準津波毎に防波堤条件が異なることから、防波堤の有無の影響を考慮した津波ハザード曲線を算定し、津波水位の年超過確率を参照するため、ロジックツリーに「防波堤有り」と「防波堤無し」の分岐を設定した。
- ・ 評価フローを以下に示す。

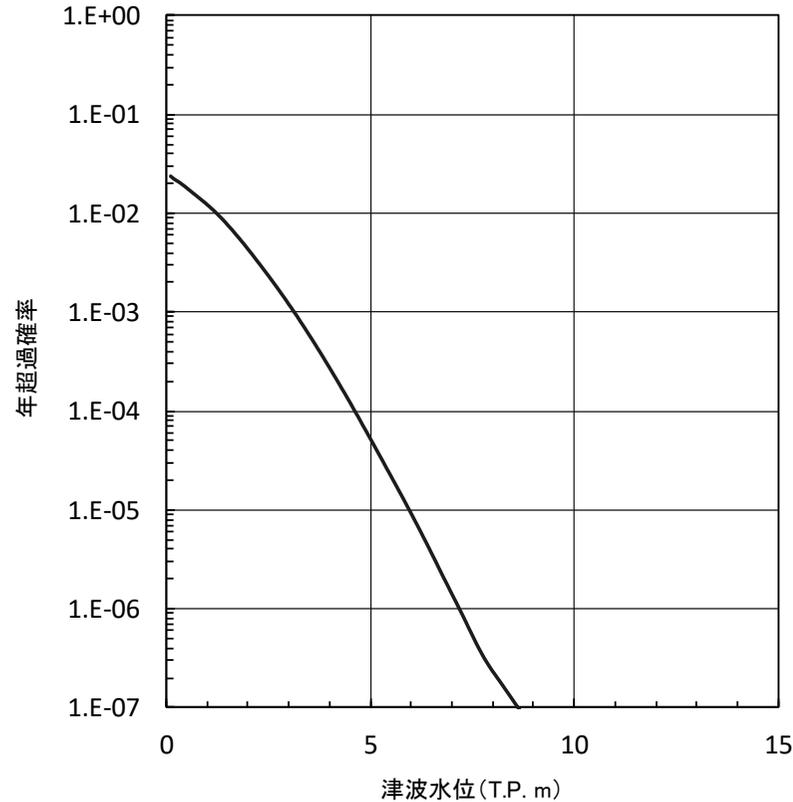


再評価結果の概要

2. 年超過確率の参照(水位上昇側)(1/3)

- 再評価した基準津波の津波ハザード曲線及び各基準津波の津波水位の年超過確率を以下に示す。

■津波ハザード曲線



■基準津波の年超過確率

基準津波	津波水位	年超過確率
基準津波[水位上昇側1(防波堤無し北側最大)]	T.P.+6.0m	10 ⁻⁵ 程度(9.4 × 10 ⁻⁶)
基準津波[水位上昇側2(防波堤無し東側最大)]	T.P.+6.2m	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁶ 程度(6.6 × 10 ⁻⁶)
基準津波[水位上昇側3(防波堤有り南側最大)]	T.P.+5.9m	10 ⁻⁵ 程度(1.1 × 10 ⁻⁵)

再評価結果の概要

2. 年超過確率の参照(水位上昇側)(2/3)

- 敷地造成前の基準津波と敷地造成後の再評価した基準津波の年超過確率の一覧を下表に示す。
- 再評価した基準津波について、基準津波[水位上昇側1(防波堤無し北側最大)]の年超過確率は、 10^{-5} 程度であり、敷地造成前から変更はない。
- 新たに策定した基準津波[水位上昇側2(防波堤無し東側最大)]の年超過確率は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度、基準津波[水位上昇側3(防波堤有り南側最大)]の年超過確率は 10^{-5} 程度である。

敷地造成前の基準津波 (1270回審査会合(R6.7.19))				再評価した基準津波 (敷地造成後)				備考
基準津波	津波波源	基準津波 策定位置 の最高水位	年超過確率	基準津波	津波波源	基準津波 策定位置 の最高水位	年超過確率	
基準津波 [水位上昇側 (防波堤無し 最大)]	連動型地震 (基準断層モデル①) と日高海底地すべり (地すべり②単独) との組合せ津波	T.P.+6.0m ^{※1}	10^{-5} 程度 (8.7×10^{-6})	基準津波 [水位上昇側1 (防波堤無し 北側最大)]	連動型地震 (基準断層モデル①) と日高海底地すべり (地すべり②単独) との組合せ津波	T.P.+6.0m ^{※1}	10^{-5} 程度 (9.4×10^{-6})	変更なし
—	—	—	—	基準津波 [水位上昇側2 (防波堤無し 東側最大)]	連動型地震 (基準断層モデル②) と日高海底地すべり (地すべり②単独) との組合せ津波	T.P.+6.2m ^{※2}	$10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度 (6.6×10^{-6})	新規追加
—	—	—	—	基準津波 [水位上昇側3 (防波堤有り 南側最大)]	連動型地震 (基準断層モデル②) と日高海底地すべり (地すべり①と②との 同時活動)との組合せ 津波	T.P.+5.9m ^{※3}	10^{-5} 程度 (1.1×10^{-5})	新規追加

※1: 敷地前面(北側)の最高水位はT.P.+12.1m

※2: 敷地前面(東側)の最高水位はT.P.+11.2m

※3: 敷地前面(南側)の最高水位はT.P.+12.4m

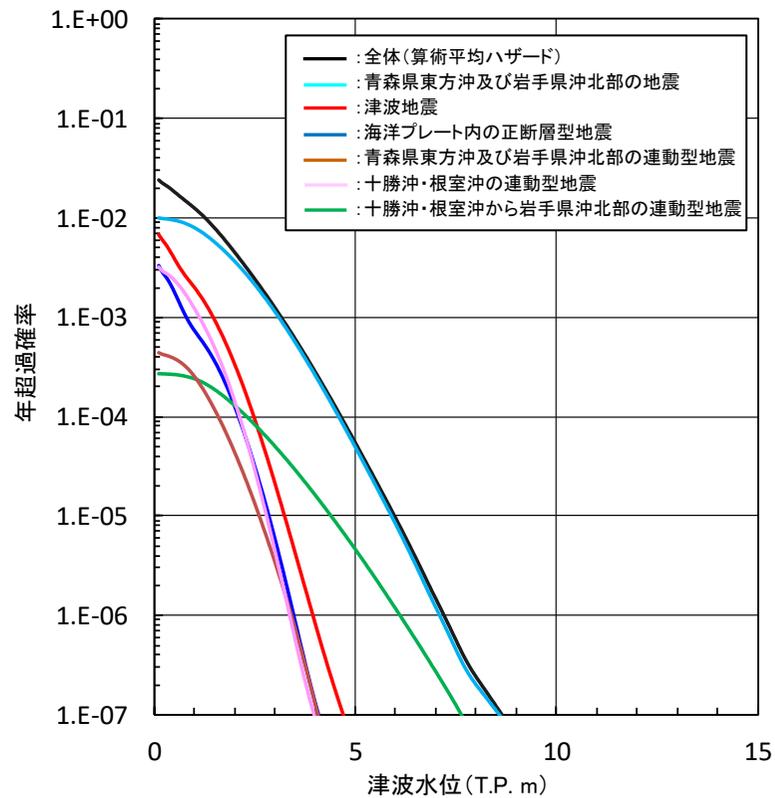
余白

再評価結果の概要

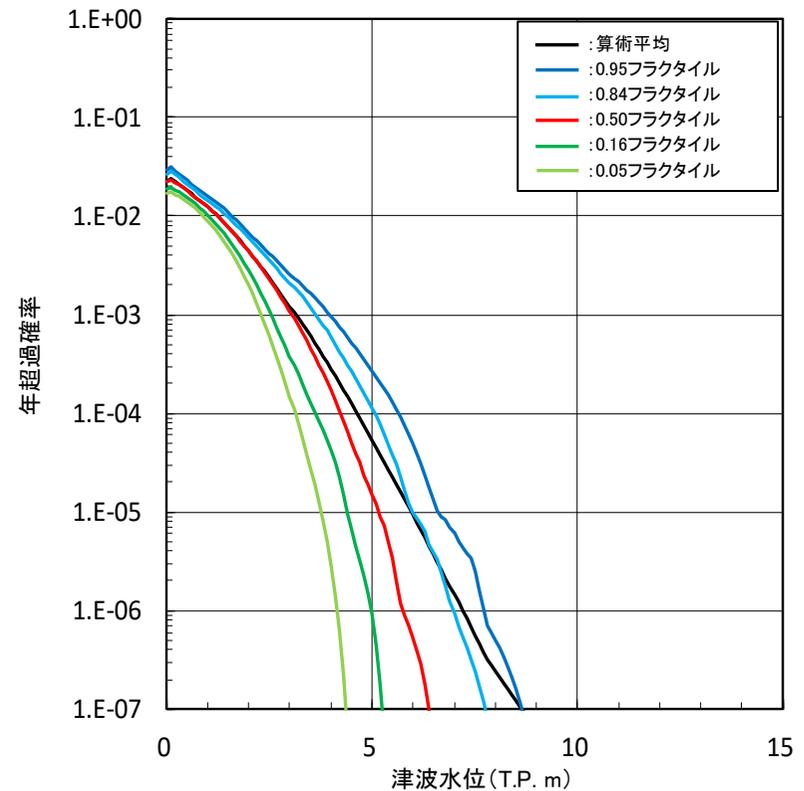
2. 年超過確率の参照(水位上昇側)(3/3)

- 再評価した基準津波の津波ハザード曲線(波源別寄与度)及びフラクタイルハザード曲線を以下に示す。

【津波ハザード曲線(波源別寄与度)】



【フラクタイルハザード曲線】

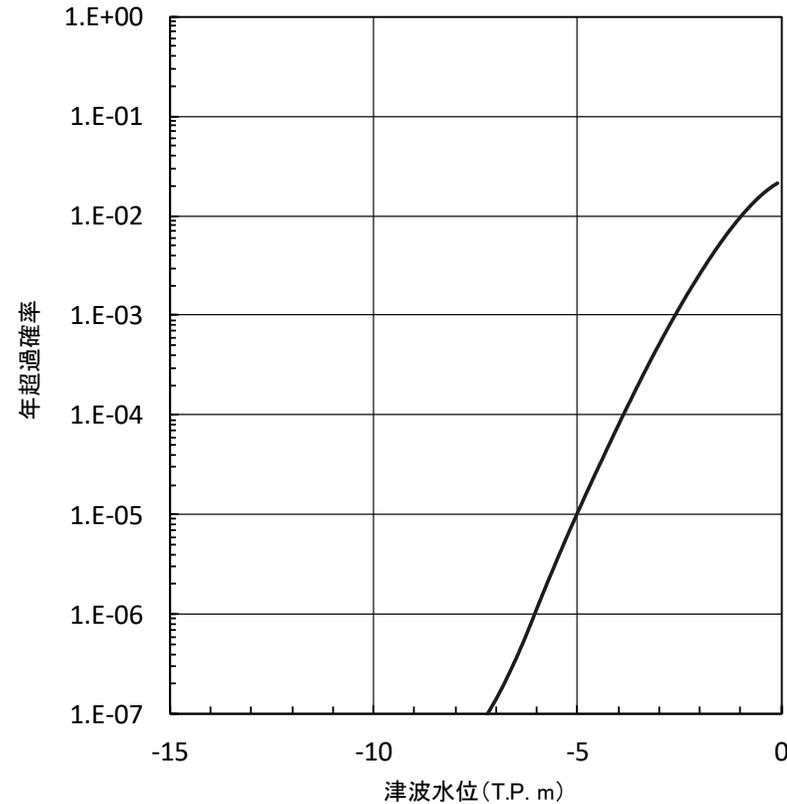


再評価結果の概要

3. 年超過確率の参照(水位下降側)(1/3)

- 再評価した基準津波の津波ハザード曲線及び各基準津波の津波水位の年超過確率を以下に示す。

■津波ハザード曲線



■基準津波の年超過確率

基準津波	津波水位	年超過確率
基準津波[水位下降側1(防波堤有り最大)]	T.P.-3.9m	10^{-4} 程度 (9.7×10^{-5})
基準津波[水位下降側2(防波堤無し最大)]	T.P.-5.0m	10^{-5} 程度 (1.1×10^{-5})

再評価結果の概要

3. 年超過確率の参照(水位下降側)(2/3)

- 敷地造成前の基準津波と敷地造成後の再評価した基準津波の年超過確率の一覧を下表に示す。
- 再評価した基準津波について、基準津波[水位下降側1(防波堤有り最大)]の年超過確率は、 10^{-4} 程度であり、敷地造成前から変更はない。
- また、基準津波[水位下降側2(防波堤無し最大)]の年超過確率についても、 10^{-5} 程度であり、敷地造成前から変更はない。

敷地造成前の基準津波 (1270回審査会合(R6.7.19))				再評価した基準津波 (敷地造成後)				備考
基準津波	津波波源	基準津波 策定位置 の最低水位	年超過確率	基準津波	津波波源	基準津波 策定位置 の最低水位	年超過確率	
基準津波 [水位下降側1 (防波堤有り 最大)]	連動型地震 (基準断層モデル③) と日高海底地すべり (地すべり①単独) との組合せ津波※3	T.P.-3.9m※5	10^{-4} 程度 (9.3×10^{-5})	基準津波 [水位下降側1 (防波堤有り 最大)]	連動型地震 (基準断層モデル④) と日高海底地すべり (地すべり①単独) との組合せ津波※3	T.P.-3.9m※5	10^{-4} 程度 (9.7×10^{-5})	変更なし
基準津波 [水位下降側2 (防波堤無し 水位最大)]※1	連動型地震 (基準断層モデル②) と日高海底地すべり (地すべり①単独) との組合せ津波	T.P.-4.8m	10^{-5} 程度 (1.7×10^{-5})	基準津波 [水位下降側2 (防波堤無し 最大)]※2	連動型地震 (基準断層モデル③) と日高海底地すべり (地すべり②単独) との組合せ津波※4	T.P.-5.0m※7	10^{-5} 程度 (1.1×10^{-5})	変更なし
基準津波 [水位下降側3 (防波堤無し 時間最大)]※1	連動型地震 (基準断層モデル②) と日高海底地すべり (地すべり②単独) との組合せ津波	T.P.-4.9m※6	10^{-5} 程度 (1.4×10^{-5})					

※1: 防波堤無しの評価結果、補機冷却海水系取水口前面の最大水位下降量が最大となる津波波源と補機冷却海水系取水口敷高(T.P.-4.0m)を下回る継続時間が最大となる津波波源が異なるため、基準津波[水位下降側2(防波堤無し水位最大)]及び基準津波[水位下降側3(防波堤無し時間最大)]を選定。

※2: 敷地造成後の再評価結果、最低水位及び取水口敷高を下回る継続時間が最大となる津波波源が同一となったため、基準津波[水位下降側2(防波堤無し最大)]として選定。

※3: 敷地造成前後で津波波源に変更なし(連動型地震の基準断層モデル番号は変更あり(③→④))

※4: 敷地造成前後で津波波源に変更なし(連動型地震の基準断層モデル番号は変更あり(②→③))

※5: 補機冷却海水系取水口前面の最低水位はT.P.-6.2m

※6: 補機冷却海水系取水口前面の最低水位はT.P.-7.4m

※7: 補機冷却海水系取水口前面の最低水位はT.P.-7.5m

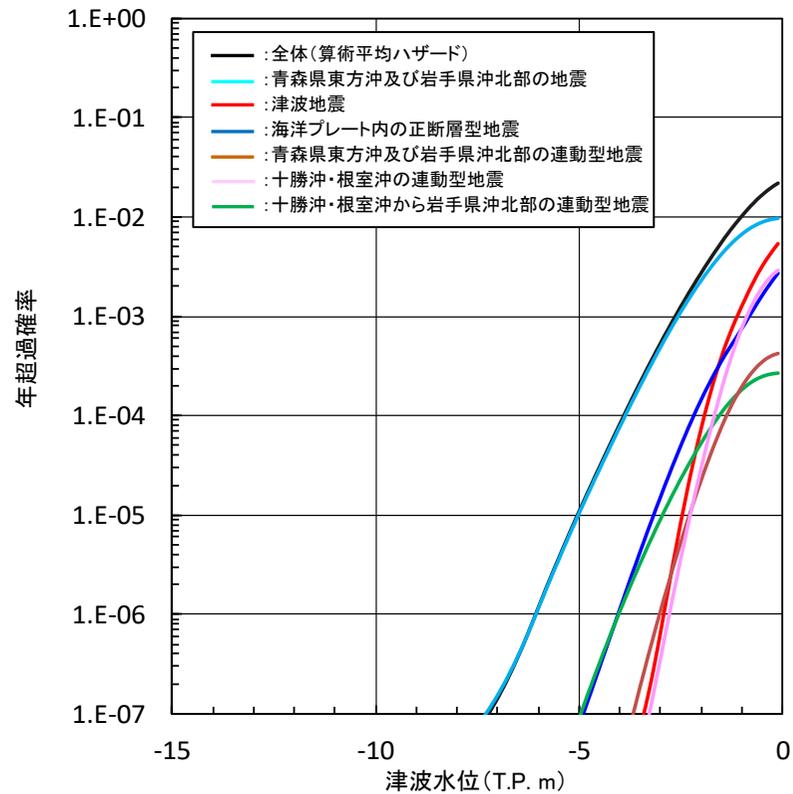
余白

再評価結果の概要

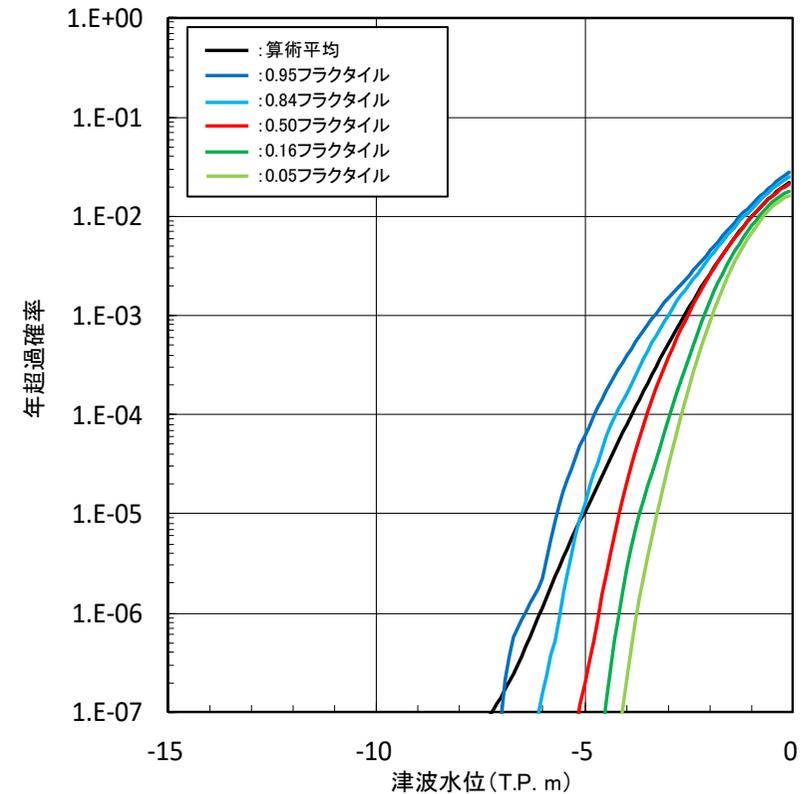
3. 年超過確率の参照(水位下降側)(3/3)

- 再評価した基準津波の津波ハザード曲線(波源別寄与度)及びフラクタイルハザード曲線を以下に示す。

【津波ハザード曲線(波源別寄与度)】



【フラクタイルハザード曲線】



目次

1. 評価概要	14
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)	23
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)	66
4. 防波堤の有無の条件に関するロジックツリー	80
5. 評価結果	82

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

余白

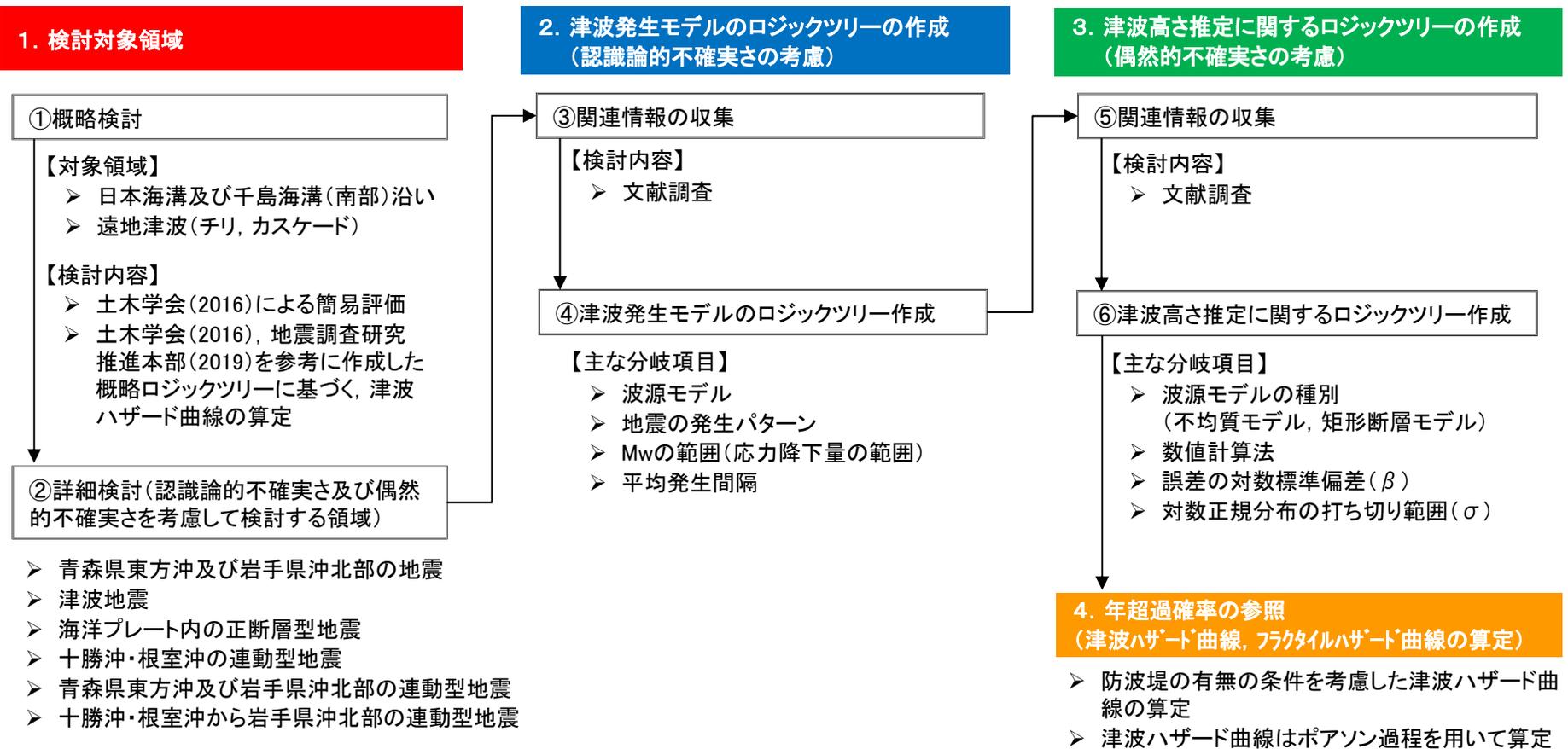
1. 評価概要

1.1 評価方針

S245

■評価フロー

- ・ 確率論的津波ハザード評価は、日本原子力学会(2017)、土木学会(2011)、土木学会(2016)及び平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(以下、「3.11地震」という。)から得られた知見等を踏まえて実施する。
- ・ 評価フローを以下に示す。



1. 評価概要

1.1 評価方針(水位上昇側)

■津波ハザード曲線の算定

- 各基準津波^{※1}の防波堤の有無の影響を考慮した津波ハザード曲線を算定し、津波水位の年超過確率を参照するため、ロジックツリーに「防波堤有り」と「防波堤無し」の分岐を設定した。

※1:基準津波策定の詳細は、補足説明資料「1. 基準津波の策定」に記載。

【水位上昇側】

基準津波		基準津波策定位置の最高水位
基準津波 [水位上昇側1 (防波堤無し北側最大)]	十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル①(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(内閣府(2012)考慮))と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり②単独)との組合せ津波	T.P.+6.0m ^{※2}
基準津波 [水位上昇側2 (防波堤無し東側最大)]	十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル②(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(内閣府(2012)考慮))と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり②単独)との組合せ津波	T.P.+6.2m ^{※3}
基準津波 [水位上昇側3 (防波堤有り南側最大)]	十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル②(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(内閣府(2012)考慮))と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり①と②の同時活動)との組合せ津波	T.P.+5.9m ^{※4}

※2:敷地前面(北側)の最高水位はT.P.+12.1m

※3:敷地前面(東側)の最高水位はT.P.+11.2m

※4:敷地前面(南側)の最高水位はT.P.+12.4m

1. 評価概要

1.1 評価方針(水位下降側)

■津波ハザード曲線の算定

- 各基準津波^{※1}の防波堤の有無の影響を考慮した津波ハザード曲線を算定し、津波水位の年超過確率を参照するため、ロジックツリーに「防波堤有り」と「防波堤無し」の分岐を設定した。

※1: 基準津波策定の詳細は、補足説明資料「1. 基準津波の策定」に記載。

【水位下降側】

基準津波		基準津波策定位置の最低水位
基準津波 [水位下降側1 (防波堤有り最大)]	十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル④(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(すべり分布の不確かさ考慮))]と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり①単独)との組合せ津波	T.P.-3.9m ^{※2}
基準津波 [水位下降側2 (防波堤無し最大)]	十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル③(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(すべり量の不確かさ考慮))]と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり②単独)との組合せ津波	T.P.-5.0m ^{※3}

※2: 補機冷却海水系取水口前面の最低水位はT.P.-6.2m

※3: 補機冷却海水系取水口前面の最低水位はT.P.-7.5m

1. 評価概要

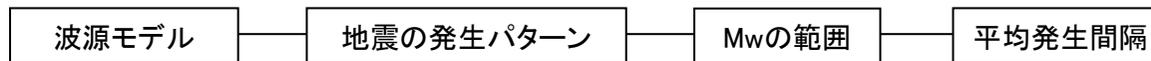
1.2 ロジックツリーの作成

■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】

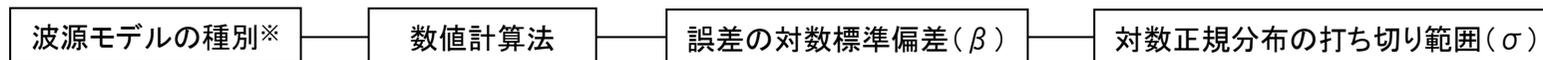
(1)各津波発生領域のロジックツリー



(2)津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

- ・ 土木学会(2016)を参考に、これまで発生した記録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(特性化モデル)、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。)

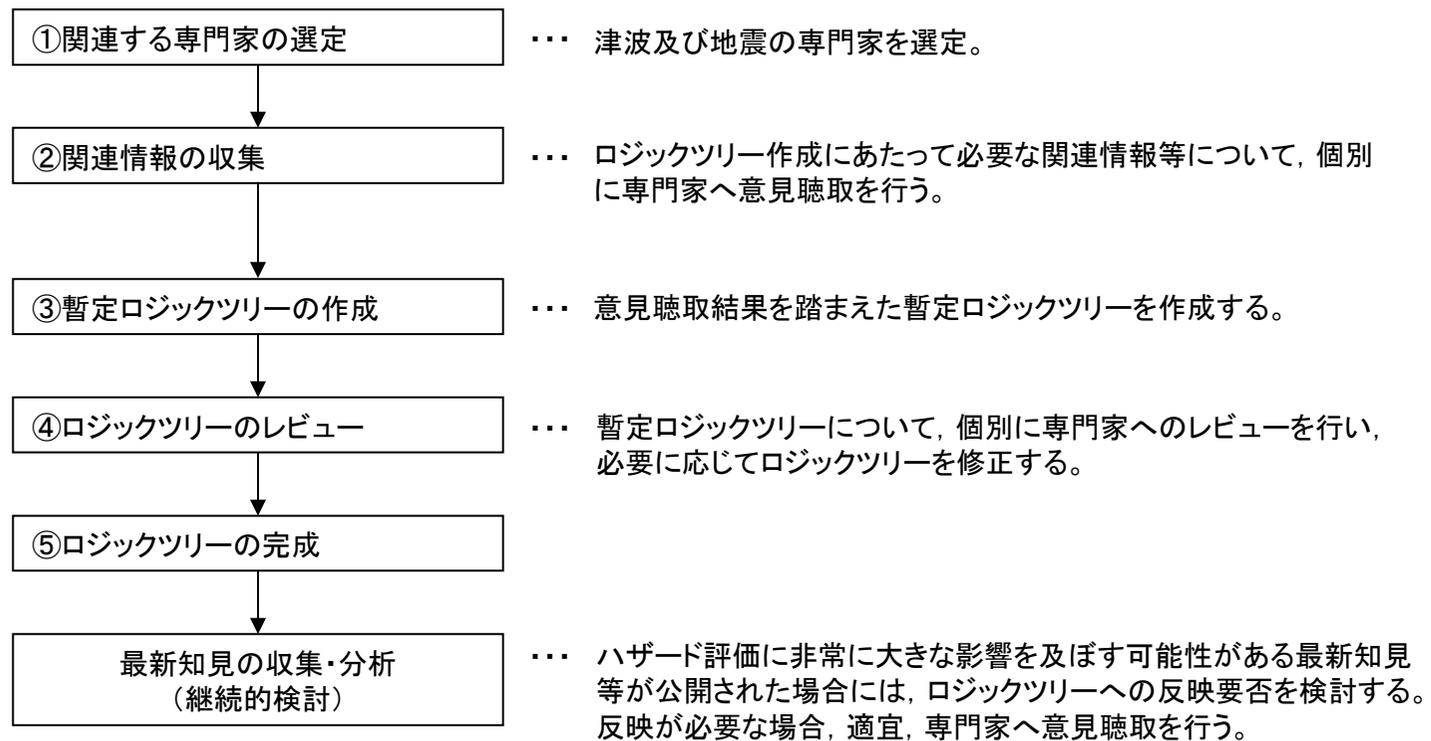
1. 評価概要

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(2017)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】



1. 評価概要

1.3 分岐の重み配分設定

- 土木学会(2011), 土木学会(2016)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(2016)の重みを用いた。
- 新たに追加した分岐や修正した分岐については, 関連情報を収集のうえ, 土木学会(2016)を参考に, 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, 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。

余白

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
- 2. 2 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震
- 2. 3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震
- 2. 4 十勝沖・根室沖の連動型地震
- 2. 5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

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

2. 2 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震

2. 3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震

2. 4 十勝沖・根室沖の連動型地震

2. 5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震

2. 6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震

2. 7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

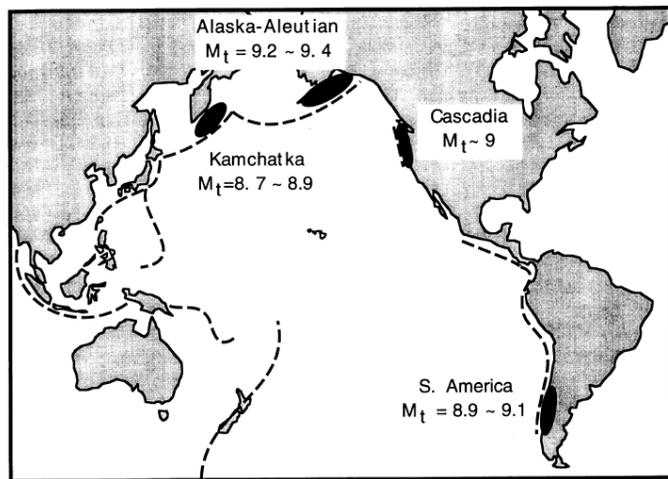
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.1 検討対象領域

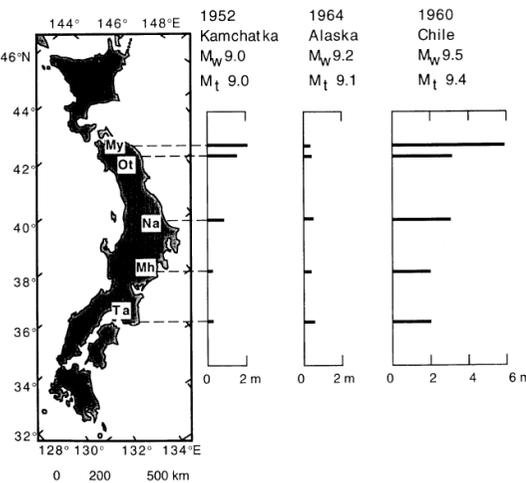
■検討対象領域:基本方針

- ・ 本検討は、日本海溝及び千島海溝(南部)沿いで過去に発生したM8クラスの地震、十勝沖・根室沖の連動型地震及び東北地方太平洋沖型の地震に加え、これまで発生した記録が無いプレート間地震と津波地震の連動型地震も対象とした(検討対象領域の詳細は次頁に記載)。
- ・ また、遠地津波については、M9クラスの巨大地震のうち過去に三陸沿岸に及ぼした影響が大きいチリ地震及びカスケード地震を対象とした(下図)。
- ・ 検討対象領域のうち認識論的不確実さ及び偶発的不確実さを考慮して検討する領域(詳細検討を実施する領域)は、土木学会(2016)等を参考に、簡易評価並びに概略ロジックツリーを用いた概略検討を実施し、年超過確率に与える影響が大きい津波を対象とした。

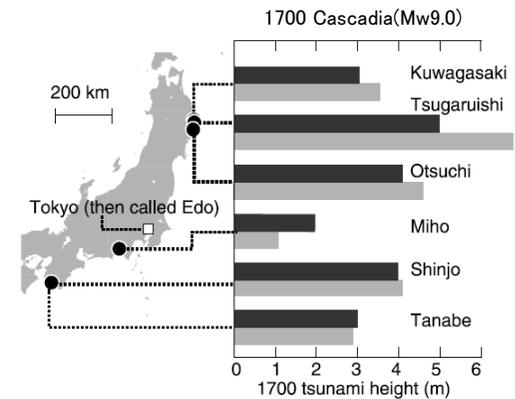
【遠地津波:M9クラスの巨大地震の発生位置及び三陸沿岸の津波高さの比較】



M9クラスの巨大地震の発生位置
(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)一部抜粋)



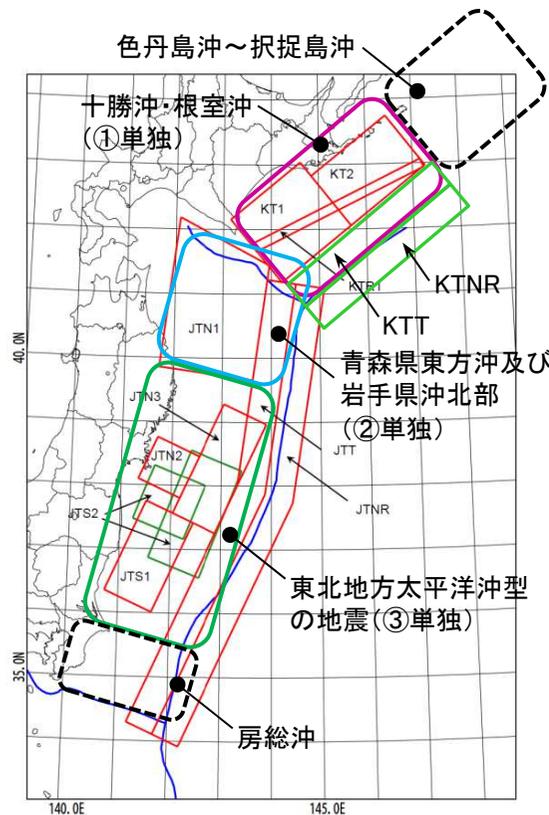
Estimated (Medium) height
Computed for Long-Narrow model
Average slip: 19 m in full-slip zone
14 m including partial-slip zone
 $M_0 4.6 \times 10^{22}$ Nm ($M_W 9.0$)
Error factor 1.33, correlation coefficient 0.98
(Satake et al.(2003))

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

2.1 検討対象領域

■最新知見及び基準津波策定に係る審査実績の反映事項

- 日本海溝及び千島海溝(南部)沿いにおける津波発生領域の設定について、土木学会(2016)を参考に、プレート間地震と津波地震の連動型地震を考慮した(コード:①単独, ②単独, ③単独, ①+②, ②+③, ①+②+③, 択捉島沖～房総沖)。
- また、津波地震、海洋プレート内の正断層型地震については、地震調査研究推進本部(2017)の評価対象領域を踏まえ、千島海溝(南部)沿いの領域に加え(コード:KTT, KTNR)、日本海溝・千島海溝島弧会合部を跨ぐ地震も考慮した(コード:JTT+KTT, JTNR+KTNR)。
- 土木学会(2016)等を参考とした簡易評価、概略ロジックツリーを用いた概略検討を踏まえて設定した認識論的不確実さ及び偶然的不確実さを考慮して検討する領域(詳細検討を実施する領域)を以下に示す。



日本海溝及び千島海溝(南部)沿いの
津波発生領域
(土木学会(2011)に一部加筆)

認識論的不確実さ及び偶然的不確実さを考慮して検討する領域 (: 詳細検討を実施する領域)

コード	名称	既往津波	備考
KT1	十勝沖プレート間	2003年十勝沖地震	概略検討(詳細はp28)
KT2	根室沖プレート間	1973年根室半島沖地震	概略検討(詳細はp28)
KTR1	沈み込んだプレート内のやや浅い地震	1994年北海道東方沖地震	概略検討(詳細はp28)
JTN1	青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震	1968年十勝沖地震	詳細検討
JTT, KTT, JTT+KTT	津波地震	1896年明治三陸地震	詳細検討
JTNR, KTNR, JTNR+KTNR	海洋プレート内の正断層型地震	1933年昭和三陸地震	詳細検討
①単独	十勝沖・根室沖の連動型地震	17世紀の地震	詳細検討
②単独	青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震	—(記録なし)	詳細検討
③単独	東北地方太平洋沖型の地震	3.11地震	概略検討(詳細はp29～32)
①+②	十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震	—(記録なし)	詳細検討
②+③	青森県東方沖から茨城県沖の連動型地震	—(記録なし)	東北地方太平洋沖型の地震の50年間超過確率は 10^{-30} オーダー(詳細はp29～32)。本地震が発生する確率はさらに低い。
①+②+③	十勝沖・根室沖から茨城県沖の連動型地震	—(記録なし)	
択捉島沖～房総沖	択捉島沖から房総沖の連動型地震	—(記録なし)	概略検討(詳細はp33～35)
(遠地津波)	チリ	1960年	概略検討(詳細はp28)
	カスケード	1700年	概略検討(詳細はp28)

余白

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

■千島海溝(南部)沿いにおけるM8クラスの地震に伴う津波及び遠地津波

- 千島海溝(南部)沿いのM8クラスの地震、遠地津波のうち三陸沿岸に及ぼす影響が大きいチリ地震及びカスケード地震が年超過確率に与える影響について、土木学会(2016)を参考に、東通原子力発電所の「評価対象水位」と「津波高さに含まれるばらつきを考慮した既往津波高」との比較から検討した。検討結果を以下に示す。
- 本検討から、千島海溝(南部)沿いのM8クラスの地震及び遠地津波が年超過確率に与える影響は小さいことから、検討対象領域(詳細検討を実施する領域)に選定しない。

【土木学会(2016)】

評価対象となる水位(X)の年超過確率に有意な影響を与える波源を評価対象とすればよく、評価対象水位(X)と活動域による評価地点の最大水位上昇量(下降量)(H)が、以下の関係となる活動域では、最終的な年超過確率に与える影響は微小であるとしている。

$$|X| > |H| \cdot \kappa^{2.3}$$

ここで、X:評価対象となる水位(敷地高や取水可能レベル)、H:評価地点前面の最大水位上昇(下降)量、 κ :津波高さに含まれるばらつき

- Hを既往津波高、津波高さに含まれるばらつき κ を1.4とすると、 $H \times \kappa^{2.3} = H \times 1.4^{2.3} \approx 2H$ となり、評価対象水位(X)に対し、既往津波高(H)が約1/2以下であれば、年超過確率に与える影響は小さいと考えられる。
- 発電所の津波水位に与える影響が大きい十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震に伴う津波の最大水位上昇量11.18mを評価対象水位(X)とすると、千島海溝(南部)沿いにおけるM8クラスの地震及び遠地津波の既往津波高(H)は、評価対象水位(X)の約1/2以下(約5.6m以下)であり(下表)、年超過確率に与える影響は小さいことを確認した。

種別	津波発生領域(コード)	既往津波(Mw) ^{※1}	既往津波高:H	備考(既往津波高の参考文献)
千島海溝(南部)沿い	十勝沖(KT1)	1952年(Mw8.2)	2.0m(青森県八戸市) ^{※2}	渡辺(1998)
	根室沖(KT2)	1894年(Mw8.1)	1.5m(岩手県田老町) ^{※2}	渡辺(1998)
	沈み込んだプレート内のやや浅い地震(KTR1)	1994年(Mw8.4)	0.9m(青森県六ヶ所村) ^{※2}	渡辺(1998)(全振幅)
遠地津波	チリ	1960年(Mw9.5)	2.0m(青森県東通村白糖)	チリ津波合同調査班(1961)
	カスケード	1700年(Mw9.1)	5m(岩手県宮古市) ^{※3}	Satake et al.(2003)

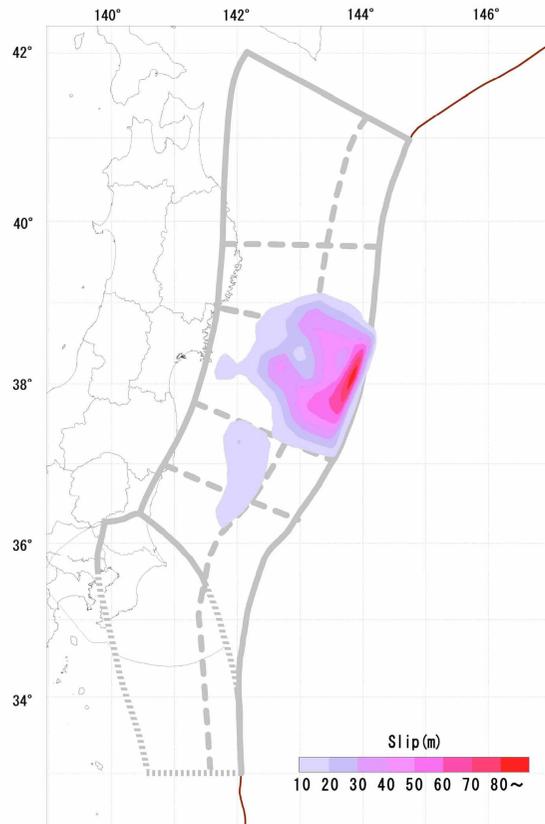
※1:土木学会(2011)を引用、 ※2:発電所に最も近い地域で記録が残されている既往津波高、 ※3:東日本太平洋沿岸における既往最大津波高

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

■東北地方太平洋沖型の地震(1/4)

- 地震調査研究推進本部(2019)では、次の東北地方太平洋沖型の地震の発生確率について、今後50年以内の発生確率をほぼ0%と評価している。



東北地方太平洋沖型地震の地震時のすべり量の分布
(地震調査研究推進本部(2019))

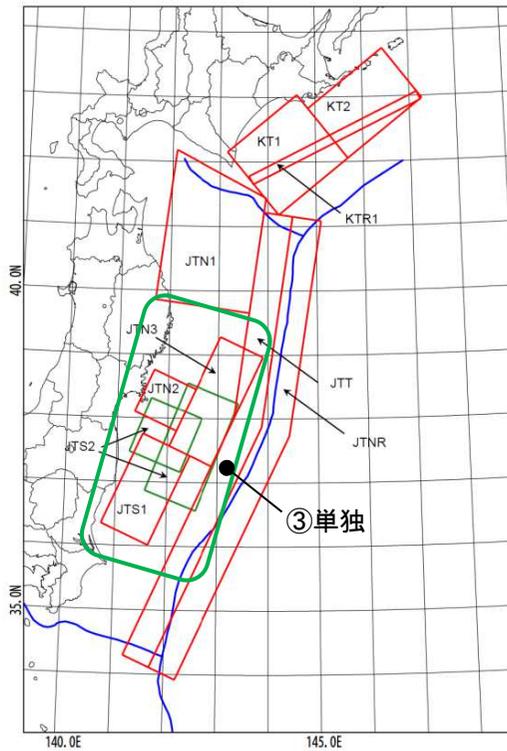
次の超巨大地震(東北地方太平洋沖型)の発生確率等
(地震調査研究推進本部(2019))

項目	将来の地震発生確率等 注1,3	地震後経過率 (期末) 注5	備考
今後10年以内の発生確率	ほぼ0%	0.03	地震発生時期の不確実性を考慮する方法で発生確率を算出した
今後20年以内の発生確率	ほぼ0%	0.05	
今後30年以内の発生確率	ほぼ0%	0.06~0.07	
今後40年以内の発生確率	ほぼ0%	0.08~0.09	
今後50年以内の発生確率	ほぼ0%	0.10~0.11	
地震後経過率 (2019年1月1日時点)	0.01		経過時間約7.8年を平均発生間隔約550年~600年で除した値
次の地震の規模	M9.0程度注4		東北地方太平洋沖地震のM、Mt、Mwを参考にし、総合的に判断した。

2.1 検討対象領域

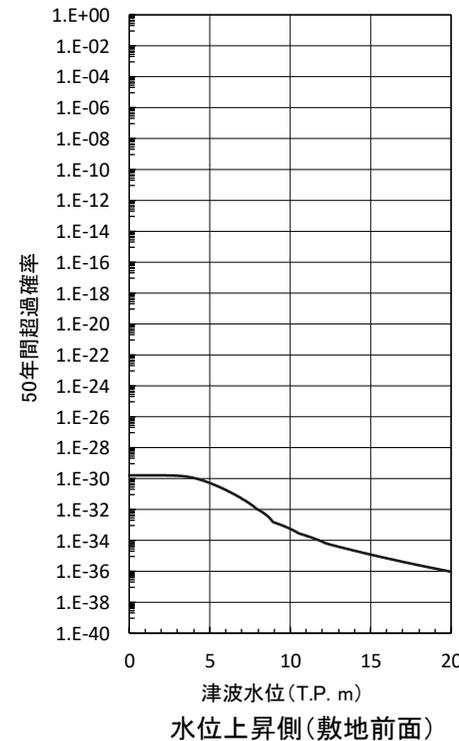
■東北地方太平洋沖型の地震(2/4)

- ・ 土木学会(2016), 地震調査研究推進本部(2019)を参考に概略ロジックツリーを作成した(各項目の詳細は次頁に記載)。
- ・ 前回の地震発生日は2011年3月11日であることを踏まえ, 更新過程を用いて今後50年間超過確率を算定した(評価基準日: 2024年1月1日)。
- ・ 算定した津波ハザード曲線を以下に示す。今後50年間超過確率は, ほぼ0%(10^{-30} オーダー)であり, 年超過確率に与える影響は十分に小さいことを確認した。

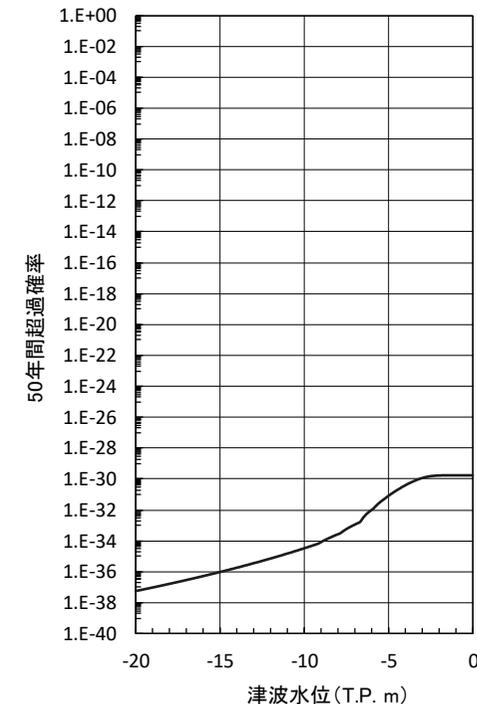


日本海溝及び千島海溝(南部)沿い海域の津波発生領域区分
(土木学会(2011)に一部加筆)

【発電所位置における津波ハザード曲線】



水位上昇側(敷地前面)



水位下降側(補機冷却海水系取水口前面)

(参考)地震発生日と評価基準日の違いによる今後50年の地震発生確率

	地震発生日	評価基準日	今後50年の地震発生確率
東北地方太平洋沖型の地震 (平均発生間隔: 600年)	約500~600年前 (前々回の地震)	2011年3月11日 (前回の地震発生日)	20~30%※1
	2011年3月11日 (前回の地震)	2024年1月1日	ほぼ0% (10^{-30} ※2)

※1: 地震調査研究推進本部(2012)による評価 ※2: $\alpha=0.24$ で算定

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)

2.1 検討対象領域

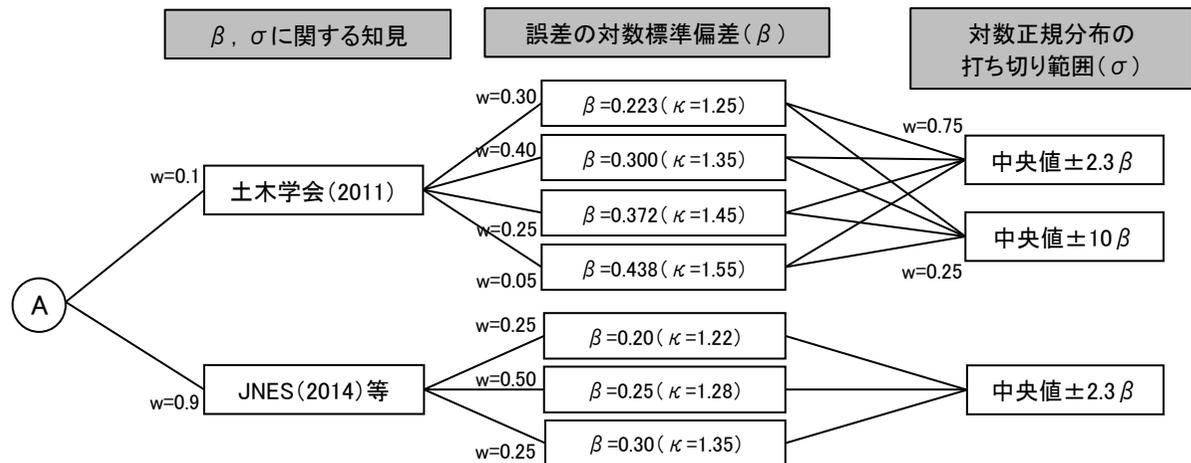
■東北地方太平洋沖型の地震(3/4):概略ロジックツリー

【津波発生モデルのロジックツリー】

- ✓ 土木学会(2016), 地震調査研究推進本部(2019)を参考に概略ロジックツリーを作成した(各項目の詳細は次頁に記載)。

【津波高さ推定に関するロジックツリー】

- ✓ 詳細検討に用いるロジックツリーと同じロジックツリーを用いた(ロジックツリーの詳細は, p68に記載)。



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)

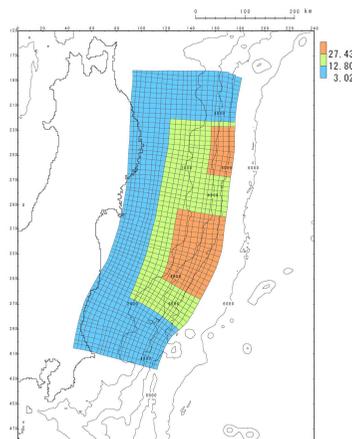
2.1 検討対象領域

■東北地方太平洋沖型の地震(4/4):概略ロジックツリー

【波源モデル及び応力降下量の範囲】

- ・ 波源モデルは, 3.11地震に伴う津波の広域の津波特性(痕跡高)を考慮できる杉野ほか(2014)の方法により設定した特性化モデル※を用いた。
- ・ 応力降下量の範囲については, 3.11地震に伴う津波の広域の津波特性(痕跡高)を考慮できる特性化モデル※のMw(9.13)とした。

※: 特性化モデルの設定方法の詳細は, 補足説明資料「3. 津波波源モデルの設定方法」に記載。



3.11地震の広域の津波特性を考慮した
特性化モデル

主な断層諸元

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($\Delta\sigma$)		3.26MPa
地震モーメント(Mo)		6.21×10^{22} (Nm)
すべり量	平均すべり量(D)	9.82 (m)
	大すべり域(1.4D)	12.80 (m)
	超大すべり域(3D)	27.43 (m)
	背景領域(0.33D)	3.02 (m)

【平均発生間隔, BPT分布】

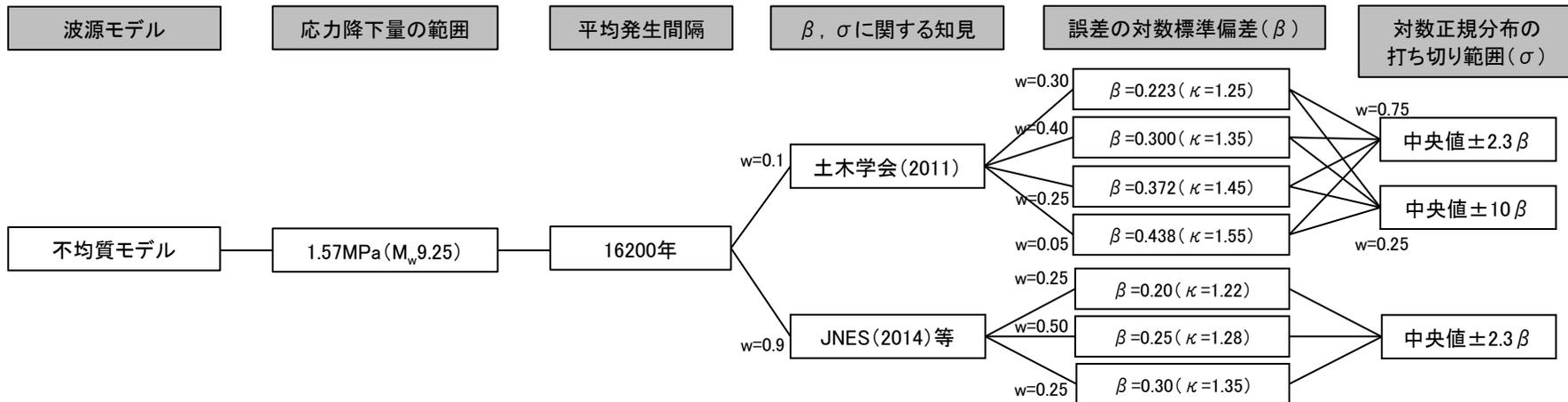
- ・ 地震調査研究推進本部(2012, 2019)を参考に設定した。

2.1 検討対象領域

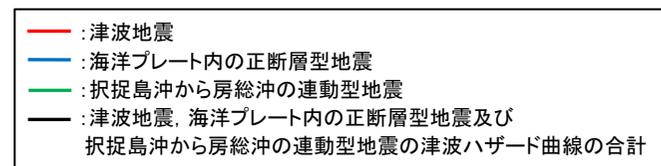
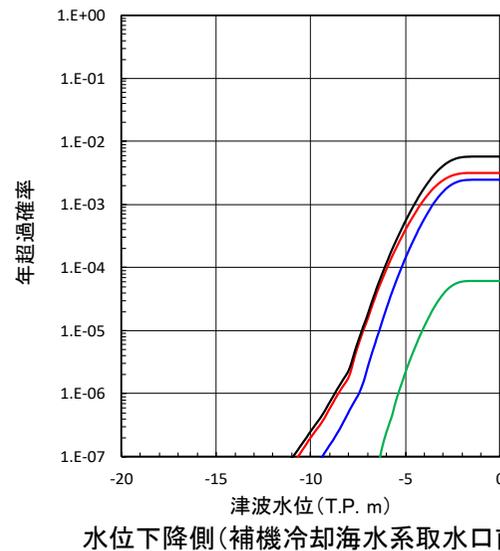
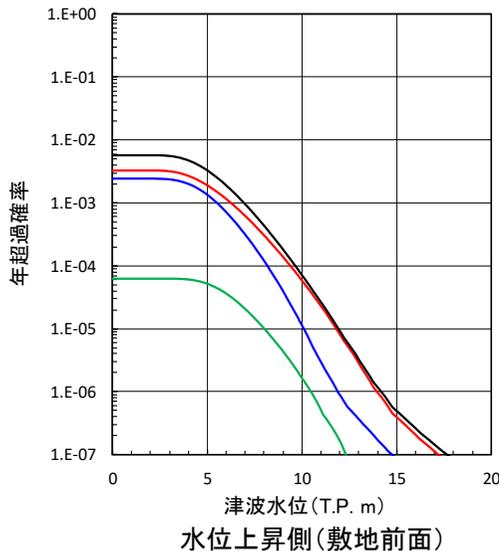
■ 択捉島沖から房総沖の連動型地震(1/3)

- 土木学会(2016)等を参考に概略ロジックツリーを作成し、算定した津波ハザード曲線を以下に示す(各項目の詳細は次頁に記載)。
- 本検討から、択捉島沖から房総沖の連動型地震は、発電所の津波水位に与える影響が大きい津波地震及び海洋プレート内の正断層型地震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した。

【択捉島沖から房総沖の連動型地震の概略ロジックツリー】



【発電所位置における津波ハザード曲線】

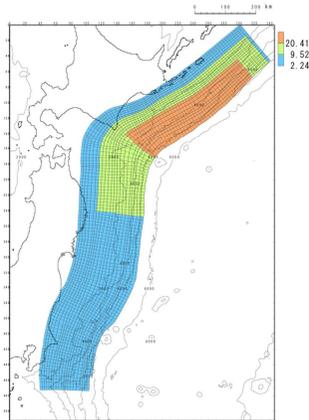


2.1 検討対象領域

■ 択捉島沖から房総沖の連動型地震(2/3)

【波源モデル】

- ・ 広域の津波特性(痕跡高)を考慮できる杉野ほか(2014)の方法を用いて設定した。
- ・ 東北地方太平洋沖型の地震の50年間超過確率は 10^{-30} オーダーであり(詳細はp29~32), 日本海溝沿いで大きなすべりが発生する確率は極めて低いことから, 超大すべり域は, 千島海溝沿いに配置した。



特性化モデル(Mw9.25)

主な断層諸元

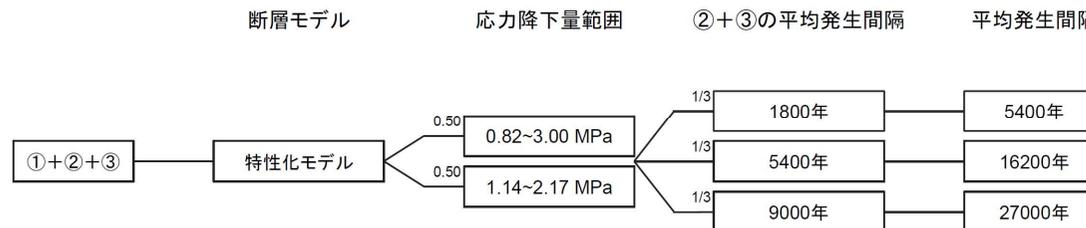
断層パラメータ	設定値	備考
モーメントマグニチュード(Mw)	9.25	
断層面積(S)	278,498 (km ²)	
平均応力降下量($\Delta\sigma$)	1.57MPa	Murotani et al.(2013)で示される平均値
地震モーメント(Mo)	9.47×10^{22} (Nm)	
すべり量	平均すべり量(D)	6.80(m)
	大すべり域(1.4D)	9.52(m)
	超大すべり域(3D)	20.41(m)
	背景領域(0.33D)	2.24(m)

【応力降下量の範囲】

- ・ 択捉島沖から房総沖の連動型地震が発生した記録は無いことから, 土木学会(2016)を参考に, Murotani et al.(2013)のスケーリング則による平均的な応力降下量1.57MPaを設定した。

【平均発生間隔】

- ・ 土木学会(2016)による十勝沖・根室沖から茨城県沖の連動型地震のロジックツリーを参考に, 平均発生間隔の分岐の中央に相当する平均発生間隔を用いた。



十勝沖・根室沖から茨城県沖の連動型地震(①+②+③)のロジックツリー(土木学会(2016))

【津波高さ推定に関するロジックツリー】

- ・ 詳細検討に用いるロジックツリーと同じロジックツリーを用いた(ロジックツリーの詳細は, p68に記載)。

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

■ 択捉島沖から房総沖の連動型地震(3/3)

【津波地震(JTT)及び海洋プレート内の正断層型地震(JTNR)の概略ロジックツリー】

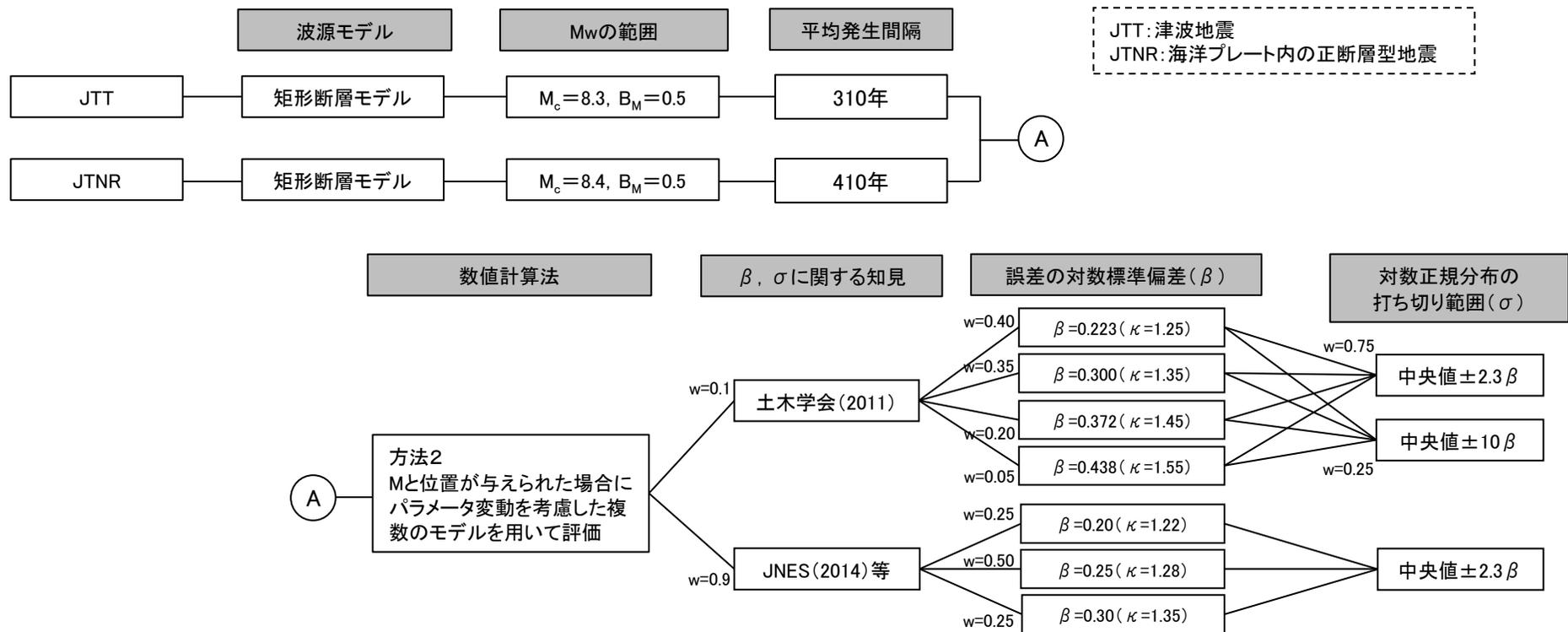
津波発生モデルのロジックツリー

- ✓ 土木学会(2011)に示される各津波波源領域のロジックツリー※を参考に作成した。Mwの範囲, 平均発生間隔については, 各分岐のうち平均的な設定値を示す分岐を選定した。

※: 土木学会(2011)のロジックツリーの詳細は, 補足説明資料「4. 土木学会(2011)のロジックツリー」に記載。

津波高さ推定に関するロジックツリー

- ✓ 詳細検討に用いるロジックツリーと同じロジックツリーを用いた(ロジックツリーの詳細は, p68に記載)。



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
- 2. 2 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震
- 2. 3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震
- 2. 4 十勝沖・根室沖の連動型地震
- 2. 5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

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)

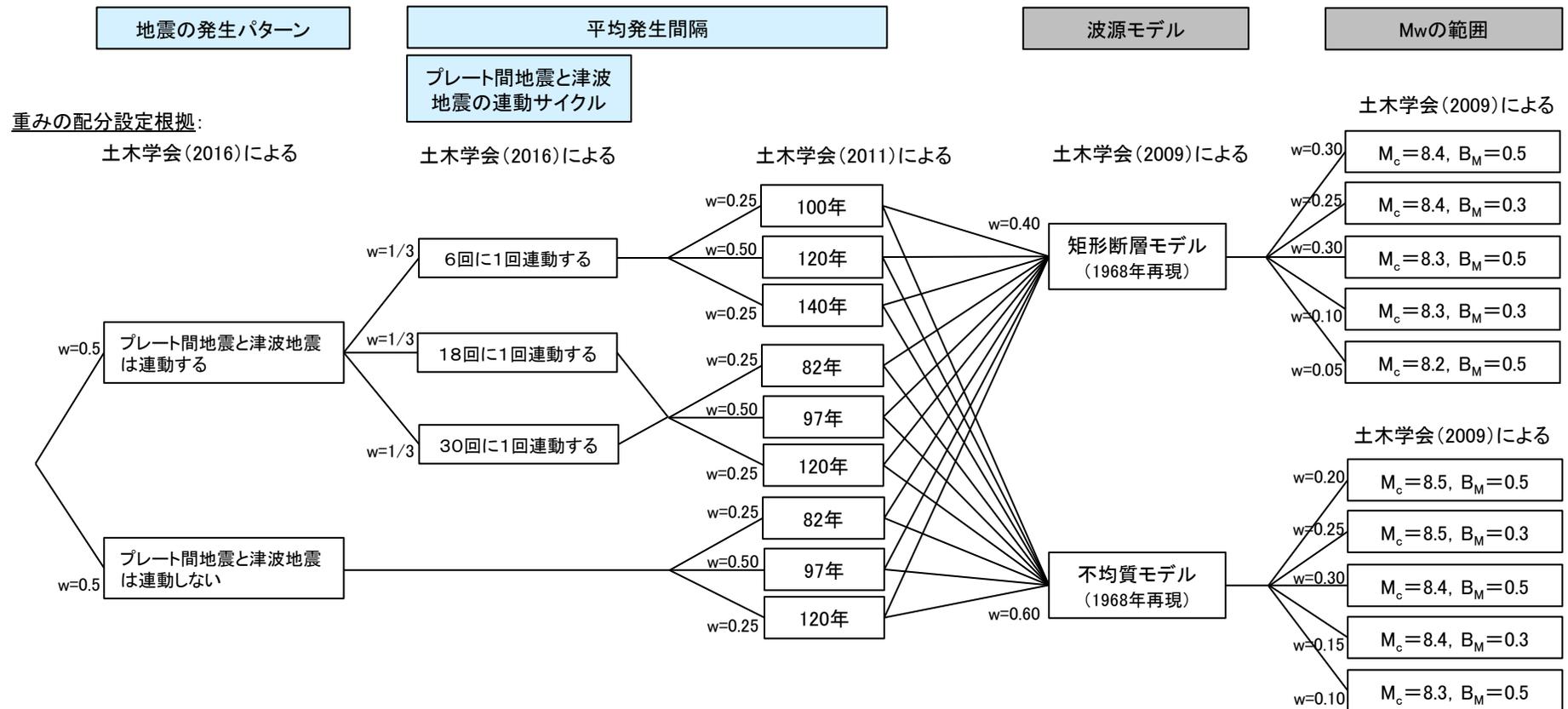
2.2 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震

■ロジックツリー

- 土木学会(2011)のロジックツリー※を基本に、各不確実さに関連する情報を収集・分析し、ロジックツリーを作成した(各項目の詳細は次頁以降で説明)。
- なお、Mwの範囲と平均発生間隔の組合せ(ロジックツリー)は、土木学会(2011)と同様に、各項目の分岐を一律に組み合わせた。

※:土木学会(2011)のロジックツリーの詳細は、補足説明資料「4. 土木学会(2011)のロジックツリー」に記載。

 : 土木学会(2011)からの変更箇所(新規設定を含む)



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 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震

■地震の発生パターン, 平均発生間隔

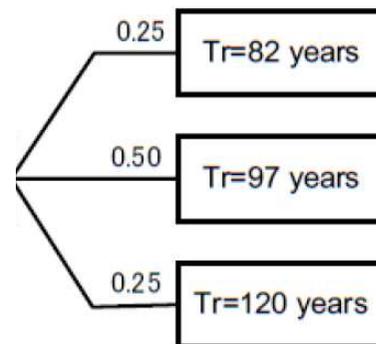
【地震の発生パターン】

- 本領域ではプレート間地震と津波地震の連動型地震が発生した記録が無いことから、土木学会(2016)を参考に(詳細はp45に記載)、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、土木学会(2016)と同様に均等配分とした。

【平均発生間隔】

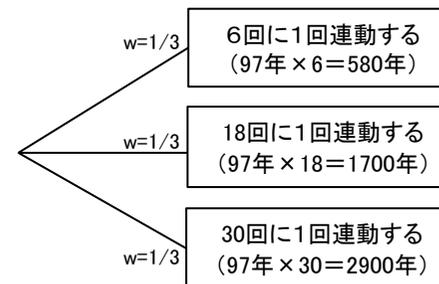
- 土木学会(2011)の分岐設定を基本に、プレート間地震と津波地震の連動型地震である青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震(②単独)の平均発生間隔と重複しないように(=連動サイクルを考慮して)設定した。
- 土木学会(2011)の分岐及び青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震(②単独)の平均発生間隔を以下に示す。

【土木学会(2011)の分岐設定】



【青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震(詳細はp55~56)】

- ✓ プレート間地震と津波地震の連動型地震が発生した記録が無いことを踏まえ、土木学会(2016)を参考に、東北地方太平洋沖型の地震の平均発生間隔(600年)と同程度となるように、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年間に相当), 18回に1回(1800年間に相当), 30回に1回(3000年間に相当)発生するとした。



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 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震

■波源モデル及びMwの範囲

- 波源モデルは、土木学会(2011)を参考に、1968年十勝沖地震に伴う津波を再現する矩形断層モデル(Mw8.41)、不均質モデル(Mw8.46)を分岐として設定し、中央マグニチュード(Mc)はそれぞれMc8.4、Mc8.5とした。また、重み配分については、土木学会(2009)のアンケート結果に基づき、矩形断層モデルの重みを0.4、不均質モデルの重みを0.6とした。不均質モデルのすべり量分布及び各小断層のすべり量を以下に示す*。
- Mwの範囲の分岐の重み配分については、土木学会(2009)に基づき設定した。

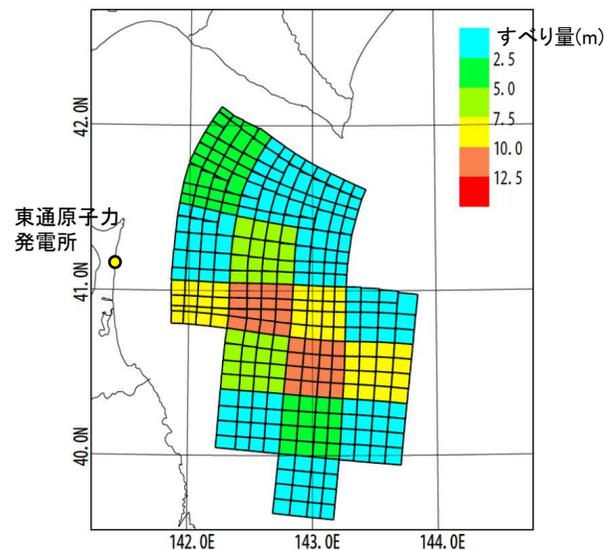
*:矩形断層モデルの設定方法の詳細は、補足説明資料「3. 津波波源モデルの設定方法」に記載。

【矩形断層モデル】



波源位置

【不均質モデル(土木学会(2011))】



すべり量分布

各小断層のすべり量

3.10m	2.13m	0.03m	—
0.02m	6.13m	1.00m	—
9.48m	11.98m	7.78m	1.41m
—	7.01m	12.00m	8.20m
—	0.01m	4.56m	0.01m
—	—	0.81m	—

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)

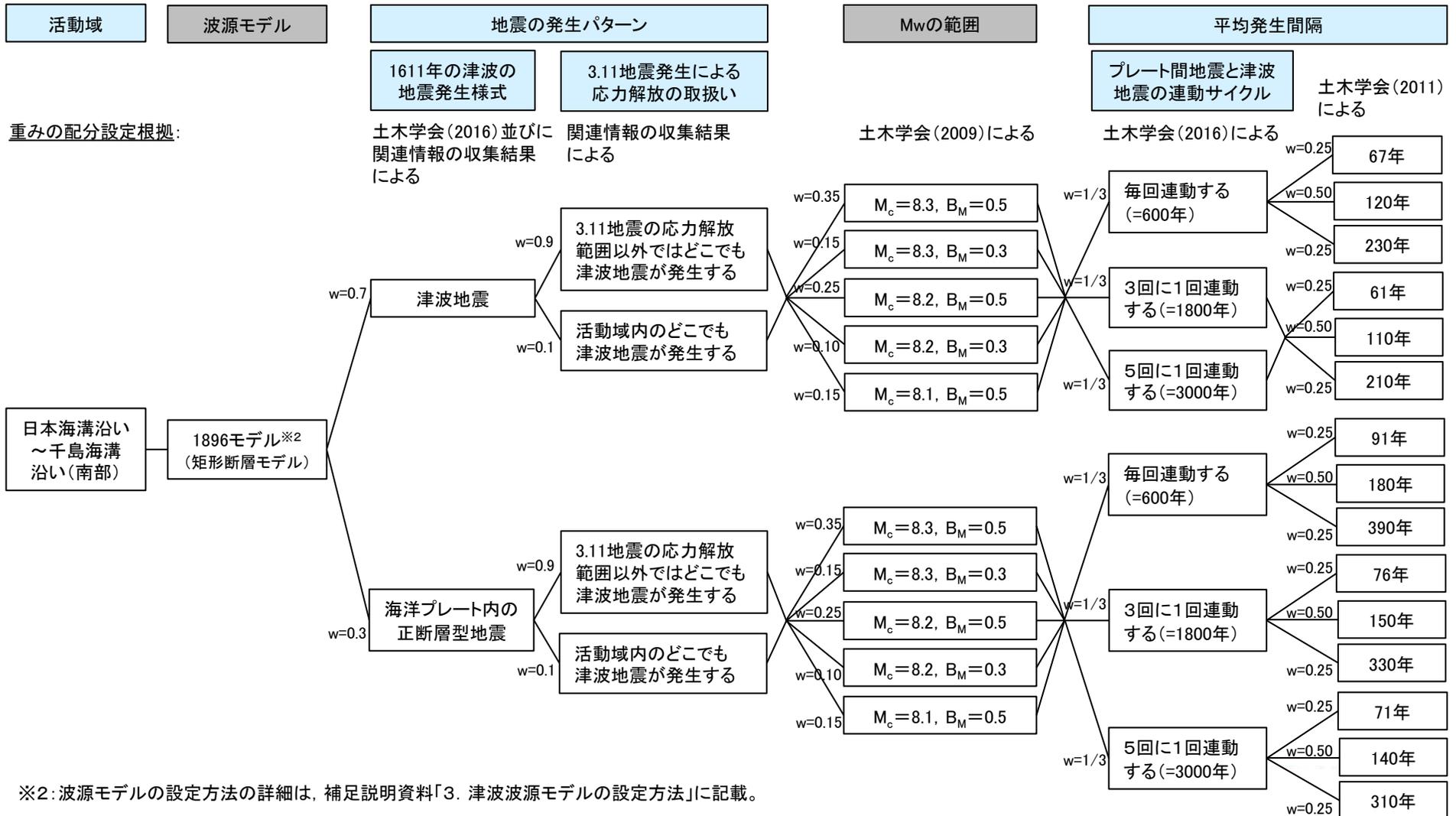
- 2. 1 検討対象領域
- 2. 2 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震
- 2. 3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震**
- 2. 4 十勝沖・根室沖の連動型地震
- 2. 5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

2.3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震

■津波地震のロジックツリー

- 土木学会(2011)のロジックツリー※1を基本に, 活動域, 地震の発生パターン及び平均発生間隔に関する情報を収集し, ロジックツリーを作成した(各項目の詳細は次頁以降で説明)。
- なお, Mwの範囲と平均発生間隔の組合せ(ロジックツリー)は, 土木学会(2011)と同様に, 各項目の分岐を一律に組み合わせた。
※1:土木学会(2011)のロジックツリーの詳細は, 補足説明資料「4. 土木学会(2011)のロジックツリー」に記載。

□ :土木学会(2011)からの変更箇所



※2: 波源モデルの設定方法の詳細は, 補足説明資料「3. 津波波源モデルの設定方法」に記載。

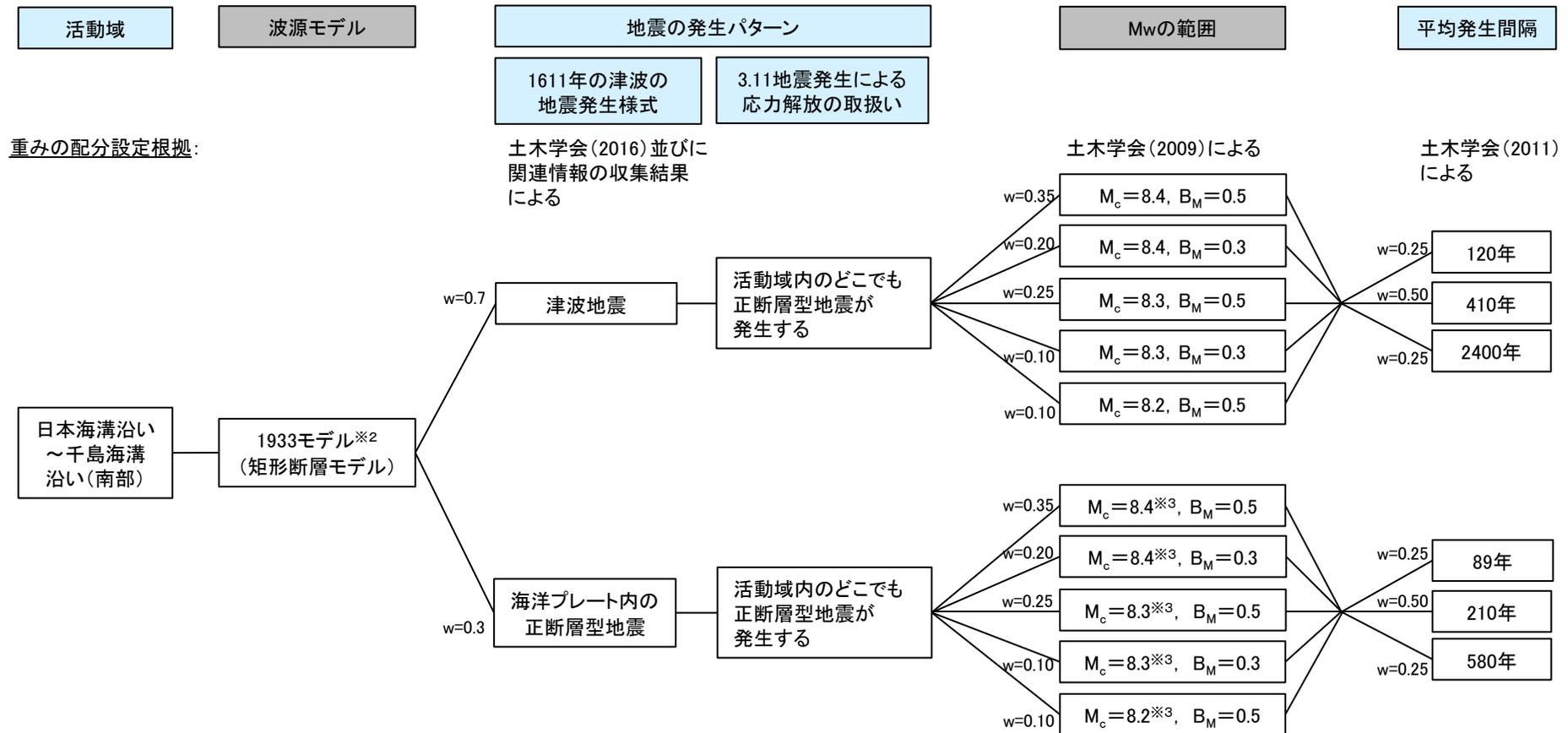
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震

■海洋プレート内の正断層型地震のロジックツリー

- 土木学会(2011)のロジックツリー※1を基本に, 活動域, 地震の発生パターン及び平均発生間隔に関する情報を収集し, ロジックツリーを作成した(各項目の詳細は次頁以降で説明)。
- なお, Mwの範囲と平均発生間隔の組合せ(ロジックツリー)は, 土木学会(2011)と同様に, 各項目の分岐を一律に組み合わせた。
※1:土木学会(2011)のロジックツリーの詳細は, 補足説明資料「4. 土木学会(2011)のロジックツリー」に記載。

□ : 土木学会(2011)からの変更箇所



重みの配分設定根拠:

土木学会(2016)並びに
関連情報の収集結果
による

土木学会(2009)による

土木学会(2011)
による

※2: 波源モデルの設定方法の詳細は, 補足説明資料「3. 津波波源モデルの設定方法」に記載。

※3: 1611年の津波が正断層型地震の場合のMcについて専門家意見聴取を実施。意見聴取結果の詳細は, 補足説明資料「5. 海洋プレート内の正断層型地震の地震規模」に記載。

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 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震

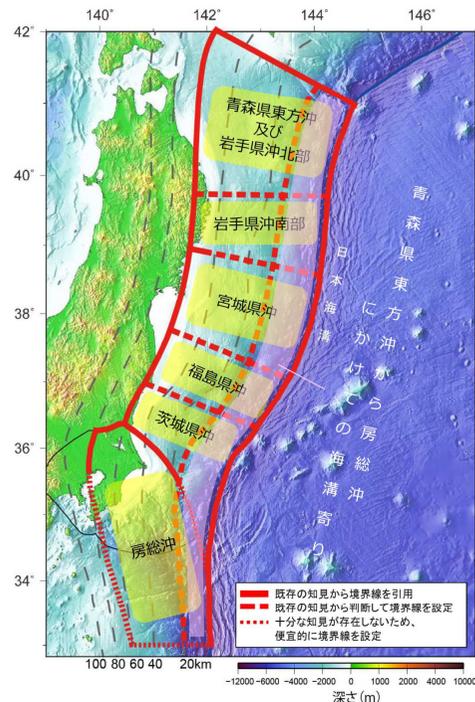
■活動域, 平均発生間隔及び地震規模

【千島海溝沿い(南部)で発生する津波地震】

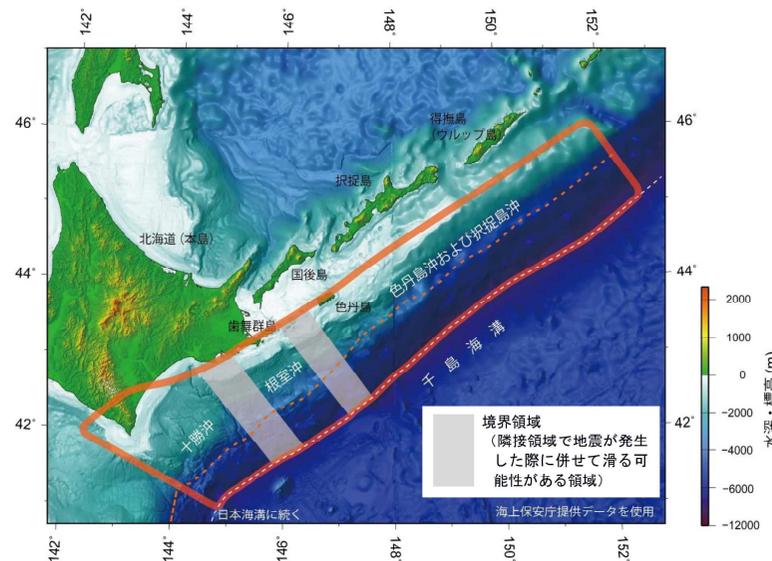
- 地震調査研究推進本部(2017)は, 顕著な被害を伴った津波地震は知られていないが, 日本海溝では被害の大きい津波地震が発生していることを踏まえ, 発生領域として海溝寄りの領域を設定していることから, 活動域に千島海溝沿い(南部)を設定する。
- 平均発生間隔及び地震規模について, 1611年の津波, 1896年明治三陸地震津波と同規模の地震が発生した記録はないが, 日本海溝と千島海溝を跨ぐ地震発生の可能性を考慮することから, 本評価では, 日本海溝沿いの津波地震の分岐を流用する。

【千島海溝沿い(南部)で発生する海洋プレート内の正断層型地震】

- 地震調査研究推進本部(2017)は, 過去に十勝沖から択捉島沖において地震が発生した履歴は無いが, 択捉島沖の北東側では2007年にM8.2(Mw8.1)が, 隣接する日本海溝沿いの領域では1933年にM8.1(Mw8.4)の地震(昭和三陸地震)が発生しているため, 同様の規模の地震は海溝軸外側のどこでも発生する可能性があるとして評価していることから, 活動域に千島海溝沿い(南部)を設定する。
- 平均発生間隔及び地震規模について, 1933年昭和三陸地震津波と同規模の地震が発生した記録はないが, 日本海溝と千島海溝を跨ぐ地震発生の可能性を考慮することから, 本評価では, 日本海溝沿いの海洋プレート内の正断層型地震の分岐を流用する。



地震調査研究推進本部(2019)における
日本海溝沿いの評価対象領域



地震調査研究推進本部(2017)における
千島海溝沿いの評価対象領域

2.3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震

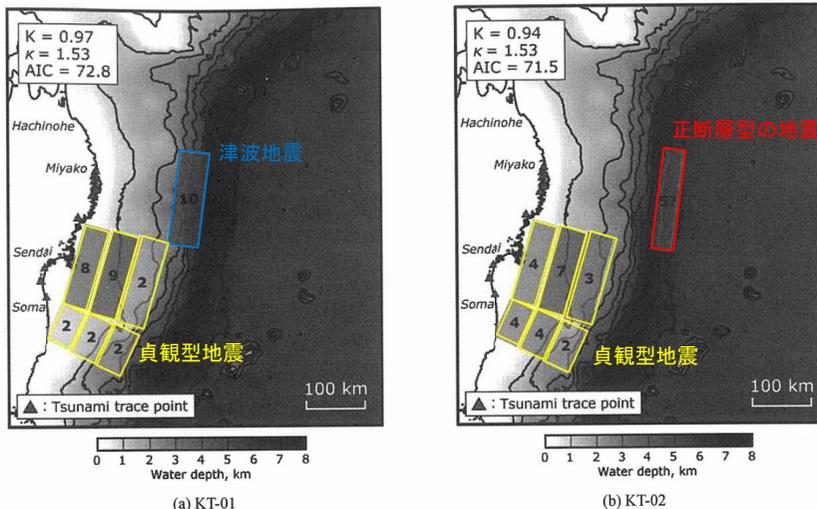
■地震の発生パターン：1611年の津波の地震発生様式

- 土木学会(2011), 地震調査研究推進本部(2019), Yamanaka and Tanioka(2022)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。また, 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, 土木学会(2016)を参考に, 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。
- 重み配分については, 土木学会(2016)並びに1611年の津波の発生様式に関連する情報の収集結果を踏まえ, 重みの配分設定方法に基づき(p21), 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。
- なお, 今井ほか(2015), 高橋ほか(2023)は, 東北地方太平洋沖型の地震(③単独)と同じ発生様式であるプレート境界面深部と浅部の連動型地震を想定している。地震調査研究推進本部(2019)では, 1611年の津波の発生様式を津波地震と評価しているが, 東北地方太平洋沖型の地震と同じ発生様式であった可能性について, 津波地震と東北地方太平洋沖型の地震の平均発生間隔の設定で考慮していることから, 本評価でも同様に扱う(詳細は, p46~47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[※]。
- 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。

※: 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】

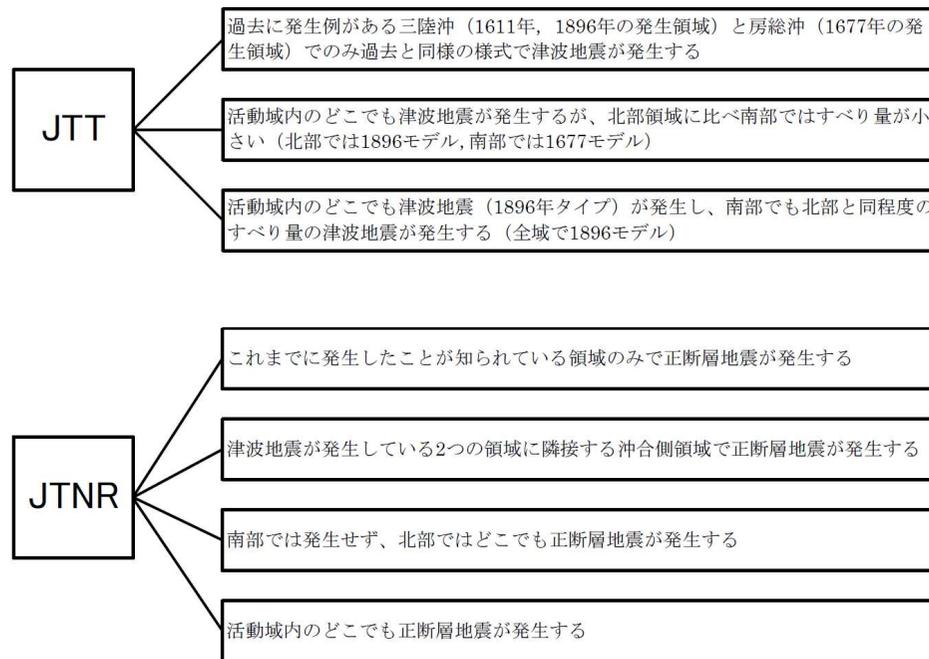
関連情報	1611年の津波の発生様式
相田(1977)	海洋プレート内の正断層型地震
土木学会(2002)	津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震
中央防災会議(2005)	津波地震
土木学会(2009)	津波地震
今井ほか(2012)	海洋プレート内の正断層型地震
岩淵(2013)	津波地震
今井ほか(2015)	プレート境界面深部と浅部の 連動型地震
福原・谷岡(2017)	津波地震
地震調査研究 推進本部(2019)	津波地震
Yamanaka and Tanioka(2022)	津波地震
高橋ほか(2023)	プレート境界面深部と浅部の 連動型地震

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)

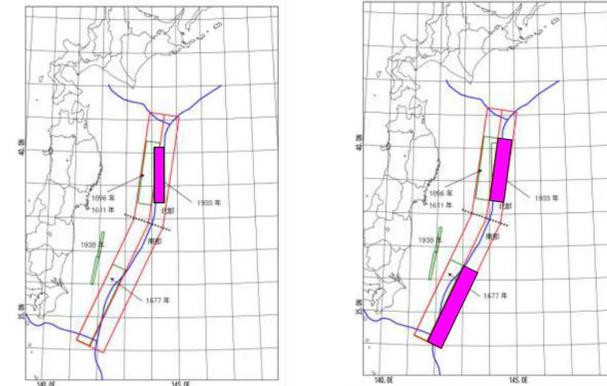
2.3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震

■地震の発生パターン：3.11地震発生による応力解放の取扱い

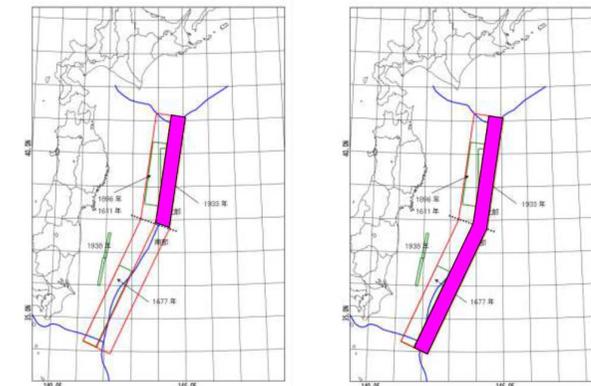
- 土木学会(2011)では、地震の発生パターンに分岐を設定しているが、地震調査研究推進本部(2019)の評価を踏まえ、日本海溝沿いのどこでも地震が発生する分岐のみとした。
- なお、津波地震については、M9クラスの巨大地震と同様に、3.11地震の応力解放範囲で発電所供用期間中に地震が発生する可能性は小さいと考えられるものの、津波地震単独で活動する際に必要な歪みは、M9クラスの巨大地震と比較して小さいことを踏まえ、応力解放範囲で津波地震が発生する場合の分岐を設定した。重み配分については、重みの配分設定方法に基づき(p21)、3.11地震の応力解放範囲以外ではどこでも津波地震が発生する重みを0.9、活動域内のどこでも津波地震が発生する重みを0.1とした。



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))

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 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震

■平均発生間隔：基本方針

- 土木学会(2011), 地震調査研究推進本部(2019)と同様に固有地震モデルに基づく方法を用いて, 以下の考え方にに基づき, 平均発生間隔を設定した。

地震調査研究推進本部(2019)による青森県東方沖から房総沖にかけての津波地震の発生領域, 震源域の形態及び発生間隔の評価

項目	特性	根拠
(1)地震の発生領域の目安	図1 の当該領域。	震源域は、1896年の明治三陸地震のモデル(Tanioka and Satake, 1996 ; Aida, 1978)を参考にし、同様の地震は青森県東方沖から房総沖の海溝寄りの領域内のどこでも発生する可能性があると考えた。
(2)震源域の形態	陸側のプレートと太平洋プレートの境界面。低角逆断層型。	
(3)震源域	日本海溝に沿って長さ約200km、幅約50km。具体的な地域は特定できない。	
(4)震源断層面における平均的なずれの向き	約N111~112° E (陸側のプレートと太平洋プレートに対するずれの向き)	太平洋プレートの陸側のプレートに対する相対運動方向(DeMets et al. 2010)から推定した。
(5)発生間隔等	発生頻度 102.8年に1回	1600年から2011年3月11日14時46分までの約411年間に顕著な津波被害を伴った地震が4回(1611年・1677年・1896年・2011年)発生したため、発生頻度は102.8年に1回とした。

1611年の津波の地震発生様式を考慮した既往地震, 中央マグニチュード(Mc)及び地震発生回数の考え方

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)	地震発生回数	既往地震	中央マグニチュード(Mc)	地震発生回数
津波地震(JTT)	1611年 1677年 1896年	8.3 (1896年)	1600年以降 約410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410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410年間において発生は1回。	1611年 1933年	8.4 (1933年)	1600年以降 約410年間において発生は2回。

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 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震

■平均発生間隔：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型地震である東北地方太平洋沖型の地震(③単独), 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震(②単独)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。
- 地震調査研究推進本部(2019), 土木学会(2016)を参考に設定した東北地方太平洋沖型の地震, 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震の平均発生間隔を以下に示す。
- 重み配分については, 現時点の見解で判断するのは困難であることから, 土木学会(2016)と同様に均等配分とした。

【東北地方太平洋沖型の地震】

- ✓ 600年間隔で, 毎回プレート間地震と津波地震が連動する。
- ✓ 15~17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。

【青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震の連動型地震(詳細はp55~56)】

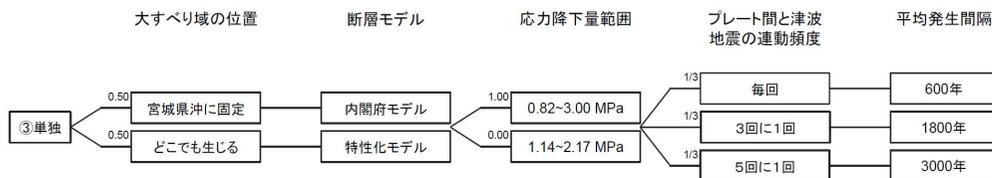
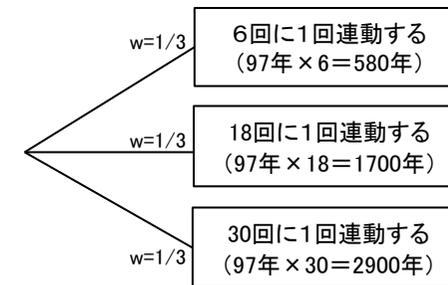
- ✓ プレート間地震と津波地震の連動型地震が発生した記録が無いことを踏まえ, 土木学会(2016)を参考に, 東北地方太平洋沖型の地震の平均発生間隔(600年)と同程度となるように, プレート間地震(1677年, 1763年, 1856年, 1968年)の平均発生間隔(97年)の6回に1回(600年間隔に相当), 18回に1回(1800年間隔に相当), 30回に1回(3000年間隔に相当)発生するとした。

地震調査研究推進本部(2019)による東北地方太平洋沖型の地震の評価

対象地震及び発生領域	地震発生日時	地震の平均発生間隔等	地震規模 ^{注1}			死傷者数 ^{注2}		最大震度 ^{注3}	津波高さ ^{注4}
			M	Mt	Mw	死者・行方不明者	負傷者		
超巨大地震 (東北地方太平洋沖型)	紀元前4~3世紀 4~5世紀 869/ 7/13	平均発生間隔は550年 ~600年程度 ^{注5}	8.3		8.6~ ^{注6}	—	—	7	10以上
	15~17世紀 ^{注7} 2011/ 3/11 14:46					9.0 ^{注8}	9.1~ 9.4 ^{注8}		

注7: 15~17世紀のうち, 1454年もしくは1611年のいずれかの地震が該当すると判断した。

(注1~注6, 注8の説明については省略)



*この平均発生間隔に
②+③の平均発生間隔を考慮

東北地方太平洋沖型の地震(③単独)のロジックツリー(土木学会(2016))

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
- 2. 2 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震
- 2. 3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震
- 2. 4 十勝沖・根室沖の連動型地震**
- 2. 5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

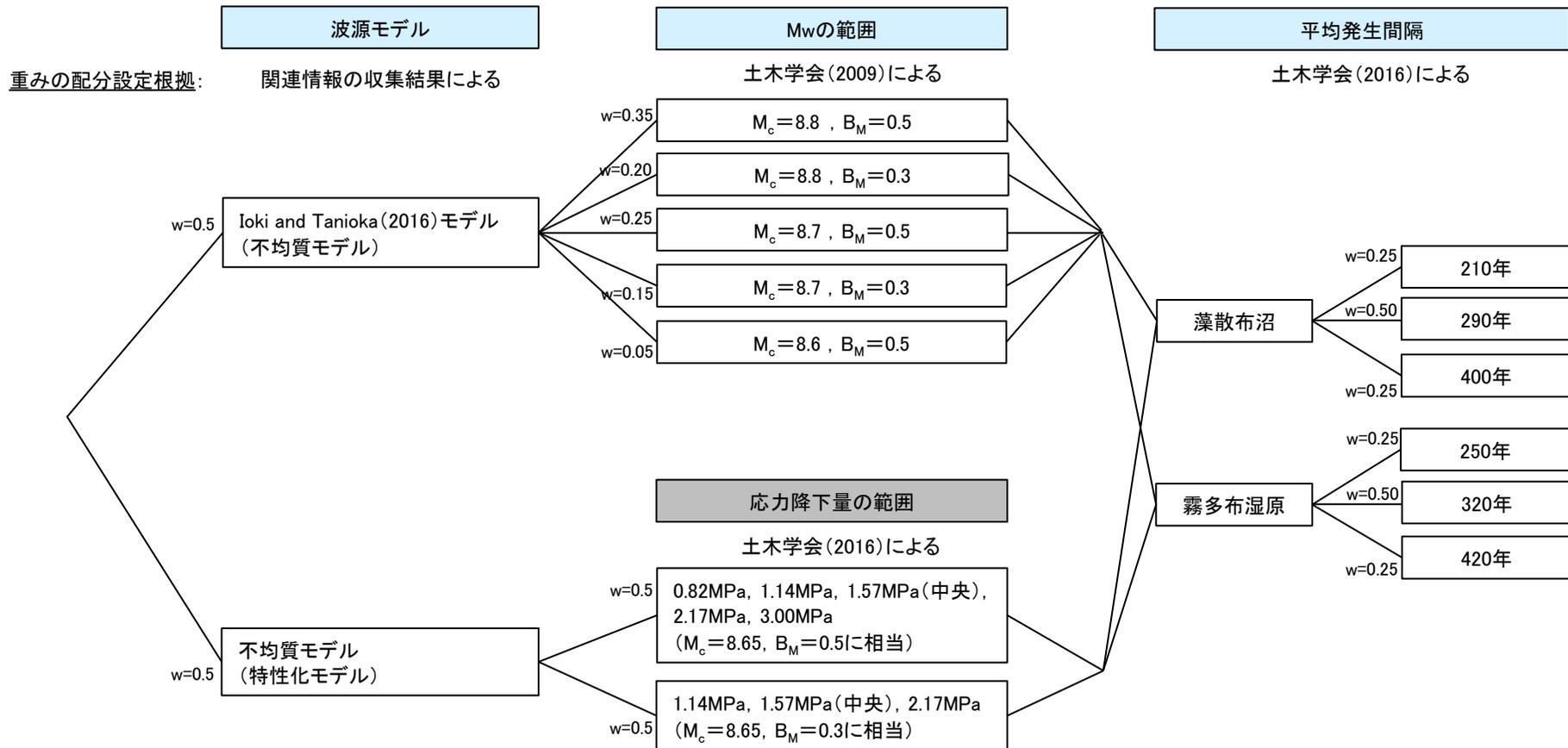
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.4 十勝沖・根室沖の連動型地震

■ロジックツリー

- 土木学会(2016)を参考に、各不確実さに関連する情報を収集・分析し、ロジックツリーを作成した(各項目の詳細は次頁以降で説明)。
- なお、Mwの範囲と平均発生間隔の組合せ(ロジックツリー)は、土木学会(2016)と同様に、各項目の分岐を一律に組み合わせた。

: 土木学会(2016)からの変更箇所

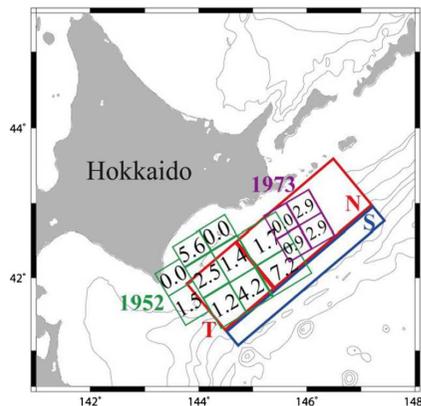


2.4 十勝沖・根室沖の連動型地震

■波源モデル

【Ioki and Tanioka(2016)モデル】

- 北海道東部に分布する津波堆積物の平面分布及び十勝海岸の津波高さを良好に再現するIoki and Tanioka(2016)モデル(Mw8.8)を用いた。



Ioki and Tanioka(2016)モデル
(Ioki and Tanioka(2016))

断層パラメータ
(Ioki and Tanioka(2016))

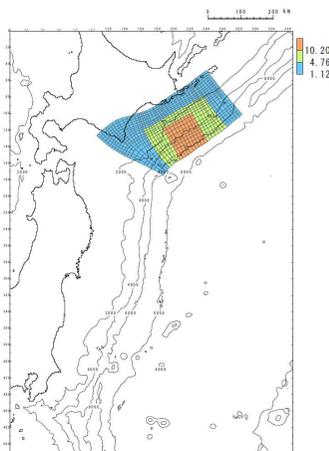
Table 1

Fault models and their parameters of the 17th century great earthquake.

Fault model	Length (km)	Width (km)	Depth (km)	Strike (deg)	Dip (deg)	Rake (deg)	Slip (m)
T	100	100	14	228	15	90	10
N	200	100	14	228	15	90	5
S	300	30	6.7	228	15	90	0-35

【特性化モデル】

- 広域の津波特性(痕跡高)を考慮できる杉野ほか(2014)の方法を用いて設定した。



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(Δσ)	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)

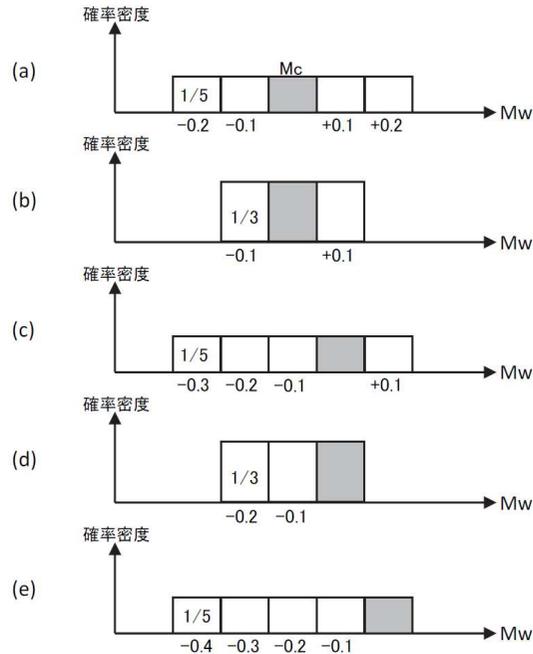
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.4 十勝沖・根室沖の連動型地震

■Mwの範囲

【Ioki and Tanioka (2016)モデル】

- 土木学会(2016)を参考に、Ioki and Tanioka(2016)モデルの地震規模(Mw8.8)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型地震の重みを準用した。



Mwの分布幅に対するMcの位置の可能性(土木学会(2016))

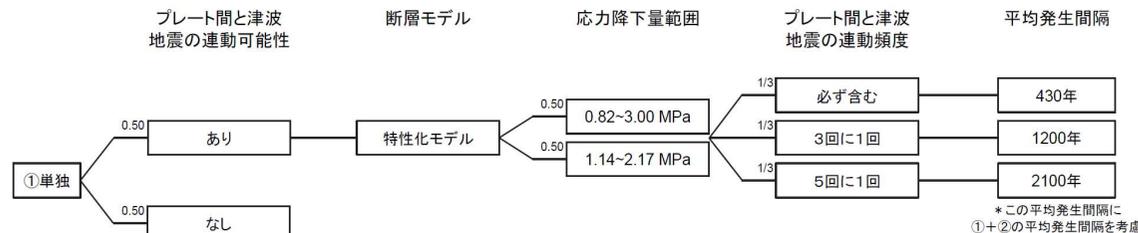
十勝沖(KT1)と根室沖(KT2)の連動型地震のMwの範囲の重みに関するアンケート結果
(土木学会(2009))

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		
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

【特性化モデル】

- 土木学会(2016)による応力降下量範囲の分岐及び重み配分を用いた。



十勝沖・根室沖の連動型地震(①単独)のロジックツリー(土木学会(2016))

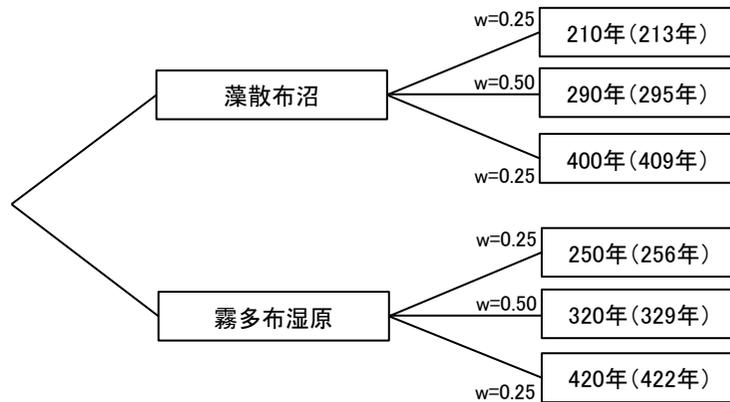
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.4 十勝沖・根室沖の連動型地震

■平均発生間隔

- 地震調査研究推進本部(2017)による藻散布沼及び霧多布湿原の津波堆積物調査結果及びばらつき(α)を用いて、土木学会(2016)による固有地震の平均発生間隔の誤差を考慮して分岐を設定した。
- 重み配分については、土木学会(2016)の正規分布に対する分岐設定方法を用いて設定した。

【地震調査研究推進本部(2017)の知見を踏まえた平均発生間隔に関する分岐※】



※:固有地震の平均発生間隔の誤差を考慮した分岐設定(土木学会(2016))

- 固有地震の平均発生間隔がデータに基づいている場合には、誤差に基づき分岐を設定し、対数正規分布とする。
- 対数分布で発生間隔の中央値を T_m としたとき、標準偏差の範囲は以下のとおりとなり、これを分岐として設定する。

$$T_m \cdot e^{-\sigma_{ln}/\sqrt{n}} \sim T_m \sim T_m \cdot e^{+\sigma_{ln}/\sqrt{n}}$$

ここで、

- T_m : 対数正規分布の中央値 (幾何平均)
- σ_{ln} : 対数標準偏差 (ばらつき)
- n : 発生間隔のデータ数

藻散布沼

- 対数正規分布の中央値(幾何平均): 295年(推定堆積期間($\pm 1\sigma$))を使用)
- ばらつき(α): 0.8
- 発生間隔のデータ数(n): 6

砂層の名前	推定堆積期間 ($\pm 1\sigma$) (cal y B.P.)	推定堆積 期間(平均)	間隔(年)
MP2	670 - 280	475	
MP3	1400 - 750	1075	600
MP4	1495 - 1430	1462.5	387.5
MP5	1930 - 1600	1765	302.5
MP6	2450 - 2270	2360	595
MP7	2600 - 2360	2480	120
MP8	2720 - 2500	2610	130

幾何平均(年): 295

霧多布湿原

- 対数正規分布の中央値(幾何平均): 329年(推定堆積期間($\pm 1\sigma$))を使用)
- ばらつき(α): 0.5
- 発生間隔のデータ数(n): 4

砂層の名前	推定堆積期間 ($\pm 1\sigma$) (cal y B.P.)	推定堆積 期間(平均)	間隔(年)
K4	1340 - 1220	1280	
K5	1720 - 1420	1570	290
K6	2370 - 2090	2230	660
K7	2570 - 2260	2415	185
K8	2820 - 2670	2745	330

幾何平均(年): 329

余白

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)

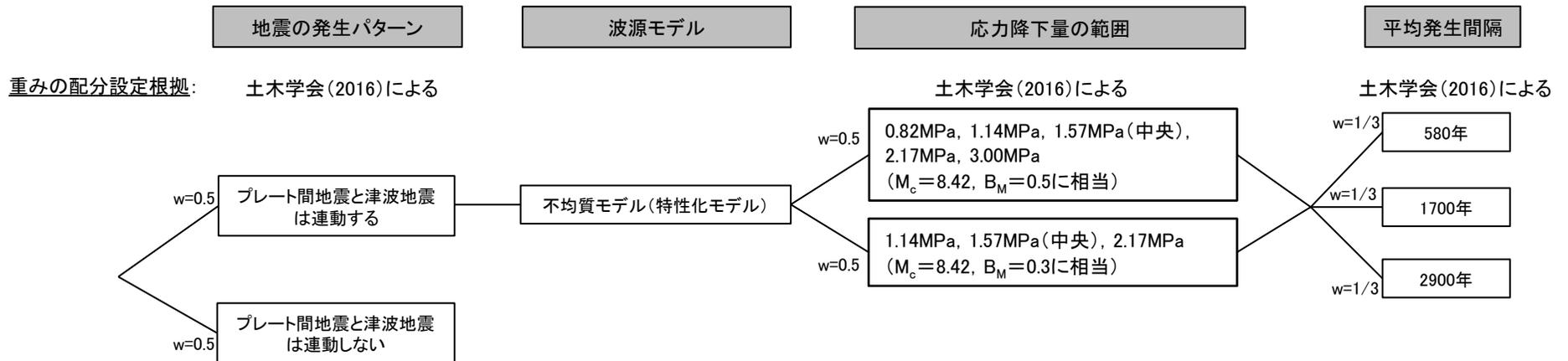
- 2. 1 検討対象領域
- 2. 2 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震
- 2. 3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震
- 2. 4 十勝沖・根室沖の連動型地震
- 2. 5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震**
- 2. 6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

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)

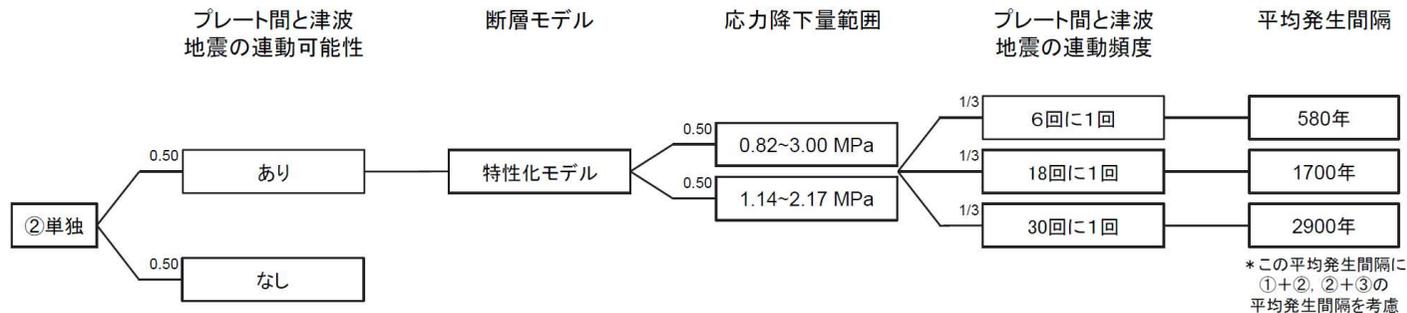
2.5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震

■ロジックツリー

- 土木学会(2016)を参考に、ロジックツリーを作成した(各項目の詳細は次頁以降で説明)。
- なお、Mwの範囲と平均発生間隔の組合せ(ロジックツリー)は、土木学会(2016)と同様に、各項目の分岐を一律に組み合わせた。



【土木学会(2016)のロジックツリー】



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)

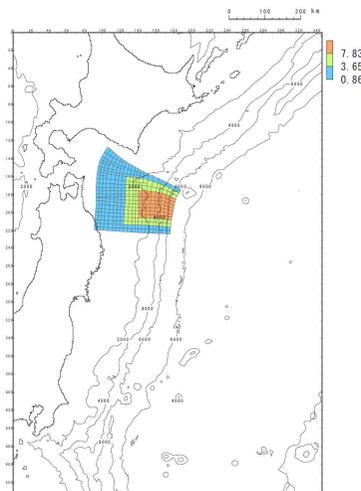
2.5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震

■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型地震が発生した記録が無いことを踏まえ、土木学会(2016)を参考に、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、土木学会(2016)と同様に均等配分とした。

■波源モデル

- 広域の津波特性(痕跡高)を考慮できる杉野ほか(2014)の方法を用いて設定した。



特性化モデル
(今回設定, Mw(Mc)=8.42)

主な断層諸元

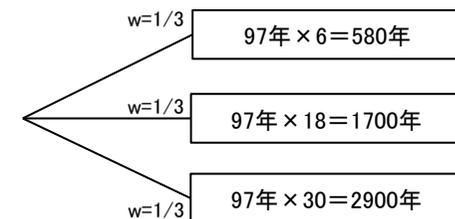
断層パラメータ		設定値	備考
モーメントマグニチュード(Mw)		8.42	
断層面積(S)		40,959(km ²)	
平均応力降下量($\Delta\sigma$)		1.57MPa	Murotani et al.(2013)で示される平均値
地震モーメント(Mo)		5.43×10^{21} (Nm)	
すべり量	平均すべり量(D)	2.61(m)	
	大すべり域(1.4D)	3.65(m)	
	超大すべり域(3D)	7.83(m)	
	背景領域(0.33D)	0.86(m)	

■応力降下量の範囲及び平均発生間隔

- 土木学会(2016)による応力降下量範囲の分岐及び重み配分を用いた。

■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型地震が発生した記録がないことを踏まえ、土木学会(2016)を参考に、東北地方太平洋沖型の地震の平均発生間隔(600年)と同程度となるように、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)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、土木学会(2016)と同様に均等配分とした。



余白

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
- 2. 2 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震
- 2. 3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震
- 2. 4 十勝沖・根室沖の連動型地震
- 2. 5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

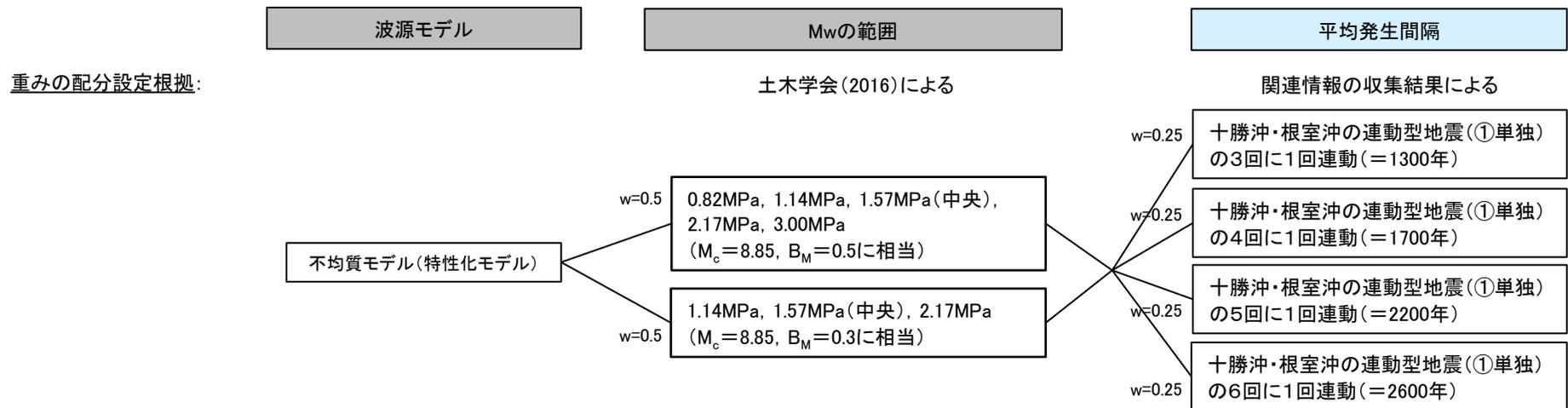
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震:ロジックツリー

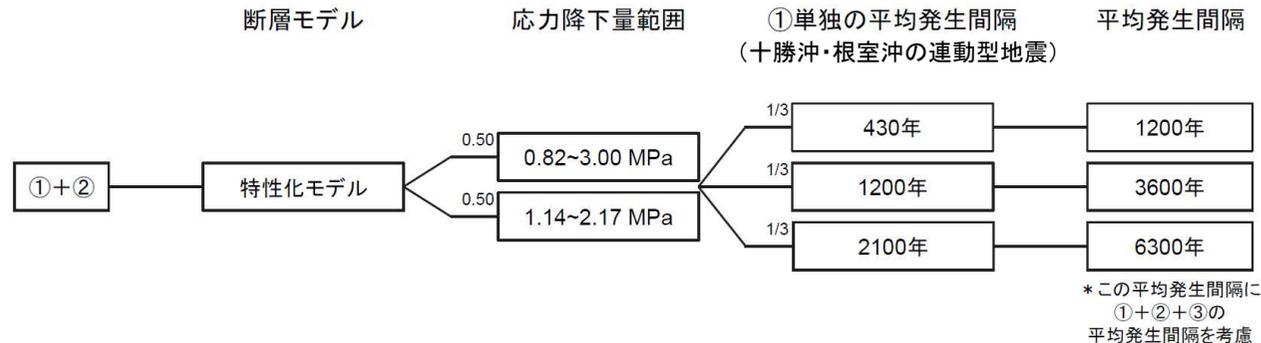
■ロジックツリー

- 土木学会(2016)を参考に、ロジックツリーを作成した(各項目の詳細は次頁以降で説明)。
- なお、Mwの範囲と平均発生間隔の組合せ(ロジックツリー)は、土木学会(2016)と同様に、各項目の分岐を一律に組み合わせた。

□ : 土木学会(2016)からの変更箇所



【土木学会(2016)のロジックツリー】

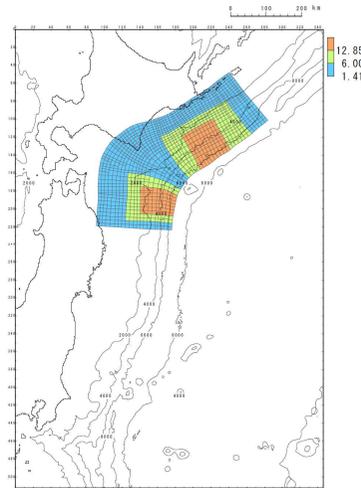


2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震

■波源モデル

- 広域の津波特性(痕跡高)を考慮できる杉野ほか(2014)の方法を用いて設定した。



特性化モデル
(Mw(Mc)=8.85)

主な断層諸元

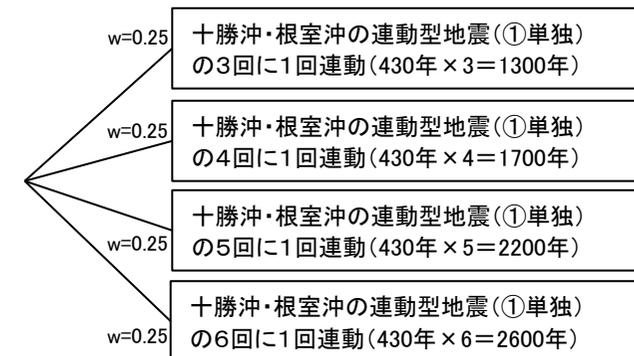
断層パラメータ		設定値	備考
モーメントマグニチュード(Mw)		8.85	
断層面積(S)		110,472 (km ²)	
平均応力降下量($\Delta\sigma$)		1.57MPa	Murotani et al.(2013)で示される平均値
地震モーメント(Mo)		2.37×10^{22} (Nm)	
すべり量	平均すべり量(D)	4.28(m)	
	大すべり域(1.4D)	6.00(m)	
	超大すべり域(3D)	12.85(m)	
	背景領域(0.33D)	1.41(m)	

■応力降下量の範囲

- 土木学会(2016)による応力降下量範囲の分岐及び重み配分を用いた。

■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、土木学会(2016)による十勝沖・根室沖の連動型地震の平均発生間隔(430年)を基に、網羅的に設定した。
 - ✓ 南米チリの地震:3回に1回連動
 - ✓ 十勝沖・根室沖の連動型地震: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、土木学会(2016)を参考に均等配分とした。



余白

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)

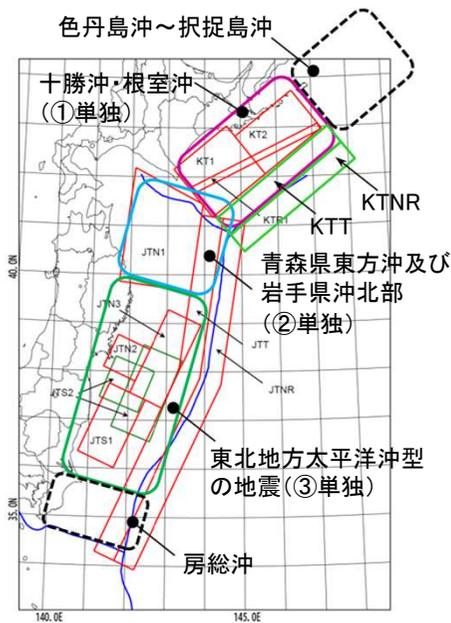
- 2. 1 検討対象領域
- 2. 2 青森県東方沖及び岩手県沖北部の地震
- 2. 3 津波地震, 海洋プレート内の正断層型地震
- 2. 4 十勝沖・根室沖の連動型地震
- 2. 5 青森県東方沖及び岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 6 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震
- 2. 7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

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)

2.7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

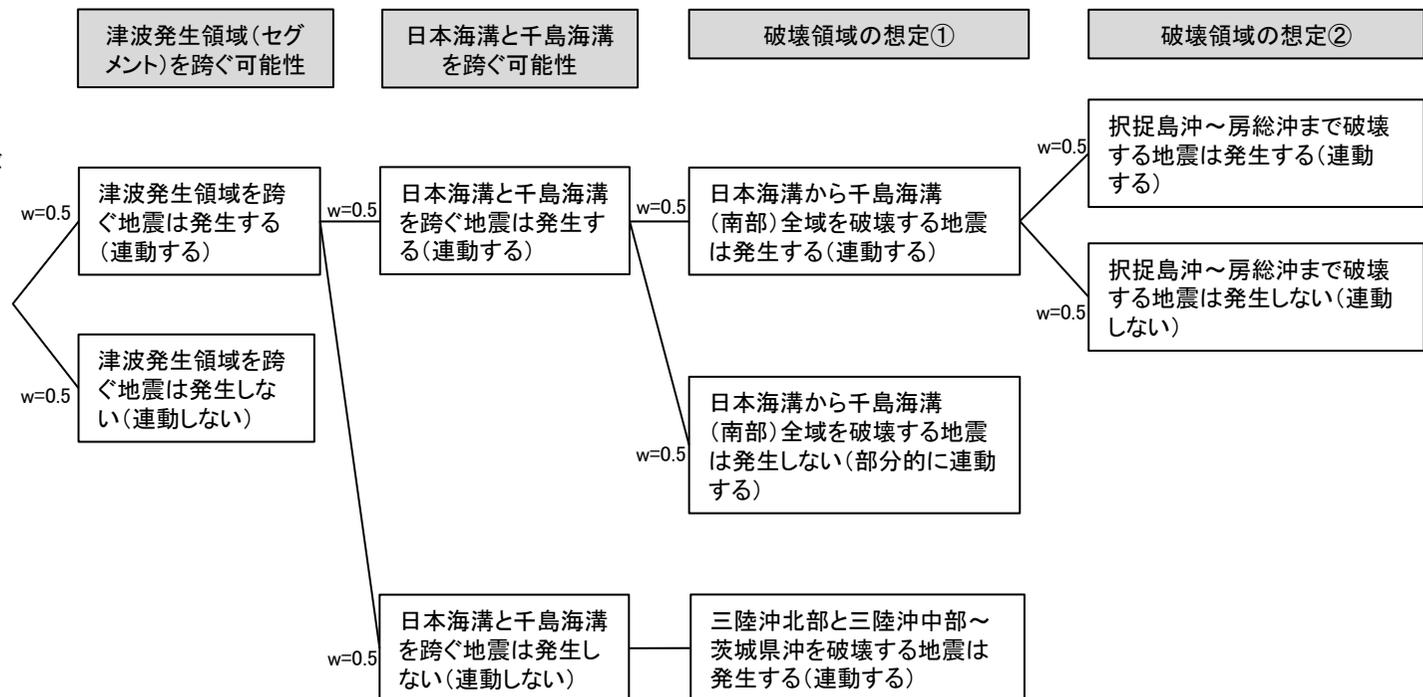
■津波発生領域の連動パターン

- 土木学会(2016)を参考に、これまで発生した記録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。



日本海溝及び千島海溝(南部)沿いの津波発生領域区分(土木学会(2011)に一部加筆)

【津波発生領域(セグメント)の連動パターン】



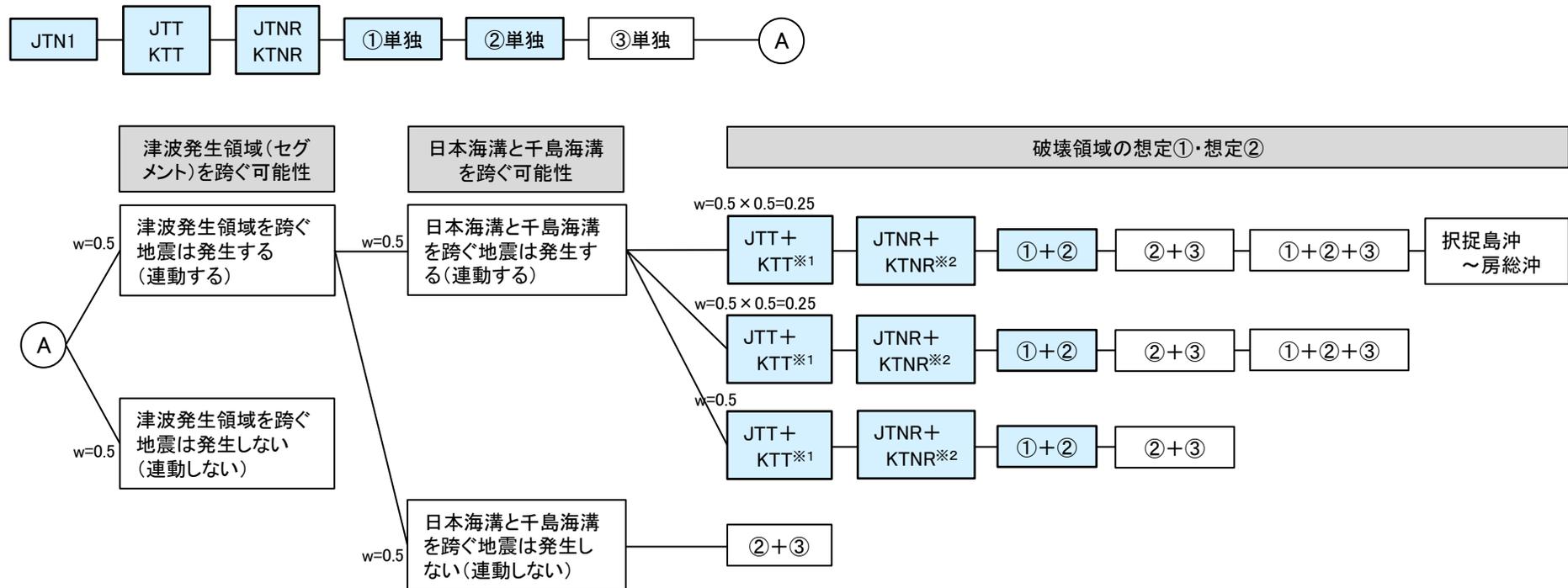
2. 津波発生モデルのロジックツリー(認識論的不確実さの考慮)

2.7 津波発生領域の組合せに関するロジックツリー

■ 津波発生領域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に基づき設定したロジックツリーを以下に示す。

: 認識論的不確実さ及び偶然的不確実さを考慮して検討する領域



※1: 日本海溝と千島海溝島弧会合部を跨ぐ津波地震

※2: 日本海溝と千島海溝島弧会合部を跨ぐ海洋プレート内の正断層型地震

余白

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)

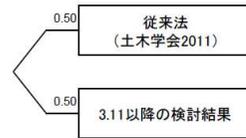
- 3. 1 津波高さ推定に関するロジックツリー
- 3. 2 誤差の対数標準偏差及び対数正規分布の打ち切り範囲に関連する情報
- 3. 3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差及び打ち切り範囲の分岐設定
- 3. 4 津波高さ推定に関するロジックツリーの設定

3.1 津波高さ推定に関するロジックツリー

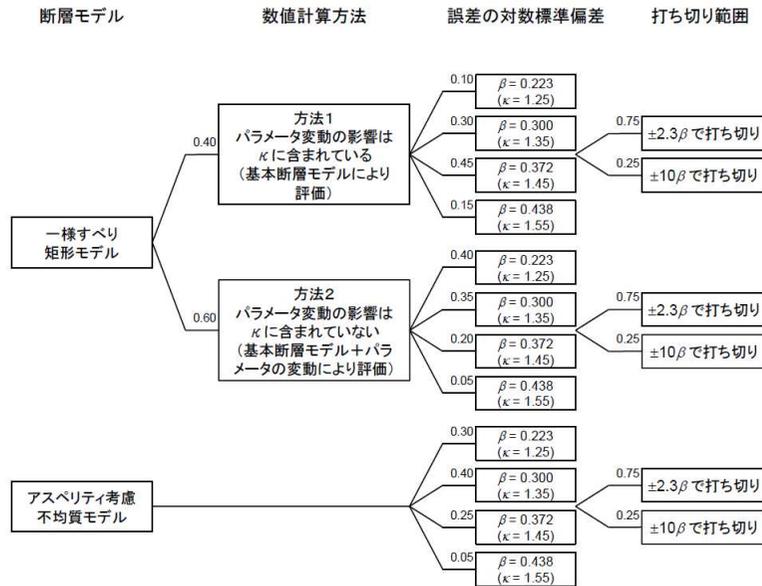
■津波高さ推定に関するロジックツリーの設定方針

- 土木学会(2016)では、土木学会(2011)の津波高さ推定に関するロジックツリーを従来法と位置付け、3.11地震に伴う津波の再現解析等から津波高さ推定値のばらつきに関する知見をロジックツリーに反映している。

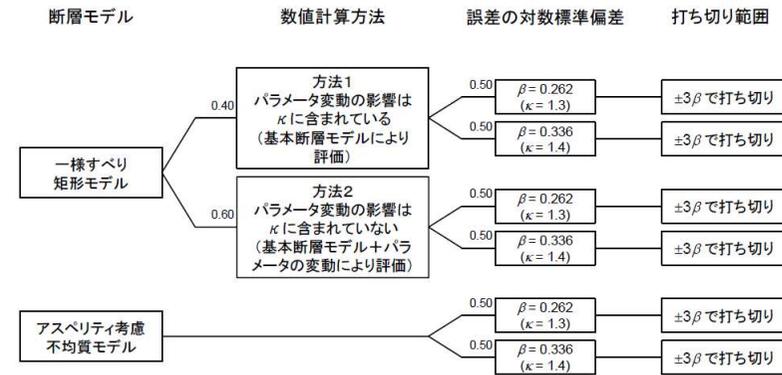
【土木学会(2016)による津波高さ推定に関するロジックツリー】



(a) ばらつきと打ち切りの考え方に関する分岐



(b) 従来法 (土木学会, 2011)



(c) 東北地方太平洋沖地震以降の検討結果

- 「3.11地震に伴う津波の痕跡高と計算津波高のばらつきに関する情報(=情報①)」及び「3.11地震から得られた知見(情報①)のロジックツリーへの適用事例に関する情報(=情報②)」を収集するとともに、不均質モデルに関する知見(情報①・②)が矩形断層モデルに適用可能かを検討し、暫定ロジックツリーを作成した。
- 作成した暫定ロジックツリーについて(関連情報の収集内容も含む)、専門家に意見聴取を行い、ロジックツリーを設定した(完成させた)。

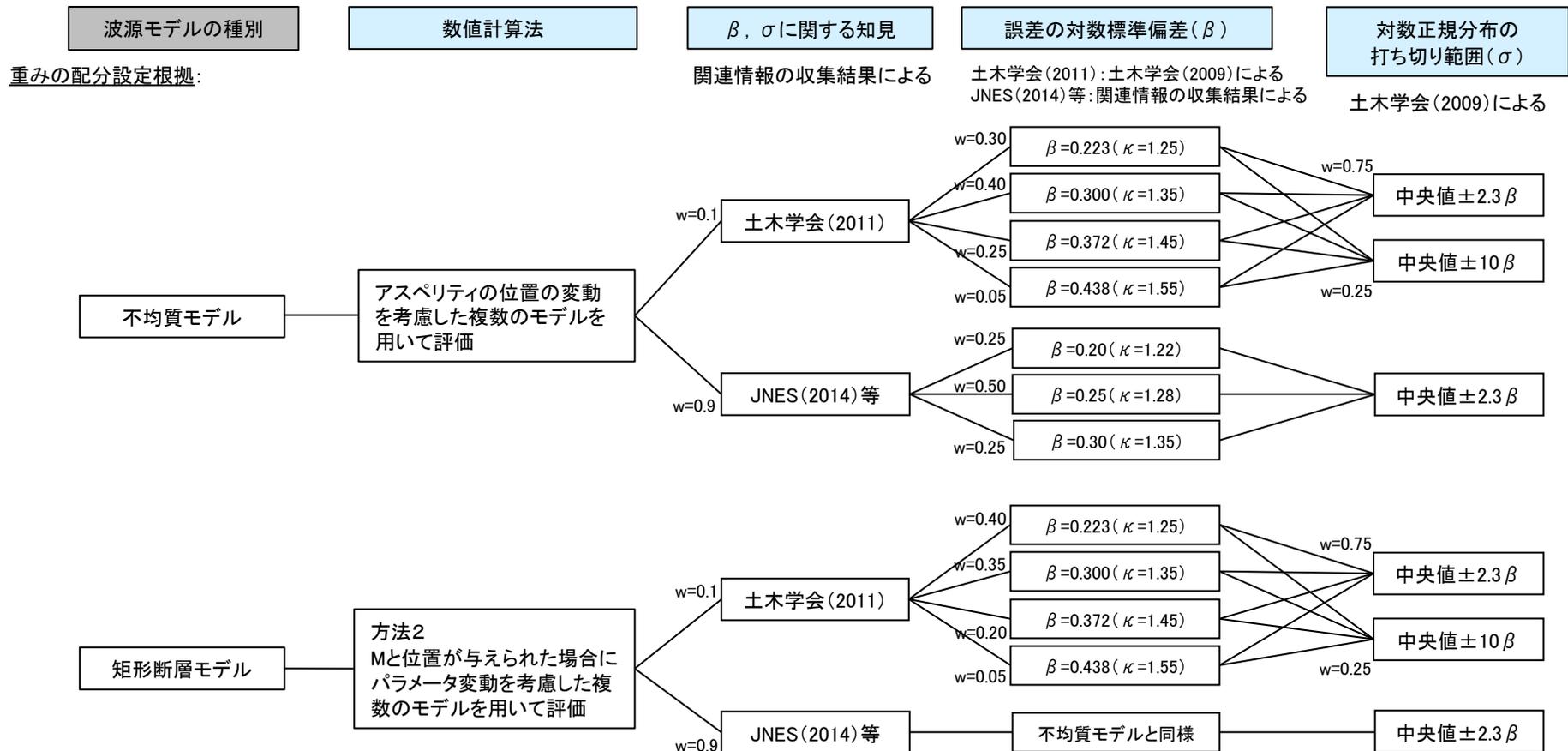
3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.1 津波高さ推定に関するロジックツリー

■津波高さ推定に関するロジックツリー

- 設定したロジックツリーを以下に示す(ロジックツリーの検討内容の詳細は次頁以降に記載)。

□ : 土木学会(2011)からの変更箇所

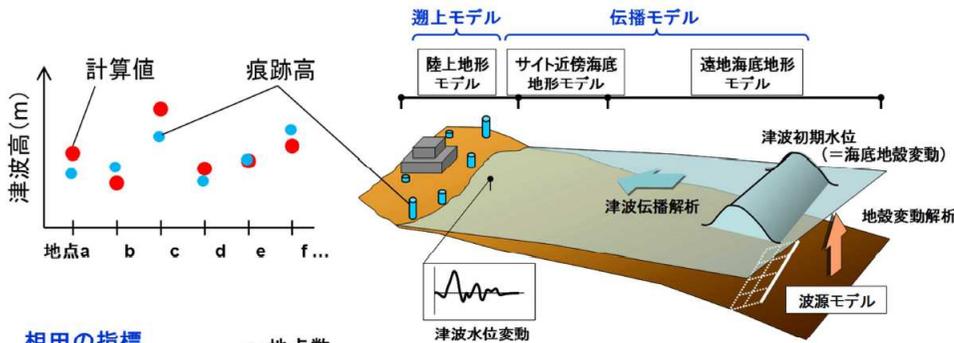


3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.2 誤差の対数標準偏差及び対数正規分布の打ち切り範囲に関連する情報

■土木学会(2011)による誤差の対数標準偏差(β)に対する3.11地震に伴う津波の計算津波高のばらつき(1/2)

- 津波高さのばらつき(β)は, 津波波源モデル($\beta_{\text{波源}}$), 海底地形を含めた海上伝播($\beta_{\text{伝播}}$), 陸上地形を含めた陸上遡上($\beta_{\text{遡上}}$)のモデル化上のばらつきが混在する。さらには, 痕跡情報である津波高さや位置情報の不確かさも含まれる(杉野ほか(2014))。
- 杉野ほか(2014)は, 3.11地震に伴う津波を再現する特性化波源モデル(杉野ほか(2013))による痕跡高と計算値の関係から, 津波高さのばらつき($\beta_{\text{特性化}}$)を整理し, 土木学会(2011)のばらつき β (およそ0.28~0.47)に対して, $\beta_{\text{特性化}}$ は0.24~0.27と大きく低減したとしている。



相田の指標

n : 地点数

$$\ln K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln K_i, \quad K_i = \frac{\text{痕跡高 } R_i}{\text{計算値 } H_i}$$

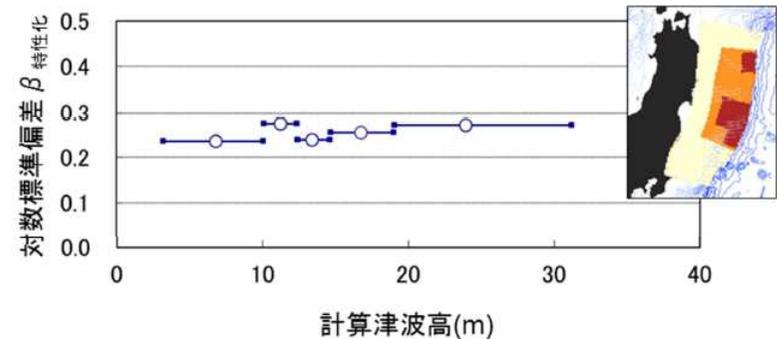
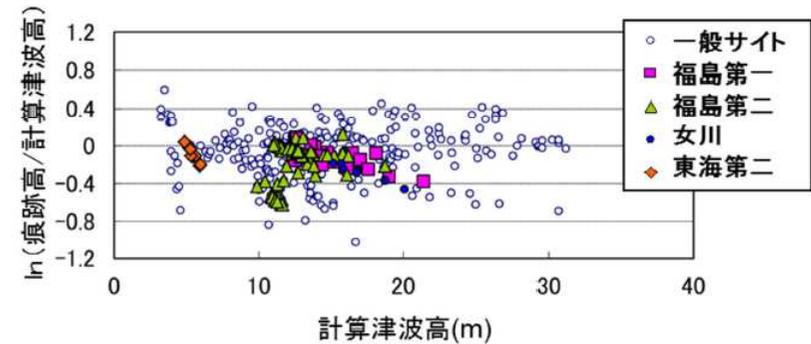
$$\ln \kappa = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\ln K_i)^2 - n(\ln K)^2 \right\} \right]^{1/2} = \beta$$

津波高のばらつき β の内訳

津波高(中央値) = f (遡上モデル × 伝播モデル × 波源モデル)

$$\text{対数標準偏差 } \beta = \sqrt{\beta_{\text{遡上}}^2 + \beta_{\text{伝播}}^2 + \beta_{\text{波源}}^2}$$

津波伝播モデルの構成と津波高のばらつき要因
(杉野ほか(2014))



特性化波源モデルの $\beta_{\text{特性化}}$ と計算津波高の関係
(杉野ほか(2014))

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)

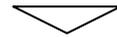
3.2 誤差の対数標準偏差及び対数正規分布の打ち切り範囲に関連する情報

■土木学会(2011)による誤差の対数標準偏差(β)に対する3.11地震に伴う津波の計算津波高のばらつき(2/2)

- 杉野ほか(2014)は、土木学会(2011)のばらつきよりも小さくなった理由について、以下のとおり種々の要因が重なった結果によるものとしている。

【低減要因(杉野ほか(2014))】

- ✓ 波源特性において特性化波源モデルとして不均一なすべり分布を取り入れたこと。
- ✓ 遡上特性では航空レーザー測量による標高データに基づいて陸上地形モデルの空間格子間隔を詳細化したこと。
- ✓ 痕跡情報では土木学会(2011)の痕跡情報は歴史記録に基づいているのに対し、今回対象とした3.11地震津波の痕跡情報はGPS測量に基づいた詳細な情報を有していること。



これらの各種モデル化や痕跡情報の精度向上が、ばらつきの低減に寄与した。

津波伝播モデルによるばらつき β に関する土木学会(2011)との比較(杉野ほか(2014))

	1) 波源特性	2) 伝播特性	3) 遡上特性	4) 痕跡情報	津波高のばらつき β (κ)
土木学会 2011.9	• 一様すべりモデル	• 海底地形	• 地形格子 100~200m • 遡上なしの全反射	• 痕跡点の位置情報 の精度:小	日本海溝:0.34~0.37 (1.40~1.45) 南海トラフ:0.30~0.47 (1.35~1.60)
	• 不均一モデル	• 海底地形	• 地形格子 50m • 遡上なしの全反射	• 痕跡点の位置情報 の精度:小	日本海溝:0.31~0.37 (1.37~1.45) 南海トラフ:0.28~0.39 (1.32~1.48)
東北地震 津波	• 特性化波源モデル (不均一モデル)	• 海底地形	• 地形格子 5.6m • 遡上あり • 建屋あり	• 痕跡点の位置情報 の精度:高	日本海溝:0.24~0.27 (1.27~1.31)

各種モデル化精度の向上

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)

3.2 誤差の対数標準偏差及び対数正規分布の打ち切り範囲に関連する情報

■ロジックツリーへの適用事例(1/2)

- 日本海溝沿いのプレート間地震及び海洋プレート内地震(正断層)の評価について, JNES(2014)は, 杉野ほか(2014)で得られた知見の適用方法, 適用事例を以下のとおり示している。

不確実さ要因の設定方法(JNES(2014)に一部加筆)

(1) ばらつき β について

- 津波伝播モデルのばらつきは, 計算水位を中央値とする確率分布(対数正規分布)を仮定したときの対数標準偏差 β で定義する。
- 津波伝播モデルのばらつき β の値は, 津波ハザード評価の結果に大きく影響することに留意し, 用いる津波解析手法, 解析モデルに対して, 最新知見を反映して適切に設定する。

(2) 打ち切りについて

- 推定値の不確実性は, 打ち切りのある対数正規分布で表現するため, パラメータとして対数標準偏差 β と打ち切り範囲を設定する。

(解説)

(1) ばらつき β について

- 津波伝播モデルによる津波高さに関する評価結果と痕跡高は完全に一致することは少なく, ばらつきが存在する。
- 「6.6.3.1 津波評価手法の選択」で選択された津波伝播モデルによって推定された津波高さに含まれるばらつきの大きさを対数標準偏差で定義し, ロジックツリーの分岐として考量する。
- 評価サイトの地形モデルの格子サイズが5m程度の場合, 津波伝播モデルのばらつき β は0.20~0.30の範囲で設定する。

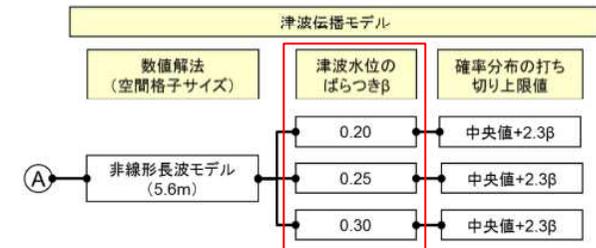
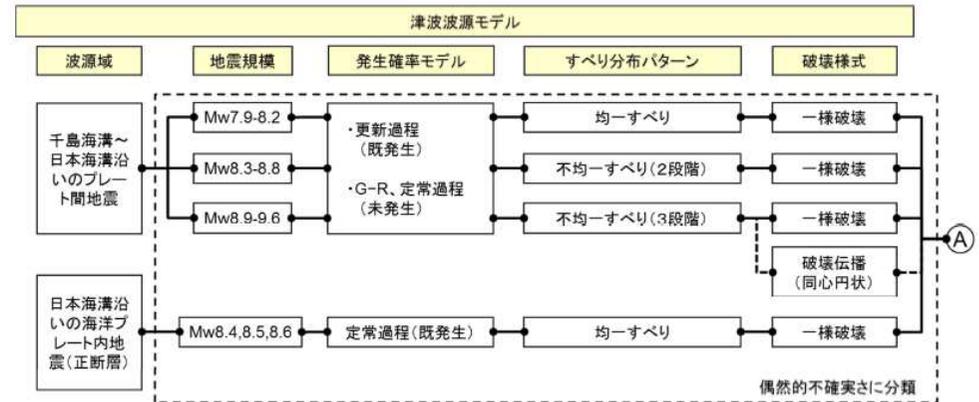
(2) 津波伝播モデルにおける対数正規分布の打ち切りの設定

「6.6.3.1 津波評価手法の選択」で選択された津波伝播モデルによって推定された津波高さに含まれるばらつきが対数正規分布に従うとした場合に, 正規分布の打ち切りについて, ロジックツリーの分岐として考量する。

例えば, 「分布の両側の各1%に入る現象は実際には起こらない」とする場合, 表6.11のように分布の両側1%を打ち切る。

表 6.11 打ち切りの設定パターン (例)

ばらつきの考慮範囲	打ち切り	打ち切り範囲
正規分布の99%まで	1%	$\pm 2.3\sigma$



ロジックツリーの概要
(JNES(2014)に一部加筆)

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及び対数正規分布の打ち切り範囲に関連する情報

■ロジックツリーへの適用事例(2/2)

- 日本海溝沿いのプレート間地震の評価について、杉野ほか(2015)は、杉野ほか(2014)で得られた知見の適用方法、適用事例を以下のとおり示している。

【杉野ほか(2015):千島海溝から日本海溝沿いにおけるロジックツリー】

津波伝播モデルに係るロジックツリーの設定方法(杉野ほか(2015)に一部加筆)

図9は津波伝播モデルに係るロジックツリーである。同図中の左端のA及びBは、図7及び図8から繋がる記号であり、Aは新津波想定モデルの場合を、Bは旧津波想定モデルの場合を表す。いずれも認識論的不確かさ要因として津波伝播モデルに係る津波高のばらつき β の値を分岐として設定する。Aの場合には杉野ほか⁴⁾の特性化波源モデルの検証結果を踏まえて、0.20、0.25、0.30の3つの値を分岐とする。Bの場合には東北地震津波の発生前までの知見として土木学会の報告書³⁾に示される、0.223、0.300、0.372、0.438の4つの値を分岐とする。また、確率分布の打ち切り上限値については、東北地震発生後も更新された知見は知られていないため、A,Bいずれの場合も土木学会の報告書³⁾を参考とする。

※杉野ほか⁴⁾:杉野ほか(2014)
土木学会の報告書³⁾:土木学会(2011)

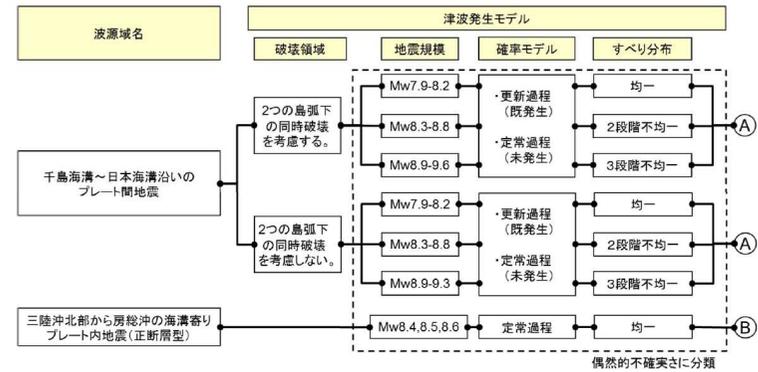


図7 新津波想定モデルを適用する場合の津波発生モデルのロジックツリー

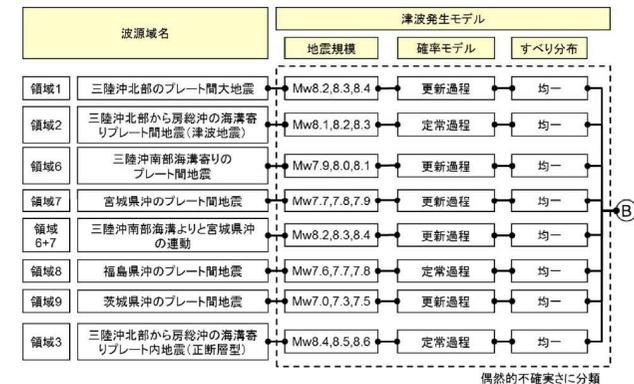


図8 旧津波想定モデルを適用する場合の津波発生モデルのロジックツリー

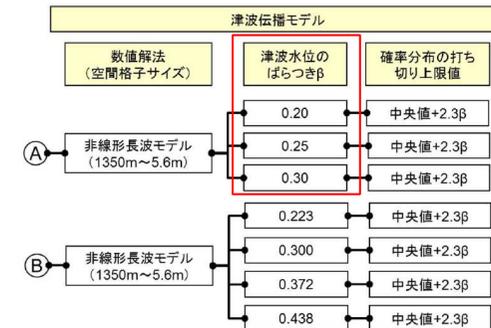


図9 津波伝播モデルのロジックツリー

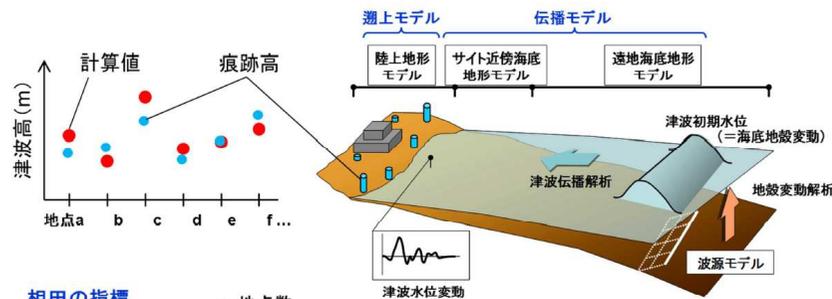
3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差及び打ち切り範囲の分岐設定

■ 検討概要

- ・ 杉野ほか(2014)は不均質モデルを対象とした検討であるとともに、杉野ほか(2015)に示される矩形断層モデルのロジックツリーは、土木学会(2011)の設定方法を引用し、3.11地震から得られた知見は反映されていない。
- ・ 以上を踏まえ、矩形断層モデルに、不均質モデルと同じロジックツリーを適用できるかを確認するため、既往津波の再現解析、並びに土木学会(2009)の評価から、モデルの違いが波源特性のばらつき($\beta_{波源}$)に与える影響について考察した※。

※: 伝播特性, 遡上特性のばらつき($\beta_{伝播}$, $\beta_{遡上}$)は、解析に用いる地形データ等が同一であることから、モデルの違いが各ばらつきに与える影響は無いと考えられる(下表)。



相田の指標 n : 地点数

$$\ln K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln K_i, \quad K_i = \frac{\text{痕跡高 } R_i}{\text{計算値 } H_i}$$

$$\ln \kappa = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\ln K_i)^2 - n(\ln K)^2 \right\} \right]^{1/2} = \beta$$

津波高のばらつき β の内訳

$$\text{津波高(中央値)} = f(\text{遡上モデル} \times \text{伝播モデル} \times \text{波源モデル})$$

$$\text{対数標準偏差 } \beta = \sqrt{\beta_{遡上}^2 + \beta_{伝播}^2 + \beta_{波源}^2}$$

モデルの違いが伝播特性・遡上特性のばらつきに与える影響に関する考察

津波高さのばらつき要因	内容
伝播特性 ($\beta_{伝播}$)	解析に用いる海底地形等は同一であることから、モデルの違いによる影響は無い。
遡上特性 ($\beta_{遡上}$)	解析に用いる地形データ、空間格子間隔等は同一であることから、モデルの違いによる影響は無い。

津波伝播モデルの構成と津波高のばらつき要因(杉野ほか(2014))

津波伝播モデルによるばらつき β に関する土木学会(2011)との比較(杉野ほか(2014))

	1) 波源特性	2) 伝播特性	3) 遡上特性	4) 痕跡情報	津波高のばらつき β (κ)
土木学会 2011.9	・一様すべりモデル	・海底地形	・地形格子 100~200m	・痕跡点の位置情報 の精度:小	日本海溝: 0.34~0.37 (1.40~1.45) 南海トラフ: 0.30~0.47 (1.35~1.60)
	・不均一モデル	・海底地形	・地形格子 50m	・痕跡点の位置情報 の精度:小	日本海溝: 0.31~0.37 (1.37~1.45) 南海トラフ: 0.28~0.39 (1.32~1.48)
東北地震 津波	・特性化波源モデル (不均一モデル)	・海底地形	・地形格子 5.6m ・遡上あり ・建屋あり	・痕跡点の位置情報 の精度:高	日本海溝: 0.24~0.27 (1.27~1.31)

各種モデル化精度の向上

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)

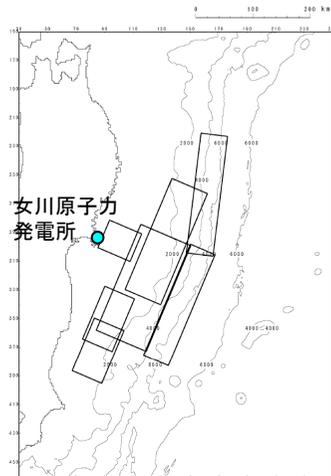
3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差及び打ち切り範囲の分岐設定

■ 既往津波の再現解析: 3.11地震に伴う津波

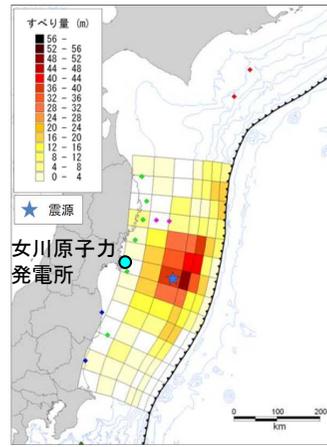
- 土木学会(2002)等で示される既往津波の波源モデル(矩形断層モデル)を組み合わせた既往津波の組合せモデル(菅野ほか(2012))と、内閣府による再現モデル(内閣府(2012b))を用いて再現解析を実施した結果、女川原子力発電所地点及び発電所周辺における津波高さのばらつき(κ)は同程度であることを確認した。
- さらに、最小空間格子間隔が5mである発電所地点のばらつきは、同間隔が31mである発電所周辺のばらつきと比較して、十分に小さいことを確認した。
- 以上から、波源特性のばらつき($\beta_{\text{波源}}$)は、矩形断層モデルと不均質モデルで有意な差はなく、かつ津波高さのばらつき(β)に与える影響は、遡上特性のばらつき($\beta_{\text{遡上}}$)よりも小さいと考えられる[※]。

※: 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対する意見聴取結果の詳細は、補足説明資料「6. 津波高さ推定に関するロジックツリー 6.2 専門家意見聴取結果: 関連情報4」に記載。

【検討モデル】

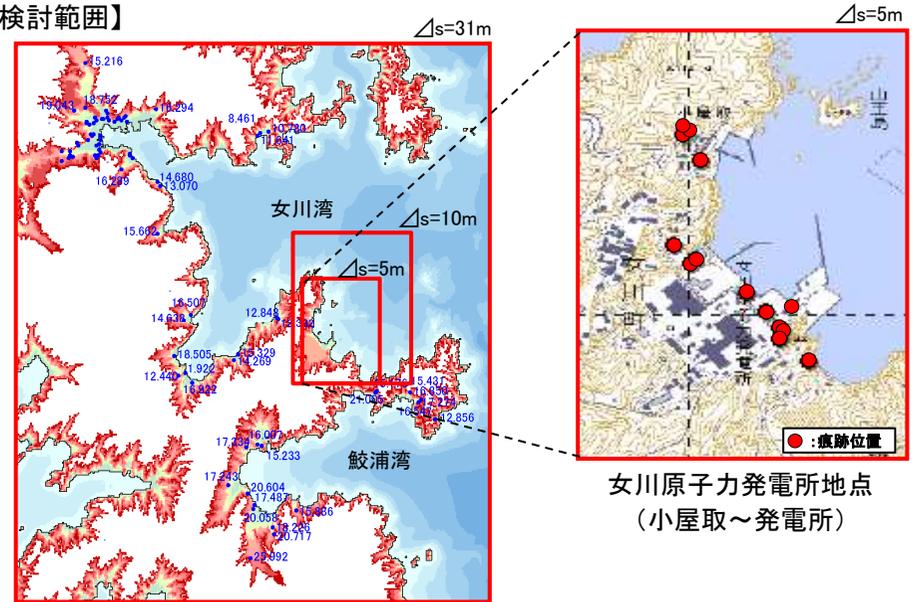


既往津波の組合せモデル
(菅野ほか(2012))



内閣府による再現モデル
(内閣府(2012b))

【検討範囲】



女川原子力発電所周辺(女川湾～鮫浦湾)



女川原子力発電所地点
(小屋取～発電所)

【再現性の評価結果】

範囲	基準断層モデル	K	κ	n
発電所地点 ($\Delta s=5m$)	既往津波の組合せモデル	0.97	$\beta_{\text{波源}}$ 同程度	14
	内閣府(2012)モデル	0.97	1.06	
発電所周辺 ($\Delta s=31m$)	既往津波の組合せモデル	0.99	$\beta_{\text{波源}}$ 同程度	111
	内閣府(2012)モデル	0.87	1.25	

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)

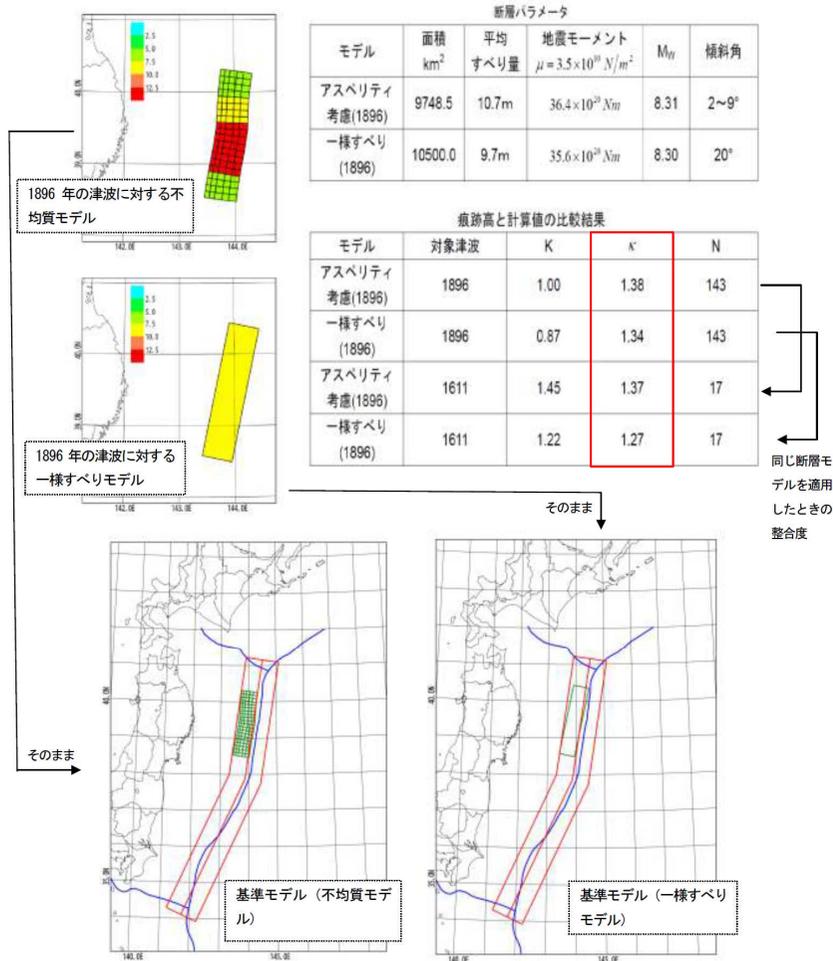
3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差及び打ち切り範囲の分岐設定

■ 既往津波の再現解析: 1896年明治三陸地震津波, 1968年十勝沖地震に伴う津波

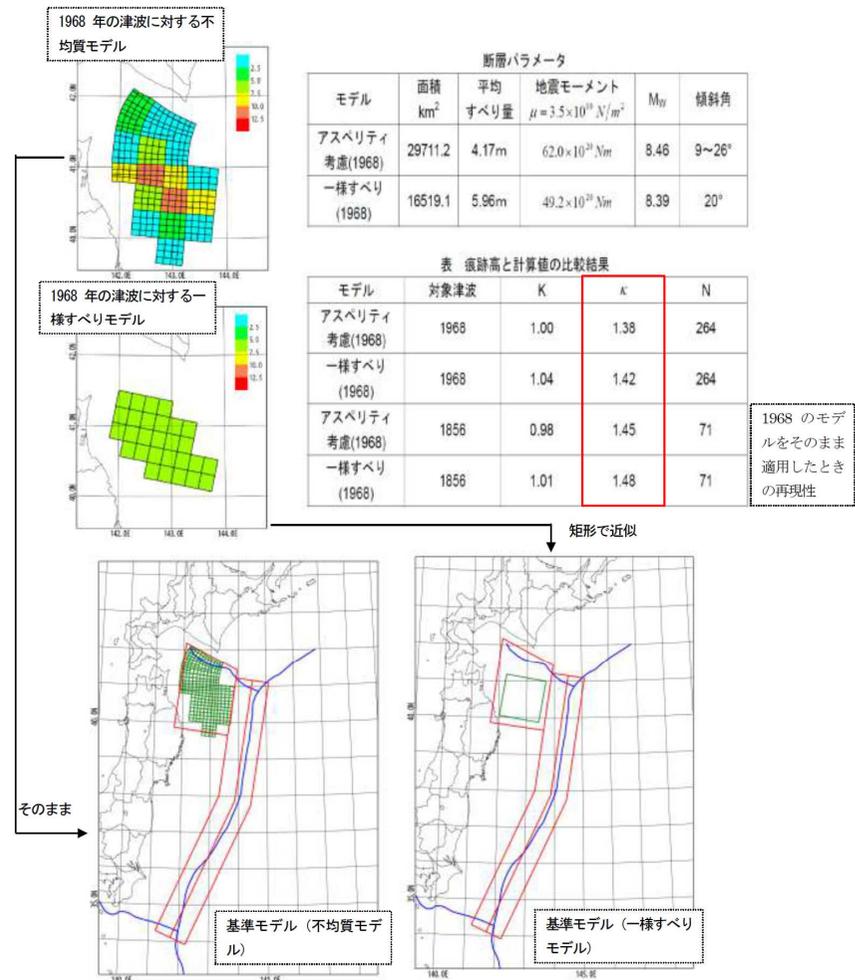
- 土木学会(2009)では, 1896年明治三陸地震津波, 1968年十勝沖地震に伴う津波の痕跡高を用いたインバージョンモデルと矩形断層モデルを用いて再現解析を実施し, 両モデルのばらつき(κ)は同程度であることを示している。
- 以上から, 波源特性のばらつき($\beta_{\text{波源}}$)は, 矩形断層モデルと不均質モデルで有意な差は無いと考えられる*。

*: 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対する意見聴取結果の詳細は, 補足説明資料「6. 津波高さ推定に関するロジックツリー 6.2 専門家意見聴取結果: 関連情報4」に記載。

【1896年明治三陸地震津波(土木学会(2009)に一部加筆)】



【1968年十勝沖地震に伴う津波(土木学会(2009)に一部加筆)】

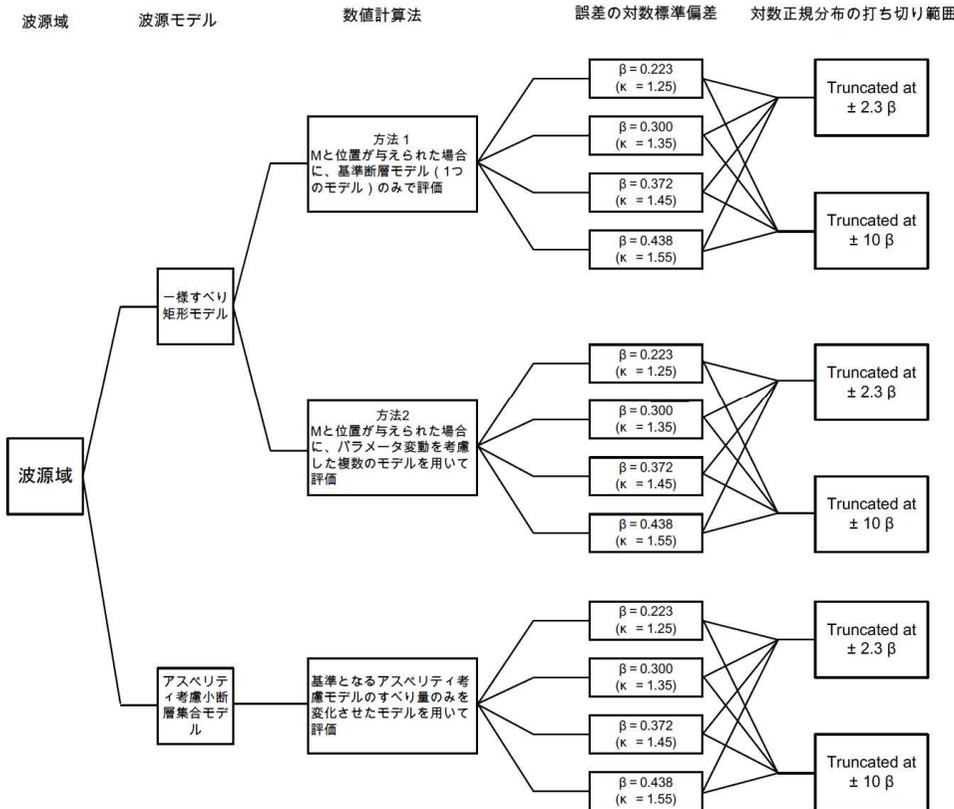


3. 津波高さ推定に関するロジックツリー(偶然的不確かさの考慮)

3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差及び打ち切り範囲の分岐設定

■ 土木学会(2009)の評価

- 土木学会(2009)では、矩形断層モデル、並びに不均質モデルで得られた計算水位に含まれるばらつきに関するアンケート結果を踏まえロジックツリーを作成しており、矩形断層モデルの不確かさを考慮した分岐(方法2)と不均質モデルの分岐で、ほぼ同程度の重みを設定している。



津波高さ推定に関するロジックツリー
(土木学会(2011))

■ アンケート結果(土木学会(2009))

【矩形断層モデル(一様すべり矩形モデル):方法1】

分岐	考え方	重み【ご記入ください】
①	$\kappa=1.25$ に相当する誤差を含む	0.10[0.10]
②	$\kappa=1.35$ に相当する誤差を含む	0.30[0.35]
③	$\kappa=1.45$ に相当する誤差を含む	0.45[0.40]
④	$\kappa=1.55$ に相当する誤差を含む	0.15[0.15]
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

【矩形断層モデル(一様すべり矩形モデル):方法2】

分岐	考え方	重み【ご記入ください】
①	$\kappa=1.25$ に相当する誤差を含む	0.40[0.40]
②	$\kappa=1.35$ に相当する誤差を含む	0.35[0.35]
③	$\kappa=1.45$ に相当する誤差を含む	0.20[0.20]
④	$\kappa=1.55$ に相当する誤差を含む	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

【不均質モデル(アスペリティ考慮小断層集合モデル)※】

分岐	考え方	重み【ご記入ください】
①	$\kappa=1.25$ に相当する誤差を含む	0.30
②	$\kappa=1.35$ に相当する誤差を含む	0.40
③	$\kappa=1.45$ に相当する誤差を含む	0.25
④	$\kappa=1.55$ に相当する誤差を含む	0.00
特記事項【できるだけご記入ください】		重みの合計 1.0

※:分岐④の重みは0.05の誤記

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)

3.3 矩形断層モデルに適用する誤差の対数標準偏差及び打ち切り範囲の分岐設定

■まとめ

- ・ 既往津波の再現解析から、波源特性のばらつき($\beta_{\text{波源}}$)は、矩形断層モデルと不均質モデルで有意な差は無いと考えられる。
- ・ また、土木学会(2009)では、アンケート結果を踏まえ、矩形断層モデルの不確かさを考慮した分岐(方法2)と不均質モデルの分岐で同程度の重みを設定している。
- ・ 以上から、矩形断層モデルに、不均質モデルと同じロジックツリーを適用できることを確認した。

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)

3.4 津波高さ推定に関するロジックツリーの設定

- 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^{※1}、同知見を評価に反映した。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、専門家意見聴取結果を踏まえ、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、関連情報及び専門家意見聴取結果を踏まえ、重み配分設定方法(p21)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^{※3}。

※1:解析条件に関する意見聴取結果の詳細は、補足説明資料「6. 津波高さ推定に関するロジックツリー 6.2 専門家意見聴取結果:関連情報2」に記載。

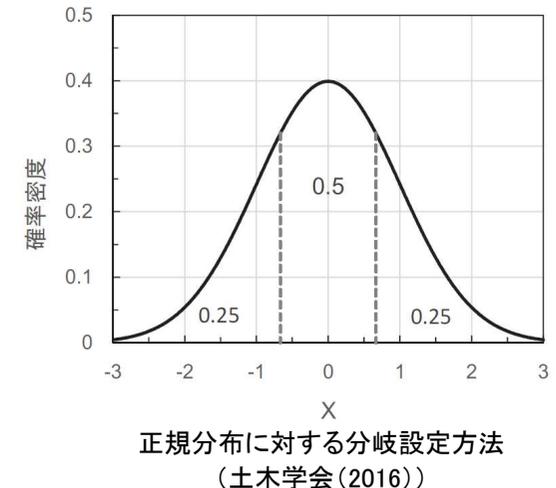
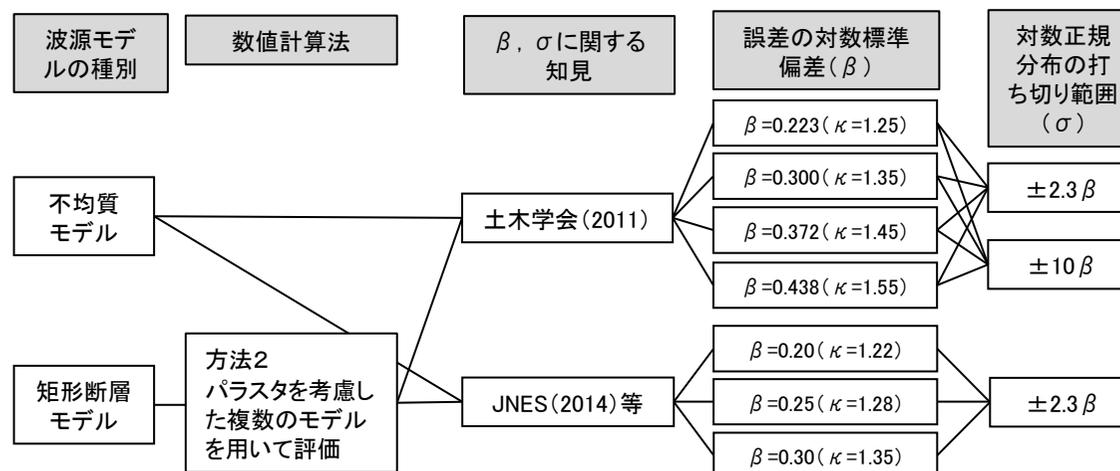
※2:JNES(2014)等の最新知見をロジックツリーに反映することに対する意見聴取結果の詳細は、補足説明資料「6. 津波高さ推定に関するロジックツリー 6.2 専門家意見聴取結果:関連情報1」に記載。

※3:ロジックツリーの見直し及び重み配分設定方法に対する意見聴取結果の詳細は、補足説明資料「6. 津波高さ推定に関するロジックツリー 6.2 専門家意見聴取結果:関連情報3」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	不均質モデル	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)^{※4}】^{※4}:各分岐の重みはp68に記載

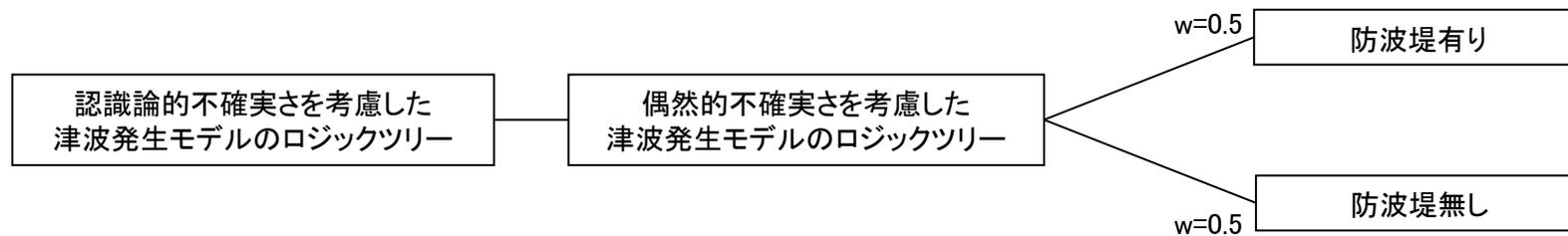


4. 防波堤の有無の条件に関するロジックツリー

4. 防波堤の有無の条件に関するロジックツリー

- 各基準津波の防波堤の有無の影響を考慮した津波ハザード曲線を算定し、津波水位の年超過確率を参照するため、ロジックツリーに「防波堤有り」と「防波堤無し」の分岐を設定した。
- 各分岐の重み配分については均等配分とした。

【防波堤の有無の条件に関する分岐設定】



5. 評価結果

- 5. 1 津波ハザード曲線の算定方針
- 5. 2 津波ハザード曲線の算定
- 5. 3 年超過確率の参照

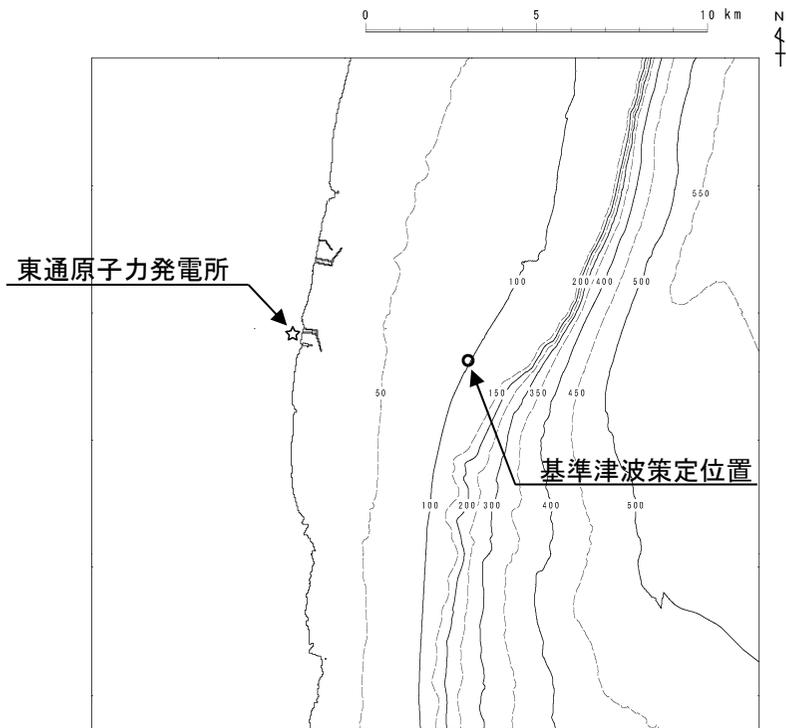
余白

5. 評価結果

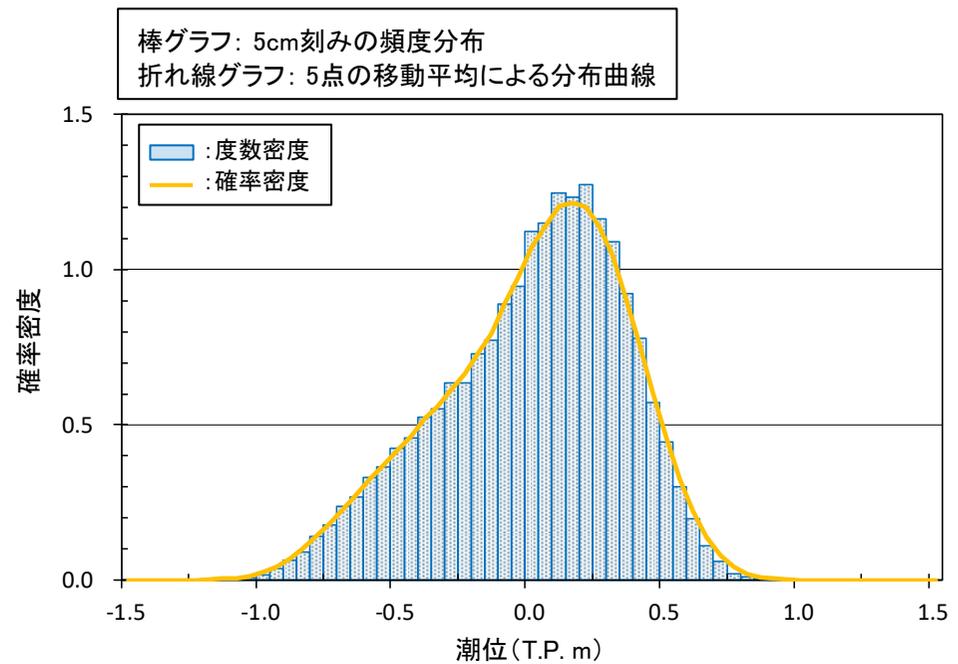
5.1 津波ハザード曲線の算定方針

- 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土木学会(2011)を参考に、モンテカルロ手法により5000本のサンプルを抽出して(組み合わせで)算定した。
- 潮位の確率密度分布は、敷地南方約29kmに位置する東北地方整備局むつ小川原検潮所における1986～2020年の観測記録※を用いて算定した。
- 津波ハザード曲線を算定する基準津波策定位置及び潮位の確率密度分布を以下に示す。

※:2003年及び2012年の観測記録は、年間を通じた記録の取得率が85%未満であり、季節別に偏りが生じていることから、各年の観測記録は除外した。



基準津波の策定位置



潮位の確率密度分布

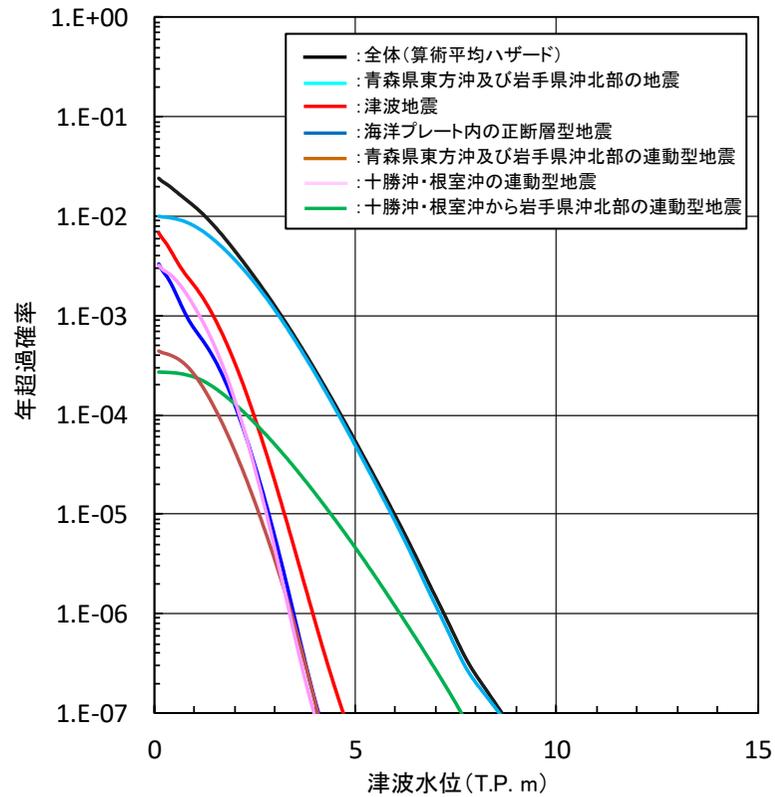
5. 評価結果

5.2 津波ハザード曲線の算定

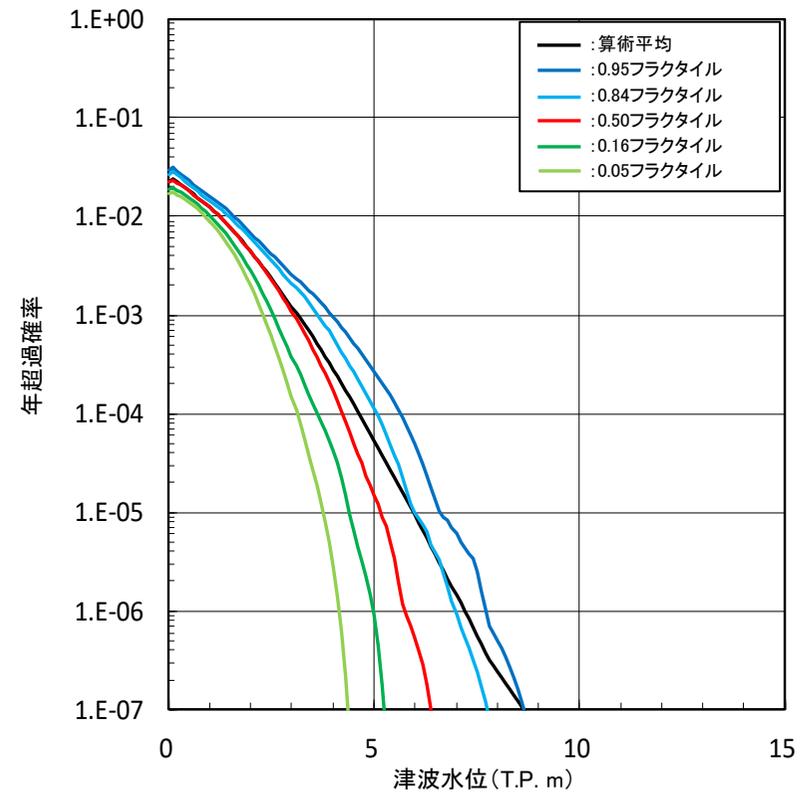
■水位上昇側

- ・ 基準津波策定位置の津波ハザード曲線及びフラクタイルハザード曲線を以下に示す。

【津波ハザード曲線】



【フラクタイルハザード曲線】



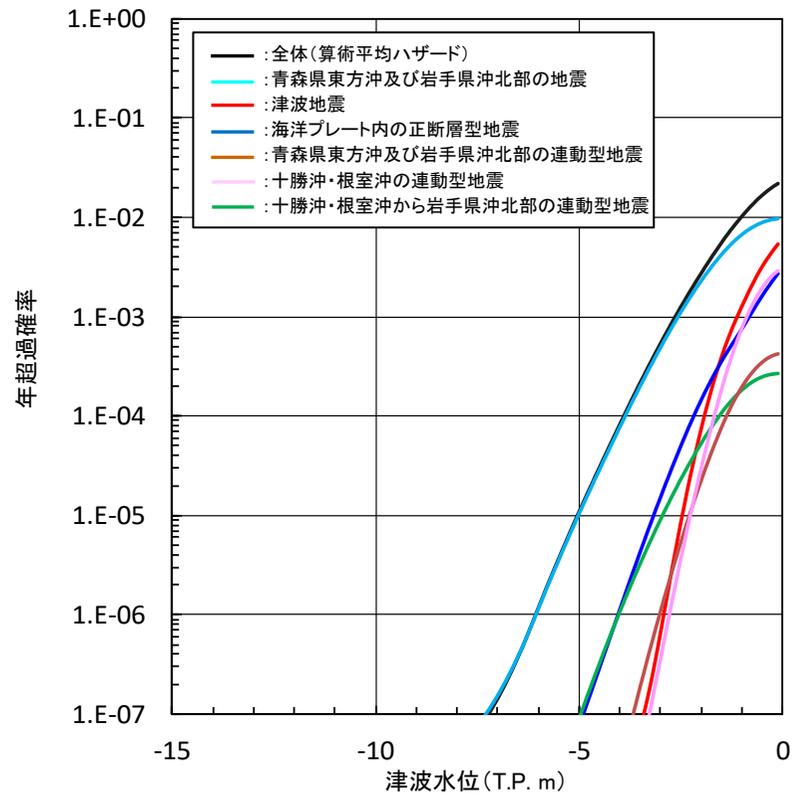
5. 評価結果

5.2 津波ハザード曲線の算定

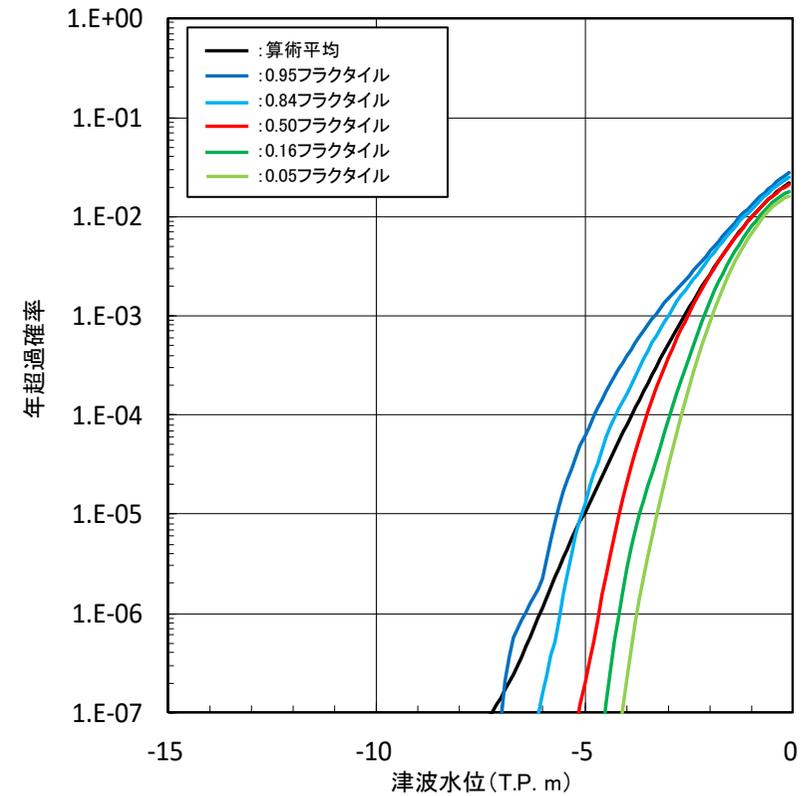
■水位下降側

- ・ 基準津波策定位置の津波ハザード曲線及びフラクタイルハザード曲線を以下に示す。

【津波ハザード曲線】



【フラクタイルハザード曲線】

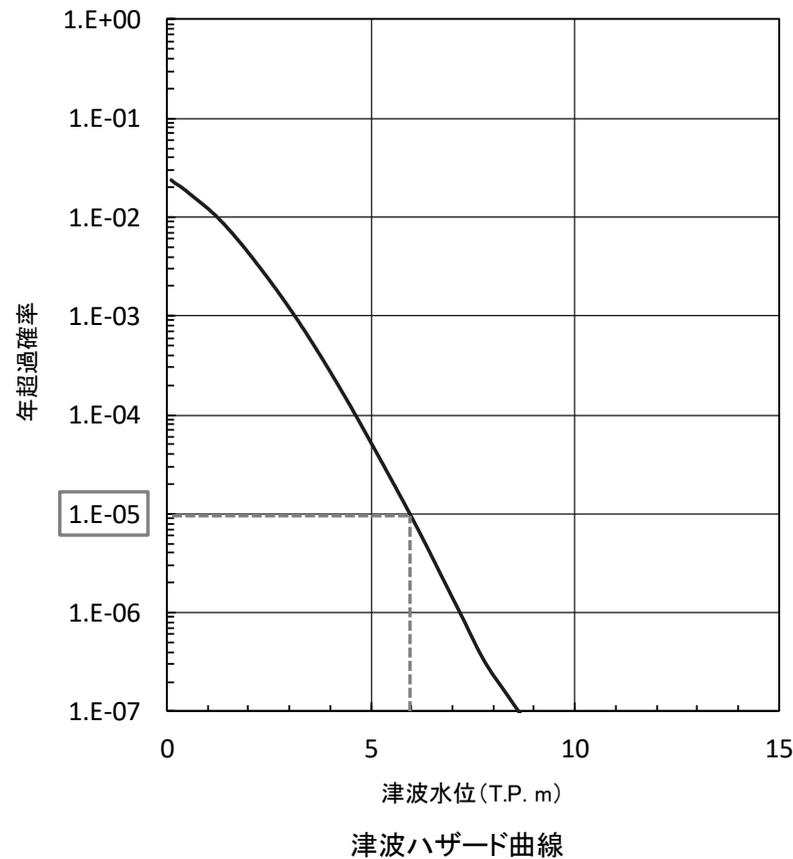


5. 評価結果

5.3 年超過確率の参照

■基準津波[水位上昇側1(防波堤無し北側最大)]

- 基準津波[水位上昇側1(防波堤無し北側最大)]の「十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル①(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(内閣府(2012)考慮))]と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり②単独)との組合せ津波」の年超過確率は、 10^{-5} 程度である。



津波水位に対応する年超過確率

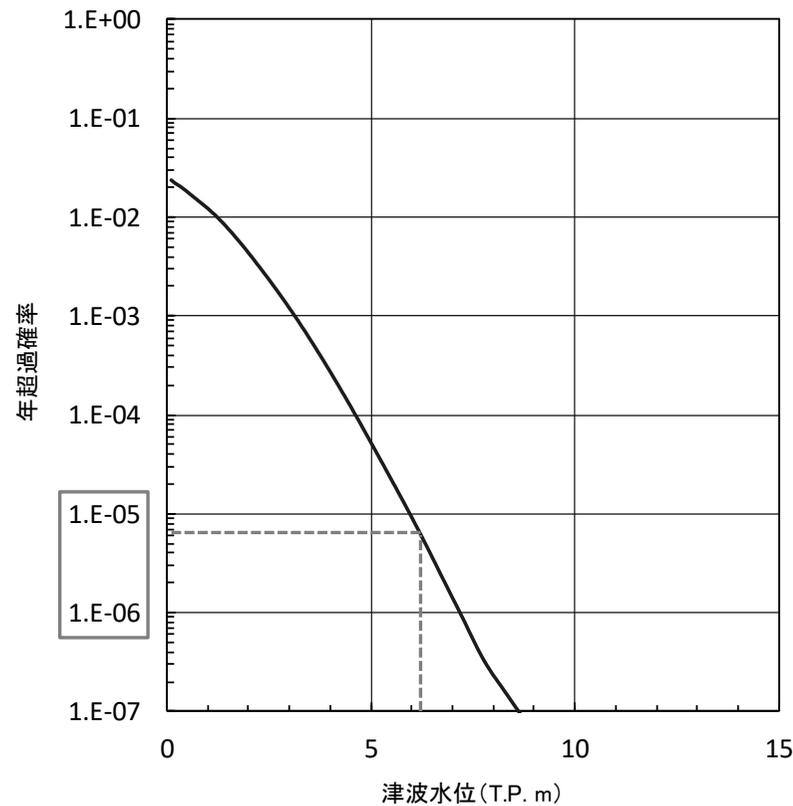
	津波水位	年超過確率
基準津波[水位上昇側1 (防波堤無し北側最大)]	T.P.+6.0m	10^{-5} 程度 (9.4×10^{-6})

5. 評価結果

5.3 年超過確率の参照

■基準津波[水位上昇側2(防波堤無し東側最大)]

- 基準津波[水位上昇側2(防波堤無し東側最大)]の「十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル②(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(内閣府(2012)考慮)]と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり②単独)との組合せ津波」の年超過確率は、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度である。



津波水位に対応する年超過確率

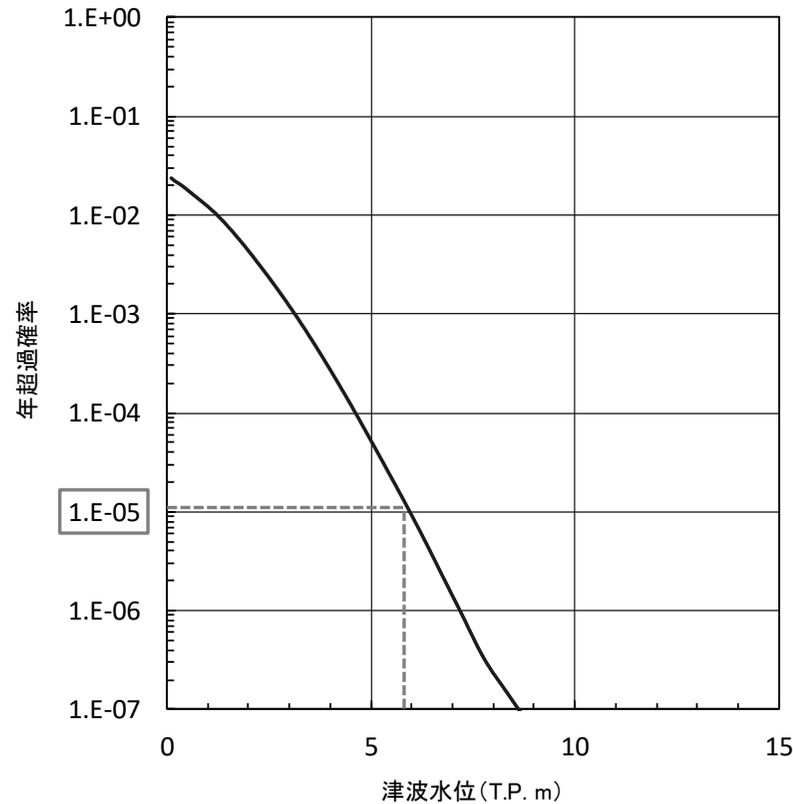
	津波水位	年超過確率
基準津波[水位上昇側2 (防波堤無し東側最大)]	T.P.+6.2m	$10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度 (6.6×10^{-6})

5. 評価結果

5.3 年超過確率の参照

■基準津波[水位上昇側3(防波堤有り南側最大)]

- 基準津波[水位上昇側3(防波堤有り南側最大)]の「十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル②(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(内閣府(2012)考慮)]と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり①と②の同時活動)との組合せ津波」の年超過確率は、 10^{-5} 程度である。



津波水位に対応する年超過確率

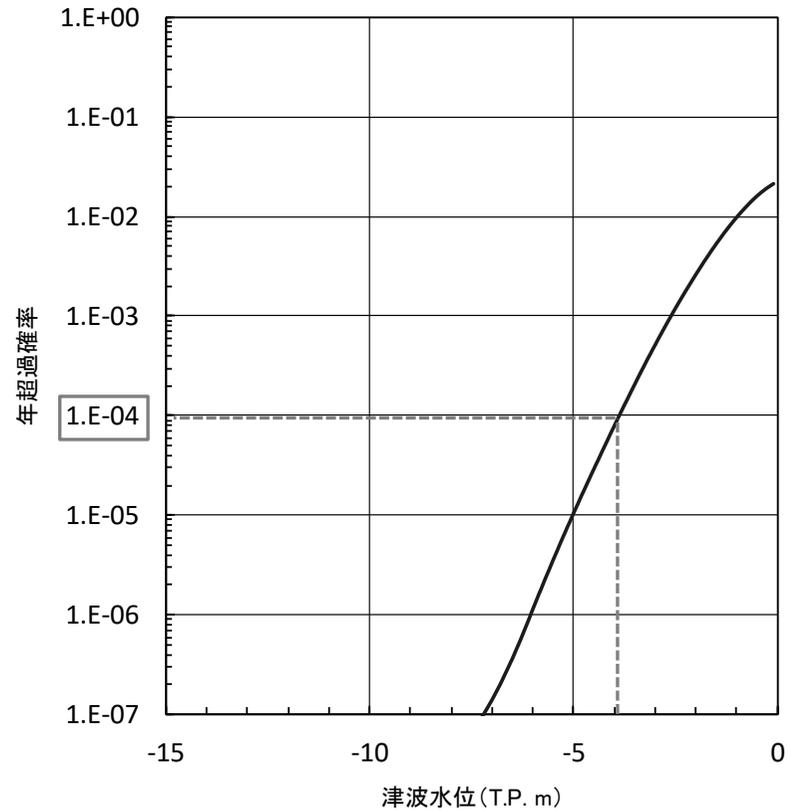
	津波水位	年超過確率
基準津波[水位上昇側3 (防波堤有り南側最大)]	T.P.+5.9m	10^{-5} 程度 (1.1×10^{-5})

5. 評価結果

5.3 年超過確率の参照

■基準津波[水位下降側1(防波堤有り最大)]

- 基準津波[水位下降側1(防波堤有り最大)]の「十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル④(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(すべり分布の不確かさを考慮)]と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり①単独)との組合せ津波」の年超過確率は、 10^{-4} 程度である。



津波水位に対応する年超過確率

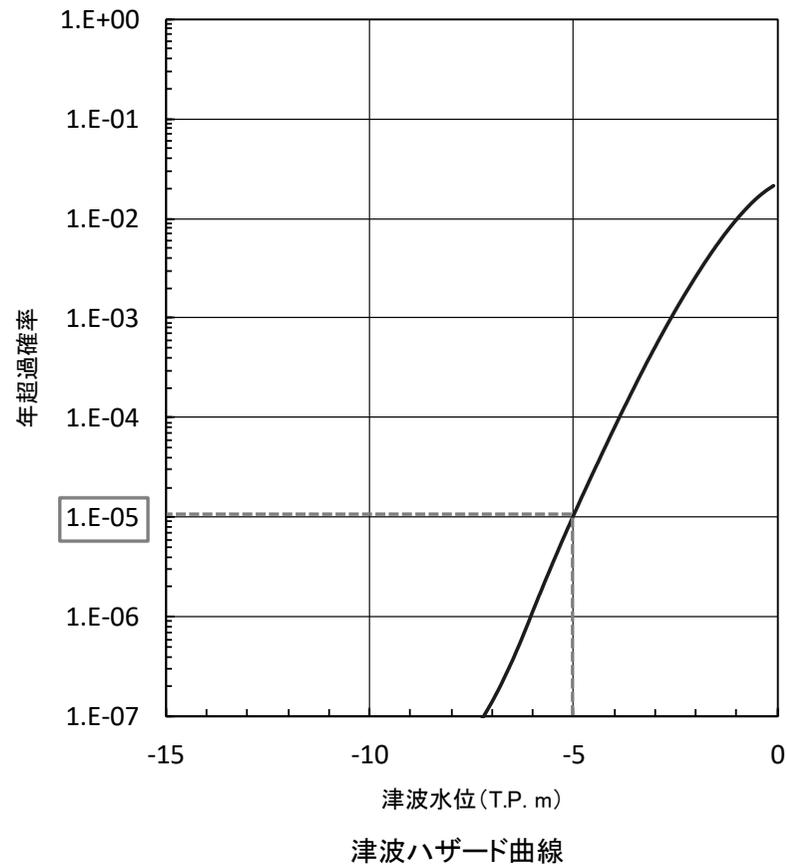
	津波水位	年超過確率
基準津波[水位下降側1 (防波堤有り最大)]	T.P.-3.9m	10^{-4} 程度 (9.7×10^{-5})

5. 評価結果

5.3 年超過確率の参照

■基準津波[水位下降側2(防波堤無し最大)]

- 基準津波[水位下降側2(防波堤無し最大)]の「十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震[基準断層モデル③(青森県東方沖及び岩手県沖北部の大すべり域の破壊特性を考慮したモデル(すべり量の不確かさ考慮)]と日高舟状海盆の海底地すべり(地すべり②単独)との組合せ津波」の年超過確率は、 10^{-5} 程度である。



津波水位に対応する年超過確率

	津波水位	年超過確率
基準津波[水位下降側2 (防波堤無し最大)]	T.P.-5.0m	10^{-5} 程度 (1.1×10^{-5})

参考文献

参考文献①

1. 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(第三版)
2. 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
3. 相田勇(1977):三陸沖の古い津波のシミュレーション, 地震研究所彙報, Vol.52, pp.71-101
4. 一般社団法人日本原子力学会(2017):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:2016
5. 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)
6. 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
7. 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)
8. 内閣府(2012):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
9. 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
10. 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
11. 渡辺偉夫(1998):日本被害津波総覧[第2版], 東京大学出版会
12. チリ津波合同調査班(1961):1960年5月24日チリ地震津波に関する論文及び報告, 丸善
13. 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, JNES-RE-Report Series, JNES-RE-2013-2041
14. 杉野英治・岩淵洋子・橋本紀彦・松末和之・蛭澤勝三・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
15. 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
16. Satoko Murotani, Kenji Satake and 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
17. Yamanaka, Y. and Y. Tanioka(2022): Short-wave run-ups of the 1611 Keicho tsunami along the Sanriku Coast, Progress in Earth and Planetary Science, doi.org/10.1186/s40645-022-00496-1
18. 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
19. 今井健太郎・前田拓人・飯沼卓史・蛭名裕一・菅原大助・今村文彦・平川新(2015):組み合わせ最適化手法を利用した歴史津波の波源推定法 -1611年慶長奥州地震の事例-, 東北地方災害科学研究, 第51巻, pp.139-144
20. 高橋潤・安中正・今村文彦(2023):古文書記録および津波堆積物調査に基づく1611年慶長奥州津波の波源推定, 歴史地震, 第38号, pp.177-196
21. 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

参考文献②

- 22.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
- 23.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
- 24.福原紘太・谷岡勇市郎(2017):歴史津波資料をデータとし津波遡上計算により推定された1611年慶長三陸津波地震の震源モデル, 日本地球惑星科学連合2017年大会, HDS16-10
- 25.Ioki, K. and Y. Tanioka(2016):Re-estimated fault model of the 17th century great earthquake off Hokkaido using tsunami deposit data, Earth and Planetary Science Letters, 433, 133-138
- 26.杉野英治・呉長江・是永真理子・根本信・岩淵洋子・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)
- 27.杉野英治・岩淵洋子・阿部雄太・今村文彦(2015):確率論的津波ハザード評価における津波想定の影響, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第4号
- 28.菅野剛・大内一男・平田一穂(2012):女川原子力発電所における津波の評価および対策, 電力土木, No.362
- 29.内閣府(2012b):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, 南海トラフの巨大地震モデル検討会第12回会合, 参考資料1