

第3回、第10回、第16回、第19回、
第21回、第27回WT資料改訂版
(論点No.26～32, 34～39, 41～48, 225反映)

東海第二発電所

津波対策への対応について(改訂版)

2024年3月18日

日本原子力発電株式会社

本資料のうち、 は営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

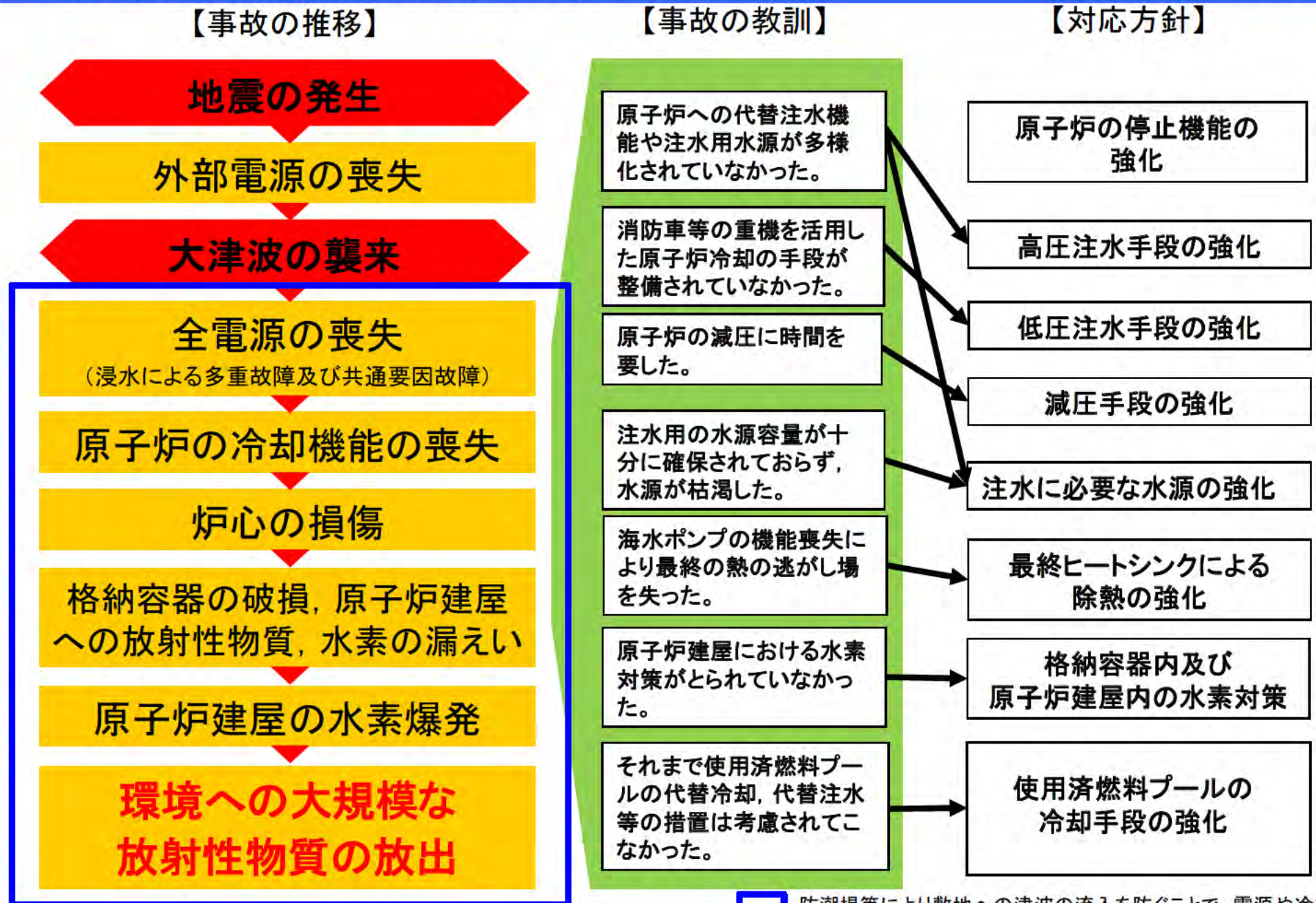
目 次

津波対策への対応	3
津波の評価	9
耐津波設計	95
補足説明資料	133

津波対策への対応

1. 福島第一原子力発電所事故の教訓	5
2. 防護対象とする津波の区分と発電所の防護方針	6
3. 津波対策の従来からの主な変更点	7
4. 東海第二発電所 防潮堤位置図	8

1. 福島第一原子力発電所事故の教訓



 : 防潮堤等により敷地への津波の流入を防ぐことで、電源や冷却機能等を確保し、原子炉を安全停止して環境影響を防止可能

2. 防護対象とする津波の区分と発電所の防護方針

- ・太平洋に面する東海第二発電所における津波に対する安全対策の特徴として、防護対象とする津波高さを以下の二つのとおり設定し、それぞれの津波の特徴に応じた形で発電所の安全確保を図ることとしている。
- ・ここでは、それぞれについて防護対象設備、津波防護対策等を示す。

①基準津波(防潮堤前面最高水位T.P.+17.1m)

- ⇒決定論的手法に基づき、発電所の供用期間中に発電所の安全施設に大きな影響を及ぼす恐れがある津波を定義したもの。(第3回ワーキングチームでご説明)
- ⇒発電所に設置する防潮堤(高さT.P.+20m)等により、基準津波を敷地に流入させない対策を図ることで、発電所の安全施設の機能を維持する。

②敷地に遡上する津波(防潮堤前面最高水位T.P.+24m(無限鉛直壁))

- ⇒確率論的評価を用いた津波PRA結果に基づき、基準津波の防潮堤前面高さ(T.P.+17.1m)を上回り、防潮堤高さ(T.P.+20m)を超える津波に対して発電所の防護を行う。
- ⇒防潮堤を超えて敷地に遡上する津波に対して、原子炉建屋の外壁や重大事故等対処設備等に水密対策を施すことで、重大事故対処設備を活用して原子炉等の冷却を可能とする。

3. 津波対策の従来からの主な変更点

対策の目的	対策の方向性	従来から備えていた対策	福島第一原子力発電所事故の教訓に基づく新たな安全対策	備考
津波の敷地への流入防止	Sクラスに属する施設の設置された敷地に基準津波による遡上波を地上部から到達、流入させない	<ul style="list-style-type: none"> ・低地の重要安全施設（非常用海水ポンプ）を局部的に防護する方針 ・海水ポンプ室の防護壁の増強（T.P.約+6.1m）（当時対策実施中） <p>〔茨城県による津波評価に基づく海水ポンプ室位置水位：T.P.約+5.7m〕</p>	<p>①基準津波への対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電所全体を取り囲むように防潮堤等を設置し、敷地に津波を流入させない対策を図ることで、発電所の安全施設の機能を維持する。 ・防潮堤の高さ：T.P.+20m（海岸側）及びT.P.+18m（陸側） ・上記に対応した取水路や放水路、開口部への流入防止対策、貫通部止水処置等を実施する。 <p>〔基準津波の評価に基づく 防潮堤前面の最高水位T.P.+17.1m（入力津波高さT.P.+17.9m）〕</p> <p>②敷地に遡上する津波への対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・基準津波を上回り、防潮堤高さ（T.P.+20m）を超えて敷地に遡上する津波に対して発電所の防護を行う。 ・防潮堤を超えて敷地に遡上する津波に対して、原子炉建屋の外壁や重大事故等対処設備等に水密対策を施し、重大事故対処設備を活用して原子炉等の冷却を可能とする。 <p>〔敷地に遡上する津波の設定 防潮堤前面の最高水位T.P.+24m（無限鉛直壁を想定）〕</p>	新規
水位低下による安全機能への影響防止	水位変動に伴う取水性低下による重要な安全機能への影響を防止	<ul style="list-style-type: none"> ・非常用海水ポンプの吸い込み口の取水可能水位まで対応可能 <p>〔取水ピット水位 T.P. <input type="text"/> まで取水可能〕</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・基準津波による引き波時も安全機能を維持する。 <p>〔引き波の入力津波高さはT.P.-6.0mで、 非常用海水ポンプ取水可能水位T.P. <input type="text"/> を下回る〕</p> <ul style="list-style-type: none"> ・貯留堰の設置により海水を貯留し、引き波が継続している間も非常用海水ポンプの運転継続を可能とする。 	新規
津波監視設備の設置	津波の襲来状況を監視するために津波監視設備を設置	潮位計による潮位の監視	<ul style="list-style-type: none"> ・津波の襲来状況を監視し、津波による水位の変化を監視・計測する。 ・耐震性を有する、津波・構内監視カメラ、取水ピット水位計及び潮位計を設置する。 	新規

4. 東海第二発電所 防潮堤位置図



- 東京の北方約130km, 水戸市の北東約15kmの地点で太平洋に面して位置する。
- 東海第二発電所の敷地の広さは約75万 m^2 。
- 東海第二発電所の原子炉建屋等の設置位置は T.P.+8mである。
- 防潮堤 高さ T.P.+18m~T.P.+20m

津波の評価

1. 評価の変遷	11
2. 新規制基準およびその適合状況(耐津波)	13
3. 基準津波の策定要件	14
4. 津波評価のあらまし	15
5. 地震に起因する津波の評価	24
6. 地震以外に起因する津波の評価	77
7. 基準津波の選定	91
8. 行政機関の津波評価との比較	93

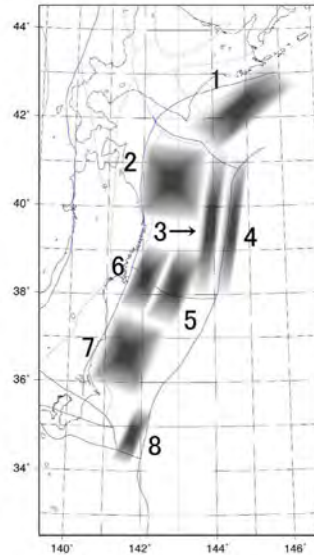
1. 評価の変遷

		津波評価	津波高さ T.P.(m)	津波対策
昭和46(1971)年 12月	原子炉設置許可申請	昭和31年7月以降の日立港の潮位記録(最高潮位:T.P.+1.46m)を基に敷地レベルを設定(取水口機器設置レベル:T.P.+3.31m)。	+1.46 (最高潮位)	+3.31m (敷地レベル)
平成5年7月	北海道南西沖地震発生			
平成8年12月	4省庁(農水省, 水産庁, 運輸省, 建設省)が「太平洋沿岸部地震津波防災計画主要調査委員会」を設置。			
平成9(1997)年		4省庁の検討状況を踏まえ, 津波解析を実施。 1677年房総沖地震を波源とした解析結果(最高水位T.P.+4.41m)からポンプ室の壁がT.P.+4.91mまで必要と判断し, 自主的に対策を実施。	+4.41	+4.91 (H9年対策)
平成10年3月	7省庁(4省庁+国土庁, 気象庁, 消防庁)が「津波防災計画における津波対策強化の手引き」を公表。			
平成14(2002)年 2月	土木学会が「原子力発電所の津波技術」を公表。	左記評価技術に基づき津波評価を実施した結果, 最高水位がT.P.+4.86mであり, ポンプ室の安全性を確認。 (次頁に示す)		
平成18年9月	「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」改訂。		+4.86	
平成19年10月	茨城県が「県沿岸における津波浸水想定区域図等」を公表。			
平成20(2008)年 12月		茨城県の津波評価を踏まえた評価を実施した結果, 最高水位がT.P.+5.72mであったことから, ポンプ室の対策計画を決定。 (次頁に示す)	+5.72	+6.11
平成23年3月11日	2011年東北地方太平洋沖地震	ポンプ室対策のうち側板設置完了(H22,9)。ポンプ室対策のうち貫通部の封止完了(H23)。ケーブルトレイ(北側)対策中。		
平成25年6月	「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置, 構造及び設備の基準に関する規則の解釈」及び各種審査ガイドの制定(原子力規制委員会)			
平成26年5月	原子炉設置変更許可申請	「基準津波及び対津波設計方針に係る審査ガイド」, 2011年東北地方太平洋沖地震の知見等を踏まえ基準津波を設定(防潮堤位置:T.P.+17.2m)	+17.2 (防潮堤位置)	+18~20 (防潮堤高さ)

1. 評価の変遷 「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」を踏まえた評価(2011年東北地方太平洋沖地震前)

●「原子力発電所の津波技術」(土木学会)に基づく評価

日本海溝沿い及び千島海溝(南部)沿いで考慮する波源モデル



領域	既往最大 M_w	対応する既往津波
1	8.2	1952年
2	8.4	1968年
3	8.3	1896年
4	8.6	1611年
5	8.2	1793年
6	7.7	1978年
7	7.9	1938年
8	8.2	1677年

1677年延宝房総沖地震に対応する波源が最も影響が大きく、最高水位がT.P.+4.86mとなった。

●茨城県の津波評価(H19年10月)に基づく評価



	ハード対策	ソフト対策
想定地震	1897年 明治三陸地震	1677年 延宝房総沖地震
マグニチュード(M)	8.6	8.3
茨城県沿岸での津波高さ	1~2m	2~7m

1677年延宝房総沖地震を波源として評価を行った結果、最高水位がT.P.+5.72mとなった。

2. 新規制基準およびその適合状況(耐津波)

東海第二発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(平成26年5月)

添付書類八「変更後における発電用原子炉施設の安全設計に関する説明書」

1.10.8「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(平成25年7月8日施行)」に対する適合(抜粋、一部追記)

【第5条】 新規制基準の項目※1	適合状況
<p>設計基準対象施設は、その供用中に当該設計基準対象施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波(以下「基準津波」という。)に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。</p>	<p>(1)基準津波の策定 基準津波は、最新の科学的・技術的知見を踏まえ、波源海域から敷地周辺までの海底地形、地質構造、地震活動性等の地震学的見地から想定することが適切なものを策定する。 また、津波の発生要因として、地震のほか、地すべり、斜面崩壊、その他の地震以外の要因、及びこれらの組み合わせによるものを複数選定し、不確かさを考慮し策定する。 なお、基準津波は、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に施設から離れた沿岸域における津波を用いる。</p> <p>(2)基準津波に対する設計基準対象施設の設計 基準津波に対して、耐津波設計上重要な施設※2の安全機能が損なわれることがないように設計する。 耐津波設計上重要な施設を設置する敷地において、基準津波による遡上波を地上部から到達又は流入させない。また、海と接続する取水口、放水路等の経路から、同敷地及び耐津波設計上重要な施設を内包する建屋に流入させない。【外郭防護1】 取水・放水施設、地下部等において、漏水する可能性を考慮の上、漏水による浸水範囲を限定して、重要な安全機能への影響を防止する。【外郭防護2】 上記の他、耐津波設計上重要な施設は、浸水防護をすることにより、津波による影響等から隔離する。【内郭防護】 水位変動に伴う取水性低下による重要な安全機能への影響を防止できる設計とする。</p>

※1:「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第五条(津波による損傷の防止)

※2:耐震Sクラスに属する施設及び安全機能を有する設備(クラス1・2設備及びクラス3設備のうち緊急時対策所)

3. 基準津波の策定要件

【新規制基準の要求事項】

(基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド抜粋)

○津波発生要因の検討

(1) 津波を発生させる要因として、以下の事象を検討していることを確認する。

- ・プレート間地震
- ・海洋プレート内地震
- ・海域の活断層による地殻内地震
- ・陸上及び海底での地すべり(以下「地すべり」という。)、斜面崩壊
- ・火山現象(噴火、山体崩壊、カルデラ陥没等)

(2) プレート間地震では、津波を発生させる要因として、以下の事象を考慮していることを確認する。

- ・プレート境界での大きなすべりにより強い揺れと大きな津波を生成する地震及び海溝直近の分岐断層まで同時に活動する地震
- ・プレート境界(海溝近傍)でのゆっくりとした大きなすべりにより強い揺れは伴わないが大きな津波を生成する津波地震
- ・上記の同時発生

(3) 海洋プレート内地震では、津波を発生させる要因として、海溝軸の外側で発生する地震を考慮していることを確認する。

(4) 海域の活断層による地殻内地震では、津波を発生させる要因として、海岸のやや沖合の陸側のプレート(大陸プレート)内部で発生する地震を考慮していることを確認する。

(5) 地すべり、斜面崩壊の要因となる事象(地震、火山現象、豪雨等)を適切に考慮していることを確認する。また、活断層が少ない地域においても、過去に地すべりや斜面崩壊が発生したことを示す地形や地質構造が見られる場合には、地すべりや斜面崩壊による津波の発生を適切に考慮していることを確認する。

○津波発生要因の組合せ

(1) 津波発生要因に係るサイトの地学的背景、津波発生要因の関連性を踏まえ、次に示す組合せについて考慮していることを確認する。

- ・プレート間地震とその他の地震
- ・地震と地すべり
- ・地震と斜面崩壊
- ・地震と山体崩壊

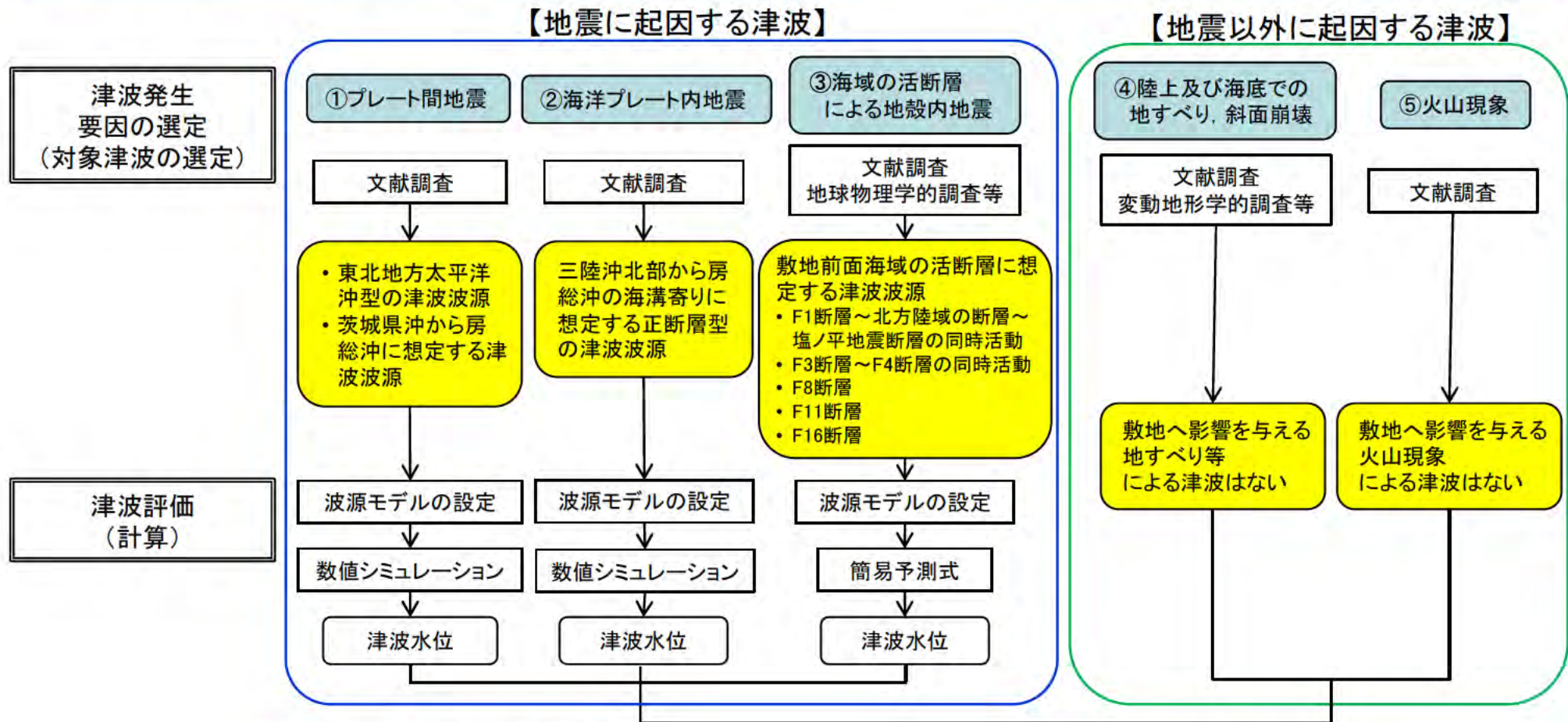
○基準津波の策定方針

(1) 基準津波は、上記の発生要因を考慮した波源モデルに基づき、津波の伝播の影響等を踏まえて複数策定していることを確認する。

(2) 基準津波の策定に当たっては、最新の知見に基づき、科学的想像力を発揮し、十分な不確かさを考慮していることを確認する。

上記内容に基づき基準津波を策定

4. 津波評価のあらまし (津波評価の流れ)



「① プレート間地震」を選定

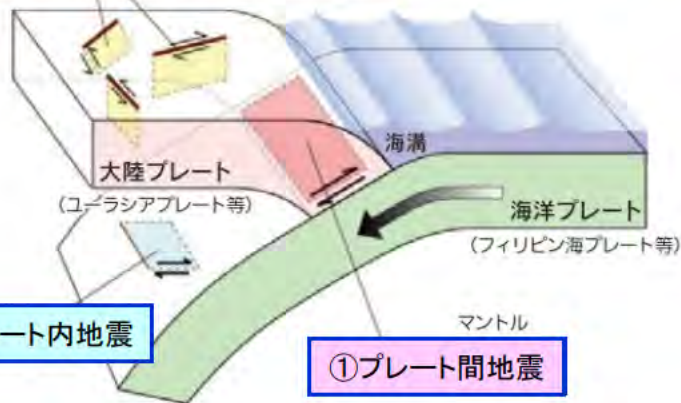
基準津波の選定	①プレート間地震	「茨城県沖から房総沖」で発生する津波が発電所に最も大きな影響を与える。
	②海洋プレート内地震	プレート間地震による津波の最大高さを上回る津波はない。
	③海域の活断層による地殻内地震	
	④地すべりや斜面崩壊	敷地へ影響を与える地すべり、火山現象等による津波はない。
	⑤火山現象	

4. 津波評価のあらまし (津波のイメージ)

【地震に起因する津波】

■ 地震発生のメカニズム(概念図)

③ 海域の活断層による地殻内地震



② 海洋プレート内地震

① プレート間地震

① プレート間地震

大陸プレートが海洋プレートに引きずられて変形するうちに、境界面が支えきれなくなって大陸プレートが跳ね返り、地震が発生します。

② 海洋プレート内地震

海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込んでいくうちに、内部でひずみが蓄積され、それが解放されるときに地震が発生します。

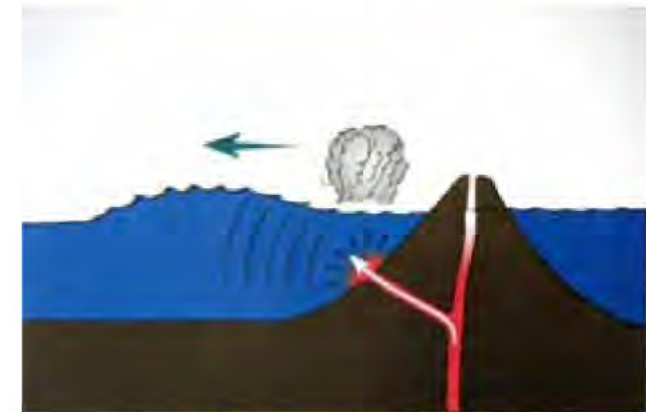
③ 海域の活断層による地殻内地震

大陸プレートが海洋プレートから押され続けているうちに、内部でひずみが蓄積され、それが解放されるときに地震が発生します。

【地震以外に起因する津波】



④ 陸上及び海底での地すべり, 斜面崩壊



⑤ 火山現象

図版出典

Sheila B.Reed:Natural and Human-Made Hazards
:Mitigation and Management Issue
Wilderness Medicine 2001:1630p

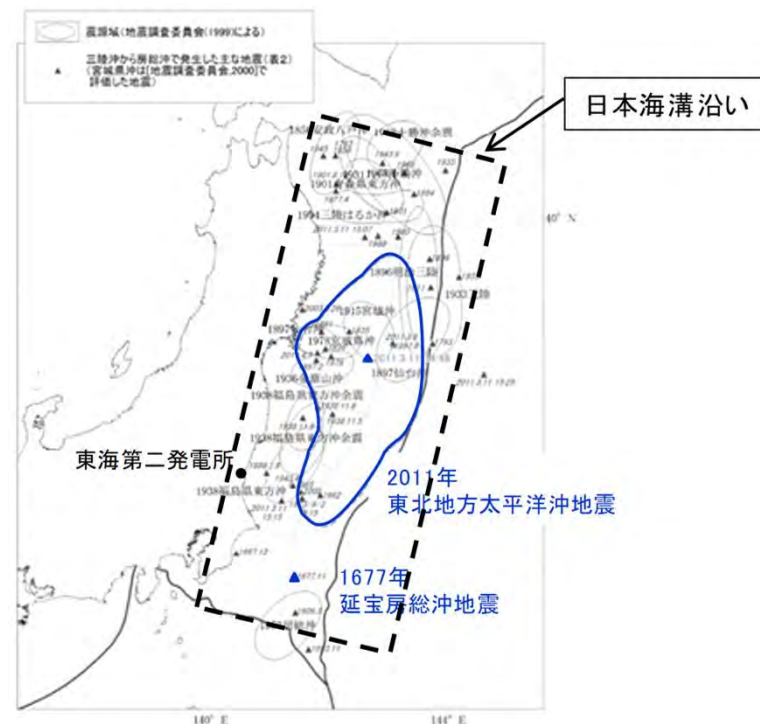
4. 津波評価のあらまし (地震に起因する津波 ①プレート間地震に起因する津波)

過去に発生した地震規模M8以上(国外においてはM9クラス)の津波の中で、敷地に比較的大きな影響を及ぼしたと考えられる既往津波は、日本海溝沿いで発生したプレート間による津波である。

- ✓ 1677年延宝房総沖地震津波: 茨城県那珂湊(現ひたちなか市): 4.5~5.5m
- ✓ 2011年東北地方太平洋沖地震津波(東海第二発電所): 概ね5~6m(最大6.5m)

過去に発生した大規模な地震

領域	名称	地震規模		文献調査結果	
		Mj	Mw		
近地津波	日本海溝沿い	869年の津波	8.3 ±1/4	—	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		1611年の津波	≒8.1	8.3	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		1677年延宝房総沖地震津波	≒8.0	8.2	茨城県那珂湊(現ひたちなか市)で4.5~5.5m
		1793年宮城県沖地震に伴う津波	8.0~8.4	—	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		1896年明治三陸地震津波	8・1/4	8.3	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		2011年東北地方太平洋沖地震津波	8.4	9.0	発電所で概ね5~6m(最大6.5 m)
近地津波	千島海溝沿い	1968年十勝沖地震に伴う津波	7.9	8.2	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		17世紀初頭の地震(500年間隔地震)に伴う津波	—	8.8	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
	伊豆・小笠原海溝沿い	1972年八丈島東方沖地震津波	7.2	M ₁₀ 7.5	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
遠地津波	1700年カスケード地震津波	—	9.0	茨城県那珂湊(現ひたちなか市)で約2m	
	1952年カムチャッカ地震津波	—	9.0	福島県沿岸で約0.5~1.5m	
	1960年チリ地震津波	—	9.5	茨城県久慈港で約2.3m	
	1964年アラスカ地震津波	—	9.2	小名浜で0.35m, 銚子で0.36m	



三陸沖から房総沖にかけての主な地震と主な震源域 (地震調査研究推進本部(2012)に加筆)

4. 津波評価のあらまし (地震に起因する津波 ①プレート間地震に起因する津波)

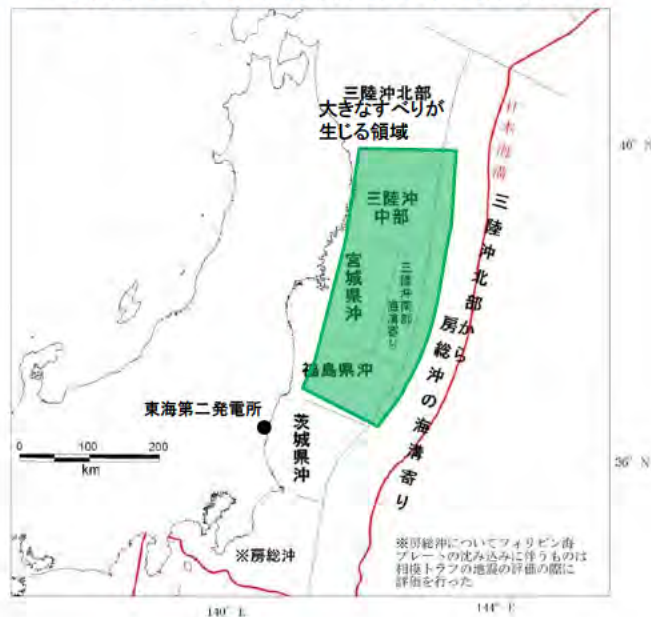
想定津波波源について

- ・過去に発生した津波
- ・2011年東北地方太平洋沖地震の知見 等を参考に設定

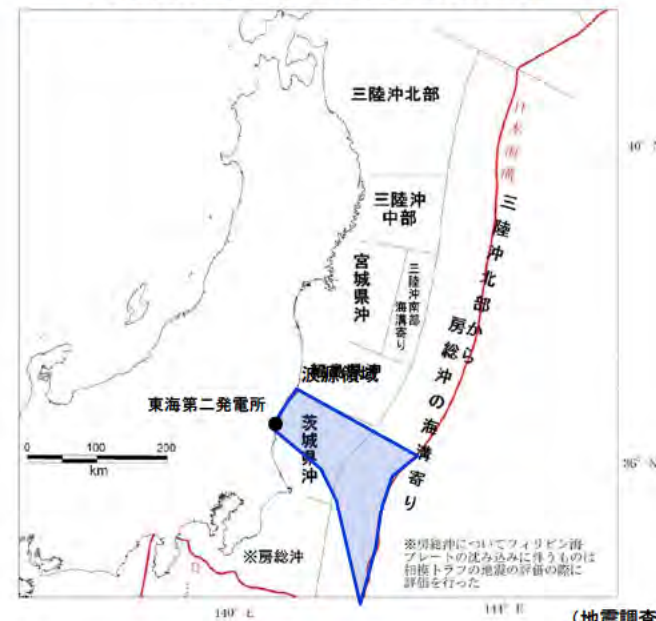
想定津波の設定方針

- I.
- ✓日本海溝沿いで生じた地震津波のうち、2011年東北地方太平洋沖地震は敷地に比較的大きな影響を及ぼしたことを踏まえ、東北地方太平洋沖型の津波波源を設定する。
 - ✓東北地方太平洋沖型の津波波源で大きなすべりが生じる領域は、三陸沖中部から福島県沖及びその沖合の海溝軸付近の領域とする。
- II.
- ✓日本海溝沿いで生じた地震津波のうち、1677年延宝房総沖地震は敷地に比較的大きな影響を及ぼしたことを踏まえ、茨城県沖に想定する津波波源を設定する。
 - ✓茨城県沖に想定する津波波源については、2011年東北地方太平洋沖地震で大きなすべりが生じていない領域とする。なお、領域の南限については、北米プレートとフィリピン海プレートの境界とする。

【東北地方太平洋沖型の津波波源】



【茨城県沖に想定する津波波源】

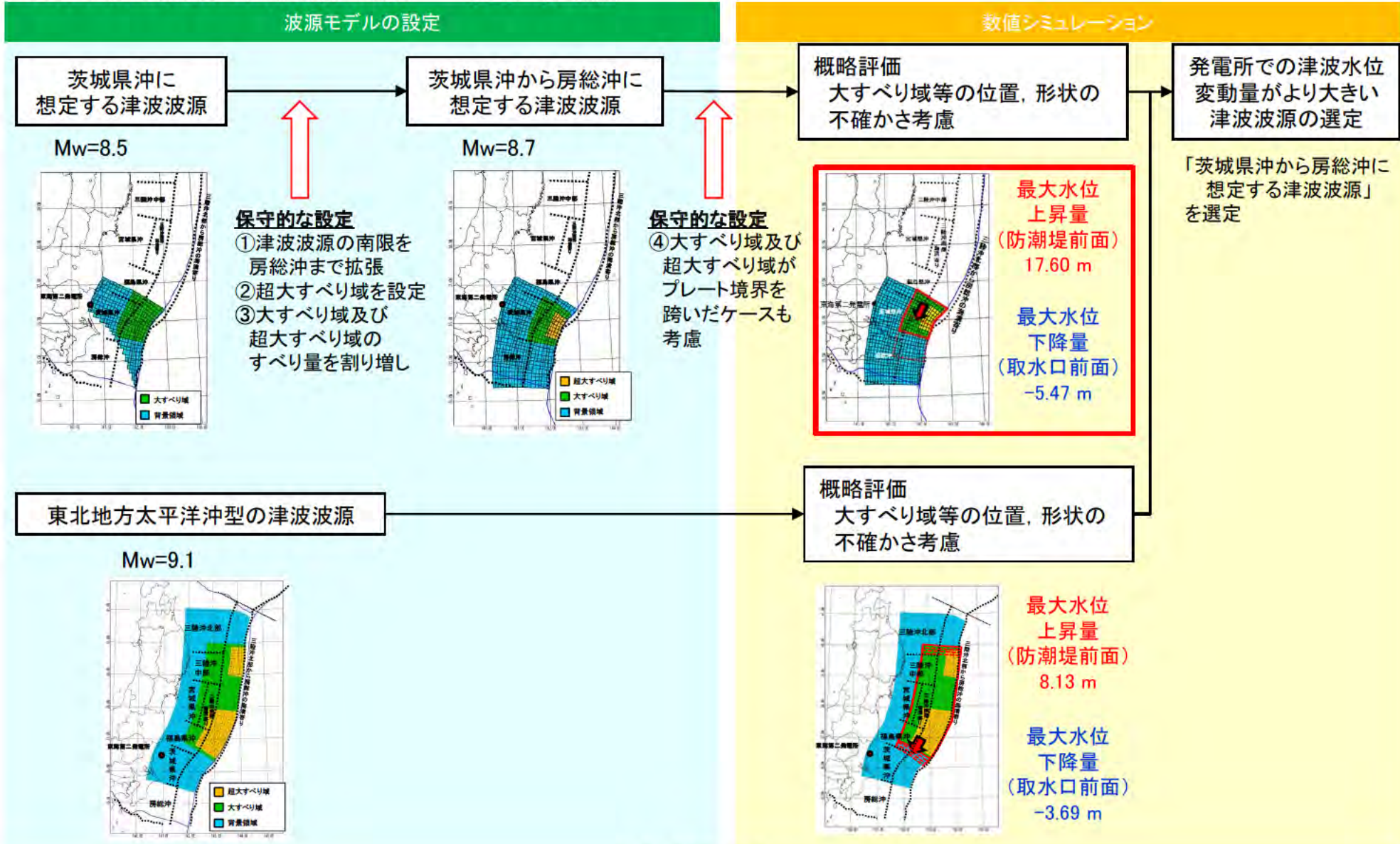


(地震調査研究推進本部(2012)に加筆)

4. 津波評価のあらまし (地震に起因する津波 ①プレート間地震に起因する津波)

想定津波波源について

- ・過去に発生した津波
- ・2011年東北地方太平洋沖地震の知見 等を参考に設定

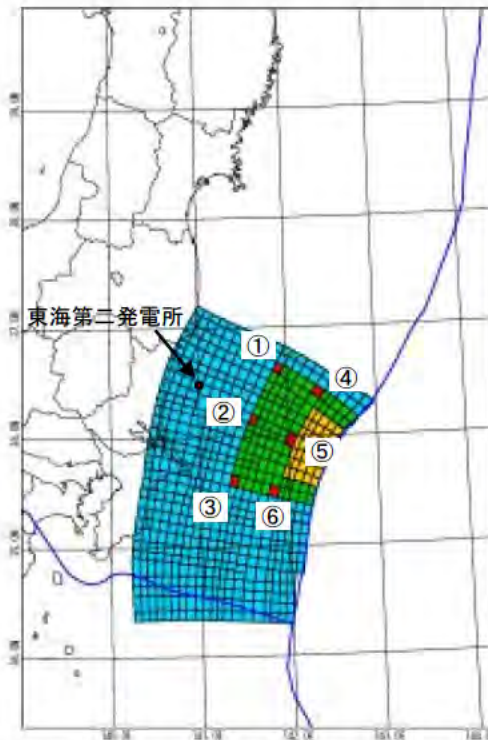


4. 津波評価のあらまし (地震に起因する津波 ①プレート間地震に起因する津波)

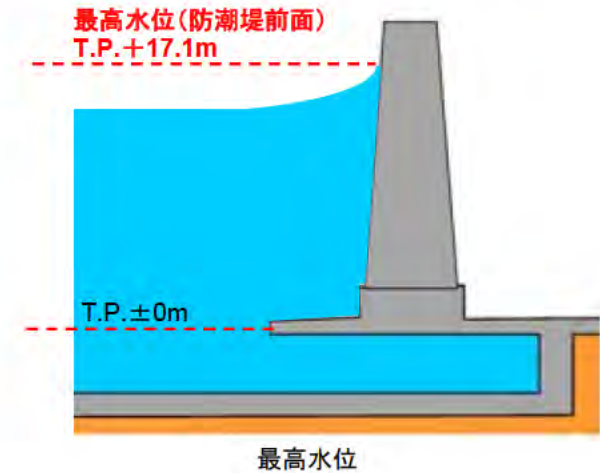
発電所での津波水位変動量がより大きい津波波源として
プレート間地震に起因する津波
「茨城県沖から房総沖に想定する津波波源」を選定
茨城県沖～房総沖 Mw=8.7

詳細評価 不確かさの考慮

- ・破壊開始点 : 6ケース(①～⑥)
- ・破壊伝播速度 : 5ケース(1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0km/s)
- ・立ち上がり時間 : 2ケース(30, 60秒)



茨城県沖から房総沖に想定する津波波源



《 詳細評価の結果 》

最大水位上昇量(防潮堤前面) : 15.96m※ (+16.08m)
最大水位下降量(取水口前面) : -4.59m※ (-4.97m)

最高水位(防潮堤前面) : T.P. +17.1m※ (T.P. +17.2m)
最低水位(取水口前面) : T.P. - 4.9m※ (T.P. -5.3m)

※ 申請時から設備形状(防潮堤の線形形状の見直し等)を変更したモデルにおける評価水位

4. 津波評価のあらまし (津波評価 まとめ)

敷地に影響を及ぼす対象津波を選定するため、評価を実施

津波の発生要因	津波評価結果(計算)	津波の影響評価結果
①プレート間地震※1	最大水位上昇量: +16.08m(防潮堤前面) 最大水位下降量: -4.97m(取水口前面)	「茨城県沖から房総沖」で発生する津波が発電所に最も大きな影響を与える。
②海洋プレート内地震※2	最大水位上昇量: +6.44m(防潮堤前面) 最大水位下降量: -4.19m(取水口前面)	プレート間地震による津波の最大高さを上回る津波はない。
③海域の活断層による地殻内地震※3	最大水位上昇量: +1.8m(防潮堤前面) 最大水位下降量: (影響は少ないと評価)	
④地すべりや斜面崩壊	—	敷地へ影響を与える地すべり、火山現象等による津波はない。
⑤火山現象	—	

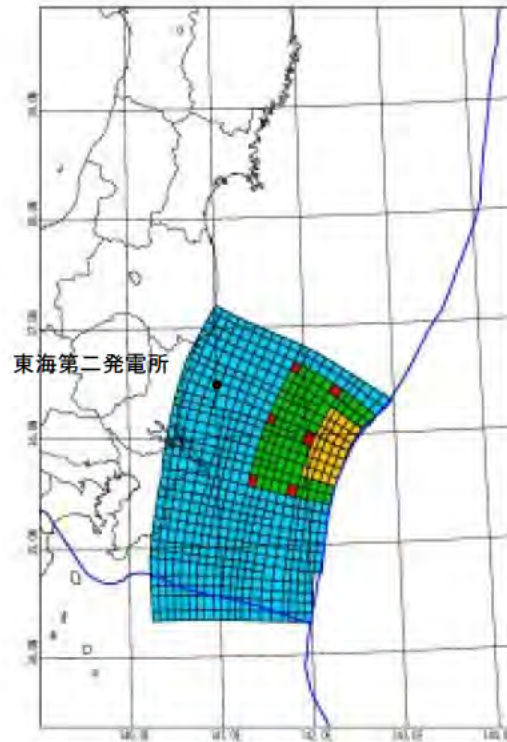
⇒ ① プレート間地震を選定

※1 詳細評価の結果

※2 概略評価の結果

※3 簡易予測式による評価の結果

4. 津波評価のあらまし (基準津波の選定)



項目	地震に起因する津波
地震種別	茨城県沖から房総沖に想定するプレート間地震
最高水位(防潮堤前面)	T.P.+17.1m (*T.P.+17.2m)
最低水位(取水口前面)	T.P.-4.9m (*T.P.-5.3m)

※ 申請時の設備形状における評価水位

「地震に起因する津波」と「地震以外に起因する津波」の評価結果を踏まえ、
発電所に与える影響が最も大きい津波は『茨城県沖から房総沖に想定するプレート間地震 Mw=8.7』である。

以上より『茨城県沖から房総沖に想定するプレート間地震 Mw=8.7』を『基準津波』とする。

4. 津波評価のあらまし (原電がさらに保守的に設定した津波評価のまとめ)

- 前提条件 : 津波波源を茨城県沖に設定
- 設定条件① : 津波波源の南限を房総沖まで拡張
- 設定条件② : 超大すべり域を設定
- 設定条件③ : 大すべり域及び超大すべり域のすべり量を割り増し
- 設定条件④ : 大すべり域及び超大すべり域がプレート境界を跨いだケースも考慮

以上を保守的に評価したことで、

津波評価(基準津波)は

最高水位(防潮堤前面)において、T.P.+17.1m と設定した。

津波波源の設定			津波評価
---------	--	--	------

1. 検討対象領域の選定	2. 想定津波の設定に反映する知見の分析	3. 想定波源領域の設定	4. 特性化波源モデルの設定
--------------	----------------------	--------------	----------------

特性化波源モデル

- 既往津波から検討波源領域を抽出
- 【2011年東北地方太平洋沖地震の特徴と関連する知見】
 - ✓ 破壊領域
 - ✓ すべり
 - ✓ 地震の発生メカニズム

【検討波源領域】

- 日本海溝沿い※1 (三陸沖北部～房総沖)



(地震調査研究推進本部(2012))

※1:遠地津波(チリ地震等)及び近地津波のうち千島海溝沿い及び伊豆・小笠原海溝沿いの領域については、既往津波の記録、波源の位置と伝播の指向性を考慮すると、敷地への影響が小さく、影響の大きい敷地前面の波源を想定波源として検討した。

【想定津波の設定方針】

- I.
 - ✓ 日本海溝沿いで生じた地震津波のうち、2011年東北地方太平洋沖地震は敷地に比較的大きな影響を及ぼしたことを踏まえ、東北地方太平洋沖型の津波波源を設定する。
 - ✓ 東北地方太平洋沖型の津波波源で大きなすべりが生じる領域は、三陸沖中部から福島県沖及びその沖合の海溝軸付近の領域とする。
- II.
 - ✓ 日本海溝沿いで生じた地震津波のうち、1677年延宝房総沖地震は敷地に比較的大きな影響を及ぼしたことを踏まえ、茨城県沖に想定する津波波源を設定する。
 - ✓ 茨城県沖に想定する津波波源については、2011年東北地方太平洋沖地震で大きなすべりが生じていない領域とする。なお、領域の南限については、北米プレートとフィリピン海プレートの境界とする。
- III. 2011年東北地方太平洋沖地震で応力を解放した領域では、東北地方太平洋沖型の地震津波の発生確率は極めて小さい。

【東北地方太平洋沖型の津波波源】



【茨城県沖に想定する津波波源】

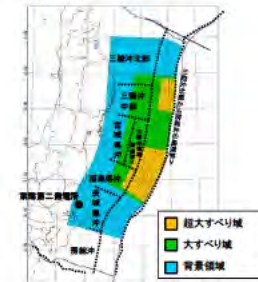


茨城県沖に想定する津波波源については、固着の程度が小さい領域に大きなすべりを生じる津波波源を想定した。

- ✓ 波源領域の南限については、北米プレートとフィリピン海プレートの境界とする。
- ✓ 波源領域の北限については、茨城県沖と福島県沖の境界とする。
- ✓ プレート間地震と津波地震の連動型地震を仮想的に考慮する。

特性化波源モデル

波源領域:三陸沖北部～茨城県沖
Mw=9.1



1896年明治三陸地震津波は、敷地への影響が小さいと考えられる。また、当該津波の波源は、東北地方太平洋沖型の津波波源(プレート間地震と津波地震の連動型地震)に含まれている。

【茨城県沖から房総沖に想定する津波波源】

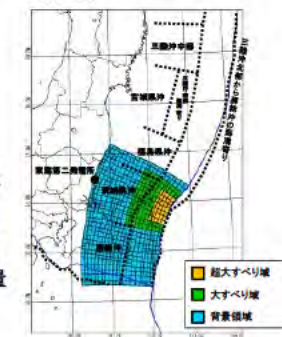
波源領域:茨城県沖～房総沖の一部
Mw=8.5



- 保守的設定1. 津波波源の南限を房総沖まで拡張
保守的設定2. 超大すべり域を設定
保守的設定3. 大すべり域及び超大すべり域のすべり量を割り増し

波源領域の北限については、すべり量が保守的な設定となるように、福島県沖の一部まで拡張して設定した。

検討波源:茨城県沖～房総沖
Mw=8.7



1677年延宝房総沖地震津波の波源は、茨城県沖から房総沖に想定する津波波源(プレート間地震と津波地震の連動型地震)に含まれている。

津波評価

4. 特性化波源モデルの設定

5. 特性化波源モデルの不確かさの考慮

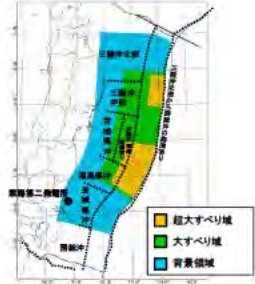
特性化波源モデル

概略パラメータスタディ
(大すべり域等の位置, 形状の不確かさの考慮)

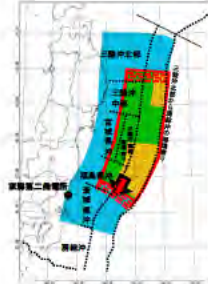
発電所での津波水位変動量がより大きい津波波源の選定

詳細パラメータスタディ
(破壊開始点, 破壊伝播速度, 立ち上がり時間の不確かさの考慮)

波源領域: 三陸沖北部~茨城県沖
Mw=9.1

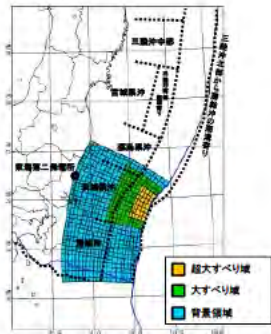


大すべり域, 超大すべり域の位置を約10km単位で移動

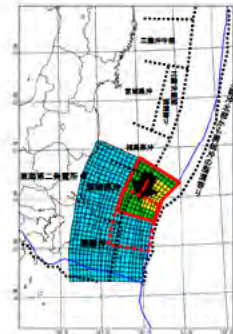


最大水位
上昇量
(防潮堤前面)
8.13 m^{※1}
最大水位
下降量
(取水口前面)
-3.69 m^{※1}

検討波源: 茨城県沖~房総沖
Mw=8.7

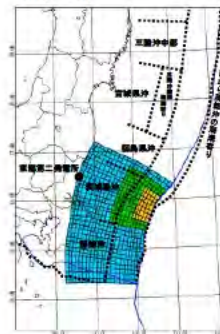


大すべり域, 超大すべり域の位置を約10km単位で移動



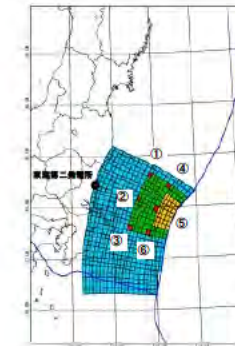
最大水位
上昇量
(防潮堤前面)
17.60 m^{※1}
最大水位
下降量
(取水口前面)
-5.47 m^{※1}

検討波源: 茨城県沖~房総沖
Mw=8.7



最大水位
上昇量
(防潮堤前面)
17.60 m^{※1}
最大水位
下降量
(取水口前面)
-5.47 m^{※1}

破壊開始点: ①~⑥
破壊伝播速度: 1.0km/s, 1.5km/s, 2.0km/s, 2.5km/s, 3.0km/s
立ち上がり時間: 30秒, 60秒



最高水位^{※2}
(防潮堤前面)
T.P. +17.1 m
最低水位^{※2}
(取水口前面)
T.P. -4.9 m

- ※2
- 申請時から防潮堤の設置ルート等を変更したモデルにおける評価水位
 - 潮位及び地殻変動量(2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動量も含む)を考慮

保守的設定4. 大すべり域及び超大すべり域がプレート境界を跨いだケースも考慮

※1 津波水位に大きな影響を与える大すべり域等の位置などの目安を得ること(検討ケースの序列決め)を目的としている。

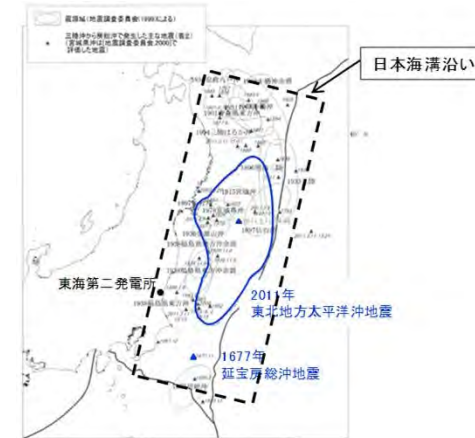
5. 地震に起因する津波の評価 5.1 プレート間地震に起因する津波 津波の波源設定(概要)



波源		茨城県沖に想定する津波波源	茨城県沖から房総沖に想定する津波波源		
		<ul style="list-style-type: none"> プレート間地震と津波地震の連動型地震を仮想的に考慮 プレート境界及び構造境界から波源領域を設定 	【保守的設定1】 津波波源の南限を 房総沖まで拡張	【保守的設定1,2】 津波波源の南限を 房総沖まで拡張 + 超大すべり域を設定	【保守的設定1,2,3】 津波波源の南限を 房総沖まで拡張 + 超大すべり域を設定 + 大すべり域及び超大すべり域の すべり量を割り増し
断層面積:S		29,630 km ²	53,684 km ²	53,684 km ²	53,684 km ²
モーメントマグニチュード:Mw		8.5	8.7	8.7	8.7
平均すべり量:D		4.5 m	6.1 m	6.1 m	6.1 m
すべり量	超大すべり域 (面積比率)	—	—	18.2 m(3D) (全体面積の15%)	24.3 m(4D) (全体面積の5%)
	大すべり域 (面積比率)	9.0 m(2D) (全体面積の40%)	12.1 m(2D) (全体面積の40%)	8.5 m(1.4D) (全体面積の25%)	12.1 m(2D) (全体面積の15%)
	背景領域 (面積比率)	1.5 m(0.33D) (全体面積の60%)	2.0 m(0.33D) (全体面積の60%)	2.0 m(0.33D) (全体面積の60%)	3.8 m(0.62D) (全体面積の80%)
特性化波源モデル(一例)					

検討対象領域の選定(既往津波の記録)

- 地震規模M8以上(国外においてはM9クラス)のプレート間地震について、文献調査※1を行った結果、敷地に比較的大きな影響を及ぼしたと考えられる既往津波は、日本海溝沿いで発生した津波である。
 - ✓ 1677年延宝房総沖地震津波：茨城県那珂湊(現ひたちなか市)で4.5~5.5m
 - ✓ 2011年東北地方太平洋沖地震津波：発電所で概ね5~6m(最大6.5m)



三陸沖から房総沖にかけての主な地震と主な震源域(地震調査研究推進本部(2012)に加筆)

領域	名称	波源域	地震規模		文献調査結果	
			Mj	Mw		
近地津波	日本海溝沿い	869年の津波	三陸沖	8.3 ± 1/4	—	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		1611年の津波	三陸沖(海溝軸付近)	≒8.1	8.3	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		1677年延宝房総沖地震津波	房総沖(海溝軸付近)	≒8.0	8.2	茨城県那珂湊(現ひたちなか市)で4.5~5.5m
		1793年宮城県沖地震に伴う津波	三陸沖	8.0~8.4	—	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		1896年明治三陸地震津波	三陸沖(海溝軸付近)	8・1/4	8.3	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		2011年東北地方太平洋沖地震津波	三陸沖北部~茨城県沖及びその沖合の海溝軸付近	8.4	9.0	発電所で概ね5~6m(最大6.5 m)
近地津波	千島海溝沿い	1968年十勝沖地震に伴う津波	十勝沖	7.9	8.2	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
		17世紀初頭の地震(500年間隔地震)に伴う津波	十勝・根室沖	—	8.8※2	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
	伊豆・小笠原海溝沿い	1972年八丈島東方沖地震津波	八丈島東方沖	7.2	M _{t0} 7.5	敷地付近への影響を示す津波の痕跡はない。
遠地津波		1700年カスケード地震津波	北米北西部沖	—	9.0	茨城県那珂湊(現ひたちなか市)で約2m
		1952年カムチャッカ地震津波	カムチャッカ半島南東沖	—	9.0	福島県沿岸で約0.5~1.5m
		1960年チリ地震津波	チリ南部沖	—	9.5	茨城県久慈港で約2.3m
		1964年アラスカ地震津波	アラスカ湾	—	9.2	小名浜で0.35m, 銚子で0.36m

※1 資料5-2「1.1(2) 津波痕跡に関する文献調査」に記載

※2 Ioki and Tanioka (2016, in press)による。

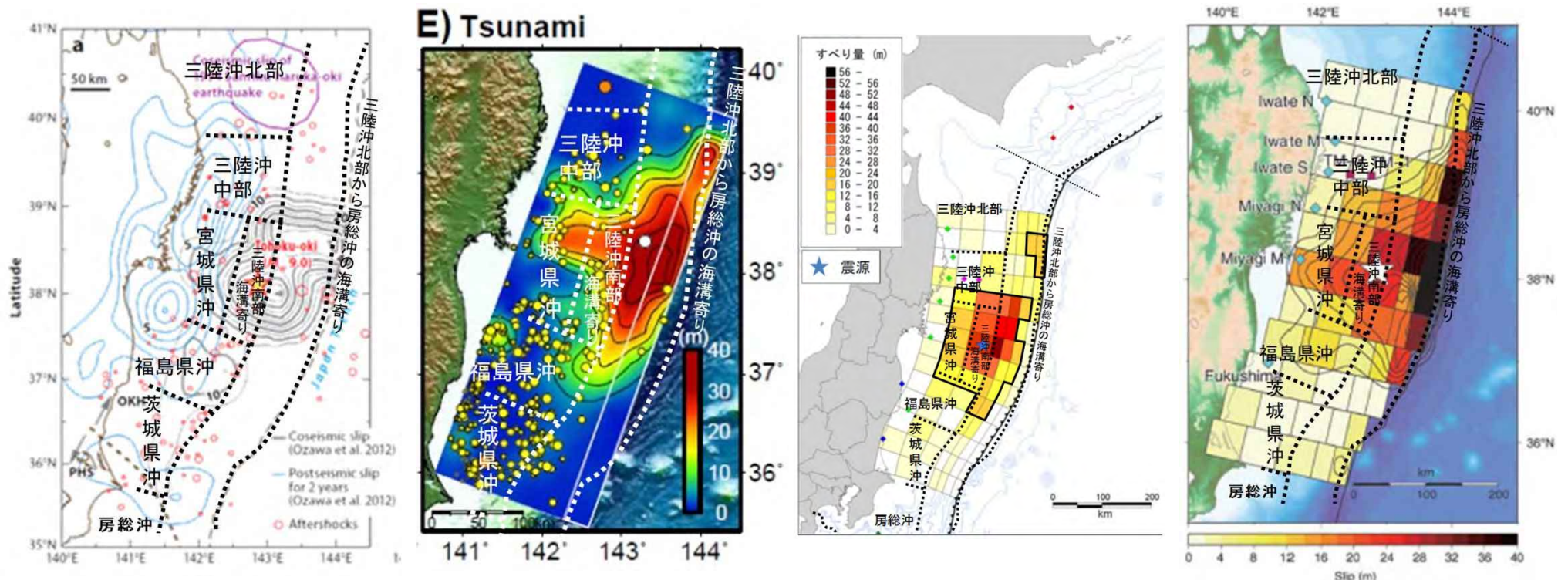
- 文献調査結果より、過去に敷地へ比較的大きな影響を及ぼした日本海溝沿いの領域を対象に、津波波源について検討した。
- 遠地津波(チリ地震等)及び近地津波のうち千島海溝沿い及び伊豆・小笠原海溝沿いの領域については、敷地への影響が小さいことを確認した。

想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(破壊領域とすべり))

他機関の検討※(Ozawa et al. (2012), Koketsu et al.(2011), 内閣府(2012)及びSatake et al.(2013))に基づけば, 2011年東北地方太平洋沖地震の破壊領域とすべりには以下の傾向が見られる。

「複数の領域が連動して破壊した。」

「すべりには不均質性が認められ, 大きなすべりが生じた領域は三陸沖中部の一部, 宮城県沖, 三陸沖南部海溝寄り, 福島県沖の一部の4領域及びその沖合の海溝軸付近である。」



陸上・海上のGPS及び水圧計データに基づく2011年東北地方太平洋沖地震のすべり量分布(黒線)
(Ozawa et al. (2012)に加筆)

津波インバージョン解析
(Koketsu et al. (2011)に加筆)

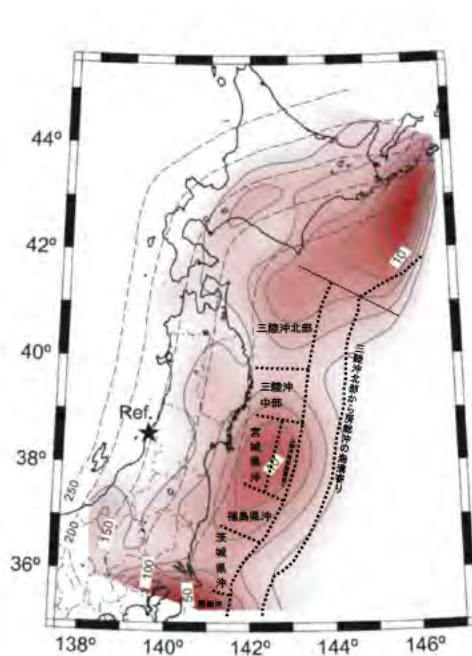
津波インバージョン解析
(内閣府(2012)に加筆)

津波インバージョン解析
(Satake et al.(2013)に加筆)

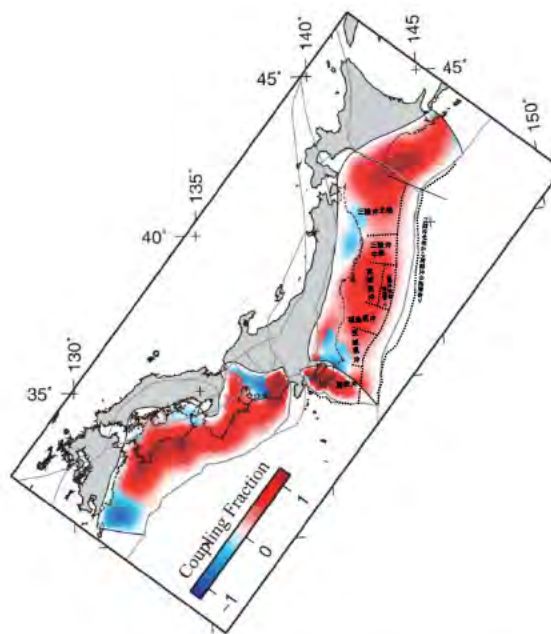
想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(固着の程度とすべり))

他機関の検討(Suwa et al. (2006), Loveless and Meade (2010, 2011))に基づけば, 固着の程度とすべりについて以下の傾向が見られる。
「大きなすべりが生じた領域は, 固着の程度が大きい領域に対応している。」

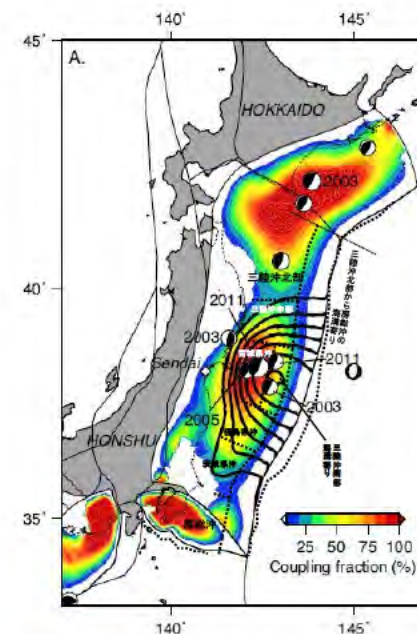
- Suwa et al. (2006), Loveless and Meade (2010, 2011) は, 宮城県沖に固着が強い領域が認められるとしている。



1997 ~2001年のGPSデータに基づくすべり欠損速度
(Suwa et al. (2006)に加筆)



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

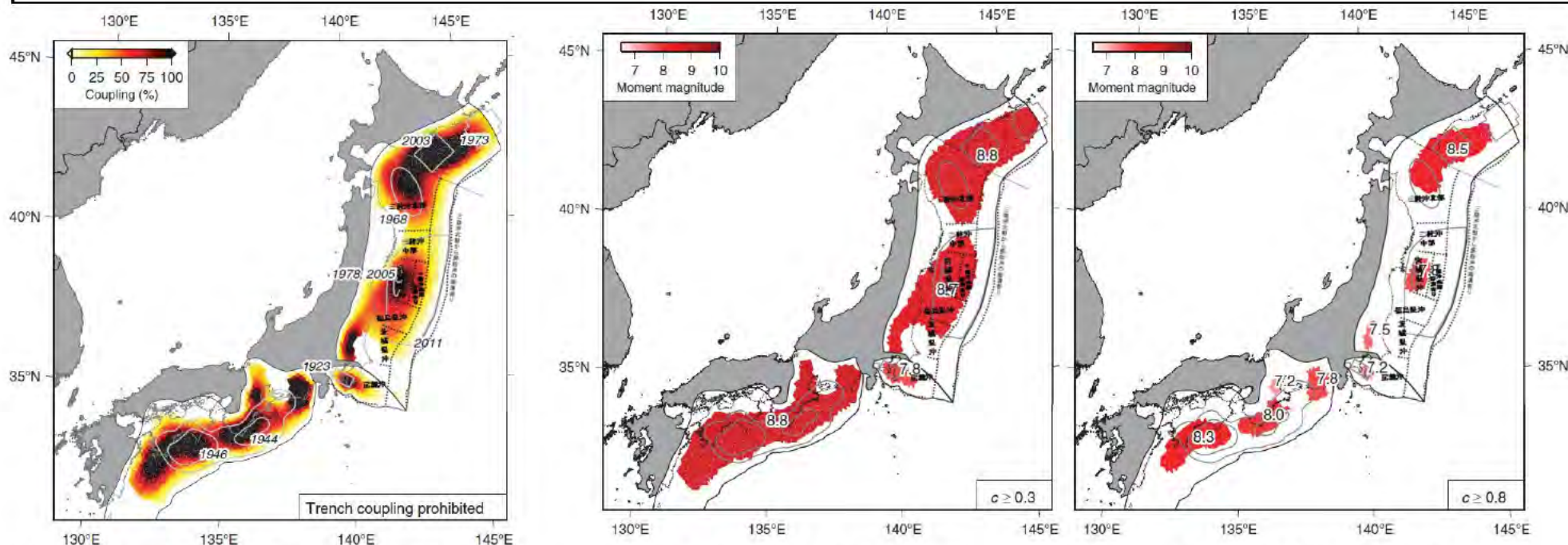


カラーコンター: 1996-2000年GEONETデータに基づくカップリング率
黒線: 地震時すべり量(2.5m間隔)
震源球: 1994年から本震までに発生したMw7.0以上, 深さ100km未満の地震のメカニズム
(Loveless and Meade (2011)に加筆)

Loveless and Meade(2015)は、固着の程度と破壊伝播について、以下の見解を示している。

「本震については固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 日本海溝では、カップリング率0.3以上の領域と、東北地方太平洋沖地震の破壊領域はよく対応している。一方、カップリング率0.8以上の領域は日本周辺における20世紀以降の地震(東北地方太平洋沖地震を除く)の破壊領域と対応している。
- カップリング率0.8以上の領域は比較的頻度の高い地震の破壊領域を規定し、カップリング率0.3以上の領域は稀で巨大な地震の破壊領域に対応している可能性がある。
- カップリング率の低い領域が、地震時の破壊伝播に対し運動学的バリアとして働くと考えれば、将来発生する地震のポテンシャルを領域ごとに特定できる。



1997～2000年のGPSデータに基づくプレート間カップリング率

プレート間カップリング率が0.3以上の領域

プレート間カップリング率が0.8以上の領域

いずれの図においても灰色の曲線は、各種文献に基づく過去の地震のすべり量コンターを表す。

- 1946年東南海地震(Mw8.3)及び1944年東南海地震(Mw 8.1): すべり量1m及び3mのコンター
- 1923年関東地震(Mw - 7.9): モデル化された破壊領域
- 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0): すべり量4mのコンター
- 1978年宮城沖(Mw 7.6): 余震域
- 2005年宮城沖(Mw 7.0): 震央位置
- 1968年十勝沖(Mw 8.2): 余震域
- 2003年十勝沖(Mw 8.2): モデル化された破壊領域
- 1973年根室沖(Mw 8.0): すべり量1mのコンター

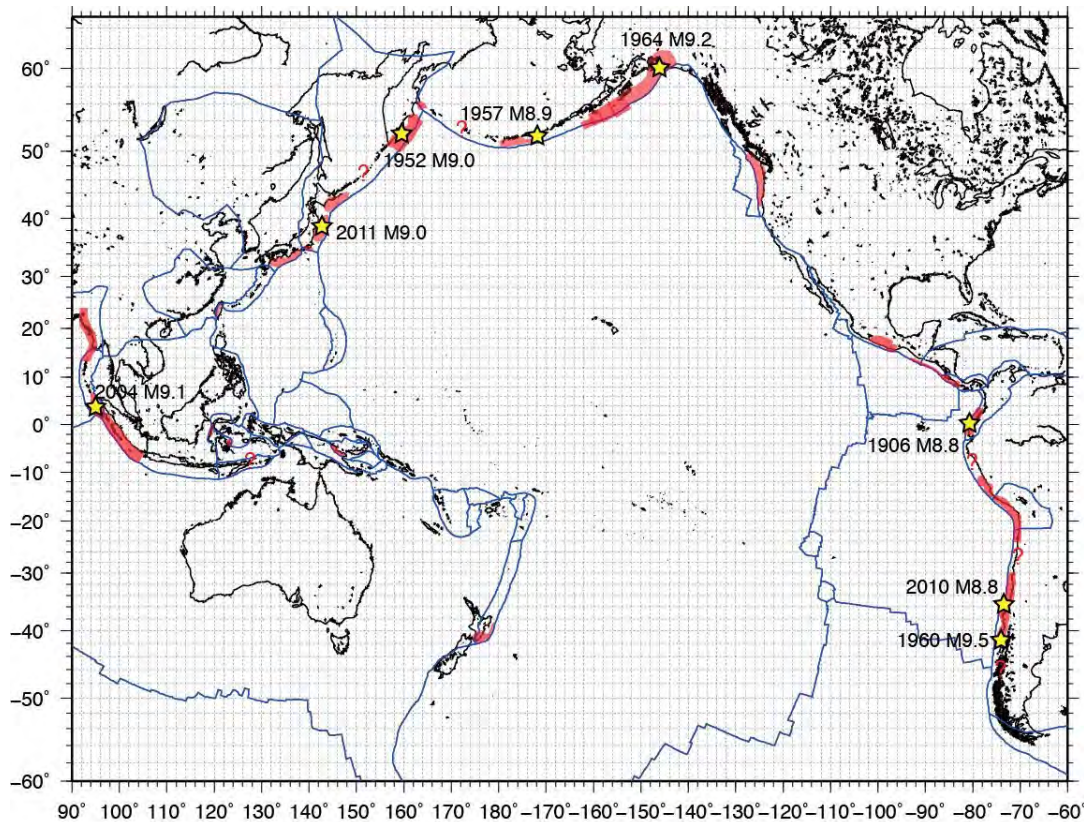
(Loveless and Meade (2015)に加筆)

想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(固着の程度とすべり))



西村(2013)は、固着の程度とすべりについて以下の見解を示している。
 「大きなすべりが生じた領域は、固着の程度が大きい領域に対応している。」

- 固着が強いプレート境界と20世紀以降の巨大地震の発生域の関係を整理し、M9クラスの巨大地震は全てカップリング係数が中程度以上の特定の領域で発生しているとしている。



- : すべり欠損速度が2cm / 年以上と推定されている領域
- : 1900 年以降のM8.8 以上の超巨大地震の震央
- : カップリングしていると疑われるが、文献が調査できなかった地域
- : プレート境界位置

【カップリング係数が大きい(1に近い)地域】

- 北米カスケード, チリ, スマトラ, 西南日本(南海トラフ)

【カップリング係数が中程度の地域】

- カムチャッカ, アリューシャン, アラスカ, メキシコ, 中米, コロンビア, ペルー, 東北日本(日本海溝, 千島海溝)

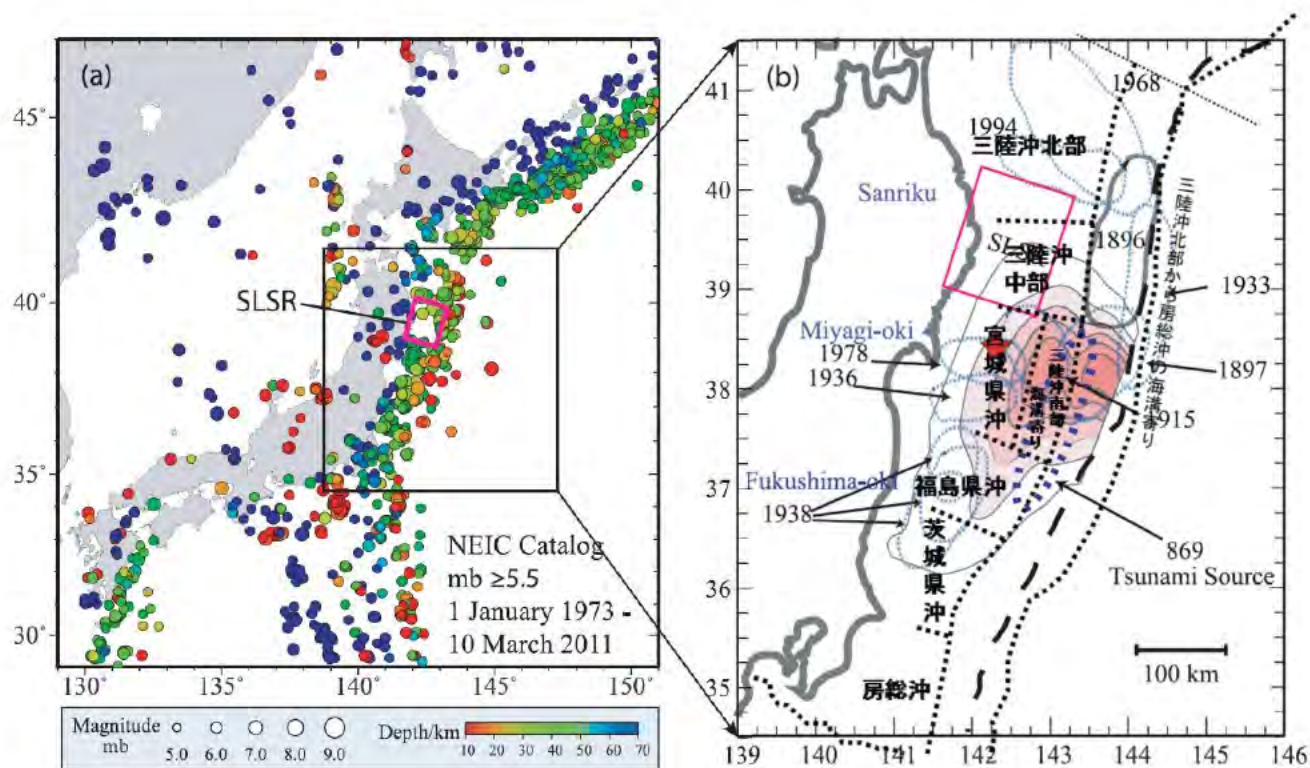
【カップリング係数が小さい地域】

- ニュージーランド, トンガ, 伊豆・小笠原, マリアナ, 琉球, フィリピン等

環太平洋とその周辺における測地データから推定されたプレート間カップリング分布 (西村(2013))

地震調査研究推進本部(2012)及びYe et al.(2012)は、固着の程度と破壊領域について以下の見解を示している。
 「固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 地震調査研究推進本部(2012)は、三陸沖中部については、(中略)カップリング率は他の領域に比べると低いと考えられているとしている。
- Ye et al.(2012)は、三陸沖中部のプレート境界深部には、非地震性のすべりにより歪みが解放される低地震活動領域(SLSR(Sanriku-Oki low-seismicity region))が存在し、2011年東北地方太平洋沖地震の大きなすべりの北限とSLSRが対応するとしている。



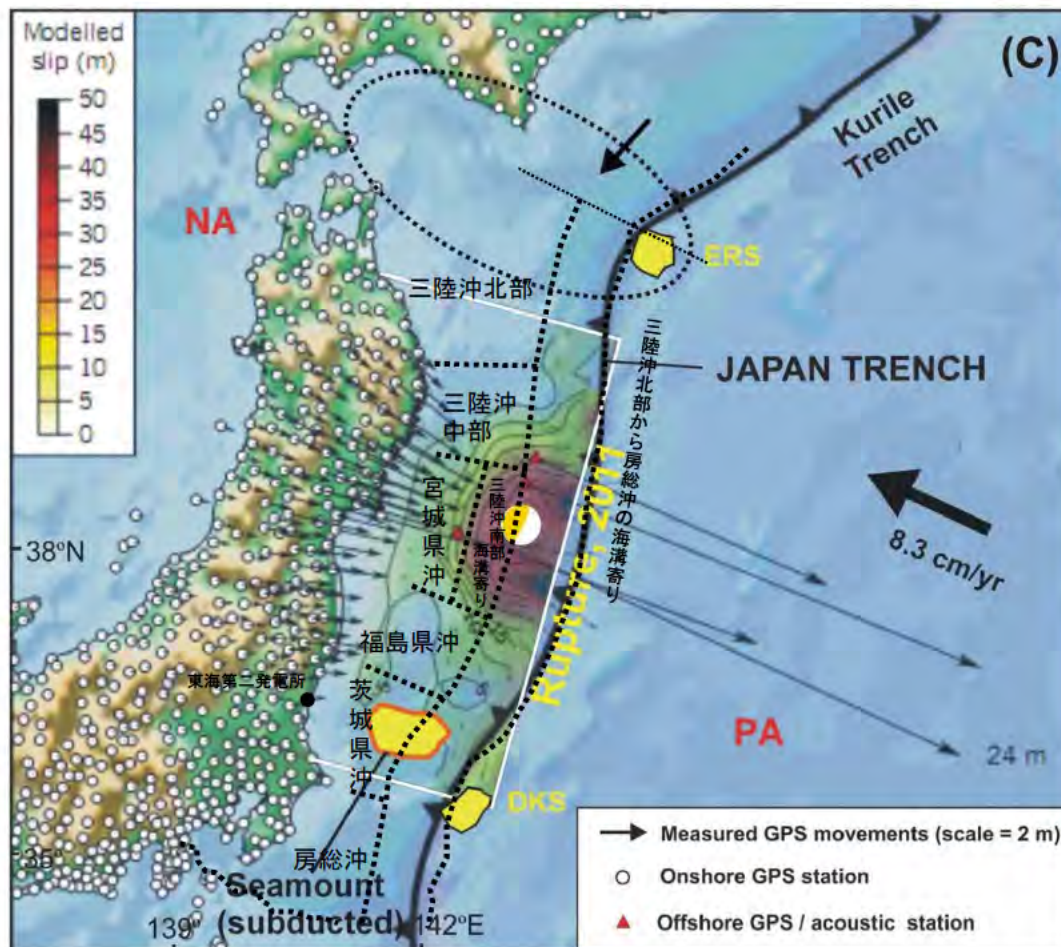
左: 米国立地震情報センター(NEIC)による1973年から2011年東北地方太平洋沖地震以前のM5.5以上の地震の震源分布
 右: SLSRの位置(赤線), 主な既往地震の震源域(水色線), 1896年明治三陸沖地震の波源域(灰色線), 及び東北地方太平洋沖地震のすべり量分布のコンター
 三陸沖中部における低地震活動領域(SLSR)と地震の分布の関係

(Ye et al.(2012)に加筆)

Kundu et al.(2012)は、固着の程度と破壊領域について以下の見解を示している。

「固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 2011年東北地方太平洋沖地震の大きなすべり領域(high slip patch)の南限では、沈み込む海山がプレート間のカップリングを弱め、2011年東北地方太平洋沖地震の破壊のバリアとして作用したとしている。



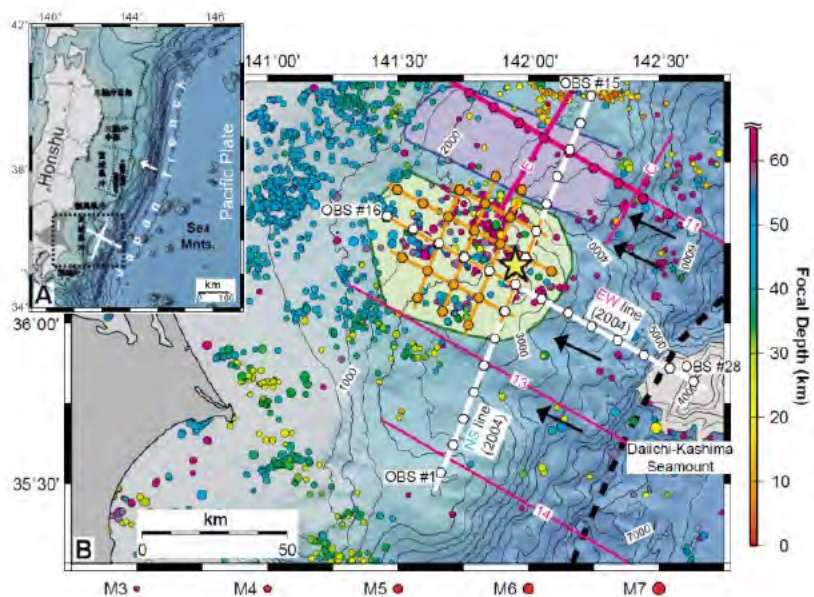
2011年東北地方太平洋沖地震の破壊領域(矩形), 陸上及び海域のGPSより推定したすべり量分布(コンター)及び海山の配置(黄色)
(Kundu et al.(2012)に加筆)

想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(固着の程度と破壊領域))

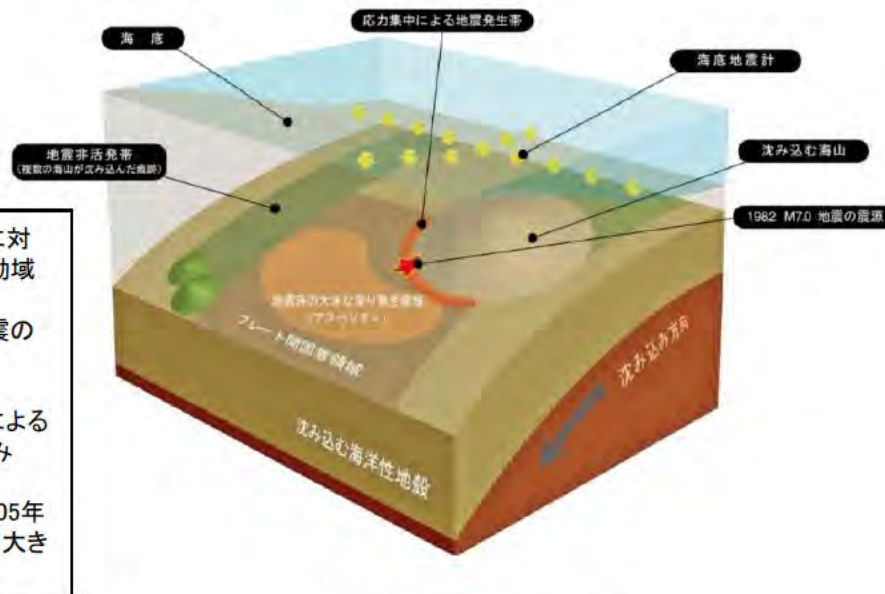
Mochizuki et al. (2008), 望月(2011)及び Nakatani et al.(2015)は、固着の程度と破壊領域について以下の見解を示している。

「固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- Mochizuki et al. (2008)及び望月(2011)は、以下の見解を示している。
 - ✓ 海山上のプレート境界はこれまで予測されていた性質とは異なり、固着強度が弱い。すなわち海山自身はアスペリティにはならない。
 - ✓ 茨城県沖北端付近の複数の海山が沈み込んだ領域ではプレート境界面上に海溝軸から堆積物が沈み込んでいることが確認されており、このことがプレート境界における固着を弱くしている(したがって地震が発生しない)。この非活発帯は海山の沈み込みによってプレート境界に接する下部地殻が削り取られ、そこに堆積物がたまっているために地震活動が非活発になっている。過去に海山の通った痕跡がアスペリティの境界になっている可能性がある。
 - ✓ 南側の沈み込む海山上のプレート境界では地震が発生しておらず、海山の麓周辺でM7程度の地震が集中的に発生している。この海山の沈み込みに伴って上盤側底部が破壊されることによって歪エネルギーを蓄えることができないために地震活動が非活発である可能性が考えられる。
- Nakatani et al.(2015) は、稠密海底地震計観測に基づき、北から伝播した東北地方太平洋沖地震本震の破壊は茨城沖海域を手前に停止したとしている。



複数の海山が沈み込んだ領域と地形及び地震活動の関係 (Mochizuki et al. (2008)に加筆)



周辺海域の構造の模式図 (望月(2011))

想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(破壊領域))

文部科学省測地学分科会(2013)は、破壊領域について以下の見解を示している。
 「沈み込む海山及びプレート境界が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 2011年東北地方太平洋沖地震の余震については、大きなすべりの領域は震源から南東方向に約20kmの浅い領域に位置しており、この領域は沈み込むフィリピン海プレートの北東限と沈み込む海山に囲まれた場所に位置するため、この地震の破壊の伝播の伝達がフィリピン海プレートと海山によって止められたように見え、大地震の発生場所と規模(震源域の広がり)を海底地形やプレート構造などの地学的要因と関係する可能性があることが分かったとしている。

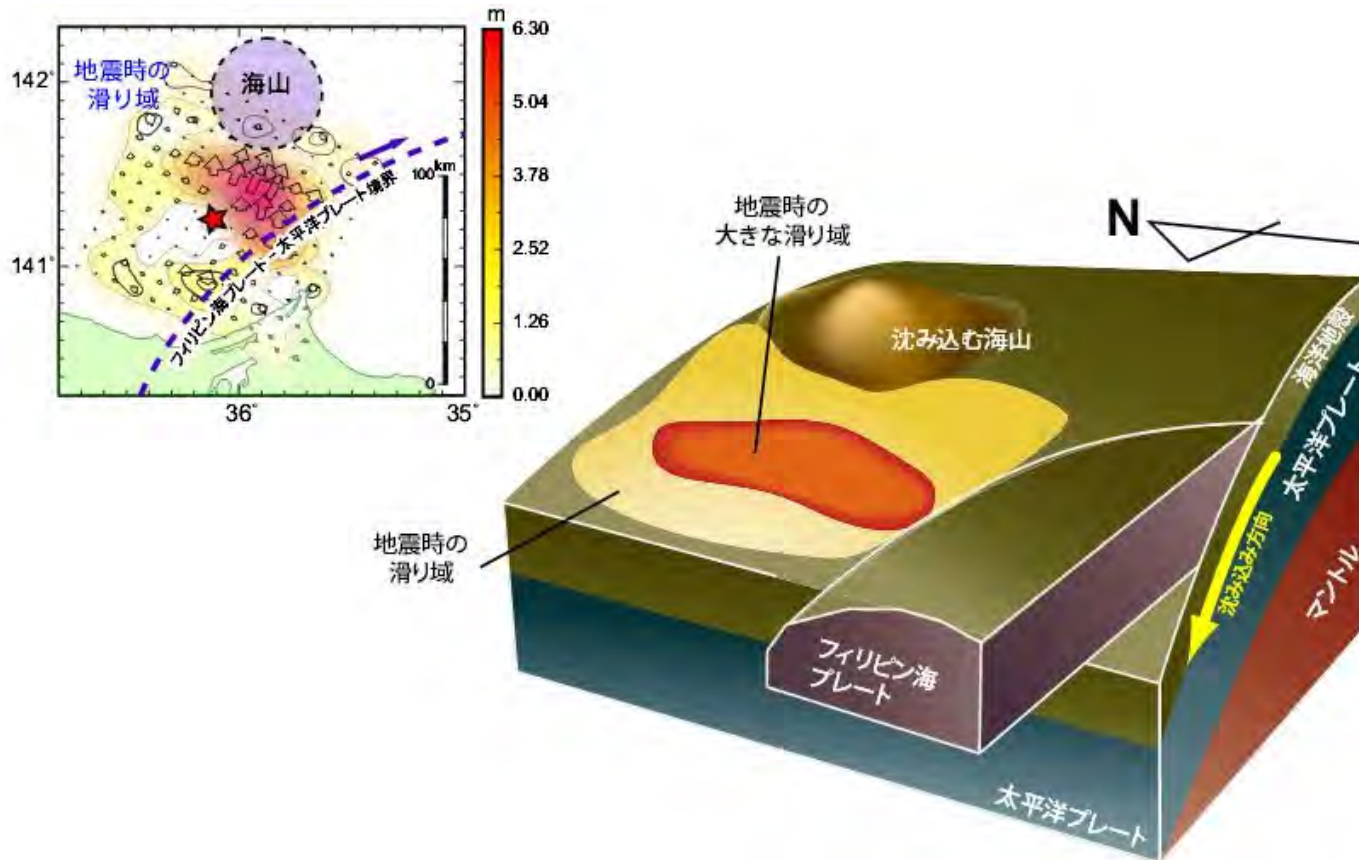


図12 (茨城県沖地震) 2011年茨城県沖の地震(M7.6)震源域の模式図。右上図は、近地強震波形とGNSSデータ解析から求められた断層面上における滑り分布。大きな滑り域が太平洋プレート/フィリピン海プレート境界(青点線)と太平洋プレートとともに沈み込む海山(紫点線)に挟まれた位置にあり、これらの構造の境界が滑りを止めた可能性が考えられる。

(文部科学省測地学分科会(2013))

想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(固着の程度と破壊領域))

Wang and Bilek (2014)は、固着の程度と破壊領域について以下の見解を示している。

「固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 機器観測された全ての巨大地震は、滑らかな地形が沈み込む海域で発生している。起伏の激しい地形を伴うプレート境界はクリープしており、超巨大地震を発生しない。
- 沈み込む海山は、起伏の激しい地形の典型例である。海山が沈み込む領域では中小規模の地震を伴うが、大地震を発生する証拠は得られていない。2011年東北地方太平洋沖地震の破壊の南側での停止は、フィリピン海プレートが下盤となる位置ではなく、海山が沈み込む領域で生じた。

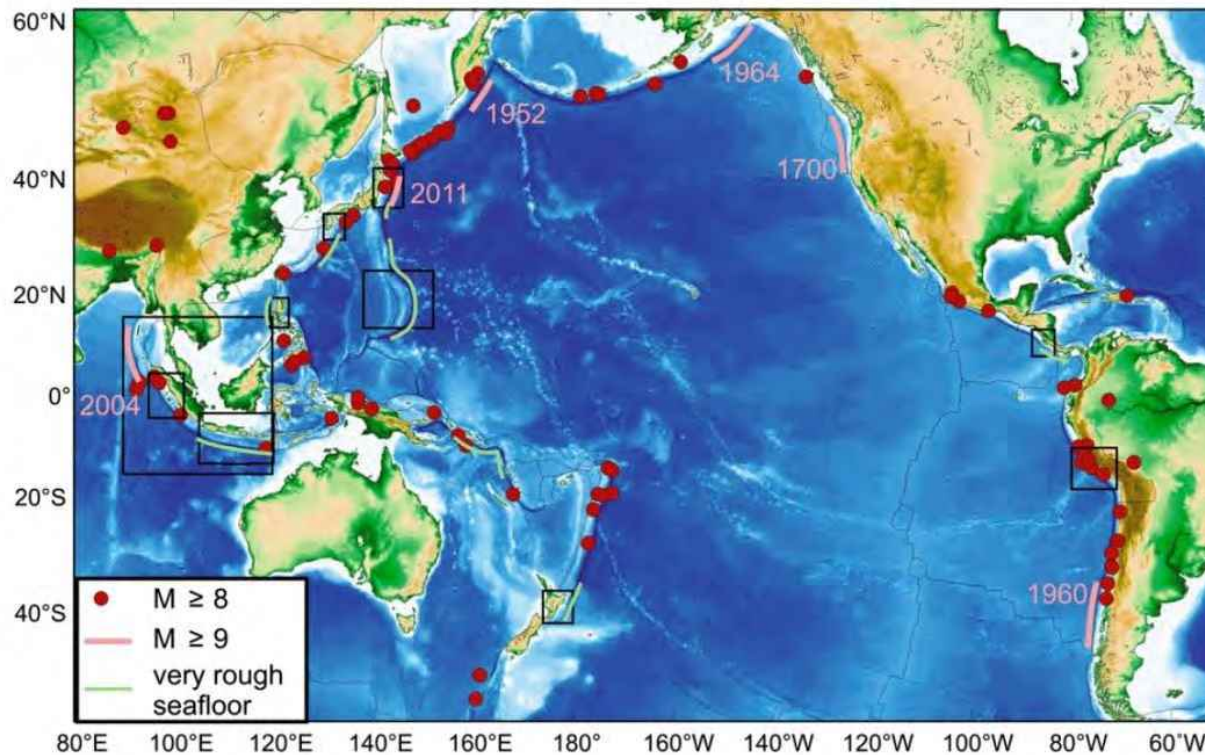


Fig. 1. World map showing general lack of correlation between rugged subducting seafloor and great megathrust earthquakes and showing locations of map areas of Fig. 2 through 10 and 14. Rupture extents of giant ($M_w \geq 9$) events are indicated with pink lines. Epicentre locations of other great ($M_w \geq 8$) events are from the USGS/NOAA catalogue for the time period of 1903-2012.

起伏の激しい海底と巨大地震の発生位置の分布

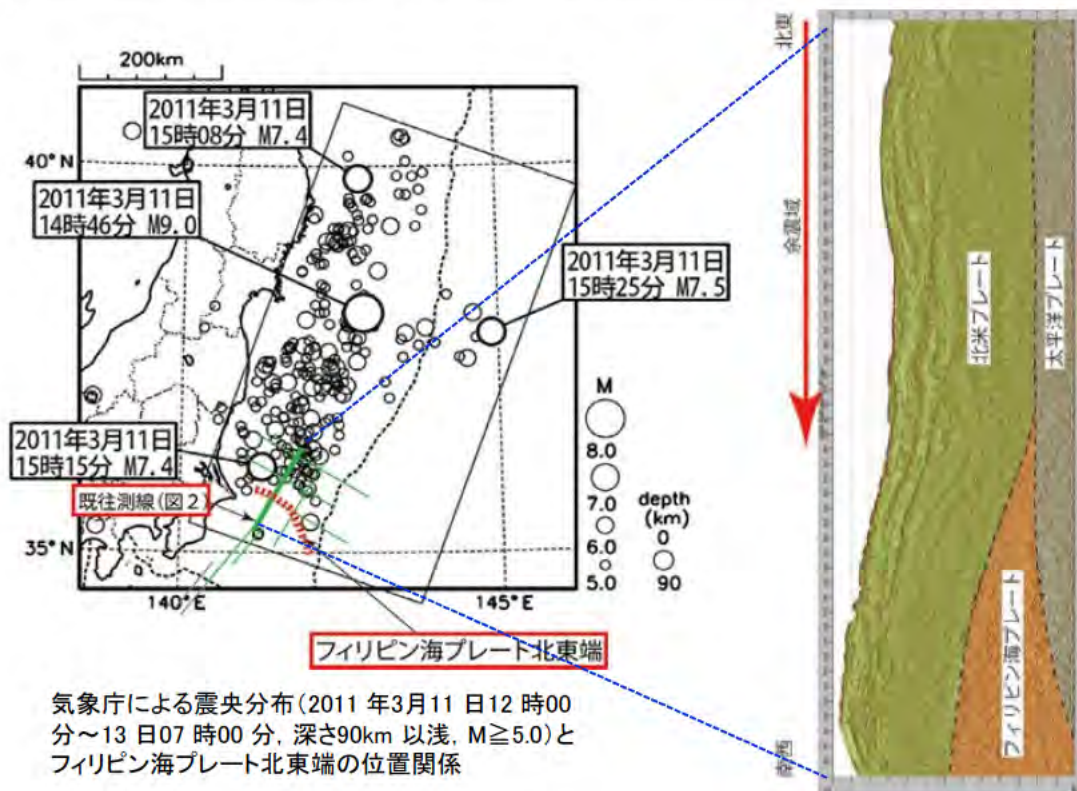
(Wang and Bilek (2014))

想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(破壊領域))

海洋研究開発機構(2012) 及びShinohara et al.(2011)は、破壊領域について以下の見解を示している。

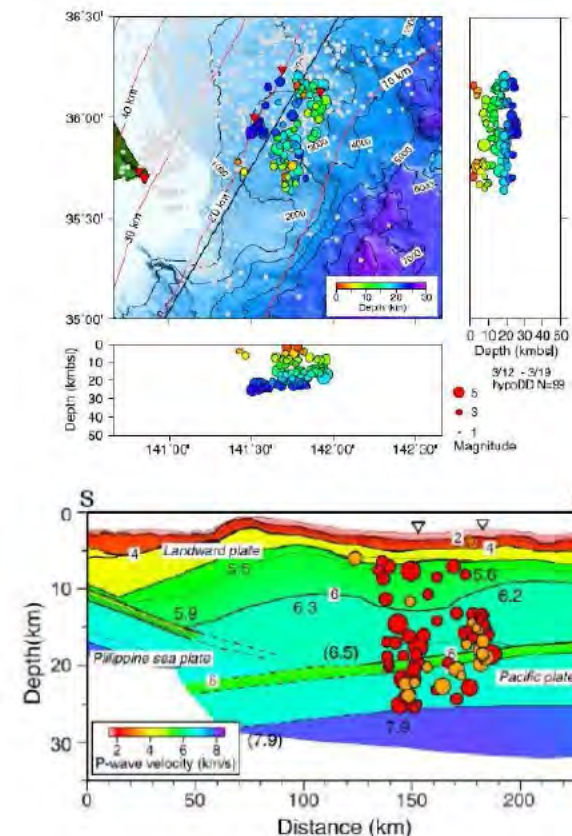
「プレート境界が破壊伝播のバリアとなっている。」

- 海洋研究開発機構(2012)は、2011年東北地方太平洋沖地震の余震分布はフィリピン海プレート北東端をほぼ南限としており、沈み込む太平洋プレートの上ののるプレートが、北米プレートからフィリピン海プレートに変わる領域において、破壊の南への伝播が止められたとしている。
- Shinohara et al.(2011)は、2011年東北地方太平洋沖地震の余震分布に関する分析から、フィリピン海プレート北東端の位置と破壊域が一致していることを明らかにするとともに、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としている。



気象庁による震央分布(2011年3月11日12時00分~13日07時00分、深さ90km以浅、 $M \geq 5.0$)とフィリピン海プレート北東端の位置関係

(海洋研究開発機構(2012)に加筆)



縦断面図

2011年東北地方太平洋沖地震の余震分布(3月12日-19日)とプレート境界面の位置関係

(Shinohara et al.(2011))

反射法地震探査に基づく解釈図
房総沖では、銚子付近から南東方向に向って、フィリピン海プレート北東端が太平洋プレートと接している

Hasegawa et al.(2012)は、地震のメカニズムについて以下の見解を示している。

「地震前後で、プレート境界上盤側の応力状態が圧縮状態から引張状態へ変化したことから、三陸沖中部～福島沖に蓄積されていた歪みはほぼ完全に解消された。」

- 2011年東北地方太平洋沖地震の発生前後で、応力状態が変化していることにより、三陸沖中部～福島沖に蓄積されていた歪みはほぼ完全に解消されたと考えられるとしている。

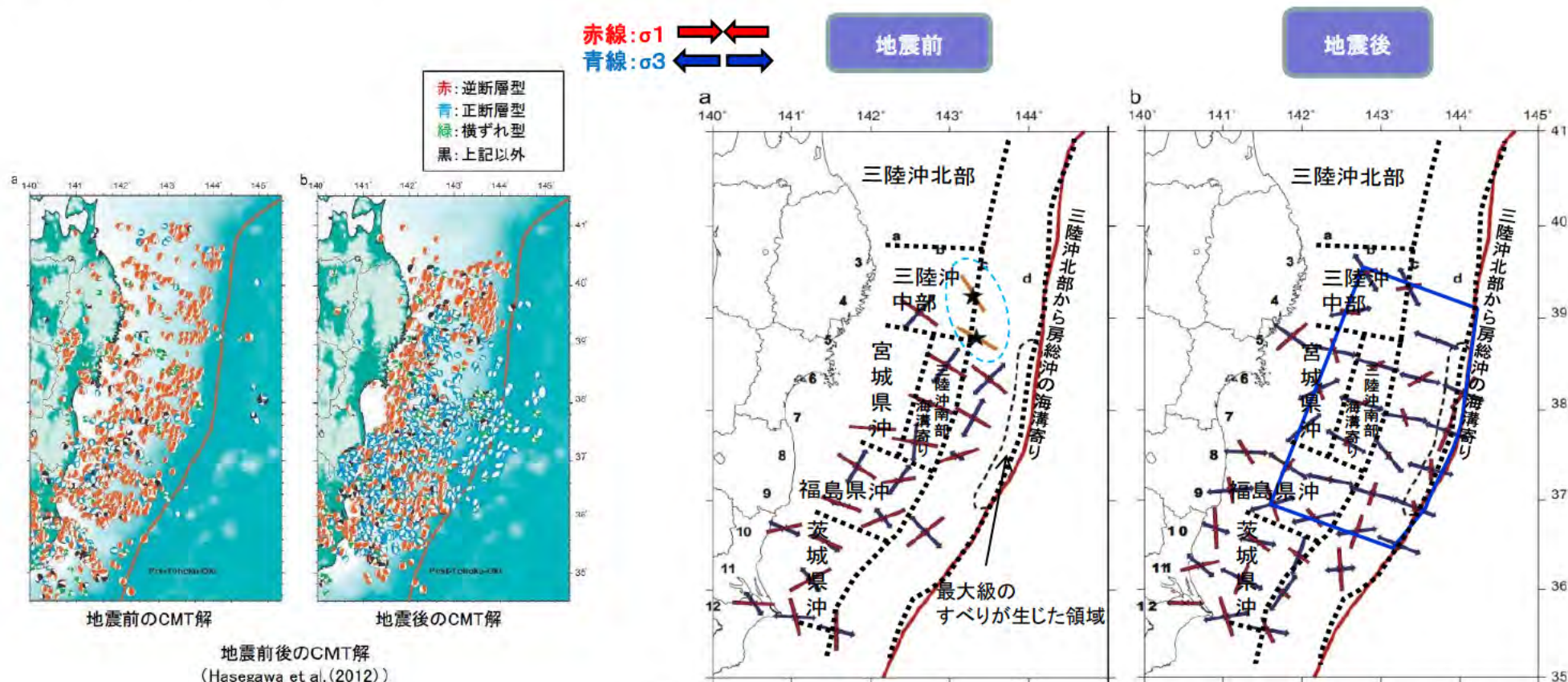


Fig. 6. Orientations of the best-fit σ_1 and σ_3 axes obtained by stress tensor inversions of upper plate events before (a) and after (b) the Tohoku Oki earthquake. The σ_1 and σ_3 axes are indicated by red and blue arrows, respectively, at each grid node. The lengths of arrows correspond to the plunge of the principal stress axes. Orange bars with stars in (a) show the orientations of the maximum horizontal principal stress axis estimated from borehole breakout at two sites on ODP Leg 186 (Lin et al., 2011). The area of the estimated largest slip is enclosed by a dashed line near the trench axis.

(Hasegawa et al. (2012)に加筆)

想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(巨大地震の発生))

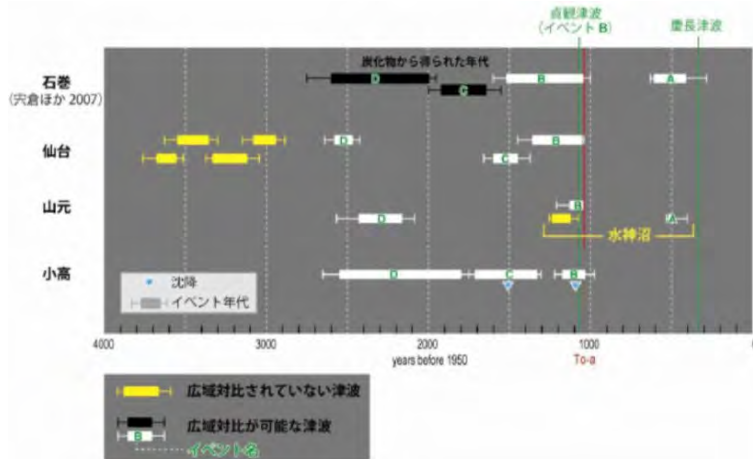
菅原他(2013)及び地震調査研究推進本部(2012)は、巨大地震の発生について以下の見解を示している。
 「過去に同規模の巨大地震が数百年間隔で発生している。」

- 菅原他(2013)に基づけば、貞観869年の津波と2011年東北地方太平洋沖地震の仙台平野における浸水域や津波堆積物の到達限界は殆ど重なる。したがって、過去にも同じ海域で東北地方太平洋沖型の地震と同規模の地震が発生していたと推測される。
- 地震調査研究推進本部(2012)は、東北地方太平洋沖型の地震の特徴のひとつである広い浸水をもたらす津波は、過去2500年間で5回発生していたと確認され、これらの津波をもたらした地震が繰り返し発生したとするとその発生間隔は400年～800年程度で平均発生間隔は600年程度であるとしている。

表2 三陸沖～房総沖で発生した主な地震のマグニチュード等

地震発生領域	地震発生年月日	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	-

(地震調査研究推進本部(2012))



(A) 西暦1500年頃のイベント, (B) 869年の津波
 (C) 西暦430年頃のイベント, (D) 紀元前390年頃のイベント

石巻市, 仙台市, 山元町, 相馬市で見られた津波堆積物の地域間対比
 (文部科学省 研究開発局他(2010)に加筆)

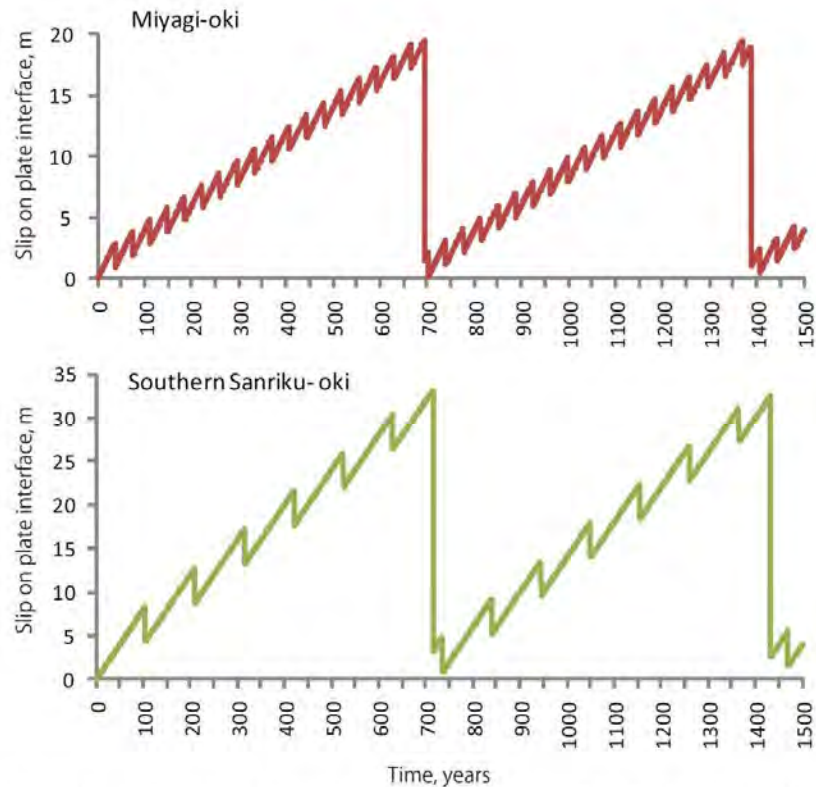


仙台平野における869年の津波と2011年東北地方太平洋沖地震津波の浸水域の比較
 (菅原他(2013))

想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(巨大地震の発生))

佐竹(2011)は、巨大地震の発生について以下の見解を示している。
 「巨大地震が数百年間隔で発生している。」

- 頻度の高い中規模地震と数百年に一度の大規模地震の組合せで、プレートの沈み込みに伴う歪みの解放を説明できるモデルを提示しており、すべり残しが2011年型の地震ですべて解放されると仮定すると、そのサイクル(スーパーサイクル)は約700年となるとしている。



第3図 宮城沖(上)と三陸沖南部(下)における地震発生サイクルのモデル。第2図のすべり残しが2011年型の地震ですべて解放されると仮定すると、そのサイクル(スーパーサイクル)は約700年となる。横軸は時間(年)、縦軸はプレート境界におけるすべり(m)を示す。

第1表 日本海溝沿いの各領域における固有地震と2011年型地震のすべり量と発生間隔
 Table 1. Size and recurrence intervals of characteristic and 2011-type earthquakes along Japan Trench

地震調査委員会の領域	固有地震の発生間隔	固有地震のすべり量	すべり残し速度	2011年のすべり量	2011年型の発生間隔
Regions	Characteristic interval, R (year)	Characteristic coseismic slip, d (m)	Slip Deficit, S=8 - d/R (cm/yr)	2011 slip, D(m)	Supercycle interval, D/S (year)
宮城沖	37	2	2.6	17	660
Miyagi-oki					
三陸沖南部海溝寄り	105	4	4.2	30	720
Southern Sanriku					
津波地震	530	6	6.9	45	660
Tsunami earthquakes					

(佐竹(2011)に加筆)

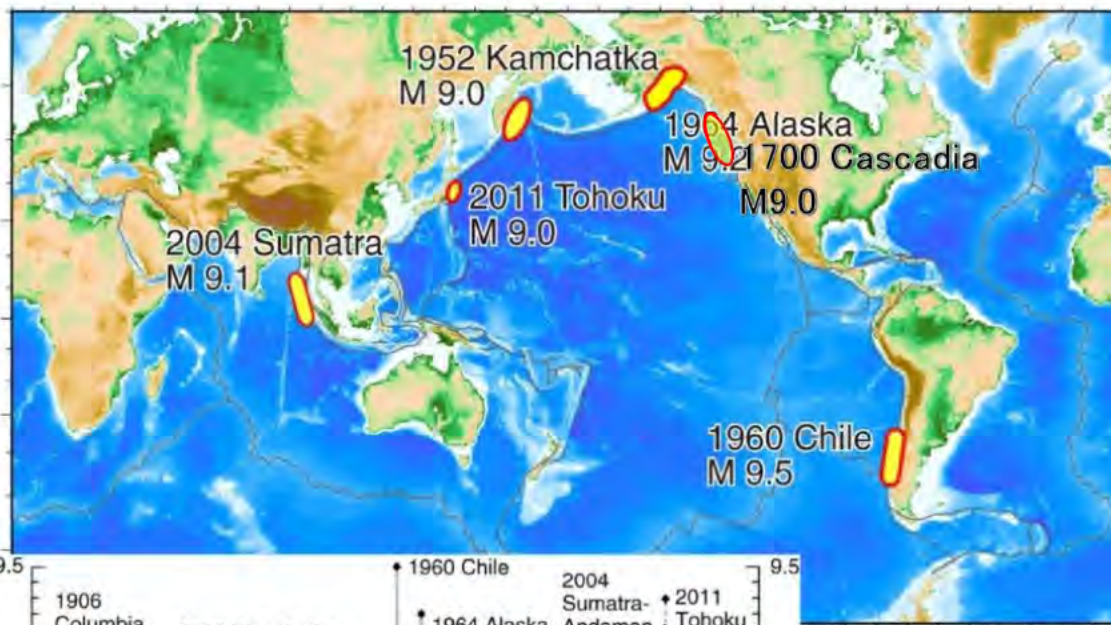
想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(巨大地震の発生))

他機関の文献※1~※6に基づけば、巨大地震の発生について以下の傾向が見られる。

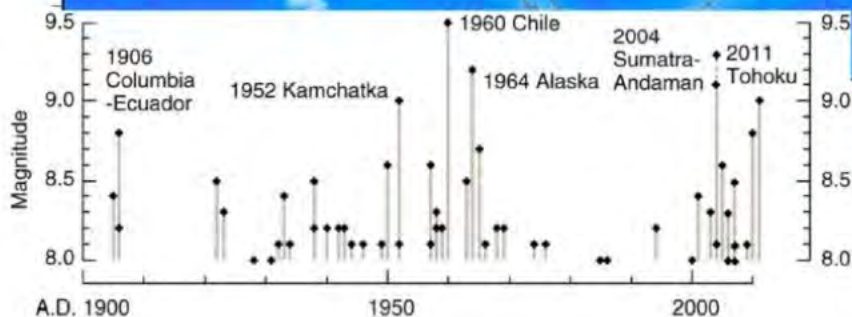
「過去に同規模の巨大地震が数百年間隔で発生している。」

- プレート間で発生するM9クラスの巨大地震については、数百年間隔で繰返し発生している。

	日本海溝沿いの巨大地震 (2011年)	カスケード沈み込み帯の巨大地震 (1700年)	カムチャッカ沖の巨大地震 (1952年)	チリ沖の巨大地震 (1960年)	アラスカ沖の巨大地震 (1964年)	スマトラ沖の巨大地震 (2004年)
M9クラスの巨大地震の平均発生間隔	約600年 (※1)	平均約500年(全域の破壊) (※2)	平均100~400年 (※3)	平均約300年 (※4)	平均約600年 (※5)	平均400~500年 (※6)



- ※1. 地震調査研究推進本部(2012)
- ※2. 佐竹(2013)
- ※3. 谷岡(2013)
- ※4. 宍倉(2013)
- ※5. Shennan et al.(2007)
- ※6. Rajendran(2013)



Updated Satake and Atwater (2007, Ann. Rev. Earth Planet. Sci.)

(Satake(2012)に加筆)

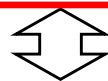
想定津波の設定に反映する知見の分析(特徴と関連する知見(巨大地震の発生))

当社の検討結果に基づけば、巨大地震の発生について以下の傾向が見られる。

「巨大地震が数百年間隔で発生している。」

- 他機関の文献で得られた知見に基づくM9クラスの巨大地震の平均発生間隔, プレート相対運動速度及びカップリング係数で概算したすべり量と地震時すべり量には調和的な関係がある。

	カスケード沈み込み帯の 巨大地震※ (1700年)	カムチャッカ沖の巨大地震※ (1952年)	チリ沖の 巨大地震※ (1960年)	アラスカ沖の 巨大地震※ (1964年)	スマトラ沖の 巨大地震※ (2004年)
マグニチュード(M)	9.0	9.0	9.5	9.2	9.1
M9クラスの巨大地震の平均 発生間隔①	平均約500年 (全域の破壊)	平均100~400年	平均約300年	平均約600年	平均400~500年
プレート相対運動速度②	3.2~3.8cm/年	6.9~8.4cm/年	6.3~7.5cm/年	2.2~5.2cm/年	1.6~4.4cm/年
カップリング係数③	1.0	0.5	1.0	0.6	0.5~1.0
概算のすべり量(A) (①, ②, ③より算出)	500年間で16~19m	100年間で3.5~4.2m 400年間で14~17m	385年間で24~29m 128年間で8~10m	600年間で8~19m 1000年間で13~31m	500年間で4~22m



地震時すべり量(a)	最大19m 平均14m	最大11.4m 平均3.2m	最大25~30m 平均11m	最大22m 平均8.6m	最大23m 平均8.6m
------------	----------------	-------------------	-------------------	-----------------	-----------------

想定津波の設定に反映する知見の分析(まとめ)

日本海溝沿いの領域に対して、検討波源モデルの設定及び波源特性の不確かさの考慮の検討の基礎とするため、文献調査を実施した。その結果、以下の結論が得られた。

2011年東北地方太平洋沖地震の特徴

(破壊領域)

- 複数の領域が連動して破壊した。
- 余震を含む破壊領域の南限は、北米プレートとフィリピン海プレートの境界に位置している。

(すべり)

- すべりには不均質性が認められ、大きなすべりが生じた領域は三陸沖中部の南部、宮城県沖、三陸沖南部海溝寄り、福島県沖の4領域及びその沖合の海溝軸付近の領域である。

(地震の発生メカニズム)

- 地震の前後でプレート境界上盤側で発生する地震のメカニズムは大きく変化した。

2011年東北地方太平洋沖地震に関連する知見

- 固着の程度が小さい領域が破壊伝播のバリアとなっている。
- 北米プレートとフィリピン海プレートの境界が余震を含む破壊伝播のバリアとして作用している。
- 大きなすべりが生じた領域は、固着の程度が大きい領域に対応している。
- 海溝軸付近では大きなすべりを生じた(オーバーシュートが生じた)領域が見られ、遠洋性粘土層が連続的に分布している領域に対応している。
- 地震前後で、応力状態が圧縮状態から引張状態へ変化したことから、三陸沖中部～福島県沖に蓄積されていた巨大地震を引き起こす歪みはほぼ完全に解消された。
- 津波堆積物調査結果等から、過去に同規模の巨大地震が数百年間隔で発生している。

想定津波の設定方針

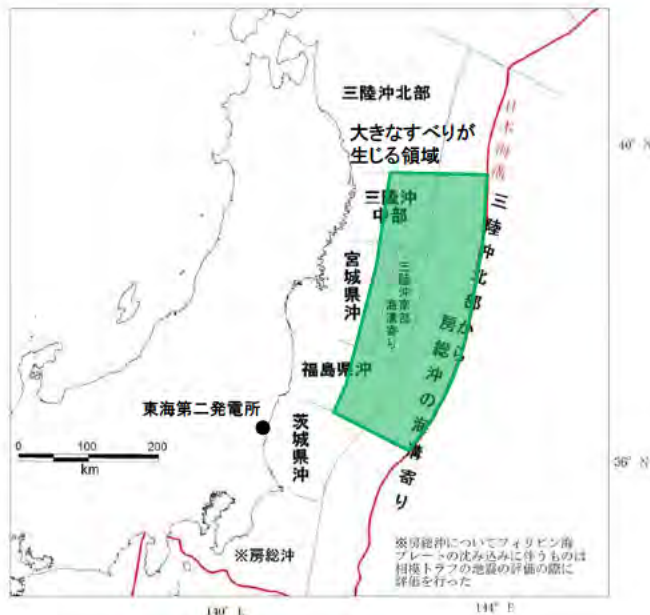
- I.
 - ✓ 日本海溝沿いで生じた地震津波のうち、2011年東北地方太平洋沖地震は敷地に比較的大きな影響を及ぼしたことを踏まえ、東北地方太平洋沖型の津波波源を設定する。
 - ✓ 東北地方太平洋沖型の津波波源で大きなすべりが生じる領域は、三陸沖中部から福島県沖及びその沖合の海溝軸付近の領域とする。
- II.
 - ✓ 日本海溝沿いで生じた地震津波のうち、1677年延宝房総沖地震は敷地に比較的大きな影響を及ぼしたことを踏まえ、茨城県沖に想定する津波波源を設定する。
 - ✓ 茨城県沖に想定する津波波源については、2011年東北地方太平洋沖地震で大きなすべりが生じていない領域とする。なお、領域の南限については、北米プレートとフィリピン海プレートの境界とする。
- III. 2011年東北地方太平洋沖地震で応力を解放した領域では、東北地方太平洋沖型の地震津波の発生確率は極めて小さい。

想定波源領域の設定(まとめ)

想定津波の設定方針

- I.
 - ✓ 日本海溝沿いで生じた地震津波のうち、2011年東北地方太平洋沖地震は敷地に比較的大きな影響を及ぼしたことを踏まえ、東北地方太平洋沖型の津波波源を設定する。
 - ✓ 東北地方太平洋沖型の津波波源で大きなすべりが生じる領域は、三陸沖中部から福島県沖及びその沖合の海溝軸付近の領域とする。
- II.
 - ✓ 日本海溝沿いで生じた地震津波のうち、1677年延宝房総沖地震は敷地に比較的大きな影響を及ぼしたことを踏まえ、茨城県沖に想定する津波波源を設定する。
 - ✓ 茨城県沖に想定する津波波源については、2011年東北地方太平洋沖地震で大きなすべりが生じていない領域とする。なお、領域の南限については、北米プレートとフィリピン海プレートの境界とする。
- III. 2011年東北地方太平洋沖地震で応力を解放した領域では、東北地方太平洋沖型の地震津波の発生確率は極めて小さい。

【東北地方太平洋沖型の津波波源】

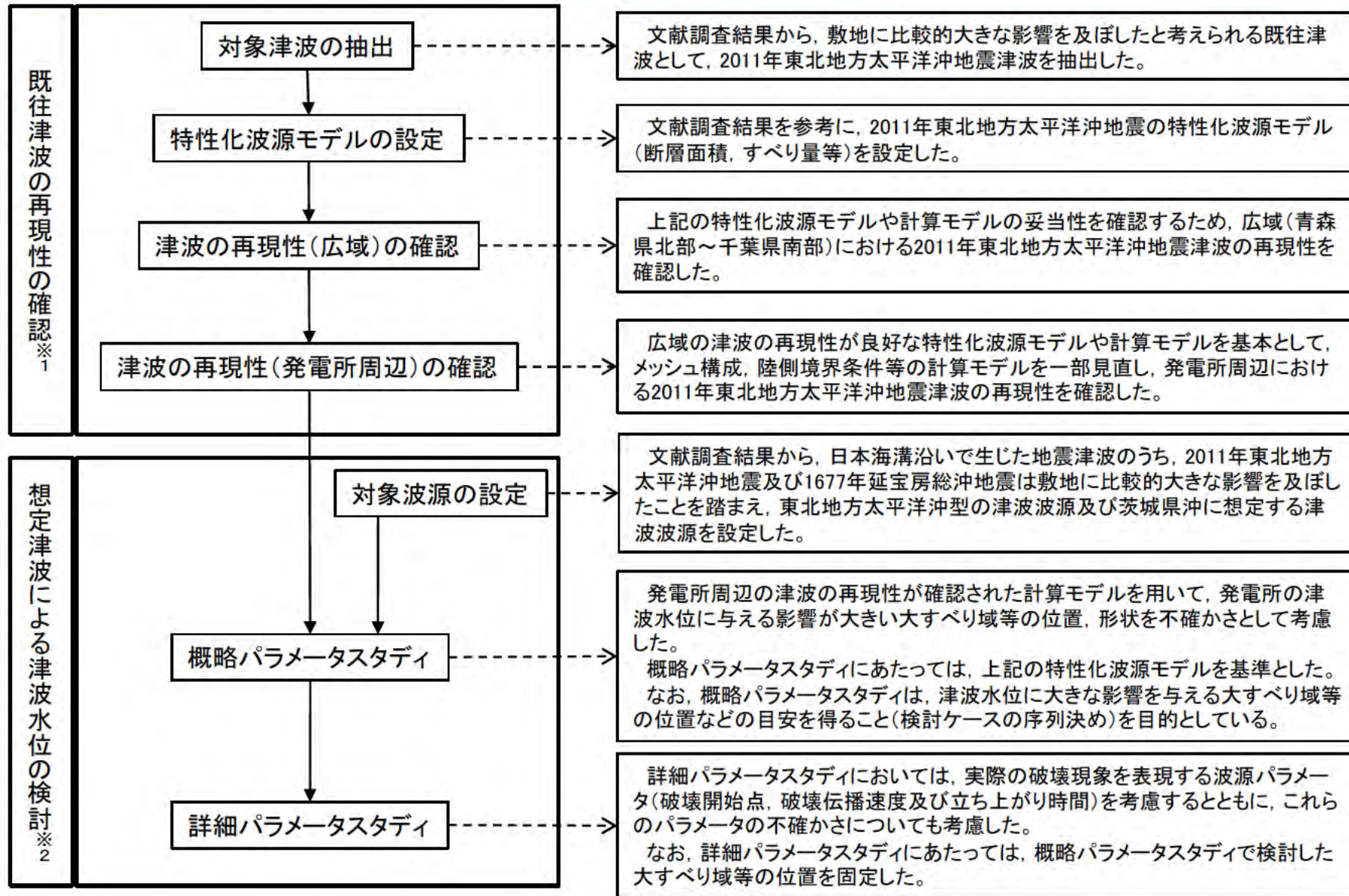


【茨城県沖に想定する津波波源】



(地震調査研究推進本部(2012)に加筆)

津波評価(検討フロー)



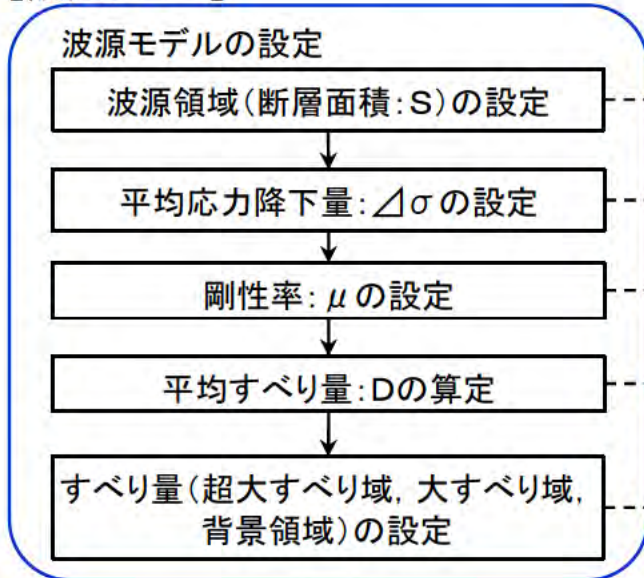
※1: 再現解析の津波水位 = 潮位 + 水位変動量 + 2011年東北地方太平洋沖地震による地殻変動量 (当該地震前の陸上地形で計算(発電所の防潮堤なし))

※2: 津波予測解析の津波水位 = 潮位 + 水位変動量 + 2011年東北地方太平洋沖地震による地殻変動量 + 津波予測解析による地殻変動量 (当該地震後の陸上地形で計算(発電所で防潮堤考慮))

想定波源領域の設定(広域の再現解析: 特性化波源モデル)

- 文献調査の結果から敷地に比較的大きな影響を及ぼしたと考えられる既往津波として、2011年東北地方太平洋沖地震津波を抽出した。
- 2011年東北地方太平洋沖地震の波源モデルについては、破壊伝播を考慮した特性化波源モデルとした。
- 破壊開始点は震源位置、破壊伝播速度は3.0km/s、立ち上がり時間は30秒とした。

【設定フロー】



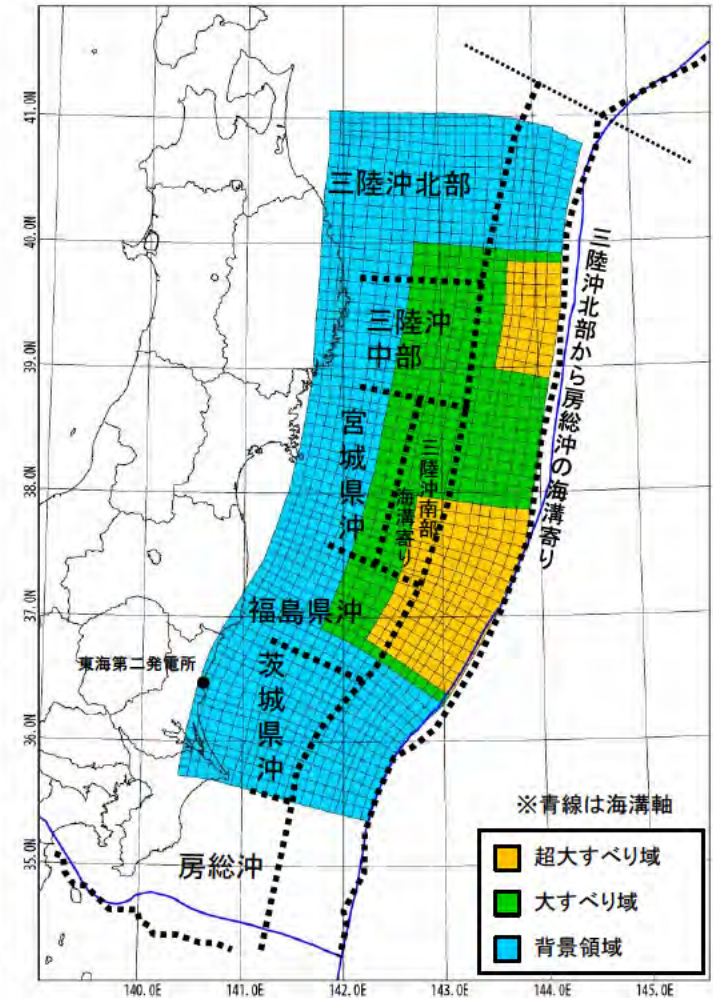
【設定根拠】



パラメータ	設定値
断層面積: S	134,733 km ²
平均応力降下量: $\Delta\sigma$	3.0 MPa
剛性率: μ	4.7×10^{10} N/m ²
モーメントマグニチュード: Mw	9.1
平均すべり量: D	9.6 m
地震モーメント: M_0	6.1×10^{22} Nm

パラメータ		設定値
超大すべり域	すべり量	28.9 m
	面積比率(断層面積)	全体面積の15% (20,010 km ²)※
大すべり域	すべり量	13.5 m
	面積比率(断層面積)	全体面積の25% (33,825 km ²)※
背景領域	すべり量	3.2 m
	面積比率(断層面積)	全体面積の60% (80,898 km ²)※

※ 断層面積は右図の特性化波源モデル値
ただし、超大すべり域、大すべり域の位置により若干変動する



特性化波源モデル(一例)

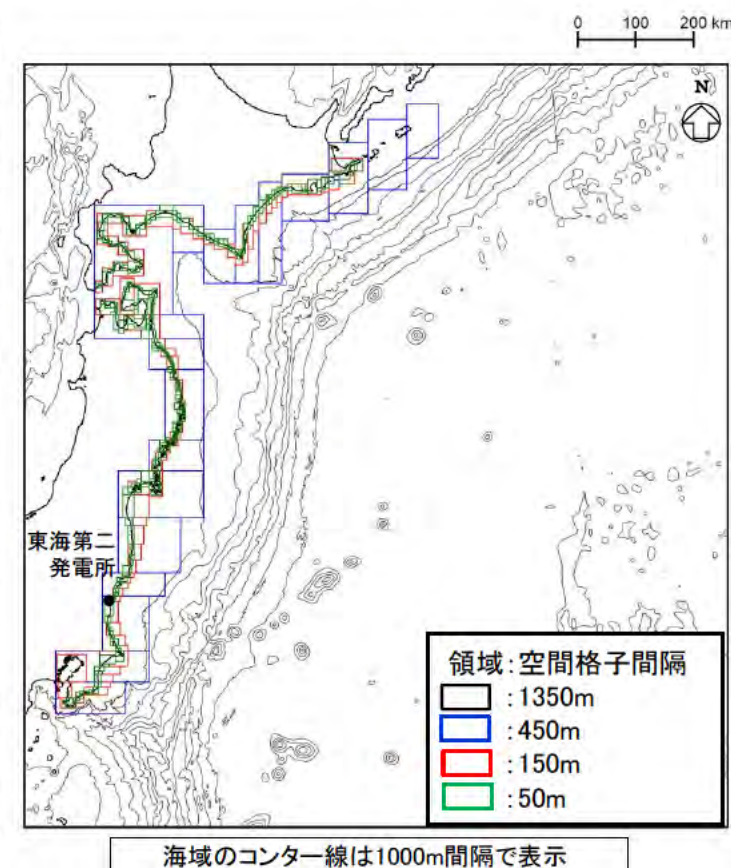
想定波源領域の設定(広域の再現解析:計算条件及び計算領域)

- 波源モデルや津波伝播に関するモデルの設定にあたっては、2011年東北地方太平洋沖地震津波の津波痕跡高さを再現出来るモデルの設定と同じ考えとしている。
- 波源モデルや津波伝播に関するモデルの妥当性を確認するため、広域(最小50mのメッシュサイズ)における2011年東北地方太平洋沖地震の津波痕跡高さの再現性の観点から以下の条件で検討した。

広域の再現解析の計算条件

項目	条件	備考
計算領域	北海道から千葉房総付近までの太平洋 (南北約1,300km, 東西約1,200km)	
メッシュ構成	沖合1,350m→450m→150m→沿岸50m	長谷川他(1987)
基礎方程式	非線形長波理論	後藤・小川(1982)の方法
計算スキーム	スタガード格子, リープ・フロッグ法	後藤・小川(1982)の方法
初期変位量	Mansinha and Smylie(1971)の方法	
境界条件	沖側:後藤・小川(1982)の自由透過の条件 陸側:計算格子間隔50m領域は小谷他 (1998)の陸上遡上境界条件 それ以外は完全反射条件	
越流条件	防波堤:本間公式(1940) 護岸:相田公式(1977)	
海底摩擦係数	マンニングの粗度係数($n=0.03m^{-1/3s}$)	
水平滑動粘性係数	考慮していない($Kh=0$)	
計算時間間隔	$\Delta t=0.5$ 秒	C.F.L条件を満たすように 設定
計算時間	津波発生後240分間	十分な計算時間となるよう に設定
潮位条件	T.P.-0.4m	地震発生時の潮位

津波水位=潮位+水位変動量+2011年東北地方太平洋沖地震による地殻変動量

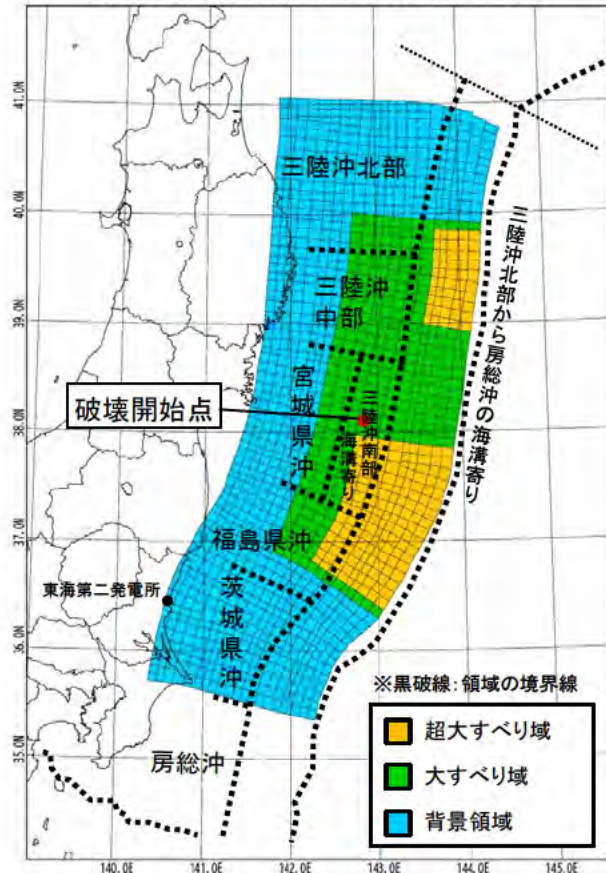


計算領域と格子分割

想定波源領域の設定(広域の再現性の確認結果)

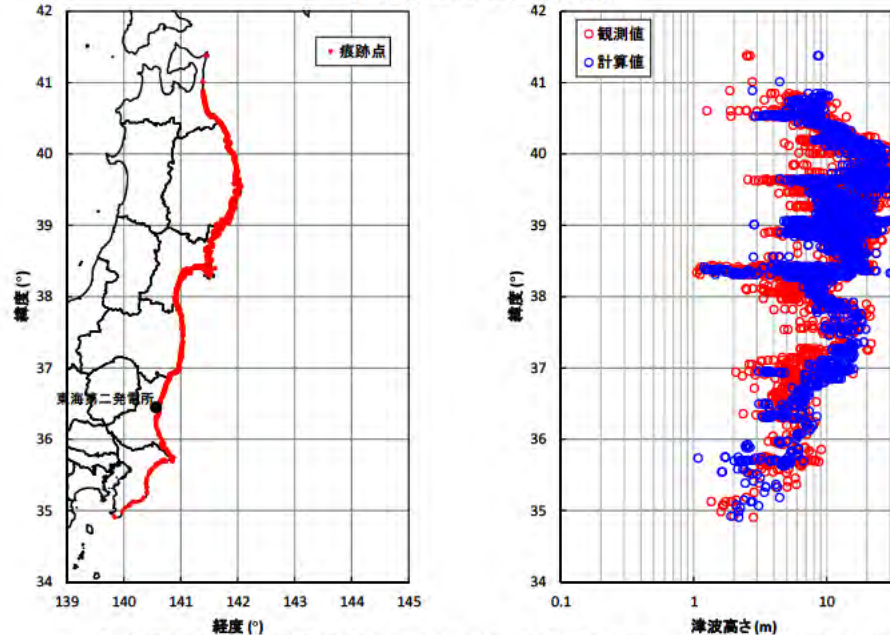
- 設定した波源モデルは、2011年東北地方太平洋沖地震の津波痕跡高(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2012))に対して計算値の方が大きくなっているが(幾何平均 $K=0.94$), 幾何標準偏差($\kappa=1.43$)は土木学会(2016)の再現性の目安値を満足している。
- なお、幾何平均 K は1より小さい(痕跡高に対して計算値の方が大きい)ため保守的である。

【東北地方太平洋沖型の波源モデル】



破壊開始点 : 震源位置
 破壊伝播速度 : 3.0km/s
 立ち上がり時間 : 30秒

【再現性の確認結果】



青森県北部～千葉県南部における2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波の痕跡地点(左図)及び痕跡高(右図)
 (東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2012)のデータを使用)

地点数 n	幾何平均 K	幾何標準偏差 κ
2,772	0.94	1.43

【幾何平均 K 及び幾何標準偏差 κ の再現性の目安】
 $0.95 < K < 1.05$
 $\kappa < 1.45$

(土木学会(2016))

幾何平均 K : 計算による津波高さ(計算値)と津波痕跡高(観測値)の平均的な対応関係を示す。
 幾何標準偏差 κ : 計算値と観測値との対応関係のばらつきを示す。

波源モデルや広域(最小50mのメッシュサイズ)の津波伝播に関するモデルについて、2011年東北地方太平洋沖地震津波の津波痕跡高さを良好に再現出来ることを確認している。

想定波源領域の設定(発電所周辺の再現解析: 計算条件及び計算領域)

- 広域の津波の再現性が良好な波源モデルや津波伝播に関するモデルを基本として、メッシュの大きさ、陸側境界条件等を一部見直し、発電所周辺(最小5mのメッシュサイズ)における2011年東北地方太平洋沖地震の津波痕跡高さの再現性の観点から以下の条件で検討した。
- 津波伝播に関するモデルが既往津波を良好に再現出来るモデルであることを確認し、発電所の津波想定を行っている。

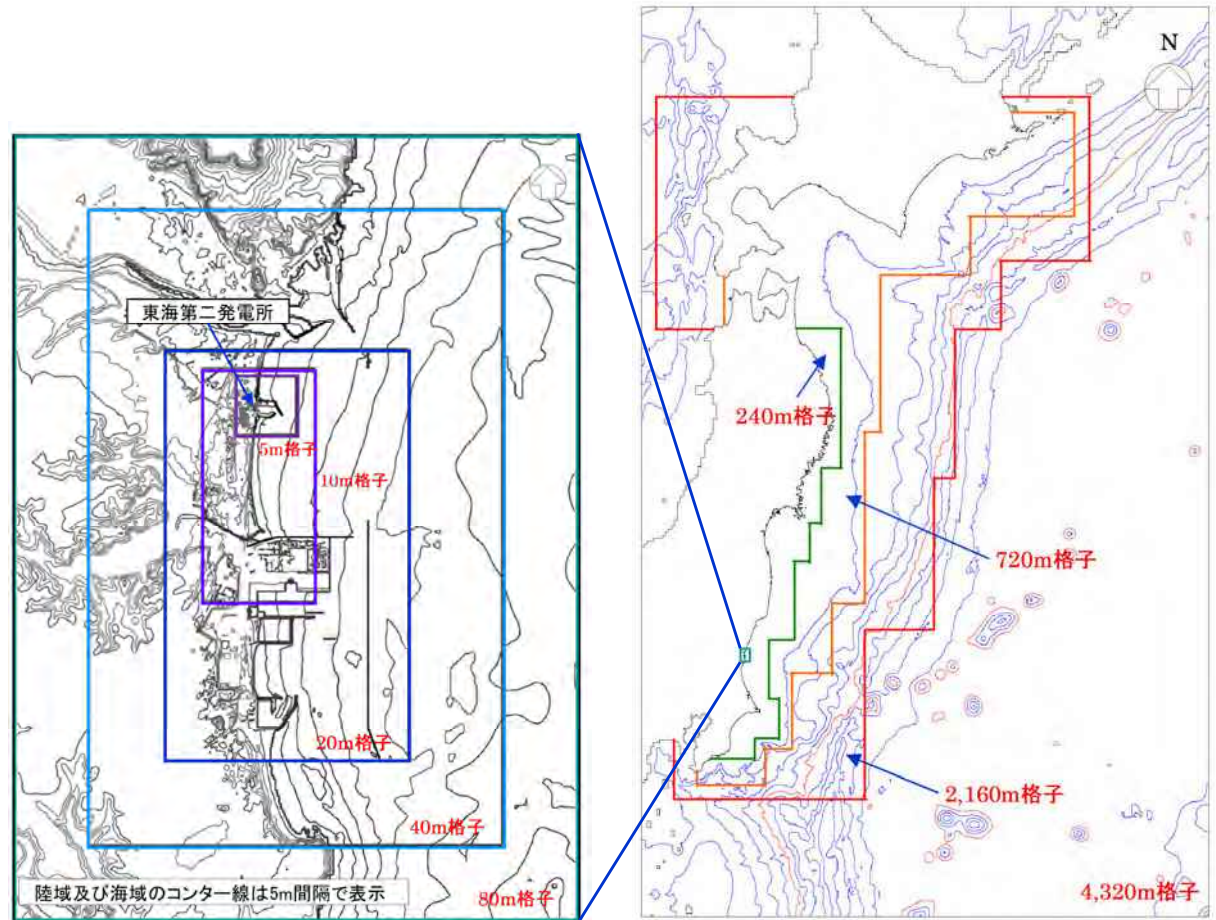
発電所周辺の再現解析の計算条件

項目	条件	備考
計算領域	北海道から千葉房総付近までの太平洋 (南北約1,300km、東西約800km)	
メッシュ構成	沖合4,320m→2,160m→720m→沿岸域240m→ 発電所周辺80m→40m→20m→10m→5m	長谷川他(1987)
基礎方程式	非線形長波理論	後藤・小川(1982)の方法
計算スキーム	スタッガード格子、リーブ・フロッグ法	後藤・小川(1982)の方法
初期変位量	Mansinha and Smylie (1971)の方法	
境界条件	沖側: 後藤・小川(1982)の自由透過の条件 陸側: 敷地周辺(計算格子間隔80m~5m)の領域は小谷他(1998)の陸上遡上境界条件 それ以外は完全反射条件	
越流条件	防波堤: 本間公式(1940) 護岸: 相田公式(1977)	
海底摩擦係数	マニングの粗度係数($n=0.03m^{-1/3}s$)	
水平渦動粘性係数	考慮していない($Kh=0$)	
計算時間間隔	$\Delta t=0.05$ 秒	C.F.L.条件を満たすように設定
計算時間	津波発生後240分間	十分な計算時間となるように設定
潮位条件	T.P.-0.49m	地震発生時の日立港潮位

津波水位 = 潮位 + 水位変動量 + 2011年東北地方太平洋沖地震による地殻変動量

津波伝播に関するモデルに用いた地形データ

項目	データ
陸上地形	<ul style="list-style-type: none"> • 津波解析用地形データ: 茨城県(2007) • 敷地平面図: 日本原子力発電(株)(2007)
海底地形	<ul style="list-style-type: none"> • JTOPO30: (財)日本水路協会(2006) • 沿岸の海の基本図デジタルデータ: (財)日本水路協会(2002) • 津波解析用地形データ: 茨城県(2007) • 東海水深図: 日本原子力発電(株)(2007)



計算領域と格子分割(発電所周辺)

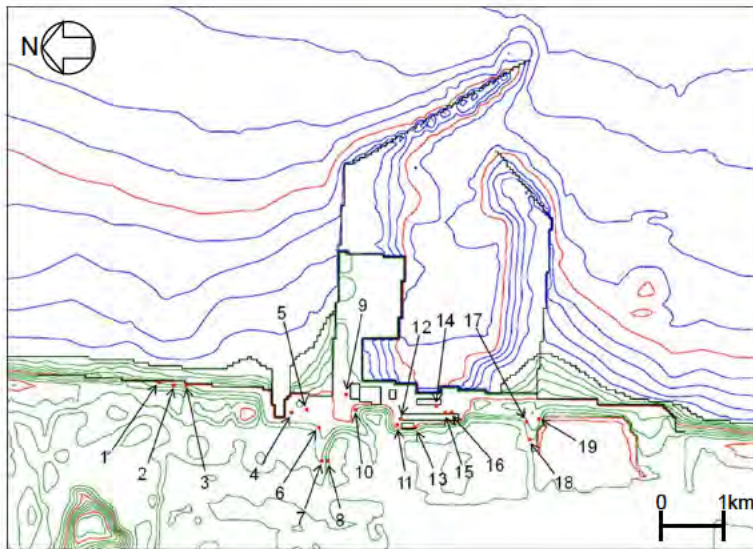
計算領域と格子分割(沖合~沿岸域)

想定波源領域の設定(発電所周辺の再現性の確認結果)

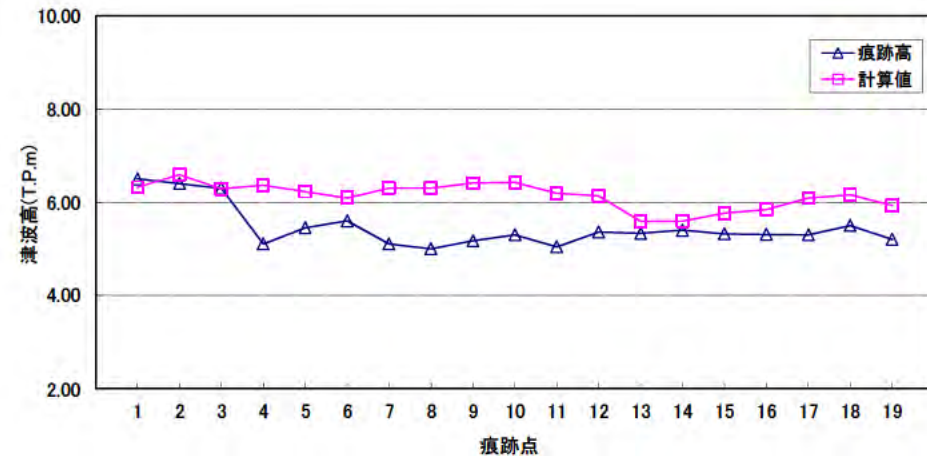
- 設定した波源モデルは、発電所では痕跡高に対して計算値の方が大きくなっているが(幾何平均 $K=0.89$)、幾何標準偏差($\kappa=1.08$)は土木学会(2016)の再現性の目安値を満足している。
- なお、幾何平均 K は1より小さい(痕跡高に対して計算値の方が大きい)ため保守的である。

<計算値と痕跡高の比較>

- 痕跡点1~19の計算値と痕跡高の傾向の違いを比較した。
 - 痕跡点1~3周辺には、構造物が無い。
 - 痕跡点1~3以外の周辺には、構造物が有る。
- 構造物が有る、痕跡点1~3以外の周辺には、モデル化していない構造物(地震や津波に耐えられないもの)もあるため、計算値と痕跡高の差を生じさせたと考えられる。



敷地内評価点



計算値と痕跡高の比較

地点数 n	幾何平均 K	幾何標準偏差 κ
19	0.89	1.08

【幾何平均 K 及び幾何標準偏差 κ の再現性の目安】

$0.95 < K < 1.05$

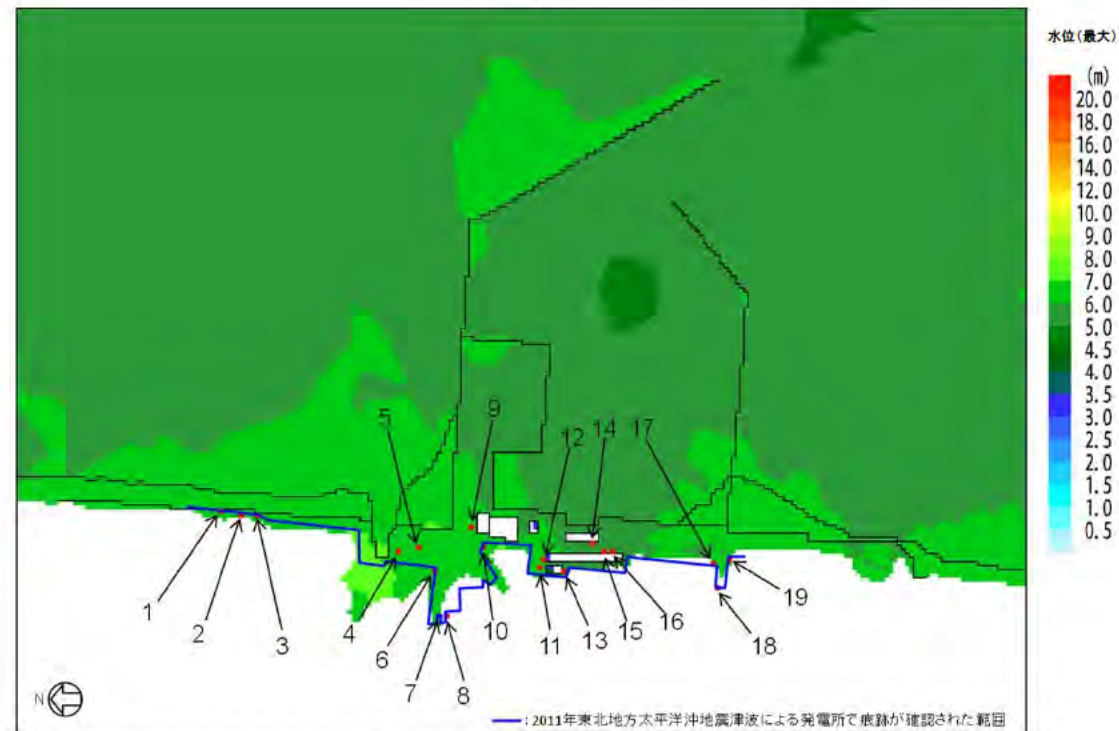
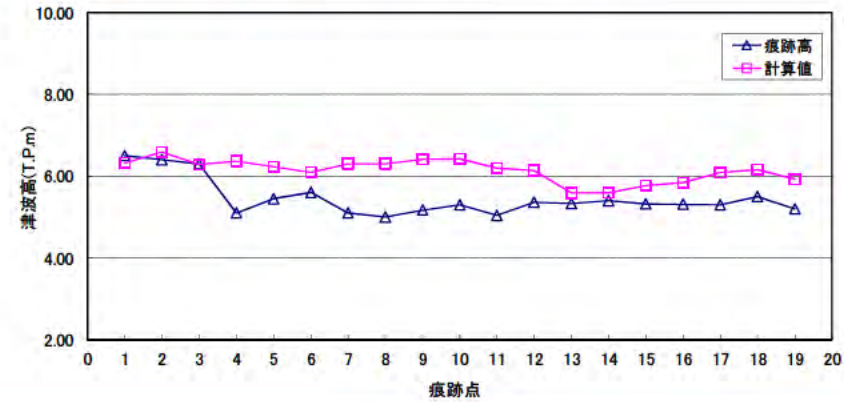
$\kappa < 1.45$

(土木学会(2016))

波源モデルや発電所周辺(最小5mのメッシュサイズ)の津波伝播に関するモデルについて、2011年東北地方太平洋沖地震津波の津波痕跡高さを良好に再現出来ることを確認している。

想定波源領域の設定(痕跡域と再現計算の浸水範囲との比較)

- 2011年東北地方太平洋沖地震津波による発電所で痕跡が確認された範囲と再現計算による浸水範囲を比較した結果、同程度であり、波源モデルや津波伝播に関するモデル(評価するモデル)は妥当であることを確認している。



2011年東北地方太平洋沖地震津波の再現計算の浸水範囲

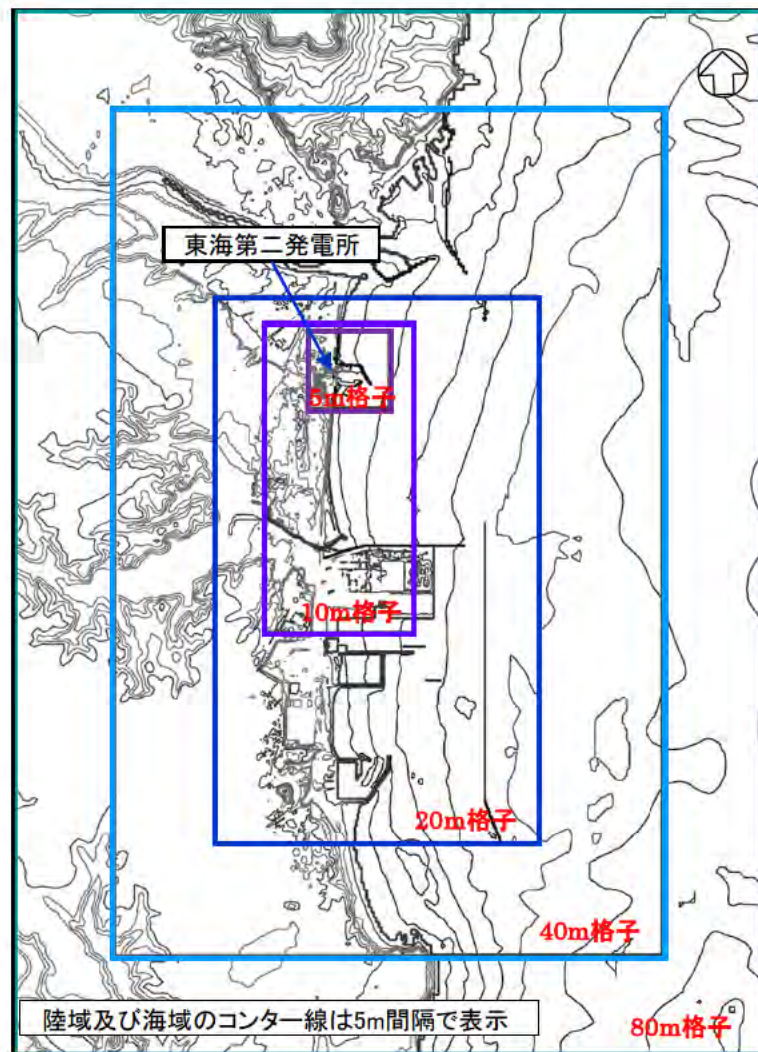
想定波源領域の設定(津波予測解析:計算条件)

- 津波予測解析にあたっては、下記の計算条件を用いた。

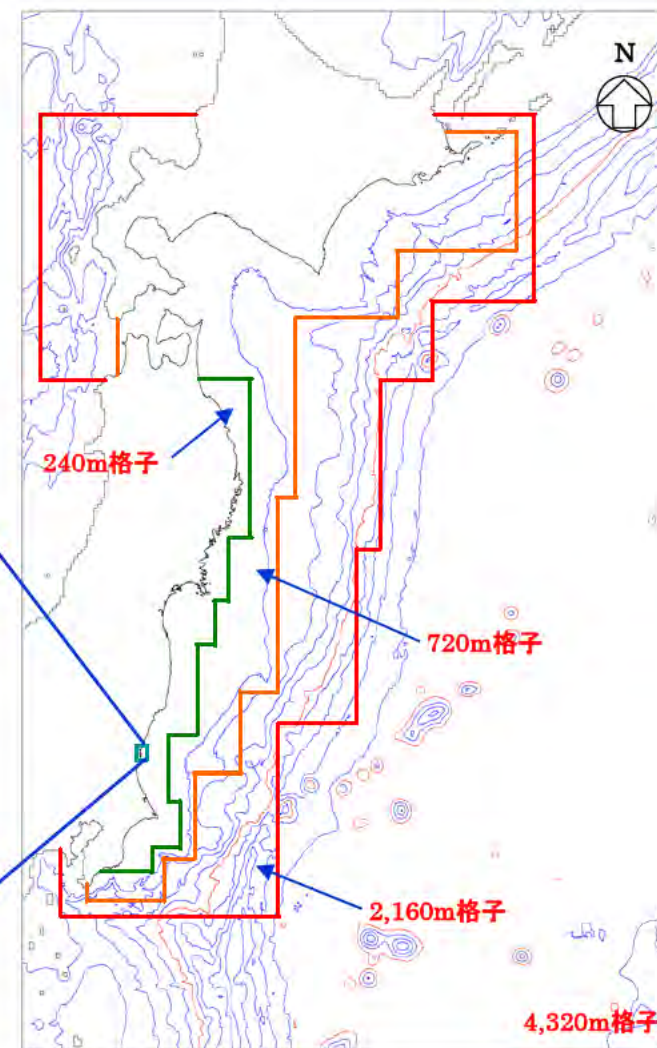
津波予測解析の計算条件

項目	条件		備考
解析領域	北海道から千葉房総付近までの太平洋		
メッシュ構成	沖合4,320m→2,160m→720m→沿岸域240m→発電所周辺80m→40m→20m→10m→5m		長谷川他(1987)
基礎方程式	非線形長波理論		後藤・小川(1982)の方法
計算スキーム	スタッガード格子, リープ・フロッグ法		後藤・小川(1982)の方法
初期変位量	Mansinha and Smylie(1971)の方法		
境界条件	沖側:後藤・小川(1982)の自由透過の条件 陸側:敷地周辺(計算格子間隔80m~5m)の領域は小谷他(1998)の陸上遡上境界条件 それ以外は完全反射条件		
越流条件	防波堤:本間公式(1940) 護岸:相田公式(1977)		
防潮堤	鉛直無限壁		
海底摩擦係数	マニングの粗度係数($n=0.03m^{-1/3}s$)		
水平渦動粘性係数	考慮していない($Kh=0$)		
計算時間間隔	$\Delta t=0.05$ 秒		C.F.L.条件を満たすように設定
計算時間	津波発生後240分間		十分な計算時間となるように設定
潮位条件	概略パラメータスタディ	T.P.+0.02m	茨城港常陸那珂港区(茨城港日立港区)の潮位表(平成16年~平成21年)を用いて設定
	詳細パラメータスタディ	T.P.+0.61m(上昇側)	
		T.P.-0.81m(下降側)	

津波水位=潮位+水位変動量+ 2011年東北地方太平洋沖地震による地殻変動量 +津波予測解析による地殻変動量
(設定根拠については参考資料(36及び38頁)に記載)



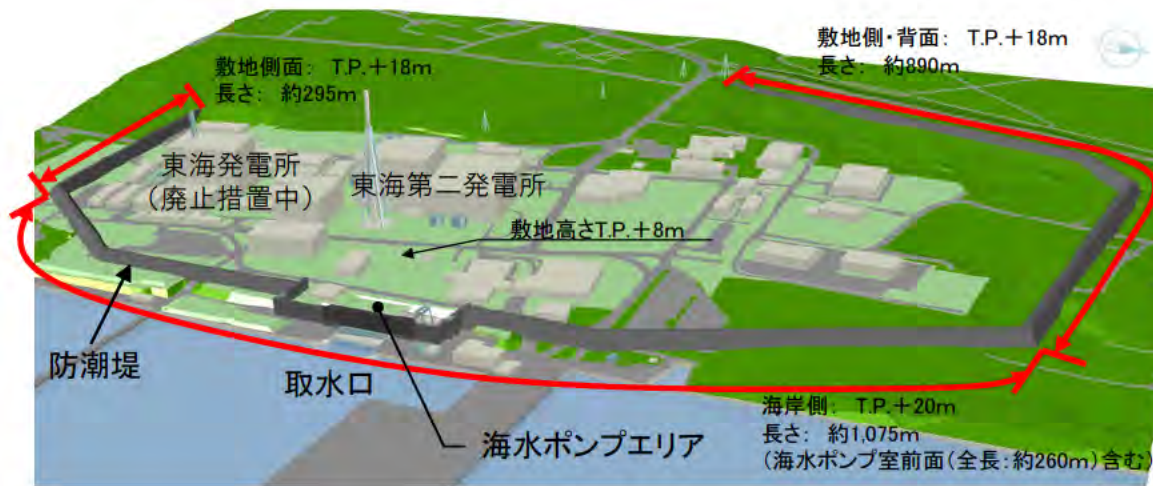
計算格子(発電所周辺)



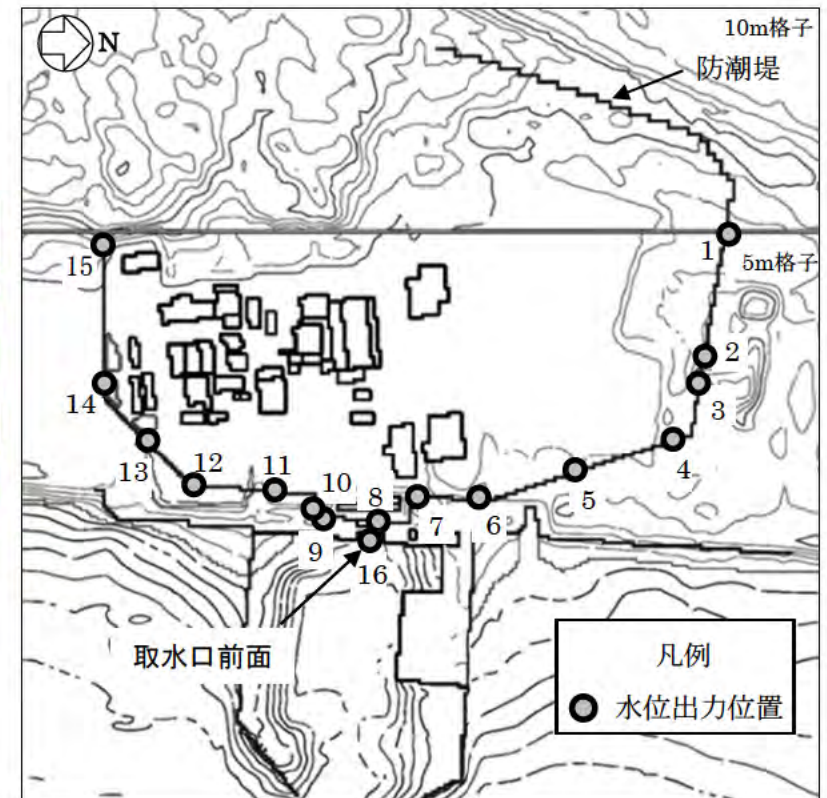
計算格子(沖合～沿岸域)

想定波源領域の設定(津波水位の出力位置)

- 重要な安全機能を有する施設の設置された敷地(T.P.+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を設置することから, 防潮堤位置を津波水位(上昇側)の出力位置とした。
- 取水路内の水位変動に伴う非常用海水ポンプの取水性を評価することから, 取水口前面を津波水位(下降側)の出力位置とした。



<防潮堤の概要(イメージ図)>

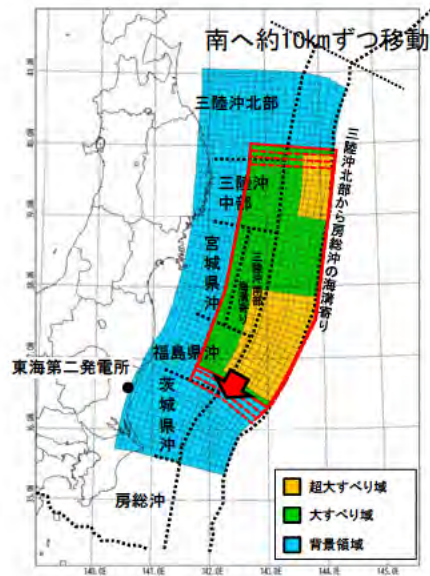


出力位置

東北地方太平洋沖型の津波波源(概略パラメータスタディの設定及び評価結果)

- 再現性の最も良好なモデルを基準として、大すべり域、超大すべり域を三陸沖中部から福島県沖の範囲で10kmずつ移動させて発電所への津波水位の影響が最も大きくなる波源モデルを確認した。
- その結果、防潮堤前面の最大水位上昇量の最大値は8.13m、取水口前面の最大水位下降量の最大値は-3.69mとなることを確認した。

【M9クラスの特性化波源モデル】



破壊開始点 : 無し

破壊伝播速度 : ∞

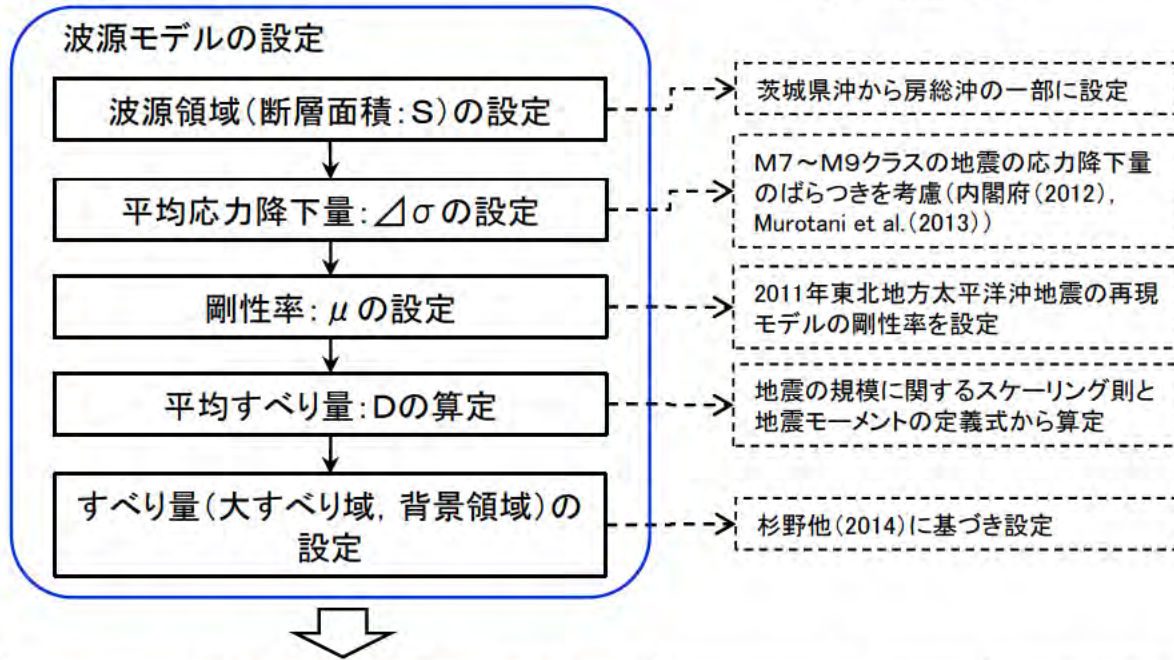
位置	防潮堤前面	取水口前面
	最大水位上昇量(m)	最大水位下降量(m)
基準	7.36	-3.52
南へ10km移動	8.13	-3.19
南へ20km移動	8.09	-3.04
南へ30km移動	7.75	-3.69

※行政機関による既往評価で比較できるパラメータ(地震規模 M_w , すべり量等)も参考にして特性化波源モデルを設定

茨城県沖に想定する津波波源(特性化波源モデル)

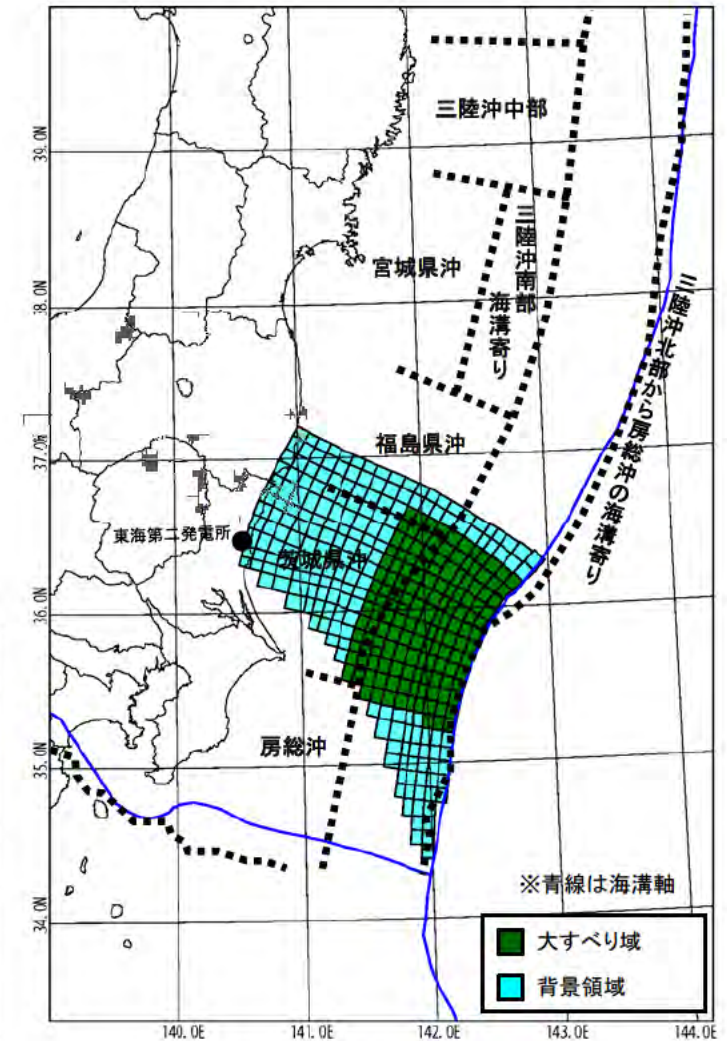
【設定フロー】

【設定根拠】



パラメータ※1	設定値
断層面積:S	29,630 km ²
平均応力降下量:Δσ	3.0 MPa
剛性率:μ	4.7 × 10 ¹⁰ N/m ²
モーメントマグニチュード:Mw	8.5
平均すべり量:D	4.5 m
地震モーメント:M ₀	6.3 × 10 ²¹ Nm

パラメータ		設定値
超大すべり域	すべり量	—
	面積比率(断層面積)	—
大すべり域	すべり量	9.0 m
	面積比率(断層面積)	全体面積の40% (11,862 km ²)※2
背景領域	すべり量	1.5 m
	面積比率(断層面積)	全体面積の60% (17,768 km ²)※2



特性化波源モデル(一例)

※1 行政機関による既往評価で比較できるパラメータ(地震規模Mw, すべり量等)も参考にして特性化波源モデルを設定

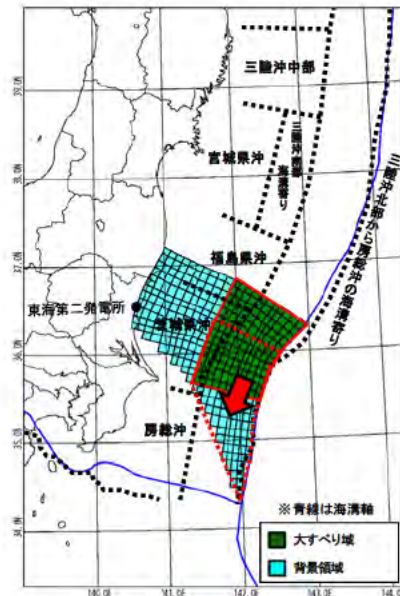
※2 断層面積は右図の特性化波源モデル値。ただし、大すべり域の位置により若干変動する

計算条件は東北地方太平洋沖型の津波波源(津波予測解析)と同様

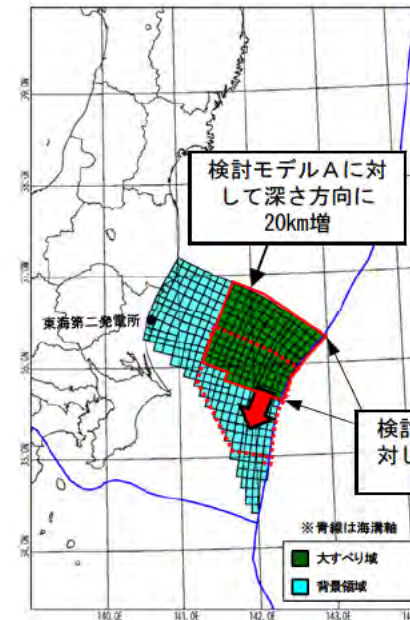
茨城県沖に想定する津波波源(概略パラメータスタディの設定及び評価結果)



- 大すべり域の形状の違いが津波水位変動量に与える影響を把握するため、大すべり域の形状を変えた2パターンのモデルについて検討した。
- 大すべり域を波源モデルの北限に配置したモデルを基準として、南へ10kmずつ移動させて、発電所への津波水位の影響が最も大きくなる波源モデルを確認した。
- その結果、防潮堤前面の最大水位上昇量の最大値は8.17m、取水口前面の最大水位下降量の最大値は-4.52mとなることを確認した。



検討モデルA



検討モデルB

破壊開始点 : 無し
破壊伝播速度 : ∞

位置		防潮堤前面 最大水位上昇量(m)	取水口前面 最大水位下降量(m)
基準	A-1	7.71	-4.18
南へ10km移動	A-2	7.99	-4.35
南へ20km移動	A-3	8.17	-4.49
南へ30km移動	A-4	7.53	-4.52
南へ40km移動	A-5	6.69	-4.35
南へ50km移動	A-6	6.18	-4.08

位置		防潮堤前面 最大水位上昇量(m)	取水口前面 最大水位下降量(m)
基準	B-1	5.70	-3.57
南へ10km移動	B-2	6.17	-3.88
南へ20km移動	B-3	6.27	-4.14
南へ30km移動	B-4	6.82	-4.27
南へ40km移動	B-5	6.32	-4.35
南へ50km移動	B-6	5.41	-3.90

保守性を考慮した場合に津波水位が大きくなる津波波源の選定

- 概略パラメータスタディの結果より、東北地方太平洋沖型の津波波源と茨城県沖に想定する津波波源では、発電所での最大水位上昇量は同程度であるが、最大水位下降量がより大きく、また発電所の前面海域に位置する茨城県沖に想定する津波波源に対して、保守性を考慮することとした。
- 保守性の考え方については次頁に示す通り。

津波波源	防潮堤前面	取水口前面
	最大水位上昇量 (m)	最大水位下降量 (m)
東北地方太平洋沖型の津波波源	8.13	-3.69
茨城県沖に想定する津波波源	8.17	-4.52

保守性を考慮した特性化波源モデルの設定

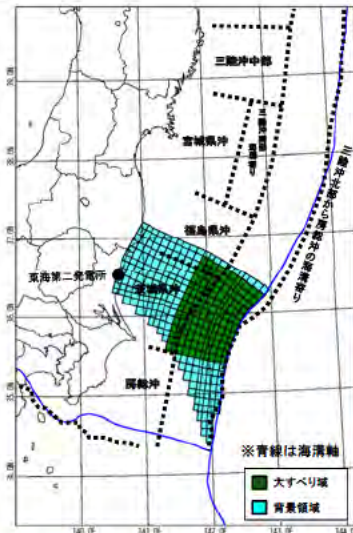
- 2011年東北地方太平洋沖地震から得られた知見からは、「茨城県沖に想定する津波波源」が波源として妥当であるが、保守的設定(波源領域の拡張, 超大すべり域の設定, すべり量の割り増し等)を行った「茨城県沖から房総沖に想定する津波波源」を基準津波の波源として選定している。
- なお, 解析における水位上昇量の最大値である最大水位上昇量が「茨城県沖に想定する津波波源」は約8mに対し, 「茨城県沖から房総沖に想定する津波波源」は約16mであり, 約8mの余裕度を確保していることを確認している。

茨城県沖に想定する津波波源の諸元

パラメータ		設定値
断層面積:S		29,630 km ²
モーメントマグニチュード:Mw		8.5
平均すべり量:D		4.5 m
すべり量	超大すべり域 (面積比率)	—
	大すべり域:2D (面積比率)	9.0 m (全体面積の40%)
	背景領域:0.33D	1.5 m
最大水位上昇量:m		8.17

茨城県沖から房総沖に想定する津波波源の諸元

パラメータ		設定値
断層面積:S		53,684 km ²
モーメントマグニチュード:Mw		8.7
平均すべり量:D		6.1 m
すべり量	超大すべり域:4D (面積比率)	24.3 m (全体面積の5%)
	大すべり域:2D (面積比率)	12.1 m (全体面積の15%)
	背景領域:0.62D	3.8 m
最大水位上昇量:m		16.08

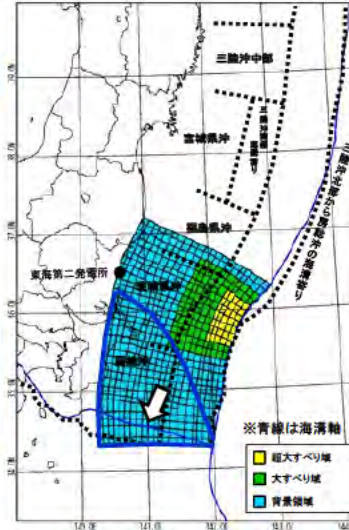


茨城県沖に想定する津波波源

保守的設定1, 2, 3を考慮

保守的設定1. 津波波源の南限を房総沖まで拡張

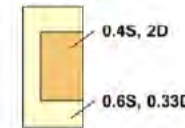
※北米プレートとフィリピン海プレートの境界を越えて矩形となるように設定



茨城県沖から房総沖に想定する津波波源
津波対策-59

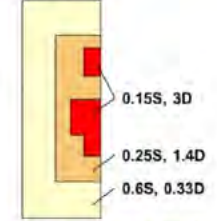
保守的設定2. 超大すべり域を設定

大規模
(~Mw8.8)
2段階すべり



杉野他(2014)では,
Mw8.7の場合, 超大すべり
を設定していない

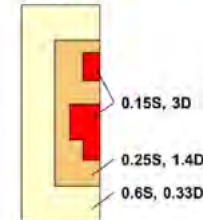
超大規模
(Mw8.9~)
3段階すべり



超大すべりを設定

保守的設定3. 大すべり域及び超大すべり域のすべり量を割り増し

超大規模
(Mw8.9~)
3段階すべり



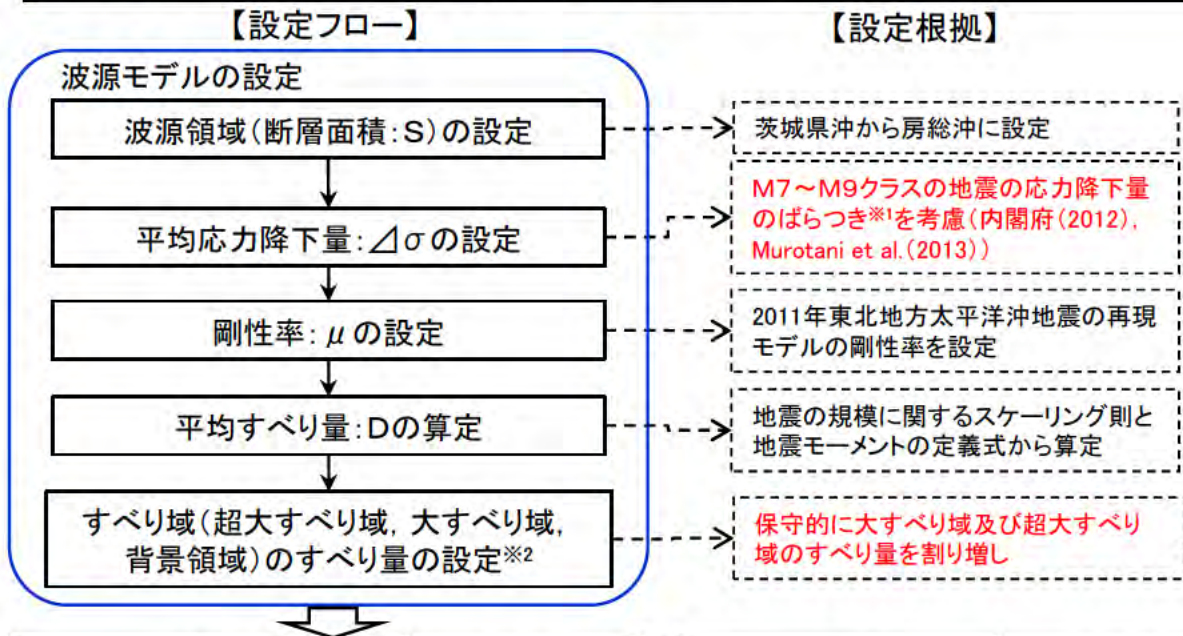
0.05S, 4D

0.15S, 2D

(杉野他(2014))

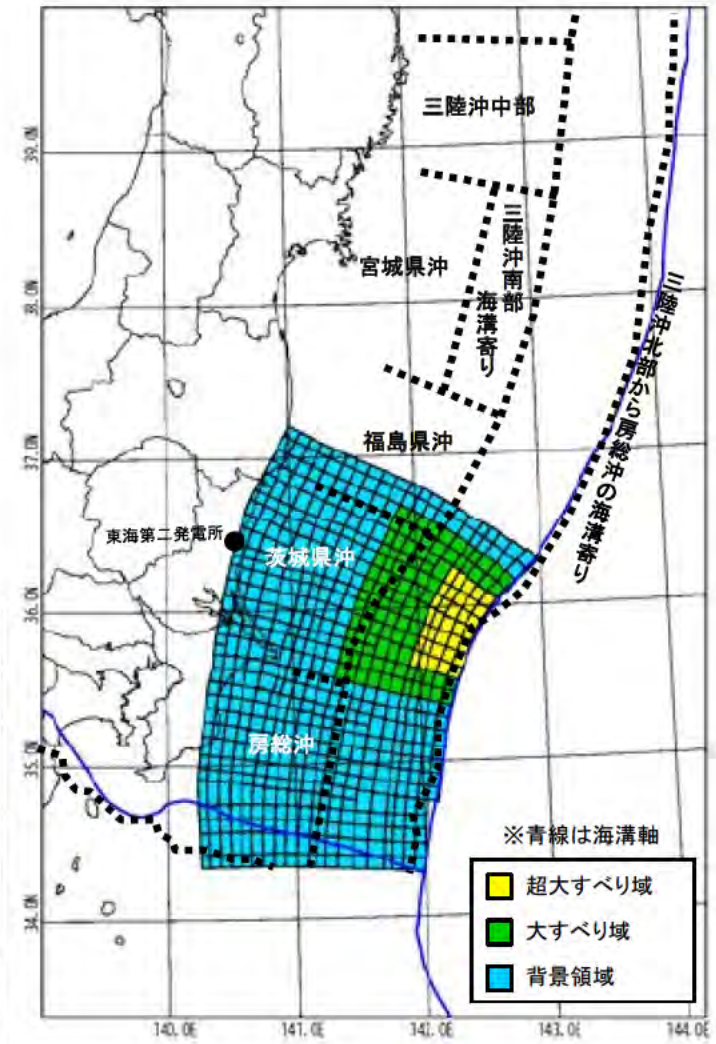
茨城県沖から房総沖に想定する津波波源(特性化波源モデル)

・ 特性化波源モデルのパラメータについて、設定フローに従って設定した。



パラメータ	設定値
断層面積:S	53,684 km ²
平均応力降下量: $\Delta\sigma$	3.00 MPa
剛性率: μ	4.7×10^{10} N/m ²
モーメントマグニチュード:Mw	8.7
平均すべり量:D	6.1 m
地震モーメント:M ₀	1.5×10^{22} Nm

パラメータ		設定値
超大すべり域	すべり量	24.3 m
	面積比率(断層面積)	全体面積の5% (2,659 km ²)※3
大すべり域	すべり量	12.1 m
	面積比率(断層面積)	全体面積の15% (8,231 km ²)※3
背景領域	すべり量	3.8 m
	面積比率(断層面積)	全体面積の80% (42,794 km ²)※3



特性化波源モデル(一例)

※1 M7~M9クラスの地震の応力降下量のばらつきは、標準偏差を考慮すると0.82~3.00MPaの範囲であり、保守的な値としてばらつき範囲の上限値である3.00MPaを平均応力降下量として設定する。

※2 上段で設定したS, $\Delta\sigma$, μ から求まるモーメントマグニチュードが変動しないようにすべり量を設定する。
 なお、 $\Delta\sigma$ の設定において「ばらつきを考慮」していることから、マグニチュードは保守的となっている。
 すべり域(超大すべり域, 大すべり域, 背景領域)のすべり量の設定については次頁参照。

※3 断層面積は右図の特性化波源モデル値。ただし、超大すべり域, 大すべり域の位置により若干変動する。

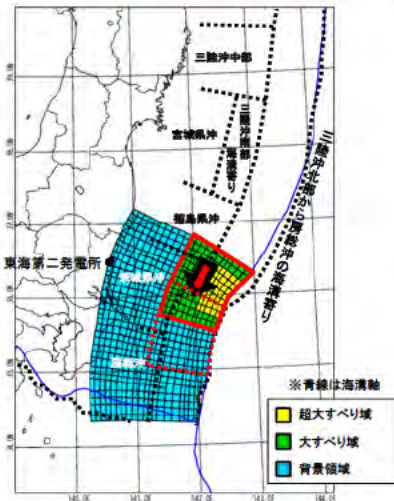
茨城県沖から房総沖に想定する津波波源(概略パラメータスタディの設定及び評価結果)



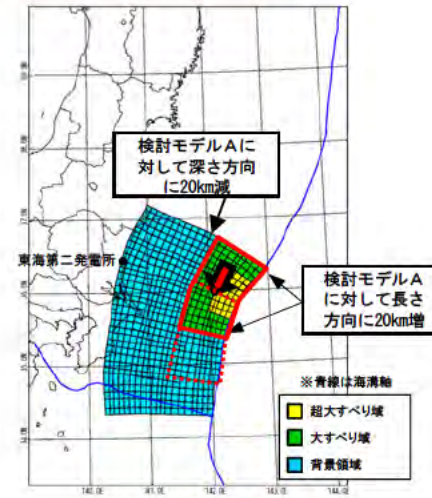
- 大すべり域の形状の違いが津波水位変動量に与える影響を把握するため、大すべり域の形状を変えた2パターンのモデルについて検討した。
- 波源モデルの北限を基準に、大すべり域、超大すべり域を茨城県沖から房総沖の範囲で南へ10kmずつ移動させて、発電所への津波水位の影響が最も大きくなる波源モデルを確認した。
- その結果、防潮堤前面の最大水位上昇量の最大値は17.60m、取水口前面の最大水位下降量の最大値は-5.47mとなることを確認した。

保守的設定4. 大すべり域及び超大すべり域がプレート境界を跨いだケースも考慮

破壊開始点 : 無し
破壊伝播速度 : ∞



検討モデルA



検討モデルB

位置		防潮堤前面 最大水位上昇量 (m)	取水口前面 最大水位下降量 (m)
基準	A-1	16.78	-5.16
南へ10km移動	A-2	17.34	-5.17
南へ20km移動	A-3	17.60	-5.24
南へ30km移動	A-4	17.22	-5.44
南へ40km移動	A-5	16.22	-5.47
南へ50km移動	A-6	14.68	-5.42
南へ60km移動	A-7	12.20	-5.20
南へ70km移動	A-8	10.38	-5.03

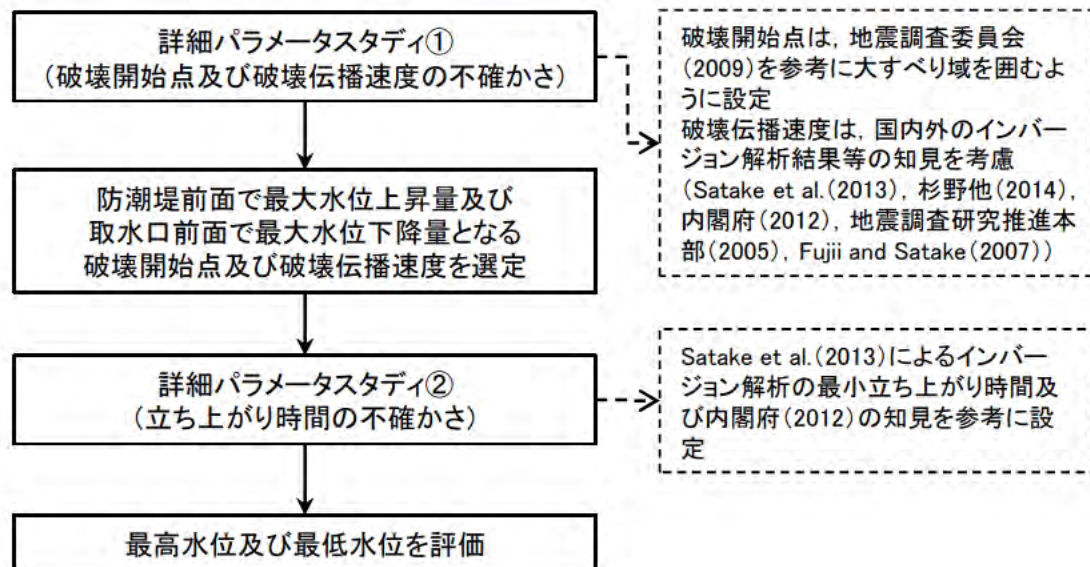
位置		防潮堤前面 最大水位上昇量 (m)	取水口前面 最大水位下降量 (m)
基準	B-1	16.30	-4.93
南へ10km移動	B-2	16.75	-4.94
南へ20km移動	B-3	15.73	-5.08
南へ30km移動	B-4	15.93	-5.15
南へ40km移動	B-5	16.21	-5.04
南へ50km移動	B-6	13.74	-4.83
南へ60km移動	B-7	11.08	-4.73
南へ70km移動	B-8	9.36	-4.47

茨城県沖から房総沖に想定する津波波源(詳細パラメータスタディの設定)



【設定フロー】

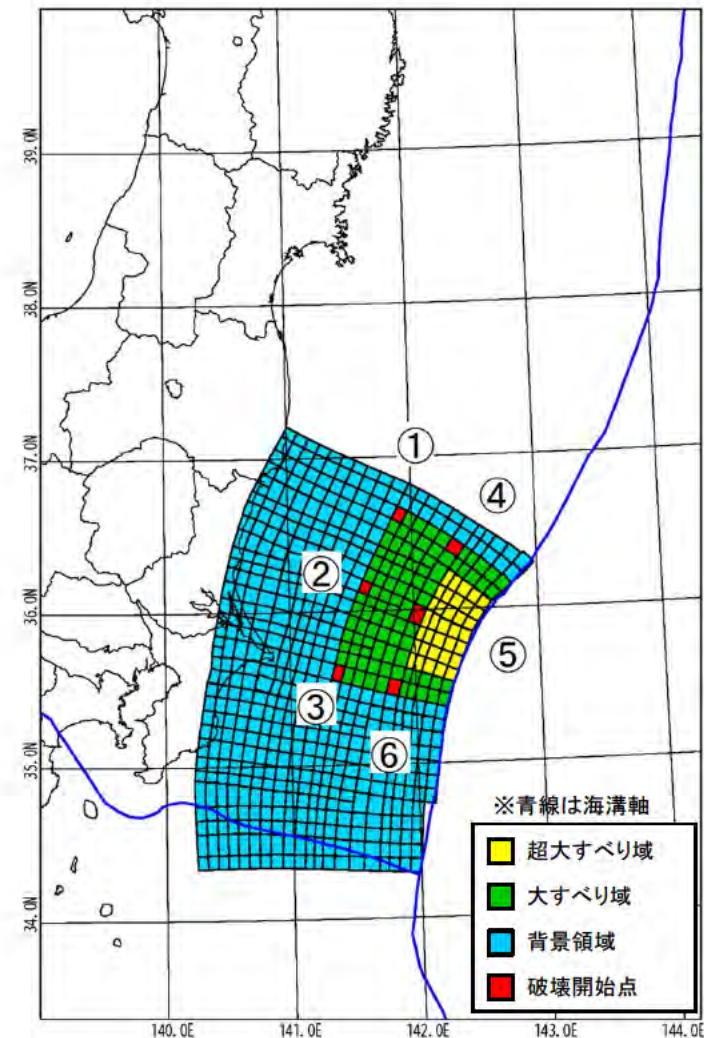
【設定根拠】



破壊開始点は、地震調査委員会(2009)を参考に大すべり域を囲むように設定
 破壊伝播速度は、国内外のインバージョン解析結果等の知見を考慮(Satake et al.(2013), 杉野他(2014), 内閣府(2012), 地震調査研究推進本部(2005), Fujii and Satake(2007))

Satake et al.(2013)によるインバージョン解析の最小立ち上がり時間及び内閣府(2012)の知見を参考に設定

項目	設定値
破壊開始点	①～⑥(右図参照)
破壊伝播速度	1.0km/s, 1.5km/s, 2.0km/s, 2.5km/s, 3.0km/s
立ち上がり時間	30秒, 60秒



破壊開始点位置図

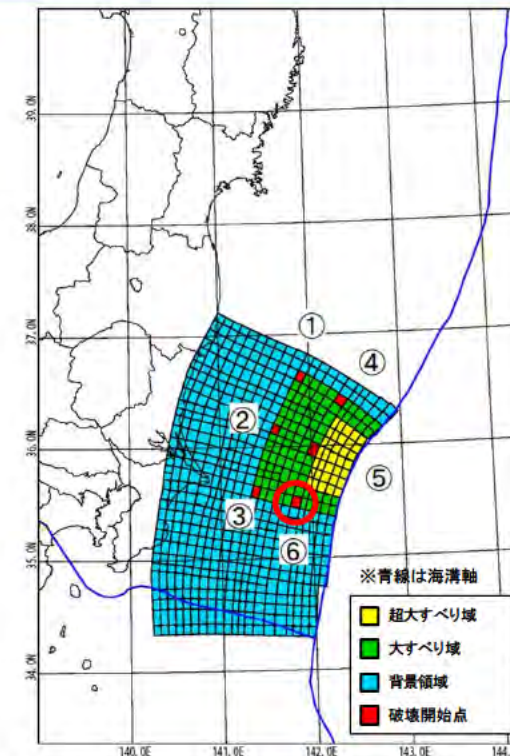
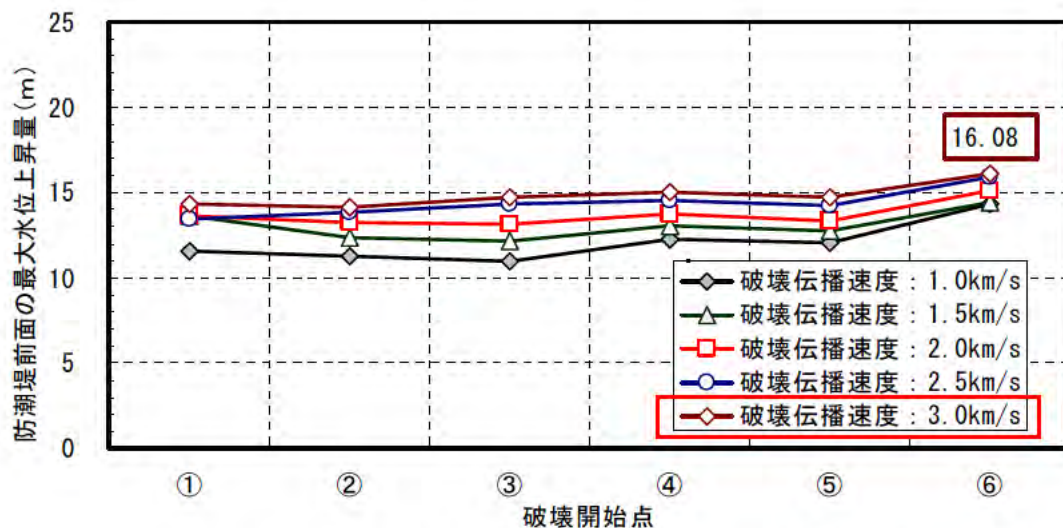
計算条件は東北地方太平洋沖型の津波波源(津波予測解析)と同様

茨城県沖から房総沖に想定する津波波源(詳細パラメータスタディの評価結果)



■破壊開始点及び破壊伝播速度

- 防潮堤前面の最大水位上昇量が最大(+16.08m)となる, 破壊開始点⑥の破壊伝播速度3.0km/sのケースを選定した。



防潮堤前面の最高水位：A-3, 破壊開始点及び破壊伝播速度のパラメータスタディ

A-3	防潮堤前面の最大水位上昇量 ^{※1} (m)				
	破壊伝播速度				
破壊開始点	1.0km/s	1.5km/s	2.0km/s	2.5km/s	3.0km/s
①	11.52	13.66	13.62	13.46	14.36
②	11.24	12.33	13.27	13.83	14.09
③	11.01	12.20	13.14	14.28	14.76
④	12.29	13.08	13.72	14.53	15.00
⑤	12.01	12.74	13.36	14.22	14.68
⑥	14.28	14.41	15.13	15.89	16.08 ^{※2}

※1 立ち上がり時間: 30秒

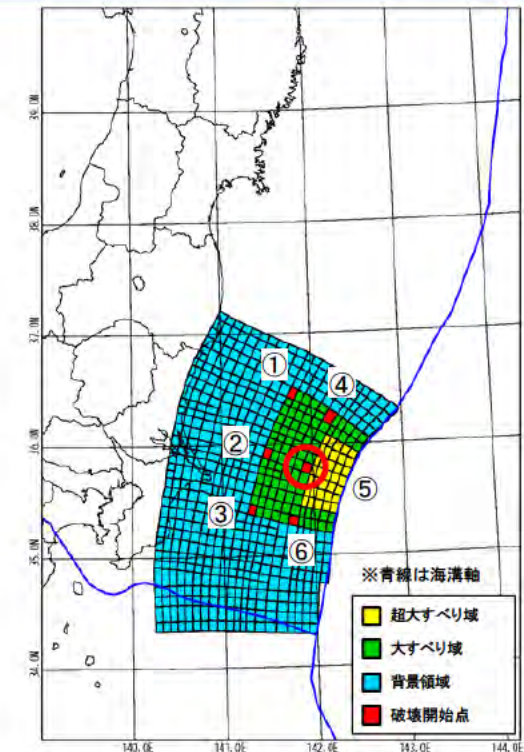
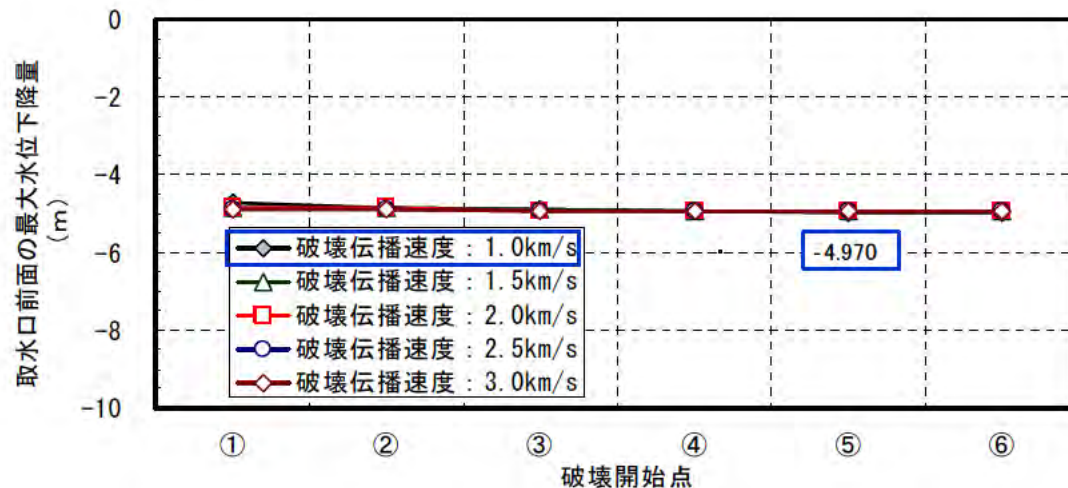
※2 取水口前面の最大水位上昇量 13.09 m

茨城県沖から房総沖に想定する津波波源(詳細パラメータスタディの評価結果)



■破壊開始点及び破壊伝播速度

- 取水口前面の最大水位下降量が最大(-4.970m)となる、破壊開始点⑤の破壊伝播速度1.0km/sのケースを選定した。



取水口前面の最低水位：A-5，破壊開始点及び破壊伝播速度のパラメータスタディ

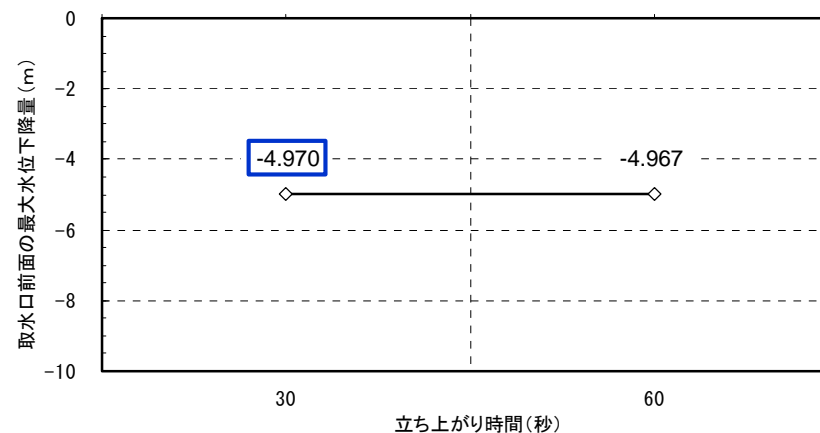
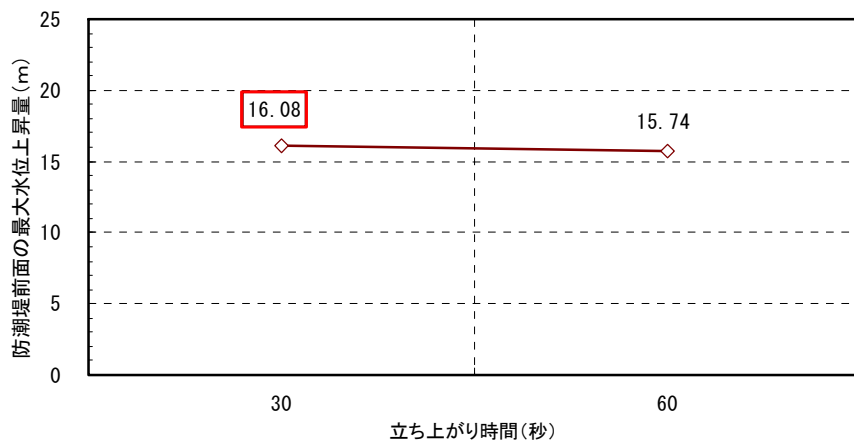
A-5	取水口前面の最大水位下降量*(m)				
	破壊伝播速度				
破壊開始点	1.0km/s	1.5km/s	2.0km/s	2.5km/s	3.0km/s
①	-4.71	-4.83	-4.84	-4.88	-4.90
②	-4.84	-4.85	-4.85	-4.88	-4.90
③	-4.91	-4.91	-4.92	-4.92	-4.93
④	-4.93	-4.92	-4.92	-4.92	-4.92
⑤	-4.970	-4.95	-4.94	-4.94	-4.93
⑥	-4.969	-4.96	-4.95	-4.94	-4.94

※立ち上がり時間:30秒

茨城県沖から房総沖に想定する津波波源(詳細パラメータスタディの評価結果)

■ 立ち上がり時間

- 立ち上がり時間30秒のとき、防潮堤前面の最大水位上昇量が最大(+16.08m)となった。
- 立ち上がり時間30秒のとき、取水口前面の最大水位下降量が最大(-4.970m)となった。



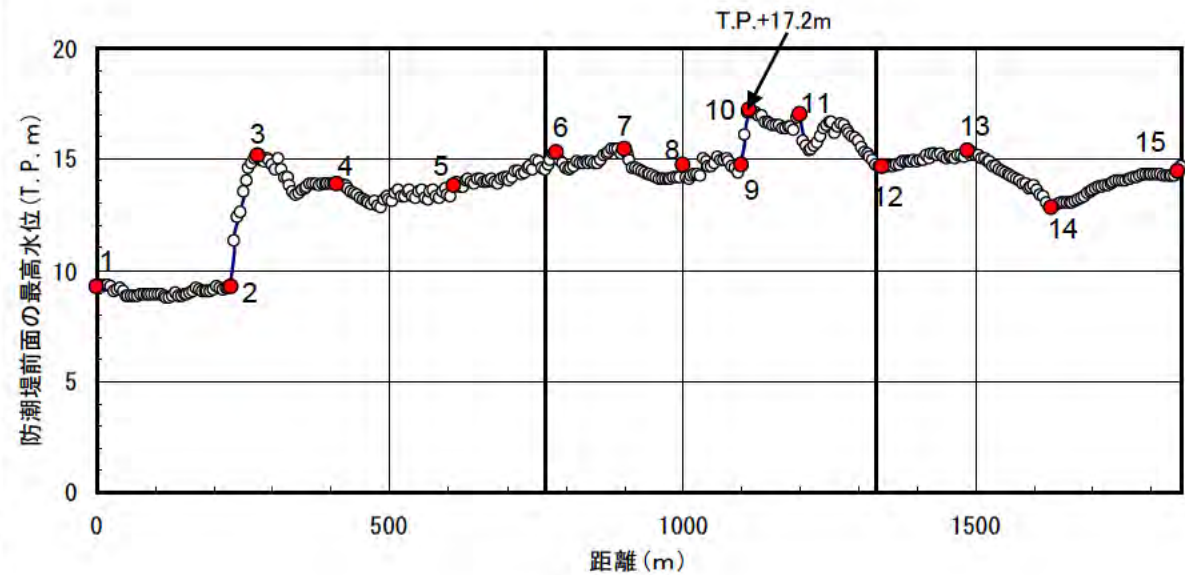
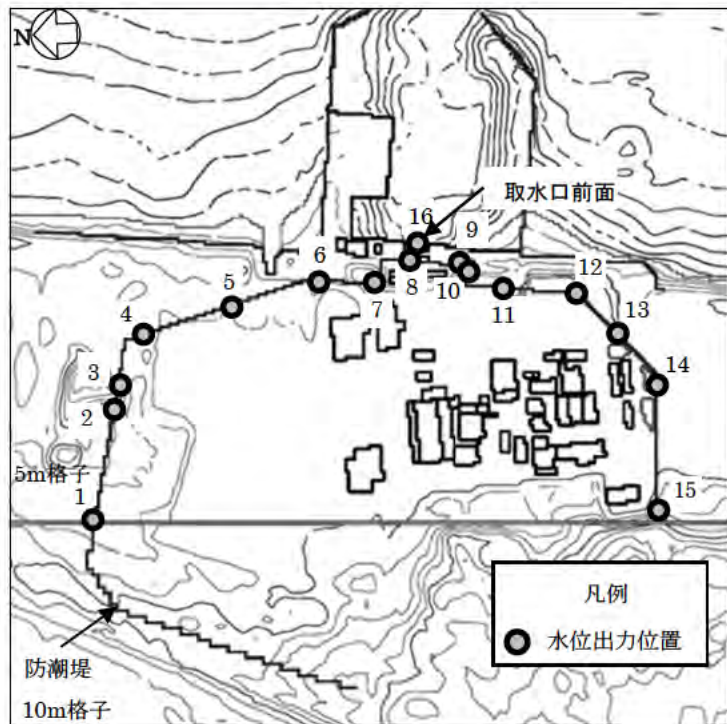
A-3	防潮堤前面の最大水位上昇量 (m)
	破壊開始点⑥
立ち上がり時間 (秒)	破壊伝播速度 : 3.0km/s
30	16.08
60	15.74

A-5	取水口前面の最大水位下降量 (m)
	破壊開始点⑤
立ち上がり時間 (秒)	破壊伝播速度 : 1.0km/s
30	-4.970
60	-4.967

茨城県沖から房総沖に想定する津波波源(詳細パラメータスタディの評価結果)



・ プレート間地震の評価結果は以下の通りである。



項目	水位	パラメータ
最高水位※ ¹ (防潮堤前面)	T.P.+17.2m※ ²	A-3, 破壊開始点⑥, 破壊伝播速度3.0km/s及び立ち上がり時間30秒
最低水位※ ¹ (取水口前面)	T.P.-5.3m	A-5, 破壊開始点⑤, 破壊伝播速度1.0km/s及び立ち上がり時間30秒

※¹ 潮位及び地殻変動量(2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動量も含む)を考慮

※² 同パラメータによる取水口前面の最高水位はT.P.+14.3mである

文献調査(過去の津波)

- Alvarez-Gomez et al.(2012)に基づけば、1933年昭和三陸沖地震津波は、海溝外縁隆起帯(outer rise)で発生した地震では最大規模の地震である。

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

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)

(Alvarez-Gomez et al.(2012)に加筆)

文献調査(地震規模)

- 地震調査研究推進本部(2012)は、過去の三陸沖北部から房総沖にかけてのプレート内正断層型地震で津波等により大きな被害をもたらしたものは、三陸沖で1933年に発生した昭和三陸沖地震が唯一知られているだけであるとしている。
- また、今後100年以内の発生確率は10%~20%であり、次の地震の規模は、過去に発生した地震を参考として、M8.2前後、Mt8.3前後と推定している。

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# 今後20年以内の発生確率# 今後30年以内の発生確率# 今後40年以内の発生確率# 今後50年以内の発生確率# 今後100年以内の発生確率# 今後300年以内の発生確率#	1%~2% (0.3%~0.6%) 3%~5% (0.7%~1%) 4%~7% (1%~2%) 5%~10% (1%~2%) 6%~10% (2%~3%) 10%~20% (3%~6%) 30%~50% (10%~20%)	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。 # 三陸沖北部から房総沖の海溝寄り全体での発生確率を示す。()は特定の海域の値。	C
次の地震の規模	M8.2前後 ^{注3} Mt8.3前後	過去に発生した地震のM及びMtを参考にして判断した。	B

注3：この報告書では、Mの数値の推定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：評価の信頼度は、評価に用いたデータの量的・質的な充足性などから、評価の確からしさを相対的にランク付けしたもので、AからDの4段階で表す。各ランクの一般的な意味は次のとおりである。

A：(信頼度が)高い B：中程度 C：やや低い D：低い

評価の信頼度は、想定地震の発生領域、規模、発生確率のそれぞれの評価項目について与える。発生確率の評価の信頼度は、地震発生時の切迫度を表すのではなく、確率の値の確からしさを表すことに注意する必要がある。なお、規模及び発生確率の信頼度ランクの具体的な意味は以下のとおりである。分類の詳細な方法については(付表)を参照のこと。

- 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。
- C: 規模を過去の事例からでなく地震学的知見から推定したため、想定規模の信頼性はやや低い。
- D: 規模を過去の事例からでなく地震学的知見から推定したが、地震学的知見も不十分で想定規模の信頼性は低い。

発生確率の評価の信頼度

- A: 想定地震と同様な過去の地震データが比較的多く、発生確率を求めるのに十分な程度あり、発生確率の値の信頼性は高い。
- B: 想定地震と同様な過去の地震データが多くはないが、発生確率を求め得る程度にあり、発生確率の値の信頼性は中程度である。
- 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。
- D: 想定地震と同様な過去の地震データがほとんど無く、地震学的知見等から発生確率の値を推定したため、発生確率の値の信頼性は低い。今後の新しい知見により値が大きく変わり得る。

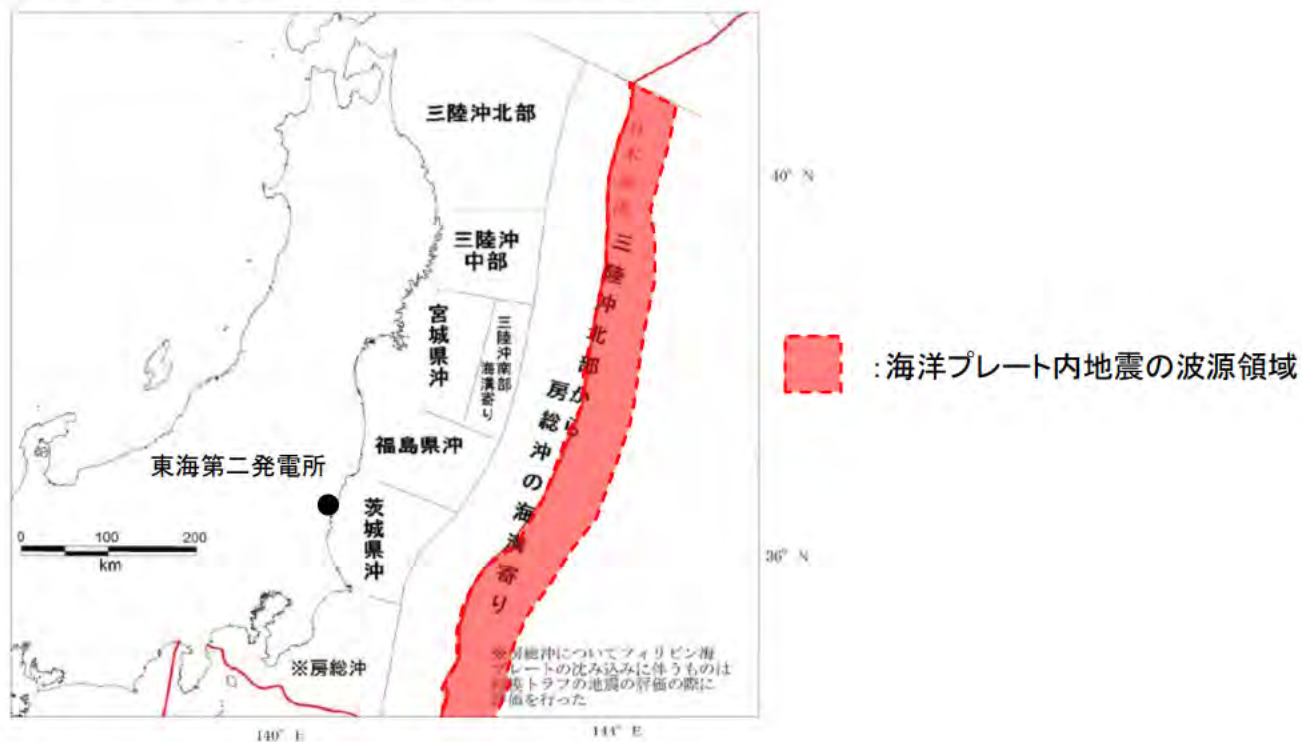
(地震調査研究推進本部(2012))

- 想定される海洋プレート内地震は国内外で最大規模の地震であること及び地震調査研究推進本部(2012)は、次の地震の規模を1933年昭和三陸沖地震津波と評価していることを踏まえ、断層モデルは、1933年昭和三陸地震津波を基本とする。

津波波源

- 地震調査研究推進本部(2012)は、1933年の「三陸地震」についてのモデル(kanamori,1971,1972;Ben-Menaheem,1977;他)を参考にして、同様な地震は、三陸沖北部から房総沖の海溝寄りの領域内のどこでも発生するとしている。

日本海溝沿いにどこでも発生し得るものとして波源を設定

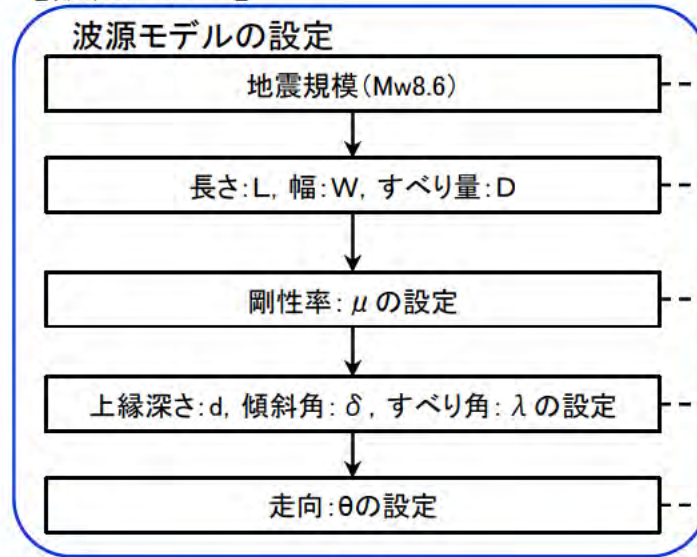


日本海溝沿いにおけるプレート間地震の地震発生領域区分
(地震調査研究推進本部(2012)に加筆)

- 以上より、海洋プレート内地震津波の発生領域は、三陸沖北部から房総沖までとした。

三陸沖北部から房総沖の海溝寄りに想定する正断層型の津波波源(波源モデルの設定)

【設定フロー】

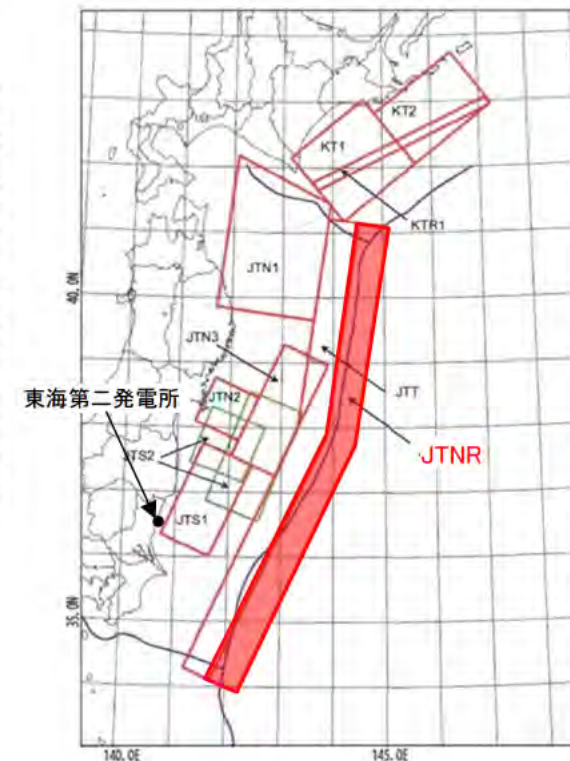


【設定根拠】

- 土木学会(2002)による1611年の津波が海洋プレート内地震であった場合の地震規模 Mw8.6に基づき設定
- 1933年昭和三陸沖地震の断層パラメータを基本に, 土木学会(2002)のスケールン則に基づき設定
- 土木学会(2002)に基づき設定
- 土木学会(2002)の1933年昭和三陸沖地震の断層パラメータに基づき設定
- 土木学会(2011)による1933年昭和三陸沖地震及び1677年房総沖地震の走向を参考に設定



パラメータ	設定値
Mw	8.6
長さ:L (km)	283.0
幅:W (km)	50.0
すべり量:D (m)	10.1
剛性率 μ (N/m ²)	7.0×10^{10}
地震モーメント M_0 (Nm)	1.00×10^{22}
上縁深さ:d (m)	1.0
傾斜角: δ (°)	45
すべり角: λ (°)	270
走向: θ (°)	180, 205



海洋プレート内地震の検討領域

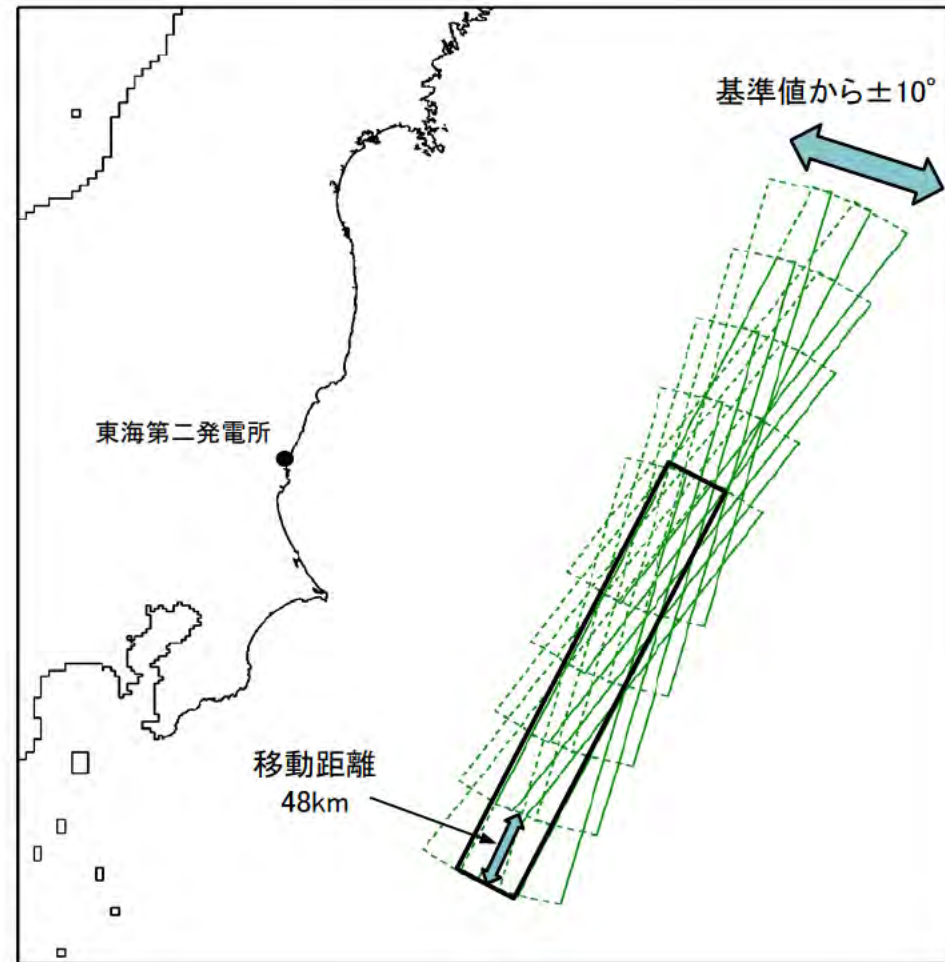
計算条件は東北地方太平洋沖型の津波波源(津波予測解析)と同様

■ 震源位置及び走向

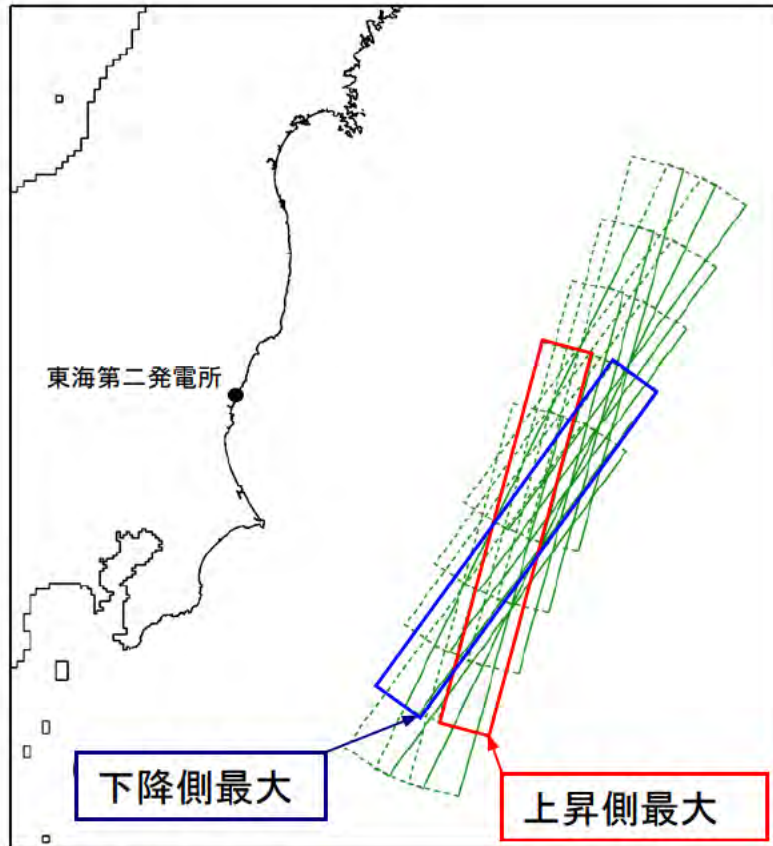
- 土木学会(2002)を参考として、位置及び走向を変動させた概略パラメータスタディを実施した。
- 房総沖の南限を基準に、検討領域の範囲で北へ48kmずつ移動させて発電所への津波水位の影響が最も大きくなる波源モデルを確認した。

概略パラメータスタディ一覧

地震モデル	パラメータ項目	パラメータ変動範囲	ケース数	
正断層型	震源位置	検討領域内に南から北へ走向方向へ48kmごとに移動	5	15
	走向	基準±10°	3	

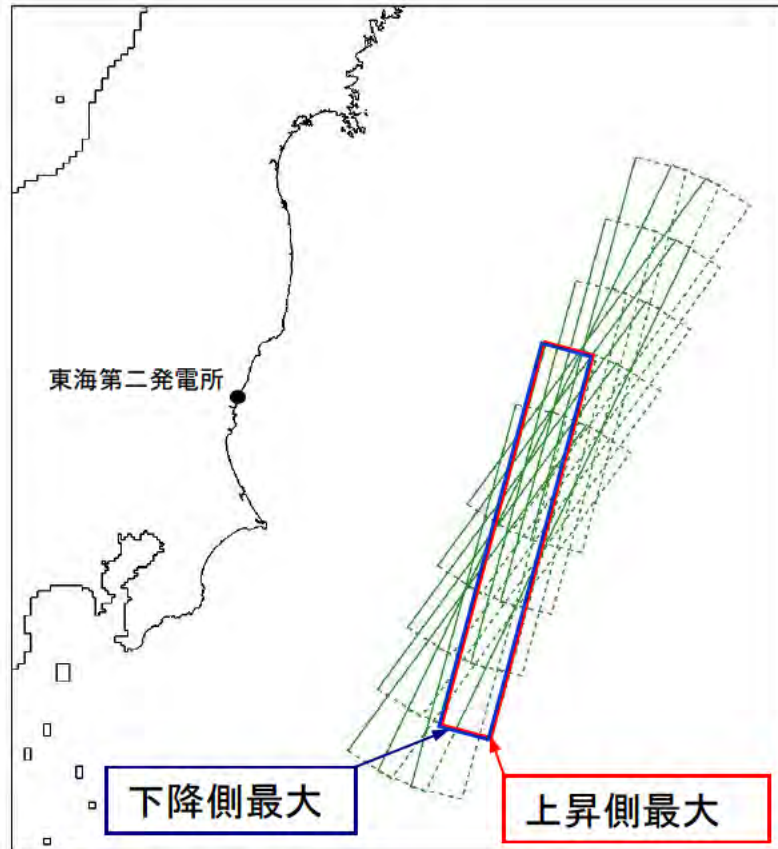


- ・ 防潮堤前面の最大水位上昇量の最大値は6.44m, 取水口前面での最大水位下降量の最大値は-4.19mとなった。
- ・ なお, 北へ48km以上移動させた結果, 最大水位上昇量及び最大水位下降量ともに減少する傾向が確認できたことから, 三陸沖の領域の検討は省略した。



破壊開始点 : 無し
 破壊伝播速度 : ∞
 立ち上がり時間: 0秒

ケース(西傾斜)		防潮堤前面	取水口前面
位置	走向	最大水位上昇量(m)	最大水位下降量(m)
北へ192km移動	-10°	-	-3.50
	±0°	-	-3.31
	+10°	-	-3.17
北へ144km移動	-10°	2.90	-3.72
	±0°	2.90	-4.18
	+10°	3.00	-4.01
北へ96km移動	-10°	4.92	-4.06
	±0°	4.99	-4.05
	+10°	4.90	-3.98
北へ48km移動	-10°	6.44	-3.95
	±0°	4.84	-4.11
	+10°	5.42	-4.19
基準	-10°	4.63	-3.66
	±0°	4.10	-4.12
	+10°	4.56	-3.86

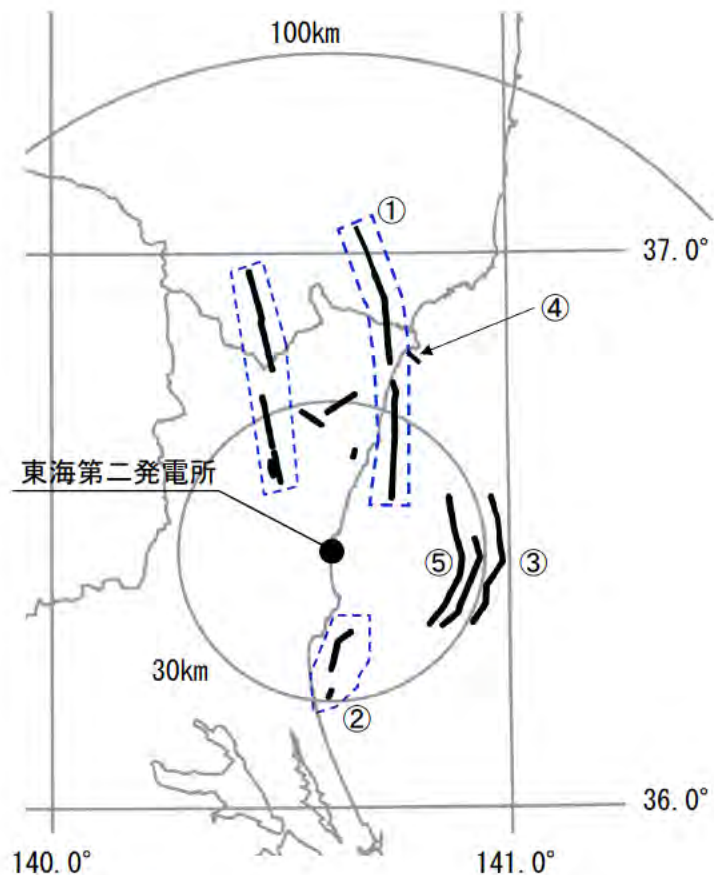


破壊開始点 : 無し
 破壊伝播速度 : ∞
 立ち上がり時間: 0秒

ケース(東傾斜)		防潮堤前面	取水口前面
位置	走向	最大水位上昇量(m)	最大水位下降量(m)
北へ192km移動	-10°	-	-3.02
	±0°	-	-3.27
	+10°	-	-3.18
北へ144km移動	-10°	4.63	-3.90
	±0°	2.90	-3.84
	+10°	3.46	-3.62
北へ96km移動	-10°	4.78	-3.66
	±0°	3.40	-3.87
	+10°	4.62	-3.86
北へ48km移動	-10°	5.02	-4.02
	±0°	4.57	-3.63
	+10°	4.49	-3.58
基準	-10°	3.48	-3.86
	±0°	4.78	-3.91
	+10°	4.91	-3.78

・海洋プレート内地震の正断層モデルについては、プレート間地震の概略パラメータスタディ結果(最大水位上昇量17.60m, 最大水位下降量-5.47m)と比較して、最大水位上昇量及び最大水位下降量の最大値がともに小さいため、詳細パラメータスタディは省略した。

5.3.1 津波波源の設定



同時活動を考慮する断層

敷地周辺の活断層分布

敷地周辺の海域活断層

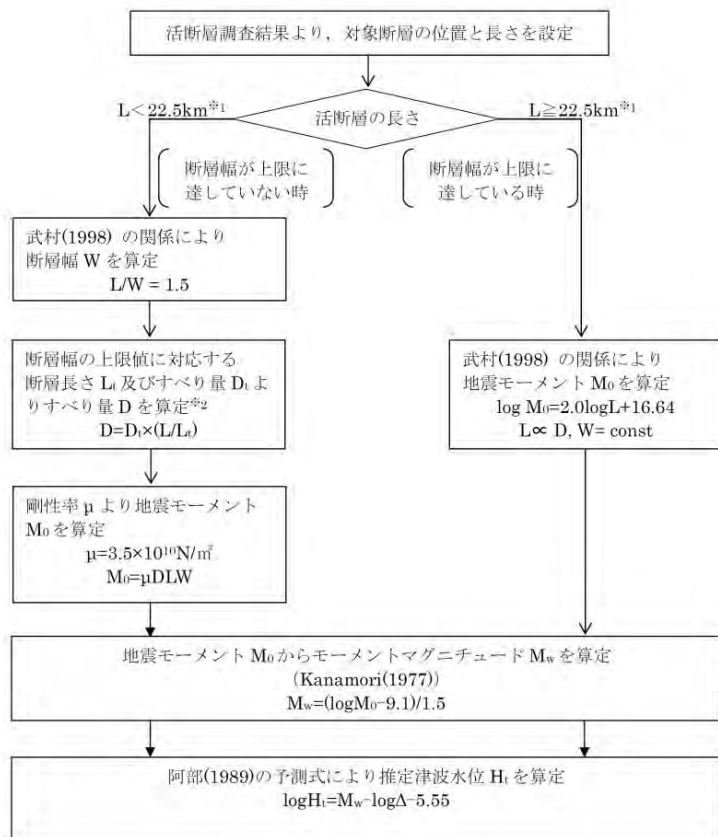
	断層名	断層長さ	敷地からの距離※△
①	F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層の同時活動	58km	40km
②	F3断層～F4断層の同時活動	16km	21km
③	F8断層	26km	28km
④	F11断層	5km	41km
⑤	F16断層	26km	20km

※断層中心から敷地までの平面距離

5.3.2 津波評価

- 海域活断層で波高が最も高くなるのはF1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層の同時活動と推定され、その推定津波高は1.8mである。

【検討フロー】



※1 断層幅の上限 W_L は、地震発生層の厚さ H_0 を 15km とし、傾斜角 δ を $90^\circ(45^\circ \sim 90^\circ$ のうち M_w が最大となる値) とした際には、 $W_L = H_0 / \sin \delta = 15 \text{ km}$ となる。断層幅の上限に対応する断層長さ L_L は、 $L_L = 1.5 W_L = 22.5 \text{ km}$ となる。

※2 断層幅の上限に対応するすべり量 D_L は、モーメントマグニチュードを $M_{wL} = (\log L_L + 3.77) / 0.75 = 6.83$ 、地震モーメントを $M_{0L} = 10^{(1.6M_{wL} + 9.1)} = 2.21 \times 10^{19} \text{ Nm}$ 、剛性率を $\mu = 3.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ とした際には、 $D_L = M_{0L} / (\mu L_L W_L) = 1.87 \text{ m}$ となる。

	地震モデル	Mw	長さ: L (km)	幅: W (km)	すべり量: D (m)	地震モーメント: Mo (N・m)	敷地からの距離: Δ (km)	推定津波高: Ht (m)
①	F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層の同時活動	7.4	58	—	—	1.47×10^{20}	40	1.8
②	F3断層～F4断層の同時活動	6.5	16	10.7	1.33	7.97×10^{18}	21	0.5
③	F8断層	6.9	26	—	—	2.95×10^{19}	28	0.8
④	F11断層	5.5	5	3.3	0.42	2.43×10^{17}	41	0.1
⑤	F16断層	6.9	26	—	—	2.95×10^{19}	20	1.2

- 海域の活断層については、プレート間地震の概略パラメータスタディ結果(最大水位上昇量17.60m)と比較して、最大水位上昇量が小さいことが推定されるため、概略・詳細パラメータスタディは省略した。

5.4 地震に起因する津波の評価 まとめ

- 地震に起因する津波のうち、発電所に最も影響を与える地震津波は、プレート間地震による津波である。
- 最高水位は防潮堤前面でT.P.+17.2mである。
- 最低水位は取水口前面でT.P.-5.3mである。

【概略パラメータスタディ結果】

地震種別	プレート間地震	海洋プレート内地震	海域の活断層による 地殻内地震
波源モデル	茨城県沖から房総沖 に想定する津波波源	三陸沖北部から房総沖の海溝寄りに 想定する正断層型の津波波源	敷地前面海域の活断層に想定する津波波源 (F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層の同時活動)
最大水位上昇量 (防潮堤前面)	17.60m	6.44m	1.8m (阿部(1989)の簡易予測式による推定津波高)
最大水位下降量 (取水口前面)	-5.47m	-4.19m	—



【詳細パラメータスタディ結果】

地震種別	プレート間地震
最大水位上昇量 (防潮堤前面)	16.08m
最大水位下降量 (取水口前面)	-4.97m



地震種別	プレート間地震
最高水位※ (防潮堤前面)	T.P.+17.2m
最低水位※ (取水口前面)	T.P.-5.3m

※潮位及び地殻変動量(2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動量も含む)を考慮