

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

1. 下北海底地すべりと連動型地震の線形足し合わせによる津波水位

- 1. 1 海底地すべりが発生する時間範囲の算定
- 1. 2 線形足し合わせによる水位変動量

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価 1. 下北海底地すべりと連動型地震の線形足し合わせによる津波水位

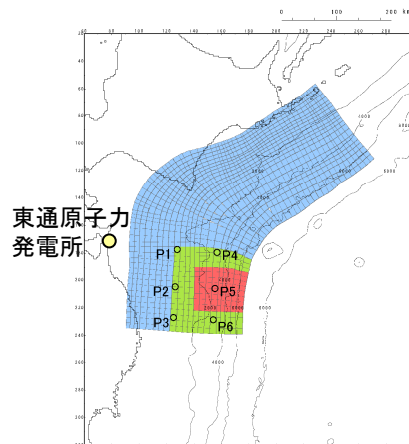
1.1 海底地すべりが発生する時間範囲の算定

S231

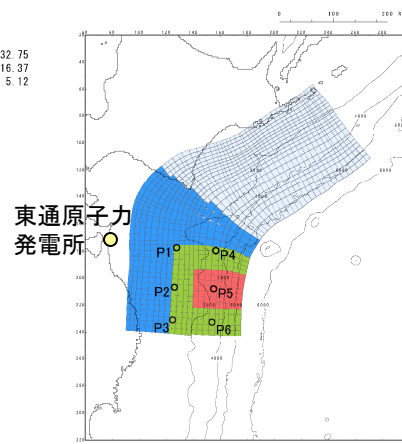
■地震動の到達時間(T_s)の算定

- 各地震の破壊開始点から海底地すべり頂部までの距離(=震源距離)とS波速度(3.4km/s(地震調査研究推進本部(2009)))から、海底地すべり位置に地震動が到達する時間(T_s)を以下のとおり算定した。

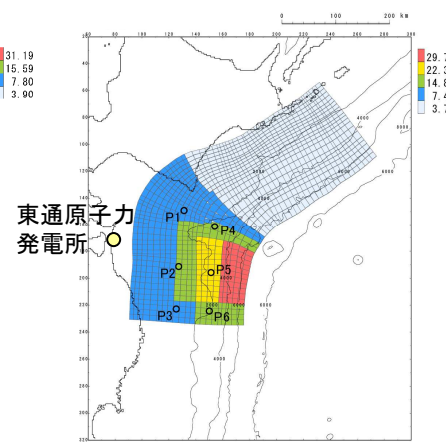
区分	波源モデル	破壊開始点位置	海底地すべり	地震の破壊開始点から海底地すべり頂部までの距離(X)	S波速度	地震動到達時間(T_s)
水位上昇側	基準断層モデル①	P6	下北海底地すべり(SLS-2)	243.6(km)	3.4(km/s)	71.6(s)
水位下降側	基準断層モデル②	P4	下北海底地すべり(SLS-2)	191.5(km)	3.4(km/s)	56.3(s)
	基準断層モデル③	P1	下北海底地すべり(SLS-2)	130.1(km)	3.4(km/s)	38.3(s)



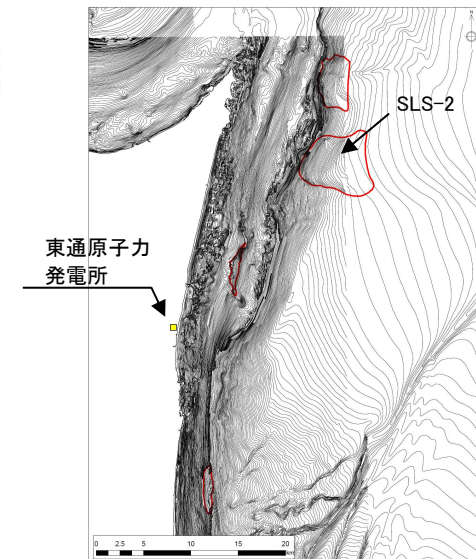
基準断層モデル①
破壊開始点:P6



基準断層モデル②
破壊開始点:P4



基準断層モデル③
破壊開始点:P1



下北太平洋側大陸棚外縁の海底地すべり(SLS-2)

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価 1. 下北海底地すべりと連動型地震の線形足し合わせによる津波水位

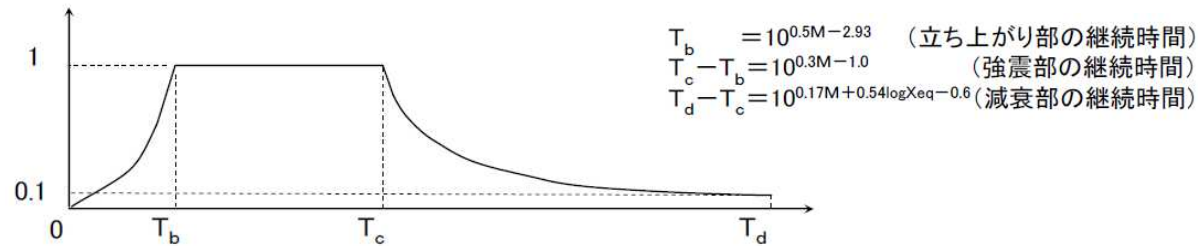
1.1 海底地すべりが発生する時間範囲の算定

S231

 ■地震動継続時間(T_d)の算定

- Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時特性を参考として、海底地すべり位置での地震動継続時間(T_d)を以下のとおり算定した。

区分	波源モデル	破壊開始点	地震規模	各地震の破壊開始点から海底地すべり頂部までの距離(=震源距離)	振幅包絡線の経時特性		
					T_b	T_c	T_d
水位上昇側	基準断層モデル①	P6	9.04	243.6(km)	38.9(s)	90.4(s)	258.5(s)
水位下降側	基準断層モデル②	P4	9.05	191.5(km)	39.4(s)	91.2(s)	239.4(s)
	基準断層モデル③	P1	9.04	130.1(km)	38.9(s)	90.4(s)	210.2(s)



Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時特性

■海底地すべりが発生する時間範囲の算定

- 海底地すべり位置に地震動が到達する時間(T_s)と地震動継続時間(T_d)から、海底地すべりが発生する時間範囲を以下のとおり算定した。

区分	波源モデル	破壊開始点	地震動到達時間(T_s)	地震動継続時間(T_d)	海底地すべりが発生する時間範囲($T_s \sim T_s + T_d$)
水位上昇側	基準断層モデル①	P6	71.6(s)	258.6(s)	71.6(s) ~ 330.2(s)
水位下降側	基準断層モデル②	P4	56.3(s)	239.5(s)	56.3(s) ~ 295.8(s)
	基準断層モデル③	P1	38.3(s)	210.2(s)	38.3(s) ~ 248.5(s)

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価 1. 下北海底地すべりと連動型地震の線形足し合わせによる津波水位

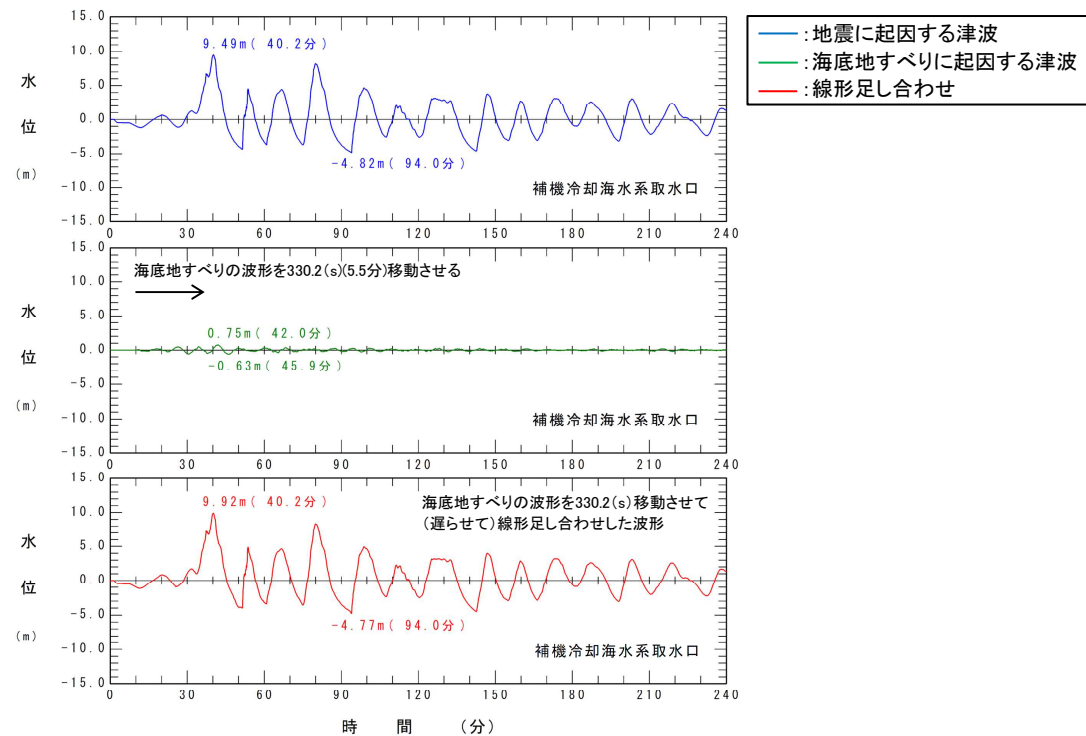
1.2 線形足し合わせによる水位変動量

S231

■水位上昇側

- 連動型地震(基準断層モデル①)と下北海底地すべりの線形足し合わせによる最大水位上昇量を以下に示す。

十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震	海底地すべり	海底地すべりが発生する時間範囲($T_s \sim T_s + T_d$)	補機冷却海水系取水口前面	
			組合せ時間(T_{max})	線形足し合わせによる最大水位上昇量
基準断層モデル①	下北太平洋側大陸棚外縁 SLS-2(二層流モデル)	71.6(s)~330.2(s)	330.2(s)	9.92(m)



VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価 1. 下北海道地すべりと連動型地震の線形足し合わせによる津波水位

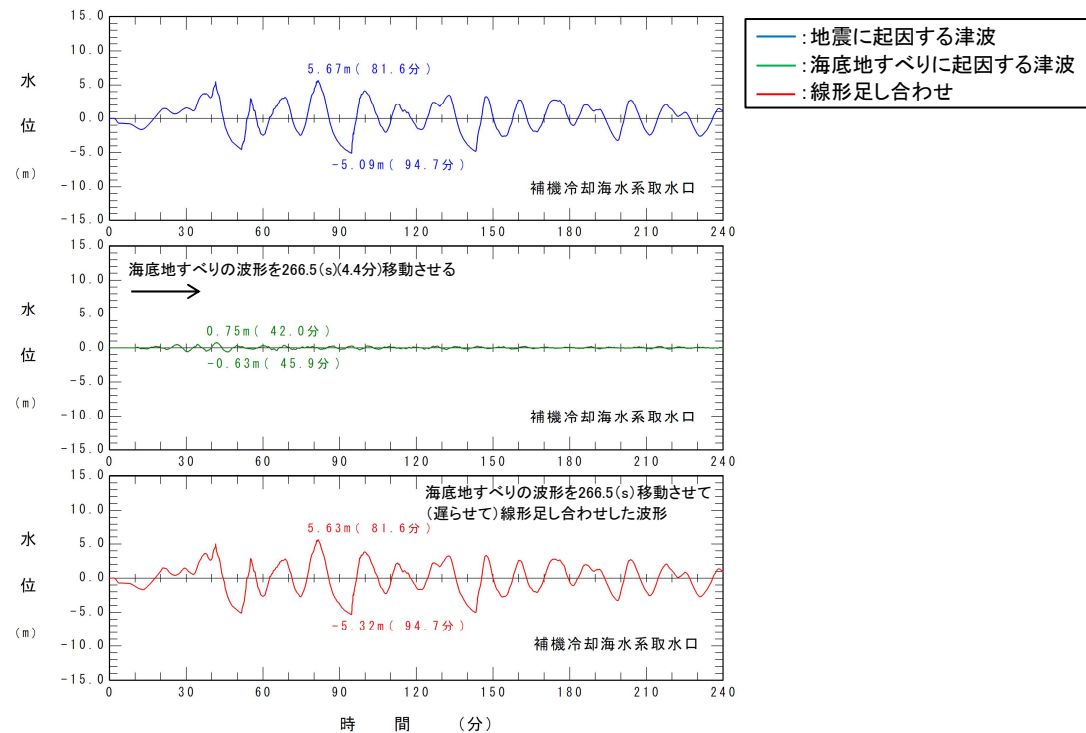
1.2 線形足し合わせによる水位変動量

S231

■水位下降側(1/2)

- 連動型地震(基準断層モデル②)と下北海道地すべりの線形足し合わせによる最大水位下降量を以下に示す。

十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震	海底地すべり	海底地すべりが発生する時間範囲($T_s \sim T_s + T_d$)	補機冷却海水系取水口前面	
			組合せ時間(T_{max})	線形足し合わせによる最大水位下降量
基準断層モデル②	下北太平洋側大陸棚外縁 SLS-2(二層流モデル)	56.3(s)~295.8(s)	266.5(s)	-5.32(m)



VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価 1. 下北海底地すべりと連動型地震の線形足し合わせによる津波水位

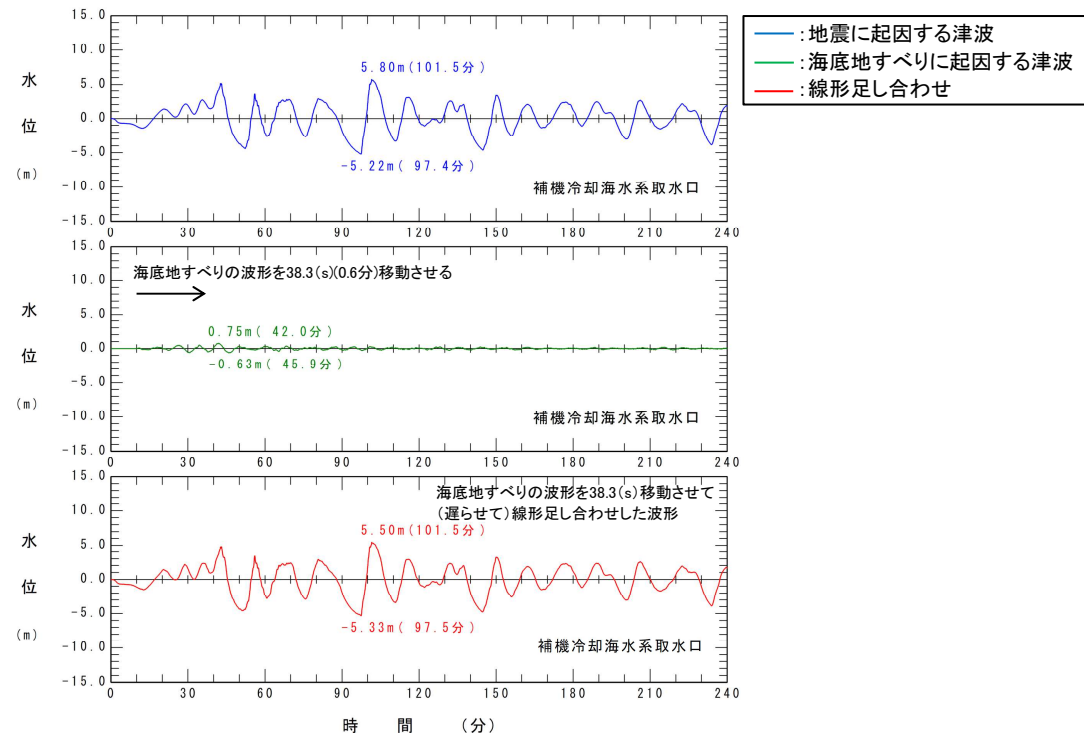
1.2 線形足し合わせによる水位変動量

S231

■水位下降側(2/2)

- 連動型地震(基準断層モデル③)と下北海底地すべりの線形足し合わせによる最大水位下降量を以下に示す。

十勝沖・根室沖から岩手県沖 北部の連動型地震	海底地すべり	海底地すべりが発生する 時間範囲($T_s \sim T_s + T_d$)	補機冷却海水系取水口前面	
			組合せ時間(T_{max})	線形足し合わせによる 最大水位下降量
基準断層モデル③	下北太平洋側大陸棚外縁 SLS-2(二層流モデル)	38.3(s)~248.5(s)	38.3(s)	-5.33(m)



VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

2. 海底地すべりの発生を想定する時間範囲の合理性

2. 1 検討方針

2. 2 海底地すべりの発生メカニズム

2. 3 2018年インドネシア・スラウェシ島の地震と海底地すべりに伴う津波

2. 4 まとめ

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

2. 海底地すべりの発生を想定する時間範囲の合理性

2.1 検討方針

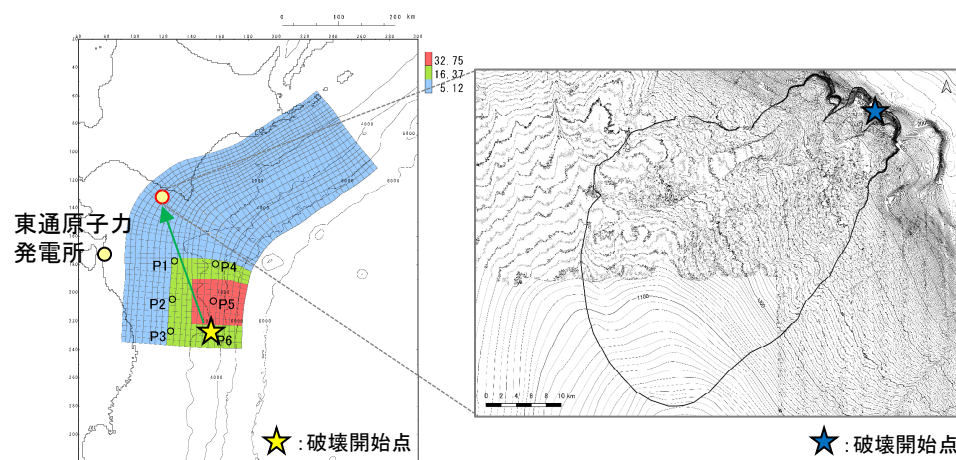
S223

- 地震による地震動が海底地すべり位置に到達する時間(T_s)から, Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時特性から得られる地震動継続時間(T_d)の範囲($T_s \sim T_s + T_d$)で海底地すべりの発生を想定することの合理性について, 海底地すべりの発生メカニズムに関する知見及び2018年インドネシア・スラウェシ島で発生した地震と海底地すべりに伴う津波の事例から確認する。

■ 海底地すべりが発生する時間範囲の設定方法

① 地震動の到達時間(T_s)の算定

- 地震の破壊開始点から海底地すべり頂部までの距離(=震源距離)とS波速度(3.4km/s(地震調査研究推進本部(2009)))から, 海底地すべり位置に地震動が到達する時間(T_s)を算定する。

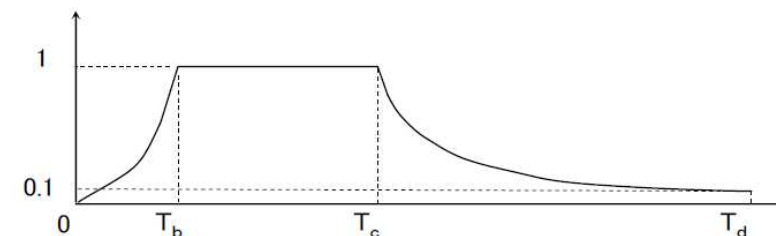


十勝沖・根室沖から岩手県沖北部
の連動型地震
水位上昇量決定ケース
(破壊開始点:P6)

日高舟状海盆の海底地すべり
(浦河沖の海底地すべり)

② 海底地すべり位置での地震動継続時間($T_s \sim T_s + T_d$)の算定

- Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時特性から海底地すべり位置での地震動継続時間($T_s \sim T_s + T_d$)を算定する。



$$T_b = 10^{0.5M - 2.93} \quad (\text{立ち上がり部の継続時間})$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M - 1.0} \quad (\text{強震部の継続時間})$$

$$T_d - T_c = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6} \quad (\text{減衰部の継続時間})$$

Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時特性

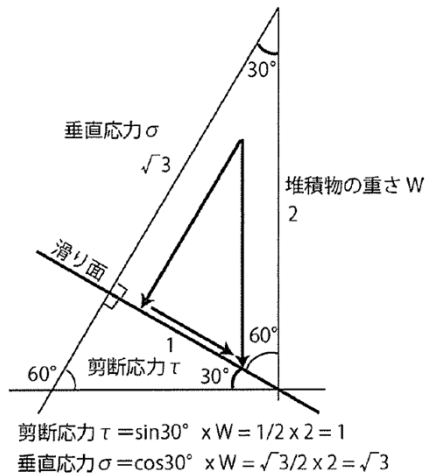
VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

2. 海底地すべりの発生を想定する時間範囲の合理性

2.2 海底地すべりの発生メカニズム

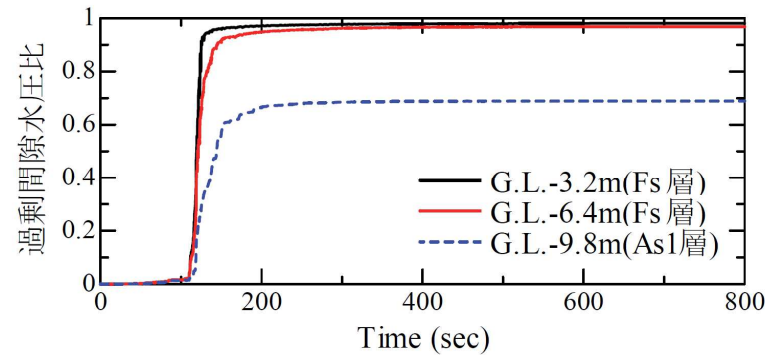
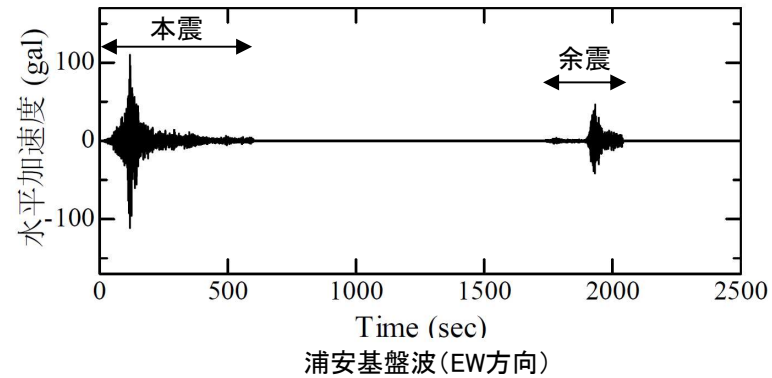
S223

- 川村(2022)は、海底地すべりの発生原因について、陸上でも海底でも斜面で地すべりが起きるのは斜面の安定性が失われる(土のせん断強度がせん断応力を下回る)ことが原因であるとし、その要因については、地震動によるせん断応力の増加や液状化によるせん断強度の低下などがあるとしている。
- 上田ほか(2014)は、2011年東北地方太平洋沖地震において液状化が発生した浦安市高洲地区を対象に、同地区の地盤情報に基づく地盤モデル、観測記録※を用いた地震応答解析を実施し、地震動(本震)の継続時間中に過剰間隙水圧比が上昇し、液状化が発生していたことを示している。
※:K-NET浦安で得られた観測記録(EW方向)を等価線形化法を用いて基盤面まで引き戻した波形。



せん断強度 = $\tan \phi \times \cos \theta$
× (上載圧 W - 間隙水圧) + 粘着力
せん断応力 = $\sin \theta \times$ 上載圧 W

応力バランスの模式図
(川村(2022))



過剰間隙水圧比の時刻歴(非排水解析)(本震のみ考慮)

2011年東北地方太平洋沖地震における浦安市の地震応答解析結果
(上田ほか(2014)に一部加筆)

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

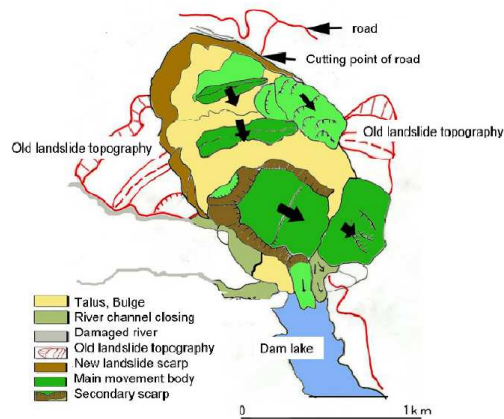
2. 海底地すべりの発生を想定する時間範囲の合理性

2.2 海底地すべりの発生メカニズム

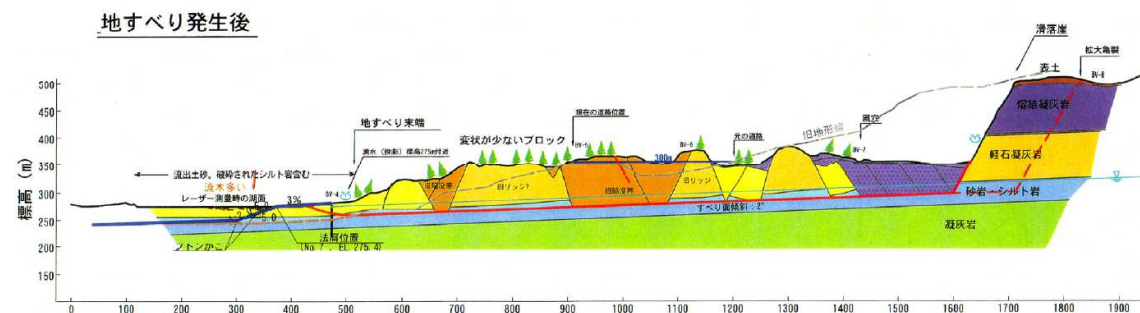
S223

- 風間ほか(2011)は、2008年岩手・宮城内陸地震において、荒砥沢ダム上流部で発生した巨大地すべり(最大幅約900m, 最大長さ約1300m, 最大移動距離約320m)の発生メカニズムについて、ダムサイトで観測された強振動記録を基にした滑動解析から、地震動による繰り返しせん断による有効応力の低下(過剰間隙水圧の上昇)が主因であった可能性を指摘している。

■荒砥沢ダム上流部で発生した巨大地すべり

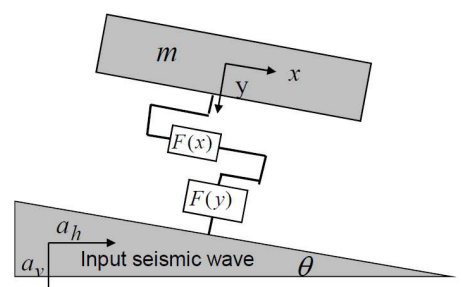


平面図

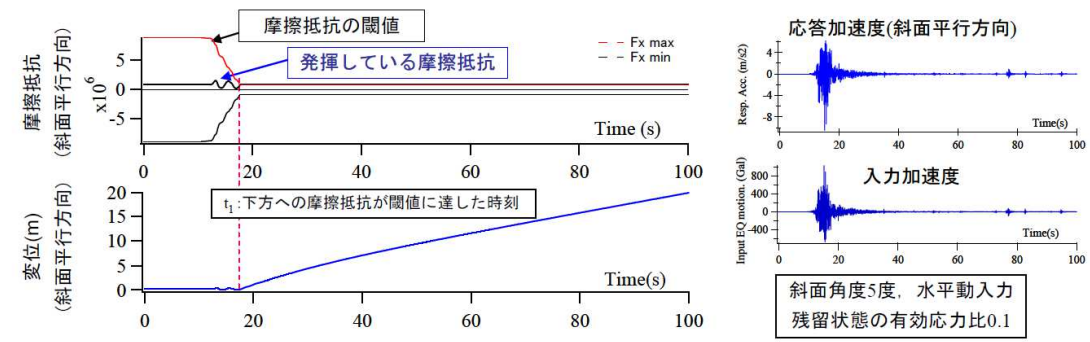


断面図

■有効応力の低下を考慮した滑動解析



すべりモデル(1質点モデル)※



解析結果

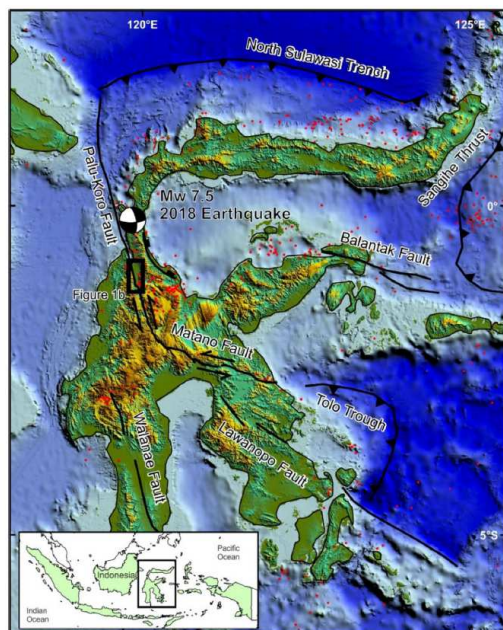
※: 主すべり土塊を角度θの基礎地盤に設置し、斜面直交方向・平行方向にばねとダッシュポットを連結。さらに、スライダを設置。

2.3 2018年インドネシア・スラウェシ島の地震と海底地すべりに伴う津波

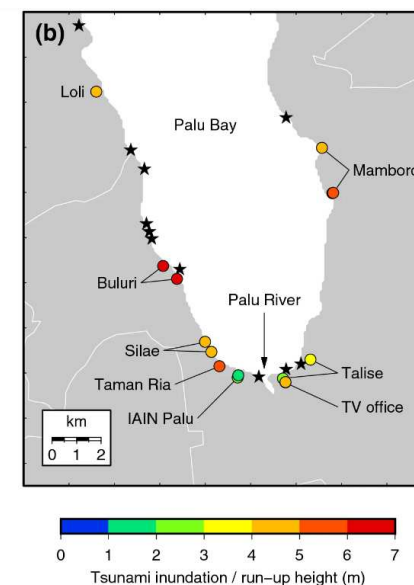
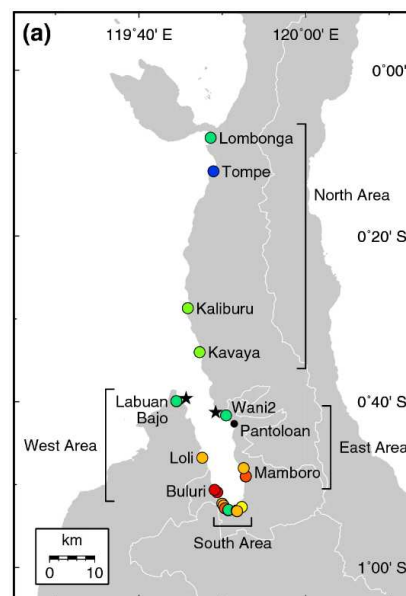
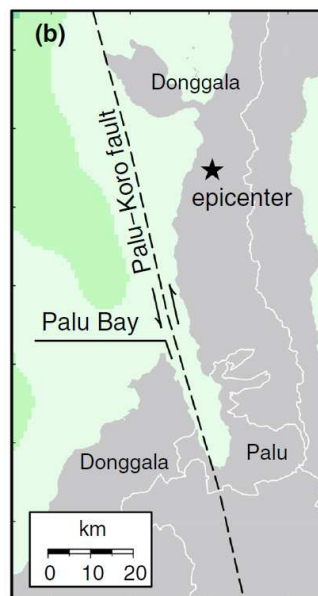
S223

■津波の概要

- ・ インドネシア・スラウェシ島は、太平洋プレート、オーストラリアプレート、ユーラシアプレートが衝突する三重会合点に位置する。スラウェシ島中央部には主要な活断層であるパル・コロ断層が横断しており、同断層の活動は左横ずれの傾向がある。2018年の地震は、パル・コロ断層の活動により発生した地震(左横ずれ)であり、その地震規模はMw7.5とされる(Patria and Purna(2020))。
- ・ 2018年の地震では津波も発生し、震源付近の北部地域(Kavaya~Lomboka)の浸水・遡上高は3m未満であったのに対し、震源の南に位置するパル湾内の遡上高は5mを上回り、湾奥では10mを上回る遡上高も確認されている(Mikami et al.(2019), Widiyanto et al.(2019))。
- ・ 震源付近の北部地域と比較して、パル湾内の遡上高が大きくなった要因について、地震により発生した海底地すべりに伴う津波とする知見(Mikami et al.(2019), Liu et al.(2020), Chatuphorn et al.(2022))の他に、地震と海底地すべりの組合せ津波とする知見(Shambach et al.(2021))もある。
- ・ Liu et al.(2020), Shambach et al.(2021)は、パル湾内における地震前の深浅測量データは十分な解像度が無いため、津波発生要因の議論には、不確実性があるとしている。



インドネシア・スラウェシ島付近の断層帯及び
2018年の地震の震源位置 (Patria and Purna(2020))



2018年の地震の震源付近及びパル湾内における浸水・遡上高の分布
(Mikami et al.(2019))

パル湾内で確認された痕跡高、検潮記録、目撃証言等を再現するモデルに係る知見から、同湾内の遡上高が大きくなった要因は、海底地すべり伴う津波の影響が大きいと考えられることから、海底地すべりに関する知見を用いて以降考察する。

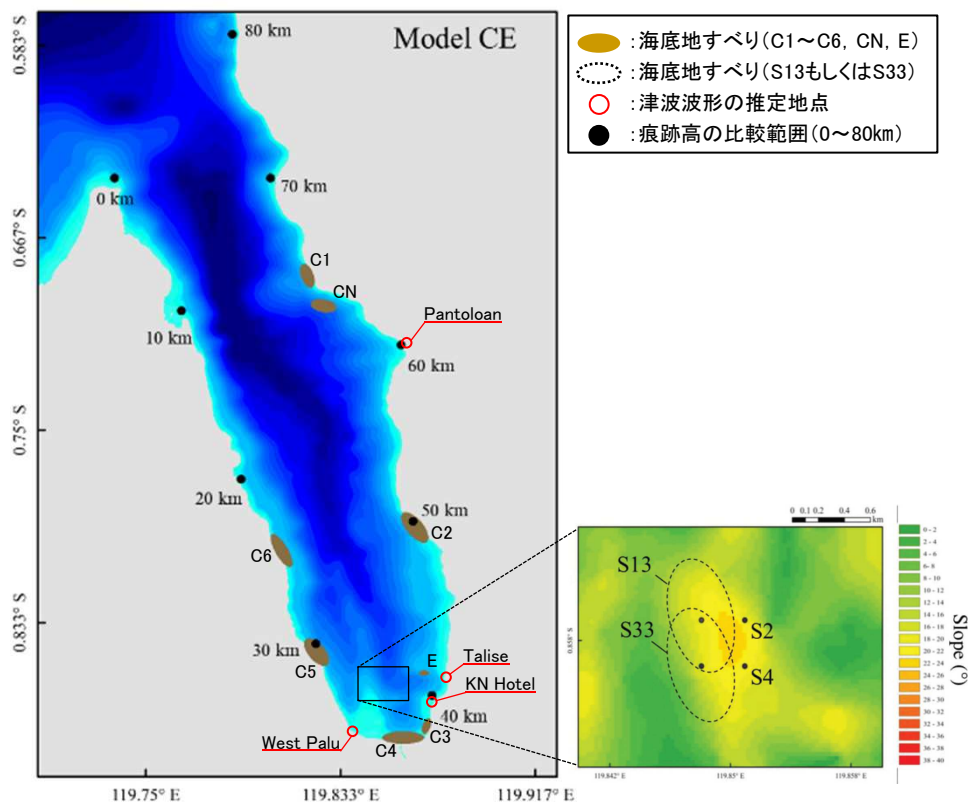
2.3 2018年インドネシア・スラウェシ島の地震と海底地すべりに伴う津波

S223

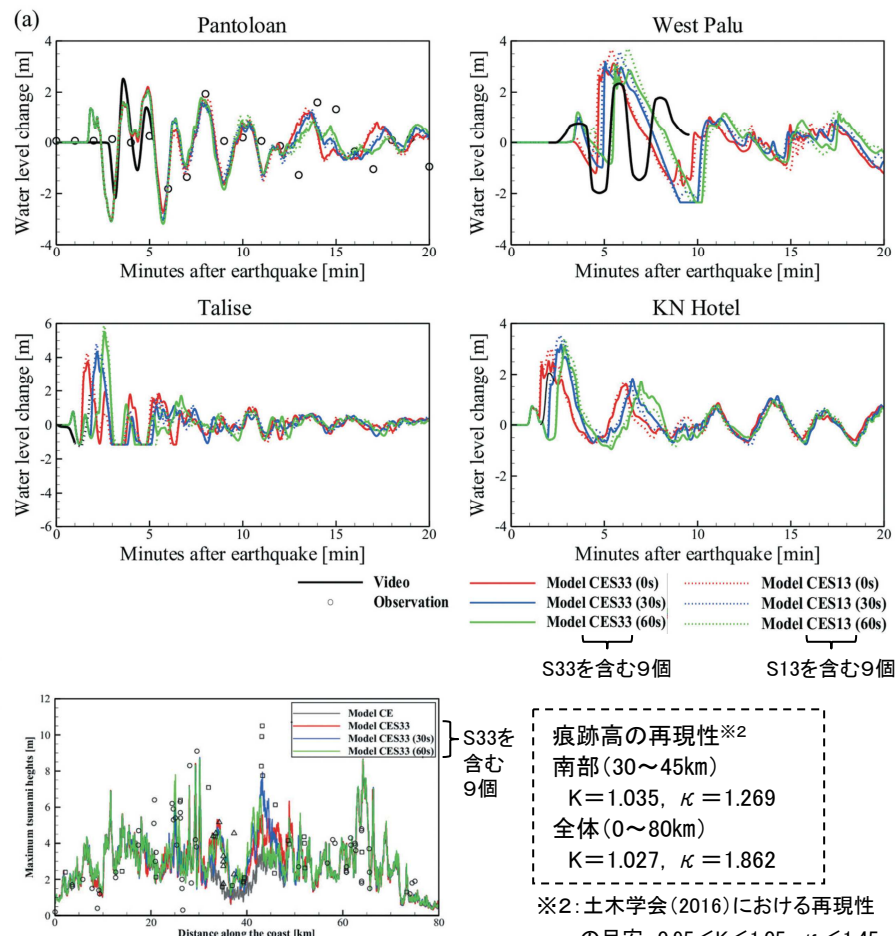
■津波波形及び痕跡高の再現シミュレーション

- Nagai et al.(2021)は、既往研究による海底地形調査、同研究での海底斜面勾配分析に基づき設定した複数の海底地すべり(C1~C6, CN, E, S13もしくはS33※1, 全9個)を対象に、ビデオ画像から推定された津波波形及びパル湾周辺で確認された痕跡高の再現シミュレーション(二層流モデル)を実施。
- 地震と同時に海底地すべりが発生することを基本としたうえで、海底地すべりS33の発生を約60秒遅らせると、他の海底地すべりによる津波と重なり合い、パル湾南部のWest Palu, Talise, KN Hotelの津波波形及びパル湾南部(30km~45km)の痕跡高の再現性が向上するとしている。

※1 : Danny et al.(2021)が海底地形調査から推定した海底地すべりを基に、海底斜面勾配分析から海底地すべりS13, S33を推定し、両地すべりを対象に津波シミュレーションを実施。



海底地すべり位置、津波波形の推定地点及び痕跡高の比較範囲 (Nagai et al.(2021))に一部加筆)



津波波形及び痕跡高の再現シミュレーション結果(Nagai et al.(2021))

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

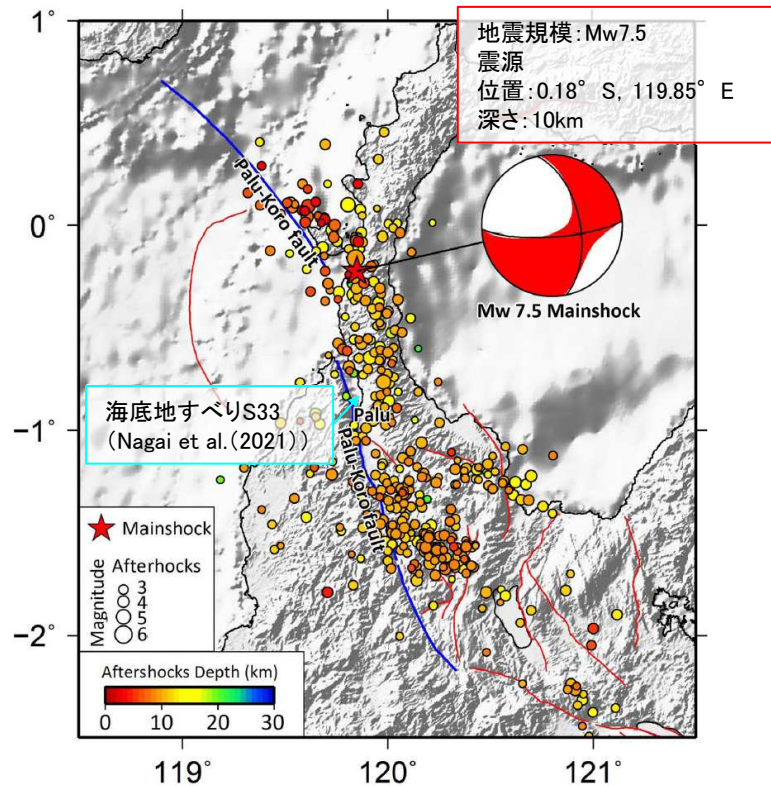
2. 海底地すべりの発生を想定する時間範囲の合理性

2.3 2018年インドネシア・スラウェシ島の地震と海底地すべりに伴う津波

S223

■海底地すべりの発生タイミングに関する考察

- Nagai et al.(2021)による地震発生60秒後に発生した海底地すべりS33が、パル・コロ断層の活動により発生した地震動継続時間中に発生したものを確認するため、Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時特性から得られる地震動継続時間と比較した。
- 海底地すべりS33位置での地震動継続時間は地震発生後22.4秒～95.9秒であることから、海底地すべりS33は地震動継続時間中に発生したものと考えられる。



2018年インドネシア・スラウェシ島で発生した地震の震源と海底地すべりのS33位置 (Pepen et al.(2019)に一部加筆)

【海底地すべりS33位置への地震動到達時間(T_s)の算定】

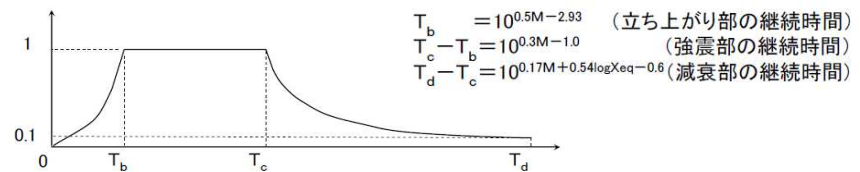
震源距離	S波速度	地震動到達時間(T_s)
76.1 (km)	3.4 (km/s)	22.4 (s)

【Noda et al.(2002)から得られる地震動継続時間(T_d)の算定】

地震規模 (Mw)	震源距離 (X_{eq})	振幅包絡線の経時特性		
		T_b	T_c	T_d
7.5	76.1 (km)	6.6 (s)	24.4 (s)	73.5 (s)

【海底地すべりS33位置での地震動継続時間($T_s \sim T_s + T_d$)】

地震動到達時間 (T_s)	地震動継続時間 (T_d)	海底地すべり位置での地震動継続時間 ($T_s \sim T_s + T_d$)
22.4 (s)	73.5 (s)	22.4 (s) ~ 95.9 (s)



海底地すべりS33位置での地震動継続時間の算定

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

2. 海底地すべりの発生を想定する時間範囲の合理性

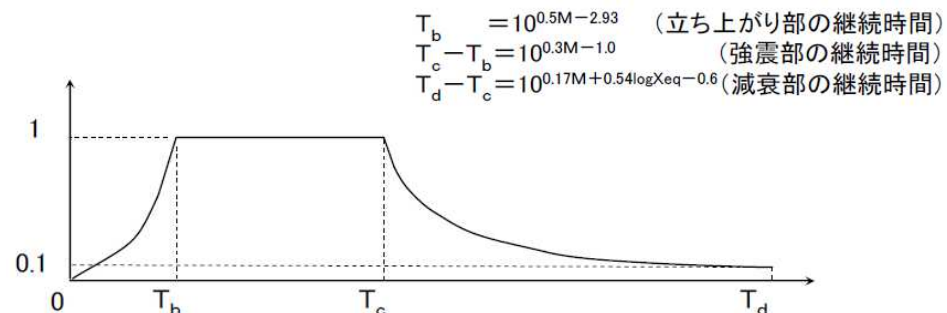
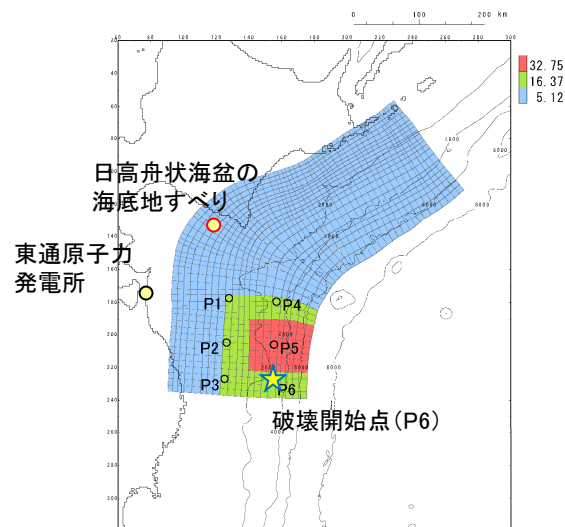
2.4 まとめ

S223

- 海底地すべりの発生メカニズムに関する知見及び2018年インドネシア・スラウェシ島の地震 (Mw7.5) と海底地すべりに伴う津波の事例から, Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時特性から得られる地震動継続時間の範囲で海底地すべりの発生を想定することは合理的である。

■連動型地震(基準断層モデル①)の地震動継続時間(T_d)

区分	波源モデル	破壊開始点	地震規模	地震の破壊開始点から海底地すべり頂部までの距離(=震源距離)	振幅包絡線の経時特性		
					T _b	T _c	T _d
水位上昇側	基準断層モデル①	P6	9.04	258.3(km)	38.9(s)	90.4(s)	263.9(s)



Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時特性

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)

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

3. 組合せ時間算定位置の妥当性

- 3. 1 検討方針
- 3. 2 連動型地震の津波特性
- 3. 3 まとめ

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価 3. 組合せ時間算定位置の妥当性

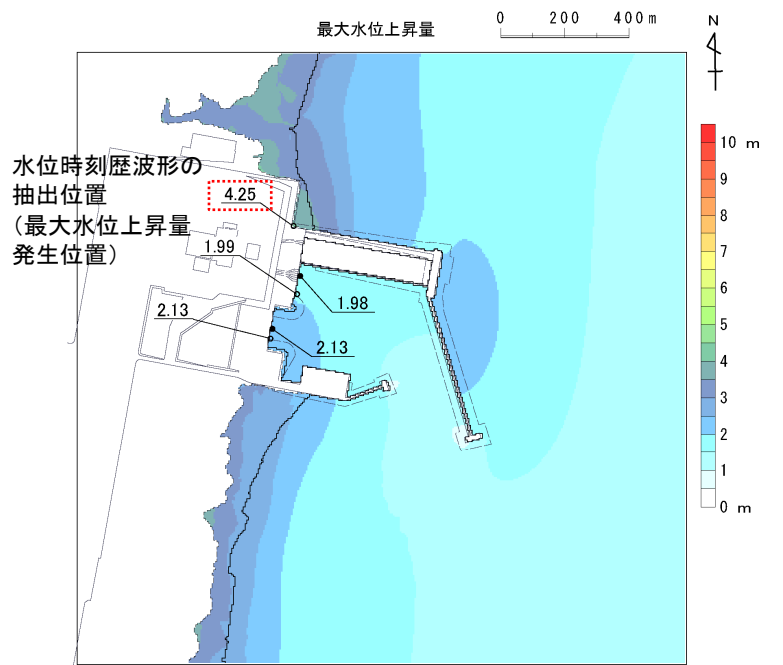
3.1 検討方針

S223

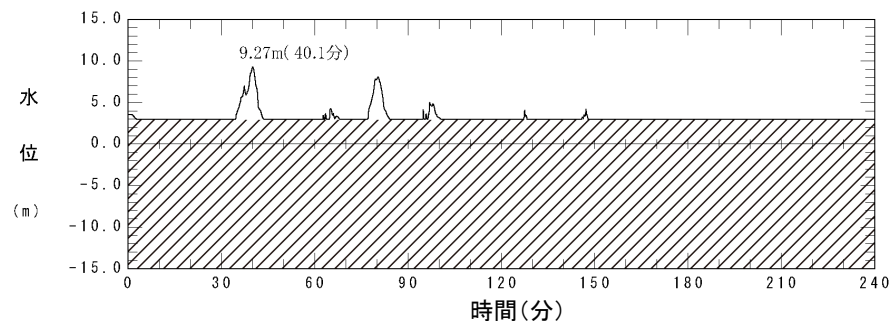
- 補機冷却海水系取水口前面及び取水口前面を組合せ時間の算定位置として代表させることの妥当性について、連動型地震に起因する津波の津波特性(周期, 波長)及び発電所周辺への津波来襲特性から確認する。

【組合せ時間算定位置の選定】

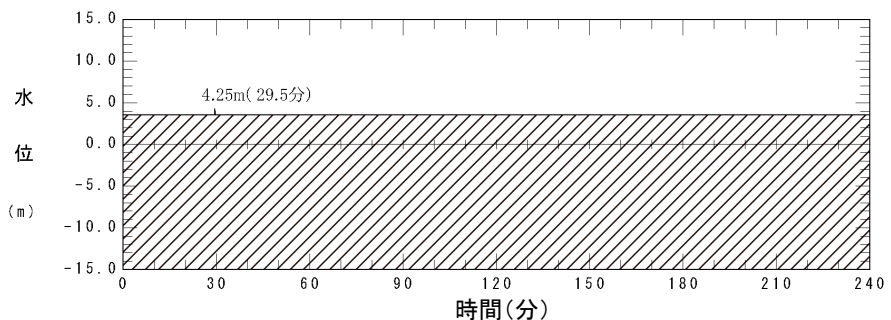
- 敷地前面(遡上域)の組合せ時間算定位置は、連動型地震と日高舟状海盆の海底地すべりに伴う津波の最大水位上昇量分布の比較から、日高舟状海盆の海底地すべりに伴う津波の最大水位上昇量発生位置を代表地点に選定。
- 日高舟状海盆の海底地すべりに伴う津波は、連動型地震に伴う津波よりも早く敷地前面(遡上域)に到達するとともに、第1波のみしか陸域に遡上しないことから、海底地すべりが発生する時間範囲: 76.0s~339.9sでは、連動型地震に伴う津波の水位上昇に影響しないことを確認。
- 放水路護岸前面については、日高舟状海盆の海底地すべりに伴う津波の津波水位は、放水路導流堤(T.P.+3.1m)より小さく、同位置に津波は到達しない。
- 以上から、連動型地震と日高舟状海盆の海底地すべりととの組合せ時間算定位置は、補機冷却海水系取水口前面及び取水口前面位置の2点とした。



水位時刻歴波形の抽出位置
(日高舟状海盆の海底地すべりに伴う津波の最大水位上昇量分布)



連動型地震に伴う津波(基準断層モデル①)※



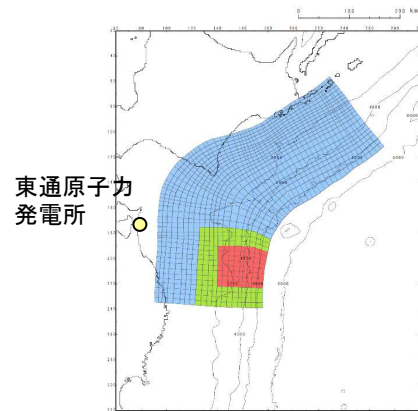
日高舟状海盆の海底地すべりに伴う津波※

※: 図中斜線部は水位抽出点の地盤の標高を示す

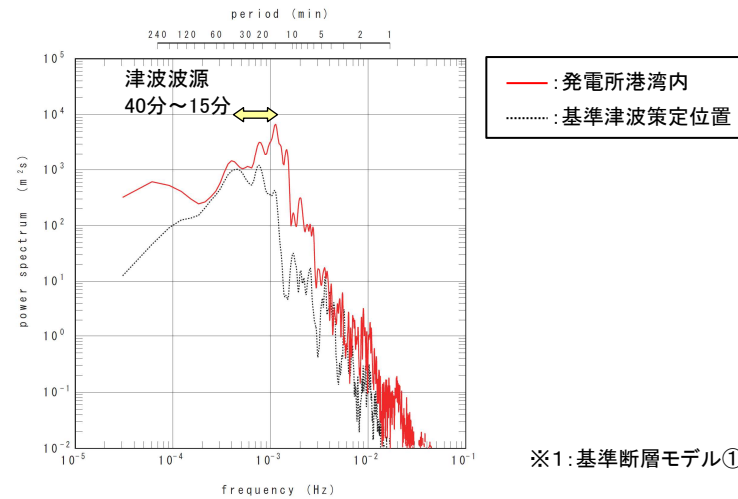
3.2 連動型地震の津波特性

- 連動型地震の周期は15分～40分程度の長周期成分が卓越し、最高水位を決定する第1波の波長は基準津波策定位置で70km程度、発電所周辺で40km程度と長い。
- また、発電所地点の津波高さは10m程度と高いことから、発電所港湾施設や発電所周辺の微地形の影響は小さい。

■周期特性(特性化モデル②※1)

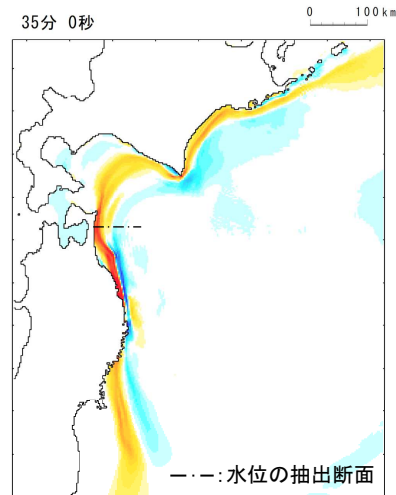


特性化モデル②※1
(大すべり域位置:南へ約100km移動)

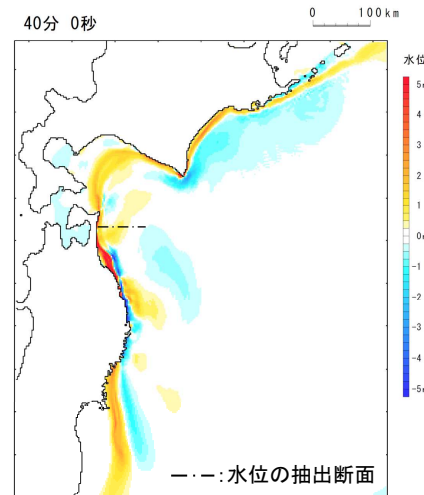


※1: 基準断層モデル①のベースモデル(概略パラメータスタディ決定ケース)

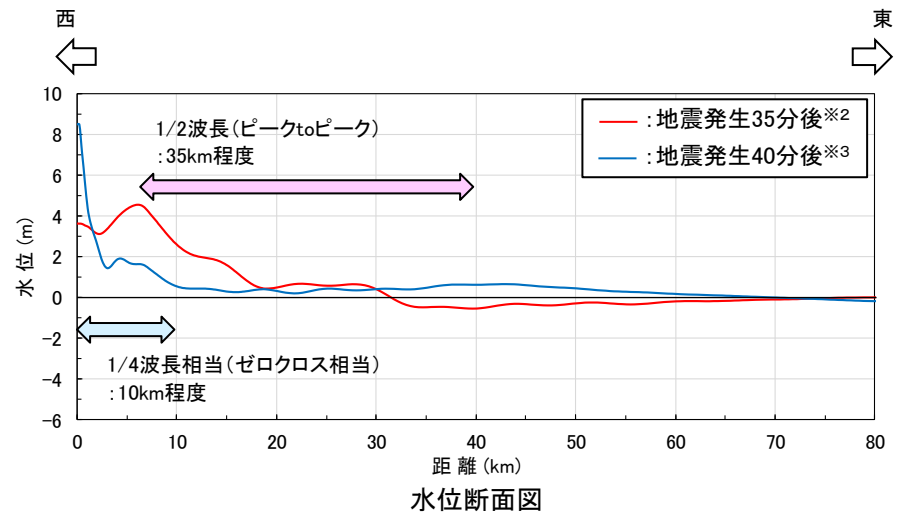
■波長(特性化モデル②)



地震発生35分後※2



地震発生40分後※3



※2: 基準津波策定位置における最高水位発生時間付近
※3: 発電所地点における最高水位発生時間付近

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価 3. 組合せ時間算定位置の妥当性

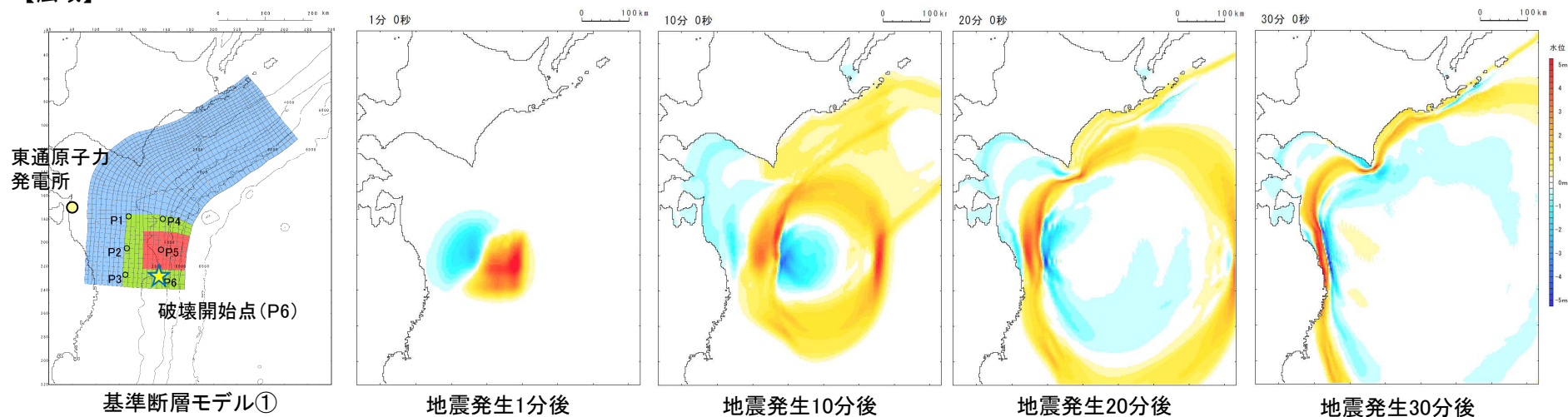
3.2 連動型地震の津波特性

S223

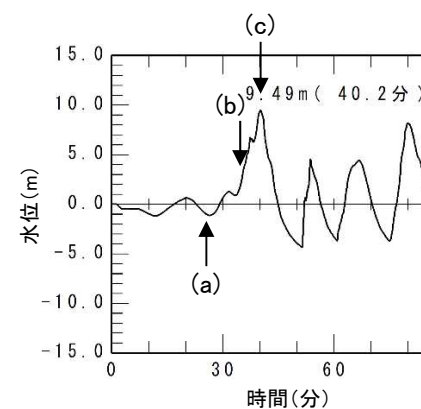
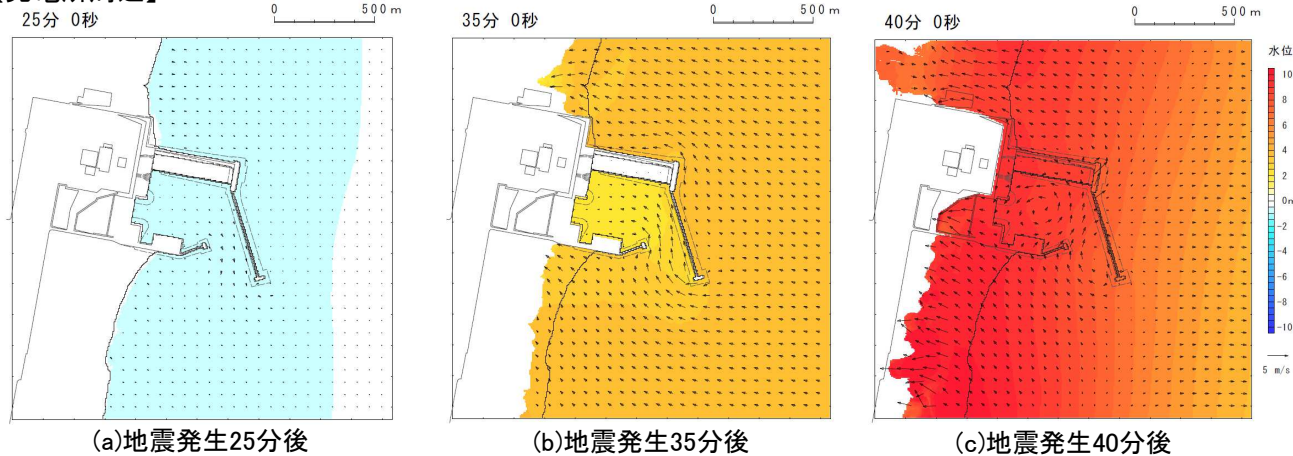
- 連動型地震の周期は15分～40分程度、波長は40km程度と長いことから、遡上域を含む発電所周辺には同じ高さの津波が同じタイミングで来襲する。

■津波伝播特性(基準断層モデル①)

【広域】



【発電所周辺】



補機冷却海水系取水口前面水位時刻歴波形

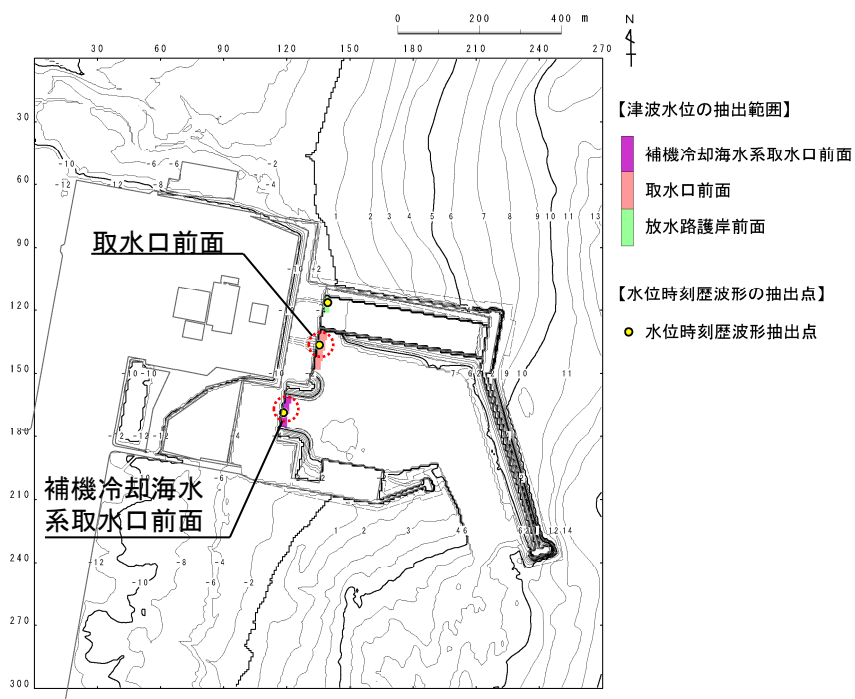
VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価 3. 組合せ時間算定位置の妥当性

3.3 まとめ

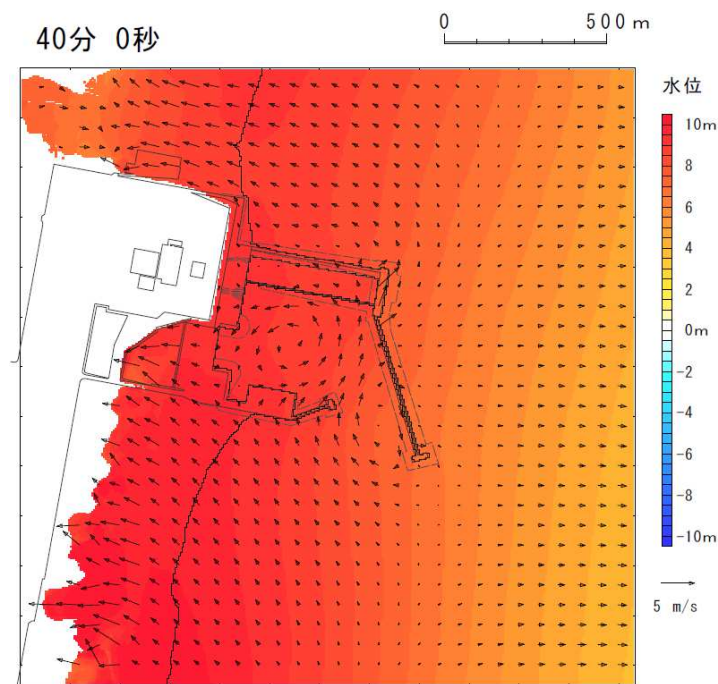
S223

- 連動型地震の周期は15分～40分程度の長周期成分が卓越するとともに、最高水位を決定する第1波の波長は発電所周辺で40km程度と長いことから、遡上域を含む発電所周辺には、同じ高さの津波が同じタイミングで来襲する。
- 以上の連動型地震の津波特性から、敷地前面(遡上域)を含めて、補機冷却海水系取水口前面及び取水口前面を組合せ時間の算定位置として代表させることは妥当である。

■ 海域における組合せ時間算定位置



■ 連動型地震の津波来襲特性



地震発生40分後
(最高水位到達時間付近)

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

4. 地すべり①と地すべり②の同時活動を考慮した組合せ津波が連動型地震(単独)の津波水位を下回る要因

- 4. 1 検討方針
- 4. 2 日高舟状海盆の海底地すべりの津波特性
- 4. 3 連動型地震と組合せ津波の津波伝播特性の比較
- 4. 4 まとめ

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

4. 地すべり①と地すべり②の同時活動を考慮した組合せ津波が連動型地震(単独)の津波水位を下回る要因

4.1 検討方針

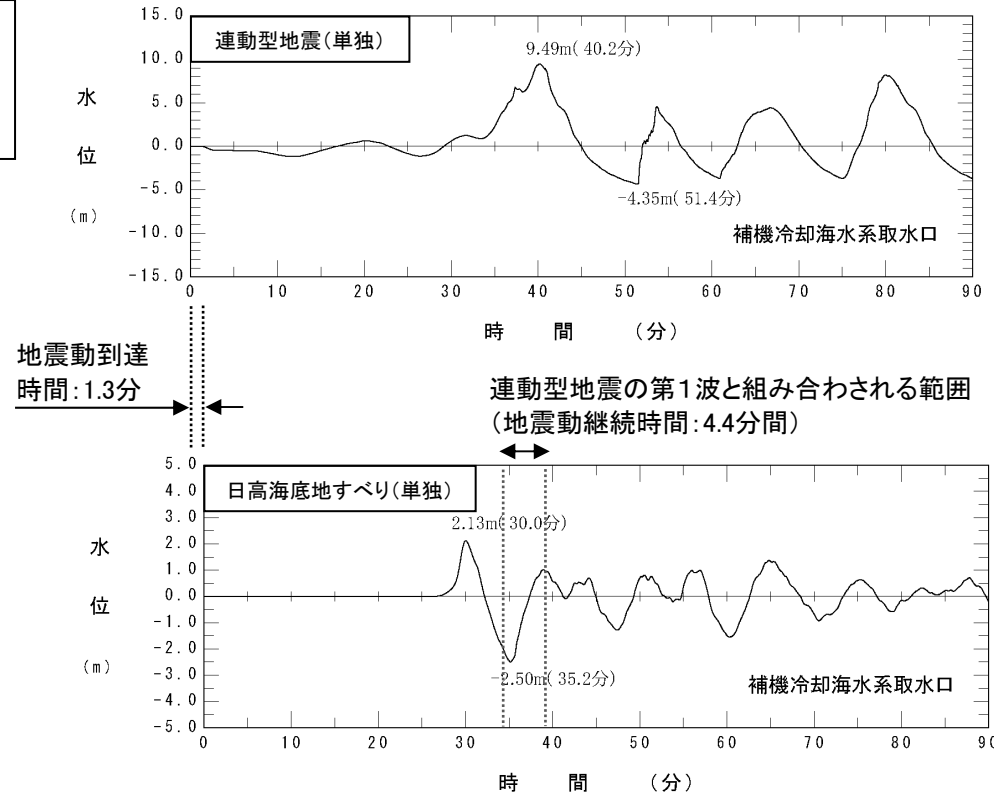
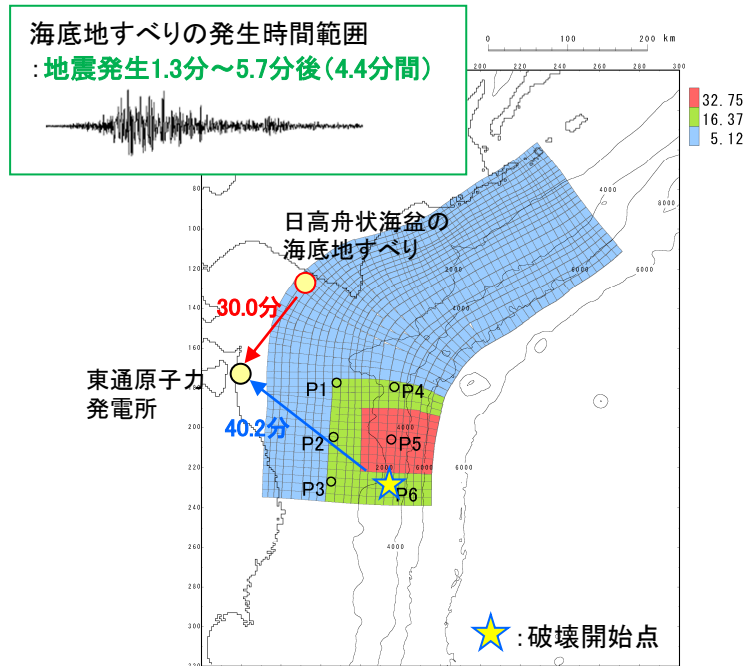
S223

- 各津波波源と発電所の位置及び海底地すべりの発生時間範囲の関係から、日高舟状海盆の海底地すべりに伴う津波が先に発電所に到達するため、発電所地点では、連動型地震の第1波(押し波)と日高海底地すべりの第2波(押し波)が組み合わせられる。

【各津波の最高水位到達時間及び海底地すべりの発生時間範囲の関係】

- 連動型地震(単独)の最高水位到達時間: 40.2分
- 海底地すべり(単独)の最高水位到達時間: 30.0分
- 海底地すべりの発生時間範囲: 地震発生1.3分~5.7分後(4.4分間)

【発電所地点(補機冷却海水系取水口前面位置)における水位時刻歴波形】



組合せ津波の水位が連動型地震(単独)津波の水位を下回る要因について、日高舟状海盆の海底地すべりの津波特性(水位変動量、周期、波長)及び連動型地震(単独)と組合せ津波の津波伝播特性の比較から分析する*。

*: 連動型地震の活動に伴う地殻変動(初期海面変動)が、日高海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響の詳細は、補足説明資料「VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価 5. 連動型地震の活動に伴う地殻変動が日高舟状海盆の海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響」に記載。

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

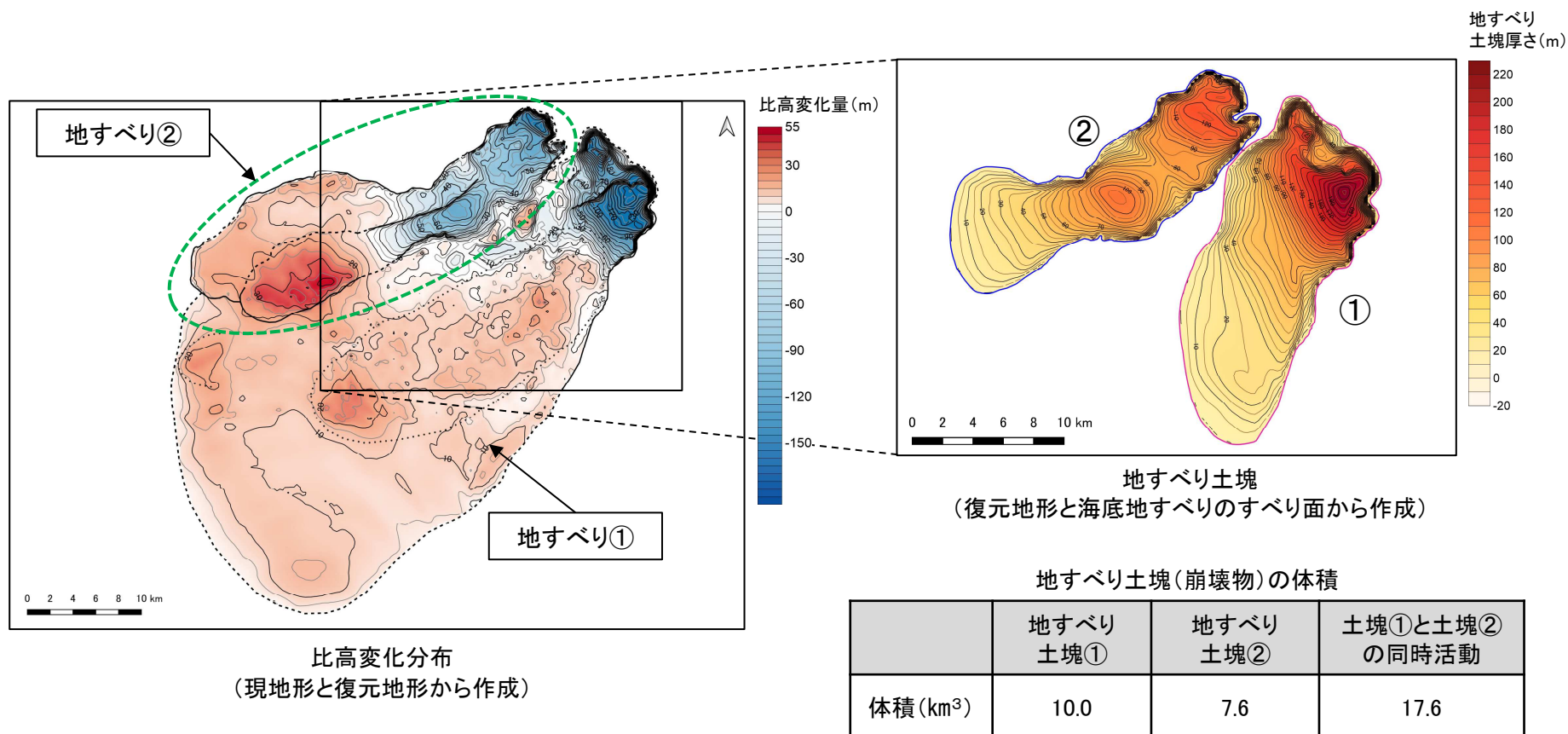
4. 地すべり①と地すべり②の同時活動を考慮した組合せ津波が連動型地震(単独)の津波水位を下回る要因

4.2 日高舟状海盆の海底地すべりの津波特性

S223

■ 日高舟状海盆の海底地すべりの評価: 地すべり規模の保守性

- 日高舟状海盆の海底地すべりは複数回の活動で形成された可能性が考えられ、地すべり地形は地すべり①と地すべり②に区分される。地すべりの形成過程については、堆積構造から地すべり①の後に、地すべり②が発生したと考えられる。
- 海底地すべりに伴う津波の水位変動量は、想定する地すべり規模(地すべり土塊の体積)に起因することから、保守的に地すべり①と地すべり②の同時活動を考慮し、連動型地震との組合せを評価している。



VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

4. 地すべり①と地すべり②の同時活動を考慮した組合せ津波が連動型地震(単独)の津波水位を下回る要因

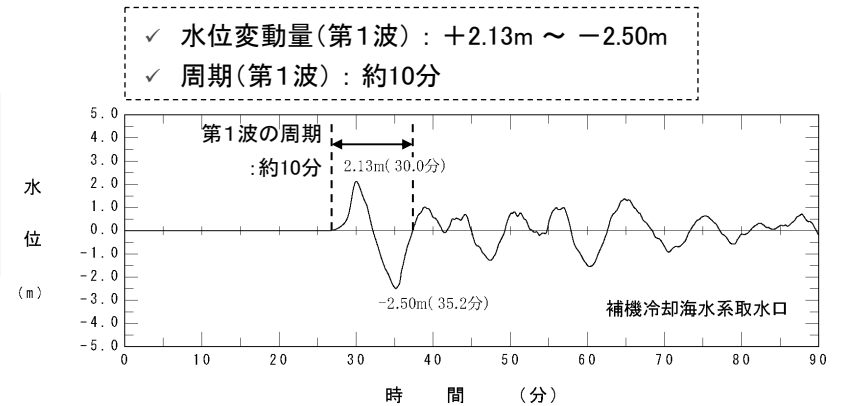
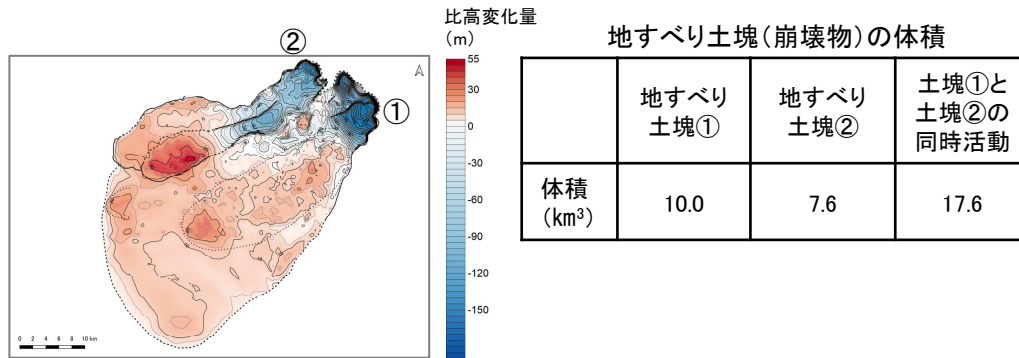
4.2 日高舟状海盆の海底地すべりの津波特性

S223

■日高舟状海盆の海底地すべりの津波特性

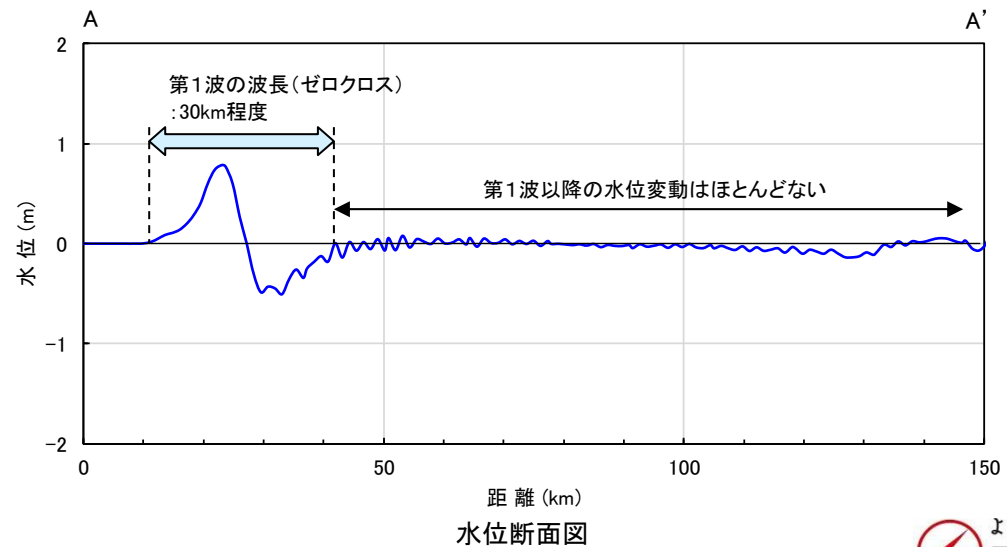
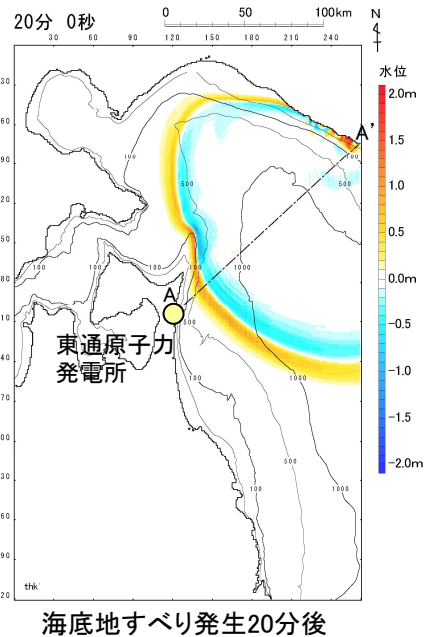
- ・ 地すべり規模の保守性(地すべり①と地すべり②の同時活動)を考慮した影響から第1波の水位変動量は大きく、周期、波長も長い。
- ・ また、第1波以降の水位変動はほとんどない特性を有する。

【海底地すべり規模及び津波特性】



補機冷却海水系取水口前面における水位時刻歴波形

【波長】



VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

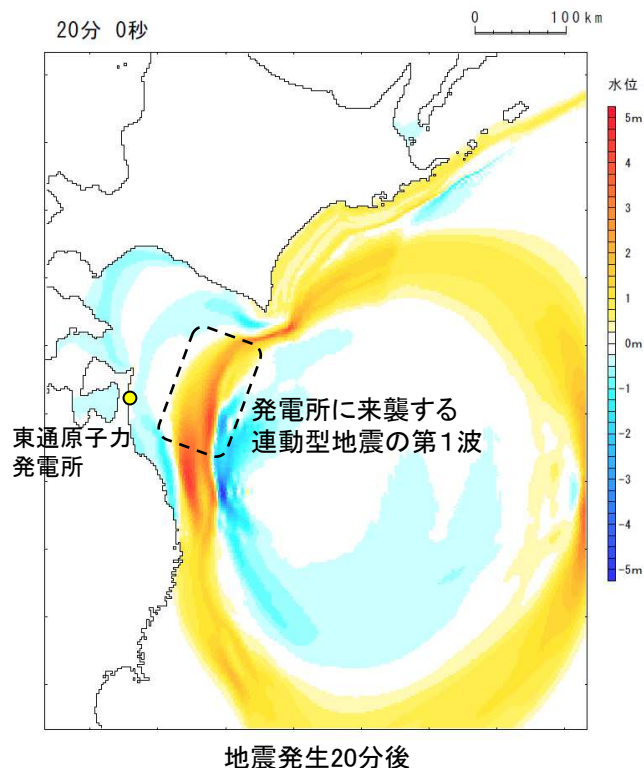
4. 地すべり①と地すべり②の同時活動を考慮した組合せ津波が連動型地震(単独)の津波水位を下回る要因

4.3 連動型地震と組合せ津波の津波伝播特性の比較

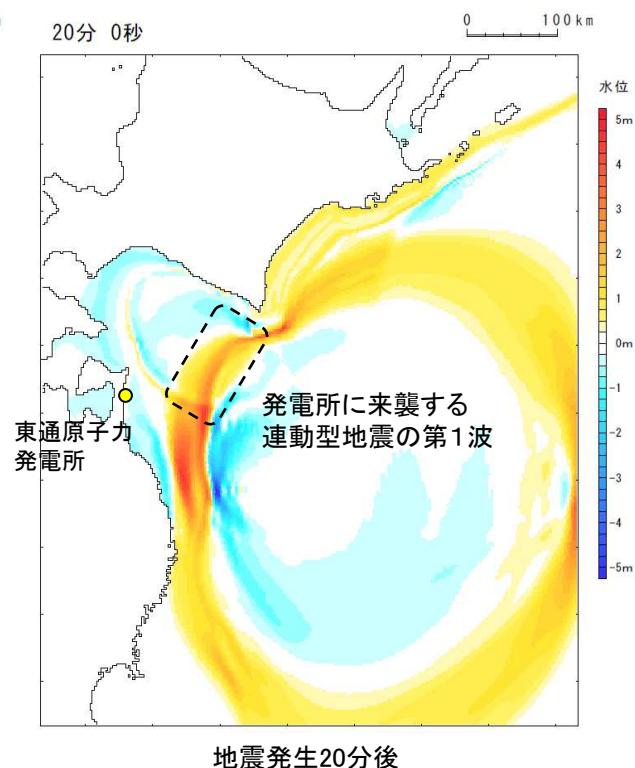
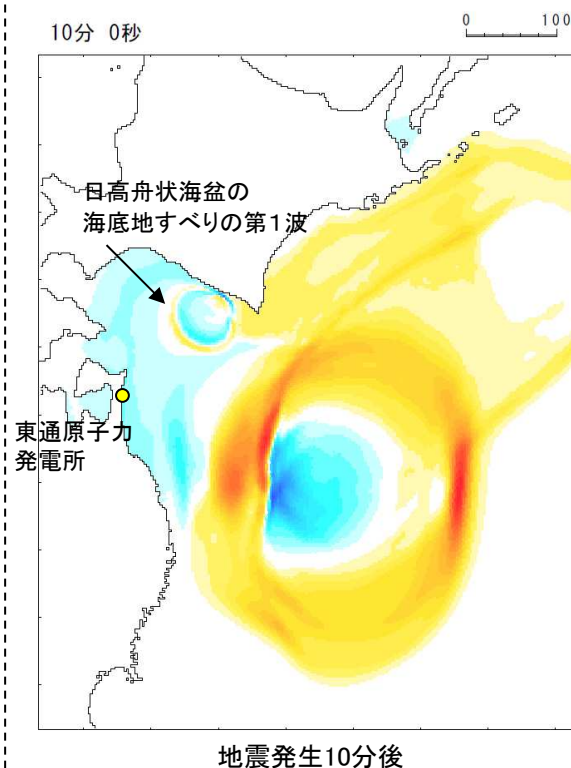
S223

- ・ 連動型地震, 連動型地震と日高舟状海盆の海底地すべりの組合せ津波の津波伝播特性の比較を以下に示す。
- ・ 日高舟状海盆の海底地すべりの津波特性について, 地すべり規模の保守性を考慮した影響から, 第1波の水位変動量は大きく, 周期・波長も長い。
- ・ 組合せ津波が地震単独津波の水位を下回る要因は, 上記の津波特性を有する海底地すべり津波の第1波の押し波が沖合を通過し, その後の引き波により, 初期水面(T.P.±0.0m)から水面が低下した状態に, 連動型地震の津波の第1波が来襲するためと考えられる。
- ・ 地震発生1分後~30分後までの津波伝播特性(スナップショット)の比較を次頁以降に示す。

■連動型地震



■連動型地震と日高舟状海盆の海底地すべりの組合せ
(水位上昇側決定ケース, 組合せ時間:地震発生87.5秒後)



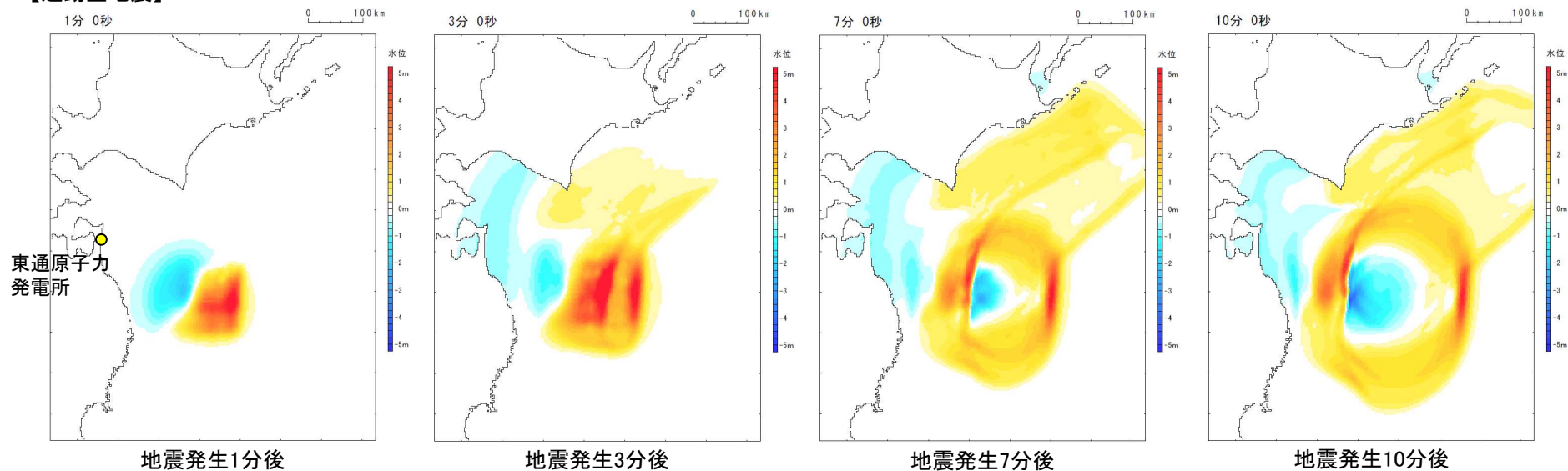
VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

4. 地すべり①と地すべり②の同時活動を考慮した組合せ津波が連動型地震(単独)の津波水位を下回る要因

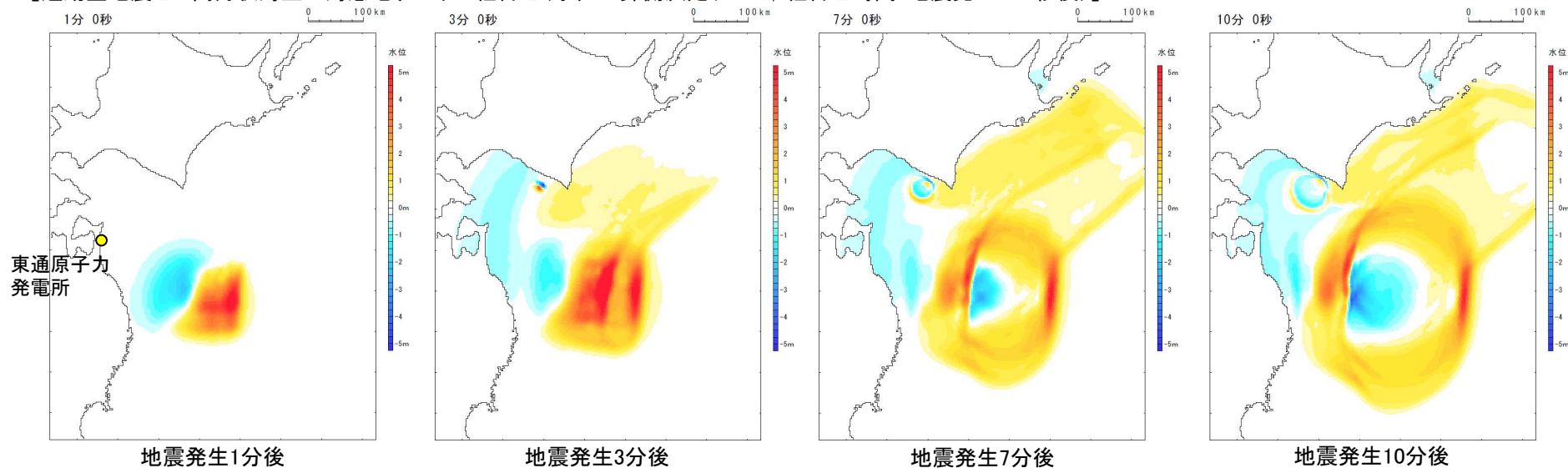
4.3 連動型地震と組合せ津波の津波伝播特性の比較

■津波伝播特性(スナップショット)(1/2)

【連動型地震】



【連動型地震と日高舟状海盆の海底地すべりの組合せ(水位上昇側決定ケース, 組合せ時間:地震発生87.5秒後)】



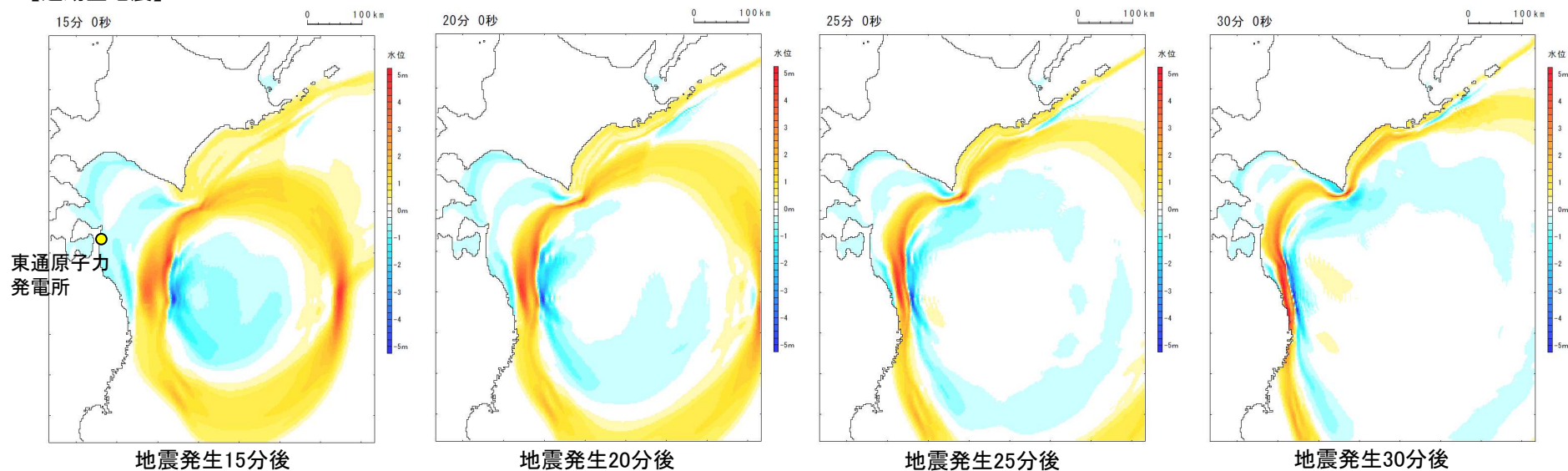
VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

4. 地すべり①と地すべり②の同時活動を考慮した組合せ津波が連動型地震(単独)の津波水位を下回る要因

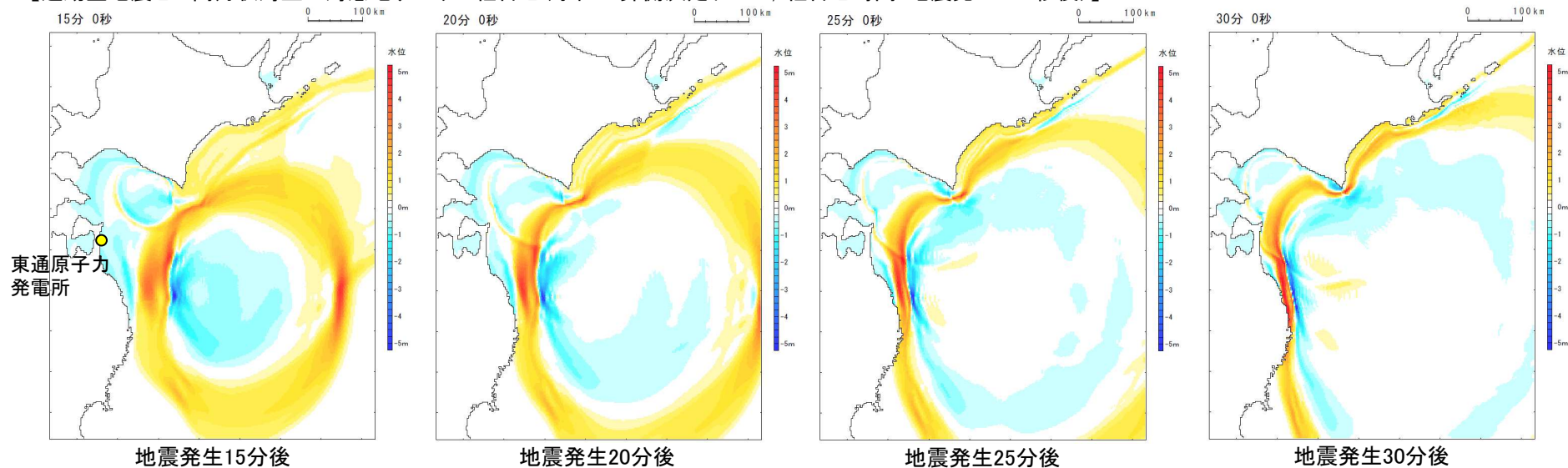
4.3 連動型地震と組合せ津波の津波伝播特性の比較

■津波伝播特性(スナップショット)(2/2)

【連動型地震】



【連動型地震と日高舟状海盆の海底地すべりの組合せ(水位上昇側決定ケース, 組合せ時間:地震発生87.5秒後)】



VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

4. 地すべり①と地すべり②の同時活動を考慮した組合せ津波が連動型地震(単独)の津波水位を下回る要因

4.4 まとめ

S223

■下回る要因分析から得られた知見

- 各津波波源と発電所の位置及び海底地すべりの発生時間範囲の関係から、日高舟状海盆の海底地すべりに伴う津波が先に沖合を通過し、発電所に到達する。そのため、沖合では日高海底地すべりの第1波の引き波と連動型地震の第1波(押し波)が干渉し、発電所地点では、(沖合で干渉した)連動型地震の第1波(押し波)と日高海底地すべりの第2波(押し波)が組み合わせられる。
- 上記に対し、「地すべり①と地すべり②の同時活動」は、地すべり規模の保守性を考慮したことにより、第1波の水位下降量は大きく、その周期・波長も長い津波となり、これが、連動型地震(単独)津波の水位を下回る要因になっていることを確認した。

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

5. 連動型地震の活動に伴う地殻変動が日高舟状海盆の海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響

- 5. 1 検討方針
- 5. 2 日高海底地すべり発生直後の水位変動に及ぼす影響
- 5. 3 日高海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響
- 5. 4 まとめ

VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

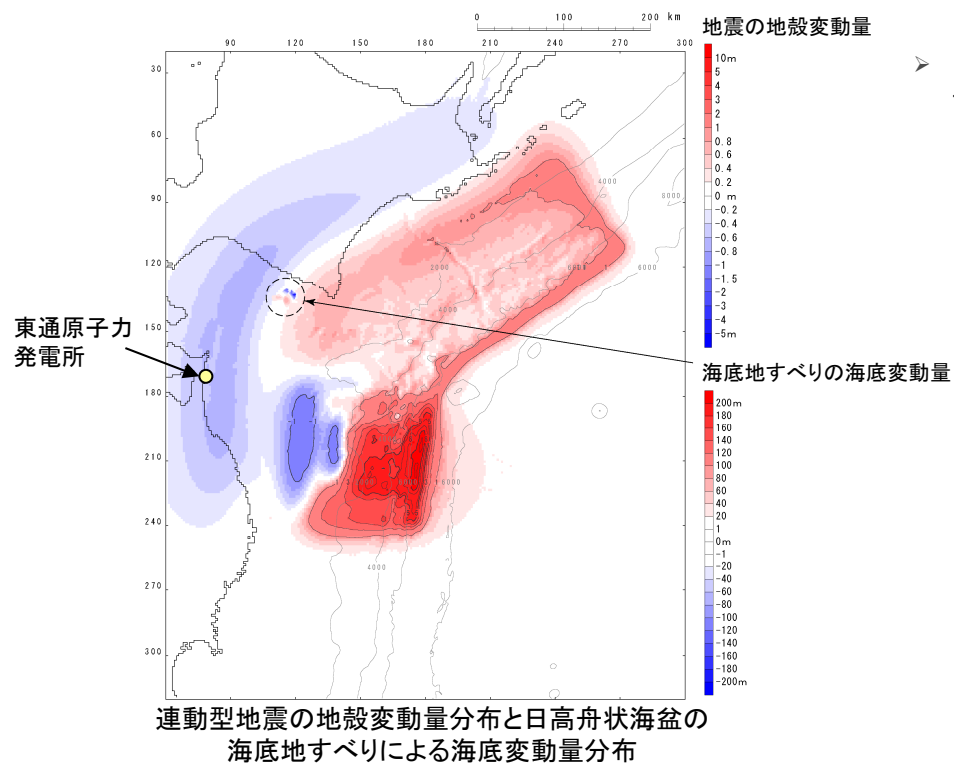
5. 連動型地震の活動に伴う地殻変動が日高舟状海盆の海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響

5.1 検討方針

S223

- ・ 日高舟状海盆の海底地すべりは連動型地震の波源域に位置し、地震の活動に伴う地殻変動(初期海面変動)(以下、「地殻変動」という。)の影響を受ける。
- ・ 地殻変動が日高舟状海盆の海底地すべり発生直後の水位変動及び津波伝播特性に及ぼす影響について、日高海底地すべり単独と組合せ津波(水位上昇側決定ケース、組合せ時間:地震発生1分27秒後(87.5秒後))の水位断面の比較から確認する。

【日高海底地すべり位置における連動型地震の活動に伴う地殻変動量】



- 日高海底地すべり位置における地殻変動量:
-0.30m ~ +0.30m (= 沈降域と隆起域の境界部に位置)

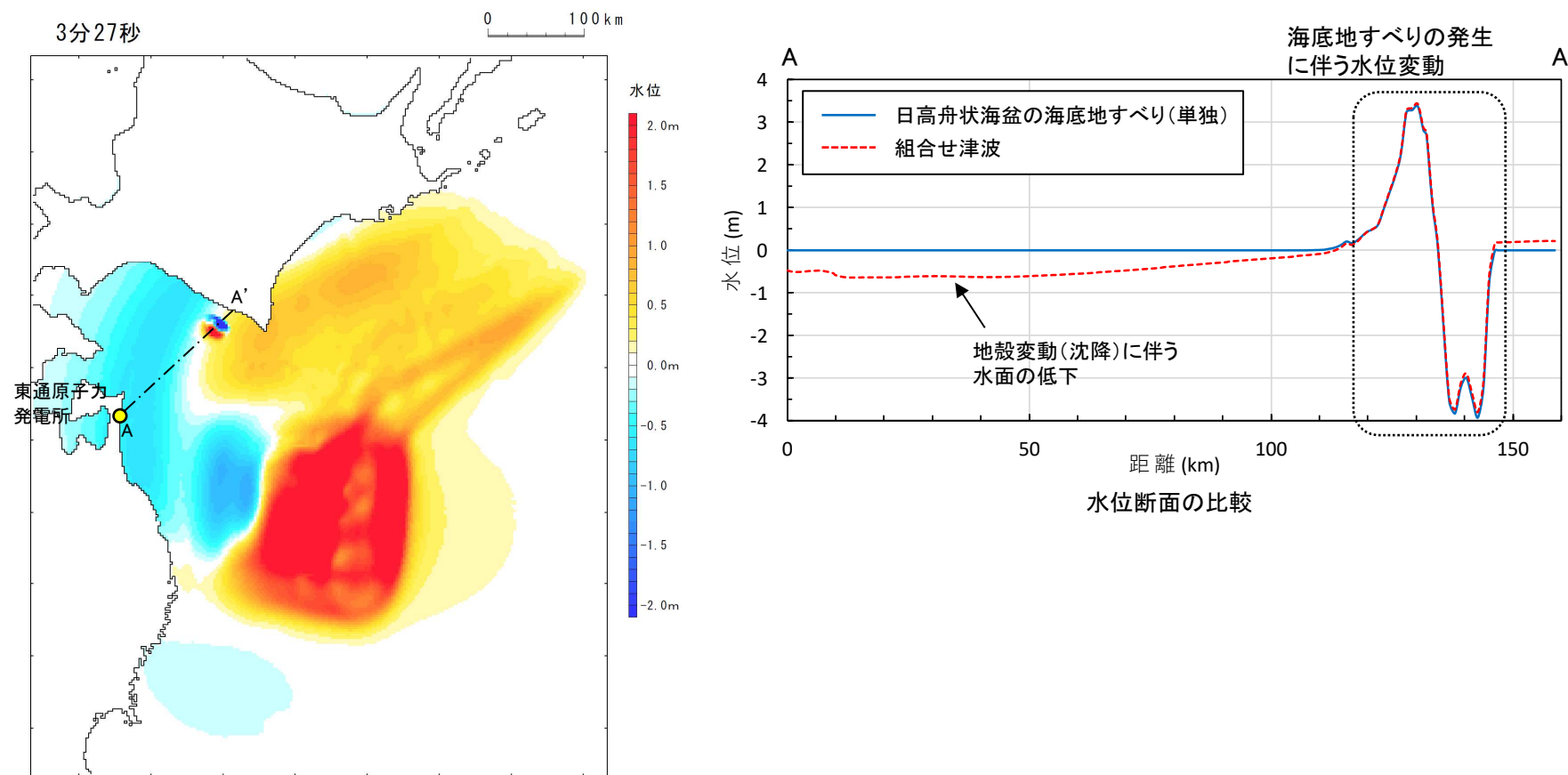
VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

5. 連動型地震の活動に伴う地殻変動が日高舟状海盆の海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響

5.2 日高海底地すべり発生直後の水位変動に及ぼす影響

S223

- 地震発生3分27秒後(日高舟状海盆の海底地すべり発生2分後)における海底地すべり(単独)と組合せ津波の水位断面の比較を示す。
- 日高舟状海盆の海底地すべりは地殻変動の沈降域と隆起域の境界部に位置するため、地殻変動が海底地すべり発生直後の水位変動に及ぼす影響はほとんどない。



組合せ津波の水位変動量分布
地震発生3分27秒後(日高舟状海盆の海底地すべり発生2分後)

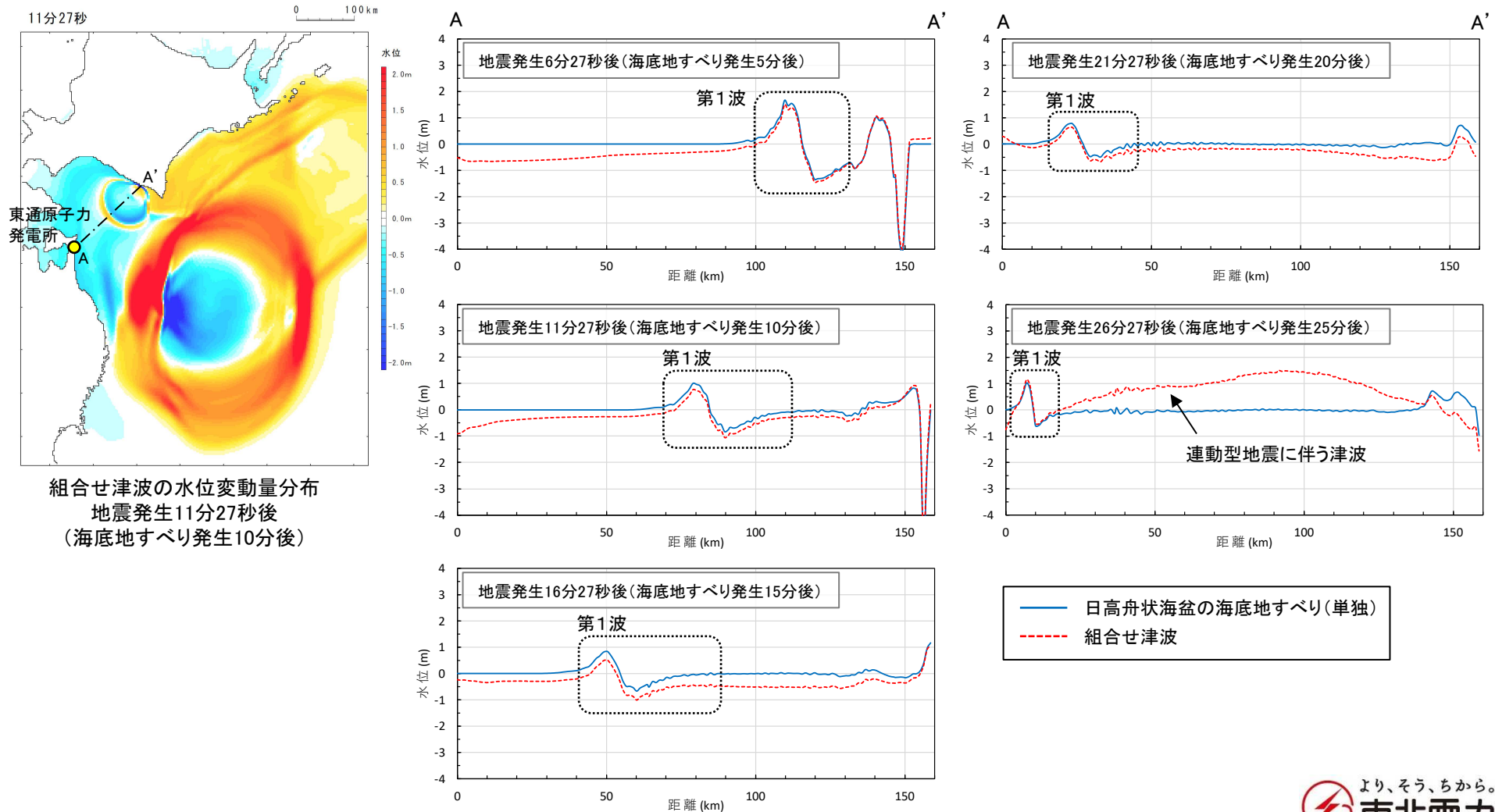
VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

5. 連動型地震の活動に伴う地殻変動が日高舟状海盆の海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響

5.3 日高海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響

S223

- 日高舟状海盆の海底地すべりに伴う津波(第1波)は地殻変動に伴う沈降によって水面が低下した状態を伝播していくため、沖合では、海底地すべり(単独)と比較して全体的に0.2m~0.3m程度水位が低下するものの、水深が浅くなるにつれて浅水変形し、発電所付近では海底地すべり(単独)の水位と同程度になる。



VI. 地震に起因する津波と地震以外に起因する津波の組合せの評価

5. 連動型地震の活動に伴う地殻変動が日高舟状海盆の海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響

5.4 まとめ

S223

- 地殻変動量が日高舟状海盆の海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響について、日高海底地すべり単独と組合せ津波の水位断面の比較から確認した。
- 日高海底地すべり発生直後の水位変動に及ぼす影響について、日高舟状海盆の海底地すべりは地殻変動の沈降域と隆起域の境界部に位置するため、地殻変動の影響はほとんどないことを確認した。
- 日高海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響について、海底地すべりの津波(第1波)は地殻変動に伴う沈降によって水面が低下した状態を伝播していくため、沖合では、海底地すべり(単独)と比較して全体的に0.2m~0.3m程度水位が低下するものの、水深が浅くなるにつれて浅水変形し、発電所付近では海底地すべり(単独)の水位と同程度になることを確認した。
- 以上から、地殻変動量が日高海底地すべりの津波伝播特性に及ぼす影響はほとんどないことを確認した。

VII. 計算条件等

1. 潮位条件
2. 津波解析条件
3. 既往津波の再現解析
4. 津波水位の評価位置
5. 水位下降側の評価方法
6. 想定津波群の作成方法
7. 津波伝播特性の検討

Ⅶ. 計算条件等

1. 潮位条件

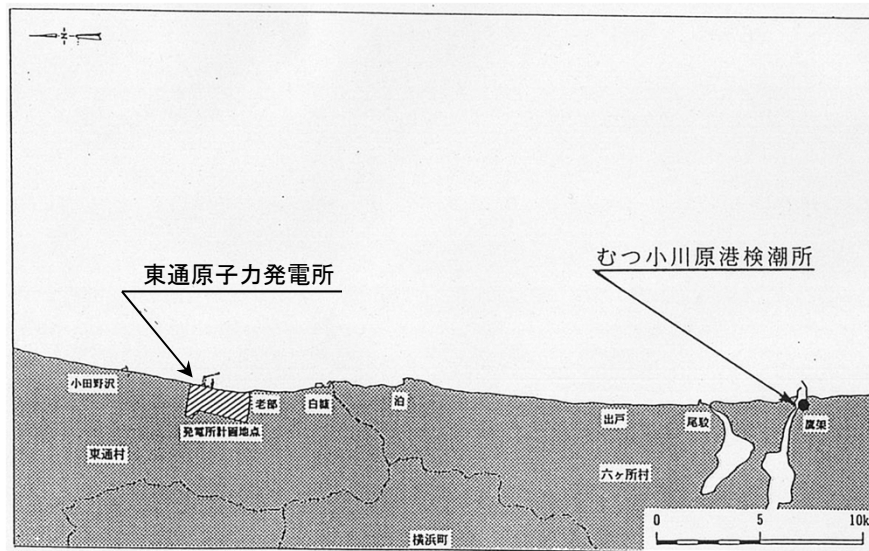
1. 1 潮位条件

1. 2 朔望平均潮位の妥当性

Ⅶ. 計算条件等 1. 潮位条件

1.1 潮位条件

- 基準津波評価で考慮している朔望平均潮位は、敷地南方約29kmに位置する国土交通省東北地方整備局むつ小川原港検潮所における1988年～1992年の観測記録を用いて算定した。



発電所とむつ小川原港検潮所の位置図

基準津波評価で考慮している朔望平均潮位

朔望平均満潮位	T.P.+0.61m
朔望平均干潮位	T.P.-0.87m

Ⅶ. 計算条件等 1. 潮位条件

1.2 朔望平均潮位の妥当性

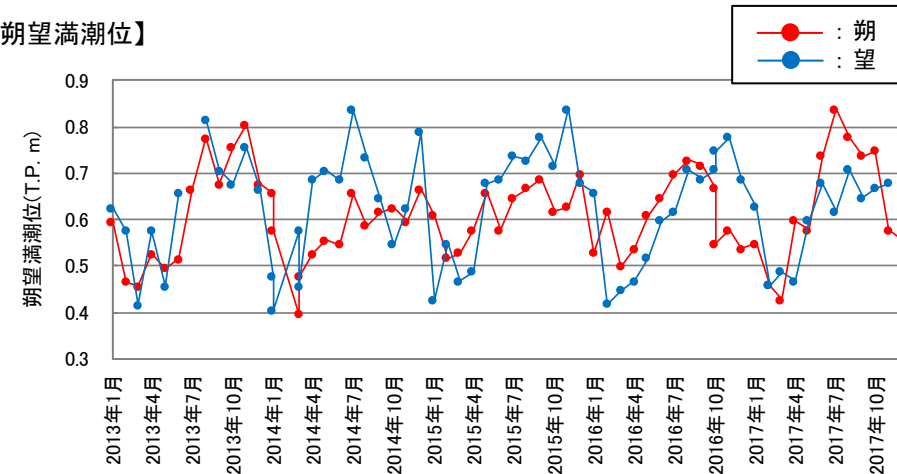
- 近年(2013年~2017年)の観測記録※を用いて朔望平均潮位を算定した結果、朔望平均満潮位はT.P.+0.66m、朔望平均干潮位はT.P.-0.81mであり、基準津波評価で考慮している朔望平均潮位と有意な差がないことを確認した。

※: 潮位記録は、「日本海洋データセンター」の資料を使用した。また、朔望平均潮位は、毎正時の朔望の前2日、後4日の期間における最高潮位または最低潮位を平均して算定した。

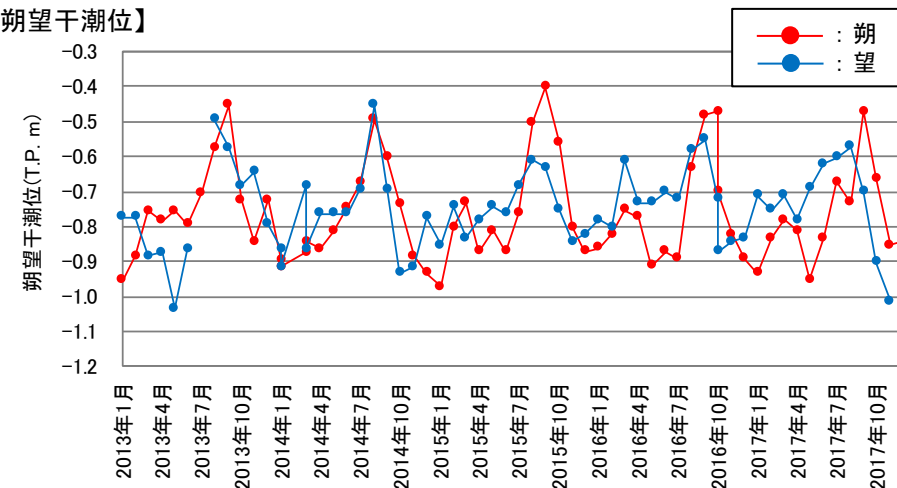
朔望平均潮位の比較

	①基準津波評価 (1988年~1992年)	②近年 (2013年~2017年)	差 (①-②)
朔望平均満潮位	T.P.+0.61m	T.P.+0.66m	-0.05m
朔望平均干潮位	T.P.-0.87m	T.P.-0.81m	-0.06m

【朔望満潮位】



【朔望干潮位】



各月の朔望潮位の経時変化

Ⅶ. 計算条件等

2. 津波解析条件

2. 1 計算条件

2. 2 計算領域

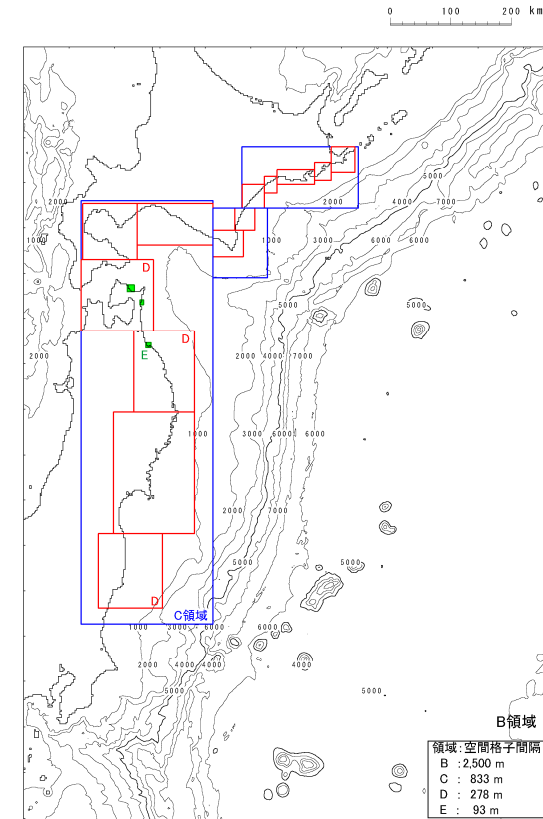
Ⅶ. 計算条件等 2. 津波計算条件

2.1 計算条件

- ・ 津波予測計算は、次の計算条件等に基づき実施した。
- ・ なお、数値シミュレーションの手法の妥当性は、既往津波の再現性の評価を実施して確認した。

主な計算条件

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

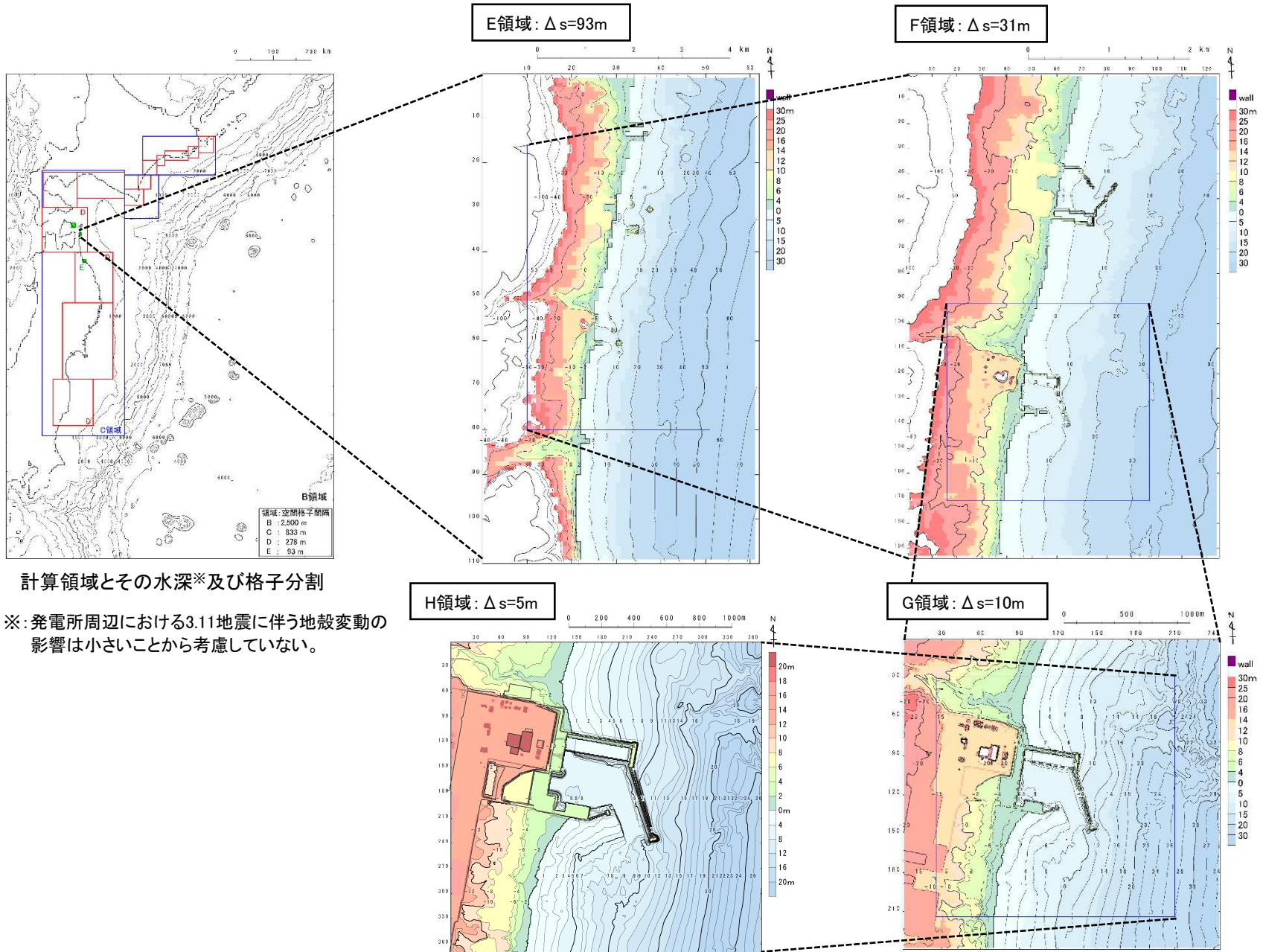


計算領域^{*2}とその水深及び格子分割

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

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

2.1 計算領域



Ⅶ. 計算条件等

3. 既往津波の再現解析

- 3. 1 計算領域
- 3. 2 評価方法
- 3. 3 評価結果

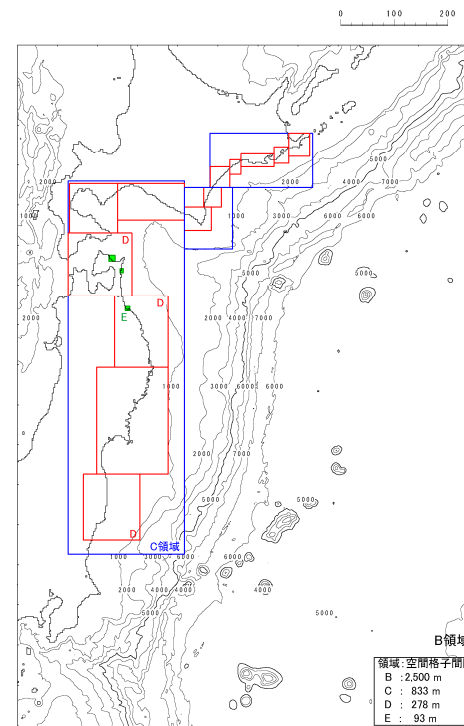
Ⅶ. 計算条件等 3. 既往津波の再現解析

3.1 計算領域

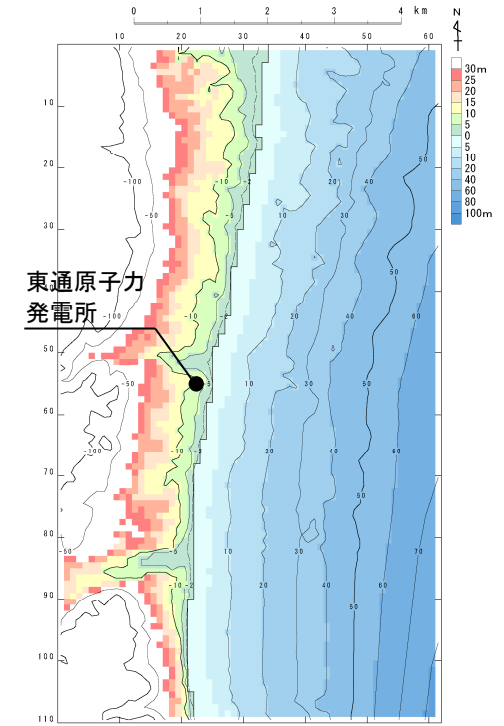
- ・ 数値シミュレーションの手法の妥当性を確認するために、既往津波の再現解析を実施した。
- ・ 再現解析は、次の計算条件等に基づき実施した。

主な計算条件

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



計算領域とその水深及び格子分割



敷地周辺の計算領域とその水深及び格子分割

Ⅶ. 計算条件等 3. 既往津波の再現解析

3.2 評価方法

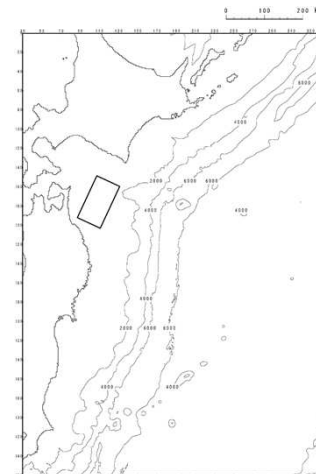
- ・ 再現性の評価は、各地点における既往津波高と数値シミュレーションによる津波高を比較することにより行った。
- ・ 再現性の指標は、相田(1977)による既往津波高と数値シミュレーションにより計算された津波高との比から求める幾何平均値K及びばらつきを表す指標 k を用いた。
- ・ 評価に用いた既往津波は、地震種別毎に評価することを基本として選定した。

評価に用いた既往津波

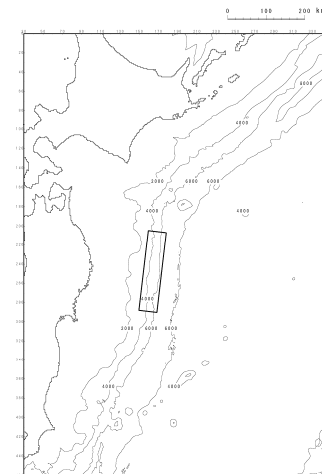
地震種別		既往津波
プレート間地震	津波地震	1896年明治三陸地震津波
	プレート間地震	1856年の津波
		1968年十勝沖地震に伴う津波
海洋プレート内地震		1933年昭和三陸地震津波

主な断層パラメータ

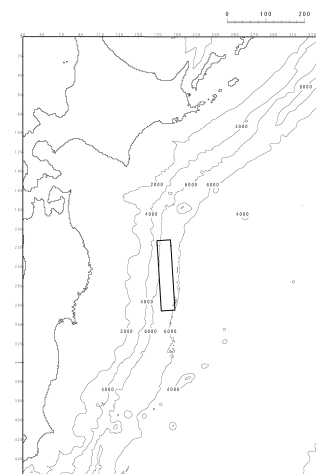
断層パラメータ		1856年	1896年	1933年	1968年
モーメントマグニチュード*	Mw	8.35	8.28	8.35	8.41
長さ	L(km)	120	210	185	150
幅	W(km)	70	50	50	100
走向	θ (°)	205	190	180	195
断層上縁深さ	d(km)	26	1	1	6
傾斜角	δ (°)	20	20	45	20
すべり角	λ (°)	90	75	270	76
すべり量	D(m)	10.0	9.0	6.6	6.9



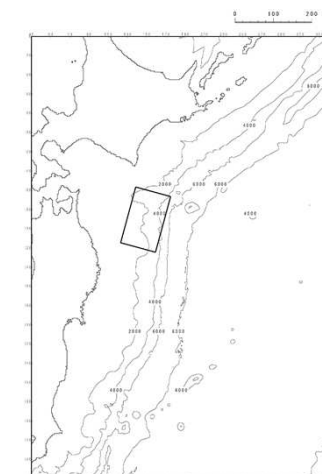
1856年の津波



1896年明治三陸地震津波



1933年昭和三陸地震津波



1968年十勝沖地震に伴う津波

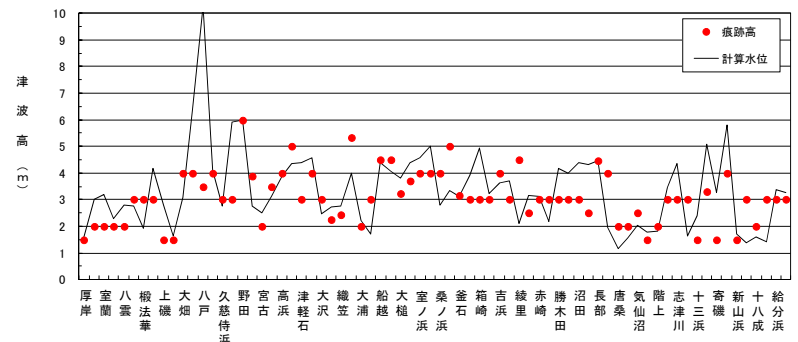
3.3 評価結果

- 土木学会(2016)の目安を満足しており、数値シミュレーションの手法が妥当であることを確認した。

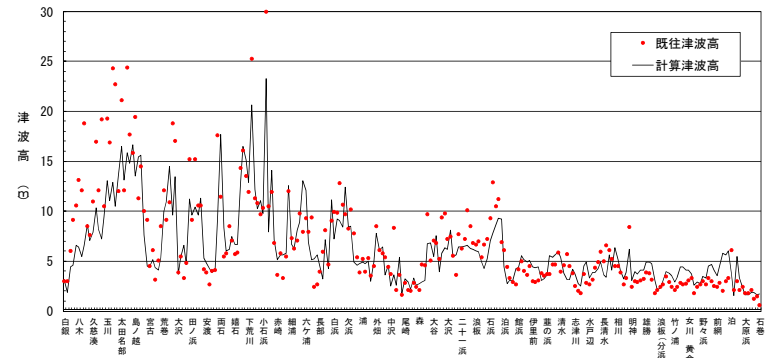
再現性の評価結果※

既往津波	K	κ	n	既往津波高
1856年の津波	0.95	1.448	72	羽鳥(2000)
1896年明治三陸地震津波	1.00	1.44	246	伊木(1897), 松尾(1933)
1933年昭和三陸地震津波	1.00	1.43	553	松尾(1933), 地震研究所(1934)
1968年十勝沖地震に伴う津波	0.97	1.39	297	岸(1969)

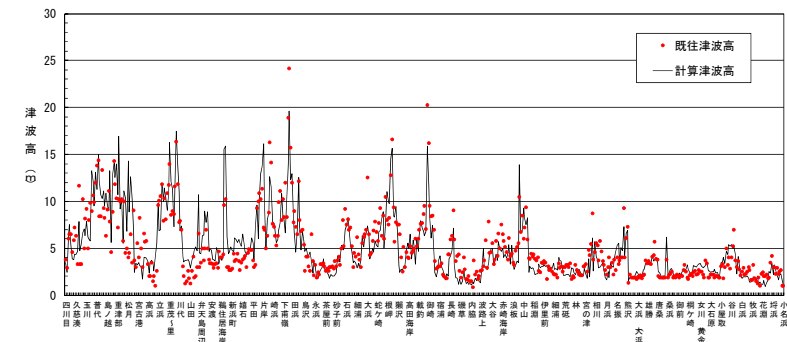
※土木学会(2016)による再現性の目安 : $0.95 < K < 1.05$, $\kappa < 1.45$



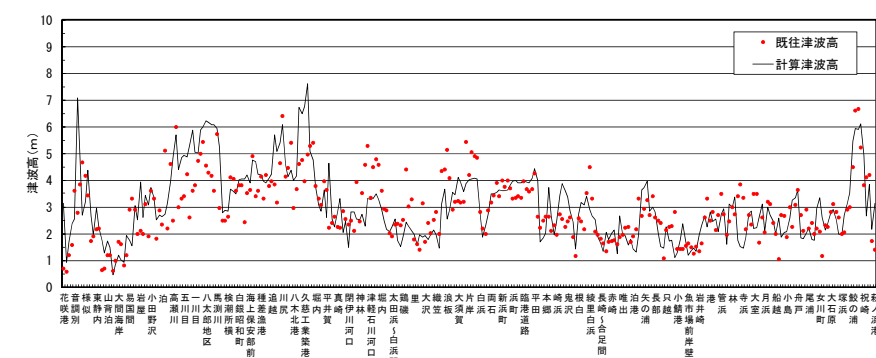
1856年の津波



1896年明治三陸地震津波



1933年昭和三陸地震津波



1968年十勝沖地震に伴う津波

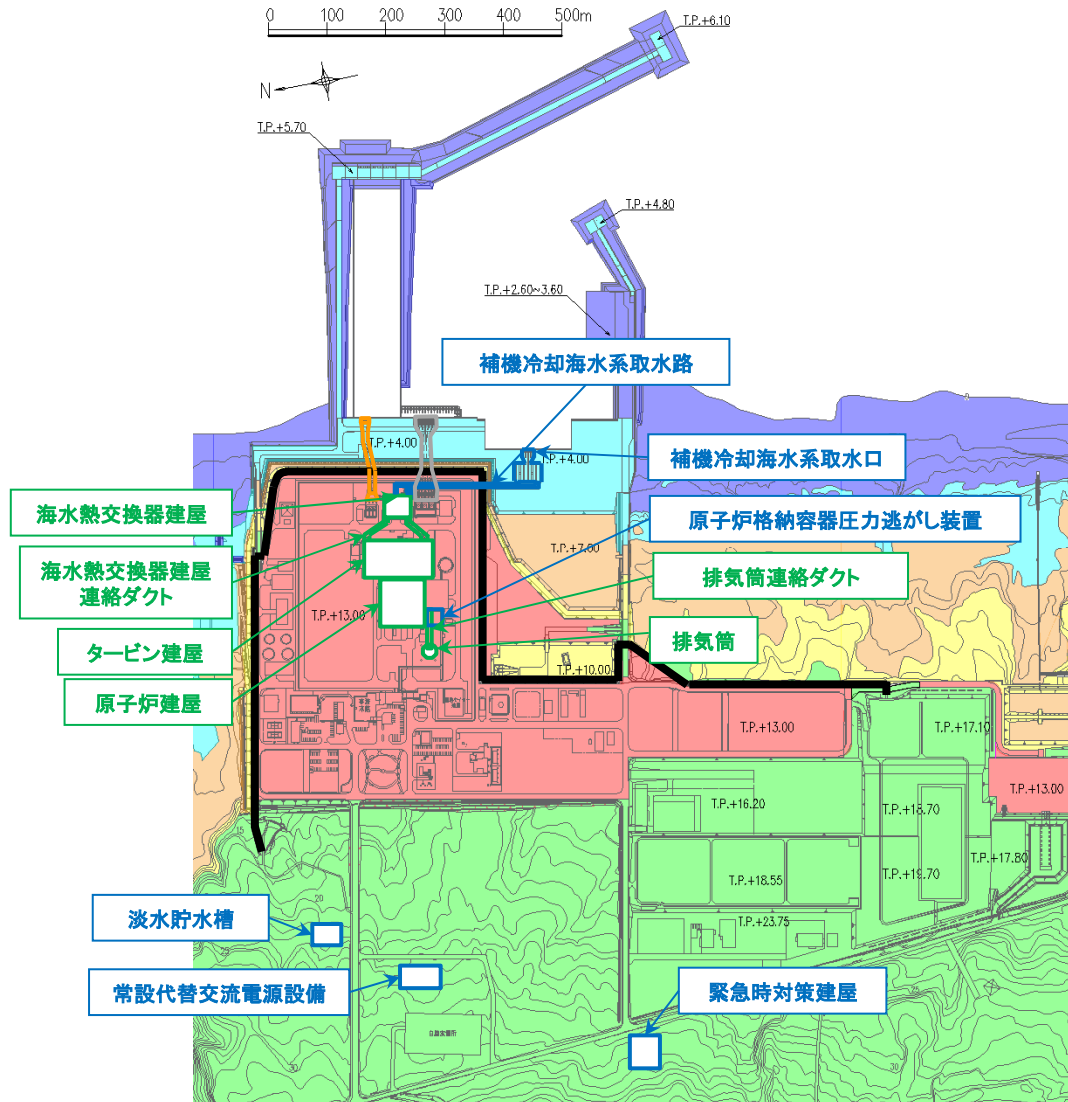
Ⅶ. 計算条件等

4. 津波水位の評価位置

- 4. 1 発電所敷地及び耐震重要施設等の配置
- 4. 2 津波水位の評価位置
- 4. 3 時刻歴波形抽出位置

4. 1 発電所敷地及び耐震重要施設等の配置

- 東通原子力発電所の主要設備が設置される敷地はT.P.+4.0m, T.P.+13.0mであり, その主要設備周辺はT.P.+4.0m~T.P.+23.75mに整地されている。
- 耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設の一部はT.P.+13.0mに設置し, 緊急時対策建屋等の常設重大事故等対処施設の一部はT.P.+13.0mよりもさらに高い敷地に設置する。
- 耐震重要施設等が設置された敷地(T.P.+13.0m)への津波の流入経路は, 常用系の海水を取水する取水路, 非常用系の海水を取水する補機冷却海水系取水路, 並びに常用系・非常用系を放水する放水路がある。



【標高(T.P., m)】

0 ≤	< 4
4 ≤	< 7
7 ≤	< 10
10 ≤	< 13
13 =	
13 <	

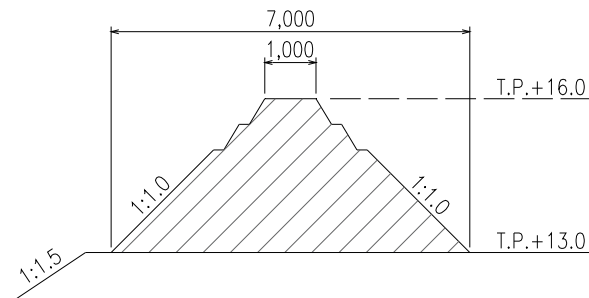
【施設位置】

—	: 防潮堤(自主対策設備)※1
□	: 耐震重要施設※2及び 常設重大事故等対処施設※3
□	: 常設重大事故等対処施設
□	: 放水設備
□	: 取水設備

※1 緊急安全対策の更なる安全性向上のための対策として設置。設置標高はT.P.+13.0mであり津波が到達しないことから, 解析結果には影響しない。

※2 設置許可基準規則第3条の対象となる耐震重要施設(間接支持構造物を含む)

※3 設置許可基準規則第38条の対象となる常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設(特定重大事故等対処施設を除く)



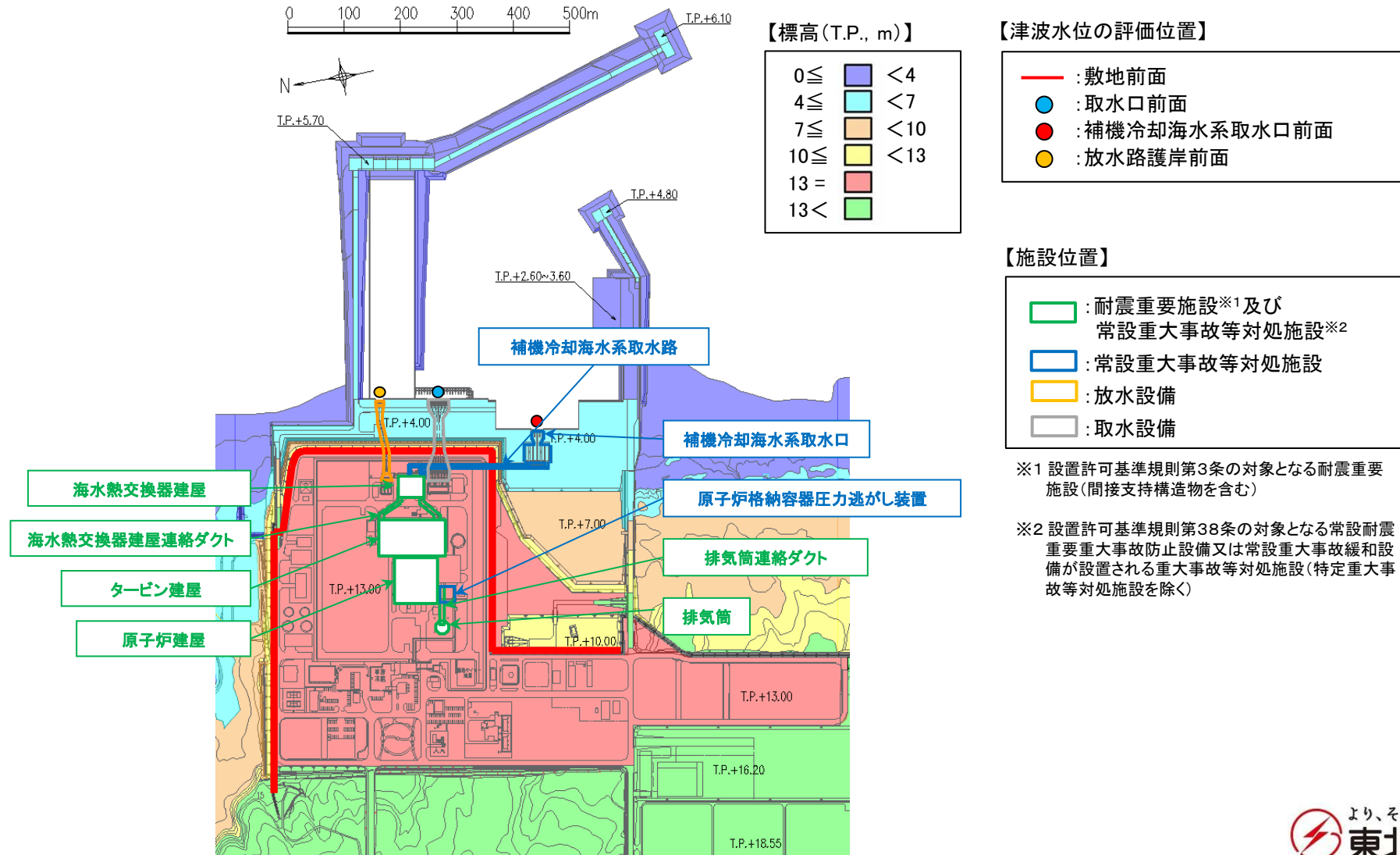
防潮堤(セメント改良土)標準断面図

Ⅶ. 計算条件等 4. 津波水位の評価位置

4.2 津波水位の評価位置:水位上昇側

■敷地前面

- 耐震重要施設等が設置された敷地(T.P.+13.0m)へ津波が遡上するかを評価するため敷地前面(下図:赤線)を津波水位の評価位置とする。
- なお、津波水位が低く、敷地前面位置まで津波が遡上しない場合には、敷地前面周辺での最大水位を抽出する。

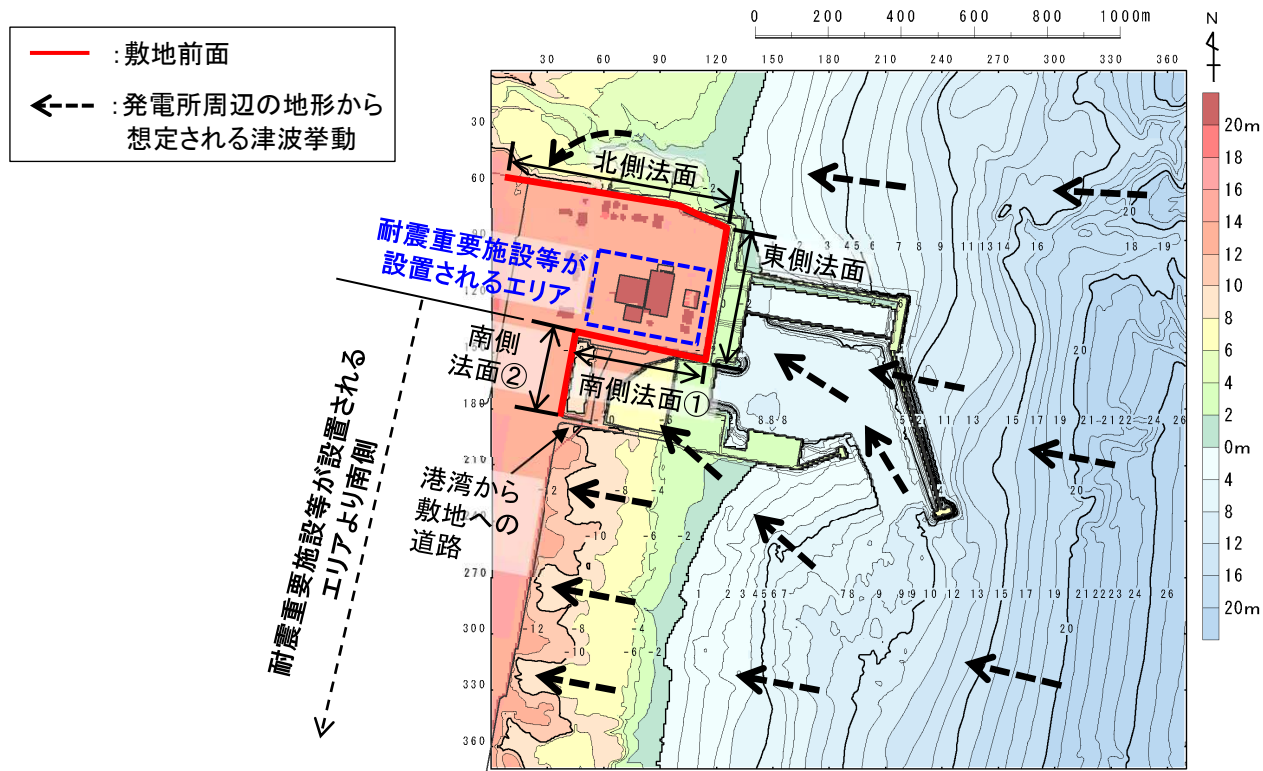


4.2 津波水位の評価位置:水位上昇側

■敷地前面の設定の考え方

- 発電所周辺の地形から想定される津波挙動を考慮し、敷地(T.P.+13.0m)のうち耐震重要施設等が設置されるエリア(以下、「エリア」という。)を取り囲むように津波水位の評価位置を設定した(敷地前面を北側法面、東側法面、南側法面①、南側法面②で構成した)。

- 北側法面:東から来襲した津波が谷状地形に沿って遡上し、エリアへの遡上波の回り込みが想定されることから評価位置とし、北側法面の西側の端部はT.P.+16.0mの地山に擦りつく位置に設定した。
- 東側法面:東から来襲した津波が直接来襲することが想定されることから、評価位置に設定した。
- 南側法面①:東から来襲した津波が海底地形の影響により北西方向に回折し、エリアへの遡上波の回り込みが想定されることから評価位置に設定した。
- 南側法面②:エリアより南側は、東から来襲した津波が海底地形の影響によりそのまま西方向へ遡上することが想定されるため、エリアへの遡上波の回り込みはなく、津波水位の評価位置として設定する必要はない。ただし、「南側法面①」の西側の端部がエリアに近接することから、一定の離隔を確保する観点で「南側法面②」を評価位置に設定し、その端部は港湾から敷地への道路の交差部までとした。以上から、南側法面②よりさらに南側は評価位置に設定しない。



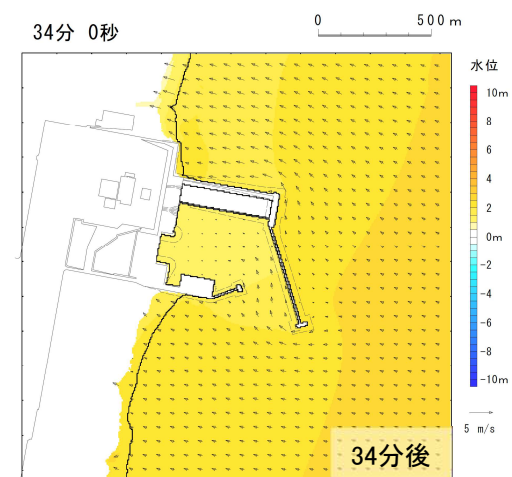
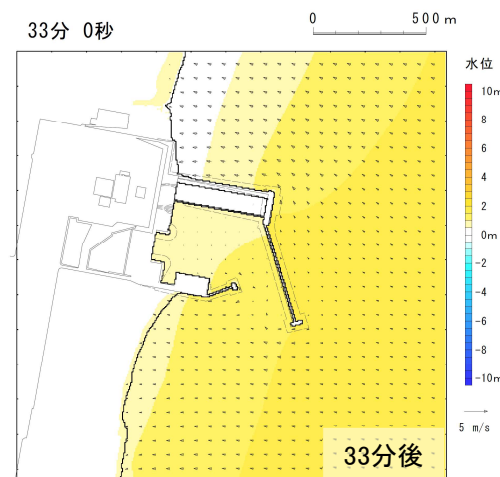
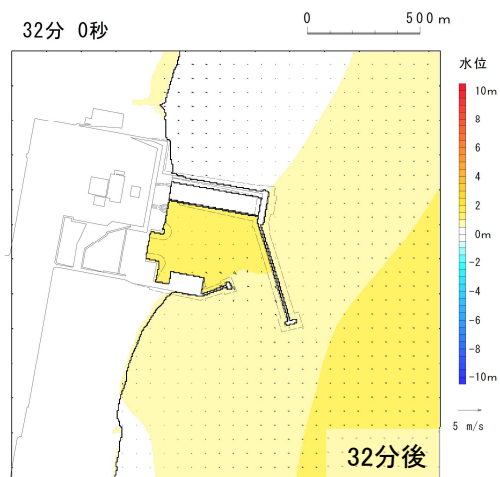
Ⅶ. 計算条件等 4. 津波水位の評価位置

4.2 津波水位の評価位置:水位上昇側

- 敷地前面の設定範囲の妥当性について、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)の津波来襲特性から以下のとおり確認した。

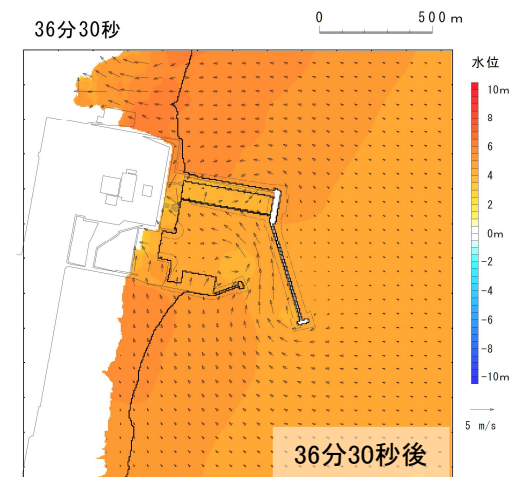
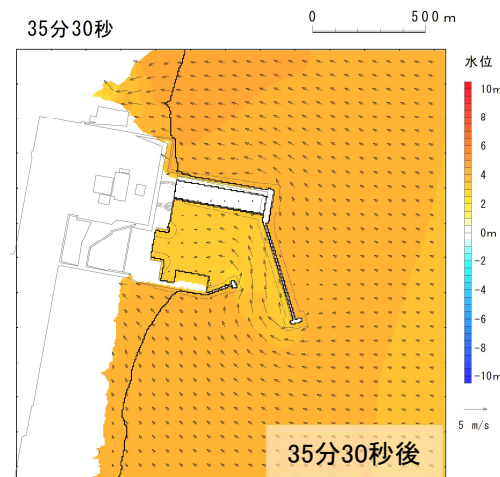
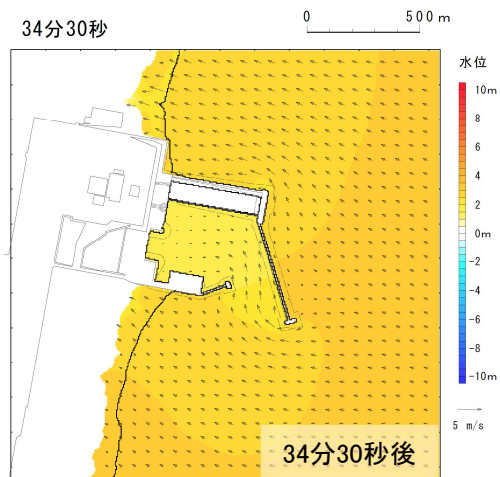
■ 第1波の来襲状況

- 津波は発電所に対し東から来襲する。



■ 耐震重要施設等が設置されるエリアの北側の遡上状況

- 東から来襲した津波は谷状地形に沿って遡上する。

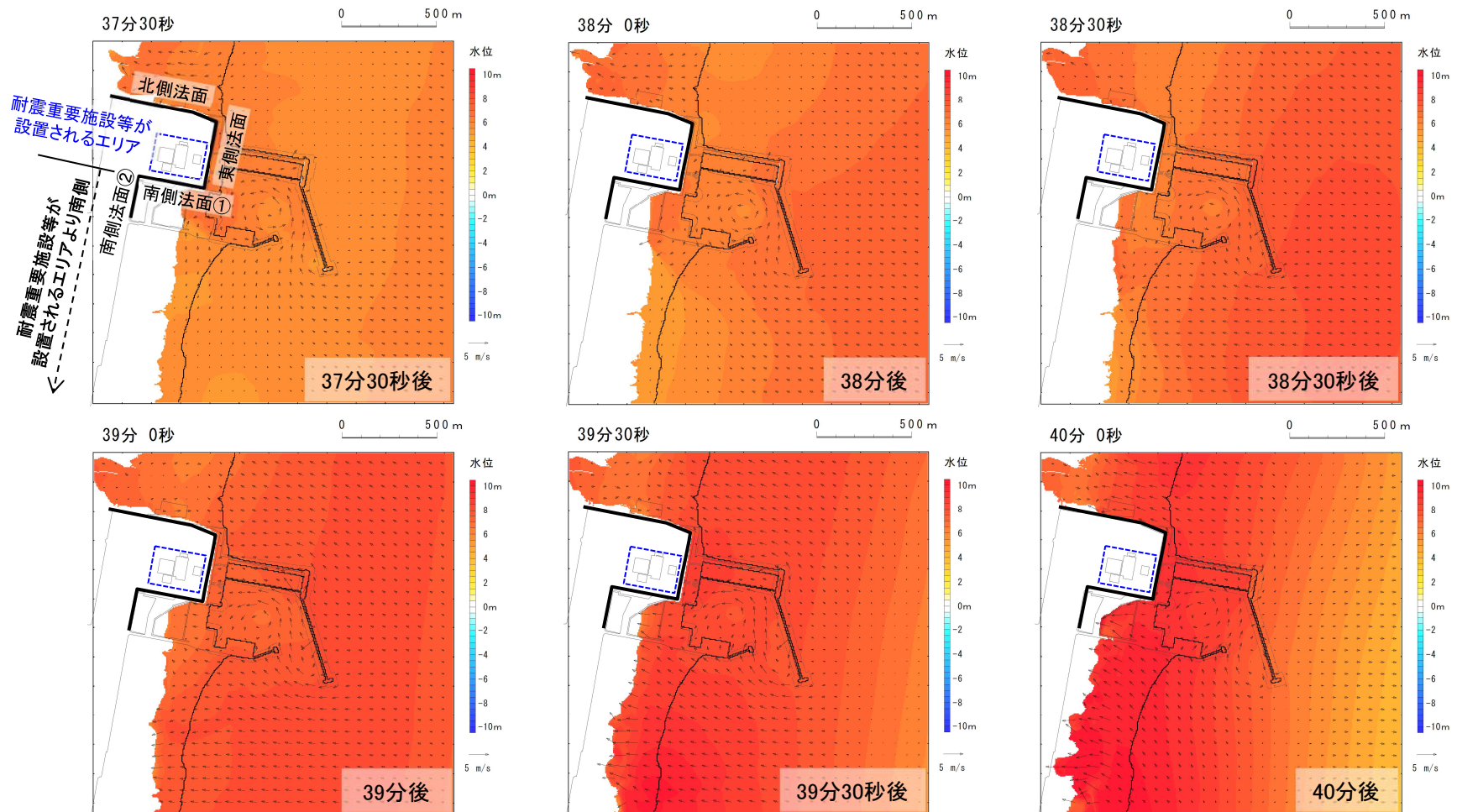


4.2 津波水位の評価位置:水位上昇側

■敷地前面の設定の妥当性(耐震重要施設等が設置されるエリアへの来襲状況)

- ・ エリアに対する津波の来襲状況から、敷地前面の設定範囲の妥当性を以下のとおり確認した。

- 北側法面: 谷状地形に沿って遡上した津波が、エリアに回り込むように遡上する(地震発生38分30秒~40分後)。
- 東側法面: 東から来襲した津波がエリアに直接来襲する(地震発生37分30秒~40分後)。
- 南側法面①: 東から来襲した津波が海底地形の影響により北西方向に回折し、エリアの南側に回り込むように遡上する(地震発生39分~40分後)。
- 南側法面②(エリアより南側): 東から来襲した津波が海底地形の影響によりそのまま西方向へ遡上し、エリアへの回り込みはない(地震発生39分~40分後)。

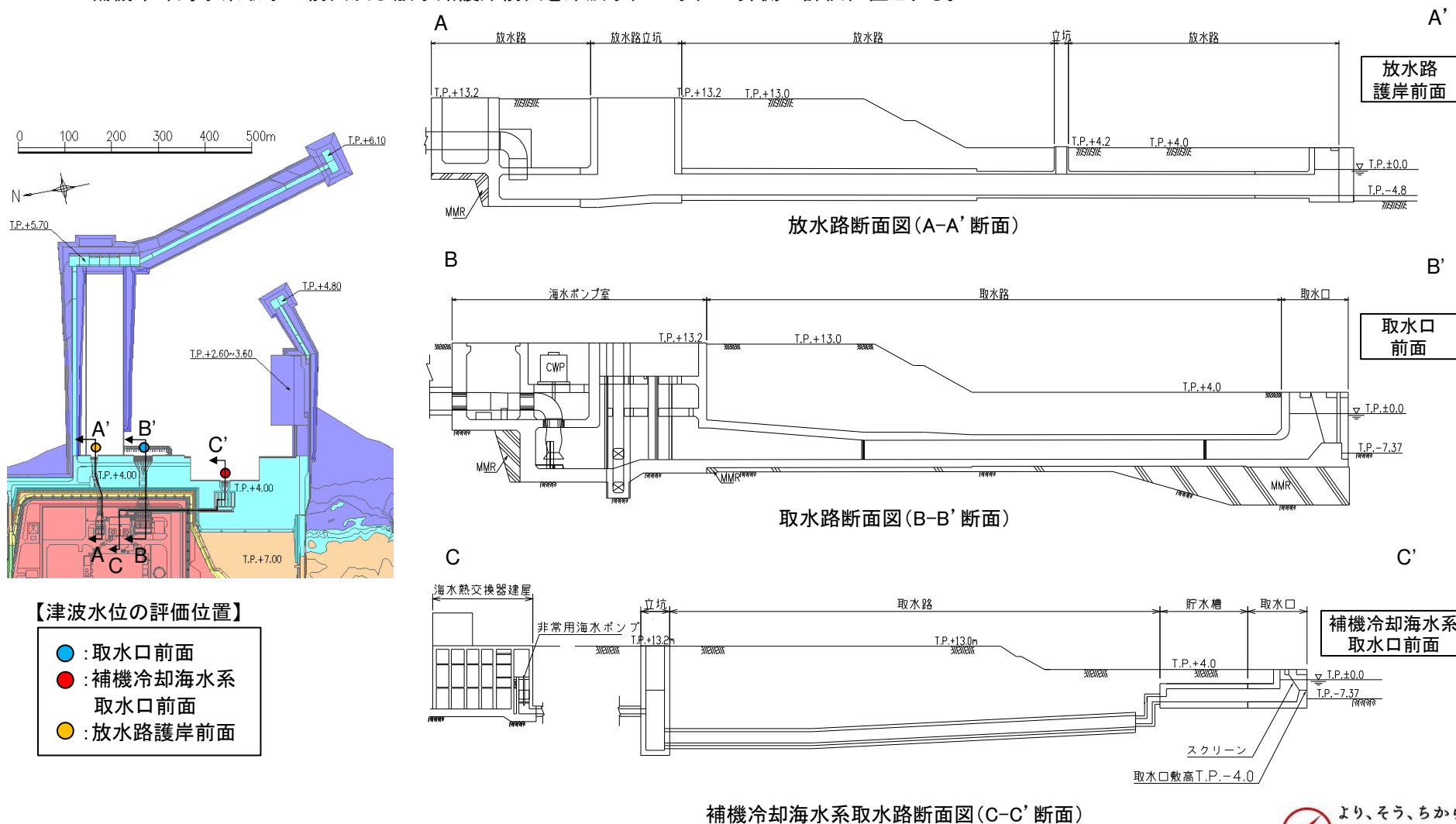


Ⅶ. 計算条件等 4. 津波水位の評価位置

4.2 津波水位の評価位置:水位上昇側

■取水口前面, 補機冷却海水系取水口前面, 放水路護岸前面

- 取水路及び放水路を介し, 重要な安全機能を有する施設の設置された敷地(T.P.+13.0m)へ津波が流入する可能性を評価するため, 取水口前面, 補機冷却海水系取水口前面及び放水路護岸前面を津波水位の水位上昇側の評価位置とする。



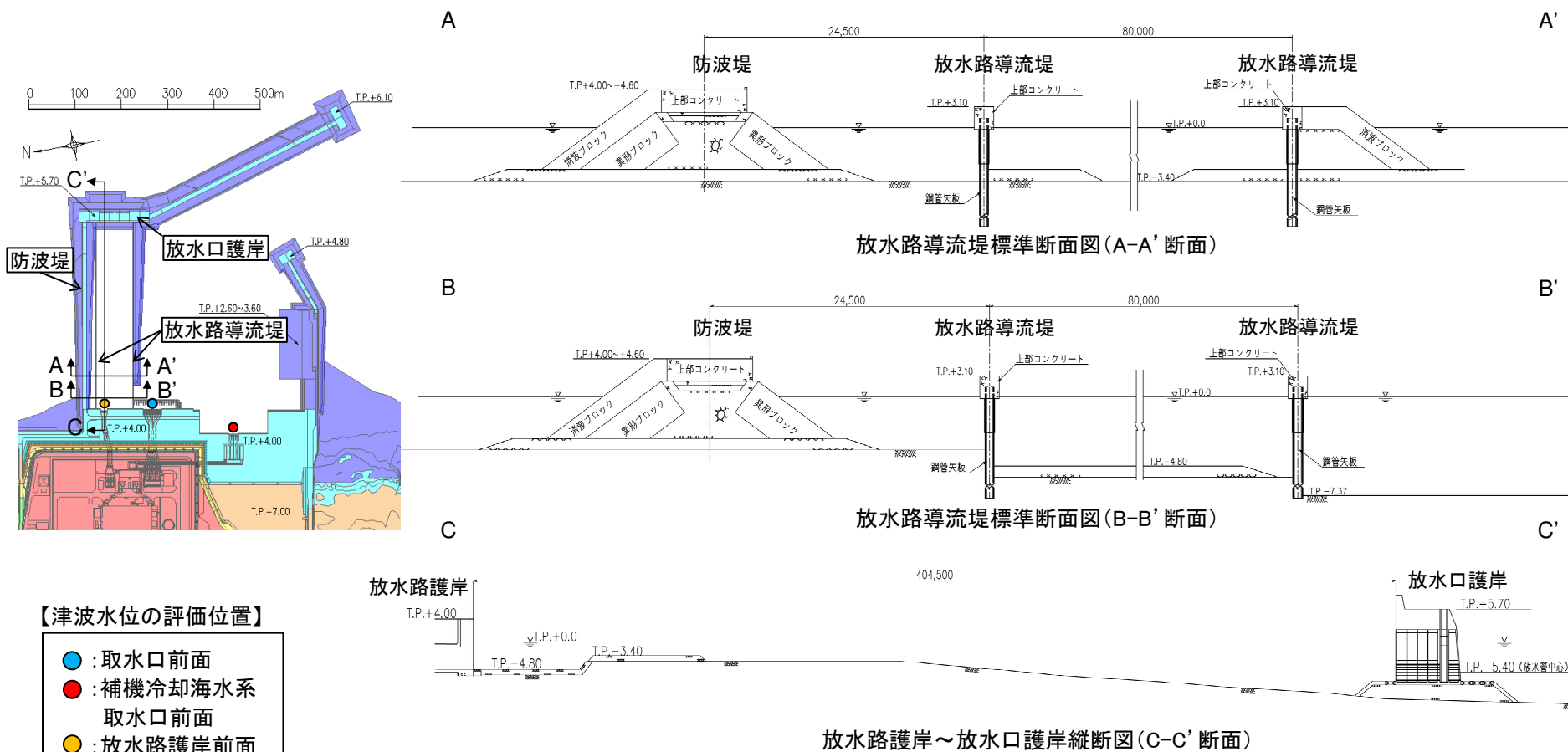
補機冷却海水系取水路断面図(C-C' 断面)

Ⅶ. 計算条件等 4. 津波水位の評価位置

4.2 津波水位の評価位置:水位上昇側

■放水路護岸前面

- 放水路護岸～放水口護岸までの構造は下図のとおりであり、放水路護岸前面は高さT.P.+3.1mの放水路導流堤及びT.P.+5.7mの放水口護岸で囲まれた区域内に位置するため、それらを越波しない限り、津波は到達しない。



【津波水位の評価位置】

- : 取水口前面
- : 補機冷却海水系
取水口前面
- : 放水路護岸前面

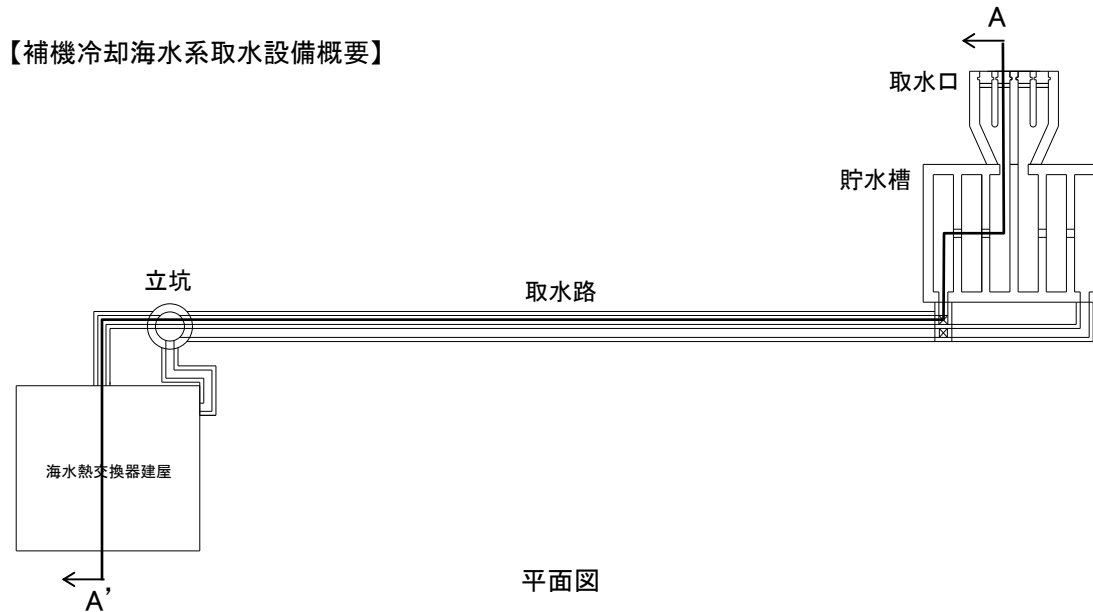
Ⅶ. 計算条件等 4. 津波水位の評価位置

4.2 津波水位の評価位置:水位下降側

■補機冷却海水系取水口前面

- 非常用海水ポンプ(原子炉補機冷却海水ポンプ, 高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ)の取水性を評価するため, 補機冷却海水系取水口前面を津波水位の水位下降側の評価位置とする。
- 補機冷却海水系取水設備は, 津波が取水口敷高(T.P.-4.0m)を下回る場合の非常用海水ポンプの運転に必要な海水を貯留する構造を兼ねていることから, 補機冷却海水系取水口敷高を下回る継続時間についても評価する。

【補機冷却海水系取水設備概要】



■非常用海水ポンプの運転可能継続時間

(A)有効貯水量:約5,000(m³)

取水口敷高(T.P.-4.0m)から非常用海水ポンプの取水可能水位(T.P.-7.5m)までの容量

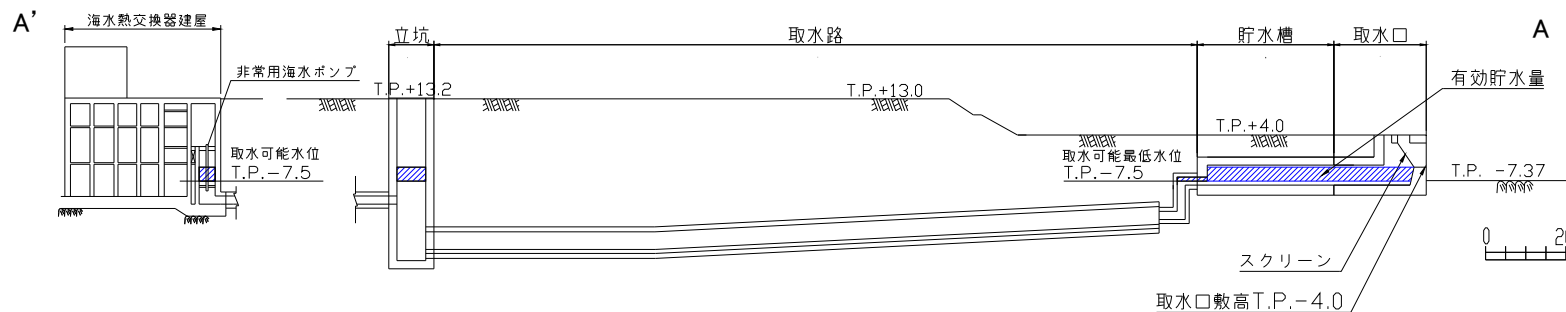
(B)非常用海水ポンプの運転可能継続時間:約35(分)

(A)/非常用海水ポンプの取水量
= 5,000(m³)/8,340(m³/hr) × 60 = 約35分

非常用海水ポンプの取水量

	運転台数*	流量 (m ³ /hr)	取水量 (m ³ /hr)
原子炉補機冷却 海水ポンプ	2台×2系統	8,000	8,340
高圧炉心スプレイ 補機冷却海水ポンプ	1台×1系統	340	

※:非常用海水ポンプの最大運転台数を考慮



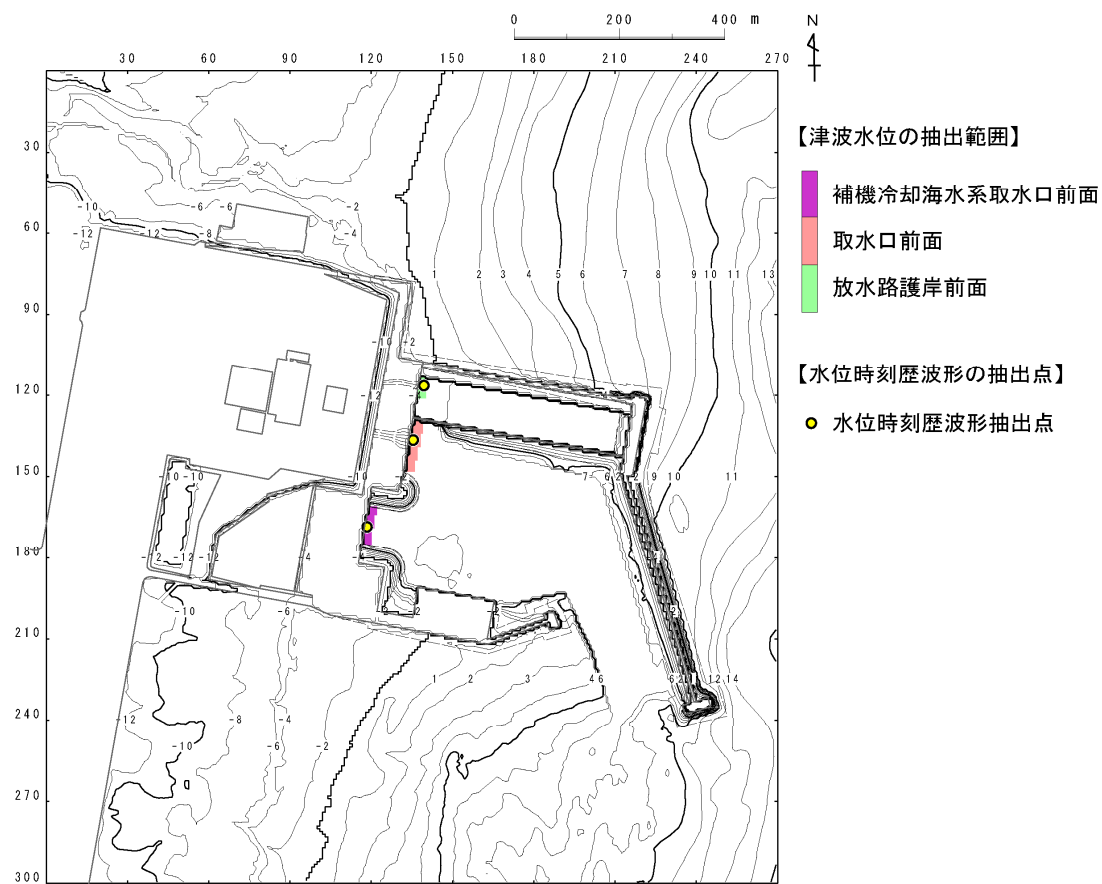
:津波水位が取水口敷高を下回る場合に, 非常用海水ポンプの取水に必要な海水が設備内に確保される範囲(約5,000m³)

断面図(A-A'断面)

Ⅶ. 計算条件等 4. 津波水位の評価位置

4.3 時刻歴波形抽出位置

- 津波解析は、設定する波源により発電所港湾内における流れ場が異なることから、津波水位(最大水位上昇量・最大水位下降量)の抽出位置を下図のとおり設定した。
- 水位時刻歴波形の抽出位置は、上記の代表点として各取放水設備前面の中央位置とした。



津波水位の抽出位置

Ⅶ. 計算条件等

5. 水位下降側の評価方法

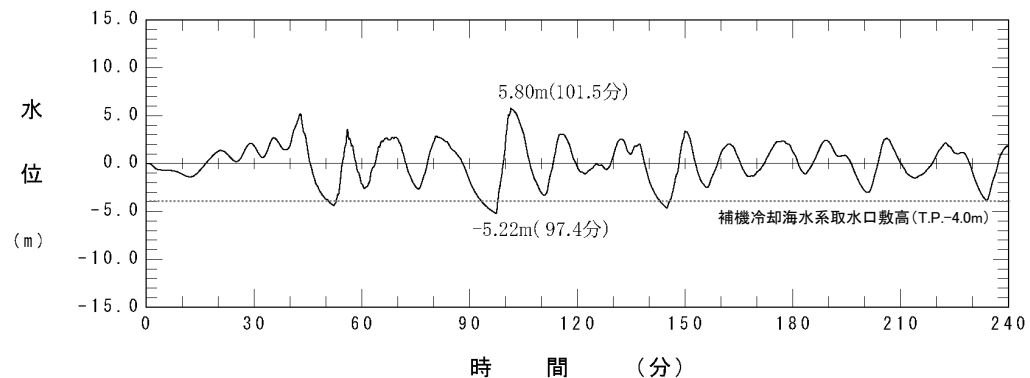
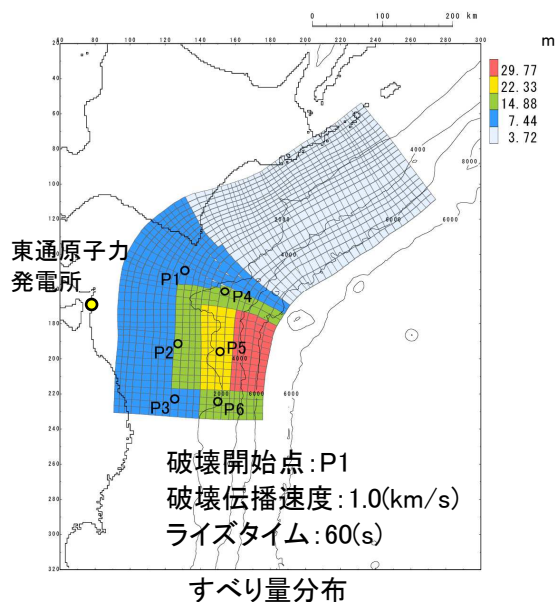
5. 1 評価方法

5. 2 水位下降量及び取水口敷高を下回る時間の比較

5.1 評価方法

- ・ 発電所の津波高さに与える影響が大きい津波は、プレート間地震(十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震、津波地震)及び海洋プレート内地震であり、海域の活断層による地殻内地震、海底の地すべり及び火山現象に起因する津波と比較して、津波の周期は長く、一時的に水位が上昇・下降するような波(パルス)は発生しない。
 - ・ また、発電所は比較的平坦な海岸線に立地し、湾や入り江形等との共振の影響はほとんどないため、津波波源そのものの影響が支配的であることから※1、水位下降量の大小と補機冷却海水系取水口敷高を下回る継続時間の長短には相関性がある。
 - ・ 以上の津波特性及び立地的特徴を踏まえ、水位下降側の評価は、水位下降量に着目したパラメータスタディを実施し、決定ケースを対象に補機冷却海水系取水口敷高※2を下回る継続時間を整理することを基本とする。
 - ・ ただし、「十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震」に起因する津波については、①津波地震及び海洋プレート内地震と比較して、水位下降側の影響が大きいとともに、②3.11地震から得られた知見等を参考に設定した複数の特性化モデルから基準断層モデルを設定することを踏まえ、水位下降量及び補機冷却海水系取水口敷高を下回る継続時間の両面から評価する。
 - ・ 水位下降側の評価は防波堤の有無の影響が大きいことを踏まえ、基準断層モデルの設定(概略パラメータスタディ)及び詳細パラメータスタディの決定ケースの評価にあたっては、防波堤無しでの解析結果も考慮する。
- ※1:詳細は、補足説明資料「Ⅰ. 「十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震」に起因する津波の評価 14. 発電所周辺地形及び各特性化モデルの周期特性」に記載。
 ※2:設備の詳細は、補足説明資料「Ⅶ. 計算条件等 4. 津波水位の評価位置」に記載。

■「十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震」に起因する津波:基準断層モデル③(水位下降量決定ケース)※3



補機冷却海水系取水口前面における水位時刻歴波形

※3:詳細は、本資料「Ⅰ. 地震に起因する津波の評価 1. 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震 1.5 動的破壊特性の不確かさの考慮(詳細パラメータスタディ) 1.5.3 詳細パラメータスタディ:基準断層モデル③」に記載。

Ⅶ. 計算条件等 5. 水位下降側の評価方法

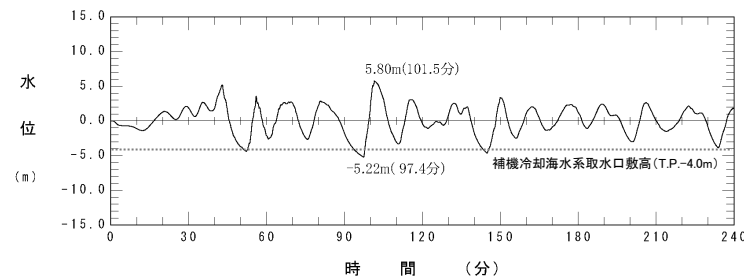
5.2 水位下降量及び取水口敷高を下回る時間の比較

- 十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震、津波地震及び海洋プレート内地震に起因する津波について、補機冷却海水系取水口前面における最大水位下降量及び補機冷却海水系取水口の敷高を下回る継続時間の比較を以下に示す。
- 連動型地震に起因する津波は、津波地震、海洋プレート内地震と比較して、最大水位下降量が大きく、かつ津波の周期が長いことに起因し、補機冷却海水系取水口敷高を下回る時間は長い※。

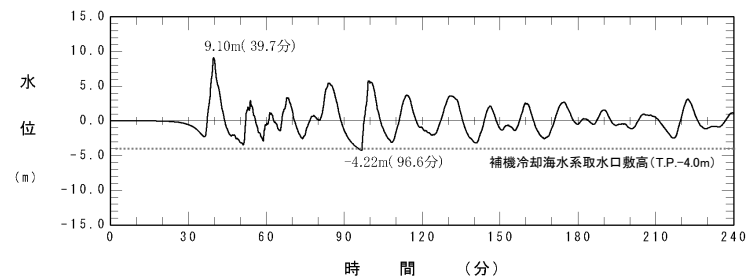
※:詳細は、本資料「Ⅰ. 地震に起因する津波の評価 5. 地震に起因する津波の評価結果のまとめ 5.2 水位下降側」に記載。

波源モデル	補機冷却海水系取水口前面	
	最大水位下降量(m)	取水口敷高を下回る継続時間(分)
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)	-5.24	4.4
津波地震	-4.27	1.3
海洋プレート内地震(正断層型の地震)	-4.59	1.9

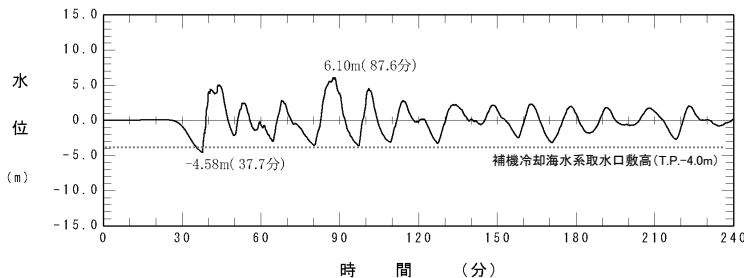
■十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震



■津波地震



■海洋プレート内地震



Ⅶ. 計算条件等

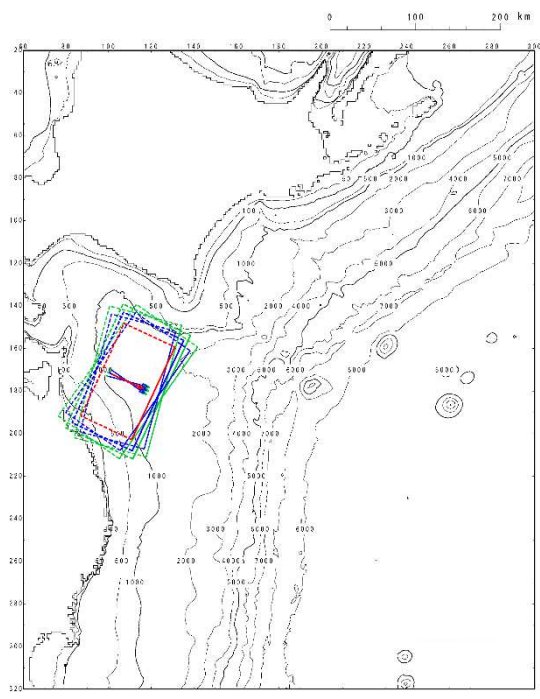
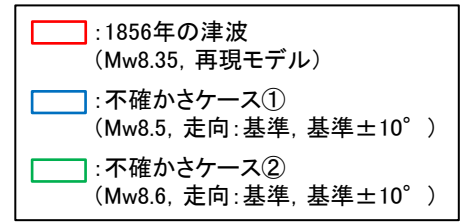
6. 想定津波群の作成方法

- 6. 1 1856年の津波
- 6. 2 連動型地震
- 6. 3 内閣府(2020) 日本海溝(三陸・日高沖)モデル
- 6. 4 各特性化モデルの詳細パラメータスタディ

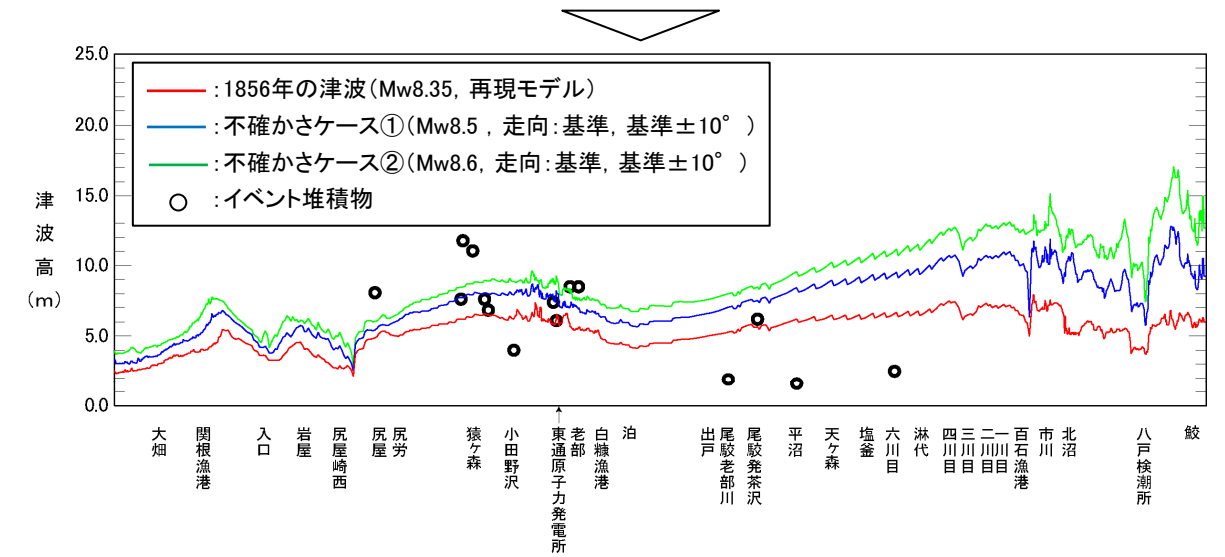
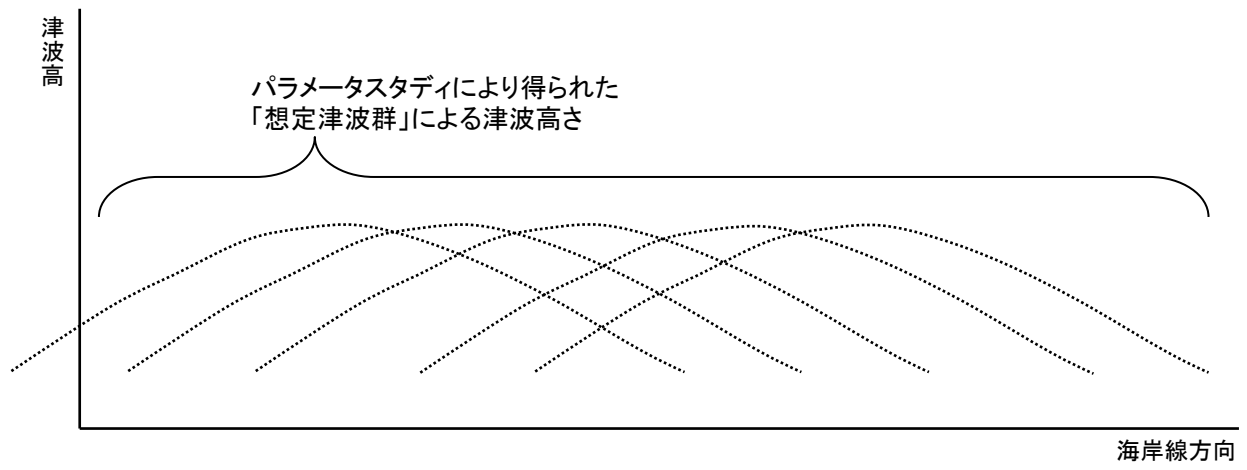
Ⅶ. 計算条件等 6. 想定津波群の作成方法
6.1 1856年の津波

- 不確かさケース①, 不確かさケース②については, 土木学会(2016)を参考に, 走向の不確かさを考慮した想定津波群(=パラメータスタディを行った津波の集合体)を作成し, イベント堆積物と比較した。

■検討モデル



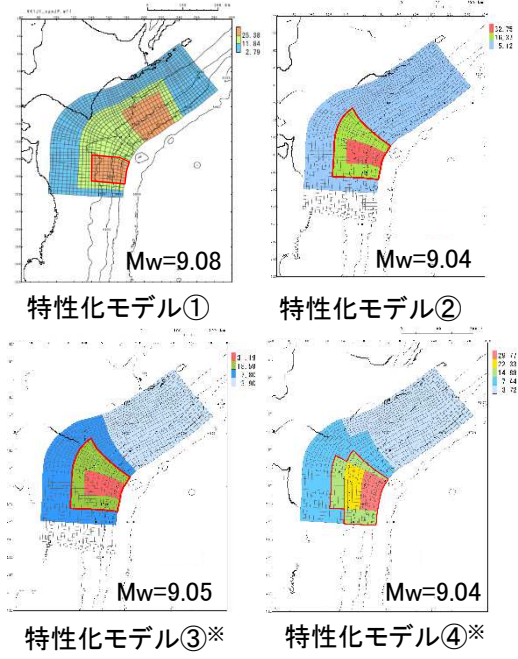
■想定津波群の作成



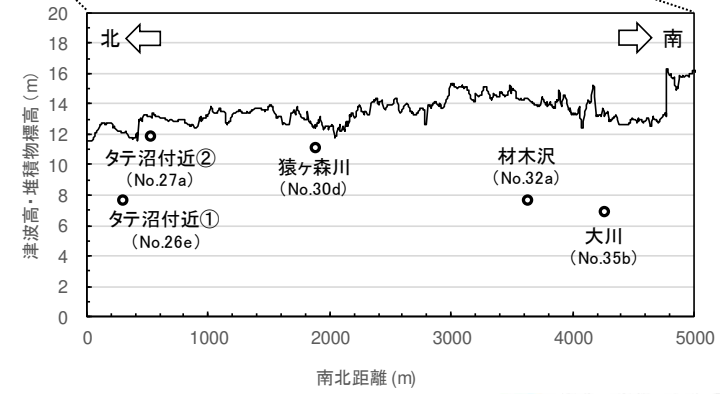
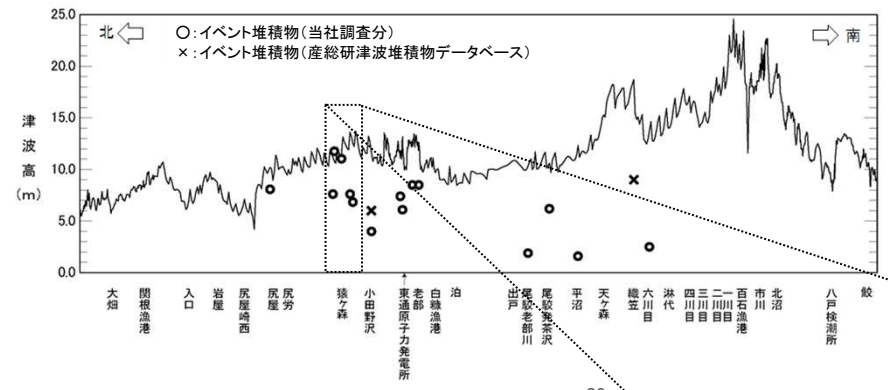
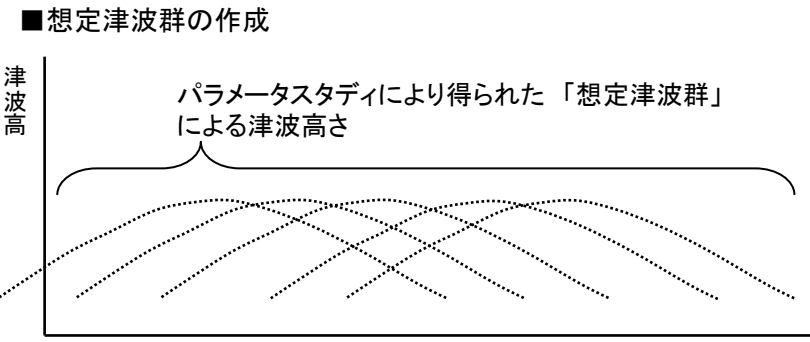
想定津波群とイベント堆積物の比較

Ⅶ. 計算条件等 6. 想定津波群の作成方法
6.2 連動型地震

・ 特性化モデル①～④を対象に、以下に示す表のケースを対象に想定津波群を作成し、イベント堆積物及び内閣府(2020a)と比較した。



□ : 大すべり域等
※: 大すべり域等に合わせて、基本すべり域も移動させる。

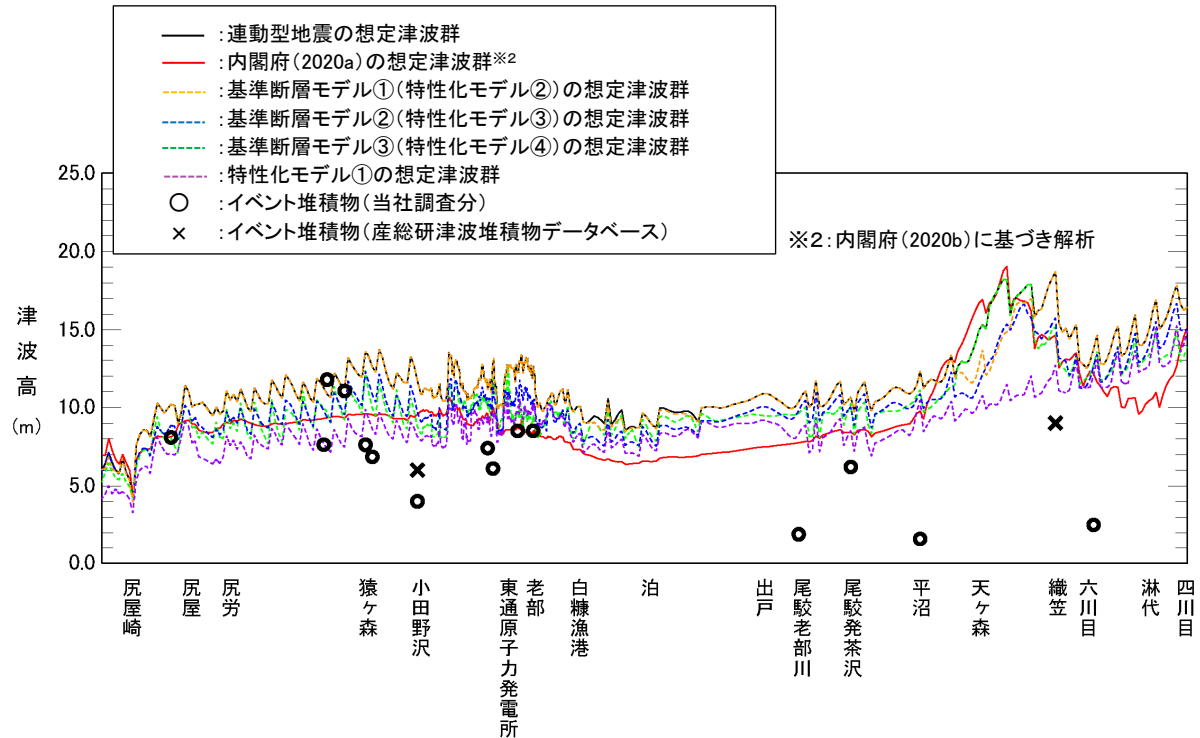
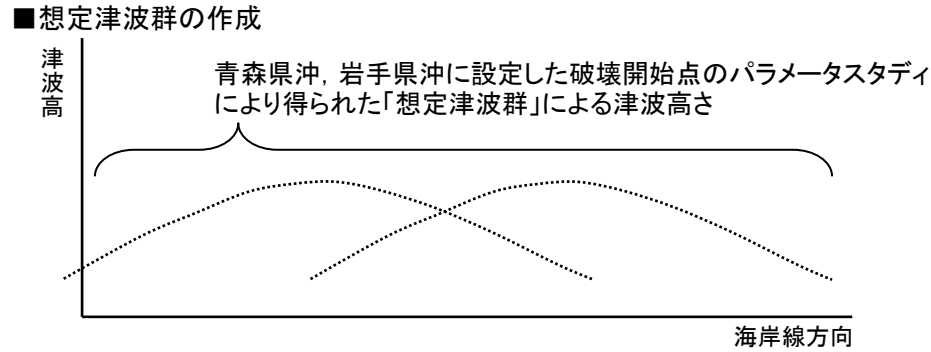
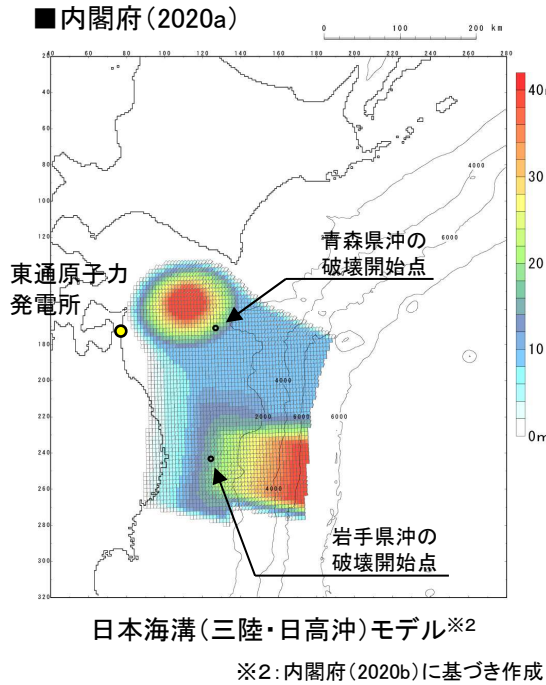


想定津波群とイベント堆積物の比較

特性化モデル	概略パラメータスタディ	詳細パラメータスタディ	
	大すべり域の位置	破壊開始点	破壊伝播速度
特性化モデル①	北へ30km～南へ70km	なし	なし
特性化モデル② (基準断層モデル①)	北へ50km～南へ150km	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P6)
特性化モデル③ (基準断層モデル②)	北へ50km～南へ150km	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P4)
特性化モデル④ (基準断層モデル③)	北へ50km～南へ150km	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P1)

6.3 内閣府(2020) 日本海溝(三陸・日高沖)モデル

- 日本海溝(三陸・日高沖)モデルについては、青森県沖、岩手県沖に破壊開始点設定したケースを対象に想定津波群を作成し、各特性化モデルの想定津波群と比較した。



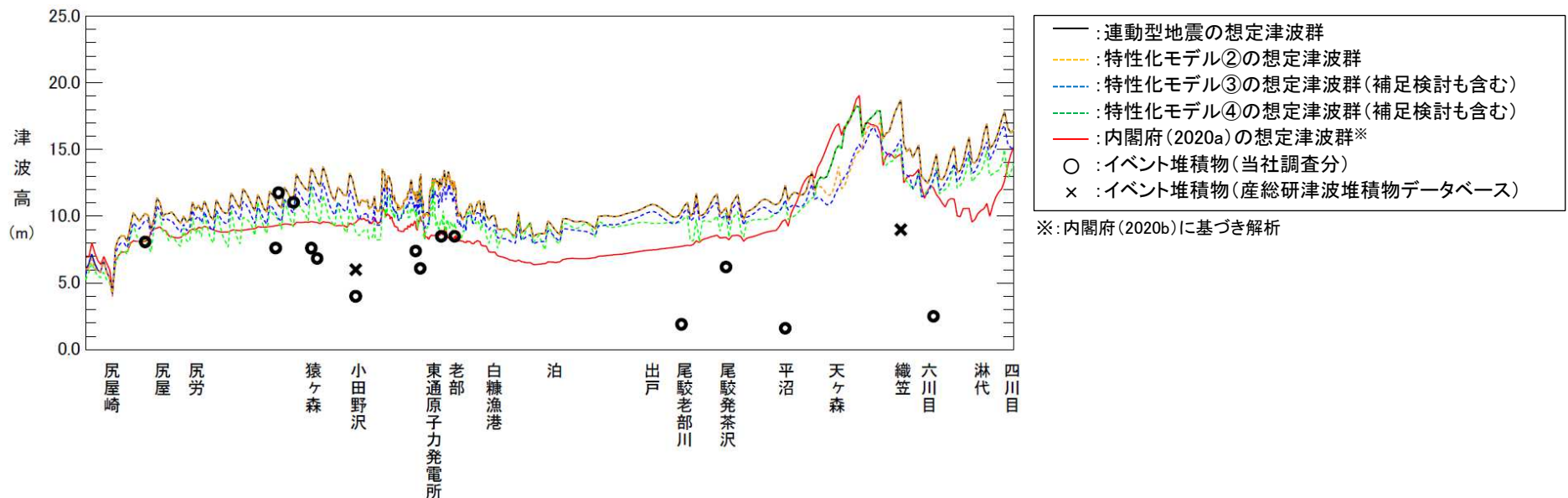
青森県北部太平洋沿岸の汀線位置における十勝沖・根室沖から岩手県沖北部の連動型地震の想定津波群とイベント堆積物及び内閣府(2020a)による日本海溝(三陸・日高沖)モデルの想定津波群の比較

Ⅶ. 計算条件等 6. 想定津波群の作成方法

6.4 各特性化モデルの詳細パラメータスタディ

- 各特性化モデルを対象に実施した詳細パラメータスタディ結果を踏まえた想定津波群とイベント堆積物及び内閣府(2020a)の想定津波群との比較結果を以下に示す。

特性化モデル	概略パラメータスタディ		詳細パラメータスタディ			
	大すべり域の位置	水位上昇側		水位下降側		
		破壊開始点	破壊伝播速度	破壊開始点	破壊伝播速度	
特性化モデル①	北へ30km～南へ70km	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P6)	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P5)	
特性化モデル② (基準断層モデル①)	北へ50km～南へ150km	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P6)	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P4)	
特性化モデル③ (基準断層モデル②)	北へ50km～南へ150km	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P6)	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P4)	
特性化モデル④ (基準断層モデル③)	北へ50km～南へ150km	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P6)	P1～P6	1.0, 1.5, 2.0, 2.5km/s (破壊開始点:P1)	



青森県北部太平洋沿岸の汀線位置における連動型地震の想定津波群(補足検討も含む)とイベント堆積物及び内閣府(2020a)による日本海溝(三陸・日高沖)モデルの想定津波群の比較

Ⅶ. 計算条件等

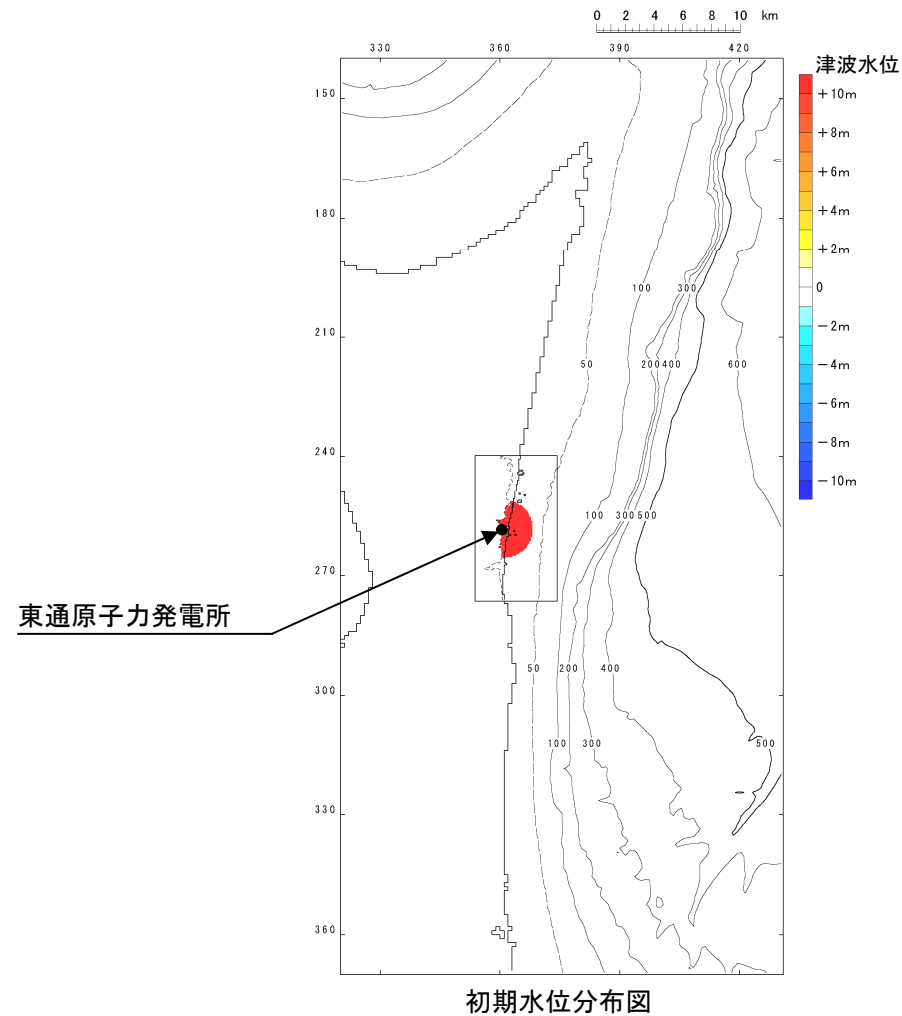
7. 津波伝播特性の検討

- 7. 1 検討方針
- 7. 2 最大水位上昇量分布
- 7. 3 津波の伝播状況

VII. 計算条件等 7. 津波伝播特性の検討

7.1 検討方針

- ・ 発電所を津波波源と仮定した場合の数値シミュレーションにより、津波の伝播特性の大きな傾向の把握を行った。
- ・ 津波波源は、発電所を中心とする半径2kmの円を設定し、一律10mの初期水位を与えた。

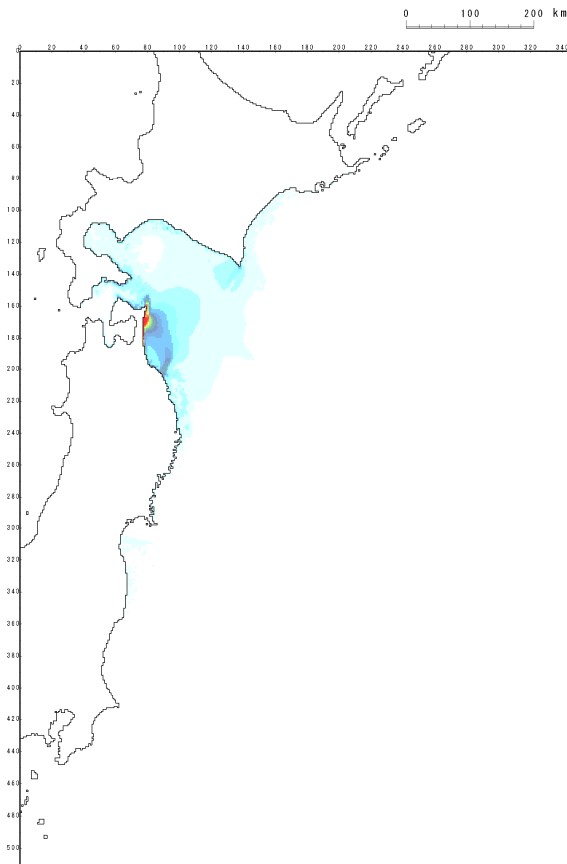


VII. 計算条件等 7. 津波伝播特性の検討

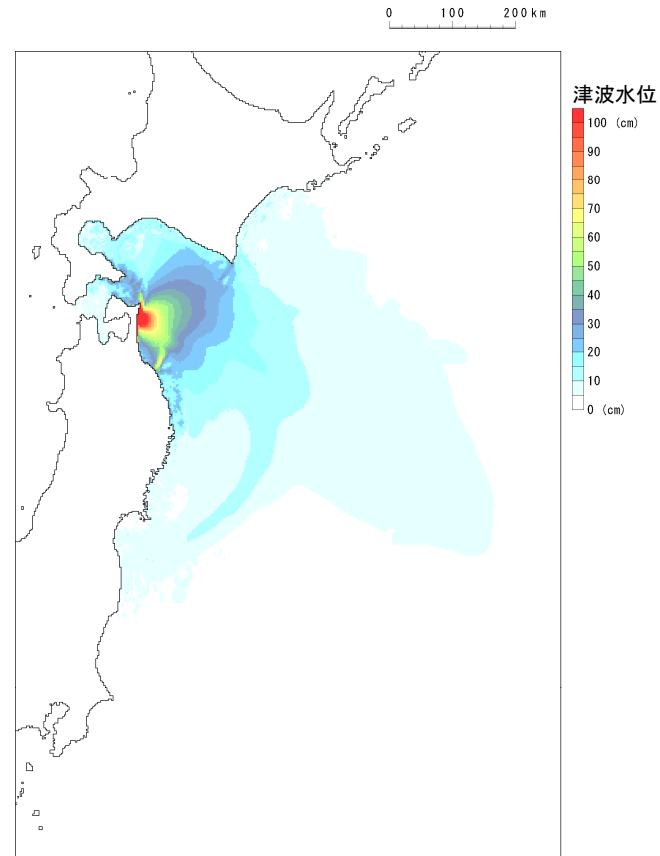
7.2 最大水位上昇量分布

- 水深による津波振幅への影響を軽減するため、「グリーンの法則」を用いて最大水位上昇量を補正※した。

※: 波源位置の水深を $h_0 (=10\text{m})$, 沖合地点の水深を h として, 数値シミュレーションで得られる各格子の最大水位上昇量を「 $(h_0/h)^{1/4}$ 」で除して補正。



水位補正前

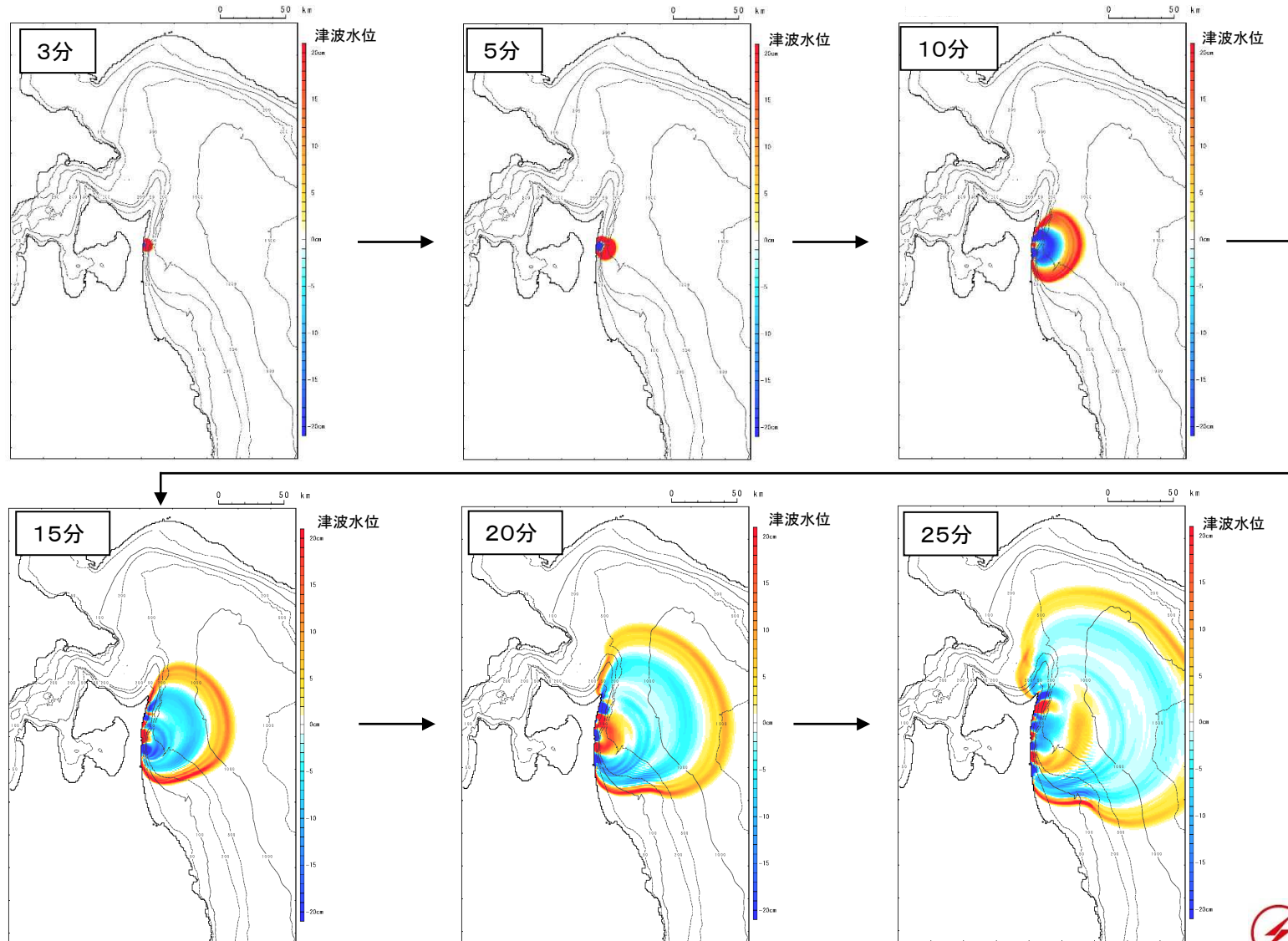


水位補正後

Ⅶ. 計算条件等 7. 津波伝播特性の検討

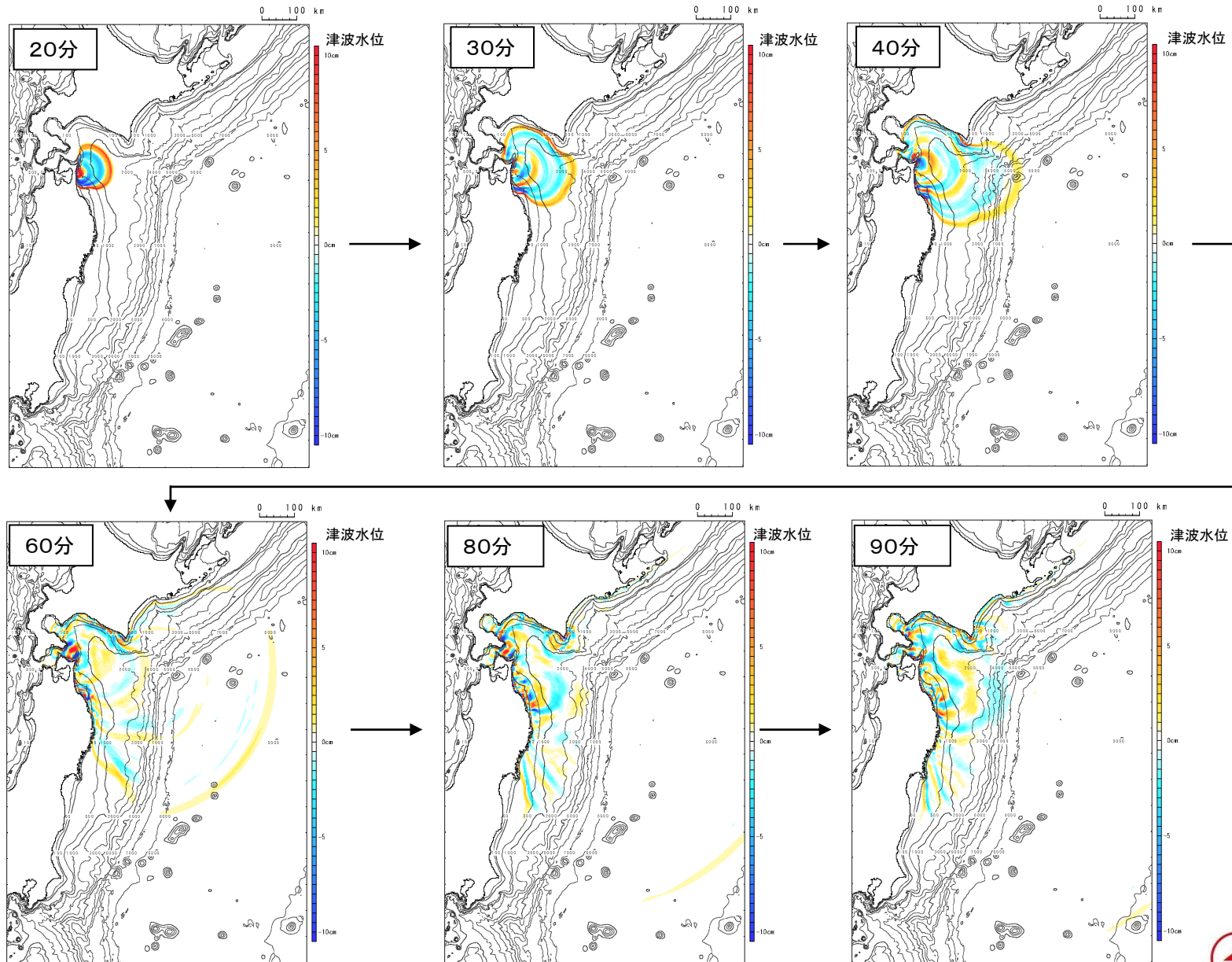
7.3 津波の伝播状況: 敷地近傍(3~25分後)

- 波源域から敷地前面海域に向かって、同心円状に津波が伝播する過程が確認される。



7.3 津波の伝播状況: 広域 (20~90分後)

- ・ 沖合に向かって、同心円状に津波が伝播する過程が確認される。



参考文献

参考文献①

1. Lingling Ye, Thorne Lay, and Hiroo Kanamori (2012) : The Sanriku-Oki low-seismicity region on the northern margin of the great 2011 Tohoku-Oki earthquake rupture, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, B02305, doi:10.1029/2011JB008847
2. 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
3. Naoki Uchida and Toru Matsuzawa (2011) : Coupling coefficient, hierarchical structure, and earthquake cycle for the source area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake inferred from small repeating earthquake data, Earth Planets Space, 63, 675-679
4. 気象庁(2009) : 2008年7月19日福島県沖の地震(M6.9)について, 地震予知連絡会 会報, 第81巻, 3-21
5. 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)
6. 文部科学省研究開発局・国立大学法人東北大学大学院理学研究科・国立大学法人東京大学地震研究所・独立法人産業技術総合研究所(2010) : 宮城県沖地震における重点的調査観測総括成果報告書, 390pp
7. 佐竹健治・行谷佑一・山木滋(2008) : 石巻・仙台平野における869年貞観津波の数値シミュレーション, 活断層・古地震研究報告, No.8, pp.71-89
8. 西村卓也(2012) : 測地観測データに基づく東北日本の最近120年間の地殻変動, 地質学雑誌, 第118巻, 第5号, pp.278-293
9. Shinzaburo Ozawa, Takuya Nishimura, Hiroshi Munekane, Hisashi Suito, Tomokazu Kobayashi, Mikio Tobita and Tetsuro Imakiire (2012) : Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, Journal of Geophysical Research, Vol.177, B07404, DOI: 10.1029/2011JB009120
10. Yusuke Yokota, Kazuki Koketsu (2015) : A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake, NATURE COMMUNICATIONS, DOI: 10.1038/ncomms6934
11. Naoki Uchida, Junichi Nakajima, Akira Hasegawa, Toru Matsuzawa (2009) : What controls interplate coupling?: Evidence for abrupt change in coupling across a border between two overlying plates in the NE Japan subduction zone, Earth and Planetary Science Letters 283, 111-121
12. Masanao Shinohara, Tomoaki Yamada, Kazuo Nakahigashi, Shin'ichi Sakai, Kimihiro Mochizuki, Kenji Uehira, Yoshihiro Ito, Ryusuke Azuma, Yuka Kaiho, Tetsuo No, Hajime Shiobara, Ryota Hino, Yoshio Murai, Hiroshi Yakiwara, Toshinori Sato, Yuya Machida, Takashi Shinbo, Takehi Isse, Hiroki Miyamachi, Koichiro Obana, Narumi Takahashi, Shuichi Kodaira, Yoshiyuki Kaneda, Kenji Hirata, Sumio Yoshikawa, Kazushige Obara, Takaya Iwasaki, and Naoshi Hirata (2011) : Aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by using ocean bottom seismometer network, Earth Planets Space, 63, 835-840
13. Tomoya Abe, Kazuhisa Goto, Daisuke Sugawara (2012) : Relationship between the maximum extent of tsunami sand and the inundation limit of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Sendai Plain, Japan, Sedimentary Geology 282, 142-150, doi:10.1016/j.sedgeo.2012.05.004
14. 後藤和久・箕浦幸治(2012) : 2011年東北地方太平洋沖地震津波の反省に立った津波堆積学の今後のあり方, 堆積学研究, 第71巻, 第2号, 105-117
15. 中村有吾・西村裕一・伊尾木圭衣・プルナ スラスティア プトラ・アディティア グスマン(2011) : 北海道および青森県における東北地方太平洋沖地震津波の実態に関する野外調査, 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会 予稿集

参考文献②

16. 山田昌樹・藤野滋弘(2013):2011年東北地方太平洋沖地震津波により茨城県・千葉県沿岸低地に形成された津波堆積物の堆積学的特徴, 堆積学研究, 第72巻, 第1号, 13-25
17. 後藤和久・菅原大助・西村裕一・藤野滋弘・小松原純子・澤井祐紀・清水康博(2017):津波堆積物の認定手順, 津波工学研究報告, 第33号, p.45-54
18. 澤井祐紀・穴倉正展・岡村行信・高田圭太・松浦旅人・Than Tin Aung・小松原純子・藤井雄士郎・藤原治・佐竹健治・鎌滝孝信・佐藤伸枝(2007):ハンディオスライサーを用いた宮城県仙台平野(仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町)における古津波痕跡調査, 活断層・古地震研究報告, No.7, pp.47-80
19. 澤井祐紀・穴倉正展・小松原純子(2008):ハンドコアラを用いた宮城県仙台平野(仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町)における古津波痕跡調査, 活断層・古地震研究報告, No.8, pp.17-70
20. 穴倉正展・澤井祐紀・岡村行信・小松原純子・Than TinAung・石山達也・藤原治・藤野滋弘(2007):石巻平野における津波堆積物の分布と年代, 活断層・古地震研究報告, No.7, pp.31-46
21. 内閣府中央防災会議 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会(2006):日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会報告について
22. 藤原治・鎌滝孝信・田村亨(2003):内湾における津波堆積物の粒度分布と津波波形との関連—房総半島南端の完新統の例—, 第四紀研究, 42(2), p.67-81
23. Koji Minoura, Shinichi Hirano, Tsutomu Yamada(2013):Identification and possible recurrence of an oversized tsunami on the Pacific coast of northern Japan, Nat Hazards 68:631-643, Springer, DOI 10.1007/s11069-013-0640-z
24. 穴倉正展・藤原治・澤井祐紀・行谷佑一・谷川晃一郎(2012):2011年東北地方太平洋沖地震による津波堆積物の仙台・石巻平野における分布限界, 活断層・古地震研究報告, No.12, pp.45-61
25. 谷川晃一郎・澤井祐紀・穴倉正展・藤原治・行谷佑一・松本弾(2013):青森県太平洋岸で検出された津波堆積物, 日本第四紀学会講演要旨集, No.43, 16-17
26. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター:津波堆積物データベース, https://gbank.gsj.jp/tsunami_deposit_db
27. 鎌田隆史・菅原大助・箕浦幸治・根本直樹・山田努(2015):猿ヶ森砂丘に挟在する再堆積層の成因:下北半島後期完新世砂丘の起源の考察, 日本地質学会第122年学術大会, 講演要旨, R21-O-4
28. 文部科学省(2012):根室沖等の地震に関する調査研究 成果報告書(平成23年度)
29. 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治(2011):地質学的データを用いた西暦869年貞観地震津波の復元について, 自然災害科学, 29-4, pp.501-516
30. 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治(2013):貞観津波と東日本大震災の津波, 東日本大震災を分析する2 震災と人間・まち・記録, 明石書店, pp.179-188
31. 行谷佑一・佐竹健治・山木滋(2010):宮城県石巻・仙台平野および福島県請戸川河口低地における869年貞観地震津波の数値シミュレーション, 活断層・古地震研究報告, No.10, pp.1-21
32. 文部科学省研究開発局・国立大学法人東北大学大学院理学研究科・国立大学法人東京大学地震研究所・独立法人産業技術総合研究所(2010):宮城県沖地震における重点的調査観測総括成果報告書, p.39

参考文献③

33. 菅原大助(2014):津波堆積物と津波の規模について, 地学雑誌, 123(6), 797-812
34. 岡村行信・行谷佑一(2011):17世紀に発生した千島海溝の連動型地震の再検討, 活断層・古地震研究報告, No.11, p.15-20
35. KOICHIRO TANIGAWA, YUKI SAWAI, MASANOBU SHISHIKURA, YUICHI NAMEGAYA and DAN MATSUMOTO (2014): Geological evidence for an unusually large tsunami on the Pacific coast of Aomori, Northern Japan, JOURNAL OF QUATERNARY SCIENCE, 29(2), 200-208, DOI: 10.1002/jqs.2690
36. Koji Minoura, Shu Nakaya and Masao Uchida(1994):Tsunami deposits in a lacustrine sequence of the Sanriku coast, northeast Japan, Sedimentary Geology,89, 25-31
37. 谷川晃一郎(2017):青森県六ヶ所村平沼における津波堆積物調査, 活断層・古地震研究報告, No.17, p.1-14
38. 谷川晃一郎・澤井祐紀・宍倉正展・藤原治・行谷佑一(2014):青森県三沢市で検出されたイベント堆積物, 第四紀研究, 53(1), p.55-62
39. 宍倉正展(2013):1960年チリ地震(Mw 9.5)の履歴と余効変動, 地震予知連絡会 会報, 第89巻, 12-7
40. Kusala Rajendran(2013):On the recurrence of great subduction zone earthquakes, CURRENT SCIENCE, VOL.104, NO.7,pp.880-892
41. 佐竹建治(2013):第197回地震予知連絡会 重点検討課題「世界の巨大地震・津波」概要, 地震予知連絡会 会報, 第89巻, 12-6
42. Robert C. Witter, Yinglong Zhang, Kelin Wang, Chris Goldfinger, George R. Priest and Jonathan C. Allan (2012):Coseismic slip on the southern Cascadia megathrust implied by tsunami deposits in an Oregon lake and earthquake-triggered marine turbidites,JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL.117, B10303
43. 岸本清行(2000):海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成:Japan250m.grd, 地質調査所研究資料集353, 地質調査
44. Tetsuzo Seno (2014):Stress drop as a criterion to differentiate subduction zones where Mw 9 earthquakes can occur , Tectonophysics 621 , 198-210
45. 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
46. 杉野英治・岩渕洋子・橋本紀彦・松末和之・蛭沢勝三・亀田弘行・今村文彦(2014):プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案, 日本地震工学会論文集, 第14巻, 第5号
47. 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによるデータ(<http://www.coastal.jp/tjt/>), 2012/12/29
48. 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
49. 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998):GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.356-360
50. Mansinha, L. and D.E. Smylie(1971):The displacement fields of inclined faults, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.61, No.5,pp.1433-1440
51. 杉野英治・呉長江・是永真理子・根本信・岩渕洋子・蛭沢勝三(2013):原子力サイトにおける2011東北地震津波の検証, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第2号(特集号)
52. Changjiang Wu, Hideaki Tsutsumi, Hongjun Si, Yusuke Saijo(2012): Rupture Process of the 2011 Mw9.0 Tohoku Earthquake And Strong Motion Simulation from the Viewpoint of NPP Seismic Design,15th World Conference on Earthquake Engineering

参考文献④

53. Satoko Murotani, Kenji Satake, Yushiro Fujii (2013) : Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip and asperity size for M \sim 9 subduction zone earthquakes, *Geophysical Research Letters*, Vol.40, pp.5070–5074
54. Toshiya Fujiwara, Shuichi Kodaira, Tetsuo No, Yuka Kaiho, Narumi Takahashi, Yoshiyuki Kaneda (2011) : The 2011 Tohoku–Oki Earthquake: Displacement Reaching the Trench Axis, *SCIENCE*, VOL 334
55. Kenji Satake, Yushiro Fujii, Tomoya Harada, and Yuichi Namegaya (2013) : Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 2B, pp. 1473–1492, doi:10.1785/0120120122
56. 東北電力株式会社 (2011) : 女川原子力発電所における平成23年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の調査結果に関わる報告書, 2011年7月
57. 長谷川昭 (2015) : 2011年東北沖地震の震源域で何が起きたか? – 東北沖地震の発生機構 –, *地震ジャーナル*, 60号
58. Tetsuro Tsuru, Jin–Oh Park, Seiichi Miura, Shuichi Kodaira, Yukari Kido, Tsutomu Hayashi (2002) : Along–arc structural variation of the plate boundary at the Japan Trench margin: Implication of interplate coupling, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 107, NO. B12, 2357, doi:10.1029/2001JB001664
59. Koichiro Obana, Shuichi Kodaira, Masanao Shinohara, Ryota Hino, Kenji Uehira, Hajime Shiobara, Kazuo Nakahigashi, Tomoaki Yamada, Hiroko Sugioka, Aki Ito, Yasuyuki Nakamura, Seiichi Miura, Tetsuo No, Narumi Takahashi (2013) : Aftershocks near the updip end of the 2011 Tohoku–Oki earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 382, 111–116, doi.org/10.1016/j.epsl.2013.09.007
60. 文部科学省測地学分科会 (2014) : 「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」平成25年度年次報告 (機関別), 課題番号1205, アスペリティの特性解明に向けた観測研究
61. Satoshi Ide, Annemarie Baltay, Gregory C. Beroza (2011) : Shallow Dynamic Overshoot and Energetic Deep Rupture in the 2011 Mw9.0 Tohoku–Oki Earthquake, *Science*, vol. 332, 1426–1429, DOI:10.1126/science.1207020
62. 井出哲 (2011) : 東北沖地震の二面性 – 浅部のすべり過ぎと深部の高周波震動 –, 東京大学大学院理学系学科, プレスリリース
63. Jeremy E. Kozdon and Eric M. Dunham (2013) : Rupture to the Trench: Dynamic Rupture Simulations of the 11 March 2011 Tohoku Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.103, No.2B, pp.1275–1289, doi: 10.1785/0120120136
64. Aki Ito, Gou Fujie, Tetsuro Tsuru, Shuichi Kodaira, Ayako Nakanishi, Yoshiyuki Kaneda (2004) : Fault plane geometry in the source region of the 1994 Sanriku–oki earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 223, 163–175
65. Yamanaka, Y. and M. Kikuchi (2004) : Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, 109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683
66. 永井理子・菊地正幸・山中佳子 (2001) : 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究 – 1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較 –, *地震 第2輯*, 54, 267–280
67. Saeko Kita, Junichi Nakajima, Akira Hasegawa, Tomomi Okada, Kei Katsumata, Youichi Asano and Takeshi Kimura (2014) : Detailed seismic attenuation structure beneath Hokkaido, northeastern Japan: Arc–arc collision process, arc magmatism, and seismotectonics, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119(8), 6486–6511

参考文献⑤

68. Kazushige Obara, Yoshikatsu Haryu, Yoshihiro Ito, Katsuhiko Shiomi (2004) : Low frequency events occurred during the sequence of aftershock activity of the 2003 Tokachi–Oki earthquake; a dynamic process of the tectonic erosion by subducted seamount, *Earth Planets Space*, 56, 347–351
69. Yukinobu Okamura, Takumi Tsujino, Kohsaku Arai, Tomoyuki Sasaki, Kenji Satake and Masato Joshima (2008) : Fore arc structure and plate boundary earthquake sources along the southwestern Kuril subduction zone, *Journal of Geophysical Research*, Vol.113, B06305
70. Sachiko Tanaka , Takanori Matsuzawa , and Youichi Asano(2019) : Shallow Low-Frequency Tremor in the Northern Japan Trench Subduction Zone, *Geophysical Research Letters*, Vol.46, Issue.10, pp.5217–5224
71. Saeko Kita, Tomomi Okada, Akira Hasegawa, Junichi Nakajima, Toru Matsuzawa (2010) : Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth and Planetary Science Letters* 290, 415–426
72. 文部科学省 (2008) : プレート境界及びその周辺域の3次元地殻不均質構造の推定, 東南海・南海地震等海溝型地震に関する調査研究, 平成20年度成果報告書, 3.1.1.2
73. Azusa Nishizawa, Kentaro Kaneda, Naoko Watanabe, and Mitsuhiro Oikawa (2009) : Seismic structure of the subducting seamounts on the trench axis: Erimo Seamount and Daiichi–Kashima Seamount, northern and southern ends of the Japan Trench, *Earth Planets Space*, 61, e5–e8
74. Tomoaki Nishikawa, Toru Matsuzawa, Kazuaki. Ohta, Naoki Uchida, Takuya. Nishimura, S. Ide (2019) : The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories, *Science*, Vol. 365, Issue 6455, pp. 808–813
75. Takuya Nishimura, Tomowo Hirasawa, Shin'ichi Miyazaki, Takeshi Sagiya, Takashi Tada, Satoshi Miura and Kazuo Tanaka (2004) : Temporal change of interplate coupling in northeastern Japan during 1995–2002 estimated from continuous GPS observations, *Geophysical Journal International*, Vol.157, Issue 2, pp.901–916
76. Chihiro Hashimoto, Akemi Noda, Takeshi Sagiya and Mitsuhiro Matsu'ura (2009) : Interplate seismogenic zones along the Kuril–Japan trench inferred from GPS data inversion, *Nature Geoscience*, Vol.2, pp.141–144
77. Naoyuki Kato and Tetsuzo Seno (2003) : Hypocenter depths of large interplate earthquakes and their relation to seismic coupling, *Earth and Planetary Science Letters* 210, 53–63
78. P. Martin Mai, P. Spudich, and J. Boatwright (2005) : Hypocenter Locations in Finite–Source Rupture Models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 3, pp. 965–980, doi: 10.1785/0120040111
79. S.T.G. RAGHUKANTH and S. SANGEETHA (2016) : A stochastic model for earthquake slip distribution of large events, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 7, No. 2, 493–521, doi.org/10.1080/19475705.2014.941418
80. Diego Melgar and Gavin P. Hayes (2019) : The Correlation Lengths and Hypocentral Positions of Great Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 109, No. 6, pp. 2582–2593, doi: 10.1785/0120190164

参考文献⑥

81. 杉野英治・岩渕洋子・阿部雄太(2017):破壊伝播特性の不確かさ影響を考慮した確率論的津波ハザード評価手法, 日本地震工学会論文集 第17巻, 第2号
82. Yushiro Fujii and Kenji Satake(2007):Tsunami Source of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Inferred from Tide Gauge and Satellite Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 1A, pp. S192-S207, doi: 10.1785/0120050613
83. YUSHIRO FUJII and KENJI SATAKE (2013): Slip Distribution and Seismic Moment of the 2010 and 1960 Chilean Earthquakes Inferred from Tsunami Waveforms and Coastal Geodetic Data, Pure and Applied Geophysics, DOI 10.1007/s00024-012-0524-2
84. 内閣府(2020a):日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデルの検討について(概要報告), 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会
85. 内閣府(2020b):G空間情報センターHP, 内閣府 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデルの検討会/津波断層モデル(3)津波断層パラメータ(最終更新2020年12月16日), <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/2-003>
86. 河合弘泰・佐藤真・川口浩二・関克己(2011):GPS波浪計で捉えた平成23年東北地方太平洋沖地震津波, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.67, No.2, I_1291-I_1295
87. JAMSTEC(2012):海溝軸まで及んだ東北地方太平洋沖地震の地震断層を確認, プレスリリース
88. 奥村与志弘・後藤浩之(2013):海溝型地震の分岐断層破壊シナリオで発生する津波の特徴に関する一考察, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.69, No.4(地震工学論文集第32巻), I_750-I_757
89. 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
90. 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)
91. R. McCaffrey(2008):Global Frequency of Magnitude 9 Earthquakes, Geology, DR2008063
92. 岸力(1969):1968年十勝沖地震調査報告, 津波—北海道東北沿岸—, 1968年十勝沖地震調査委員会編『1968年十勝沖地震調査報告』, pp.207-256
93. 相田勇(1986):津波波源の推定, 水工学シリーズ86-B-2, 土木学会水理委員会
94. 伊藤潔・大東明子(1996):地殻および上部マントルにおける V_p/V_s 比, 日本地震学会講演予稿集, No.2, B83
95. 阿部勝征(2003):津波地震とは何か—総論—, 月刊 地球, Vol.25, No.5, pp.337-342
96. 阿部勝征(1988):津波マグニチュードによる日本付近の地震津波の定量化, 東京大学地震研究所彙報, Vol.63, pp.289-303
97. 阿部勝征(1999):遡上高を用いた津波マグニチュード M_t の決定—歴史津波への応用—, 地震第2輯, 第52巻, pp.369-377
98. Katsuyuki Abe(1979):Size of Great Earthquakes of 1837-1974 Inferred From Tsunami Data, Journal of Geophysical Research, Vol. 84, No.B4
99. Katsuyuki Abe(1985):Quantification of major earthquake tsunamis of the Japan Sea, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 38,214-223
100. 宇津徳治(1999):地震活動概説, 東大出版会, 876pp
101. Katsuyuki Abe(1981):Physical size of tsunamigenic earthquakes of the northwestern Pacific, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 27,194-205
102. Hiroo Kanamori(1972):Mechanism of tsunami Earthquakes, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 6, 346-359

参考文献⑦

103. 防災科学技術研究所(2009):「地すべり地形分布図第42集「野辺地・八戸」」, 地すべり地形分布図データベース, 防災科学技術研究所研究資料, 第329号, <http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/pdfview/s42-index.html>
104. B.G.McAdoo,L.F.Pratson,D.L.Orange (2000) : Submarine landslide geomorphology, US continental slope, Marine Geology,169, 103-136
105. Posamentier, H. and Martinsen, H. (2011) : The character and genesis of submarine mass-transport deposits: insights from outcrop and 3D seismic data. SEPM Special Publication "Mass-transport deposits in deepwater settings", Vol.96, pp.7-38.
106. 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2009) :付録3 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)
107. S.Noda, K.Yashiro, K.Takahashi, M.Takemura, S.Ohno, M.Tohdo and T.Watanabe (2002) :RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering, Oct.16-18, Istanbul
108. 川村喜一郎(2022) :活動的縁辺域での海底地すべりの研究課題, 月刊地球, 号外, No.73, pp.38-45
109. 上田恭平・井澤淳・室野剛隆・井合進(2014) :余震の発生が地盤の液状化挙動に及ぼす影響に関する解析的検討, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.70, No.4(地震工学論文集第33巻), 1_578-1_585
110. 風間基樹・森友宏・株木宏明・松井哲志(2011) :荒砥沢ダム上流部で発生した地すべりの滑動計算とその考察, 日本地震工学会論文集, 第11巻, 第5号(特集号)
111. Adi Patria and Purna Sulastya Putra(2020) :Development of the Palu-Koro Fault in NW Palu Valley, Indonesia, Geoscience Letters, doi:10.1186/s40562-020-0150-2
112. TAKAHITO MIKAMI, TOMOYA SHIBAYAMA, MIGUEL ESTEBAN, TOMOYUKI TAKABATAKE, RYOTA NAKAMURA,YUTA NISHIDA, HENDRA ACHIARI, RUSLI, ABDUL GAFUR MARZUKI, MUHAMMAD FADEL HIDAYAT MARZUKI, JACOB STOLLE, CLEMENS KRAUTWALD, IAN ROBERTSON, RAFAEL ARA´NGUIZ and KOICHIRO OHIRA (2019) :Field Survey of the 2018 Sulawesi Tsunami: Inundation and Run-up Heights and Damage to Coastal Communities, Pure and Applied Geophysics, 3291-3304
113. Wahyu Widiyanto, Purwanto B. Santoso, Shih-Chun Hsiao and Rudy T. Imananta(2019) :Post-event Field Survey of 28 September 2018 Sulawesi Earthquake and Tsunami, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol.19, 2781-2794
114. P.L.-F.Liu, P.Higuera, S.Husrin, G.S.Prasetya, J.Prihantono, H.Diastomo, D.G.Pryambodo and H.Susmoro(2020) :Coastal landslides in Palu Bay during 2018 Sulawesi earthquake and tsunami, Landslides, 17, 2085-2098
115. Chatuphorn Somphong, Anawat Suppasri, Kwanchai Pakoksung, Tsuyoshi Nagasawa, Yuya Narita, Ryunosuke Tawatari, Shohei Iwai, Yukio Mabuchi, Saneiki Fujita, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada, Cipta Athanasius and Fumihiko Imamura(2022) :Submarine landslide source modeling using the 3D slope stability analysis method for the 2018 Palu, Sulawesi, tsunami, Natural Hazards and Earth System Sciences, 891-907
116. Lauren Schambach, Stephan T. Grilli and David R. Tappin(2021) :New High-Resolution Modeling of the 2018 Palu Tsunami, Based on Supershear Earthquake Mechanisms and Mapped Coastal Landslides, Supports a Dual Source, Frontiers in Earth Science, Vol.8, 1-22
117. Nagai Kaori, Abdul Muhari, Kwanchai Pakoksung, Masashi Watanabe, Anawat Suppasri, Taro Arikawa and Fumihiko Imamura(2021) :Consideration of submarine landslide induced by 2018 Sulawesi earthquake and tsunami within Palu Bay, Coastal Engineering Journal, Vol.63, 446-466

参考文献⑧

118. Danny Hilman Natawidjaja, Mudrik R. Daryono, Gegar Prasetya, Udrekh, Philip L-F. Liu, Nugroho Dwi Hananto, Widjo Kongko, Wahyu Triyoso, Anggraini Rizkita Puji, Irwan Meilano, Endra Gunawan, Pepen Supendi, Astyka Pamumpuni, Mashyur Irsyam, Lutfi Faizal, Sri Hidayati, Benyamin Sapiie, Mipi A. Kusuma and Sukardan Tawil (2021) : The 2018 Mw7.5 Palu ‘supershear’ earthquake ruptures geological fault’s multisegment separated by large bends: results from integrating field measurements, LiDAR, swath bathymetry and seismic-reflection data, *Geophysical Journal International*, 224, 985–1002
119. Pepen Supendi, Andri Dian Nugraha, Sri Widiyantoro, Chalid Idham Abdullah, Nanang T. Puspito, Kadek Hendrawan Palgunadi, D. Daryono and Samsul Hadi Wiyono (2019) : Hypocenter relocation of the aftershocks of the Mw 7.5 Palu earthquake (September 28, 2018) and swarm earthquakes of Mamasa, Sulawesi, Indonesia, using the BMKG network data, *Geoscience Letters*, doi:10.1186/s40562-019-0148-9
120. 相田勇(1977) : 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東京大学地震研究所彙報, Vol.52, pp.71–101
121. 羽鳥徳太郎(2000) : 三陸沖歴史津波の規模の再検討, 津波工学研究報告17, pp.39–48
122. 伊木常誠(1897) : 三陸地方津浪実況取調報告, 震災予防調査会報告, 第11号, pp.5–34
123. 松尾春雄(1933) : 三陸津浪調査報告, 内務省土木試験所報告, 第24号, pp.83–112
124. 地震研究所(1934) : 昭和8年3月3日三陸地方津浪に関する論文及報告, 東京帝国大学地震研究所彙報, 別冊第1号