

本資料は、旧 原子力安全委員会 原子力安全基準・指針専門部会 地震・津波関連指針等検討小委員会(第5回 H23.10.7)において、東北電力から説明したものです。

女川原子力発電所における 平成23年(2011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ついて

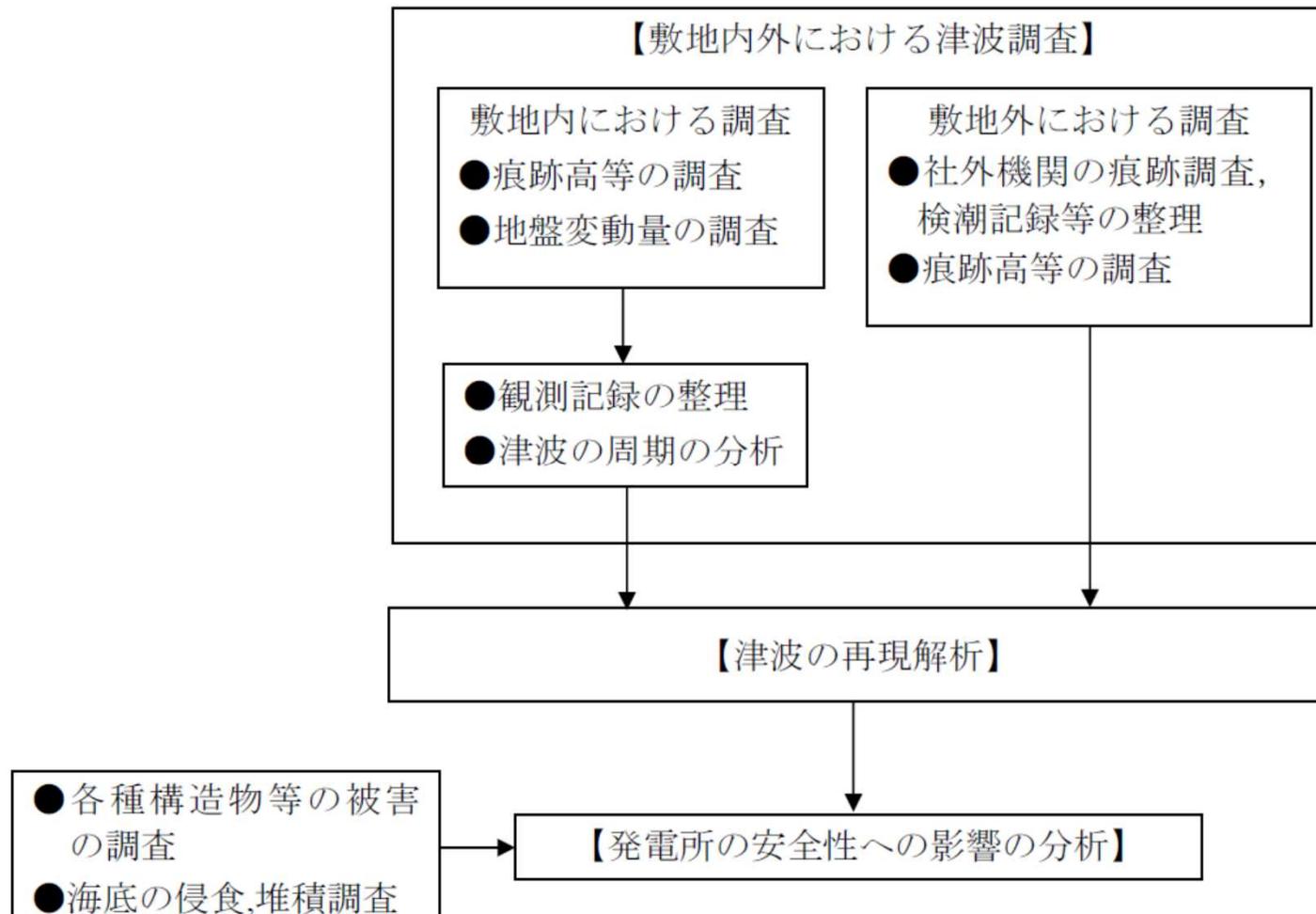
1. 検討の流れ
2. 東北地方太平洋沖地震津波に関するデータの収集
3. 津波波源モデルの策定
 - (1) 津波波源モデルの推定
 - (2) 津波波源モデルの妥当性確認
4. 発電所の安全性への影響の分析

1.検討の流れ



1. 検討の流れ

◇平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により女川原子力発電所に来襲した津波について、敷地内外における津波調査、津波の再現解析、発電所の安全性への影響の分析を実施した。



2. 東北地方太平洋沖地震津波に関するデータの収集



2. 東北地方太平洋沖地震津波に関するデータの収集

津波波源モデルの推定, 再現解析結果の妥当性確認に用いた調査データ

項目	東北電力の調査データ	社外機関による調査データ
① 地盤変動	<ul style="list-style-type: none"> ・陸域: GPS基準点測量 	<ul style="list-style-type: none"> ・陸域: 国土交通省 ・海域: 海上保安庁
② 痕跡高	<ul style="list-style-type: none"> ・女川発電所敷地 ・宮城県牡鹿郡女川町～宮城県石巻市 	<ul style="list-style-type: none"> ・東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ等
③ 検潮記録	<ul style="list-style-type: none"> ・女川発電所専用港湾に設置したバックアップ用潮位計による観測記録 	<ul style="list-style-type: none"> ・気象庁, 国土地理院, 港湾局等で公開した検潮記録 ・東京電力(株)福島第一発電所, 日本原子力発電(株)東海第二発電所で取得した観測記録
④ 浸水域	<ul style="list-style-type: none"> ・女川発電所敷地における浸水域 	<ul style="list-style-type: none"> ・国土地理院による浸水域 ・東京電力(株), 日本原子力発電(株)による福島県および東海村の浸水域

2. 東北地方太平洋沖地震津波に関するデータの収集 地盤変動について

東北電力の調査データ

◇GPS基準点測量より、発電所敷地は、約1m程度沈下し、O. P. ※約+13.8mになったと考えられる。



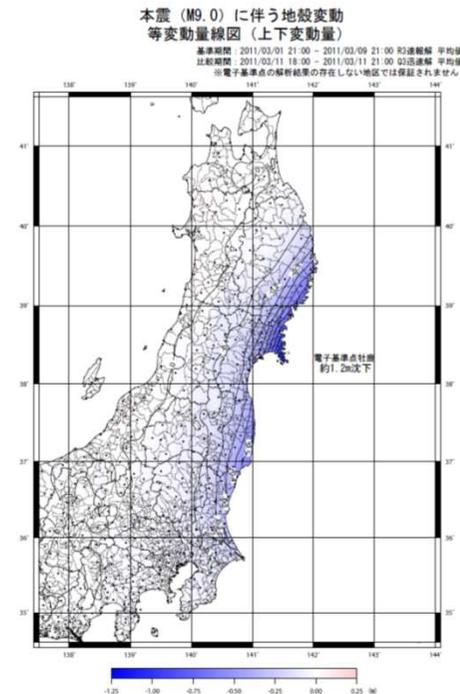
整合的



社外機関による調査データ

◇女川発電所周辺における変動量(暫定値)

- ・上下方向: 約1.0m~1.1m
- ・水平方向: 約5.2m(東南東)



上下方向の地盤変動量(国土地理院HPより)

※: O.P.は女川原子力発電所工事用基準面であり、O.P.±0.0mは東京湾平均海面(T.P.)から-0.74mの高さ



2. 東北地方太平洋沖地震津波に関するデータの収集 痕跡高について

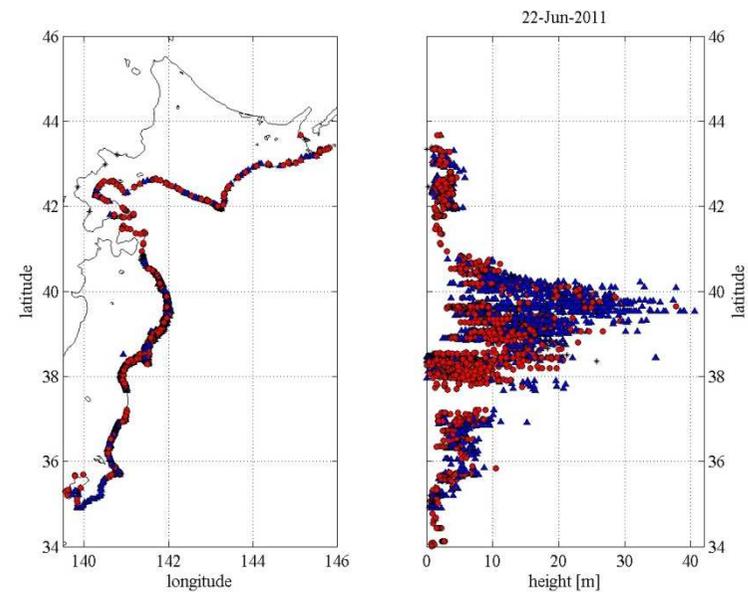
東北電力の調査データ

◇平成23年3月26日～4月6日にかけて、発電所敷地および宮城県牡鹿郡女川町尾浦から石巻市泊浜泊を対象に痕跡調査を実施。



社外機関による調査データ

◇東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの調査結果から、北海道太平洋北部沿岸から千葉県房総半島沿岸部のデータを取得。

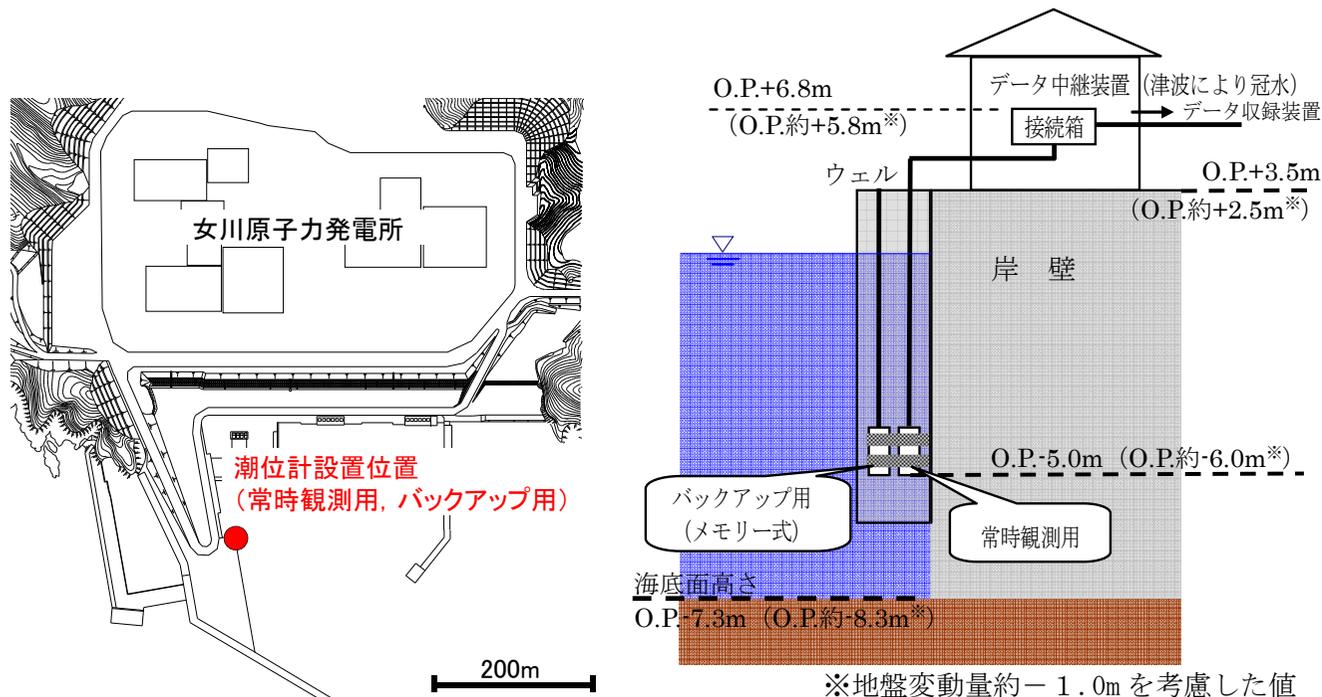


検潮記録について(東北電力で取得した津波観測記録)

【潮位計の概要】

◇港内静穏域に常時観測用の潮位計と常時観測用が欠測となった場合のバックアップ用の潮位計(メモリー式)を同一箇所を設置。

◇常時観測用の潮位計は津波の影響により測定不能となったものの、バックアップ用の潮位計により継続的に観測を行っておりデータを取得。



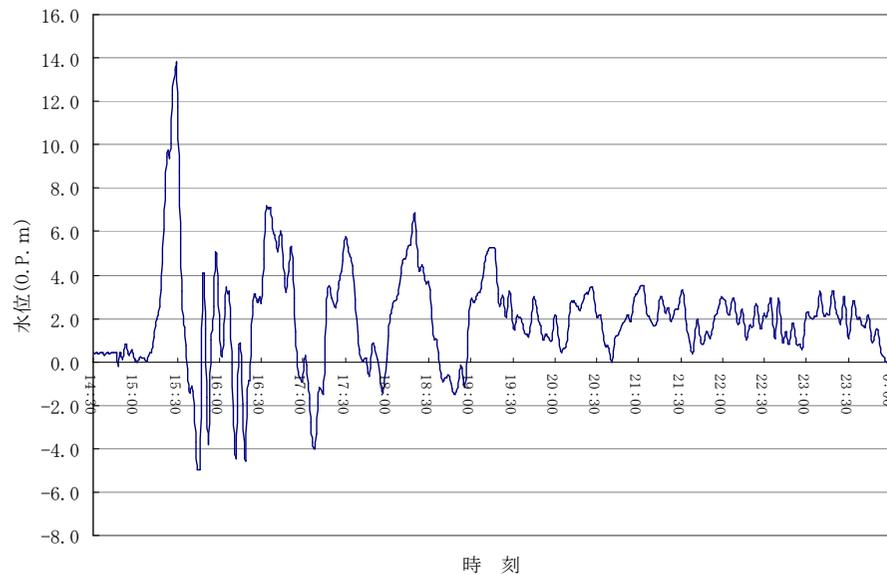
潮位計	設置時期	方式	測定範囲	測定間隔
常時観測用	1号機建設時	水晶式(有線テレメータ)	O.P.+5.0m~O.P.-5.0m	2秒
バックアップ用	平成22年3月	圧力式(メモリー)	O.P.+20.0m~O.P.-5.0m	60秒

検潮記録について(東北電力で取得した津波観測記録)

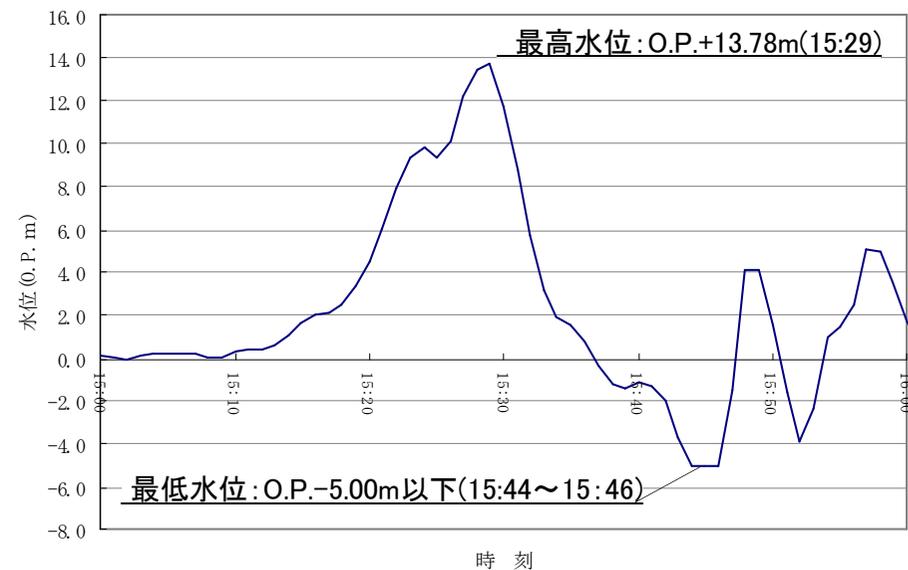
【観測記録の整理:地盤変動量約1m補正前】

◇測定範囲:O.P.+20.0m ~ O.P.-5.0m

◇測定間隔:60秒

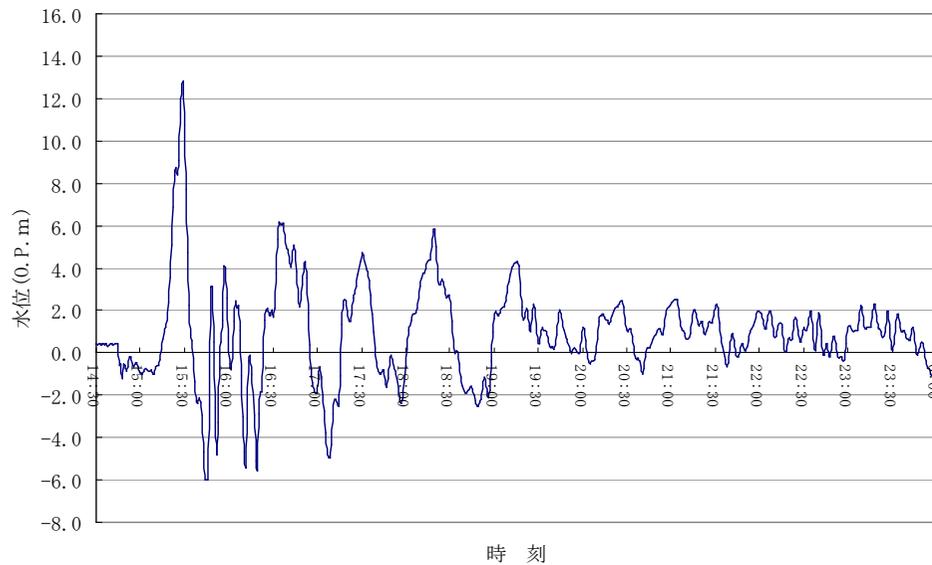


平成23年3月11日14時30分～24時00分

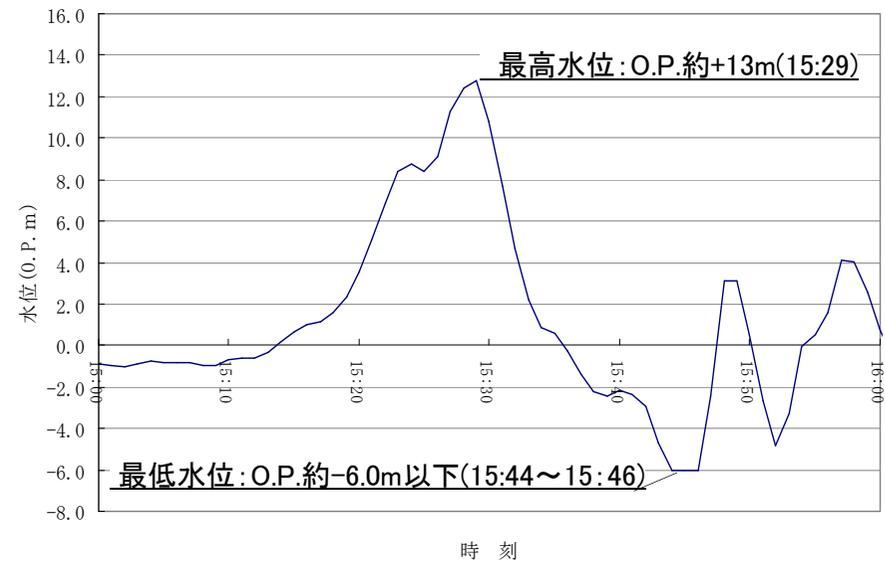


平成23年3月11日15時00分～16時00分

【観測記録の整理: 地盤変動量約1m補正後】



平成23年3月11日14時30分～24時00分



平成23年3月11日15時00分～16時00分

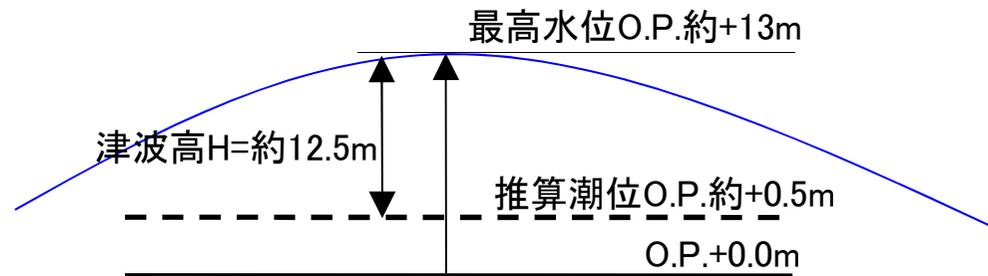
検潮記録について(東北電力で取得した津波観測記録)

【津波高の整理:地盤変動量約1m補正後】

◇実潮位は、常時観測用の潮位計で計測しているが、計測不能となったことから、推算潮位※を実潮位と仮定して津波高を算定。

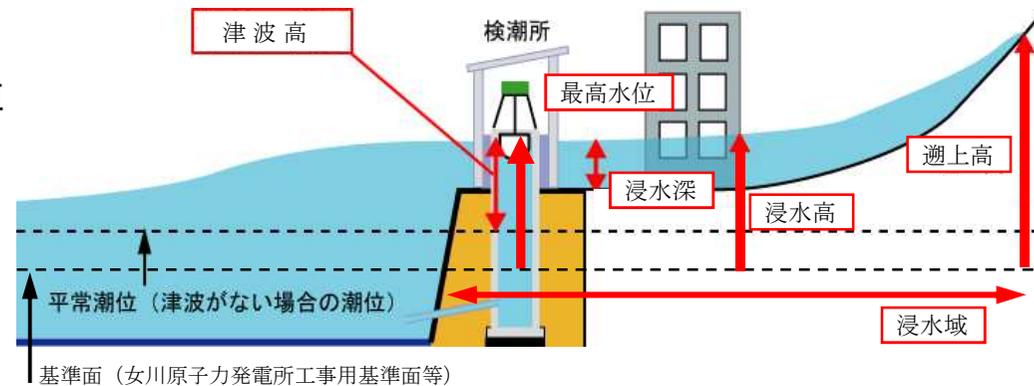
※:推算潮位は、過去5年間(平成17年4月1日～平成22年3月31日)に女川原子力発電所で観測された潮位データを基にして計算された潮位の予測値であり、O.P.約+0.5mとなる。

◇津波高H=最高水位(O.P.約+13m)－推算潮位(O.P.約+0.5m)＝約12.5m



【用語の定義】

- ・最高水位:潮位計で観測された津波の高さの最高値
- ・津波高:津波によって海面が上昇した高さ
- ・浸水高:建屋や設備に残された津波の痕跡の高さ
- ・遡上高:海岸から内陸に津波が及んだ高さ
- ・浸水域:津波によって浸水した範囲
- ※ 痕跡高:浸水高、遡上高を総称



検潮記録について(社外機関による検潮記録)

◇北海道太平洋北部沿岸から千葉県房総半島南部沿岸のデータを取得。

◇原子力発電所のデータは、女川原子力発電所の観測記録に加え、東京電力株式会社及び日本原子力発電株式会社から提供を受けたものを利用。

場 所	機 関
花咲	気象庁
浜中町霧多布	国土交通省港湾局
釧路	気象庁
釧路(波高計)	国土交通省港湾局
十勝港	気象庁
えりも町庶野	気象庁
浦河	気象庁
苫小牧西	国土交通省港湾局
苫小牧(波高計)	国土交通省港湾局
白老	国土交通省港湾局
室蘭(潮位計)	国土交通省港湾局
函館	気象庁
むつ市関根浜	気象庁
浅虫	国土地理院
むつ小川原	国土交通省港湾局
むつ小川原(波高計)	国土交通省港湾局

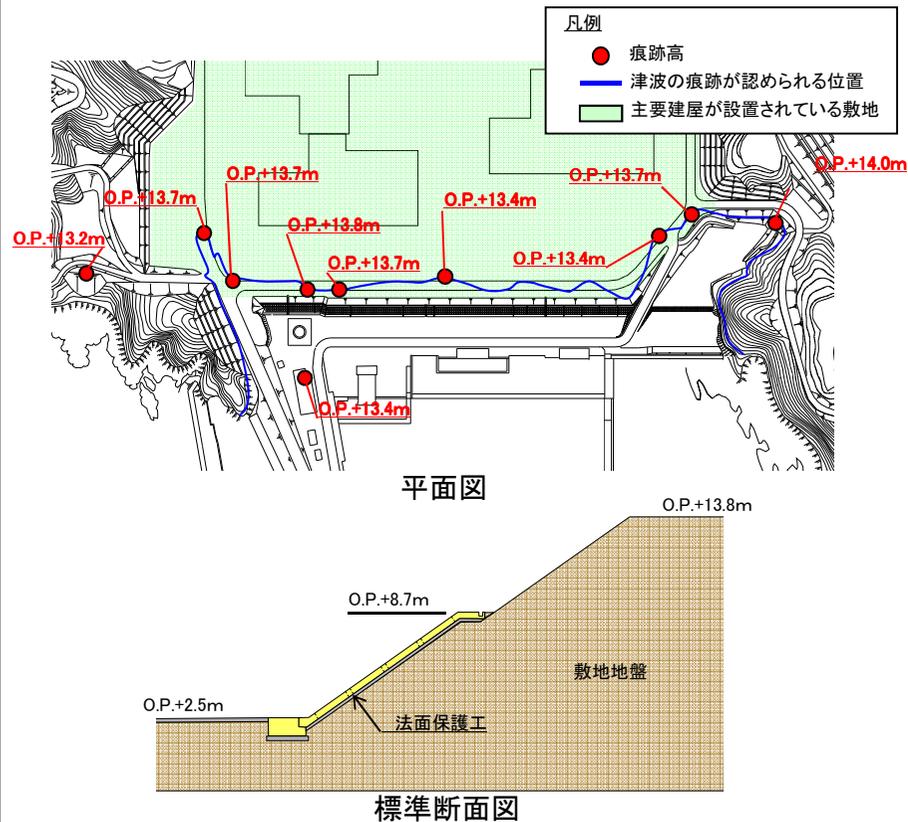
場 所	機 関
八戸	気象庁
八戸港鮫	国土交通省港湾局
八戸(波高計)	国土交通省港湾局
久慈(潮位計)	国土交通省港湾局
久慈(波高計)	国土交通省港湾局
宮古	気象庁
釜石	気象庁
大船渡	気象庁
鮎川	気象庁
仙台新港(波高計)	国土交通省港湾局
相馬	気象庁
小名浜	気象庁
大洗	気象庁
銚子	気象庁
勝浦	国土地理院
布良	気象庁

場 所	機 関
岩手北部沖GPS	国土交通省港湾局
岩手中部沖GPS	国土交通省港湾局
岩手南部沖GPS	国土交通省港湾局
宮城北部沖 GPS	国土交通省港湾局
宮城中部沖 GPS	国土交通省港湾局
福島県沖GPS	国土交通省港湾局
Station21418	NOAA
Station21401	NOAA
TM1	東京大学地震研究所
TM2	東京大学地震研究所
女川	東北電力
福島第一	東京電力
東海第二	日本原子力発電
東海第二(波高計)	日本原子力発電

2. 東北地方太平洋沖地震津波に関するデータの収集 浸水域について

東北電力の調査データ

◇RTK-GPS測量より、主要な建屋が設置されている敷地前面における遡上高は、最大でO.P. 約+13.8m※であることを確認。



※:地盤変動量約-1.0mを考慮した値

社外機関による調査データ

◇地震後に撮影した空中写真および観測された衛星画像を使用した浸水域のデータを取得。



国土地理院による浸水域

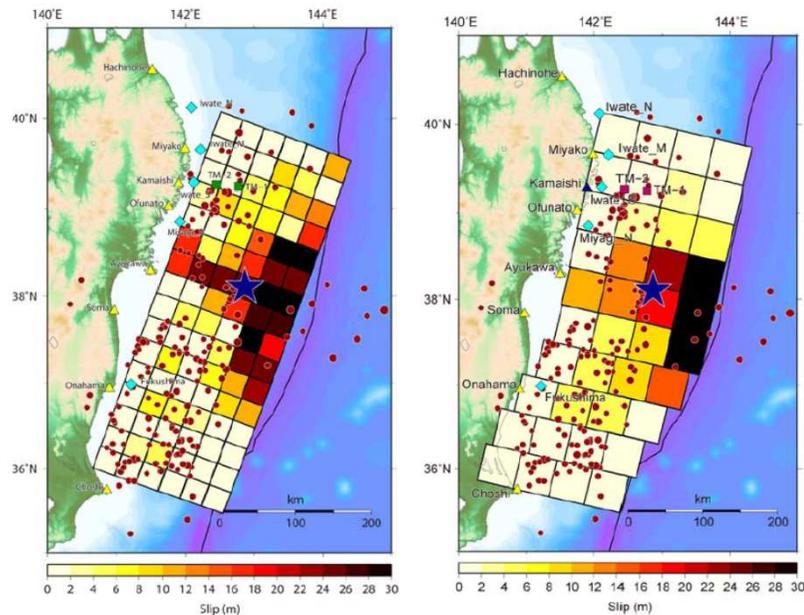


3. 津波波源モデルの策定



ベースとする津波波源モデルの選定

◇ベースとする津波波源モデル
⇒藤井・佐竹(2011)モデル



96枚断層(ver.3.1)
30km × 30kmの小断層

40枚断層(ver.4.0)
50km × 50kmの小断層

◇ 津波波源モデルの選定方法

各モデルに対して数値計算を実施

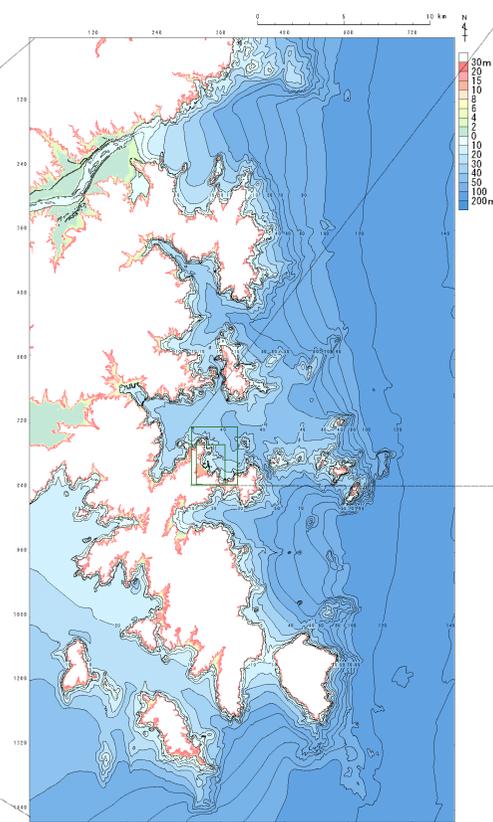
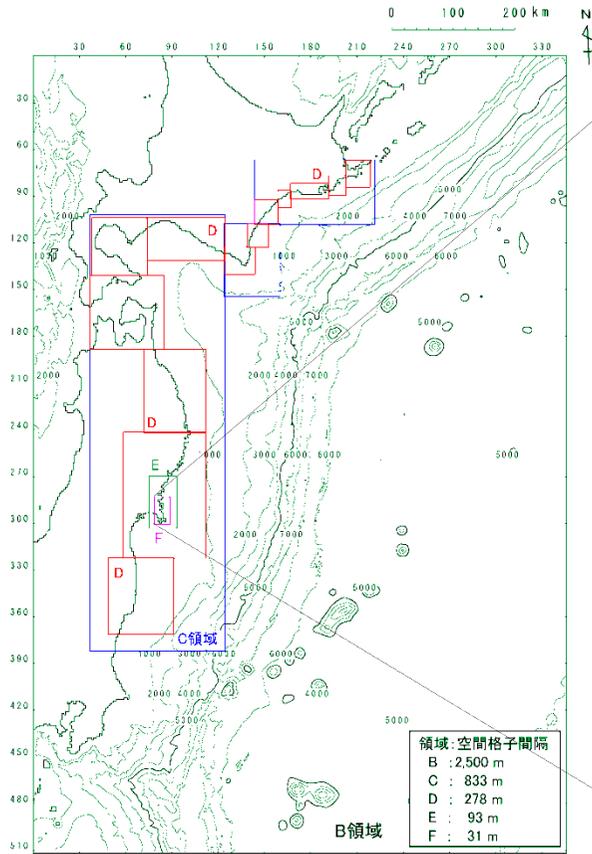


- ①発電所津波観測記録(波形)との整合性
- ②発電所地盤変動量との整合性

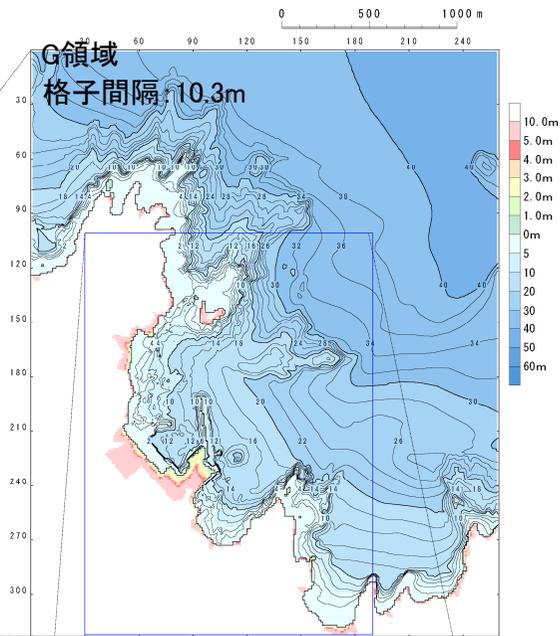


ベースとする津波波源モデルを選定

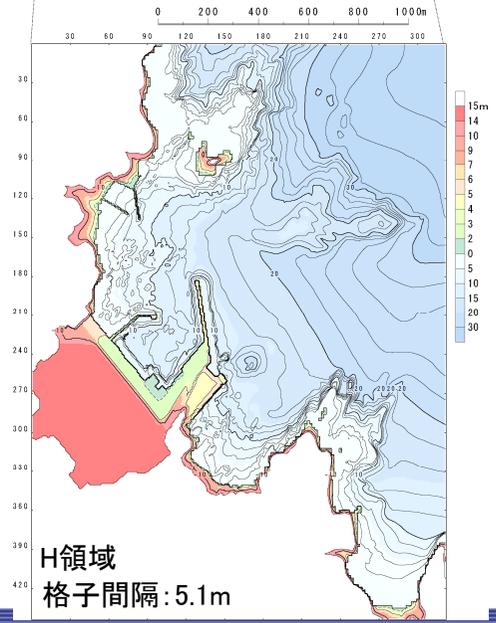
3. 津波波源モデルの策定 (1)津波波源モデルの推定 計算領域と海底地形



F領域
格子間隔: 31m



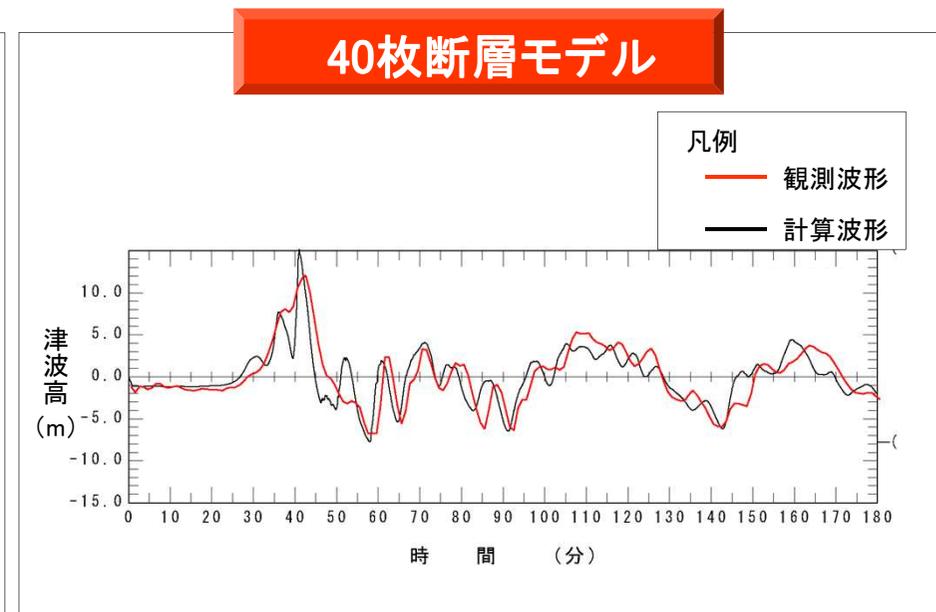
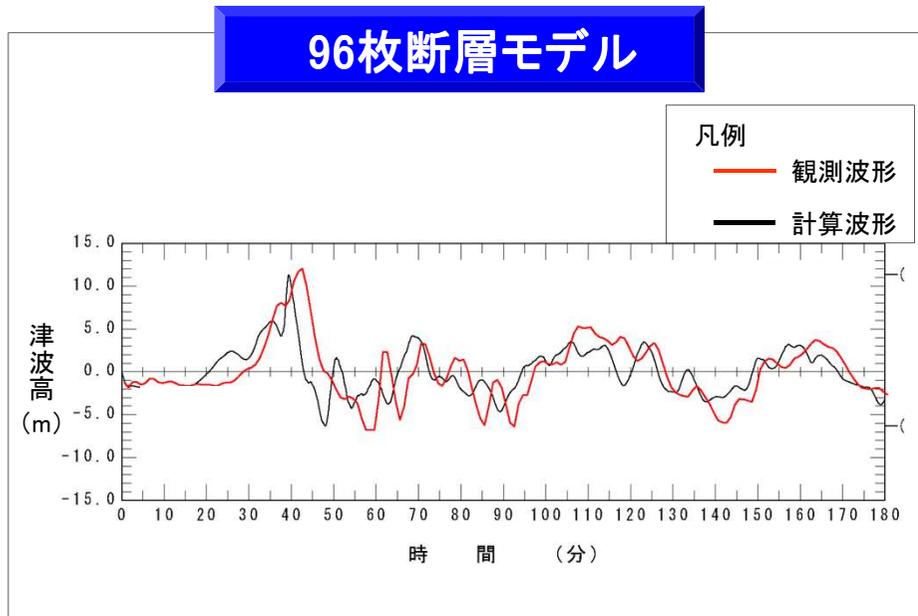
G領域
格子間隔: 10.3m



H領域
格子間隔: 5.1m

計算条件

領域・項目	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)	10.3 m (2500/243)	5.1 m (2500/486)
時間格子間隔 Δt	0.1秒(計算安定条件により設定)						
基礎方程式	線形長波式	非線形長波式					
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	地震断層モデルを用いてMansinha and Smylie(1971)の方法により 計算される鉛直変位を、立ち上がり時間1分で海面上に与える						
海底摩擦	考慮しない	マンニングの粗度係数 $n = 0.03\text{m}^{-1/3}/\text{s}$					
初期潮位条件	T.P.-0.4m						
計算再現時間	地震発生後3時間						

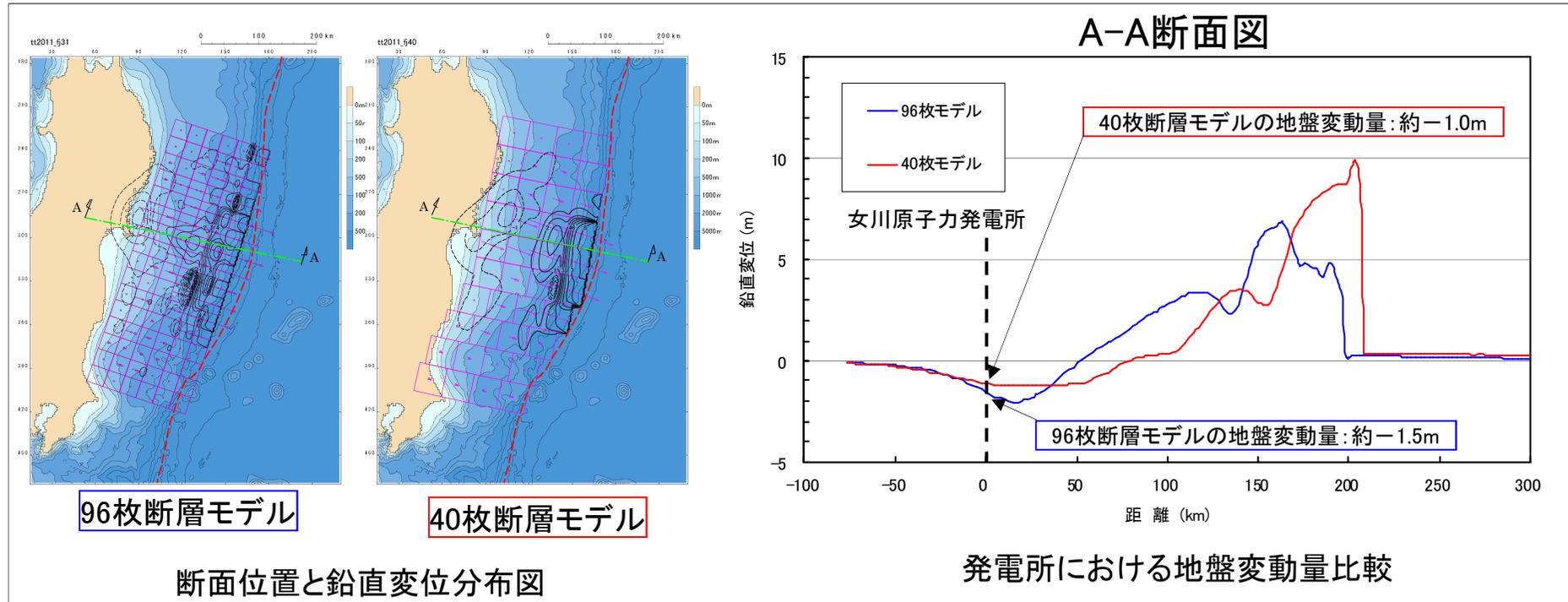


◇ 96枚断層モデルは、観測波形と計算波形に位相の差が見られる。

◇ 一方、40枚断層モデルでは津波高に差が見られるものの、観測波形と計算波形の位相の観点からは良好な再現性が確認できる。

3. 津波波源モデルの策定 (1)津波波源モデルの推定

藤井・佐竹(2011)モデルの選定: 発電所地盤変動量との整合性



◇発電所地点の地盤変動量約1mの沈下に対し、40枚断層モデルが良好な再現性を確認できる。

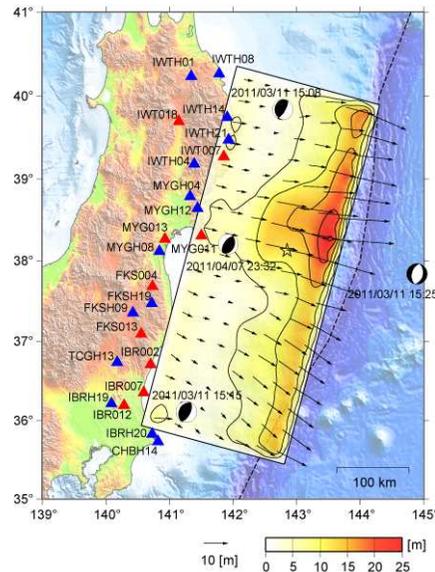
発電所における津波観測記録(波形), 地盤変動量の整合性の確認結果から, 藤井・佐竹(2011)40枚断層モデルを, 津波波源モデルのベースとして選定した。

津波波源モデルの策定

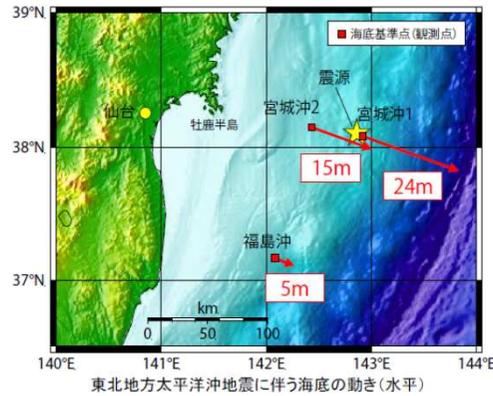
◇地盤変動量, 痕跡高, 浸水域, 津波観測記録を再現する津波波源モデルを策定。

◇策定に当たっては, 各機関で公開されている情報を参照しながら, 試行錯誤的に小断層のすべり量を調整。

各機関で公開されている情報

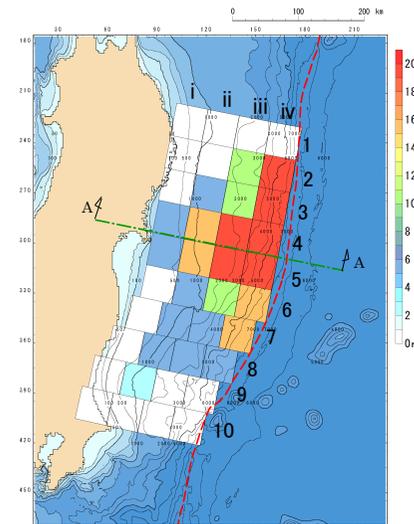


防災科学技術研究所
地震波インバージョン
によるすべり量分布※1



海上保安庁による海底変位※2

策定した津波波源モデル



すべり量分布

小断層のすべり量(m)

小断層のすべり量(m)				
i	ii	iii	iv	
0	0	0	0	1
0	0	10	20	2
0	5	10	20	3
5	15	20	20	4
5	15	20	20	5
0	5	10	15	6
0	5	5	15	7
0	5	5	5	8
0	2	0	0	9
0	0	0	0	10

波源モデルの諸元

走向	傾斜角	断層上縁深さ	最大すべり量	モーメントマグニチュード [*] Mw
193°	14°	3km	20m	8.94

※1 : <http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h23/k20110406/k110406-2.pdf>

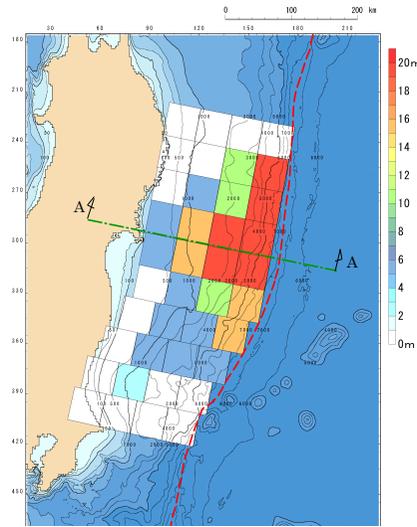
※2 : http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/inversion/



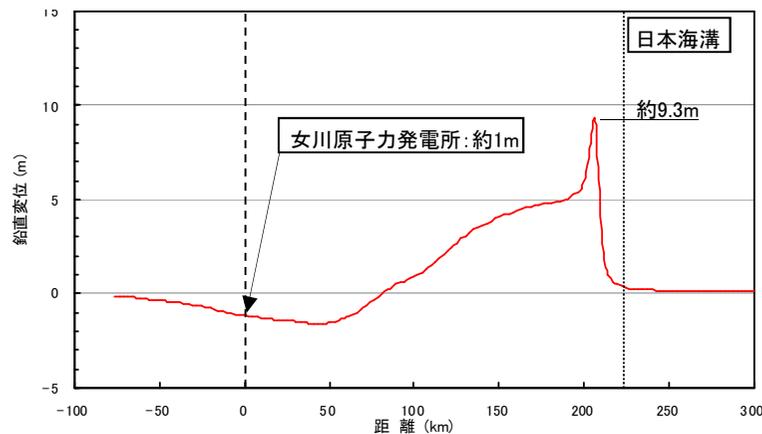
3. 津波波源モデルの策定 (2) 津波波源モデルの妥当性確認

地盤変動量の再現性

発電所敷地における
地盤沈下約1mを良好に再現

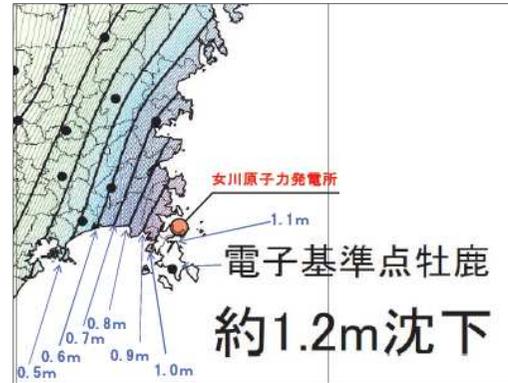


すべり量分布

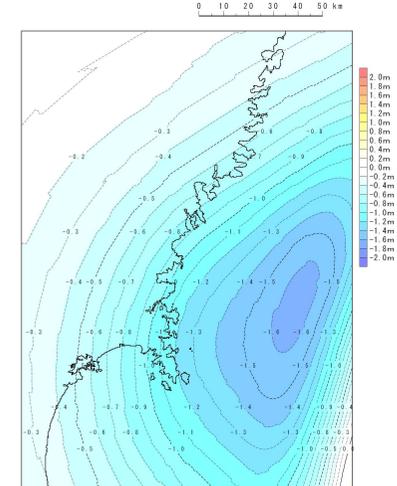


A-A断面図

陸域(広域)の鉛直変位量分布を良好に再現

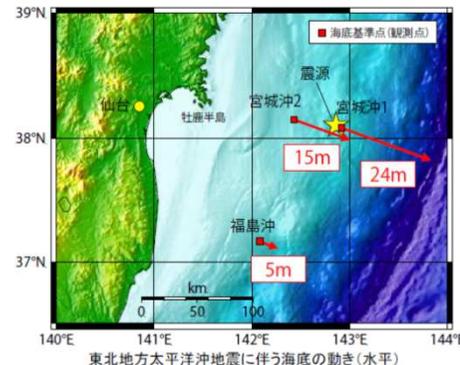


国土地理院HPに加工
国土地理院による鉛直変位分布

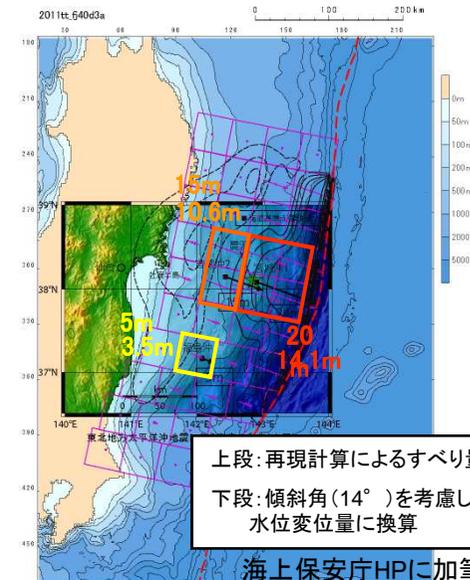


再現計算による鉛直変位分布

海域の水平変位と調和的



海上保安庁による海底変位



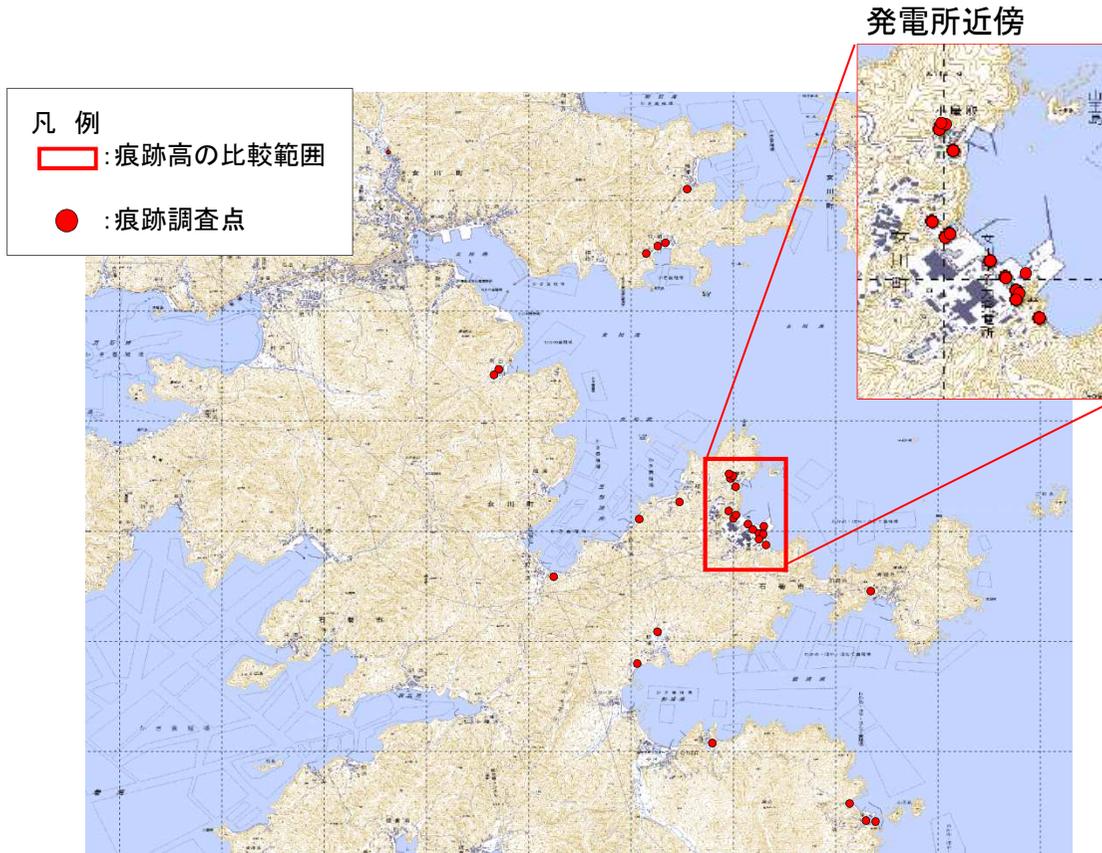
上段: 再現計算によるすべり量
下段: 傾斜角(14°)を考慮して
水位変位量に換算

海上保安庁HPに加工

再現計算によるすべり量と海底変位の比較

痕跡高の再現性(発電所近傍)

◇「東北電力」,「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」による発電所近傍の痕跡高と計算値を比較し,良好な再現性を確認。



痕跡高の比較範囲(発電所近傍)

再現性の確認結果

K	κ	n
1.00	1.04	14

相田(1977)による再現性の評価指標(K, κ)

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

$$K_i = R_i / H_i$$

ここで,

n : 地点数,

R_i : i 番目の地点での観測値(痕跡高),

H_i : i 番目の地点での数値シミュレーション結果

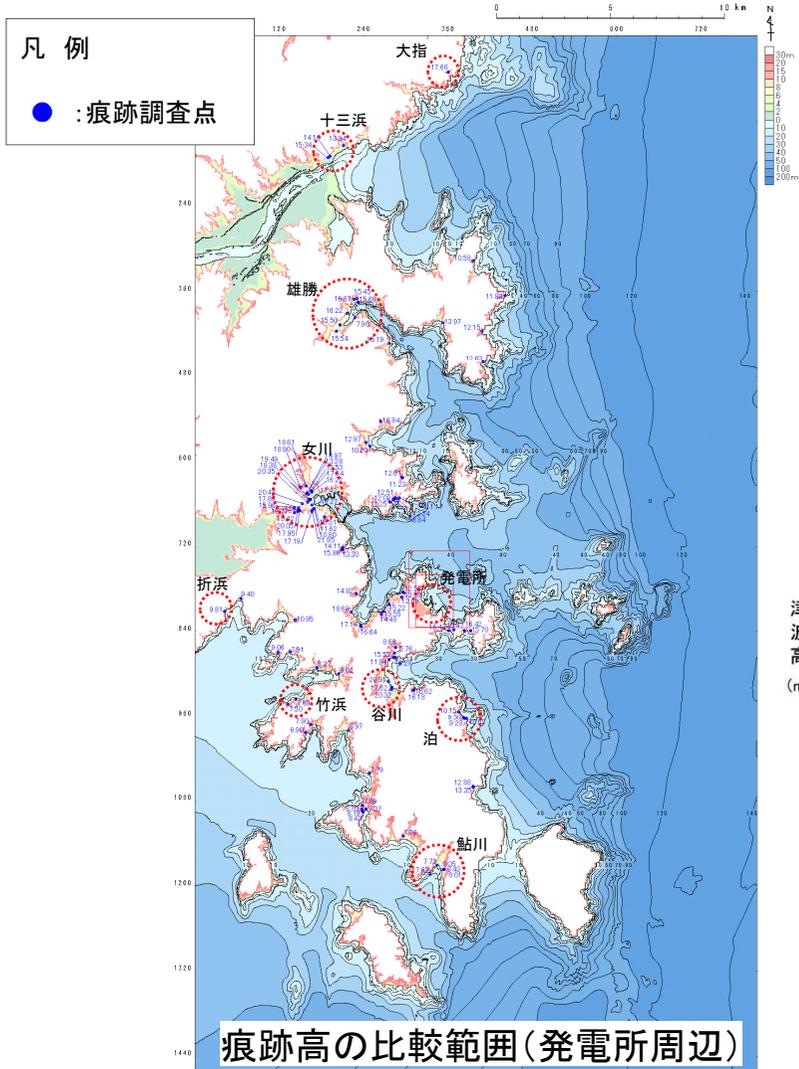
【土木学会(2002)※による再現性の目安】

$$0.95 < K < 1.05, \quad \kappa < 1.45$$

※: 原子力発電所の津波評価技術
 (平成14年2月 土木学会 原子力土木委員会)

痕跡高の再現性(発電所周辺)

◇「東北電力」、「東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ」による発電所周辺の痕跡高と計算値を比較し、概ね痕跡高を再現できていることを確認。



再現性の確認結果

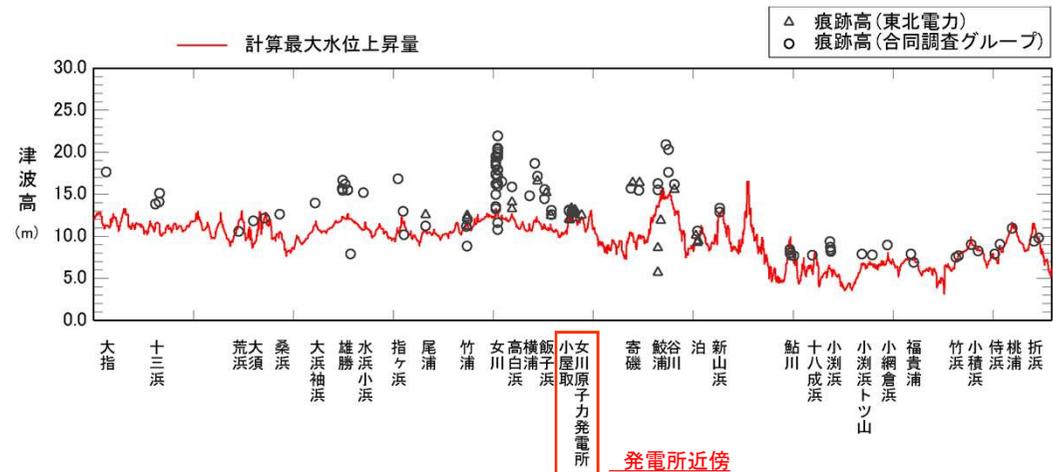
K	κ	n
1.15	1.24	123

【土木学会(2002)※による再現性の目安】

$0.95 < K < 1.05$, $\kappa < 1.45$

※: 原子力発電所の津波評価技術

(平成14年2月 土木学会 原子力土木委員会)

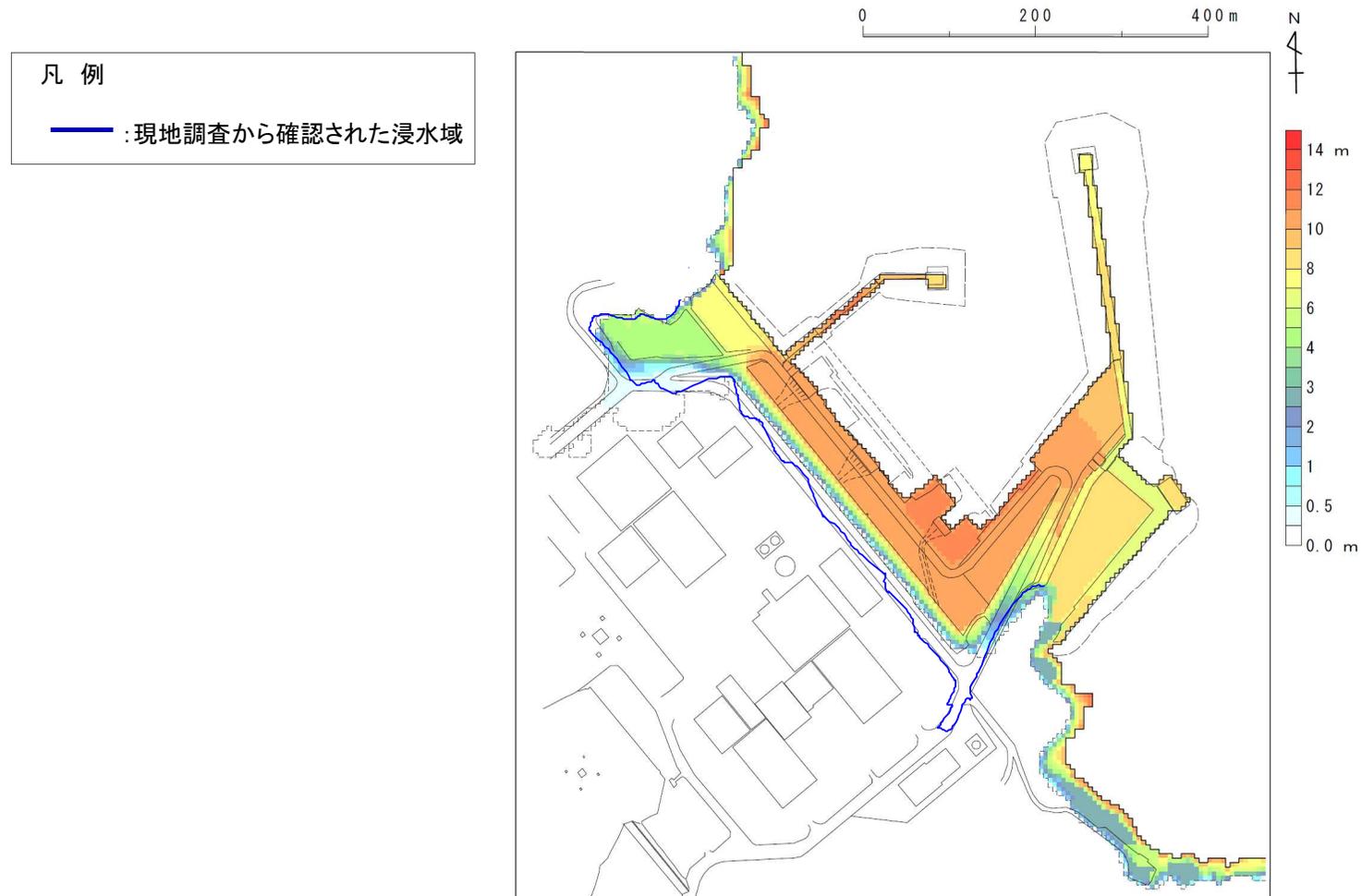


痕跡高と計算値の比較(発電所周辺)



浸水域の再現性(発電所近傍)

◇再現解析による発電所敷地の浸水域は、現地調査から確認された浸水域と整合的で良好な再現性を確認。

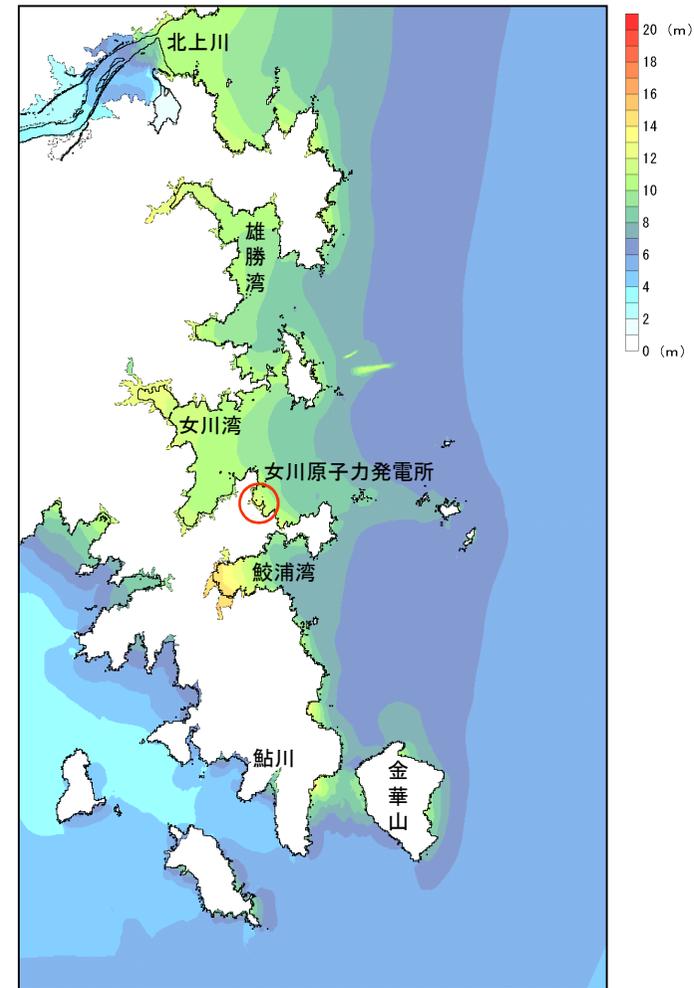
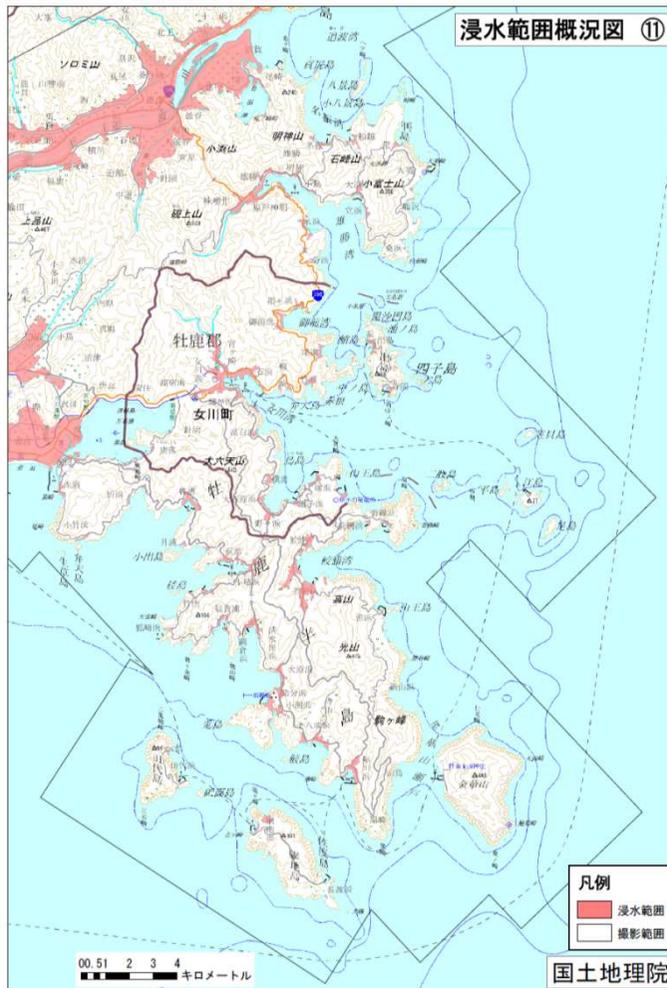


発電所敷地の浸水分布の比較図

浸水域の再現性(発電所周辺)

◇再現解析による発電所周辺の浸水域※は、国土交通省国土地理院で公開されている浸水域を良好に再現していることを確認。

※:再現解析で得られる最高水位分布



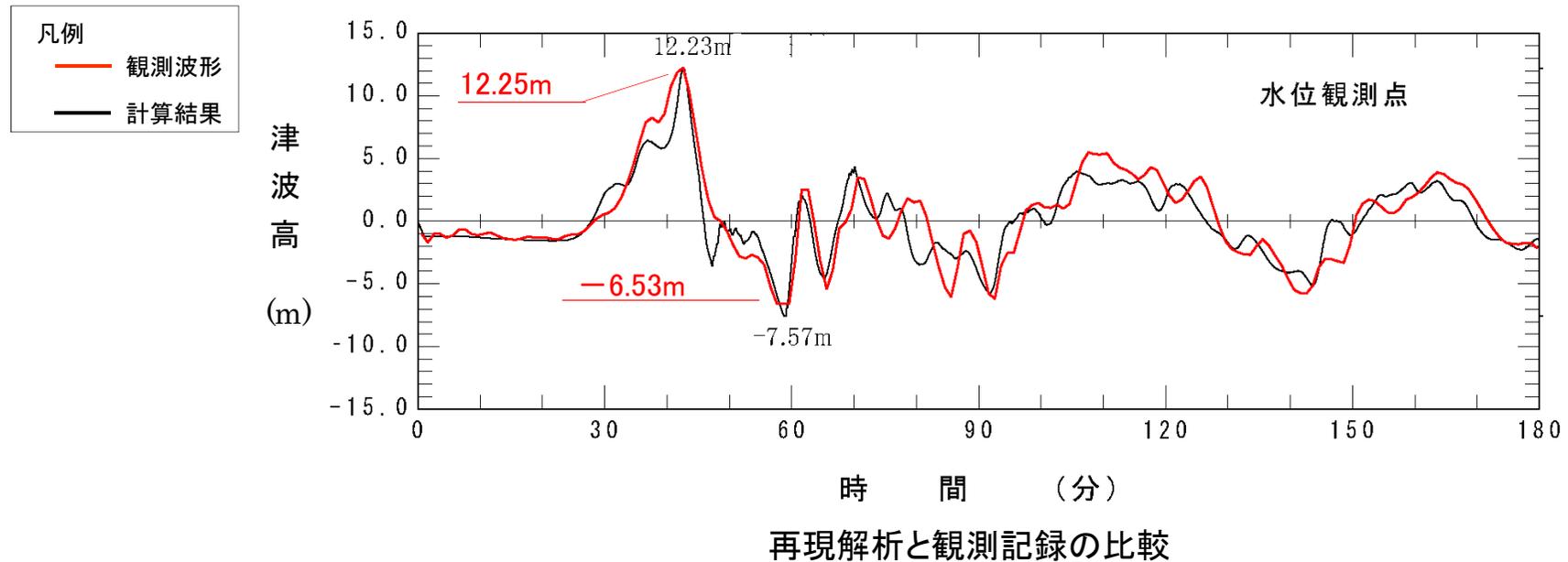
国土地理院による浸水域

再現解析による最高水位分布図



津波観測記録(波形)の再現性

◇再現解析による潮位計設置位置の時刻歴波形は，潮位計で得られた観測記録の位相，最高水位を良好に再現していることを確認。



今回策定した津波波源モデルによる再現解析結果は，発電所近傍および周辺の地盤変動量，痕跡高，浸水範囲および発電所で観測された津波記録(波形)を良好に再現している。

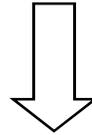
4. 発電所の安全性への影響の分析



津波による水位変動に伴う取水安全性

◇再現解析に基づき、各号機の取水口前面の水位が取水口敷高を下回った時間を算出し、原子炉補機冷却海水系ポンプの取水への影響を確認。

再現解析の結果によれば、各号機の取水口前面では最低水位O.P.約-7.6mとなっており、数分間程度、水位が取水口敷高を下回ったと考えられる。

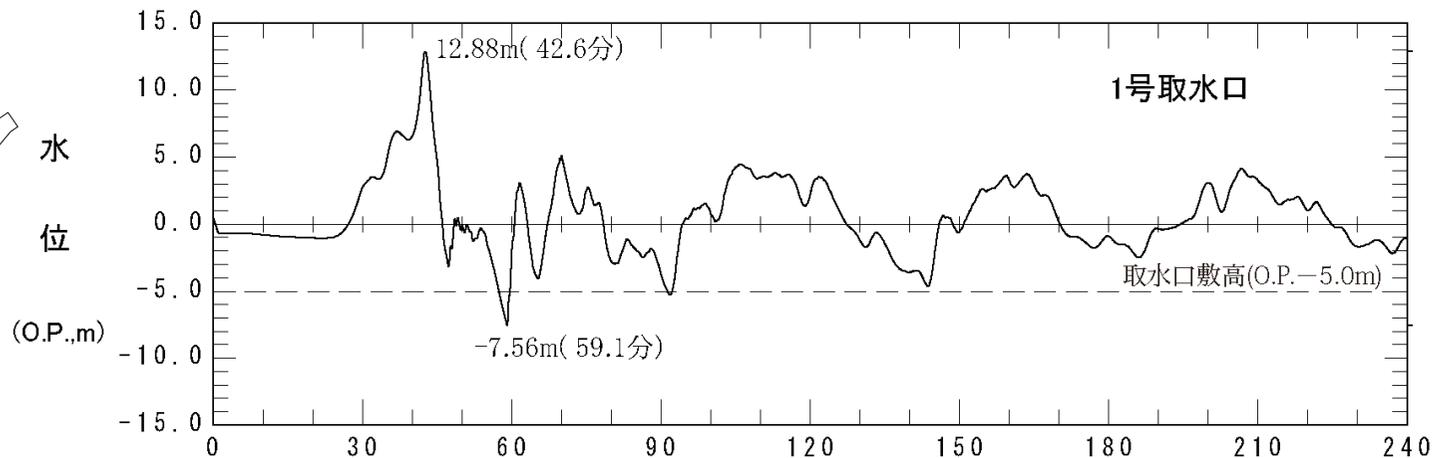
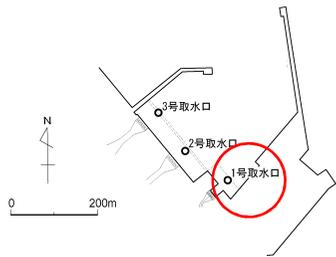
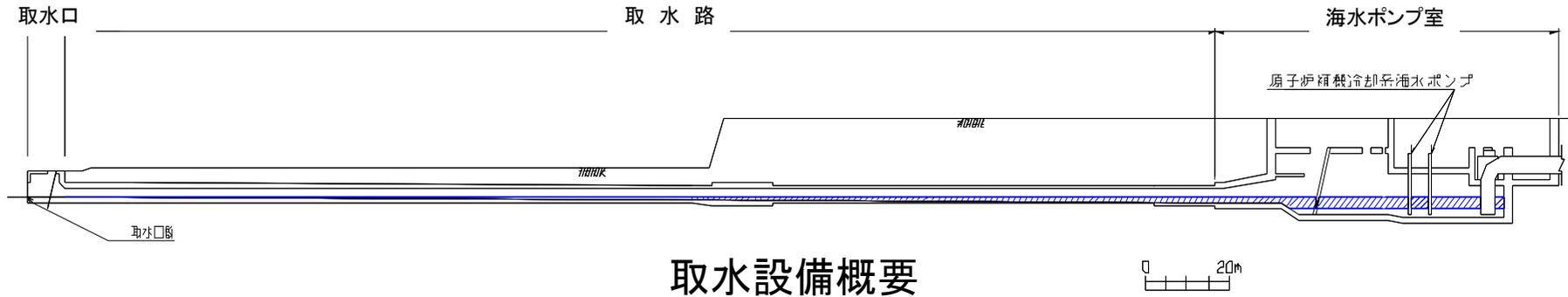


一方、原子炉補機冷却系海水ポンプに必要な海水が、

- 1号機では約40分間
- 2号機および3号機では約38分間

取水設備内に確保される構造となっていることから、原子炉施設の冷却機能に支障を来すことはなかったと考えられる。

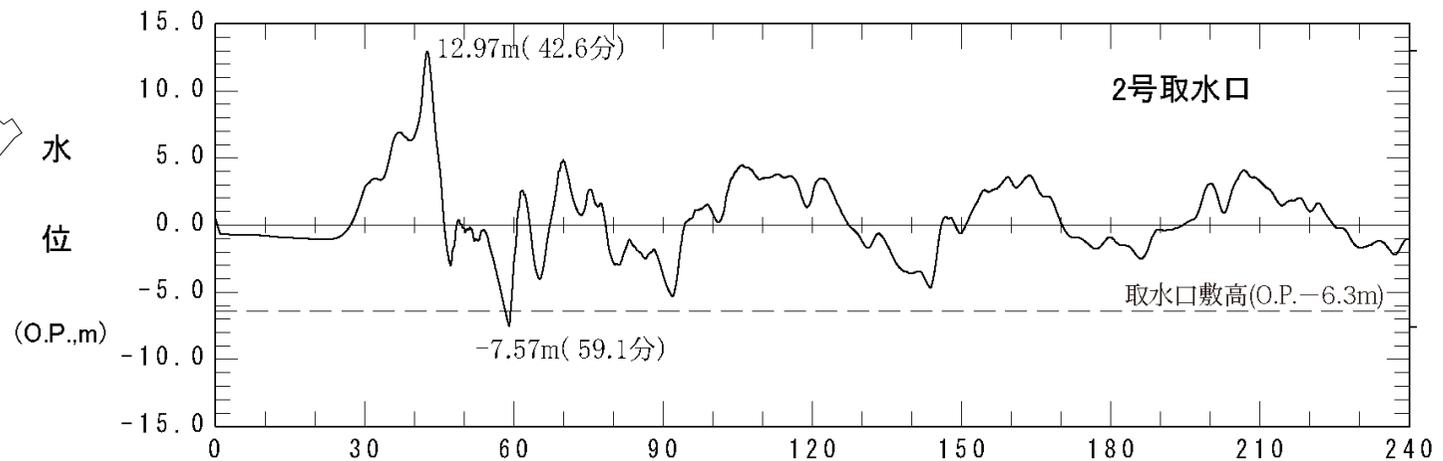
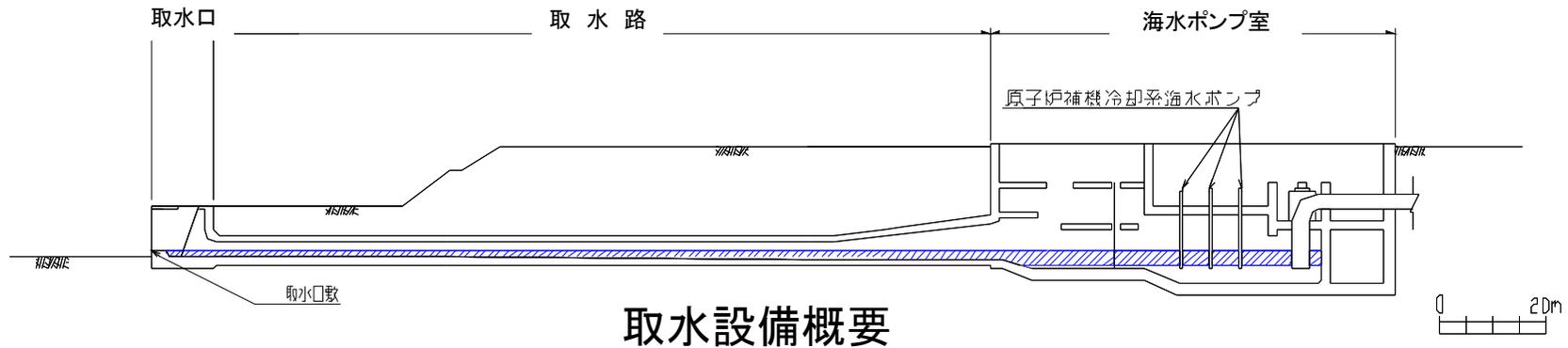
1号機



取水口前面の水位と取水口敷高の関係

津波による水位変動に伴う取水安全性

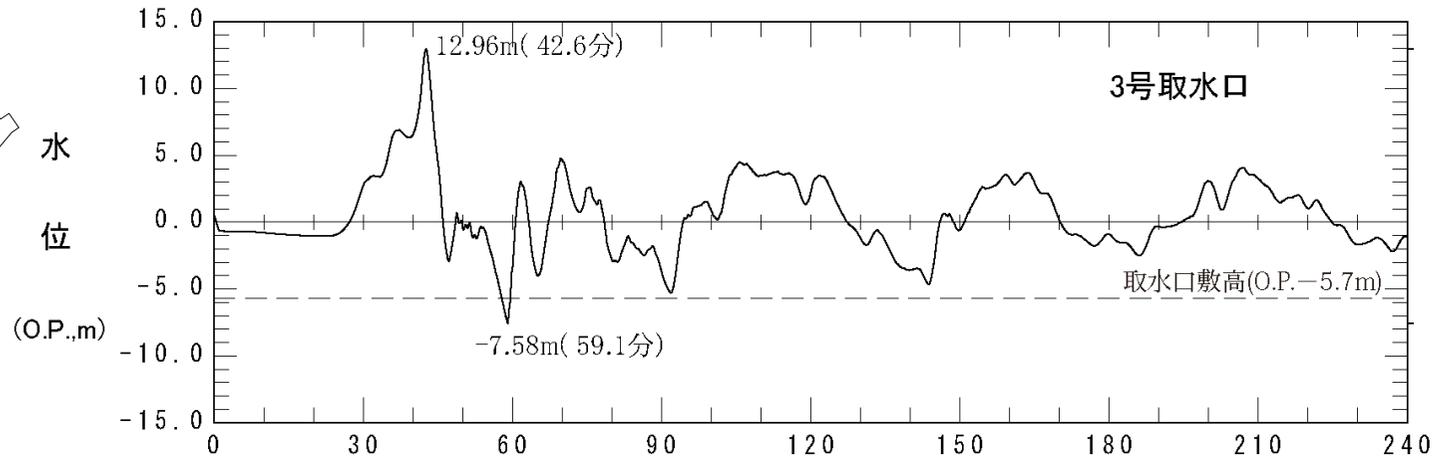
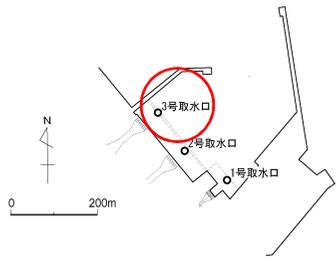
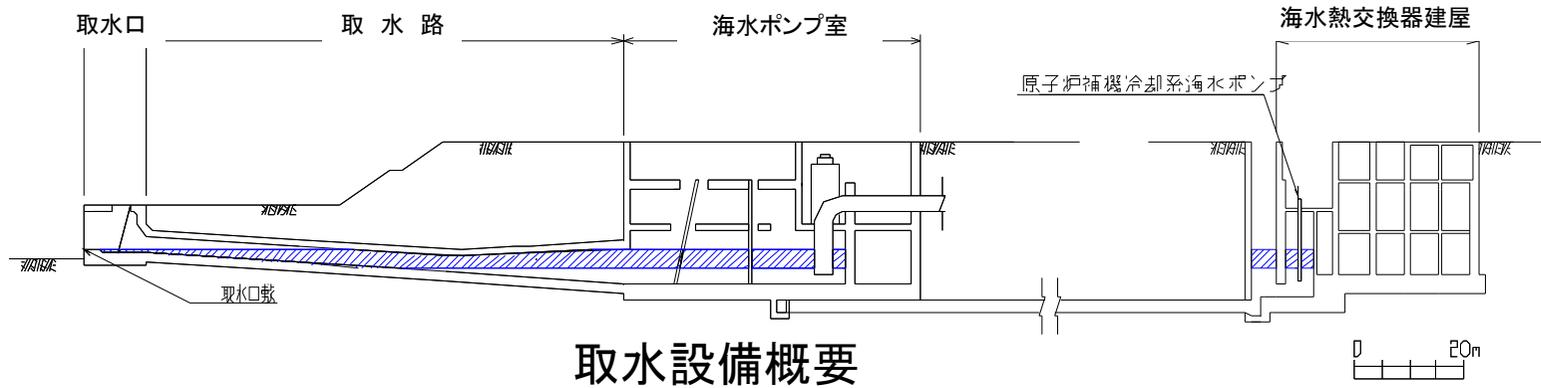
2号機



取水口前面の水位と取水口敷高の関係

津波による水位変動に伴う取水安全性

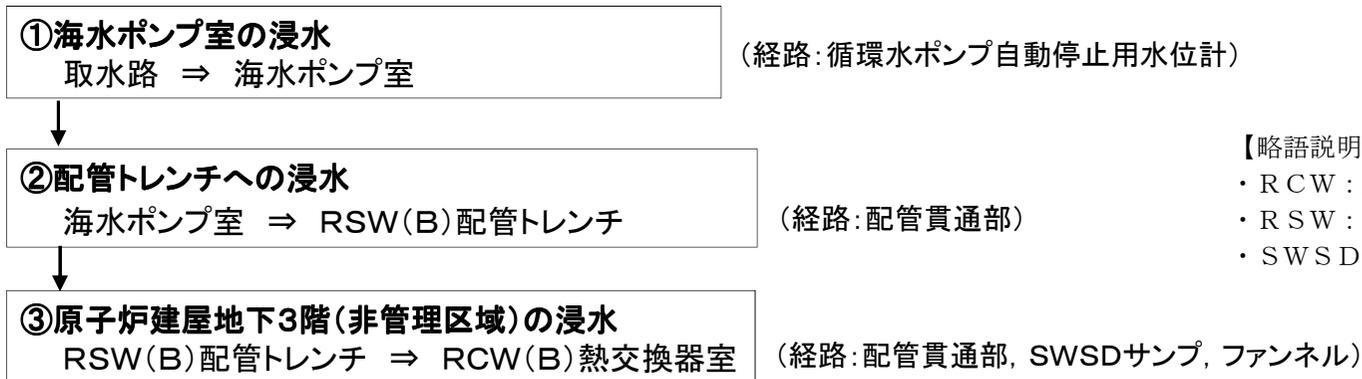
3号機



取水口前面の水位と取水口敷高の関係

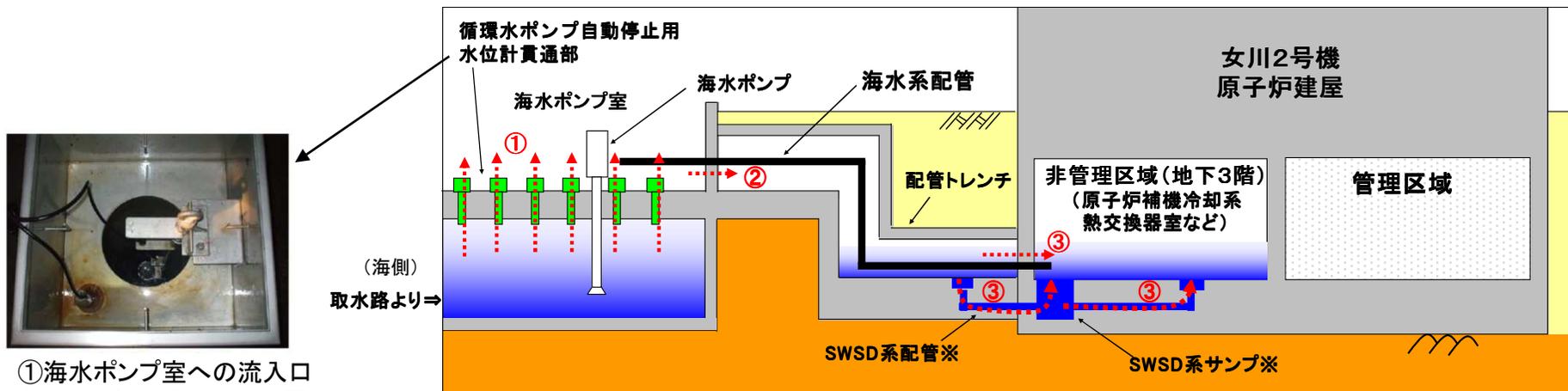
女川2号機 原子炉建屋地下3階(非管理区域)への浸水

◇女川2号機海水ポンプ室に設置した循環水ポンプ自動停止用水位計の止水処理が不十分だったため、津波の影響により取水路側から海水が流入し、女川2号機原子炉建屋地下3階の原子炉補機冷却水系熱交換器室等(非管理区域)が浸水した。



【略語説明】

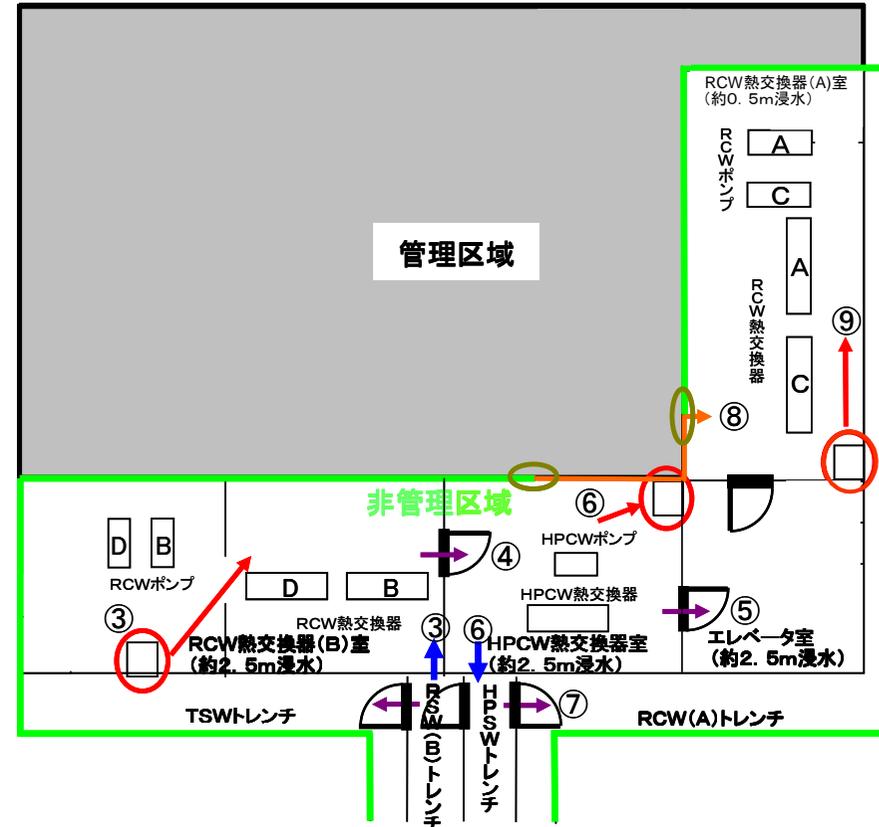
- ・RCW：原子炉補機冷却水系
- ・RSW：原子炉補機冷却海水系
- ・SWSD：海水ストームドレン移送系



①海水ポンプ室への流入口
(収納箱上蓋開放状態の写真)

※: SWSD系とは、原子炉補機冷却海水系等で発生した排水(非放射性的の海水)を、一旦、サンパに収集し、サンパ内に設置されたポンプにより屋外放水ピットへ移送するための系統。なお、サンパとは収集槽のこと。

女川2号機 原子炉建屋地下3階(非管理区域)の浸水ルート



【略語説明】

- ・HPCW：高圧炉心スプレー補機冷却水系
- ・HPSW：高圧炉心スプレー補機冷却海水系
- ・RCW：原子炉補機冷却水系
- ・RSW：原子炉補機冷却海水系
- ・SWSD：海水ストームドレン移送系
- ・TSW：タービン補機冷却海水系

(凡例)

- ➡ 配管貫通部での流入
- ➡ SWSD経由での流入
- ➡ 電路経由での流入
- ➡ 水密扉経由での流入
- SWSD

※1: 水密扉の開方向に設計仕様以上の水圧が作用したため、設計漏えい量以上に流出したと推定。
 ※2: エレベータ室からRCW熱交換器(A)室への水密扉閉方向の流出は、ほぼ無かったと推定。

浸水による耐震安全上重要な設備への影響

◇女川2号機の安全上重要な機器について、浸水による影響を確認した。

- 原子炉補機冷却水系(B)系の機能喪失
- 高圧炉心スプレイ補機冷却水系の機能喪失

高さ約2.5mまで海水が浸水



◇上記冷却系統の機能喪失により、非常用ディーゼル発電機(B)，(H)が自動停止したが、以下のとおり、原子炉冷却機能は確保されていた。

- 外部電源が喪失しておらず非常用ディーゼル発電機(A)も健全であった。
- 原子炉補機冷却水系(A)系に被害がなく非常用炉心冷却系が2系統維持されていた。

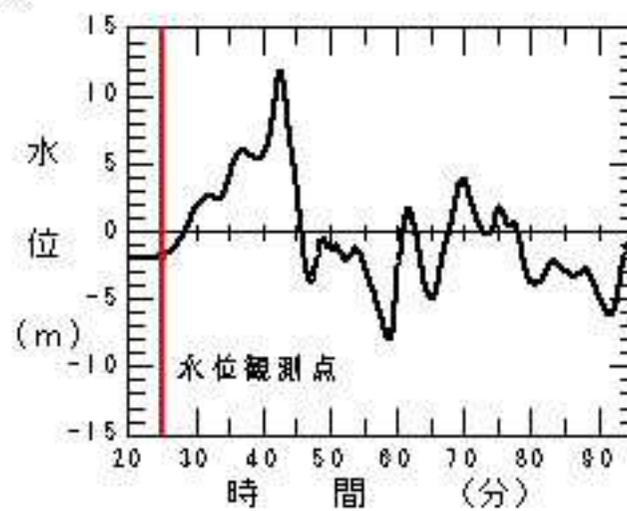
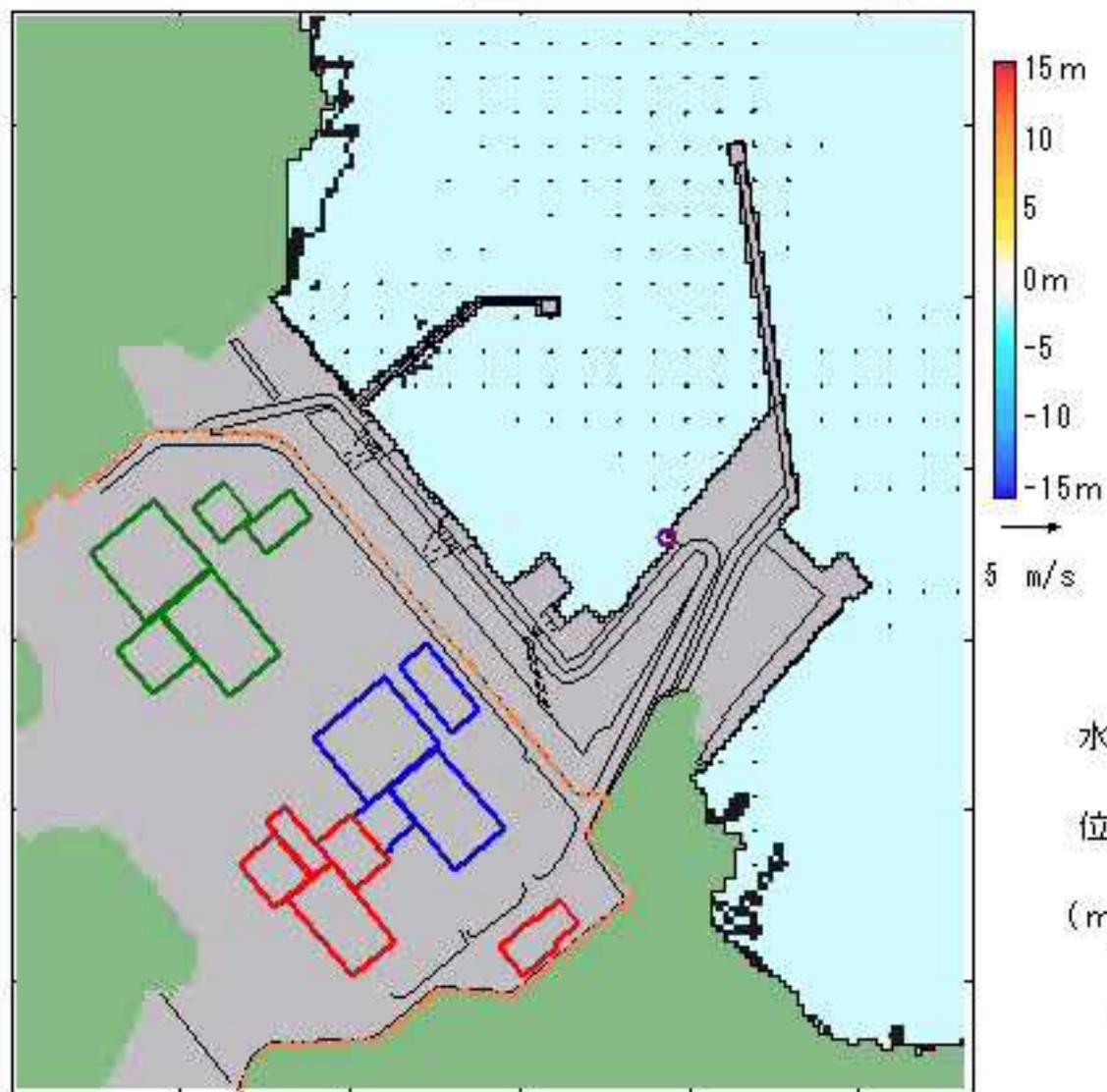
発電所近傍における津波の流況分析

- ◇ 発電所で取得した津波観測記録に基づき、津波の周期について分析した結果、発電所に来襲した津波の主要な周期は概ね50分前後。
- ◇ 発電所に来襲した津波は、水位は1m/分程度と緩やかに上昇し、流速が1m/s未満と非常に小さいことを確認。

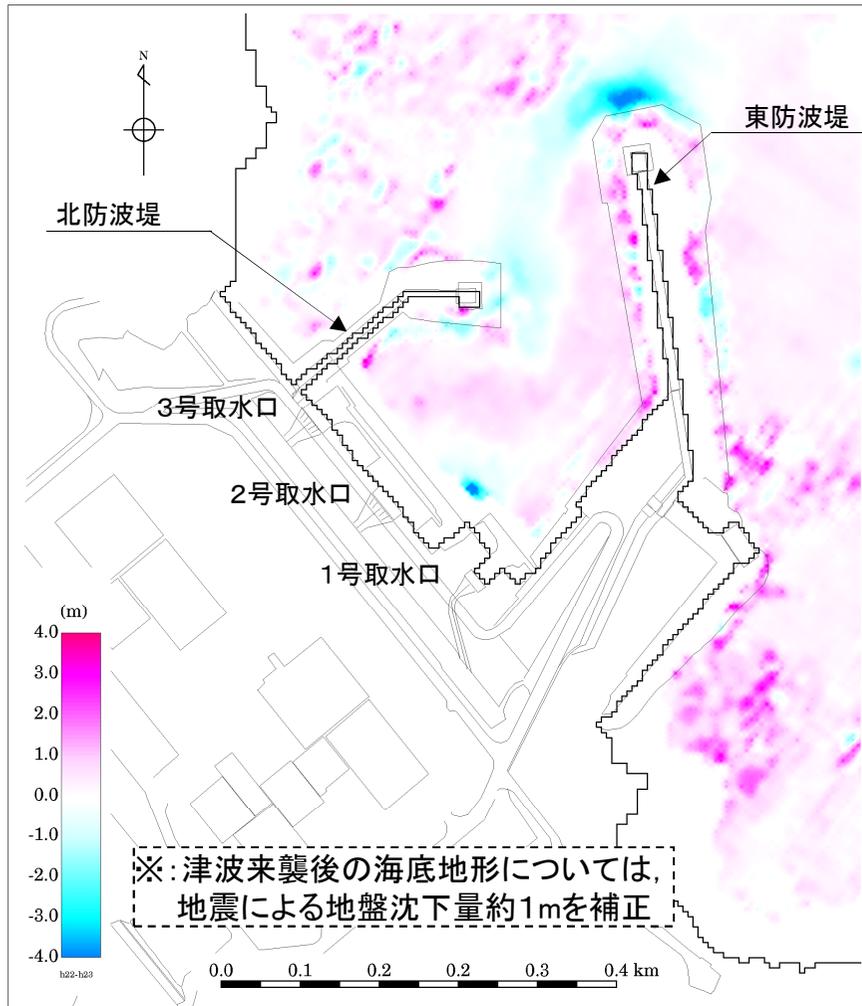
⇒ 大きな波圧や流体力は作用しなかったと推定される。

25分 0秒

0 200 400 m



津波による海底地形変化



津波来襲前後の堆積・侵食状況の比較結果

津波来襲前	測量日:H22.10.26~28	測線間隔: 10~20m
津波来襲後	測量日:H23.4.27~5.10	測線間隔: 10~20m

【調査結果】

- ◇砂の堆積は、発電所港湾内における泊地で概ね0.5m~0.6m程度。
- ◇海底の侵食は、東防波堤堤頭部で最大5.5m程度。
- ◇津波に伴う堆砂により取水口が閉塞することはなく、原子炉補機冷却系海水ポンプに必要な海水が継続的に取水可能であったことを確認。

【考察】

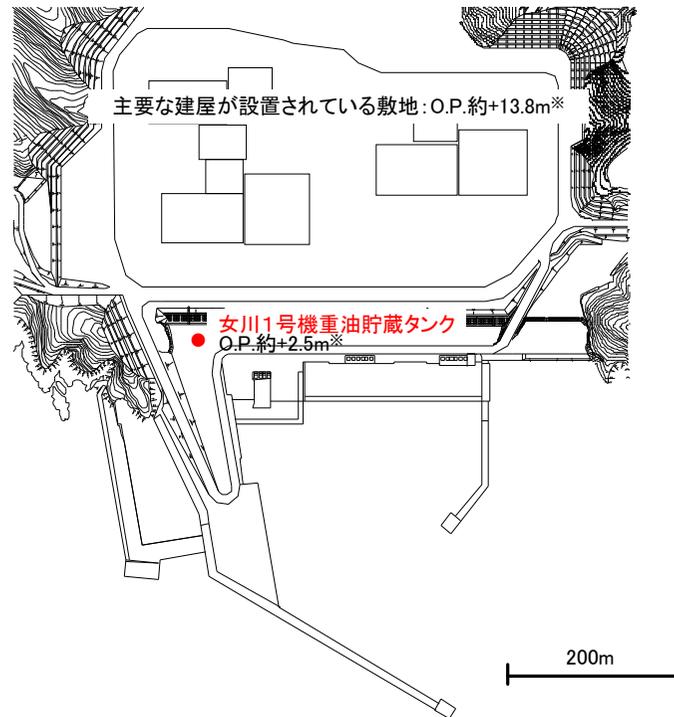
- ◇第1波の引き波時、第2波来襲時に港口部で最大3~5m/sの流速が発生し、港口部の侵食が進行。
- ◇巻き上がった砂が第2波の来襲時に港湾内に運ばれ、時計回りの流れによって沈降するといった過程によるものと推定。

女川1号機重油貯蔵タンクの倒壊について

◇タンクは、主要な建屋が設置された敷地(O.P.約+13.8m)より低い位置(O.P.約+2.5m)に設置。

◇重油残量は約600klと推定しており、底面からの水位約5mにて浮力により浮き上がると推定。

◇再現解析により、重油タンク設置位置での最高水位はO.P.約+13mであると推定しており、タンクは津波に伴う水位上昇により浮き上がるとともに水平方向に流され、倒壊したものと推定される。



※: 地盤変動量約-1.0mを考慮した値

その他の構造物の被害

◇主要な施設が設置されている敷地より低い位置に設置されている小屋等に浸水等による損傷を確認したが、建屋の倒壊等大きな被害は確認されなかった。

◇再現解析に基づく津波の流況の分析から、水位は1m/分程度と緩やかに上昇し、流速が1m/s未満と非常に小さいことから、大きな波圧や流体力が作用しなかったため、大きな被害は無かったものと推定される。

構造物、機器等	被害状況
1号放水口モニタ建屋	建具等の損傷および浸水
1号放水路サンプリング室	建具等の損傷および浸水
1号海水放射線モニタ局舎	建具等の損傷および浸水
2号放水流管真空ポンプ室	建具等の損傷および浸水
2号放水口モニタ建屋	建具等の損傷および浸水
3号放水路サンプリング建屋	建具等の損傷および浸水
屋外電動機等点検建屋	外壁、屋根、建具等の損傷および浸水
港湾作業管理詰所	外壁、屋根、建具等の損傷および浸水
重油ポンプ室	建具等の損傷および浸水
オイルフェンス格納倉庫	外壁、屋根、建具等の損傷および浸水
データ中継装置建屋	浸水による機器の電気系統の故障
1号除塵機	浸水による電気系統の故障
2号除塵機	浸水による電気系統の故障
3号除塵機	浸水による電気系統の故障
周囲柵	一部倒壊、変形
海水温度モニタリング装置 (観測局舎)	浸水による電気系統の故障
海水温度モニタリング装置 (観測ブイ)	位置移動
沖合側航路ブイ	水没
波高計	頂部灯具、太陽光パネル破損

◇北海道太平洋北部沿岸から千葉県房総半島沿岸の痕跡高について、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ等による痕跡調査結果と計算値※の比較を行った。

※: 沿岸域の空間格子間隔を50mに細分化するなどの格子間隔の修正を行うとともに、時間格子間隔を0.5秒にするなど、計算条件を一部変更

◇再現性の確認の結果、土木学会(2002)による再現性の目安は満足していないものの、痕跡高さの傾向を概ね再現していることを確認。

再現性の確認結果

K	κ	n
1.28	1.49	2,820

相田(1977)による再現性の評価指標(K, κ)

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

$$K_i = R_i / H_i$$

ここで、

n : 地点数、

R_i : i 番目の地点での観測値(痕跡高)、

H_i : i 番目の地点での数値シミュレーション結果

【土木学会(2002)※による再現性の目安】

$$0.95 < K < 1.05, \quad \kappa < 1.45$$

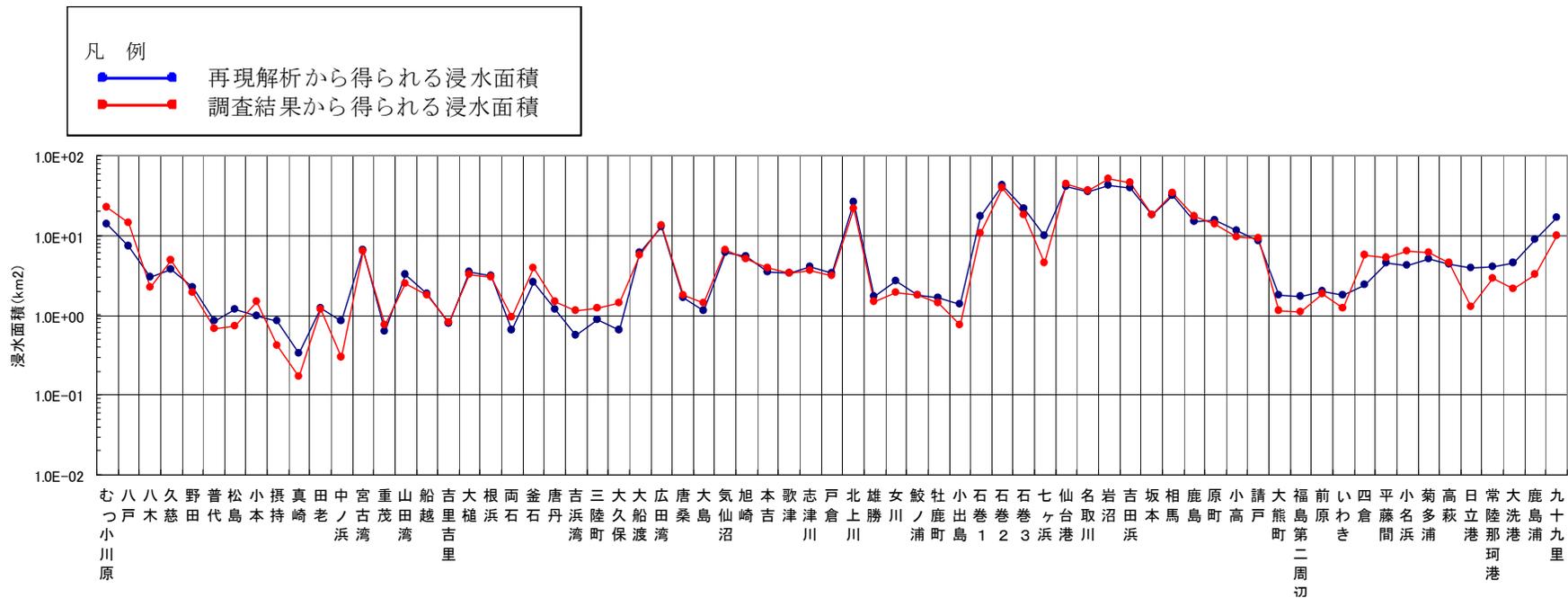
※: 原子力発電所の津波評価技術

(平成14年2月 土木学会 原子力土木委員会)

(参考) 広域の再現性の確認: 浸水域

◇ 下北半島南部沿岸から千葉県房総半島北部沿岸において、
国土地理院から得られる浸水面積と再現解析から得られる浸水面積の比較を行った。

◇ 痕跡高の再現性の目安のような指標は無いが、青森県から千葉県にかけての浸水域を網羅的に再現していることを確認。



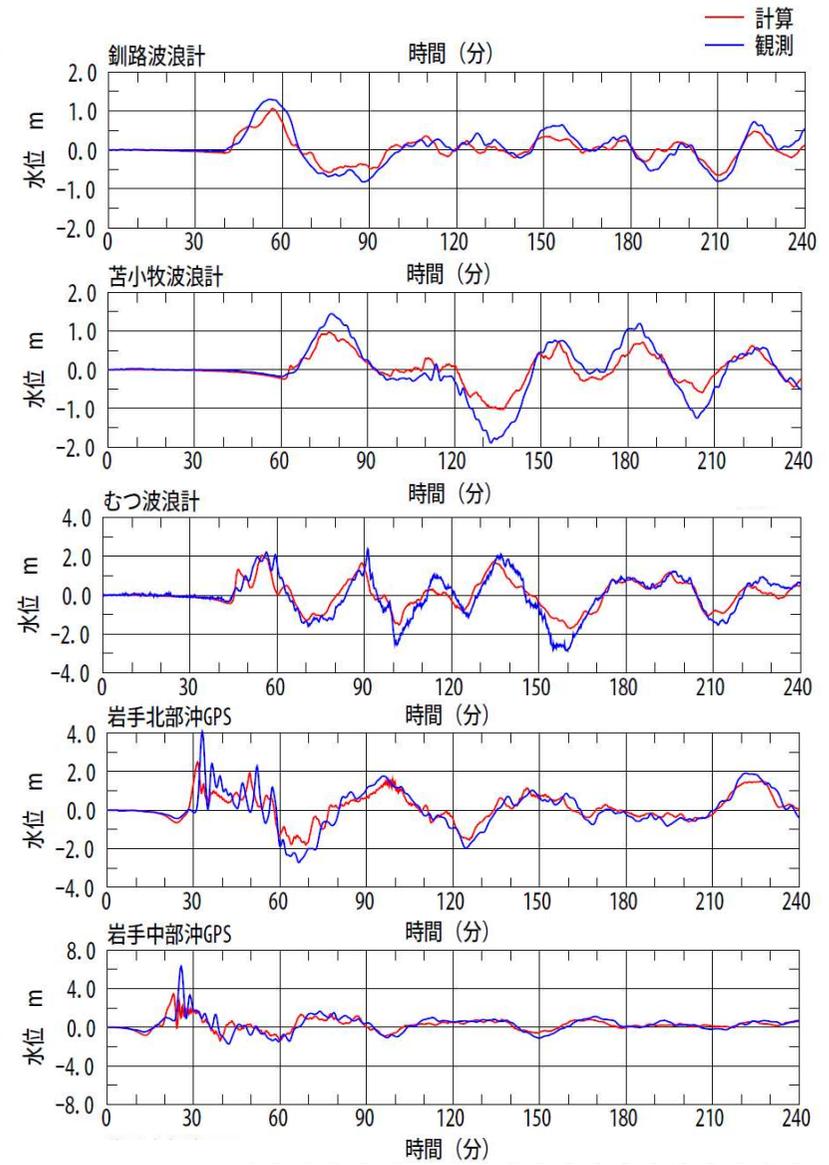
- ◇北海道太平洋北部沿岸から千葉県房総半島沿岸において気象庁等の検潮所で観測された検潮記録と再現解析による各位置の時刻歴波形の比較を行った。

- ◇若干の位相のずれ, 最高・最低水位の差が見られるものの, 全体として再現性は良好であり, 広域の波形を網羅的に再現していることを確認。

(参考) 広域の再現性の確認: 検潮記録



検潮所の位置(全46地点中, 15地点を表示)



(参考) 広域の再現性の確認: 検潮記録

