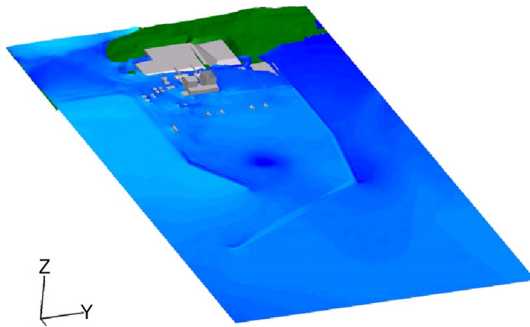


# 津波から構造物を守る 三菱重工の津波シミュレーション技術

Technique of Analysis and Evaluation for Protect Structures from Tsunami



四條 利久磨<sup>\*1</sup>  
Rikuma Shijo

佐藤 敏浩<sup>\*2</sup>  
Toshihiro Sato

2011年の東北地方太平洋沖地震では、従来の想定を超える巨大な津波により数多くの構造物が損壊した。近年、東海・東南海・南海三連動型地震の発生が危惧される中、今後沿岸部における津波対策の強化が求められるが、その検討にあたっては、陸上に遡上する津波の挙動や陸上構造物に作用する津波波力の評価が重要となる。当社は100年以上の歴史を持つ船舶の波浪検討技術及び最新の大規模計算機シミュレーション技術を有しており、これらを組み合わせた3次元津波解析による津波挙動、津波波力の評価技術の開発を行い、実機への適用を推進している。本報では、これらの解析、評価技術の概要、実機への展開例などを紹介する。

## 1. はじめに

沿岸構造物等の津波防災検討にあたっては、想定断層モデルと対象沿岸部の地形特性を考慮した上で沿岸部に襲来する津波条件を推定し、陸上に遡上する津波の詳細挙動、構造物への作用を評価する必要がある。そこで、当社は図1で示すフローにより津波防災検討を進めている。最初に、対象とする地震で推定される断層モデルを設定し、それに基づき震源直上の津波初期鉛直変位を算定する。次に、広域の津波伝播解析により対象沿岸部に襲来する津波の水位、流速、方向を算定する。そして、これらの諸元を入力条件とした沿岸部の狭域3次元数値シミュレーション(3D-CFD)により、沿岸構造物周辺の津波の詳細挙動及び波力の評価を行い構造健全性の評価や対策の検討を行っている。以下では、それらの津波解析技術について、3.11 地震津波を対象とした実プラントにおける適用事例<sup>(1)</sup>を挙げながら説明を加える。

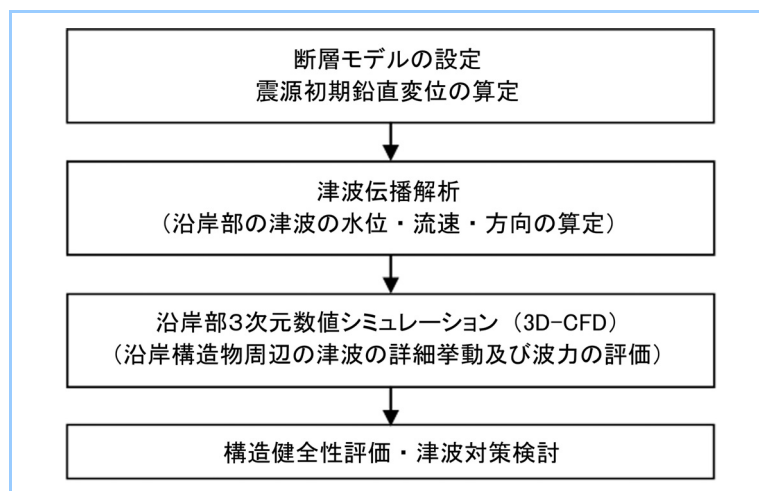


図1 津波防災検討フロー(津波防災を検討する際の手順を示す)

\*1 技術統括本部長崎研究所 技術士(建設部門)

\*2 技術統括本部長崎研究所 主席研究員 工博, 技術士(機械部門)

## 2. 津波伝播解析

### 2.1 計算手法

津波解析技術の適用事例として東北地方太平洋沖地震津波で甚大な被害を受けた東北電力(株)原町火力発電所を対象に、3.11 地震津波による津波の伝播状況及び発電所に襲来した津波の特性を把握するため、東日本全域の津波数値計算を実施した。解析には当社保有の解析ソフトを用い、鉛直方向に静水圧近似を仮定した非線形長波方程式により津波発生から伝播までを解析した。計算領域は南北方向に北緯 35 度から北緯 41 度、東西方向に東経 140 度から東経 145 度に設定し、水深データには日本海洋データセンターの JEGG500 を使用した。断層モデルは、藤井・佐竹モデル Ver4.2<sup>(2)</sup>を使用し、Mansinha and Smylie(1971)<sup>(3)</sup>の方法により地殻変動量を求め、これを津波の初期水位分布とした。空間格子サイズは 1350m の直交格子とし、時間ステップは1秒とした。また、陸地との境界は完全反射を仮定し、沖側(計算領域外周部)は透過境界条件とした。再現対象は地震発生から2時間とした。

### 2.2 計算結果

津波伝播解析結果を図2に示す。地震発生後、同心円状に津波が伝播し 30 分後頃にまず岩手県沿岸に到達する。その後、地震発生後 50 分後頃に発電所に襲来している状況が確認できる。図3に国土交通省港湾局による全国港湾海洋波浪情報網(NAWPHAS)により観測された津波波形<sup>(4)</sup>と解析結果の比較を示す。

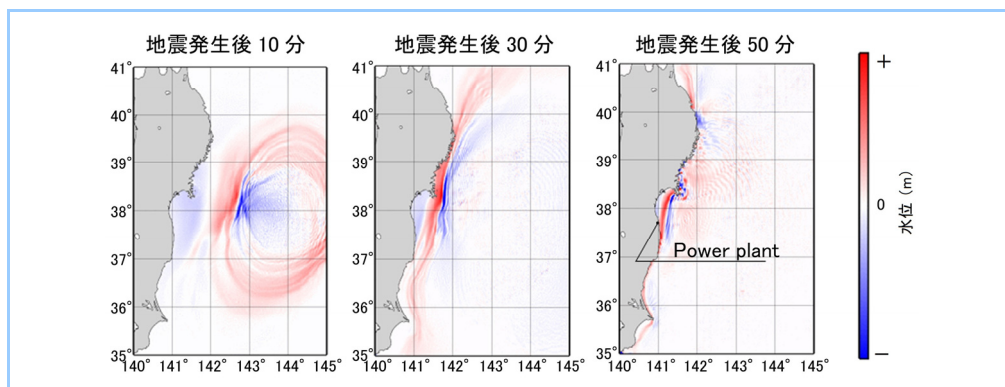


図2 津波伝播解析結果

津波伝播解析結果より、地震発生後 10 分、30 分、60 分における津波水位を示す。

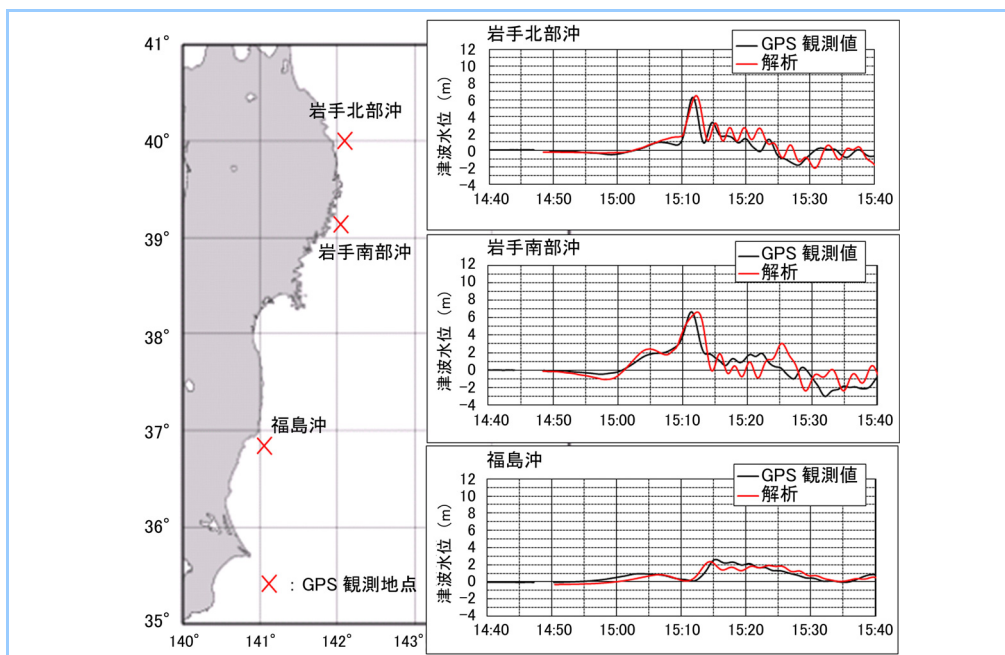


図3 GPS 波浪計データとの水位比較

3.11 における GPS 波浪計の観測データと津波伝播解析結果の比較を示す。

図3より津波の最大波の到達時間, ピーク水位をある程度再現できており, 伝播解析結果が妥当であると言える. 図4に発電所より 2km 沿岸の地点における津波水位, 津波流速, 津波の方向を示すが, これらの諸元を次ステップの3次元数値シミュレーションの入力条件とする.

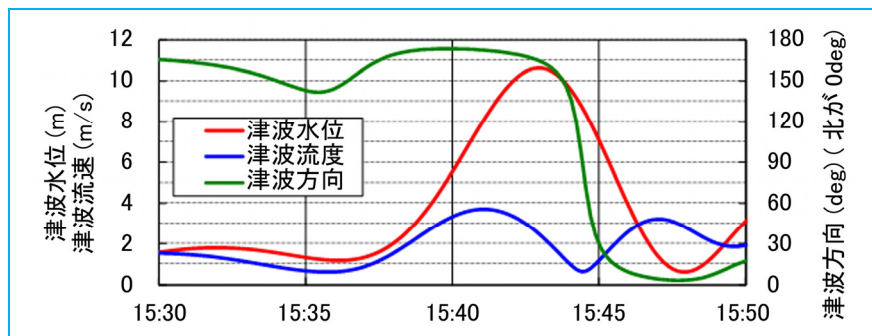


図4 発電所へ襲来する津波諸元

発電所沿岸 2km における津波水位, 津波流速, 津波方向の時系列を示す.

### 3. 沿岸部の3次元数値シミュレーション

#### 3.1 計算手法

陸上に遡上する津波は地形や構造物の影響を受けて複雑な流れとなり, 構造物に作用する津波波力を精度良く求めるには, 構造物前面における遡上津波の打ち上がりや構造物背後への回り込み等の現象を再現する必要がある. このような遡上津波の詳細挙動を再現するには, 沿岸構造物や地形, 海底等を詳細に考慮できる3次元の数値シミュレーションが有効と考えられる. そこで, 計算格子の取扱いが比較的容易な汎用の流体解析コードである ANSYS 社の FLUENT を用いた3次元数値シミュレーションによって, 沿岸構造物周辺の津波の詳細挙動及び波力を評価する技術を開発した<sup>(1)(5)(6)</sup>. 支配方程式は3次元 Navier-Stokes 方程式であり, 乱流モデルには LES(Large-Eddy Simulation)を用い, 自由表面形状の決定には界面捕捉手法の一つであり船舶の波浪解析でも実績がある VOF 法 (Volume of Fluid Method)<sup>(7)</sup>を採用した. 計算対象領域は東北電力(株)原町火力発電所とその防波堤を含む東西 3.5km, 南北 3.0km の範囲とし, 発電所建屋やタンク, 防波堤などの構造物, 周辺地形及び水深を再現した. 図5に CFD モデルを示す. 計算格子は, 建屋近傍は 0.5m の等間隔格子を採用し, 計算負荷の軽減のため建屋から離れるにしたがって格子サイズを大きくした. 津波入力条件は, 2章で実施した広域伝播解析結果より図4で示した沿岸 2km 地点での津波水位及び流速, 方向を CFD モデル境界に入力した.

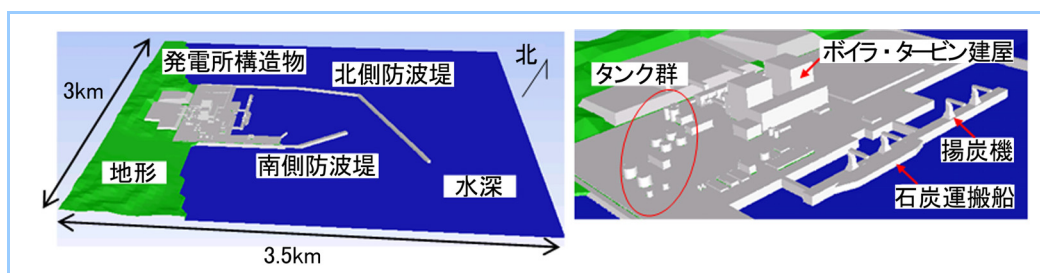


図5 解析領域及び再現構造

3次元数値シミュレーションの解析領域及び再現構造を示す.

#### 3.2 計算結果

##### (1) 津波遡上挙動

図6に津波シミュレーション結果の時系列画像を示す. 領域に侵入した津波(状態a)が, はじめに南側護岸から敷地に遡上し(状態b), その後, 防波堤内に浸入した津波が揚炭機正面より敷地に遡上する様子(状態c)が分かる. この結果, 発電所を包み込むように津波が襲来する(状態d). 上記津波の遡上挙動は, 被災当時の現場職員の見撃談とも一致しており, シミュレーションにより発電所近傍の津波挙動が概ね再現できていると考えられる.



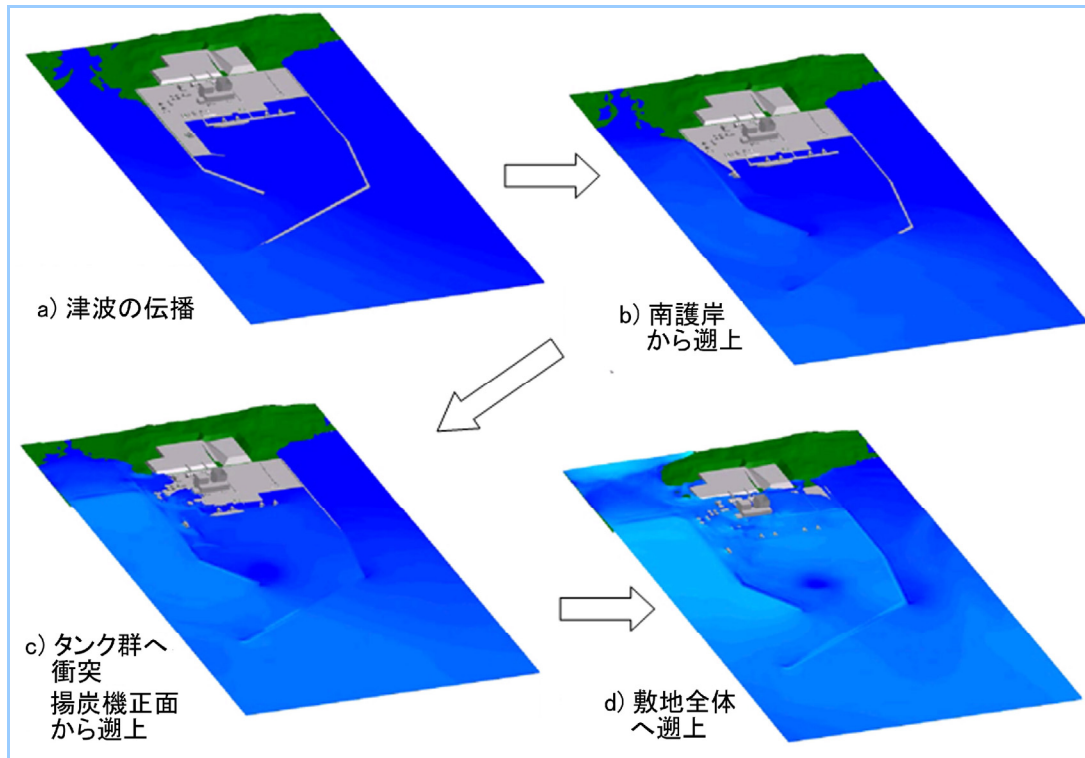


図6 津波遡上挙動

3次元数値シミュレーション結果のうち代表的な時刻における津波水面を示す。

## (2) 津波浸水高

図7に津波痕跡と津波シミュレーションより求めた津波浸水高さの比較を示すが、これより、痕跡では南から北に行くに従い浸水高さが低下する傾向にあり、シミュレーションでもこの減衰効果が再現できている。また、個々の建屋における浸水高さについては、解析では大きめに評価する傾向にあるが、10%程度以内の誤差で再現できていることが確認された。

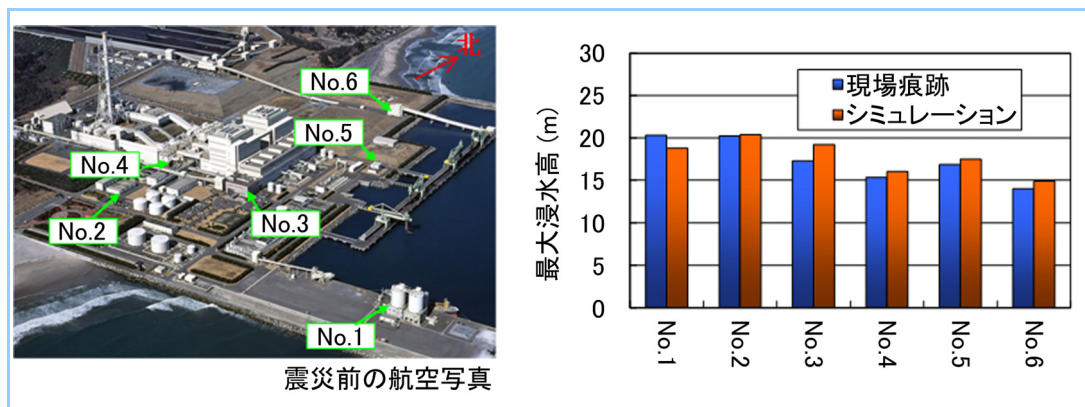


図7 現場痕跡と解析の津波浸水高比較

現場の津波痕跡と津波シミュレーションより求めた津波浸水高さの比較を示す。

## (3) 津波波力

図8にシミュレーションにより求められたタンクに作用する津波波力の時系列波形と座屈限界荷重及び滑動限界荷重を示す。対象としたタンクでは、滑動しないものの側板の座屈が発生した。ここで、座屈限界荷重と滑動限界荷重はタンクの構造寸法及び被災時の貯水量から推定した。なお、時刻の0秒はCFDの対象領域に津波が侵入を開始した時刻を示す。図8より、座屈限界荷重以上の水平波力がシミュレーションの結果得られていることが分かる。また、シミュレーションで算定される水平波力は滑動限界波力以下となっており、実際の被害に対応する津波波力をシミュレーションにより再現することができていると言える。

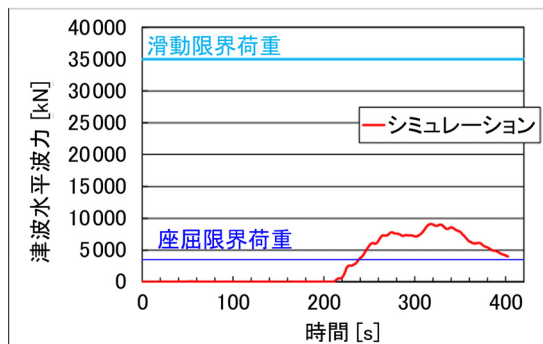


図8 タンクに作用する津波水平波力

シミュレーションにより求められたタンクに作用する津波波力の時系列波形と座屈限界荷重及び滑動限界荷重の関係を示す。

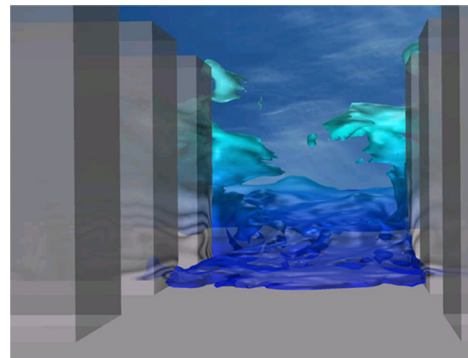


図9 バーチャルリアリティ可視化例

バーチャルリアリティ (VR) システムを用いた3次元立体等身大可視化事例を示す。

#### (4) 津波挙動の可視化

遡上する津波の挙動については図6で示す平面可視化のほか、当社のバーチャルリアリティ (VR) システムを用いた3次元立体等身大可視化が可能である。一例を図9に示すが、発電所等対象とする構造物周辺に実際に入り込んだ様々な視点からの津波の3次元詳細挙動を可視化することで、より実感を伴った現象把握や避難シミュレーションを行うことができる。

## 4. まとめ

沿岸構造物に作用する津波波力を評価し、津波に対する安全性を確保するため、津波発生から伝播、陸上への遡上、構造物への作用までの一連の解析技術を開発した。解析により対象沿岸構造物周辺の津波挙動、津波浸水高及び構造物に作用する津波波力を推定することが可能である。本技術は、津波襲来時の避難経路の検討や沿岸部に建設する建屋や機器、インフラの配置の検討、防波堤高さ・配置などの効果検証に適用可能である。

今後、将来発生が想定される地震規模及び津波規模の精緻化が進み、津波設計基準も変化していくことが想定される中、国内のみでなく、海外展開される構造物についても津波から構造物を守る技術開発を続けていく所存である。

謝辞：本技術を開発するに際し、東北電力(株)原町火力発電所から発電所構造情報及び被災状況に関するデータを提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 四條, 佃, 佐藤, 池末, 樋口, 工藤, 石崎, 清水, “発電所における東北地方太平洋沖地震津波の3次元数値シミュレーション”, 機械学会第90期流体工学部門講演会(2012), pp.547-548
- (2) “2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源(暫定結果, Ver. 4.2とVer. 4.6)”, [http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami\\_ja.html](http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html)(2011)
- (3) L.Mansinha, D.E. Smylie, “The displacement fields of inclined faults”, Bulletin of the Seismological Society of America, vol.61(1971), pp.1433-1440
- (4) “2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報”, 港湾空港技術研究所資料No.1231(2011), pp.238
- (5) 池末, 四條, 佐藤, “複数構造物に作用する津波波力に関する3次元数値シミュレーション”, 土木学会第67回年次学術講演会(2012), II-216
- (6) 四條, 佐藤, 池末, “複数構造物に作用する津波波力に関する3次元数値シミュレーション”, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2(2012), I-761-765
- (7) C.W.Hirt and B.D.Nichols, “Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamicx of Free Boundaries”, Journal of Computational Physics, vol. 39 (1981), pp. 201-225.