

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	工認-1107 改0
提出年月日	平成30年10月1日

V-5-64 計算機プログラム（解析コード）の概要・TSUNAMI

目次

1. はじめに	1
1.1 使用状況一覧	2
2. 解析コードの概要	3
3. TSUNAMIの解析手法について	5
3.1 解析コードの特徴	5
3.2 解析手法	6
3.3 解析フローチャート	8
3.4 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)	9

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）TSUNAMIについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-1-2-2-2	基準津波の概要	Ver. 7
V-1-1-2-2-3	入力津波の設定	Ver. 7
V-1-1-2-2-4	入力津波による津波防護対象設備への影響評価	Ver. 7
V-1-1-2-2-5	津波防護に関する施設の設計方針	Ver. 7

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	TSUNAMI
使用目的	津波水位解析
開発機関	東電設計株式会社
開発時期	1987年
使用したバージョン	Ver. 7
コードの概要	<p>TSUNAMI は、津波の非線形長波理論に基づく津波伝播・遡上解析を行う解析コードで、主な特徴は下記の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非線形長波理論（浅水理論）に基づく後藤の方法（後藤・小川 1982）により、平面二次元の津波伝播・遡上解析を行う。 ・地震の断層パラメータを入力として断層運動による津波の発生・伝播の解析が可能である。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	<p>TSUNAMIは、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備の設計に使用されている。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードによる津波伝播経路の解が屈折計算（法線法）と概ね一致することを確認している。 ・本解析コードを用いて 1960 年チリ地震津波の再現計算を行い、解（津波遡上範囲）が文献解と概ね一致することを確認している。 ・本解析コードを用いて 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を行い、解（水位）が土木学会の目安を満足していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証の内容の通り、波向き線、津波遡上範囲及び水位について検証していることから、解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・なお、日本国内の原子力施設の設置変更認可申請における解析に使用された実績がある。 ・本工事計画における解析の使用目的に対し、使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. TSUNAMI の解析手法について

3.1 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・非線形長波理論（浅水理論）に基づく後藤の方法（後藤・小川1982）により，平面二次元の津波伝播・遡上解析を行う。
- ・地震の断層パラメータを入力として断層運動による津波の発生・伝播の解析が可能である。

3.2 解析手法

a. 基礎方程式と計算スキーム

本解析コードにおける基礎方程式及び計算スキームは、非線形長波理論（浅水理論）に基づく後藤の方法（後藤・小川(1982)）を用いた。基礎方程式は次の通りである。

①連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

②運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0$$

ここで、

t : 時間, x, y : 平面座標, η : 静水面から鉛直上方にとった水位変動量,

M : x 方向の線流量, N : y 方向の線流量, h : 静水深, D : 全水深 ($= h + \eta$),

g : 重力加速度, n : マニングの粗度係数

差分法による計算スキームの概要は次の通りである。

- ・時間積分スキームは主にリープフロッグ法による。
- ・変数の配置はスタッガードシステムによる。
- ・保存型移流項に一次風上差分法を用いる。
- ・摩擦項は不安定にならないように陰的に近似する。

b. 初期条件

数値計算の初期条件設定に必要となる海底面の鉛直変位分布については、地震発生地盤が等方で均質な弾性体であるとの仮定のもとで地震断層運動に伴う変位分布を計算するMansinha and Smylie(1971)の方法を用いて計算する。

c. 境界条件

沖側境界条件については、特性曲線法をもとに誘導される自由透過の条件(後藤・小川(1982))を用いる。

陸側境界条件については、陸上部への遡上を考慮しない場合は、汀線を鉛直無限壁と考えて汀線に直角な方向の線流量をゼロ（完全反射）とする。陸上斜面への遡上を考慮する場合や浅い海域の引き波の際には、津波先端部での地形を格子間隔幅の階段状に近似し、計算過程で時刻ステップ毎に階段上に水があるか否かを判別する。先端条件の扱いは、小谷ら(1998)の方法による。

防波堤や護岸等の構造物を越流する際の境界条件については、防波堤等を格子間の境界で表現し、防波堤は本間公式(1940)、護岸は相田公式(1977)を用いて流量を評価する。

①本間公式(1940)

計算領域内に防波堤・防潮堤が存在し、水位がその天端高を越えた場合(図1参照)、天端高を基準とした堤前後の水深を h_1, h_2 ($h_1 > h_2$) とすると、越流状態に応じて堤単位長さ当たり越流量 q を以下のように求めることができる。

(完全及び不完全越流)

$$q = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad h_2 \leq \frac{2}{3} h_1$$

(潜り越流)

$$q = \mu' h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad h_2 > \frac{2}{3} h_1$$

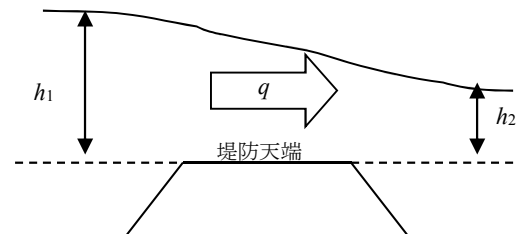


図1 本間公式(1940)の説明図

ここで、

$$\mu = 0.35, \mu' = 2.6\mu$$

なお、越流しない防波堤・防潮堤では、それを鉛直無限壁とする完全反射条件を与え、堤に直角方向の線流量をゼロとする。

②相田公式(1977)

汀線に護岸が存在する場合には、潜堤の場合のように流量係数 C_1 を用い、護岸内側への堤単位長さ当たり越流量 q を以下のように求めることができる(図2参照)。

$$q = C_1 H_1 \sqrt{g\Delta H}$$

ここで、

$$C_1 = 0.6$$

H_1 : 護岸上面からの水位

ΔH : 不連続箇所での水位差

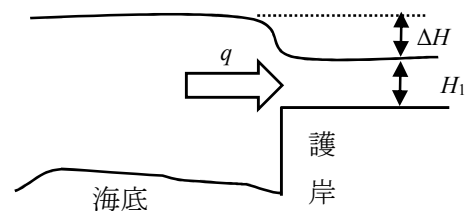


図2 相田公式の説明図

3.3 解析フローチャート

解析フローチャートを図3に示す。

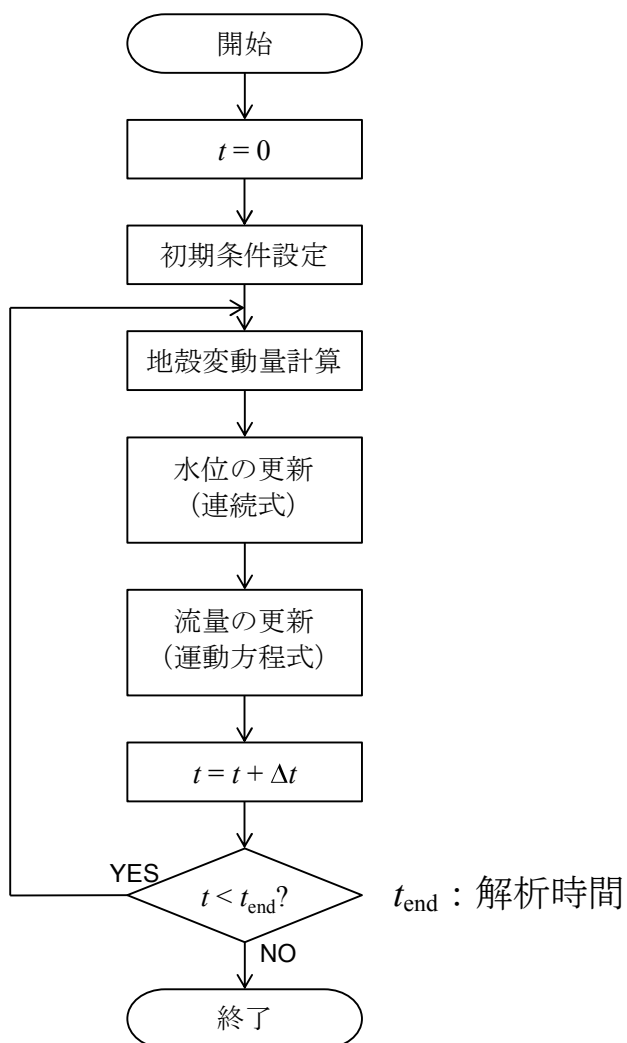


図3 解析フローチャート

3.4 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

a. 波向き線の検証 (Verification)

(a) 検証方法

波向き線法 (スネルの法則) を用いた屈折計算による波向き線と本解析コードによる波向き線との比較し, 両者が一致することを検証する。

(b) 検証条件

モデル海域は柏崎・刈羽原子力発電所の前面海域とする。

(c) 検証結果

屈折計算による波向き線と本解析コードによる波向き線は概ね一致しており (図4参照), 本解析コードが津波伝播経路を正しく評価していることが検証できる。

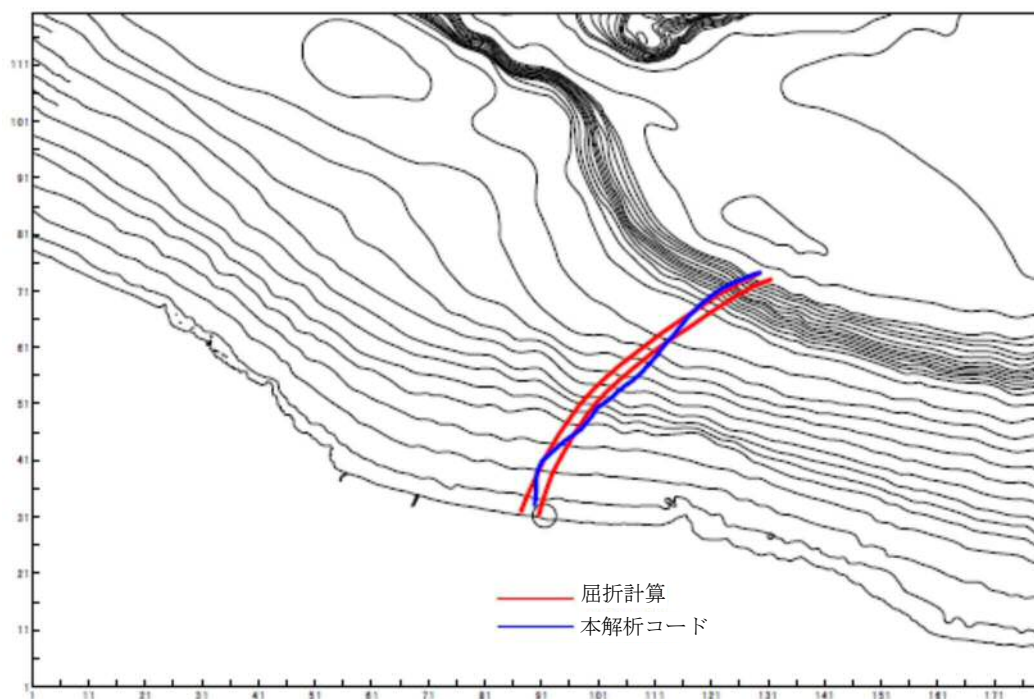


図4 屈折計算と本解析コードとの比較結果

b. 津波遡上範囲の検証 (Verification)

(a) 検証方法

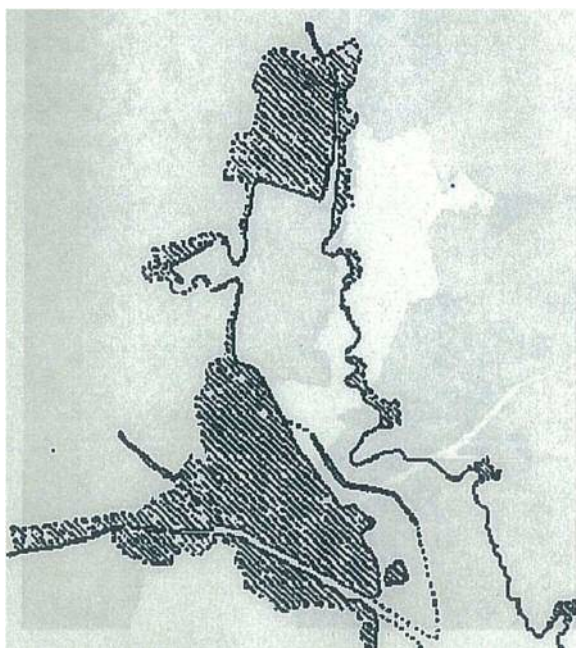
1960年チリ地震津波の再現計算を行い、津波遡上範囲について実測（西城(1961)）及び公開文献の計算結果（高橋(1991)）と比較し、結果が一致することを検証する。

(b) 検証条件

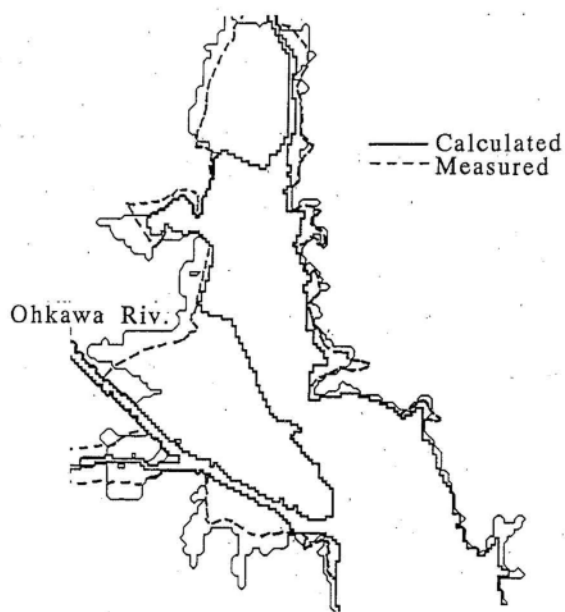
モデル化範囲は気仙沼湾における1960年チリ地震津波の津波遡上範囲とする。

(c) 検証結果

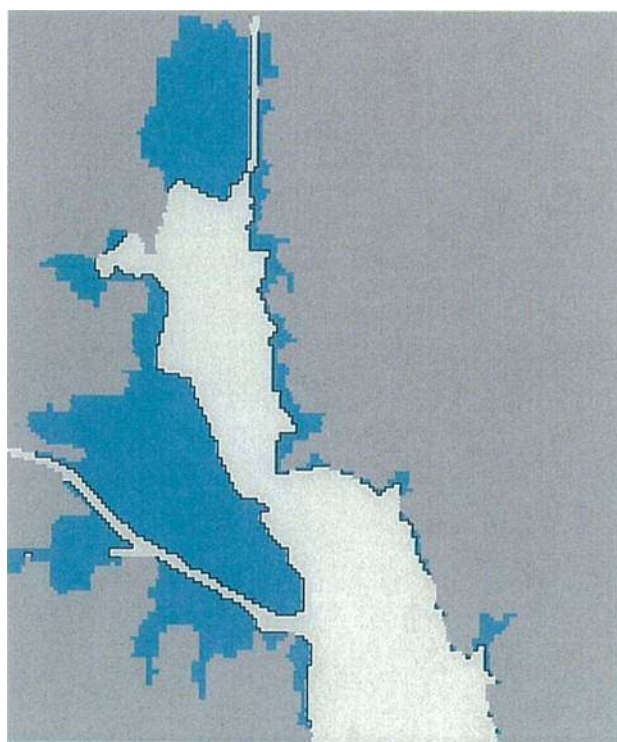
本解析コード（図5(3)）の計算結果は実測（図5(1)）及び公開文献の計算結果（図5(2)）と概ね一致しており、本計算機コードが津波伝播経路を正しく評価していることが検証できる。



(1) 西城(1961)による遡上範囲(実測)



(2) 高橋ら(1991)による計算結果



(3) 本解析コードによる計算結果

図5 気仙沼湾における遡上範囲の比較(1960年チリ地震津波)

c. 水位の検証 (Verification)

(a) 検証方法

2011年東北地方太平洋沖地震津波の再現計算を行い、水位について実測（痕跡高）と比較し、結果が一致することを検証する。

(b) 検証条件

北海道から千葉房総付近までの太平洋をモデル化し、2011年東北地方太平洋沖地震津波再現断層モデル（図6）を用いて解析を行う。

(c) 検証結果

本解析コードによる計算結果（水位）と痕跡高の比較を図7に示す。全2820点のデータに対して相田(1977)の幾何平均 $K=1.04$ ，幾何標準偏差 $\kappa=1.40$ であり土木学会の目安（ $0.95 < K < 1.05$ ， $\kappa < 1.45$ ）を満足しており，本解析コードで水位を正しく評価できていることが検証できる。

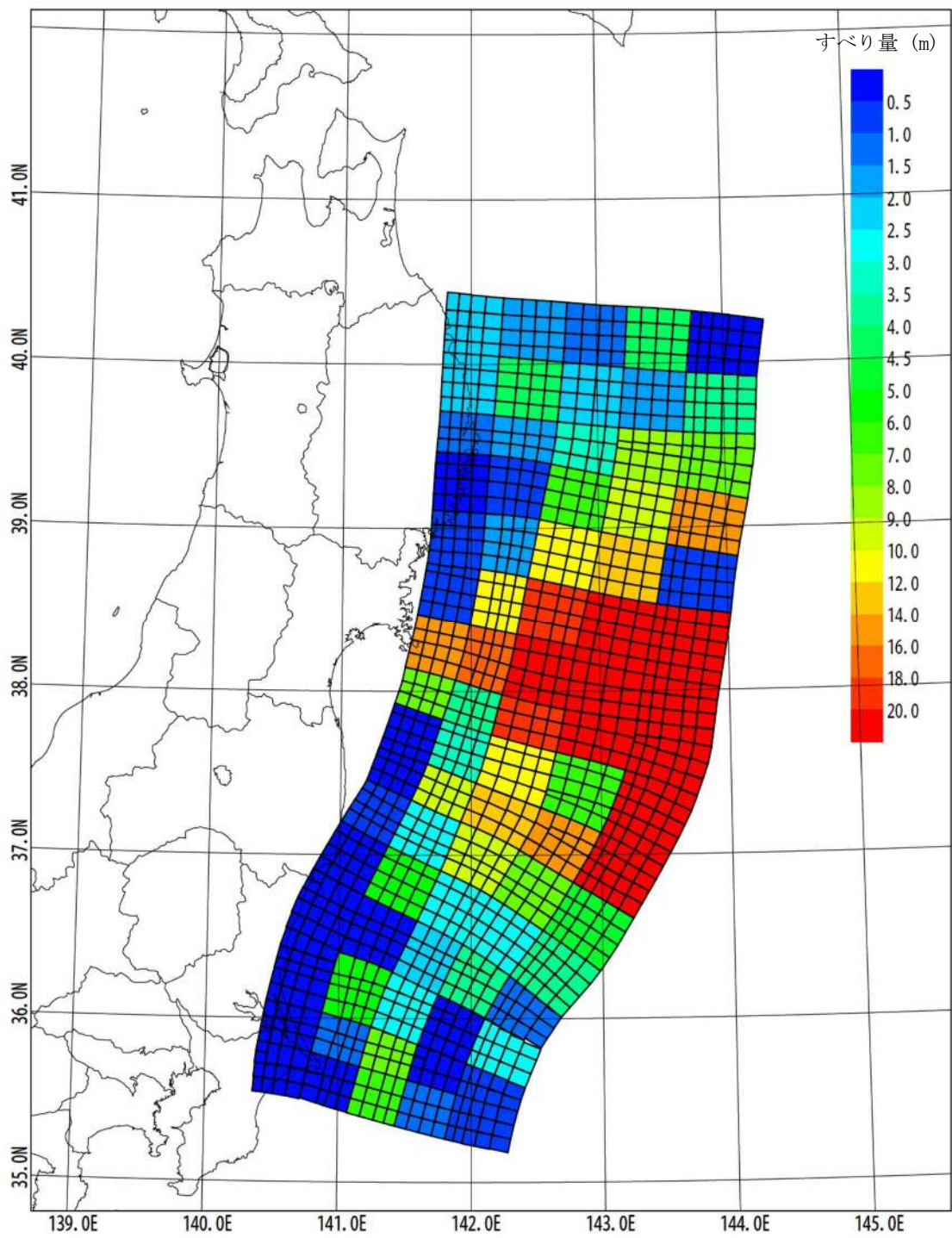


図6 断層モデル
(2011年東北地方太平洋沖地震)

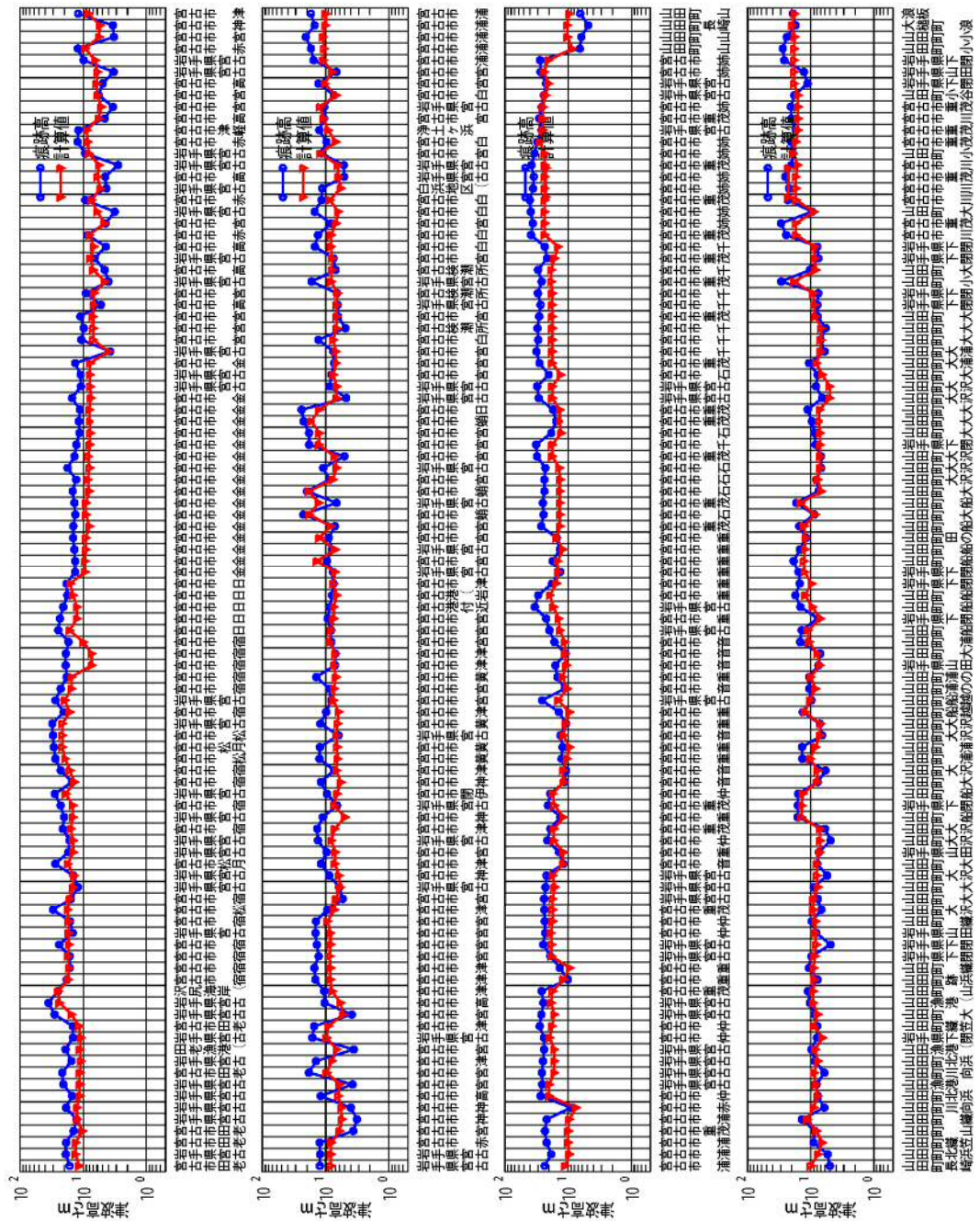


図 7(3) 計算結果 (水位) と痕跡高の比較

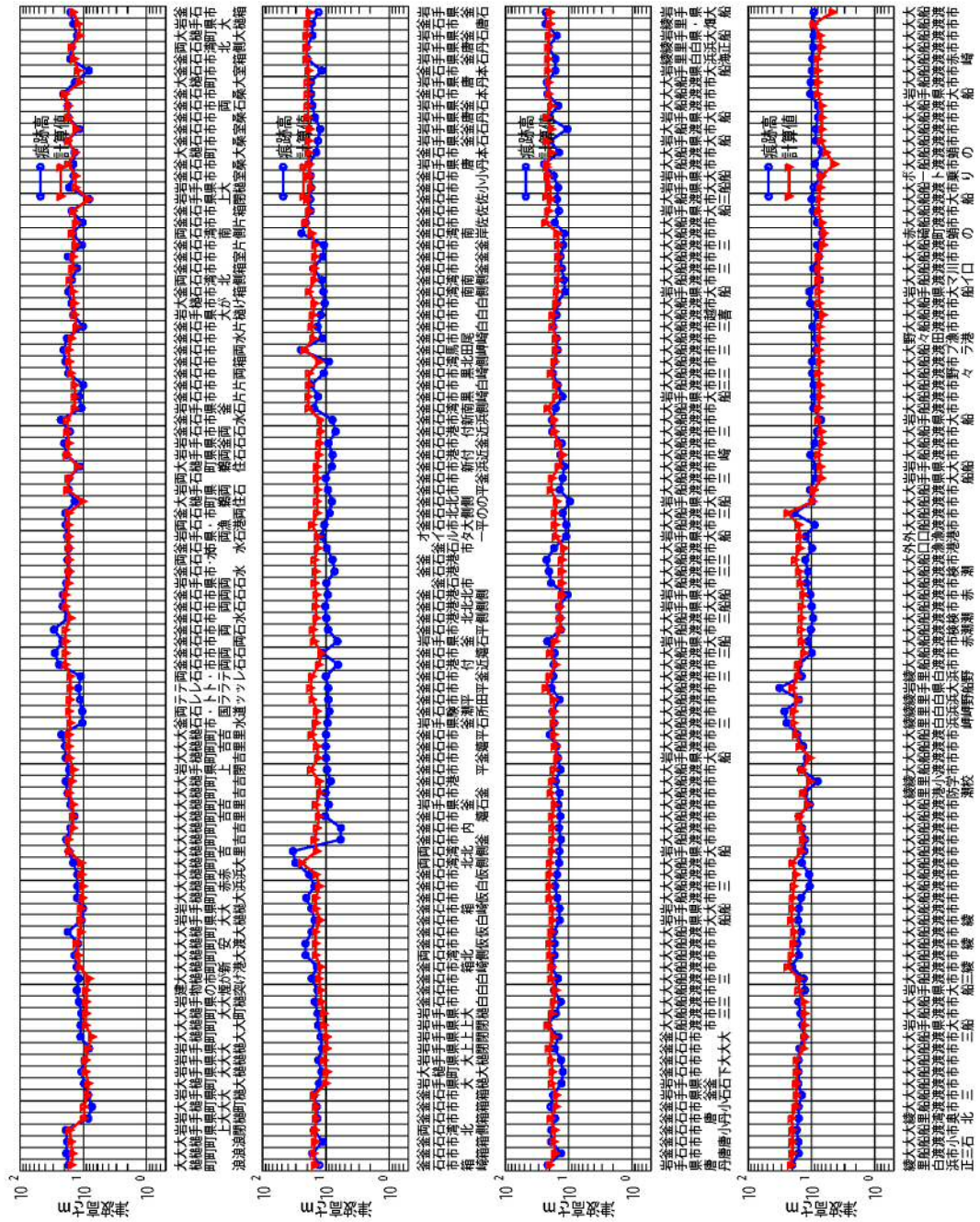


図 7(4) 計算結果（水位）と痕跡高の比較

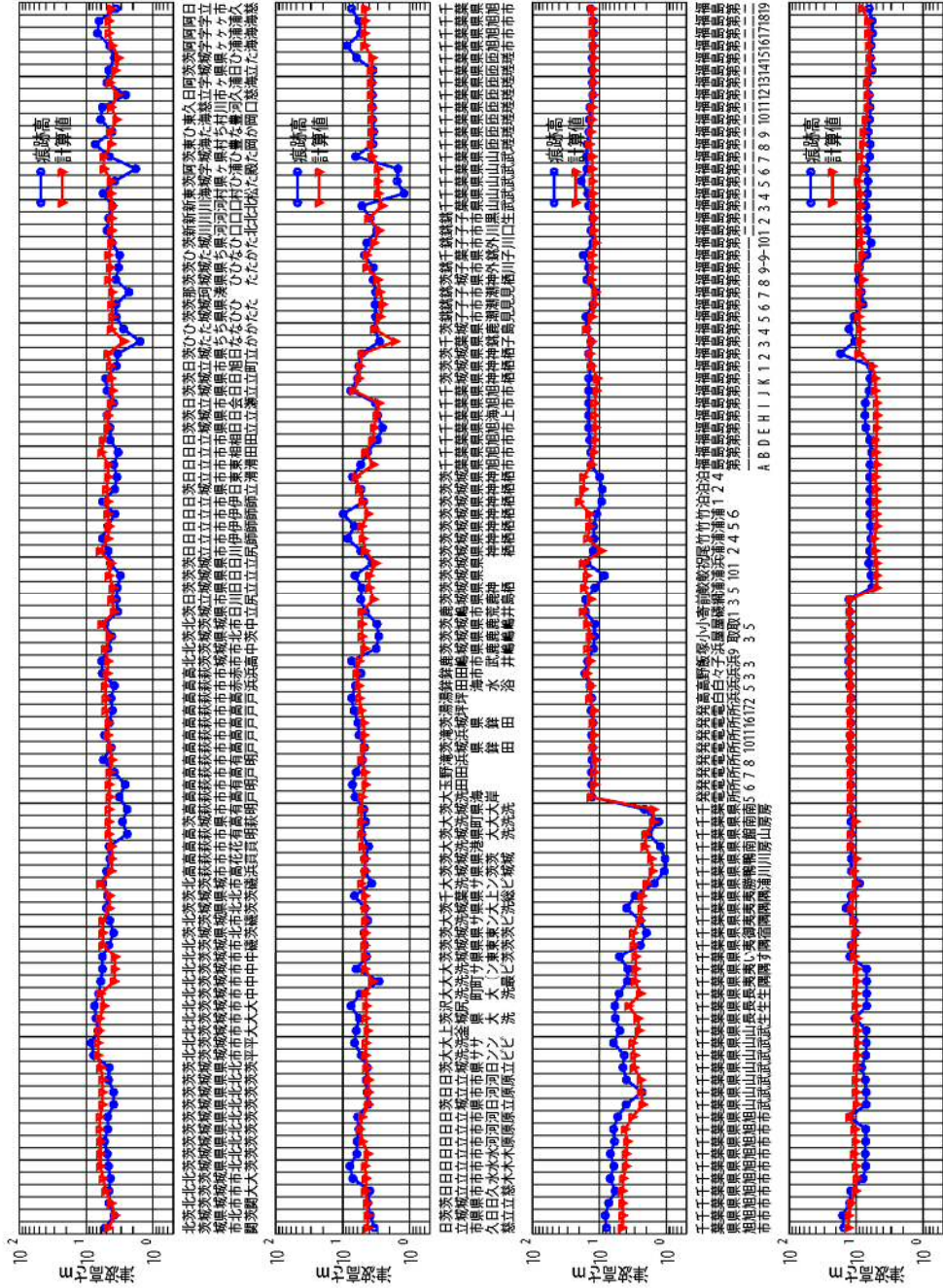


図 7(7) 計算結果 (水位) と痕跡高の比較

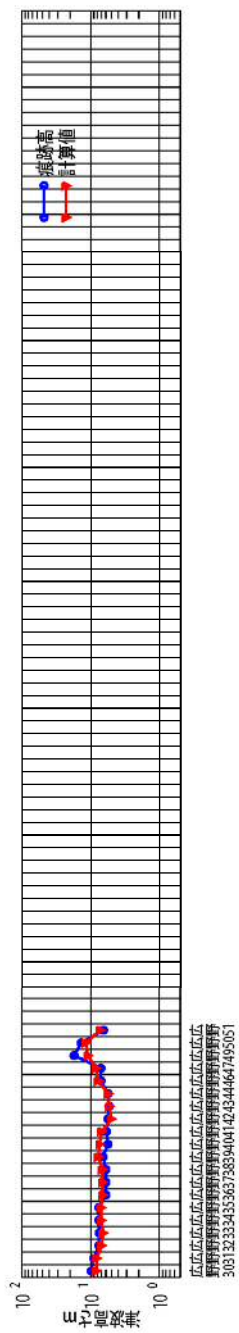


図 7(8) 計算結果 (水位) と痕跡高の比較

d. 妥当性確認 (Validation)

津波防護施設, 浸水防止設備及び津波監視設備の設計にTSUNAMIを使用することは, 次の通り検証されており, 妥当である。

- ・ 検証の内容の通り, 波向き線, 津波遡上範囲及び水位について検証していることから, 解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。