

1. 津波シミュレーション手法・条件設定案

表 1 に津波計算条件を示す。計算時間間隔やマニング粗度係数など、詳細な条件については委員会の意見や実際の計算を通して決定していくものとする。

表 1 津波計算条件

項 目	内 容
検討対象とする地震津波	資料 3 の通り
想定地震津波の波源モデル	資料 3 の通り
基礎式と解法	◆（波源～沿岸の伝播計算、堤内地の氾濫計算） 非線形長波方程式を基礎式とし、Leap-Frog 差分法により計算 ◆（越流境界（海岸堤防位置の津波の入射（越流量））） 本間公式による越流計算
計算メッシュ間隔	約 2700m、約 900m、約 300m、96m、48m、24m、12m*
大メッシュと小メッシュの接続方法	◆空間：波源から堤内地までの計算領域を接続し、同時に津波遡上シミュレーションを実施 ◆時間：計算時間間隔はすべての計算領域で一定とする
検討方法	対象 2 ケースについて、全域で津波遡上シミュレーションを実施。（市街地は最小計算メッシュ間隔＝12m）。最大浸水深、浸水区域より津波浸水想定区域図を作成
計算時間	3 時間
計算時間間隔	0.1～0.5 秒（計算安定条件を満たすよう設定）
地盤変位量	マンシンハ・スマイリ（1971）の方法
初期条件	初期水位変動量＝海底地盤変位量の鉛直成分
潮位条件	朔望平均満潮位
Manning の粗度係数 n	市街地：高密度（建物占有面積 50%以上）：0.08、中密度（同 20～50%）：0.06、低密度（同 20%未満）：0.04、森林：0.03、水面：0.025、田畑：0.020（漁港、港湾施設などは市街地に含める。）陸域はオルソフォトから土地利用を読み取り設定する
陸上遡上（氾濫）計算における波先端条件	水域側水位と陸域側地盤高の差（実水深）が 10^{-5}m を超える場合に遡上 ※「三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発、後藤智明・佐藤一央、港湾技術研究所報告 第 32 巻 第 2 号」より設定
アウトプット	◆津波評価点における津波波形と流速ベクトルの経時変化（最大津波高、津波到達時間） ◆最大津波高の平面分布 ◆最大浸水深分布図 ◆浸水深平面分布時系列変化図（CG 動画含む）

*一部河川については、6mメッシュで評価する。

1.1 基礎方程式

連続の式、および運動方程式により、津波の運動を記述する。シミュレーションでは、計算領域のメッシュサイズや水深に応じて、計算領域ごとに線形長波方程式と非線形長波方程式を選択して用いる。

ここでは、非線形長波方程式について説明する。

1.2 非線形長波理論

水深を h 、波長を L 、波高を H とした時、 h/L および H/L がともに小さいときに用いられる近似が長波理論である。この近似では、圧力は静水圧分布となり、水平方向の流速は鉛直線に沿って一様と仮定される。

このような近似の下では、長波の運動は次のように表される。

連続式：

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

運動方程式：

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = fN + K_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{F}{D^2} MQ$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = -fM + K_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{F}{D^2} NQ$$

ここで、

x, y ：静水面に取った空間座標

t ：時間座標

η ：水位変動

h ：静水深

g ：重力加速度

M, N ：それぞれ (x, y) 方向の線流量

$$Q = \sqrt{M^2 + N^2}$$

f ：コリオリ係数

F ：海底摩擦損失

マンニングの粗度係数を用いて、 $F = \frac{gn^2}{D^{1/3}}$ と表すことができる。

K_h ：水平渦動粘性係数

D : $D = h + \eta$ で表される全水深

連続の式は、運動方程式から得られる流量から、津波の水位を求める式であり、運動方程式は連続の式から得られる水位から、流量を求める式である。交互に計算を繰り返していくことで、津波の伝播する状況を時間を追って把握することができる。

1.3 差分スキーム

空間差分にはスタaggerド格子を用い、時間差分にはリーブ・フロッグ法を用いた。リーブ・フロッグ法の計算格子では、図 1 に示すように水位 η と水平流量 M , N の計算点が時間的にずれている。空間的には、水位はメッシュ中心で、流量はメッシュ辺の中心で計算する。

以下、 (x, y, t) に対応する離散化量を添字 (i, j, k) で表すこととする。

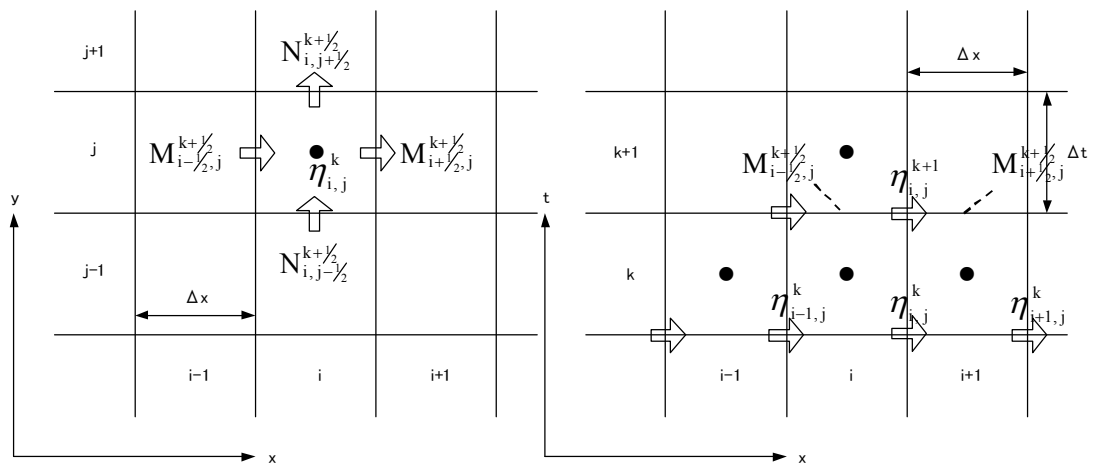


図 1 スタッガード格子 (左) とリーブ・フロッグ法の計算点配置 (右)
(後藤・柴木, 1993)

連続式の各項は、中央差分により次式のように表現される。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta}{\partial t} &= \frac{1}{\Delta t} [\eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^k] \\ \frac{\partial M}{\partial x} &= \frac{1}{\Delta x} [M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}] \\ \frac{\partial N}{\partial y} &= \frac{1}{\Delta y} [N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}]\end{aligned}$$

以上より、連続式の差分式は、次のように表現される。

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} [M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}] - \frac{\Delta t}{\Delta y} [N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}]$$

次に、運動方程式の差分式は、次のように表現される。非線形項は風上差分を用いる。

$$\begin{aligned}M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{1 + x \mu_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} \left\{ \left(1 - x \mu_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right) M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} - g D_{i+\frac{1}{2},j}^k \frac{\Delta t}{\Delta x} [\eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k] \right. \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}})^2}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{21} \frac{(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}})^2}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{31} \frac{(M_{i-\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}})^2}{D_{i-\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\nu_{11} \frac{M_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k-\frac{1}{2}} N_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} + \nu_{21} \frac{M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} + \nu_{31} \frac{M_{i+\frac{1}{2},j-1}^{k-\frac{1}{2}} N_{i+\frac{1}{2},j-1}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i-\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \\ &\quad \left. + \Delta t f N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} + \frac{K_h}{\Delta x^2} \Delta t [M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} + M_{i-\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} + M_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k-\frac{1}{2}} + M_{i+\frac{1}{2},j-1}^{k-\frac{1}{2}} - 4 M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}] \right\} \\ N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} &= \frac{1}{1 + y \mu_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \left\{ \left(1 - y \mu_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right) N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - g D_{i,j+\frac{1}{2}}^k \frac{\Delta t}{\Delta y} [\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k] \right. \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\lambda_{12} \frac{M_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} N_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{22} \frac{M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{32} \frac{M_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} N_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\nu_{12} \frac{(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}})^2}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \nu_{22} \frac{(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}})^2}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \nu_{32} \frac{(N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}})^2}{D_{i,j-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \\ &\quad \left. - \Delta t f M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} + \frac{K_h}{\Delta y^2} \Delta t [N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} + N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} + N_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} + N_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - 4 N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}] \right\}\end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}x \mu_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} &= \frac{\Delta t g n^2}{2(D_{i+\frac{1}{2},j}^k)^3} \sqrt{(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}})^2 + (N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}})^2} \\ y \mu_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} &= \frac{\Delta t g n^2}{2(D_{i,j+\frac{1}{2}}^k)^3} \sqrt{(M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}})^2 + (N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}})^2}\end{aligned}$$

係数 λ 、 ν は流量の方向により次の値を取る。

$$\begin{aligned}M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0 &\rightarrow \lambda_{11} = 0, \lambda_{21} = 1, \lambda_{31} = -1 \\ M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} < 0 &\rightarrow \lambda_{11} = 1, \lambda_{21} = -1, \lambda_{31} = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0 &\rightarrow v_{11} = 0, v_{21} = 1, v_{31} = -1 \\
N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} < 0 &\rightarrow v_{11} = 1, v_{21} = -1, v_{31} = 0 \\
M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0 &\rightarrow \lambda_{12} = 0, \lambda_{22} = 1, \lambda_{32} = -1 \\
M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} < 0 &\rightarrow \lambda_{12} = 1, \lambda_{22} = -1, \lambda_{32} = 0 \\
N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0 &\rightarrow v_{12} = 0, v_{22} = 1, v_{32} = -1 \\
N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} < 0 &\rightarrow v_{12} = 1, v_{22} = -1, v_{32} = 0
\end{aligned}$$

1.4 計算の諸条件

津波計算の数値計算の初期条件としては、震源断層モデルを用いて計算される海底地盤変動の鉛直成分を海面上の水位変動として与える方法を用いる。図 2に示すように断層モデルのパラメータを与え、断層近傍の海底面の垂直変動量分布を Mansinha and Smylie (1971)の方法によって計算し、この垂直変動量を海面の水位変動量として与えたものが津波シミュレーションの初期条件となる。

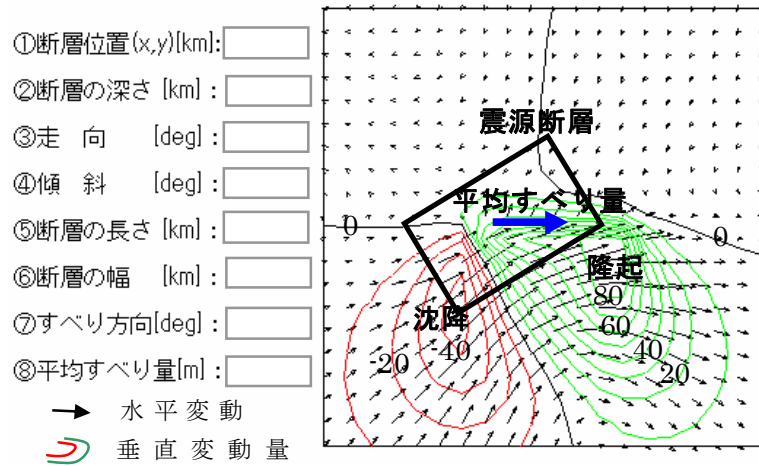


図 2 Mansinha and Smylie (1971)の方法による地盤変動量の計算例

1.5 境界条件

(1) 沖側境界

境界に仮想的な完全壁面を設定して、そこで発生する重複波の半分が透過波成分と等しいという原理（日野ほか, 1988）を利用し、沖側境界を自由透過させる。

(2) 遡上境界

陸上への津波の遡上に関しては、非線形長波理論式を用いる場合のみ適用する。図3に示すように、波先端部において陸側メッシュの地盤高 h より海側メッシュの水位 η が高い場合、その差を実水深 D として流量計算を実施する。

本調査では、 $D > 10^{-5} \text{m}$ の時に遡上計算を行うこととする。

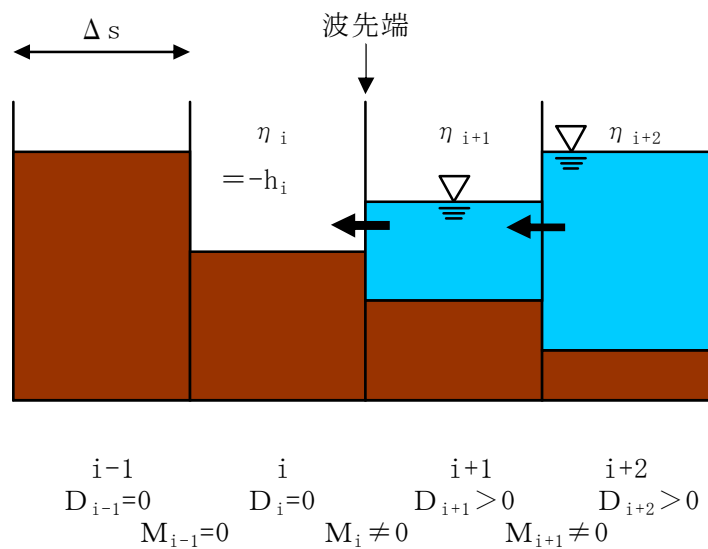


図 3 遡上境界条件（後藤・柴木, 1993）

(3) 越流境界

計算領域内の防波堤、堤防等において、水位がその天端高を越えた場合には、次の本間公式を用いて単位幅当たりの越流量 Q を計算する。

$$Q = 0.35H_1\sqrt{2gH_1} \quad H_2 \leq \frac{2}{3}H_1 \quad (\text{完全越流})$$

$$Q = 0.91H_2\sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad H_2 > \frac{2}{3}H_1 \quad (\text{潜り越流})$$

ここで H_1 と H_2 は天端高を基準とした堤の前後の水の厚さを示す（図 4）。

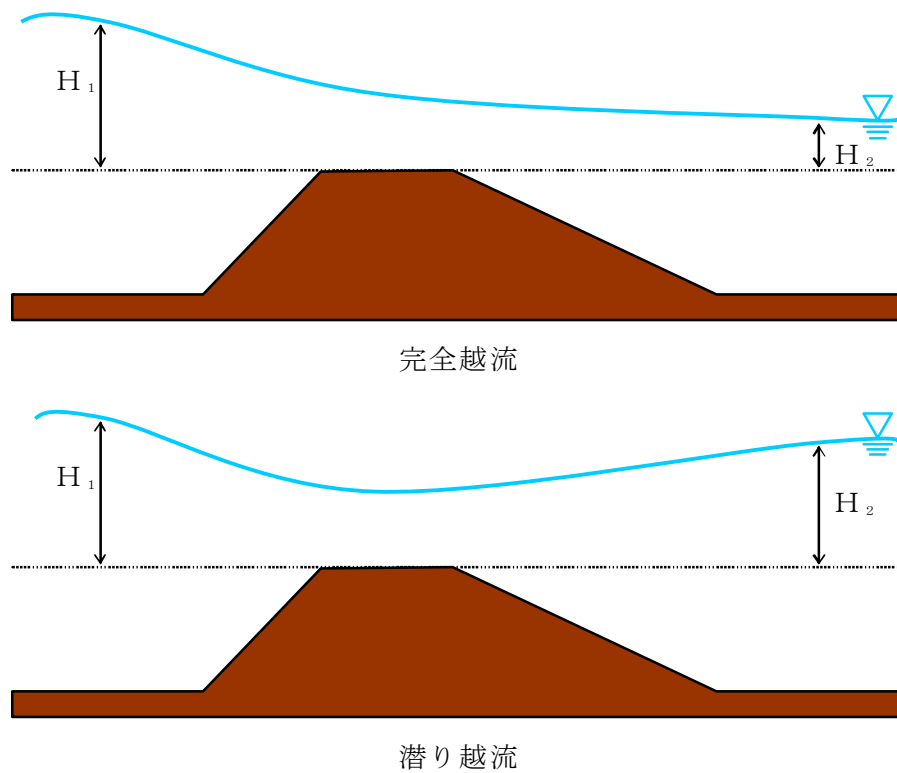


図 4 越流の模式図（後藤・柴木，1993）

1.6 計算安定条件

全計算領域を一様の時間間隔 Δt で計算する。ただし、以下に示す差分スキームの安定条件（C. F. L 条件）を満たすように Δt を設定する。

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} > \sqrt{2gh_{\max}}$$

ここで、

Δs : 各計算領域のメッシュサイズ

$h_{\max}$: 各計算領域の最大水深

2. 河川遡上のモデルの取扱い

河川遡上により沿川で生じる浸水被害をシミュレーションにより予測する。構造物データについては、河川遡上および河川堤防からの氾濫のシミュレーション精度の向上のために12mまたは6mメッシュを用いる（図5）。河川のモデルは海岸部までのモデルと同様に2次元で構築し、波源からの一連の計算によって浸水予測を行う。表2に河川遡上計算の対象河川とモデル化の考え方を示す。最新の写真画像を利用することにより、最新かつ正確な津波防災施設位置を取得する。

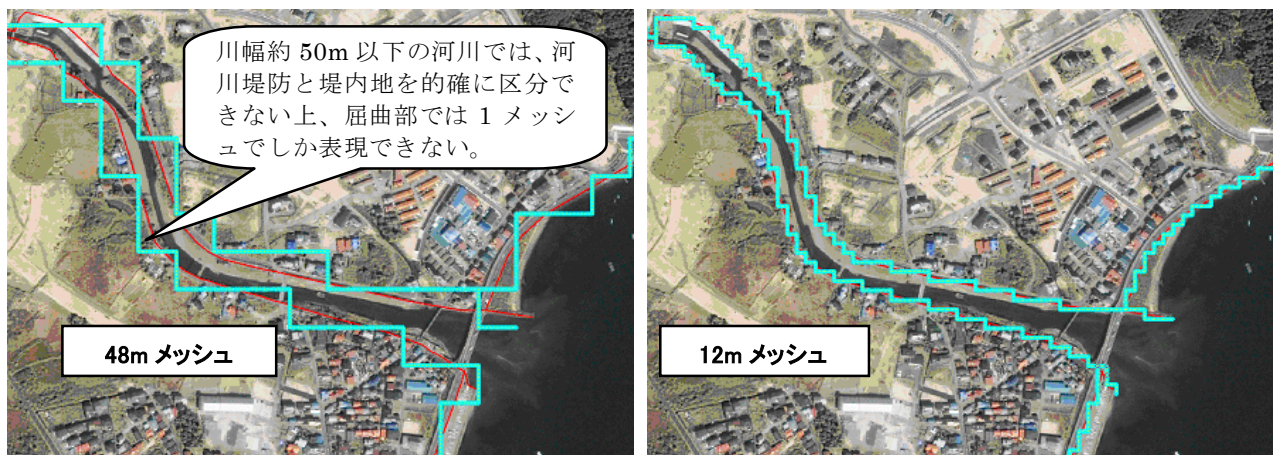


図5 12mメッシュモデルの効果例（河川遡上）

表2 河川遡上のモデルの考え方

対象河川	1級河川と河口幅25m以上の2級河川を対象とする。
モデル化の考え方	・ 矩形メッシュにより2次元でモデル化する。河川堤防はメッシュ辺に配置する。 ・ 河川横断方向に4メッシュ以上で表現できることを条件とし、河口幅25m以上の河川を対象とする。 ・ 河道および堤防のデータ化にあたっては、レーザスキャナ計測による2mメッシュ標高データを活用し、河川の現況をモデルに反映させる。 ・ 河床が朔望平均満潮位より低い区間は河床を地盤高とし、それより上流は河川敷の高さを河川の地盤高とする。河床の地形データは、できる限り横断面図を収集するとともに、橋梁位置で簡易計測を実施して作成する。

3. 構造物の条件設定（構造物の効果の見込み方）

津波防災施設の効果については、海岸堤防、防波堤、河川堤防、水門などの施設が全て有効に機能するケースを想定する。