

津波の河川遡上と氾濫解析における CRD法の適用性

THE APPLICABILITY OF CRD SCHEME IN TSUNAMI RUNUP AND INNUNDATION SIMULATION

岡村誠司¹・堀江克也²・森明巨³・西本直史¹
Seiji OKAMURA, Katsuya HORIE, Akio MORI, Naoshi NISHIMOTO

¹正会員 博(工) いであ株式会社 水圏事業本部 (〒154-8585 東京都世田谷区駒沢3-15-1)

²正会員 工修 いであ株式会社 水圏事業本部 (〒154-8585 東京都世田谷区駒沢3-15-1)

³正会員 工博 いであ株式会社 水圏事業本部 (〒060-0062 北海道札幌市中央区南二条西9-1-2)

The Tsunami caused by the 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake wreaked enormous damage on coastal area. Numerical computation model which can simulate Tsunami propagation, run-up and inundation with high accuracy is required. In this paper, the two dimensional CRD (Contour-integration-based Residual Distribution) scheme which is numerical computation to simulate the flow with shock waves is applied for run up and inundation of the 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake Tsunami in the Ishinomaki city and the Kitakami River. This paper shows that CRD scheme can evaluate the propagation velocity and wave height of Tsunami in the sea, the river and the inundation area.

Key Words : numerical computation, contour-integration-based residual distribution, tsunami, run up, inundation

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震により発生した津波は、沿岸の防波堤・防潮堤を乗り越え、また河川を遡上した津波が河川堤防を乗り越えて市街地へと氾濫し、太平洋沿岸の各地で甚大な被害をもたらした。この津波災害を受け、被災地域の復旧・復興計画の策定等を支援するため「平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き」¹⁾が示された。また、今後想定される南海トラフ地震による津波の発生が懸念されており、津波対策の策定が急がれている。このような状況から、津波の氾濫を精度よく想定できるシミュレーションが求められている。

津波氾濫を精度よく解析するためには、津波の波源から沿岸までの広い海域における津波の伝播と波高の増幅を解析するとともに、津波の河川遡上、沿岸の防波堤や河川の堤防を乗り越える局所的な流れ、市街地への氾濫を一体的に解析する必要がある。特に、防波堤や河川堤防の周辺等では常流・射流混在流が発生し、このような流れ場の精度よい解析が重要である。

常流・射流混在流の計算はMacCormack法²⁾、CIP法³⁾、Residual Distribution (RD) scheme⁴⁾⁵⁾⁶⁾など現在までに多くの数値モデルが提案されているが、その一つとしてCRD法⁷⁾がある。CRD法は不連続解を持つ流れの多次元解析

法として開発され、高速空気流でその優れた機能が示された⁷⁾。MacCormack法のように陽的に人工粘性を加える必要がない。また、RD法のように複雑な線形化を必要とせず、単純平均で充分で、二次元河床変動解析への適用が容易である。さらに、平面二次元計算では非構造の三角形格子を用いるので複雑な地形の扱いが容易である。一つの計算要素ごとに独立して計算するためベクトル化も簡単である。

堀江ら⁸⁾⁹⁾は、CRD法を開水路流れの一次元と二次元問題に適用し、ダム破壊流れなどの理論値、急流河川である豊平川の水利模型実験結果等と比較しその有効性を示した。本論文では、石巻・北上川周辺の津波河川遡上・氾濫を対象としてCRD法の適用性を検討する。

2. 計算法

(1) CRD法

本論文で適用するCRD法は堀江ら⁸⁾⁹⁾が用いた解析法である。二次元一階双曲型偏微分方程式を式(1)で表す。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \mathbf{F} + \Omega = 0 \quad (1)$$

ここに、 ϕ は保存変量、 \mathbf{F} は流束である。ガウスの発散定理を使えば、式(1)は式(2)に書き換えられる(簡単のため $\Omega = 0$ とする)。

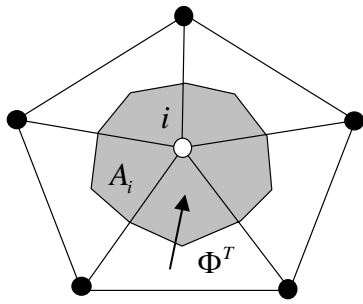
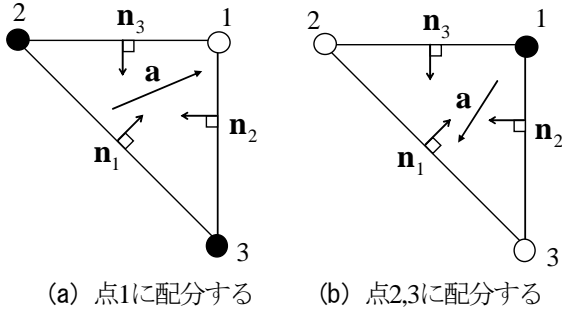


図-1 CRD法における計算点(三角形の頂点におく)



(a) 点1に配分する (b) 点2,3に配分する

図-2 Residualの配分法-波動の伝播する \mathbf{a} の方向に配分

$$\int_A \frac{\partial \phi}{\partial t} dA + \Phi^T = 0 \quad (2)$$

$$\Phi^T = \int_T \nabla \cdot \mathbf{F} dA = \oint_{\partial T} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{n}$$

ここに、 Φ^T はResidualと呼ばれる。Aは計算点の支配面積、 \mathbf{n} は計算領域の境界線に外向きの垂直ベクトル、Tは計算要素(ここでは三角形)を表す。

Φ^T を式(3)に示す係数 β_i^T に応じて、計算点*i*へ配分する。

$$\phi_i^{n+1} = \phi_i^n - \frac{\Delta t}{A_i} \beta_i^T \Phi^T \quad (3)$$

ここに、 n は時間ステップ、 $\sum_i \beta_i^T = 1$ である。

計算単位は、平面二次元計算では非構造の三角形格子を用いる。計算点は三角形の頂点(Cell-vertex)にとり(図-1)、1つの三角形格子(計算要素)ごとに独立してResidual Φ^T を計算する。

式(2)に左固有ベクトルLを作用させて固有ベクトル空間に変換し、 $L\Phi^T$ をInflow parameter $k_i = \mathbf{a} \cdot \mathbf{n}_i / 2$ の符号が正の方向に配分する(風上スキーム)。ここに、 \mathbf{a} は波動の伝播速度、 \mathbf{n}_i は辺に垂直で計算要素に内向きのベクトルである。図-2(a)のように $k_i > 0$ が1点の場合は点1に配分する。(b)のように2点に向かう場合には多くの方法が提案されているが、本論文では k_i の比に応じて配分する(4)式の方法を用いる。得られた配分に右固有ベクトルRを作用させて元の空間に戻し、 Δt 後の保存変量 ϕ を算定する。

Z: 地盤高, H: 水位, h: 水深, u: 流速

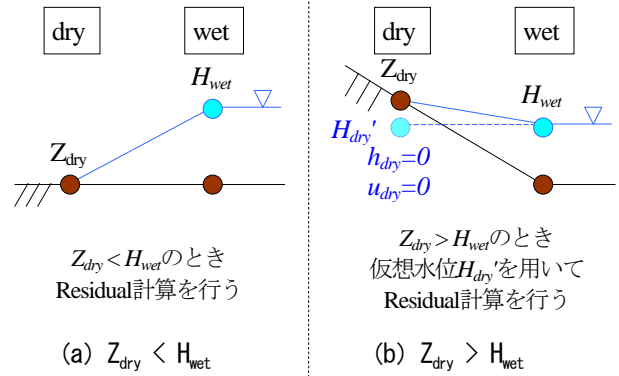


図-3 Dry-Wet要素の計算

$$\text{LDA-scheme}^4 \begin{cases} \beta_2 = k_2 / (k_2 + k_3) \\ \beta_3 = k_3 / (k_2 + k_3) \end{cases} \quad (4)$$

(2) 基礎方程式

平面二次元浅水流方程式は(1)式において、

$$\phi = \begin{pmatrix} h \\ q_u \\ q_v \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} h\mathbf{v} \\ q_u \mathbf{v} + g[h]H\mathbf{i} \\ q_v \mathbf{v} + g[h]H\mathbf{j} \end{pmatrix}, \Omega = \begin{pmatrix} 0 \\ f q_u \\ f q_v \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここに、 h は水深、 $\mathbf{v} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$ 、 u, v は x, y 方向の水深平均流速、 \mathbf{i}, \mathbf{j} は x, y 方向の単位ベクトル、 $q_u = uh$ 、 $q_v = vh$ 、 g は重力加速度、 H は水位である。 $f = f'|\mathbf{v}|/h$ は底面摩擦抵抗である。津波氾濫解析にあたって海域における f' の値は渡辺ら¹⁰⁾に倣い $f' = 0.005$ とした。陸域は、市街地のビルや家屋等の建造物の影響を摩擦抵抗に含めることとし、浸水範囲を概ね再現できる $f' = 0.05$ とした。本来は建造物のひとつひとつを地形として解析に取り込むべきであるが、家屋等の流動効果の適正な評価など不明な点も多い。適正な摩擦抵抗の値は、計算精度を向上するうえで今後の課題である。なお、 $[\]$ は計算要素の平均を表し定数として扱う。

(3) 抵抗項の取り扱い

水深がゼロに近く流速が速い場合、式(5)の抵抗項が非物理的な値となるため、 Δt 後の保存変量 ϕ^{n+1} を算出する際に式(6)に示すように抵抗項を陰的に取り扱う。

$$\begin{pmatrix} h \\ (1 + f\Delta t)q_u \\ (1 + f\Delta t)q_v \end{pmatrix}^{n+1} = \begin{pmatrix} h \\ q_u \\ q_v \end{pmatrix}^n - \frac{\Delta t}{A_i} \beta_i^T \Phi^T \quad (6)$$

(4) 水際条件

三角形要素を構成する3計算点すべてがdry($h=0$)のときはResidualの計算を行わない。wet($h>0$)とdry($h=0$)両方の格子点を含む氾濫フロントや堤防際の三角形要素では、図-3のようにResidualの計算を行う。

図-3(a)のように $Z_{dry} < H_{wet}$ の要素では、通常の

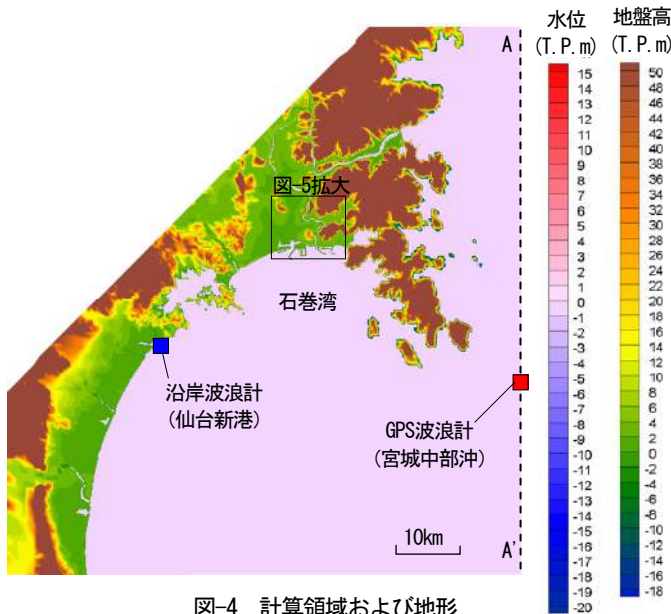


図-4 計算領域および地形

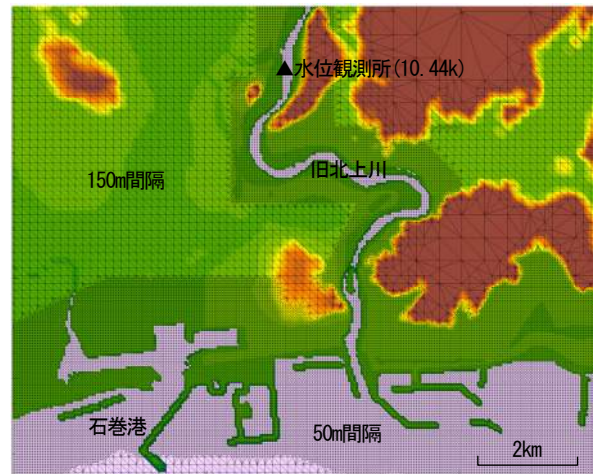


図-5 石巻付近の格子形状

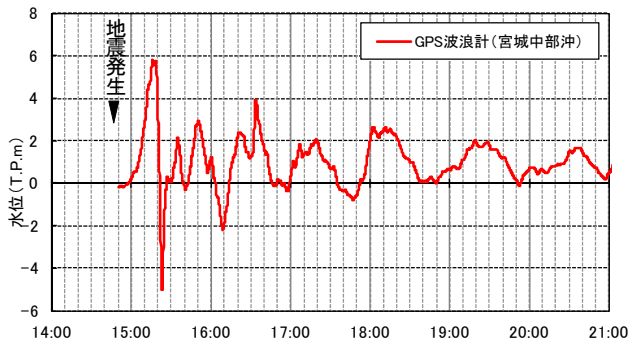


図-6 GPS波浪計 (宮城中部沖) による津波波形¹²⁾

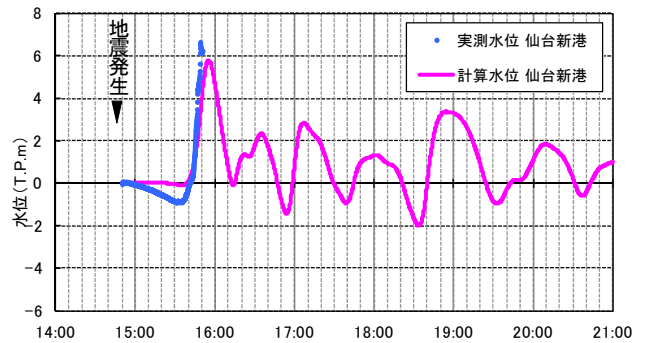


図-7 仙台新港における津波波形の比較¹²⁾

Residual計算を行う。図-3(b)のように $Z_{dry} > H_{wet}$ の要素では、dryの計算点に仮想水位 H_{dry}' を与え $h_{dry}=0$, $u_{dry}=0$ としてResidual計算を行う。初期は $H_{dry}' = H_{wet}$ とし、Residual計算を行うとdry計算点で微小な水深変化 dh ・流速変化 du が生じる。この誤差を抑えるため、次の時間ステップでは H_{dry}' に dh を加え、再び $h_{dry}=0$, $u_{dry}=0$ として計算を行う。このように H_{dry}' を時間的に修正しながら計算を進める。

3. 津波遡上・氾濫解析

平面二次元CRD法を用いて北上川および石巻港周辺の津波遡上・氾濫解析を行い、適用性を検討する。

(1) 計算条件

計算領域および地形を図-4に示す。地震前の測量地盤高¹¹⁾をベースに、地震に伴う地盤沈下を考慮し、計算領域全体の地盤高を一律0.6m低くした。格子間隔は、本論文で着目する旧北上川と新北上川および石巻海岸付近で最も細かい50m間隔とし、河川および海岸から離れるにしたがって格子間隔を徐々に広くなるよう設定した。図

-5に石巻港・旧北上川河口付近の格子形状を示す。防波堤および河川堤防は地盤高として考慮した。

津波水位境界条件は、図-4中に■で示す地点に設置されたGPS波浪計(NOWPHAS宮城中部沖)¹²⁾により計測された津波波形の時系列データを計算領域の東端(図中のA-A'線上)に与えた。図-6に計測された津波波形を示す。津波の第一波は15:15分頃にピーク水位(約T.P.+6m)を記録している。南側と北側の海の端は、自由端開境界とし、平衡条件を与えた。計算領域全体の初期水位は地震発生直前の潮位を与えた。旧北上川の河川流の初期状態として流量 $200\text{m}^3/\text{s}$ を与えた。

(2) 計算結果と観測値の比較

a) 沿岸の津波波形・痕跡水位

図-4中に■で示す地点に設置された沿岸波浪計(NOWPHAS仙台新港)¹²⁾により、地震発生から約1時間後までの津波波形が計測された。図-7に仙台新港における津波波形の実測値と計算値の比較を示す。計算による津波の到達時刻および津波波高は概ね実測値と対応している。ただし、計算では津波の第一波到達前の引き波を表

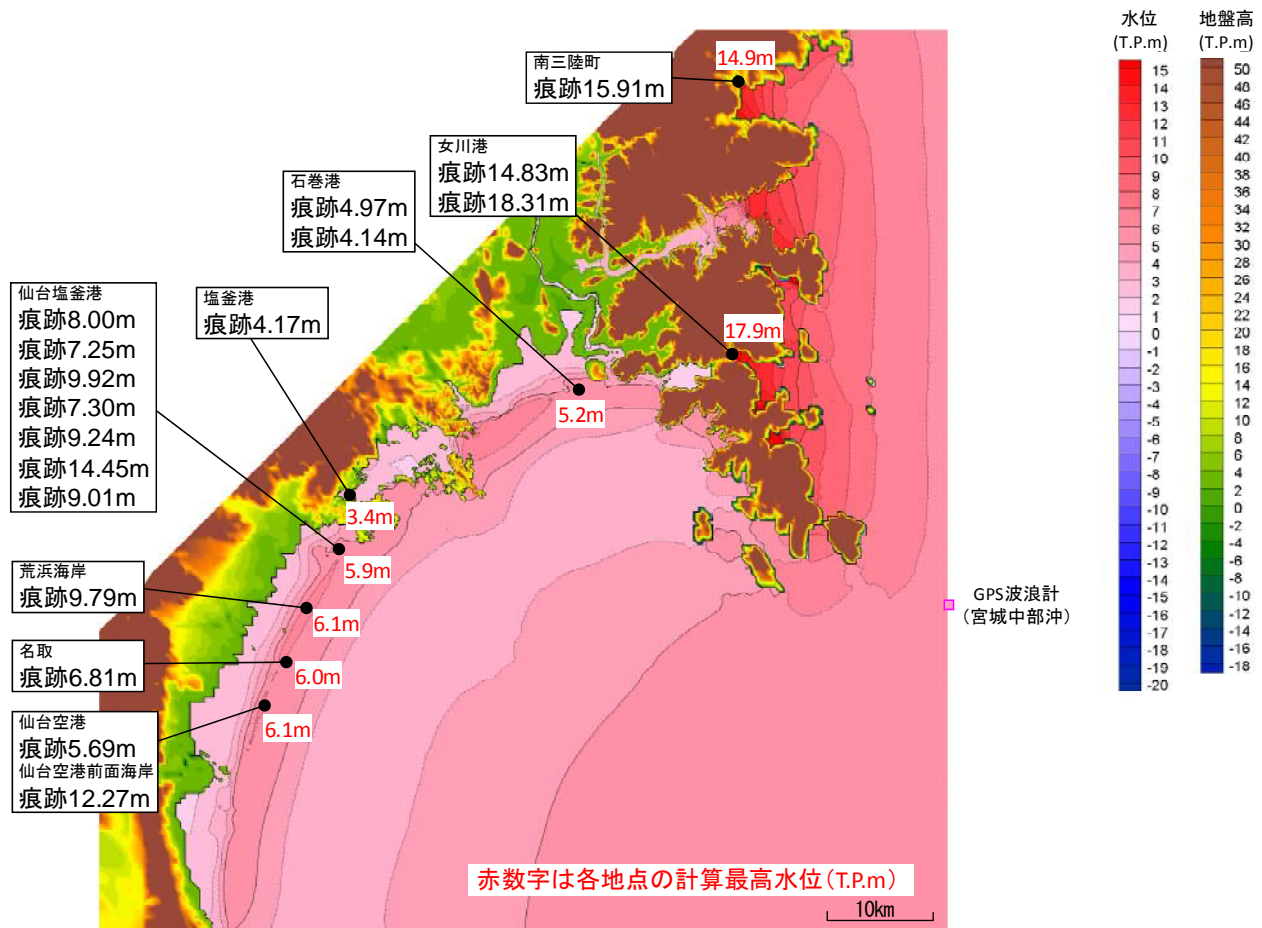


図-8 沿岸の津波痕跡水位¹³⁾と計算最高水位コンター

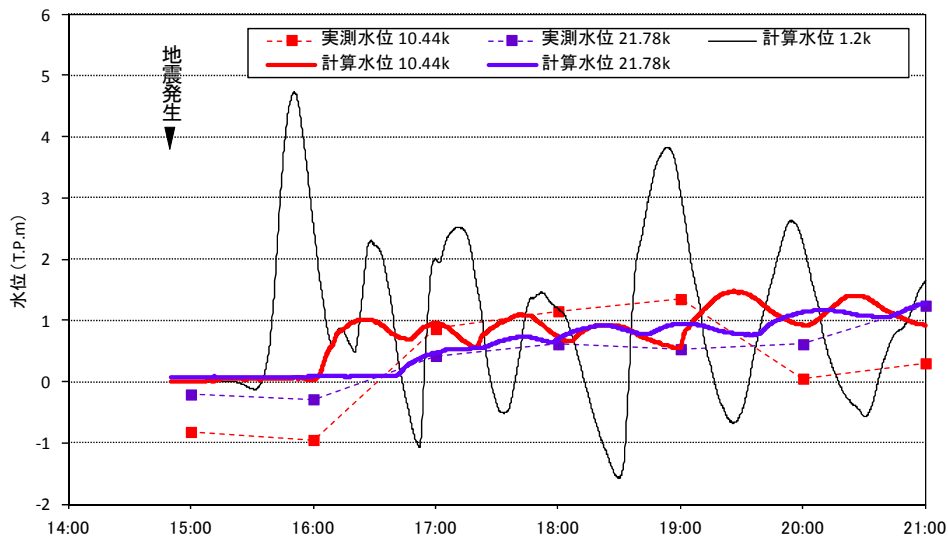


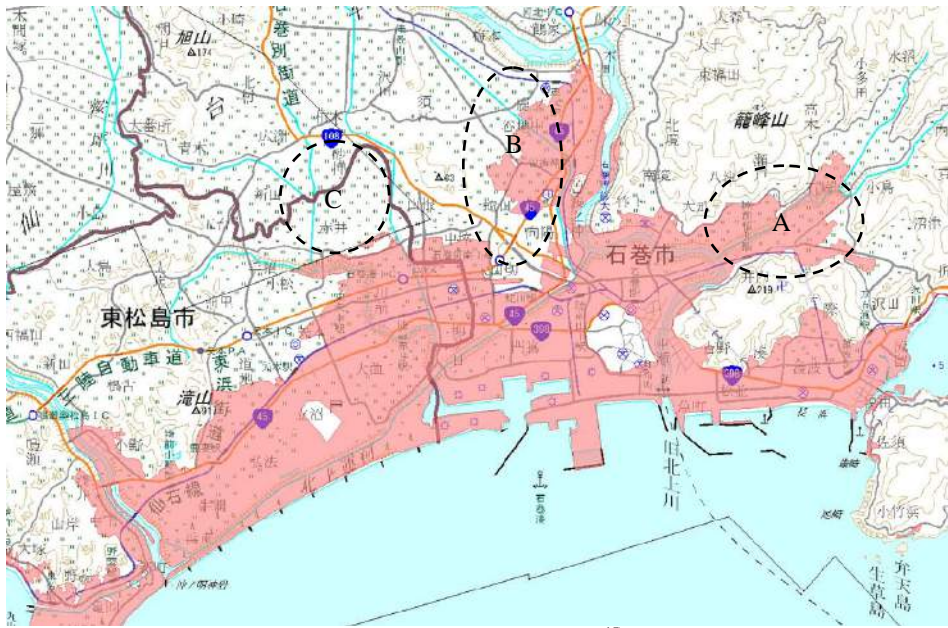
図-9 旧北上川の河川水位の実測値¹⁴⁾と計算値

現できていない。これは、計算領域全体に地震発生直前の潮位を初期水位として与えたためと考えられる。

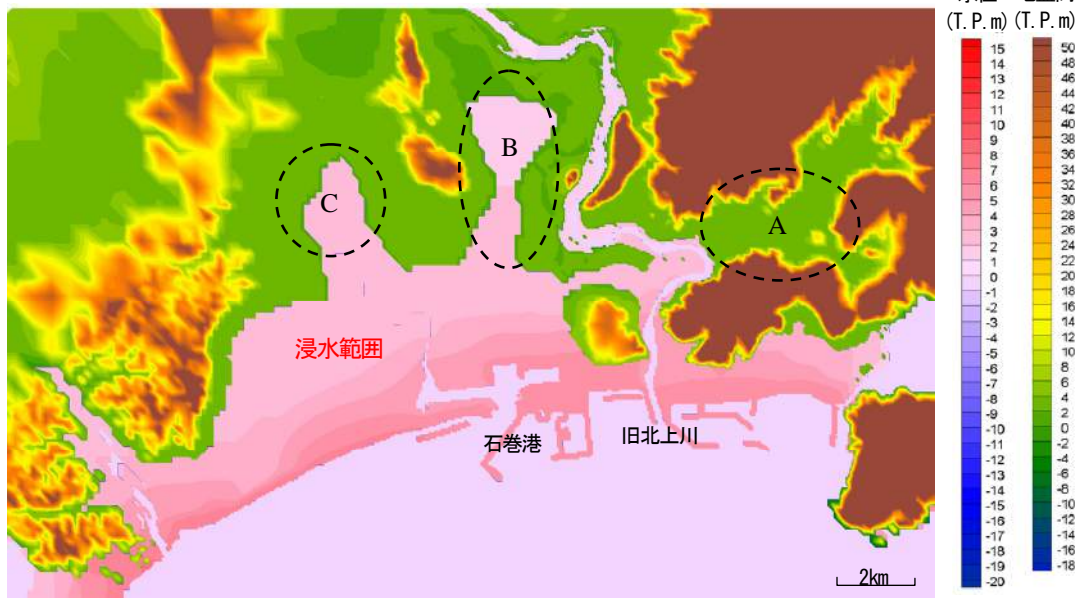
図-8には沿岸の津波痕跡水位¹³⁾と計算最高水位コンターを示す。図中にそれぞれの痕跡水位調査地点での計算最高水位を赤字で示す。図-8より計算最高水位はそれぞれの調査地の平均的な痕跡高と概ね対応している。ただし、計算では実測の津波痕跡水位と比べ場所的な変

化が小さい。計算の津波境界条件はGPS波浪計1地点(宮城中部沖)での実測津波波形を計算領域の東端に一樣に与えている。このため、詳細な津波波形の再現精度に課題があると考えられる。

計算結果は仙台新港の津波波形や石巻湾沿岸の痕跡高を全体的に捉えており、本計算では沖合から沿岸にかけての津波の伝播速度と最大波高を概ね再現できている。



(a) 浸水範囲の調査結果¹⁵⁾



(b) 浸水範囲の計算結果

図-10 石巻周辺の津波浸水範囲

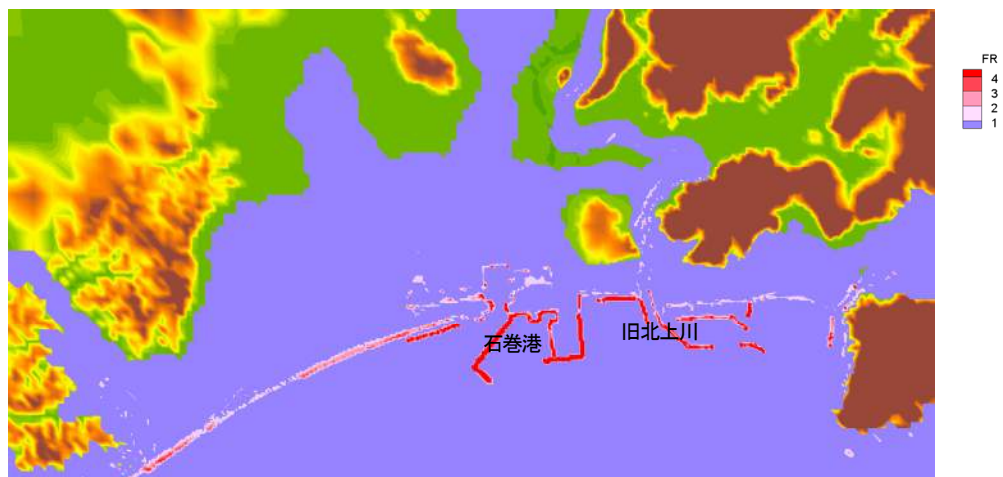


図-11 計算によるFr数の平面分布 (計算期間中の最高値)

b) 河川水位

図-9には旧北上川の河口から10.44k地点および21.78k地点に設置された水位観測所における水位の実測値¹⁴⁾と計算値を示す。実測値は1時間間隔である。地震発生から約1時間後の16:00時点では10.44k、21.78k地点に津波が到達していない点や津波到達後の河川水位に関して、2地点とも計算水位は実測水位を概ね捉えている。

計算において津波第一波のピークは、15:50頃に河口から1.2k地点に到達し、30分後の16:20頃に10.44k地点に到達している。これより計算における津波の河川遡上速度は1.2k~10.44k区間で約5.1m/sである。この区間の平均水深は約5mであり、長波の波速 $c = \sqrt{gh}$ は約7.0m/sである。河川流の流速は0.1~0.3m/s程度である。計算において津波は長波の波速程度で遡上している。

c) 津波浸水範囲

図-10には石巻周辺における津波の浸水範囲についての調査結果¹⁵⁾と計算結果の比較を示す。計算結果は全体として調査結果の浸水範囲を捉えているが、図中にA,B,Cで示す領域で差異がみられる。Aの領域は調査結果で浸水しているが、計算では浸水していない。この原因として、計算ではAの領域を流れる小支川を地形条件として考慮していないため、支川を遡上した津波による浸水を表現できていないことが考えられる。反対に、B,Cの領域は調査結果で浸水していないが、計算では浸水している。この原因として、計算では石巻市街地周辺の幹線道路の盛土等を地形条件として考慮していないこと等が考えられる。今後、小支川や道路盛土等の詳細な地形条件を反映することで、浸水範囲の再現精度の向上を図る。

図-11に計算によるFr数の平面分布(計算期間中の最大値)を示す。石巻港や旧北上川河口付近の防波堤を乗り越える際に射流が生じている。津波の氾濫解析においては、このような不連続部を含む流れを精度よく計算することが必要であり、CRD法の有効性が発揮される。

4. おわりに

本論文では、平面二次元CRD法を石巻港および旧北上川周辺の津波氾濫・河川遡上問題に適用した。その結果、実用的な精度で津波の伝播、河川遡上および氾濫を再現することができ、本計算法が津波解析問題において有効であることを示した。

以下に得られた主な結論を示す。

- 1) 沖合から沿岸にかけての津波の伝播に関して、計算結果は仙台新港の水位変化や石巻湾沿岸の津波痕跡高を全体的に捉えており、津波の伝播速度と最大波高を概ね再現できることを示した。
- 2) 津波の河川遡上に関して、計算結果は旧北上川の河口から10.44k地点および21.78k地点の実測水位を概ね捉えており、河川遡上速度と水位上昇量を概ね再現できることを示した。

- 3) 津波浸水範囲に関して、計算結果は全体として調査結果の浸水範囲を捉えている。ただし、小支川や道路盛土等の微地形を考慮していないために、いくつかの地点で浸水範囲の再現精度に課題がある。

津波の境界条件の与え方についても課題である。今後、解析領域を広げ、断層により変位した初期海面形状を与えることで計算精度の向上を図っていく。

なお、本論文で使用した津波に関するデータは全て公表されているものである。

参考文献

- 1) 平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き, 国土交通省, 2011.
- 2) 例えば崇田徳彦, 清水康行, 渡邊康玄: MacCormack法を用いた常・射流計算, 北海道開発局開発土木研究所月報, No.448, pp.23-32, 1990.
- 3) 清水康行, 藤田睦博, 平野道夫: 連続床止め工を有する複断面河道における流れと河床変動の計算, 水工学論文集, 第43巻, pp.683-688, 1999.
- 4) H.Paillere, and H.Deconinck.: Compact Cell Vertex Schemes on Unstructured Meshes. In "Euler and Navier-Stokes Solvers Using Multi-Dimensional Upwind Schemes and Multigrid Acceleration" Edited by Herman Deconinck and Barry Koren, Vieweg, 1997
- 5) 西本直史, 森明巨, 板倉忠興, 金澤克己: FDS法による1次元開水路流れの数値解析, 土木学会論文集, No.670/II-54, pp.25-36, 2001.
- 6) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 鬼東幸樹, 白川寛樹: 平面2次元数値モデルによる急流都市河川の流れ解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.631-636, 2004.
- 7) Arpad Csik., Mario Ricchiuto, and Herman Deconinck.: A Conservative Formulation of the Multidimensional Upwind Residual Distribution Schemes for General Nonlinear Conservation Laws, *Journal of Computational Physics*, Vol.179, pp.286-312, 2002.
- 8) 堀江克也, 岡村誠司, 小林雄介, 兵藤誠, 樋田祥久, 西本直史, 森明巨: CRD法を用いた常流・射流混在流れの数値解析, 水工学論文集, 第55巻, pp.1189-1194, 2011.
- 9) 堀江克也, 森明巨, 平井康幸, 西本直史: 急勾配河川におけるCRD法の適用性, 水工学論文集, 第56巻, pp.1231-1236, 2012.
- 10) Y. Watanabe, Y. Mitobe, A. Saruwatari, T. Yamada and Y. Niida: Evolution of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami on the Pacific Coast of Hokkaido, *Coastal Engineering Journal*, JSCE, Vol.54, No.1-1250002, pp.1-17, 2012.
- 11) 数値地図50mメッシュ(標高), 国土地理院.
- 12) NOWPHAS, 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網.
- 13) 港湾空港技術研究所資料「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」, 独立行政法人, 港湾航空技術研究所, 2011.
- 14) 水文水質データベース, 国土交通省.
- 15) 浸水範囲概況図, 国土地理院.