

#### 4. 高解像津波の遡上モデル開発（担当：渡部靖憲）

##### (1) はじめに

iRIC-ELIMO (Easy-performable Long-wave Inundation Model) は、2013年7月、津波の発生から伝達、海岸での発達をシミュレートする計算コードをiRIC上で実行し、不特定多数のユーザーが独自の想定津波に対して計算可能な津波計算ソフトウェアとしてリリースされている。ELIMOは高校の研究授業から地方自治体、研究機関に渡って幅広く多用途に利用されてきた。2014年5月、世界中の海底地形情報の入力に対応させたバージョンアップを行い、さらなるユーザーの拡大、利用の促進を行ってきた。さらに2015年5月、任意数の断層セグメントに対応した初期断層パラメータ入力機能を追加するとともに、津波遡上計算を導入するための技術開発を行い、想定津波計算を可能とするELIMO version 2を配布している。

現バージョンで海域の任意の津波伝播が再現可能となった一方、ELIMOの当初の目的の一つであった、津波遡上計算の実装には至っていない。これはELIMOにて推奨する地形データが全球座標最高30秒解像度であり、これはmオーダーの局所解像度が要求される遡上計算に対して非常に粗いため、ELIMOによる直接計算が難しいことが原因である。PCレベルの計算を念頭に、津波の波源から遡上までを扱う一体解析は諦め、高解像度地形グリッド上で海域の水位時系列をインプットとする遡上ルーチンによるワンウェイ計算を行うハイブリッドモデルの開発が本研究の最終目的となる。

一方、Adaptive Mesh Refinement (以後AMRと略記) は、動的に計算グリッドの細分化あるいはグリッドの合体を行うことにより、計算すべき物理量の急変部にのみ対して高解像度で計算を行うと同時に計算効率を向上させる計算手法であり、特に高解像計算が必要となる圧縮性流体の衝撃波面や気液界面近傍の流れの再現等に応用され注目されてきた。この方法は、従来高解像計算に必要な部分的に細分化する様な格子形成が不要であり、ユーザーが設定した物理量に対する閾値に応じて必要な個所に対して必要な時にグリッドの細分化が行われるため、非常に効率的な計算を可能とする。

非線形長波方程式をベースとしたAMR津波シミュレータによる津波の陸域への浸水について、既にその信頼性と有効性を明らかにしている<sup>1)2)3)</sup> (図4.1参照)。本研究では、現在最高解像度の地形情報を提供するLaser profilerデータのELIMOの遡上計算への導入を前提に、AMR環境の下、堤防からの越流と浸水に関わるルーチンを追

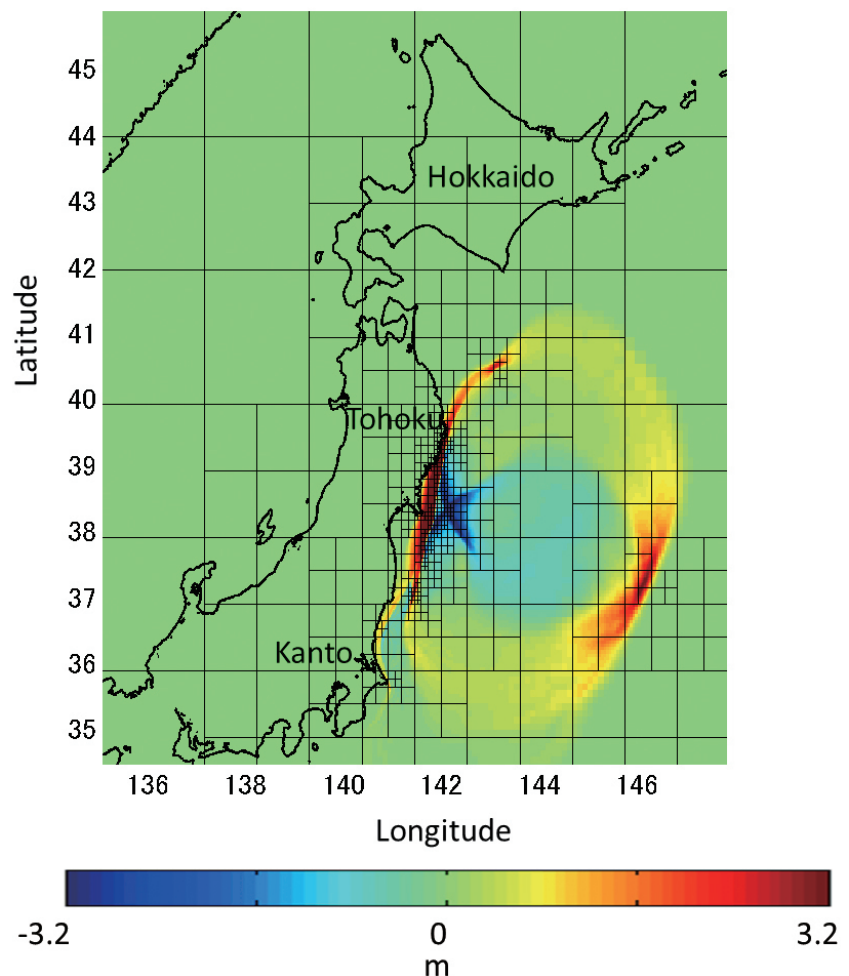


図4.1 2011東北太平洋沖地震津波のAMR津波計算例<sup>1)</sup>

加し、河川の遡上と氾濫に至る一連の津波イベントに関わる高解像度計算において生じる問題点の整理と必要な計算技術開発を目指すものである。

## (2) Adaptive Mesh Refinement

本研究では、流況に応じて計算グリッドの細分化、粗視化を動的に行うAMRの導入により、急変する流況に対して小グリッド、変動の少ない水域は粗いグリッドで効果的に津波計算並びに自由水面流れ計算を行う。以下に、AMRの基本的特徴と計算法について概説する。

AMRは、マルチスケールの流れに関する諸物理量を時間変化や空間変化に応じて計算ブロック及びグリッドの細分化を行う手法である。時間変化に応じて予め設定した閾値に応じて、動的に分割と結合を繰り返すグリッド系を形成できるため、高速高解像度計算が望まれている背景のもと、注目されているスキームの一つである。AMRでは、実際に差分計算を行う多数のグリッドから構成される計算ブロックによって計算領域がカバーされる。2次元計算を例にとると、最も大きいブロックは計算領域全体であり（ブロック分割レベル1）、レベルの増加に対してブロックが4分割されるクアドツリー構造をもつ（図4.2参照）。各ブロックに含まれる計算グリッド数は不変であり、含まれる計算グリッドもまた1/4のサイズとなり解像度が4倍となる。ブロック分割あるいは結合を決定するパラメータは水位、流速、あるいはそれらの勾配など任意の変数で与えることができ、その閾値に計算解像度、計算負荷及び効率が依存することになる。

AMR環境では、ブロック自体が相似なクアドツリー構造をもつことから、各レベルにおけるブロックの再分割は同一のサブルーチンを使って行うことができる。ブロック間の変数のやり取りは、代数方程式による内挿あるいは外挿によって行う。また、図4.3に示すように最大分割レベルおよび最小分割レベルを適宜設定することによって、諸物理量の時間や空間的に変化の大きい箇所のみ計算ブロックの細分化が可能となる。よって、最大、最小分割レベルを予め与えることで、取得すべ

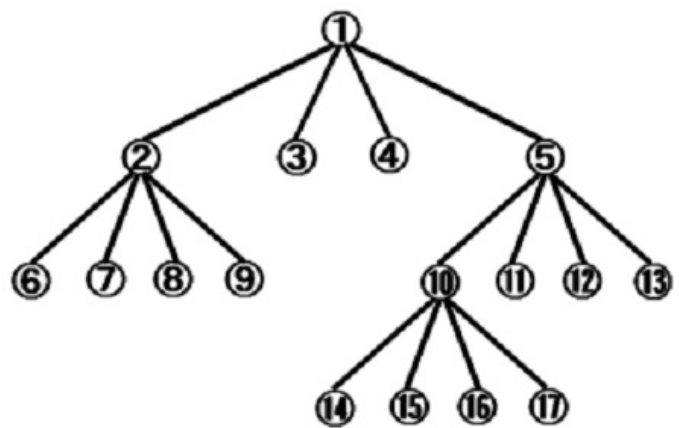
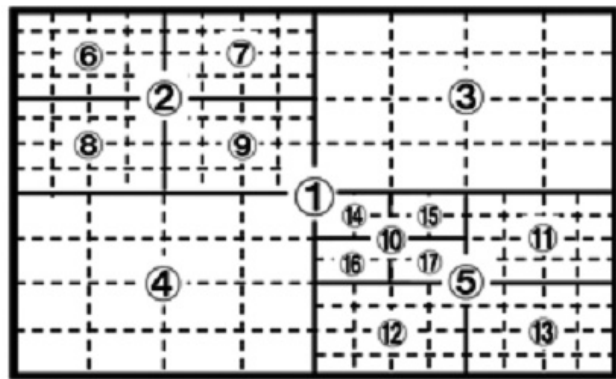


図4.2 AMR環境における計算ブロックとクアドツリーの関係

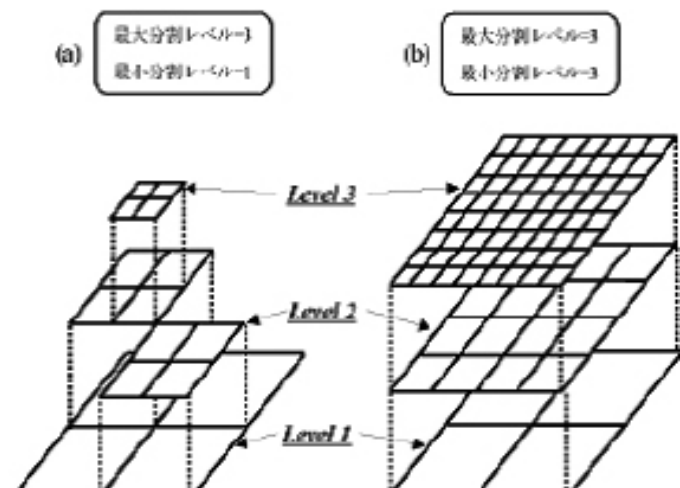


図4.3 AMR環境における計算ブロックと分割レベルの関係

き解像度及び計算コストに応じた計算を可能とする。

### (3) 遡上計算法

津波の伝播は次の長波方程式と連続式に支配される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u\nabla)u = -g\nabla\eta + v_h\nabla^2 u + \tau_b/h \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (u(h + \eta)) = 0 \quad (4.2)$$

ここで、流速 $u'$ を使って、平均流速 $u = \frac{1}{h+\eta} \int_{-h} u' dz$ と定義される。 $\eta$ は水位変動、 $h$ は水深、 $v_h$ は水平運動量拡散係数、 $\tau_b$ は底面摩擦である。全ての変数は重力加速度と代表水深で無次元化されている。多段階分離解法により、式(4.1)、(4.2)の移流項、圧力項、粘性項をそれぞれ分離すると、次のような離散式が得られる。

$$u^* = u^n - \Delta t g \nabla \eta^n \quad (4.3)$$

$$u^{n+1} = u^* + \Delta t v_h \nabla^2 u^* + \tau_b/h \quad (4.4)$$

$$\frac{Du^{n+1}}{Dt} = 0 \quad (4.5)$$

$$\eta^{n+1} = \eta^n - \Delta t \nabla \cdot (u^* h) \quad (4.6)$$

$$\frac{D\eta^{n+1}}{Dt} = 0 \quad (4.7)$$

式(4.3)と(4.6)に対しては予測子修正子法、式(4.5)と(4.7)の移流計算についてはCIP法を適用した<sup>1)</sup>。AMRにおいて、この計算は細分化される計算ブロック内を等間隔で分割するグリッド上で行われる。なお、本計算では、1ブロックあたり $10 \times 10 = 100$ 個の計算グリッドを配置し計算を行った。

国土交通省から提供された北上川河口部を含む中下流域2mグリッド地形データを使用した(図4.4)。河道内において河川流れの流速は無視し、河口部計算領域右端においてy方向に一様に、最大津波を想定した水位変化(図4.4)を与える。この流入境界以外の計算領域外縁においては開放境界条件を与えた。最大分割レベル9とし、最大解像度は約1.2mとした。即ち、2m地形グリッドから構成されるLPデータを完全に解像するレベルで計算を行った。

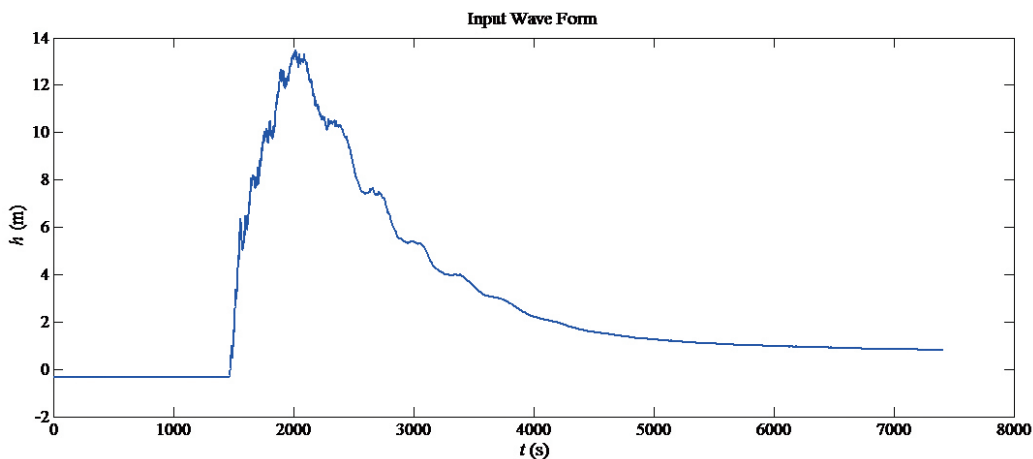
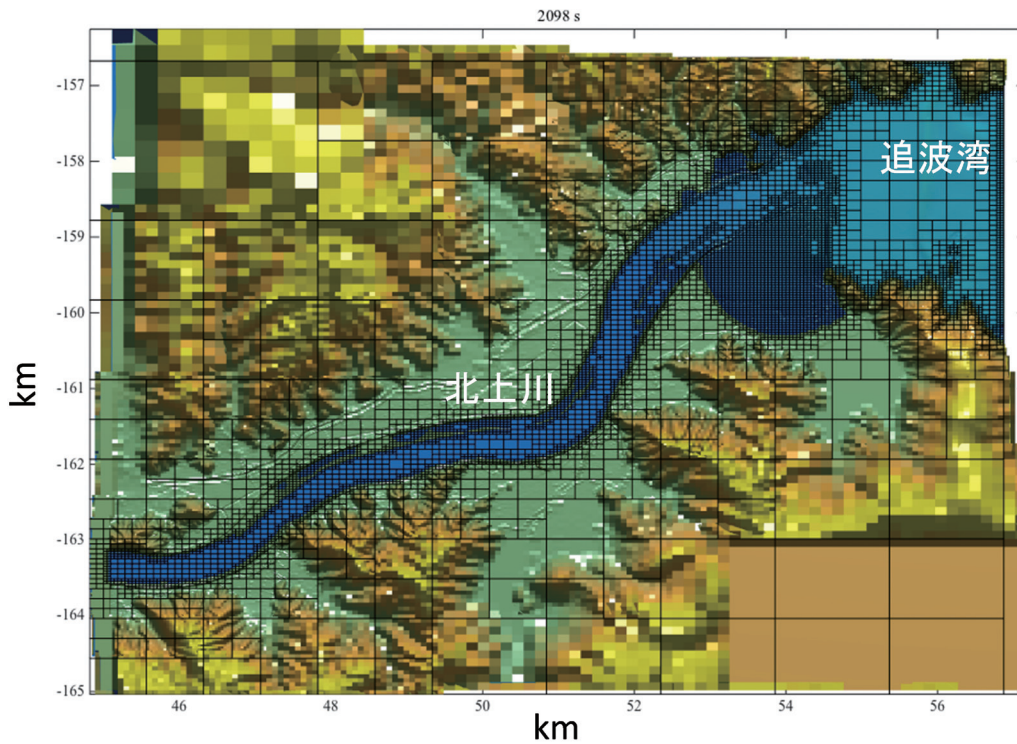


図4.4 北上川中下流域を対象とした計算領域と浸水を解像する計算ブロック（上）と  
今次津波の第1波と同等な入力水位時系列（下）

遡上・氾濫計算では、浸水域の進行を決定する水際部の解像度並びに計算精度が重要となる。AMR環境によってこの領域を最高解像度で計算するため、流体域を示すカラーファンクションの移流計算を導入し、水際部で最大値を示すカラーファンクションの勾配を閾値とする新たな分割レベル決定法を提案した。この方法では、初期河川水の氾濫を記述するため、時刻0において計算領域内に存在する流体領域にカラーファンクション $C=1.0$ を与え、以下の $C$ の移流計算により浸水域を決定する。

$$\frac{DC}{Dt} = 0 \quad (4.8)$$

上式は、式(4.5)、(4.6)と同様にCIP法によって3次精度で解かれる。計算ブロックは、陸域への浸水域近傍（ $\nabla C$ がある閾値を超えると）で細分化され、それ以外では結合されるように設定した。

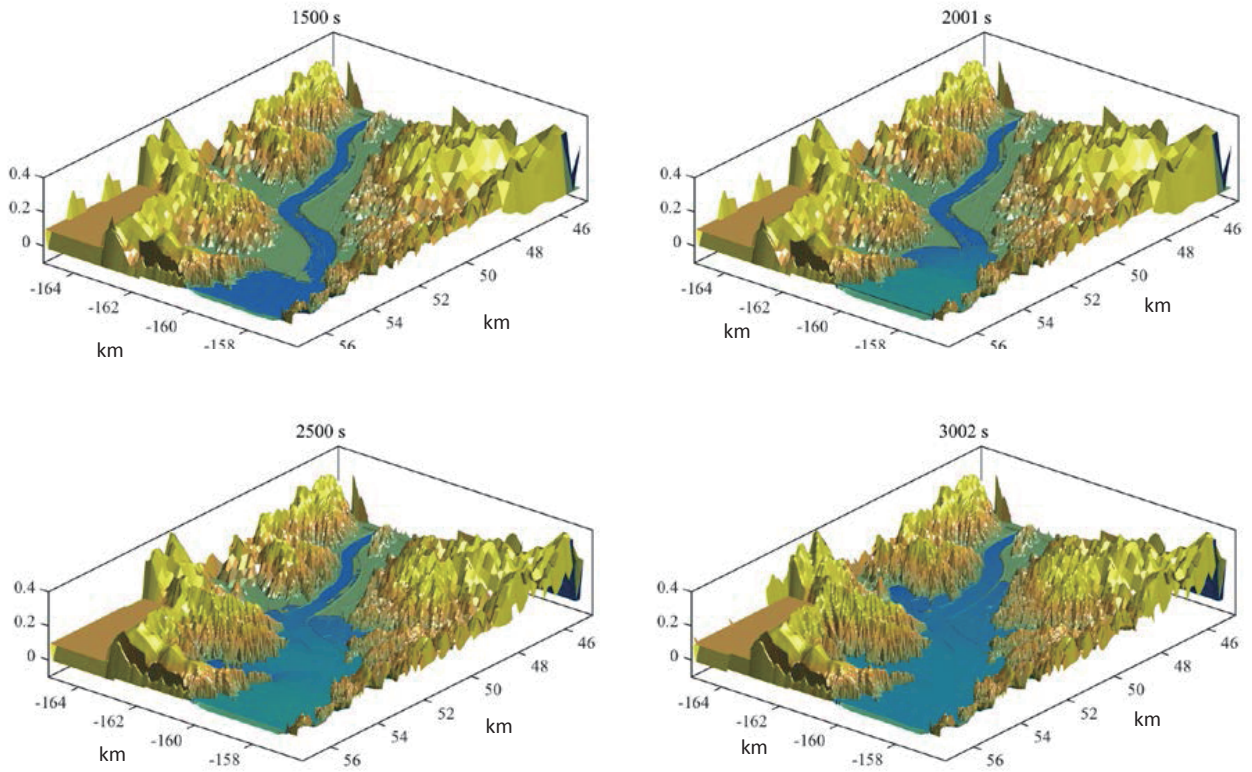


図4.5 追波湾からの津波の来襲と氾濫を伴う河川遡上過程（500秒間隔）

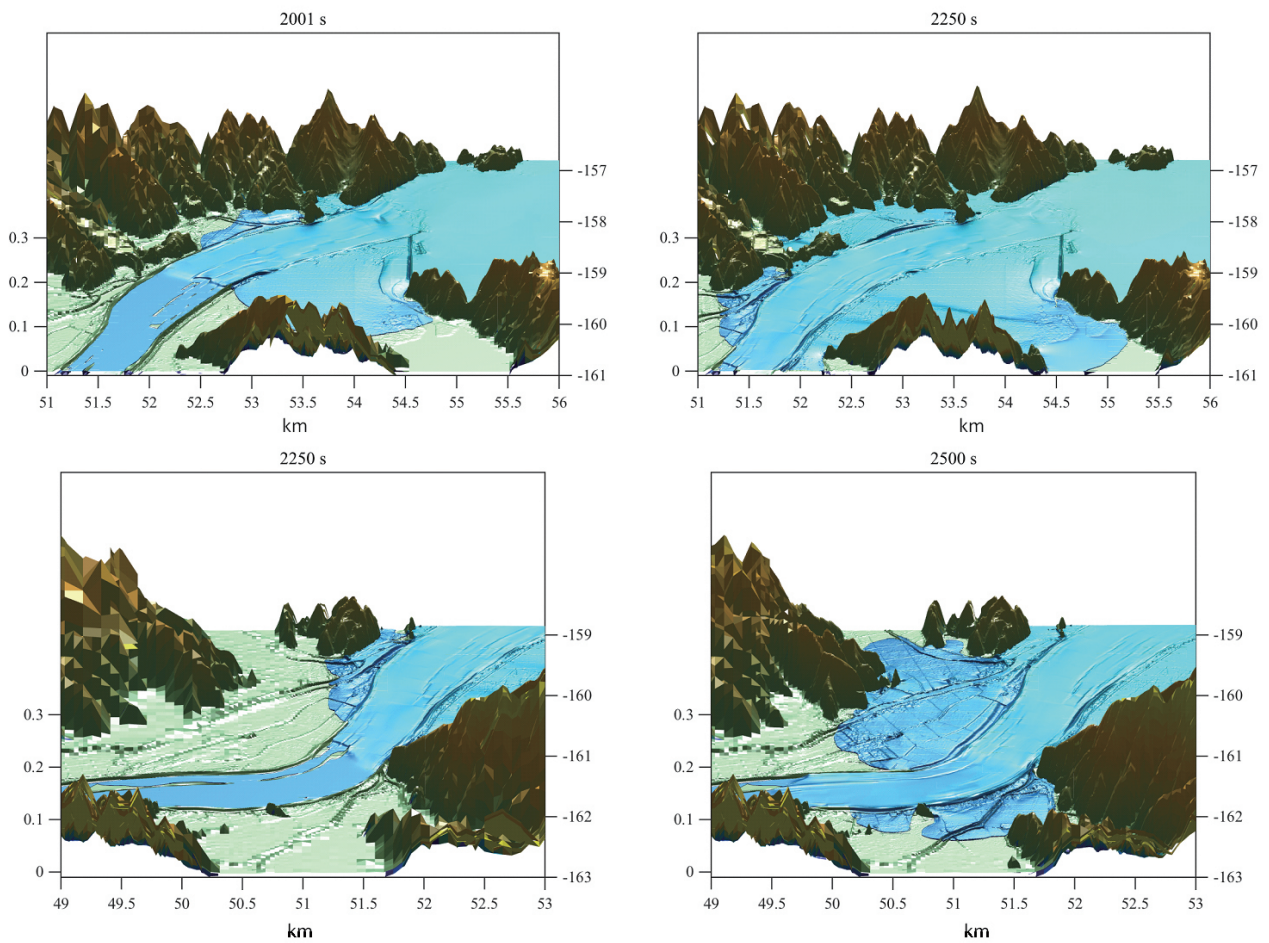


図4.6 北上川河口部の浸水（上）と河口から4km（大川小学校周辺）での浸水過程の詳細（下）

#### (4) 数値解析結果と考察

図4.5は、追波湾に入射した津波が防潮堤を越流し、浸水域を拡大すると共に、堤防を越流しながら北上川を遡上する再現計算結果を表している。浸水域は日本地理学会が公開する津波浸水マップと矛盾がないことを確認している。

図4.6は、北上川河口部及び河口から4kmほどの地域における津波浸水の詳細を表したものである。河川を遡上する段波状のフロント部、堤防からの越流だけでなく、河口砂州上の跳水や、道路や用水路を伝って広域に広がる局所的な浸水過程の詳細を理解することができる。特に、遡上波先端付近では常にグリッド間隔約1mの最高解像度で局所的な地形を解像し、形状抵抗を反映した局所流況の再現により、堤防決壊の位置や浸水時間情報等取得可能となるものと考えられる。今後、津波浸水の重要な特徴である地盤の浸食堆積を見積もるために、移動床計算と連動したモデルの開発を進める予定である。

#### おわりに

高解像津波遡上モデルのELIMOへの導入を目的とし、AMR環境の下、CIP法、密度関数法を導入し、従来とは全く異なる新たな遡上計算法を提案した。このモデルにより、局所形状に応じた堤防からの越流、陸域の局所地形に依存して進行する浸水、河川の遡上過程を詳細に見積もることができる。今後、津波浸水の重要な特徴である地盤の浸食堆積を再現する移動床計算と連動したモデルの開発を進める。

#### 参考文献

- 1) Watanabe Y., Mitobe Y., Saruwatari A., Yamada T., Niida Y., Evolution of the 2011 Tohoku Earthquake tsunami on the Pacific Coast of Hokkaido, *Coast Eng J* 54(1) 1250002.1-1250002.17 (2012)
- 2) Watanabe Y., Mitobe Y., Niida Y., Yamada T., Application of adaptive mesh refinement to tsunami computation, *Proc. Int. Offshore Polar Eng. Conf.*, CDROM (2011)
- 3) 渡部靖憲, 小玉努, Adaptive mesh refinementによる高解像津波シミュレーション, 海洋開発論文集, 25, 849 – 854 (2009)