

# iRIC環境下での津波シミュレーションソフトウェアの開発

Tsunami simulation software on iRIC environment

渡部 靖憲<sup>1</sup>

Yasunori WATANABE

<sup>1</sup>北海道大学大学院 工学研究院 准教授

## 要 旨

東日本大震災を受け、海域、河川そして地域一体の津波防災が検討され、今後北海道においても予期される大津波に備えた地域社会の再構成が必要である。特に河川工学においては、津波の河川遡上とそれに伴う避難体制の確保そして堤防設計の再検討が急務であり、地域的に大きく変動する津波外力の想定を適切に行う必要がある。

本研究は、研究者、技術者そして地域防災関係者に至る不特定多数のユーザーを対象に任意の想定津波に対する陸域の応答を予測する津波伝播モデルをGUIベースにプレ、ポスト処理可能なiRIC環境へ導入し、容易に津波予測可能なモデルiRIC-ELIMOを開発しようとするものである。本稿において、このiRIC-ELIMOの基本設計並びにその基本的機能を紹介する。

《キーワード：津波；iRIC；防災》

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋地震津波に対する一連の報道が示す通り、津波の遡上により甚大な人的、物的被害が発生した。津波の遡上は、初期津波の規模だけではなく陸域の局所的な地形に強く依存する。また一般的にいわれているように最大の水位となるのは第1波ではなく連続して発生する第2波、3波など後続の波であり、陸域への浸水、河川への遡上を予め予測するためには、一連の津波イベントを適切に計算する必要がある。

現在、東日本大震災を受け、各地で津波に対する防災計画が検討されている。河川への津波の遡上に関わる対策は最重要項目の一つである一方、これまで波浪に対する技術的経験の少ない河川技術者、研究者、管理者にとって、遡上波の外力条件を設定することが困難となるケースが生じ、混乱が生じている。一刻も早い津波防災対策の設定を完了し、震災の教訓を生かすべく予期されている津波に備えることが急務である。

著者ら<sup>1),2)</sup>は、動的適合格子により、高解像津波計算を行い2003十勝沖地震津波並びに2011東北地方太平洋沖地震津波の北海道太平洋岸において津波の発達の特徴を明らかにしている。しかしながら、この様な大規模計算を要する津波シミュレーションの実行は大型計算機を使用できる特定の機関に限定され、一般の技術者が使用するための敷居は高く、広く浸透しているとは言えない。

河川流れ、氾濫計算プラットフォームであるiRICは、多様な地形情報の計算格子化、オプションの設定を行うプレ処理、そして計算結果の可視化、グラフ化を行うポスト処理をGUI環境下で統一して行うものであり、幅広いユーザーが利用している。本研究は、海底変位情報をインプットとし、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iRIC-ELIMO (Easy-performable Long-wave Inundation Model)を開発しようとするものである (図-1参照)。

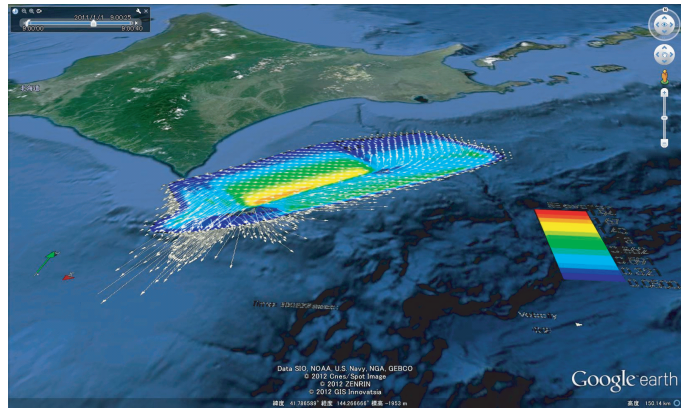


図-1 iRIC-ELIMOで計算された2003十勝沖地震津波発生後の水位、流速分布をiRICで可視化した例

## 2. 計算方法

任意の場所を対象とした津波計算を行うため、通常対規模海洋流れを扱う場合に主流であり、比較的地形データを入手しやすい緯度経度球面座標系に対する計算アルゴリズムを採用する。

### (1) 基礎方程式

支配方程式となる球面座標上の水深積分型運動方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \phi} = -\frac{1}{\rho R \cos \phi} \frac{\partial P_a}{\partial \lambda} - \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + \frac{\tau_\lambda^s - \tau_\lambda^b}{\rho(h + \zeta)} \dots \dots \dots (1)$$

$$+ v_h \left( \frac{1}{R^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 u}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{R^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \cos \phi \frac{\partial u}{\partial \phi} \right) \right) + \left( 2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi} \right) v \sin \phi$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial v}{\partial \phi} = -\frac{1}{\rho R} \frac{\partial P_a}{\partial \phi} - \frac{1}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} + \frac{\tau_\phi^s - \tau_\phi^b}{\rho(h + \zeta)} + v_h \left( \frac{1}{R^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 v}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{R^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \cos \phi \frac{\partial v}{\partial \phi} \right) \right) + \left( 2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi} \right) u \sin \phi \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、水深平均流速は  $u = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} u' dz$ ,  $v = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} v' dz$  で定義され、 $u', v'$  は局所流速、 $R$  は地球の中心からの距離、 $\Omega$  は地球の自転角速度、 $\lambda$  は経度、 $\phi$  は緯度、 $P_a$  は大気圧、 $\zeta$  は水位変動、 $v_h$  は水平運動量交換係数である。また、質量保存則からなる水深積分連続式は、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} u(h + \lambda) + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} v \cos \phi (h + \lambda) = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$h \gg \zeta$  とし、(1)～(3)式を線形化すると、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + \frac{-\tau_\lambda^b}{\rho h} + v_h \left( \frac{1}{R^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 u}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{R^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \cos \phi \frac{\partial u}{\partial \phi} \right) \right) + \left( 2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi} \right) v \sin \phi \quad \dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} + \frac{-\tau_\phi^b}{\rho h} + v_h \left( \frac{1}{R^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 v}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{R^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \cos \phi \frac{\partial v}{\partial \phi} \right) \right) + \left( 2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi} \right) u \sin \phi \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{R \cos \phi} \left\{ u \frac{\partial h}{\partial \lambda} + h \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right\} + \frac{1}{R} \left\{ \tan \phi v h - v \frac{\partial h}{\partial \phi} - h \frac{\partial v}{\partial \phi} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、大気圧は空間的に不変と仮定し、水面のせん断力は無視している。(4)、(5)、(6)式を離散化し予測子修正子法によって2次精度線形津波計算を行う。

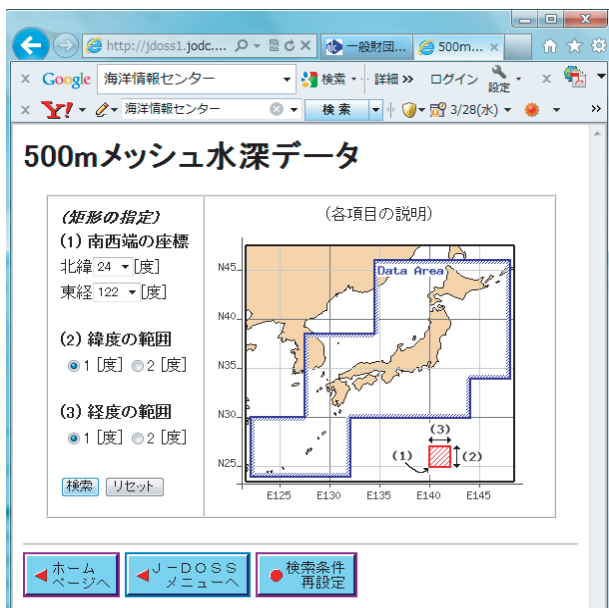


図-2 基本地形として採用する日本海洋データセンター提供の水深データ指定サイト ([http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/depth500\\_file.jp](http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/depth500_file.jp))

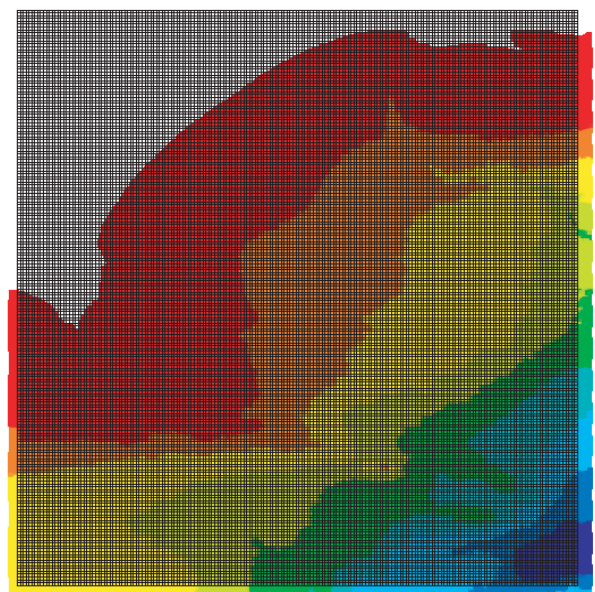


図-3 水深データをiRIC用の標高データに変換し、格子生成をする。iRIC上の可視化の例。

## (2) 地形情報

津波の計算には水位変動を解像する緯度経度水深データの入力が必要となる。解像度が高く広域の海洋をカバーするデジタル水深データは別途購入する必要があるが、ここでは、不特定多数のユーザーが手軽に簡単な計算を行うための目的を重視し、日本海洋データセンター ([http://www.jodc.go.jp/index\\_j.html](http://www.jodc.go.jp/index_j.html)) が無償で提供し、ダウンロード可能な「500mメッシュ水深データ」を基本海底地形として与えた計算システムを構築する。これは緯度経度それぞれ2°までの領域について我が国近海の任意の海域を指定し、ダウンロード可能となる (図-2参照)。

取得した水深データは、iRIC上で可視化、座標化を行うために海底面の標高値に変換が必要になる。変換された標高データはiRIC上で「矩形領域の格子を作成」によりグリッド化される (図-3参照)。なお津波計算においては、これら標高データは再度水深データに変換され、支配方程式を解く設計とした。

## (3) 海底断層パラメータ

図-4は、2011東北地方太平洋沖地震で発生し津波を引き起こした海底地盤の鉛直変位を表している。海底地盤の変位は図-4が示す様に場所によって分布をもつので、局所的な変位を反映させ津波計算を行う例もあるが、ELIMOでは長方形の領域をもつ断層が一樣にすべり面上を滑り変位する矩形断層モデルによって引き起こされる津波を対象として計算を行う (図-5参照)。これは計算条件の設定において、変位する矩形領域の長さ (Rupture length) と幅 (Rupture width), 滑り距離 (Slip length), 走向角 (Strike angle) と傾斜角 (Dip angle) 及び矩形断層中央の緯度 (Latitude of the epicenter) と経度 (Longitude of the epicenter) を断層パラメータとして指定することで任意の想定津波を決定できる (図-6参照)。なおELIMOでは、断層モデルによる海底の鉛直変位を初期水面として与え津波計算を進める。

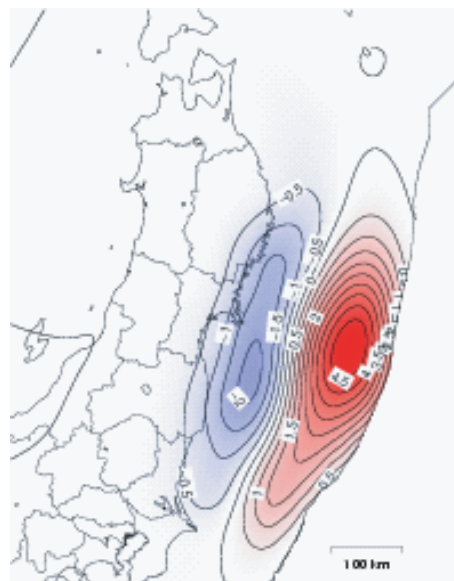


図-4 2011東北地方太平洋沖地震による鉛直方向海底変位分布 (国土地理院HPより)

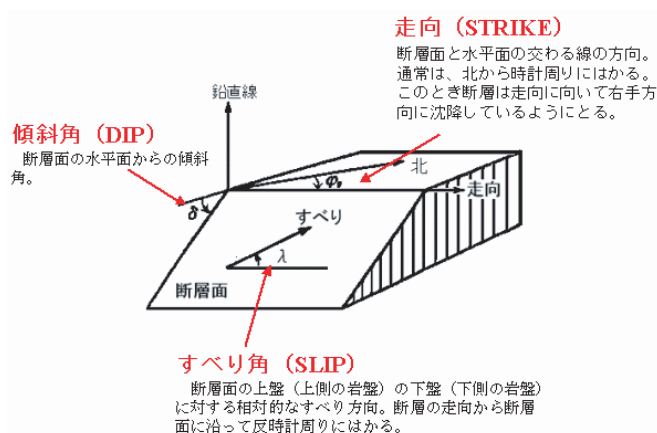


図-5 断層パラメータ (気象庁HPより)



図-6 iRIC上での断層パラメータ入力ウィンドウ



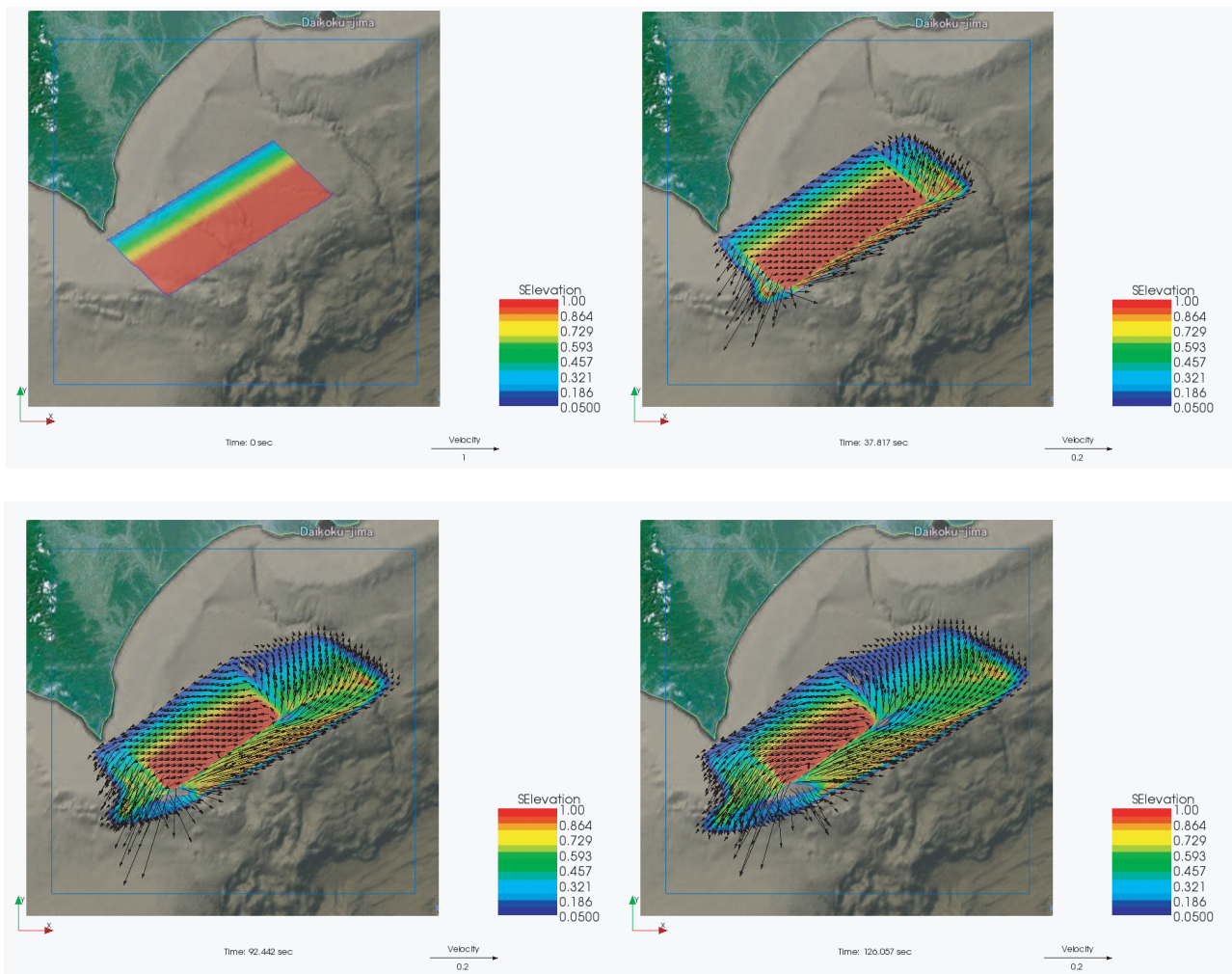


図-7 2003十勝沖地震津波を想定した断層モデルにより津波が発生し、伝播する様子  
色は水位変動を表し、ベクトルは平均流速を表す。

#### (4) 境界条件

標高が海拔0となる汀線において、不透過境界条件が与えられる。海域境界の近傍では、津波のエネルギーを減衰させるため境界に近づくにつれて線形増加する底面抵抗係数並びに水平運動量交換係数を与える所謂スポンジレイヤーを導入した。海域境界では、法線方向の流速勾配が0となる開放条件を与えた。

### 3. 計算例

2003十勝沖地震津波は、2003年9月26日、M8.0のプレート境界間地震による逆断層海底変位に伴って発生した。断層距離は約90km、滑り距離は5mで、北海道沿岸では1~3mの津波高が観測されている。

図-7は、2003十勝沖地震津波発生直後の水位分布、流速分布の時間変化をiRIC-ELIMOによって計算し、可視化した一例である。矩形断層モデルに規定される海底変位によって隆起した海水面の水位差から津波が伝達する様子をiRICのもつ可視化機能のサポートにより明確に観察することができる。

現モデルでは、断層パラメータの設定を図-6の様に数値の入力で行わなければならない点、専門的知識がなければ分かりにくく直観的な操作ができない点、また今回設定した様な緯度経度2度程度の海域では、スポンジレイヤーを十分に広く設定できないため、海域境界から有意な反射が生じる点など、iRICへの導入後新たに浮上した改善すべき点はあるものの、地球座標津波計算法をプレ、ポスト処理を含めてiRICに適合した形態で設計し、導入する本年度の研究目的はすべて達成することができた。

#### 4. おわりに

想定地震に対する津波の発生，伝播，発達までを不特定多数のユーザーが簡単に計算可能な津波予測モデルの開発に向けて，基礎モデルのiRIC環境への導入に成功した．

地球座標系水深積分型線形波動モデルと矛盾なく与えられる緯度経度による矩形断層モデルをベースとした初期条件の設定及びユーザーが手軽に取得できる無償地形データに対応可能な様に総合的な津波シミュレーターの機能を設計した．これにより，津波計算のプレ及びポスト処理を一貫してiRIC環境で行うことが可能なiRIC-ELIMOの基本動作を確認した．

最終目標である任意海域に対して任意想定津波を専門知識がないユーザーが使用できるレベルまでの計算性能を確保するためには，iRIC導入後に浮上したダウンロード可能な地形データに関わる問題及び断層モデルの設定法に関わる問題について新たな検討が必要である．

#### 参考文献

- 1) Watanabe Y., Mitobe Y., Niida Y. and Yamada T.: Application of Adaptive Mesh Refinement to Tsunami Computation, *Proc. 21st Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, CD-ROM, 2011.
- 2) Watanabe Y., Mitobe Y., Saruwatari A., Yamada T. and Niida Y.: Evolution of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami on the Pacific Coast of Hokkaido, *Coastal Engineering Journal*, Vol.54, No. 1, DOI: 10.1142/S0578563412500027, 2012.