

2. iRIC-ELIMOの開発（担当：渡部靖憲）

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。

これまでELIMOでは、津波の初期水位を1枚あるいは2枚の矩形断層パラメータのみで与えられてきたのに対して、近年中央防災会議等で公開されている将来の発生が予測されている想定津波の断層モデルは一般に断層面上をカバーしそれぞれ独立したパラメータが与えられる複数のセグメントで記述されており、想定津波を直接ELIMOに反映させることはできなかった。また、現行バージョンでは、汀線における津波高の計算に限定され、遡上計算を行えないことも、ソフトウェアの用途を限定している。

本研究は、ELIMOによる想定津波計算を可能とすると同時に、遡上計算を追加し、利用用途を格段に広げ、さらなる防災教育の拡大を推進することを最終目的とするものであり、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う。

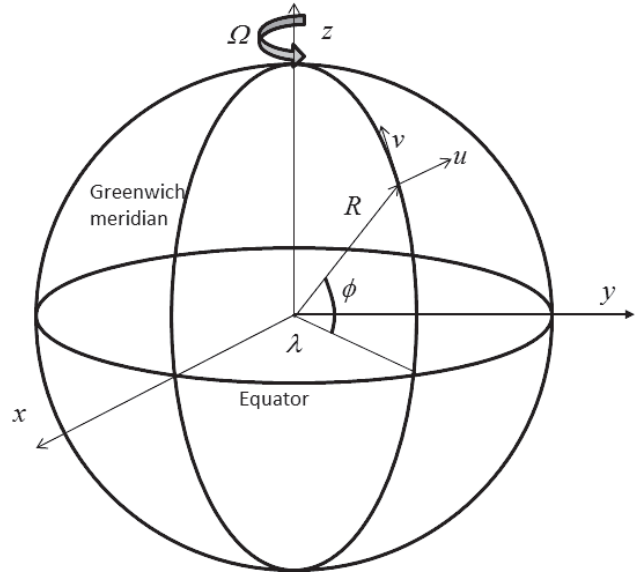


図1 全球座標系

(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（図1）。

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

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

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、 Ω は地球の自転角速度、 λ は経度、 ϕ は緯度、 P_a は大気圧、 ζ 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、

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

大気圧をゲージ圧 0 とし、水面のせん断力を見捨てる。後に説明するスポンジ層における減衰増幅率 A_d を導入し、整理すると、

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} = & -\frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - \frac{\tau_{\lambda}^{b*}}{\rho(h+\zeta)} + v_h^* \left(\frac{1}{R^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 u}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{R^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial u}{\partial \phi} \right) \right) \\ & + \left(2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi} \right) v \sin \phi \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{Dv}{Dt} = & -\frac{1}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \phi} - \frac{\tau_{\phi}^{b*}}{\rho(h+\zeta)} + v_h^* \left(\frac{1}{R^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 v}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{R^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial v}{\partial \phi} \right) \right) \\ & + \left(2\Omega + \frac{u}{R \cos \phi} \right) u \sin \phi \end{aligned} \quad (5)$$

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

ここで、

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} = 0,$$

修正底面せん断力 $\tau_{\lambda}^{b*} = C_b A_b |u|u$ 及び $\tau_{\phi}^{b*} = C_b A_b |v|v$ 、修正水平運動量交換係数 $v_h^* = \nu A_d$ 、 C_d は抗力係数である。

微分方程式システム(4)–(6)に対して、Watanabe et al.¹⁾と同様に高精度非線形差分計算を行う。二段階分離解法を適用し、移流項に対してはCIP法、水位勾配、拡散計算については予測子修正子法を適用した。

遡上計算は、Watanabe et al.¹⁾の方法を導入する。即ち、浸水域の内外の流速及び水位の勾配（それぞれ ∇u と $\nabla \zeta$ ）を一定とする近似のもと、浸水域内側の ∇u と $\nabla \zeta$ を外側グリッドに外挿し、式(4)～(6)の二段階分離解法によって得られる流速と水位変動に関する移流方

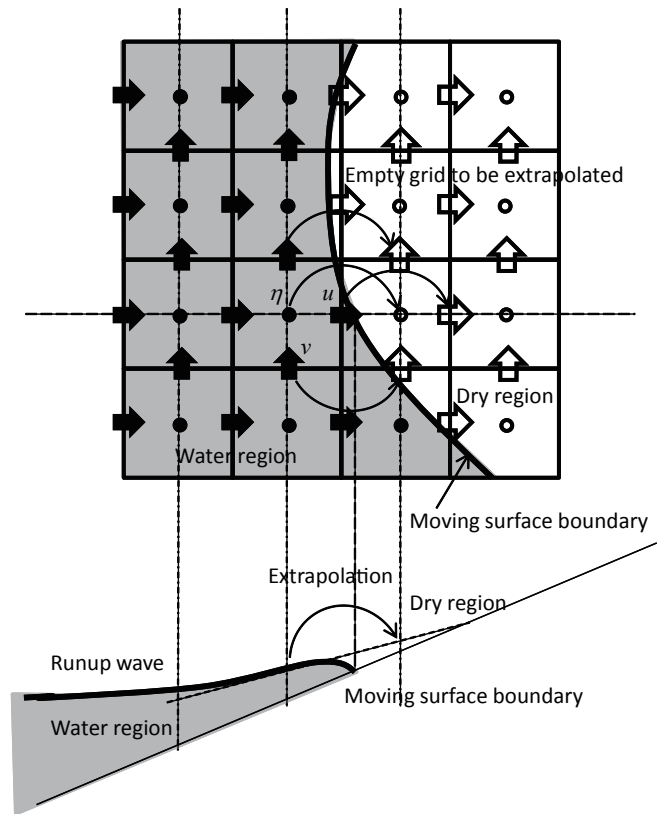


図2 遡上先端部での速度勾配の外挿

程式 ($\frac{Du}{Dt}=0$ と $\frac{D\zeta}{Dt}=0$) をCIP法によ
 って解いていくものである (図2)。一方,
 ELIMOは海域を中心とした津波の伝播を
 評価するために設計されたものであり, 解
 像度が必要な局所的な遡上を表現するこ
 とが可能であるか, 検討が必要である。上
 述の遡上計算方法をELIMOに導入するた
 めのテスト計算として, 2011年東北地方太
 平洋沖地震津波において広範囲の浸水を記録
 した北上川中下流の流れにモデルを使用し
 その適用可能性を調査した。

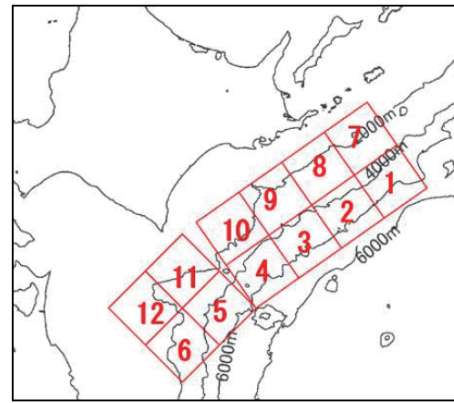


図3 太平洋岸に係る津波浸水予測図策定業務報告
 書²⁾による波源モデルのセグメント

(2) 多断層パラメータの導入

図3は, 北海道が公開している太平洋岸
 に係る津波浸水予測図策定業務報告書²⁾で
 北海道沿岸で想定しているLevel 2地震津
 波の想定波源断層モデルの領域を表したも
 のである。図中1~12のセグメントは, そ
 れぞれ異なる断層パラメータをもつIDを
 示す。なお, 断層パラメータは, 各セグ
 メントの緯度, 経度, 断層長さと同幅に加
 え, すべり量, 走向, 傾斜角, すべり角 (図
 4) が個々のセグメントに与えられる。こ
 の様に, 現在日本周辺で発生が予想され
 ている想定津波の殆どは, 多数のセグメン
 ト化された波源断層モデルが使用され, 現
 行ELIMOが使用可能な2枚のみの断層パ
 ラメータの入力のみでは, 直接的な評価は
 できない。本研究では, 現行の2種類のパ
 ラメータに対するマニュアル入力に加え,
 ファイルに一括パラメータ入力機能を追
 加し, ELIMOによる適用性を拡張すると
 共に, その有効性を調査した。

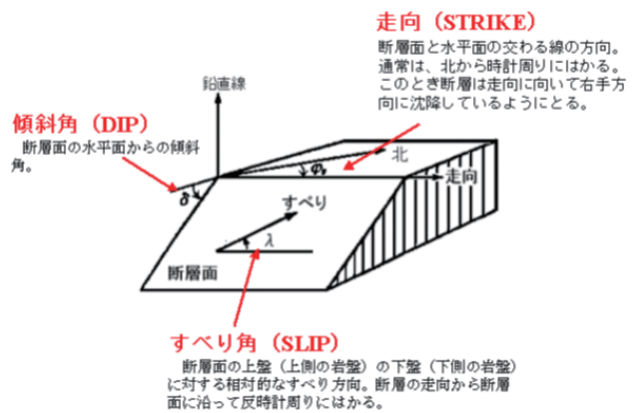


図4 断層パラメータ

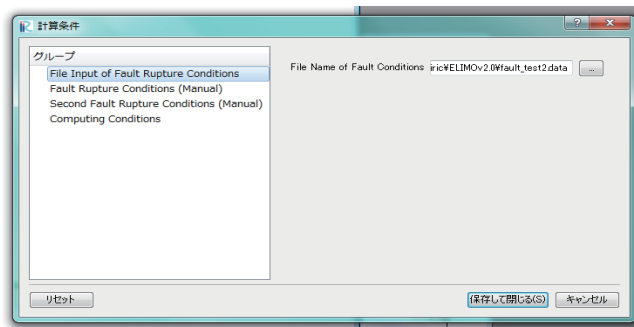


図5 断層パラメータ入力ウィンドウ

図5は, ELIMO上での計算条件入力ウ
 インドウを示す。任意の数のセグメント
 に対する上述のパラメータを記述したフ
 ァイル (図6) を現行のマニュアル入力
 に優先して読み込み, 津波の初期水位
 に反映することに成功した。

図7は, 北海道近海におけるLevel2
 想定地震津波の波源モデル²⁾ (図3) の
 12の断層

147.5584	42.4135	70.0	70.0	35.0	235	10	90
146.8476	42.0703	70.0	70.0	35.0	235	10	90
146.1445	41.7226	70.0	70.0	35.0	235	10	90
...
144.9746	41.8907	70.0	70.0	30.0	235	20	90
144.1716	41.4608	70.0	70.0	30.0	225	20	90

図6 断層パラメータファイルの一例

セグメントに対するパラメータを新たに作成したパラメータ入力機能によってELIMOに与え、計算した結果を示す。

同報告書で紹介されている津波伝搬のスナップショット（**図8**）は、その時間間隔、水位変動のレンジなど報告書中に記載がなく定量的な比較ができないが、ELIMOの計算結果は、初期の楕円型の津波の広がり、その後の北海道沿岸における水位の上昇、局所地形に応答した水位変動に起因したエッジ波の形成など、定性的に矛盾がないと言える。

本成果の導入により、想定津波対策の用途においても、ELIMOを利用したさらなる防災活動の広がりを期待する。

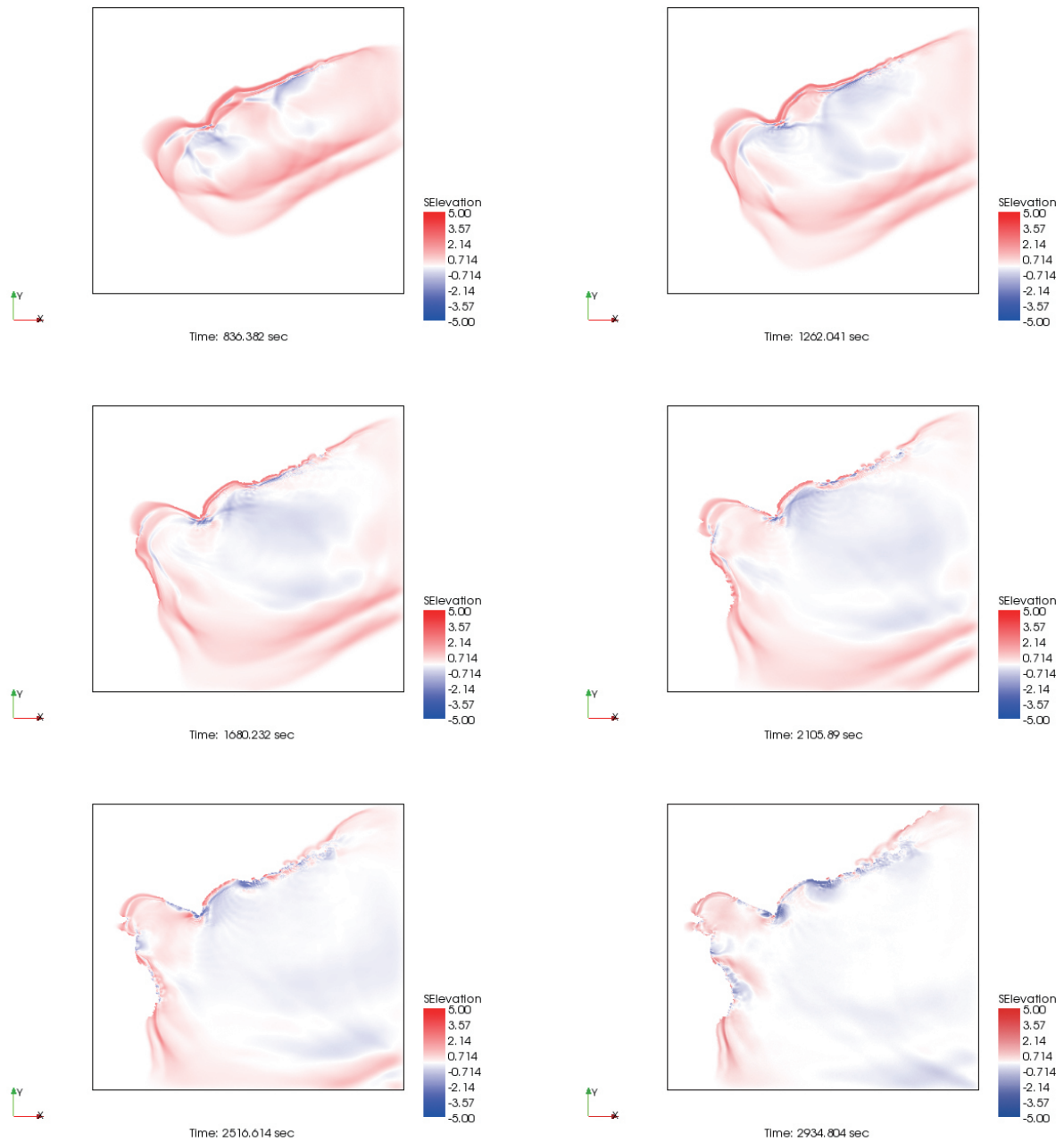


図7 北海道近海におけるLevel2想定地震津波の波源モデル²⁾によるELIMOの津波水位計算結果；津波発生14分後から7分間隔

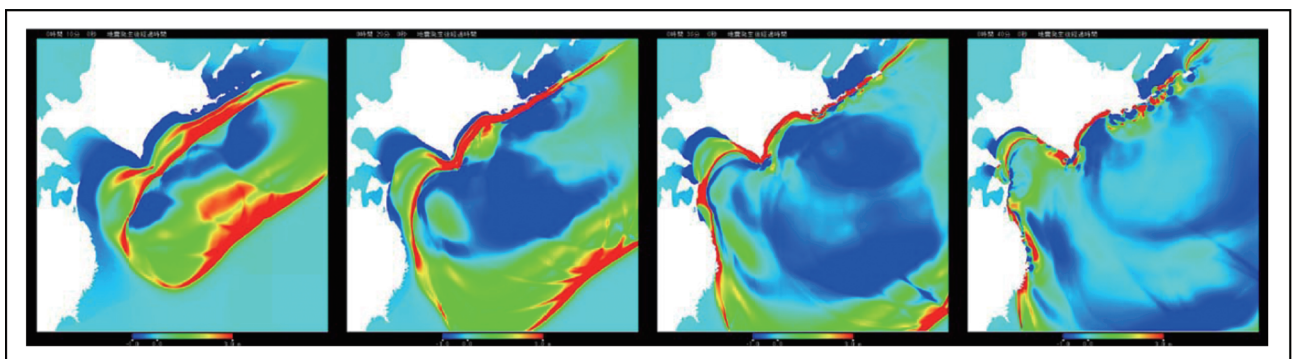


図8 太平洋岸に係る津波浸水予測図策定業務報告書²⁾に記載されている津波伝播のスナップショット

(3) 遡上計算導入の検討

津波の陸域への浸水、遡上を計算するためには、解像度の高い陸域の地形に対する適当な遡上モデルの導入が必要となる。一方、PCレベルの計算能力で津波伝播を計算するELIMOが推奨する解像度は全球座標で1分であり、これは日本が位置する中緯度では1kmを超えるグリッド幅となり、遡上波進行のスケール（少なくとも10mオーダー）と比べると大きすぎて評価が困難である。遡上スケールに合わせた高解像格子のELIMOへの直接の導入は、計算負荷を著しく増大させるため、津波伝播計算と遡上計算を異なる計算格子上で別途計算を行うのが現実的と考える。

宮城県北上川河口から中流に至る高解像度地形データを使用し、(1)の遡上計算法によって、津波の河川の遡上と部分的な浸水の進行を計算した一例を図9に表す。なおこの計算は、ELIMOと同一計算法を使用しているが、開発段階のワークステーション上でのテスト計算のため、PCを使ったiRIC上の計算ではない。計算結果は、河口部の津波の侵入による水位の上昇と、部分的な遡上、河川中流部へ向かう津波の伝播を適切に再現しており、高解像地形上でも同一計算モデルによる十分な適用性を表している。今後定量的な比較による計算精度検証とELIMOと遡上計算を連携するためのインターフェースの結合の設計を行い、iRIC上の津波の遡上評価を行うための作業が必要である。

(4) おわりに

iRIC-ELIMOを多セグメントからなる波源モデルと同一の断層パラメータが設定可能な機能を追加し、日本近海で発生可能な想定地震津波に直接対応した津波計算を行うためのシステムを整備した。北海道近海におけるLevel 2想定地震である十勝沖、根室沖断層の同時変位に伴う津波を計算し、定性的な再現性を確認した。

津波遡上計算の基礎ルーチンを完成させ、宮城県北上川を伝播する津波及び部分的な遡

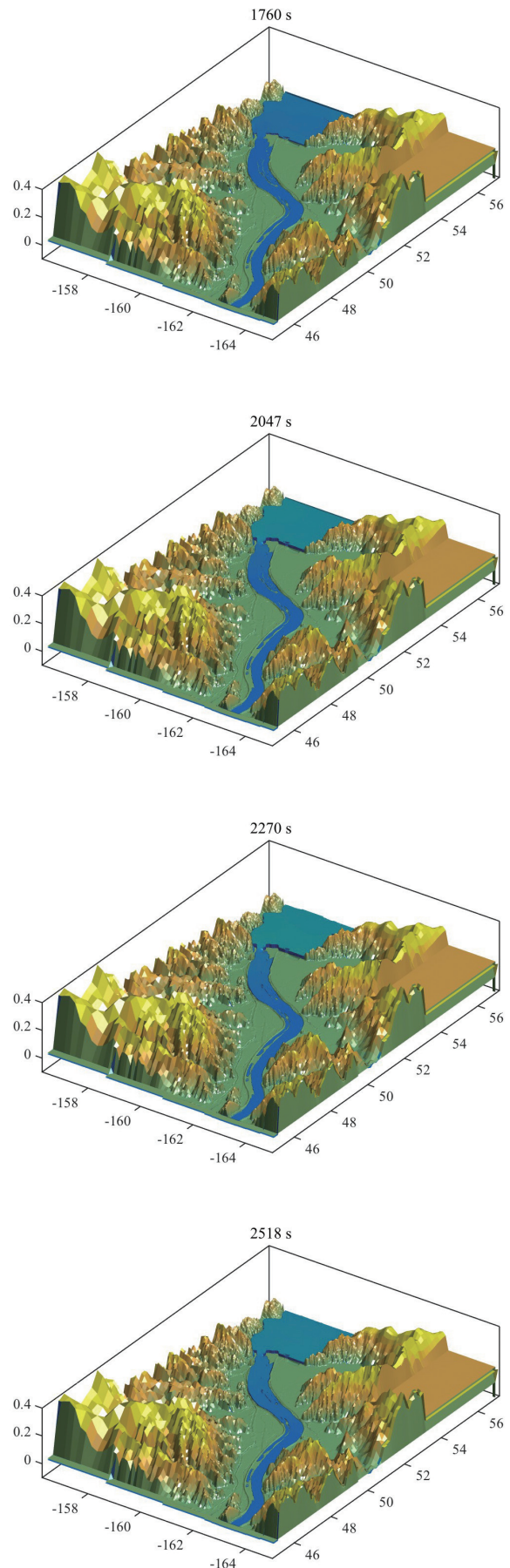


図9 北上川を遡上する津波入射後の水位変化

上が矛盾なく計算されることを確認した。今後遡上域との定量的な比較による計算精度検証とELIMOと遡上計算を連携するためのインターフェースの結合の設計を行い、iRIC上の津波の遡上評価を行う必要がある。

参考文献

- 1) Watanabe Y., Mitobe Y., Saruwatari A., Yamada T., Niida Y. (2012), Evolution of the 2011 Tohoku earthquake tsunami on the Pacific coast of Hokkaido, Coastal Engineering Journal, Vol. 54 (1), 1250002.
- 2) 太平洋岸に係る津波浸水予測図策定業務報告書，北海道防災情報，http://www.bousai-hokkaido.jp/BousaiPublic/html/common/sim_tsunami/rep/98_report/05_toubu_tyuubu_seibu.html