# 非構造格子モデルを用いた バンダアチェにおける2004年インド洋大津波の追算

## Hindcasting of 2004 Indian Ocean Tsunami in Banda Aceh, Indonesia, Using FVCOM

## 小松雄二<sup>1</sup> · 佐々木 淳<sup>2</sup> · 松丸 亮<sup>3</sup>

## Yuji KOMATSU, Jun SASAKI and Ryo MATSUMARU

An unstructured-grid, finite-volume, 3D primitive equation coastal circulation model, FVCOM, was first applied to a tsunami propagation and inundation problem after small modification on the treatment of initial conditions. The model was validated through an application to 2004 Indian Ocean Tsunami, focusing on inundation in Banda Aceh, Indonesia. The computed results are consistent with measured tidal gauge data and existing numerical results using other models. Performance for reproducing inundation areas is enhanced after resolving roads and structures. Considering the recent progress in high resolution GIS data and computer resources, application of FVCOM will become a useful tool to consider the local disaster prevention in a straightforward and easier manner.

## 1. はじめに

従来の津波伝播遡上計算の多くは構造格子に基づくも のであり、ネスティングに基づき建物密度を考慮した合 成粗度を用いた計算法が提案されている(Koshimuraら、 2009).一方、近年発展のめざましい非構造格子の海洋 流動モデルを津波計算に適用できれば、道路や建物を直 接解像した遡上計算が海域伝播計算と同時かつ簡便に行 えるようになり、昨今のGISデータの充実と相まって減 災マネジメントの高度化に資するものと期待される.

これまで非構造格子モデルによる津波計算はMyers・ Baptista (1995) 等, 有限要素法に基づく ADCIRC (Luettichら, 1991)を用いたものがあるが,計算上の課 題も指摘されている (Synolakis · Bernard, 2006). 一方, 近年いくつかのオープンソースの非構造格子海洋流動モ デルが開発され、そのうち有限要素法を採用している SELFE (Zhang · Baptista, 2008a) は海洋流動モデルと しての実績はあまり多くないものの、津波計算への応用 が検討され始めている (Zhang · Baptista, 2008b). また, Chenら(2003)が開発した有限体積法モデルである FVCOMはオープンソースの次世代型非構造格子流動モ デルとして主に海洋物理分野で注目を集めている. FVCOMは有限体積法を採用したことで質量保存則が数 値計算上も満たされる利点があり, ユーザー数が多くマ ニュアル類も充実していることから、今後の標準モデル としての発展が期待されるが,これまでのところ津波計 算への適用事例はない.

そこで本研究ではFVCOMの津波への適用法を検討し,

1		修(工)	五洋建設(株)	
2	正会員	博(工)	横浜国立大学教授	大学院工学研究院
3	正会員	博(工)	(有)アイ・アール・	エム 取締役社長

2004年インド洋大津波の伝播計算とバンダアチェでの遡 上計算を同時に行うことで、本モデルの有効性を検証す ることを目的とする.

#### 2. 計算方法

#### (1) 数値モデルの概要

数値モデルはChenら(2003)が開発した準3次元非構 造格子有限体積法海洋流動モデルFVCOM ver. 2.6.1を採 用した.本モデルは静水圧近似とブシネスク近似を仮定 し,鉛直座標にシグマ座標系を採用した,ナビエ・スト ークスの方程式と連続式に有限体積法を適用したもので あり,数値解法としては多くの海洋流動モデルと同様に 外部重力モードと内部重力モードを分離するモードスプ リット法を採用している.ただし,本研究では水平2次 元計算のみを対象としている.

本モデルの特長として、水平方向に三角格子を用いる ことで海岸線に沿った格子配置が可能であり、また、移 流項にセミ・ラグランジュ法を採用する等、計算効率を 高める工夫が施され、冠水・干出も扱えることから、大 洋スケールの津波伝播計算と陸域における道路や建物を 解像した遡上計算の同時計算が可能である.ただし、オ リジナルコードでは初期水位の設定に制約があるため、 断層モデルを用いて算出した初期水位を各格子点で読み 込むことができるよう、コードの改変を行った.さらに、 冠水・干出に関わるコードを一部改変している.

(2) 数値計算条件

a)計算格子

用いた計算格子のうち、伝播計算領域とバンダアチェ およびその沿岸域の伝播・遡上計算領域の非構造格子の 様子を図-1に示す、伝播計算領域の範囲は東経78°~ 103°,南緯5°~北緯23°である、水平格子間隔は海

表-1 陸	域の地形デー	9	作成に用いたデータセッ	ŀ
-------	--------	---	-------------	---

データ名		点間隔 (m)	主な特徴
ASTER GDEM	Elevation	30	衛星データ. ARRISの範囲外の地形に用いる
	Elevation	_	地盤高
	Coastline	0.5	海岸線の形状,標高は0mとする
ADDIS	River	0.5	河川の形状,水深は一律3mとした
ARRIS	Building	1.0	構造物データ,高さは属性データで分類した.
	Road	1.0	バンダアチェ市全体の道路の形状
	WIDE_Road	1.0	バンダアチェ市の一部の道路の幅の形状
DEPTH	Bathymetry		バンダアチェ沿岸部の水深 (Sea Defense Consultantより入手)



図-1 伝播計算領域(上)とバンダアチェおよびその沖合い における伝播・遡上計算領域の非構造格子

域においてはバンダアチェ沿岸部の10mから大洋におけ る50km, 遡上域で5mから50mにとっている.格子点数 は599,826点, 要素数は1,132,894個である.格子点の 80%以上は遡上域に配置されている.図-2に示すように, バンダアチェ中心部に位置するグランドモスク周辺(図-3参照)では道路境界に沿って格子を配置し,道路を遡 上する津波の再現を試みる.

#### 表-2 Building で分類した建物の高さ

名称	高さ(m)
Permanent Building	4
Not Permanent Building	4
Temple	10
Church	10
Governer Office	15
Hotel/Motel/Hostel	15
Village Head Office	5
Ministry Office	15
Post Office	5
Mosque	10
Elementary School	10
Junior High School	10
Senior High School	10
Polytechnic	10
Kindergarten	5
Public Hospital	15
Studium/Tribune/Sport Building	15
Park	0

#### b)水深・標高データ

海域の水深データはGEBCOがweb上で公開している 30秒間隔および1分間隔のデータを格子解像度に応じて 使用した.一方,遡上域については道路や構造物の解像 を含めた検討を行うため、2009年10月6日から8日に現 地踏査を行うと同時に、Syiah Kuala大学の協力を得て、 JICA (2005)のARRISデータをはじめとする,表-1に示 す各種データを入手した.遡上域の標高データはASTER GDEMを基本とし、ARRISデータ等をArcGIS上で読み 込み反映させることで、詳細な地形表現を可能とした. 建物についてはARRISデータのBuildingに含まれる表-2 の分類に従い、Elevationデータと合わせて建物高さを考 慮した遡上域格子の標高を与えた.

#### c)境界条件

伝播計算における陸境界および遡上域の陸側境界は完 全反射とした.開境界にはエネルギー減衰帯を設け,反 射波を抑制した.底面摩擦係数の値は海域および遡上域





図-3 バンダアチェ陸域高さの平面分布図(上)とグランド モスク周辺の拡大図(下)(鉛直下向きを正と定義)

共に0.0025を採用した.

以上により作成した遡上域における建物高さを考慮し た標高分布を図-3上に,グランドモスク周辺を拡大した ものを図-3下に示す.本研究では図-3上の全領域に対し, 道路や建物を解像した格子を作成することは困難であっ たため,グランドモスク周辺についてのみこれらを考慮 し,地形の詳細な解像が計算結果に与える影響を検討す ることとした.

#### d)断層モデル

断層モデルによる地盤変動量の計算にはMansinha・ Smylie (1971)の方法を用い,断層パラメータには有効 性が実証されている大家ら (2006)が提案した値を採用



した.これにより得られた津波の初期水位分布を図-4に 示す.

#### 3. 数値計算結果と考察

#### (1) 伝播計算

再現時間を10時間とし,最初に海域のみを対象とした 津波の伝播計算を行った.タイのKrabiとKuraburi,およ びスマトラ島南部に位置するSibolgaでの実測値と計算値 の比較をそれぞれ図-5,図-6および図-7に示す.実測値 はKrabiとKuraburiではSiripongら(2005)が,Sibolgaで はMerrifieldら(2005)が,実測検潮記録から津波成分の みを抜き出したものを用いた.KrabiおよびKuraburiとも に津波の到達時刻は計算と実測で良好な整合性を有して おり,特にKrabiでは波形もよく整合している.一方, Sibolgaにおいては波形の整合性は高いものの,計算値が 実測値より早く到達しており,位相のずれが見られる. この傾向は大家ら(2006)の解析結果と類似しているが, その原因として彼らは南側断層位置の誤差および地形デ ータの影響を指摘している.

次にバンダアチェのUlee Lheue海岸に到達した波形の 計算値を図-8に示す.計算結果によれば、20分後に到達 した第1波の最大水位は約23cm、36分後に到達した第2 波の最大水位は10.6mであり、これが計算期間中で最大 の値であった.一方,松富ら(2005)は現地調査のヒア リングにおいて、地震の発生から15~20分の間に小さ な津波高の第1波が観測され、その15~20分後に最大の 津波高となる2波目が観測されたとの証言を得ている. 本計算結果はこの証言と整合しており、バンダアチェに おける津波伝播計算の妥当性を示唆するものと言える.

#### (2) 遡上計算

再現時間を60分とし、伝播域と遡上域を合わせた格子 を用い、津波の伝播・遡上計算を行った.

市街地を含む陸域における各格子点の遡上高の最大値 および実測値を図-9に、グランドモスク周辺(図-9の矩



図-8 バンダアチェのUlee Lheue 海岸における水位時系列の計 算結果

形領域)の最大遡上高を図-10に示す.図-9中の黒線は遡 上計算範囲,両図の赤線は現地調査による浸水域の最大

MAX\_Runup (m)
12.0
11.0
9.0
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0

図-9 バンダアチェにおける遡上高の計算値と実測値(色丸). 赤実線は最大遡上域の実測値を示す.



図-10 グランドモスク (図中の矩形) 周辺の遡上高の計算値



図-11 グランドモスクの被災時と2009年調査時の様子

範囲を表している.遡上高の実測値は都司ら(2006)の 測定結果に,松丸(2005)による調査結果を加えたもの を用いた.

最大遡上域について実測値と計算値を比較すると,全 体的には両者はある程度整合しているが,図-9の中央右 あたりでは遡上範囲の計算値が過小評価となっている. このあたりは密集市街地となっているが,道路等の解像 を十分行っていない領域である一方,建物等の高さの情 報が計算格子の標高に反映されてしまっていることか ら,本来津波が遡上する道路等の地盤高が過大評価とな り,その結果遡上が遮られる状況となっていたことが考 えられる.このことは道路や建物等を解像して計算を行 う場合と、これらを解像しない場合で、計算格子の標高 の与え方に注意を要することを示している.これらの効 率的な取り扱い方法については今後の検討課題とした い.一方、市街地から離れた周辺部、特に図-9の右上部 では遡上範囲の計算値が過大評価となっている.この領 域も道路等の解像は行っていないが、建物が少ないため ほぼ地盤高で計算格子の標高が設定されており、津波後 の地盤高を用いたことの妥当性や摩擦係数の過小評価が 影響している可能性がある.後者についてはFVCOMの オリジナルコードでは摩擦係数の空間分布を考慮するこ とができないため、今後コードの改良を含めた検討を行 う必要がある.

グランドモスクを含む図-10の左側約三分の二の領域 では5m程度で主要な道路を解像した格子作成を行って いる.この領域では道路に沿って遡上する様子が明瞭に 現れており,最大遡上範囲の計算値は実測値とよく一致 している.このように道路の解像が可能な場合には,粗 度係数等の調整を行うことなく,よい精度での再現が可 能であることを示唆している.今後,道路を解像した計 算例を増やすことにより,その妥当性について検討して いく必要がある.

最大浸水深については、バンダアチェの中心に位置す るグランドモスクにおいて遡上時のビデオ映像 (Eksklusit Metro TV)が残されており(図-11左),実線 の高さまで浸水していることが確認できる。2009年の現 地踏査において確認したところ(図-11右),その浸水深 は約1.6mであった.計算値も約1.6mとほぼ一致してお り,道路や建物を解像したことにより高い再現性が得ら れたものと思われる.

#### 4.おわりに

非構造格子有限体積法モデルFVCOMを津波の伝播・ 遡上計算に適用し、2004年インド洋大津波の伝播および バンダアチェでの遡上計算を行うことで、同モデルを用 いた津波計算法について検討した.その結果、伝播計算 については既往の知見と整合する結果が得られることを 確認した.遡上計算については道路や建物を解像するこ とで、最大遡上域や浸水深がよい精度で再現できること を確認した.一方、これらを十分解像せずに建物等の情 報を標高データに反映させると、遡上域が過小評価とな る傾向があることが示された.

GISデータの整備が進みつつある状況を念頭に置く と、道路,建物等を解像した計算が十分可能となりつつ あり、大洋スケールの計算と遡上域の詳細計算がネステ ィングなしに同時に行える簡便性からも、今後FVCOM を用いた津波計算法を確立していくことは有用であると 考える. **謝辞**: JICAおよびSyiah Kuala大学からはバンダアチェ 市街地のGISデータを, Sea Defense Consultantからは沿 岸域の水深データをご提供頂いた.

#### 参考文献

- 大家隆行・越村俊一・柳沢英明・今村文彦(2006):2004年インド洋大津波によるバンダ・アチェ市街地の津波氾濫計 算と被害調査,海岸工学論文集,第53巻,pp.221-225.
- 都司嘉宣・谷岡勇市郎・松富英夫・西村裕一・鎌滝孝信・村 上嘉謙・榊山 勉・Andrew Moore・Guy Gelfenbaum・ Sindhu Nugroho・Budi Waluyo・Inyoman Sukanta・Rahmat Triyono・行谷佑一(2006):2004年スマトラ島沖地震に よる最大被災地 Banda Aceh 市とその周辺海岸の津波の浸 水高さ.月刊地球,号外56,154-166,2006.
- 松富秀夫・榊山 勉・Sindhu Nugroho・都司嘉宣・谷岡勇市 郎・西村裕一・鎌滝孝信・村上嘉兼・松山昌史・栗塚一 範(2005): Banda Acheと周辺における2004年インド洋 津波と被害想定から見た課題,海岸工学論文集,第52巻, pp. 1366-1370.
- 松丸 亮 (2005):バンダアチェ市におけるスマトラ沖大地 震・津波被害と復興に関する考察,土木学会年講講演概 要集.
- Chen C., Liu, H. and Beardsley, R.C. (2003) : An unstructured, finite-volume, three-dimensional primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries, J. Atmospheric and Ocean Tech., Vol. 20, pp. 159-186.
- JICA (2005) : The study on the urgent rehabilitation and reconstruction support program for Aceh Province and affected areas in north Sumatra, Final Report.
- Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H. and Imamura, F. (2009) : Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, Coastal Eng. J. Vol. 51, No. 3, pp. 243-273.
- Luettich, R.A., Westerink, J.J. and Scheffner, N.W. (1991) : ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts and estuaries, Coastal Eng. Res. Ct., U.S. Army Engs. Wtrways. Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Mansinha L. and D.E.Smylie (1971) : The Displacement Fields of inclined faults, Bulletein of Seimological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.
- Merrifield, M.A., Firing, Y.L., Aarup, T., Agricole, W. and Brundrit, G. (2005) : Tide gauge observations of the Indian Ocean tsunami, December 26,2004, Geophys. Res. Letters, Vol. 32, L09603.
- Myers, E.P. and Baptista, A.M. (1995) : Finite element modeling of the July 12, 1993 Hokkaido Nansei-Oki tsunami, Pure Appl. Geophys., Vol. 144, pp. 769-801.
- Siripong A., Choi, B.H., Vichiencharoen, C., Yumuang, S. and Sawangphol, N. (2005) : The changing coastline on the Andaman seacoasts of Thailand from Indian Ocean Tsunami, Sumatra Tsunami on 26th December 2004, Special Asia Tsunami Session at APAC 2005, pp. 21-31.
- Synolakis, C.E. and Bernard, E.N. (2006) : Tsunami science before and beyond Boxing Day 2004, Phil. Trans. R. Soc. A 364, pp. 2231-2265.
- Zhang, Y.L. and Baptista, A.M. (2008a) : SELFE: A semi-implicit Eulerina-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation, Ocean Modeling, Vol. 21, pp. 71-96.
- Zhang, Y.L. and Baptista, A.M. (2008b) : An efficient and robust tsunami model on unstructured grids. Part I: Inundation Benchmarks, Pure Appl. Geophys., Vol. 165, pp. 2229-2248.