

適合格子細分化による沿岸・河川域のためのシームレス氾濫モデル開発

Development of a seamless inundation model for coast and river system with adaptive mesh refinement

広島大学大学院国際協力研究科 准教授 李 漢洙

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究背景

津波・高潮などの長波数値計算では、水深が浅くなるにつれて複雑になる現象を精度よく再現するため、海洋部から沿岸部にかけて空間格子を細かくする必要がある。その計算手法は、空間解像度の異なる複数の領域に対して同時進行的に計算し、各領域の境界上で水位流速などの変数を線形補間により受け渡すネスティング手法が一般的である。この手法は格子の粗い大領域から格子の細かい小領域へ伝播する場合は有効であるが、逆に小領域で発生した反射波や散乱波が大領域へ通過する場合、短波長成分が開境界上で反射し、小領域内にトラップされることで、数値誤差および計算不安定性の原因となる。さらに、外洋から沿岸・河口部まで段階的に領域を細分化するマルチネスティング計算は、大きな計算負荷と計算時間を要する。適合格子細分化は、高い空間分解能を必要とする場所だけの格子を細分化するので、計算精度を維持しつつ計算効率を上げ、計算時間を大幅に短縮できる。本研究では、適合格子細分化を用いて、複雑地形を持つ沿岸・河口域におけるシームレス氾濫モデルを開発し、高潮・津波モデリングにおける高精度化・高効率化を目指した。

2. 数値モデルと数値実験

水理実験

本研究は、1993年北海道南西沖地震による奥尻島における津波遡上実験を行い適合格子細分化の適用性と効率性を精査した。1993年北海道南西沖地震による遡上高は、震源からの津波の直撃を受けた奥尻島の西側で特に高く、藻内地区で最大遡上高31.7mを記録した。このような藻内地区における津波遡上は水槽実験が行われ、その実験の諸元と物理実験結果はInundation Science & Engineering Cooperative (ISEC)から公開され、津波モデルのベンチマークテストとして利用されている。Table 1は模型サイズ、境界条件、入射波条件、水深データなど、その水槽実験の諸元を示す。Figure 1(a)は水槽実験に用いられた藻内地区の模型を示す。Figure 1(b)は模型の西側の開放境界で与えられた入射波条件を表す。入射波は22.5秒間0.05秒間隔で与えられる。Table 2は水槽実験に設けられた水位計測地点プローブの位置を表す。

Table 1. Size, boundary conditions, input wave, and depth for physical model.

Size (m)		Boundary conditions		Input wave (sec)		Depth (m)	
X	Y	West	East, South, North	Time domain	Time step	Max	Min (land)
5.448	3.402	Input wave	Solid wall	0 - 22.5	0.05	0.13535	-0.125

Table 2. Locations of wave gage for measure water levels.

Probes	X (m)	Y (m)
P5	4.521	1.196
P7	4.521	1.696
P9	4.521	2.196

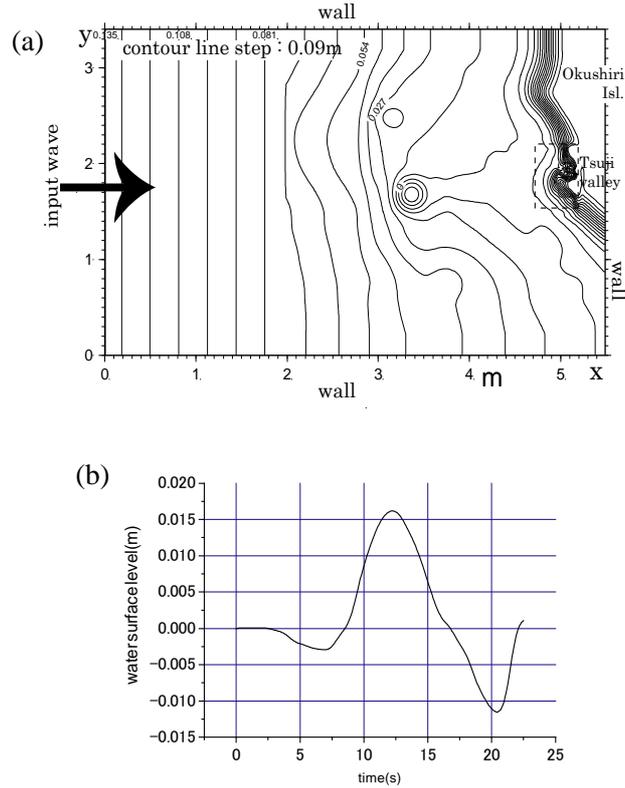


Fig. 1. Experimental conditions and input wave time profile for tsunami model. (Source from the Inundation Science and Engineering Cooperative (ISEC)).

数値モデル

数値実験は適合格子細分化を適用した非線形長波理論式モデルで行った．基礎方程式は以下のとおりである．

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) - fv = -hg \frac{\partial z}{\partial x} - C_f |u|u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + fu = -hg \frac{\partial z}{\partial y} - C_f |v|v \quad (3)$$

ここで、 h は自由表面、 $\mathbf{u}=(u,v)$ は流速ベクトル、 g は重力加速度、 z は水深、 f はコリオリ係数、 C_f は海底摩擦係数である．数値計算スキームは、空間に対しては2次精度のslope-limited Godunov型スキームが、時間に対しては2次精度のMUSCL型スキームが採用されている．さらに、不連続点における解の安定化のため、短波の安定化と長波の数値消散量の制御に有効なSwebyリミッターを用いる．タイムステップに関しては、モデル安定化のためCFL条件を満たすものとする．

数値実験

数値実験は(a)粗い間隔の均質メッシュ、(b)適合格子細分化を適用例、(c)細かい間隔の均質メッシュ、で計算することで適合格子細分化による効率性と適用性を検討した．適合格子細分化適用の場合、格子間隔は格子間隔レベル6からレベル9の間で変化させた．粗いメッシュの間隔は約5.316 cm、細かいメッシュの間隔は約0.664 cmであり、それぞれ格子間隔レベル6とレベル9に相応する．さらに、底面摩擦(C_f)が津波伝播と遡上に及ぼす影響を調べるため、それぞれに格子間隔条件にお

いて 0.001, 0.0025, 0.004 と 0.01 の 4 ケースの C_f 値で実験を行った。その他、数値実験における計算領域、水深および地形データ、入射波条件と境界条件は水槽実験と同様の条件で実行した。Table 3 は合計 12 パターンの数値実験条件を示す。

Table 3. Numerical experiment conditions. Level 6 and 9 are precisely equivalent to 5.316 cm and 0.664 cm.

Bottom friction coefficient (C_f)	Adaptive mesh	Non-Adaptive	
		Low level	High level
0.001	6 \cong level \cong 9	6	9
0.0025	6 \cong level \cong 9	6	9
0.004	6 \cong level \cong 9	6	9
0.01	6 \cong level \cong 9	6	9

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 結果

Figure 2 は上からそれぞれ水位計測プローブ P5, P7 と P9 における計測水位と計算された水位の比較を示す。計算水位は左からそれぞれ粗い間隔の均質メッシュの計算結果、適合格子細分化を適用した計算結果、細かい間隔の均質メッシュを適用した計算結果を表す。

水位計測プローブ P5 では、計算経過時間約 17.5 秒と 18 秒に二つの計算水位の先端が観測された。さらに、これらの二つの計算水位先端は計測水位の先端とよく一致する。さらに、二つの計測水位の先端は異なる摩擦係数を用いた計算においても、 $C_f = 0.001, 0.0025, 0.004$, と 0.01 の順でその計算水位に明確に表れている。しかし、摩擦係数の違いによる計算水位先端値の差は小さい。

水位計測プローブ P7 では、経過時間約 17 秒に表れる計測水位の初めの峰がすべての計算水位によく再現されている。経過時間約 19 秒に表れる二度目の計測水位の峰もすべての計算水位とよく一致する。さらに、異なる摩擦係数による計算結果では、 $C_f = 0.001, 0.0025, 0.004$, と 0.01 の順で P7 における初めの計測水位の峰をよく表している。

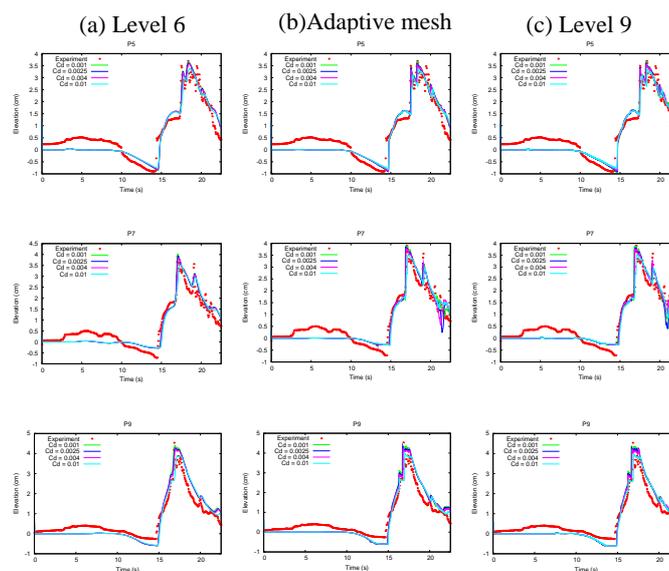


Fig. 2. Comparisons of calculated water levels at P5 (first row), P7 (second row) and P9 (third row) with measured experiment data. Calculated values are obtained from non-adaptive mesh runs with level 6 (left column), adaptive mesh runs (middle column) and non-adaptive run with level 9 (right column). The calculations were carried out with varying bottom friction coefficients, $C_f = 0.001$ (green), $C_f = 0.0025$ (blue), $C_f = 0.004$ (magenta), and $C_f = 0.01$ (cyan)

水位計測プローブ P9 では、経過時間約 17 秒に計測された初めの先端値がすべての計算値でよく再現できている。さらに、摩擦係数を変化による計算結果でもその他のプローブと同様の順で計測結果とよく一致する。

Figure 3 と 4 はそれぞれ 2 次元と 3 次元の計算水位のスナップショットを示す。計算水位は左からそれぞれ粗い間隔の均質メッシュの計算結果、適合格子細分化を適用した計算結果、細かい間隔の均質メッシュを適用した計算結果を表す。さらに、上から計算経過時間 16 秒、18 秒と 20 秒における計算結果を示す。計算結果のスナップショットでは異なる格子間隔が計算水位のフロントに及ぼす影響が顕著に表れている。例え、18 秒における粗いメッシュでの計算結果では水位フロントがぼやけているが、細かいメッシュからの計算結果では水位フロントが鮮明に映られている。

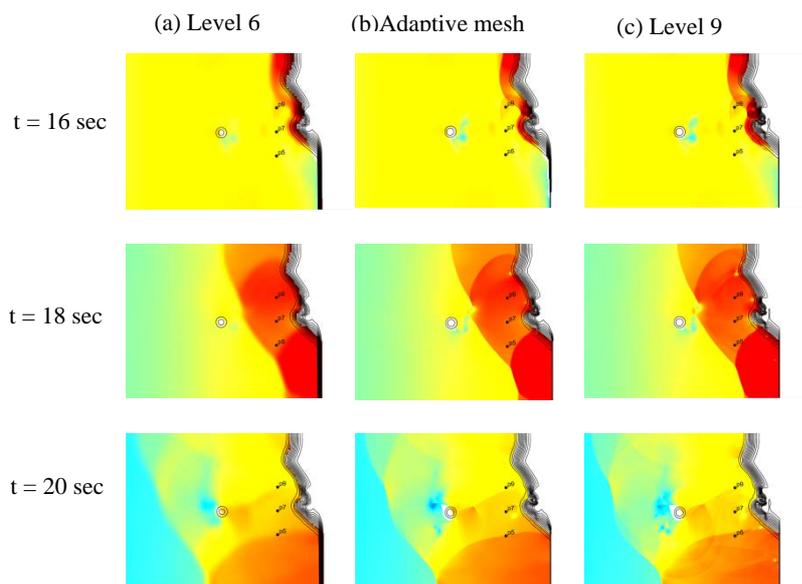


Fig. 3. Comparisons of calculated water levels at 16 sec (first row), 18 sec (second row) and 20 sec (third row) of elapsed time from non-adaptive mesh run with level 6 (left column), adaptive mesh run (middle column) and non-adaptive run with level 9 (right column), respectively. Calculated values are all obtained from $C_f = 0.001$.

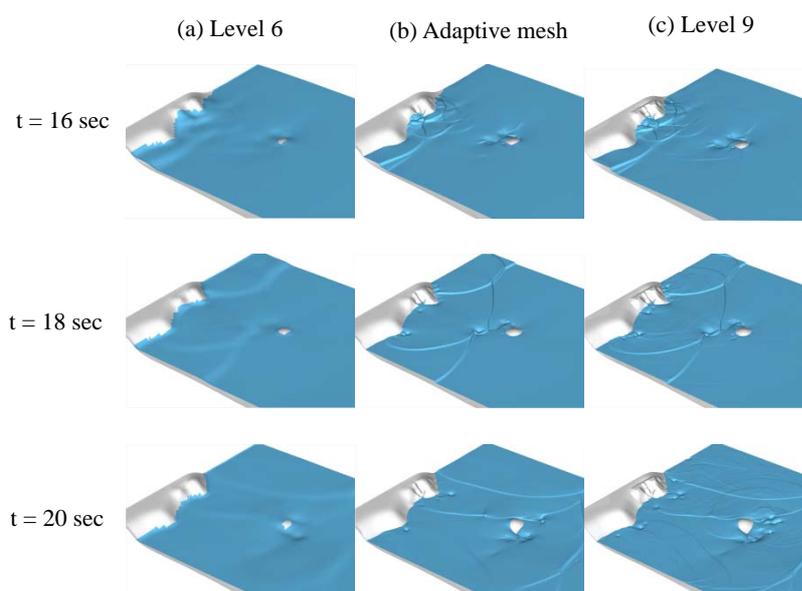


Fig. 4. 3D snapshots of calculated water levels at 16 sec, 18 sec and 20 sec of elapsed time from non-adaptive mesh run with level 6 (left column), adaptive mesh run (middle column) and non-adaptive run with level 9 (right column) with $C_f = 0.001$.

さらに、適合格子細分化を適用して計算結果においても、細かい格子計算結果のように津波の先端波形がよく再現できている。しかし、粗い格子計算結果では津波波形の先端部（フロント）の再現性がよくないと言える。特に、経過時間 20 秒における計算結果では格子間隔による計算結果が一目瞭然に確認できる。20 秒の細かい格子計算結果では第四象限における反射波による複雑な波形フロントが確認できる。

Table 4 は 12 パターンすべての数値実験における 22.5 秒の計算時間に使われた計算消費時間のまとめを表す。適合格子細分化を適用した場合、粗いメッシュによる計算消費時間よりおよそ 10 倍の計算 CPU 時間が必要である。一方、細かいメッシュによる計算消費時間に比べると僅か 3% の計算 CPU 時間が消費された。以上により、適合格子細分化を適用すると計算精度を向上させながら、計算効率の向上（計算消費時間の軽減）が確認できた。なお、計算に利用したワークステーションの諸元は Table 4 に示す。

Table 4. Required computational time for each numerical experiment. They are relative values obtained by a single CPU run with Intel Xeon CPU E5-2687W 3.10GHz with 256Gb RAM memory.

Bottom friction coefficient (C_f)	Adaptive mesh (sec)	Non-Adaptive (sec)	
		Low level	High level
0.001	532.55	40.48	22514.53
0.0025	461.78	40.22	22042.93
0.004	438.09	40.12	21374.64
0.01	357.87	39.82	21662.04

4. まとめ

本研究では、適合格子細分化を採用したシームレス氾濫モデルを開発し、津波・高潮数値計算における高精度化・高効率化を目指すため、津波遡上ベンチマークテストを用い数値実験を行った。数値計算では、粗い間隔の均質メッシュ、適合格子細分化適用計算、細かい間隔の均質メッシュの 3 ケースと異なる海底摩擦係数の 4 ケースを合わせて、合計 12 パターンの数値実験を実行した。さらに、計算結果はベンチマークテストの水槽実験計測結果を比較・検証を行った。計算結果では、適合格子細分化を適用した計算結果は、細かい格子間隔の計算結果と比較すると高精度の計算結果を維持しつつ、計算消費時間においては計算完了まで僅か 3% の計算時間を要した。以上により、適合格子細分化は津波の波源域から沿岸域までの津波伝播・氾濫モデルにおける計算負荷軽減および計算結果向上のための有効な対案であると言える。

（発表論文）

李 漢洙 and 下山 智久, 2016. 瀬戸内海における潮汐が津波伝播に及ぼす影響に関する数値実験. 土木学会論文集B2(海岸工学), 72(2): I_325-I_330.

Lee, H.S. Tsunami run-up modeling with adaptive mesh refinement method: A case study for Monai Village run-up experiment. Proc. of the 20th IAHR-APD congress (2016), 7p, Colombo, Sri Lanka.