

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Tree-Based Mesh-Refined GPU Accelerated Tsunami Simulator for Real Time Operation
著者(和文)	アルセアクニヤ マルロン
Author(English)	MARLON RODOLFO ARCE ACUNA
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11017号, 授与年月日:2018年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:青木 尊之,肖 鋒,木倉 宏成,筒井 広明,加藤 之貴
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11017号, Conferred date:2018/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

(2000字程度)

報告番号	乙 第 号	学位申請者	Marlon Rodolfo Arce Acuña	
	氏 名	職 名	氏 名	職 名
論文審査員	主査 青木 尊之	教授	筒井 広明	准教授
	加藤 之貴	教授		
	肖 鋒	教授		
	木倉 宏成	准教授		

本論文は「Tree-Based Mesh-Refinement GPU-Accelerated Tsunami Simulator for Real-Time Operation (木構造に基づいた格子細分化と GPU による高速化を導入したリアルタイム津波シミュレータの開発)」と題し、8 章より構成されている。

第 1 章「Introduction」では、背景として津波災害の歴史および近年の津波による大きな災害に触れ、特に東日本大震災の津波による福島原子力発電所の被害は極めて重大であり、津波シミュレータの高度化の重要性を述べている。既存の津波シミュレータをレビューし、GPU(Graphics Processing Unit)の利用と高効率・高精度な計算手法の導入により、新しいリアルタイム津波シミュレータの開発を本研究の目的とすることを述べている。

第 2 章「Governing Equations」では、開発するシミュレータが津波の発生・伝播・遡上の 3 段階の計算から構成され、津波の初期値が地震による海底地形の変位に基づいて設定され、極座標系で表された浅水波方程式に基づいて津波伝播が計算され、海岸線の指定した数 km の範囲に対して陸地への津波遡上を計算していることを説明している。

第 3 章「Numerical Methods and Boundary Conditions」では、津波伝播の数値計算手法として、特性線法に基づいたリーマン不変量に対するセミ・ラグランジュ法を用いることにより、重力波(重力により波高の変位が伝播する波)に対して大きな時間刻みで高精度かつ安定に計算できることを示している。津波遡上は MUSCL(Monotonic Upwind Scheme for Conservation Laws)法に基づいた有限体積法で計算し、陸地には 1cm 程度の薄い水の層を設定することにより津波先端での浅水波方程式の特異性を回避している。検証のための幾つかの 1 次元問題を解き、解析解と計算結果の良い一致を示すことで、シミュレータに用いる計算手法の妥当性を検証している。

第 4 章「Tree-based Refinement and Bathymetry」では、木構造に基づいたブロック型の細分化格子法により、海岸線や水深が浅い領域に高解像度格子を選択的に配置し、効率的に計算するための計算格子を生成できることを示している。1 ブロック当たり 64×64 格子を割り当て、遡上計算する領域に対しては 50 m 間隔にまで格子を細分化している。海底地形のデータは公開されている GEBCO(General Bathymetric Chart of the Oceans)の最も細かい 1500 m 解像度のデータを用い、それより細かい計算格子に対しては補間により海底地形のデータを生成し、遡上計算の領域へ接続できるようにしている。

第 5 章「GPU Computing Implementation for Tsunami Modeling」では、GPU が 1,000 を超える演算コアを搭載するために単体プロセッサとしての計算性能が高く、津波シミュレーションの実行時間を大幅に短縮することができることを説明している。CUDA プログラミングによる単一 GPU に対する計算の実装方法と、複数 GPU を用いてさらに高速化する方法を述べている。ヒルベルト空間充填曲線を用いて領域分割し、計算負荷を均一にする方法を実装している。異なる格子幅のブロックが混在する計算領域の中で、サブステップ法を導入し、計算している間に並行して GPU 間通信を行い、データ出力を非同期で行うなどの様々な高速化を導入することにより、インド洋の 10 時間の津波シミュレーションが 40 分で完了することを可能にしている。

第 6 章「Tsunami Inundation Benchmarks」では、開発した津波シミュレータの遡上計算の妥当性を国際ベンチマークテストで検証している。孤立波伝播の問題から北海道南西沖地震(1993 年)の津波に対する奥尻島での詳細な観測データとの比較まで様々な問題において、他の現業シミュレータに対して、数%の範囲で同じまたは優れた結果が得られている。

第 7 章「Numerical Simulation: Application」では、2004 年のスマトラ沖大地震で発生した津波に対して 12 時間のシミュレーションを行い、様々な場所に設置された波高計の時刻歴を非常に良く再現していることを示している。さらに、Mozambique, Comoros, Seychelles, Sri Lanka, Phuket での遡上域が観測データおよび他のシミュレータとも非常に良く一致していることを示し、津波予測の実運用が十分可能であることを明らかにしている。

第 8 章「Conclusions and Future Work」では、各章において得られた成果を要約し、結論としてまとめている。

これを要するに、本論文はリアルタイムの津波予測のための高速・高精度な津波シミュレータの開発を行い、複数 GPU を用いて国際ベンチマーク問題や実際の津波の観測データとの比較を行うことにより、実運用に対して十分な性能があることを示している。今後発生する津波に対し、海岸線の原子力施設に対する影響を早期に予測することが可能であり、工学上および工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分価値あるものと認められる。

注意: 「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。