

論文の内容の要旨

東日本大震災を契機として、津波に対する被害予測には従来の浸水域の予測のみでなく、建造物の被害予測も含めたものが求められるようになってきている。本研究では、広領域の津波解析を合理的に行う手法として、波源域を含む沖合から海岸近くまで 2 次元浅水長波方程式を用い、対象とする建造物を含む沿岸地域に対しては 3 次元 Navier-Stokes 方程式を用いるハイブリッド津波解析手法の提案を行っている。本手法の特徴としては、オーバーラップ領域を含む 2 次元解析領域と 3 次元解析領域の接続面において、相互に水位の適合条件と流量の連続条件を課しており、双方向に伝播する波が混在する場への適用を可能としている。また、2 次元領域のメッシュと 3 次元領域のメッシュは独立かつ任意領域で定義することが可能であり、任意形状への適合性と適用性に優れる長所がある。

第 1 章「Introduction (序論)」では、研究の背景、既往の研究、研究目的を述べている。

第 2 章「2D Tsunami Analysis Model (2 次元津波解析モデル)」では、4 章で提案する 2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析手法に用いる、2 次元解析手法として非構造格子を用いた安定化有限要素法について、その定式化と結果の妥当性について述べている。

第 3 章「3D Tsunami Analysis Model (3 次元津波解析モデル)」では、4 章で提案する 2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析手法に用いる、3 次元解析手法として非構造格子を用いた安定化有限要素法について、その定式化と結果の妥当性について述べている。本章では、固定メッシュに基づいて気液界面を決定する手法として、近年注目されている Phase Field Model の導入を行い、従来用いられている VOF 法との比較により Phase Field Model の有効性について、理論解および実験結果との比較のもとに行っている。

第 4 章「2D-3D Hybrid Model Using Overlapping Method (オーバーラッピング手法を用いた 2 次元・3 次元ハイブリッドモデル)」では、任意格子に基づくオーバーラッピング手法を用いた 2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析手法の提案を行っている。ベンチマーク問題において、実験結果との比較により、オーバーラップ領域の設定に関する検討、任意格子に基づく本手法の妥当性と有効性を示している。また、本手法は、押し波および引き波のどちらから始まる津波に対して適用可能であり、従来の VOF と比較して実験結果と良い一致を示すこと、およびオーバーラップ領域において解の接続が滑らかであることを示している。

第 5 章「Development of A Parallel Large-Scale 2D-3D Hybrid Model (大規模 2 次元・3 次元並列ハイブリッドモデル)」では、4 章で構築した解析手法を大規模津波解析に適用可能とするため、領域分割に基づく並列計算手法の提案を行っている。並列計算のプログラミング手法としては、機種依存性のない MPI (Message Passing Interface) に基づく手法を採用している。本手法の大規模計算への適用性について検討するため、1 億要素以上の 3 次元メッシュを用いて、東北地方太平洋沖地震により発生した津波解析を実施してその妥当性と有効性を示している。

第 6 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の研究課題を示している。

論文審査の結果の要旨

東日本大震災を契機として、津波に対する被害予測には従来の浸水域の予測のみでなく、建造物の被害予測も含めたものが求められるようになってきている。広領域の津波解析を合理的に行う手法として、波源域を含む沖合から海岸近くまでを 2 次元浅水長波方程式を用い、対象とする建造物を含む沿岸地域に対しては 3 次元 Navier-Stokes 方程式を用いるハイブリッド津波解析手法がこれまで提案されている。しかし、既往のハイブリッド解析手法は、構造格子に基づく方法と非構造格子に基づく方法、および粒子法に基づく方法に大別されるが、以下に述べる問題点がある。構造格子および非構造格子に基づく方法は、2 次元および 3 次元領域の互いの接続境界を同一境界上に設定する必要があり、加えて構造格子に基づく方法は建造物の幾何形状の適合性に難がある。また、粒子法に基づく方法は連成が沖合の 2 次元から 3 次元領域への片方向のみの連成で双方向の連成が実現されていない。

本研究では、上記の問題点を解決する有限要素法に基づく 2 次元・3 次元ハイブリッド解析手法を提案するものである。本手法の特徴としては、以下の 4 点が挙げられる。1) オーバーラップ領域を含む 2 次元解析領域と 3 次元解析領域の接続面において、相互に水位の適合条件と流量の連続条件を課しており、双方向に伝播する波が混在する場への適用を可能としている。2) 非構造格子に基づく有限要素法を採用しているため、地形や建造物の幾何形状の適合性に優れている。3) 2 次元領域のメッシュと 3 次元領域のメッシュは独立かつ任意領域で定義することが可能であり、適用性に優れている。4) 領域分割の基づく MPI による並列化計算プログラミングの実装することで、大規模計算に対応している。

本論文は 6 章で構成される。各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

第 1 章「Introduction (序論)」では、研究の背景、既往の研究、本研究の目的と構成を示している。

第 2 章「2D Tsunami Analysis Model (2 次元津波解析モデル)」では、4 章で提案する 2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析手法に用いる 2 次元解析手法について述べている。三角形一次要素に基づく非構造格子を用いた安定化有限要素法 (SUPG 法) による定式化、空間と時間の離散化手法および水際線の移動境界の処理法について述べている。また、ベンチマーク問題に適用して、2 次元解析手法の妥当性について述べている。

第 3 章「3D Tsunami Analysis Model (3 次元津波解析モデル)」では、4 章で提案する 2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析手法に用いる 3 次元解析手法について述べている。四面体一次要素に基づく固定メッシュを用いた安定化有限要素法 (SUPG/PSPG 法) の定式化、空間と時間の離散化手法について述べている。本章では、固定メッシュに基づく自由表面 (気液界面) を決定する手法として、近年注目されている Phase Field Model の導入を行っている。Allen-Cahn 方程式に基づく Phase Field Model の有効性について検討するため、従来一般的に用いられている VOF 法との比較を、理論解および実験結果との比較のもとに行っている。その結果、Phase Field Model は VOF 法に比べて理論解および実験結果と良い一致を示すこ

と、VOF法の問題点である界面が拡散することなく一定に保たれることを示している。

第4章「2D-3D Hybrid Model Using Overlapping Method (オーバーラッピング手法を用いた2次元・3次元ハイブリッドモデル)」では、2章と3章で述べた手法を用いて、任意格子に基づくオーバーラッピング手法を用いた2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法の提案を行っている。本手法は、オーバーラップ領域を含む2次元解析領域と3次元解析領域の接継面において、相互に水位の適合条件と流量の連続条件を課しており、双方向に伝播する波が混在する場への適用を可能としている。また、2次元領域のメッシュと3次元領域のメッシュは独立かつ任意領域で定義することが可能であり適用性に優れる特徴がある。時間方向の離散化には、2次精度のCrank-Nicolson法を用いている。なお、本ハイブリッド手法では時間ステップにおいて、2次元領域を解析した後に3次元解析を実施しているが、その順番を逆にしても計算結果には優位な差異がないことを示している。

ベンチマーク問題において、構造格子を用いた結果と任意格子を用いた結果との比較を行い、任意格子を用いた場合の精度検証を行った。その結果、両者の差異は微小であり任意格子の妥当性と有効性を示している。また、2次元領域と3次元領域のオーバーラップ領域の大きさについて検討を行い、粗い方のメッシュを基準として4層程度とれば、結果に差異はないことを示している。また、本手法は、押し波および引き波のどちらから始まる津波に対して適用可能であり、従来のVOFと比較して実験結果と良い一致を示すこと、およびオーバーラップ領域において解の接継が滑らかであることを示している。さらに、実際の津波波動解析を想定した場合、3次元領域の解析コストが支配的になるため、本手法では計算の初期は解析領域全体を2次元解析で行い、沖合からの津波が3次元領域に到達してからハイブリッド解析に移行するアルゴリズムを導入している。

第5章「Development of A Parallel Large-Scale 2D-3D Hybrid Model (大規模2次元・3次元並列ハイブリッドモデル)」では、4章で構築した2次元・3次元ハイブリッド解析手法を大規模津波解析に適用可能とするため、領域分割に基づく並列計算手法の提案を行っている。並列計算のプログラミング手法としては、機種による依存性のないMPI (Message Passing Interface) に基づく手法を採用している。本手法の大規模計算への適用性について検討を行うため、1億要素以上の3次元メッシュを用いて、東北地方太平洋沖地震により発生した津波解析を実施した。その結果、計算時間の大幅な短縮が実現でき、また計算結果も既往の計算結果と良い一致を示すことを明らかにした。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の研究課題を示している。

以上、本論文は、合理的で高精度な津波解析手法の構築を行った研究であり、計算工学における新しい考え方、解析方法を与えるものであり、学術上極めて重要な貢献を与えている。よって本論文は、博士[工学]論文として価値があるものと認める。