

論文内容の要旨

論文題目

Finite Element Models for Precise Predictions of Shallow Water Flows within Tokyo Bay

(沿岸域流況予測のための高精度な有限要素モデルの開発と東京湾への適用)

氏名： 文屋 信太郎

本研究の背景

地表の7割を占める広大な海洋の中でも、大陸棚以浅の沿岸域は人々の生活と密接に関係する重要な海域である。特に四方を海に囲まれている日本における生活、文化は沿岸域、特に内湾内の水環境に大きな影響を受けている。その沿岸域で人々が快適に暮らすために工学が取り組むべき問題は大きく二つに分類されると考えられる。一つは、生態系の保全・再生、水質管理、汚染物質の拡散などの環境問題である。もう一つは台風による高潮や洪水、地震時に発生する津波などが人工構造物へ与える被害などの自然災害である。これらの現象を理解し、適切な対策を施すためには、それらの現象に共通して関係する海水の流動について理解することが不可欠である。しかしながら海洋の流動現象は空間・時間スケールが大きいため、その実験を行うことは不可能であるか、あるいは非常に大規模な装置を必要とする。そこで本研究では、数値モデルを用いた数値実験によって沿岸域の諸現象を理解・予測することを目的とし、特に沿岸域の海水の流れに注目してそれを高精度に解くための計算手法を提案する。また、東京湾を含む実海域に提案手法を適用し、その有効性を示す。

沿岸域の流れの数値計算

沿岸域の海水の流動は主に潮汐力と風による海表面摩擦力によって駆動される。どちらの力も大きな空間スケールでは水平方向の流れを生むため、鉛直方向の流速は水平方向の流速に対して非常に小さくなる。このような流れは水平方向の流速と基準水面からの水位変動を変数として持つ浅水長波方程式によって表現される。本研究ではこの浅水長波方程式を用いて沿岸域の流況予測を行う。

浅水長波方程式の数値解法としていくつかの方法が試されているが、本研究では、複雑な海岸地形を容易に再現することのできる非構造格子の利用を考え、有限要素法を採用した。有限要素法によって浅水長波方程式を解く場合、二つの排除すべき数値的不安定性が存在することが知られており、この不安定性をいかに精度良く取り除くかによって解の信頼性が大きく左右される。

擬似気泡関数法

一つ目の不安定性として、水位と流速を同次の要素で補間すると高周波モードが発生して安定な解が得られないことが知られている。従来は非物理的な数値粘性を加えることによってこの不安定性を回避していたが、その場合、解は大きく減衰し、精度を保証することが困難になる。そこで本研究では近年その有効性が確認された擬似気泡関数 (quasi-bubble) 要素を用いた混合補間を採用し、非物理的な数値粘性を一切加えることなく高周波モードを排除した。これにより計算領域の内部については安定に精度の良い解を得ることに成功した。

DSBI 法

二つ目の不安定性として、計算領域境界上で発生する高周波モードが知られている。潮汐流の計算を行うためには外洋につながる境界において水位の変動を境界条件として与えるが、この境界において局所的な数値振動が発生する。この水位境界上における不安定性を解決するために、本研究では Discontinuous Surface-elevation Boundary Implementation 法 (DSBI 法) を新しく考案し、提案する。この手法は、通常は基本境界条件として厳密に与えられる水位境界条件を、弱解の形で近似的に与えられるように定式化することによって、境界における不安定性を取り除く手法である。このユニークな定式化の妥当性と有効性は、解析的及び数値的手法によって本論文中において詳細に確かめられた。以下、擬似気泡関数と DSBI 法を組み合わせた有限要素解法を QB-DSBI 法と呼ぶ。

提案手法による東京湾の流況予測

東京湾と相模湾を含む海域の潮流計算によって、幾つかの従来法と QB-DSBI 法とを比較した。その結果、従来法では数値振動による不安定性が顕著に現れたのに対し、QB-DSBI 法では非物理的な振動は見られず、安定に解が得られた。また、計算で得られた水位について実測値と比較した結果良好な一致を得た。さらに、節点数約 15 万、要素数約 30 万の非常に解像度の高い非構造格子を用いて潮流計算を行った結果、従来の数値モデルでは報告されていない流れの詳細構造を観察することができた。

計算システムの構成

本研究の中で構築した計算システムは、数値地図からの境界線の抽出、海底の地形を考慮した非構造格子の作成、浅水長波方程式の有限要素計算、計算結果の可視化という、計算モデルの作成から結果の可視化までの一連の機能をすべて実現するソフトウェア群によって構成されている。また、流動計算プログラムには Message Passing Interface による並列計算機能が実装されており、必要な場合には PC クラスタなどの並列計算環境での高速な計算が可能である。

結言

沿岸海域で発生する環境問題や自然災害の理解・予測・対策への適用を目指して、非物理的な数値粘性を加えることなく、浅水長波流れを高精度に解くことのできる有限要素解法を提案した。水位境界条件の安定化、高精度化手法として提案した DSBI 法は基本境界条件の代替的な実装法として非常にユニークであり、且つその精度と安定性は解析的、数値的手法によって詳細に確認された。

提案した有限要素解法である QB-DSBI 法を用いて東京湾を含む海域の潮流計算を行った結果、高い解像度で精度良く流れの構造を再現することができた。これらの検証問題によって、QB-DSBI 法が沿岸海域の流況予測に対して大変有効であることが確認された。今後、水中の輸送現象や自然災害対策のための流況予測計算への応用が期待される。

