非構造格子モデルによる波浪と流れの双方向結合シミュレーションに関する基礎的検討

 九州大学
 学生会員
 升永史織

 九州大学
 井手喜彦

 九州大学
 正会員
 山城
 賢

九州大学 フェロー 橋本典明

1. はじめに

海洋表層の流れは様々な力によって駆動されている。海面せん断応力は風によって海面が引きずられることで生じる力であり、風から海洋へ伝わる運動量の大きさは海面抵抗係数によって表現される。海面抵抗係数は風や大気安定度に依存するほか、波浪場にも依存している。また、浅海域において流れと波浪が共存するために生じるラディエーション応力も流れに作用する力の一つである。一方、波浪場も流れ場(水位、流速)に依存して変化する。このように波と流れの状態は互いに影響を及ぼし合っているため、精度の高い計算を実施するには波と流れの相互作用を考慮することが必要である。しかし、これまで非構造格子系を採用した海洋流動モデルを用いた波と流れの双方向結合シミュレーションはあまり行われてこなかった。そこで、本研究では非構造格子モデルである FVCOMを用いて波と流れの双方向結合計算を実施し、経験式や観測値と比較検証することで、FVCOMで流れと波のカップリング計算を実施する際の問題点を把握し、実用化に向けたモデルの改良を試みた。

2. シミュレーションモデル

2. 1 モデルの概要

本研究では、非構造格子系を採用した海洋流動モデル $FVCOM(Finite\ Volume\ Coastal\ Ocean\ Model)^1)$ を用いた。また $FVCOM\ C$ は、第 3 世代の沿岸波浪推算モデル(SWAN)を非構造格子系に対応させた $SWAVE\ E$ ジュールが組み込まれており、波と流れのカップリング計算が可能である。しかし、 $SWAVE\ E$ ジュールについての計算精度の検証は十分になされておらず、計算が不安定になることも多い。

2. 2 計算概要と検証方法

まず、矩形の単純地形を用いて海面境界に一様で定常な風(風速は 10~40 m/s、風向は y 軸方向)を与えて数値 実験を実施した(図-1). 計算領域は x, y 軸方向ともに 10 km であり、メッシュサイズは 1 km である. また、図-2 に示す九州西部海域を対象とした実地形での計算も行った. 最大メッシュサイズは開境界部で約 20 km, 最小メッシュサイズは伊王島と熊本付近(図の赤枠)で 1 km である. 気象外力(気圧・風)として GPV(時間解像度 1 時間、水平解像度 5 km)データを計算メッシュに線形内挿した. 計算期間は 2012 年 16 号台風来襲時(2012 年 9 月 16 日 15 時~17 日 15 時)とした. 表-1 には矩形および実地形計算での主な設定条件をまとめる. 矩形地形での計算では有義波高・有義波周期に関して図-1 の赤点(吹送距離 9 km)における値を SMB 法から算定した値と比較することでカップリング計算の問題点を把握し改良を行った. 実地形での実験では伊王島と熊本において NOWPHAS の観測データと比較し改良後におけるモデルの妥当性を検証した.

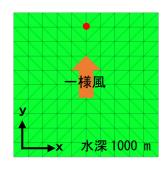


図-1 矩形の計算領域

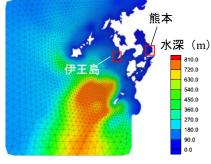


図-2 実地形の計算領域

表-1 計算条件

計算条件	矩形	実地形
ノード数	121	4427
メッシュ数	200	8157
水平格子点間隔	1000m	1∼20km
鉛直方向層	1層	1層
水深	1000m	実水深
計算時間間隔(波)	20秒	5秒
計算時間間隔(流れ)	0.01秒	0.01秒
計算期間	24時間	24時間

3. モデルの問題点

図-3 は矩形地形の計算で図中の赤点における有義波高(実線)の時間変化と SMB 法から算出した有義波高(点線)を示す. 風速10 m/s では、実験の波高は計算開始1時間で約0.6 m となり、計算終了まで安定した計算ができている. また SMB 法から算出した値とほぼ一致している. 風速30 m/s 以上では計算開始からすぐに計算が不安定となり、20時間以降から比較的値は定常となるものの、SMB 法と比較して2 倍程度過大評価している. 以上より流れと波浪のカップリング計算の問題は、計算が不安定となること(問題点1)、有義波高が過大に評価されること(問題点2)である. 二つの問題点は風速が大きいときに顕著となる.

4. モデルの改良

問題点 1 については、海面抵抗係数を修正することで有義波高を調整した.ここでは、極端であるが、風速に依存せず一定値(0.0012873)とした.問題点 2 については、波から流れに受け渡すラディエーション応力の空間分布が原因で計算が不安定となることが分かったため、応力の空間補間方法を変更し計算の安定化を試みた.図-4 左に示すように、FVCOMでは最終的に流れ場に応力を渡すためにエッジの中央での応力を求める必要がある.そのため波浪場の計算で求めたエッジ両端での応力を平均することでエッジ中央の値を求めていた.しかし、これでは応力の空間分布に不自然な高低差が生じたため、図-4 右に示すようにエッジ中央から任意の半径を持つ円を設定し、円内に含まれる応力の平均値をエッジ中央の応力とするように改良した.なお、矩形地形と実地形の実験での半径は、それぞれ 1200 m と 2500 m とした.

5. 結果

図-5 は図-3 と同様であるが改良後の結果を示す. 風速 10~30 m/s では安定して計算ができており, SMB 法の推算値とほぼ一致している. 一方, 風速 40 m/s では計算開始 13 時間後に計算が不安定になっているが, 改良前と比較し安定して計算できる時間が約 10 時間延びた. 図-6 は実地形での計算における熊本, 伊王島での有義波高の時間変化を示す. 観測値と計算値を比較すると, 伊王島では最大で約 1.5 m の差が生じる時間帯もあるが, 最大値の

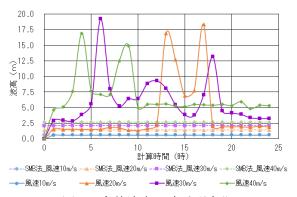


図-3 有義波高の時系列変化

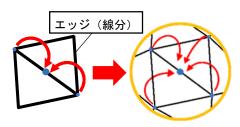


図-4 ラディエーション応力の与え方 ((左) 改良前,(右) 改良後)

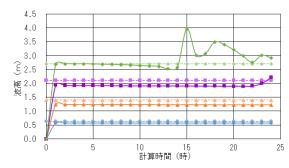


図-5 有義波高の時系列変化(改良後)

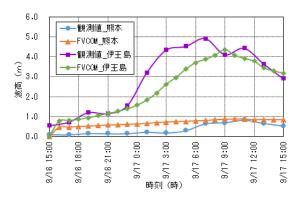


図-6 有義波高の時系列変化(実地形)

差は約30cmであった.また,熊本では基本的に観測値に比べ計算値が大きいが最大値はほぼ一致している.

6. おわりに

本研究では、まず FVCOM による波と流れのカップリング計算の問題点を把握した。主な問題点は計算が不安定であること、および有義波高が過大評価されることであった。これらの問題点に対し、海面抵抗係数の変更およびラディエーション応力の空間補間方法の修正を行った。その結果、計算の安定性と計算精度を向上させることができた。本研究は、文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)の一環として、実施したものである。参考文献

1) Chen et al.(2003): An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Vol.20, pp159-186