

波・流れ・地形変化の相互作用を考慮した非構造格子シミュレーションモデルの開発

九州大学大学院 学生会員 ○奈永卓也

九州大学大学院 正会員 井手喜彦 山城 賢 杉村佳寿

1. はじめに

沿岸域の流れは様々な力によって複雑に駆動されており、波によって生じる Radiation 応力の存在は流れ場を変化させる。一方、波浪場も水位や流れの場に依存して変化する。そして、流れと波が混在した複雑な流動場の作用により地形変化が生じ、地形条件が変わることで流れ場や波浪場も変化する。特に、台風襲来等の擾乱時には平常時の潮汐流による作用に加え、波による作用が地形変化に大きく影響するため、精度の高い計算を行う場合、相互作用を考慮したカップリングモデルを用いる必要がある。しかし、波、流れ、地形変化の相互作用を考慮でき、かつ海岸地形の再現性が高い非構造格子を採用したモデルの構築に関する研究例は少ない。そこで本研究は、既往の非構造格子モデル同士をカップリングすることで波、流れ、地形変化の相互作用を考慮したシミュレーションモデルを開発した。

2. カップリングモデルの概要

2.1 カップリングに使用したモデル

流れ・地形変化の計算には、海洋流動モデル FVCOM(Finite-Volume Community Ocean Model ver. 3.2)を用いた。本モデルは水平空間方向に非構造格子を採用しており、複雑な海岸線を詳細に表現できるため、高精度な計算が期待できる。FVCOM には SWAVE と呼ばれる波浪カップリング計算のためのモジュールが用意されているが、計算

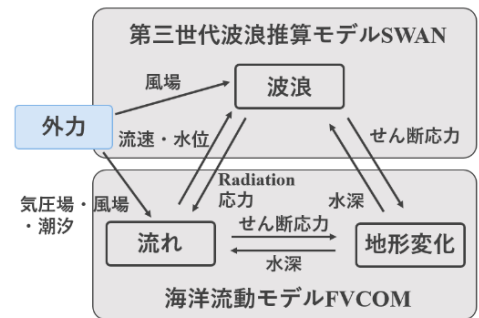


図-1 カップリングモデルの模式図

の不安定性および有義波高の過大評価などの深刻な問題点が確認されている。また、波と流れの計算で同一の計算メッシュを用いるため、波の計算に膨大な計算コストが生じるという課題もあった。そこで本モデルは、波の計算には非構造格子に対応している第三世代波浪推算モデル SWAN(Simulating Waves Nearshore)を FVCOM とカップリングすることで流れと波浪の計算で異なる計算時間間隔、計算メッシュを設定可能にした。

2.2 変数の受け渡し

本モデルは SWAN を基にした波浪計算、FVCOM を基にした流れ計算と地形変化計算からなる (図-1)。升永らにより、流れから波浪へ流速・水位を受け渡し、波浪から流れへ Radiation 応力による力の受け渡しを行う波と流れの相互作用を考慮したモデルが開発された。本研究では、波浪と流れの相互作用に加え、波浪計算から地形変化計算へせん断応力を受け渡すことで波・流れ共存場における地形変化計算を行った。さらに、地形変化に伴って変化する水深を波浪計算に受け渡すことで、波・流れ・地形変化の3方向結合を行った。

3. 波・流れ共存場における地形変化計算

3.1 底面せん断応力の算定手法の改良

波・流れ共存場における底面せん断応力の算定には、流れ場の平均流速と波浪場の軌道流速振幅を代表値として、それぞれ流れ場と波浪場のせん断応力を算出し、式(1)のように時間平均値 τ_m として算出する方法²⁾が一般に用いられる。なお、 τ_c は流れによる底面せん断応力、 τ_w は波による底面せん断応力である。しかし現実には、底面近傍における流速は確率分布を持って変動しており、代表値である平均流速と底質輸送量の間には強い非線形性が存在する。そこで本研究では、中川ら³⁾に従って底面近傍の流速は流れ場の平均流速を平均値、波の軌道流速の RMS 値を標準偏差とした正規分布に従うと仮定し、流速分布に対して式(2)を用いて底面せん断応力の変動分

表-1 地形変化計算に用いた式

$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right]$	(1)
$\tau = \frac{\rho}{2} 0.041 (\omega v)^{0.16} u_t u_t ^{0.68}$	(2)
$E_{(\tau)} = \begin{cases} M(1-P_b)F_b \left(\frac{\tau}{\tau_{yield}} - 1 \right) & \tau \geq \tau_{yield} \\ 0 & \tau < \tau_{yield} \end{cases}$	(3)
$E_{total} = \int_{\tau_{yield}}^{\infty} P_{(\tau)} E_{(\tau)} d\tau + \int_{-\infty}^{-\tau_{yield}} P_{(\tau)} E_{(\tau)} d\tau$	(4)

布 $P(\tau)$ を求め、式(3)の侵食量算定式を用いて底面せん断応力の変動分を考慮した侵食量 E_{total} を算出した。ここで、 M は侵食速度係数、 P_b は空隙率、 τ_{yield} は限界せん断応力である。

3.2 単純地形を用いた検証

波浪計算から地形変化計算へせん断応力の受け渡しを行った場合と行わなかった場合とを比較し、波浪によるせん断応力が地形変化へ与える影響について確認した。計算メッシュは矩形 (x,y 軸方向ともに 20 km) の単純地形、10 m の一様水深で実験を行った (図-2)。開境界から x 軸方向に有義波高 1.5 m、平均周期 5.0 s のスペクトル波を入力し、同じく x 軸方向に 10 m/s の一様な風を与えた。その他、計算条件の詳細を表-2 に示す。図-3 に波によるせん断応力の受け渡しを行わなかった場合(nowave)と、底面流速の確率分布を考慮したせん断応力を受け渡した場合(prob.)、式(1)の平均せん断応力を受け渡した場合(ave.)におけるそれぞれの地形変化を示す。波によるせん断応力の受け渡しを行わなかった計算では、ほとんど地形変化が見られなかったのに対し、受け渡しを行うことで侵食が見られたことから、波によるせん断応力が地形変化に大きな影響を与えていることがわかる。また、平均せん断応力を与えた計算では最大でも 6 cm 程度の侵食であったのに対し、底面流速の確率分布を考慮したせん断応力を与えた計算では、20 cm 以上の侵食した。これは、

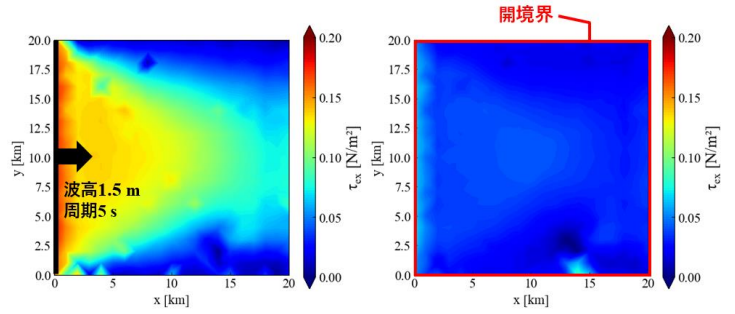


図-2 過剰せん断応力の平面分布 (左: 流速の確率分布を考慮したせん断応力, 右: 平均せん断応力)

表-2 計算条件

SWAN	条件	FVCOM
121	ノード数	441
200	メッシュ数	800
2 km	水平格子点間隔	1 km
10 m	水深	10 m
	鉛直方向層数	10層
60 s	計算時間間隔	5 s
120 h	計算時間	120 h

平均せん断応力による地形変化計算では過剰せん断応力が最大でも 0.08 N/m²程度であったのに対し、底面流速の確率分布を考慮することで、過剰せん断応力が 0.15 N/m²を超えた地点もあり、侵食量に差が生じたためである (図-2)。本計算ケースにおける、平均流と波の軌道流速による過剰せん断応力を図-4 に示す。平均せん断応力を与えた場合に比べ、底面流速の確率分布を考慮した場合、一定の平均流 U_c に対して波の軌道流速 u_{rms} が

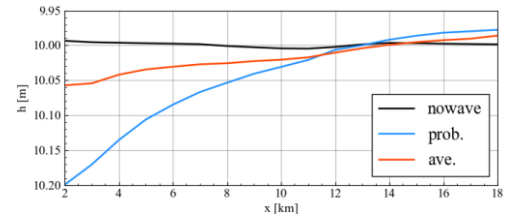


図-3 水深の断面図

変化した時の過剰せん断応力の変化量が大きいことから、底面流速の確率分布を考慮することで、波によるせん断応力を考慮した時の侵食量が大きくなる事が分かる。

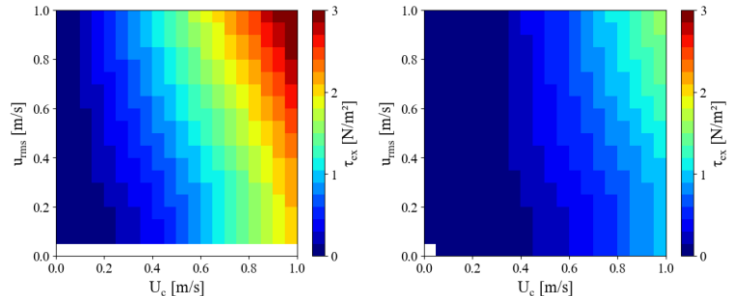


図-4 平均流と波の軌道流速による過剰せん断応力 (左: 流速の確率分布を考慮したせん断応力, 右: 平均せん断応力)

4. 終わりに

非構造格子モデルの FVCOM と SWAN を基にして、波、流れの相互作用に地形変化を加えたの 3 方向結合モデルの開発を行った。単純地形を用いて、波・流れ共存場の地形変化モデルと既存の流れ場の地形変化モデルによる計算を比較することで、波によるせん断応力が地形変化に与える効果を確認した。また、底面流速の確率変動を考慮することで過剰せん断応力が大きくなり、地形変化量に差が生じることを明らかにした。

参考文献

- 1) 升永史織・山城 賢・井手喜彦 (2021) : 波浪と流動の相互作用を考慮した非構造格子カップリングモデルの開発, 令和 3 年度土木学会西部支部研究発表会概要集 CD-ROM
- 2) Whitehouse, R., R. Soulsby, W. Roberts and H. Mitchener (2000): Dynamics of estuarine muds, Thomas Telford Publications, 210 p.
- 3) 中川康之・灘岡和夫・八木宏・二瓶泰雄・川崎浩司 木村彰宏・久保田踊児・内川直洋 (2015) : 底質輸送量算定における底面流速変動の確率分布を考慮した新たな外力評価手法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, I_523-I_528