

位相解像型波浪モデルを用いた風波発達を考慮する高波発達モデルの開発
Modeling of High Waves Considering Wind-wave Growth Based on Phase-resolving Wave Model

○佐藤笙子・森 信人・志村智也・宮下卓也

○Shoko SATO, Nobuhito MORI, Tomoya SHIMURA, Takuya MIYASHITA

It is becoming important to consider the growth of wind waves due to strong typhoon winds in a bay. However, wave growth in a bay is an intermediate phenomenon hardly modeled by either spectral wave model or phase-resolving wave model. One way to work on this problem is to add a wind-wave growth term to the phase-resolving wave model. In this study, a wind-wave growth term based on Miles' theory that describes the development of wind waves due to a local wave slope is added to the conventional wind stress term. In addition, the momentum distribution between waves and currents is introduced. Then, the distribution ratio is formulated depend on wave energy and is optimized using the results of the spectral wave model. Wind-wave development could be expressed in the phase-resolving wave model by introducing wind-wave growth term, and the wave development calculated in the optimized model showed a good agreement with that in the spectral wave model. (158 words).

1. はじめに

2018年台風21号等、強い台風に伴って湾内で発達した高波により沿岸部の被災が発生している。このような沿岸災害の減災には、湾内の強風による風波の発達と地形による波浪変形を同時に考慮することが重要であるが、これらはそれぞれ位相解像型波浪モデルとスペクトル型波浪モデルにより別々に評価される。そこで本研究では、風波発達を考慮した位相解像型波浪モデルを開発することを目的とする。強風条件下の浅海を対象にして、局所的な波形勾配による風波発達を示す波浪発達項を浅水方程式に導入した。その後、波浪と流れの運動量分配係数を導入した。さらに、導入した運動量分配係数について、波浪発達依存するよう定式化を行い、スペクトル型波浪モデルの結果を用いて最適化を行った。その後、波が準単色線形波であるという仮定を用いずに波浪発達項を表現した。

2. 波浪発達項の導入

非線形浅水方程式の従来の風応力項に加えて、Miles理論をもとにした局所的な波形勾配を考慮する波浪発達項を方程式中の圧力項に追加した。従来の風応力項は次式で示される。

$$\rho_a u_*^2 / \rho(\eta + h) \quad (1)$$

ここで、 ρ_a は空気密度、 u_* は摩擦速度、 ρ は水の密度、 η は自由水面水位、 h は水深である。Miles理

論に基づく波浪発達項 (Miles 項) は以下で示される。

$$-\rho_a u_*^2 \left(\frac{2\beta}{\kappa^2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right) / \rho \quad (2)$$

ここで、 β はMilesのエネルギー輸送係数、 κ はカルマン定数である。沿岸部の波浪計算を行う非線形浅水方程式を基礎式とする非静水圧版 XBeach (Roelvink, 2009) に上記のMiles項を差分化して導入した。

3. 波浪と流れの運動量分配係数の導入

2.の位相解像型波浪モデルは波と流れ間の運動量輸送を表現できない。そこで風から海面への運動量 τ を分配係数 α を用いて、以下のように波浪発達分 $\tau_{develop}$ と吹送流分 $\tau_{current}$ に分離して表現した。

$$\tau = \tau_{develop} + \tau_{current} = \alpha \rho_a u_*^2 + (1 - \alpha) \rho_a u_*^2 \quad (3)$$

波浪発達分の運動量 $\tau_{develop}$ はMiles理論による水柱にはたらく応力 $\rho_a u_*^2 \frac{2\beta}{\kappa^2} k^2 \overline{\eta^2}$ に相当するので、Milesのエネルギー輸送係数を C_{miles} とし、さらに波数 k を無視すると、

$$C_{miles} = \beta k^2 = \frac{\alpha \kappa^2}{2\eta^2} \quad (4)$$

したがって、準単色線形波を仮定すると、式(2)で示されるMiles項は分配係数 α を用いて $\rho_a u_*^2 (\alpha / \overline{\eta^2} \eta) / \rho$ と表される。式(4)より α が一定値の場合、波浪発達係数 C_{miles} は水面変位の関数とな

り、波浪が発達するにしたがって小さくなる。

波浪エネルギーの波浪発達依存仮定の検証のため、有義波高の空間分布を比較した。図1は一定水深 20m の地形に一樣風速 30m/s 条件で、波高 1m 周期 10 秒の規則波が左側方境界から入射したときの有義波高の空間分布である。赤線は $C_{miles} = 0.06$ とし、分配係数 α が未導入のときの結果である。緑線は $\alpha = 0.1$ (波浪発達に 10%, 吹送流に 90% の運動量が分配される) とし、水面変位の関数である C_{miles} を用いたときの結果である。 C_{miles} が波浪エネルギーに依存するという仮定では、有義波高は吹送距離則にしたがって発達しており、固定値の C_{miles} を用いたケースで見られた過剰な波浪の発達が改善された。

4. 運動量分配係数の最適化

波浪発達初期段階では α は 1 に近く、発達が飽和すると α は 0 に漸近することが予想できる。そこで α を係数 A を用いて以下のように定式化した。

$$\alpha = -A\bar{\eta}^2 + 1 \quad (5)$$

スペクトル型波浪モデル (SWAN) の計算結果をもとに、フェッチ制限の波の発達率から A の最適化を行った。 A の最適値は、風速 10, 20, 30, 40, 50m/s のときそれぞれ 0.1, 1.6, 0.9, 0.6, 0.5 であった。例として風速 30m/s 条件での有義波高の空間分布を比較する (図 1)。固定値の α を用いたときの結果 (緑線) と、風速 30m/s のときの最適値 $A = 0.9$ を用いて α を水面変位の関数としたときの結果 (水色線), SWAN から得られた結果 (マゼンタ線) を比較した。 α を水面変位の関数とすることにより、SWAN と同様に吹送距離則にほぼしたがう波浪発達が得られた。

5. 準単色線形波を仮定しない波浪発達項の導入

ここまでは準単色線形波を仮定して、 $\partial^2\eta/\partial x^2 = -k^2\eta$ としてきたが、直接 $\partial^2\eta/\partial x^2$ を Miles 項に導入することを考える。式(4)の波浪発達係数 C_{miles} を用いると、式(2)で表される Miles 項は $-\rho\alpha u_*^2(\alpha/\bar{\eta}^2\partial^2\eta/\partial x^2)/\rho$ となる。また $\partial^2\eta/\partial x^2$ は各タイムステップにおいて 2 次精度中心差分法により空間的に離散化された。

図 2 は一樣水深 20m の地形に一樣風速 10m/s 条件で、波高 1m, 周期 10 秒の規則波が左側方境界から入射した時の、入射から 3000 秒後の波形である。青線が準単色線形波を仮定したときの結果で、赤線が準単色線形波を仮定せず $\partial^2\eta/\partial x^2$ を用いた

ときの結果である。 $\partial^2\eta/\partial x^2$ を用いる時の方が、準単色線形波仮定を用いる時に比較して水面変位のばらつきが大きく、安定して計算を行いにくいことが分かる。離散化の方法に課題が残り、今後の改良が必要である。

6. 参考文献

[1] Dano Roelvink, Ad Reniers, Ap van Dongeren, Jaap van Thiel de Vries, Robert McCall, Jamie Lescinski, 2009, Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, Coastal Engineering, 56, 11-12, 1133-1152

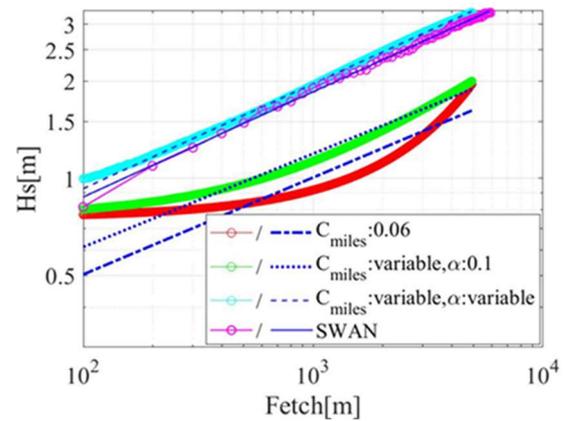


図 1: 提案されたモデルと SWAN による有義波高の空間分布と近似線 (赤・鎖線: $C_{miles} = 0.06$, α 未導入のときの結果, 緑・点線: C_{miles} が水面変位の関数, $\alpha = 0.1$ のときの結果, 水色・破線: C_{miles} , α が水面変位の関数のときの結果, マゼンタ・直線: SWAN の結果) 風速 30m/s 条件

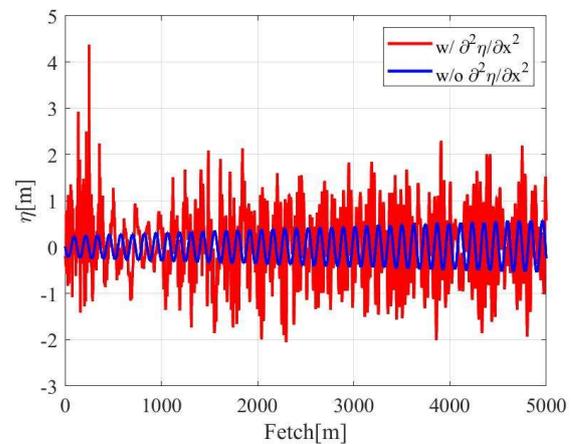


図 2: 風速 10m/s 条件で左境界から規則波を入射した時の入射から 3000 秒後の波形のスナップショット (赤: 準単色線形波仮定を用いないときの結果, 青: 準単色線形波を仮定したときの結果)