

台風高波推算に対する観測波浪方向スペクトル同化手法の開発 Development of Observed Wave Directional Spectrum Assimilation Method for Typhoon-Generated Extreme Waves

○山崎豪太・志村智也・森 信人・宮下卓也

○Gota YAMASAKI, Tomoya SHIMURA, Nobuhito MORI, Takuya MIYASHITA

We developed a system to assimilate the wave directional spectra observed by drifting buoys into the spectral wave model, WAVEWATCH III. We implemented Optimal Interpolation as data assimilation method and used quadratic programming to obtain analytical values of the directional distribution. We conducted wave simulations in the Western North Pacific, targeting the typhoon generated waves in the summer of 2022. The results showed the system reduced the error by the same amount as the assimilation of significant wave height data. In addition, it also showed wave distribution retained physical consistency. These results indicate that this system is also effective for improving wave models.

1. はじめに

地球温暖化に伴う影響は世界中で顕在化しており、日本も EA 研究により定量化が進んでいる。影響の中でも極端に強力な台風については、発生頻度割合や強度の増加が予測されており、これに伴った高波強度の増加が想定される。このため、波浪モデルによる精緻な高波予測は沿岸防災の観点から重要視されている。

そこで山崎ら(2024)¹⁾は、近年増加している漂流波浪観測ブイから得られた周波数スペクトルデータを波浪モデル WAVEWATCH III (以下 WW3) に同化し、波浪推算精度の向上を試みた。その結果、物理的に整合した修正を示し、台風到来時の有義波高・平均周期の推算精度の向上が確認された。しかし、一部で誤差増加が確認され、更なるモデル改良と精度向上の余地が残った。

本研究では、漂流ブイから得られた方向スペクトルデータを WW3 に同化した。また同化後の解析値について、有義波高データ同化手法と比較し、精度について評価した。

2. 研究手法

(1) 方向スペクトルデータ同化

WW3 によって推算されたデータ同化前の方向スペクトルに対し、同時刻に観測された方向スペクトルを同化し、方向スペクトルの解析値を作成した。WW3 と漂流ブイの方向スペクトルデータはともに離散化されているが、その解像度が異なる。

そのため、同化の際は線形内挿を用いて漂流ブイ観測データを WW3 の解像度に補間した。

(2) 同化手法

本研究では、Smitら(2021)²⁾の手法を踏襲し、最適内挿法と呼ばれるデータ同化手法を用いた。解析方程式は以下のように表される。

$$\mathbf{y}^{\text{an}} = \mathbf{y}^{\text{mod}} + \rho \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \rho \mathbf{H}^T + \sigma \mathbf{I}]^{-1} (\mathbf{y}^{\text{obs}} - \mathbf{H} \mathbf{y}^{\text{mod}}) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{y}^{\text{an}}$ は観測値、 $\mathbf{y}^{\text{mod}}$ は第一推定値、 $\mathbf{y}^{\text{obs}}$ は観測値、 ρ は空間的な相互相関関数、 $\mathbf{H}$ は観測点での第一推定値をバイリニア補間により計算する補間行列、 σ はモデルと観測の誤差の比である。

漂流ブイは周波数スペクトル $e^{\text{obs}}(f)$ と方向分布の4つのフーリエ係数 a_1, b_1, a_2, b_2 を得る。また、波浪モデルの周波数スペクトルは以下の式で得る。

$$e^{\text{mod}}(f) = \Delta\theta \sum_{\theta} E^{\text{mod}}(f, \theta) \quad (2)$$

ここで $E^{\text{mod}}(f, \theta)$ は波浪スペクトルである。方向分布のフーリエ係数 $\mathbf{m}$ は以下の式で得る。

$$\mathbf{D}^{\text{mod}}(f) = \frac{E^{\text{mod}}(f, \theta)}{e^{\text{mod}}(f)} \quad (3)$$

$$\mathbf{m}^{\text{mod}}(f) = \begin{bmatrix} (2\pi)^{-1} \\ a_1(f) \\ b_1(f) \\ a_2(f) \\ b_2(f) \end{bmatrix} = \Delta\theta \begin{bmatrix} (2\pi)^{-1} \mathbf{1}^T \\ \cos(\theta^T) \\ \sin(\theta^T) \\ \cos(2\theta^T) \\ \sin(2\theta^T) \end{bmatrix} \mathbf{D}^{\text{mod}} = \mathbf{M} \mathbf{D}^{\text{mod}} \quad (4)$$

e と $\mathbf{m}$ は(1)式で解析値を求める。 $\mathbf{m}^{\text{an}}$ から方向スペクトルを求めるために、 $\mathbf{D}^{\text{mod}}$ が高精度かつ $\mathbf{D}^{\text{an}}$ が

正の半正定値であると仮定して以下の二次計画問題の解を求めた．

$$\min_{\mathbf{D}^{\text{an}}} [\mathbf{D}^{\text{an}} - \mathbf{D}^{\text{mod}}]^T [\mathbf{D}^{\text{an}} - \mathbf{D}^{\text{mod}}] \quad (5)$$

$$\text{subject to } \mathbf{M}\mathbf{D}^{\text{an}} = \mathbf{m}^{\text{an}}, \mathbf{D}^{\text{an}} > 0 \quad (6)$$

本研究では， σ を0.3と設定した．また， ρ は大円距離が900kmより小さい場合にのみ計算した．

3. 実験概要

本実験では，2022年9月17日0時(UTC)を対象とし，観測方向スペクトルを同化した．これは2022年で最も強力な台風であるNANMADOLが日本に接近した期間内である．得られた解析値から有義波高を算出し，精度検証を実施した．その際，真値として全国港湾海洋波浪情報網(Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS : NOWPHAS)の観測値を使用し，観測点に最も近い格子点の解析値と比較した．また，有義波高データ同化による結果と比較した．

4. 結果

図1は2022年9月17日0時(UTC)における，データ同化なし(パネルa)，有義波高データ同化実施後(パネルb)，方向スペクトルデータ同化実施後(パネルc)の有義波高の空間分布を示したものである．日本沿岸の各点はNOWPHASの観測点を示しており，濃淡は誤差を表示している．データ同化なしでは，高知県沿岸の観測点で1m近い誤差がみられるが，方向スペクトルデータ同化によりそれらの誤差が減少している．誤差減少の程度は有義波高データ同化と同等である．

また，有義波高データ同化では高波推算領域全体で有義波高が大きく減少しているが，方向スペクトルデータ同化ではデータ同化無しの結果と同様の波高分布を示している．これは，方向スペクトルデータ同化が，波浪モデルが持つ物理的整合性を保持しやすい同化手法を採用しているからであると考えられる．

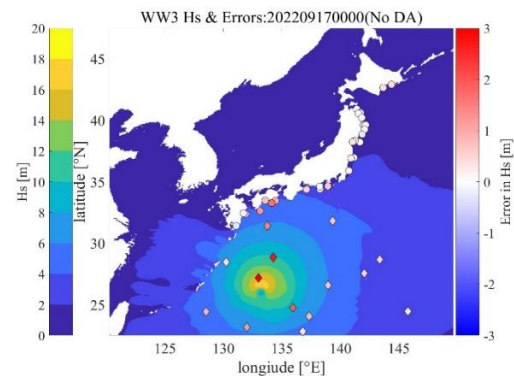
5. 結論

本研究では，太平洋に展開した多数の漂流ブイから得られた方向スペクトルデータをWW3に同化し，精度検証を実施した．その結果，有義波高に関して，有義波高データ同化と同等の誤差減少が見られた．また，物理的に整合のとれた空間分

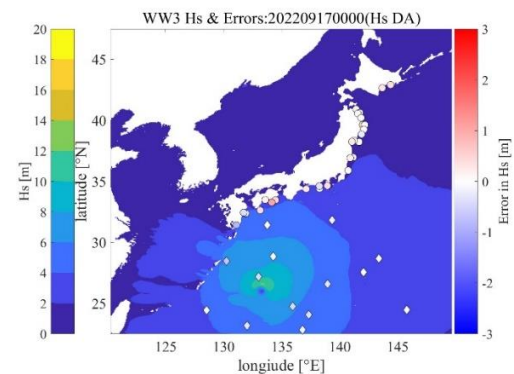
布が確認された．これは，方向スペクトル同化が台風高波推算の精度向上に有効であることを示している．

7. 参考文献

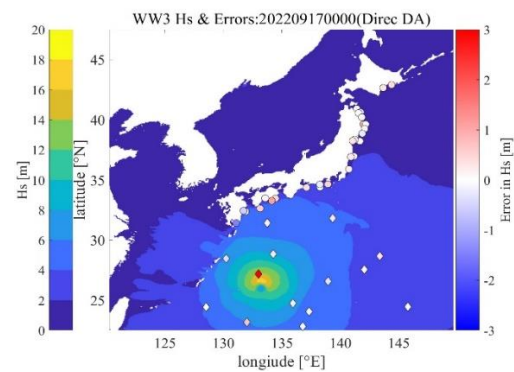
- 1) 山崎豪太, 志村智也, 森信人, & 宮下卓也. (2024). 漂流ブイ観測周波数スペクトルのデータ同化による台風高波推算. 土木学会論文集, 80(17), 24-17026.
- 2) Smit, P. B., Houghton, I. A., Jordanova, K., Portwood, T., Shapiro, E., Clark, D., Sosa, M., and Janssen, T. T.: Assimilation of significant wave height from distributed ocean wave sensors. Ocean Modelling, 159, 101738, 2021.



(a) データ同化なし



(b) 有義波高データ同化



(c) 方向スペクトルデータ同化

図-1; 2022年9月17日0時(UTC)におけるデータ同化なし・有義波高データ同化・方向スペクトルデータ同化の誤差