

深層学習を用いた 定点波浪方向スペクトル推算手法の開発

○田中陽二*・増田和輝*

・ Chathura Manawasekara**・樋口直人**・原信彦**

*東洋建設, **エコー

1 序論：研究の背景と課題

高度な海象情報の必要性

- 有義波諸元（波高・周期・波向）だけでは、うねり性波浪や多方向性波浪などの情報が得られない。
- 海上工事の作業可否判断等の高度化において、波浪方向スペクトル（以下，方向スペクトル）の情報が不可欠である。

従来手法（数値波浪モデル）の課題

- WAVEWATCH III（以下，WW3）等の物理モデルは高精度だが，計算負荷が膨大となる。
- リアルタイム推算や，大規模アンサンブルデータ（d4PDF）への適用が困難。

既存AI手法の課題

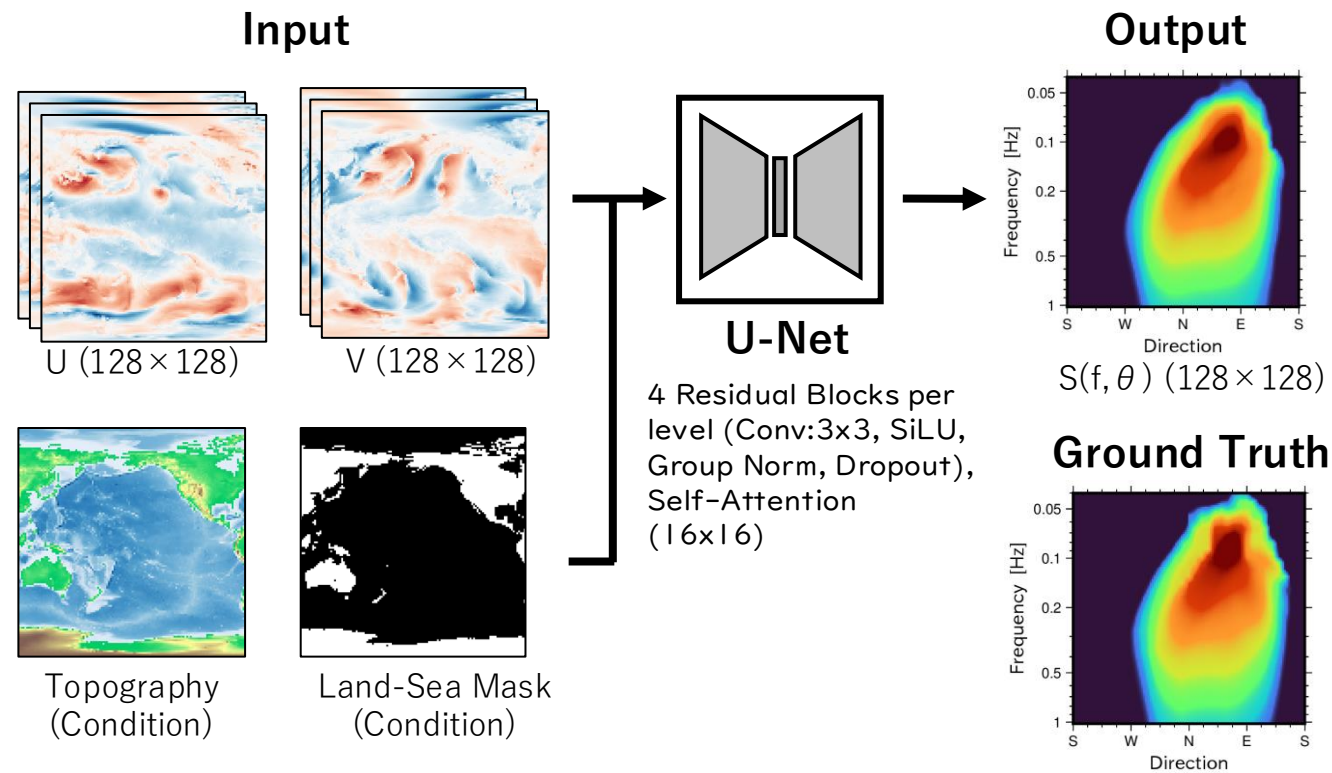
- スカラー量（有義波高など）の推定が主流。
- 既往の方向スペクトルの推定は，データ作成などの前処理が煩雑で，汎用性に欠ける（Song, 2023）。

研究の目的

- 風速場から定点の方向スペクトルを，直接かつ高速に推定する，深層学習モデルを開発すること．

アプローチ

- 2次元データの処理に優れた深層学習モデル「U-Net」を採用．
- 入力値の「データ範囲」や「データ期間」で，感度分析を実施．



図：U-Netによる方向スペクトルの推定手法

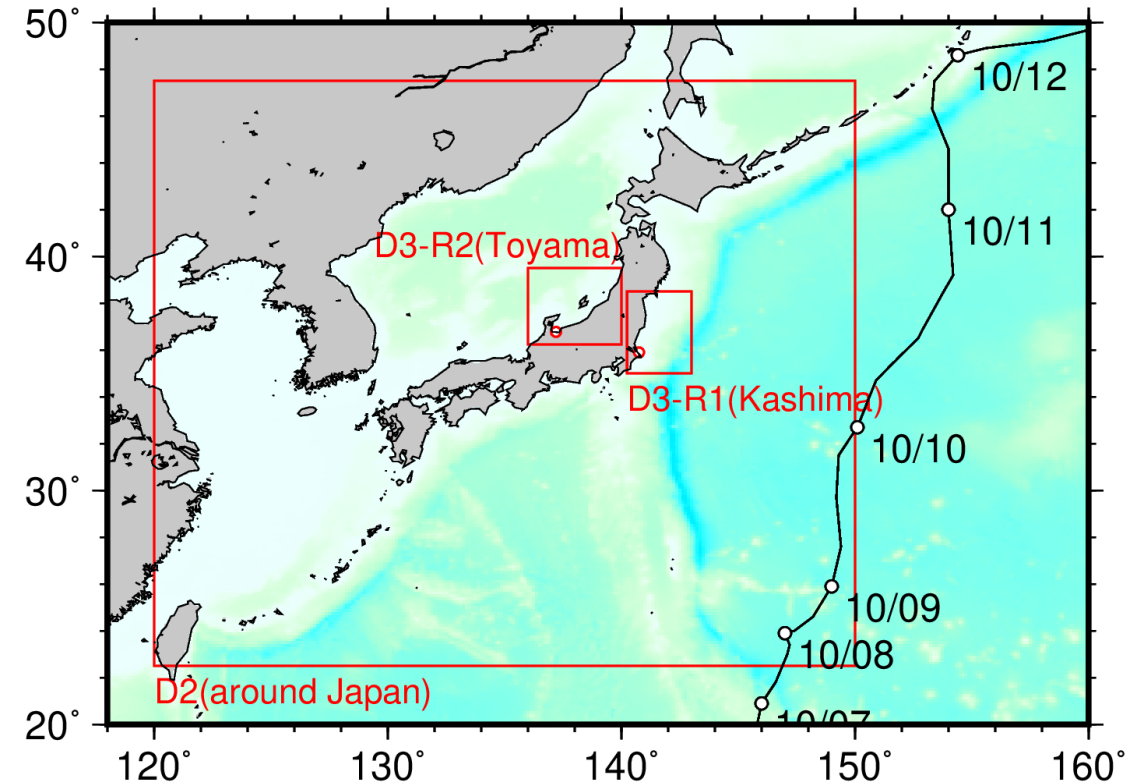
2 方法：教師データとモデル

教師データ

- 鹿島，富山の方向スペクトルの推算値．
- WW3を用いて算出．10年間（2015～2024年）の推算結果を使用．

深層学習モデル

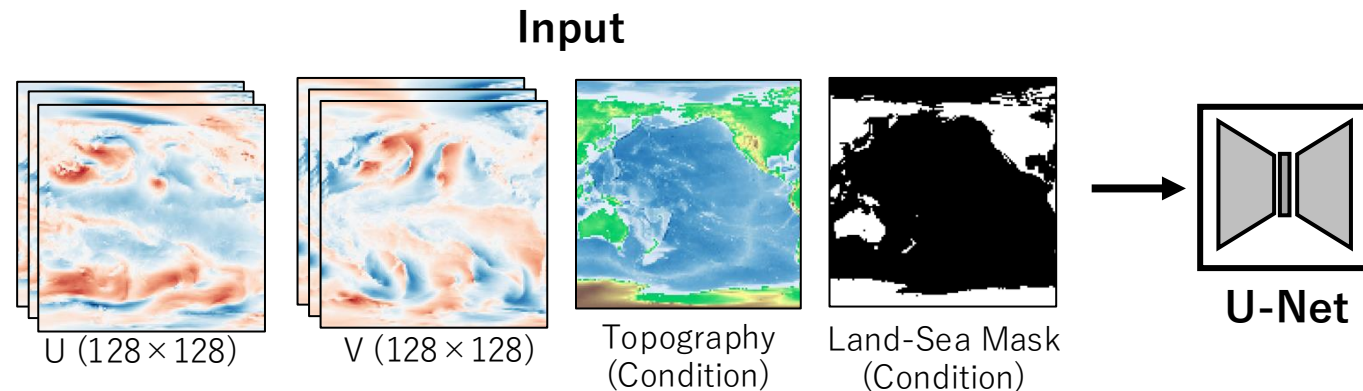
- 入力（風速場）と出力（定点方向スペクトル）を，ともに2次元データとして処理（U-Net）．
- 8年間を学習期間とし，2年間（2023～2024年）を検証期間とした．



図：WW3の計算メッシュと台風経路（T2419）

入力データ

- 気象庁GSM（0.5° 格子）の10m高度風速（U, V）
- 固定の条件値（標高，海陸判定）



図：U-Netの入力データ

感度分析の条件

- 入力値の「範囲」と「期間」について，感度分析を実施．

表：入力風速場の設定

項目	設計（ケース番号）
範囲	A：日本全域
	B：太平洋全域
期間	0：対象時刻のみ
	3：対象時刻から3日前まで

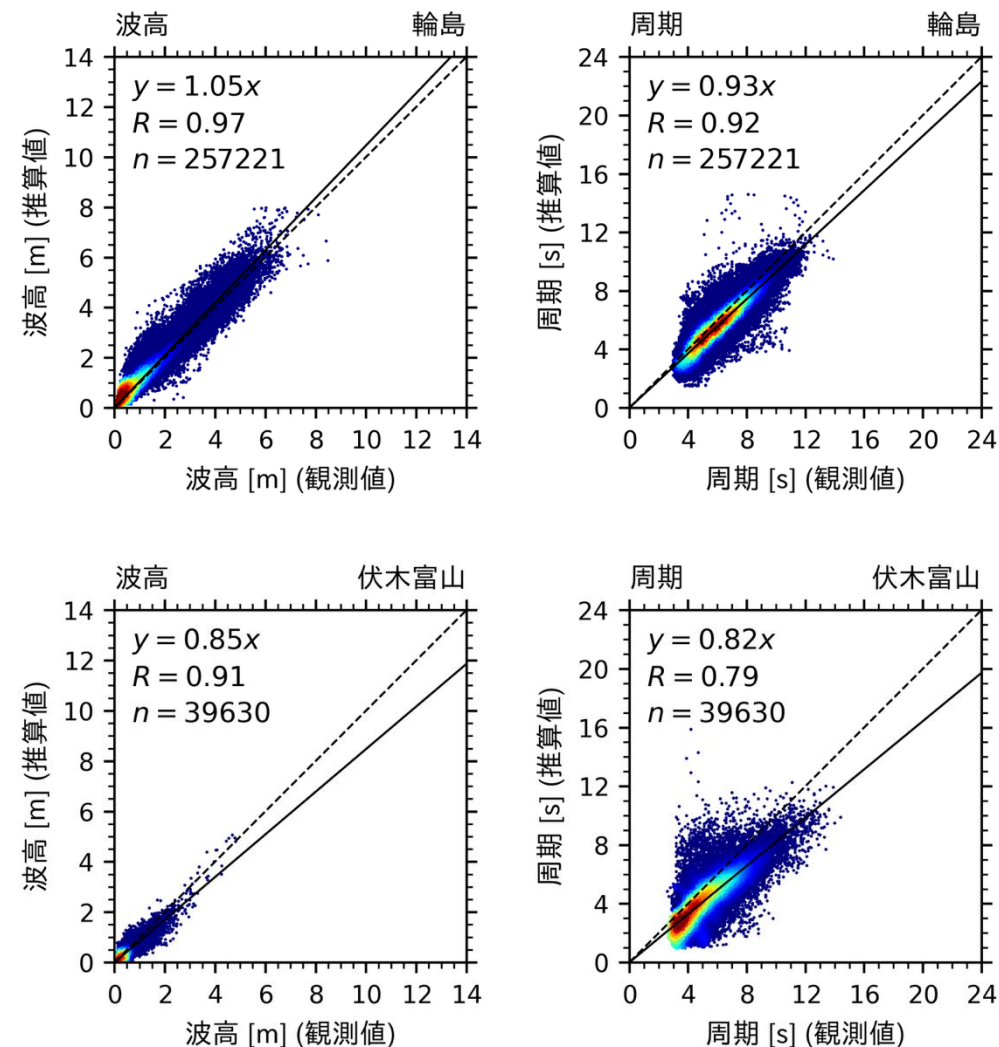
表：WW3とナウファスの相関解析結果（10年間分）

地点	波高[m]			周期[s]			波向
	相関係数	回帰係数	RMSE	相関係数	回帰係数	RMSE	
富山	0.89	0.82	0.22	0.84	0.85	1.34	0.77
伏木富山	0.91	0.85	0.15	0.79	0.82	1.45	0.69
輪島	0.97	1.05	0.27	0.92	0.93	0.74	0.78
小名浜	0.89	1.00	0.28	0.80	0.97	1.02	0.71
常陸那珂	0.89	0.93	0.31	0.78	1.01	1.02	0.63
鹿島	0.93	0.95	0.26	0.84	0.96	0.97	0.74

- 富山湾の波高・周期はやや過小評価傾向。
- 周期は、ややバラつきが大きい。



- 概ねの波浪特性を再現しており、教師データとして使用できると判断された。



図：輪島（上）と伏木富山（下）の相関解析結果

期間の影響

- 波高と波向は、1日前までで十分な精度を確保できた。
- 周期・方向分散角は、3日前まで期間を拡張することで、**精度が増加した**。
- ただし、鹿島では、7日前まで拡張すると、逆に精度が低下した。
- 予測に寄与しない特徴量が**ノイズとして増加したため**と考えられる。

表：期間変更による相関係数の応答結果（U-Net）

計算条件			相関係数			
地点	範囲	期間	波高	周期	波向	$\sigma_{\theta,p}$
鹿島	太平洋 全域	対象時刻のみ	0.84	0.59	0.86	0.33
		1日間	0.90	0.69	0.91	0.41
		3日間	0.93	0.76	0.93	0.54
		7日間	0.89	0.73	0.91	0.55
富山	日本 全域	対象時刻のみ	0.89	0.68	0.89	0.43
		1日間	0.93	0.81	0.93	0.55
		3日間	0.93	0.88	0.93	0.61



- 期間の影響は、特に、周期やうねりを高精度化させる。
- ただし、拡張しすぎると逆効果。

範囲の影響（鹿島）

- 太平洋全域への範囲拡張で、周期と方向分散角（うねり）の精度が向上。
- 遠方からの波浪が影響するためと考えられる。

範囲の影響（富山）

- 太平洋全域へ範囲を拡張すると、かえって精度が低下。
- 遠方データとの相関が低く、狭い範囲の入力データ密度を上げる戦略が適切だったと考えられる。



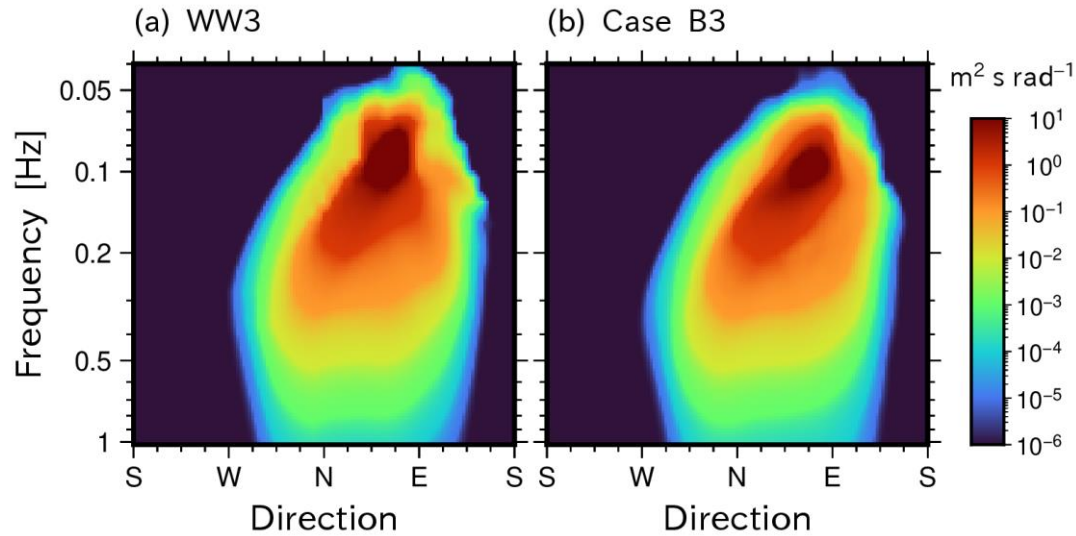
- 地点に応じた最適な空間設定が重要。

表：範囲変更による相関係数の応答結果（U-Net）

計算条件			相関係数			
地点	期間	範囲	波高	周期	波向	$\sigma_{\theta,p}$
鹿島	3日間	日本全域	0.93	0.70	0.94	0.46
		太平洋全域	0.93	0.76	0.93	0.54
富山	3日間	日本全域	0.93	0.88	0.93	0.61
		太平洋全域	0.92	0.85	0.91	0.59

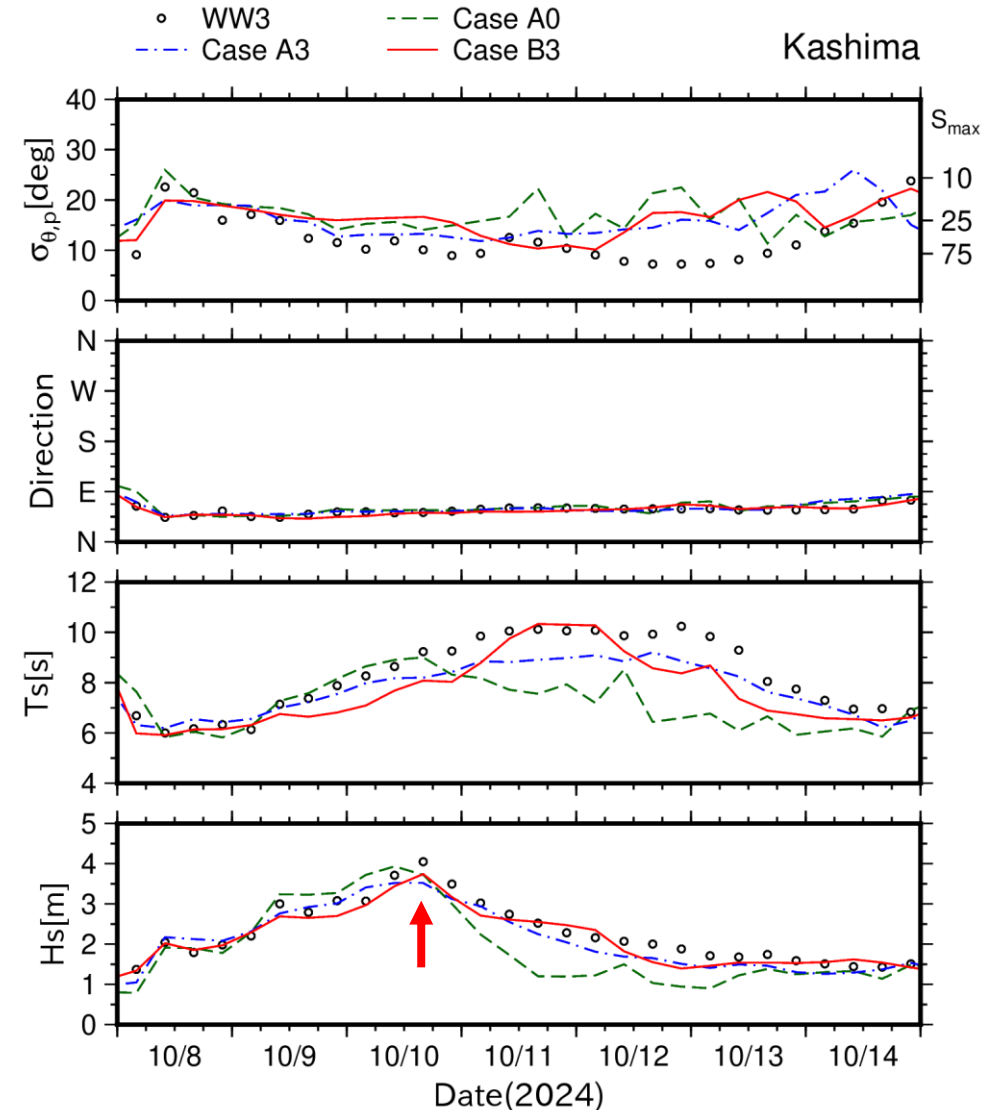
推算結果

- 波高ピーク時（台風通過時）の波高はWW3と良好に一致。
- 周期と方向分散角は、やや過小評価。



図：方向スペクトル（10月10日16:00）

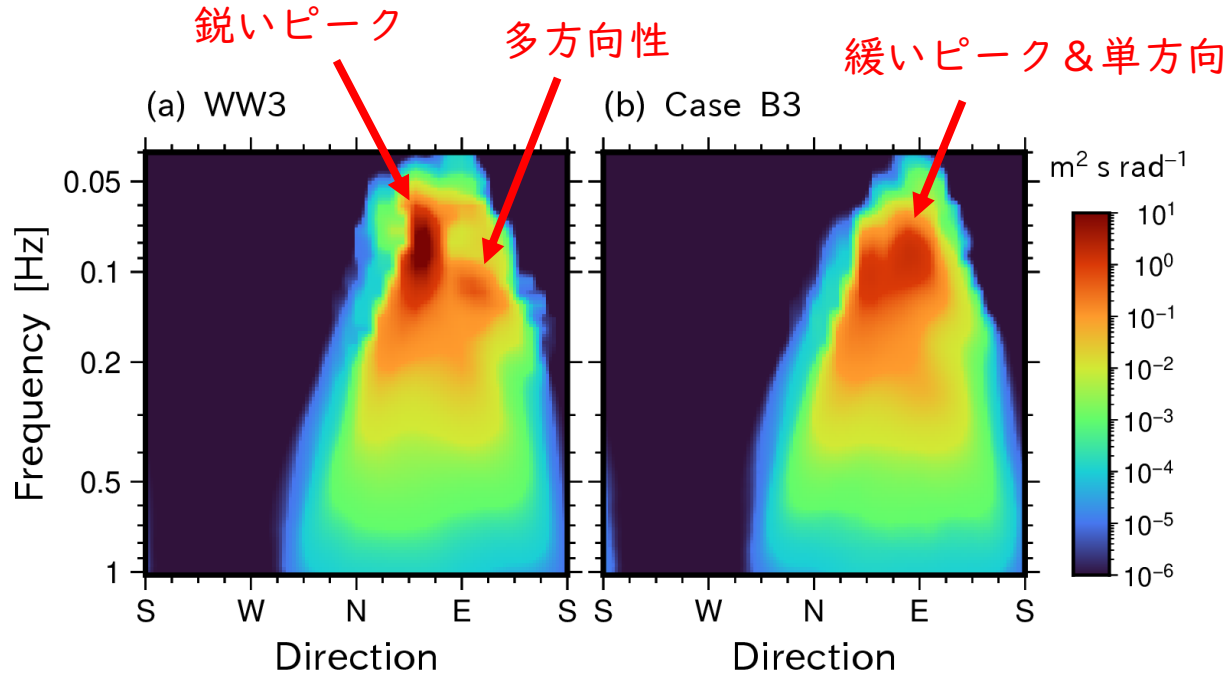
- 方向スペクトル形状は概ね一致していた。



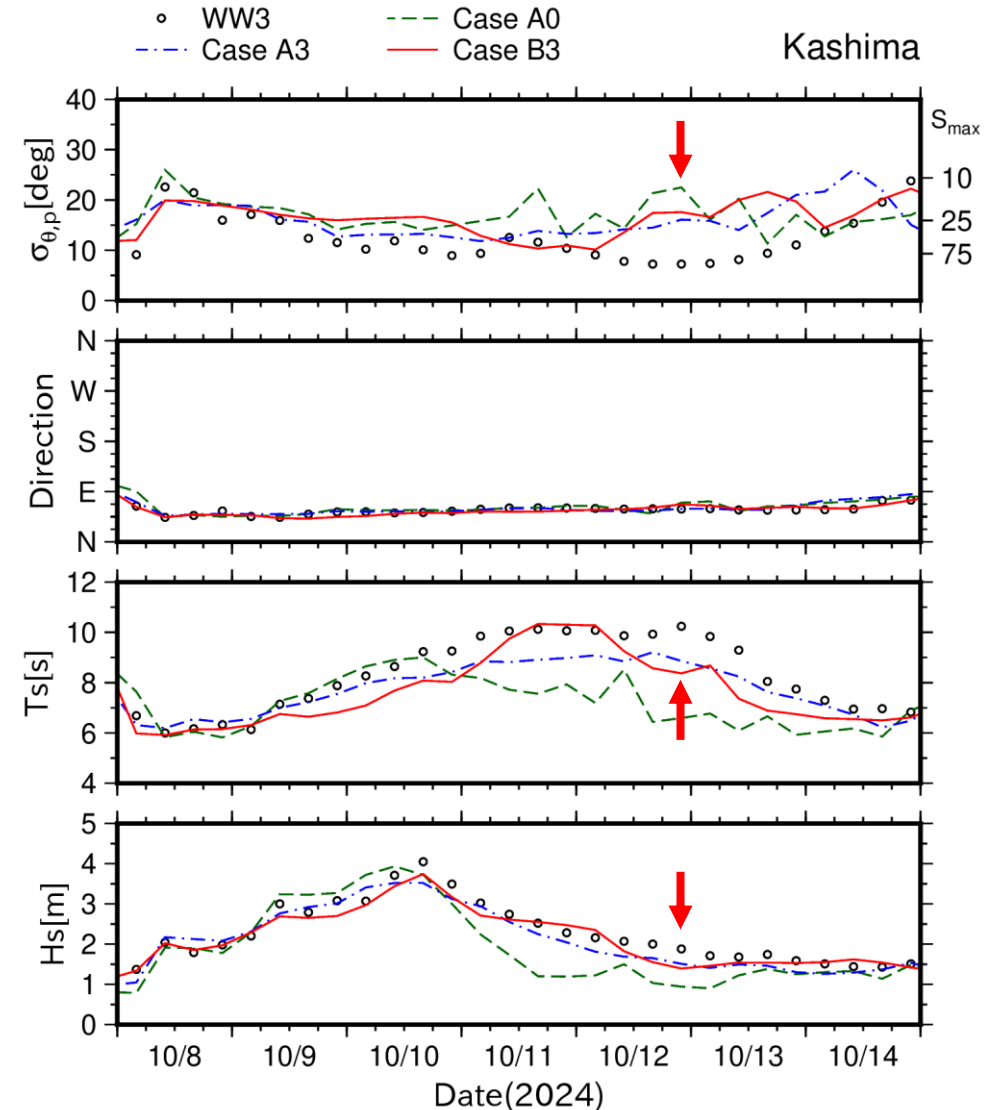
図：鹿島における波浪諸元の時系列変化

結果：推算事例① 鹿島（台風T2419の高波浪）

- 台風通過後（10月12日）のうねりの再現精度が低下。

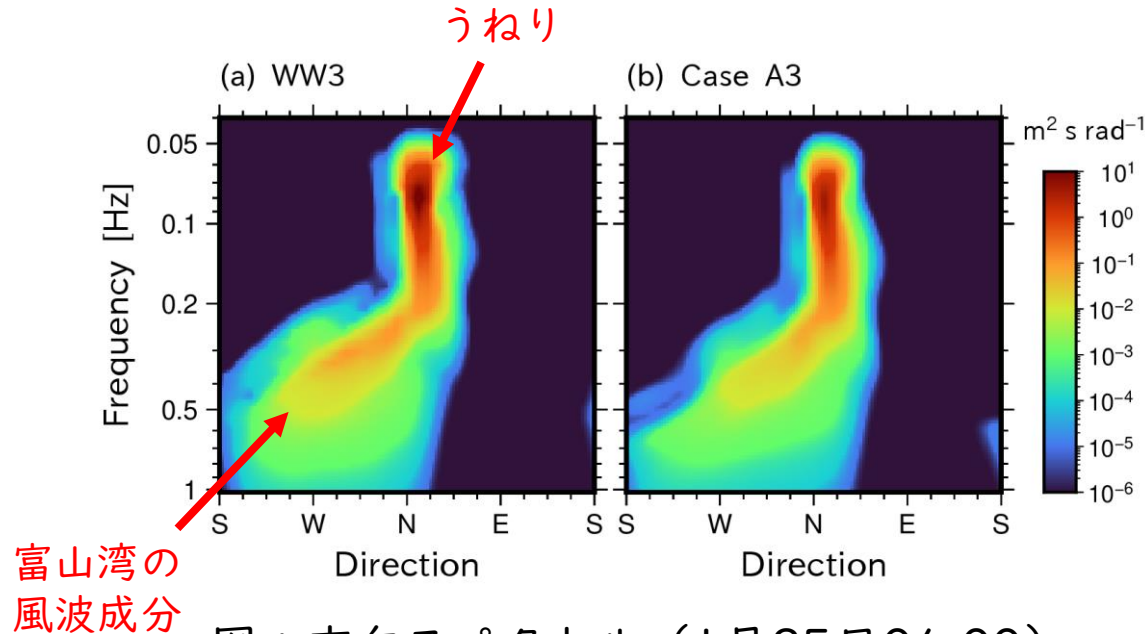


- ① データ不足：方向集中度 $S_{max} = 124$ は、全データの上位 1.6% の極めて稀なうねりであり、学習データが不足した。
- ② アルゴリズム特性：損失関数の MSE はピークが平滑化されやすい。



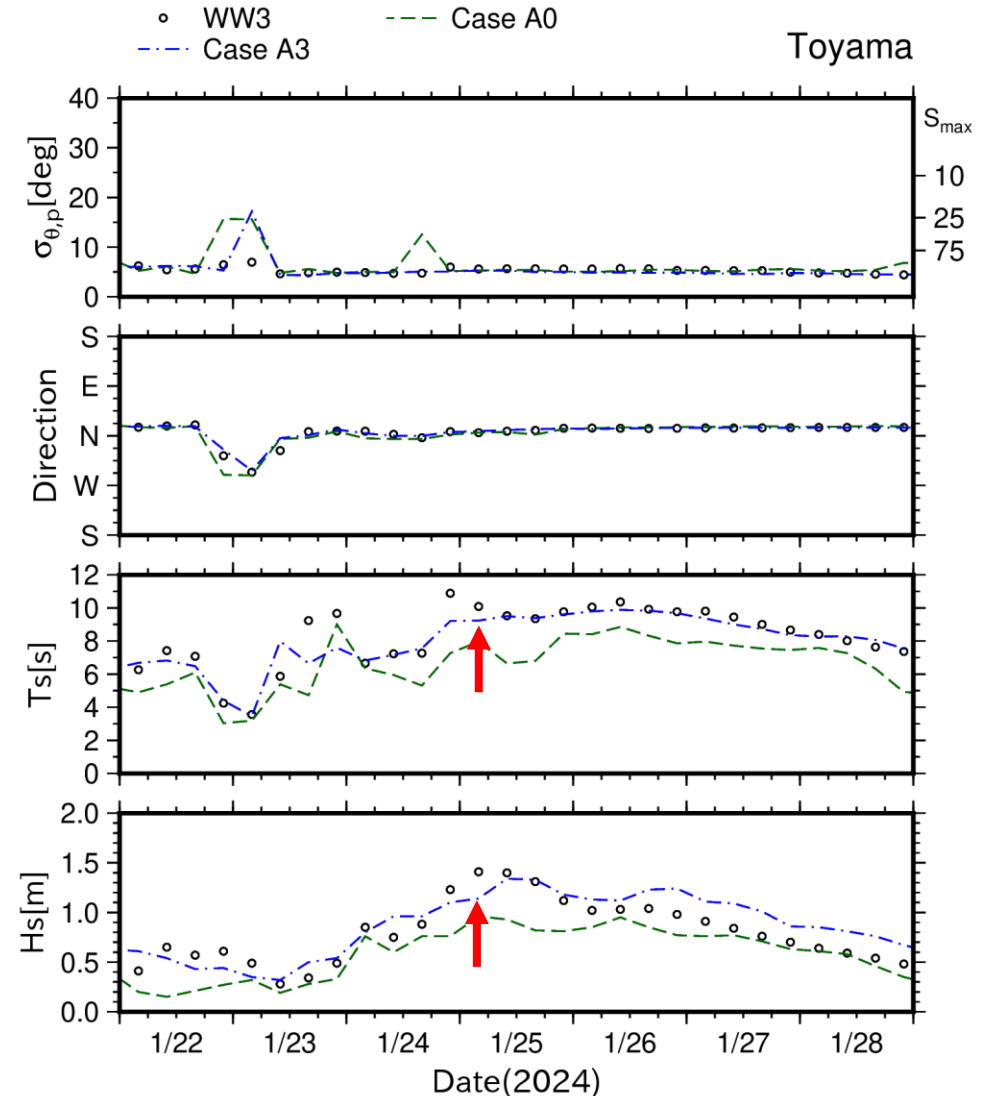
推算結果

- 冬季の寄り回り波によるうねり（ $S_{max} = 191$ ）を精度良く再現できた。



図：方向スペクトル（1月25日04:00）

- 寄り回り波は地形的特性によって生じるため、発生頻度が比較的多く、鋭いピークも学習できたものと考えられる。



図：富山における波浪諸元の時系列変化

計算速度

- 1地点での2年間分の推論時間は、わずか**38.7秒**（※NVIDIA RTX Pro 6000を使用）



- 長期間の推論においても、計算コストは極めて小さい。
- リアルタイム推算や、大規模アンサンブル計算（d4PDF等）への強力なツールとなり得る。

まとめ

- 深層学習モデル（U-Net）を用いて、**方向スペクトルの推算手法を開発した**。
- 風速期間の感度分析 → 3日前までのデータで**周期・うねりの精度が向上した**。
- 風速範囲の感度分析 → 外洋・内湾などの**地理的特性に応じた最適化が必要である**。
- 鹿島の風波卓越時や、富山の寄り回り波発生時の波浪方向スペクトルを良く再現していた。
- 多方向性波浪など、**稀な事象の推算精度には限界が見られた**。

今後の課題

- 学習データの長期間化，特殊ケースにフォーカスした教師データの作成など，**学習不足の対策**が必要である。
- 方向スペクトルの研究があまり進んでおらず，**分析・活用方法の開発も推進**すべきである。



Thank you for your attention.