令和８年 11 月 11 日

国立大学法人愛媛大学
国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
ＯＲＮＩＳ株式会社
国立大学法人琉球大学

レーダと AI で波と風を面的に同時に計測

深層学習で短波海洋レーダの観測能力を拡張－計算時間は従来法の約100分の1に－

愛媛大学大学院理工学研究科の片岡智哉准教授、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所の田村仁・藤木峻、ORNIS 株式会社／琉球大学名誉教授の藤井智史らの研究グループは、陸上に設置した短波海洋レーダの観測データから、沖合の「波」と「風」を人工知能（AI）で面的かつ同時に計測する手法を開発しました（図 1）。

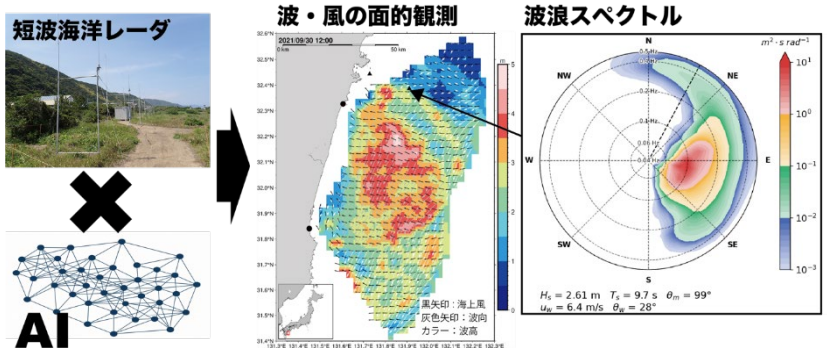


図 1） 研究概要

短波海洋レーダは、陸上から沖合数十 km～数百 km の海面を 24 時間連続で監視できる装置です。しかし、波や風の情報はレーダ信号のごく弱い部分（2次散乱）に埋もれているため、従来は複雑な非線形方程式を解く必要があり、荒天時やノイズの多い条件では計算が破綻しやすく、さらに波の向きを決めるには、2基のレーダによる同時観測が不可欠とされてきました。本研究では、レーダが捉えた信号（ドップラースペクトル）を加工せずそのまま画像のように扱う畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を構築し、日向灘・紀伊水道での実観測データと波浪推算モデルの計算結果を学習させました。

その結果、(1) レーダ 1 基でも周囲4点の信号をまとめて入力すれば、2基の場合と同等の波向精度が得られること、(2) 従来の物理モデルに基づく解析法に比べてノイズに強く、計算時間を約 100分の 1 に短縮できること、(3) 周波数の異なるレーダにも同一構造の AI モデルをそのまま適用できること、を明らかにしました。本成果は、高波・高潮の監視や洋上風力発電の海域調査など、沿岸域のリアルタイム海象監視の高度化に貢献することが期待されます。

本研究成果は、国際学術誌「Scientific Reports」に 11 月 10 日付けで掲載されました。

※送付資料 5 枚（本紙を含む）

【研究成果のポイント】

- 陸上の短波海洋レーダ※1 が捉える信号から、波のエネルギーが「どの周期・どの方向」に分布するか（波浪スペクトル※2）と、海上の風向・風速とを、沖合の広い海域にわたって面的かつ同時に推定する深層学習（CNN）モデルを開発しました。
- 従来、波の向きを正しく求めるには2基のレーダによる同時観測が必要でしたが、1基でも隣接する複数ビームの情報をまとめて入力することで、検証段階で2基と同等の波向精度（誤差約 20 度）を達成しました。
- 従来の物理モデルに基づく解析法（ベイズ法※3）と比べてノイズに強く安定した推定が可能で、計算時間は1地点・1時刻あたり約 3.5 秒から約 30 ミリ秒へと約 100 分の 1 に短縮されました。
- 周波数の異なる2海域のレーダ（日向灘 13.5 MHz、紀伊水道 24.515 MHz）に同一構造のモデルがそのまま適用できることを確認し、沿岸防災や洋上風力発電など海洋利用への展開が期待されます。

【研究成果の詳細】

短波海洋レーダは、陸上の送受信アンテナから海面に電波を照射し、波によって散乱されて戻ってくる電波を解析することで、沖合数十キロメートルの広い海域の流れ・波・風を昼夜問わず面的・連続的に観測できる、数少ない陸上設置型の遠隔計測技術です。古くから国内外で防災・海難救助・海洋利用のインフラとして導入が進んでいます。

しかし、レーダ信号から波や風の情報を取り出すことは技術的に難しい課題でした。反射信号（ドップラースペクトル※4）のうち、流れの計測に使われる強い「1次散乱」に対して、波や風の情報を含む「2次散乱※5」は強度が 20〜40 デシベルも低く、ノイズに埋もれやすいためです。従来手法では、この2次散乱を1次散乱から切り分けたうえで非線形積分方程式を解く必要があり、(1)波が高いときには両者が重なって分離できない、(2)電波干渉や船舶の反射などのノイズで結果が大きく乱れる、(3)波や風の向きを一意に決めるには2基のレーダによる同時観測が必要、(4)風速と信号強度の関係が強い非線形性をもつため風速の推定が難しい、という4つの壁がありました。

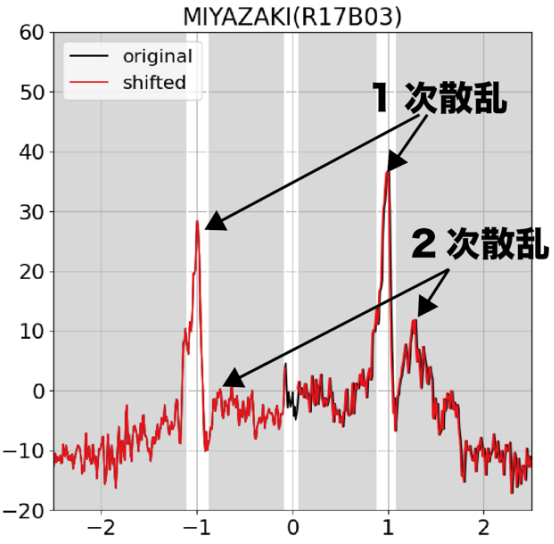


図2） ドップラースペクトル

研究グループは、これらの壁を「信号を切り分けない」という発想で乗り越えました。レーダ信号全体を、1次散乱の強度を 1、ノイズ水準を 0 とする対数正規化によって画像のような2次元データに変換し、画像認識で実績のある VGG 型の畳み込みニューラルネットワーク（CNN）※6 に入力します。学習データには、宮崎県が運用する日向灘の2基（13.5 MHz、2019 年・2020 年の 8〜11 月）と、紀伊水道の2基（24.515 MHz、2013 年 8〜9 月）のレーダ観測値、および波浪推算モデル※7WAVEWATCH III による波浪スペクトルと気象モデルの海上風を用いました。出力層は波浪スペクトル（周期 35×方向 37）と東西・南北方向の風速の計 1297 項目で、波と風を一つのモデルで同時に推定します。

加えて本研究では、推定したい地点の信号だけを使う従来型（Single Point Selection）に対し、周囲4点の信号をまとめて入力する方式（Quad Point Selection）を考案しました。隣り合うレーダビーム同士の空間的なつながりを手掛かりとすることで、1基のレーダにつきまとう「波がどちら向きから来たのか決められない（180 度の方向不確定性）」という問題を緩和できます。検証の結果、1基+4点方式の波向誤差は約 19.7 度で、従来

必要とされた2基構成（約 18.0 度）とほぼ同等でした。

学習に使っていない期間のデータ（日向灘：2021 年 8～11 月、紀伊水道：2014 年 9～11 月）と GPS 波浪ブイ等の現地観測との比較では、日向灘において有意波高※8 の誤差 0.44 メートル（相関係数※9 0.81）と良好な精度が得られました（図3）。また、従来の物理モデルに基づくベイズ法と比べると、本手法はノイズに起因する不自然な乱れが少ない安定した波浪スペクトルを与え、計算時間も1地点・1時刻あたり約 3.5 秒（CPU）から約 30 ミリ秒（GPU 併用）へと約 100 分の 1 に短縮されました。さらに、周波数の異なる2海域のレーダに同一構造のモデルが適用できたことは、装置ごとの個別調整なしに全国のレーダ網へ展開できる可能性を示しています。

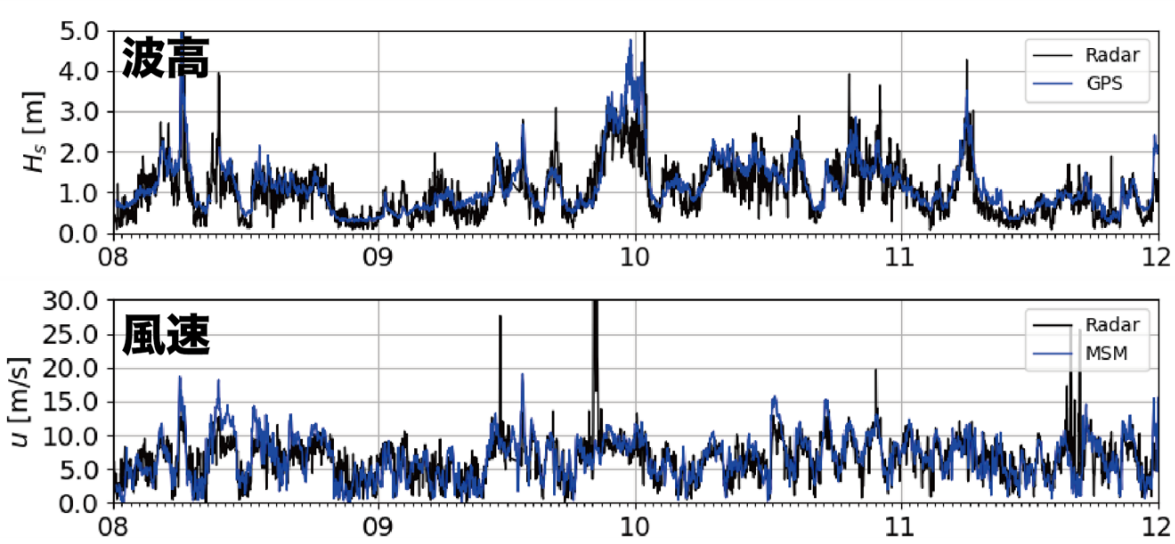


図3）波高と風速の時系列比較（黒：レーダ、青：観測値/気象庁モデル値）

一方で課題も残ります。風速の推定精度は相関係数 0.47～0.67 にとどまり（図3）、今後の改良が必要です。また、学習データが2か月分と少なかった紀伊水道では波向の精度が低下しており、AI の性能が学習データの量と多様性に強く依存することも明らかになりました。研究グループは今後、複数年にわたる長期データによる学習と、AI が信号のどこに着目しているかを可視化する説明可能 AI（XAI）※10 の導入を進め、沿岸防災や洋上風力発電の海域調査に役立つ実用的な海象監視システムの構築を目指します。

【論文情報】

掲載誌：Scientific Reports

題名：Simultaneous retrieval of sea-surface waves and winds from high-frequency radar using a convolutional neural network

（参考和訳）畳み込みニューラルネットワークを用いた短波海洋レーダによる海面波浪と海上風の同時推定

著者：Tomoya Kataoka, Hitoshi Tamura, Takashi Fujiki, Satoshi Fujii

DOI：10.1038/s41598-026-76688-2

URL：https://doi.org/10.1038/s41598-026-76688-2

【研究サポート】
国土交通省　交通運輸技術開発推進制度（JPJ002223）
科学技術振興機構（JST）研究成果最適展開支援プログラム（START）プロジェクト推進型（SBIR フェーズ Ⅰ 支援）（JPMJST2459）

【用語解説】

※1 短波海洋レーダ（HF レーダ）：3MHz～30MHz の短波帯の電波を陸上から海面に向けて発射し、海面で散乱されて戻ってくる電波を解析することで、沖合数十 km～数百 km の海域の流れ・波・風を面的かつ連続的に測る遠隔計測装置。本研究では 13.5 MHz と 24.515 MHz の装置を用いました。

※2 波浪スペクトル：海面の波のエネルギーが、どの周期（波の繰り返しの速さ）とどの方向に、どれだけ分布しているかを表したもの。有意波高などの代表値よりもはるかに多くの情報をもち、うねりと風浪が混ざり合った複雑な海の状態を表現できます。

※3 ベイズ法（ベイズ逆解析法）：観測されたレーダ信号から、確率論（ベイズ統計）に基づいて最もあり得る波の状態を逆算する従来手法。非線形の方程式を繰り返し計算で解くため、ノイズが多い条件では解が不安定になりやすく、計算にも時間がかかります。

※4 ドップラースペクトル：戻ってきた電波の周波数のずれ（ドップラー偏移）ごとに、どれだけの強さの信号が含まれるかを表したグラフ。1次散乱と2次散乱は、このグラフ上の大小のピークとして現れます。

※5 1次散乱・2次散乱（ブラッグ散乱）：電波の波長の半分の波長をもつ海の波が電波を強く反射する現象をブラッグ散乱といい、この強い反射が「1次散乱」で、海面の流れの計測に使われます。一方、複数の波の相互作用によって生じる弱い反射が「2次散乱」で、波や風の情報を含みますが、強度が1次散乱より 20～40 デシベルも低く（1 次散乱強度の 100 分の 1～10000 分の 1 に相当）、ノイズに埋もれやすいため、海象情報の抽出に難しさがあります。

※6 畳み込みニューラルネットワーク（CNN）：多層のニューラルネットワークに大量のデータを学習させ、入力と出力の複雑な対応関係を自動的に獲得させる人工知能技術（深層学習）の一種。画像の局所的な模様を段階的に捉えることが得意で、画像認識で広く使われています。本研究では、レーダ信号を画像のように扱うために CNN を用いました。

※7 波浪推算モデル（WAVEWATCH III）：米国海洋大気庁（NOAA）が開発・公開している、風から波の発生・発達・伝播を計算する数値モデル。本研究では、AI に学習させるとして、このモデルが計算した波のデータを利用しました。

※8 有意波高：ある時間内に観測された波のうち、高いほうから数えて 3 分の 1 の波を平均した波高。人が目で見て感じる波の大きさに近く、波浪予報などで一般に用いられる指標です。

※9 相関係数：2つのデータがどれだけ連動して変化するかを－1～1 の値で表す指標。1 に近いほど、推定値と実測値がよく一致していることを示します。

※10 説明可能 AI（XAI）：AI が「なぜその答えを出したのか」を人が理解できる形で示す技術。本研究では、AI がレーダ信号のどの部分に着目して波や風を推定しているかを可視化する手法（Grad-CAM など）の導入を検討しています。

【お問い合わせ先】
（研究に関するお問い合わせ先）
愛媛大学大学院理工学研究科（工） 准教授 片岡 智哉
電話：089-927-9817
E-mail：kataoka.tomoya.ab@ehime-u.ac.jp

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
海洋利用研究領域 上席研究官 田村 仁
電話：046-844-5048
E-mail：htamura(★)p.mpat.go.jp
沿岸水工研究領域 波浪研究グループ長 藤木 峻
電話：046-844-5042
E-mail：fujiki-t2wm(★)p.mpat.go.jp
（「(★)」を「@」に置き換えて下さい。）

ORNIS 株式会社 CTO／琉球大学名誉教授 藤井 智史
E-mail：fujii@ornis.jp／fujii@eee.u-ryukyu.ac.jp

（報道に関するお問い合わせ先）
国立大学法人愛媛大学 総務部広報課
TEL: 089-927-9022
E-mail: koho@stu.ehime-u.ac.jp

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
管理調整・防災部企画調整・防災課
電話：046-844-5040
E-mail：pari-search(★)p.mpat.go.jp
（「(★)」を「@」に置き換えて下さい。）

ORNIS 株式会社
E-mail：info@ornis.jp

国立大学法人琉球大学総務部総務課広報係
TEL：098-895-8175
E-mail：kohokoho@acs.u-ryukyu.ac.jp