# 台風等強風下における X バンドレーダによる風波砕波評価法

Evaluation method of the wind wave breakings under storm winds such as typhoons with X-band radar

北海道大学院工学院修士課程1年 ○学生員 坂川諒太 (Ryota Sakagawa)北海道大学院工学研究院 正会員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

# 1. はじめに

将来気候において,スーパー台風等の極端気象現象の 増加が予測されている一方,暴風下の海洋においては海 面抵抗モデルの不確実性が指摘されている(Powell et al. 2003)<sup>1)</sup>. この一つの要因として,強風時の海洋で生じる 風波砕波に伴う大量の気泡・飛沫群が,運動量・熱・水 分・ガスなど大気海洋間における様々な輸送形態に大き な影響を与えるがわかっている.これら各物理量の海面 フラックスの推定には従来から様々なバルク式が提案さ れている(例えば Large & Pond 1982)<sup>2)</sup>一方,近年ではリ モートセンシング技術を用いた海洋観測がその推定精度 の向上に大きく寄与している.

リモートセンシングは人口衛星から計測する合成開口 レーダをはじめ、特に沿岸域の観測には陸上や船舶に設 置する HF レーダや X バンドレーダが用いられている. これらのレーダは高い時間的空間的な分解能を有し、瞬 時に広域の海面の状況を把握できるなどの特徴を備えて いるが、得られるシークラッター画像の模様を生み出す 変調機構などは未解明な部分も多く、様々な仮定と予測 を基に多くの解析方法が提案されている. (Huang et al. 2017)<sup>3)</sup>

従来から風波砕波の抽出には、WEB カメラなどによ る可視画像解析によって白波を抽出する方法がとられて おり、この方法は自動抽出技術など客観的な砕波の定量 化が進められている(Callaghan & White 2008)<sup>4)</sup>. 一方で、 砕波後のボア領域で X バンドのようなマイクロ波の散 乱強度が大きくなることを利用して、より広域な海面を 調べられるシークラッター画像を基に白波砕波を抽出し ようとする研究もなされている. (小林ら 2006)<sup>5)</sup>

本論文では、和歌山県田辺中島高潮観測塔における台 風気象イベントの集中観測で得られた波高や風速データ、 可視画像データを用いて、その近海域を撮影する X バ ンドレーダによる解析結果に考察を加え、X バンドレー ダによる台風気象イベント時における風波砕波の評価法 について議論していくものである.

#### 2. 観測条件

南西に開けた和歌山県田辺湾の湾口中心付近の急峻な 海丘に建てられた田辺中島高潮観測塔(図-1)において, 台風気象イベントの集中観測が行われている. 観測塔付 近の水深は約 30m となっており,平均水位から高度 10m 地点に波高計が置かれ 20 分間平均のデータを取得 している. さらに高度 12.5m 地点に WEB カメラが設置 され,10 分間隔で海表面画像を撮影している.

海上観測塔に対して X バンドレーダは陸上に設置さ



図-1 田辺中島高潮観測塔 (京都大学防災研究所白浜海象観測所)

れている(図-2). この X バンドレーダのデータのサ ンプリング間隔は視線方向が 4.684m, 回転方向が 0.182°となっており.時間間隔は約 2.3~2.5 秒である. 本観測ではレーダ設置地点を中心に 1012m の遅延領域 が存在し,より視線方向にサンプリング数 256 で中心か らの距離 2211m 程度までの空間を観測領域としている.

X バンドレーダの解析対象イベントとしては,2016 年9月20日に和歌山県にも上陸した台風16号の最接近 付近のタイミングと,10月9日の風も弱くある程度落 ちついた波場の状態のものとを比較していく.



 図-2 Xバンドレーダ設置位置と観測塔位置 (Google map 航空写真)
赤線が囲まれた領域が Xバンドレーダの対象領域



図-3 台風 16 号最接近時の海面の様子 2016 年 09 月 20 日 13 時 38 分 撮影

特に2016年の台風 16 号は強風と降雨によって大きな 被害をもたらし,人的被害もあった.田辺市最接近時の 観測塔では図-3 のように WEB カメラの撮影領域全域を 覆うような大きな白波砕波を連続的に起こしている.

### 2. 解析方法

X バンドレーダによって取得されるシークラッター画 像は海面によるマイクロ波の後方散乱強度の空間分布を 表す. この後方散乱強度は海面粗さや入射角に依存し, これらのパラメータによって散乱機構が異なることが指 摘されている.後方散乱強度を決める物理機構が未解明 なため、様々な仮定・予測を基に多くの解析方法が提案 されてきており、Huang et al. 2017<sup>3)</sup>はそれらをまとめて 紹介している.

この中でも古くから波場の解析として多く用いられて きた方法が連続したシークラッター画像を用いて時空間 の3次元離散フーリエ変換をベースにした解析方法であ り、本解析でもこの手法を用いる.この解析法の手順を 以下のようになっている.

・離散高速フーリエ変換を行うため、長方形領域 をすべての連続画像から抽出

・観測領域に依存する静止パターンを除くために 連続長方形画像から平均画像を求め,各画像から 除く

・離散高速フーリエ変換を実行し画像スペクトル を生成

・低い角周波数領域に集中する非定常・非均質の 波場によるノイズを除去するためにハイパスフィ ルタ処理を行う

・分散関係式を適応しバンドパスフィルタ処理を 行う

・周波数領域で積分し、二次元の波数空間スペク トルの算出

・分散関係式を用いて,方向・角周波数スペクト ルの算出

本解析においては 64 枚の連続シークラッタ画像を用い ており、図-4 は台風時と低風速時とのそれぞれで得ら れる代表的な解析前のシークラッタ画像である.図-2



図-4 左 台風時のシークラッター画像 右 低風速時のシークラッター画像 赤線の領域が解析対象の長方形領域





の赤線で囲まれた領域からの散乱信号を受けて強度分布 が描かれており、どちらも南西方向に波場があることが 確認できるが、シークラッタ模様が明らかに異なってい ることがわかる.

#### 3. 解析結果

解析方法に記した順に従い,解析を行っていく.まず, すべての連続画像から図-4 の赤線で示した長方形領域 (約 1902m×951m)を取り出す.このとき,後の離散 高速フーリエ変換を利用するために 256 ピクセル×128 ピクセルに設定し,1 ピクセルが 7.428mとなる.この 長方形領域の抽出においては,バイリニア補完を用いて 後方散乱強度値を補完している.

図-2,4からもわかるように、本観測対象領域には小 さな孤島が複数存在し、この影響を小さくするために正 規化が必要である。64枚の連続画像を用いると図-5の ように台風時のものでいうと孤島の影響と距離減衰を多 少補完するような平均画像が得られる一方、低風速時に おいては孤島の影響が大きく表れており、平均の画像の 特徴が異なることがわかった。この処理の後、3次元の 離散高速フーリエ変換を行い、画像スペクトルを作成す る。この画像スペクトルにおいて低い角周波数成分にお いてノイズが多いことからハイパスフィルタを用いてフ



下 低風速時の波数角周波数スペクトル スペクトルはいずれも最大値で割り正規化している 黒線は微小振幅波から得られる分散関係式

ィルタ処理する(Nieto et al. 2004)<sup>6)</sup>. 多くの X バンドレ ーダの解析ではこの後に分散関係式を用いて表層流速を 求める作業を行う(Young et al. 1985)<sup>7)</sup>が,本観測におい ては図-6 のようにどちらもあまり分散関係式からのず れが大きくなかったため,本観測では省略し,分散関係 式近傍のみスペクトルのみを抽出するためにバンドパス フィルタ操作を行う.分散関係式に用いられる水深は 20mの定数として与えた.そして周波数領域で積分して 二次元の波数スペクトルを作成,さらには分散関係式を 用いて二次元の方向・周波数スペクトルを作成する.

図-7 は方向・角周波数スペクトルを表しており,台 風時においては角度π付近,すなわち真横の方向におい てスペクトルピークを持っている.これは図-1 で散乱 強度が高い波峰部分とほぼ水平に長方形をとっているこ とから,直感的に正しいことがわかる.一方で低風速時 はスペクトルピーク位置が複数あり,台風のように強風 が海洋に対して支配的でないことが言える.

また,このスペクトル強度値と波高が何かしらの関係 性を持つことがきたされるが,Xバンドレーダの各解析 対象のタイミングにおいて観測塔の波高計による有義波 高は台風時(2016年9月20日13時40分)では6.277m,



低風速時(2016 年 10 月 9 日 12 時)では 0.709m を示して いた. この値に対して X バンドレーダはスペクトルの 絶対値のピーク値は台風時 94714,低風速時は 12484 と いう値を取った.絶対的な解析数量が不足していること からまだ何も言えないが,ここに何かしらの相関関係が あることが期待される.

## 4. 砕波抽出

既往研究から白波砕波がマイクロ波の散乱強度を高め ることがわかっているが、未だに X バンドレーダを用 いて適切に砕波を抽出するまでには至っていない.本解 析対象の 2016 年台風 16 号においては可視画像から連続 的に砕波が生じていることがわかっているので、X バン ドレーダで得られるシークラッターから白波の特徴を捉 えていく.

図-8 は台風時の長方形シークラッター画像の平均画 像による正規化後の画像である(右).この画像の中に は一定強度の縞模様が現れているが、その中には、突出 して強度値の高い波が見られる.これが砕波による後方 散乱強度の増加を示していると考えることができる.図 -8 の左は赤い矢印の行の強度値を真横に見ていった時 の強度分布であり、これを見ると適切な閾値(この画像



図-8 左 反射強度分布 右 台風時の正規化後のシークラッター画像

でいえば強度値 3000 程度)をもって砕波を抽出しうる 可能性がある.加えてシークラッター画像内の砕波の影 響を特定することができれば,砕波が存在する波場に対 しても,砕波の影響をなくして純粋な波場を再現し,解 析を行うことも可能になると考えられるため,Xバンド レーダによる砕波検出は大きな役割を持つ.

## 5. おわりに

本論文では X バンドレーダを用いた広域な海面の解 析を台風による強風時と,通常の低風速時との比較を行 い,強風時における X バンドレーダ解析結果の特徴を 見たものである.台風等強風時においても従来の解析方 法が適応可能であり,スペクトル推定を行うことができ た.加えて,砕波と想定される後方散乱強度の突出とそ の抽出について議論した.

今後は解析データ数を増やし、スペクトルピークにお ける波高との関係を調べ、また X バンドレーダを用い た白波の適切な抽出方法を模索していきたい.

## 参考文献

- Mark D. Powell, Peter J. Vickery & Timothy A. Reinhold : Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, NATURE/VOL 422/20 MARCH 2003, pp279-283
- Large, W. G and Pond, S.: Sensible and latent heat flux measurements over the ocean, J. Phys. Oceanogr., Vol.12, No.5, pp.464–482, 1982.
- Weimin Huang, Xinlong Liu, Eric W. Gill: Ocean Wind and Wave Measurements Using X-Band Marine Radar: A Comprehensive Review, Remote Sens. 2017, 9, 1261
- Callaghan, A. H. and White, M.: Automated processing of sea surface images for the determination of whitecap coverage, J. Atomos. Ocean. Tech., Vol.26, pp.383–394, 2009.
- 5) 小林智尚,柴田武志,安田孝志:海洋観測レーダ と波浪推算モデルを用いた実海域での白波被覆率 の解析,海岸工学論文集,第 53 巻(2006)土木学 会,386-390
- 6) Nieto-Borge, J.C.; Rodriguez, G.; Hessner, K.; Izquierdo,

P. Inversion of marine radar images for surface wave analysis. J. Atmos. Ocean. Technol. 2004, 21, 1291–1300.

 Young, I.R.; Rosenthal, W.; Ziemer, F. A threedimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents. J. Geophys. Res. 1985, 90, 1049–1059.