

白浜画像解析による砕波の時空間的スケーリング

Spatio-temporal scaling of breaking waves based on Shirahama image analysis.

北海道大学大学院工学研究科 学生員 南健人 (Kento Minami)

北海道大学大学院教授工学研究院 正会員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

外洋における白波の分布は波浪場の力学的、環境学的評価、さらには、海洋境界層への運動量・熱輸送のバルクパラメータとして使われてきた。即ち白波の波峰方向への延長は波峰長として定義され、波浪の運動量、エネルギー散逸の基本物理量として (Melville et al. 2002)¹⁾、また白波被覆率 (Callaghan et al. 2009)²⁾ は大気からの気体輸送が生じる面積を定義し (Monahan 1971)³⁾、海洋生態系予測に必要なパラメータとなる。さらに白波分布のレーダー観測は、波向の特定、方向分布関数の推定 (Goda et al. 1997)⁴⁾、波浪場における流れの推定 (Huang et al. 2017)⁵⁾ に利用されてきた。これら既存の評価は、白波被覆あるいは分布についての瞬時量あるいは長時間データの平均量を見積もるものである一方、時々刻々の白波の発達を通じた分布スケールの変化、減衰に至るまでの時間変化は言及しない。

こうした白波の時空間的発達過程は、砕波に伴う乱流化とエアレーション機構の理解に加え、大気海洋間気体輸送予測の高度化に直結し、重要である。

本研究は、和歌山県田辺湾湾口部に位置する白浜海象観測塔ならびに北海道紋別港に隣接するガリンコタワーから撮影した連続画像の時空間三次元スペクトルから白波変化の時空間スケールの変化の特徴を議論すると共に、波・流れ共存場の分散関係を用いた流れの流速推定を検討するものである。

2. 現地観測条件

(1) 和歌山県田辺湾白浜海象観測塔

田辺湾口部周辺は平坦な地形であり、水深は約30mである。そして、その湾口中心付近の水深10mの中島の上に、白浜海象観測塔が建っている (図1)。本観測で用いたカメラは約200万画素 (1920×1080ピクセル) であり、約1秒間隔で20枚連写し、15分のインターバルのち、また、20枚の連写をするという形で撮影を行った。

(2) 北海道紋別港ガリンコタワー

紋別港第三防波堤に隣接するガリンコタワーは、沖合1kmほどの地点に建っている (図2)。本観測で用いたカメラは約200万画素 (1920×1080ピクセル) であり、約1秒間隔で16枚連写し、1時間のインターバルのち、また、16枚の連写をするという形で撮影を行った。

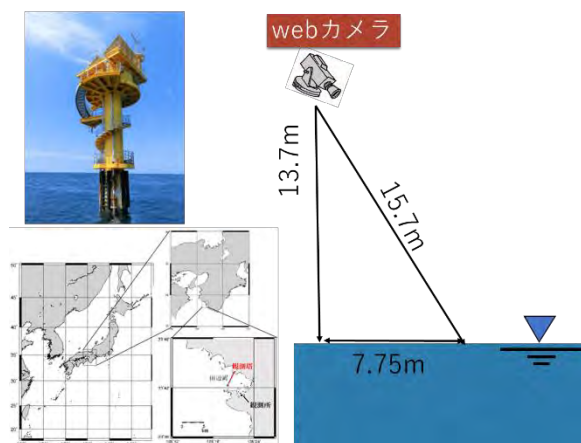


図1 白浜海象観測概要

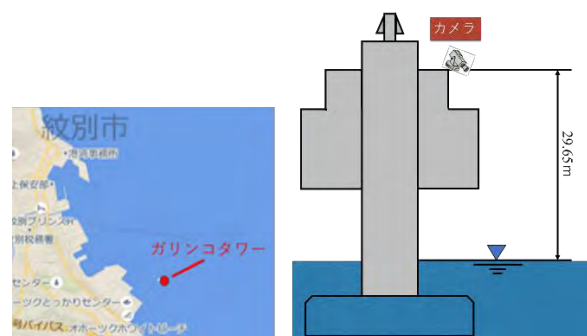


図2 ガリンコタワー概要

3. 観測画像解析手法

本観測では、観測塔の影響を受けない海面を撮影するように仰角が設定されているため、画像の手前が大きく奥が小さく映ってしまう。定量的に砕波を扱うためには、これを真上から撮影した形に変換する必要がある。本研究では、寸法が既知の船舶を撮影した画像を用いることで、キャリブレーションを行う。そして、キャリブレーションの施された画像に対して、三次元スペクトル、白波被覆率を算定し、比較・検討する。以下に、それぞれの手法を説明する。

(1) キャリブレーション手法

図3に示すように実空間座標 (x, y, z) と画像座標 (x', y') を設定した。このモデルでは、次のように座標変換が行われる。

- 1) 射影変換により、画像座標は絶対座標と焦点距離 f を用いて表せる。

$$x' = f \frac{x}{z} \tag{1}$$

$$y' = f \frac{y}{z} \tag{2}$$

- 2) アフィン変換ではある座標 (x'', y'') に対して次のように与えられる。

$$x'' = a_1x + a_2y + a_3 \tag{3}$$

$$y'' = b_1x + b_2y + b_3 \tag{4}$$

- 3) 平面の方程式から、海面の z 座標は次のように与えられる。

$$z = c_1x + c_2y + c_3 \tag{5}$$

- 4) (1)-(5)より、画像座標と絶対座標をある係数 $(a_1 \dots c_2)$ を用いて表せる。

$$x' = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + c_3} \tag{6}$$

$$y' = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + c_3} \tag{7}$$

これらの係数は、画像座標と対応する絶対座標の関係から、最小二乗法を用いることで推定できるのだが、本研究では、寸法が既知の船舶を用いた(図4)。船舶を複数枚撮影し、寸法から対応する絶対座標を与えることで、係数を算定した。そして、(6)、(7)の式と求めた係数から、観測画像をキャリブレーションした。

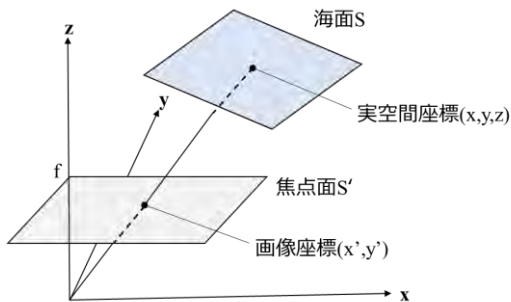


図3 画像変換モデル

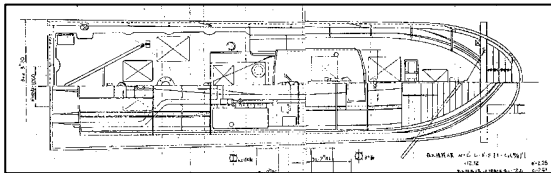


図4 キャリブレーション用の船の図面(白浜)

(2) 白波被覆率の算定

白波被覆率は海表面における単位面積当たりの白波領域の面積として定義される。白波は画像の中で輝度値が大きくなるため、現地観測での画像の輝度値から、海表面の白波領域を抽出する。具体的な算定手順としては、観測画像をカラー画像からグレースケール画像に変換し、

閾値を設定し画像を2値化することで背景と白波部分に分けている。この時、各画像に対して適切な閾値を設定することが重要となるため、Callaghan et al. (2009)の提案したAWE法を応用する。

AWE法について簡単に説明すると、まず、0~1の強度値をもつグレースケール画像に対して、閾値を1から0.01ずつ小さくして設定していき、閾値よりも強度値が大きい画素数をカウントしていく。この増加割合をPIP (Percentage increase in number of pixels) とし、以下のように計算する(図5)。

$$PIP(i) = \frac{P(i) - P(i + 0.01)}{P(i)} \times 100 \tag{8}$$

ここで、背景の強度値はおおよそ同じ値をとっていると仮定すると、設定する閾値が背景部分の強度値より小さくなると、急激にPIPが増加する。したがって、この一つ手前の閾値が最適な閾値となる(図5のRegion Aの最後の閾値)。これを微分解析により求めることで、客観的で各画像の輝度に対して最適な閾値を設定することが可能となる。また、白波が発生していない画像については、PIPの変動から判断し自動で除去している。この求めた閾値で画像の2値化を行うことで白波を抽出し、抽出された画素数を画像の総画素数で割ることで、白波被覆率を算定した。なお、今回の観測では1秒ごとの連続画像から算定した被覆率を、平均化したものを解析に用いた。また、白波抽出を行う際、海表面において光が反射される影響を抑えるため、画像のトリミングならびに画像へのトップハットフィルター処理を施した。

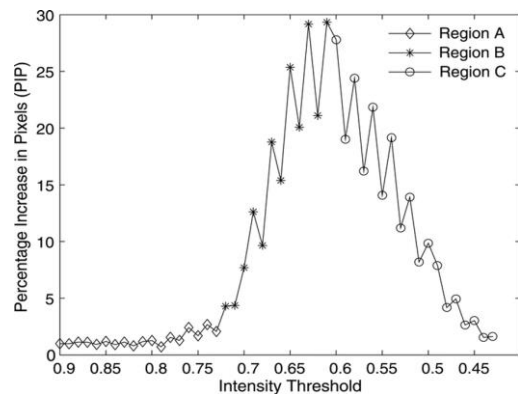


図5 PIP—閾値

(3) 三次元スペクトルの算定

図6のような数秒間の連続画像に対して、三次元スペクトルによる波数・周波数分析を行っている(図7, 8)。低周波数成分では、高波数に細かいスペクトルピークがいくつもある(図7)。これは、画像の中で光が反射し、細かい模様のようにになっているものが現れているのだと考えられる。また、高周波数成分において、 k_x 方向に長いレンジを持つスペクトルが現れている(図8)。これは、 x 方向に長い波峰を持つ進行波のスペクトルを表していると考えられる。したがって、三次元スペクトルから進行波の周波数と波数が特定できる。



図6 紋別観測画像 (2022年10月15日7時)

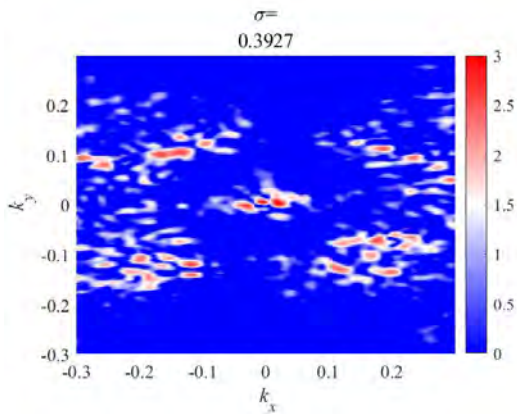


図7 低周波数 ($\sigma = 0.3927$) でのスペクトル (紋別)

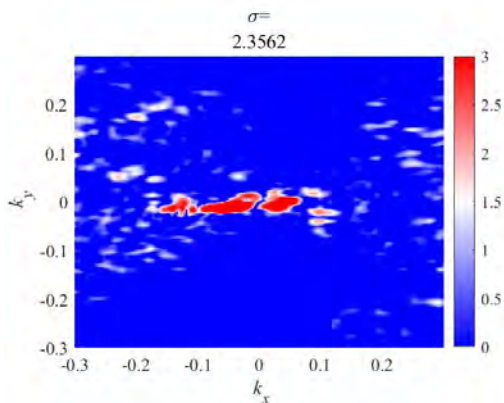


図8 高周波数 ($\sigma = 2.3562$) でのスペクトル (紋別)

4. 観測画像解析結果及び考察

本研究では、白浜海象観測塔の2022年9月29日を対象として解析を行った。まず、白浜での白波被覆率の変動を算定した結果を以下の図9に示す。

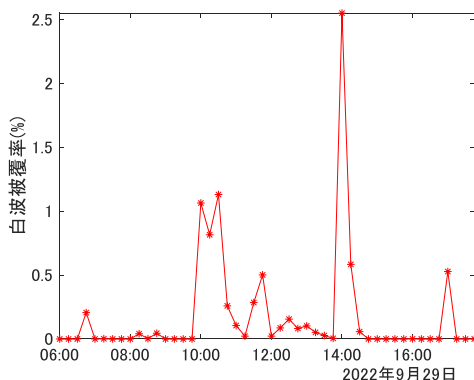


図9 白波被覆率の変動

ここで、白波被覆率の大きい2022年9月29日14:00の白波を時空間スケールで把握するため、三次元スペクトルによる周波数-波数分析を行った。

低周波数成分においては、高波数の点でいくつかスペクトルが現れていた(図10)。一方、高周波数成分においては、低波数にスペクトルが集中していた(図11)。これは、白波背後の残留泡沫がスペクトルとして現れているものである。残留泡沫は、波長が小さく、周期が長い特徴があるため、低周波数で高波数にスペクトルとして現れていると考えられる。

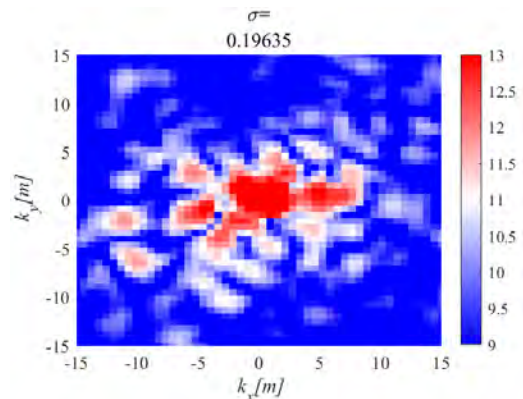


図10 低周波数 ($\sigma = 0.19635$) でのスペクトル (白浜)

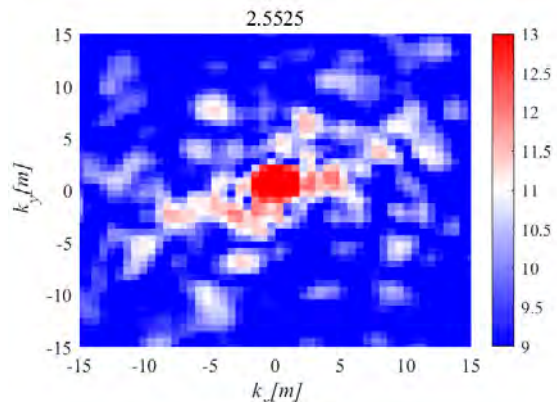


図11 高周波数 ($\sigma = 2.5525$) でのスペクトル (白浜)

5. 結論

白浜海象観測塔の連続画像から白波被覆率の時間変化を算定し、白波発生時の白波背後に残留する泡沫の存在を三次元スペクトルから確認することができた。しかし、現在は時化の観測画像が不足しており、白波変化の時空間スケールの変化までは言及できていない。

また、先述したように、波数と周波数が特定できれば、以下の波と流れの分散関係式から、流速 U を推定することが可能となる。

$$(\sigma + Uk)^2 = gk \tanh kh \quad (9)$$

この手法は以前からレーダー観測を用いた推定に利用されていたが、本研究のような連続画像から、流速を推定することができれば、大幅なコストダウンが期待できる。

今後は、台風等の大型波浪イベント発生時に撮影を行い、データを収集し、白波の発達から減衰の過程について検討すると共に、流れの流速推定の可能性についても検討していきたい。

参考文献

- 1) Melville, W.K. and Matusov, P.: Distribution of breaking waves at the ocean surface, *Nature*, Vol. 417, pp. 58-63, 2002.
- 2) Callaghan, A.H. and White, M.: Automated processing of sea surface images for the determination of whitecap coverage, *J.Atomos .Ocean. Tech.*, Vol.26,pp383-394, 2009.
- 3) Monahan, E. C.: Oceanic Whitecaps, *J. Phys. Oceanogr.*, 1, 139-144 , 1971.
- 4) Goda, Y.: Directional wave spectrum and its engineering applications, *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 3, World Scientific, pp. 66-71, 1997.
- 5) Huang, W.; Liu, X. and Gill, E.W. :Ocean wind and wave measurements using X-Band marine radar: A comprehensive review, *Remote Sens.* 9(12), 1261,2017