可視光・熱赤外線・Xバンドレーダーによる白波砕波の評価法

Measurement method of breaking whitecaps using visual, thermal infrared and X-band radar iamges

北海道大学工学部4年 ○学生会員 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

台風等の暴風下で生じる風波砕波は、大気海洋境界面 にはたらく海面抵抗を変化させ、気象海象に影響を与え る。吹送は風波を発達させ海面抵抗を増加させる一方、 さらなる強風下では、砕波による波高の減衰が逆に抵抗 を減じるだけでなく、同時に生成される大量の飛沫気泡 群によって大気海洋間の運動量輸送は大きく変化する。 これらの影響は特に海上風速 35(m/s)以上の暴風下では、 従来のバルクモデルとは大きく異なるものとなることが 指摘されている(Powell et al 2003)¹⁾一方、その原因なら びに物理機構は依然未解明である。

将来気候において、スーパー台風等極端気象イベント の頻発が予期される一方、現在の全球気候モデル(GCM) には波浪による海面粗度の影響は反映されていない。志 村ら(2016)²⁾によると、海面粗度の GCM への導入により 最大気候値の 15%におよぶ変化が現れる可能性が指摘さ れている。すなわち、強風下の海面の応答の理解、並び に海面抵抗の適切なモデル化は、台風による海岸災害予 測だけでなく、将来気候予測の精度向上に寄与するもの である。

従来から風波砕波の抽出は可視画像計測によって行われてきた。Callaghan ら(2008)³⁾は観測者の主観に依存することなく白波部を抽出する方法を提案している。一方、観測が昼間に限られる可視画像だけでなく、砕波直後の水温変化によって砕波イベントを評価する方法(Jessup et al 1997)⁴⁾や、X バンドレーダーの後方散乱によって検出する方法(Haller et al 2003)⁵⁾などによって活発な砕波研究が進められている。

本研究は、和歌山県田辺中島観測塔における台風下の 気象海象集中観測のフレームワークの下、可視および熱 赤外線画像計測、さらにXバンドレーダー観測により白 波砕波を抽出し、気象イベントに対する海面応答を明ら かにしようとするものである。

2. 観測方法

和歌山県田辺湾にある田辺中島高潮観測塔上に、可視 カメラおよび赤外線カメラを設置し、その沿岸海域を観 測する(図―1・2参照)。田辺湾湾口部周辺の海域は 水深約 30mの平坦地形となっており、湾口中心に急峻 な孤立海底山(中島)が存在し、そのうえにこの観測塔 が建てられている。そのため浅海効果による日常的な砕 波は見られず、風浪の発達による砕波、および強風によ る波峰部崩壊による砕波の観測を行うことができる。可 視カメラおよび赤外線カメラは高さ13.7mに設置され、 10秒間隔でそれぞれ撮影している。



図-1 観測塔位置(北緯 33°42'32"東経 135°19'58") Xバンドレーダー位置(北緯 33°43'49"東経 135°21'04")



図-2 田辺中島高潮観測塔

3. 可視画像解析

3.1 解析方法

可視画像から白波被覆率を求めるためには、画像から 白波が発生している部分と発生していない部分との境界 を見分け、明確に区別する必要がある。本研究では Callaghan ら(2008)が提唱した自動白波抽出(AWE)法をベ ースにして白波を区別する閾値を求めた。

AWE 法は可視画像を強度値 0(黒)から 1(白)までのグレースケールにした画像を用いて解析する。閾値候補を

1から0.01 ずつ小さくしながら与えていき、その閾値候 補より大きい強度値をもつピクセル数を出し、以下の式 より連続する閾値候補におけるピクセル数の増加率を求 める。

$$PIP(i) = \frac{P(i) - P(i+0.01)}{P(i)} \times 100$$
(1)

ここで*i* は閾値候補、*P(i)* は閾値候補より大きい強度 値をもつピクセル数、*PIP(i)* がその増加率となる。図 -3 は縦軸にピクセル数増加率、横軸に閾値候補を取っ たものであり、これを Image Structure と呼ぶ。この図を 見ると閾値0.73 から増加率が大きくなることがわかる。 これは 0.73 の強度値から白波が存在しない周辺部の強 度値をもつピクセルが含まれることを意味し、すなわち この閾値候補の値に 0.01 加えた 0.74 を閾値として与え ることで白波を明確に区別することができるというもの である。この Image Structure に二回ほど四点移動平均を 取り平滑化したものを用いて微分解析を行い、適切な閾 値を自動で求めていく。



図-3 各閾値を上回る強度値をもつピクセルの増加数

この AWE 法は自動的かつ客観的に白波を区別する閾 値を求めることができるが、その精度には周囲の照度の 均一性が大きく影響する。本観測においては、カメラの 視線方向が北向きであるために観測塔の影が画像の一部 分に写ってしまい、照度が不均一になってしまう時間帯 が存在する(図-4(a)左参照)。このような照度の不 均一性は図-4(c)破線のように PIP の変動が非常に大き くなり、適切な閾値を求めることができない場合がある。 図-4(a)右の画像では図-4(c)破線から閾値を 0.8 と取 り白波を抽出したが、影がかかっている中央部の白波を 抽出できていないことがわかる。そこで本解析では前処 理として、取得した画像にモルフォロジーオープン処理 をかけ、全体の背景を抽出し、原画像とオープン処理を した画像の差をとることで照度の不均一性を取り除いた トップハット画像に AWE 法を適応しようと考えた。ト ップハット画像はそのまま扱うと全体として強度値が非 常に小さいため、全体の強度平均値が 0.5 になるように 処理した画像に AWE 法を適応した。



図-4(a) 中央部に観測塔の影が存在する画像 左:グレースケール画像、右:白波抽出画像







図-4(c) 照度の不均一が存在する場合のトップハッ ト画像の Image Structure およびグレースケール画像の Image Structure

3.2 結果

トップハット画像に AWE 法を適応した場合の大きな 特徴として、図―4(c)の実線のように Image Structure に おける PIP の変動を小さくする効果がある。これにより、 変動によって求める閾値にずれが生じることを軽減する ことができ、トップハット画像の解析に対しては図―4 (c)では閾値として 0.73 が取得される。トップハット画 像にこの閾値を適応し白波を抽出すると図―4(b)右の 画像のようになり、オリジナルに AWE 法を適応した場 合より観測塔の影の影響を受けていないより再現性の高 い白波の抽出に成功している。

しかし、トップハット画像に AWE 法を適応する場合、 図-5(b)のように狭い閾値候補の幅で大きな上昇をす るような Image Structure をよく見かける。なぜこのよう な構造になるのかこれからさらなる検証が必要であるが、 このような極端な増加が起こったものに四点移動平均を 用いると、図のように増加の山の終わりが右に押し出さ れるようにずれてしまい、得られる閾値(今回であると 0.74)では図-5(a)右のように実際の白波以外の部分も 抽出してしまうような結果が与えられてしまう。現段階 でこの問題の解決法は見つかっていないが、トップハッ ト画像の有用性も考え、今後とも、原画像・トップハッ ト画像両方を用いて AWE 法を適用していき、様々な環 境要因に対応できるベストな白波抽出技術を目指してい きたい。



図— 5(a) 極端な PIP の増加を示す Image Structure をも つトップハット画像の解析

左:原画像、右:トップハット画像に閾値 0.74 で白波 を抽出しようとしたもの



図-5(b) 極端な PIP の増加を示す Image Structure

4. 熱赤外線(IR) 画像解析

IR 画像は海面からの熱放射をとらえており、可視画 像との比較により砕波と海面表層の熱輸送の関係は今ま でにも多く報告されている。Marmorino et al (2005)のによ ると、沿岸域において、波峰部に存在する白波(active 領域) とその後方に形成される白波 (residual 領域) は 形成過程や構造が全く異なり、赤外線画像では周辺部に 比べ 0.1K スケールで active 領域は明るく、residual 領域 では暗く映ると報告されている。その原因としては、 active 領域では表面粗度および泡沫に関連した放射率の 増加が、residual 領域では物質温度の低下が指摘されて いる。この residual 領域での物質温度の低下の要因とし ては、「砕波により泡沫を発生させる気泡噴流(bubble plumes)が深い所からより冷たい水を表面に混ぜ込む」 というものと、「泡沫の最上層の水の薄膜が気化するこ とで冷却する」というものが考えられているが未だ未解 明である。

図-7(a)では可視画像における波峰部の砕波と IR 画像の輝度の高い領域が一致していること、図-7(b)で



図-7(a) 左が可視画像 右が IR 画像 (active 領域) どちらも 2016/12/06 13:28:00 に撮影



図-7(b) 左が可視画像 右が IR 画像 (residual 領域) どちらも 2016/12/06 13:27:30 に撮影





図一7(c) 2016/12/29 左 3:22:27 右 3:26:50 渦上の輝度分布が見られる。





図-7(d) 2016/12/29 左 3:48:40 右 3:54:45 筋状の輝度分布が見られる。

は可視画像における残留泡沫と IR 画像の輝度の低い領 域が一致していることが見て取れる。この特徴は Marmorino et al (2005)の報告と近しいものがあり、可視 画像で観測される白波砕波と IR 画像における輝度の分 布を関連づける上で非常に重要だと考えられる。また、 夜間における IR 画像は低い輝度が昼間より多く見られ、 様々な輝度分布のパターンが観測される。図一7(c)で は中央付近に海平面状の渦構造が見られ、図一7(d)で は筋状の波が太いものから細いものまで形成されている ことがわかる。

今後は可視画像・IR 画像ともに実スケール画像へと 変換するキャリブレーションを行い、両者の比較によっ て砕波における熱輸送の機構を解明していくことが目標 となる。その関係を応用し、図一7(c)(d)のように夜間 に行われる熱輸送の実態把握や、可視画像では撮影でき ない夜間の時間帯における砕波率の推定にもつながると 考えられる。

5. X バンドレーダー解析

X バンドはマイクロ波の中でも波長 3(cm)前後、周波 数帯 8~12(GHz)程度のものを指すバンド帯であり、降 雨や海面などが比較的良好な後方散乱を起こすことで利 用されている。海面での後方散乱としては、Haller et al (2003)によると三つの散乱メカニズムが考えられており、 一つが「高波や砕波における波形前面での鏡面散乱」、 二つ目が「砕波頂部でのウェッジ散乱」、そして三つ目 が「砕波過程における気泡の擾乱で生じる表面粗さによ るブラッグ散乱」である。それぞれの散乱メカニズムの 貢献度がXバンドレーダーの見通し角と相関を持つとさ れているが、どの散乱メカニズムも砕波と関係すること から今回研究対象に含めて考えている。

本観測において、X バンドレーダーは観測塔に設置し ているわけでなく田辺湾沿岸に設置している(図―1参 照)。現在は実際に得られた後方散乱生データを画像化 し(図―8参照)、それを 2~3 秒ごとの連続データとし て映像化して波の動きを確認している段階である。設置 位置と後方散乱強度データを見比べてわかるように、北 側には地形域が広がっているため後方散乱強度が飽和し てしまっているが、南西方向に広く海面が広がり後方散 乱している部分が散在していることがわかる。連続デー タとすると、この後方散乱している部分が次第に中心に 近づいてくることが確認できる。未だXバンドレーダー のデータのみからわかることはないが、可視画像から白 波被覆率などのパラメーターが導出できれば、同一海象 での広域砕波率などの推定につながる可能性などを秘め ていると考えている。



6. まとめ

最も長く白波砕波の評価法とされてきた可視画像において、客観的かつ自動的に処理を行う AWE 法の利用と、 AWE 法の高精度を保証する照度の均一性が保たれない 観測環境におけるトップハット画像を使った AWE 法の 応用を試みた。トップハット画像を用いた場合の AWE 法は、PIP の一部分的な急激な増加というグレースケー ル画像の処理では現れない Image Structure もち、その取 り扱いにはさらなる検証が必要である。また、熱赤外線、 X バンドレーダーを利用した白波砕波の評価法に関して は、夜間や広域など幅広い状態の白波砕波データの取得 を目指し、今後さらに可視画像との比較検証を繰り返し 行っていきたいと考えている。

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
2)志村 智也 • 竹見 哲也 • 森 信人 • 水

田 亮,全球大気気候-波浪結合モデルによる海面粗度 を通した波浪の気候への影響評価,土木学会論文集 B2(海岸工学),Vol 72, No. 2, I 1507-I 1512, 2016

3) ADRIAN H. CALLAGHAN AND MARTIN WHITE : Automated Processing of Sea Surface Images forthe Determination of Whitecap Coverage, JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY VOLUME 26, pp383-394

4) Jessup, A. T., C. J. Zappa, M. R. Loewen, and V. Hesany (1997), Infrared remote sensing of breaking waves, Nature, 385, 52–55.

5) Merrick C. Haller and David R. Lyzenga : Comparison of Radar and Video Observations of Shallow Water Breaking Waves, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 41, NO. 4, APRIL 2003, pp832-844

6) G. O. Marmorino and G. B. Smith : Bright and dark ocean whitecaps observed in the infrared, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 32, L11604,