海洋画像観測による白波波峰長と 残留泡沫のスペクトル特性

渡部 靖憲¹・南 健人²・猿渡 亜由未³・馬場 康之⁴・久保 輝広⁵・森 信人⁶・ 内山 雄介⁷・志村 智也⁸・大塚 淳一⁹・新井田 靖郎¹⁰・二宮 順一¹¹

 ¹正会員 北海道大学大学院教授 工学研究院(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目) E-mail: yasunori@eng.hokudai.ac.jp (Corresponding Author)
²学生員 北海道大学大学院 工学院(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
³正会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
⁴正会員 京都大学准教授 防災研究所 白浜海象観測所(〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田 2500-106)
⁵正会員 京都大学技術職員 防災研究所 白浜海象観測所(〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田 2500-106)
⁶正会員 京都大学教授 防災研究所(〒611-0011 京都府宇治市五ケ庄)
⁷正会員 京都大学教授 防災研究所(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
⁸正会員 京都大学准教授 防災研究所(〒611-0011 京都府宇治市五ケ庄)
⁹正会員 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)
¹⁰正会員 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部(〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646)

11正会員 金沢大学准教授 地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

本研究は、爆弾低気圧及び台風の通過に伴う高波イベントに対して海洋画像観測を行い、砕波に伴う白 波の発達と泡沫の残留に至る白波の被覆過程の時空間変化を見積もり、その統計的特徴を議論するもので ある. 白波画像の局所速度をオプティカルフローで見積り波峰長を与える既存の方法を展開し、環境光の 依存を低下させた上で波向き方向の積分なしに、波速に対する波峰長分布を与える方法を提案した. これ により砕波の発達に伴い成長し、砕波背後で停滞し残留する波峰長の特徴を表すことができる. また波峰 長の時間平均の指数則スケーリングは、爆弾低気圧及び台風イベント共に既報と矛盾なく高波速域で-6 乗 則を示した. 白波画像時空間スペクトルにより、砕波の発達に伴い白波が発達するアクティブ白波と残留 泡沫を分離することが可能となった.

Key Words: whitecap, wave breaking, spatio-temporal spectrum, ocean image

1. はじめに

外洋における風波砕波に起因する白波のレーダー あるいは画像観測により,運動量輸送とエネルギー 散逸 (Phillips 1985)¹⁾ や気体輸送 (Monahan 1971)²⁾ な ど大気-海洋間のフラックス輸送に加え,スペクトル の方向関数 (Goda 1997)³⁾ の評価が行われてきた. 観 測される白波は,砕波直後の波面上のものと再曝気 後に砕波背後に残存するものに大別され,上述の海 面粗過程の評価に与える影響が異なる. 前者につい て,Kleiss & Melville (2010)⁴⁾(以降 KM と略記) は,フ ラックス輸送の基本量となる白波波峰長 Λ を連続可 視画像のオプティカルフローをベースに決定する方 法を提案している.一方後者の残存白波については 海面を長時間に渡って被覆し続けるため,特に気体 輸送や生物的影響は大きいと考えるが,多くの研究 はなく,その空間分布や時間変化について理解が乏 しい.

本研究は,観測可視画像の時空間スペクトル解析 から,波流れ分散関係を基に白波波峰長及び残存白 波の分離を行い両者の時空間スケールの特徴化を目 指すと同時に,既存の手法との比較を通して白波特 性を再評価しようとするものである.

1



図-1 現地画像観測地点

2. 現地観測

現地画像計測は,北海道紋別市のオホーツクタワー 及び和歌山県白浜町の田辺中島高潮観測塔で行われた(図-1).

(1) オホーツクタワー

オホーツクタワーは海岸から約 1km 沖,水深約 8m に位置し,紋別港第 3 防波堤の先端付近から渡海橋 を経てアクセスできる展望台であり,海底階から地 上 3 階に観光施設と共に研究観測設備が併設されて いる.デジタルビデオカメラ (MAXIMUS MMX,解 像度 3200 × 1800pixel)が海上 29.65m のタワー屋上 の手摺に固定され,南東に向けて水平角 23°で海面 画像を撮影した.画像は 15 分間ごとに 1s 間隔, 16s 間に渡って保存され,オンラインでクラウドに保存 される.同サイトにおいて,風速,気圧,気温,海 面温度,海水温が同時に計測されており,気象海象 の総合的な検討が可能となる.なお,波浪について はナウファス紋別(南)の海象計のデータをもって 整理した.

(2) 田辺中島高潮観測塔

田辺中島高潮観測塔(京都大学 白浜海象観測所) は、和歌山県 田辺湾の南西方向に開けた湾口の中央 付近に位置する. 観測塔付近の水深は 30m 程度であ り、観測塔直下は水深約 10m の海丘となっている. デジタルビデオカメラ (解像度 1920 × 1080pixel)は 海上 13.7m の高さの踊り場手摺に固定され、北に向 けて水平角 60.5°で海面画像を撮影した.オホーツ クサイトと同様に 15 分間ごとに 1s 間隔, 20s 間に 渡って画像が撮影されオンラインでデータが転送さ れる.風速(海上 23m),波高を同時観測した.



図-2 (a): 観測可視画像(紋別サイト), (b): 較正後, (c): トリミング後



図-3 オプティカルフローによる白波画像の局所速度の分 布(左),白波画像の濃度微分値の分布(右)

3. 画像解析

両サイトにおいて,予めその長さが既知である船 舶の撮影画像をもとに,Affine 変換によって斜め下 向きに撮影された画像の変形を補正し,ピクセルに 対する実次元長さに較正した.これにより,1024× 512pixel に変換された撮影画像は102.4×51.2mの実 座標に対する画像濃度分布として解析することがで きる(図-2参照).二値化閾値に対する白波面積の 変化率をベースに,主観的閾値の決定をすることな く,自動的に白波領域を決定するAutomated Whitecap Extraction (以降 AWE と略記)⁵⁾によって変換画像中 の白波領域及び被覆率を決定した.



図-4 x方向のオプティカルフロー速度分布(左),白波領 域の各パッチ内平均速度分布(中),白波移動方向 の速度分布(右)

(1) 波峰長の推定

KM は、画像中の連続する白波画像からオプティ カルフローによって画像濃度速度を求め (図-3 左)、 白波パッチ外周のセグメント $dl_i(x, y, t)$ と白波画像 濃度勾配の方向の速度 $c_i(x, y, t) = (c_{xi}, c_{yi})$ を使って 波峰長 Λ (単位面積、二次元波速ビンあたりのセグメ ント長さの総和、単位:m⁻²s) を定義している.

$$\Lambda(c_x, c_y) = \frac{1}{A \left(\Delta c\right)^2} \sum_i \left(dl_i \mid c_x - \frac{\Delta c}{2} < c_{xi} < c_x + \frac{\Delta c}{2}, \\ c_y - \frac{\Delta c}{2} < c_{yi} < c_y + \frac{\Delta c}{2} \right)$$
(1)

ここで, A は検査領域面積, 速度のビン幅 $\Delta c = 0.5$ m/s である. θ を波向きとし $c = (c, \theta)$ とすると,式 (1) は 方向と無関係に

$$\Lambda(c) = \int_0^{2\pi} c \Lambda(c) d\theta$$
 (2)

と与えられる. KM は, 乱れを生成し散逸を引き起 こす領域を決定する目的の下, アクティブな白波の フロント部の画像濃度勾配方向の速度のみを使用し, 白波伝播の波速と Λ との関係を与えている. しか し, 白波画像の濃度微分値は一般に極めて複雑な局 所分布をもち (図-3 右), さらに環境光に大きく依存 するため, 抽出すべき白波の伝播速度以外の速度成 分や誤差が Λ の統計に影響を与える可能性がある.

本研究では、画像内のオプティカルフロー速度を求 めた上で、AWE によって与えられた白波領域の *n* 番目 パッチ内 (面積 *S_n*)の平均速度 $\overline{c_n}$ を求め (図-4),白波 パッチの平均移動方向 $m_n = (\overline{c_{xn}}, \overline{c_{yn}})/\sqrt{\overline{c_{xn}}^2 + \overline{c_{yn}}^2}$ と白波パッチ境界上の速度 c_{ni} との内積をとり白波 移動方向の $c \pm \Delta c/2$ の速度間の波峰長 $\Lambda(c)$ を次式で 直接求める方法を提案する.

$$\Lambda(c) = \frac{1}{A(\Delta c)^2} \sum_{n} \sum_{i} \left(dl_{ni} \mid c - \frac{\Delta c}{2} < \boldsymbol{m_n} \cdot \boldsymbol{c_{ni}} < c + \frac{\Delta c}{2} \right)$$
(3)



図-5 時空間3次元スペクトル解析のイメージ

なお、オプティカルフローは画素間濃度分布を2次 方程式で近似し、代数変換によって連続する2フレー ム画像の局所的変位を求める Farnebäck⁶⁾の方法を適 用した.

(2) 時空間 3 次元スペクトル

本研究では、1秒毎16秒間連続して撮影された白 波画像に対して 3 次元スペクトル解析を行い, 白波 の時空間変動スケールを評価した. これは、周波数 σ=0 (時間平均) から 2.75s⁻¹ まで 0.39s⁻¹ 毎の各周波 数に対して、横軸に画像 x 軸方向に変動する白波分 布の波数 k_x,縦軸に y 軸方向の波数 k_y の波数空間上 のスペクトル分布を与えるものであり、それぞれの 周波数で時間的に変動する白波の空間変動スケール を記述する (図-5). 同様な解析は、X-band レーダー の波面からの後方散乱画像に対して行われ、特に海 洋表層流れの分析に使われてきた⁷⁾.これは,流速 $U = (U_x, U_y)$ の流れ場が誘発するドップラーシフト と線形分散関係式に従う周波数 (ω)の和(即ち波流 れ共存場の分散関係)と3次元スペクトルで与えら れた周波数 σ_n との二乗誤差(次式に示す)を最小と する流速を求めるものである.

$$\delta = \sum_{n=1}^{N} \left(\sigma_n - \omega(k_{xn}, k_{yn}) - k_{xn}U_x - k_{yn}U_y \right)^2 \qquad (4)$$

ここで,Nはスペクトルピークの数, k_{xn} , k_{yn} はn番目のスペクトルピークの(x, y)波数成分,分散関係式

$$\omega = \sqrt{gk_n \tanh k_n h},\tag{5}$$

 $k_n^2 = k_{xn}^2 + k_{yn}^2$ である.

本研究が対象とする暴風下では、吹送流を伴う波 浪場が形成される.式(4)に対して最小二乗法によっ て得られるUに対する波流れ共存場の分散関係は、 波浪に追従する白波即ち、アクティブ砕波が輸送す る白波の時空間変動を表す.即ち、分散関係からの 逸脱をもってアクティブ白波と残留白波成分と分離 が可能となる.



図-6 対象高波イベント発生時のベストトラックと気圧,風速風向,有義波高,有義周期,白波被覆率の時系列(上:2022 年爆弾低気圧,下:2022年台風14号)

(3) 高波イベント

2022年12月22日太平洋上で発達した温帯低気圧 が北上し、12月23日さらに発達し続けながら北海道 東部で停滞した(図-6). この爆弾低気圧は北海道内 で大雪や強風を引き起こし、12月24日紋別市では 送電用の鉄塔が倒壊しオホーツク管内に大規模な停 電が発生した. この時の紋別市の最低気圧は980hPa を下回り風速は20m/sを越えるものであり、有義波 高 6m を越える高波が観測され、観測サイトでは非 常に高い白波被覆率を記録した.

2022年9月14日小笠原近海で発生した台風第14 号は日本の南を北西に進み,発達しながら9月18日 九州に上陸,19日にかけて縦断した.その後,進路 を東寄りに変え,中国,近畿,北陸地方を縦断した. 台風の通過に伴い特に九州,西日本では暴風,大雨, 時化が発生した.白浜サイトにおいても9月18日~ 20日にかけて風速18m/sを越える強風の中,うねり 性の有義波高5mを越える砕波を伴った高波を観測 した.

これら2つの高波イベントを対象に,画像分析を 行った.

4. 結果

(1) 波峰長の時間変化

図-7 は、紋別サイトで観測された白波画像と式(1) によって与えられた (*c_x*, *c_y*) に対する Λ(*c*) の分布を



 図-7 紋別サイトでの 12月 23日 9:00 観測画像 (8 秒間)
(上)と、その時刻において式 (1) により推定した白 波波峰長の分布(下)

表している.画像で確認される砕波前面で側方に広 がりながら輸送される白波領域を ($t = t_0+10s$),図中 矢印の方向の速度をもつ高い $\Lambda(c)$ が記述しており (図-7 左下),またその後,停滞あるいは逆方向の速 度をもつ複数の $\Lambda(c)$ ピークは砕波背後で残留あるい は後方や側方に輸送されながら白波パッチが分裂す る過程を示している(図-7 右下).

図-8 は,前図と同一の時間帯の白波画像に対する 式 (3) で定義された Λ(*c*) を表している. *c* < 4m/s に



図-8 白波波峰長分布の変化(12月23日9:00の10秒間)



図-9 紋別サイトでの 12 月 23 日 9:15 観測画像 (6 秒間)(上)とその時刻の白波波峰長分布の変化(下)

おいて,時間と共に波峰長が増加し, $c \approx 1 - 2m/s$ に 最大値をもつ平衡状態の分布へと漸近していくのが わかる.これは,異なる時間帯で観測された小規模 白波の発達過程においても観測された (図-9).その 後,残留泡沫としてパッチが分散され, $\Lambda(c)$ はc に 対して無秩序に分布する.

KM は航空白波画像をもとに $\Lambda(c)$ 分布フェッチ依存性を調査し,最大波峰長は波齢に影響される一方,高波速域においては波齢に依存しない-6乗の指数則勾配をもつ普遍領域が存在することを明らかにしている. **図-10**は,紋別及び白浜サイトにおける一時間平均 $\Lambda(c)$ 分布の時間変化を表したものである.それぞれのサイトにおいて,波高及び風速の時間変化(**図**-6) に対応した平均波峰長の変化はあるものの,その分布形に変化はなく,KM の発見と同一の-6乗則が高波速域に現れる.これは,KM の波峰長推定方法



図-10 一時間平均波峰長分布の時間変化(上:紋別サイト,下:白浜サイト)

に環境光の依存性を排除し,式(2)による積分なしで Λ(c)を容易に見積もる提案の手法の妥当性を示す.

一方, Phillips (1985)¹⁾ が与えたように *c* と *c* + *dc* 間の速度をもつ砕波による単位面積当たりの平均エネルギー散逸率:

$$\epsilon(\mathbf{c})d\mathbf{c} = bg^{-1}c^5\Lambda(\mathbf{c})d\mathbf{c} \tag{6}$$

を見積もるとすれば、白波が成長する砕波乱流の発 達期の波峰長が与えられるべきであり、平衡状態と なった砕波背後の白波領域とは区別しなければなら ない. さらに砕波後長時間に渡って残存する泡沫群 は気体輸送や海洋生態にとって重要であり、その分 離について次節で議論する.

(2) 白波スペクトル

図-7の砕波イベント間の σ=0.39s⁻¹(a), 0.79s⁻¹(b), 1.18s⁻¹(c), 2.74s⁻¹(d) (それぞれ, 16s, 8s, 5.3s, 2.3s 周 期の変動) に対する時空間スペクトル分布を図-11 に 表す.3(2)章に従って算定した波流れ共存場におけ る分散関係に従う波数域を黒の曲線で示しており, こ



図-11 波数スペクトル分布 (12月23日9:00); (a) 角周波数 σ=0.39s⁻¹, (b) σ=0.79s⁻¹, (c) σ=1.18s⁻¹, (d) σ=2.74s⁻¹



図-12 波数スペクトル分布 (12月 23日 9:15); (a) 角周波数 σ=0.39s⁻¹, (b) σ=0.79s⁻¹, (c) σ=1.18s⁻¹, (d) σ=2.74s⁻¹

の曲線上のスペクトル分布は伝播する波浪の変動と 対応した砕波前面で発達し輸送されるアクティブ白 波と考えることができる.観測された有義周期(図-6 参照) に対応する (a) 及び (b) では, 黒曲線上に幅広い スペクトル分布が現れており、これは伝播波浪に輸 送されながら白波領域が拡大する白波の時間的成長 を表していると考えられる. (c) 以降の短周期変動で は, 波数空間の原点から遠い位置(即ち $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ の大きい位置) で離散的なスペクトルが生じており, 波浪による輸送とは無関係な速度 σ/k でゆっくりと 輸送される分散した残留白波パッチの存在を説明す る. さらに高周波変動となる (d) では, 殆ど分散関 係とは無関係な分布を表しており、波浪の伝播とは 異なる砕波過程における局所的な泡沫分布変動を示 す.時間的に高解像で観測を行えば砕波乱流に対応 した泡沫分布の変動も取得できる可能性がある.

図-12 は、図-9 における時間帯の小規模砕波に対 するスペクトルを表しており、このケースにおいて も同様な解釈の下アクティブ白波と残留泡沫分布の 時空間スケールを説明可能である.

白浜サイトにおいても同様な分析を行ったが,有 義周期で十数秒を超えるうねり性の波浪が卓越し(図 -6参照),本観測における 16 秒の画像計測時間では 十分な周波数分解が行われなかった.うねり性のイ ベントに対して同様な分析を行うためには長期間連 続撮影が必要である.

5. 結論

AWE にオプティカルフローを組み合わせること で、環境光依存性を低減した波速に対する白波波峰 長分布の推定方法を提案した.また、観測可視画像 の時空間スペクトル解析から、アクティブ白波と残 留泡沫の時空間スケールの特徴化を検討した.

本研究では AWE 法を利用して環境光に依存しな い白波外周の積分を行った.高波浪イベント時に対 し式 (3)を適用することで,時々刻々波峰長が増大 し,再曝気後に砕波背後に白波が残留する白波発達 過程の特徴を表した.さらに,一時間平均波峰長分 布から,KMと同様に高波速域において-6乗指数則が 確認でき,本研究で提案する手法の有効性を示した. また,時空間スペクトル解析に波流れ共存場の分散 関係を組み合わせ,波浪に追従するアクティブ白波 の特定並びに,残存白波成分との分離を行うことで, 両者の時空間スケールの特徴が説明可能となった.

白浜サイトにおいても同様な分析を行い類似の結 果を得たが,うねり性のイベントに関しては本観測 の計測時間が不十分であり課題が提示された.

謝辞:本研究の一部は,科学研究費補助金(23H00191) の支援を受けた.ここに記して謝意を表する.

6

REFERENCES

- 1) Phillips, O.M.: Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves, *J. Fluid Mech.*, Vol. 156, 505–531
- Monahan, E. C.: Oceanic Whitecaps, J. Phys. Oceanogr., 1, 139–144, 1971.
- Goda, Y.: Directional wave spectrum and its engineering applications, Advances in Coastal and Ocean Engineering, Vol. 3, World Scientific, pp. 66-71, 1997.
- Kleiss, J.M. and Melville, W.K.: Observations of wae breaking kinematices in fetch-limited seas, Journal of Physical Oceanography, Vol. 40, 2575–2604.
- 5) Callaghan, A.H. and White, M.: Automated processing of

sea surface images for the determination of whitecap coverage, *J. Atmospheric and Ocean TEchnology*, Vol. 26, 383 – 394, 2009.

- Farnebäck, G:: Two-frame motion estimation based on polynomial expansion, SCIA 2003, LNCS 2749, 363–370, 2003.
- Huang, W.: Surface curent measurement under low sea state using dual polarized X-band nautical radar, *IEEE J of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 5 (6), 1868 – 1873, 2012

(Received March 16, 2023) (Accepted July 20, 2023)

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF WHITECAP WAVE CREST LENGTH AND RESIDUAL FOAM FROM SEA SURFACE IMAGE OBSERVATION

Yasunori WATANABE, Kent MINAMI, Ayumi SARUWATARI, Yasuyuki BABA, Teruhiro KUBO, Nobuhito MORI, Yusuke UCHIYAMA, Tomoya SHIMURA, Junichi OTSUKA, Yasuo NIIDA and Junichi NINOMIYA

This study estimates the spatio-temporal changes in the whitecap coverage process from the development of whitecaps associated with wave breaking to the residual foam, and discusses the statistical characteristics of the whitecap coverage process by using sea surface image observations for storm surge events associated with the passage of a bomb cyclone and a typhoon. We propose a new method to estimate the crest lengths of whitecaps by using optical flow to estimate the local velocity of the whitecap image. This method can represent the characteristics of wave crest lengths that grow with the development of breaking waves and remain behind the wave breaking. The exponential scaling of the time-averaged wave crest length shows a -6 power law in the high wave speed region, consistent with previous reports for both bomb cyclones and typhoon events. Spatio-temporal spectrum of whitecap image enables us to separate active whitecaps from residual bubbles, which develop with the development of wave breaking.