

海面画像計測による白波被覆率の評価

杉原, 裕司
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋システム学専攻

津守, 博通
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋システム学専攻

古寺, 大悟
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋システム学専攻

吉岡, 洋
京都大学防災研究所

他

<https://doi.org/10.15017/16714>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 25 (4), pp.405-412, 2004-03. 九州大学大学院総合理工学府
バージョン：
権利関係：



海面画像計測による白波被覆率の評価

杉原 裕司^{*1,†}・津守 博通^{*2}・古寺 大悟^{*3}
吉岡 洋^{*4}・芹澤 重厚^{*4}・増田 章^{*1}

(平成16年1月30日 受理)

Estimation of Whitecap Coverage from Digital Images of the Sea Surface

Yuji SUGIHARA, Hiromichi TSUMORI, Daigo FURUTERA, Hiroshi YOSHIOKA,
Shigeatsu SERIZAWA and Akira MASUDA

[†]E-mail of corresponding author: sugihara@esst.kyushu-u.ac.jp

The whitecap coverage, which is defined as the area of whitecaps per a unit sea surface, was obtained from field imaging measurements. The measurements were made at the storm surge observation tower of Shirahama oceanographic observatory, Wakayama, Japan. High-resolution images of whitecaps were taken using a 3CCD digital camera system mounted at 14 m above the mean sea level, and they were stored automatically at a time interval of 1 s. The present results indicate that the 1/3 power of the whitecap coverage increases linearly with the wind speed, and that the coverage is influenced significantly by the near-water air stability and the state of the development of surface waves. In addition, it is observed from our data set that whitecaps are produced most actively under the condition of pure wind sea.

Key words : whitecap coverage, wind wave, breaking wave, air-sea interaction, imaging measurement

1. 緒 論

白波砕波は海面の乱流を強化し、著しい気泡の生成を伴うことから、大気海洋間における運動量・熱・気体の交換において重要な役割を果たすものと考えられている。海洋の白波砕波を定量化する指標の一つに白波被覆率 (whitecap coverage) がある。白波被覆率は、一般に海域の単位面積当たり存在する白波領域の面積として定義される。Monahan¹⁾ は、大西洋、メキシコ湾などにおいて船舶上から海面のカメラ撮影を行った。彼は、写真から白波領域を切り抜き、写真1枚に対する重量比から白波被覆率を算定した。そして、5~20枚の写真による平均重量比を白波被覆率の30分~1時間平均値とし、その評価式として次式を提案した。

$$W_C = 13.5 \times 10^{-4} U_{10}^{3.4} \quad (1)$$

ここで、 W_C (%) は白波被覆率、 U_{10} は高度10mにおける平均風速を示す。また、Ross and Cardone²⁾ は、風速10~25m/s、有義波高2.5~8.0mという荒天時における海面の航空写真撮影を行った。彼らは、カラー写

真濃度計を用いて32段階の海面輝度レベルの違いから白波被覆率を算出した。解析した画像の面積は最小でも1000m²あり、画像の範囲が広大であるため統計平均的な白波被覆率が算定されているとした。Monahan³⁾ は、海面のビデオ撮影を行った画像をグレースケール画像に変換し、256段階の輝度レベルの違いによって白波領域を判別するというアイデアを提案した。これ以降、白波砕波の観測にはビデオ撮影を、画像解析にはデジタル処理を用いることが主流となった。また、彼は白波被覆率と風速の間には次式のような3乗則の関係があるとした。

$$W_C = c_1 (U_{10} - c_0)^3 \quad (2)$$

ここで、 c_1 、 c_0 は経験的に得られる定数であり、上式は最も広く支持されている経験則の一つである。このような状況の中で、Zhao and Toba⁴⁾ はこれまでの式が風速のみで表示されている点に着目し、波浪条件も取り入れた評価式を構築するべきであると主張した。彼らは、過去の様々な研究によって得られた観測データを再整理した結果、Toba and Koga⁵⁾ が提唱した無次元パラメータ $R_B (= u_*^2 / \nu \omega_p)$ が最もデータの分散が小さく、これを用いて白波被覆率を評価すべきであるとされた。ここで、 u_* は気流側の摩擦速度、 ν は空気の動粘性係数、 ω_p は風波のピーク波角周波数を示す。彼らは、 R_B を用いて白波

*1 大気海洋環境システム学専攻

*2 大気海洋環境システム学専攻博士課程

*3 大気海洋環境システム学専攻修士課程

*4 京都大学防災研究所

被覆率を次式のように表した。

$$W_C = 3.88 \times 10^{-5} R_B^{1.09} \quad (3)$$

上式は波浪特性量を含んでおり無次元表示されているという点で興味深いですが、その妥当性を検証するためにはさらに検討が必要であると思われる。

菅野他⁶⁾は、遠州灘、駿河湾、相模湾および鹿島灘において航空機、崖の上および地上から海面写真撮影を行い、同時に風速、水温、気温、吹送距離を測定した。彼らは重回帰分析の結果から、白波被覆率の支配因子として、海面水温や海上気温に関する海面の熱的安定性、海上風速に関する海面への力学的擾乱および吹送距離や吹送時間に関する風波の発達状態の3つを挙げた。Stramska and Petelski⁷⁾は、北大西洋の北極海域において船舶上からデジタルカメラ撮影を行い、白波被覆率を算出した。撮影と同時に風速、気温、水温、波高などを船舶上から観測し、大気安定度、水温および波の発達状態などを指標として白波被覆率の風速依存性について検討した。彼らは、波の発達状態によって白波被覆率と風速の相関式が有意に異なることを指摘した。しかし、一方で白波被覆率は大気安定度や水温の変化にはほとんど影響されないと結論づけた。このように、白波被覆率の温度依存性については研究者によって意見が分かれており、確定的な結論を得るには至っていないのが現状である。

白波特性量に基づいて大気海洋間の運動輸送量や気体交換量を評価しようとする試みもある。Monahan³⁾は、白波領域を砕波が起こっている波峰部分とその後部に漂っている部分に分けて、エネルギーや運動量の輸送は主に波峰部分で支配的であるとした。Monahan and Spillane⁸⁾は、白波砕波面と非白波砕波面で気体交換速度が異なることに着目し、次式のような気体交換速度 k_L の評価式を提案した。

$$k_L = k_M(1 - W) + k_W W \quad (4)$$

ここで、 W は比率で表した白波被覆率、 k_M および k_W はそれぞれ非白波砕波面および白波砕波面での気体交換速度を示す。また、Asher et al.⁹⁾ は上式の白波砕波面での気体交換速度 k_W を砕波乱流による交換速度 k_T と気泡による交換速度 k_B とに区別し、次式を導いた。

$$k_L = (k_M + W(k_T - k_M)) + Wk_B \quad (5)$$

さらに、Asher and Wanninkhof¹⁰⁾ は、上式の k_M 、 k_T 、 k_B の風速依存性に関する考察を深め、次式のような気体交換速度の評価式を提案した。

$$k_L = \left[\{1.3U_{10} + W(3200 - 1.3U_{10})\} Sc^{-1/2} + W(-1.03/\alpha + 170\alpha^{-0.37} Sc^{-0.18}) \right] \times 10^{-4} \quad (6)$$

ここで、 α はオストワルド溶解度を示す。式(6)の右辺第1項は風と砕波に起因する乱流の効果を、第2項は気泡

内から海水中への溶解の効果を表している。また、Asher et al.¹¹⁾ は、北大西洋での学際的な大気海洋間の気体交換実験 (GasEx-98) で得られた、

$$W = 3.7 \times 10^{-6} (U_{10} - 1.2)^3 \quad (7)$$

を式(6)に代入すると、McGillis et al.¹²⁾ が実海洋で得た k_L の観測結果と同様の挙動を示すことを指摘している。

このように、白波被覆率は大気海洋相互作用を特徴づける指標となるもので、白波被覆率を推定することの重要性は今後さらに高まるものと思われる。これまでの研究で得られた海面画像の多くは船舶上から撮影されたものであり、それらのほとんどは撮影俯角が小さい。そのような場合、波面の前面、背面のどちら側から撮影するかによって白波被覆率が異なるという問題が生ずる。一方、航空機からの撮影の場合、ほぼ垂直で良質の画像を得ることが可能であるが、撮影時の気象・波浪データを得ることが難しく、また大変な費用がかかることからその実施が困難である。本研究の目的は、気象・波浪の定時観測を行っている海洋観測塔において長期間の海面画像撮影を実施し、気象や波浪条件に対する白波被覆率の依存性について検討することである。本研究では、3CCD デジタルビデオカメラを用いて1秒間隔で高解像度の海面デジタル画像を取得し、得られた画像から白波被覆率の時系列を算出する。さらに、波の方向スペクトルから風波やうねりの伝播方向を同定し、それらの偏角が白波被覆率に及ぼす影響についても検討する。

2. 観測概要

観測は、和歌山県白浜町の田辺湾沖合約2kmに位置する海洋観測塔 (京都大学防災研究所災害観測実験研究センター所有) において行われた。Fig. 1に、観測塔の位置と周辺海域の概略図を示す。図からわかるように観測塔の設置海域は南西方向が外海に面しており、付近の平均水深は約30mである。ただし、観測塔は海域にある水深10mの海底台地の上に設置されている。ここでは、比較的大きなうねりは主に南西方向から伝播してくることになる。

Fig. 2に海洋観測塔と測器の設置位置の概略図を示す。平均海面から高度23mの位置に超音波風速計が設置されており、毎時20分間、サンプリング間隔10Hzで風速の3方向成分の瞬時値が取得されている。本研究では、超音波風速計からの出力値を10分ごとのブロックに分け、風向・風速の10分平均値を算定した。また、高度16mの位置に気温 T_a を測定する温度計が、14mの位置に海面温度 T_s を測定する放射温度計が設置されている。これらのデータは、30秒間隔で記録されており、大気安定度を示す $\Delta T (= T_a - T_s)$ を評価するために用いられた。観測塔から南西に20m離れた海底には WAVEADCP が

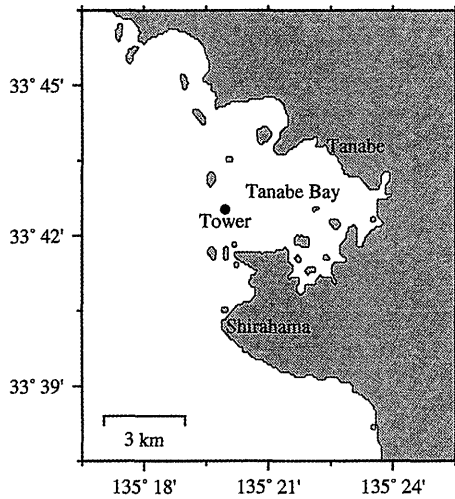


Fig. 1 Location of the storm surge observation tower of Shirahama Oceanographic observatory.

設置されており、毎時 20 分間その直上の水位変動を測定している。本研究では、WAVEADCP で得られたデータから、毎時 20 分間ごとに波浪特性量として、有義波高 H_s 、ピーク波周期 T_p 、ピーク波向き D_p および方向スペクトルを算定した。これら以外にも、風向・風速、気圧、水位、水温等が 30 秒間隔で記録されており、同観測塔では白波被覆率の気象・波浪依存性を評価するための各種データの取得が可能であることがわかる。

本研究では、海面画像を常時撮影するために無人カメラシステムを用いており、その構成を Fig. 3 に示す。使用したカメラは、38 万有効画素の 3CCD デジタルビデオカメラ (SONY DXC-390) であり、用いたレンズの焦点距離は 8 mm であった。カメラは、雨や海塩から保護するためにハウジングに収納し、海面高度約 14 m の位置にある手摺りに固定された。カメラの撮影方向は方位約 215 度の方向であり、WAVEADCP が設置されている海底の直上海面を画像の中央付近に納めるためにカメラの俯角を約 33 度にした。カメラ以外の記録機器は全て観測塔にある記録室の室内に納められた。海面デジタル画像の記録にはハードディスクレコーダ (SONY HSR-X200) を用いており、そのディスク容量は 80 G バイトであった。撮影期間は 2003 年 11 月 5 日から 12 月 9 日の 35 日間で、タイマー設定により自動で 1 日 7 時間 (8:30 ~ 15:30) の海面画像を 1 秒間隔で記録した。

3. 白波被覆率の算定方法

白波被覆率は、海域の単位面積あたりに存在する白波領域の面積として定義される。その算定方法は次のようである。まず観測で得られた海面デジタル画像を PC へ取り込み、カラー原画像をグレースケール画像へ変換する。グレースケール画像の輝度レベルは 256 階調である。そして、原画像と比較しながら白波被覆面を同定する輝

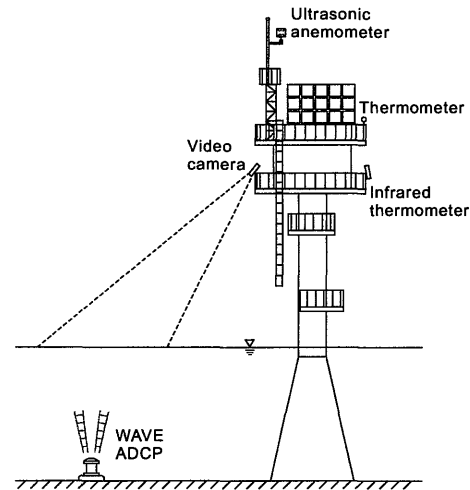


Fig. 2 Schematic diagram of the observation system.

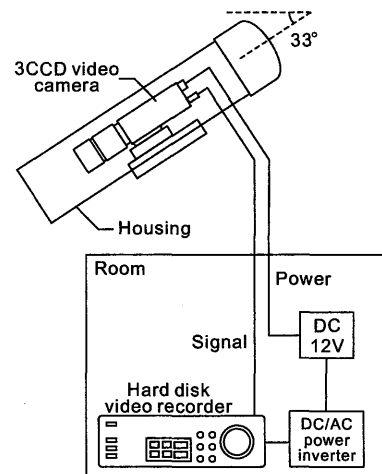


Fig. 3 Schematic diagram of the camera system.

度のしきい値を決定し、白波被覆面のピクセル数をカウントする。解析領域全体のピクセル数で白波領域のピクセル数を割ったものを白波被覆率として 1 秒間隔で算出した。なお、海面の輝度が観測時間を通して変化するため、画像解析では 10 分毎にしきい値と解析領域を変化させた。Fig. 4(a) に、グレースケール変換された海面画像の一例を示す。白線の枠内が解析領域を示しており、原画像のピクセル数は 710×478 、解析領域のピクセル数は 590×278 である。この図より、本研究の画像では白波砕波の状況が明瞭に捉えられていることがわかる。また、Fig. 4(b), (c) に画像上に引かれた線に沿った輝度分布と白波被覆率の算定に用いた輝度しきい値を示す。この図より、白波砕波面と背景の輝度レベルの差はかなり大きく、設定したしきい値によって白波被覆面を同定することが妥当であることがわかる。本研究では、10 分間のデジタル画像 600 枚から算出された被覆率の瞬間値を

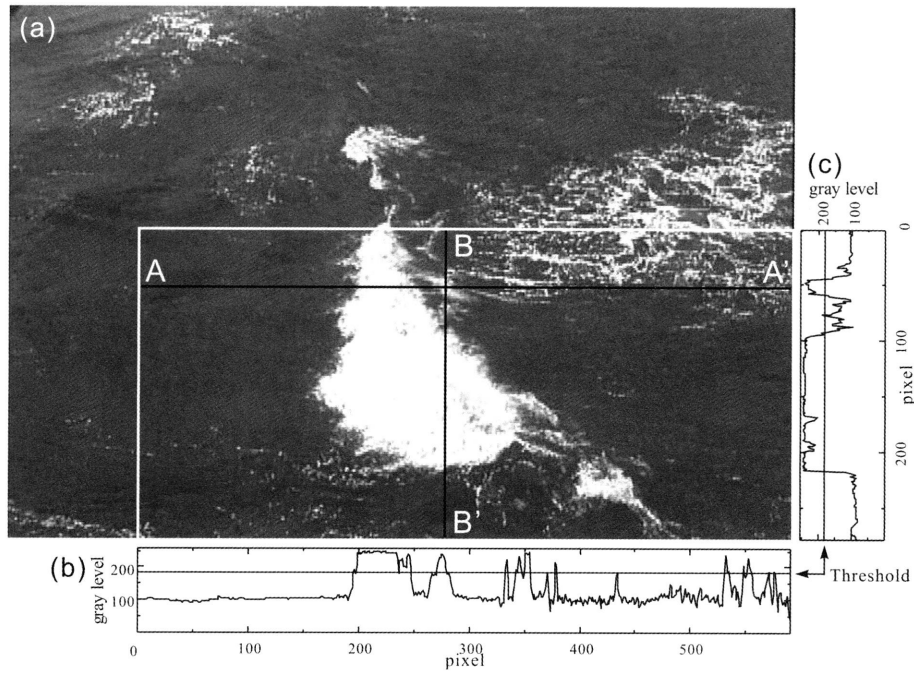


Fig. 4 (a) Picture of whitecaps. (b) Distribution of brightness on the A-A' line. (c) Distribution of brightness on the B-B' line.

算術平均することにより、10分間平均値として白波被覆率を求めている。なお、太陽反射による海面輝度が高く、白波被覆面との区別が困難である画像については解析の対象から外し、精度良く白波被覆率を算定できるもののみについて解析を行った。以下の解析では10分平均値の白波被覆率が用いられており、本研究の白波被覆率は従来の研究に比べて高い精度を有するものと思われる。

4. 結果および考察

Fig. 5に、白波撮影時に観測された平均風速 U 、風向 WD 、有義波高 H_s 、ピーク波周期 T_p 、ピーク波向き D_p および大気安定度 ΔT の時系列を示す。図中の風速と風向は10分平均値（毎時2点）を、有義波高、ピーク波周期およびピーク波向きは20分平均値（毎時1点）を表している。また、大気安定度は10分平均値（毎時6点）を示している。観測期間の前半は比較的風速が小さく波も穏やかであるが、後半には11月30日から翌日にかけて台風が接近したために、風速、有義波高およびピーク波周期が増加している。観測期間を通じておおそ2つの卓越風向（NNW, E）が見られることがわかる。NNWは冬季の季節風に対応する風向である。また、観測期間における最大平均風速、有義波高、ピーク波周期はそれぞれ15 m/s, 3 m, 15 sec程度であった。ピーク波向きの卓越方向は（SW, NW）であり、SWは外海から伝播するうねりに、NWは季節風によって発生した風波に対応する波向きであると思われる。特に有義波高の大きい台風接

近時にはSW方向からの周期の長いうねりの伝播が認められる。以上のように、この観測点では、代表的な波浪状態としてNW方向から風波が伝播する場合、SW方向からうねりが伝播する場合、これらが混在する場合のケースが考えられる。大気安定度 ΔT は、おおそ0 ~ -11 °Cで変化しており、観測期間を通じて概ね負の値を示していることがわかる。このことは、観測期間の大部分において海面付近の大気の状態が不安定であったことを意味する。従って、本研究の白波被覆率は、大気の状態が中立もしくは不安定の条件のみで得られたデータであることに注意する。

白波被覆率を算定した時間帯における全ての波の方向スペクトルを算出した。その結果、波浪場の状態は、風波のみが存在する場合（Pure wind sea）、うねりが卓越する場合（Swell-dominated sea）、風波の伝播方向と同じ向きにうねりが伝播する場合（Following swell）、風波の伝播方向に対して横から交差するようにうねりが伝播する場合（Cross swell）の4つのケースに分類できることがわかった。ただし、うねりが卓越する場合においても、風は吹いており小さな風波は存在していることに注意する。風波とうねりが混在する場合の分類については、風波の伝播方向に対して $\pm 45^\circ$ の方向にうねりが伝播する場合を Following swell, $\pm 45 \sim 135^\circ$ の方向にうねりが伝播する場合を Cross swell とした。このような分類の基準は、Donelan et al.¹³⁾ が海面抵抗係数におけるうねりの影響を考察する際に用いたものと同じである。

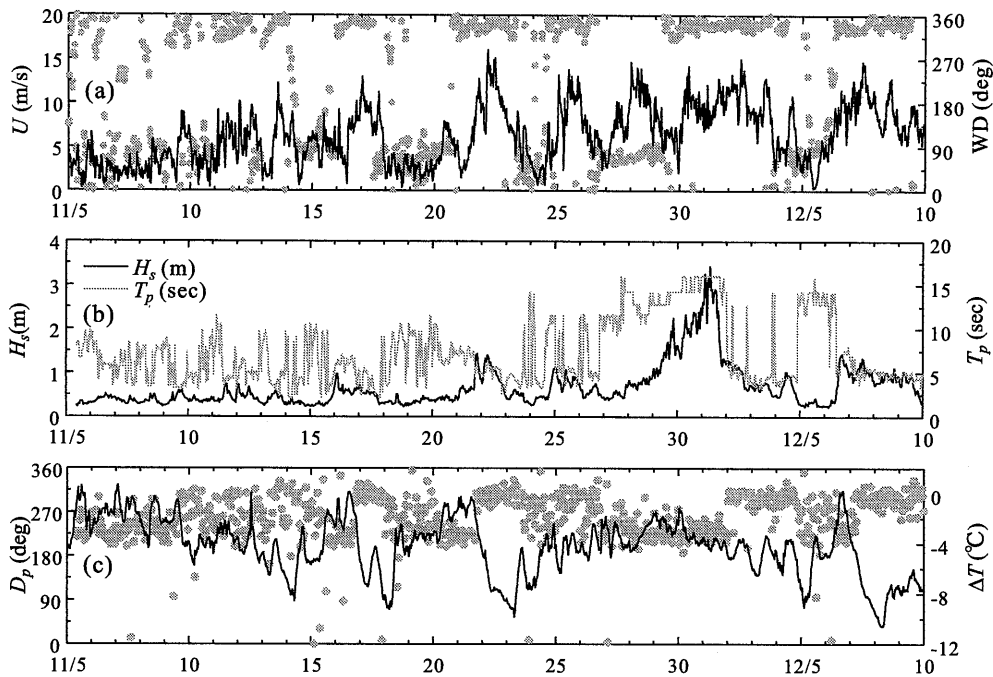


Fig. 5 Meteorological and wave conditions: (a) wind speed and direction; (b) significant wave height and spectral peak period of wave; (c) peak direction of wave and temperature difference between air and sea surface.

Fig. 6 に、これらの代表的な 4 つの波浪条件における方向スペクトルの一例を示す。ここで、図中の矢印は風速ベクトルを示し、方向スペクトルは波が伝播してくる方位を表していることに注意する。Pure wind sea の場合でも、厳密には風向に対して西寄りに伝播方向が傾いており、さまざまな方向からの波が混在している。また、うねりは外海に面している南西方向から主に伝播してくることがわかる。後ほど、これらの分類に基づいて、白波被覆率と風速の関係における波浪条件の依存性について検討する。

Fig. 7 は、白波被覆率 W_C と平均風速 U との関係を示したものである。ここで、本研究の白波被覆率と風速のデータについては 10 分平均値をプロットしている。なお、本研究では平均風速として高度 23 m の値を用いている。一般に、このような場合高度 10 m の風速値を用いることが多いが、23 m における風速値との差異はあまり大きくないと考えられるため、ここでは平均風速の高度補正は行っていない。また、比較のために他の研究者のデータおよび観測値に基づいた経験式もプロットされている^{1),2),4),14)~18)}。本研究で得られた W_C はオーダー的には他の研究者のデータとよく一致していることがわかる。ただし、我々の観測値では、3 m/s 付近の低風速から 10 m/s を超える高風速に至るまでの W_C と U の間の関係が明瞭に示されている。 U が 6 m/s より小さくなると、 W_C は急激に減少し経験式と異なる挙動を示している。また、10 m/s を超えるような高風速領域では本研究

で得られた W_C は、Zhao and Toba⁴⁾ の経験的に定量的に一致し、風速の 3 乗に比例して増加するように見える。

Fig. 8 は、本研究によって得られた白波被覆率 $W_C^{1/3}$ と U の関係を示したものである。Fig. 7 でも見たように高風速領域では白波被覆率は風速の約 3 乗に比例して増加する傾向にあると考えられるので、ここでは U に対し $W_C^{1/3}$ がプロットされている。この図より風速の増加とともに白波被覆率 $W_C^{1/3}$ は線形的に増加しているように見える。図中の実線は $W_C^{1/3}$ と U の関係を線形の最小自乗近似直線で表したものであり、図中の式が同定された近似直線を示している。また、 r は相関係数である。データの散乱は比較的大きいが、近似的にはこのような経験式で W_C を表すことができるようである。同様の経験式は式 (2) に示されており、本研究の結果から式 (2) の定数として $c_1 = 1.11 \times 10^{-3}$ 、 $c_0 = 3.41$ が得られる。

Fig. 9 は、大気安定度 ΔT を指標として $W_C^{1/3}$ と U の関係を示したものである。 ΔT が負値でその大きさが大きいほど大気の大気不安定性は強いとみなされる。ここでは図に示されているように、 $0 < \Delta T < -4$ の場合と $-4 < \Delta T < -11$ の場合に分けて、それぞれのデータの組に対して最小自乗法による近似直線を求めた。この図より、同じ風速に対しては大気不安定性が強いほど W_C は大きな値を示すことが明らかである。また、それぞれの近似直線の相関係数は、Fig. 9 のそれよりも高い値を示しており、このことはデータの散乱の原因が大気安定度に関係することを示唆している。Stramska and Petelski⁷⁾

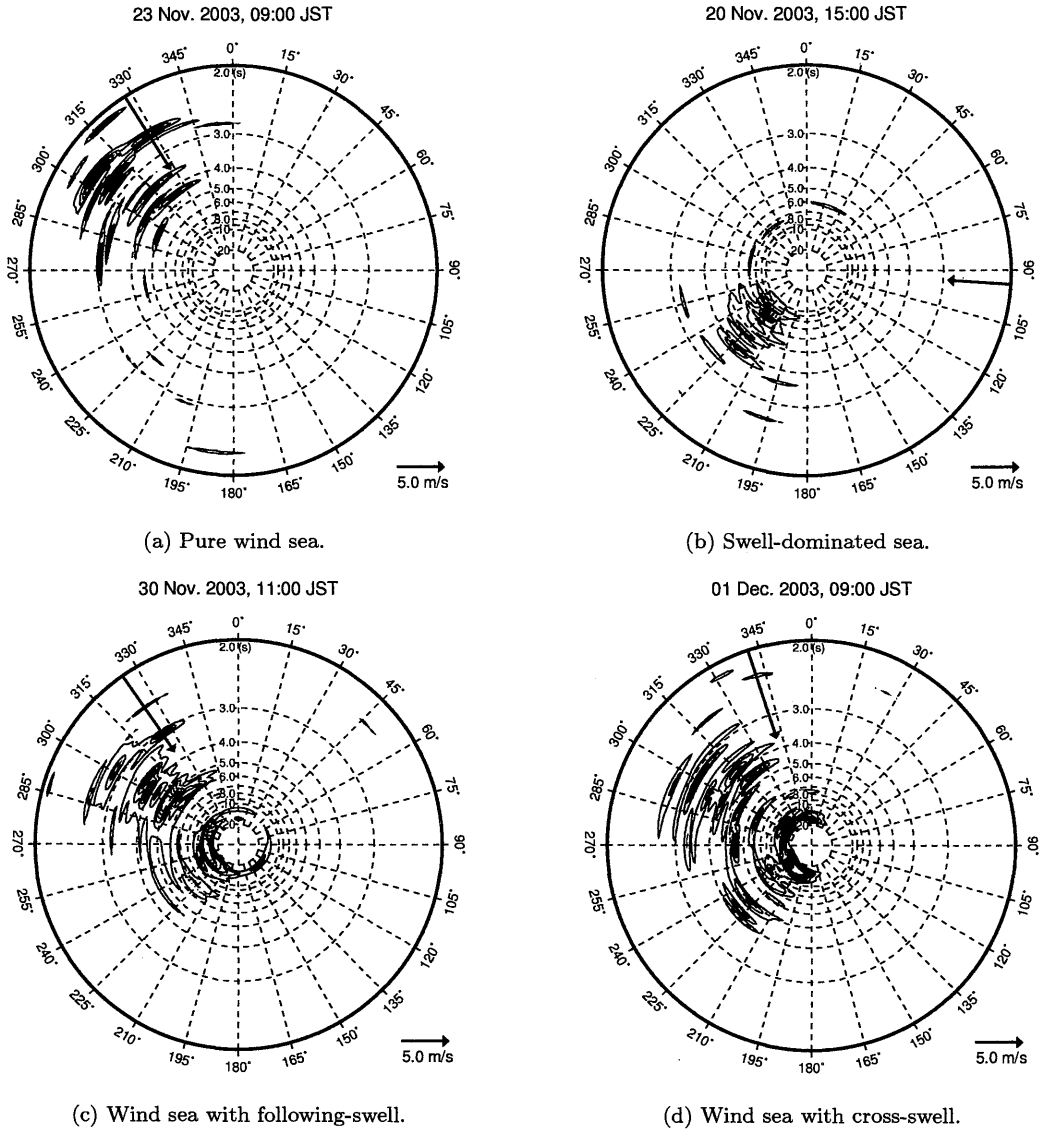


Fig. 6 Directional wave spectra.

は海面付近の大気の安定性はどのような風速の場合も白波被覆率に影響を与えないとしたが、本研究の結果は彼らの結論と矛盾している。ただし、白波被覆率に対する大気安定度の影響を明確にするには幅広い ΔT に関する分析が不可欠であり、今後さらに検討が必要である。

Fig. 10 は、波の発達状態で区別した $W_C^{1/3}$ と U の関係を示す。ここでは、 H_s の時系列に 12 時間移動平均を施した後に、 H_s が時間的に増加すれば発達期、減少すれば減衰期とした。また、波高の高い状態が続く場合は発達期とした。この図より、本研究での風速の範囲では発達期にある波よりも減衰期にある波のほうが W_C が相対的に大きくなっているように見える。また、減衰期に対する近似曲線の勾配は発達期のそれに比べてかなり小さくなっている。これらの挙動は砕波機構と深く関わっていると思われ、その物理的理由を明らかにするためには

今後さらに検討が必要である。

Fig. 11 は、風波の伝播方向に対するうねりの偏角で分類された、 $W_C^{1/3}$ と U の関係を示す。なお、この分類は、Fig. 6 において示された方向スペクトルによる波浪条件の分類に基づいている。この海域では Cross swell の頻度が高く、Following swell のケースはほとんどない。また、当然であるが Swell-dominated sea は低風速の場合に限られている。図中の実線は、Pure wind sea のみについて算定された近似直線を、点線はそれ以外の全てのデータを対象に算定された近似直線を示す。これより、風波のみが卓越する Pure wind sea の条件では、うねりの存在する他の条件に比べて W_C が相対的に大きくなることがわかる。このことは、白波砕波は風波に支配されており、うねりの存在が白波砕波を抑制することを示唆している。

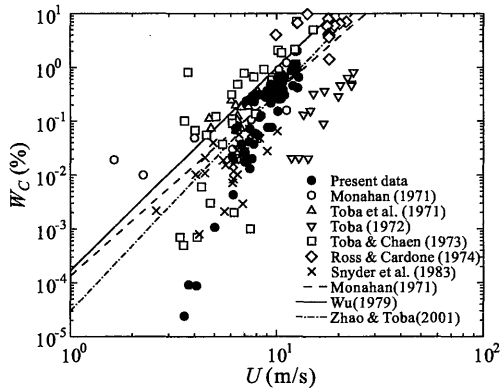


Fig. 7 Relationship between W_C and U .

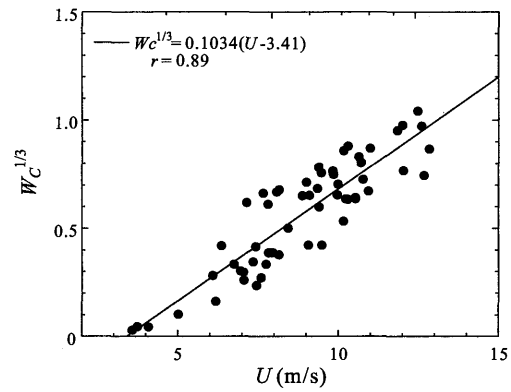


Fig. 8 Relationship between $W_C^{1/3}$ and U .

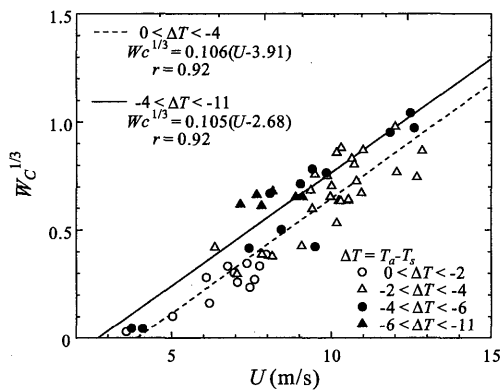


Fig. 9 Dependence of $W_C^{1/3}$ on air stability.

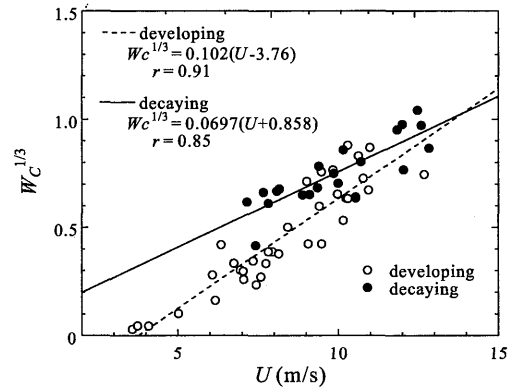


Fig. 10 Dependence of $W_C^{1/3}$ on the state of the development of waves.

5. 結 論

本研究では、海洋観測塔において1秒のサンプリング間隔で海面デジタル画像を取得し、600枚の画像の平均値として精度の高い白波被覆率 W_C を算定した。 W_C と平均風速 U の関係における気象・波浪条件の依存性を検討した。本研究の結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 本研究で得られた W_C の値はオーダー的に他の研究者のものと同様で、3 m/s 付近の低風速から 10 m/s を超える高風速に至るまでの W_C と U の関係が明らかとなった。 W_C は U が 6 m/s 以下になると急激に減少し、高風速域では風速の3乗に比例して増加する。また、本研究の W_C は高風速域で Zhao and Toba⁴⁾ の経験式に定量的に一致する。
- (2) 気温 T_a と水表面温度 T_s の差 $\Delta T (= T_a - T_s)$ で定義される大気安定度を指標として W_C と U の関係を調べた。その結果、同じ風速に対しては大気不安定性が強いほど W_C は相対的に大きな値を示すことが明らかとなった。
- (3) 波の発達状態を指標として W_C と U の関係を調べ

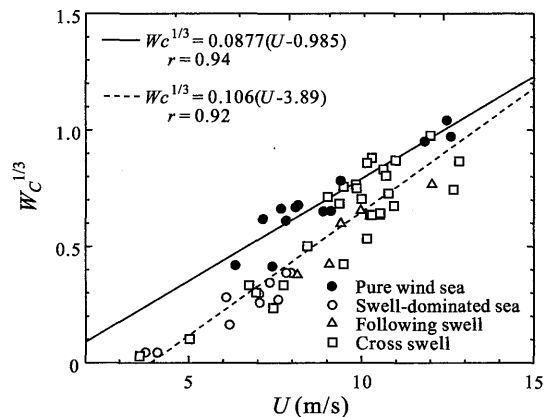


Fig. 11 Dependence of $W_C^{1/3}$ on the conditions of wind sea and swell.

た結果、本研究の風速範囲では発達期にある波よりも減衰期にある波の方が W_C が相対的に大きくなることがわかった。

- (4) 波の方向スペクトルから風波とうねりの伝播方向を同定し、風波の伝播方向に対するうねりの偏角を指

標として W_C と U の関係を調べた。これより、風波のみが卓越する場合の方が、うねりの存在する場合に比べて W_C が相対的に大きくなることがわかった。このことは、白波砕波は風波に支配されており、うねりの存在が白波砕波を抑制することを示唆している。

謝 辞

本研究を行うにあたり、九州大学教授松永信博先生にご助言を頂きました。本研究の一部は、平成14年度総理工奨励研究費および平成15年度科学研究費補助金の援助の下で行われたものです。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Monahan, E. C.: Oceanic whitecaps, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 1, pp. 139-144, 1971.
- 2) Ross, D. B. and Cardone, V.: Observations of oceanic whitecaps and their relation to remote measurements of surface wind speed, *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, pp. 444-452, 1974.
- 3) Monahan, E. C.: Occurrence and evolution of acoustically relevant subsurface bubble plumes and their associated, remotely monitorable, surface whitecaps, *Natural Physical Sources of Underwater Sound*, edited by B. R. Kerman, Kluwer Acad., Noewell, Mass., pp. 503-517, 1993.
- 4) Zhao, D. and Toba, Y.: Dependence of whitecap coverage on wind and wind-wave properties, *J. Oceanogr.*, Vol. 57, pp. 603-616, 2001.
- 5) Toba, Y. and Koga, M.: A parameter describing overall conditions of wave breaking, whitecapping, sea-spray production and wind stress, *Oceanic Whitecaps*, edited by E. C. Monahan and G. Mac Niocaill, D. Reidel, pp. 37-47, 1986.
- 6) 菅野 進, 古島靖夫, 千葉康弘, 杉森康宏: ホワイトキャップの海面被覆率と風速, その他の物理的要因との相互関係, 海洋理工学会誌, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10, 1997.
- 7) Stramska, M. and Petelski, T.: Observations of oceanic whitecaps in the north polar waters of the Atlantic, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. C3, 3086, 2003.
- 8) Monahan, E. C. and Spillane, M. C.: The role of whitecaps in air-sea gas exchange, *Gas Transfer at Water Surfaces*, edited by W. Brutsaert and G. H. Jirka, D. Reidel, Norwell, Mass., pp. 495-504, 1984.
- 9) Asher, W. E., Higgins, B. J., Karle, L. M., Farley, P. J., Sherwood, C. R., Gardiner, W. W., Wanninkhof, R., Chen, H., Lantry, T., Streckley, M., Monahan, E. C., Wang, Q. and Smith, P. M.: Measurement of gas transfer, whitecap coverage and brightness temperature in a surf pool: an overview of WABEX-93, *Air-Water Gas Transfer*, edited by B. Jähne and E. C. Monahan, AEON, pp. 205-216, 1995.
- 10) Asher, W. E. and Wanninkhof, R.: The effect of bubble-mediated gas transfer on purposeful dual-gaseous tracer experiments, *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, pp. 10555-10560, 1998.
- 11) Asher, W., Edson, J., McGillis W., Wanninkhof, R., Ho, D. T. and Litchendorf, T.: Fractional area whitecap coverage and air-sea gas transfer velocities measured during GasEx-98, *Gas Transfer at Water Surfaces*, edited by M. A. Donelan, W. M. Drennan, E. S. Saltzman and R. Wanninkhof, American Geophysical Union, pp. 199-203, 2002.
- 12) McGillis, W. R., Edson, J. B., Hare, J. E. and Fairall, C. W.: Direct covariance air-sea CO₂ fluxes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 106, pp. 16729-16745, 2001.
- 13) Donelan, M. A., Drennan, W. M. and Katsaros, K. B.: The air-sea momentum flux in conditions of wind sea and swell, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 27, pp. 2087-2099, 1997.
- 14) Toba, Y., Kunishi, H., Nishi, K., Kawai, S., Shimada, Y. and Shibata, N.: Study on the air-sea boundary processes at the Shirahama Oceanographic Tower Station, *Disacs. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., Annals*, Vol. 14B, pp. 519-531, 1971.
- 15) Toba, Y.: Local balance in the air-sea boundary processes. I. On the growth processes of wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 28, pp. 109-120, 1972.
- 16) Toba, Y. and Chaen, M.: Quantitative expression of the breaking of wind waves on the sea surface, *Rec. Oceanogr. Works Japan*, Vol. 12, pp. 1-11, 1973.
- 17) Snyder, R. L., Smith, L. and Kennedy, R. M.: On the formulation of whitecaps by a threshold mechanism. Part III: Field experiment and comparison with theory, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 13, pp. 1505-1518, 1983.
- 18) Wu, J.: Oceanic whitecaps and sea state, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 9, pp. 1064-1068, 1979.