

気象・波浪条件が白波被覆率に及ぼす影響

津守博通*・杉原裕司**・古寺大悟***
吉岡 洋****・芹澤重厚*****

海洋観測塔においてサンプリング間隔 1 秒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の算定を行った。海面撮影と同時に気象および波浪観測も行い、気象・波浪条件に対する白波被覆率の依存性について検討した。白波被覆率の値はオーダー的に他の研究者のものと一致し、高風速領域では海上風速 U_{10} の約 3 乗に比例して増加する。同じ U_{10} に対しては、大気不安定性が強い場合、波浪が減衰期にある場合の方が、白波被覆率が相対的に大きくなることわかった。また、白波被覆率は風波のみが卓越する場合の方が、うねりが存在する場合に比べて相対的に大きくなることが明らかとなった。

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: W_c) 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。白波被覆率については、これまで主に海上高度 10 m における平均風速 U_{10} に対する依存性が調べられており、その評価式も U_{10} に関するものが多く提案されている (例えば, Monahan, 1993; Asher・Wanninkhof, 1998; Stramska・Petelski, 2003)。しかし、従来から指摘があるように、海洋波の砕波は風速のみに規定されるものではなく、波浪の発達状態や接水境界層内の大気安定度と深く結び付いていると考えられる。そのため、気象・波浪の特性量をパラメータとした白波被覆率の検討が必要とされているが、観測データが不十分であり、白波砕波を支配する因子を特定するには至っていないのが現状である。このような背景から、本研究では、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、気象や波浪に対する白波被覆率の依存性について詳細に検討した。

2. 観測の概要

観測は、和歌山県白浜町の田辺湾沖合約 2 km に位置する田辺中島高潮観測塔 (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。図-1 に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

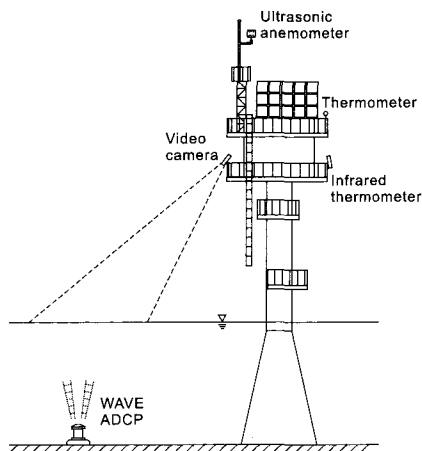


図-1 観測塔の概略図

23 m の位置に超音波風速計が設置されている。得られた風速の 3 方向成分の瞬時値を 10 分ごとのブロックに分け、風向・風速の 10 分間平均値を算定した。また、高度 16 m の位置に気温 T_a を測定する温度計が、14 m の位置に海面温度 T_s を測定する放射温度計があり、これらから大気安定度 $\Delta T (= T_a - T_s)$ が算定された。観測塔から南西に 20 m 離れた海底には WAVEADCP が設置されており、毎時 20 分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。

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た。使用したカメラは、38 万有効画素の 3 CCD 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され、海上高度約 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。この場合、レンズの焦点距離から計算される撮影範

* 学生会員 修(工) 日本学術振興会特別研究員 九州大学大学院
総合理工学府大気海洋環境システム学専攻
** 正会員 博(工) 九州大学助教授 大学院総合理工学研究院流
体環境理工学部門
*** 修(工) 国土交通省 八代河川国道事務所
**** 正会員 理 博 愛知県立大学教授 情報科学部地域情報科学
科
***** 京都大学助手 防災研究所災害観測実験研究
センター

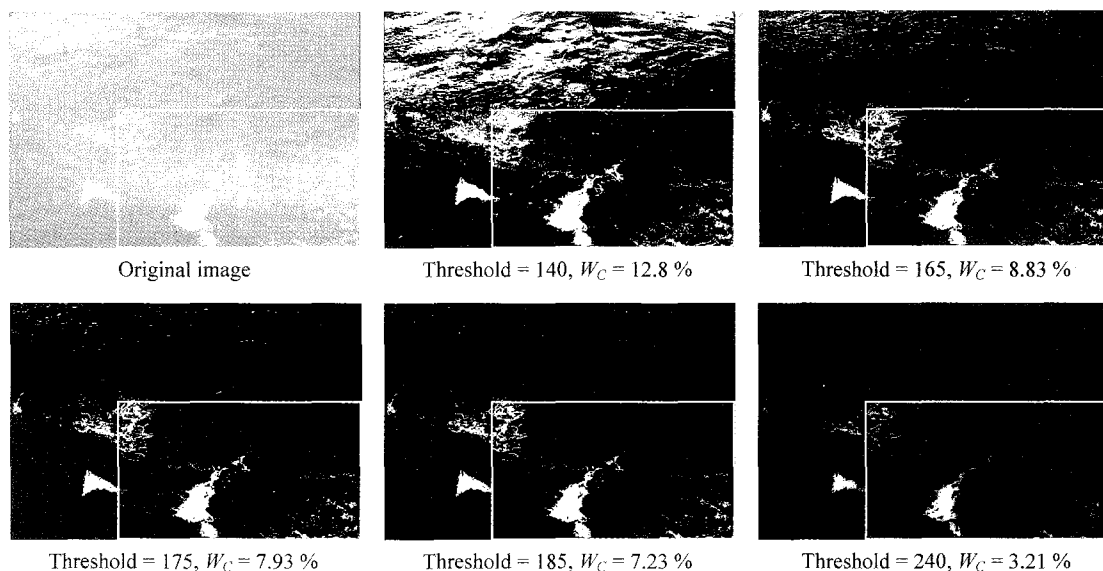


図-2 しきい値による二値化画像の変化

画はおよそ横 15 m × 縦 24 m である。斜めから撮影された画像では奥行き方向に面積の歪みが大きくなるが、本研究では白波碎波面の面積率を算出しているため面積の補正は特に必要ない。カメラ以外の記録機器は全て観測塔にある記録室の中に納められた。得られた海面デジタル画像の解像度は 720 × 480 ピクセルであり、記録にはハードディスクレコーダ (SONY HSR-X 200) を用いた。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。その算定方法を以下に述べる。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の瞬間値として 1 秒ごとに算出した。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。本研究では、太陽光の反射が少ない曇天日を中心に解析を行い、600 枚の画像から算出された被覆率の瞬間値を算術平均することによって 10 分間平均値として白波被覆率を求めている。

しきい値による白波被覆率の変化を検討するために、

しきい値を 5 つのケース (140, 165, 175, 185, 240) に変化させた二値化画像と白波被覆率 W_c を図-2 に示す。白線で囲まれた部分が解析領域を示し、記載されている白波被覆率の値はこの解析領域において算出されている。これらの図より、太陽光の影響のために海面の輝度は画像の上部で大きいことがわかる。また、しきい値 140 の画像では白波碎波面ではない領域が碎波面として認識されており、反対にしきい値 240 の画像では碎波面と見られる領域が非碎波面と認識されていることがわかる。実際には、この時間帯のしきい値として 175 を設定した。しきい値 175 の場合の白波被覆率は 7.93% であるので、しきい値が ± 10 変化する場合の相対誤差は約 10% である。前述したように、本研究では 600 枚の画像ごとに解析領域と輝度しきい値を決定して連続処理を行っている。解析画面内に太陽光が入ると白波被覆率が極端に上昇するので、600 枚を通じて太陽光の影響がなるべく入らないように解析領域は若干小さめに設定し、しきい値は若干大きめに設定されている。

図-3 に、図-2 で示された画像に対してしきい値を 5 ずつ変化させた場合の白波被覆率の変化を示す。この図より、しきい値 90 までは白波被覆率はほぼ 100% を示しており、その後急激に減少することがわかる。また、140 を超えると比較的緩やかに減少し、250 ではほぼ 0% となる。先に示したように、急激に減少する部分は太陽の反射光などの非白波碎波面の輝度範囲に対応し、緩やかに減少していく部分は白波碎波面の輝度差に起因するものと考えられる。急激に減少する部分は非白波碎波面を含んでいるため、しきい値は緩やかに減少する 140 ~ 240 の輝度範囲の中から選定されなければならないことがわか

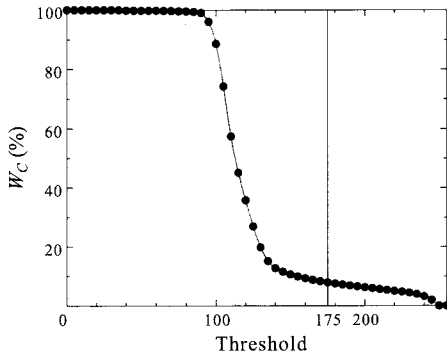


図-3 しきい値による白波被覆率の瞬間値の変化

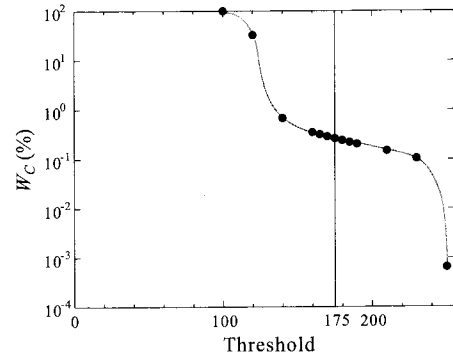


図-4 しきい値による白波被覆率の10分間平均値の変化

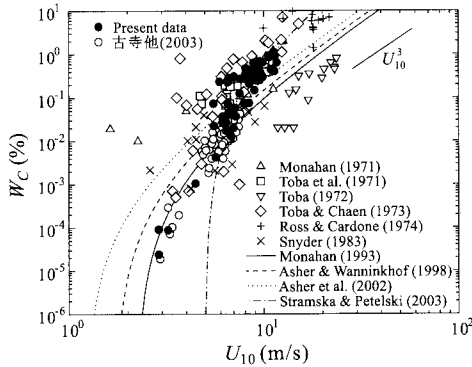


図-5 W_c と U_{10} の関係

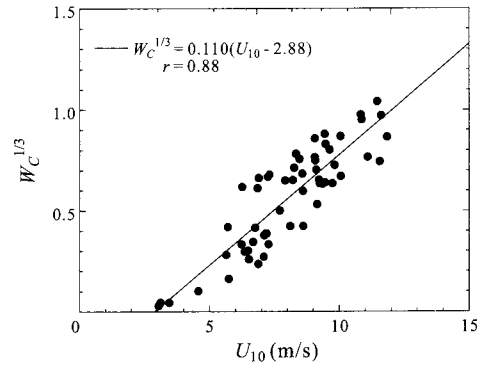


図-6 $W_c^{1/3}$ と U_{10} の関係

る。なお、解析画像の平均輝度は123.5であった。

図-4は、図-2の原画像を含む時間帯における10分間平均値の白波被覆率に対するしきい値の依存性を示したものである。図中の直線はこの時間帯のしきい値(175)を表しており、しきい値を変化させた13ケースについて解析を行った。この図より、図-3と同様に140を超えると白波被覆率は緩やかに減少していくことがわかる。また、しきい値175±10における白波被覆率の変化は±0.1%未満の範囲にある。しきい値175における平均白波被覆率は0.264%であるので、しきい値が±10変化した場合の相対誤差は約18%となる。したがって、1枚の画像の被覆率に対するしきい値の依存性と600枚平均値の被覆率に対するしきい値の依存性は大きく変化しないことがわかる。

4. 観測結果および考察

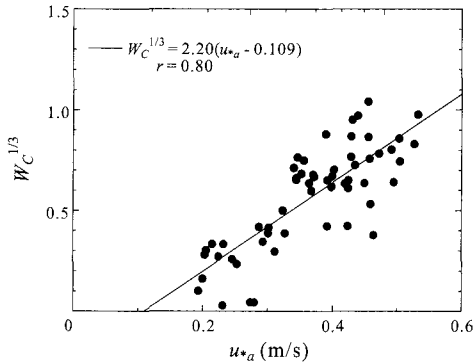
図-5は、白波被覆率 W_c と海上高度10mにおける平均風速 U_{10} の関係を示したものである。本研究の白波被覆率と風速のデータについては10分間平均値をプロットしている。ここで、 U_{10} は高度23mの風速データから得られた平均風速と摩擦速度 u_{*a} に基づく対数分布則から算定されている。また、比較のために他の研究者の観

測値および経験式もプロットされている。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、3m/s付近の低風速から10m/sを超える高風速に至るまでの W_c と U_{10} の関係が明瞭に示されている。10m/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、Stramska・Petelski (2003) の経験式に定量的に一致し、風速の約3乗に比例して増加するように見える。また、 U_{10} が6m/sより小さくなると W_c は急激に減少し、Monahan (1993) の経験式に比較的近い挙動を示していることがわかる。

Monahan (1993) は、 W_c と U_{10} の間には次式のような3乗則の関係があるとした。

$$W_c = c_1(U_{10} - c_0)^3 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 c_0 、 c_1 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。図-5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、上式を考慮して本研究によって得られた $W_c^{1/3}$ と U_{10} の関係を図-6に示す。この図より風速の増加とともに $W_c^{1/3}$ 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_{10} の関係を線形の最小自乗近似直線で表したもので

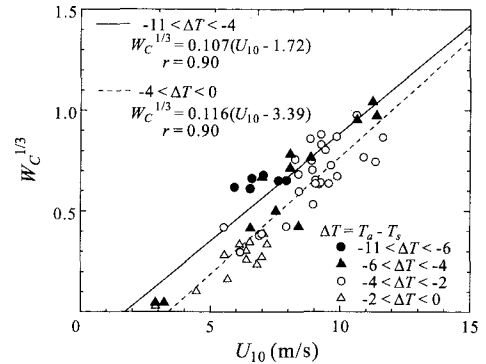
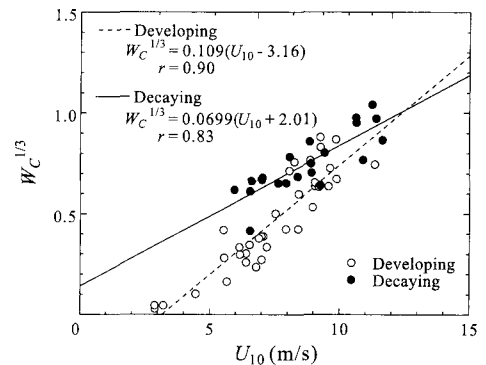
図-7 $W_c^{1/3}$ と u_{*a} の関係

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。

Phillips (1985) は、周波数の -4 乗に比例する波浪の平衡スペクトルを用いて、波浪のエネルギー散逸率 ε が u_{*a}^3 に比例することを示した。 ε は波の砕波と直接結びついた物理量であり、もし W_c と ε の間に比例関係が成立するならば、 W_c は ε に比例することになる。図-7 に $W_c^{1/3}$ と u_{*a} の関係を示す。この図から $W_c^{1/3}$ と u_{*a} は線形関係にあり、このことは先の仮定の妥当性を支持する。ただし、その相関係数は0.80と比較的高いものの、 U_{10} の場合に比べてデータの分散に改善は見られない。これは u_{*a} の評価自体に誤差が含まれているためと考えられる。

図-8 は、大気安定度 ΔT を指標として $W_c^{1/3}$ と U_{10} 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不安定性は強いとみなされる。なお、観測期間を通してほぼ ΔT は負となり、大気の状態は不安定であった。ここでは、 $-4 < \Delta T < 0$ の場合と $-11 < \Delta T < -4$ 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の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、図-6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・Petelski (2003) は海面付近の大気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。

図-9 は、波の発達状態で区別した $W_c^{1/3}$ と U_{10} の関係を示す。ここで、 H_s の時系列に12時間移動平均を施した

図-8 大気安定度を指標とした $W_c^{1/3}$ と U_{10} の関係図-9 波の発達状態で分類された $W_c^{1/3}$ と U_{10} の関係

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ことがわかる。また、減衰期に対する近似直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。Hanson・Phillips (1999) は外洋で波浪観測を行い、風速が減速期にあるときの波浪のエネルギー散逸率 ε が加速期のものと比べて相対的に大きくなることを示した。 ε と W_c は比例関係にあるとし、さらに風速の減速期は波高の減衰期と考えれば、 W_c が有義波高の減衰期に大きくなるという本研究の結果は彼らの観測結果と整合している。このような挙動を示す理由は以下のように考えられる。風速の変化に波浪場が応答するにはある程度の時間が必要であろう。そのため、減衰期にある波浪場では以前の波が高い状態の履歴が残っていることになり、同一風速の場合においても、発達期に比べて W_c が相対的に大きくなるものと思われる。この点についても今後詳しい検証が必要がある。

図-10 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_{10} の関係を示す。なお、この分類は、

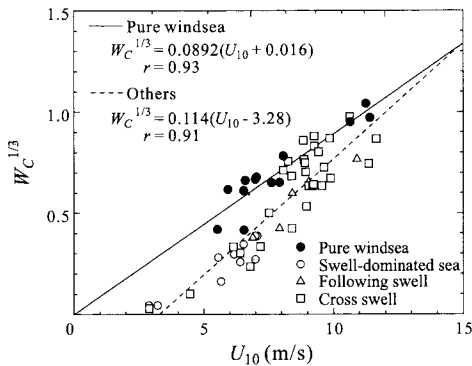


図-10 風波とうねりの偏角で分類された $W_c^{1/3}$ と U_{10} の関係

杉原ら (2004) 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おり、風波のみが存在する場合を Pure windsea、うねりが卓越する場合を Swell-dominated sea、風波の伝播方向に対して $\pm 45^\circ$ 範囲の方向にうねりが伝播する場合を Following swell、 $\pm 45^\circ \sim 135^\circ$ の方向にうねりが伝播する場合を Cross swell とした。図中の実線は、Pure windsea 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 windsea 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。

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。そして、 W_c と U_{10} の関係における気象・波浪条件の影響を検討した。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一致した。 W_c は U_{10} が 6 m/s 以下になると急激に減少し、高風速域では U_{10} の約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 Stramska・Petelski (2003) 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_{10} の関係を調べた。その結果、同じ風速に対しては大気的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_{10} の関係を調べた結果、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_{10} の関係を調べた。 W_c は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。

本研究を行うにあたり、九州大学松永信博教授および増田章教授にご助言を頂きました。本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究(B) 代表者: 杉原裕司、特別研究員奨励費 代表者: 津守博通)の援助の下で行われました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 杉原裕司・津守博通・大賀崇史・吉岡 洋・芹澤重厚 (2004): 風波とうねりが混在する波浪場の海面抵抗則に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 66-70.
- 古寺大悟・津守博通・杉原裕司・松永信博・増田 章 (2003): 海面画像計測による白波被覆率の評価, 平成14年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. B-80-B-81.
- Asher, W. E. and R. Wanninkhof (1998): The effect of bubble-mediated gas transfer on purposeful dual-gaseous tracer experiments, J. Geophys. Res., Vol. 103, pp. 10555-10560.
- Asher, W., J. Edson, W. McGillis, R. Wanninkhof, D. T. Ho and T. Litchendorf (2002): 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, AGU, pp. 199-203.
- Hanson, J. L. and O. M. Phillips (1999): Wind sea growth and dissipation in the open ocean, J. Phys. Oceanogr., Vol. 29, pp. 1633-1648.
- Monahan, E. C. (1971): Oceanic whitecaps, J. Phys. Oceanogr., Vol. 1, pp. 139-144.
- Monahan, E. C. (1993): Occurrence and evolution of acoustically relevant sub-surface bubble plumes and their associated, remotely monitorable, surface whitecaps, Natural Physical Sources of Underwater Sound, edited by B. R. Kerman, Kluwer Academic Publishers, pp. 503-517.
- Phillips, O. M. (1985): Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves, J. Fluid Mech., Vol. 156, pp. 505-531.
- Ross, D. B. and V. Cardone (1974): Observations of oceanic whitecaps and their relation to remote measurements of surface wind speed, J. Geophys. Res., Vol. 79, pp. 444-452.
- Snyder, R. L., L. Smith and R. M. Kennedy (1983): On the formation of whitecaps by a threshold mechanism. Part III: Field experiment and comparison with theory, J. Phys. Oceanogr., Vol. 13, pp. 1505-1518.
- Stramska, M. and T. Petelski (2003): Observations of oceanic whitecaps in the north polar waters of the Atlantic, J. Geophys. Res., Vol. 108, 3086, doi: 10.1029/2002 JC 001321.
- Toba, Y. (1972): Local balance in the air-sea boundary processes. I. On the growth process of wind waves, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 28, pp. 109-120.
- Toba, Y. and M. Chaen (1973): Quantitative expression of the breaking of wind waves on the sea surface, Rec. Oceanogr. Works Japan, Vol. 12, pp. 1-11.
- Toba, Y., H. Kunishi, K. Nishi, S. Kawai, Y. Shimada and N. Shibata (1971): Study on the air-sea boundary processes at the Shirahama Oceanographic Tower Station, Disacs. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., Annals, Vol. 14 B, pp. 519-531.