

海洋観測レーダと波浪推算モデルを用いた実海域での 白波被覆率の解析

小林智尚¹・柴田武志²・安田孝志³

本研究では X バンド海洋観測レーダを用いた白波砕波域の検出法を提案し, これを用いて現地海域での白波被覆率の長期間定時計測を試みた. この海洋観測レーダはほぼ瞬時に海面状態を面的に把握できる映像レーダで, 自ら電磁波を照射する能動型計測機器であり, また一方白波砕波部も X バンド帯電磁波の比較的良好な散乱体であることから, レーダ計測は白波砕波の面的把握に有効であった. さらに本研究では波浪推算モデル SWAN を用いて計測対象海域の波浪場を把握, その推算結果とレーダ観測で得られた白波被覆率との関係を検討した. その結果, 白波砕波によるエネルギー散逸や有義波の波形勾配などのパラメータと白波被覆率との間に関係があることが見いだされた.

1. はじめに

気候変動や異常気象の多発などを伴うとされる地球温暖化現象は国際的なトピックとなっており, この温暖化現象の中心となる大気中の温室効果ガス CO₂ の追跡調査や貯蔵技術などに注目が集まっている. 大気中に放出された CO₂ の多くを海洋が吸収しており, さらに大気・海洋間での CO₂ ガス輸送過程には白波砕波などによる気泡や飛沫が大きく関係していることは以前から定性的に知られている (たとえば, 森・今村, 2002). 現在, 海面でのガス交換過程に関する研究が進められ, ミクロスケールでの物理化学プロセス解明や, 交換率推定など, 成果が上げられつつある (たとえば, 津守ら, 2002). しかしこれらの研究の多くは実験室スケールの現象解明が中心であり, 現地スケールでの検討は渡辺ら (2004) などまだ少なく, 詳細な検討はあまり進んでいない.

現地における, 大気・海洋間での CO₂ ガス交換と白波砕波については, このガス交換が白波砕波の海面被覆率と関係していることは定性的には知られているが定量的な評価は見当たらない. これは従来の計測機器では, 時系列的に白波被覆率などを面情報を把握することが困難だからである. これに対して近年では海洋観測レーダによる海面計測が進められており, 従来にない, 海面の面的情報の把握が可能となっている. (たとえば, 西田ら, 2005; 武若, 2005; 小林ら, 2002).

そこで本研究ではこの海洋観測レーダを用いて白波砕波発生域を特定し, その被覆率を推定する手法を開発する. そしてこれを用いて, 実海域での白波被覆率の長期

表-1 X バンド海洋観測レーダの緒元

項 目	仕 様
アンテナ長	9 フィート (2,836 mm)
回転速度	約 40 rpm
送信周波数	9410 MHz $\pm$ 30 MHz
送信パルス繰返し周波数	2048 Hz
A/D 変換周波数	20 MHz

間定時計測を行う. さらに計測対象域において波浪推算を実施し, 波浪推算によって得られる各種物理パラメータとこの白波被覆率との関係を検討する.

2. 海洋観測レーダによる白波砕波検出

(1) X バンド海洋観測レーダ

本研究で用いる X バンド海洋観測レーダはリアルタイムに波浪場を映像として面的に捉えうる観測機器である. その緒元を表-1 に示す. 表中の送信周波数からこのレーダが扱う電磁波の波長 λ は約 3 cm であり, 電磁波のブラッグ散乱特性から, この電磁波は電磁波波長の半分 $\lambda/2$, 約 1.5 cm 程度のスケールの凹凸で特に強く散乱する (たとえば, 土木学会, 2001). このスケールの凹凸は気泡を大量に含んだ白波砕波部では多く見られる. したがって, 他の海面に比べてこの白波砕波部は X バンドレーダにとって良好な散乱体であり, レーダによる検出が容易な現象の一つである.

このように X バンド海洋観測レーダは白波砕波部を面的に検出できる計測器である. さらにこのレーダは自ら電磁波を発射・受信する能動型計測機器であるため, 昼夜関係なく計測できるなど, 白波砕波部計測に適した特徴を兼ね備えている.

(2) 白波砕波部の検出

先に述べた通り, X バンド海洋観測レーダは白波砕波被覆部を強散乱体として検出できる画像レーダである. このレーダによって捉えられた画像の一例として, 2003 年 12 月 12 日 15 時に新潟県大潟海岸の京都大学防災研

1 正 会 員 博(工) 岐阜大学助教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻
2 岐阜大学大学院 工学研究科環境エネルギーシステム専攻
3 正 会 員 工博 岐阜大学教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻

究所大潟波浪観測所で得られたレーダ画像を図-1に示す。この図では、汀線から海側の領域で強散乱体として縞状に白波碎波域が検出されている。

しかし実際には白波碎波部を他の海域部と明確に分離はできない。図-2に2003年12月10日15時に計測された海域での散乱強度の累積頻度分布を示す。この図では電磁波の距離減衰を補正している。図の通り、海域での散乱強度は白波碎波部のみが大きいのではなく、それ以外でも比較的大きな散乱が観測されるため、頻度分布では白波碎波部を明示的に分離できるような、分布形に特徴的な点は見られなかった。そこでここでは、ビデオカメラによる同時計測を行い、白波碎波部を特定するために散乱強度の閾値を推定することとした。

海洋観測レーダとビデオカメラによる同時計測は大潟波浪観測所にて、2005年12月10日、2006年1月18、19日に計10ケース実施した。海洋観測レーダは観測機

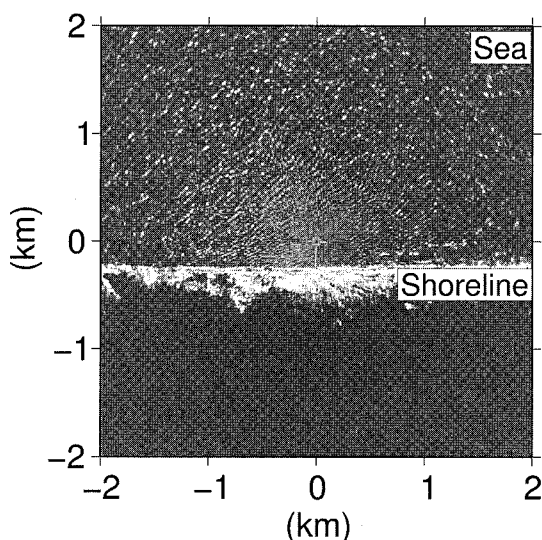


図-1 海洋観測レーダによって得られる海面のレーダ画像の一例 (2003年12月12日15時)

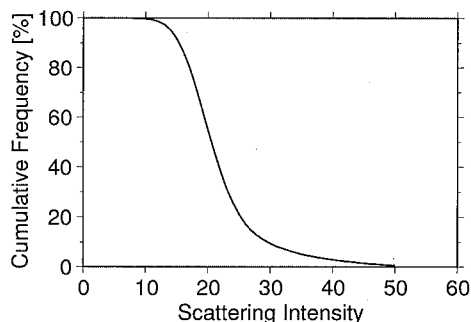
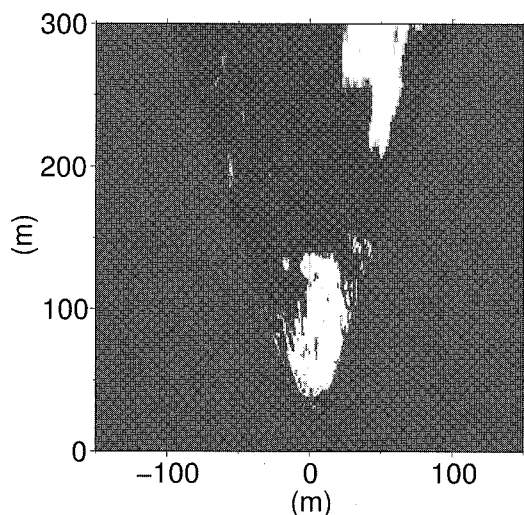


図-2 海洋観測レーダ画像データの散乱強度頻度分布 (2003年12月10日15時, 距離減衰補正済み)



(a) 原画像



(b) アフィン変換による平面画像 (明部が検出された白波碎波部)

図-3 ビデオカメラ計測による海面状態 (2005年12月10日13時)

橋先端 (汀線から沖側に約 300 m, 海面から高さ約 10 m) に設置している。ビデオカメラもレーダと同地点に設置し、そこから約 300 m 沖側の地点を中心とする海域を対象に計測した。得られたカラー画像をアフィン変換で海面の平面画像に変換し、画像の輝度・色調から白波碎波部を特定した。一例として、2005年12月10日13時に得られたビデオ画像と、それをアフィン変換して白波碎波部を抽出した画像を図-3に示す。このビデオカメラによる計測では、この図-3(a)に示すように、撮影領域が極めて限定される。そこで各ケースにおいてビデオ撮影は数分間行い、得られた複数枚の画像を処理、これらの画像の時間平均値として白波被覆率を算定した。

一方、海洋観測レーダによる計測はビデオカメラ計測と同時間帯に行い、ビデオカメラの撮影対象領域を抽出、

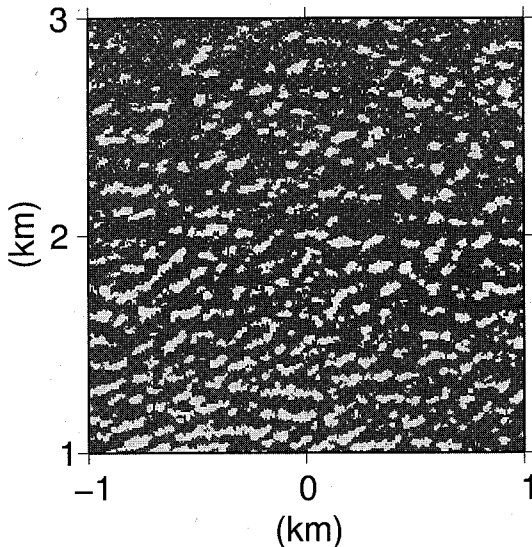


図-4 白波碎波部を検出したレーダ画像 (2005年12月10日13時)

電磁波の距離減衰を補正した後、散乱強度の頻度分布を求めた。そして強散乱体として白波碎波部を特定するために、ビデオカメラ計測から得られた白波被覆率を参照して、この散乱強度頻度分布から閾値を特定した。この手法によって得られた、白波碎波部を特定したレーダ画像の一例を図-4に示す。この海洋観測レーダとビデオカメラによる同時計測では各ケースの白波被覆率はほぼ8~43%であった。しかし、得られた閾値の変動幅は5%程度であった。これはレーダが能動型観測機器であり、海面での散乱強度やその特性がほぼ一定であるため、この結果は閾値を一定にすることの妥当性を示している。また、ビデオカメラ撮影映像 (図-3) とレーダ画像 (図-1) とを比較すると、レーダ画像の対象領域が極めて広く、レーダ画像の優位さは明確である。

この手法ではやや白波被覆率を過大に評価する傾向が見られた。今回の海洋観測レーダやビデオカメラ計測のように視線の入射角が海面に対して小さい場合、波峰によってその背後に影となる領域が生じる。ビデオカメラ計測に用いたアフィン変換ではこの影領域を波峰の状態で補完する。このため碎波した波の影領域は白波碎波部として認識され、図-3(b)に示すように、白波碎波部が視線方向に伸ばされて評価されてしまう。このため白波被覆率はやや過大に評価されることが考えられる。一方海洋観測レーダでは、この波峰背後からは散乱波が得られず計測されない (たとえば、土木学会, 2001)。このビデオカメラ計測と海洋観測レーダ計測との波峰背後の影領域の扱いの違いにより、先に求めた、レーダ画像から白波碎波部を特定するための散乱強度閾値の値には誤

差が含まれていると考えられる。ただし本研究の目的に対しては、その傾向は大きく変わらないので、この手法および閾値を採用することとした。

3. レーダによる白波被覆率の長期間定時計測

前節で得られた、海洋観測レーダによる白波被覆率算定法を用いて、実海域における白波被覆率の長期間定時計測を試みた。海洋観測レーダは大潟波浪観測所棧橋に設置し、周辺海域を観測対象とした。観測期間を2003, 2004, 2005年の12月から翌年2月とし、毎正時に数分間、海洋観測レーダを用いて海面を観測し、白波被覆率を算定した。

解析結果の一例として、2004年1月の白波被覆率の時系列結果を図-5に示す。図中の海上風速 U_{10} と有義波高 $H_{1/3}$ については次節で述べる。ここでは以下に述べる理由から、降水時の観測結果は除去している。降水の判断にはレーダアメダスのデータを用いた。

レーダの電磁波にとって白波碎波部は強散乱体であるが、雪や雨粒も電磁波を強く散乱させる物体である。そのため降水時のレーダ画像には海面状態の映像に降水域の映像が重なってしまう (たとえば、小林ら, 2001)。その一例として、降雪時に観測されたレーダ画像を図-6に示す。この図のように、レーダ画像では白波碎波部に降水域が重なるために、白波碎波部検出方法として今回のように散乱強度に閾値をもうけて判断する手法では、降水域まで白波碎波部として検出してしまい、白波被覆率として極端に大きな値を算出してしまった。この問題を回避するには、レーダ画像上での現象スケールなどを指標に、白波碎波部と降水域を分離した後に解析するなど、新たな手法の導入が必要になる。

上記の通り降水時の解析に問題があるものの、本研究

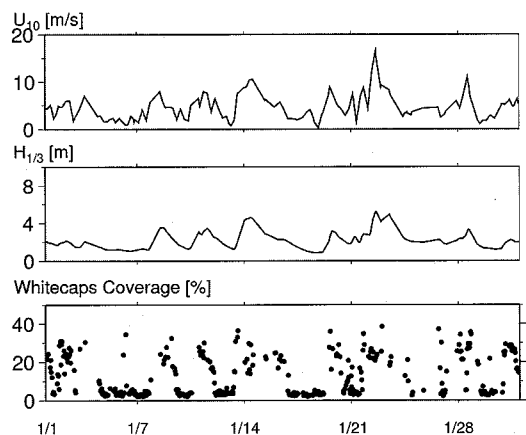


図-5 白波被覆率と海上風速 U_{10} および有義波高 $H_{1/3}$ の経時変化 (2004年1月, 大潟海岸)

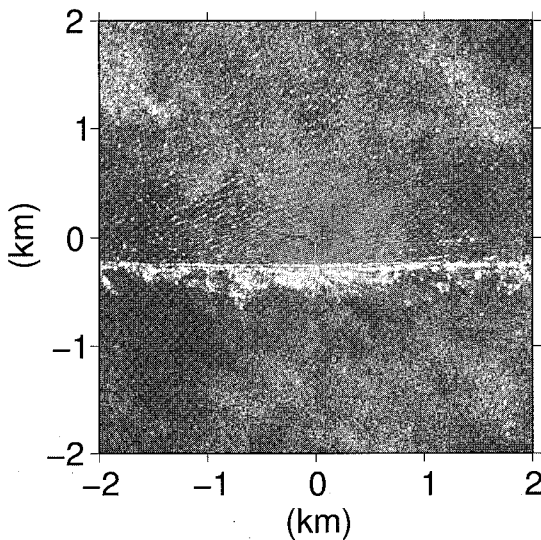


図-6 降雪時に得られた海洋観測レーダのレーダ画像
(2005年12月15日23時)

で提案する白波被覆率の算出手法により、被覆率の長期間計測が可能となった。

4. 白波被覆率と波浪物理量との関係

(1) SWAN による波浪推算

次に白波被覆率の波浪状況の関係について検討する。ここでは波浪推算を実施し、計算結果から得られた波浪パラメータを、前節の海洋観測レーダで得られた白波被覆率と比較することとした。波浪推算モデルには第三世代波浪推算モデル SWAN (Booij ら, 1999) を用いた。対象領域は図-7 に示す通り、日本海全体を対象とする大領域と新潟県大潟海岸を含む小領域をネスティングすることにより、対象海域の波浪を算定した。対象期間は海洋観測レーダによる観測期間を参考に 2003 年 12 月から翌年 2 月まで、および 2004 年 12 月とした。推算条件を表-2 に示す。波浪推算結果の一例として、2003 年 12 月の直江津における有義波高推算結果を現地観測結果とともに図-8 に示す。この図から推算結果は、12 月 21 日の高波浪を再現していない、有義波周期が過小傾向である、などの点があるものの、全体として観測結果を再現しており、推算結果はほぼ妥当であることがわかる。

そこで、この波浪推算結果から得られる波浪の諸パラメータと、海洋観測レーダによって得られた白波被覆率との関係を検討した。

(2) 白波被覆率と波浪物理量

海洋観測レーダによる白波被覆率に、気象庁メソ解析値の海上風データ U_{10} と波浪推算によって得られた有義波高 $H_{1/3}$ を加えて図-5 に示す。この図では白波被覆率は

表-2 波浪推算条件

推算条件	大領域	小領域
計算領域 (経度) (緯度)	126°~142° 33°~46°	136°~139° 36.5°~39°
格子数	32 × 26	30 × 25
格子間隔	0.5°~0.5°	0.1°~0.1°
時間間隔	5 分	2 分
海上風データ (格子間隔) (時間間隔)	気象庁メソ解析値 20 km 6 時間	
解析期間	2003 年 12 月 1 日~2004 年 2 月 29 日 2004 年 12 月 1 日~2004 年 12 月 31 日	

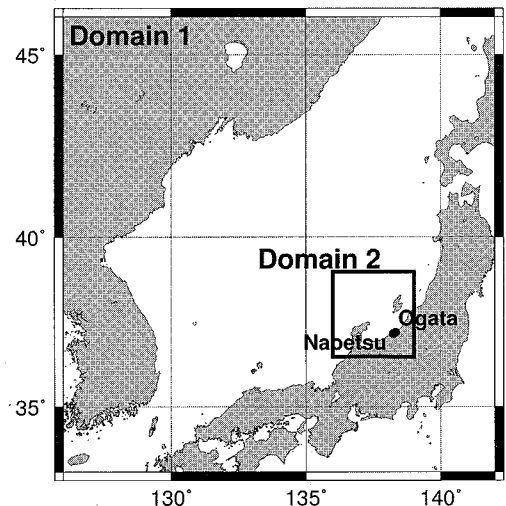


図-7 波浪推算の計算領域 (Domain 1: 大領域, Domain 2: 小領域)

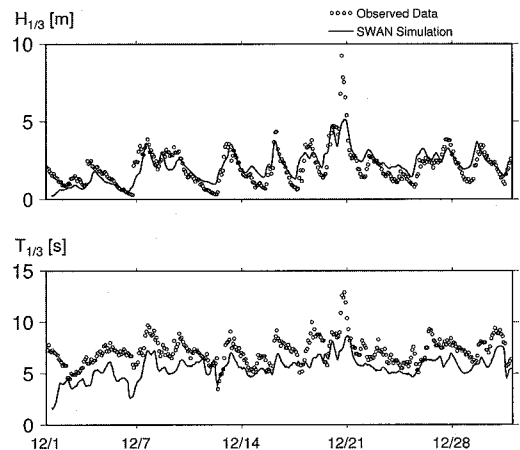


図-8 直江津での波浪推算結果 (2003年12月)

有義波高などと似た変動傾向を示しており、被覆率が波浪のパラメータに関連していると考えられる。そこで、

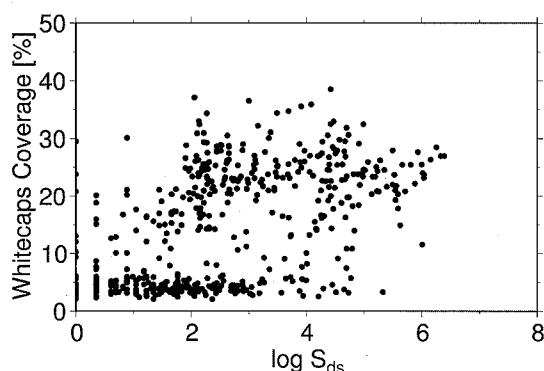


図-9 白波砕波によるエネルギー散逸 S_{ds} と白波被覆率の関係

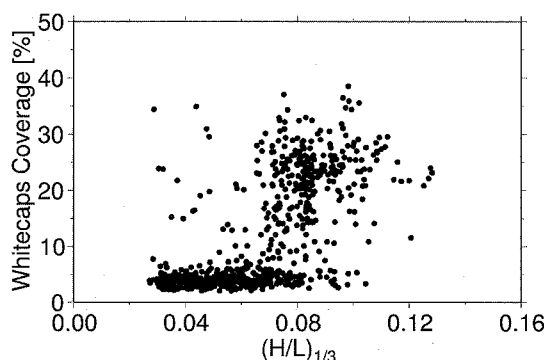


図-10 有義波の波形勾配 $(H/L)^{1/3}$ と白波被覆率の関係

波浪推算結果から得られる種々のパラメータと白波被覆率の関係を検討した。その結果の一例として、白波砕波によるエネルギー散逸 S_{ds} 、あるいは有義波の波形勾配 $(H/L)^{1/3}$ と白波被覆率との関係をそれぞれ図-9、10に示す。

図-9では、ばらつきが大きいものの、白波砕波によるエネルギー散逸 $\log S_{ds}$ が大きくなるにしたがって、白波被覆率も増大する傾向が見られる。一方図-10でも波形勾配 $(H/L)^{1/3}$ が増大するにしたがって被覆率が増大している。ただし波形勾配がある程度大きいにも関わらず、白波被覆率が極めて小さい値を示すケースも見られる。これはうねり成分が増え、白波砕波の発生が抑えられたものと考えられる。

本研究では、波浪推算結果から得られる波浪の諸パラメータと白波被覆率との関連性を簡単な比較から見いだした。今後は白波砕波の発生プロセスなどを再検討し、その物理的メカニズムを元に波浪のパラメータと白波被覆率との関連を議論する必要がある。

5. おわりに

本研究では、Xバンド海洋観測レーダを用いて実海域での白波被覆率の計測を試みた。海洋観測レーダの長所である海面の面的計測に加え、レーダが自ら電波を発する能動型計測機器である点、白波砕波部がXバンド帯の電磁波にとって比較的良好な散乱体である点などから、海洋観測レーダは白波砕波の現地計測に極めて有効な計測機器である。この海洋観測レーダによる定時観測を行い、長期間の白波被覆率の時系列変化を捉えることができた。

さらに本研究では計測対象海域の波浪場を波浪推算で再現し、レーダによって得られた白波被覆率との関係を検討した。その結果、白波砕波によるエネルギー散逸 S_{ds} や有義波の波形勾配 $(H/L)^{1/3}$ などの波浪のパラメータと白波被覆率の間に関係が見られた。

謝辞：本研究を行うにあたって、岡山大学大学院講師、岩田徹先生には有益な助言を頂きました。ここに謝意を表します。また気象庁提供のメソ解析値ならびにレーダアメダスのデータを使用しました。本研究は科学研究費(B)一般 18360236, (B)一般 18310128, (C)一般 18560496による成果です。

参考文献

- 小林智尚・河合篤司・小塚将之・安田孝志(2001)：Xバンドレーダによる沿岸域の観測，海岸工学論文集，第48巻，pp. 1431-1435.
- 小林智尚・山崎将史・湯本大輔・渡辺章人・安田孝志(2002)：Xバンドレーダによる冬期日本海沿岸海洋観測，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1516-1520.
- 武若 聡(2005)：Xバンドレーダによる長周期週上変動の沿岸伝播の観測，海岸工学論文集第52巻，pp. 126-130.
- 津守博通・古寺大悟・杉原裕司(2002)：風波パラメータを用いたガス交換係数の実験式，海岸工学論文集，第49巻，pp. 86-90.
- 土木学会研究現況レビュー小委員会編(2001)：陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測，土木学会，212p.
- 西田修三・中辻啓二・宮本豊尚・清水隆夫・坂井伸一・松山昌史・坪野考樹(2005)：DBF 海洋観測レーダーによる大阪湾奥部の流況観測と波浪解析の応用，海岸工学論文集第52巻，pp. 1441-1445.
- 森 信人・今村正裕(2002)：2色 LIF-PIV を用いた水表面におけるガス交換過程の計測，海岸工学論文集，第49巻，pp. 96-100.
- 渡辺千香子・出崎寛基・岩田 徹・塚本 修(2004)：大気・海洋間の CO_2 交換に関する微気象測定について，日本気象学会関西支部第2回例会講演要旨集，103号，pp. 46-48.
- Booij,N.R., R.C.Ris and L.H.Holthuijsen(1999)：A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No. C4, pp.7649-7666.