

外洋の広域波浪計測のための遠距離海洋レーダの開発

児島正一郎*・佐藤健治**・松岡建志***・藤井智史***

本研究では遠距離海洋レーダによる広域波浪計測の可能性を明らかにするために、外洋にブイ (COMPASS) を設置して波浪計測を行い遠距離海洋レーダの受信信号を算定し、実際に遠距離海洋レーダで計測した受信信号との比較を行った。その上で、電離層が遠距離海洋レーダの受信信号に及ぼす影響についての検討を行い、波浪計測を行う際の問題点等を明らかにした。最後に、遠距離海洋レーダの受信信号から波浪の物理量 (方向スペクトル, 有義波高, 有義周期) を逆推定し、ブイとの比較を行うことによりその特徴・問題点を明らかにした上で、その空間特性についての議論も行った。

1. はじめに

これまで短波帯の電波を利用した海洋レーダは、沿岸から 50 km までの沿岸域の表層流や波浪の計測に利用されてきた。通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センターでは沿岸から外洋までの表層流及び波浪を面的に計測することを目的に遠距離海洋レーダの開発を行っている。遠距離海洋レーダによって波浪観測を行う場合、他の海洋レーダ (例えば、狭ビーム走査方式の海洋レーダ) と比較して観測海域が広く、同時性を保った計測を行うことが可能である。また、高波浪時にも安定して波浪計測を行うことができる。このような特徴を有する一方、その空間分解能は他の海洋レーダと比較して低く、外来ノイズの影響を強く受けるため精度良く波浪計測を行うことが困難な場合がある。

本研究では遠距離海洋レーダによる広域波浪計測の可能性を明らかにするために、外洋にブイを設置して波浪観測を行い、その結果から遠距離海洋レーダの受信信号を算定して実際に遠距離海洋レーダで計測した受信信号との比較を行った。その上で、遠距離海洋レーダの受信信号に混入する外来ノイズの大きさを左右する電離層の影響についての検討を行った。最後に、電離層の影響が小さい時に遠距離海洋レーダによる波浪計測を行い、ブイの波高計との比較を行うことによって、遠距離海洋レーダによる広域波浪計測の特徴・問題点を明らかにした。

2. 遠距離海洋レーダについて

図-1 に遠距離海洋レーダのアンテナ設置位置 (石垣島と与那国島) とその観測範囲及び遠距離海洋レーダの波浪計測精度検証用に設置した COMPASS ブイの位置 (★) を示し、表-1 に遠距離海洋レーダの主要諸元を示

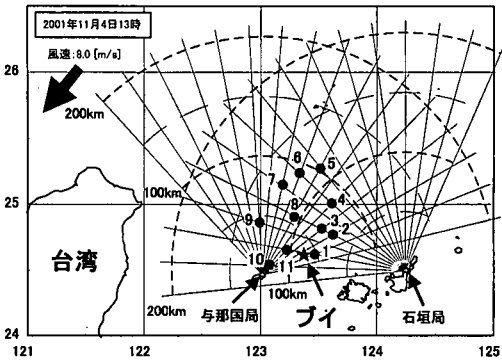


図-1 観測対象海域

表-1 遠距離海洋レーダの諸元

	項目
レーダの形式	FMICW
周波数	9.25 MHz
掃引周波数幅	22 kHz
周波数掃引間隔	0.7 s
送信出力	ピーク時: 1 kW, 平均: 500 W
距離分解能	7 km
速度分解能	2.5 cm/s
アンテナ	DBF 方式
ビーム幅	8~10 度
観測範囲	±60 度

す。COMPASS ブイでは、海上風の風向・風速、表層 (水深: 4 m) の流速、ブイの運動 (5 自由度運動計測が可能 なジャイロによって) の計測を行っている。本研究では、波浪の方向スペクトルをブイの運動データ (前後揺, 上下揺, 縦揺) から推定 (小寺山ら, 2002) した。

遠距離海洋レーダではアンテナ方式としてデジタルビームフォーミング (DBF) 方式を採用しているため、計測範囲の同時性を保った計測が可能 (狭ビーム走査方式の海洋レーダでは全計測範囲を走査するのに時間を要するため、計測範囲の同時性を保つことができなかつ

* 正会員 博(工) (独法)通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センター
** (独法)通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センター
*** 博(工) (独法)通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センター

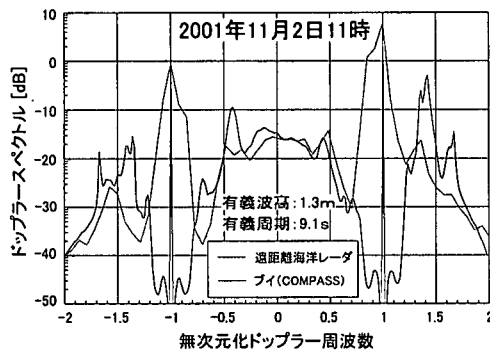


図-2 日中におけるドップラースペクトルの比較

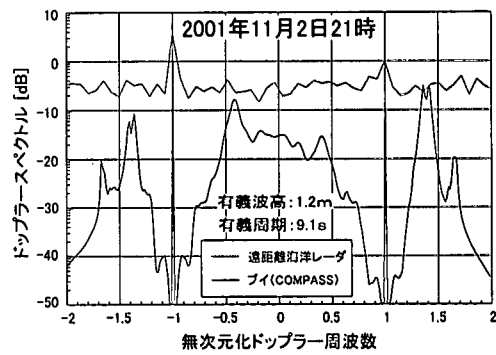


図-3 夜間におけるドップラースペクトル比較

た。)である。また、遠距離海洋レーダでは使用する電波の周波数を低く (9.25 MHz) することにより、従来の海洋レーダより広範囲の観測が可能である。このような特徴を有する一方、電離層の状態によっては、受信信号に混入する外来ノイズのノイズレベルが上昇して波浪計測を行うことが困難になる場合がある。これは、遠距離海洋レーダで使用する電波の周波数が電離層の反射を利用した無線通信で利用されている周波数と同じであるからである。

3. COMPASS ブイによるドップラースペクトルの評価

遠距離海洋レーダによる広域波浪計測の可能性を明らかにするために、COMPASS ブイの波浪観測結果を用いた遠距離海洋レーダのドップラースペクトルの評価を行った。この評価のために COMPASS ブイで測定された波浪の方向スペクトルから遠距離海洋レーダのドップラースペクトルを以下に示す Brrick (1972) の関係式(方向スペクトルとドップラースペクトルの関係式)を用いて算定した。

$$\sigma^{(1)}(\omega) = 2^6 \pi |k_0|^4 \sum_{m=\pm 1} S(-2mk_0) \delta(\omega - m\omega_B) \dots\dots (1)$$

$$\sigma^{(2)}(\omega) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1, m_2=\pm 1} \iint_{-\infty}^{\infty} |\Gamma|^2 S(m_1 k) S(m_2 k') \times \delta(\omega - m_1 \sqrt{gk} - m_2 \sqrt{gk'}) dp dq \dots\dots (2)$$

ここで、 $\sigma^{(1)}(\omega)$ はドップラースペクトルの一次散乱成分、 $\sigma^{(2)}(\omega)$ はドップラースペクトルの二次散乱成分、 k_0 はレーダで使用した電磁波の波数ベクトル、 k_0 はレーダで使用した電磁波の波数 ($k_0 = |k_0|$)、 ω はドップラー周波数、 ω_B はブラッグ周波数、 m と m' はドップラーシフトの符号 (± 1)、 $S(mk)$ は波浪の波数スペクトル、 k, k' はレーダ波の散乱に関わる 2 つの自由波の波数ベクトル ($k + k' = -2k_0$) をそれぞれ表す。 Γ は結合係数と呼ばれ、一般に、電磁気学的な 2 次散乱による部分 Γ_E と流体力学的な 2 次散乱による部分 Γ_H の和 ($\Gamma = \Gamma_E + \Gamma_H$) で表さ

れ、それぞれ次式で与えられる。

$$\Gamma_H = -\frac{i}{2} \left\{ k + k' - \frac{(kk' - k \cdot k')}{mm' \sqrt{kk'}} \frac{\omega^2 + \omega_B^2}{\omega^2 - \omega_B^2} \right\} \dots (3)$$

$$\Gamma_E = -\frac{1}{2} \left\{ \frac{(k \cdot k_0)(k' \cdot k_0)/k_0^2 - 2k \cdot k'}{\sqrt{k \cdot k'} - k_0 \Delta} \right\} \dots\dots (4)$$

ここで、 Δ は海面の複素インピーダンスで、絶対値の小さな複素数である。

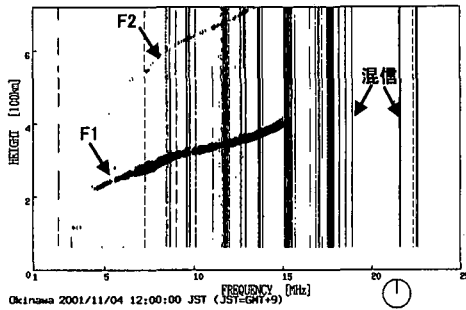
式 (1)、(2) から算定されるドップラースペクトルと実際に遠距離海洋レーダで計測されるドップラースペクトルの比較を行うことにより、遠距離海洋レーダによる広域波浪計測の可能性を評価する。この比較は 2001 年 11 月 1 日～2001 年 11 月 7 日の期間に実施した。比較検証観測を行った結果を以下に示す。

(1) 日中と夜間の違い

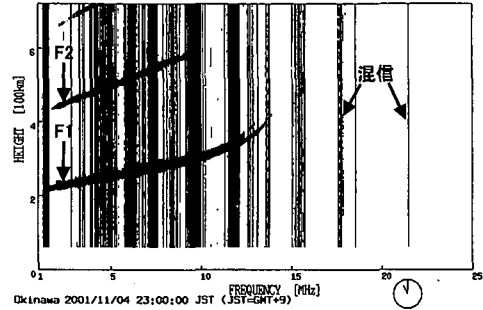
図-2 に日中における遠距離海洋レーダ (石垣局) で観測されたドップラースペクトルと COMPASS ブイから算定されたドップラースペクトルの比較を示す。図-3 に夜間における遠距離海洋レーダ (石垣局) のドップラースペクトルと COMPASS ブイから算定されたドップラースペクトルの比較を示す。図-2、3 より、夜間に遠距離海洋レーダに混入するノイズのレベルが大きくなっていることがわかる。図-3 のようにノイズレベルが上昇し、大部分のドップラースペクトルの二次散乱成分がノイズレベルに埋もれてしまうと、ドップラースペクトルの二次散乱成分から波浪の物理量を逆推定することが困難になる。特に、ドップラースペクトルの二次散乱成分のすべてを用いて逆推定する方向スペクトルは、図-3 の状況下においては推定することは不可能である。一方、ドップラースペクトルの一次散乱ピークのシフト量から算定される表層流は、ノイズレベルが上昇する夜間においても計測が可能であった。本検証観測期間中に、ノイズレベルがドップラースペクトルの一次散乱ピークを超えることはなかったからである。

(2) レーダの設置場所及び視線方向の違い

レーダ施設の設置場所や視線方向の違いによって、ど



(a) 日中 (2001年11月4日12時)



(b) 夜間 (2001年11月4日23時)

図-4 沖縄で行われている電離層観測結果 (イオグラフ)

の程度ノイズレベルが変化するかを石垣局と与那国局の遠距離海洋レーダのドップラースペクトルを用いて調査した。その結果、与那国局の方が石垣局よりもノイズレベルが高いことがわかった。

上記に示すように、遠距離海洋レーダでは外来ノイズの影響が卓越する場合 (夜間) がある。このようなときに計測する場合には、十分に注意して計測を行う必要がある。

4. 電離層の影響について

短波帯の電波、特に周波数の低い電波を利用する場合、反射・吸収帯として働く電離層の影響を留意する必要がある。COMPASS プイを用いた検証観測においても夜間にノイズレベルの急激な上昇傾向があり、電離層の影響を強く受けていた可能性がある。そこで、電離層の日変化を確認するとともに、電離層の状態の変化が遠距離海洋レーダの受信信号に及ぼす影響について検討する。通信総合研究所では沖縄の大宜味において電離層観測を実施している。この電離層観測はパルスレーダを利用して、1 MHz～30 MHz の電波を垂直方向に向けて発射し、各電離層から戻ってくる電波の時間と強度を測定している。電離層は高度が低い方から D 層、E 層、F 層 (F1 層と F2 層) に分類されている。

D 層は高度 60～90 km の範囲に形成される。D 層は昼間太陽の紫外線 (ライマン- α 線) や X 線によって、大気電離することにより形成される。D 層の電子密度は E 層や F 層と比べて低いが、大気と電子の衝突が激しいため、短波帯の電波を吸収して減衰させる。

E 層は高度 90～150 km の範囲に形成される。E 層は主に分子イオンと電子からなり、D 層と同様に夜間には密度が著しく低下する。同じ高度に突発的に形成されるスプラディック E 層は電子密度が異常に高くなり、VHF 帯の電波まで反射させる場合がある。テレビなどの混信障害は、このスプラディック E 層によって引起されることがある。

F 層は高度 200 km 以上の上空に存在し、電離層の中で最も電子密度が高い。F 層は主に酸素イオンと電子から成り立っており、夏の日中には分子イオンを主とする F1 層 (200～400 km) と酸素イオンを主とする F2 層 (400 km～) に分かれる。F 層の特徴として、日没後も完全には電離が消えないことが挙げられる。短波帯の電波を利用した長距離通信は、主に F 層による反射を利用している。

図-4 に沖縄で行われている電離層観測の結果 (イオグラフ) を示す。この観測は 2001 年 11 月 4 日の 12 時と 23 時に実施されたものである。短波帯の電波の反射帯として働く、F 層が夜間においても消えることなく存在している (広い周波数帯にわたり反射帯として働いている) 様子を確認することができる。一方、日中の F 層は低周波数側 (1～5 MHz) に存在しない。また、夜間に顕著に現れる混信 (イオグラフ中の黒い縦線) が日中は減少している。特に、低周波数側の混信が極端に少なくなっている。これは、短波の吸収帯として働く D 層が発達しているために、周波数の低い電波 (1～5 MHz) が D 層に吸収され、F 層まで電波が届かないためである。

電波は実際には電離層に対して垂直に入射する場合もあれば、斜めから入射する場合もある。電波が斜めから電離層に入射した場合には、電波が垂直に電離層に入射した場合と反射条件が変わってくる。電波を斜めに電離層に入射させたときの反射条件は、以下に示すセカントの法則によって決まる。

$$f' = f \sec \theta = f \sec \left(\tan^{-1} \frac{D}{2h} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 f' は電波を斜めから電離層に入射させたときの周波数、 f は電波を電離層に垂直に入射させたときの周波数、 θ は電波の電離層への入射角、 D は送受信間の距離、 h は電離層の高さをそれぞれ表している。式 (5) を用いることによって、斜めから電離層に入射させたときの電波の周波数を垂直に電離層に入射させたときの電波の周波数に変換することができる。この変換によって、

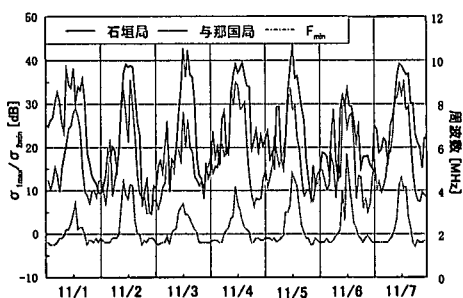
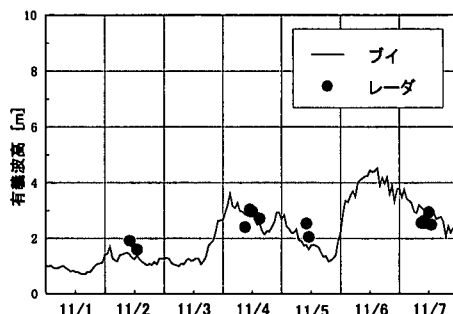
図-5 $F_{\min}$ と $\sigma_{1\max}/\sigma_{2\min}$ の変動特性

図-6 有義波高の比較

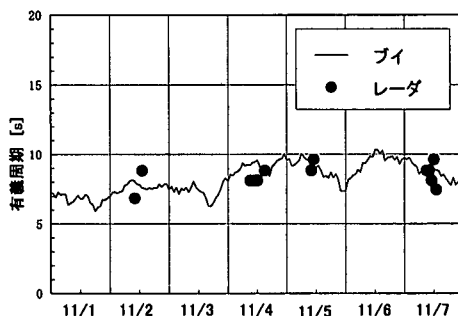


図-7 有義周期の比較

イオグラフにおいてどの周波数帯の電離層が反射に寄与するかを確認することができる。例えば、遠距離海洋レーダで使用している 9.25 MHz の電波が斜め 45 度から電離層に入射した場合の反射条件は、式 (5) より 4.625 MHz の電波を垂直に電離層に入射させたときの反射条件と同じになる。このように、電波が斜めから電離層に入射する場合、低周波数の電波を吸収する D 層が発達しているかどうかで、遠距離海洋レーダに混入するノイズのエネルギーレベルが決定される。D 層が極端に発達するデリンジャー現象 (太陽の放射する X 線の強度は著しく変動し、大きな太陽面爆発 (太陽フレア) が発生したときのことをいう。通常の 100~1000 倍の X 線が発生し、D 層では異常な電離が起きる。これに伴い、D 層

における短波帯の電波の吸収も大きくなる。)には、遠距離海洋レーダに混入するノイズのエネルギーレベルは極端に小さくなる。D 層の発達の状態を定量的に示す指標は存在しないが、定性的な指標としては $F_{\min}$ (F 層の低周波数側の最小値、D 層が発達している場合には低周波数の電波を鉛直に発射しても D 層によって吸収されて F 層まで到達しないことを利用) という指標がある。図-5 に検証観測期間における $F_{\min}$ の時系列変動と一次散乱のピークと二次散乱の最小値との比 $\sigma_{1\max}/\sigma_{2\min}$ の変動特性を示す。図-5 より、 $F_{\min}$ (D 層の発達具合) の変動は太陽の動きに連動していることがわかる。また、石垣局と与那国局における $\sigma_{1\max}/\sigma_{2\min}$ は $F_{\min}$ に比例して変動しており、遠距離海洋レーダの受信信号に混入するノイズのレベルは D 層の発達具合に比例してそのレベルが決まっていることがわかる。

5. 遠距離海洋レーダによる広域波浪計測

これまでの研究によってドップラースペクトルから方向スペクトルを逆推定する解析方法がいくつか提案されている。それらの中で橋本・徳田 (1998) によって提案されたベイズ統計論に基づく方向スペクトルの逆推定法や、児島・橋本 (2001) によって提案された一次散乱を考慮したベイズ統計論に基づく逆推定法は理論的には非常に高精度でドップラースペクトルから方向スペクトルを逆推定することができる。本研究では一次散乱を考慮したベイズ統計論に基づく逆推定法によってドップラースペクトルから方向スペクトルを逆推定し、逆推定された方向スペクトルから有義波高・有義周期を算定した。

逆推定される方向スペクトルはノイズレベルによってその精度が大きく変化し、ノイズレベルが高い場合にはその精度は著しく低下する。そこで、図-5 で示す $\sigma_{1\max}/\sigma_{2\min}$ が 30 dB 以上の場合 (ノイズレベルが低い) に方向スペクトルを逆推定し、有義波高・有義周期を算定した。このようにして算定した方向スペクトル・有義波高・有義周期と COMPASS ブイで計測された方向スペクトル・有義波高・有義周期との比較を行うことにより、遠距離海洋レーダによる波浪計測の精度について検討を行った。

図-6 に遠距離海洋レーダから推算した有義波高と COMPASS ブイで計測した有義波高の比較を示す。両者を比較すると若干の違いが存在するが有義波高の時間変動のパターンは一致している。図-7 に遠距離海洋レーダから推算した有義周期と COMPASS ブイで計測した有義周期の比較を示す。両者を比較すると若干の違いが存在するが有義周期の時間変動のパターンは一致している。

図-8 に遠距離海洋レーダから推算した方向スペクトル

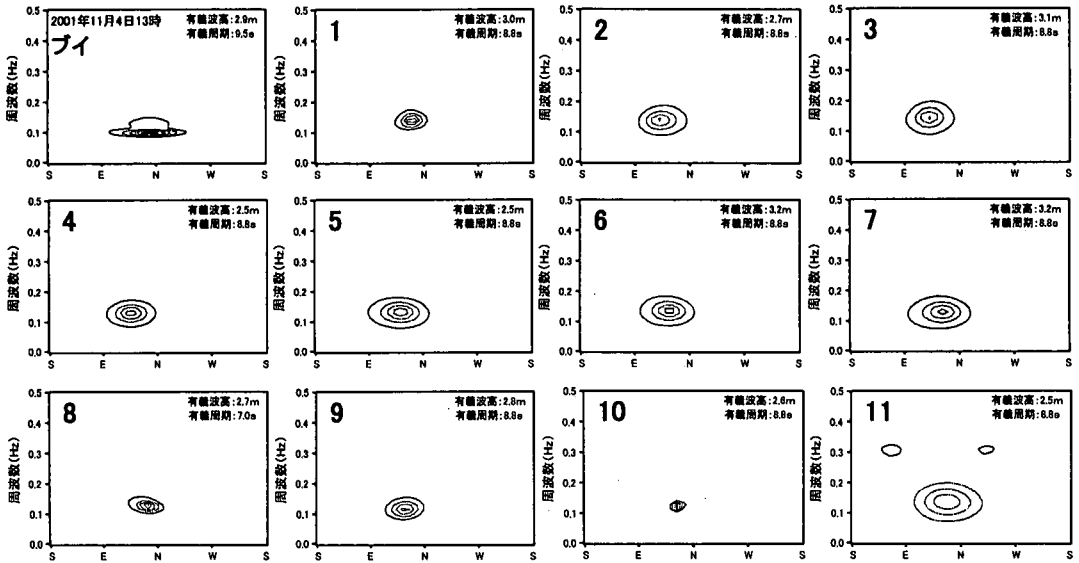


図-8 方向スペクトルの比較

図-8 COMPASS ブイで計測した方向スペクトルの比較を示す。遠距離海洋レーダでは、図-1 に示す観測地点(1~11)における方向スペクトルを推算した。遠距離海洋レーダで推算した方向スペクトルは COMPASS ブイで計測された方向スペクトルと比較すると、細部のエネルギー分布は異なるがその分布形状は類似している。ノイズのレベルが低い場合には、遠距離海洋レーダによって広域の方向スペクトルの計測が可能である。一方、各観測地点における方向スペクトルの形状は観測地点間で異なっている。特に、観測地点 10 の方向スペクトルは他の観測地点の方向スペクトルと大きく異なっている。これは観測地点 10 が与那国島に近い、陸上の影響を受けていると思われる。今回の結果から、ノイズレベルが低い場合には遠距離海洋レーダによって 100 km 沖合の外洋まで波浪計測が可能であることがわかった。

6. まとめ

遠距離海洋レーダは狭ビーム走査方式の海洋レーダと比較して、観測の同時性と観測海域の広域化を可能にする。また、従来の計測器(海底設置型の波高計やブイ)では計測することが困難であった沿岸から 100 km 沖合の外洋(特に、水深が深い海域)においても波浪計測が可能になり、外洋における波浪特性を把握できるようになる。このような特徴がある一方で、電離層の状態によっ

ては受信信号に混入するノイズレベルが増大し、波浪の情報を含んでいるドップラースペクトルの二次散乱成分がノイズレベルに埋もれてしまい波浪計測が困難になる場合がある。特に、短波帯の電波を吸収する D 層が消滅する夕方から明け方にかけては受信信号に混入するノイズレベルが大きくなり、事実上、波浪観測を行うことは不可能となる。今後は、遠距離海洋レーダの受信信号と受信信号に混入するノイズを分離するための方法を開発する必要がある。

最後に、電離層について貴重な助言を通信総合研究所電磁波計測部門電離圏・超高層グループの丸山隆殿から受けた。ここに記して謝辞を表します。

参考文献

- 橋本典明・徳田正幸 (1998): 海洋短波レーダによる方向スペクトルの推定, 海岸工学論文集, pp. 1271-1275.
- 児島正一郎・橋本典明・佐藤裕司 (2001): 一次散乱を考慮した海洋短波レーダによる波浪の方向スペクトルの推算法, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1436-1440.
- 小寺山亘・中村昌彦・池淵哲朗・高津尚之・藤井智史・佐藤健治 (2002): 波浪計測用ブイシステムの開発研究, 日本造船学会論文集, 第 191 号, pp. 57-67.
- Barrick, D. E. (1972): Remote sensing of sea state by radar, Remote sensing of the Troposphere, V. E. Derr, Editor, U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C., 12.