第9章　波浪の観測*

9.1　はじめに

従来、海岸近くに設置された気象レーダまたは船舶レーダには、sea-echo あるいは sea-clutter と呼ばれる、波浪による散乱エコーがあることが認められていた。例えば門脇（1962）は室戸岬レーダを用いて、成田・鳥居（1967）は函館山レーダを用いて、目視による風力階級とレーダに映る sea-echo の大きさまたは受信電力の間に定性的な関係があることを報告している。その後、測器による波高観測とレーダとの比較観測が行なわれた。例えば城野・榎嶋（1978）は富士山レーダと大島の波高との比較を、永田・青山（1979）は啓風丸等の気象レーダ及び種ヶ島レーダと啓風丸で得られた波高との比較を行なった。しかし両者とも受信電力は必ずしも波高に比例しないことを報告している。受信電力が波高よりも、むしろ海上風とよい相関を持つことは、磯崎・梯（1982）の最近の観測結果によっても示されている。

気象レーダのパルス幅は一般に数 μs で、距離分解能は数百 m である。海の波の波長は普通もっと短かい。そこでこのパルス幅を短かくすると、PPI 画面で海のうねりのパターンをみることができる。例えば船舶レーダは距離分解能が高いので、原見（1977）のようにうねりの波向や波長を観測することができる。船舶の航行にとって、海上の広範囲の波高分布を知ることは、非常に大切である。従って船舶レーダの PPI 画面にでるうねりのパターンを解析して、波高を推算する調査も行なわれている（萩野他、1985）。

ドップラーレーダによる波浪の観測は、アメリカの Johns Hopkins 大学の Pidgeon(1968)によって行なわれたので最初であろう。彼によると散乱体の速度は、水平偏波の方が垂直偏波で測定したものより早く、大体 1〜3 m/s の値であった。アメリカ海軍でもドップラーレーダを用いた観測は行なわれているようであるが、野外観測の結果はあまり公表されていない。

気象研究所は 1980〜1982 年に、電波研究所鹿島支所と共同で、鹿島の C バンド（5.6 cm）のドップラーレーダを用いて波浪の観測を行なった（Shibata 他、1985）。その結果から速度の異る幾つかの散乱体が存在することを見出した。その後、気象研究所は 1984、1985 年度に銚子と鹿島に X バンド（3 cm）の可搬型ドップラーレーダを設置し、波浪の観測を行なった（鹿島は 1985 年度のみ）。ここでは 1984 年度の観測結果について述べ、1985 年度については別の機会に報告する。

9.2　銚子における観測の概要

図 9.1 に銚子のレーダ観測に用いた観測施設の位置を示した。A は銚子市黒生海岸に設置した X

＊　柴田　彰：海洋研究部、磯崎一郎：気象庁海上気象課

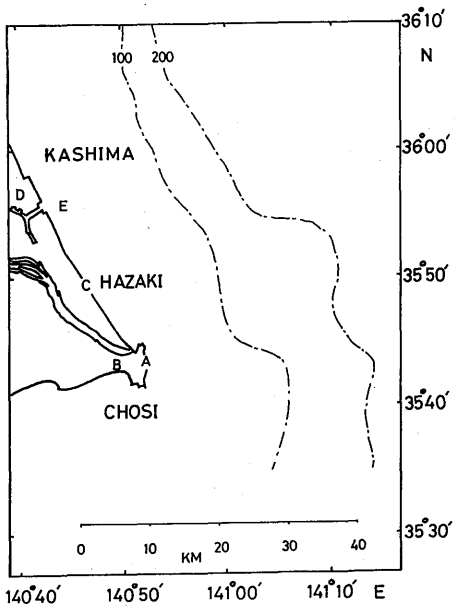

図 9.1 観測施設の位置図

バンド（3 cm）のドップラーレーダ、B は銚子地方気象台、C は気象研究所物理気象部が波崎に設置している気象観測施設、D は電波研究所鹿島支所の C バンドドップラーレーダ、E は第 2 港湾建設局の超音波式波高計である。A のレーダのアンテナの高さは海面から 20 m である。海は方位 355° から時計回りに 155° まで見ることができる。波崎の観測施設は平坦な砂丘の上にあり、風向が北東の場合、そこで測られる風速は海上風とほぼ等しいと考えられる。実際、雨が降っている場合、ドップラーレーダで測った雨滴の水平速度は波崎の風速とほぼ等しかった。

観測は 1984 年 11 月 20～22 日、12 月 5～8 日に行なった。図 9.2 は 2 つの期間の波崎における風向風速である。気圧配置は初めの観測では冬型で、後の観測では寒冷前線が通過して冬型になった。しかしこの冬型は両者とも北高型で、全般に天気が悪く、11 月 20 日、12 月 5～6 日には雨が降っていた。

9.3 観測結果

9.3.1 ドップラースペクトル

ドップラースペクトルは、レーダのアンテナの方位を固定して、観測された I, Q シグナルを使って計算する。このレーダの繰り返し周波数は 2,000 H_zで、1 回の取り込み時間は 0.6 秒なので、それぞれ 1,200 個の I、Q シグナルが得られる。そのうち初めの 1,024 個ずつの I, Q シグナルに対して、フーリエ変換を用いて、スペクトルが求められる。図 9.3 はその 1 例で、上記の 1 回分の観測を 36 個たしあわせて平均している。図の右側がレーダに近づく方向である。時刻は 1984 年 11 月 20

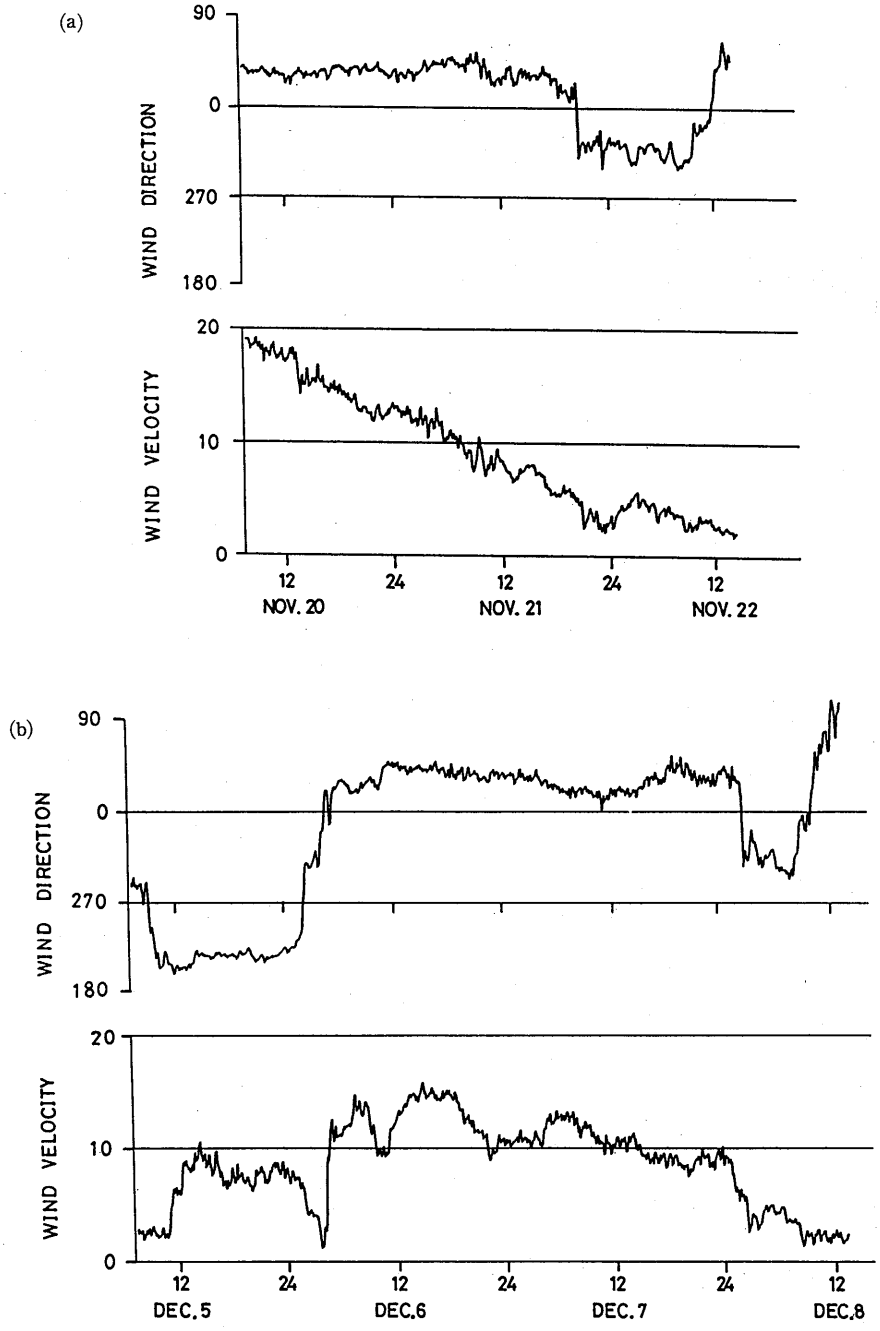

図 9.2　観測期間中の波崎における風向・風速　(a) 1984年11月20日～22日、(b) 1984年12月5～8日

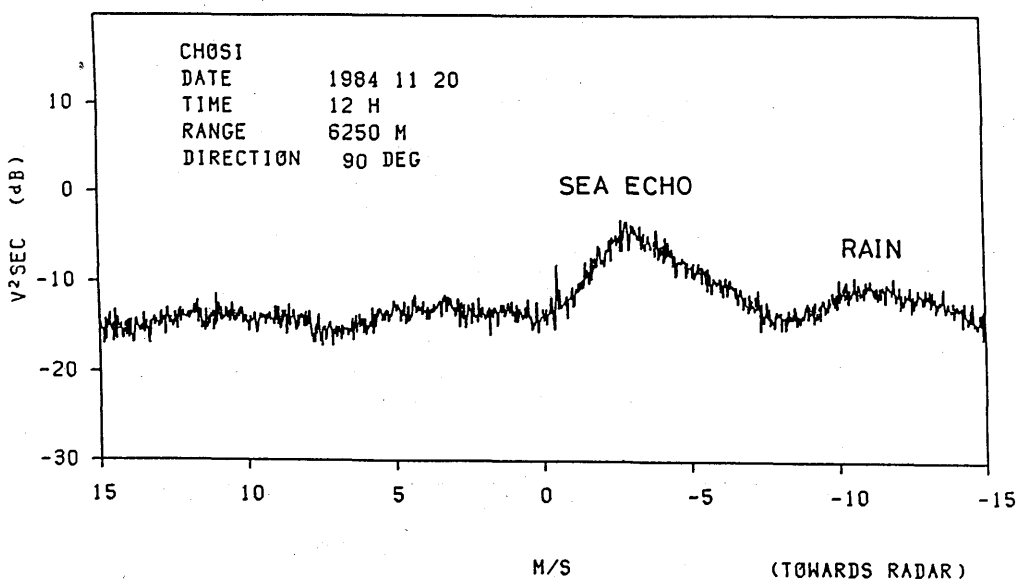

図 9.3 X バンドドップラーレーダで観測されたドップラースペクトル

日正午で、ビームの方位は 90°、仰角は −0.5° である。銚子地方気象台によると平均 3 mm/hr の雨が降っていた。図 9.2 を参照にすると、その頃の風向は北東で、風速は 18 m/s である。図 9.3 をみると、レーダに近づく方向に、速さが 2.6 m/s と、10.5 m/s の 2 つのピークがあることがわかる。前者は波浪の反射を、後者は雨滴の反射を表わしていると考えられる。このようにドップラーレーダは、両者の速さが違うので波浪の反射と雨滴の反射を区別することができる。

9.3.2 受信強度・ドップラー速度と海上風速・波高との関連

このレーダは PPI 画面で、平均の受信強度とドップラー速度の大きさが色別でそれぞれ表示され、大変みやすくなっている。口絵写真 9.1 がその例である。日時は 1984 年 12 月 6 日 14 時で、風は北東約 14 m/s である。受信強度とドップラー速度はともに色別で 8 階級に分類してある。速度の分布をみると、北東に最大速度がみられ、南東に視線方向の速度が零である方向がみられ、風向とよく対応していることがわかる。

次に観測された受信強度とドップラー速度が海上風速と波高のどちらに相関がよいかを調べた。図 9.4 がその結果である。風速は波崎における値で、風向は北東の場合のみ選んである*。受信強度は PPI 画面で強度が 1 と 2 の間の距離と定義し、単位は km である。測定は雨がない場合のみ行なった。ドップラー速度は図 9.3 にみられる波浪の反射のピークの値である。この値は、レーダからの距離 3 km のものであるが、結果は距離にあまり依存しない。図 9.4 をみると、受信強度・ドップラー速度ともに波高よりも海上風速と相関が良いことがわかる。波高との相関が悪くなる 2 つの原因が考えられる。1 つは 12 月 6 日の早朝のように、寒冷前線が通過し北東からの 10 m/s 以上の強

* 風向が西よりの場合、波崎の風速が海上の風をどの程度代表しているか不確定であるから除外した。

風が吹いたのに、波高が高くなっていない例が含まれていること。もう1つは11月22日のように前々日から北東の風が吹き続け波高が高くなっているのに、風速が弱い例が含まれていることである。

一般に入射角が中間領域(20～80°)においては、マイクロ波の海面における後方散乱はBragg散乱によるといわれている。しかし今回のように入射角が90°前後の、アンテナを水平方向に向けた観測では、散乱機構はまだ十分にわかっていない。図9.4の結果は、散乱体は風によって直ちに生じる小さな波であり、その波は大きな波の波高にあまり影響されず風の影響を受けていることを示唆している。このことは1985年度の観測結果でも示されている。

9.3.3　風速が大きい時のドップラー速度と受信強度の連続記録

11月20日午前は20 m/s近い北東の風が吹いていた。海面は泡立ち、時々しぶきが立っていた。図9.5はAスコープから読み取った平均ドップラー速度と受信強度の約10分間の記録である。図の上が速度で、下が強度である。速度の向きはレーダに向う方向で、実際はマイナスであるが、便宜上プラスにとってある。時刻は図9.3と同じで、ビームの方位及び仰角も同じである。平均ドップラー速度をみると、大体3～5 m/sであるが、時々10～14 m/sの大きな値がみられる。推測であるが、これは海面にしぶきが時々立ち風の速さで流される水滴からの反射ではないかと思われる。その時、強度も強くなっているようにみえる。

次に受信強度のスペクトルを求めて、どの時間的スケールが卓越するか調べてみた。このレーダのパルス幅は1 μsで、距離分解能は150 mである。従って海の波の波長が150 m以下のものは、レーダの強度の変動には寄与しないと推定される。一般に海の波の波長Lと周期Tには次式が成立する。

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \qquad (9.1)$$

ここでgは重力加速度である。Lを150 mとすると、Tは約10秒であるから、上の波長との議論と同様に、周期10秒程度以下のもののスペクトルの値は小さいと思われる。図9.6にレーダの強度のスペクトルを示した。この図から、周期の長いものの変動が卓越することがわかる。この図で周期の短かい所でぎざぎざしているのは、読み取り誤差が原因と思われる。一方、同時刻の鹿島港の波高スペクトルを図9.7に示した。この図から周期5～6秒に風浪のピーク、周期10秒前後にうねりのピークがみられる。図9.6と9.7を対比してみると、レーダの受信強度のスペクトルは、波高スペクトルを反映していないことがわかる。同じ手法を、パルス幅の小さいレーダに適用した時どうなるかの問題は、将来の調査に残されている。

9.4　ま と め

この報告では主に1984年度に行なわれた観測結果について述べた。観測は1985年度も行なわれ

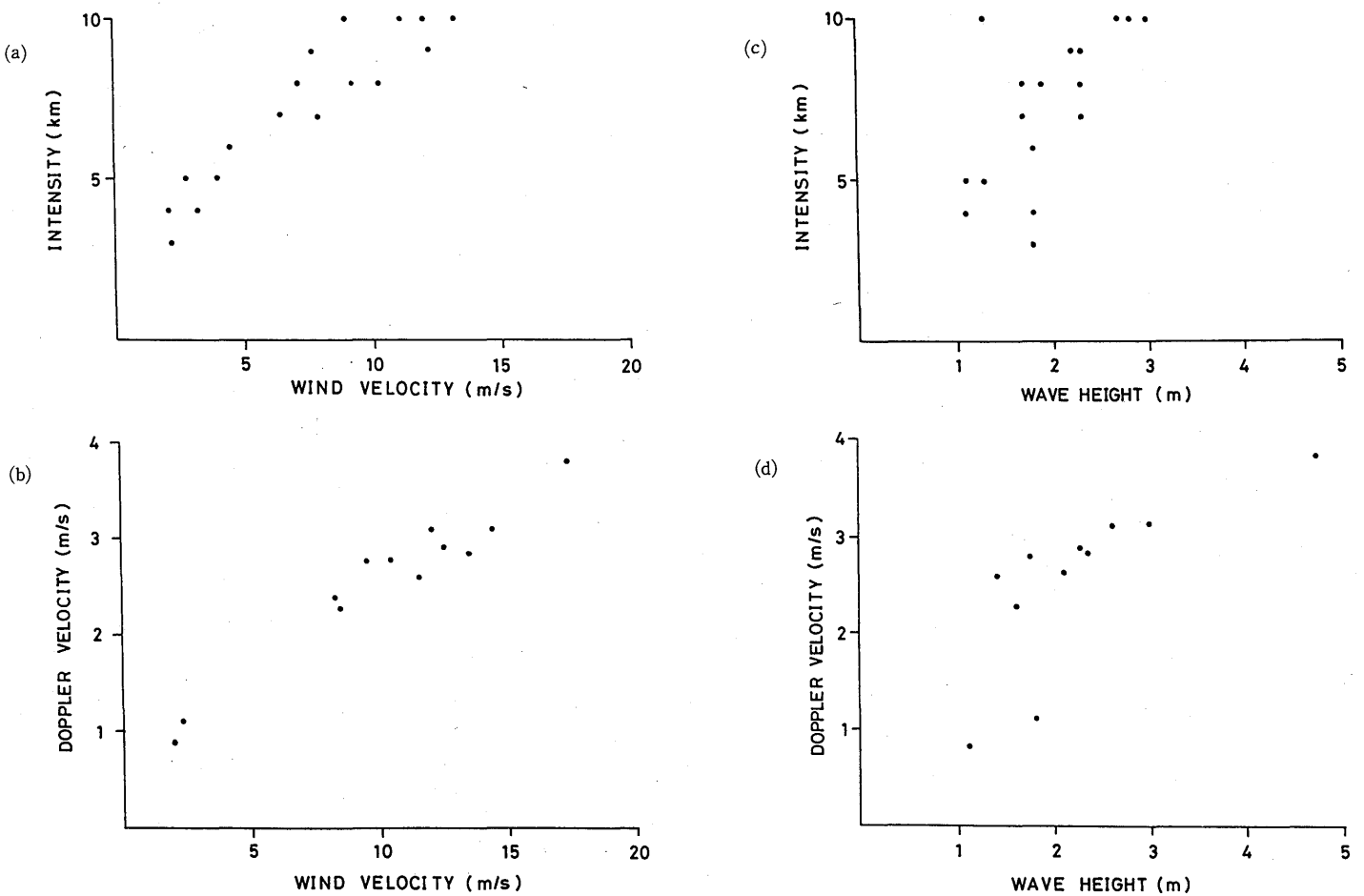

図 9.4 海上風速・波高と受信強度・速度との関連 (a) 海上風速と強度、(b) 海上風速と速度、(c) 波高と強度、(d) 波高と速度

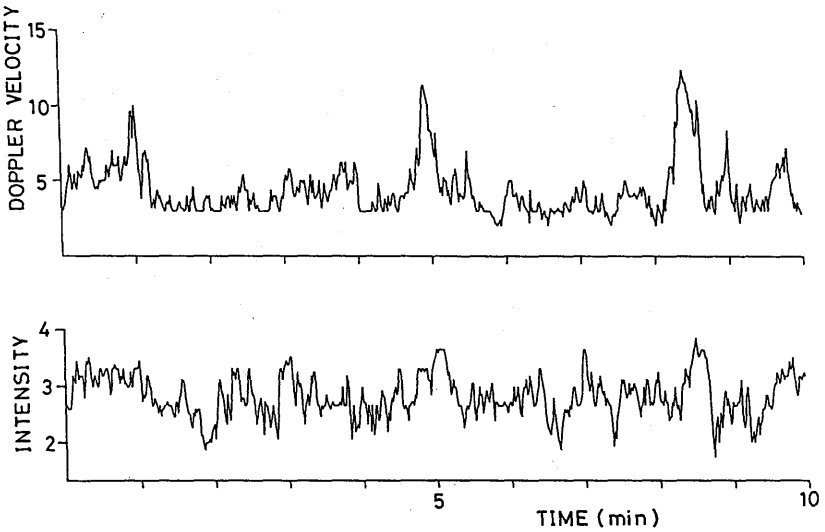

図 9.5　ドップラー速度と強度の連続記録（11時20日12時）

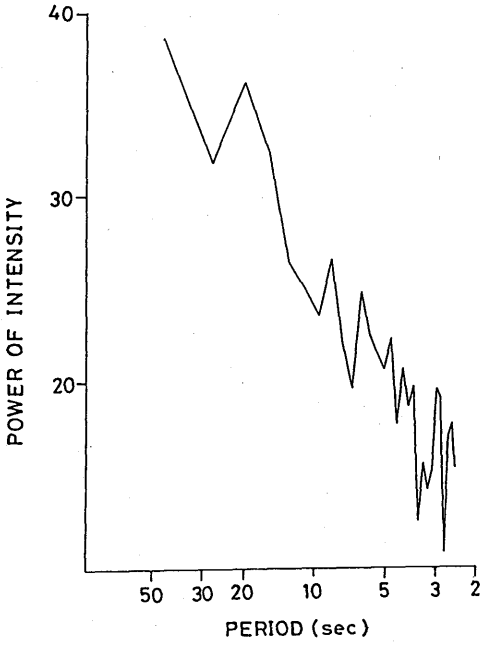

図 9.6　図 9.5 の強度のスペクトル

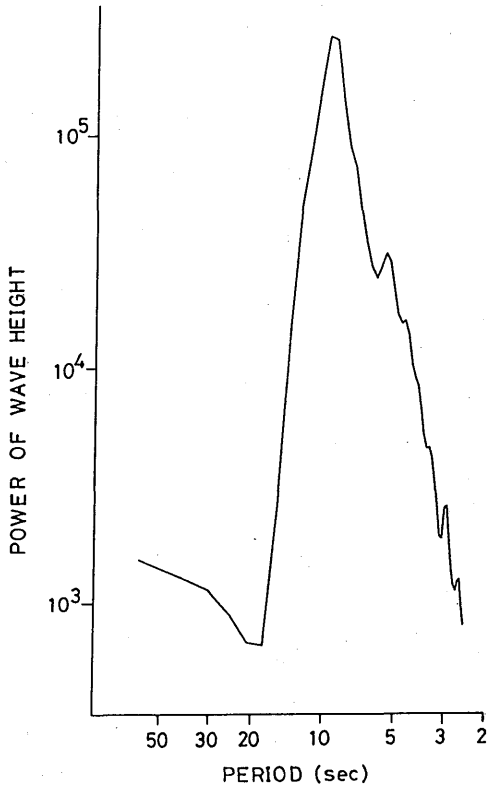

図9.7　鹿島港の波高のスペクトル（11月20日12時）

ており、9.3で述べた以外の新しい知見も得られている。従って、ここでのまとめは中間報告の形になるが、予測も交じえてドップラーレーダで波浪の観測を行なう利点を述べてみたい。

これまでも気象レーダのPPI画面で受信電力を見ていると、風向がある程度推測できた。即ち風上側が受信電力最大で、風下測が最小である。しかしこれはビームの中に林や建物などの異物がはいったり、海流などの流れがあったりすると、電力が変化し、それ程単純ではなかった。しかしドップラーレーダの速度のPPI画面を見ていると、風向が正確にわかるようになる。これはマイクロ波の海面における散乱体が、風によって直ちに生じる小さな波であると考えられるからである。この波はそれが乗っている波長のより長い波の進行方向とはあまり関係なく、観測時点の風の吹く向きに動いている。このことは急激な風向変化のおきる寒冷前線が通過する際、顕著である。実際、そのことは1985年度の観測で確められた。一方、ドップラー速度と風速との関連については、図9.4(b)のように、風速が20 m/s未満では、ほぼ線形であると見られる。しかしこの線形性が20 m/s以上でどうなるかは、1985年度の観測でもデータがないので、まだ未知の問題である。

銚子に設置されたレーダのアンテナの海面からの高さは20 mで、見通し距離は約18 kmである。しかし海上ではラジオダクトが生じやすく、実際、風が強いと20～30 km沖合までみえ、40 km以

上になることもしばしばあった。気象レーダの標高は一般にもっと高く、レーダで監視できる距離は長くなると考えられる。従ってドップラー化されれば、沖合から強風域が接近してくる様子が良く観測され、これが風についての短時間予報に利用できるのではないかと考えられる。

これまで海岸近くにある気象レーダでは海面の反射と雨滴の反射を区別することは困難であった。しかしドップラーレーダでは、海面の散乱体の速度と雨滴の速度は大概違うので、ドップラースペクトルで両者を区別することができる。しかしその場合でも、風速が強いと、海面にしぶきが立ち、その分だけ強度が強くなり、正確な雨量の推定は難しくなる。従って、しぶきの量に関する補正が必要となろう。

気象レーダの受信電力から波高を推定する試みは、9.1で述べたように、これまでもそれ程良くはいっていなかった。今回の観測でも図9.4(c)のように、波高と受信強度(9.3.2で定義)との関連は単純ではないようである。将来もその相関が良くなる見通しはあまり立てられない。また9.3.3で述べたように、レーダの距離分解能が数百mである限り、受信強度のスペクトルは、海の波の大部分のエネルギーが集中する周期10数秒以下の波のスペクトルを反映しない。しかし以上のことはパルス幅が数μsの場合の話であり、船舶レーダのようにパルス幅が0.1μsで距離分解能が15mと高くなると、PPI画面にうねりのパターンが写し出され、それから波高を推定できる可能性はある。しかしドップラー化することと、パルス幅を小さくすることは、相反することなので、レーダの仕様を切換えて用いる必要があると考えられる。

終りにこの研究を進めるにあたり、暖かい御援助をいただいた台風研究部柳沢善次主任研究官、石原正仁研究官に厚く感謝いたします。またデータの提供をいただいた銚子地方気象台、気象研究所物理気象部、電波研究所鹿島支所、第2港湾建設局の各機関の関係官にも厚く御礼申し上げます。

参考文献

萩野芳造他7名、1985：船舶用波浪観測レーダ、日本無線技報、No. 23, pp. 16-21.

原見敬二、1977：船用レーダによるうねりの回折観測、大阪管区府県気象研究会誌(昭和52年)、pp. 53-54.

磯崎一郎、梯　武浩、1982：気象レーダのシークラッターと海上風関係、気象研究所報告Vol. 33、No. 1、pp. 35-47.

城野光昭、榎嶋邦夫、1978：富士山レーダによるsea clutterの基礎的調査、研究時報、30巻別冊、pp. 97-99.

門脇俊一郎、1962：Sea-echoとその利用（その1)、海と空、38、13-23.

永田三和、青山道夫、1979：五島灘における2船協同ならびに九州西方および種ヶ島周辺海域の4船協同海上気象観測報告、波浪と気象レーダによるシークラッターについて、神戸海洋気象台彙報、197、31-43.

成田信一、鳥居　貢、1967：シークラッターと波浪、気象研究ノート第90号、気象レーダ特集号第7章、pp. 306-315.

Pidgeon V. W., 1968: Doppler dependence of radar sea return, J. Geophysical Research, 73、1333-

1341.

Shibata A., et al., 1985 : Doppler spectra of microwave radar echo returned from calm and rough sea surfaces, The Ocean Surface, Y. Toba and H. Mitsuyasu (eds.), D. Reidel Publishing Company, pp. 263-268.