

船舶用 X バンドレーダによる波向き観測

平 口 博 丸*・池 野 正 明*

1. はじめに

船舶用レーダの画像には波峰線と思われる縞模様が現れる事から、その縞模様の方向から波向きを推定しようとする研究が幾つかなされている。板尾ら(1967)は光学的回析を利用して波向きを求める方法について、また井上・加藤(1982)、Young ら(1985)は写真の濃淡をデジタル値に変換して解析する方法について検討している。これらの方法はいずれも写真撮影されたレーダ画像を介して解析を行っているため、処理・解析に非常な労力と時間を必要とするばかりでなく、波向き以外の量を定量的に評価することは困難である。

本研究は、海面からのレーダ反射信号をデジタルデータに直接変換し、シークラッターの特徴を風速や波浪との関係から検討すると共に、方向スペクトルに関する詳細なシーツルースデータを基にして、船舶用 X バンドレーダの波向き観測への適用性について検討した。

2. 現地観測の方法

(1) 船舶用 X バンドレーダ

本研究に用いた船舶用 X バンドレーダは送信周波数 9410 ± 30 kHz (波長約 3 cm)、送信出力 25 kW、送信パルス幅 $0.2 \mu\text{s}$ 、繰り返し周波数 2000 Hz、また空中線の水平、垂直ビーム幅は 0.8° 、 25° でありその回転数は約 24 rpm である。レーダ信号のデータ収集システムを図-1 に示す。海面からのエコーはレーダ位置に近いほど強くなるため、データが飽和しないように対数増幅検波を行った。対数検波後のレーダ信号は、パーソナルコンピュータに

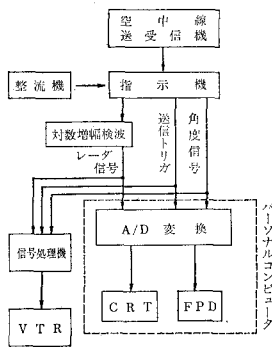


図-1 データ収集システム

て直接 A/D 変換され、8 bit (0~255) のデジタルデータとして保存した。サンプリング周波数は 10 MHz、これに対応した距離分解能は 15 m である。このシステムでは、収録開始方位 (北を 0° 度とし時計回りに定義する) を入力することにより 90° の範囲内のデータが 2 スキャン分連続して収録できる。1 スキャン分のデータは距離方向に 256 個、方位方向に 512 個である。なお方位に関する A/D 変換のタイミングは、空中線の方位パルスを利用しており、風による空中線の回転むらの影響を極力受けないように配慮した。

(2) 現地観測の概要

現地観測は冬季季節風時の日本海を対象として1988年2月に実施した。レーダは新潟県柏崎市荒浜にある財団法人海洋生物環境研究所実証試験場の屋上に設置され、その設置位置は海面上約 20 m、海岸からの距離約 50 m である。レーダ設置位置を図-2 の▲印で示す。この位

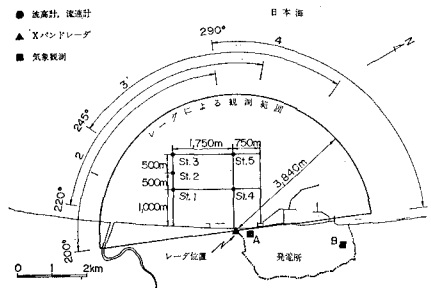


図-2 レーダと波浪観測装置の設置位置

置を中心にして海側の半径 3.84 km の半円内を観測領域とし、この領域内を 4 回に分けて収録した。即ち収録開始方位は図-2 に示すように 200° 、 220° 、 245° 、 290° とした。観測は 1988 年 2 月 15 日 18 時~17 日 12 時および 27 日 16 時~29 日 12 時の期間実施し、毎偶数時の観測を基本とした。

超音波式波高計と 2 成分電磁流速計を組み合わせた方向スペクトル観測装置を 5 ヵ所に設置し、波浪の現地観測を行った。図-2 中の ST. 1~5 の●印が波浪の観測位置であり、沖側より水深 20, 15, 10 m である。観測

は毎偶数時に約10分間とした。なお風向・風速の気象データは、観測地点に隣接する東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所において観測されている図-2のA地点(標高20m, 地上10m)およびB地点(標高160m, 地上78m)のデータを使用させて頂いた。

3. レーダ受信信号の解析方法

デジタル化されたレーダ受信信号データを用いて波向き等を求める。このときの解析フローを図-3に示す。

(1) 距離補正

レーダ方程式によれば、クラッターによる反射電波の電力(ワット)はアンテナから目標物までの距離 R の4乗に比例する。特にシークラッターの場合には、海面に対するレーダの見下ろし角が小さいために C は R の-3乗に比例する。また本研究ではレーダ信号を対数増幅検波しているため、A/D変換時のレーダ信号は次のように表すことができる(平口・池野, 1989)。

$$\zeta = \log C = \log \lambda + \log \sigma^0 - 3 \log R \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに ζ は対数増幅検波後のレーダ信号、 λ はレーダの性能のみにより決まる定数、 σ^0 は単位面積当りの有効反射面積である。本研究では、レーダ信号強度の空間変化から波向き等を求める事が主目的であることから、以下のような処理を行い距離補正とした。式(1)によれば距離補正関数は $\log R$ に比例するが、解析対象とする範囲が $1\text{ km} < R < 4\text{ km}$ 程度の比較的狭い海域を対象としていることから対数は直線で近似できると考えられる。さらに、式(1)中の $\log \sigma^0$ は距離 R の関数であり空間的に変動しているが、その空間平均値は定数であると考慮される。以上により、 $\log \sigma^0$ の空間変動成分は距離補正の関数形を1次関数で与えることにより概略評価できる。

$$\xi = \zeta - \delta(R), \quad \delta(R) = a + bR \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに ξ は距離補正後のレーダ受信信号の空間変動成分、 $\delta(R)$ は距離補正に関する1次関数である。 a と b は最小自乗法により決定される定数で、各方向毎に計算した。本研究では、距離補正の対象海域を0.96~3.84 kmの区間とすると共に、距離方向データを内挿し7.5 m間隔を与えた。なお今回の研究では、収録されたデジタル値をそのまま用いて解析しており、物理量(ワット)への変換は行っていない。

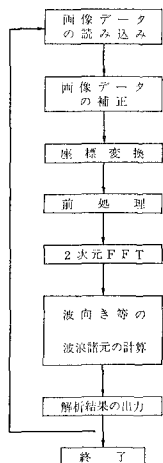


図-3 解析フロー

(2) 座標変換と2次元FFT

極座標系で定義されたPPIのイメージ画像から正方形の解析対象領域を切り出し、その領域内のデータを近隣点補間法を用いて $\Delta X = \Delta Y = 7.5\text{ m}$ の直交座標系に変換する。近隣点補間法とは、求めたい直交座標系の格子点上の値を、その点に最も近い極座標系の値で代表させる方法である。座標変換後の正方形領域のデータ $\xi(x, y)$ に2次元高速フーリエ変換(2D-FFT)を施し、複素フーリエ成分 $F(m, n)$ を計算する。ここに m, n は波数番号である。

(3) 波向き等の計算

複素フーリエ成分 F を用いて波数スペクトル $S(m, n)$ を計算し、 S が最大となる波数番号 (m, n) から、波浪場の代表的な波数 k 、波長 L および波向き α を求める。この時の波の周期 T は波長 L の結果から分散関係式を用いて計算することができる。ただしこの時の水深は切り出した領域内の平均的な水深を与えるものとする。

4. 解析結果の比較・検討

(1) レーダ信号の特徴

レーダ受信信号 ζ の距離方向変化の一例を図-4に示す。図(a)は通常気象条件(2月17日2時)、(b)は激しい降雪時(2月15日22時)、(c)は無風状態(2月29日11時)の場合の結果である。図中の2つの曲線のうち値が大きく常に正の値を取るものが生の受信信号 ζ 、値が小さく0付近で変動しているものが距離補正後の信号 ξ である。 θ_i は収録開始方位(245°)から数えた方向番号を表わし、 $\theta_i = 161, 193, 225$ は各々約273, 279, 285°の方向に対応する。同図より以下の事が分かる。1 km以下の近距離ではデータが飽和する場合がある。距離補正を行うことにより、生の受信信号に見られる距離方向のトレンドはほとんど除去できる。

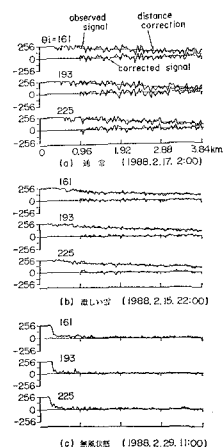
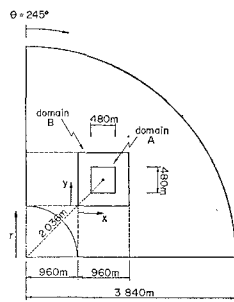


図-4 レーダ信号の1例

降雪時の場合、受信信号レベルは高いがその空間的な変動量は小さくなる。一方、無風状態の場合、信号値自体が非常に小さくなってしまふ。

生の受信信号 ζ や距離補正後の信号 ξ に関する平均値およびrmsを計算した。解析は図-5に示す正方形領域A(480 m × 480 m)を対象とし、観測開始方位が245°の1スキャン目のデータのみを解析した。図-6(a)に

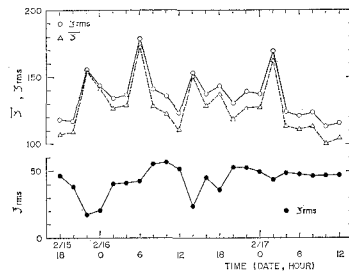
ζ_{mean} , ζ_{rms} , ξ_{rms} の解析結果を, 図 (b), (c) には B 地点で測定された風速・風向と ST.3 にて測定された有義波高・周期の結果を示す。図—6 より以下のことが分かる。雪が降っていた 2 月 15 日 22 時前後, 16 日の 6 時と 14 時の解析結果は, ζ_{mean} が大きく逆に ξ_{rms} は小さくなっている。図—4



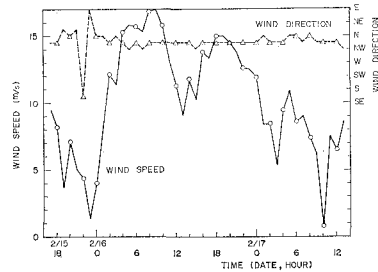
図—5 解析対象領域

(b) でも示したように, これはレーダの電波が海面に到達する前に雪による散乱を受けたことを表している。なお, 図—6(a)の17日2時の ζ および ξ の値は, 降雪時と同じ傾向を示しているが, 目視観測では降雪は全く見られなかった。この原因については現在のところ不明である。

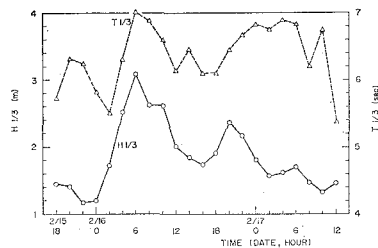
紙面の都合上ここには示さなかったが, 29日11時前後の受信信号強度は他の時間帯に比べて非常に小さく $\zeta_{\text{rms}} \approx 25$, $\xi_{\text{rms}} \approx 10$ 程度の値であった (図—4(c)参照)。このときの風速を見ると, 29日の明け方から風速が弱まり始め観測時には無風状態であった。しかし, 図—6の17日8時の無風状態の時にはその様な受信信号強度の低下は見られない。また兩時刻の波高値は約 1.4 m とほぼ同じであるが, 周期から判断すれば17日8時は風浪で, 29日11時はうねり性の波浪であったと言える。この様に, 海面での電波反射と風速や波浪との間にはかなり密



(a) レーダ信号強度



(b) 風向・風速



(c) 有義波高・周期

図—6 レーダ信号強度と風や波浪との関係

表—1 検討ケースの一覧と気象・海象状況

検討ケース 1988年		風速 風向 (m/s)	波高 (上: H1/3, 下: 4√m0)					周期 (上: T1/3(S), 下: f _p (Hz))					波向き (上: θM, 下: θD)				備 考
			ST.1	ST.2	ST.3	ST.4	ST.5	ST.1	ST.2	ST.3	ST.4	ST.5	ST.1	ST.2	ST.3	ST.4	
CASE-1 2月16日	2時間前	15.3 NNW	213	253	215	213		6.32	6.31	6.33	6.37		327	340	322		レーダ観測は6時を中心とした20分間に5回の観測を実施している。この観測期間中は、小雪がちらつく気象条件であった。 このときの波高は2.5m以上と比較的高波状である。
	正 時	15.7 NNW	268	273	309	276	263	7.34	7.15	7.04	6.82	7.03	322	320	320	323	
	6 時	16.8 NNW	280	283	313	279	275	0.125	0.133	0.121	0.111	0.123	320	316	314	312	
	2時間後	16.8 NNW	279	269	263	254	254	7.38	7.10	6.89	7.15	6.79	318	322	323	325	
CASE-2 2月17日	2時間前	12.6 NNW	190	178	216	184	183	7.15	6.79	6.68	6.26	6.27	321	322	330	322	レーダ観測は0時を中心とした20分間に5回の観測を実施している。この時の気象条件は雪もなく、良好であった。 レーダ画像では2方向性の波浪となっている。
	正 時	11.9 NNW	205	189	231	199	219	0.119	0.117	0.127	0.182	0.193	324	312	326	318	
	0 時	8.4 NNW	180	170	181	183	174	6.73	6.06	6.83	7.11	6.98	322	319	326	324	
	2時間後	8.4 NNW	189	178	194	193	199	0.109	0.113	0.107	0.107	0.104	328	322	322	320	
CASE-3 2月27日	2時間前	9.2 NW	161	157	157	153	157	7.33	6.89	6.75	6.71	7.49	321	325	322	322	レーダ観測は定時観測の1回のみである。このときの気象条件は雪もなく良好であった。 この時の波向きは、柏崎では希なN方向である。
	正 時	9.0 NW	174	174	168	169	189	0.117	0.109	0.111	0.113	0.109	330	336	322	318	
	20 時	9.0 NW	79	90	91	86	91	4.60	5.16	4.69	4.75	4.99	360	350	339	342	
	2時間後	12.9 NW	90	102	102	96	98	0.260	0.125	0.258	0.133	0.260	330	2	4	348	
CASE-3 2月27日	2時間前	9.2 NW	101	94	112	106	119	4.58	5.01	4.93	4.77	4.85	331	334	330	335	レーダ観測は定時観測の1回のみである。このときの気象条件は雪もなく良好であった。 この時の波向きは、柏崎では希なN方向である。
	正 時	9.0 NW	112	103	121	113	124	0.109	0.107	0.121	0.115	0.238	330	4	350	338	
	20 時	12.9 NW	130	135	119	129	116	4.79	4.87	4.69	5.01	4.83	322	327	335	326	
	2時間後	12.9 NW	137	142	128	138	126	0.195	0.201	0.123	0.197	0.203	326	328	352	316	

H 1/3 ; ゼロアップクロス法により求められる有義波高 (cm)
T 1/3 ; ゼロアップクロス法により求められる有義波周期 (s)
4√m0 ; パワースペクトルの0次モーメントm0から求められる波高 (cm)
H 1/3 ≈ 4.004√m0

f p ; パワースペクトルのピーク周波数 (Hz)
θ m ; 方向スペクトルの1次モーメントから求められる平均波向き (deg).
波向きは波の来襲方向を表し, その角度はN方向を0度として時計回りに定義する
θ d ; 方向関数が最大となる方向 (deg)

(cf) ここに示したスペクトル解析結果はHanningのスペクトル・ウィンドウを20回作用させた時の結果である。

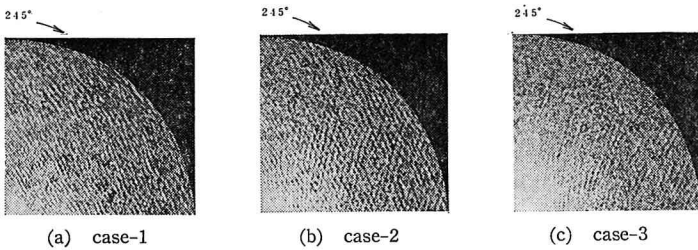


写真-1 PPI のイメージ画像

接な関係があると推察されるが、これらの間の関係については降雪の影響を除いて評価する必要があり、今後の検討課題である。

(2) 検討ケース

以下の3ケースについて観測開始方位が 245° のレーダ画像を詳しく検討した。各検討ケースの特徴やそのときの気象・海象状況をまとめると表-1 となる。

case-1 と 2 では、16日6時および17日0時の定期観測を中心とした前後10分間を対象とし、5分毎に得られた5回の観測データ(10 スキャン)を解析した。case-3 は27日20時のデータであり、通常の定時観測のデータ(2 スキャン)しか得られていない。解析対象としたPPI イメージ画像の一例を写真-1 に示す。case-1 の場合来襲波の有義波高は約2.5 mと比較的大きい。case-2 の特徴は写真-1(b)のイメージ画像から判断する限り2方向

の波が卓越していると予想される事である。case-3の特徴は波浪の方向スペクトルの解析から得られる波向きが柏崎では希なN方向となっている事である。

(3) レーダ画像の波数スペクトル

図-5 に示す様な領域B (960 m*960 m) をレーダ画像から切り出し、波数スペクトル S を求めた。 S が極大(S_p)と成る波数を case-1 と 2 について示したものが図-7である。図中の①②③④は極大値 S_p の順番を表し、横軸・縦軸は x と y 方向の波数番号である。ただしこの波数番号 m, n は、波数ベクトルに対して 180° 異なる方向即ち波の来襲方向に対応する。図-7 の左上の図は全て(10シーン)のアンサンブル平均時の結果であり、残りの5つの図は各時刻での結果(2シーンの平均)である。波数の原点付近に現れるピークは波長の長い成分が存在することを示しており、距離補正時に除去し得なかったトレンド成分によるものと考えられる。波の波長に対応した波数付近のみに着目すれば以下の事が分かる。

図-7(a) の場合、 S_p の波数位置は時刻によりばらつくが、平均的には $(m, n) = (10, 4)$ 付近にピークが存在していると言える。図-7(b) の場合にもある波数位置を中心にして結果がばらついているが、ここで最も特徴的なことは $(m, n) = (11, 5)$ の他に $(m, n) = (9, -1)$ 付近にもかなり安定したピークが存在するということである。これは、写真-1(b) のイメージ画像に見られた2方向性の波浪に対応するものである。

図-7(a) の場合、 S_p の波数位置は時刻によりばらつくが、平均的には $(m, n) = (10, 4)$ 付近にピークが存在していると言える。図-7(b) の場合にもある波数位置を中心にして結果がばらついているが、ここで最も特徴的なことは $(m, n) = (11, 5)$ の他に $(m, n) = (9, -1)$ 付近にもかなり安定したピークが存在するということである。これは、写真-1(b) のイメージ画像に見られた2方向性の波浪に対応するものである。

このような波数位置のばらつきは、現地波浪の周期および波向きに関する不規則性に起因するものであろう。このような変動性を除去するための方法としては、(i) もっと広い海域を解析対象とする (ii) 測定時刻が異なる多数の解析結果を平均する (iii) スペクトル・ウィンドウ等により平滑化を行う 等の方法が考えられる。本研究のように水深が変化する沿岸域で測定する場合、波浪場の空間的な一様性から言って (i) の方法には問題があるため (ii) の方法が最も良いと思われる。ただし case-3 については (iii) の方法を用いて波数スペクトルを求めた。

(4) 波向き・波長に関する実測値との比較

波高と流速のデータから磯部らの拡張最尤法により方向スペクトル $E(f, \theta)$ を求め、レーダ画像から求められる周波数や波向きと比較した。case-1~3 の比較結果を図-8 (a)~(c) に示す。図中のコンターは方向スペクトル E を表し、横軸は波の周波数 f 、縦軸は波の来襲方向 θ である。図の右側の2つの曲線は、 E を周波数について積分した方向関数 $D(\theta)$ と、 D の累加曲線 $P(\theta)$ を表

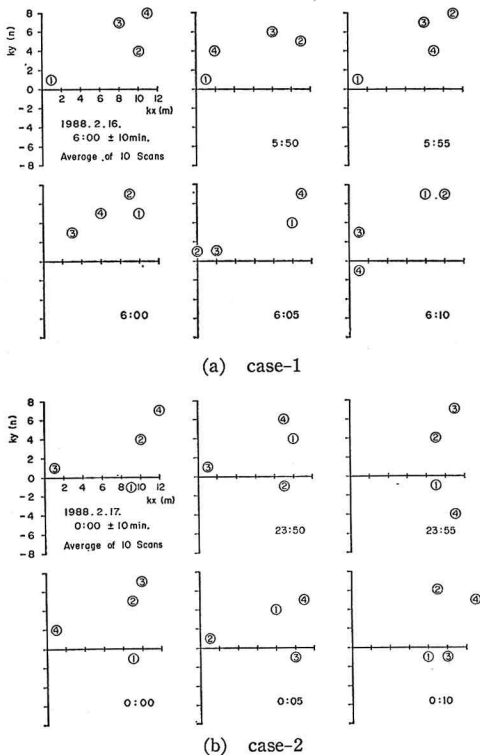


図-7 波数スペクトル極大値の発生位置

す。また図中には、 E が最大となる周波数と方向、 D が最大となる方向、および D が最大となる方向を中心として波浪エネルギーの 60% (左右に 30% づつ) が含まれている範囲が、各々矢印および数値で記されている。但し、ここでのスペクトル解析結果はウィンドウ回数を 10 回としたものであり、表-1 の結果と若干異なる場合がある。図中の①～④は、レーダ画像の波数①～④ (図-7 参照) に対応した周波数及び方向である。なお周波数の計算においては対象海域の平均的な水深を 20 m とした、

図-8(a) より以下の事が分かる。波の方向スペクトルのピーク位置はレーダ画像の波数②と③の中間に位置している。また、方向関数 D が最大となる方向 314° は波数②の値 313° に対応している。この様にレーダ画像から推定される波浪場の代表的な周波数や波向きは、波浪の現地観測から得られる結果と良い一致を示す。

case-2 の波高は 1.8 m 程度と比較的小さいことから、ST.2 (水深 15 m) での方向スペクトル観測結果を用いた。図-8(b) より以下の事が分かる。方向スペクトルのピーク位置と波数①および②とを比較すると、波向き・周波数共に前者は後者の中間に位置している。前述したように、①および②の波数位置はかなり安定した解析結果であり、2 方向性の波浪となっていることが予想された。波の方向スペクトルにはレーダ画像から予想されるような明確な 2 ピークは現れていないが、波の集中度は非常に低く波浪エネルギーはかなり広い方向にわたって分布していることが分かる。なお、4 時間後の方向スペクトルの観測結果には明瞭な 2 ピークが現れていた。

図-8(c) より case-3 について以下の事が分かる。方向スペクトルのピーク波向きは 8° 、レーダの解析結果①は 346° であり、両者には 20° 程度の差が見られる。一方 ST.3 での波向きは表-1 に示すように 350° であり、観測値同士にも違いがみられる。この原因としては、有義波高が約 1 m と小さいために流速の測定精度が低下した事が考えられる。また、このレーダ画像の解析結果は 1 回の観測データのみによるものであり、波の不規則性に起因するばらつきが考慮されていないと言う問題がある。しかしながら、両者の解析結果は他の時刻の結果に比べてかなり北寄りの波向きを示しており、定性的には両者はよく対応しているものと判断される。

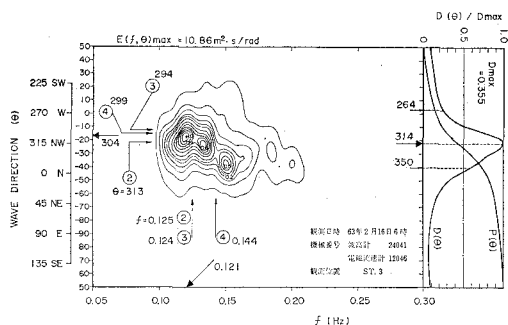
5. ま と め

波浪場の代表的な周期や波向きは X バンドレーダを用いて十分評価できることが明らかになった。今後は、レーダ受信信号強度と物理量 (例えば風速や波高) との関係についても検討する予定である。

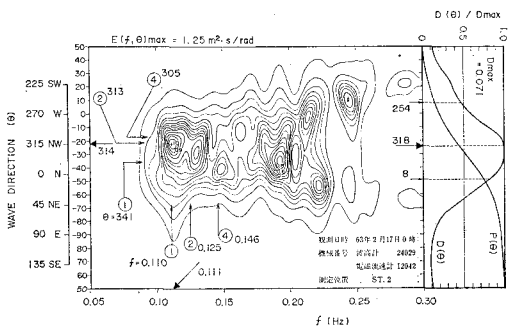
本研究を実施するに当たっては多くの機関の御協力を得た。財団法人海洋生物環境研究所実証試験場、東京電力株式会社柏崎刈羽建設所および日本無線株式会社には現地観測に際して便宜を図っていただいた。また画像解析では三菱総合研究所の後藤真太郎氏の御協力を得た。ここに記し感謝の意を表します。

参 考 文 献

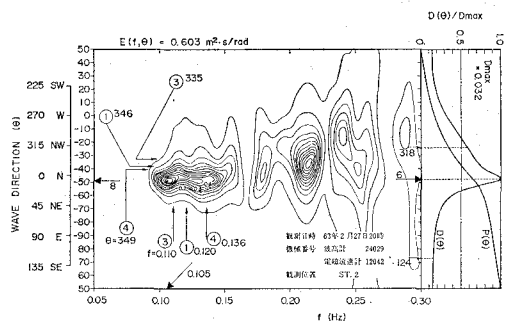
- 板尾純一・木戸 武・井島武士・松尾隆彦・石川敏雄 (1967): 日本海沿岸の波について (第 2 報) — 金沢海岸のレーダー観測による波向分布 —, 第 14 回海岸工学講演会論文集, pp. 60~67.
- 井上篤次郎・加藤雅司 (1982): 船用レーダを利用した波浪解析の一方, 日本航海学会論文集, No. 67, pp. 127~135.
- 平口博丸・池野正明 (1989): 船舶レーダを利用した波浪の波向き観測, 電力中央研究所研究報告, (印刷中)
- Young, I. R., W. Rosenthal and F. Ziemer (1985): A Three-Dimensional Analysis of Marine Radar Images for the Determination of Ocean Wave Directionality and Surface Currents, J.G.R., Vol. 90, No. c1, pp. 1049~1059.



(a) case-1



(b) case-2



(c) case-3

図-8 波向きと周波数に関する比較