

等高線情報を用いたレーダイメージの生成

柳原圭雄 田中 稔 田村進一 田中幸吉
(大阪大学基礎工学部)

1. まえがき

レーダ(RADio Detection And Ranging)は、電波を用いて物標(対象物)までの距離と方向を測定し表示する装置である。現在レーダには、船舶用・航空機用・地上用等の多くの種類があり、それぞれの分野で利用されている。

筆者らは、船舶用レーダを想定し、実際のエコーイメージに良く似た像を表示する訓練用機器(レーダシミュレータ)として使用し得るシステムの開発を行なってきた⁽¹⁾⁽²⁾。システムへの地形情報の入力として国土地理院の5万分の1の地形図を用いている。

レーダの原理は、電波を放射してから物標に反射して戻ってくる電波を受信するまでの時間を測ればその物標までの距離が測定できる事である。実際のレーダでは、電波を放射すると同時にCRT面上の輝点を中心から半径方向に動かし、電波が戻ってきたときに電波の強度に応じた輝度変調によりCRT面上に物標の位置を表わすようにしている。これを電波を放射する向きすなわちアンテナの向きとCRT面上の輝点を中心から動かす向きとを同期させて行なえば、360度すべての方向のエコーイメージが得られる。

レーダの性能を表わす言葉として、方位分解能と距離分解能がある。方位分解能は角度で表わし、レーダ位置から見てこの角度以下に接近している2つの物標は、個々別々に表示されずにつながった像として表示される。これはアンテナのもつ指向特性により定まる。距離分解能は距離で表わし、同一方向にある物標でこの距離以下に接近している2つの物標は、個々別々に表わされずにつながった像として表示される。これはパルス幅より定まる。

表1に実際の船舶用レーダの仕様例を示す。

現在あるレーダシミュレータは、フィルム面上に記録されたエコーイメージの模擬像をFSSで読みとり、その電気信号をCRT面上に表示するものである。そのためレーダ位置を変えても、同じ像が平行移動した像しか得られない。

本稿で提案するレーダシミュレータはレーダ位置ごとにエコーイメージに対応したエコーテーブルを作成し、その内容を表示する方式を採用しており、レーダの移動によるエコーの変化を表示できる。

表1 船舶用レーダの仕様の例

指示部

探知範囲/距離目盛

●甲種型機は0.75マイル
●甲種型機は0.25マイル形

0.25	0.5*	1.5	3	6	12	24	48	100	マイル
0.125	0.125*	0.25	0.5	1	2	4	8	20	マイル毎

可変距離目盛 0.1~110マイル

方位分解能 1.23°(2000mm)、0.95°(2400mm)、
0.75°(3000mm)

距離分解能 14m以下

距離目盛精度 ±1%または±40mの何れか大きい方

可変距離目盛精度 ±1.5%以下

方位精度 1°以下

最小探知距離 20m以下(0.25マイルレンジ上)

ブラウン管直径 10または12インチCRT(甲種型機は10インチ)

中心位置調整 1/8半径

使用温度範囲 -15~+55°C

2. システムのハード/ソフト構成

図1にハード構成を示す。CEC555HはFSSとリンクされており、ここで地形図より等高線情報が入力される。CEC555HからU-300を介して45/Sヘデータが送られる。45/Sでデータの前処理と変換及びエコーテーブルの生成と表示が行なわれる。ライトペンによってレーダ位置を指示する。

図2にソフト構成を示す。FSSより入力された等高線図を2値化及び細線化をし、点の追跡によって等高線の点列を作成する。その点列に高度情報を付け加えて整理する。サンプル間隔(画素間隔)は実地形上では約28m、高さ方向では25mに対応している。

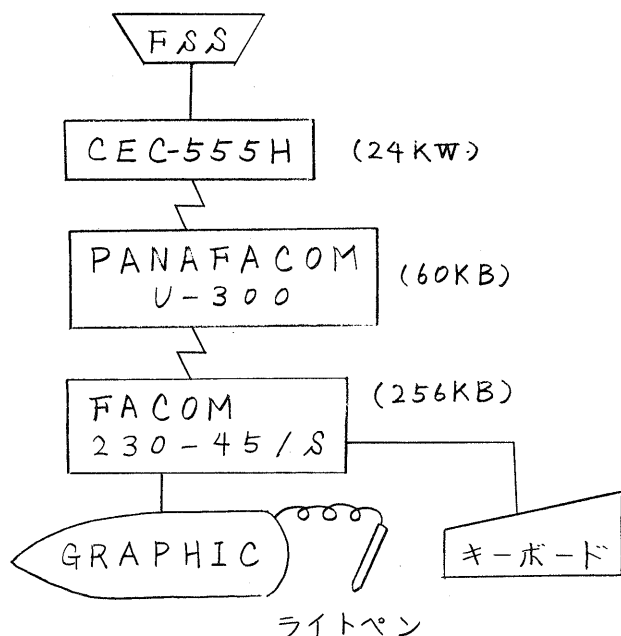


図1 ハード構成

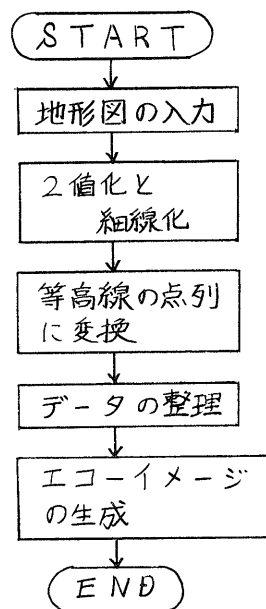


図2 ソフト構成

3. 等高線情報の抽出と整理

前処理として、国土地理院の5万分の1の地形図から等高線情報の抽出を行なう。等高線に沿って墨入れを行ない、フィルムに撮影したものをFSSより入力する。このとき実地形上で南北方向約6.7km、東西方向約9kmを、240×320の画素で標本化している。この画像を、8近傍連結の手法を用いて細線化を行なう。

次に、同じ等高線である点を一連の点列として表わす。点の追跡は次のように2つの場合に分けて行なわれる。(i)画面エッジ上に端点がある場合、画面エッジを探索し端点を見つけ、その点より点列を追跡していく。(ii)等高線が閉じており画面内にある場合、画面の原点からラスタ走査を行ない、追跡されていない点があればその点を出発点として、点列を追跡する。閉じている事を考慮に入れ

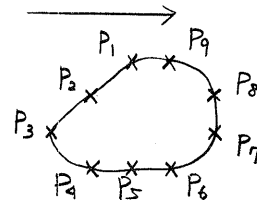
て、点列の最後に出発点を付け加える(図3)。1つの等高線の道跡が終了すれば、その点列の出発点の次の点から再びラスタ走査を開始する。

このようにしてできたデータは、 X, Y 直交座標で表わされた座標点列となっている。前処理の次のステップは各座標点列に対する高度情報の付加操作である。

1つの等高線をグラフィックに表示し高度情報をキーボードより入力するようにしている。この操作の後では、データは1つの点列に対し1つの高度情報をもっている。

最後に、データを高さの順に並べ換える。結果として得られる等高線データは次のような形をしている。

ラスタスキャン



点列 $P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 P_7 P_8 P_9 P_1$

図3 ループの場合の座標点列構成法

($Z_1 S_{11} S_{12} \dots S_{1n_1} Z_2 S_{21} S_{22} \dots S_{2n_2} \dots Z_m S_{m1} S_{m2} \dots S_{mn_m}$)
 ただし $S_{ij} = (X_{ij1}, Y_{ij1}) (X_{ij2}, Y_{ij2}) \dots (X_{ijk_{ij}}, Y_{ijk_{ij}})$
 m は異なる高さの数
 n_i は高さ Z_i の等高線の数
 S_{ij} は高さ Z_i の j 番目の等高線の点列
 k_{ij} は点列 S_{ij} に含まれる点の数

4. エコーイメージの生成

処理フローを図4に示す。

前処理で得られた等高線データとグラフィック面上で指示されたレーダ位置とが入力データである。

初期エコーテーブルは、レーダ位置を中心とした r, θ, Z 円筒座標系で表わされた等高線上の点を格納するテーブルであり、エコーテーブルは、それを用いて表示するためのテーブルである。共に1度ごとの配列をもち、全体で360個の配列をもっている。

4.1では、等高線データを r, θ, Z 円筒座標系に変換した後に初期エコーテーブルを得る手順について述べる。

4.2では、初期エコーテーブルを表示に適した形式に変形し、エコーテーブルを得る手順について述べる。

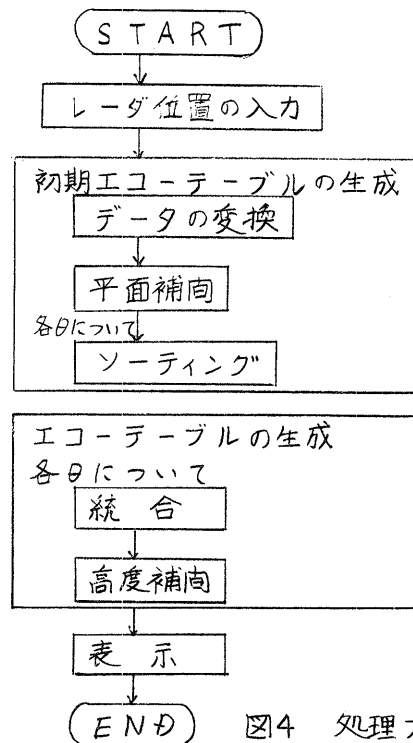


図4 処理フロー

4.1 初期エコーテーブルの生成

x, y, z 直交座標系の点 (x, y, z) を、レーダ位置 $(x_0, y_0, 0)$ を中心とする r, θ, z 円筒座標系の点 (r, θ, z) に変換する。以下の処理は画素間隔を単位長としている。

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

$$\theta = \begin{cases} \left[\frac{180}{\pi} \cos^{-1} \frac{x - x_0}{r} \right] + 1 & \text{if } y - y_0 \geq 0 \\ \left[\frac{180}{\pi} (2\pi - \cos^{-1} \frac{x - x_0}{r}) \right] + 1 & \text{if } y - y_0 < 0 \end{cases} \quad (1)$$

[] はガウス記号を表わす。

この演算の結果 (r, z) を初期エコーテーブルの角 θ に対応した配列の要素として格納する。

ここですり抜け現象(図4)が問題となる。これは、 x, y 平面では連結した点であっても、 r, θ 平面に変換したときに連結性が保存されないために生ずる。

これを解決するために、連結した2点の向に点の補向を行ない、その点を配列に格納する。2点をそれぞれ (r_i, θ_i, z) (r_j, θ_j, z) ($m = \theta_j - \theta_i > 1$) とすると、配列 $\theta_i + k$ に格納する点を次のような線形補向で求める。

$$\theta = \theta_i + k$$

$$r = r_i + (r_j - r_i) \times \frac{k}{m}$$

$$1 \leq k \leq m - 1$$

(2)

$m = 2$ の場合を図5, 6に示す。

次に、各 θ ごとに r の昇順に配列要素の並べ換えを行なう。

こうして得られた初期エコーテーブルは、地形図の等高線のみをレーダ位置を中心に1度ごとに放射状スキャンによってFスキャンより読みとった等高線の位置状報と、さらに高度情報を付け加えたものに対応している。

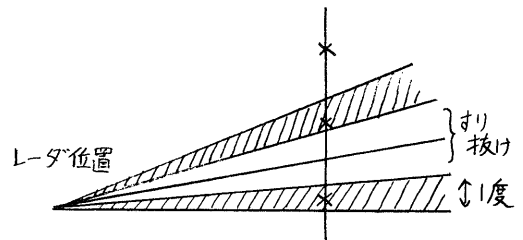


図4 すり抜け現象

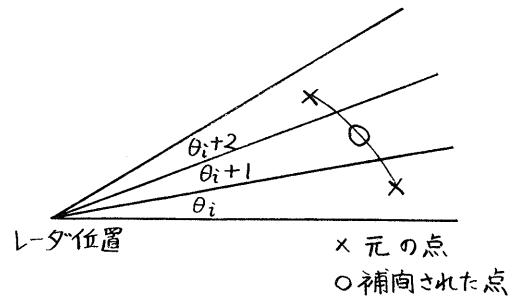


図5 水平面での補向

1	
}	⋮
	(r_i, z)
	$((r_i + r_j)/2, z)$
$\theta_i + 1$	(r_j, z)
}	⋮
	⋮
	360

図6 テーブルへの格納

4.2 エコーテーブルの生成

初期エコーテーブルに対し、各θごとに等高度連結点の削除と高度補間を行ないエコーテーブルを生成する。

同一θ内に連続する2点 (r_i, z_i) (r_{i+1}, z_{i+1}) に対して、 $z_i = z_{i+1}$ 、 $r_{i+1} - r_i \leq \sqrt{2}$ である場合には、点 (r_{i+1}, z_{i+1}) を初期エコーテーブルより取り除く。これは、図7のような場合にrの一番小さい点、すなわち最初にエコーが返ってくる点で代表させるためである。模式図的に表わすと図8のようになる。

次に高度に対して補間を行なう。Z平面上で約28mごとにサンプルしているのに対し、現在の前処理の結果ではZ方向に100mごとのサンプルとなっているので、Z方向に対して25mごとに補間を行なう。同一θ内の高度の違う連続した2点 (r_i, z_i) 、 (r_{i+1}, z_{i+1}) の間に、次のような線形補間を行ない3点 (r'_j, z'_j) $j = 1, 2, 3$ を挿入する。

$$\left. \begin{aligned} r'_j &= r_i + (r_{i+1} - r_i) \times \frac{j}{4} \\ z'_j &= z_i + (z_{i+1} - z_i) \times \frac{j}{4} \\ j &= 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} (3)$$

4.3 エコーイメージの生成

エコーテーブルを用いて、エコーイメージは以下のように生成される。各θに入っている点を (r_i, z_i) $1 \leq i \leq n$ (n は点の数)、 $\varphi_n(j) = \max \{ z_l / r_l \mid 1 \leq l \leq j \}$ 、 $\varphi_n(0)$ を負、 $R_i = \sqrt{r_i^2 + z_i^2}$ とする。

- (i) $\varphi_n(i-1) < z_i / r_i$ のとき ($1 \leq i < n$)
- (a) $z_i / r_i < z_{i+1} / r_{i+1}$ ならば
区画 $[R_i, R_{i+1}]$ にエコー有とする。
- (b) $z_i / r_i = z_{i+1} / r_{i+1}$ ならば
区画 $[R_i, (R_i + R_{i+1}) / 2]$ にエコー有とする。

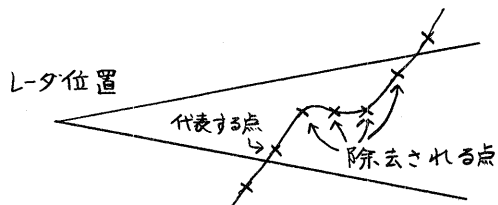


図7 統合処理

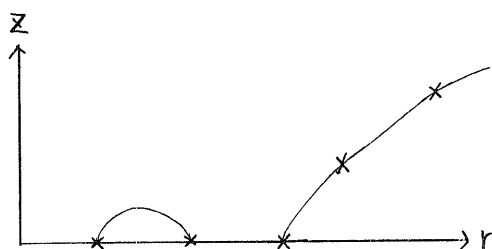


図8 代表された等高点

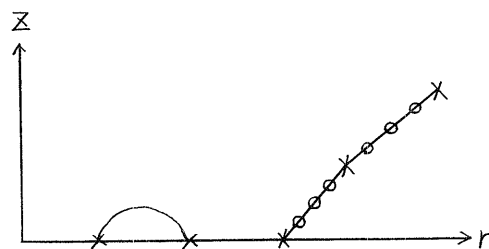


図9 高度の補間 (○補間点)

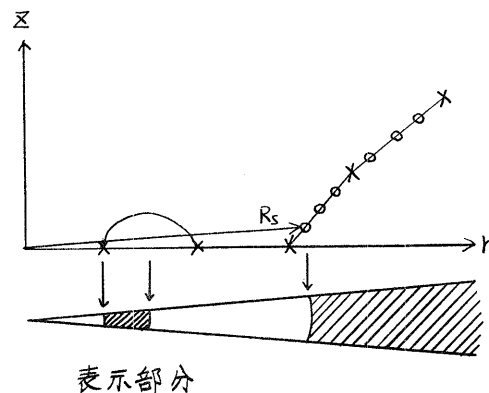


図10 基本とする表示

- (C) $Z_i/r_i > Z_{i+1}/r_{i+1}$ ならば
 区向 $[R_i, R_{i+0.5}]$ にエコー有とする。
- (ii) $\varphi_n(m-1) < \Sigma_n/r_n$ のとき
 区向 $[R_n, R_{n+5}]$ にエコー有とする。
- (iii) 上記以外はエコー無とする。

図10の例で解るように、高度 0 が連続する場合には高さを考慮する必要が生ずる。島の両端の点の中央に高さ H の点があると仮定し、 $\varphi_n(r)$ の値に修正を加える。島の両端の点の距離が R であるとき、 H を R の関数として求める (図11, 12)。

$$H = \begin{cases} R/5 & \text{if } R < 17.5 \\ 3.5 & \text{if } R \geq 17.5 \end{cases} \quad (4)$$

同様の操作を島だけでなく、山の頂上に対しても施している。この H と R の関数は、地形図より得た数値を基にして求めたものである。

上の処理を各 θ 個別に行なっているために、等高線の屈曲部で図13に示すようなヒゲが発生する。これは、同じ等高線の点対になって各 θ に入ってくることを暗黙のうちに仮定していることに起因する。

このヒゲの除去は島 (又は山頂) の端を認識することで解決できる。すなわち、エコーテーブルの隣りの配列内に同じ等高線の点があるかないかを調べればよい。必要に応じて n 個隣りの配列内を調べねばならない。 n は式 (5) のように決めている。

n 個の配列の中で隣り合う配列内の等しい高さをもつ2点間の r の差が3画素以下の場合にその2点は同一等高線上の点であると判定する。

ある点 (r, z) に対して、 n 個の連続した配列内に同じ等高線の点があれば、その点は端点でないとする。そうでない場合には端点であるとし、端点において区向 $[R, R+0.5]$ にエコー有とする。

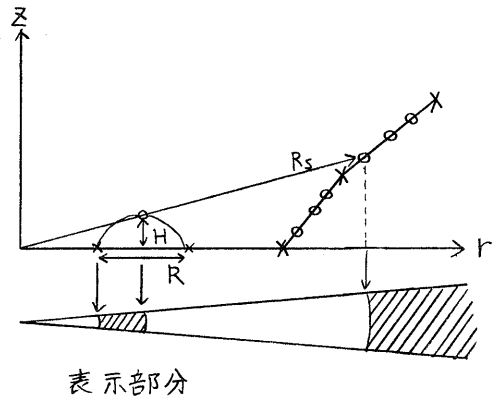


図11 島の高さの予想

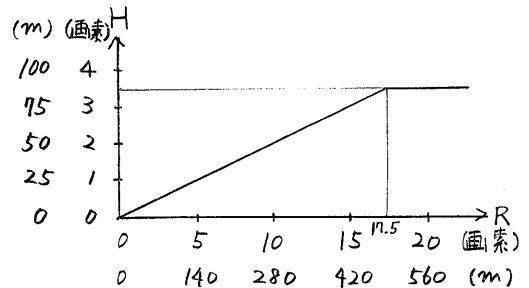


図12 HとRの関係

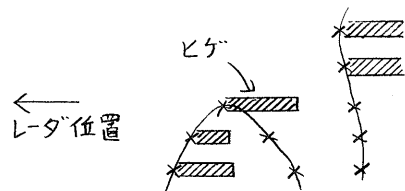


図13 発生したヒゲ

$$n = \begin{cases} 4 & \text{if } r < 15 \\ 3 & \text{if } 15 \leq r < 30 \\ 2 & \text{if } 30 \leq r < 45 \\ 1 & \text{if } 45 \leq r \end{cases} \quad (5)$$

5. 結果及び検討

シミュレート実験を行なった写真を(1)~(4)に示す。用いた地図は、国土地理院の5万分の1の地形図(橋州赤穂)を用いた。ビームの到達距離を100画素(約2.8Km)としている。

写真(1)~(4)は、同じ湾を異なる3つのレーダ位置からの像である。

写真(1)に示した○印のエコーは、等高線の向を平行にビームがある場合に起っている(図14)。この問題は、 θ 方向に對しても補向を行なうか、あるいは、地表面の傾斜がゆるやかなものと判断しその部分の表示を暗くする操作によって解決できる。

高さ100m以下の島が並んでいる場合それらの島の大小にかかわらず、後にある島のエコーは表われていない(図15)。この問題は、島の頂上にある点を式4に従って補向し、エコーテーブルに記入することで解決できる。

方位分解能と距離分解能について考える。エコーテーブルを1度ごとに生成しているので、方位分解能は1度である。 $\sqrt{2}$ 画素より離れた2点は区別されているので、距離分解能は $\sqrt{2}$ 画素(約50m)である。

6. あとがき

2次元直交座標点列の形で表わされた等高線情報を、レーダの表示に適した形 r θ 円筒座標系に変換してエコーイメージを生成・表示するシステムを提案した。本シミュレートシステムは数個のマイコンで構成できるようなものを念頭に置いているため、(i)入力データ量の圧縮、(ii)処理アルゴリズムの簡略化を考慮した。すなわち、(i)に對しては等高線座標点列を入力とし、(ii)に對してはエコーテーブルを導入することにより、全ての処理をテーブルの上で実行するようにした。

シミュレータとして更に改良すべき第1の点は、エコー強度に応じたCRT輝度の変調である。エコーテーブル内の情報から、地表面の傾斜角を求めることが可能であり、それに応じた輝度変調を施すことでこの改良は行なえる。その他の点は、海面反射による不要波の模擬、他船の存在などを示すエコーの模擬などである。

参考文献

- (1)大野, 田中, 田村, 田中 「等高線情報をもとにしたレーダイメージの生成」情報処理20回全大
- (2)三宅, 田中, 田村, 田中 「レーダシミュレータの生成」 情報処理21回全大

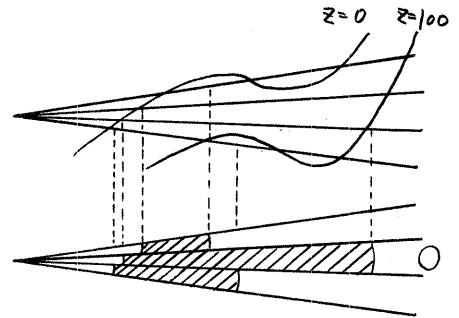


図14 ○印のエコーの原因

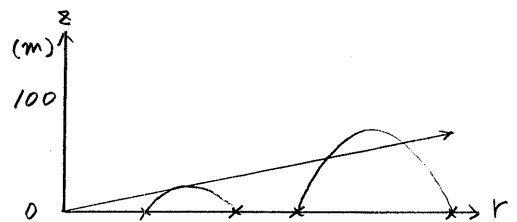
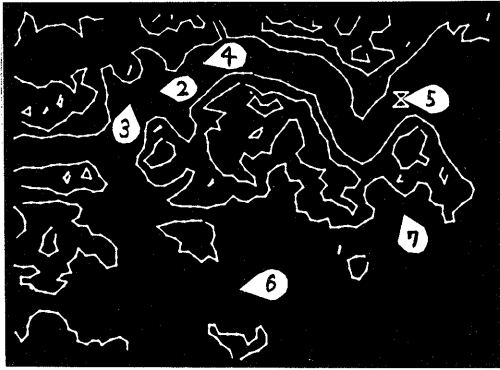


図15 後の島の隠滅

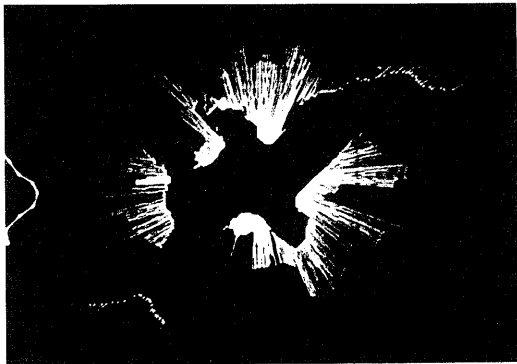


↑ (1)

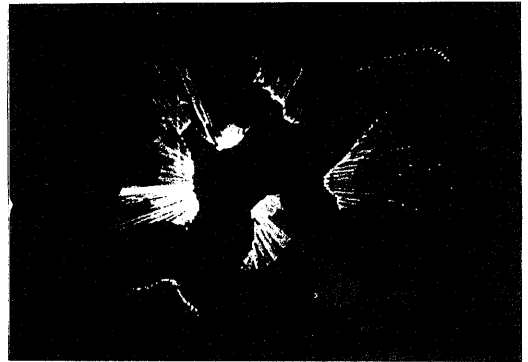
附録

- (1) 入力データ (6点おきに表示)
- (2) } 同じ湾を異なる3地点から得た像
- (3) }
- (4) }
- (5) 半島を表わす像
- (6) 遠方の島を表わす像
- (7) 湾と島を表わす像

注) (2)の写真は写真(1)の②の先端をレーダの位置とした像を表わす。他も同様である。



↑ (2)



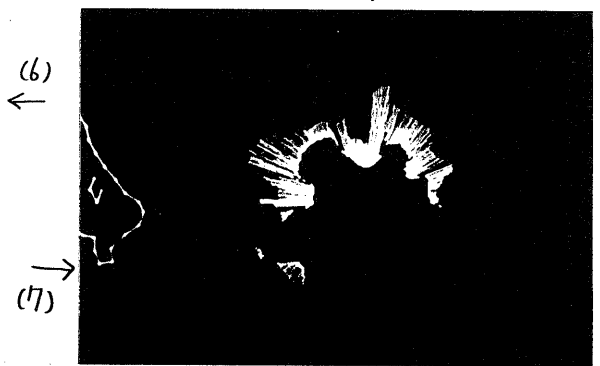
↑ (3)



↑ (4)



↑ (5)



(6)
←

→
(7)