

自律航法を目指した  
適用レーダ映像処理の基礎研究

森 賢 郎



①

自律航法を目指した  
船用レーダ映像処理の基礎研究

林 尚 吾

## 目 次

1. 結論	1
1.1 目的と意義	1
1.2 自律航法の必要性	2
1.3 本論文の構成	3
2. 船舶における周囲状況の認識と通信	5
2.1 マイクロ波イメージングレーダ等	5
2.2 船用自立型測位システムへの期待	7
2.3 陸上からの画像情報伝送による周囲状況の認識	8
2.4 見張り作業支援のためのレーダの表示方式の検討	9
2.5 レーダによる対象物標の情報の収集	11
2.6 海上における通信の現状と適切な通信の必要性	13
3. 各種のレーダ映像の観測	15
3.1 各種の船舶のレーダ映像の観測	15
3.2 クラッタの観測と抑圧方式	15
3.2.1 クラッタの観測とその特性	15
3.2.2 クラッタの抑圧	24
3.3 氷野等のレーダ映像の観測	25
3.3.1 レーダによる凹凸の測定の基礎実験	25
3.3.2 雪の凹凸の観測	33
3.4 交差偏波によるレーダ観測	39
3.5 偽像の観測と判定	39
3.5.1 レーダ偽像の実状の観測	39
3.5.2 レーダ偽像の推定・識別判定のための経験的知識	40
4. レーダ映像からの情報の抽出	42
4.1 映像の前処理	42
4.1.1 レーダ干渉の除去	42
4.1.2 ターゲット対クラッタ比の改善	43
4.2 レーダ映像の特徴の記述	56
4.2.1 レーダ映像の特徴の記述	56
4.2.2 特徴の記述の要素	57
4.2.3 特徴の表現方法のまとめかた	57
4.2.4 欲しい情報とレーダ映像の特徴との関係	59
4.3 総トン数の推定	60
4.3.1 肉眼による船舶の総トン数の推定	60
4.3.2 レーダ映像信号と肉眼での実像との対応	61
4.3.3 レーダ反射信号からの船舶の総トン数の推定方法	61
4.3.4 総トン数の推定結果と考察	62
4.4 アスペクト角の推定	65

4.4.1	データ処理方法	65
4.4.2	結果と考察	66
4.5	交差偏波による物標の分類に関する基礎測定	67
4.5.1	はじめに	67
4.5.2	観測装置の構成	67
4.5.3	レーダ観測の方法	69
4.5.4	結果と解析	70
4.5.5	まとめ	73
4.6	レーダ映像からの情報抽出のまとめ	73
5	レーダ映像からの推定実像の構成	76
5.1	推定実像の構成方法の概要	76
5.2	船種・船形の推定	76
5.2.1	船種の分類	76
5.2.2	船形の推定可能性 (ミリ波レーダ映像データの収集)	80
5.2.3	船形の推定可能性 (X帯レーダ映像データの収集)	86
5.3	船種の推定による映像の構成	88
5.3.1	レーダ映像に含まれている経験的情報	88
5.3.2	船種の推定	88
5.3.3	船種の判別方法と判定結果	91
5.3.4	船舶用レーダのための新しい表示方式	93
5.4	判別向上への課題とまとめ	94
6	船舶システムへの応用	97
6.1	自律航法の基本センサ	97
6.2	物標の識別による自動的な測位システム	97
6.3	走錐監視レーダへの応用	98
6.3.1	はじめに	98
6.3.2	走錐監視レーダの要件	99
6.3.3	レーダ観測実験とその考察	103
6.3.4	走錐監視システム概念	106
6.3.5	あとがき	108
6.4	レーダ映像マッチングによる座礁予防システム	109
6.4.1	研究の背景および概要	109
6.4.2	実船実験の内容	109
6.4.3	実験結果および考察	115
6.4.4	まとめ	125
6.5	物標識別方法の未来	126
6.5.1	レーダの歴史的役割	126
6.5.2	船舶用レーダのこれからの役割	126
7	次世代航法技術の展望	129

7.1	次世代とは	129
7.2	次世代に向かう世界の動向	131
7.2.1	船舶および航空用航法システムの動向	131
7.2.2	ランドナビゲーションの動向	133
7.3	航法と関連技術の展望	136
7.3.1	航法システムの統合一元化	136
7.3.2	通信技術の展望	136
7.3.3	船橋当直の変化と電子海図	139
7.3.4	船舶用レーダの展望	141
7.3.5	気象・海象状態の観測と予報の展望	146
7.3.6	時計の発達と地域的 $\rho$ - $\rho$ 航法への展望	147
7.3.7	人間の役割と知的情報処理の展望	148
7.3.8	自動操船への一提案	149
7.3.9	自立航法への展望	144
7.4	「高信頼度知能化船」の開発	154
7.4.1	「高信頼度知能化船」の概要	154
7.4.2	将来的技術の展望	155
7.5	次世代航法技術への課題と展望	159
7.5.1	電波航法システムと通信システム	159
7.5.2	自立航法から自律航法へ	161
7.6	おわりに	162
8	結言	163

付録

付-1	レーダと連動した情報通信と識別	
付-1-1	レーダ・アスペクタの研究	169
付-1-2	マリトラビジョン・システムの研究	180
付-1-3	船舶識別装置の研究	208
付-1-4	GPSとの連携によるコード呼び出しシステム	221
付-2	橋梁によるレーダ偽像と対策について	
付-2-1	既設橋におけるレーダ偽像の現況と 鶴見航路横断橋のレーダ偽像発生予測に関して	228
付-2-2	レーダ偽像対策用多段斜面構造のレーダ電波の反射特性	259

謝辞	273
----	-----

参考文献等	
参考文献	277
著者の発表論文等	283
著書	298
その他の発表論文等	299

## 1. 緒論

### 1. 1 目的と意義

航海は元来、外部からの支援を受けずに未知なる領域を探検的に進んだものである。航海が安全性、経済性あるいは定時制を向上させるために、各種の航法システムが開発・運用されるに至った。しかし船舶運行の自立性および自律性は徐々に失われ、現代ではGlobal Positioning Systemなしに大洋を航海できない状態になっていると言っても過言ではない。

大洋航海中でも沿岸航海中でも自分（自船）の安全は自分で守ることは基本原則である。本研究論文では、船舶の新しい自立航法の確立をもとに、自立に判断機能を加えた自律航法を目指した船用レーダ映像処理について述べる。

船舶の安全航行には、レーダの適切な使用が必須のことである。現在のレーダの表示方式は、反射信号の強度に応じた輝度でPPI表示方式で表示されているに過ぎない。従って、周囲の状況の把握には、熟練と継続的なレーダの監視を必要とする。もし、このレーダの表示が鳥瞰図として実際の景観のように表示されるならば、自分の船の周囲の相手の船との関係を直感的に把握できる。しかも、さほど熟練を必要としない。本研究は船用レーダの映像の画像処理によって、物標の種類や対象とする船舶の総トン数、船種、アスペクト角（12頁下段を参照下さい）を判別できる可能性があることを示す。また、相手方の判別と他の関連情報を連携させて、瞬時に相手方を呼び出して”意志”の通信を設定する方法にまで展開して述べる。この名称不明な相手方との”意志”の通信は自律の上で極めて重要な意味を持つ。

対象物の種類や動向を知ることができるなら、相手船等の行動を予測することが容易になるので、船舶の安全運行の確保のためにその意義は大きい。また、レーダ映像からの物標の判別は応用できる分野が広く、その効果も大きい。

しかも通常使用される性能の船用レーダで、単純な装置と処理方式でレーダ信号から航海に有効な情報を抽出表示することが意義のひとつとして挙げられる。

本論文は船用レーダの持つ能力を活用し、もって船舶航行の安全性の向上に寄与することを目的とする。さらに、次世代には自律航法が要請されることを論理的に展開し、その中で重要な役割を担う船用レーダの在り方について述べる。

## 1. 2 自律航法の必要性

現在の航法は、GPSに代表される電子測位システムを基礎に置き始めた。GPSはこれまで永年にわたって築かれた双曲線航法システムを一挙に駆逐する勢いで普及し、世界中の測位システムや中距離の測量システムまでGPS一辺倒となっている。これまで、地球上を航海する船や飛行機にとって、GPSの出現前は精度の悪いオメガ航法システムが唯一の全世界型の測位方式であり、航空機ではINSが使われていたもの一般的には天文航法が唯一の全世界的自立型の測位方式であった。この時の道具は正確な時計（クロノメータ）と天体の運行位置を予め計算した天測暦であった。

経済の発展と共に天候に左右されず時間に正確に運行される船舶や航空機が必要となり、時代は天文航法を過去のものとしはじめた。

GPSはアメリカ合衆国が軍事目的から開発したものであり、システムの中核部分は開示されておらず、国家の緊急時にはいつでもシステムを停止したり、民間利用者には利用されないようにできる。つまり、GPSだけに頼りすぎることは船舶や航空機にとって危険だと考える<sup>(1)</sup>ことは杞憂のこととは思えない。

安全上の理由から、複数の測位システムを並列的に作動させ、その出力の一致あるいは比較判断から位置を判断する方式が従来からの我々の知恵である。一例として、電波航法で求めた位置と天文航法で求めた位置を比較し、大体の場合には一致しないので、一致しない原因を推量し、経験的知識も加えながらベテランの船長は大洋上での自船の位置を決めたものである。

現在は天文航法で求められる位置よりもGPSは約1桁（天文航法では約0.5海里（約1Km）GPSでは約100m）も精度が良く、24時間中利用可能になったことから他の航法を駆逐してしまった。しかし、ここではGPSが利用できることが航法の全ての前提条件として成り立っていなければならない。

GPSは空が見えている状況でしか使えないことは当然のことであり、自動車用システムではトンネル内の走行時や掘割られた道路を走行する場合などでは受信の制限を受ける。このようなとき、短時間だけならば誤差の広がらない範囲で簡易な自立（推測）航法システムが使われている。これらのシステムの一例は振動ジャイロで角加速度を検出し、車輪から走行距離パルスを受けて演算するものである。このように2つのシステムを補間的に使い、両者の長所を活かす製品が市販されている。

船舶の場合には、少し条件が異なる。大洋航海中に空を遮るものはなく、24時間中受信できるが、GPSの運用の一時的な中止は起こり得る。

現在の国際情勢では紛争のために一時停止はあり得ないかも知れないが、そ

の保証もない。

現在、GPSが全世界的測位システムとして、軍事目的なシステムであるにもかかわらず、民間用としても隆盛を呈しているのは、経済性からである。宇宙セグメント、陸上支援セグメント、そしてロケットでの打ち上げ費用や運用経費等の一切を負担せず、無償でシステムを利用させてもらっているに過ぎない。GPSの受信システムそのものは10万円以下で購入でき、しかも距離標準偏差値の2倍値で100mの精度が得られている。アメリカ合衆国はシステムの運用費用を受益者負担という考えから、経費を世界中の民間利用者に負担させる意向もあることを示している。そして具体的な利用料金の徴収のための暗号化された送信情報を解読するためのハードウェアも検討され、5年以上を経過している。

このように不安定で安心できないGPSが普及しているのは安価に利用できて、しかも精度が良いからであり、これに代わる精度のシステムが安い価格で登場するなら、私達利用者は両者を比較することになる。現在の動向は、旧ソビエト連邦が打ち上げたGPSと類似のGLONASS (Global Navigation Satellite System) 等の両方を使用するように進められている。

## 1. 3 本論文の構成

各章のつながりと展開について述べる。

### 第1章

#### 緒論

目的、意義、自律航法の必要性

### 第2章

#### 船舶における周囲の状況認識と通信

周囲の状況認識方法の種類と概略を述べ、船用レーダの映像処理による的確な表示方式の要件について述べる。

### 第3章

#### レーダ映像の観測

船用レーダによる多数の実験を行ない、各種の物標、クラッタおよび氷野の反射特性の調査をおこなった。交差偏波成分の情報が識別の要素として有効なことを示す。また、レーダ偽像の発生状況と偽像の見分け方について述べる。

第4章 映像からの情報の抽出	前処理、周辺部のぼやけ、形状、伸び、推定
第5章 推定実像の構成	基本構造に特徴を表現する部分を付加する。
第6章 船舶システムへの応用	レーダは自律航法のための基本的センサである。レーダ映像での物標の判別は、多くの応用が考えられる。
第7章 未来の船舶システムへ	レーダによる物標の判別は自律航法システムのひとつの核として展開される。
第8章 結言	レーダ映像から物標の判別や情報の抽出が、衝突防止やその他の海難の防止に極めて有効であり、円滑な海上交通の向上に役立つ。
付録 その1 レーダと連携した情報通信	特定の相手方に関する情報の獲得と識別について、その他の方法について検討した結果を述べる。
付録 その2 架橋によるレーダ偽像の減少対策に関する研究	レーダ偽像の発生機構を解明するための基本的な測定を行い、対策箇所に応じた偽像の減少対策を提案した。また各対策の効果を実際に測定した結果を述べる。

## 2. 船舶における周囲状況の認識と通信

### 2.1 マイクロ波イメージングレーダ等

対象物標を繊細な映像として表示するには高分解能が要求される。レーダは方位分解能の観点から可視光での分解能やSAR（合成開口レーダ）と比較されて、分解能が悪いため一般用レーダは対象物の形状を観測する際の評価の対象にも挙げられないことがある。

可視光の中心波長が550nm（黄緑色）として、一般の船舶用レーダの場合には波長が32mmであり、波長は約5800倍も長い。大型船用のレーダ・アンテナでは一般に約1度のビーム幅のものが使用されており、その長さは2.2m程度である。視力1.0の人の場合、視角1分が識別できることを意味するので、人の瞳孔の直径を2mmとすると開口長で約1000倍異なるが、分解能では3600倍も違う。このようにきわめて分解能は悪いものの、夜間や霧の中でも使用できる点は代えることのできない利点である。この分解能を達成するためにSARやISARが用いられているが、どちらもシステムが高価であり、船舶等ですぐに応用できるものではない。

さて、レーダにおいて方位分解能は周波数を変えない場合、アンテナを大型化する他には効果的な方策は無く、大型のアンテナを使用するか、信号処理型アンテナで等価的に大型アンテナと同等の性能を持たせている。一例として、海岸に大きなレーダ・アンテナを建造して、沖合いを航行する艦船の形状を観測した軍事的な研究の例があった。しかし、アンテナの形状が大きすぎることから回転させることはできなかったので特定方位の観測しか出来なかった。

また、入射波に対してターゲットが変調器として作用し後方散乱波に影響を及ぼすという考え方から、偏波特性、周波数と時間の各領域での解析、コヒーレント性等の関連から物標の識別を論じたもの<sup>(1)</sup>がある。

分解能を向上させるためにはアンテナを大きくするか周波数を高くする必要があるが、現在の9.4GHzよりも飛躍的に上げる必要がある。電波伝搬の減衰量の観点から「大気窓」と呼ばれている利用可能な周波数があり、大気中の酸素分子や窒素分子等と共振減衰を起こさない35GHz、94GHzそして140GHzに周波数の窓がある。

船舶用レーダの周波数である9.4GHzは水平偏波で使用する場合、Sea Clutterが少ない利点があることから選定され、国際的に取り決められた周波数である。35GHzのレーダは港湾用レーダとして使われているが尖頭出力30KWで15Km（約8海里）程の有効範囲であり、しかも降雨の時

など減衰が大きく有効範囲は極めて制限される。したがって、利用に適した周波数としては現在広く普及している9.4GHzのレーダを使うことが望ましい。

さて、この他に高い9.4GHz(波長3.2mm)の周波数を使用した映像観測装置がMillitech社から発表<sup>(2)</sup>されている。このシステムは48×32のfocal plane arrayでアンテナを構成し、パッシブ型である。

パッシブ型の利点として自らμ波エネルギーを対象物に照射する必要がないため約1Km先までの対象物からの放射エネルギーの状況を映像化できる。周波数が高いことから分解能も高く、1Km先で3mの分解能を得ている。このシステムは、霧の中での小型機の着陸に適していると紹介している。映像は白黒であり、曇りの日の景色を見ているように映像化されると述べている。

さらに周波数を高めた場合、赤外線あるいは近赤外線領域の周波数を使用したレーダの例がある。

例えば赤外線レーダでは対象物から放射されるあるいは反射される赤外線のエネルギーを計測し、その強度分布を映像化するものである。目的に応じてアクティブ型とパッシブ型とがあるが、アクティブ型では消費電力の大きい赤外線照射ランプを使用している。これらの形式では漂流物は白く写り、海面は後方散乱が少ないため黒く写る。

パッシブ型の例で、船体の映像を捉えると船体周辺の熱の分布を測定することとなり、内部に機関室のある船側は温度が高いため白く写り、また排気ガスが放出されている煙突周辺や煙が白く写るといった結果となった。これらの情報をもとに船の種類を判別する研究が「高度知能化船の研究開発」の一連の研究として実施されたことがある。白煙や機関室の位置と種類とは関係が薄く、船の検出はできるが判別は困難であったのでこの赤外線パッシブレーダはその後の発表を聞いていない。

方位分解能を向上させる目的から、光領域のレーダとしてレーザ・レーダ(LIDAR)が各方面で研究され、また、空気中の塵埃等の計測に利用されている。LIDARによる形状の計測の例<sup>(3)</sup>は、レンジ・ゲーティングの技術を使用して建物や戦車の識別などにも使われている。

レーザ・レーダも分解能の点から、大型のものは大気中のごみ、チリの観測用に用いられている。使用周波数出力によっては人の眼球に致命的な損傷を与えるおそれがあり、人が存在する地域に照射することはできない。小型で発光出力が10~30W(平均出力2mW程度)のものが自動車用追尾予防レーダ<sup>(4)</sup>として使用されている。このレーザレーダでは約100m前方の車にレーザ用

のレフレクタの装備を前提として設計されており、安全上の問題や外部環境の変化に対応する技術上の多くの問題がある。しかし、安全は他の何物にも代えがたいものであり、一部の自動車で使用されている。

1990年のINTERNATIONAL RADAR CONFERENCE(ワシントン)での発表の中に、SAR、ISARによる高分解能化<sup>(5)</sup>、1993年米国NATIONAL RADAR CONFERENCEでは、20nsのパルス幅のレーダをネットワークとして空港の外周に構成し、複数の方向から観測してターゲットの映像を構成するシミュレーション<sup>(6)</sup>やFM-CWレーダによる戦車やミサイルのSARやISAR方式でのターゲットの形状を表示する研究発表の例<sup>(7)</sup>がある。

これらの研究発表にも現れているように、レーダによる対象物の形状による識別は、鋭いペンシル・ビームを使用したスポット方式での3次元レーダ、SARあるいはISARのように等価的に鋭い指向性を持たせて詳細な反射強度分布図を作成して判断してきた。どの研究発表の例でも、鋭いビームによるものばかりで、通常の船舶で使用されている比較的広いビーム幅のアンテナでの発表例を見ない。また、反射波の偏波面の依存性や変化などの特性から物標識別の基礎的な研究を行った落合の報告<sup>(8)</sup>がある。

船舶や航空機は複雑な表面形状をしているので、対象物からの反射信号はそのレーダの周波数の波長に対応した干渉を受けた信号となる。そのことに着目してモノパルスを送信して、反射信号のスペクトル分布の相違から識別と航空機の機種推定の可能性を述べた例<sup>(9)</sup>がある。

## 2.2 船用自立型測位システムへの期待

航空機の例では初期にはドブラレーダで対地速度と方向(方位)を測る方式があった。慣性航法装置(以下INSと呼ぶ)が民間用にも利用可能な価格の範囲になって、利用されるようになった。慣性航法装置は他の電波航法システムと組み合わせて使う方式が出現した。現在では精度の高い測定位置を搭載レーダや地上の航法援助装置を使用して求め、INSでの計算位置を更新している。

航空機における航法は船舶の航法システムを検討する際の良い前例となるが基本的に異なるのは次の点である。

- ・太平洋を渡洋する場合を例にとれば、航空機で8~9時間、船舶では9日間を所要とする。つまり24倍も長い間働き続けて、所要の精度を保持していなければならない。

- ・航空機でも船舶でも港(空港)に近づけば他の航法援助装置の支援を受け

てINSの位置を所要精度に更新しなければならない。しかし、船舶の場合、周辺に散在している船は装置（航海計器等）の設備状況が著しく異なっており、しかも管制が行き届いているわけではなく、特に沿岸部の航海は将来にわたっても難しい問題がある。

一方、航空機では空港内外への着陸に関して厳しい届出と管制があり、コントロールされている点で安心である。

船舶での大洋航海における自立的測位システムとして、最初に挙げられるものが天体の位置を観測して求める天文航法であるが、動揺する船上で人工的な水平面を作り、天体の高度を求めるのはこれまでは大変なことであった。しかし近年の映像処理技術は価格的にも操作の容易さの点からも天体の高度の自動測定は可能な技術となった。一時期電波六分儀なるものが発表されることがあったがこれはその後には実用化したとの話は聞いていない。

では、天体の位置の映像処理で自動的に現在位置を測定できるシステムが完成したからといって、それで全世界で全天候型での測位システムには残念ながら成り得ない。

つまりこれからの過渡期として将来の理想的な状態へ、表2-1の形式で移行して行く過程が想像される。

表2-1 船舶用測位システムの移行過程の推察

現 在	未 来
GPS ----->	
	(天体の映像処理 ----->)
INMARSAT ----->	
測位サービス	
	INS ----->

これらのどの過渡期においても沿岸部における航法支援システムは必要不可欠であり、またレーダシステムは沿岸部を含め大洋上でも障害物を検知するために、またレーダ映像マッチングで船位を求めるためにも重要なシステムとなる。

この論文は、これらの問題の中で、レーダにこれから要求される能力と将来への発展のあるべき方向を基礎的に研究したものである。

### 2.3 陸上からの画像情報伝送による周囲状況の認識

船舶用のレーダに限らず、レーダの画面の中には実像、レーダ干渉、ノイズ、

偽像がある。その中から実像を探して適切に対応を考えることは、映像が複雑な場合には判断が難しいことがある。また、当然陰になっている部分は見えないという制約もある。このような場合、山頂等に設置したいくつかのレーダ局の映像を処理し、必要な情報を加えて船舶に画像情報として伝送する方法<sup>(10)</sup>がある。自分の船の位置がその映像の中に確認できれば、きわめて明瞭な情報を得られることにつながり、船舶の安全航行上の効果は大きい。

### 2.4 見張り作業支援のためのレーダの表示方式の検討

双眼鏡を使用して肉眼で相手船の種類が判別できるのは、天候の良い昼間で約5海里である。当然夜間には判別不能であり、相手船の灯火を陸上の街路灯などに見誤ることやその逆も多くある。このような場合にもレーダの使用で昼夜の別なく相手船の判別や浮標の判別が可能なシステムの開発は海難事故の減少に大きく寄与するものと信じる。

航海中に相手船の種類を判別し、とるべきであろう針路の予測がたてられることは、自船のとるべき針路を余裕を持って決定できることになり、危険な状況に陥る前に行動がとれる。

例えば、浦賀水道航路において航行中の中型以上のタンカーが東京航路へ向かうことはまずなく、逆に大型客船が木更津港へ向かうこともまずない。

このような経験的知識を基に、進路を推定してしまう危険性も指摘されようが、ベテランの船長達は昼間はもちろんのこと夜間でも周囲の船の見張りにほとんどの時間を使って注意を払っている。表2-2に掲げたように見張りの作業頻度は6割にも達している。狭水道航海中には見張りの作業頻度率が低下しているように見えるが、見張りの作業の結果としての避航操船や針路を保持するための操船が含まれている結果である。

表2-2 作業発生頻度表

作 業	見張り	操船	位置	連絡	観測	作業	その他
フ 大洋航海	62.3%	—%	3.7%	1.6%	2.8%	10.5%	19.1%
エ 沿岸航海	45.2%	25.4%	6.9%	—%	2.9%	5.3%	2.6%
イ	~61.9%	~28.4%	~7.9%			~15.3%	~11.2%
ズ 狭水道航海	37.3%	35.3%	4.2%	9.6%	0.2%	7.2%	6.2%

(船員制度近代化委員会資料1980.3)

安全航海の基本は周囲の適切な見張りである。その見張りを昼夜の区別なく正確に行えるには、レーダの併用が基本となっている。霧中航海のように危険な状況に遭遇したときは、レーダだけを監視して周囲の状況の把握に努める航

海士を専従させることもあるが、通常は船橋には航海士は唯一人である。ほとんどの時間は窓の外の動きを見張っており、周辺の船の動きや船位の計測や暗礁、陸岸との距離の確認のためにレーダを覗くだけである。瞬間的に状況の把握ができる表示方式が望ましいことは当然である。

レーダの表示方式についていくつかの形態を挙げて得失を検討する。

表 2-3 各映像表示方式の特長

映像の表示方式	長 所	短 所
従来型 PPI 表示 生ビデオ映像	<ul style="list-style-type: none"> <li>映像の状態を加工せずに表示するので、ベテランの船長や航海士あるいはレーダ基地等で観測するベテランな取扱者には生ビデオの方が情報の多くを読み取れるので良い。またこのためには、映像はアナログ表示か16階調以上の表示が必要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>初心者にはすぐには判読できない。</li> <li>ベテランな取扱者にも、判読に若干の準備と時間が必要。</li> </ul>
自動衝突予防支援装置等での映像表示	<ul style="list-style-type: none"> <li>周辺の状況把握は上述のものよりも容易である。</li> <li>相手船の将来位置をベクトルで表示したり、予想領域として表示するので避航の際の判断材料にできる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>将来位置や予測領域は過去の相手船の位置から計算されている。</li> <li>相手船の変針や変速は観測結果に現れるまで表示されない。</li> <li>以上のようにベクトルが表示されることで、そのベクトルが信頼されすぎの傾向がある。</li> </ul>
カラー化したレーダ映像	<ul style="list-style-type: none"> <li>初めてのレーダ使用者には、ゲーム機感覚で好評である。</li> <li>安価である。一般のテレビ放送用表示器が使用できる。</li> <li>映像の情報内容によって色分けができるので情報の仕分けができる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>反射強度によって表示色を色分けし、強い反射体には赤色系を割り当てることは、かえって映像を見にくくしている。</li> <li>ベテランの使用者には敬遠される傾向である。</li> </ul>
鳥瞰図方式の表示	<ul style="list-style-type: none"> <li>自船を含めた周囲の状況認識が容易である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>明細な表示のためには大型の表示装置が必要となる。</li> <li>表示内容を分けし、要求に応じて表示レベルを変えるなどの工夫が必要である。</li> </ul>

鳥瞰図表示方式の場合に、視点の位置の移動は効果的な方式である。視点の位置を変えた場合次のような効果がある。

- 自船の遙か上空におき、自船を含む周囲の船の動きを過去の航跡とともに表示するなどの表示方式。
- この方式は自船の操船に極めて有効である。たとえば錨地への投錨のための操船時や入港して着棧するまでの操船などの時には自船の現在位置と航跡が周辺の構造物との間でどのような関係にあるのか、舵の効き具合や風による圧流はどの程度なのかも見やすい。
- 自船の後上方においた視点の場合には、動きのある相手船や浮標の位置関係や向きを実景と対照できる利点大きい。

## 2. 5 レーダによる対象物標の情報の収集

衝突を避けるための操船上の情報としては、対象物の種類、距離、速度、針路（進路）を知りたい。さらに目的地や操船上の意思を知ることができるなら、一層余裕をもって避航できる。

相手が浮標や漂流物である場合には、自分で避ければ衝突を避けられる。しかし、相手が船舶の場合には、お互いに避けようと舵を操作して、かえって危険な状態に陥ったり、衝突してしまうことがある。お互いが適切な動作を取ることが前提であるが、その際に相互に操船の意志を伝えあえれば、避航動作は余裕を持って適切に行える。

海上では、浦賀水道を例にすると大型船から遊漁船まで、船長、総トン数、種類も数多くの船舶が同じ海域に存在している。2次レーダや通信等で相手方の協力動作が得られる状況なら、必要な情報と相互の避航動作で安全な航海が図られよう。しかし、海上では全ての船舶に2次レーダを装備することを義務付けることは、小型の遊漁船には費用の負担能力の面から困難である。そのため、大型船側では自らの安全を確保するためには自立型式で対象物の情報を知る努力が必要である。

通常の性能を持つ船舶用のレーダを使用して収集可能な情報の種類は、

- レーダ映像の位置情報から、
- 対象物までの距離
  - 対象物までの方位
  - 対象物の進路（針路）
  - 対象物の速度

である。これらは従来のレーダシステム（ARPA<sup>(注)</sup>を含む）で情報が出力

(注) ARPA: Automatic Radar Plotting Aid

できる。

この情報に加えて

レーダ映像処理からは、

- ・物標の種類 の推定
- ・船舶の総トン数
- ・アスペクト角
- ・船種の判別

が可能であり、これらの詳細について次章以降で研究の成果を述べる。

対象とする相手船までの距離に関しては、昭和59年に「高度知能化船の研究開発」( (社)日本造船研究協会)において林らの実態調査の結果、『自船の正面から右30度前方で3.5海里までの距離にある相手船に対して格別の注意が払われている』ことが分かった。そこで、レーダで相手船の情報を収集する範囲の目標として、距離約4海里までの相手船まで収集できることとする。しかし、この距離はレーダにとっては方位方向のデータが疎になり、生情報が不足する。

現在の我が国の船舶は乗組員の資格や員数、各種の規制等の関係で、300トン未満、500トン未満、1000トン未満、2000トン未満、5000トン未満、5000トン以上に区分される。あるいは船長で区分されることもある。一方、浦賀水道航路等の航路航行義務等の場合には3000総トン、10000総トンあるいはタンカーや旅客船には規制がある。以上の現状から、小さな船舶においては総トン数で500トンの船と1000トンの船とは判別ができ、船種としては一般の貨物船かタンカーかは判別できることを目標とする。

アスペクト角は自船との衝突のおそれの判断に極めて重要なものである。これは自船の船首方位を基準にして相手船の存在する方位の角度を表すものであるが、この角度(アスペクト角)が変化しないことは徐々に同じ体勢で近付いていることになるのでやがて衝突することを意味している。衝突を避けるための協力動作の教育訓練においては、「相手方が自分を認識し明らかに何らかの動作をとったことが判断できるように現針路からの30度以上の変針を行なうこと。」を指導している。そこでアスペクト角の検出では30度以上の変化は明瞭に抽出できることを目標とする。

相手船の情報をレーダ映像処理から抽出する内容の判別の目標を表2-4にまとめて掲げる。

表2-4 レーダ映像処理による情報判別の目標

項目	判別の目標
物標	レーダレフを装備している浮標(3海里) 一般の浮標(1.5海里)
総トン数	500トンか1000トンかが判別できること
アスペクト角	30度の変化は即座に検出できること
船種	タンカー、コンテナ、自動車専用船、客船、貨物船、特殊船

## 2.6 海上における通信の現状と適切な通信の必要性

### (1) 海上における船舶運航時の通信の状況

船舶の無線通信は、無線電信から衛星通信による音声やデータ通信の時代へと大きく変革した。SOS通信もGMDSS(Global Maritime Distress and Safety System:1992年2月から完全に実施)による衛星通信と現代の新しい通信技術を基礎とした自動的な救難システムへと移行されつつある。このシステムでは個々の救難発信機の内部に各船舶の識別コードを記憶している。危急の場合に、406MHz EPIRB(Emergency Position Indicating Radio Beacon)では、自動的に遭難信号と識別コードが上空を飛来する人工衛星に受信されるように送信が続けられる。このような緊急事態の場合には、同時に作動する他の装置も少なく救命目的であることから比較的簡単に国際的に認められる。また、救命用という観点から装置の設置の義務づけも容易になり条約化・法制化ができた。GMDSSでは全ての旅客船と総トン数300トン以上の貨物船にこのEPIRBの備え付けが義務づけられている。しかし、一般の無線通信においては大きな変革は無い。

海上では1マイル(1,852m)離れただけで、相手船が大型船であっても船名が分からなければ国際港湾無線電話(150MHz帯FM)通信等で呼び出すこともできず、しかも相手船が国際港湾無線電話を備えていて、さらに適正な受信状態になければ通信による意志の交換ができない。夜間や霧中にはさらに通信の設定は困難になり、外国船との間では言語上の困難もある。

通信相手の名称や相手を特定できる何等かの特徴、例えば海上交通センタの管制官が、「中の瀬航路入口付近の船舶……」というような呼び出し方でまず船名を確認することが多い。このような状況は海上ではしばしば有り、航路にそって目前を航行している船にも通信ができなかったり、特に正面衝突の危険の迫っている船なども相互の避航方法の意志確認は難しい。

このような状況を改善する方法としては、小型のプレジャーボートから大型船まで海上を航行する全ての船舶に、自動的に情報を交換できるような装置を備え付ける方式が考えられる。しかし、これは容易なことではなく、外国籍船

の船舶への設置や経費的に極めて困難な面がある。

## (2) 早い適切な通信

海上には大型船からモーター・ボートまで、大きさと装備内容が著しく異なる多くの種類の船が混在して運航している。通信設備の有無や内容も著しく異なっている。このような状況の中で、すべての船舶に一定基準以上の通信設備の装備を持たせることは、法律で義務づける以外に方法は無いのが現状である。しかもこの義務付けは、国際条約として諸外国にも同様に実行されなければ効果は少ない。通信システムは相手方に同様の設備と協力動作を求めると、レーダによる物標の判別システムは相手方に設備や協力動作も求めない自立型のシステムである。

漁船や遊漁船、プレジャーボートなどの場合に、このような超小型の舟艇から30万トンもの大型タンカが海上衝突予防法上では対等の権利義務関係を持ち、相互に避航義務を実行しなければならない。大型タンカでは安全運行のためには相応のシステムの装備とその経費の負担能力があるが、小型の舟艇の場合には、経費の負担能力がきわめて低い。たとえば船舶電話（NTT一般加入者回線とも通話できるもの）の普及率は小型船にはきわめて低い。海上用に安価に利用できるように考慮して普及することが積極的に考慮された“マリネット”電話システムも普及していない。また、現在普及しているトランシーバの漁船等での使用状況から考察すると、エンジンの騒音に消されることなく甲板上で作業している際に聞こえるようにトランペット・スピーカーで大きな音量で使用されている。つまり、漁船などでは1人か2人で作業していることが多いので通信連絡のために専従の係などをおくことは無理なことである。このような現状にあって、相手方にも相当の設備の負担や協力動作を要求するものは困難と考えられる。

自動的なデータ通信で、相手方と情報の交換ができ、安全な航海ができれば「なだしお」と「第10富士丸」のような衝突事故も無くなる。とっさの場合に双方の操船意志を原則にしたがって的確に誘導して、双方に判断の曖昧さを除き、瞬時に意志決定を促し、避航動作を起こさせるような的確に連絡できる”意志”の通信システムが必要である。この場合にも危険な状況に入りつつある相手船に早く的確に連絡できることが必要である。

## 3. 各種のレーダ映像の観測

### 3.1 各種の船舶のレーダ映像の観測

本研究はレーダ映像の観測を基礎として研究を展開している。レーダ映像の観測にあたって、その映像の見えかたに注意するとおおよその船種や船形の推測が可能なることを研究の発端として進めてきた。観測は多くの対象物に対して行い、またレーダの周波数はX帯とKa帯の2つの周波数で行ってデータの収集に努めた。基本的な計測、観測と解析、その繰り返しを通して受信信号の特性の定量的な計測を行い、推定の正確さを増すために計測方法の改良を行いながら研究を進めてきた。実施してきたレーダ観測を表3-1に掲げる。

表3-1 実施したレーダ観測

観測内容	観測地	観測時期
タンカーや貨物船の反射信号	富浦	(1983)
小型船(汐路丸)の反射信号	富浦、館山	(多数)
港湾監視用レーダによる計測	横浜	(1986)
貨物船等の観測	館山	(1988)
いけす等の観測(交差偏波)	富浦、境港	(1992)
起重機船等の観測(交差、斜交)	東京	(1992)
貨物船等の観測(交差、斜交)	横浜	(多数)
貨物船等の観測(交差偏波)	神戸	(1993)
貨物船等の観測(交差偏波)	富津岬	(1993)

### 3.2 クラッタの観測と抑圧方式

主にXバンドのレーダ観測を中心にミリ波レーダでも実施した。交差偏波によるXバンドレーダでの観測結果も述べる。また、特に、移動が容易な研究用レーダ車を使用して、約600mの山頂から海岸まで下りながら数力所で海面への入射角を変えて観測し、入射角度の大きい場合の観測結果を述べる。

#### 3.2.1 クラッタの観測とその特性

様々なクラッタの存在する中で目標物の検出能力の改善には、様々なクラッタ除去技術が応用されている<sup>(1)</sup>。例えばMTI方式は陸地反射によるク

ラッタに対して使用され、大きなダイナミック・レンジを持つレイリー分布の海面やウェザー・クラッタにはLOG・CFAR方式が使用されている。クラッタがレイリー分布に従っていない場合には、クラッタの出力レベルは一定ではなく、またクラッタからターゲットの識別はもはや容易ではない。海面反射雑音はこれまでレイリー分布に従っていると信じられている。しかしながら、技術の進歩と共に、比較的に高分解能なレーダでの観測では、非レイリー分布の海面反射雑音が観測されるようになってきた。例えば、海面反射雑音の振幅強度分布が様々な入射角、周波数、パルス幅や海面状態によって対数正規、ワイブル、対数ワイブルおよびK分布になるものがある。一方、パルス・レーダで受信されるほとんどのクラッタの振幅特性は様々な形状係数の値を持った対数正規、ワイブルあるいはK分布に従っている。

Xバンドのパルス幅0.12マイクロ秒のパルス・レーダで、水平偏波および垂直偏波で測定された海面反射（シー・クラッタ）は、水平偏波送信-水平偏波受信（以下HHと略す）、水平偏波送信-垂直偏波受信（以下HVと略す）、垂直偏波送信-水平偏波受信（以下VHと略す）、垂直偏波送信-垂直偏波受信（以下VVと略す）、のどの組み合わせにおいても、海面反射の後方散乱波の振幅特性は対数正規分布の観測結果が得られた。

近年、クラッタの中にあるターゲットの信号検出の改善目的に、地表面、海面あるいは雲などのウェザー・クラッタの様々な振幅特性に大きな興味を持たれている。海面反射と陸上反射信号とはいささか異なっており、一般に、海面の波からの反射の方は陸上からの反射よりも小さい。グレージング角（入射角）の増加、使用周波数や海面の荒れ具合につれて、水平偏波よりも垂直偏波の方が大きくなり、追風よりは向い風の場合の方が大きくなる。横風の場合は中間的な値を示す。

これまで、海面反射の振幅特性はレイリー分布に従っていると信じられてきた。しかしながら、この10年来、レーダ技術の進展に伴って、比較的に高分解能なレーダで非レイリー分布の海面反射が観測されている。例えば、シー・クラッタは、様々な入射角、周波数、パルス幅および海面状態で対数正規、ワイブルおよびK分布に従っている。

### (1) 海面反射信号の振幅強度分布

対数正規分布の振幅強度は次式で示される。

$$P_{LN}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \dots (1)$$

ここで  $x$  は受信信号の振幅、 $\mu$  は  $\ln x$  の平均値、そして  $\sigma$  は  $\ln x$  の標準偏差値である。

ワイブル分布は次式で示される。

$$P_W(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{b}\right)^c\right\} \quad \dots (2)$$

ここで  $b$  はスケール・パラメータ、 $c$  は形状パラメータである。 $c=1.0$ 、 $c=2.0$  の場合、ワイブル分布では指数分布とレイリー分布と同一となる。

K分布は次式で示される。

$$P_K(x) = \frac{4h^{\nu+1}}{\Gamma(\nu)} x^\nu K_{\nu-1}(2hx) \quad \dots (3)$$

ここで  $h$  はスケール・パラメータ、 $\nu$  は形状パラメータである。 $\Gamma(x)$  はガンマ関数であり、 $K_\nu(x)$  は  $\nu$  次の変形ベッセル関数を示す。 $\nu$  が無限大である場合、K分布はレイリー分布と同一となる。K分布とワイブル分布とは小さな差異しか無い。一般に、対数正規分布とワイブル分布との間に、K分布がある。

### (2) AIC (赤池情報量基準) を用いた海面反射の振幅分布の決定

データの分布の種類を厳格に定めるために赤池情報量基準で検討する。複数の仮定確率モデルを考えると、そのデータに最適に適合するモデルによる基準がある。それは赤池情報量基準と呼ばれるものであり、AICと略されて使われている。

与えられたモデルに対して、AICは次のように定義される。

$$AIC = -2 (\text{最大対数尤度} - \text{パラメータの数})$$

最小のAICを示すモデルが最良の分布の種類を示すものとして見なせる。

次にAICを海面反射に応用してみる。

AICを用いて、対数-正規、ワイブル、Kの各分布について検定した。海面反射のVV, VH, HHおよびHVでの各送信と受信の偏波における振幅強度分布についてAICの結果をそれぞれ図3-1~3-4に示す。それぞれの図の中に、最小のAICを示した分布を下線を引き示してある。

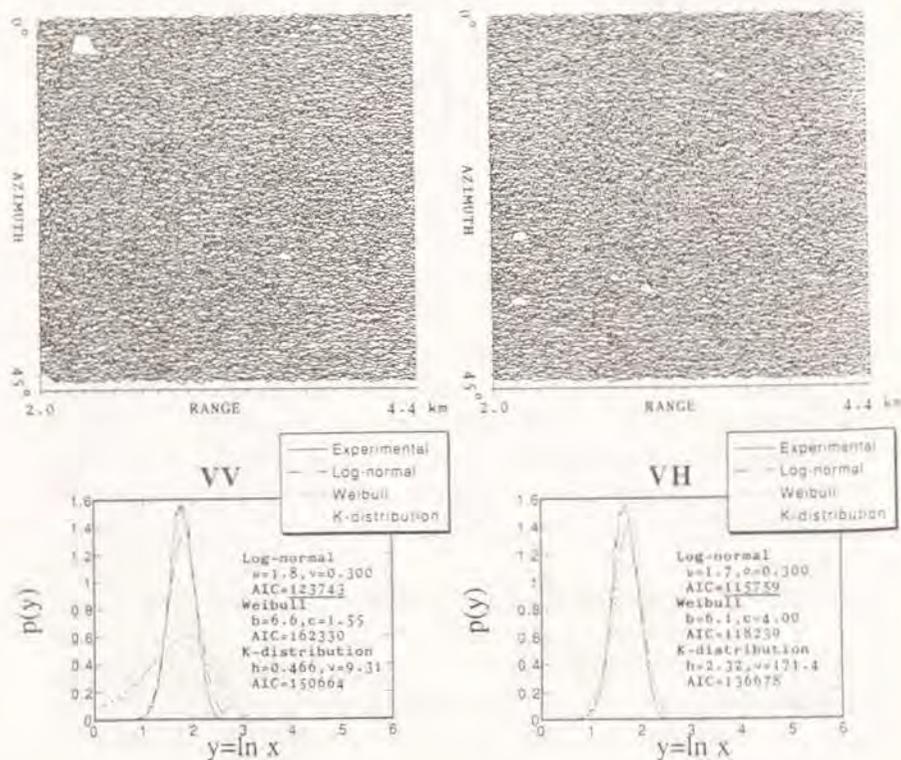


図3-1 観測した海面反射と各分布の検定結果 (VVの場合)

図3-2 観測した海面反射と各分布の検定結果 (VHの場合)

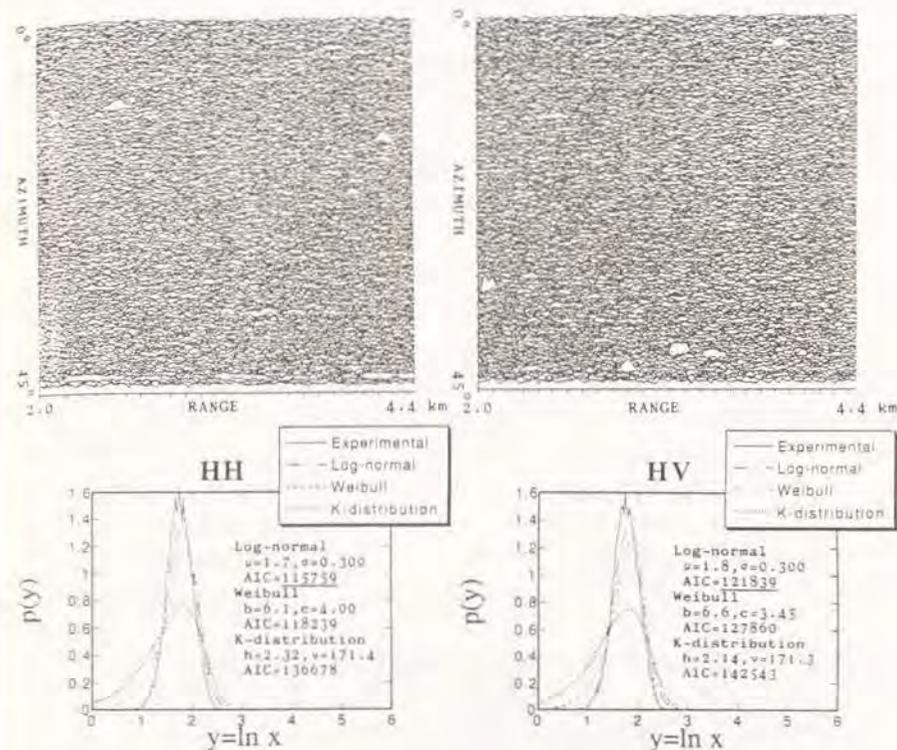


図3-3 観測した海面反射と各分布の検定結果 (HHの場合)

図3-4 観測した海面反射と各分布の検定結果 (HVの場合)

この観測の結果、どの偏波での送信受信結果においても海面反射の振幅強度分布は対数-正規分布に従っていることが示された。

### (3) 入射角度の大きいときのシー・クラッタ (弥彦山での観測)

入射角度の大きい場合のシー・クラッタの観測は、表3-2に掲げる装置で、

新潟県弥彦山の山頂（海拔630m）から行った。観測した海面の範囲は、方位で約27度の範囲で、距離は2.0~4.4kmであった。観測当時の海面状態は比較的荒れており（波浪階級=7）、最大風速は25m/sをこえ、海面には6~9mの波浪が発生していた。入射角について、8.2度（距離4.4km）から17.5度（距離2.0km）の範囲についてXバンドのレーダでの海面反射雑音の振幅強度分布の観測結果を示す。

表3-2 レーダとデータ・サンプリングの仕様の一覧

周波数	9,380MHz
送信出力	5.3kW
偏波面	水平偏波
アンテナのビーム幅	水平：0.6度 垂直：20度
送信パルス幅	0.25μs
パルス繰り返し数	1,000Hz
アンテナ回転数	18rpm
受信機の特長	対数増幅特性
サンプリング周波数	16MHz

#### (4) AICを用いた海面反射雑音の振幅強度分布の形状の決定

AICは次のように説明される。まず、真の確率分布 ( $p_1, p_2, \dots, p_N$ ) が既知であると仮定する。ここで  $p_N$  はN次の事象が発生する確率を示す。次に十分な回数の試行を行うと考え、そこでN次の事象が約  $m_N = M \cdot p_N$  回起こるとする。モデルとして確率分布 ( $q_1, q_2, \dots, q_N$ ) を仮定する。この分布に従っているM個のサンプルが観測されることで、確率Wは次式で表せる。

$$W = M! / (m_1! m_2! \dots m_N!) \cdot q_1^{m_1} q_2^{m_2} \dots q_N^{m_N} \quad \dots (4)$$

ここでWは確率分布 ( $m_1, m_2, \dots, m_N$ ) を得られる確率を示す。この両辺の対数を取ってMで割ることにより、次の式を得る。

$$1/M \cdot \ln W \rightarrow B(p, q) = \sum p_N \cdot \ln (q_N / p_N) \quad \dots (5)$$

ここで  $B(p, q)$  はKullback-Leibler エントロピーと呼ばれる。

以上の検討から、Bの値が大きくなるほど、仮定したモデルがよく適合していることを示す。

Kullback-Leibler エントロピーは次のように書き直すことができる。

$$B = \sum p_N \cdot \ln \cdot q_N - \sum p_N \cdot \ln \cdot p_N \quad \dots (6)$$

右項の第2項は真の分布のみに依存し、そのため第1項だけがモデルの推定に重要な役割を演じる。この項は  $\ln q_N$  の推定値と呼ばれる。それ故に観測値  $x_1, x_2, \dots, x_m$  の数mから初項が推定される。そこで対数尤度数Lは次のように定義される。

$$L = \sum \ln \{ f(x_N) \}, f(x_N) = q_N \text{ for } x_N = N \quad \dots (7)$$

ここで関数  $f(x)$  は観測値がxとなる確率であり、モデルに依存するものである。Lが大きい程良いモデルである。いま、確率分布密度関数  $f(x)$  が  $\theta$  のパラメータを持つとして、確率分布モデルを確率変数xと  $\theta$  の関数  $f(x; \theta)$  と書ける。もし、 $\theta$  がk個のパラメータを持つなら、 $\theta$  はk次元のベクタである。この場合、対数尤度数  $L(\theta)$  は

$$L(\theta) = \sum \ln f(x; \theta) \quad \dots (8)$$

前々式は観測値から決定されるが、 $f^*(x)$  は真の確率密度関数であるが、真の対数尤度数は次のように書くことができる。

$$L^*(\theta) = M \cdot \int f^*(x) \ln f(x; \theta) dx \quad \dots (9)$$

通常、 $L^*(\theta)$  は真の確率密度関数が既知でない限り計算不可能である。

しかしながら、もし、 $L(\theta_0) - k$  が対数尤度数のバイアスを受けていない推定値である。ここで  $\theta_0$  は  $L(\theta)$  の最大値を得るための最大尤度推定値を与える。それ故に、最終的に与えられたモデルにおけるAICは次のように定められる。

$$\begin{aligned} AIC &= -2 \{ (\text{最大対数尤度数}) - (\text{モデル内に含まれるパラメータの数}) \} \\ &= -2 \{ L(\theta_0) - k \} \quad \dots (10) \end{aligned}$$

AICの値を最小にするものが最も良いモデルを示すことになる。次にこのAICを海面反射雑音に適用してみる。モデルとして対数-正規、ワイブルおよびK分布をAICを用いて検定した。その結果を表3-3に掲げる。

表3-3 対数-正規, ワイブルおよびK分布をAICで検定した結果

スイープ番号	対数-正規分布			ワイブル分布			K分布		
	$\mu$	$\sigma$	AIC	b	c	AIC	h	$\nu$	AIC
1~6	1.25	0.65	6576.4	3.84	1.25	6486.2	0.23	1.15	6478.1
7~12	1.21	0.60	6249.7	3.69	1.31	6227.4	0.29	1.61	6206.3
13~18	1.23	0.60	6333.3	3.67	1.24	6395.4	0.28	1.60	6362.4
19~24	1.25	0.55	6062.8	3.65	1.39	6074.7	0.34	2.02	6039.3
25~30	1.10	0.50	5400.0	3.45	1.74	5405.6	0.62	5.00	5381.4
31~36	1.10	0.50	5342.4	3.29	1.69	5278.2	0.57	4.00	5268.0
37~42	1.10	0.50	5430.5	3.42	1.65	5453.3	0.55	4.00	5421.7
43~48	1.10	0.50	5475.6	3.30	1.49	5541.5	0.45	2.71	5500.2
49~54	1.05	0.51	5406.1	3.03	1.41	5407.4	0.43	2.29	5375.0
55~60	1.11	0.50	5557.3	3.36	1.51	5628.3	0.46	2.94	5580.0
61~66	1.20	0.63	6396.7	2.05	0.72	6565.4	0.13	0.35	6672.5
67~72	1.11	0.60	5987.1	2.16	0.82	6053.8	0.17	0.43	6089.9
73~78	1.15	0.53	5718.0	3.36	1.40	5768.9	0.38	2.20	5726.4
79~84	1.03	0.50	5045.4	3.14	1.75	5009.0	0.73	5.79	4992.2
85~90	1.03	0.50	5057.9	3.08	1.70	5009.3	0.68	4.93	4991.8
91~96	1.13	0.50	5534.8	3.59	1.77	5479.7	0.66	6.00	5471.1
97~102	1.11	0.50	5374.6	3.58	1.88	5310.3	0.85	9.51	5303.7
103~108	1.10	0.50	5235.5	3.28	1.75	5128.9	0.71	5.92	5127.6
109~114	1.10	0.50	5357.6	3.34	1.70	5296.8	0.63	4.89	5281.9
115~120	1.10	0.50	5333.1	3.36	1.73	5268.6	0.63	5.00	5259.0
121~126	1.15	0.50	5607.5	3.64	1.76	5555.4	0.59	5.00	5547.7
127~132	1.20	0.50	5815.5	3.97	1.84	5784.9	0.67	7.52	5776.9
133~138	1.23	0.51	5874.1	4.02	1.81	5846.6	0.62	6.50	5832.4
139~144	1.23	0.53	6008.3	4.01	1.71	5977.9	0.47	4.00	5964.3
145~150	1.30	0.60	6366.6	4.21	1.59	6299.8	0.37	2.86	6286.9
151~156	1.20	0.50	5751.9	3.86	1.78	5771.1	0.59	5.60	5749.2
157~162	1.21	0.55	6022.7	3.90	1.57	6047.6	0.41	2.99	6014.5
163~168	1.30	0.50	6029.7	4.20	1.85	6003.1	0.63	7.39	5989.4
169~174	1.35	0.50	6167.1	4.70	2.10	6148.7	1.19	29.34	6144.6
175~180	1.35	0.50	6247.5	4.70	2.00	6261.6	0.79	13.26	6253.8
181~186	1.40	0.53	6477.2	4.76	1.75	6542.4	0.43	4.62	6509.9
187~192	1.30	0.53	6141.8	4.23	1.77	6128.5	0.51	5.00	6109.6
193~198	1.25	0.50	5857.1	4.20	1.96	5853.5	0.81	11.57	5836.7
199~204	1.35	0.55	6362.5	4.45	1.65	6385.4	0.41	3.79	6349.2
205~210	1.33	0.60	6541.4	4.08	1.22	6775.0	0.25	1.61	6692.9
211~216	1.40	0.50	6354.0	4.70	1.83	6422.7	0.52	6.29	6385.9
217~222	1.25	0.50	5993.9	4.14	1.80	6018.0	0.57	6.00	5992.5
223~228	1.25	0.55	6122.3	4.08	1.69	6110.2	0.46	4.00	6091.8
229~234	1.30	0.53	6135.3	4.23	1.79	6089.4	0.56	5.96	6079.0
235~240	1.20	0.50	5679.1	3.95	1.95	5626.8	0.89	12.17	5618.5
241~246	1.30	0.53	6166.8	4.20	1.73	6141.5	0.50	4.82	6119.6
247~252	1.30	0.60	6360.4	4.14	1.55	6320.3	0.37	2.82	6297.3

表の中には最小のAICを示した部分に下線を付けてある。 そのようにして結果を検討すると、海面反射雑音はほとんどが対数-正規およびK分布に従っていることが分かった。 例として図3-5の観測値のスイープ番号19~24に示されている。

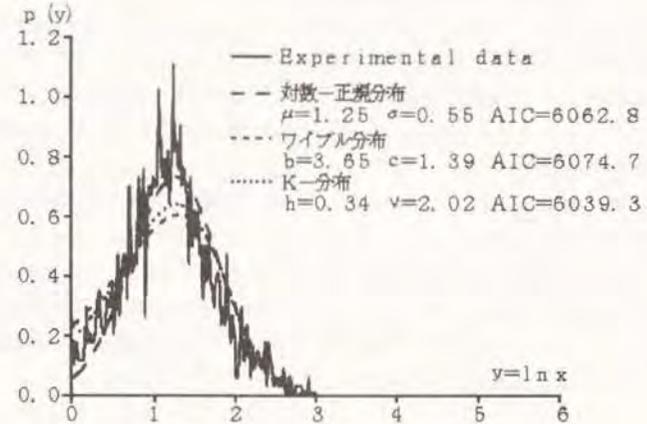


図3-5 K分布と判断された領域の回帰結果の例 (スイープ番号19~24)

通常、AICは最大対数尤度法とは異なったものである。 しかしながら、対数-正規、ワイブルおよびK分布は同じ数、2つのパラメータをもっている。 それ故に、(10)式における $k=2$ から、対数-正規、ワイブルおよびK分布に関する最大対数尤度法の計算とAICからは同じ結果を得ることになる。

#### (5) 検討結果

今回の観測結果からは、入射角度8度から17度、周波数9,380MHz、送信パルス幅0.25 $\mu$ S、波浪階級8の状態では、海面反射雑音の振幅強度分布は対数-正規およびK分布に従っていることがわかった。 しかしながら、別のレーダでの観測結果からは、入射角度0.5度から0.72度、周波数1,330MHz、送信パルス幅3 $\mu$ S、波浪階級3の状態での観測では、海面反射雑音の振幅強度分布はワイブル分布として観測された。

### 3.2.2 クラッタの抑圧

クラッタの存在は希望する信号を抽出する際の妨げとなる。波を抽出の対象とする場合には、海面反射による受信信号を他の受信波から明瞭に観測できることが重要となる。この場合には、船舶からなどの反射信号は逆に不必要なクラッタとなる。しかし、ここでは海面反射波はクラッタとして扱い、船舶などのターゲットからの反射波を信号として取り扱う。

クラッタと信号の効果的な選別あるいはクラッタ中の信号の検出方法を検討するためには、それぞれの特性を調べ、その特性の相違に応じた処理方法を適用すれば目的を達成できる。例えば、他船のレーダの干渉によるノイズは孤立ノイズとして受信されるので、スイープ相関処理や近傍点との平均化処理で除去抑圧することが可能である。また、海面反射波は出現する位置が時々刻々変化することから、時間間隔をあけて収集したレーダ映像間で相関（スキャン相関）をとる場合に低減効果が大きい。しかし、この方法は海面反射が画面にべったりと出ている場合には効果はない。スキャン相関による海面反射の除去効果については第6章3節で述べる。

クラッタの除去方式はこれまでも様々な方式が研究されてきた。基本的には海面からの反射波と物標からの反射波との性質の相違を利用してT/C（ターゲット対クラッタ比）を改善するものである。

- 送信パルス幅を変化させることでパルス幅依存性のあるクラッタを低減する方式<sup>(2)</sup>
- 異なった周波数や偏波で観測し信号処理によりクラッタを低減する方式。ビーム幅の異なる複数のアンテナを使用し信号処理によりクラッタを低減する方式<sup>(3)</sup>。
- 物標と海面反射波の周波数スペクトルの相違に基づいて周波数領域で処理しクラッタを低減する方式<sup>(4)</sup>。
- クラッタとターゲットとの振幅強度分布の特性の相違に基づいてスレッシュホルド値を設定するCFAR方式<sup>(5)</sup>。
- 方位方向については2極フィルタを使用し、距離方向には移動平均処理を行うことでT/C比を向上させる方式<sup>(6)</sup>。
- レーダの分解能をおとしたときのクラッタの振幅強度分布の空間的相関性に着目し、距離分解能を劣化させないように考慮しながら固定しきい値で

の検出性能を改善する方式<sup>(7)</sup>。

- 観測毎にクラッタのパワー・スペクトルをニューラル・ネットワークを用いて学習させ、クラッタの特性に応じて数種類の帯域除去フィルタを選択させ、クラッタの除去効果をあげる方式<sup>(8)</sup>。
- シー・クラッタはスキャン毎に出現する領域（セル）が異なることを利用した方式。目標が高速に移動する場合やレーダの高分解能化などにより位置相関がとりにくくなる場合には、新信号との加算と記憶値の消滅にそれぞれ $\alpha$ 、 $\beta$ の係数を掛け、CFAR処理のときに難しかったしきい値が容易に設定できると述べている<sup>(9)</sup>。

### 3.3 氷野等のレーダ映像の観測

流水のある海域にある船舶の検出には海面と氷野の反射信号の特性を調査する必要がある。また、氷野の表面の凹凸は風による漂流に大きく影響する。このため冬季の北海道（紋別）で流水や氷野の観測を実施してデータの収集を行った。また、小さな凹凸の検出限界を研究するために人工的に凹凸（雪、砂、板）を作り、レーダによる観測を実施した。

表3-4 氷野等のレーダ映像の観測

観測対象	観測地	観測時期
氷野の観測	紋別	(冬季)
氷野の凹凸の推定	紋別	(冬季)
人工的な凹凸による検出限界の観測	紋別	(夏季、冬季)

#### 3.3.1 レーダによる凹凸の測定の基礎実験

##### 3.3.1.1 凹凸の測定について

流水および氷野の観測は、これまで人工衛星やレーダを用いて様々な観測が行なわれ、結果が報告されている。著者らは、氷野の凹凸と風や潮の方向や強さとを関連付けて流水の動きを予測するために、レーダを用いて氷野を観測し、その凹凸を数値で表現することを試みてきた<sup>(10), (11)</sup>。

しかし、レーダ反射信号から得られる凹凸の情報と実際の氷野の物理的凹凸とを同時に観測し対応させることが困難なため、これまでは定性的な結果を得

るに留まっていた。そこで、レーダ反射信号から得られる凹凸の情報を定量的なものとするための第一歩として、人工的に作った大きさ、形状のわかる凹凸（以下「人工凹凸」と呼ぶ）の測定を試みた。今回、検出できる凹凸の限界、形状による信号の特性、電波の干渉やノイズに対する方策等について得られた若干の知見を報告する。

### 3. 3. 1. 2 観測装置の構成

観測に用いたシステムを図3-6に示す。

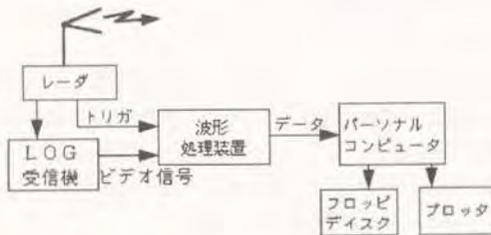


図3-6 観測システムのブロック図

LOG受信機で受信された反射信号は、波形処理装置によってA/D変換される。その仕様を表3-5に示す。また、この波形処理装置は演算機能を備えており、反射信号の瞬時値とともに演算結果も記録することができる。その記録には、

- ・ミニフロッピーディスクに記録する方法
- ・プロッタを用いて紙に記録する方法

がある。記録に要する時間は前者が約10秒、後者が約40秒である。今回、レーダアンテナは物標に向けて固定されており、反射信号はAスコープ方式で記録される。

表3-5 サンプリングインタフェースの要目

1スweep毎のサンプリング数	1~16000ポイント
サンプリング周期	10, 20, 50, 100ns
トリガ遅延	0~32000ポイント

観測に使用したレーダはXバンドレーダである。要目を表3-6に示す。

表3-6 レーダの要目

周波数	9410 MHz
送信出力	10 KW
パルス幅	80 ns
ビーム幅	0.6 度
増幅特性	LOG

### 3. 3. 1. 3 観測方法

観測は平成元年8月に約10日間にわたって実施された。検出できる凹凸の限界や形状の変化による信号への影響等、微妙な計測をするために、観測場所の条件として、人工凹凸からの反射信号のみを受信できることが望ましい。そこで、レーダ電波の反射の少ない平坦な広い土地2ヶ所（土の平地、砂浜）を観測場所を選んだ（図3-7, 3-8参照）。

観測装置は東京商船大学の研究用レーダ車に積み込み、適当な位置を決めて停車し、アンテナを固定して次の観測を行なった。



図3-7 観測場所（土の平地）



図3-8 観測場所（砂浜）

・予備観測1：レーダ電波のビーム中心の測定

固定したアンテナのビーム中心を求めるために、レンズレフレクタを左右に移動して反射信号の強い地点を求め、その地点とアンテナを結んだ線をビーム中心線とした。

・予備観測2：ハイトパターンの測定

予備観測1で求めた線上でレンズレフレクタを移動させ、反射信号を測定してハイトパターンを求めた。

予備観測は本観測の前に必ず行ない、測定条件の良い場所を選んで人工凹凸を作った。

・人工凹凸の観測（その1）：人工凹凸の数による反射強度の変化の測定

アンテナに向けた高さ15cm、幅3.6mの垂直な壁（図3-9参照）を基本形の人工凹凸とした。ベニヤ板、土、砂で人工凹凸の基本形を間隔を変えて1～3列作り、数を変えた時の反射信号の変化を測定した。また同時に、信号を分離することができる人工凹凸の間隔を測定した。

・人工凹凸の観測（その2）：人工凹凸の大きさによる反射信号の変化の測定

土、砂で人工凹凸の基本形を1列作り、左右各45cmずつ数回削って反射信号の変化を測定した。

・人工凹凸の観測（その3）：人工凹凸の形状による反射信号の変化の測定

土、砂で基本形、かまぼこ形、半球形の人工凹凸を作った。数や間隔を変えて反射信号の変化を測定した。

人工凹凸の観測（その1～3）では、反射信号の瞬時値と同期加算処理した反射信号を記録、保存した。

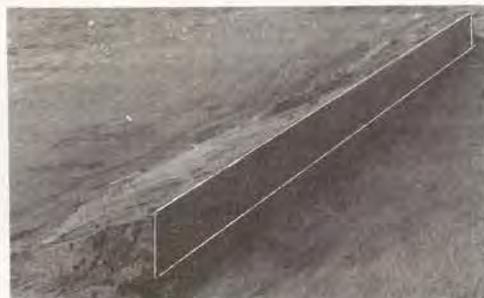


図3-9 人工凹凸（砂：高さ15cm、幅3.6m）

### 3.3.1.4 結果

#### 3.3.1.4.1 予備観測の結果について

レーダアンテナの近くに木や草があり、遠方に平坦な砂浜が広がっている場所（図3-10参照）で放射ビームの中心を測定したところ、反射信号が不安定でビーム中心を求めることができなかった。レーダアンテナ近くの草を取り除くと信号はやや安定したが、充分ではなかった。

このことから、アンテナ付近の木の揺らぎにサイドローブ等が影響され、電波経路の途中に生えた草の揺らぎに地上波が影響されていたと考えられる。

今回の観測のように小さな信号を扱う場合には、このような予備観測は重要である。



図3-10 予備観測場所（砂浜とレーダ付近の状況）

#### 3.3.1.4.2 人工凹凸の観測の結果について

##### (1) 人工凹凸の観測（その1）の結果

ベニヤ板で作った基本形の人工凹凸1列の場合の反射信号を図3-11に示す。128回の同期加算処理を行ない、人工凹凸からの反射信号の部分のみの表示である。（今後、特に断わらない限り同じ処理方法の結果を示す。）信号のピーク値は-37.1dBmで、はっきりと人工凹凸を認識できる。

次に、10m離れた所に同形状の人工凹凸を1列追加した場合の反射信号を図3-12に示す。1列目の反射信号のピーク値は-40.2dBmで、1列だけの場合より若干弱くなっているが、はっきりと認識できる。2列目の反射信号も、ほぼ同じ強度で認識できる。

ところが、同様にして 20m 離して 2 列とした場合 (図 3-13 参照)、2 列目の反射信号は認識できない。これは 2 列目の位置がハイパターンの谷、つまりレーダ電波の弱い部分であったためと考えられる。従って、識別できる人工凹凸の間隔の限界はハイパターンや付近の物標による反射信号の干渉等に影響されるため、一概に数値で表すことはできない。しかし、80ns のパルス幅と図 3-12 から考えると、10m の間隔までは識別可能であると考えられる。

次に 15m 間隔で基本形の人工凹凸 3 本の場合を図 3-14 に示す。図 3-12 の場合程、信号のピークをはっきりと認識することはできないが、かなり強い信号が幅広く存在し、凹凸が多く存在する時は、強い信号が多く分布するといえる。

土、砂の人工凹凸による観測でもほぼ同様の結果が得られた。

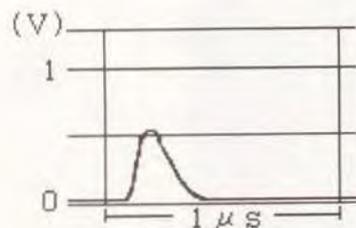


図 3-11 観測結果  
(垂直壁 1 本)

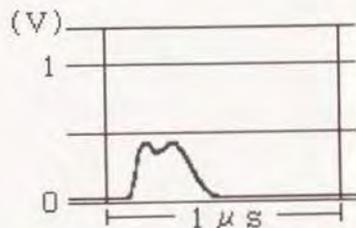


図 3-12 観測結果  
(垂直壁 2 本, 10m 間隔)

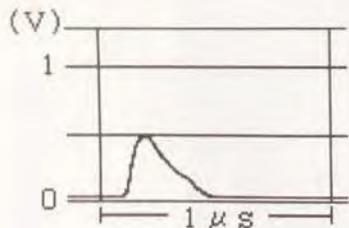


図 3-13 観測結果  
(垂直壁 2 本, 20m 間隔)

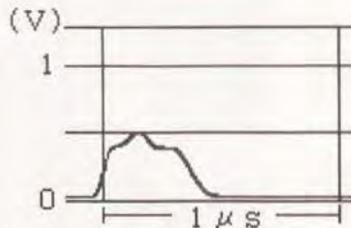


図 3-14 観測結果  
(垂直壁 3 本, 15m 間隔)

## (2) 人工凹凸の観測 (その 2) の結果

砂で基本形の人工凹凸を 1 列作り、両端から 45cm ずつ削り取った場合の結果を図 3-15 に示す。広い面積に凹凸が存在する程、反射信号は強くなっていることがわかる。

ここで、アンテナの水平ビーム幅は 0.8 度なので距離 250m では幅約 3.5m である。つまり人工凹凸の幅より小さいので、人工凹凸の幅をさらに広げても、信号の強度はこれ以上は顕著に強くないと思われる。

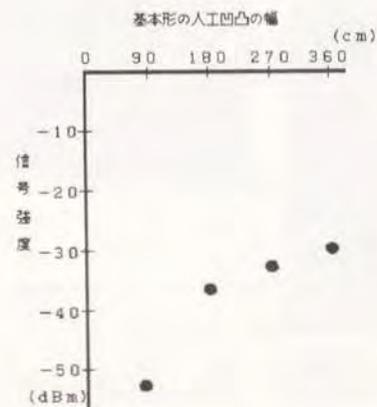


図 3-15 レーダ反射強度と垂直壁の幅

### (3) 人工凹凸の観測（その3）の結果

砂で、基本形の人工凹凸の他に、高さ15cm、幅3.6mのかまぼこ形、半径15cmの半球形の凹凸を作った。各々を図3-16, 17に示す。レーダアンテナは右方向にある。

かまぼこ形3列の場合の反射信号を図3-18に示す。基本形とほぼ同じ程度の凹凸であるにもかかわらず、信号のピークは-58.2dBmと、同じ位置の基本形の場合に比べて9.7dBも低い値となっている。また信号の山も認識できない。



図3-16 人工凹凸（かまぼこ型）



図3-17 人工凹凸（半球）

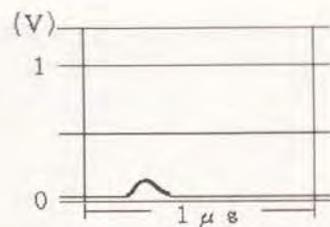


図3-18 観測結果（かまぼこ型3本、1.5m間隔）

図3-19の半球形25個の場合の反射信号はさらに低く、凹凸の体積はかなりあるにもかかわらず、ほとんど信号を認識することはできない。図3-20に瞬時値を示すが、この場合は全く信号を認識できない。

アンテナに向けた面の形状が反射信号の強度に大きく影響することがわかる。また静止した物標からの微弱な反射信号を得る場合、同期加算処理は非常に有効である。

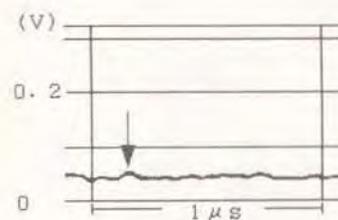


図3-19 観測結果  
（半球25個）

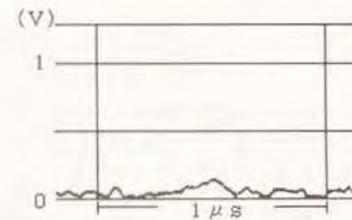


図3-20 観測結果  
（半球25個、瞬時値）

### 3. 3. 1. 5. 凹凸のレーダ映像信号への影響

以上の結果をまとめると

- ・凹凸の多い場所からは、強い反射信号が広い面積にわたって得られる。
- ・同じ程度の凹凸でも、形状により反射信号の強度は異なる。

である。

ところで、実際の氷野の凹凸は、ランダムな状態であると考えられる。従って、形状が影響してすべての凹凸からの反射信号が得られなくても、凹凸の度合いについて観測領域の全体傾向を知ることができると考えられる。

また、レーダアンテナを回転させながら観測する場合にも同期加算処理方式が重要であることがわかった。

### 3. 3. 2 雪の凹凸の観測

#### 3. 3. 2. 1 雪の凹凸の測定について

前節で述べたように、著者らはレーダ反射信号から得られる氷野の凹凸の情報を定量的なものとするための第一歩として、土や板で人工的に作った、大きさや形状のわかる凹凸の測定を試みた<sup>(3)</sup>。その結果、検出できる凹凸の限界、

形状による信号の特性等についての知見が得られた。

ここでは、流水によく似た材質の雪を使って、人工的な凹凸を作り、距離の変化や、電波の伝搬経路の変化がレーダ反射信号に及ぼす影響等について得られた若干の知見を報告する。

### 3. 3. 2. 2 観測装置の構成

観測に用いたシステムを図3-21に示す。

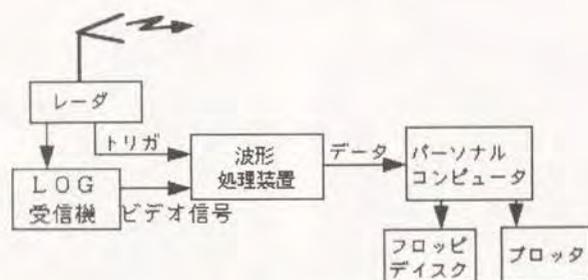


図3-21 観測システムのブロック図

LOG受信機で受信された反射信号は、波形処理装置によってA/D変換される。その仕様を表3-7に示す。また、この波形処理装置は演算機能を備えており、反射信号の瞬時値とともに演算結果も記録することができる。

その記録には、

- ・ミニフロッピーディスクに記録する方法
- ・プロッタを用いて紙に記録する方法

がある。記録に要する時間は前者が約10秒、後者が約40秒である。今回、レーダアンテナは物標に向けて固定されており、反射信号はAスコープ方式で記録される。

観測に使用したレーダはXバンドレーダである。主要諸元を表3-8に示す。

表3-7 サンプリグインタフェースの要目

1スイープ毎のサンプリング数	1~16000ポイント
サンプリング周期	10, 20, 50, 100 ns
トリガ遅延	0~32000ポイント

表3-8 レーダの要目

周波数	9410 MHz
送信出力	6 KW
パルス幅	80 ns
ビーム幅	1.8 度
増幅特性	LOG

### 3. 3. 2. 3 観測方法

観測は平成2年3月11日に実施された。人工的な雪の凹凸（以下「人工凹凸」と呼ぶ）までの距離の変化や電波の伝搬経路の変化がレーダ反射信号に及ぼす影響を計測するために、観測場所の条件として、人工凹凸からの反射信号のみを受信できることが望ましい。そこでレーダ電波の反射の少ない平坦な広い土地（雪の平地）を観測場所（図3-22参照）に選び、そこに人工凹凸を設置して観測を行なった。



図3-22 観測場所（雪の平原）

観測装置は東京商船大学の研究用レーダ車に積み込み、適当な位置を決めて停車し、アンテナを固定して次の観測を行った。

・予備観測：レーダ電波のビーム中心の測定

固定したアンテナのビーム中心を求めるために、レンズレフレクタを左右に移動して反射信号の強い地点を求め、その地点とアンテナを結んだ線をビーム中心線とした。

・人工凹凸の観測：人工凹凸の反射信号の測定

一辺約30cmの雪の立方体を、基本形の人工凹凸とした。この人工凹凸をアンテナのビーム中心線を中心とする約5m四方内に、適当な間隔をあけて約30個（以後「人工凹凸群」と呼ぶ（図3-23参照））設置した。人工凹凸群を、アンテナのビーム中心線上で距離を変えて4カ所に順次設置し、反射信号の変化を測定した。反射信号は、瞬時値と同期加算処理した結果の両方を記録、保存した。



図3-23 人工凹凸群（雪：30cmの立方体）

3.3.2.4 観測結果

人工凹凸群を設置する前の反射信号を図3-24に示す。図は128回の同期加算処理後の、反射信号の部分表示である。（今後、特に断らない限り、同じ処理方法の結果をしめす。）

矢印1の反射は、アンテナのビーム中心線を横切っている道の両側に積まれていた雪の反射である。また、矢印2は雪の平面にわずかな盛り上がりがあったための影響であると思われる。

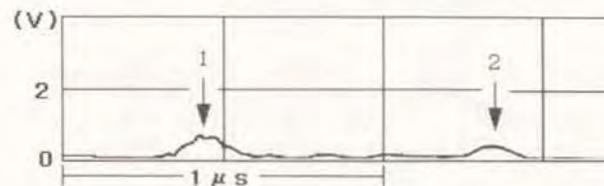


図3-24 観測結果（人工凹凸群を設置する前）

今回の観測のように微妙に変化する信号を扱う場合には、人工凹凸群を設置する前には反射信号がなるべく少ない場所が望ましい。他の反射信号がある場合には、人工凹凸の観測の前にその原因を調べておくことが重要である。

初めに、レーダ車より約375mの地点に人工凹凸群を設置した。その反射信号を図3-25に示す。矢印3が人工凹凸群からの反射信号で、はっきりと認識できている。距離方向に信号が伸びているのは、人工凹凸群が5m四方の広がりを持って設置されていること、また、群であるために多重反射が生じていることが考えられる。

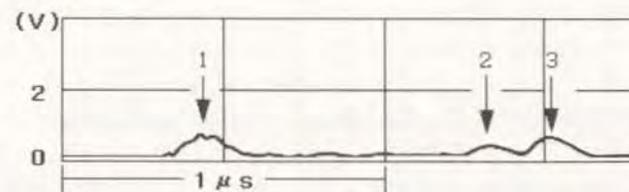


図3-25 観測結果（375m地点に人工凹凸を設置）

次に、レーダ車から約300m、約250m、約150mの地点に同様の人工凹凸群を順次設置し、観測した。それぞれの反射信号を図3-26~28に示す。図中の矢印4は300m地点、矢印5は250m地点、矢印6は150m地点の人工凹凸群からの反射を示す。

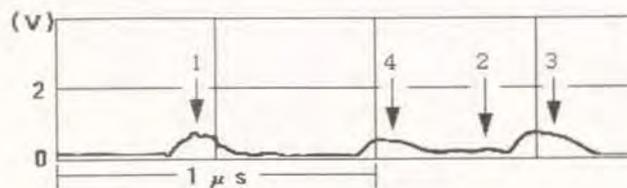


図3-26 観測結果（更に300m地点に人工凹凸群を設置）

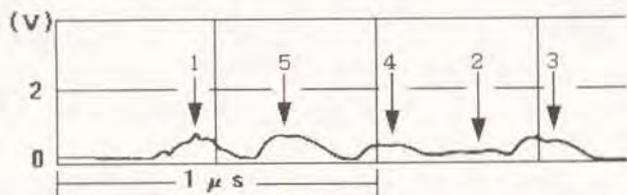


図3-27 観測結果（更に250m地点に人工凹凸群を設置）

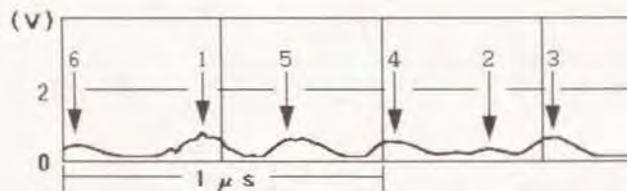


図3-28 観測結果（更に150m地点に人工凹凸群を設置）

これらより、次の結果を得た。

・図3-25で、矢印3の左側にあった小さな信号が図3-26～28ではほとんど目立たなくなっている。これは、電波の伝搬経路の地形が変化したことにより、ハイトパターンが変わったためである。

・矢印3～6は、ハイトパターンの変化による影響もほとんどなく、ほぼ同レベルの反射信号である。

・今回は、距離の違いによるレーダ反射信号への有意な影響は認められなかった。

### 3. 3. 2. 5 雪の人工凹凸群のレーダ反射信号について

以上の結果をまとめると、

- ・同程度の凹凸からは、ほぼ同じレベルのレーダ反射信号が得られる。
- ・レーダ反射信号には、すべての凹凸が表れていない場合がある。

の2点である。

1点目については、今回は大きさの異なる人工凹凸群について観測を行っていないので、今後、確認の必要がある。

2点目については次のように考える。

実際の氷野の凹凸は、ランダムな状態であると考えられる。したがって、すべての凹凸からの反射信号が得られなくても、観測領域の凹凸の度合いについて、全体傾向を知ることができると考えている。

今後、距離による影響、凹凸の程度による影響等を検討していく予定である。

### 3. 4 交差偏波による物標のレーダ観測

対象物の構造や表面の特性により、反射波には異なった偏波面の成分が含まれている。構造の複雑な対象物からの反射波には交差偏波成分が多く含まれ、単純な構造の物からの反射波には少ない。このような特性の相違を物標の識別の一要素として加えた。偏波面を変えた時の反射強度による物標の識別については、落合が昭和33年に識別への可能性を述べた(13)。落合は、レーダの分解能よりも小さい場合の物標の識別を、送受信の偏波面を変えることで識別の可能性の基礎実験を行った。この研究発表では、具体的な識別結果についての記述はほとんど無い。また、垂直偏波による受信強度と水平偏波成分での受信強度をそれぞれ色彩と輝度に対応させその合成色からの識別について述べられていたが、具体的な成果こそなかったものの35年も前にこのような一つの姿が提案されたことに敬意を表するものである。

### 3. 5 偽像の観測と判定

#### 3. 5. 1 レーダ偽像の実状の観測

各種のレーダ偽像を観測した実例を基礎にレーダ偽像の判定について述べる。

特に架橋が原因となったレーダ偽像の実状の観測結果およびレーダ偽像の低減対策については付録にその概要を述べる。

### 3. 5. 2 レーダ偽像の推定・判別判定のための経験的知識

レーダ偽像の多数の観測結果から、実像か偽像かの判定方法について述べ、自動的なレーダ偽像判断アルゴリズム構築の可能性について述べる。

表3-5-1 偽像判定の経験的知識

<p><u>全般的要素</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・映像の面積が大きい。</li> <li>・映像の境界部分が明瞭でなく、映像の内部ももやもやしている。</li> <li>・船舶の映像のように出現している偽像の場合、その移動速度が著しく早い場合がある。つまり、反射によって大きくなったりあるいは自船の速度の2倍の値になることがある。</li> <li>・広い範囲にわたって出現している映像（偽像）は、付近の構造物が鏡面として作用したものととして検討する。</li> <li>・映像の強度が一般に弱く、しかも不安定で、出現する位置も変わりやすい。</li> <li>・鏡面反射による偽像がほとんどである。</li> <li>・付近にきわめて強い反射体がある場合、鏡面反射偽像やサイドローブ偽像がやすい。</li> <li>・点状の強い反射物標では左右に翼状に広がる偽像がでる。これはメイン・ローブの近くの部分の特性によるものである。</li> <li>・人工的な構造物は反射面が一樣なので、鏡面としてよく反射させるだけでなく、反射体としても強い反射を示す。面が一樣であることから、方向性も強い。</li> </ul>
<p><u>特殊な鏡面反射に基づく偽像</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・橋脚部や径間部でも前面だけでなく、側面も鏡面として偽像の原因が作用することがある。</li> <li>・ガス・タンクなどの円柱形の構造物は、レーダ電波を様々な方向に反射させる。</li> <li>・複数のガス・タンクが並べて建設されているところでは、タンク間での多重反射偽像がやすい。</li> </ul>
<p><u>特殊なケースの偽像</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・自船と大きな船舶の船体平行部が平行となったときに多重反射偽像がでる。</li> <li>・自船内の構造物（煙突やマストなど）が原因となって発生させる偽像は、発生する方位が予めわかるので注意していればわかる。</li> <li>・サイド・ローブにより発生する偽像も、自船のレーダ・スキャナの特性を把握しててやすい角度の関係を注意していればわかる。</li> </ul>

- ・橋と自船の間での反射により、前方側にもう一本の橋が架かっているような偽像がでることがある。橋の縦横の構造部材のコーナがコーナ・レフレクタとして作用した例である。
- ・橋脚間で多重反射し、橋脚部の向こう側に伸びる偽像がでる。
- ・橋の径間部分でも構造部材間で多重反射し、橋が膨らんで見える偽像がでる。
- ・橋の底面部が鏡面として作用し、海面との反射によって橋が太く見えたり、2本の橋が架かっているように見えることがある。

#### 第2掃引偽像

- ・パルス繰り返し周期が短い時に、第2掃引偽像を現すことがある。上下を押しつぶした「く」の字で現れる特徴がある。
- ・気象条件の変化により発生した異常伝搬によって、遠方の物標の映像が第2掃引偽像として現れることがある。

#### 偽像と見誤る実像

- ・架空電力線のような実体のある反射体の映像に気付かず、偽像と見誤る例もある。
- ・潮目や海面が静穏な時の航走波がライン状に現れる。
- ・海苔ひびが立っているところは、強い反射を示す。しかし、レーダ映像が設置されている形状通りに表示されるので容易に判別がつく。

#### 強い反射を示す物標

- ・自船のレーダ・スキャナーと同じ程度の高さにある反射体が強い反射を示す。このことは大きな反射体であっても、レーダ反射断面積の計算時にはレーダ・スキャナーと同じ高さにある部分のわずかな面積で実質的なレーダ反射断面積のほとんどを受け持っている。
- ・防波堤や海岸線付近の人工的な構造物は特に強い反射を示す。
- ・切り立った壁やセメントを吹き付けた壁も強い反射を示す。

熟練した航海士やレーダ観測者は実像と偽像を見分けることができる。少々判断しかねる場合にも、しばらく継続して映像を監視することで判断がつく。

## 4. レーダ映像からの情報の抽出

レーダ映像をよく観察すると映像の強度分布に加えて、対象物の映像の周囲部分に特徴を持っていることが分かった。次に掲げる方法により、レーダ映像からの特徴抽出を研究した。

### 4.1 映像の前処理

#### 4.1.1 レーダ干渉の除去

レーダ映像において、他船のレーダからのレーダ干渉は相手のレーダのパルス幅に対応した長さの雑音として現れ、孤立したノイズとして画面に現れることが多い。画面上に現れる大きさはサンプリングの精粗に関連する。この雑音は、表示されている隣の走査線上にもでているわけではなく、たまたまその走査線上の所で卓越した強度の雑音として受信されたために表示されたものである。輝度を持つため面積を持っているように見えるが、実体は1本の走査線上に現れているだけである。見え方としては、Snowノイズあるいはごま塩ノイズ(Salt and Pepper ノイズ)のように現れる。

中には、感度を著しく高くしたり、波浪の大きいときには、シー・クラッタ(海面反射雑音)が自船の周囲に広く連らなった面として現れていることがある。このような場合には、大変である。

レーダ映像の観測例を図4.1に掲げる。この映像例では、船舶(大きな映像)、沢山の小さな映像(波)と一本の白い直線(レーダ干渉)が現れている。波は海面で反射しているため面として現れている。



図4.1 レーダ映像の観測例

これらの不要な映像を消去するには、

- レーダ干渉はスイープ相関処理で除去可能であるが、
- 波によるクラッタの除去には波の移動速度を考慮して相関処理を必要とすることが分かる。この理由から波浪のクラッタの処理にはスキャン相関処理が使用され、効果も大きい。

#### 4.1.2 ターゲット対クラッタ比の改善

レーダから得られる信号には、海面、雨雲および地面等からのクラッタと呼ばれる不必要な信号と、船舶等からのターゲットと呼ばれる必要な信号が混在している。レーダ信号の処理においては、クラッタを抑圧し、ターゲットを検出することを目的にしている。クラッタとシグナルの関係は目的とする対象物が波か船舶かで関係が変わる。

さて、このレーダ信号のクラッタの抑圧の程度を表すものとして誤警報確率  $P_{fa}(T)$  が、また、ターゲットからの信号の検出の程度を表すものとして検出確率  $P_d(T)$  が定義されている。<sup>(1)</sup>

$$P_{fa}(T) = \int_{-\infty}^{\infty} P_c(x) dx \quad \dots (1)$$

$$P_d(T) = \int_T^{\infty} P_T(x) dx \quad \dots (2)$$

ここで、 $p_c(x)$ 、 $p_T(x)$  は、それぞれ、クラッタ、ターゲットのスレッシュホルド値  $T$  における確率密度関数である。

また、レーダ信号におけるターゲットの検出方式として Threshold-Detection 方式がある。この方式は、レーダの受信機出力にしきい値(スレッシュホルド値)を設定し、出力信号が設定されたしきい値を越えるか否かでターゲットの存否を判定する方法である。

これらの指標をもとに、分解能が非常に優れた34.86GHzのミリ波レーダにより、船舶の検出実験を行い、あるしきい値で切った時の誤警報確率および検出確率について考察した。

#### (1) 測定データ

観測は平成2年7月に横須賀港で行われた。レーダは、港の海岸線近くに設置されている。今回測定されたレーダのデータの概略を図4.2に示す。また観測した対象船舶を図4.3に示す。図4.2の測定データは、レーダからの

距離が0.2 km~2.12 kmの領域のもので、この中には、自動車専用船がターゲットとして存在し、クラッタとしては海面がある。

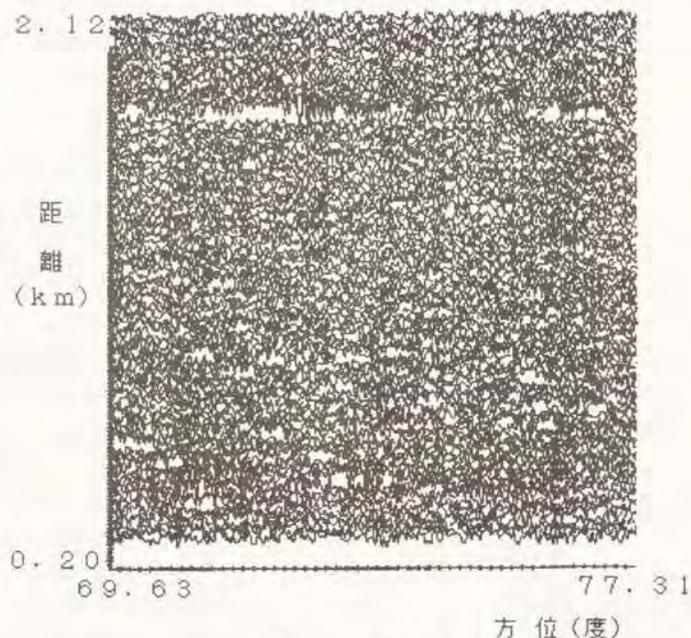


図4.2 観測結果 (自動車専用船)



図4.3 実際に観測した船舶

## (2) 測定システムについて

使用したレーダは、ミリ波レーダ (CPSH-4J, 沖電気工業製) である。その諸元値を表4.1に示す。このレーダは、波長が約8.6 mmと非常に短いので、空中線の指向性を容易に鋭くすることができる。通常、船舶用のレーダには、波長が3 cm程度のXバンドレーダが広く一般に用いられており、水平方向のビーム幅は、約1°前後である。このミリ波レーダの場合には、水平方向のビーム幅が0.25°となっており、レーダから1 kmの地点における接線方向の分解能は約4.4 mである。また送信周波数が高いため占有周波数帯域幅も広くとれることから、送信するパルス幅を狭くすることができ、距離分解能は4.5 mとなる。従って、方位および距離分解能とも非常に優れている。

表4.1 使用レーダの要目

周波数	34.86 GHz
送信出力	30 kw
偏波面	水平偏波
アンテナビーム幅	水平: 0.25度 垂直: 5.0度
送信パルス幅	30 ns
パルス繰返し数	4000 Hz
アンテナ回転数	20 rpm
受信機の特長	線形増幅特性

測定に用いたシステムを、図4.4に示す。ミリ波レーダで受信されたレーダ信号は、8 bitでA/D変換され、8個の高速書き込み用並列メモリに一時記憶される。書き込み終了後に内部のデータベースを介してパーソナル・コンピュータ (PC-9801 NEC製) にDMA (Direct Memory Access) 転送され、大容量RAMボードに8 bitのデジタルデータとして蓄えられる。

この装置のサンプリング・レートは、送信パルス幅 (30 nsec) からはShannon-染谷の標本化定理を考慮すると15 nsec程度にするべきであるが、試作装置の都合上20 MHz (50 nsec) とした。従って収集されたデータの実際のレンジ方向の各点間の分解能は、7.5 mとなっている。また、アジマス方向の各点間の分解能は、アンテナ回転数とパルス繰返し周波数の関係から、0.03°となっている。

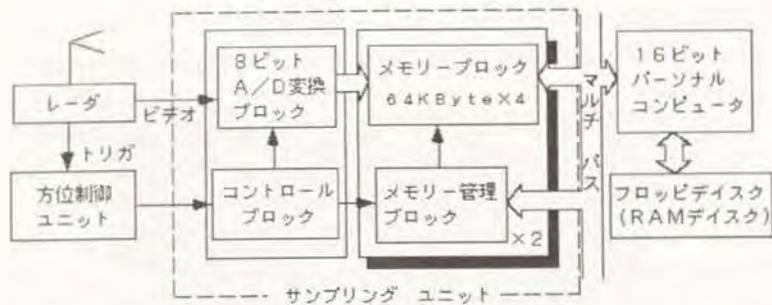


図4.4 観測システムのブロック図

この装置で測定されたデータは、距離方向に256点および方位方向に256方位となるため、距離が1.92km、角度が7.65°のパーシャル・ドーナツ型をしている。近距離部分ではデータ間隔が縮められて見にくいので、図4.5のようにBスコープ表示方式に変形し横軸に距離をとり、縦軸に方位(アジマス)をとった縦横256×256点の2次元データとして表している。また、各点の量子化レベルは、8bit(256段階)である。

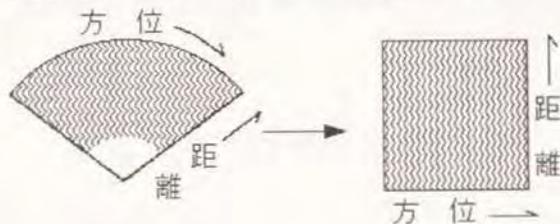


図4.5 データ変換の様子

### (3) 測定データの統計的性質

測定されたデータの振幅強度分布について、レーダ信号のクラッタ部分とターゲット部分の統計的性質は異なっていると考えられる。ターゲット部分の振幅強度分布は正規分布となり、クラッタ部分(海面反射)は対数正規分布やレーレ分布を含むワイブル分布<sup>(2)</sup>となっているとの報告が多い。そこで、このデータをターゲット部分とクラッタ部分とに分け、最大尤度法<sup>(3)</sup>を用いて調べた。最大尤度法とは、あらかじめ与えられた複数の確率モデルの中から対数尤度が最大となる確率モデルを選択することによって、近似的に真の分布に一

番近い確率モデルを得る分布推定法である。今回は、この対数正規分布、ワイブル分布および正規分布に対して最大尤度法を用いたところ、ターゲット、クラッタ共に正規分布に最も近い分布であることがわかった。図4-6にそれぞれの実測値にモデルを回帰させたときの振幅強度分布のグラフを示す。横軸に反射信号の強度、縦軸にその確率密度をとっている。ここで、(1)式の $p_C(x)$ および(2)式の $p_T(x)$ は、次に示す(3)式で与えられ、それぞれのモデル・パラメータの推定値はクラッタの平均値 $m$ が120、同じく標準偏差 $\sigma$ は17であった。このとき、ターゲットについては平均値 $m$ は144となり、標準偏差 $\sigma$ は25であった。

$$P_C(x), P_T(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \dots (3)$$

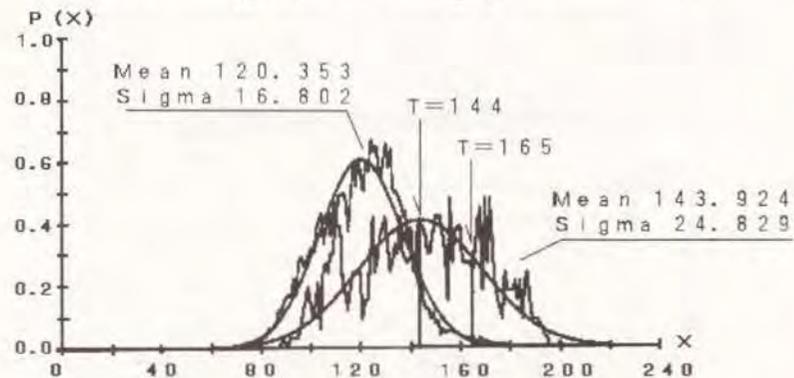


図4-6 信号振幅強度分布

### (4) 測定データの処理

Threshold-Detection方式を用いて(2)式の検出確率が、 $P_d = 0.5$ となるようにしきい値を求めると、 $T = 144$ となる。一方、この時(1)式から計算した理論上の誤警報確率は、 $P_{fa} = 3.2 \times 10^{-2}$ となる。この結果を図4-7に示す。図4-7における実際の誤警報確率を求めると、 $P_{fa} = 5.9 \times 10^{-2}$ となる。

同様に検出確率を $P_d = 0.2$ とすると、 $T = 165$ 、理論上では $P_{fa} = 1.6 \times 10^{-3}$ となり、図4-8に示す結果となる。図4-8における実際の誤警報確率は $P_{fa} = 6.9 \times 10^{-3}$ となる。

このように誤警報確率の理論上の値と実際の値が異なる原因は、理論上の値を(1)式から計算していることによる。(1)式中の $p_C(x)$ は、上記に

を(1)式から計算していることによる。(1)式中の $p_e(x)$ は、上記に述べたとおり推定されたもので、実際のものとは若干の誤差がある。従って誤警報確率にも誤差が出ることになる。同様に、検出確率も理論上のものであるから、ある程度の誤差があることになる。

ところで、図4.7に示したように検出確率を高くした場合、船舶の形状はマスト部分までかなりはっきりと認識できる。しかし、図4.7は誤警報確率が高すぎ、実用的には問題がある。実用レベルで用いるためには、Threshold-Detection方式を用いる前の段階で、 $T/C$ 比を向上させるフィルタ等で前処理が必要である。

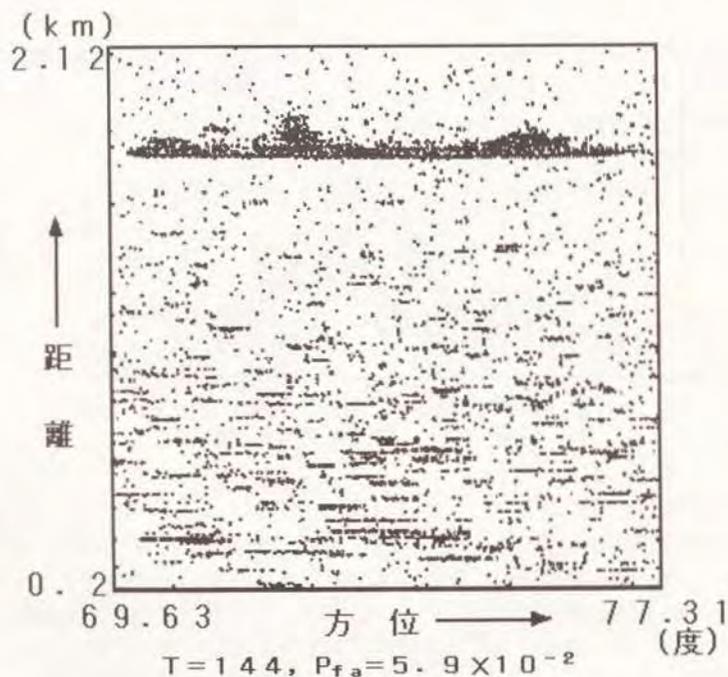


図4.7 処理後データ1

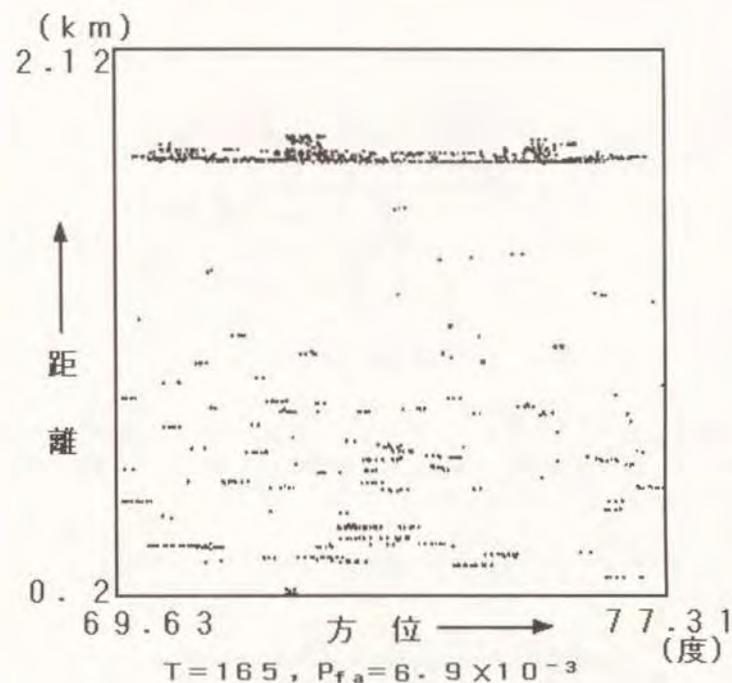


図4.8 処理後データ2

#### (5) 2極フィルタによる改善処理

前章で述べたように、測定データを実用レベルで用いるには、 $T/C$ 比を向上させるフィルタで処理することが必要である。ここでは、方位方向については回路の構成が簡単な2極フィルタ<sup>(4)</sup>で処理し、さらに距離方向に移動平均処理を行うことで、 $T/C$ 比を向上させた。2極フィルタの構成を図4.9に示す。

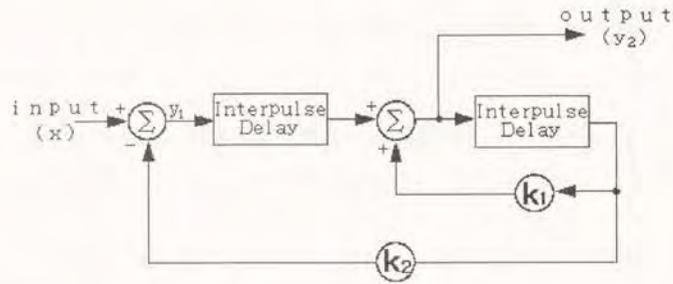


図4.9 2極フィルター

i番目のスイープ上の各サンプル位置におけるフィルタの出力はi-1番目のスイープに出力された値と演算処理する方法で求める。2極フィルタの入出力の関係は、次式で与えられる。

入力x(i)と出力y(i)は、

$$y(i) = \Phi y(i-1) + \Gamma x(i) \dots \dots (4)$$

ここで、

$$\Phi = \begin{vmatrix} 0 & -k_2 \\ 1 & k_1 \end{vmatrix}$$

$$y(i) = \begin{vmatrix} y_1(i) \\ y_2(i) \end{vmatrix}, \quad \Gamma = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$$

なお、y1(i)は中間演算出力、y2(i)は外部へのフィルタ出力である。また、k1およびk2は、アンテナのビーム幅内に入るパルスの数によって決まる定数で、今回の観測ではk1=1.64およびk2=0.67とした。この結果、T/C比は未処理の測定データに対して1.7dBの向上があった。

しかし、2極フィルターではT/C比は向上するものの誤警報は減らないので、この処理の後に先に述べたように距離方向に移動平均処理をおこなって、高い周波数成分の微小な変化を相殺させるようにした。移動平均処理の内容を図4.10に、また、処理の結果を図4.11に示す。この結果、誤警報確率が下がり検出確率が向上し、船舶の形状をクラッタの中から一層明確に認識できる可能性があることがわかる。

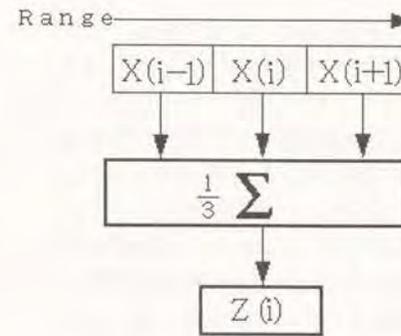


図4.10 平均化処理

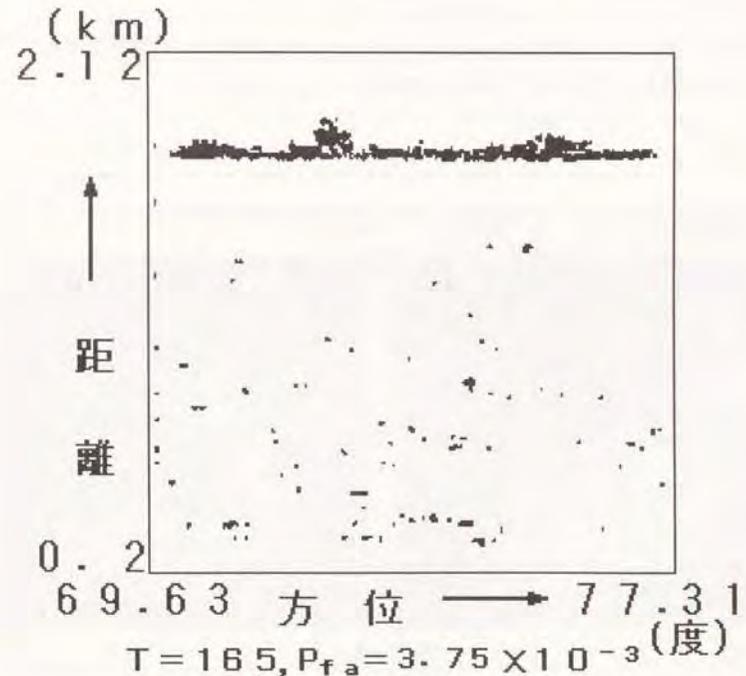


図4.11 処理データ3

(7) 効果

ミリ波レーダを用いた場合、船舶の形状を認識できる可能性はこれまでも指摘されているが、クラッタの処理を行うことで一層その可能性を向上できることがわかった。

ターゲットである船舶の検出確率を定めた時の誤警報確率の理論値と実測値を求めた際に、そのデータから推定した確率モデルが近似的にあっていれば、理論値と実測値に大差が出ないことを確認した。

この形状認識を可能にするためには、Threshold-Detection方式を用いる前の段階に、T/C比を向上させるフィルタ回路で処理を行うことが必要であり、今回は2極フィルタを用いて1.7dBの向上を達成した。

4.1.3 レーダ映像への画像処理の適用

画像処理でよく使用される空間フィルタには、

- コンポリューション形式のフィルタ
- 非コンポリューション形式のフィルタ

があるが、それらを使用したときの船舶用レーダ映像への一般的な効果について表4-2および表4-3にまとめて掲げる。

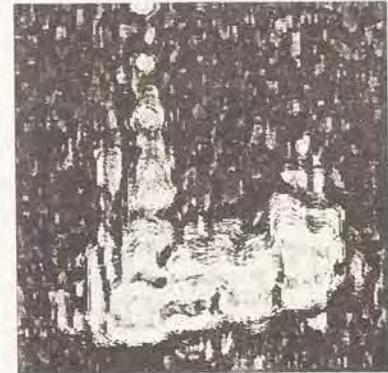
表4-2 コンポリューション形式の画像処理フィルタ

局所平均フィルタ	画像としてはぼける。ノイズは目立たなくなるが、低域通過フィルタと同じ特性を示すので映像のエッジが丸くなり、映像のシャープさが無くなる。空間フィルタの枠内の各要素に重み付け係数を付けることで、フィルタの特性を変えることもできる。
ローパス・フィルタ	映像のもつ周波数の高い成分を除去するため、映像はぼやけたようになる。この処理効果は微小な領域での大きな変化の影響を受けずに、全体の特徴が把握しやすい効果がある。
ハイ・パス・フィルタ	映像のもつ周波数の高い成分を通過させるので強度変化の大きい部分が強調された映像となる。エッジは強調される。

1次微分型フィルタ	水平方向、垂直方向それぞれの方向に微分するフィルタである。レーダ映像への信号処理の代表的なものとしてFTC (FAST TIME CONSTANT) 処理が挙げられる。レーダの信号は受信時にFTCの信号処理がなされる。FTCによる信号処理は、もやもやした反射信号の中に埋もれかけている鋭いエッジをもつ反射信号を微分処理により強調して現すことができる。この信号処理はレーダの開発当時から行われている古典的な処理方式である。レーダ信号の反射強度が平面的に並べ替えられた状態において、1次微分型フィルタ処理を行っても、元の信号や映像の状態の基本に対応させて考えた場合意義がわからない。
2次微分型フィルタ	2次微分型フィルタ ラプラシアンとも呼ばれる。低いコントラストの要素を除去し、孤立した1画素の信号に特に鋭敏に作用するため、レーダ映像の画像処理では使用を考えていない。参考結果として2次微分型フィルタで処理したレーダ映像の例を図4.12に示す。



原画像



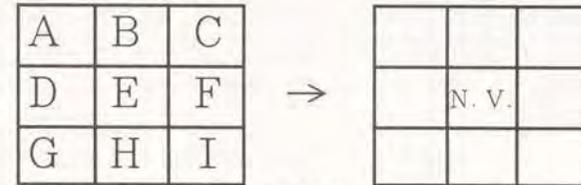
2次微分型フィルタで処理した画像

図4.12 2次微分型フィルタで処理したレーダ映像の一例

表4-3 非コンボリューション形式のフィルタ

ソーベル・フィルタ (Sobel Filter)	船舶の映像など大きい映像の外枠部分の検出に良い効果を示す。ソーベル・フィルタはエッジ検出に良い効果を示す。その構造は垂直・水平の両方向に対してエッジ検出効果を示せるように、垂直方向および水平方向のエッジ検出のオペレータを複合させた構造を持っている。いくつかの方式があり、図4-13あるいは図4-14のものがある。自乗和の根とするか、絶対値の和とするものがある。3X3の枠形状のものが使用されている。
ロバーツ・フィルタ (Roberts filter)	2X2の枠形状のオペレータで、相互に斜め向いの差の自乗和の根の値を出力値とするものである。レーダ映像の性質上、このフィルタが効果を示すような映像の例が思い当たらない。高い周波数成分を持つ部分を強調する。
メデアン・フィルタ (Median Filter)	枠内の中間値を出力するフィルタで孤立点ノイズの除去に効果がある。全体的にはぼやけた様子を示すがエッジを保存できる点が良い。エッジ保存型平滑化フィルタの代表的なものである。処理画素数が多くなることからハードウェア化するには近似型メデアン・フィルタなども考案されている。レーダ信号の処理のみならず広く画像処理で使用されている。
収縮フィルタ (Erosion Filter)	枠内の要素の最小の数値を枠中央の数値と置き換えるフィルタで、映像を収縮させる効果をもつ。具体的にはこのフィルタで処理すると映像は大きさが縮小してくる。細線化処理などに使用される。
膨張フィルタ (Dilation Filter)	Dilation Filter 枠内の要素の最大の数値を枠中央の数値と置き換えるフィルタで、映像を膨張させる効果をもつ。具体的にはこのフィルタで処理すると映像は大きさが拡大される。

Unsharp Mask Filter	このフィルタでは計算が2段階になる。まず、最初にローパス・フィルタ処理した数値を求める。次に、元の数値を2倍して、ローパス・フィルタ処理した数値との差を出力値として戻す。全体に暗くなるがエッジの部分は協調される。このフィルタは元の映像を画素毎に処理している。
---------------------	---



$$X = (C + 2F + I) - (A + 2D + G)$$

$$Y = (A + 2B + C) - (G + 2H + I)$$

$$\text{New Value (N.V.)} = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

図4-13 ソーベルフィルタ (自乗和の根の場合)

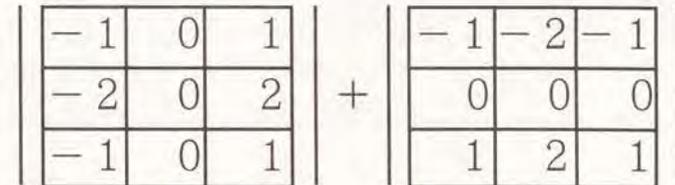


図4-14 ソーベルフィルタ (絶対値の和の場合)

#### 4. 2 レーダ映像の特徴の記述

##### 4. 2. 1 レーダ映像の特徴の記述

レーダ映像の分類のために、その特徴の記述を検討する。

航海士やレーダを業務として監視している担当者は、レーダ画面の映像に様々な特徴をとらえている。また、レーダの画面の映像と実体との関係をつなげるいくつかの特徴も見つけている。それらのいくつかの例を表4-4に掲げる。

表 4-4 レーダ映像の観測上の特徴と船舶の種類や形状との関連の例

レーダ映像の観測上の特徴	船舶の種類や形状上の関連事項
映像の大きさで相手船舶の大きさを比例させて推定する	映像の大きさ（面積）から、大中小程度の判定は可能である。
映像の大きさと強度の関係	映像が小さくても強度が高い映像は、コーナ・レフレクタなどの反射体を設置しているものが多い。例えば、ブイや小型漁船など。 逆に映像の面積が大きいのに、強度が低く、しかも、もやもやしていたり、変動しているものは偽像であることが多い。
映像の中での強度の分布状況	映像の中で特に強い部分の場所と船体構造とは相関性がある。
映像が尾を引いているように見える（残光性の短い形式のレーダでは観測できない）	速度が早く、伸びの反対側に進んでいる。
映像が長く伸びている部分がある	映像の伸びはその部分に強い反射を示す構造物があるか、多重反射を起こす構造物がある。

##### 4. 2. 2 特徴の記述の要素

レーダ映像の特徴を記述するための要素について検討した内容を表4-5に掲げる。

表 4-5 映像の特徴と記述の要素

映像の特徴	特徴の記述の要素
映像の大きさ（面積）	画素数
映像の形状	円形、楕円形、三角形、ひし形、矩形
映像の形状の変化	形状の変化が大きい、変化が少ない
映像の伸びの表現	伸びの長さ、伸びる場所 伸びの個数、伸びの強さ
映像の強さ	強度の平均値、最大値
映像の安定性	映像の強度変化が少なく安定しているか
偽像の可能性	面積からの検討、強度からの検討
強さの分布	極大値を示す個数とその位置
映像に尾があるか	（今回の観測測定方式では測定できないので対象外とする）
映像周辺部のボヤケ	ボヤケの範囲、形状

##### 4. 2. 3 特徴の表現方法のまとめかた

特徴の要素には、グループ化できるものや階層化できるもの、あるいは独立した要素となるもの、他の要素グループと相関性があるものなどがある。これらの要素を表現する方法と対象物の判定につながる方法を検討する。

次に表現方法を列挙する。

- (1) 3次元空間(座標軸)での表現  
関連する特徴の要素をそれぞれ座標軸に割当て、各要素を定量的に評価し立体的な位置関係を表現する。
- (2) 木探索法による表現と分類  
この方法は2項分布的に分類できる要素には適していると考えられるが、分類しにくい要素を含む場合には分類方法の検討を要する。
- (3) エントロピーでの表現  
対象のターゲットの表現が難しい場合、確かでないことを表現する”不確かさ”を数値的に表示することは興味ある問題であり、この表現方法の活用を考えたい。
- (4) F U Z Z Y関数での表現  
双眼鏡などで直接に対象物の形状を判定する場合であっても、鉱石専用船とタンカとの区別には迷うことがある。我々は甲板状のパイプの有無や構造物などで判断を試みるが、レーダ映像での判定にはそれ以上に厳しいものがある。そこで、いくつかの特徴の要素を持ったグループとして分類の境界を曖昧にして「・・・らしい」と表現する方法も機械に全てを任せずに監視者に後の判断を委ねる方法も活用すべきである。
- (5) 規格化による表現  
レーダ映像の特徴の要素を、予め定めてある規格に対応させる。沢山の観測事例から基本的要素を最低の規格として求め、いくつかの規格によって表現する。規格の種類と内容が増えることによって対象物を詳細に表現できる。
- (6) テキスチャ解析による表現  
レーダ映像の輝度の分布状態をテキスチャ解析し判定する。領域に分割し、その領域内の特徴カテゴリを数値で表現する。領域の前後左右の連携関係をチェーンで表現する。部分画の大きさと判定度の関係を検討しなければならない。領域の分け方によって細かな表現も可能になると考えている。

- (7) 加重係数マトリックスを用いた判断による表現  
沢山の観測事例から予めモデルを作る。観測したレーダ映像から特徴要素を抽出し、その各要素の観測値と加重係数マトリックスとの演算を行って判断して表現する。
- (8) 投影法による表現(テンプレート法の拡張)  
曖昧な要素も含め、その境界も曖昧なままで各特徴要素に基づいた数値を判定平面に投影させる。いくつもの要素が投影され、判定平面には輝度に対応して特徴量がまとめられる。この判定平面には輝度の分布と強さに対応した加重係数で処理した階級分け(テンプレート)を予め設定しておき、その結果で対象物を表現する。

最後に示した表現方法は、(1)～(7)項の全ての方式を統合化して取り扱えるものと考えている。

#### 4.2.4 欲しい情報とレーダ映像の特徴との関係

船舶の安全航行において、有効な他船の情報がレーダ映像のどの部分から得られるかを検討する。

##### (1) 自動衝突予防援助装置(ARPA: Automatic Radar Plotting Aids)

から得られる情報:

ARPAでは、数回の観測結果に基づいて、動きのある映像の位置情報から針路と速度の情報を算出し、ベクトルを表示し、航跡を追跡している。この情報に基づいて、衝突アラームや近接危険のアラームなどの警報や避航のための各種情報の表示や試行操船シミュレーションが可能であり、その情報を提供している。

しかし、次に挙げる多くの問題点がある。

- 情報は過去の航跡に基づいていること。
- 情報には意志が含まれないこと。
- 情報は過去のものであること。
- 映像の面積が大きい時、島や陸岸と認識して追跡を中止することがある。
- 映像が大きい時、追跡している位置が映像内で変化している。
- 小さな映像の時でも、追跡位置が必ずしも正確に追跡されていないことがある。

- 追跡のための予測位置がずればはじめる事がたびたびあり、誤った位置データを出力したり、追跡を失敗することがある。
- 映像の形状により追跡するポイントが変わる。
- 映像が他の映像に近接するとスワッピング（乗り換え）が起こることがある。
- 付近のクラッタに邪魔され、クラッタを追跡し始め、ついには目標を喪失することがある。
- 映像に分裂が起こると正常な追尾ができなくなる。誤ったデータの出力や分裂が回復する際に追尾位置を戻せず喪失してしまう。

ARPAの種類によっては、映像のサイズからターゲットのおおよその大小を判定して表示するものもある。サイズから追跡すべき範囲を考慮しつつ適切な範囲と位置で追跡できる機能が要求される。つまり、レーダ監視に熟練した者が判断しながら毎回毎に追跡位置を正しく定めるように、自動追跡機能が動作すればよい。このような機能はARPAの性能を向上させるためにも開発が要望されている。

### 4.3 総トン数の推定

#### 4.3.1 肉眼による船舶の総トン数の推定

肉眼で船舶の総トン数の推定を行うとき、船舶の実像の「重量感」をもとに経験的知識で補正しながら推定している。推定結果は船名録で調べることにより比較し、経験的知識を補正し、あるいは追加している。

ここで船舶の実像の「重量感」とは、対象とする船舶までの推定距離、視角、高度角、形状および奥行き等の要素から得られる視覚的感覚と定義し、総トン数とも比例的関係にあるものとする。肉眼で観測される船舶の実像は、喫水から満載状態か空船状態かの情報も得られ、その船舶のアスペクト・アングルも概略的に判断できる。そうして肉眼で観測された形状から、直接的には肉眼では見えない他の部分も類推して、総トン数の推定要素に加えていると考えられる。このように肉眼で行われる総トン数の推定には、相当の経験的知識が付加されている。従って、今後はレーダ映像からの推定についても統計的データに基づく補正や船体状況の推定に基づく補正などを考えていかなければならない。

#### 4.3.2 レーダ映像信号と肉眼での実像との対応

レーダで観測される船舶の映像は、PPI形式ではレーダの性能に応じて方位方向および距離方向に拡大されて表示される。PPI形式で表示される船舶の映像は楕円形等の形状となって表示されている。このようなレーダ映像でも対象とする船舶の部分のみ拡大するとアスペクト角の概略値や船の形状の概略を判断できることが報告されている<sup>(5)(6)</sup>。この部分的に拡大して対象物を観測することは、肉眼の場合に双眼鏡を使用して遠方の対象物を観測することと同じである。拡大したことにより、対象物の形状や動静等の判断が容易になる。部分的に拡大した対象物を観測する場合においても、可視光での実像とレーダで観測される映像とでは、分解能の差に基づく著しい差異がある。

しかし、共通する要素として、

(1) 水平方向の実像の拡がり、レーダ映像においても、水平方向への映像の拡がりとして考えられる。

(2) 対象物標を船として限って考えるならば、実像の高さは水面からその高さまで続く構造物が存在することを意味する。また船の側面は充分大きな反射断面積を有しており、甲板上の各種構造物もレーダ電波の反射体としては充分な大きさをもっている。従って、実像の高さが高いものはレーダ反射強度も強いと推定できる。

この2つの共通する要素を、レーダ反射信号から総トン数を推定する方法の基本的要素とした。

#### 4.3.3 レーダ反射信号からの船舶の総トン数の推定方法

総トン数を推定した船舶のPPI方式でのレーダ映像の部分、その船舶の上空から見た場合の投影面積に比例する要素と仮定して、レーダ反射信号が存在し分布している面積ということで「分布面積」と呼ぶこととする。「分布面積」内におけるレーダ反射信号の強度の平均値を求め、その値を「平均高さ」と呼ぶこととする。

「分布面積」および「平均高さ」も対象物までの距離に影響される要素であるので、距離の異なる対象物については距離補正を行う。距離の基準値は、ここでは1,000mにおき、映像の拡がり補正を「分布面積」に行い、また距離が異なることに基づく減衰補正を「平均高さ」に行なった。ところで、船舶の向きによって多重反射が生じたり生じなかったりすることで、分布面積が増減し、それによっても平均高さも変動する。この影響を除去するためにソーベルフィルタを用いた。多重反射で生じる映像は信号が幾分弱くなっている。輪郭を強調するソーベルフィルタによって弱い信号が無視できれば多重反射に

よる影響が除去されると考える。

また、レーダ信号は距離による影響も受ける。この影響を除くため、林<sup>4) 5)</sup>と同様の方法を用いて1000mを基準とする補正を行った。

分布面積を $D_{sn}$ とすると

$$D_{sn} = R_o \cdot S_t$$

$R_o$  : 距離1000mに対する距離比  
( $R_o = \text{距離} / 1000$ )

$S_t$  : ソーベルフイルタによって得られた輪郭内に反射信号が存在した部分のピクセル数

とした。

また平均高さを $H_{sn}$ とすると、

$$H_{sn} = K_R \cdot \Sigma S_s / D_{sn}$$

$K_R$  : 距離1000mに対する距離補正值 ( $K_R = R_o^3$ )

$\Sigma S_s$  :  $S_t$ におけるレーダ反射信号の強度の全加算値

とした。

この分布面積と平均高さから船舶の大きさの推定を行えると考える。

#### 4.3.4 総トン数の推定結果と考察

昭和61年当時、港湾監視用レーダを用いた観測<sup>(7)</sup>で、レーダ反射信号から求めた「分布面積」および「平均高さ」と総トン数との関係を図4.15および図4.16に示す。重量物積載船や自動車運搬船は全体傾向から大きく外れている。この理由は、それぞれの船形が一般の貨物船等に比較して異なることに因るものであろう。従って、コンテナ船で甲板上にも満載の状態にある場合は自動車運搬船と同様な外形となるので、この全体傾向から大きく外れるおそれがある。

「分布面積」と総トン数との相関係数は、自動車運搬船のデータを棄却した場合で0.86であった。また「平均高さ」は重量物積載船のデータを棄却した場合、総トン数との相関係数は0.82となった。「分布面積」および「平均高さ」について、自動車運搬船は「分布面積」では大きく外れているが、「平均高さ」では全体傾向に近い。また重量物積載船ではこの逆となった。

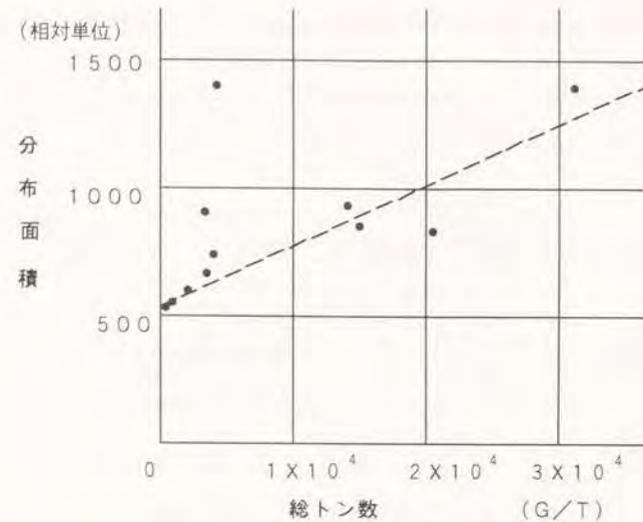


図4.15 総トン数と分布面積

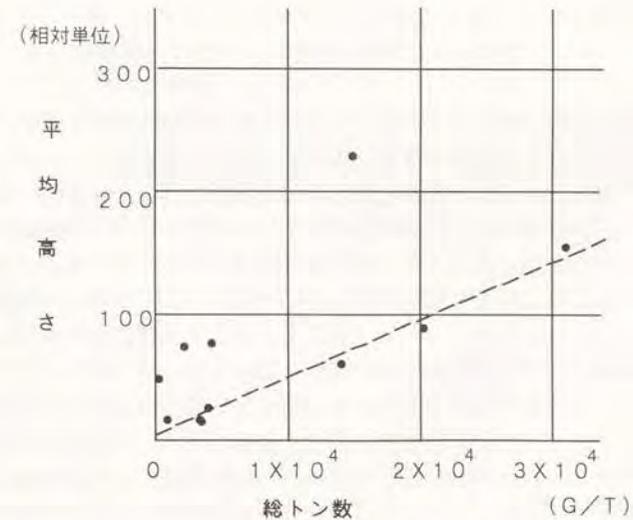


図4.16 総トン数と平均高さ

実船の観測例を多数収集し、補正が可能になるような連続したデータも収集した。その結果、補正によってさらに良い結果が得られるようになった。従来の方法での分布面積についての処理結果を図4.17に示す。

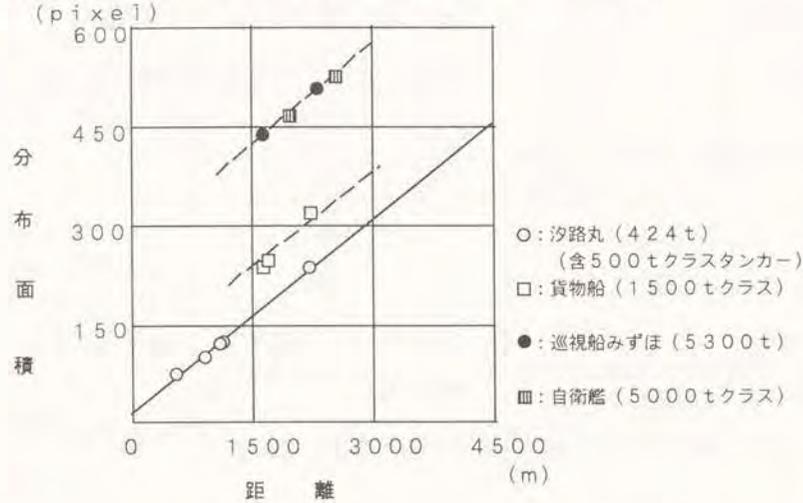


図4.17 信号の分布面積の距離による変化 (距離補正後)

図中の○は、距離の異なる『汐路丸』についての処理結果であるが、距離が遠くなるにつれて、分布面積が大きくなっている。したがって、従来行った距離補正が過大補正であったと考えられる。他の船舶についても同様のことが言える。ここで注目すべき点は、各船舶毎のデータが一次回帰直線に非常によく沿っている点である。また、各一次回帰直線はほぼ平行である。データ数は少ないが、分布面積に対する距離補正は船舶の大きさに関係なく、距離に対して同じ割合で過大に補正されていると言える。そこで観測したすべての船舶に関して『汐路丸』のデータの一次回帰直線と同じ傾きを持つ直線に沿うと仮定した。そして、その直線上の1000mの時のピクセル数をもって、船舶の分布面積とすることとした。その結果を図4.18に示す。観測されたすべてのデータが非常によく全体傾向に沿っている。一次回帰直線の相関係数は0.955である。平均高さについて処理を行った結果についても同様のことが言える。

分布面積、および平均高さに関する結果はいずれもデータが非常によく全体の傾向に沿っている。この処理方法を用いることによりレーダ映像データから

船舶のほぼ正確な総トン数を推定することが可能であると考えられる。

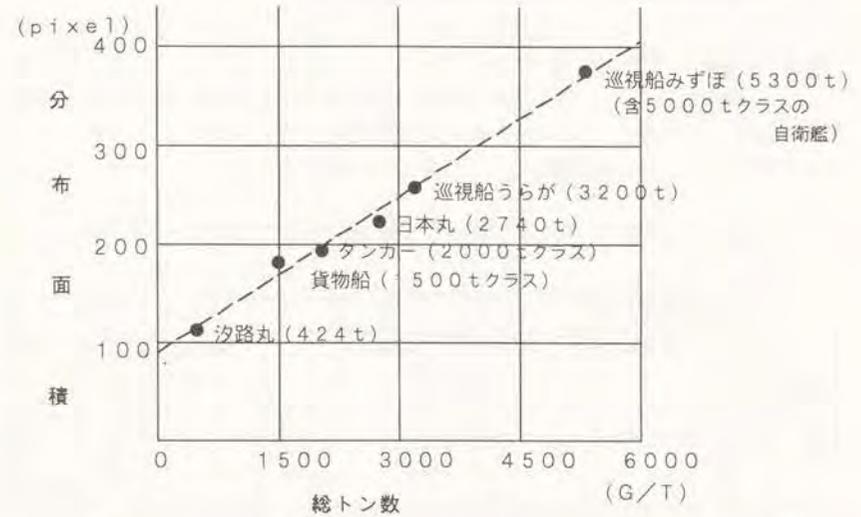


図4.18 信号の分布面積と総トン数 (距離1000mに換算後)

#### 4.4 アスペクト角の推定

##### 4.4.1 データ処理方法

アスペクト角を推定するための方法として次の3つの方法を検討した。

###### 1) 急峻な立ち上がり部分を検出する方法

抽出データを距離方向 (ここではY軸方向) に微分して、最大の微分値を急峻な立ち上がり部分として捕らえる。そして、その一次回帰線の方法を船舶の方向とし、アスペクト角を求める。

###### 2) 稜線を検出する方法

抽出データについて距離方向 (ここではY軸方向) の最大値を求め、その一次回帰線を稜線とする。その方向を船舶の方向とし、アスペクト角を求める。

###### 3) 輪郭を検出する方法

抽出データに、ソーベルフィルタをかける。ソーベルフィルタはX軸方向、あるいはY軸方向に差のあるデータを強調するフィルタで、これ

によって強調された線を船舶の輪郭線とする。輪郭線は楕円で、この楕円の長軸線をもって船舶の方向とした。

#### 4.4.2 結果と考察

港湾監視用レーダを用いた観測（昭和61年）において、レーダ反射信号の処理から求めたアスペクト角と实地調査したアスペクト角との差をまとめた結果を表4.6に掲げた。

表4.6 アスペクト角の推定結果

船名	観測時刻			アスペクト角*		
	レーダ観測	实地観測	時間差	レーダによる推定	海上での実測	差異
L丸	16:45	16:25	20分	156度	170度	14度
F丸	17:10	16:39	31分	144度	215度	71度
A丸	07:20	07:03	17分	71度	55度	16度
S丸 その1	07:30	07:30	0分	60度	60度	0度
S丸 その2	10:15	10:30	15分	150度	160度	10度

\*：ここでは、陸上固定点からの観測なので、観測対象船舶の船首方位を用いている。

この観測ではレーダと实地との観測に大きな時間差が生じてしまったことから比較が困難なデータもあるが、観測時間差の少ないものには±2.0°以内の誤差で求められているものもあった。また、当時の観測ではアスペクト角が0°あるいは180°を向いている場合のデータは収集できなかった。多数のデータをさまざまな条件にわたって観測し検討することが必要であることを当時も指摘していた。昭和63年4月からは研究用レーダ車を使用できるようになり、多数の観測が可能となった。さらに東京商船大学練習船「汐路丸」との間に、船首方位データを自動的に通信するシステムを試作し、正確な観測が実施できるようになった。

前項の3つの方法によって求めたアスペクト角を表4.7に示す。輪郭を検出する方法で求めた角度が最も安定している。他の2つの方法によって求められた角度は、+8.2~-28.1度までの大きな差異が生じているが、輪郭を

検出する方法で求められた角度は常時+5.1~+10.4度の差異である。この差異の傾向には一定のバイアスが見られるので、その原因がわかれば実用的な精度でアスペクト角を求めることができるであろう。ここで言う輪郭とは、船舶を真上から見たものではなく、レーダアンテナの位置から、レーダで船舶を見たときの輪郭である。

表4.7 各方法で求めたアスペクト角の比較

アスペクト角 (実測値)	急峻な立上り 部分の検出	稜線 の検出	輪郭 の検出
0.0	8.2	3.7	10.4
36.2	27.5	18.3	44.3
66.4	72.3	67.7	71.5
106.2	92.1	78.1	113.6

(単位:度)

#### 4.5 交差偏波による物標の分類に関する基礎測定

##### 4.5.1 はじめに

著者らが用いてきたレーダ信号は、水平偏波で送信し、水平偏波を受信するもので、その信号を用いて船舶のアスペクト角、大きさ、船形等の推定を行ない、成果を得てきた。しかし、さらに詳細な推定を行なうためには他の様々な推定方法と組み合わせることも必要である。

ここでは、物標とその物標からのレーダ反射波の強度と偏波面の違いに着目して行なった観測結果を示し、レーダによる物標の分類の可能性について述べる。

##### 4.5.2 観測装置の構成

レーダ映像データの収集に使用した観測装置の構成を図4.19に示す。信号はパソコンで制御されたサンプリング・インタフェースで10ビットに量子化され、フロッピディスクに保存される。測定したいターゲットを含む領域を効率よく記録するために方位ゲート回路とディレイ回路によりサンプリング領域を設定できるようにした。また、その境界線をP.P.I.画面上に表示できるようにしたので、任意の扇型の範囲について容易にデータを取り込むことができる。

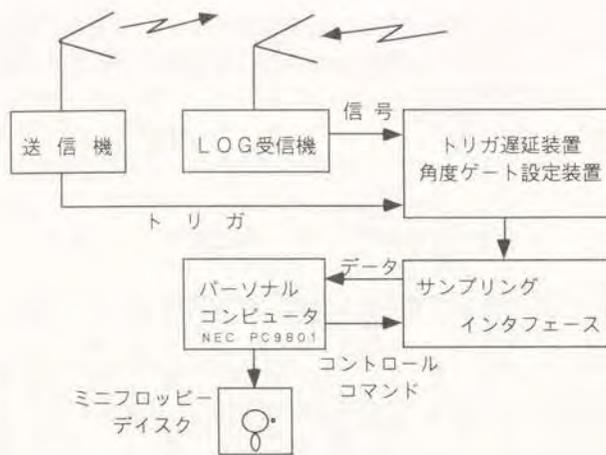


図4.19 観測装置のブロック図

レーダ映像信号のサンプリングは、レーダアンテナの旋回に合わせて256キロワードのバッファがいっぱいになるまで連続で数スキャン分のデータを取り込むことが可能である。使用したレーダ・システムの仕様等は表4.8に掲げる。

また観測に使用したレーダアンテナは3種類で、その性能および使用形態は表4.9に掲げる。

表4.8 観測に使用したレーダ・システムの仕様

送信部	
周波数	9,410MHz
尖頭出力	50KW
送信パルス幅	80ns
受信・データ処理部	
受信増幅特性	対数増幅特性
サンプリング周波数	16MHz
量子化ビット数	10ビット
バッファ容量	256K. Word

表4.9 観測に使用したレーダ・アンテナ

観測に使用したアンテナ	仕様および使用の形態
1)スロットアンテナ	長さ180センチ ビーム幅：水平1.2度、垂直20度 水平偏波での送信に用いた。 (以下、アンテナAとする。)
2)スロットアンテナ	長さ180センチ ビーム幅：水平1.2度、垂直20度 水平偏波から垂直偏波までアンテナの角度を変えて受信に用いた。 (以下、アンテナBとする。)
3)パッチアレイアンテナ	長さ50センチ ビーム幅：水平4度、垂直24度 小型の円盤型のレードームの中で水平に回転しているプリント板状のアンテナである 今回は水平または垂直に設置し、送信・受信に用いた。 (以下、アンテナCとする。)

#### 4.5.3 レーダ観測の方法

前章で説明した観測装置を東京商船大学の研究用レーダ車に搭載し、観測を行なった。ここでは2種類の観測について述べる。

##### (1) 2つのスロットアンテナによる観測

アンテナAとアンテナBを用いて観測を行なった。

アンテナAを通常の船用レーダと同様に水平に設置し、アンテナBを0度(水平)30度、60度、90度(垂直)と向きを変えて受信に用いた。設置状況を、図4.20に示す。

受信用のアンテナを水平に設置するとレーダ反射波の中の水平偏波成分

を受信し、垂直に設置すると垂直偏波成分を受信することになる。同じ物標について、受信用アンテナの角度を変えて反射波を受信し、記録した。

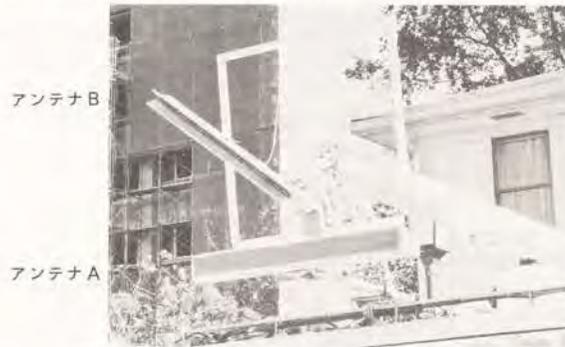


図4.20 アンテナAとアンテナBの設置状況

(2) スロットおよびパッチアレイアンテナによる観測

アンテナCを用いて、港湾近くで観測した。2枚のアンテナを水平と垂直に設置して、水平偏波送信・水平偏波受信と水平偏波送信・垂直偏波受信を行なった。設置状況を図4.21, 22に示す。どちらも同じ領域を観測している。



図4.21 水平偏波送信  
水平偏波受信



図4.22 水平偏波送信  
垂直偏波受信

4.5.4 結果と解析

(1) 2つのスロットアンテナによる観測の結果と解析

観測した中からなだらかな丘と2種類の船舶を選択し、受信偏波面の角度とそれぞれの受信強度の関係を図4.23に示す。

なだらかな丘では0度から30度に変えたとき受信強度が急激に弱くなり、ほとんど雑音レベルとなっている。

貨物船は60度から90度に変えたとき受信強度が雑音レベルとなっているが、浚渫船の受信強度はほとんど変化していない。

これらの結果から次のことが言える。

- ・物標の形状はレーダ電波の反射波の偏波面に影響を与える。
- ・丘のように表面の形状がなめらかな物標の場合、送信波の偏波面は回転することなく反射される。
- ・同じ様な船舶でも形状が異なると反射波の偏波面への影響が異なる。複雑な形状を持つ船舶の方が反射波に垂直偏波成分が強く含まれる。なお、水平偏波成分の強さについては船舶の大きさが関係することがすでに報告されている(9), (10), (11)。

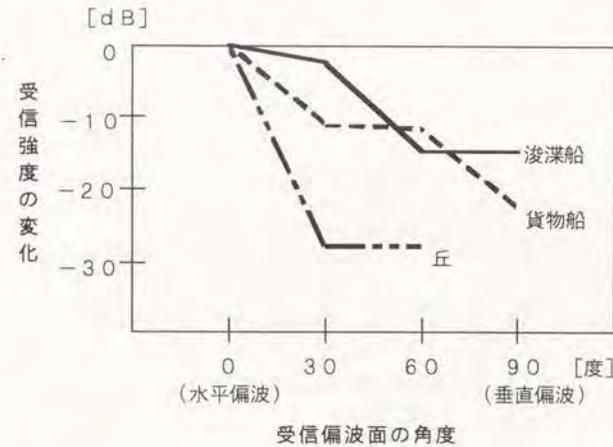


図4.23 受信偏波面の角度と受信強度の関係

(2) スロットおよびパッチアレイアンテナによる観測の結果と解析

観測したデータから建造物、防波堤、いけす、ブイを対象とし、その部分のデータを抜き出して(以下対象データという)最大値、平均値、中央値を求めた。いずれの値も水平偏波成分のデータと垂直偏波成分のデータの両方について求めた。さらに、水平偏波成分のデータの値と垂直偏波成分の

データの差の値を差分値としその最大値、平均値、中央値を求めた。差分値が大きければ、水平偏波成分の強さと垂直偏波成分の強さの差が大きい、つまり対象物の形状はなめらかであるということになる。これらの値のグラフを図4.24～図4.27に示す。最も特徴的なのは、図4.24の建造物のグラフで、垂直偏波成分の値が水平偏波成分の値より大きくなっている。地面あるいは水面から垂直に立ち上がっているという点では建造物に似た形状の防波堤の場合も平均値、中央値は垂直偏波成分の方が大きい値を示している。しかし最大値が小さくなっているのは上部構造物の表面のなめらかさによるものと考えられる。防波堤は水面上はなめらかであるが、建造物は所々に窓、さく等の凹凸や垂直な部分がある。そのためより強い反射波が所々に得られるので、最大値も大きくなると考えられる。

垂直な部分を持つという点では、部材が格子状に組み立てられているいけすも、同様である。図4.26のいけすのグラフでも垂直偏波成分の平均値、中央値が水平偏波成分の値より大きくなっている。いけすは水面からの立ち上がりがほとんどないので、信号自体が弱いため防波堤に較べて差は顕著ではないが、同じ傾向を示していると言える。

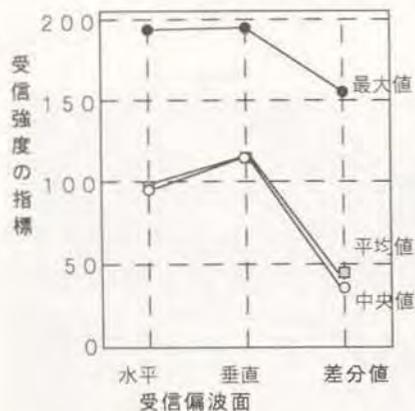


図4.24 建造物のデータの処理結果

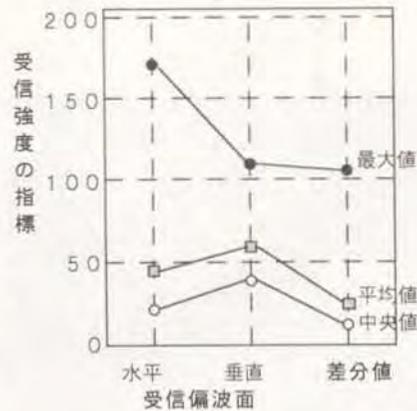


図4.25 防波堤のデータの処理結果

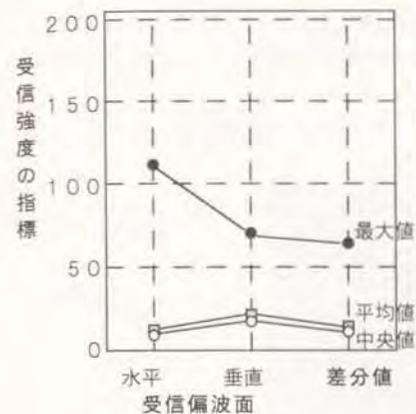


図4.26 いけすのデータの処理結果

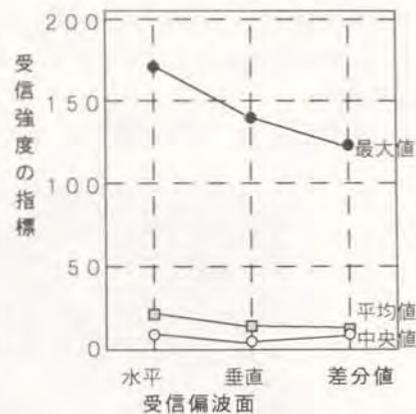


図4.27 ブイのデータの処理結果

#### 4.5.5 まとめ

物標の反射面の複雑さの度合いはその反射波に含まれる水平あるいは垂直偏波成分に影響を与えていることが確認できた。

この観測は基礎実験として建造物等を対象としたが、物標の形状と表面の状態を知ることができる感触を得た。今後様々な種類の船舶を対象とし、これまで報告してきた画像処理を用いた解析と併せて、船種の識別を行いたい。

#### 4.6 レーダ映像からの情報抽出のまとめ

兵庫県明石海峡で約1.5海里の沖合いを航行する船舶のレーダ映像を図4-28に示す。また、空間不変化した映像の1例を図4-29に示す。この映像は船長約400mの鮫石船用船であり、左側が船首、右側が船尾である。船尾部分で上(遠方)に伸びている部分は船橋とマストなどの構造物がある部分と一致している。また船首部分にも一部映像が伸びている部分があるが、これは船首部にあるフォア・マストの位置に対応しており、このレーダ映像からもおよその外形は推定できる。これは映像を拡大したことによる結果であるが、第4章で述べてきた映像の特徴の表現方法、総トン数の推定結果などを総合的に判断し、船種の推定に導きたいと考えている。

船種の推定を自動的に行うには、映像の特徴と船種の特徴をそれぞれ分類内容を記号や数値で行えるように整理しなければならない。整理の基礎として、

レーダ映像を空間不変な形式に規格化できれば効果は大きい。しかし、現状ではレーダ映像は対象物のある1方向から観測したもので陰になった部分の情報はない。

レーダ映像処理の全体的な流れについて、図4-30に示す。

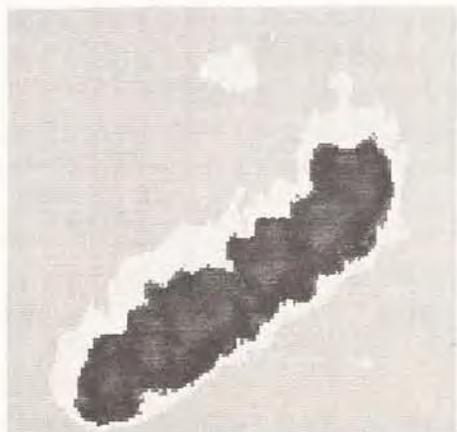


図4-28 鉱石専用船のレーダの映像例

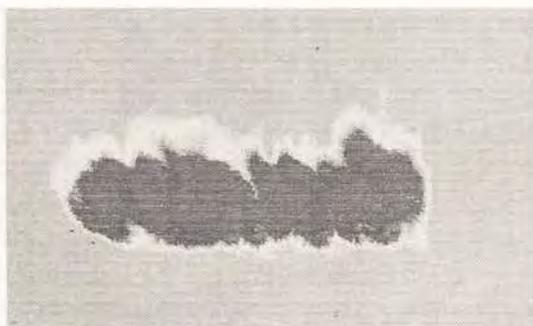


図4-29 空間不変処理した上図の例

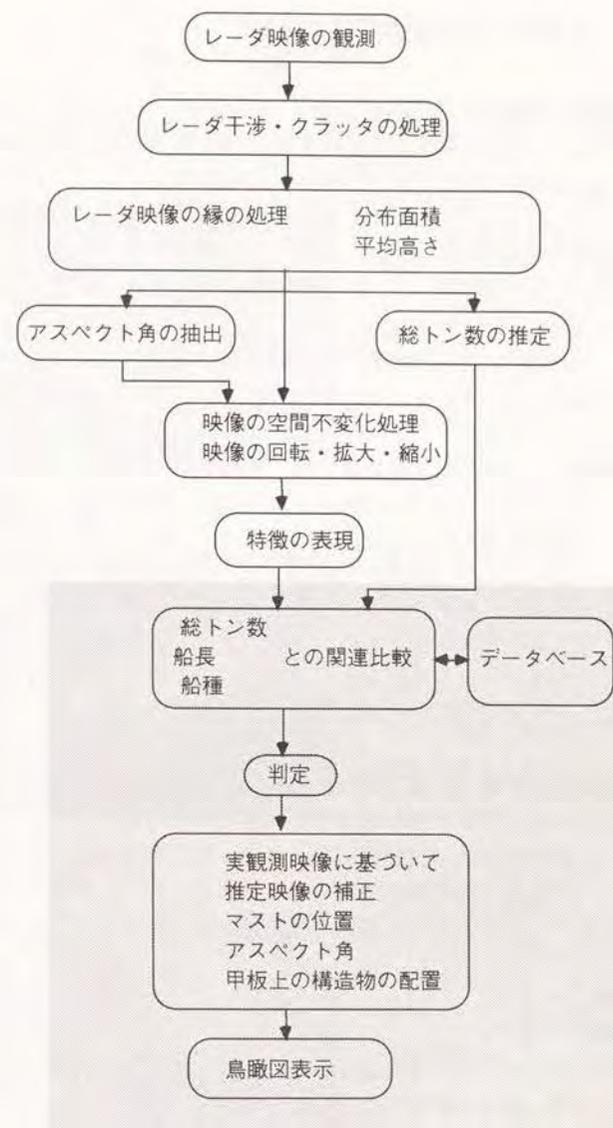


図4-30 レーダ映像処理の全体的な流れ  
(網掛けされた部分は第5章で述べる)

## 5. レーダ映像からの推定実像の構成

### 5.1 推定実像の構成方法の概要

レーダの映像表示方式の1方式としてのPPI表示方式は、優れた方式である。また、ある観点においてARPAのような処理されたレーダ映像よりも何も処理されていないレーダ映像の方が好ましいこともある。著者は処理していないレーダ信号や映像には、その中に極めて有用で重要な情報が含まれていることをこれまで述べてきた<sup>1)・2)・3)・4)</sup>。しかし、ARPAでは、映像の位置の情報だけを使用しているだけである。つまり、レーダの反射信号の中に含まれている多くの有用な情報は無為に捨て去られている。そのような現実から、多くの航海士やレーダの監視者たちは信頼のおけるレーダ監視のためには処理されていないレーダ映像表示を好んでいる。著者は多数のレーダ観測実験から得られた経験的および統計的な情報を使用して、モデル船としての基本的な模擬的な実像パターンを作成した。この模擬した映像は、観測したレーダ映像ばかりでなく知的な情報も加えてある。コンピュータ・グラフィックスで作成した映像には、推定した大きさ、推定した船長、推定の総トン数を用いた映像のボリュームおよび推定の形状を上甲板上の構造物の特徴で示している。さらに、推定されたアスペクト角で映像を変形させた。映像の表示方法は多数あるが、著者らは自船の背後上方から見た鳥瞰図の方式での映像表示を試みた。この表示方式は昼夜にかかわらず自船の周囲の状況を、即座に認識できる優れた方式と考える。

レーダ映像から実際の映像を推定して構成する方法として、大型な船舶の場合に限っているが、甲板部分から下の船体は同一の構造とした。実際の場合にも船種の特徴は甲板上の構造物にあるので、ここでは同様に甲板上の構造物の形状をレーダ映像の解析結果に対応させて表現した。また、アスペクト角（針路の交差角）に対応させて推定像も旋回させた。

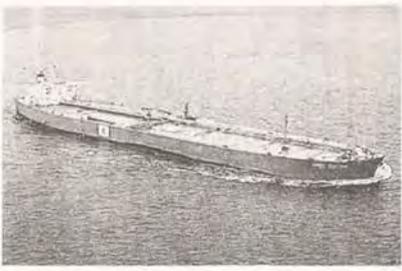
### 5.2 船種・船形の推定

#### 5.2.1 船種の分類

船種は大きく分けて、ここでは表5.1のように分類する。総トン数での比例関係もあるので、総トン数も判別の要素となる。

表5.1 船種の分類と船形の特徴

船種の名称	船形の特徴
コンテナ船 	船首部にはマストがあり、船橋楼は一般に船尾部分にある。甲板上にもコンテナを搭載している。コンテナの有無で船種を識別できる。
自動車専用船 	箱型の大きな船体をしており、船首部に船橋楼がある形式が多い。上甲板にもフラットな側板が張られているので一見して識別できる。また船側には自動車の積み卸しのための乗降口と設備を備えている。
鉱石専用船 	タンカとも類似した形状をもっているが、甲板上の設備が判断の要素となる。船倉を閉鎖する蓋や、そのための設備があるが平坦である。

<p>油槽船 (タンカ)</p> 	<p>鉱石専用船とも類似した形状をもっているが、甲板上にパイプが前後に走っている。また船体の中央付近に蒸発ガスを船外に放出するためのパイプが数本立っている。船橋楼は船尾部分にあるものがほとんどである。</p>
<p>旅客船 (フェリーを含む)</p> 	<p>上甲板上に居住区域が多くあるので、船首から船尾まで構造物が通っている。大きさはいろいろ有り、台船型のフェリーでは船体中央部分に前後左右に大きな開口部分があり風が通る構造になっている。</p>
<p>特殊船</p> 	<p>特殊な用途や作業のための船舶とする。たとえば重量物運搬船、クレーン船、大型作業船および帆船などのように外形が特異な船舶とする。しかし、外形は旅客船に近いが自衛艦や巡視船なども特殊船とする。</p>

<p>従来型貨物船</p> 	<p>三島型に代表される船形。船首楼船橋楼および船尾楼の3つの上甲板上の構造物が遠方からみると島が3つ連なっているように見えることからこの名称がある。</p>
<p>小型貨物船</p> 	<p>総トン数で500トンから1000トン程度の小型貨物船は凌波性をよくするために船首部が少し高くなっているが、船体中央部は海面から1メートル程度しかない。船尾部に船橋と居住区がある形式が多い。</p>
<p>漁船 (総トン数300トン程度)</p> 	<p>小型貨物船を短くした様な形状であるが、凌波性を確保するために船首部が高くしてある。船体はマストやその他の構造物が複雑に設備されている。</p>
<p>小型漁船 (遊漁船を含む)</p> 	<p>FRP (強化ガラス繊維樹脂) で建造されたものが多い。船体中央部より後方に小さな船室がある構造をもっている。レーダに映りにくいためレーダ・レフレクタを装備している船もある。</p>

### 5.2.2 船形の推定可能性 (ミリ波レーダ映像データの収集)

#### (1) 観測に使用したレーダの概要

船舶からのレーダ反射信号の観測は、表5.2に示した性能を持つ港湾監視用レーダを使用して実施した。このレーダは、周波数が13.95GHzであり、一般の船舶用レーダで使用されている9.4GHzよりも高く、方位分解能の向上が意図されている。従って、アンテナの水平分解能は0.25度となり、一般船用大型レーダのアンテナの水平分解能(0.9~1度)の4倍の分解能である。

表5.2 観測に使用したレーダの要目

周波数	13.95 GHz
出力	40 kW
パルス幅	0.1 $\mu$ s
ビーム幅 (水平)	0.25 度
偏波面	水平
アンテナ高さ	40.2 m
パルス繰返し周波数	3 kHz
アンテナ回転数	10 RPM

レーダ反射信号の収集にあたっては、レーダ・アンテナが一回転する間に必要な範囲のレーダ反射信号を計測・記憶できる形式の装置で収集できることが望ましい。しかも、なるべく短い標本化周期で観測されることが望ましい。今回のレーダによる観測では10nSで標本化できる波形記憶装置を使用した。性能上の理由からアンテナの回転角度0.25度毎に1回ずつ波形データを磁気記憶装置に転送する方式となった。従って、観測時に必要な角度範囲まで、記憶と転送を繰り返すこととなり、観測範囲が広い場合にはかなりの所要時間を必要とする。

#### (2) レーダ反射信号測定装置の構成

波形データ収集の角度範囲の設定、転送、記録した波形データのファイル名の管理、波形記憶装置への記録開始トリガの発生および信号処理装置の制御等を行いやすいようにパーソナル・コンピュータを使用した。この装置の全体構成を図5.1に示す。1つの信号波形を記録するために要する時間は、転送に要する時間を約10~14秒も必要としたので、スキャナーの2~3回転分

(12~18秒)を必要とした。そのため5度の角度範囲の記録には、約5分間の観測時間が必要となった。

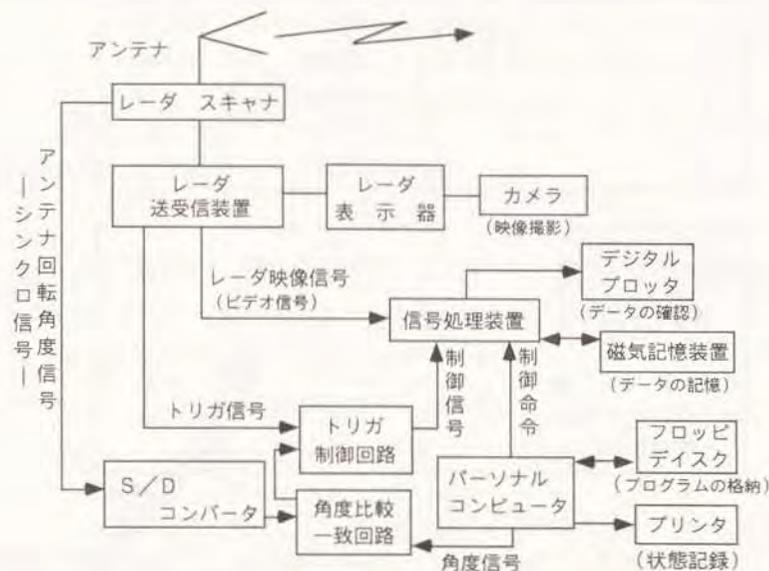


図5.1 観測装置の構成

#### (3) レーダ反射信号データの収集

京浜港横浜区の錨泊区域に錨泊していた延べ34隻の船舶を対象にデータを収集した。データの収集ができた船舶の種類および総トン数等を表5.3に掲げた。錨泊中の船舶であっても測定開始から終了までに5~10分間の時間が経過した場合、錨泊中のふれ回りや、小型舟艇の接近によって、レーダ映像がくずれるなどの問題があったので、収集したデータの中から処理、解析に適する有効なものを選別して使用することとした。

表5. 3 レーダで観測した船舶の総トン数と船種

総トン数	
1000トン未満	3隻
1000トン以上3000トン未満	6隻
3000トン以上10000トン未満	9隻
10000トン以上20000トン未満	7隻
20000トン以上	4隻
不詳	5隻

船種(用途)	
貨物船	10隻
自動車船	8隻
重量物船	5隻
油槽船	4隻
コンテナ船	4隻
材木船	3隻

(5) レーダ反射信号データの処理

レーダ反射信号データはスキャナーの回転角度で0.25度、標本化周期は10nS(距離にして1.5m)で標本化されている。このようなデータは極めて膨大な分量のデータとなるため、前処理としてWater-fall図形式で表示し、該当部分を抽出した。Water-fall図形式の一例を図5.2に示す。抽出した部分を、反射強度に従って疑似カラー化したB-Scope方式で表示しデータの全体的な概要が把握できるように処理した。

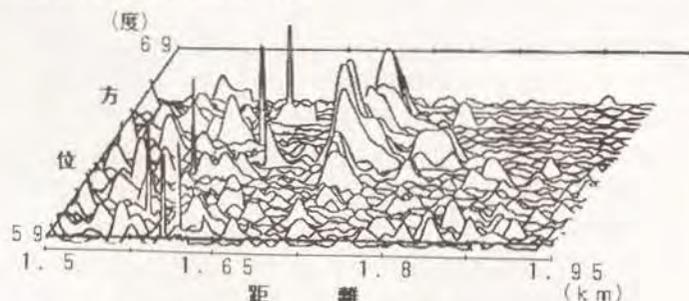


図5.2 Water-fall図形式で表現したレーダ反射信号

しかし、この2形式の表示方法は、概要を知るためには適しているが、データを詳細な部分にわたって解析する目的には不適である。そこで、データの詳細を解析する目的のために、レーダ反射強度の数値を分布図として表示した図の上に、反射強度の等強度線を補助的に記入した。記入された等強度線をもとにアスペクト角を求めるための「信号分布の傾向線」を記入した。この「傾向線」の角度がアスペクト角に相当するものである。比較のため海上からの実地観測で求めたアスペクト角も記入してある。

レーダ反射信号強度の分布を図5.3~5.6に示す。図中の船の投影図は実船を写真撮影した資料をもとに同縮尺に合わせてある。

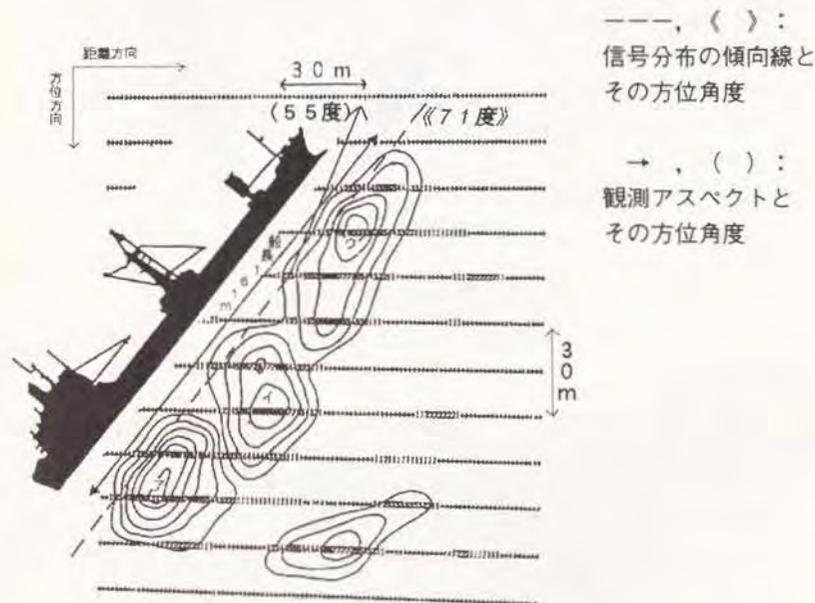


図5.3 レーダ反射信号強度分布図  
(重量物積載船, 15,000G/T)

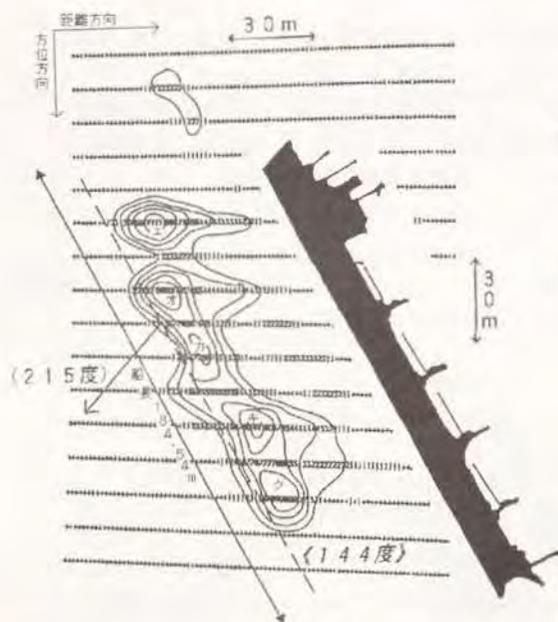


図5.4 レーダ反射信号強度分布図  
(貨物船, 20, 700G/T)

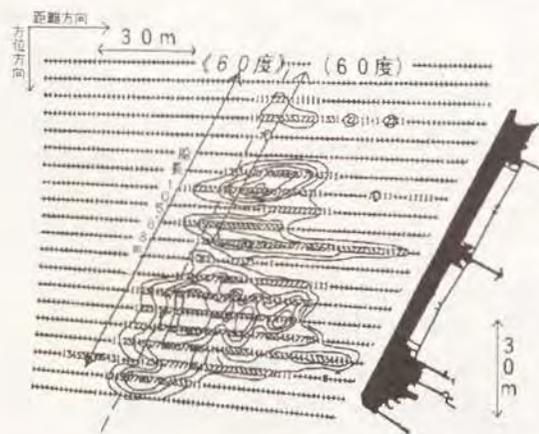


図5.5 レーダ反射信号強度分布図  
(材木船, 3, 900G/T)

---, < > :  
信号分布の傾向線と  
その方位角度

→, ( ) :  
観測アスペクトと  
その方位角度

---, < > :  
信号分布の傾向線と  
その方位角度

→, ( ) :  
観測アスペクトと  
その方位角度

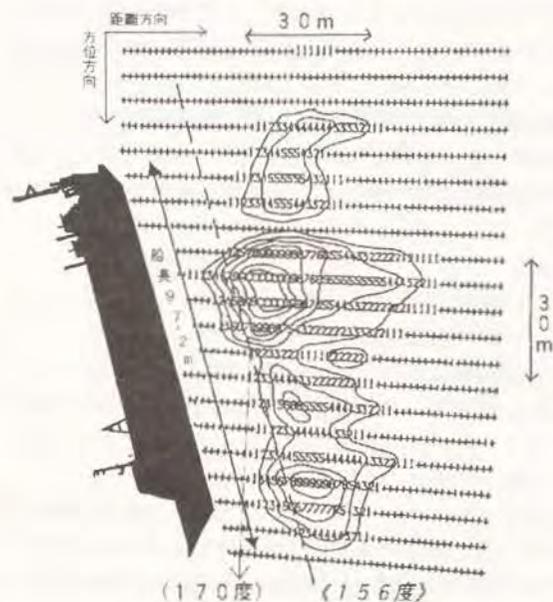


図5.6 レーダ反射信号強度分布図  
(自動車船, 1, 300G/T)

---, < > :  
信号分布の傾向線と  
その方位角度

→, ( ) :  
観測アスペクトと  
その方位角度

#### (6) 船形の推定

図5.3~図5.6において、該当船舶の側面からの投影図を描いてある。この投影図と等強度線とを比較すると、船体構造と強い反射を示した部分とが対応していることが認められる。今回のレーダ観測では方位拡大効果が少ない結果が得られたので、船体構造との対応が比較しやすかったことも一因であろう。図5.3に示した重量物積載船の例では、

- アの部分が船のハウス部分
  - イの部分は少し方位はずれているが中央の重量物用デリッククレーン部分
  - ウの部分は船首部のジブクレーンと船首楼
- に対応するものと推定される。

また、図5.4に示した大型貨物船の例では、ハウス部分とジブクレーン部分とがそれぞれ強い反射を示している部分と対応している。図5.5では、船体構造の差異に基づく多重反射の影響と思われる反射信号の長い部分がある。この原因はハウス部分での構造物が多重反射を起こして反射信号が長く伸びた

と考えられる。また、船体の中央付近のデリックポスト下部のパイプ形式の支柱構造（投影図ではわからない）によって、発生したと確定できる多重反射偽像が長く伸びた部分がある。

図5.6は自動車運搬船の例である。反射強度の分布の強弱変化が他の例に比べて少ない様子が認められる。自動車運搬船外形上の特徴と対応づけられる。

以上の結果から船体の形状や甲板上の構造物の配置の概略を知ることができると考えられる。

### 5.2.3 船形の推定可能性（X帯レーダ映像データの収集）

#### （1）観測に使用したレーダの概要

船舶のレーダ映像の観測を船舶用Xバンドのレーダを使用して実施した。このレーダは、周波数が一般の船舶用レーダで使用されている9.4GHzで、アンテナの水平分解能は0.6度で、一般船用大型レーダのアンテナの水平分解能（0.9～1度）よりも若干分解能に優れている。

レーダ反射信号の収集にあたっては、レーダ・アンテナが一回転する間に必要な範囲のレーダ反射信号を計測・記憶できる形式の装置で収集することが望ましい。しかも、なるべく短い標本化周期で観測されることが望ましい。今回のレーダによる観測では25MHz（40nS）で標本化できる波形記憶装置を使用した。

#### （2）レーダ反射信号測定装置の構成

パーソナルコンピュータは、サンプリングインターフェースに制御命令を送るとともに、記録した波形データの管理も行う。信号は8ビットで量子化され、メモリ、バッファを通してフロッピーに保存される。この装置の全体構成を図5.7に示す。

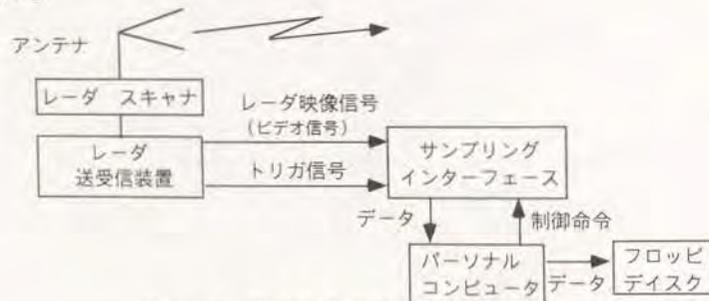


図5.7 観測装置の構成

#### （3）レーダ反射信号データの収集

千葉県館山湾に錨泊していた船舶を対象にデータを収集した。館山湾は弓形の海岸線を持っているため、海岸沿いにレーダ車で移動することにより湾内に停泊している船舶を様々な方向と距離で観測することができた。

今回はレーダアンテナの旋回に合わせてデータを取り込んだ。取込み開始角度と終了角度は任意に設定することが可能で扇形の範囲のデータを1メガバイト分取り込むことができる。

#### （4）データ処理方法

船形の推定については将来自動化を考えているが、そのアルゴリズムを確立するためにも、まず人間がレーダ映像から船形の特徴量を得られるようになることが必要である。そこで前処理後の抽出データに擬似カラーをつけて微妙な信号強度の差異を分かりやすくし、大型のディスプレイに拡大して対象船の実像と比較した。

#### （5）結果と考察

結果の一例として巡視船の処理結果を図5.8に示す。図中に示されているレーダ観測位置（R）は概略のレーダ観測位置の方向を示している。明るい白色の部分は距離方向に信号の弱い映像が伸びており、背が高く、また多重反射を生じやすい構造物（アンテナ等）がある。この巡視船は前部に多数のアンテナを備え、後部にヘリポートを持つ構造で処理結果と実像がよく対応しているといえる。ここでは白黒4階調で表示しているが、実際の処理ではカラー256色表示で実施されており、微妙な色の違いから船舶の構造物に関する情報をより多く得ることができる。



図5.8 画像処理結果の一例

### 5.3 船種の推定による映像の構成

#### 5.3.1 レーダ映像に含まれている経験的情報

多くの航海士やレーダの監視者たちはレーダの生ビデオを好んでおり、事実、信号の中にはターゲットに関する多くの有用な有効な情報を含んでいる。著者はかねてより、そのことを指摘してきていた。しかし、現在、それらの有効な情報を活用した表示システムは無い。ARPAではターゲットの位置情報のみを使用しているものが多く、一部には映像の大きさからターゲットの表示シンボルの大きさを変えているものがある。

著者は形状、大きさおよびその他のターゲットの特性とレーダ・エコーとの関係を研究してきた。

まず第一に、木板と砂で人工的な凹凸を作り、レーダの反射信号に関する基本的な実験を行い、観測されたレーダの生ビデオに人工的な凹凸からの情報が含まれていることを認識した<sup>5)</sup>。次に多数の船舶に関する実験観測を行って、船舶の構造や大きさに関する情報が、同様に生ビデオの中に含まれていることを認識した。多数の船舶の基本的な観測によって得られた、レーダの生ビデオや映像に含まれている経験的な情報を次に示す。

- (1) 上甲板上に複雑な構造物を持つ船舶のレーダ映像は、映像に長い伸び(以下、ブリップという)がある。
- (2) 高い構造物や大きな船橋部分等を持つ船舶の映像は、長いブリップと信号の強い立ち上がりを示す。
- (3) 船舶のレーダ映像の大きさと平均強度はその船舶の総トン数と良い相関性を示す。著者らは海上実験において良い結果を得ている。
- (4) 船舶のレーダ映像は、数種類の範疇、たとえば、タンカー、貨物船、自動車専用船あるいはコンテナ船などの映像に区分けすることができる。
- (5) 目標とする船舶のアスペクト角は、特殊な画像処理用のフィルタで処理することで、10度以内の誤差で推定できる。

これらの有効な情報を使って、その情報から基本的な模擬的な実像パターンを作成した。作成にあたっては観測したレーダ映像をつかうばかりでなく、経験的および統計的な情報も加えて映像を作成している。

#### 5.3.2 船種の推定

観測されたレーダ映像を左側を船首にして正横方向に向けて、船体部分を5等分に分ける。判別の要素として、各部分の映像の状態を映像の伸びが長い部分の位置、反射強度が強い部分がある位置で調べた。この場合、伸びが長い部分、強度が強い部分は1箇所に限らず複数の位置を指定しても良いが、特に長

くあるいは強い部分が無い場合は船種不明として扱った。

区分した船種は次の4種類の船舶とした。

- ・バルク船(貨物船)
- ・コンテナ専用船(以下はフルコンと呼ぶ)
- ・タンカ
- ・自動車専用船(以下はPCCと呼ぶ)

観測した総数は76隻で、バルク船が36隻、フルコン、タンカおよびPCCがそれぞれ13~14隻ずつである。

#### (1) 強度分布の観測結果

観測結果を図5.9に示す。その結果は次に示すとおりである。

- |         |            |
|---------|------------|
| バルク船では、 | 全体、中央部、後部。 |
| フルコンでは、 | 前部、後部。     |
| タンカでは、  | 全体、中央部。    |
| PCCでは、  | 前部、後部。     |

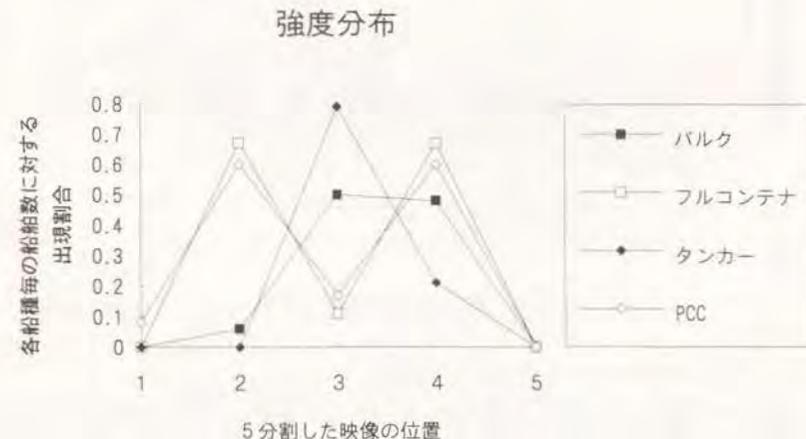


図5.9 強度の分布の観測結果

(2) 伸びの分布の観測結果

観測結果を図5.10に示す。その結果は次に示すとおりである。

- バルク船では、 前部、中央部、全体。
- フルコンでは、 中央部、後部、全体。
- タンカでは、 中央部、特に伸び無し。
- PCCでは、 前部、後部。

観測の結果で特にタンカでは、観測数は少ないものの8割の結果が伸びの位置が不明で特に伸びている部分がなかった。

伸びの分布

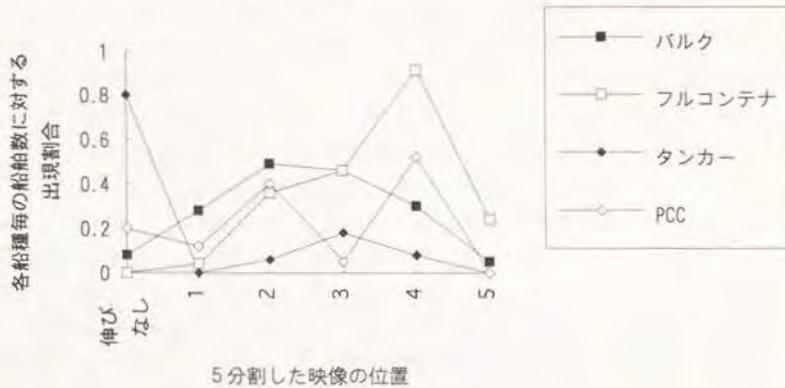


図5.10 伸びの分布の観測結果

(3) 強度と伸びの分布の観測結果と船種との対応

強度と伸びの分布の観測結果から、船種の識別に関して次のことが言える。

- ・フルコンとPCCは類似している。
- ・タンカはフルコンとPCCとは類似していない。

これらの結果を図形的に表現した例を図5.11に示す。

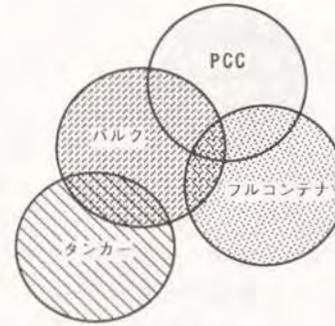


図5.11 船種の分布モデル

5.3.3 船種の推定方法と判定結果

(1) 判別要素の加重化

前項で述べた2つの判別要素の他に、強度と伸びの要素に次の3要素を加えて判別する方法を試みた。新しく加えた3つの要素は、いずれもレーダ映像の観測結果から用意に抽出しやすいことが理由である。

- ・強度の分布 (以下, 要素 A とする)
- ・伸びの分布 (以下, 要素 B とする)

新しく加えた要素。

- ・映像の輪郭の明瞭さ (以下, 要素 C とする)
- ・映像の等化的横幅 (映像のピクセル数/映像の全長) (以下, 要素 D とする)
- ・映像のピクセル数 (以下, 要素 E とする)

これらの要素は、船種と相関性が高いものと逆の相関性を示すものもある。そこでこれらの要素に加重係数を掛けた評価式を判定する4種類の船種毎に設定する。

各要素の個々の加重係数は観測した船種毎のデータから求める。

例えば、各要素の加重化された評価値は、

$$1 \leq \text{各要素の評価値} \leq 2$$

に収まる範囲で加重係数を設定していく。特に負の相関性は考慮せず、その場合には加重係数は1のままとした。

(2) 簡便な評価式

各判定要素には、個々の船種に関して要素間に相関性の有無がある。そこで

次の3つの簡便な評価式を作成し、比較を試みた。

$$P_1 = A + B + C + D + E$$

$$P_2 = A \times B \times C \times D \times E$$

$$P_3 = A \times B + 3 \times C + D \times E$$

ただし、A, B, C, D, Eは判定要素の各加重化された評価値である。この方式による比較評価、船種判定までの過程を図5.12に示す。

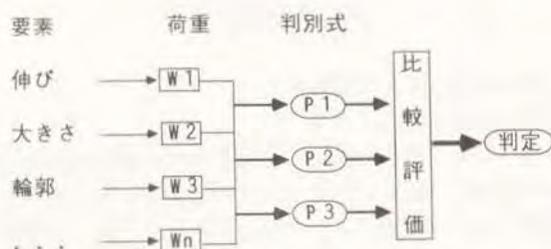


図5.12 判別要素の加重化

### (3) 判定結果

前項で述べた処理により、レーダ映像の観測結果を判定した結果を表5.4に掲げる。この判定に使用したデータは横浜港で観測した76隻分のレーダ映像であり、このレーダ映像から各加重係数も定めているので、簡便な評価式にもかかわらず判定結果は良い結果になったとも考えられる。評価式 $P_2$ では各判定要素間に相関性が少なかったために判定結果は良くない。しかし、さらに多くの観測結果を基礎に加重係数が定められるならば、学習効果が期待できることとなるので同程度以上の判定結果が期待できると考えている。

表5.4 船種の判定結果

船種	判別式		
	P1	P2	P3
タンカ	92%	92%	92%
フルコン	86	71	64
バルク	81	83	83
PCC	88	50	88

### 5.3.4 船舶用レーダのための新しい表示方式

スクリーン上にターゲットの位置を表示するPPI方式は、レーダの開発過程において画期的なことであった。ターゲットの位置は今日、コンピュータ処理により、将来位置を示すベクトルとともに表示することもできる。PPI表示方式はとても簡単で、しかも熟練したレーダ監視者にとって理解が容易である。しかし、実際のターゲットの映像に置換することは容易ではない。ここで自分の背中後方の上部に視点を置いた鳥瞰図での表示例を図5.13に示した。

この映像は次のように校正させた。

- ・ 船体の基本部分は、「推定の総トン数」で大きさを比例させる。
- ・ 船体の向きは、「アスペクト角」に基づいて回転させる。
- ・ 船橋楼を含む上甲板上の構造物は、「推定した船種」に基づいて構成する。
- ・ マストやデリックについては、レーダ映像における映像の伸びにより付加する。



図5.13 鳥瞰図での表示例

この鳥瞰図方式の表示は3次元的な表示であるので、実際の状況のように感じさせる利点がある。つまり、他船と自船との関係を理解するのが容易で、他船の相対的な動きと一緒に自船が観察できるところにある。また、自船および他船の航跡を表示することは、容易に状況を理解する上で効果的な方法である。しかし、この表示方式は感覚的な表示方法であるため、詳細な情報の表示方法としては必ずしも最適ではない。ARPAは数分前からの過去の位置に基づく計算からベクトルを求め、他船の将来位置を示すが、このベクトルで示される位置は将来の正確な位置を示すものではない。使用者はコンピュータで計算された結果は常に正しいものと誤解しがちだが、最近になってこの誤解すること

が大きな問題と認められるようになった。このため、将来のベクトルを表示するのではなく、過去の航跡を表示する方式は混乱を避けるために良い方法であると認識され、小型のラスタスキャン型のレーダにも採用されている。

レーダ信号の画像処理による解析で擬似映像を作成する。まえもって作成しておいた基本的な映像モデルを擬似映像の作成の基本部分として使用する。レーダ・スクリーン上に表示される擬似映像はレーダ信号の解析によって得られた結果で部分的に変更する。変更された擬似映像は知識と経験に基づく補助的な情報によってさらに修正する。またARPAに表示されているような情報もこれらに補充する。作成した擬似映像をターゲットの位置に設定して、自船の後ろ上空に視点を置いた3次元表示方式の表示で示す。レーダ映像の処理の流れの前半部分は第4章で述べているが、鳥瞰図を作成する部分の処理の流れを図5.14に示す。

#### 5.4 判定向上への課題とまとめ

船種の判定は極めて類似した船形の船もあり、肉眼でも難しいことがある。また、レーダ映像の中には船舶以外のレーダレフレクタや、ここでの分類対象ではない特殊な船舶（重量物専用船、帆船、軍艦および漁船等）の映像も含まれている。このようなレーダ映像にはそれぞれ特徴があり、例えばレーダレフレクタを装備している浮標や漁船では映像の面積の割合に対して非常に強い反射を示す。分類結果の正確さを向上させるには、分類対象以外のレーダ映像は排除することを考えなければならない。レーダ映像に関するデータベースを準備し、船種の判定の際にレーダ映像の特徴と判定結果とに矛盾点の有無を検定する処理を含めるように考えた。また、船種の判定には、できるだけ多くの情報があることが望ましいので、船種と総トン数との相関関係や特殊船の場合の特徴による要素なども同時並行的に処理する方式を考えている。これはレーダ映像の特徴での処理で数値的に処理できる内容はできるだけ前処理段階での評価を行うものである。このような船種判定の考え方を図5.15に示す。さらに、今回のレーダ映像からの識別には交差偏波成分の処理は含まれていないが、強度の位置や上甲板上の構造物の複雑度などの要素の判別に交差偏波成分による識別を今後の研究の過程で判別要素に組み入れる考えである。

多くの観測結果を基礎にして、コンピュータ・グラフィックスの映像でレーダ映像を表示することを試みた。レーダを用いたターゲットの特性の決定には、まだ多くの問題があるが、レーダはセンサのひとつであり、表示は見やすいものでなければならないと考えている。

この表示方式は将来のレーダのひとつのアプローチと考えている。

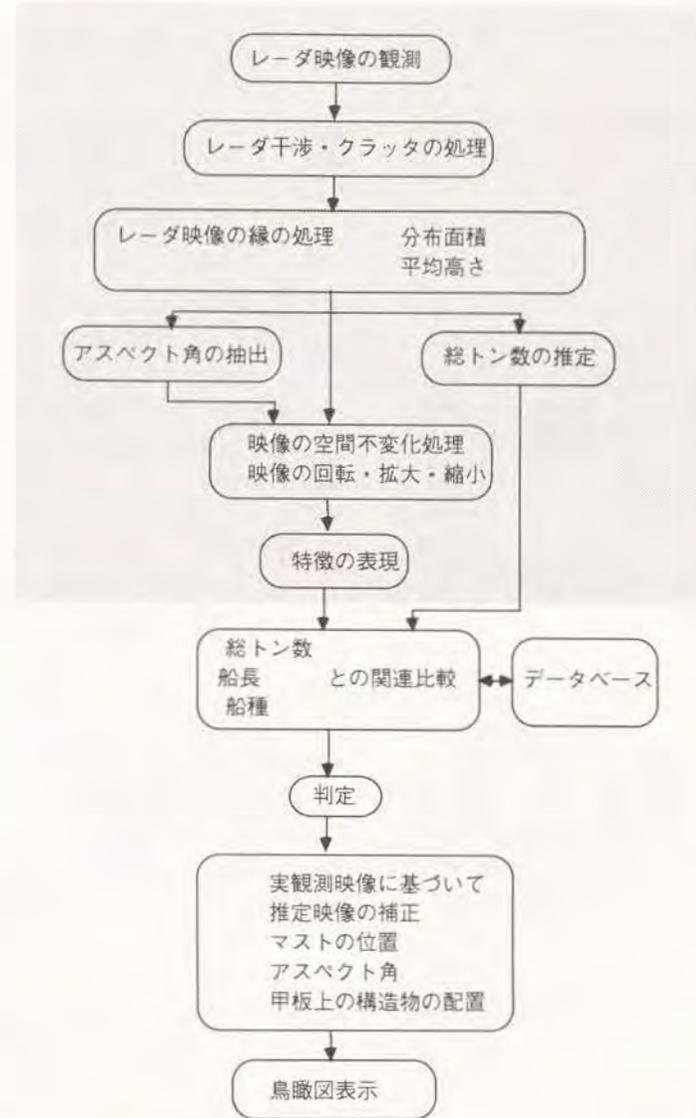


図5.14 レーダ映像の処理の流れ  
(網掛けされた部分は第4章で述べた)

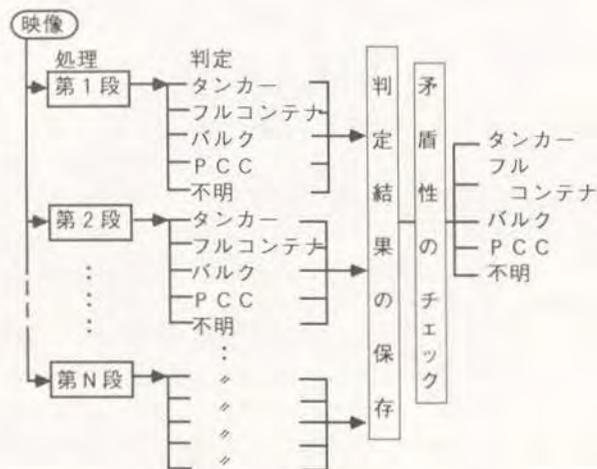


図5.15 船種判定の考え方

## 6. 船舶システムへの応用

本研究の内容が船舶システムの中でどのように位置づけられ、展開されるかに関して述べる。

### 6.1 自律航法の基本的センサ

レーダは外からの協力動作を必要としないので、自立型のセンサである。レーダは自船の周囲の状況を把握するための基本的な航海機器であり、外部からの管制や支援が途絶えた場合にも有効な情報源である。そのレーダに物標の識別機能が付加されるならば基本的センサとして重要である。自律航法とは自立に加えて判断機能を持った航法として位置づけている。

自律航法と発音を同じくして自立航法という用語がある。これらは混同して使われているように思えるので次のように整理した。

#### 自律航法の定義

自立航法と推測航法の違いは、

求められる位置について、

- ・ 推定した位置について何等かの校正手段を持っているか。
- ・ 校正を必要としないだけの精度を有するか。
- ・ 校正を行う必要の前に使命（ミッション）期間を終了するか。

などが、航法の内容上、考慮すべきである。

つまり、海図や地図とマッチングを行って、自船（自車）の位置が補正できる機能を持つ場合には、自立航法と呼べる。校正や補正の機能を持たない航法は、推測航法である。言い替えるならば、「精度の低い推測航法は自立航法とは呼べない」と考える。

英語では「Self-Contained Navigation」（自立航法）と「Autonomous Navigation」（自律航法）と区別されている。つまり、自律とは自立した上に、判断と制御の機能を持った航法であると定める。

### 6.2 物標の識別による自動的な測位システム

レーダによる測位は、孤立した岩、岬、島あるいは切り立った崖などの場所を選んで、その物標の方位と距離を測定して自船の位置をもとめている。こ

の場合、レーダ電波の反射点が特定できる物標が望ましい。電波式の航路標識として、特殊なレーダ・レフレクタ（偏波面を90度回転させるもの：P R A N S、カナダ）のような例もある。概念図を図6.1に示す。

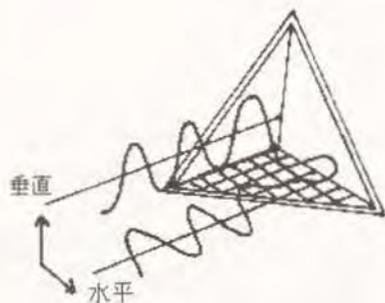


図6.1 特殊なレーダ・レフレクタの一例

物標の自動的な識別機能は、最適な反射体を自動選択し、電子海図と位置の対応関係を求めることで、自船の位置を自動的に求める自立型の測位システムが構成できる。

### 6.3 走錨監視レーダへの応用

船舶が錨泊中に気象条件の急変によって錨が引かれてしまう（走錨）ことが起こると、きわめて重大な環境破壊や損害につながる可能性がある。陸上側に設置する走錨監視レーダと船舶側のレーダに走錨の監視機能を付加する場合は考えられる。

いずれの場合も識別機能を基本とした特定物標の自動検出、有効な海岸線の検出、やあるいは警戒区域へ侵入した他船などの判別に有効である。

#### 6.3.1. はじめに

船舶が錨泊中、風が強くなると船は錨を中心として振れ回るが、このとき錨と錨鎖の一部はともに引きずられて海底を移動する。そして船体と風向きがある角度を持ち、風圧面積が大きくなると、風圧力が錨および錨鎖の把駐力を越えて鎖が引きずられ、いわゆる走錨が始まる。一旦走錨が始まると錨、錨鎖の把駐力が低下し、船は操縦性を失って走錨を止めることは難しい。

台風のような強風時には大多数の船舶は港外に出て錨泊する。錨泊船の数は極めて多数になり、例えば横浜港外では160隻にも上ることがある。このような状況で走錨が発生すると、走錨船は次々と他船と衝突し、大混乱に陥ることになりかねない。また東京湾環状道路等の橋脚に衝突することも考えられる。

これらの対策として、海上交通管理システムを強化し、走錨の恐れがある気象状態の時には、各船舶に対して適当な錨地の指定や、他船を妨害しないように監視することは重要である。またレーダ監視により積極的に走錨を発見、警告し、その対策を遅滞なく実施することが必要である。

実際に陸上でレーダ監視をしても、走錨を発見することは困難なことが多い。しかし、走錨監視は上述のように港湾管理において重要な意義を持つので、その開発を前提として研究を行った結果を報告する。

#### 6.3.2 走錨監視レーダの要件

##### (1) 走錨監視レーダの基本的性能

走錨監視レーダの基本的性能としては、走錨が発生するような気象・海象下で、対象となる船舶の位置、姿勢を正確に観測・測定できることが要求される。さらに、監視する海域は5マイル四方程度で、近い船舶から遠い船舶までを含めて全ての船舶を対象とする。以下にこれまでに検討した基本的な性能要件を示す。

- (a) 対象船舶の位置を精測できること。
- (b) 対象船舶の姿勢を観測できること。
- (c) 海面反射雑音（Sea Clutter）が多く発生している状況においても対象物を探知できること。
- (d) 走錨の発生のおそれを確実に警告できるように、対象船舶の過去の航跡記録も使用して判定できること。
- (e) 陸上の適切な位置に設置されること。
- (f) 鮮明なレーダ映像が得られるシステムであること。

この他に、走錨監視システムとしては通信・通報機能も重要である。

通信・通報機能は船舶側から

ア) 投錨位置（錨位）

イ) 船舶の固有情報（船種、船長、喫水、船舶の構造、伸出錨鎖長等）

また、陸上の監視局側から

ウ) 異常発生のおそれに関する情報等

を伝達する重要な機能である。

一般に運航体制の整った船舶では状況を的確に把握して、十分な長さの錨鎖

を伸出し、気象・海象条件の悪化が予想される時には守錨当直（Anchor Watch：錨泊中の安全を確保するための監視当直）を実施している。走錨のおそれなどがある場合、陸上の監視局側からの通報や隣接して停泊している船舶からの通報も容易に受け取れる。しかし、検討すべき重要なことは、運航体制が整っていない船舶に対する通報の方法である。そこで、走錨災害の防止対策において

- ア) 走錨の監視体制（投揚錨時の通報を含む）
- イ) 走錨発生及びそのおそれを探知した場合の通信・通報体制
- ウ) 港湾の安全対策
  - ・防波堤等の整備
  - ・各種情報の提供ポスト、パンフレット、ローカルなラジオ放送（1665KHzでの放送の例）

等を十分に整えることが有効であると考えられる。

## (2) 海面反射対策

走錨が発生するような時は、風も強く、波も高くなっている。このような状況下では、波による海面反射が大きく、レーダによる船舶の位置や姿勢の検出の妨げとなっている。従来は、このような海面反射雑音の対策として一般にSTC（Sensitivity Time Control）と呼ばれる回路が多用されてきた。しかし、このSTC回路による海面反射対策には次のような問題点がある。

海面反射は風向や波向、波高、潮流等の影響で変化するので各スキャン、各スイープ毎に強度が異なる。従って全周にわたって一定のSTCをかけると、全ての海面反射を抑制した場合、必要な信号まで消去してしまうことがある。レーダの各スイープ毎に最適な感度の制御を行えば効果が上がる。その一つの方法であるLOG-CFAR処理を採用した船舶用レーダが最近使用されつつあるが、この方式でも海面反射雑音が強すぎる状況では受信感度の調整が適当でないとFTC（Fast Time Constant）処理されたような映像となることがある。（微分処理したような画像）

海面反射雑音対策は走錨監視システムにおいて重要な項目であり、将来は海面反射雑音の振幅特性に応じて各スイープ毎に自動的に調整する方式を検討する必要がある。

## (3) レーダ映像処理による性能の向上

### (a) スキャン相関処理

レーダ映像の質の向上のための相関処理方式としては

- ・スイープ相関処理
- ・スキャン相関処理

の2つの相関処理がよく用いられている。

スイープ相関処理は他船のレーダの影響によるレーダ干渉妨害の除去には有効である。しかし、レーダの送信パルス周期に比較すると、ほとんど静止していると見なされるような波面からの反射による雑音には余り効果がない。

スキャン相関処理とは、例えばレーダアンテナの1回転には平均約3秒間かかるが、この1回転毎の映像信号をn回にわたって相関処理する方式である。

数秒間の時間経過があることから、波浪による相関は大きく減少することにより固定的な物標からの反射信号を抽出するものである。

今回はスキャン相関処理を実施して海面反射雑音の抑制と物標（船舶）の映像のゆらぎを低減する処理を試みた。その効果については6.3.3節(3)項で述べる。

### (b) 分裂した映像の処理

船舶のレーダ映像は、図6.2に例を示すように強い反射を示す部分が複数ある。その距離がレーダの方位及び距離分解能以上あれば1隻の船の映像が分離して、複数の船舶として誤認されるおそれがある。そこでこのように分裂したレーダ映像が1隻の船舶からの反射信号によるものか否かの判断を行った上で、1つのレーダ映像としてまとめる処理（以下、映像統合処理と呼ぶ）が前段階の処理として必要である。



反射の強い部分

図6.2 船舶のレーダ映像の一例

この映像統合処理の手法として、

ア) 映像の形状の現在までの変化状況から判定する方法。

スキャン相関処理の際に最新のデータには大きい加重係数をかけ、古い分のデータの加重係数は小さくする。

イ) 映像の連続性を調べるしきい値を変えて1つの映像としての形状を求めて判定する方法

ウ) 設定されている映像の中心位置から所定の範囲内にある映像は1つの物標からの反射としてみなす方法

等が考えられる。ア)の方法は海面反射雑音処理と物標の鮮明なレーダ映像を得ることにもよい効果が期待されるが、今回の実験では実験装置の性能からイ)およびウ)の方法を採用している。

### (c) 映像の中心位置の検出と振れ回り軌跡の記録

監視対象とする船舶のレーダ映像からの中心位置と船舶の姿勢角の検出及び振れ回り軌跡の記録が高い精度でできれば、錨泊中の船舶の振れ回り運動は的確に把握できる。

ア) 映像の中心位置の検出

対象とする船舶のレーダ映像が1つの楕円形状ならば、中心位置の検出も容易であるが、分割された映像の場合にも中心位置が検出できる処理方法が必要である。しかも高速で処理できるアルゴリズムを検討しなければならない。高速処理が期待される数種類の方法を検討した。

イ) 船舶の姿勢角の検出

一般のレーダ映像でも対象とする船舶の部分のみを拡大すると船の姿勢角(アスペクト角)の概略値や船の形状概略を判断できることが報告されている<sup>11)</sup>。この他、港湾監視用レーダを使用した実験観測の結果が報告されている<sup>12)</sup>。後の報告では $0.25^\circ$ という高分解能な水平ビーム幅のレーダで観測されており、その結果例を図6.3に示す。

ウ) 振れ回り軌跡の記録

錨泊船のレーダ映像の中心位置を連続的に追跡し、振れ回りの軌跡を求める。この軌跡全体がゆるやかに風下に移ったり、あるいは突然この振れ回りが止まり風下に流され始めるような場合があれば、走錨状態になったと考えられる。この軌跡の変化を自動的に検出し、警報を発する方式の開発を進めている。この方式の成否はレーダ映像による中心位置を正確にしかも滑らかな軌跡が描けるような検出時間間隔で実行できることにある。特にレーダ映像の統合処理により船舶の位置を正確に測定できることが重要である。今回の実験で採用して

いる方式では測定位置のばらつきが大きく、使用したレーダシステムやスキャンコンバータの性能による影響があった。

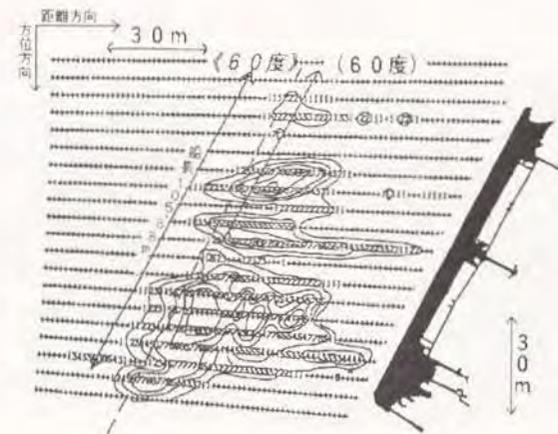


図6.3 港湾監視用レーダ(水平ビーム幅 $0.25^\circ$ )の映像

### 6.3.3 レーダ観測実験とその考察

(1) 模擬走錨実験における実験装置の構成

実験装置の構成は図6.4に示した。レーダ映像の相関処理などは処理時間の短縮のため、このプログラムは機械語で書かれている。その他の処理、記録プログラムはBASIC言語で記述されている。

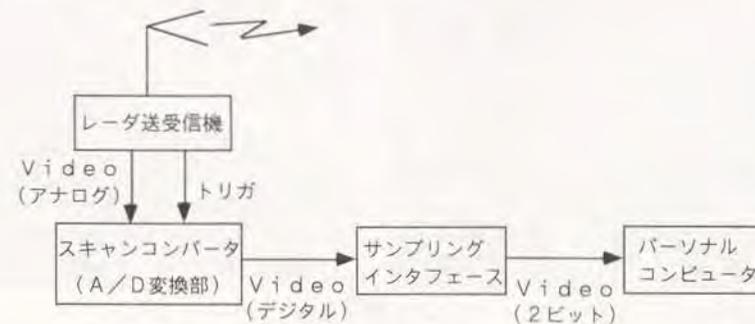


図6.4 観測装置の構成

レーダ映像は入力後、 $n$ 回の相関処理が施される。しかし、スキャンコンバータ装置およびパーソナルコンピュータ側の映像入力インターフェースの性能上の制約からレーダ映像は2値化されているので $n$ 回の相関処理は論理積処理となり、レーダ映像のゆらぎや分割のために、ついには映像が消滅してしまうこともある。そのため相関処理の回数は、現在は現場を観測してから決めている。また、映像中心を求める枠の大きさやガードリングの半径の設定も必要である。ガードリングは注意用と警告用の2種類を設定する形式、および小さなCRT画面では見にくいので、表示はしないが注意用のリングの半径の120%のところ設定する形式の2つについて実験した。

## (2) 模擬走錨実験の概要

昭和62年2月24～26日、東京商船大学富浦臨海実験実習場において本学練習船「やよい(40G/T、FRP製)」を模擬走錨船として走錨模擬実験を実施した。この実験の期間中南房総一帯は強風波浪警報が発令されており、実習場から対岸の三浦半島までの海は普段には無く白波の立っている状況であった。

「やよい」を実習場から0.5nm位の位置に漂ちゆう(漂流しながらも現在位置に留まるように操船すること)あるいは小さく移動させ模擬的に走錨状態を起こさせた。当日、実際に投錨して現実に近い状況を模擬することも検討したが、作業中の安全性を考慮して錨は使用していない。当日観測において「やよい」周辺及び実習場から約1.5nm程度の海面反射の状況を図6.5および6.6に示すが、非常に海面反射の強い状況であった。このような海面反射雑音の中にある対象物を明瞭に検出するには、まず海面反射雑音を低減することが必要である。尚、「やよい」には船の前と後ろに10m<sup>2</sup>程度のレーダ断面積を持つコーナレフレクタを各1ヶずつ取り付けてレーダ断面積を増加させ、小型船舶の姿勢検出を試みたが、レーダの分解能に比較して船が短いので今回の観測では姿勢の検出までには至らなかった。

レーダ映像のスキャン相関処理の実験状況については2値化したレーダ映像に10回のスキャン相関処理を実行したが、海面反射雑音の低減の効果を強くするため相関回数を多くするとレーダ映像も周辺部が削られ、消滅してしまうことがあった。そこで相関処理回数を7回に設定して実行したが、時々、模擬走錨船の映像が消えることがあった。この原因としては、船の移動の他に、2値化映像を使用していることが大きな要因である。図6.6～図6.8にレーダ映像のスキャン相関処理を実行したときの海面反射雑音の除去状況と走錨船のレーダ映像が削られていく状況を示す。



図6.5 海面反射雑音の発生状況

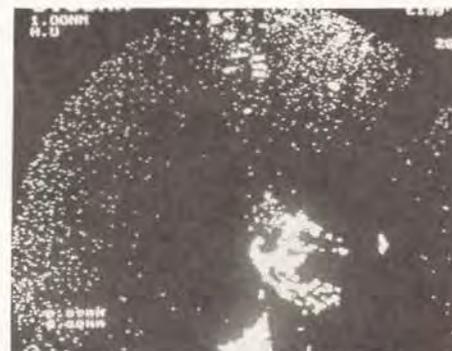


図6.6 スキャン相関前の  
レーダ映像



図6.7 スキャン相関(2回)後の  
レーダ映像



図6.8 スキャン相関(7回)後の  
レーダ映像

### (3) 実験結果の考察

#### (a) レーダ映像処理の効果

スキャン相関処理による海面反射雑音の映像の減少は効果があったが、2値化処理された映像であったため相関回数を重ねると走錨船のレーダ映像も映像のゆらぎにより周辺部から消滅していった。従って、スキャン相関処理を実行する際にレーダ映像を多値化した上で相関処理を行いスレシホールドレベルを最適制御する方法を検討する必要がある。

#### (b) 海面反射雑音対策について

海面反射雑音対策については前項で述べたレーダ映像処理によるもの他、レーダ信号を

- ア) 時間領域で処理
- イ) 周波数領域で処理
- ウ) 空間的、物理的性質に基づいて処理

の処理方法があり、これらの信号処理方式の組合せを経済的な効果も含めて検討していく必要がある。海面反射雑音対策はきわめて重要である。

#### (3) レーダ映像位置の検出方法について

対象としている船の映像が分裂して複数の映像として見えたとき、映像統合処理した後、映像の中心位置を求める方式では、映像の形状によっては実際の位置よりも外れていることがあるので、実際の位置と検出した位置とが大きく外れないで、しかも高速で処理が可能な位置検出アルゴリズムを考える必要がある。

走錨監視用レーダの基本的性能要件で述べているが、対象とする船舶の位置は高い精度で求めることが重要である。レーダ局から近い遠いにかかわらず船舶の位置を正確に求め、また船舶の姿勢角を正確に求めるためには高分解能レーダが必要である。1台のレーダで5nm平方の広い錨地を監視するには、影になって見えにくい部分が生じたり、またレーダ偽像が発生する場合もある。このようなとき、異なった場所にもう1台レーダを設置し、その映像で補完したり相関をとって対象船舶の位置が求められれば、測位精度が顕著に向上し、走錨監視の正確さも向上するであろう。

#### 6.3.4 走錨監視システム概念

走錨は船舶にかかる外力が、錨および錨鎖の把駐力より大きくなったときに発生する。この外力には風力と潮流、波浪等があるが、風力が最も大きく効く

ので、気象情報は重要な要素となる。気象・海象情報を解析することによって、過去の経験、実績などから走錨の危険があるかどうかを知ることができる。

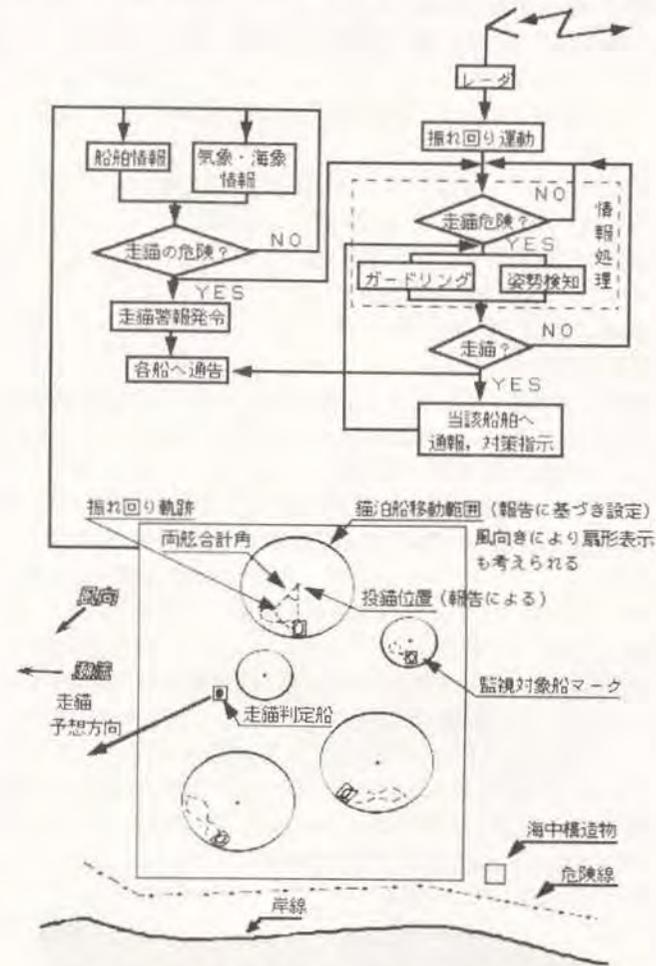


図6.9 走錨監視システムブロック図

もし走錨の危険がある気象・海象状況であると判断された場合には、走錨警報を発令し、各船へ通告することになる。一方レーダからの情報は処理されて、船の揺れ回り運動によって走錨危険度が判断され、危険度の高い船には通告さ

れる。さらにレーダ情報はガードリング方式と姿勢探知方式の2種類によって走錨の有無が判断され、走錨船がある場合は当該船舶及び他船に通報すると共に当該船舶には対策を指示するものとする。

以上が走錨監視システムの概念であるが、この過程をブロック図で示したものが図6.9である。

なお走錨警報を発したとき、各船に通告する事項は次のようになるものと思われる。

- ア) 2錨泊あるいは双錨泊とし、錨鎖は8節以上伸出する。
  - イ) バラストを十分に張り、喫水を深くする。
  - ウ) アンカーウォッチを立てる。
  - エ) 機関のスタンバイを行う。
  - オ) 走錨しても、すぐ他船に接触しないように、船間距離を充分にとる。
- また事前の通告として、
- カ) 走錨し易い船型は、前もって錨泊船の少ない安全な海域へ転錨する。
  - キ) 錨泊中でもVHF、船舶電話など通信設備を開局し、常時情報に応じられる姿勢を整える。
  - ク) 自船または他船の走錨を探知したとき、情報センター等へ通報する。
  - ケ) 外国船の走錨は特に多いことから、特別の注意を払う。

等が掲げられる。

#### 6.3.5 あとがき

以上、走錨監視レーダと情報処理装置を用いた実験の結果を主として報告し、ガードリング方式で充分走錨の探知が可能であることを検証した。しかし、走錨するような気象・海象状況では海面は著しく波立ち、いわゆる海面反射雑音が多く、情報の処理を大きく妨害するので、走錨監視レーダシステムではまず海面反射雑音対策を立てなければならないことが問題点として残された。今回の実験ではある程度の海面反射雑音対策はとったつもりであるが、今後、鋭意にこの問題に取り組む予定である。

#### 6.4 レーダ映像マッチングによる座礁予防システム

座礁を予防するための手段としては、レーダ映像マッチングによる高精度な船位の検出で自動的に海図から判断することが最も確実な方法である。そこで最適な反射体を自動選択したり、マッチングの際の映像と対応させる物標の加重係数を変化させることが高精度化の要件となる。

##### 6.4.1 研究の背景および概要

船舶の海難事故の中で座礁事故の事故率は衝突事故と共に非常に高い。また座礁事故の原因として、船位不確認、水路調査不十分、判断及び処理の不適切、見張り不十分等によるものが約90%という統計<sup>4)</sup>がある。

現在、船舶の航行に当たってはまず必要な海図を準備し、予定航路を作成・記入する。航行中は常に自船の位置を計測し、その位置を海図上にプロットしている。座礁の危険性等の判断は、自船の位置と海図上の浅瀬、暗礁の相対関係を乗組員が読み取り、船位の確認によってなされている。

今回報告する座礁予防システムは、座礁事故の要因となる乗組員の従来作業を全て自動化することを目標として開発されたものである。またこの座礁予防システムは、精度の高い位置を求め、その船位を基礎として、座礁の危険性を自動的に判断する機能をもっている。

実船実験は、東京商船大学の汐路丸において実施され、本座礁予防システムと並行して実船実験が行われた上位システム(船内統合システム)とも接続し、次の2項目の検証確認がなされた。

(1) 座礁予防システムとしての主要機能の検証・確認

(2) 乗組員への支援装置としての有効性の検証・確認

乗組員への支援情報は次の内容をCRTに表示することとした。

- 自船周囲の航路状況 ・ 海岸線 ・ 20m等深線 ・ 航路線  
・ 浮標 ・ 自船位置 ・ 針路  
・ レーダ映像 ・ レンジマーカ
- 座礁の危険レベル ・ 注意領域 ・ 危険領域 ・ 重危険領域  
(各危険レベルに対する警報機能)

以下、その結果について報告する。

##### 6.4.2 実船実験の内容

(1) 座礁予防システムの概要

座礁予防システムを開発するに当たり、まず、種々の角度から座礁事故の実

態調査がなされた各機関の調査結果資料に基づき、検討を行い座礁予防システムの要求機能としての基本的概念を策定した。図6.10に基本的概念を示す。

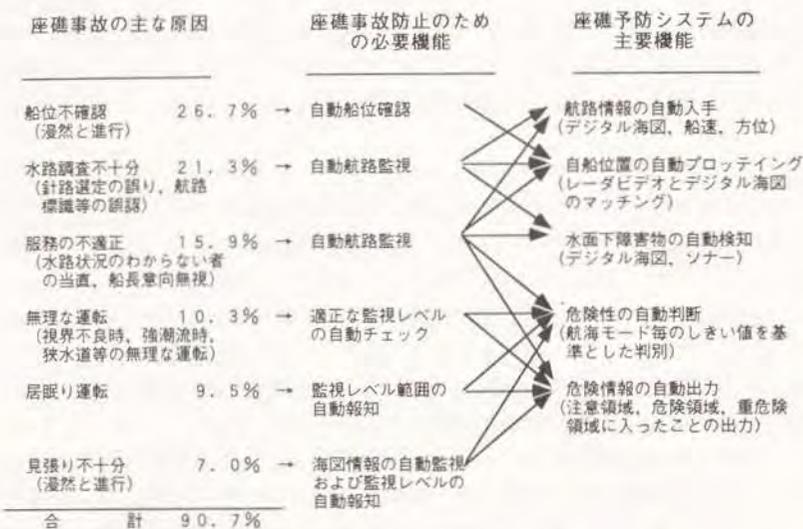


図6.10 座礁予防システムの主要機能の基本概念

座礁予防の目的には、停止距離もしくは操舵で回避できる距離以遠で浅瀬や水中障害物を発見できるものでなければならない。この目的には、水中に光や音波を放射しその反射信号で探知することが、本来は基本的なことである。しかしながら、水中での光の伝搬は極めて減衰が大きく、短い距離しか進まない。また音波では送受信するビーム幅を狭くすることが必要となり、また、温度によって伝搬速度が大きく変化するために音線が屈折してしまうので、障害物の長距離の探査が困難である。

当初、水中障害物ソナーの開発を実施し、パラメトリック方式による狭いビーム幅をもつ水中探査方式の座礁予防システムを開発し、水中温度の傾度による影響が大きいが、400~1200mまでの探知は可能となった。しかし、トランスデューサの装備場所や取り付け方の検討および水中温度の計測手段を何らかの方法で装備しなければならず実用化までには解決すべき問題が多い。

今回報告する座礁予防システムは、正確な海図情報を基礎として、正確な船

位に基づいて座礁の危険性を判断する方式のものである。

本方式の基本的な設計仕様を表6.1に掲げる。また座礁予防における危険性の判断のために危険性のレベルを設定した。その例を図6.11に示す。

表6.1 基本仕様

機能	主要仕様
航路情報の自動入手	航路計画に従った海図の自動選択 海図の有効範囲の自動切出し
自船位置の自動プロットイング	精度 : ±100mまたは±2%以内 サイクルタイム: レーダマッチングによる船位 90秒 ログ、ジャイロによる推測船位 10秒
水中障害物の自動検知	方法 : デジタル海図情報 探知範囲: 最大24浬、±60度
危険性の自動判断	サイクルタイム: 10秒
危険情報の自動出力	上位システム: 角度1度毎、距離1m単位の情報をへの通信 RS-232Cにて送信 表示部: 512×480ドット、14インチ、8色カラーディスプレイ 表示情報: 自船位置、表示レンジ、レーダ映像、海岸線、危険等深線、航路線、灯台、浮標、自船速度、針路、レンジマーカ、監視レベル データ更新: 10秒毎

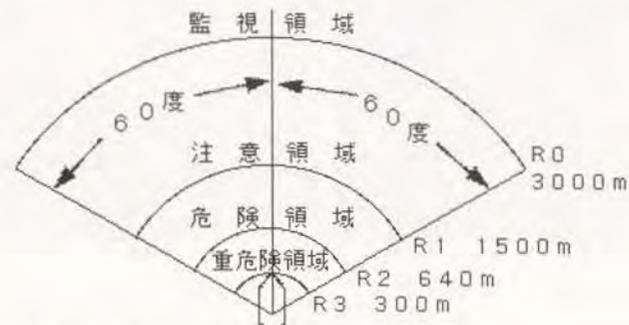


図6.11 危険判定監視レベル

座礁の予防には高精度の船位測定が最も重要な測定項目の1つであり、本システムでは、レーダ映像とデジタル海図のマッチングによる自立的な船位測定の方法を採用している(図6.12参照)。座礁予防システムの機能ブロック図及びフローチャートを図6.13及び図6.14に示す。

## (2) 実験内容

実船実験時の各機器の接続状況を図6.15に示す。船位、方位、船速の情報は実験船に装備されている船内LANから、レーダ映像は研究用に設置されているレーダから入力した。船位は、デジタル海図とレーダ映像とのマッチングによってロランC等からの概略船位を修正する方式で求めた。そして、デジタル海図上にその高精度な船位を自動的にプロットングするようにした。

水中障害物情報は、デジタル海図から抽出され、予め設定されている危険範囲と比較し、危険性の判断を行い注意、危険、重危険の各レベルに対する警報を発すると共に上位システムへ出力される。船位の比較のための基準値を得るため、トランスポンダ型の測位装置を仮設した。以下この装置によって計測された時々刻々の位置を参照位置と呼ぶこととする。この装置では分解能0.1m、精度は交角条件にもよるが±1mの精度が得られる。

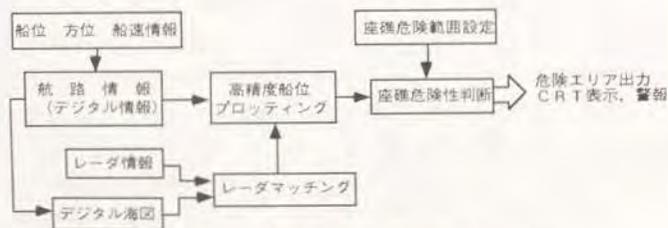
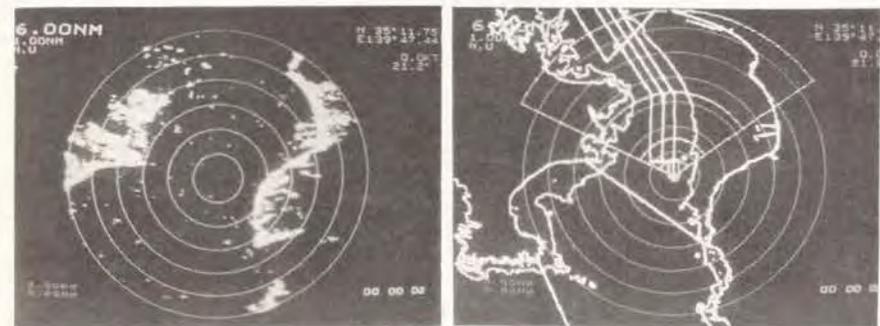
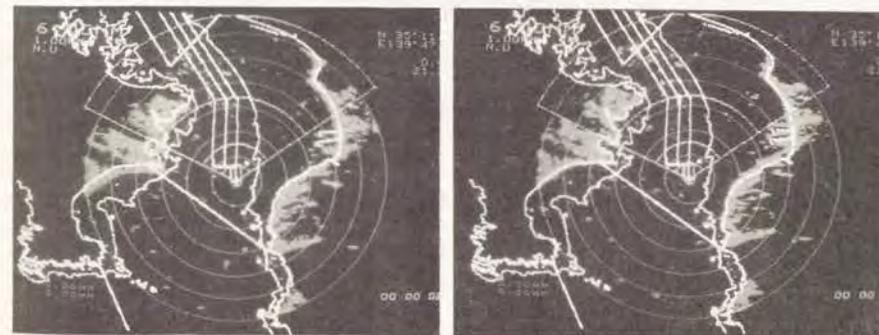


図6.13 座礁予防システム機能ブロック図



浦賀水道 レーダ映像

浦賀水道 デジタル海図



浦賀水道 レーダ映像とデジタル  
海図の重畳 (NNS S船位による)

浦賀水道 レーダ映像とデジタル  
海図の重畳 (レーダマッチングによる)

図6.12 東京湾内におけるレーダマッチング

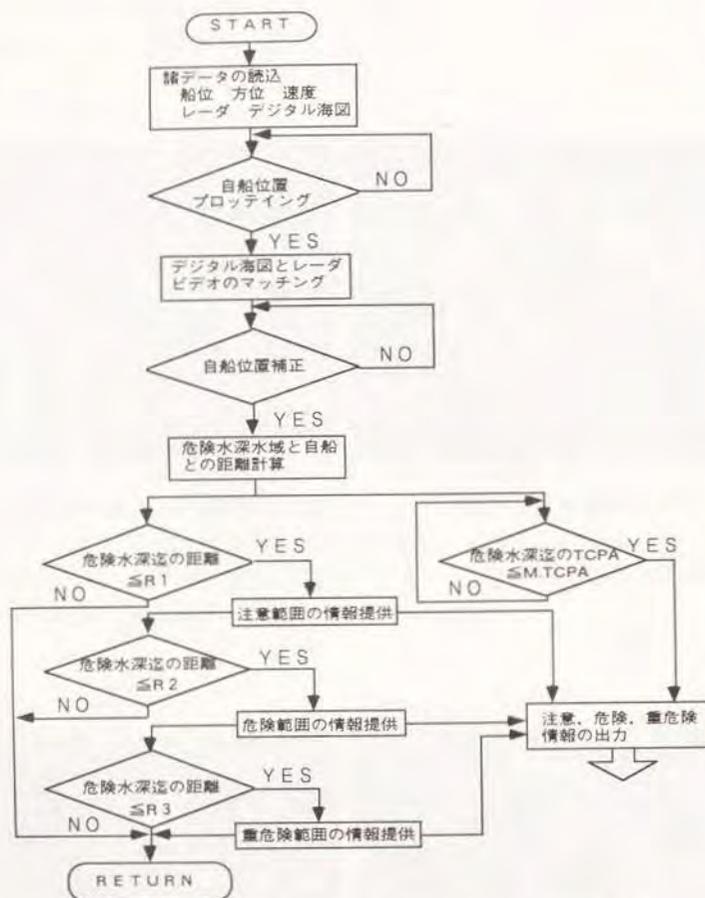


図6.14 座礁予防システムのフローダイアグラム

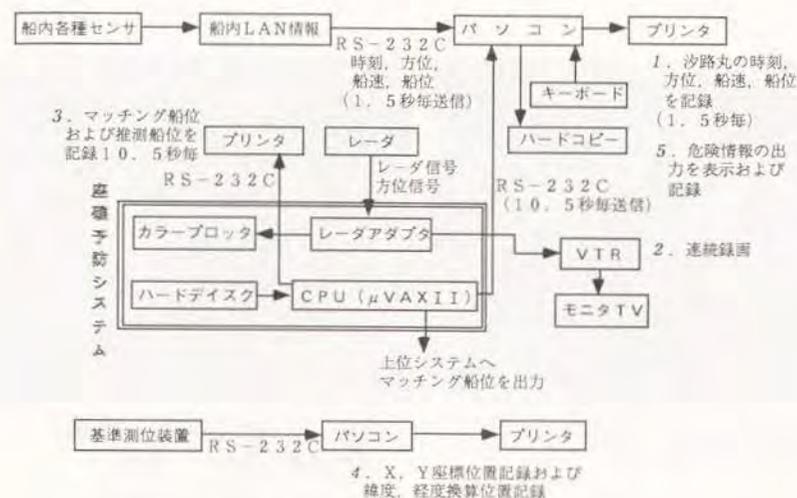


図6.15 座礁予防システム実船実験時の機器の接続

### 6.4.3 実験結果及び考察

#### (1) 実験結果

##### (a) 主要機能の確認

本座礁予防システムの基本仕様について各々の機能をCRT表示及びコントロール上の警報表示等により正しく作動することが確認された。CRT表示によって本システムの機能の確認を行った例を図6.16に示す。

##### (b) 船位計測データ

レーダ映像マッチングによる船位、ロランCによる船位(測地系、陸上伝搬による補正済み)及びデッカによる船位の計測を東京湾(主に浦賀水道航路とその周辺海域)において実施した。計測した海域の詳細は表6.2に掲げる。

さらに、船位の参照位置とするためのトランスポンダ型測位装置の従局2局を、三浦半島側の住友重機械工業(株)追浜造船所(E 139°39.86', N 35°19.17', 海面高27.84m)及び横須賀下水処理センター(E 139°41.43', N 35°15.86', 海面高21.64m)に仮設した。



北緯35度09分まで海図No.1062  
東京湾中部で南下

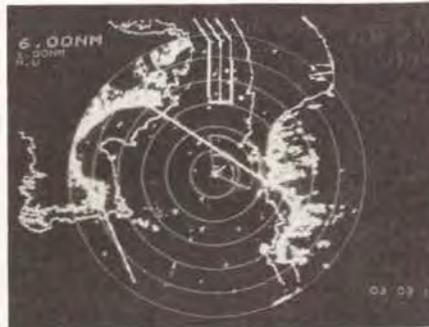


北緯35度09分を検知して海図No.51  
伊豆諸島に自動的に切替  
(マッチング後の表示画面)

図6.16-1 CRTによる機能の確認(航路情報の自動入手)

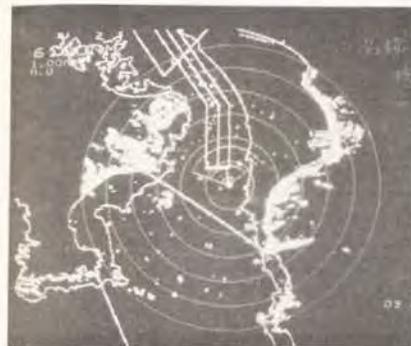


自船の船速および方位による推測位置  
(10秒間隔)



レーダ映像および電子海図のマッチ  
ング位置(90秒間隔)

図6.16-2 CRTによる機能の確認(自船位置の自動プロット)



浦賀水道航路入口付近を北上中



上位システムへの危険情報出力の  
CRT表示

図6.16-3 CRTによる機能の確認(危険情報の自動出力)

表6.2 船位計測海域

データ No.	実験日	実験海域	レーダ (マイル)	同時計測 船位
1	平成1年12月21日	浦賀水道-夏島(北行)	6	ロランC
2	平成1年12月22日	夏島-浦賀水道(南行)	6	ロランC
3	平成2年01月10日	勝どき-浦賀水道(南行)	6	デッカ
4	平成2年01月11日	浦賀水道-夏島(北行)	6	ロランC
5	平成2年01月12日	夏島-浦賀水道(南行)	6	ロランC
6	平成2年01月12日	浦賀水道-中ノ瀬(北行)	3-6	デッカ
7	平成2年01月17日	勝どき-浦賀水道(南行)	6	ロランC
8	平成2年01月18日	夏島-浦賀水道(南行)	6	ロランC
9	平成2年01月18日	浦賀水道-夏島(北行)	6	ロランC

注:勝どき:東京都中央区勝どき(実験供試船の係留地)  
夏島:横須賀市夏島(住友重機械工業(株)岸壁)

レーダ映像のマッチングによる船位、ロランCによる船位及びデッキによる船位を、参照位置を基準値として各々の誤差を算出し、レーダレンジのフルスケールに対する誤差の百分率の値の度数分布を求めた。図6.17, 18および19にレーダ映像のマッチング船位と参照位置との誤差ヒストグラムを、図6.20にロランC船位と参照位置との誤差ヒストグラムを、図6.21にデッキ船位と参照位置との誤差ヒストグラムを示す。

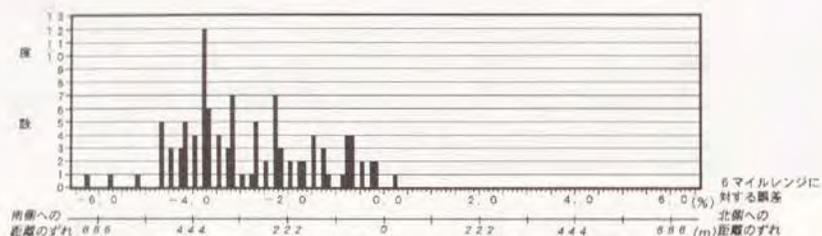


図6.17-1 レーダ映像のマッチングによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム (緯度方向の誤差)

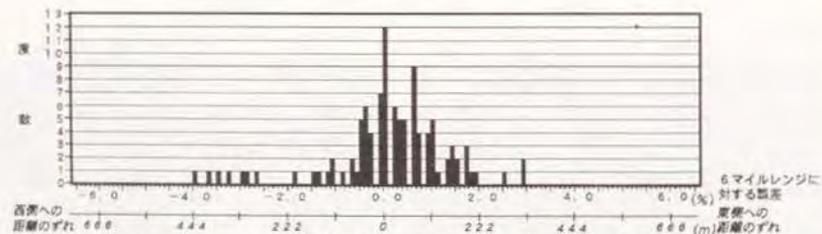


図6.17-2 レーダ映像のマッチングによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム (経度方向の誤差)

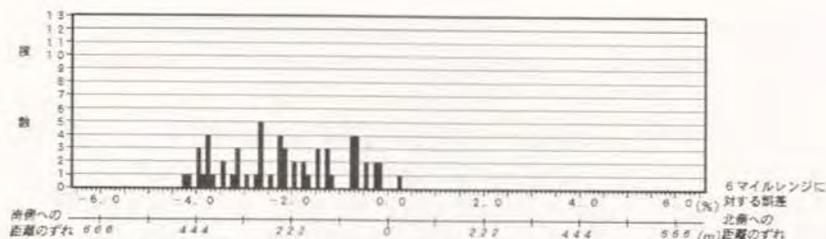


図6.18-1 レーダ映像のマッチングによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム (浦賀水道航路およびその周辺南行時の緯度方向の誤差)

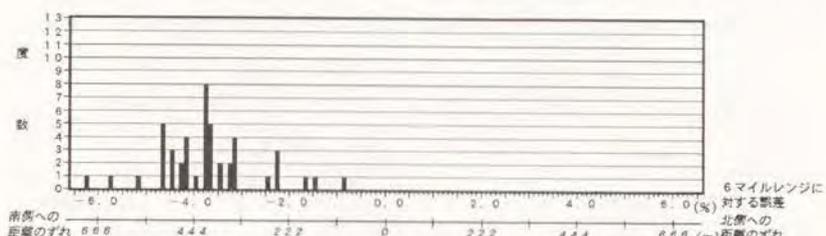


図6.18-2 レーダ映像のマッチングによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム (浦賀水道航路およびその周辺北行時の緯度方向の誤差)

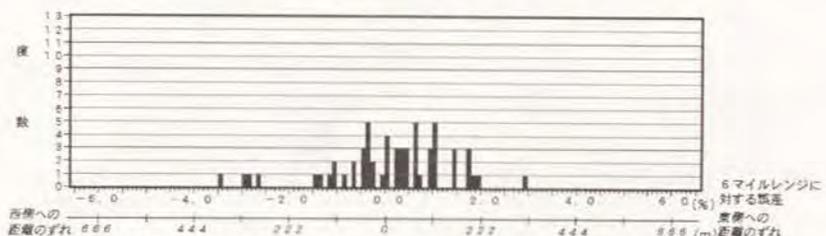


図6.19-1 レーダ映像のマッチングによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム (浦賀水道航路およびその周辺南行時の経度方向の誤差)

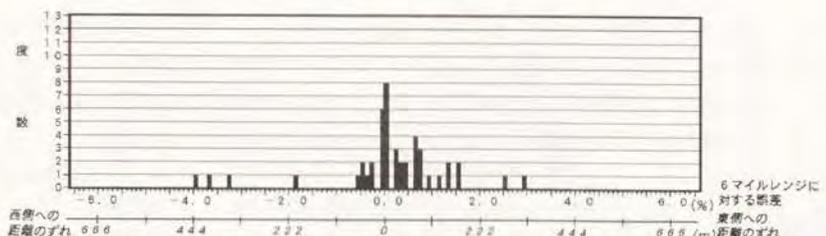


図6.19-2 レーダ映像のマッチングによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム (浦賀水道航路およびその周辺北行時の経度方向の誤差)

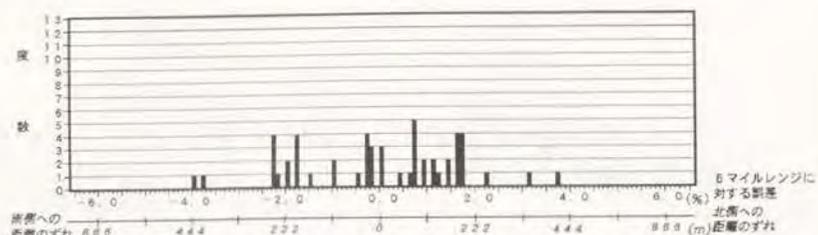


図 6. 20-1 ロランCによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム  
(緯度方向の誤差)

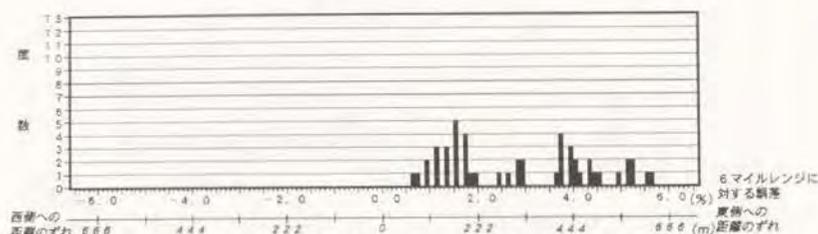


図 6. 20-2 ロランCによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム  
(経度方向の誤差)

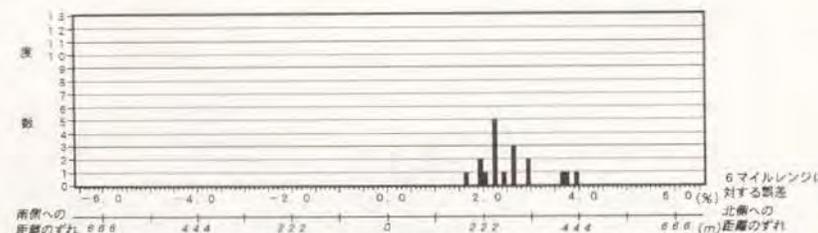


図 6. 21-1 デッカによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム  
(緯度方向の誤差)

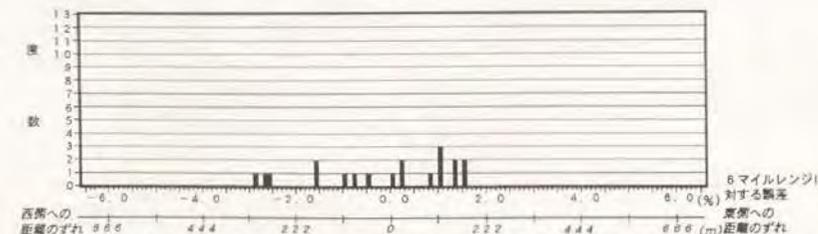


図 6. 21-2 デッカによる船位と参照位置との誤差ヒストグラム  
(経度方向の誤差)

## (2) レーダ映像のデジタル海図とのマッチング

レーダ映像とデジタル海図とのマッチングにあたっては、まず次の問題点がある。

- (a) デジタル海図は従来の紙海図を基礎に作成されたものである。従って、レーダ映像における海岸線とは一致しない部分が多い。つまり、レーダ電波の反射位置は、表示されている海岸線よりも陸側となる場合が多い。
- (b) デジタル海図にはレーダ映像とのマッチングのための情報は加えられていない。

これらの問題点は研究開発の時にも指摘していた事項である。今回の研究においてはレーダ映像のマッチングについて部分的な重み付けを行うことを試みた。具体的な方法としては、

レーダ映像を象限に分け、各象限毎に重み付け係数を変える。

船の進行方向のレーダ映像に重み付けをつける。

について、実際に試みた。

この重み付けは現段階では手動で入力している。孤立物標や小さな島がレーダ映像として得られるところでは、レーダ映像のマッチングの際にもそのような物標を使うことが望ましいことは明白である。今回の実験では複数の適当な孤立物標のレーダ映像が得られなかったため孤立物標に対するマッチング時の重み付けは行っていない。

レーダ映像のマッチングについては

デジタル海図の海岸線情報等にマッチングのための加重係数等の属性を加える。

従来の灯台にかえてレーダ電波を反射させるような「コーナレフ灯台」等を整備する。

あるいは、

レーダ映像とのマッチングのためのレーダ映像を記録した映像データライブラリを新たに作成する。

等の方策を検討することが必要である。この中で当面すぐに対応できると考えられることは、使用者が周辺の陸岸の状況を双眼鏡等で観察できる場合には肉眼で得られた情報で、また夜間等で状況が不明のときには紙海図から判読してマッチングのための属性を手動で付加することで位置の精度を向上させることが可能である。

従来からレーダ測位では孤立目標の映像を使うのが良いとされていた。この研究では海岸線マッチング方式をとっている。現在のデジタル海図には、海岸線のデータ等が入っているが、孤立物標というような属性情報は特に入っ

てはない。また、干出浜とか崖であるとかのレーダ映像のマッチングのために重要な情報も属性として入っていない。実験の過程では、富津岬のような部分（干出浜）の加重係数は下げ、観音崎のような部分の加重係数は上げるような操作を行ってマッチング精度を向上させる試みも行いった。しかし、これらの属性に関する情報は本来デジタル海図には含まれていないので、主に海岸線とのマッチングを取り扱うこととした。今後はデジタル海図にこのような属性情報を含めることを希望するとともに、将来はレーダ映像のための電波標識が従来の灯台に加えて整備されることを強く期待する。カナダでは、偏波面回転型のレーダ・レフレクタを川岸に配置して船舶の航行を援助するP R A N S (Precise Radio Navigation System) が提案されている。

### (3) 考察

#### (a) 主要機能

主要機能について項目別に考察した結果は以下の通りである。

##### 航路情報の自動入手

海図の切替動作については、容易に確認でき良好であった。ただし、切替時間が現在は約90秒であるため、船橋内での作業の迅速化のためには30秒程度まで短縮することが望ましい。

##### 自船位置の高精度自動プロット

レーダ映像のマッチングによる船位精度は、ロラン、デッカ等の他の船位測定装置に比べて精度がよく目標値であるレーダレンジの±2%以内に入った。さらに船位精度を高めるためレーダ映像のマッチング条件に重み付けを行うことが必要である。

##### 水中障害物の自動検知

デジタル海図からの航路情報の読み取りは良好に実施でき、水中障害物（浅瀬）の表示も良好であった。表示方法（色彩等）については実用段階で対応可能である。

##### 危険性の自動判断

浅瀬や浦賀水道航路に近接している第3海堡等を検知し、予め設定した監視レベルに応じた警報が出され、正常に作動した。浦賀水道の航行にも十分使用可能であるとの実感が得られた。このシステムは船位精度と水路情報の正確さに全面的に依存しているのでマッチング精度と水路情報の迅速な更新が最も重要であると考えられる。

##### 危険情報の自動出力

座礁危険情報も自動的に出力され、動作機能は良好であった。

### (b) 船位の計測精度

#### (ア) レーダ映像のマッチングによる船位の精度

緯度方向および経度方向についてそれぞれ述べる。

○緯度方向に関する測位誤差の度数分布は、レーダレンジ6マイルの場合、3.8%を頂点とし、-0.7%～-4.7%の間に広い範囲に多く分布している。実験した海域（浦賀水道およびその周辺海域）の陸岸部の状態を図6.22に示す。誤差の原因は緯度方向のマッチング・データとなる実験海域で観測されるレーダ映像について、東西方向に伸びる顕著な映像が精度に大きく影響するが、房総半島の富津岬（図6.22中のA）は干出浜がレーダ映像として広くとらえられたのでマッチング・データから棄却された上に、

- ・三浦半島の東京湾に面した北側は走水付近（図6.22中のB）の狭い範囲のデータしかなかったこと
- ・同様に三浦半島の東京湾に面した南側（図6.22中のC）は野比、長沢、上宮田の長い砂浜の海岸線の後方の住宅のエコーを捕らえたデータしかなかったこと

が要因と推察される。

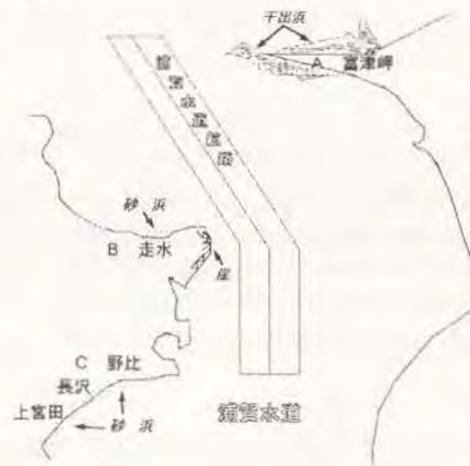


図6.22 浦賀水道航路付近の陸岸の状況

浦賀水道航路南下、北上による顕著な相違は見られないが、北上のほうが南側へのズレが少し大きな値を示している。これは野比、長沢、上宮田の長い砂浜の海岸線の影響ではないかと考えられる。

○経度方向に関する測位誤差の度数分布は、レーダレンジ6マイルの場合+0.1%を頂点とし、-1.0%～+1.8%の間に集中して分布しており、目標値であるレーダレンジの±2%の範囲に入っている。これは経度方向のマッチングデータとなる実験海域には南北方向のレーダ映像、つまり浦賀水道の東西にそれぞれ三浦半島の東側と房総半島の西側の映像が多かったため、非常に良い条件でマッチングできたものと推測される。

浦賀水道航路南下、北上における相違は見られない。

レーダ映像のマッチングによる船位計測誤差の度数分布の平均値( $\bar{X}$ )と標準偏差( $\sigma$ )を求めた結果を表6.3に示す。

表6.3 船位計測誤差の度数分布の平均値と標準偏差

航行状態	計測回数	誤差分布の性質				
		6マイル(11,112m)時の平均値( $\bar{X}$ )		6マイル(11,112m)時の標準偏差( $\sigma$ )		± $\sigma$ 内の度数および%
		m	%	m	%	
緯南行	59	-234.5	-2.11	140.0	1.26	31度(52.5%)
北行	46	-411.1	-3.70	114.5	1.03	36度(78.3%)
度南北統合	105	-312.3	-2.81	156.7	1.41	71度(67.6%)
経南行	59	15.6	0.14	137.8	1.24	43度(72.9%)
北行	46	13.3	0.12	142.2	1.28	38度(82.6%)
度南北統合	105	14.5	0.13	138.9	1.25	81度(77.1%)

○レーダ映像のマッチングについては、レーダ映像とデジタル海図の両画像のデジタル相関をとり最大値となる点に概略位置を修正するようになされた。今回の実験で経度の誤差が少なく、緯度の誤差が多かったのは、マッチング条件の良否の結果によるものと考えられる。従って、観測されたレーダ映像からいかに良いマッチング条件を作るかが今後の課題と考える。

#### (イ) ロランC及びデッカによる船位の精度

ロランCで計測された船位(測地系、陸上伝搬に関する補正済み)について参照位置と比較を行ったがデータのバラツキが多く顕著な傾向は見られない。

また、デッカで計測された船位についても参照位置と比較を行ったがロランCと同様にデータのバラツキが多く顕著な傾向は見られない。

これらの双曲線航法システムによる測位は簡便であるが、自動プロットング精度の目標値とした±222m(レーダの6マイルレンジで2%に相当する距離)の精度におさまっていない。

#### 6.4.4 まとめ

座礁予防システムにおける、レーダ映像のマッチングによる船位の精度は、ロランCやデッカによる船位に比べて精度が良く良好であった。ただし実験海域の海岸線の地形により精度が多少落ちるところがあった。これは陸岸のレーダの反射特性の差によって地図上の海岸線とレーダ映像とに相違が生じるものと考えられる。

今後の課題としては、ハードウェア上の問題として、

- ・海図の切替、レーダレンジの切替時等の処理速度の向上
- ・レーダ映像のマッチングにおける船位精度の向上のためのレーダ映像の分解能や質の改善

ソフトウェアの問題として、

- ・水路情報の迅速な更新

等が挙げられる。

将来は、航海用デジタル海図が世界的に普及すると考えられるのでデジタル海図の更新の方法の確立およびレーダ映像のマッチング用の電波標識等の設置が望まれる。これらによって座礁予防システムの水路情報の信頼性が向上し、またレーダ映像のマッチングによる船位の精度も向上され、座礁事故の減少が期待できる。

#### [謝辞]

本節の技術開発は、(社)日本造船研究協会の場合において「高度知能化船の研究開発」の一環として行われたものの一部であります。またこの実船実験は東京商船大学との共同研究として実施されたものである。作業部会の委員長でいらっしゃいました東京大学工学部藤野正隆教授並びに同委員の住友重機械工業(株)外岡幸吉氏にご協力を頂きました。深甚なる感謝の意を表します。また住友重機械工業(株)の山崎寿男氏、村瀬博司氏のご協力に深く感謝致します。

## 6.5 物標判別方法の未来

### 6.5.1 レーダの歴史的役割

レーダは電波を反射する物体の検出とその位置を測定できることにあった。対象物の種類や対象とする測定量の種類に応じた周波数やレーダの形式が選択されている。短波帯の周波数を使用するOTHから80GHz以上の周波数も使用する電波望遠鏡まで、またドアの自動開閉用や速度違反取締り用の小型ドブラ・レーダから軍事目的の3次元レーダまで多種多様である。船舶用に限って検討すると、重量と大きさ、また、価格を軽く、小さく、安くというように進められてきた。近年の電子工学技術の進歩とデバイスの改良と価格の劇的な低下とで、一昔前には考えられなかった価格で極めて多機能なレーダが開発・販売されている。

### 6.5.2 船舶用レーダのこれからの役割

レーダがターゲットの位置を測定しblip（塊の映像）を表示するだけでなく、ターゲットの判別機能をもって、種類や大きさも正確に表示してくれるようになればその効果はラジオがテレビに変わったくらいの改革となろう。

blipの内容が読み取れるようになれば、レーダの歴史に新しい1ページを加えることになる。電波による探知と測距に加えて情報が入る。

情報を信号に含めさせる方法には、

反射信号に何らかの変調をあたえるもの

レーダ・トランスポンダの形式をとるもの

が考えられる。

#### (1) 反射信号に何らかの変調をあたえるもの

電源などや増幅素子などを使わずに、反射信号の中に受動的な方法で特徴を与える方法を検討する。

反射波がもっている要素は、周波数（ドブラ・シフト）、パルス幅、パルスの振幅（強度）、偏波、偏波の回転方向、などである。

周波数（ドブラ・シフト）：相対速度に応じたドブラ・シフトがある。

パルス幅：照射範囲内の反射体の個数や形状等により、パルス幅が伸びる。多重反射もこの中に含まれる。

パルスの振幅（強度）：反射体の特性により反射強度あるいは方向が変わるため受信強度が変化する。  
干渉などのため強度が変化する。

偏波：反射体の特性により、反射波の偏波面が変わる。  
（回転、旋回、異種偏波）直交成分の比率が変わる。  
円偏波に変わる成分もある。  
偏波面の旋回方向が変わる。

#### (2) 船舶判別用の目的に設置を考えられるコーナ・レフレクタ

船舶の種類や総トン数、あるいは旅客船や危険物積載船などのような船種の判別などに使用できると考えられるコーナ・レフレクタを検討した。

可変偏波コーナ・レフレクタ：偏波面が変更（回転できる形式）  
可変反射強度コーナ・レフレクタ：レーダ反射断面積を可変できる形式。  
多重反射コーナ・レフレクタ：入射したレーダ波を内部で何回も減衰しなく反射させ、少しずつ入射方向に戻す形式。  
ドブラ式コーナ・レフレクタ：入射したレーダ波にドブラ・シフトをあたえ入射方向に戻す形式。  
アクティブ式コーナ・レフレクタ：入射したレーダ波と同じ周波数で増幅した出力で応答させる形式。トランスポンダに相当する。  
符号コーナ・レフレクタ：スイッチング素子と上記の各コーナ・レフレクタとの連動により符号を構成させる形式。

これらのコーナ・レフレクタは、船舶における信号旗や形象物（自船の状態を示す判別用の物）に加えて使用することを検討しており、レーダでの判別の補助機能を与えるものと位置づけられる。

レーダ・トランスポンダが積極的に普及されない理由として次の事があげられる。

- ・帯域内トランスポンダでは、レーダの画面上に一緒に映るので、画面内が混乱し見にくくなるなどの虞れがある。
- ・帯域外トランスポンダでは、受信用に別の付加装置が必要であり、経費がかかる。
- ・電波の割当の問題がある。

このような理由から、特別な周波数の割当を必要とせず、特別な付加装置

を必要としないで、経費の負担の少ない方式が期待されている。

技術開発のひとつの方向として、近年のM I C技術等を応用したアクティブ式コーナ・レフレクタが開発できないものかと考えている。内容的には高級なトランスポンダと同じになるかも知れないが、入射波と同じ周波数で、しかも所定の時間幅だけ持続したパルスを送信できるようなコーナ・レフレクタが開発されたならばその効果は大きい。しかも、簡単な構造で低廉な価格で提供されることが基本である。同じ周波数ならば、自船以外のレーダに対する妨害は少ない。持続したパルス幅がだせれば、その幅に情報を対応させたり、あるいはパルス変調を行って、より多くの情報を乗せることも可能である。

しかしこの場合も、トランスポンダの応答がレーダ映像を観測する際の障害となることもある。そこで、対策として、トランスポンダ側は呼びかけのレーダパルスにたいして

- ・ 3回に1回だけ応答するような機能で、レーダ側で同期させ、映像を表示しない。
- ・ 30秒休止、30秒作動とするようなインタバル機能を付ける。
- ・ パルスの呼びかけ周期が設定値以内の場合のみ応答する。

等の対策も検討する必要がある。

## 7. 次世代航法技術の展望

### 7.1 次世代とは

最近、米国<sup>1)</sup>、欧州<sup>2)</sup>そして1988年2月には国際航法学会がシドニーで開催されたが、それぞれ、未来の航法技術をシンポジウムの一つのテーマとしてとりあげている。特に、ICAOではFANS (Future Air Navigation System) をとりあげ、またRTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) では、CNS (Communication, Navigation and Surveillance) を将来重要な項目と考え、2010年の頃に要求される姿を研究検討している。現在からあと20年 (RTCA が特別委員会を設置した1983年から1/4世紀) 先の世界の航法技術を探ろうとしている。

未来予測の方法としては各界の専門家にアンケートを出し、それぞれ夢や現状の技術、そして将来達成される年代を答えてもらい、そのアンケート結果を集計解析した上で、回答者に集計結果を知らせ、再びアンケート回答をお願いするような方法で未来の動向予測が成されている。あるいは未来予測の方法として我々は古来より「温故知新」という言葉を知っているが、近年の技術の進歩をどのように評価し、過去の技術の評価と対応させて、将来の技術の進歩のベクトルを予想しようとすることもできる。

航法技術の進歩については「航海術の歴史」<sup>3)</sup>にまとめられており、これまでの発展過程を知ることができる。その中では航海技術に関する画期的なものとして、ジャイロ・コンパス、音響測深儀、そして慣性航法があげられている<sup>3)</sup>。

さて、現代において、航法技術という言葉でまず思い浮かぶのは、電子工学の画期的な発展を基礎に進歩した電波航法であるが、電波の存在がヘルツによって確認されたのは、現在からたかだか100年前のことである。

この100年間において電波の利用は長波から短波へ、そして超短波、極超短波へと進み光波の領域にまで急速に高周波領域の利用へと進んでいる。それに伴うように通信設備もかつての大型アンテナは不必要となり、また機器も小型になっている。かつて一部屋いっぱいになってしまった送受信機器も今では機能的な面では手のひらに載ってしまう程となっている。このような状況は、電子工学の進歩によるものが多いことから電波航法というよりは、最近では、電子航法といわれて久しい。そして今やGPS航法受信装置は少し大きめのハンディ型電卓のサイズ<sup>4)</sup>になっている。

現在から10年間程度の将来予測は、現在の技術の進歩の延長線上に見られる

部分が多いと考えられる。しかし30年、50年先の話となると困難である。例えば、30年以前の我々の脳裡の中に今日のGPSやINSあるいは電卓の普及、Personal Computerの個人への普及という状況は空想のものであったと思う。ならば空想でも良いから50年先の船の未来の姿を描いてみよ、と言われても一人の個人の夢を語るようになってしまうおそれを感じる。しかしながら、次世代を勝手に夢想すると、

- ・世界中どここの海にいても現在の位置を要求に合わせて正確に表示してくれる電卓程度のサイズの機械<sup>4)</sup> (これはすでにもう一部に出現しているが、。。。)
- ・世界中の、どこでもマルチメディア通信ができるポケットコミュニケーター。(重さは300g以下)(カナダのM-SAT計画にその兆しがある。)
- ・地名や物標の名称が自動表示される双眼鏡、あるいはテレビ画面表示方式の映像が揺れない望遠鏡(パターン認識技術や安定プラットフォームの普及)
- ・視野内にある他船と自動的に意志交換できる通信機器(異言語の船には、言語上の支障がないよう図形やシンボルで簡潔に表現できるものが良い。もちろん普通の会話もできるもので、自動翻訳機能が付いているもの)
- ・揺れない船(半没水船の普及)
- ・絶対に海難を起こさない安全な船
- ・100ノット程度の速度をもつ船
- ・完全無人でも航行できる程に自動化された船(輸送手段あるいは漁労手段としての船舶)
- ・「海のロマン」のための船(レジャー用の船舶)

などがあるのでは無いか。夢として感じる一部のものであるが多くの方々と共通する部分があると思う。夢の一部を想像して図7-1に描いてみる。

次世代航法において通信は一層重要になると考える。現在の船舶運航、経営形態の変遷の源であり、礎を作ったのは通信技術の進歩である。航法の原点は現在の位置を正確に知ることであり、その位置から将来の進むべき位置を決定していくことであるが、電波航法も基礎は通信技術であり、いまや衛星通信業務の中に測位サービスが含まれようとしている。

将来の航法技術を考えるにあたって、外部から情報が伝えられる高度な通信形態の存在は最適な航海に不可欠なものであるが、通信は機器の故障や電波伝搬上の原因で途絶えることが予想される。その間、自分の位置が不明確になることは安全上大きな問題となる。位置の測定は電波航法や通信技術に依存しなくても可能なので、大型航空機では慣性航法を使用して、「人工衛星や地上の

航法援助装置を使用しない」航法、Self-Contained Navigationが行われている。著者は、この「自立航法(Self-Contained Navigation)」に加えて自分では収集不可能な外部からの情報で支援された自律的な航法が普及しはじめているのではないだろうか、と考えている。

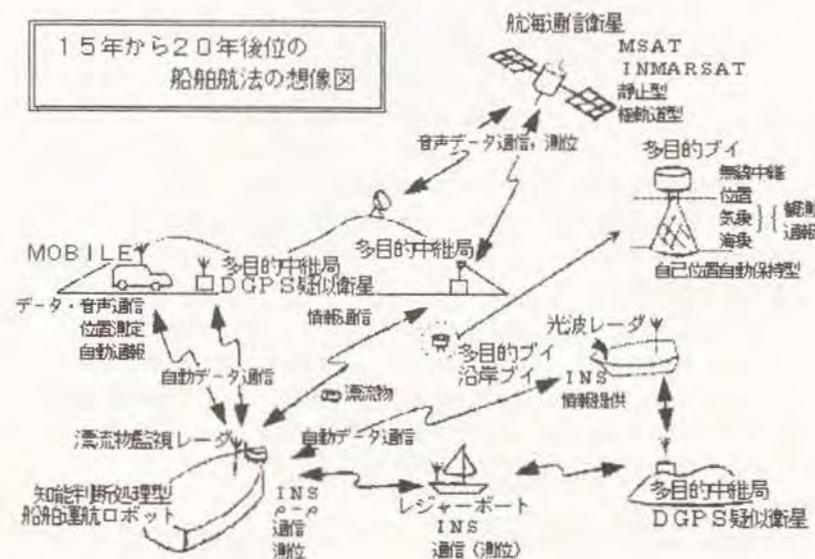


図7-1 15年~20年先の船舶航法の想像図

## 7.2 次世代に向かう世界の動向

### 7.2.1 船舶および航空用航法システムの動向

[Future Navigation Needs and Direction]

(U. S. A. I. O. N. Proceeding of the Forty-Third Annual Meeting)、

[Future Ship] (西ドイツ)、

[Radio Nav. 2000] (英国, Institute NAV '88)、

[Navigation Developments and Techniques towards 21st Century]

(International Congress, Feb. 1988)、

「高信頼度知能化船の研究開発」(日本)、

と世界中で次の世代の航法や船について研究開発が行われ、また論文等が発表されている。また米国が発刊している連邦電波航法計画(Federal Radionavigat-

ion Plan)では将来の電波航法システムの存続、廃止について米国の政策が述べられており、米国以外の国にも絶大な影響力を及ぼしている。

初めにアメリカ合衆国の動向であるがFRP(1984年版)で1988年にはGPSで三次元測位を可能にすると明記されていることもあってか、1987年1月に開催された先述の第43回年次講演のProceedingではFuture Navigation needs and direction(未来航法への要求と動向)の章ではこれから重要な3つの項目としてC.N.S.の3つが挙げられている。CはCommunication(通信)、NはNavigation(航法)、そしてSはSurveillance(監視)である。このことはICAOのFANS特別委員会(FANS:Future Air Navigation System)でもとりあげている問題であり、航空関係者の間では、計器着陸の際に使用しているILSがMLSに切り替えられることとGPS航法の採用とで大きな航法技術の転換期になっている。米国航法学会(ION)は航空、航海そして陸上(自動車)が研究発表の場となっているが、航海の立場から、USCGの某船長が次のように表明<sup>5)</sup>している。

「将来の船乗りは、大洋、海、湾、湖、川、そして港を航海するとき、どのようにして自分の針路をみつけるのだろうか?、船乗りの眼、浮標、コンパス、クロノメータ、そして霧笛、燈台、電波標識、六分儀、そして速度計は無用のものになってしまうのだろうか?、一つの”MAGIC BLACK BOX”で全てが取って変わるのであろうか?」

と疑問を投げかけている。

米国における今日の論文発表の傾向を見ると、最近では、GPS、Differential-GPSやPseudo-Satellite(擬似衛星)に関するものが多い。そしてGPSと他のセンサ、特に慣性航法用センサを結びつけ精度の向上や、現状のGPSの打ち上げ状況におけるNAVSTAR衛星で位置が求められない時の補完を行うためのものが発表されている。またAutonomous Navigation(米国での取り扱いは内容的に自立航法に相当する。)に関する研究も、加速度計やレーザジャイロなどの慣性航法用センサに関して盛んに研究されている。INS(慣性航法)に関するものも極めて多い。

連邦電波航法計画1992年版(Federal Radionavigation Plan)は1992年末までに米国内で検討された結果を踏まえて1993年に発刊された。執筆当時現在(1994年2月)ではまだ1994年版は取得できていないので1992年版に基づいて航海に関係する各電波航法システムの存続、廃止計画について連邦電波航法計画から抜粋して表7-1に掲げる。

表7-1 1990年から1992年における各電波航法システムの利用および停止計画(Federal Radionavigation Planから抜粋)

ラジオビーコン	: 簡便な航法として次世代まで続ける。
ロランC	: 米大陸および沿岸海域で利用できるロランCシステムは、次世代まで電波航法システムの一部として続ける。しかし、海外(北米大陸を利用範囲としない)の軍事用のロランCの利用は1994年12月までに停止する。
オメガ	: 次世代まで電波航法システムの一部として続ける。DODは1994年12月までにオメガの利用を打ち切るが、米空軍は使用を続ける。
TRANSIT	: 日本での名称はNNS 1996年までにGPSに置き換えられる。TRANSITは、米国政府の民間協力機関に、移管、運用されることはない。
GPS	: 1993年半ばには24個の衛星が揃い24時間全世界で利用できる。1995年には軍事機能の利用も始まる。精密位置決定方式(PPS)は、主に軍事上の国家保安上の考慮から利用が制限されるが、GPS/PPSでは2drmsで100mかもっと良い精度を保証する。
地表用	: 計画されている100mの精度では、多くの沿岸航海あるいは港湾内、港湾入口での航法の要求を満たすことはできない。さらに陸上での利用では10m程度の精度が要求されている。この厳しい要求は、GPSの拡張形態であるディファレンシャルGPSによって満たされる。米国の港湾とその入口では1996年までに10m(2drms)の精度が得られるようになる。

## 7.2.2 ランドナビゲーションの動向

自動車を対象とした陸上航法(Land Navigation)の研究は、まず対象となる利用者数が莫大であることから多くの研究開発がなされ、多数の発表がある。GPSと慣性航法センサを使用する形式<sup>6)</sup>やロランCを位置センサとしてデリバリーサービスに応用した例<sup>7)</sup>など、またタクシーやトラック、その他様々な移動

体を対象とした、図7-2に示すようなAutomatic Vehicle Location System<sup>8)</sup>・<sup>9)</sup>といったものがある。すでに簡便な方式は世界の数カ国でも使用されている。

### AVLS MOBILE STATION BLOCK DIAGRAM

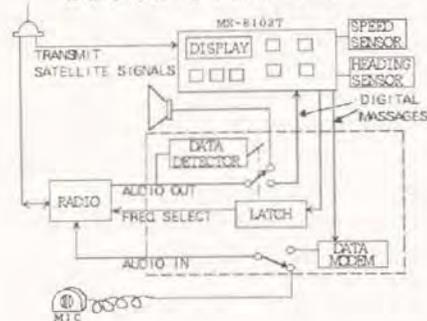


図7-2 AUTOMATIC MOBILE LOCATION SYSTEMの構成

このシステムは各移動体の現在位置の集中的な管理と目的地への誘導、そして個々の移動体には位置と適切なメッセージや音声での伝達を行うものである。このシステムは、やはり航法と衛星通信を総合したものである。一般民間の自動車を対象としたランドナビゲーションとしては、世界各国で開発されているシステムを紹介した論文<sup>10)</sup>を参照して動向の概略を述べる。自動車におけるこのような航法の開発の意図は、「走行ルートのご案内や情報提供と交通管制」にあり、混雑解消と所要時間の短縮を目標としている。このようなシステムでは、1960年代のアメリカ合衆国で研究されたERGS (Electronic Route Guidance System)があり、このシステムは道路わきに設置された自動無線通信装置によって個々の自動車に道路網の判断ポイントで指示を出すものである。同じような方式はわが国でもCATCS (Comprehensive Automobile Traffic Control System)と呼ばれた通産省のプロジェクトとして研究されたものがある。また西ドイツでは政府と民間との協同開発によるALIやALI-SCOUT (Guidance and Information Systems for Drivers)が開発された。このALI-SCOUTは図7-3に示すように地磁気方位センサーとオドメータからの走行距離データを使って推測航法を行いながら、また道路際の重要ポイントに設置されている信号機と赤外線でデータ通信を行うものである。

英国ではAuto-Guideと呼ばれるものがあり、先述のERGSと同様に道路際に立てられた通信用ビーコンとコンピュータが瞬時に情報交換を行って、交差点で進行すべき方向を合成音か簡単なグラフィック表示で運転者に伝えようとするものである。推測航法をベースにして、道路とのマップマッチングとFM放送のサブキャリアを使ったデータ伝送によって航法と走行誘導を行うCARIN (Car Information and Navigation)という方式も研究された。紀元3世紀に出現した中国の指南車のような、CARIN-IIでは、左右の車輪にそれぞれオドメータ (differential-odometer) をつけ、内・外側の車輪の走行距離の差で

P: Position-finding device with magnetic field sensors MS and wheel pulser WP  
 N: Navigation device  
 O: Operation Board with keyboard, direction indicator and destination store DS  
 MT: Measuring device for travelling time  
 IT: Infrared transmitter  
 IR: Infrared receiver

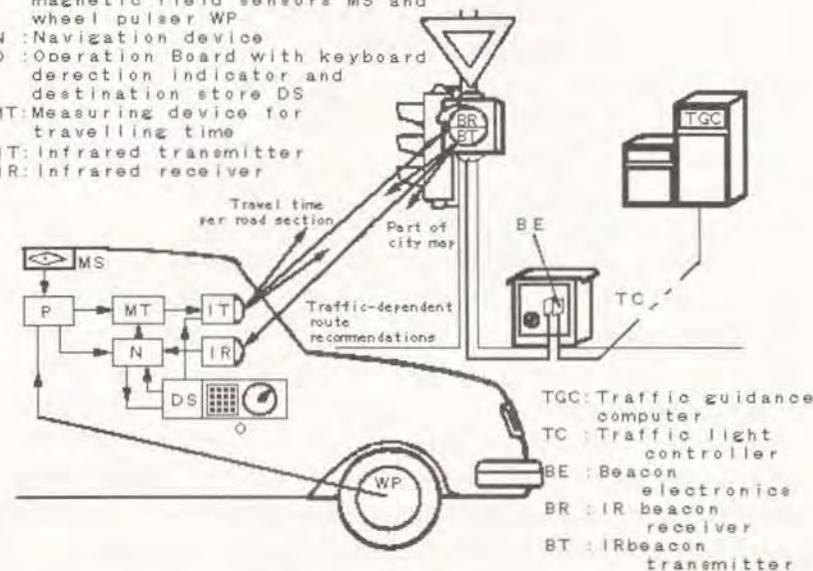


図7-3 ALI-SCOUTの動作原理 (10)

初期方位からの方位の偏角を求め、またフラックスゲート方式の地磁気センサーからの方位も同様に使用している。推測位置は、マップマッチング方式を併用して求めている。図7-4にCARIN-IIの試験システムの概略を示す。この方式はカリフォルニア州の運輸省で1988~89年に実験がなされる。

このような自動車を対象とした航法システムは対象者数が莫大であることから、この方面向けに開発研究された高級なシステムが大量生産により安価に提供されることになろう。民間船舶用としての開発は経済的制約が大きいのでランドナビゲーション向けに開発された技術が船舶用の航法システムへ波及する部分が多いと考えられる。この中で使われる無線を使用した情報 (データ) 伝送 (RDS: RADIO DATA SYSTEM) は船舶航法にすぐにも応用できるものとなる。

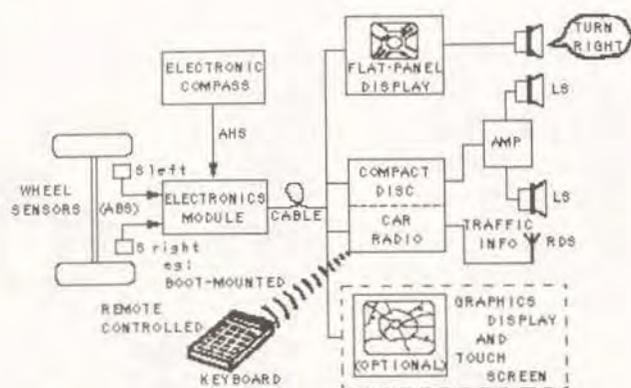


図7-4 CARIN-11の試作システムの構成 (10)

### 7.3 航法と関連技術の展望

#### 7.3.1 航法システムの統合一元化

米国の連邦電波航法政策 (Federal Radionavigation Plan) は将来の電波航法について、各種ある現行の電波航法システムを整理統合していく方針が年次計画として述べられている。日本を初め欧州各国では FRP に対する懸念<sup>11)</sup>が表明されている。海上における測位について、GPS に全面的に依存することの危険性への指摘がある。例えばロランでも GPS でも Coding が変えられたならば位置が求まらなくなることは周知の事実である。各国とも国内事情を考慮した上で、少なくとも最小限、自国の領海や周辺海域での測位サービスは確保しようと考えている。GPS で全世界的に設計当初の測位性能が提供されるようになったとしても、GPS 一辺倒となってしまうことは避けようとしている。

現在は航法、通信にしてもいくつかの手段がある。その一つの手段が故障しても他の手段によって補助され大事にいたらずに済むということが考えられる。しかし統合一元化により一つか二つの手段に限ることの危険は一般民間人よりも軍事関係者の方が強く感じるものらしく有事には GPS に代わるような自立航法システムの確立を目標とし、併せて大洋航海中には最終手段として天文航法や電波天文航法の技術を維持あるいは開発しておく<sup>12)</sup>もある。

#### 7.3.2 通信技術の展望

船舶と陸上、あるいは船舶間の通信は中、短波帯の無線電や SSB 電話、国際 VHF、ファクシミリ、テレックス、そして INMARSAT による衛星通信で実施

されている。このようにいくつものシステムの通信手段が使用されているが、航法機器同様にいくつもの通信機器を装備するのではなく、1~2 系統の確実な通信連絡手段に統一されることが望まれる。沿岸域から大洋上まで利用可能な方式としては衛星通信しか無い。現在の INMARSAT 海事衛星通信について船舶地球局は標準 A と呼ばれる方式で行われているが、INMARSAT 機構は新しい方式のサービスを提案し、第 1 世代から第 2 世代へ移行しようとしている。従来の標準 A は表 7-2 に掲げているようにアナログ方式の FM で、電話が主体の方式である。デジタルデータ伝送には不向きであり、また占有周波数帯域も 30 KHz と広くチャンネル数に制限を受ける。近年のデジタルデータの伝送要求に応じてデジタル方式で電話とデジタルデータの伝送を行う標準 B 方式が精力的に検討され標準仕様が間もなく決定される。しかし、この間に衛星通信によるデジタルデータの伝送の要求が高まり、しかも簡便な方式が望まれたこともあって標準 C 方式が検討され、試験運用が実施されており早ければ 1989 年 6 月には利用開始が予定されている。この標準 C では、標準 A や標準 B のように電話はサービスされていない。600bps の低速のデジタルデータ伝送に限ることとして小さなアンテナ、小さな送信出力の装置で簡便な装置による方式を目標としている。アンテナには無指向性アンテナが使用され、システムの全体的な性能指数である  $G/T$  は  $-23\text{dBK}$ 、そして  $EIRP$  (有効輻射電力) は  $16\sim 12\text{dBW}$  となっている。従来の標準 A、B での  $G/T = -4\text{dBK}$ 、 $EIRP = 36\text{dBW}$  でのパラボラアンテナを制御した従来方式に比べ極めて簡便となっている。

標準 C 船舶地球局の設備の概略を図 7-5 に示す。標準 C ではアンテナと送信電力の関係からフェージングやノイズの影響を受けやすくなるため、ビットインタリーブ方式と蓄積転送方式の採用により誤り訂正を行うようにしている。

表7-2 インマルサットにおける船舶地球局の特性の概略

	標準A	標準B	標準C
電話1回線当たりの所要帯域幅	30kHz	20kHz	電話なし
回線容量	小	中	大
変調方式	FMアナログ式	PSKデジタル式	BPSKデジタル式
コンパチビリティ	—	標準Aと同じアンテナを使用 送受信機も利用	新しい方式
利用可能なサービス	電話 テレックス	電話(デジタル) テレックス デジタルデータ 伝送(2400bps) グループコール ポーリング (300bps, 9600bps)	デジタルデータ (600bps)のみ 蓄積伝送  拡張EGC ポーリング
将来への対応		ISDNを考慮	
送信電力	一定	34~25dBW(EIRP)	12dBW(EIRP)
品質目標		$10^{-3} \sim 10^{-4}$	
アンテナの性能	4軸制御 -4dBK	3軸制御 -4dBK	無指向性小型軽量 -23dBK

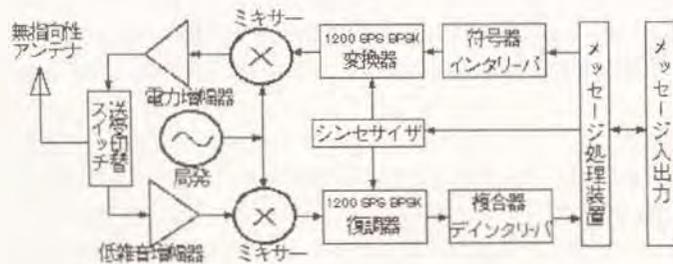


図7-5 INMARSAT標準C船舶地球局の設備(概略)

(INMARSAT標準Cシステム: KDD資料より)

また標準C方式ではEGC(Enhanced Group Calling、強化された群呼び出し機能)を使用して、

- (1) 遭難船の周辺の船舶に通報を送る。

- (2) 特定の海域にいる船舶だけに通報を送る。

- (3) ある定められた海域内にいるか、進入してくる船舶に通報を送る。

- (4) 特定のグループ(会社等)の船舶だけに通報を送る。

等のサービスが可能であり、海上安全情報の伝達に有効な機能である<sup>13)</sup>。そのためIMOでは1991年から施行されるGMDSSにおいて、標準Cの船舶地球局を衛星の可視範囲を航行する300総トン以上のNAVTEXが届かない船舶に義務設備として搭載させることを認めた。また標準CではPolling機能によって自社の船舶の現在位置、針路、速度および主機関連データも自動的に収集することが可能である。この機能にセンサを接続しておけば、一定時間毎に個々の船舶の情報を自動的に送信させることもできるので、将来の船舶の運航や管理に大きな効果をもたらす可能性がある。そのようなことから標準Cは船舶に搭載される通信機器として最も重要な一つとなると考える。標準Cでは通信衛星を利用する測位方式も検討されておりデータ伝送を通じて移動体の位置を決定する方式で、課金も可能な能動的な方法である。遭難通報(SOS)も装置のボタンを押すだけで識別符号が送られ、しかも位置が測定されることとなる。測位精度については現在検討段階のアンテナ形式では粗測定で1~4km、将来のスポットビーム方式ならば精度の1桁向上が可能とされている<sup>14)</sup>。

この標準Cは、陸上用の衛星通信装置としても脚光をあびており車両に搭載してデモンストレーションが行われ、プレジャーボート等でも搭載可能なサイズと低価格を目標としている。このように一昔前ではとても考えられなかったような衛星通信が、まるでトランシーバを使うように利用できる時代がすぐ到来しそうである。現実には、1988年の3月にはすでに携帯型衛星通信電話(\$45,000)がエベレスト登山隊に使用されている<sup>15)</sup>。

### 7.3.3 船橋当直の変化と電子海図

船橋における当直体制の変化は人員削減の世界的情勢の中で変化し、現在一部では昼夜を問わず一人で航海当直するという状況になりつつある。機関室の無人化は言うまでもない。船橋当直が一人でできるためには、自動化機器とそれらの機器や海図机あるいは海図の最適な配置やディスプレイ、一人でも十分に周囲の安全確認ができるように設計された船橋が必要となろう。近年、西ドイツのNORASIA SAMANTHA号(コンテナ船、全長173m、幅28.4m、1,546TEU積み)等の例に見られるように一人当直を前提にした設計がなされている大型船もある。西ドイツの「明日の船」計画では、このような大型船で従来のような広大なスペースの船橋ではなく、むしろ、こじんまりとして、必要な時には二人~三人でも当直できるような船橋に設計されており、しかもその操縦席は右

舷前方の視界を考慮して右舷側に偏っているものもある<sup>16)</sup>。その例を図7-6に示す。座った姿勢で当直するという方式では、従来の船橋のように室内を歩き回ってレーダを観測し、機関制御盤や速度計、風向風速計を見てまわり、各種の船位測定装置で計測し、そして海図机の前で自船の位置を海図に記入するというような平面的に情報機器が散在している形式はとれない。当然のことながら各種の関連情報やレーダ映像情報などを整理統合した上で数個のディスプレイ装置でまとめて表示する方式が必要となる。また当面の間は、電子海図と従来の紙製海図が併用されるであろうが海図の交換や海図上での迅速な現在位置確認のためには、紙製海図に代替しうるだけの電子海図が必要となる。この電子海図についてはIHOとIMOの協同作業のもとに電子海図の標準を作成して各国の水路担当機関の協調と電子海図の標準の統一が検討されている<sup>17)</sup>。電子海図の中に表現されるべき情報の種類と詳細さ等については使用するハードウェアに依存する部分が極めて大きく、依存せざるを得ないが、航法装置として持つべき性能要件に次のものを加えるべきと考える。

- (1) 自船の行動海域の全域について紙製海図と変わらぬ情報を要望する。表示方式の性能上の制限があれば表示の階層化を図り、情報を整理して選択表示できるようにする。
- (2) 表示装置はカラー表示が可能なものとし、Red, Green, Blueそれぞれ2階調以上の表示ができる程度は必要である(26色以上表示となる)。
- (3) 表示装置のドット分解能としては少なくとも1024×1024ドット以上の性能のものとして、できるならば4096×4096ドット以上のディスプレイとしたい。このような高級な装置は現在ではまだ市販段階にはでてきていないが、この程度を目標とすべきであろう。
- (4) 海図情報の伝達には臨機応変に所要の海図を表示できるように、またデータの読み出し時間はできるだけ短いことが望ましい。情報の高密度記録と高速ランダム読み出しの面からは現在は光レーザディスクが最適であり、1枚当たり0.5GB～1GB記録できる。あるいは、DAT (Digital Audio Tape) や Cartridge tapeなどの磁気テープ媒体も考えられる。
- (5) 海図情報の改補については、緊急を要するものは、海事通信衛星経由で船内の海図データベースを修正させるべきであろう。このような海事衛星経由で船内データベースを陸上で管理し変更修正すべき情報をもっとも効率良くしかも安い通信経費で行う方法<sup>18)</sup>も研究開発されているので実現できる話である。さほど急を要しない改補ならば改補すべきデータを所定の媒体で郵送により取得して改補する方法が現実的である。現在、この問題については多くの国の海図発行機関が対応方法を検討している段階と聞

いている。

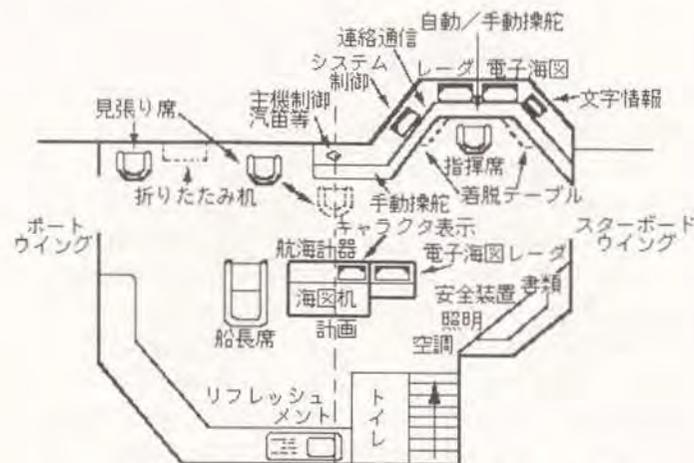


図7-6 単独当直のための船橋設計の例<sup>(18)</sup>

### 7.3.4 船舶用レーダの展望

PPI表示方式のレーダが開発されたのは第二次世界大戦中のことである。その後、表示方式については変わっていない。また、現在までに船舶用レーダにおいてもシークラッタの抑圧、目標の移動を検出してベクトル表示するようにした(ARPA)ものや 明るい場所でもフードなしで観測できるように高輝度化したもの等が製造販売されているが基本的に大きな改革は無かったように考える。

その理由として

- 1) 方位分解能や距離分解能など本質的に原理に基づく性能は変わらない。
- 2) 使用する周波数は海面反射の少ない周波数が選ばれており、一般航海用には9.4GHz帯の周波数が使用されている。
- 3) 反射信号は物体の反射の強弱に関係しているもので物体の形状をそのまま表していない。

などが挙げられる。しかし、船舶用レーダは軽く、小さく、しかも低価格で購入できるようになり、特に最近ではレーダのマイクロ波受信部にマイクロ波IC (M.I.C.)が採用され雑音指数の向上を図り、小さな尖頭出力でも従来のレーダと変わらぬ性能を持つ装置が開発<sup>19)</sup>市販されている。方位分解能の改善は使用するアンテナの物理的な長さで決定されてしまうものであるが、複数のアン

テナからの信号を演算処理する方法で放射パターンの先鋭化を行ったレーダアンテナの例<sup>20)</sup>も報告されている。海面反射の抑圧については種々の方式が提案されている。これらの中で従来からのSTCに加えて、受信信号を対数増幅特性で増幅した後、一定誤警報率(CFAR:Constant False Alarm Rate)処理して海面反射を抑圧するものを付加機構として備えている機種もある。また最近、海面反射雑音の振幅特性は種々の観測結果からワイブル分布に近いことを求めて、CFAR 信号処理方式を改善して大きな抑圧効果をあげている例<sup>21)</sup>がある。

レーダ反射信号は物体の形状を肉眼で見るときのような映像として映すことはできないが、高分解能レーダを使用すれば映像の形状の概略が影絵のようになり、判別できることが報告されている。一つは空港内に駐機しているDC-9型旅客機をASDE-3型レーダ(距離分解能5m、方位分解能0.25°)でそのイメージを観測したもの<sup>22)</sup>、また港湾監視用レーダ(距離分解能15m、方位分解能0.25°)でとらえた船舶のイメージの例<sup>23)</sup>をそれぞれ図7-7および図7-8に示す。DC-9型機の例では飛行機の形状が判別できる。船舶の例では、荷役装置、船橋、およびマスト等の構造物がある部分は構造が複雑なことから多重反射がおこり、映像が長く尾を引いている。この現象を船の構造形状と対応させて考えられるならば反射信号のイメージから船種や船形あるいは船の大きさ(総トン数)等の船固有の情報が推定できる<sup>24)</sup>。



図7-7 Airport Surface Detection Radar (ASDE-3) による航空機 (DC-9) の映像<sup>(22)</sup>



図7-8 港湾監視用レーダによる船舶の映像<sup>(23)</sup>

レーダの表示方式について考えてみると、表示されている物標が自動識別されて画面上にシンボルマーク等で表示され、さらに必要に応じて操作すると、船名、船種、行先、操船上の意志等が現れるようになれば、極めて有用になると思われる。ちょうど、海図上に相手船や物標、あるいは漁網等の位置を正確に表示して、しかも、それぞれの情報も表示するようなものである。これらの情報を表示するための具体的な方法として

- (1) 自船や物標にトランスポンダを設置し、レーダ周波数の帯域外でデータの授受を行う。
- (2) 完全自動化無人工場で、少量多品種生産に使用されているようなNon-Batteryのデジタル情報の自動応答モジュールの船舶・海上版を開発し普及させる。
- (3) レーダリフレクタの反射率をレーダからの呼びかけに応じて変化させデジタル情報をのせる。

など、自動応答できる何らかの通信網の設定を考える。そうすれば、単にレーダ画面が見やすくなるばかりでなく、船舶の安全航行に寄与できる部分は極めて大きいと考える。

さて、カラー映像表示技術の進歩とカラーテレビ装置が低廉になってきたことから、レーダにおいても各社でカラーレーダなるものが製造販売されており普及しつつある。レーダのカラー化については筆者ならずとも、それぞれ意見をお持ちだと思うが、一般的な意見をいくつか列挙し、その問題点と将来の方

向を検討してみる。

- (1) レーダのカラー化は、白黒テレビがカラーテレビに代わったような上位方向への技術進歩とは別のもと考えられる。つまり本来、色彩を持っていた物体が技術的、あるいは価格的な制約から、白黒の輝度のみで伝えられていた視覚情報に、色彩情報も加えて、より真実、現実に近い視覚情報を表現したものではないからである。もともとレーダで見える情報には色彩に関する情報は無いにもかかわらず、反射信号の強度に応じて便宜的に色彩を割り当てているに過ぎない。我々は「赤」は危険なもの、あるいは停止信号のような重要なものとして習慣づけられているが、カラーレーダにおいてこの「赤」は利得（感度）やSTCなどの調整次第で変化してしまい個々の映像から得られていた情報が別の情報に変化してしまうことになる。
- (2) レーダのカラー化はあまり大きな表示器を必要としない小型のレーダのディスプレイとして多く採用され、小型船やレジャーボートに普及しつつある。大型船の乗組員等で従来型のレーダディスプレイを見慣れてきている者にとっては、映像の出方から経験的に学習してきた判別能力がうまく使えず、新たな学習を余儀なくされるので受け入れ難い面がある。また大型船用のレーダに使用できるような大型サイズでドット数が1024×1024ドット以上のカラーブラウン管は製造が容易ではなく供給数と価格の面で問題があったことも普及しなかった一因であろう。
- (3) これまで従来型レーダの映像を見慣れていなかった初めての人達にとっては、カラーレーダの方が見やすいというような傾向もある。しかし、そのような人達のなかにもレーダの映像の色彩は無意味で却って見辛いという本質的な意見もでてきている。

近年、大型船を対象としたラスタスキャン方式の26吋のモノクローム（緑色）のブラウン管に8段階の階調をもたせたレーダ映像を表示させ、押ボタンスイッチとトラックボールで操作する表示装置がK社から市販されている。また同様にT社からは19吋のモノクローム（緑色）及びカラーの表示画面をもつ、2機種種のレーダが市販されており、この機種もレーダ映像は8階調をもつレーダ映像を表示している。ここで特筆しておきたいことは、カラー表示の装置でもレーダ映像の表示については緑一色のみとし、感度調整を変えても色が変わるというような事が無いように配慮されている点である。避險線や他船のベクトル等、レーダ映像とは異質の情報の表示や、レーダの各種の調整や切替の情報は容易に識別できるようにカラー化されている。

レーダの映像表示にあたって8段階の階調をもって表示するようにしたことは、使用者のこれまでの経験的学習効果が生かせるので見やすく良い方法と思

う。以前に0か1の2値化表示方式の映像を見たことがあったがとても見辛いものであった。

レーダのように自船から電波を送信し、反射信号を解析処理し、併せて自動通信システムにより周辺の船舶や物標と通信を行って、映像を表示する方式は、他船からの通信を除いて支援の必要がなく自立的である。しかし、狭水道通過時や港湾周辺では、より多量の情報を必要としたり、あるいはレーダ偽像や、極端な例では、防波堤の陰から出てくる小型船の情報等も要求される。そこで、このような海域では、陸上に設置した情報サービスセンタのような機関が、条件の良い数カ所でレーダ映像を観測収集し、関連情報を加えてレーダ映像画面に相当する映像情報を通航中の船舶に放送するような概念もある<sup>24)</sup>。

レーダのハードウェア自体の改善については前にも少し述べたが、昔から「レーダのアンテナを回さないで済む方法は無いのか」という事が良く言われてきた。軍用レーダにおいてはその軍事的必要性から、アンテナを電子的に回転させる方式のレーダが開発され使用されてはいるが、民間船舶用としては、現在は価格的に検討の余地が全く無い。また、現在のマグネトロンについても他の半導体発振器に置き換えることは難しいと言われている。しかし、超高周波領域の発振増幅素子として、GaAs-FET（ガリウム-ヒ素電界効果型トランジスタ）やHEMT（High Electron Mobility Transistor）素子の性能開発が進み、円筒面アレイ方式の平面アンテナ等の研究が進めばマストや煙突に巻き付けて、あるいは舷側に貼ったレーダアンテナが出現し、極めて高い方位分解能を達成できるかもしれない。

このような電子式スキャンのレーダアンテナでは、機械式旋回アンテナでは到底得られないような速度で旋回させたり、あるいは重要物標の方位だけ重点的に走査させることが可能となる。また映像の更新レートも高まるので、高輝度ディスプレイ化としての性能とともに、船舶ではあまり必要ないかも知れないが、高速で移動している物標も明確に捉えられる性能も併せ持つことができる。

使用する周波数については分解能の改善のためにミリ波領域や光波領域までの周波数を利用することも考えられる。それより以前には複数の周波数（例えばS,C,X,ミリ波、赤外線など）を使用し反射特性の相違から、物標の特性を推定、識別するレーダが普及することも考えられる。航空機や人工衛星で実施されているMSS（Multi Spectral Scanner）の水平方向2次元スキャンも考えられる。