

## 漁業練習船南星丸のレーダ有効反射面積

松野保久\*<sup>1</sup>, 東 政能\*<sup>2</sup>, 幅野明正\*<sup>2</sup>, 前村知宏\*<sup>1</sup>

### Radar Cross Section of Fishing Training Ship NANSEI-MARU

Yasuhisa Matsuno\*<sup>1</sup>, Masataka Higashi\*<sup>2</sup>, Akimasa Habano\*<sup>2</sup> and Tomohiro Maemura\*<sup>1</sup>

*Keywords* : Radar cross section, Reflection strength, Fishing training ship

#### Abstract

In radar navigation, it is very important to get an accurate radar image of other ships in order to avoid collisions between ships. However, when meteorological and maritime conditions are bad, or when the aspect angle of a small ship changes, it may become difficult to obtain a radar image of the small ship. Therefore, safe navigation is not assured. So, the measurement of a radar cross section of Nansei-maru was carried out.

The results obtained in this study were as follows:

1. A refracting point between  $1/R^4$  and  $1/R^8$  attenuation curves existed at 3945m.
2. The effective height of radar wave reflection was measured at 2.46m from the surface of the sea.
3. The radar cross section was largest,  $1790\text{m}^2$ , when the beam faced the radar antenna, and was smallest,  $130\text{m}^2$ , when the bow was toward the antenna. The value decreased about 10 dB, when it shifted at  $30^\circ$  from the beam direction. In addition, the value of the stern direction was larger than that of the bow direction.

近年沿岸航法を実施するに当り、電子海図へのレーダ映像の重畳技術による視覚的直感による使用上の利便性の向上、さらに自動衝突予防援助レーダの普及など、レーダの重要性はますます増加している。このレーダ航法において、大型船から小型船まで、あるいはブイ等に至るまで、レーダ映像としての確に捉えることが絶対条件となる。しかしながら小型船の場合、気象・海象条件や自船のレーダ性能・アンテナ高さあるいは標的のレーダ波反射特性などにより、レーダ映像として判定不可能となる場合がしばしばある。特に交通量の多い海域あるいは狭水道航行時など安全な航海が保障されない。

このような観点から操船者は標的となる小型船のレーダ反射特性を十分に認知するための基礎的データを得る必要があり、また小型船操縦者も自船が相手船にレーダ映像としてどのように捉えられているかを推定する必要

がある。平成14年度に新造された漁業練習船南星丸(175トン)は小型船舶安全規則に定める小型船舶ではない。しかし船体の方向によっては、レーダ波反射強度が小型船と同等以下の場合も推定される<sup>1,2)</sup>。また南星丸と同程度の大きさの船舶のレーダ波反射特性の資料は極めて少ない。そこで南星丸新造の機会を捉え、レーダ有効反射面積の測定を実施した。

#### 方 法

南星丸のレーダ有効反射面積測定のための構成をFig. 1に示した。トリガー信号としてレーダパルス発射信号を、またレーダ受信機回路よりビデオ信号をそれぞれオシロスコープに取り込み、南星丸からのレーダ波反射電圧を測定した。使用レーダはJRC製(JMA-2254)

\*<sup>1</sup> 鹿児島大学水産学部環境情報科学講座 (Laboratory of Environmental and Information Sciences, Faculty of Fisheries Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890-0056 Japan)

\*<sup>2</sup> 鹿児島大学水産学部練習船南星丸 (The Training Ship Nansei-maru, Faculty of Fisheries Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890-0056 Japan)

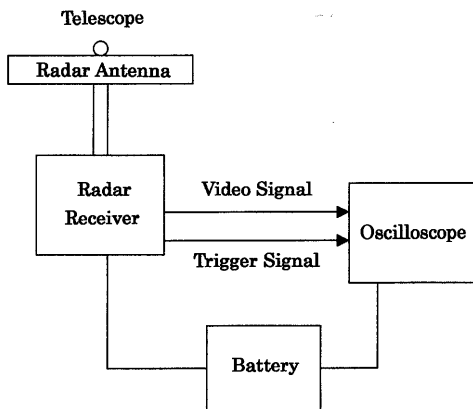


Fig. 1 Block diagram for measurement of radar cross sections.

Table 1 Specifications of the radar used for measurement.

Transmit Power	4 kW
Antenna Gain	500
Transmit Frequency	9410 ± 30 MHz
Wave Length	0.032m
Horizontal Beam Width	2.0°
Vertical Beam Width	30.0°
Pulse Length	0.08μs
Repeating Frequency	2250 Hz

で、測定時の諸元を Table 1 に示した。またオシロスコープはソニー・テクトロニクス社製 (TD3012) を使用した。

測定場所は鹿児島湾奥海域で実施し、当日の天候は晴れ、無風状態であった。

レーダアンテナ (以下アンテナと記す) を始めとする測定器材は全て Fig. 2 に示す加治木港内に係留された浚渫工事用台船 (長さ38m, 幅16m, 深さ3m, 総トン数644トン) 上に設置した。このことにより、アンテナを陸上岸壁に設置した場合とは異なり、水面に対するアンテナ高さは、潮汐の干満による影響を受けることなく、測定期間中は常に4.08mを保持した。また外力による台船の動揺は皆無であった。

南星丸からの反射電圧の測定は、アンテナの回転を止め、主ロープが正確に南星丸船体中央に向くよう手動調節する必要があった。今回の測定に於いては、アンテナと船体との距離が最大約9kmとなるため、Fig. 3 に示したように倍率10倍の望遠鏡を取り付け、その望遠鏡視野に十字線で示された視軸線と主ロープ軸とが一致するよう予め調整し、測定の都度視軸線を南星丸船体中央に一致させるようアンテナの向きを微調整した。

南星丸はアンテナ位置の経度線 (東経130°39.77') 上を移動させ、アンテナからの距離1000m~5000mまでは500m間隔で、5000m~9000mは1000m間隔の合計13測

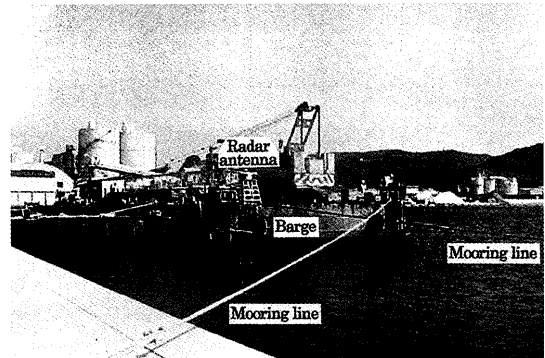


Fig. 2 The barge placed the radar antenna in Kajiki port.

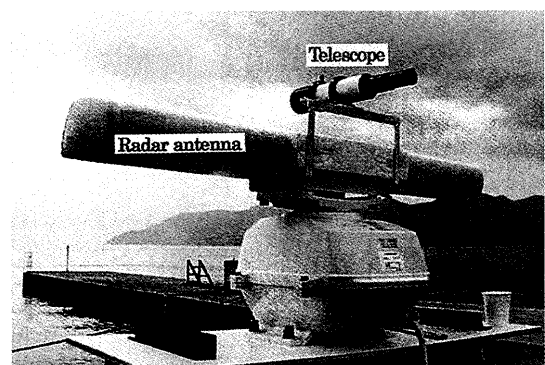
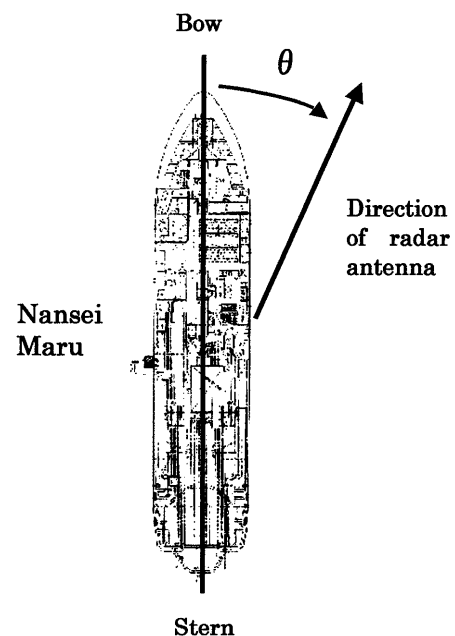


Fig. 3 The radar antenna which has a telescope installed.

Fig. 4 Definition of azimuth aspect angle  $\theta$ .

点において船首方位90°と270°に向けた時のレーダ波反射電圧を測定した。さらに距離5000m付近において、船首方位を0°~330°まで30°間隔で船体を定位せしめ12方向においてそれぞれ反射電圧を測定した。このときFig.

4に示したようにアスペクト角  $\theta$  は船首がアンテナの方向を向いた時を  $0^\circ$  とし、右舷正横  $90^\circ$ 、船尾  $180^\circ$ 、左舷正横  $270^\circ$  と定義した。これら一連の測定において、偶然誤差除去の為128回の反射電圧を平均した。このことにより信号対雑音比 (S/N比) は理論上約21dB向上する。

### 結果および考察

アンテナと南星丸の距離1000m~9000mまでの測点13点をプロットし、Fig. 5に示した。同図における受信電力 (dBm) は測定反射電圧 (受信機ビデオ出力) とMIC (Microwave Integrated Circuit) 入力電力との関係をもつて測定して得られた入出力特性曲線より求めた。この図より距離4000m付近を境として減衰の状況が明らかに異なっていることが読み取れる。次に示すレーダ方程式<sup>3,4)</sup>によりこの現象を検討する。

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4} 16 \sin^4 \left[ \frac{2\pi \cdot H_1 \cdot H_2}{\lambda \cdot R} \right] \quad (1)$$

ここで

- $P_r$  : 受信電力 (W)
- $P_t$  : 送信電力 (W)
- $R$  : レーダアンテナと南星丸との距離 (m)
- $G$  : アンテナ利得
- $H_1$  : レーダアンテナ高さ (m)
- $H_2$  : 南星丸のレーダ波反射有効高さ (m)
- $\lambda$  : 波長 (m)
- $\sigma$  : 南星丸のレーダ有効反射面積 (m<sup>2</sup>)

ここで  $\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4}$  の項は自由空間伝搬を示し、受信電力の減衰は  $1/R^4$  に比例する。距離  $R$  の増大により南星丸に対する電波の入射角が低角度となり、 $\sin$  項は

$$\sin \left[ \frac{2\pi \cdot H_1 \cdot H_2}{\lambda \cdot R} \right] \doteq \left[ \frac{2\pi \cdot H_1 \cdot H_2}{\lambda \cdot R} \right] \quad (2)$$

となり、(1) 式は

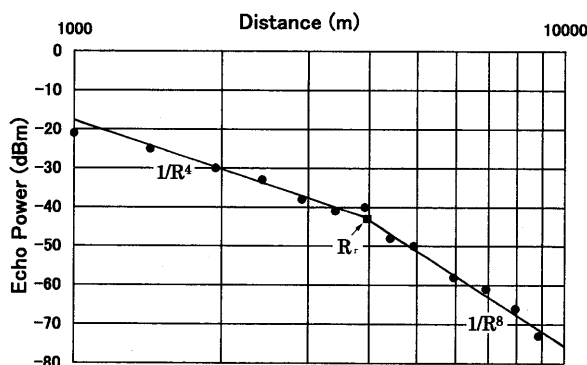


Fig. 5 Attenuation curve of measurement echo power.

$$P_r = \frac{4\pi \cdot P_t \cdot G^2 \cdot \sigma (H_1 \cdot H_2)^4}{\lambda^2 \cdot R^8} \quad (3)$$

となり、ある条件に応じた距離に遠における受信電力は  $1/R^8$  に比例する。従って  $1/R^4$  から  $1/R^8$  に変化する屈折点に於いて次式が成り立つ。屈折点までの距離を  $R_c$  とすれば

$$16 \sin^4 \left[ \frac{2\pi \cdot H_1 \cdot H_2}{\lambda \cdot R_c} \right] = 16 \left[ \frac{2\pi \cdot H_1 \cdot H_2}{\lambda \cdot R_c} \right]^4 = 1$$

よって

$$R_c = \frac{\lambda \cdot H_2}{4\pi \cdot H_1} \quad (4)$$

となる。すなわち受信電力はアンテナから屈折点  $R_c$  に至る距離までは  $1/R^4$  に、これ以遠においては  $1/R^8$  に比例する。(1)式においてレーダ有効反射面積  $\sigma$  を求めるにあたって、南星丸の電波的にみだ目標の高さであるレーダ波反射有効高さ  $H_2$  を求めるために(4)式の  $R_c$  の値が必要となる。ここで Fig. 5に示した各測点の値より、最小二乗法により  $R_c$  の値3945mを得た。この値を(4)式に代入し、南星丸のレーダ波有効高さ  $H_2$  は2.46mと推定された。

ここで、南星丸のレーダ波反射特性を知るために有効反射面積  $\sigma$  を求める必要がある。よって(1)式を変形し

$$\sigma = \frac{P_r \cdot (4\pi)^3 \cdot R^4}{16 \cdot P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sin^4 \left[ \frac{2\pi \cdot H_1 \cdot H_2}{\lambda \cdot R} \right]} \quad (5)$$

となる。アンテナからの距離約5000m付近におけるアスペクト角  $\theta$  を変化させる測定では、風等外力の影響は全く無かった。しかし船首方位を変更する際、船体の前後進を繰り返し調整したため、アンテナから南星丸に至る距離  $R$  に変動があった。この結果、最大距離5024m、最小距離4854mとなり、最大170mの距離差がみられた。各アスペクト角  $\theta$  における  $\sigma$  を比較検討するためには、 $R$  を一定としなければならないので、(5)式における  $R$  は最大距離5024mをとり、各測点との距離差に起因する受信電力  $P_r$  差はそれぞれ拡散減衰の補正を加えた。

$\theta$  の変化による南星丸のレーダ波有効反射面積  $\sigma$  の変化パターンを Fig. 6に示す。最大は  $\theta = 90^\circ$  (右舷正横方向) の1790m<sup>2</sup>、最小は  $\theta = 0^\circ$  (船首方向) の130m<sup>2</sup>で1660m<sup>2</sup>の差がみられた。平均値は518m<sup>2</sup>であった。同図からわかるように、そのパターンは、W字型を示しており、船尾方向 ( $\theta = 180^\circ$ ) は796m<sup>2</sup>で船首方向より大きく、その差は666m<sup>2</sup>に達し、また右舷正横方向は左舷正横方向 ( $\theta = 270^\circ$ ) の1599m<sup>2</sup>より191m<sup>2</sup>大きい結果となった。この左舷正横方向の値は汐路丸 (150トン) の

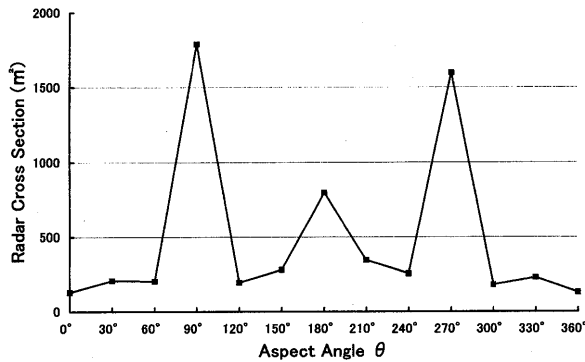


Fig. 6 Radar cross section for the aspect angle  $\theta$  of Nansei-maru.

1580m<sup>2</sup>)と極めて近い値を示した。また正横方向から船首方向・船尾方向にわずか30°ずれるだけで右舷側平均1590m<sup>2</sup>、左舷側平均1381m<sup>2</sup>急激に減少する。これは約10dBの減少となり、レーダ映像として捉えていた目標を短時間で見失う危険性を秘めていることに十分注意を払う必要がある。このパターンは深江丸(360トン)<sup>1,2)</sup>と同様の傾向にあった。これらの起因は南星丸の船体形状が大きく影響していると推定される。特に右舷正横・左舷正横のレーダ波有効反射面積 $\sigma$ の相違は以下によるものと推定される。すなわち船首楼上ブルワークから船尾ブルワークの船体中央付近接続部の外板面積が、右舷側の方が2.6m<sup>2</sup>大きいこと、また煙突が右舷側に偏移しておりレーダ波を障害なく反射するのに比べ、左舷側にはレーダ波を乱反射する複雑な形をした機材が設置されていることがあげられる。

## 要 約

平成14年度に鹿児島大学練習船南星丸が建造された。本船は学生、研究者ならびに乗組員を乗せ、主として船舶交通量の多い鹿児島湾内を航行するのが常である。視界不良時等においてレーダ航法を実施せざるを得ない状況に立ち至った時、他船が本船をレーダ映像としてどのように捉えているかを推察することは、航海の安全上重要なことである。また他船にも本船のレーダ波反射特性を知らしめることも重要である。そこでレーダ航法時、他船との異常接近ならびに衝突回避のための基礎データとして、南星丸のレーダ波有効反射面積を測定し次のような知見を得た。

①レーダアンテナから南星丸に至る距離を1000mから9000mまで変化させ、レーダ波反射電圧を測定した結果、理論上の反射電力減衰曲線 $1/R^4$ と $1/R^8$ との屈折点は3945mにあり、南星丸のレーダ波反射有効高さは水面上2.46mと推定された。

②南星丸の船首方位を、アスペクト角 $\theta=0^\circ$ (船首方位がレーダアンテナ方向に一致する)から30°間隔で330°までレーダ波反射電圧を測定した結果、それぞれのアスペクト角におけるレーダ有効反射面積を得ることができた。最大は右舷正横方向の1790m<sup>2</sup>、最小は船首方向の130m<sup>2</sup>であった。また正横方向から30°ずれるだけで、約10dBの減少がみられ、レーダ観測者は船体運動に伴う映像の変化に充分注意を払う必要がある。また船尾方向は船首方向より大きく666m<sup>2</sup>の差がみられた。

最後に、この実験を行うにあたり、浚渫工事用台船使用に便宜を与えて下さった鹿児島市吉留建設産業株式会社の宮川靖徳氏に謝意を表するとともに、レーダ装置の運搬、設定など多大なる加勢を頂いた環境情報科学講座大学院生の篠原正明氏、高嶋明子氏に感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 三好雄一, 小林 豊 (1967): 船体レーダ断面積の方向性-I. 超音波によるモデル測定. 日本航海学会誌, 38, 59-64.
- 2) 藤井英信, 前田文郎 (1973): 船用レーダによる船体反射強度の方向性について-I. 日本航海学会誌, 50, 149-153.
- 3) 落合徳臣, 茂在寅男 (1959): "レーダの理論と実際", pp. 48-54 (海文堂, 東京)
- 4) 楠 順三, 庄司和民 (1957): 船用3種レーダーの小型船反射強度について(第4報). 日本航海学会誌, 15, 41-51.