

シーカヤックのレーダ有効反射面積

松野保久, 古川慎太郎, 平口幸生, 藤 健太郎, 藤枝 繁, 日高正康

Radar Cross Section of a Sea Kayak

Yasuhisa Matsuno, Shintaro Furukawa, Kousei Hiraguti, Kentaro Fuji,
Sigeru Fujieda, and Masayasu Hidaka

Keywords : Radar cross section, Reflection strength, Sea kayak

Abstract

It is very important to utilize radar effectively in order to avoid collisions between vessels and sea kayaks, as well as to be able to find wrecked sea kayaks promptly. To facilitate this, radar cross sections of sea kayaks were measured in the touring, wrecked (drifting) and overturned conditions.

The results obtained in this study were as follows:

1. The radar cross section was $0.503\text{m}^2\text{-}0.017\text{m}^2$ for a single sea kayak, and $0.725\text{m}^2\text{-}0.011\text{m}^2$ for a tandem sea kayak.
2. The radar cross section was largest when the side of sea kayak faced the radar antenna, and was smallest when its bow or stern was towards the antenna.
3. The manned sea kayak gave larger radar cross section than the unmanned; 6dB at single and 8dB at tandem.
4. The radar cross section and the geometric cross section for each azimuth aspect angle showed almost the same patterns.

近年我が国の海洋レジャー活動は、余暇時間の増大に伴い、若者のみならず、より広い年齢層で活発化している。それは遊漁、ヨット、ボードセイリング、サーフィンそしてスキューバダイビング等々その種類も多い。その一つに、日本における歴史はまだ20年程度であるが、ヨットと同様、外洋にまで行動範囲を広げるシーカヤックがある。現在各地にシーカヤッククラブが誕生し、シーカヤッカーの増加に従い、全国各地でイベントが開催されるまでに普及してきている。またシーカヤックには高い耐航性能があることから、グループあるいは単独による海峡横断チャレンジも行われているようである。

日本海洋レジャー安全・振興協会によれば、海洋レジャーの増加により、海上での事故や舟艇等による水域利用上のトラブルも増加する傾向にあり、早急な対策の実施が望まれる。そのためには海上での事故に対する安全・救

助対策の推進およびそれらに関わる調査研究を実施し、海洋レジャーの健全な発展を図る必要があるとしている。

前述したように、シーカヤックの行動範囲は広く、ツーリング時、眼高の低さ、人力によるパドリングという条件により、常に他船との衝突ならびに遭難の危険に曝されていると言っても過言ではない。身近な例としては、1998年鹿児島湾においてシーカヤックと漁船の衝突事故が発生した。そこで、航行船舶がシーカヤックを早期に発見し、衝突回避に際して、また万一行方不明となった場合の捜索・救助に際して、船用レーダの有効性を検討する基礎データを得るため、シーカヤックのレーダ有効反射面積の測定を実施した。

方 法

シーカヤック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。レーダ受信機回路よりビデオ信号およびレーダパルス発射信号をトリガー信号としてオシロスコープに取り込み、シーカヤック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) 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。

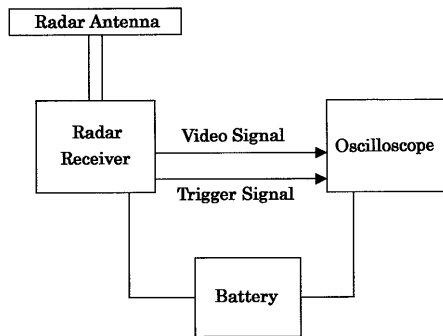


Fig. 1 A block diagram for measurements of radar cross sections of sea kayaks.

Table 1 Specifications of the radar used for measurements

Transmit Power	4kW
Antenna Gain	500
Transmit Frequency	9410±30MHz
Wave Length	3cm
Horizontal Beam Width	2.0°
Vertical Beam Width	30.0°
Pulse Length	0.08 μs
Repeating Frequency	2250Hz

測定場所は鹿児島湾に発生する波浪の影響を受けにくい鹿児島市与次郎の長水路 (幅53m×長さ650m) とし、天候がよく、風力階級 2 以下の日を選んで実施した。またレーダアンテナ高さは水面上 4 m、シーカヤックまでの距離を 273 m に設置した。測定に使用したシーカヤックを Fig. 2 に示した。1 人艇 (長さ: 540cm, 幅: 56cm, 高さ: 40cm), 2 人艇 (長さ: 599cm, 幅: 68cm, 高さ: 32cm) について、それぞれ無人の場合、人物が乗り込んだ場合、転覆させた場合の 6 条件を設定した。そして測定はレーダアンテナに対して艇首から艇尾まで 30° ずつアスペクトを変え、その都度完全に艇の動きを停止させて実施した。Fig. 3 に示したように、アスペクト角 θ は艇首方向

を 0°, 艇正横方向を 90°, 艇尾方向を 180° と定めた。各アスペクトに定置させるための艇の回転は、シーカヤックからとった 4 本の細ロープと磁気コンパスにより調整した。

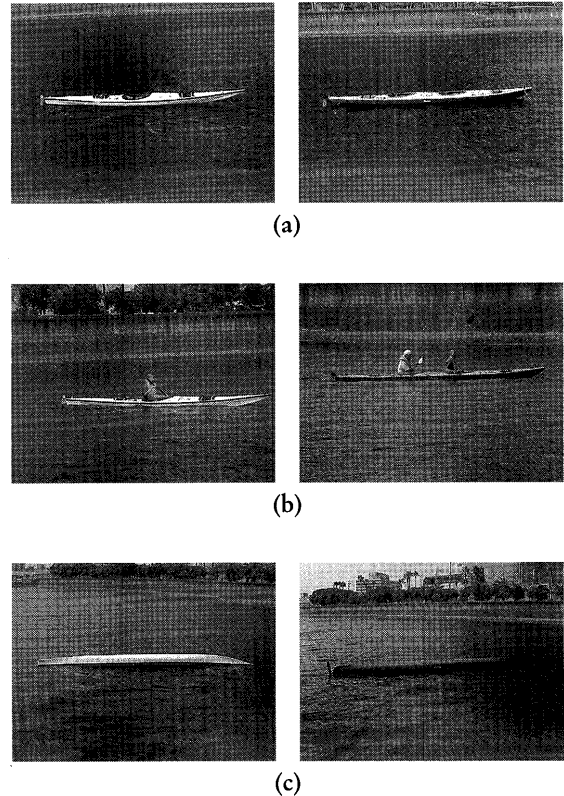


Fig. 2 Photographs of a sea kayak (left: single sea kayak, right: tandem sea kayak) used for measurements.
(a): The unmanned case
(b): The manned case
(c): The upset case

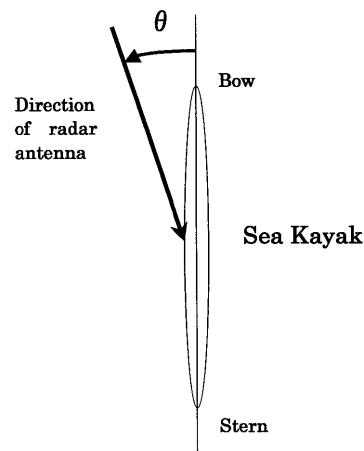


Fig. 3 Definition of azimuth aspect angle θ .

シーカヤックからの反射電圧の測定は、レーダアンテナ

ナの回転を止め, 主ローブが正確にシーカヤックの方向を向くように手動調節する必要があった。そのためオシロスコープのエンベロープ映像が最大になるよう, レーダアンテナの向きを微調整した。また測定 of 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。

シーカヤックの各アスペクト角 θ における, 有効反射面積 σ (m²) を求めるレーダ方程式は次に示すとおりである¹⁾。

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

ここで

- P_r : 受信電力 (W)
- P_t : 送信電力 (W)
- R : レーダアンテナとシーカヤックとの距離 (m)
- G : アンテナ利得
- a_z : 地球の曲率を考慮したレーダアンテナ高さ (m)
- a_x : 地球の曲率を考慮した小物標の高さ (m)
- λ : 波長 (m)

受信電力 (W) は測定反射電圧 (受信機ビデオ出力) と MIC (Microwave Integrated Circuit) 入力電力の関係を示した入出力特性曲線より求めた。さらにシーカヤックの高さは幾何学的投影面積より推算し, これらの値を (1) 式に代入して有効反射面積を算出した。

結果および考察

Table 2 にシーカヤックの有効反射面積測定結果を示した。全測定における最大値は, 2人艇に2名乗艇したときの $\theta = 90^\circ$, すなわち艇正横方向で 0.725 m^2 , 最小値は 2人艇転覆時 $\theta = 60^\circ$ の 0.011 m^2 であった。また全アスペクトの平均値は, 2人艇に2名乗艇した場合が最大, 1人艇無人の場合が最小であった。海上において,

シーカヤックでの通常のツーリング時, 遭難, 転覆時など状況は種々考えられるが, それらを総合して同面積は, 2人艇 $0.725 \text{ m}^2 \sim 0.011 \text{ m}^2$, 1人艇 $0.503 \text{ m}^2 \sim 0.017 \text{ m}^2$ の間にあった。

θ の変化による, 2人艇と1人艇の有効反射面積の変化パターンを Fig. 4, Fig. 5 に示した。6条件とも $\theta =$

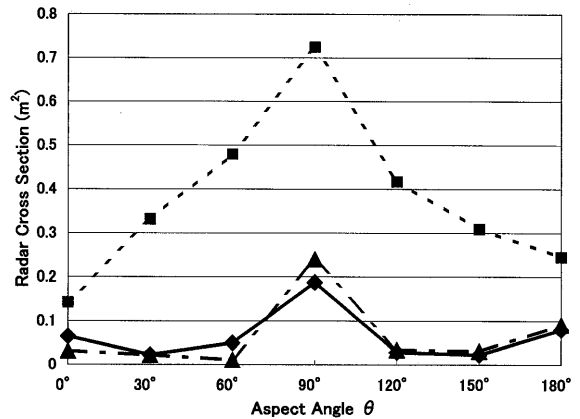


Fig. 4 Radar cross section for the aspect angle θ of a tandem sea kayak.

■ : manned ◆ : unmanned ▲ : upset

90° で最大値をとり, 艇首, 艇尾に向けて順次減少するという大略同様のパターンを示した。この傾向は伝馬船²⁾, 深江丸 (G/T 360 トン)^{3,4)} においても同様であった。しかし 2人艇 2名乗艇時を除いた 5つの条件の場合, 艇正横方向より 30° 異なる $\theta = 60^\circ$, $\theta = 120^\circ$ で急激に減少すること, および $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 180^\circ$ で若干増加する傾向は伝馬船等と少々異なった。乗艇した場合と無人との面積比は全アスペクトまるめて 2人艇 7.7dB, 1人艇 5.8dB, また有効反射面積が最大値を示した $\theta = 90^\circ$ では 2人艇 5.9dB, 1人艇 4.7dB であった。このようにシーカヤックのレーダ有効反射面積を考えると, 乗艇している人間の影響は大きく, 2人艇に2名乗艇した場合の

Table 2 Maximum, minimum and mean values of the radar cross sections in six conditions

Condition	Maximum Value		Minimum Value		Mean Value (m ²)
	Aspect Angle θ	Value (m ²)	Aspect Angle θ	Value (m ²)	
Tandem	Manned	90°	0.725	0°	0.378
	Unmanned	90°	0.187	$30^\circ, 150^\circ$	0.065
	Upset	90°	0.240	60°	0.066
Single	Manned	90°	0.503	$150^\circ, 180^\circ$	0.185
	Unmanned	90°	0.171	180°	0.049
	Upset	90°	0.297	$60^\circ, 120^\circ$	0.079

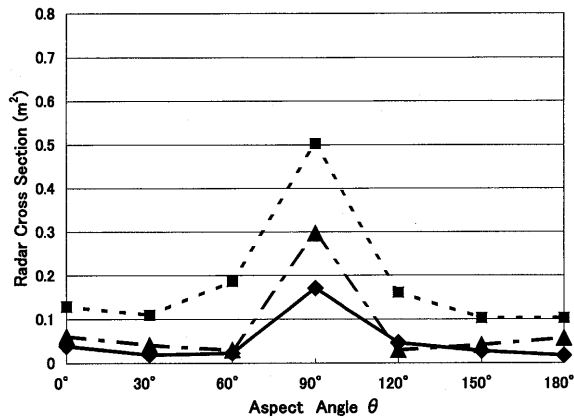


Fig. 5 Radar cross section for the aspect angle θ of a single sea kayak.

—■— : manned —◆— : unmanned —▲— : upset

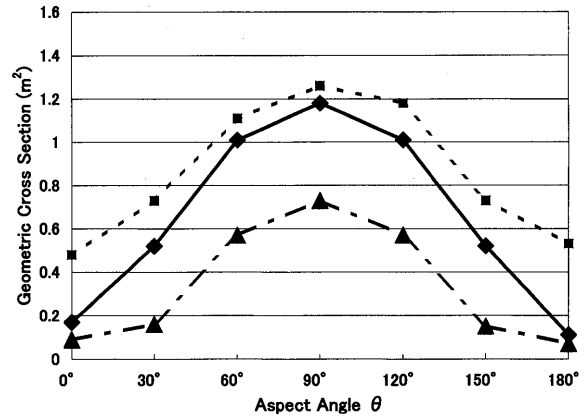


Fig. 7 Geometric cross section for the aspect angle θ of a single sea kayak.

—■— : manned —◆— : unmanned —▲— : upset

パターンが他の5条件と異なったのは、人間の影響が大きかったと推定される。しかし今回、人間のレーダ波反射特性の測定を行っていないこと、ならびにこれに関する報告も見られないので、数値化して明確にすることはできなかった。今後の課題としたい。

ここで測定時、シーカヤックのアスペクトごとに撮影した写真を基に、幾何学的投影面積を計算し、Fig. 6に2人艇、Fig. 7に1人艇を示した。幾何学的投影面積は全ての θ において、有効反射面積より大きな値となったが、両面積の変化パターンは $\theta = 90^\circ$ で最大であるという点において大略似通った。前記した $\theta = 60^\circ$ 、 120° においては、 $\theta = 90^\circ$ からの減少率は明らかに有効反射面積の方が大きく、また6条件いずれの場合においても両面積差は $\theta = 0^\circ$ あるいは $\theta = 180^\circ$ で最小となった。また各アスペクトにおける幾何学的投影面積に対する有効反射面積の比は、 $\theta = 0^\circ$ 、 90° 、 180° で極大、 $\theta = 60^\circ$ 、

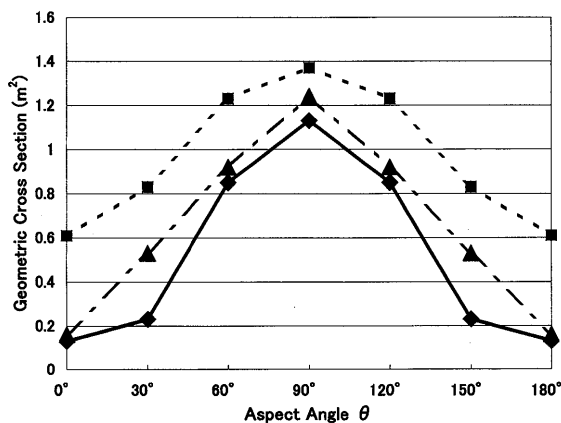


Fig. 6 Geometric cross section for the aspect angle θ of a tandem sea kayak.

120° で極小をもつW字パターンをもつ傾向がみられた。しかし $\theta = 0^\circ$ 、 90° における両面積の絶対値が小さいこともあり、より精密な測定が望まれるところである。今回測定に使用したシーカヤックは、FRP製で船体表面は塗装仕上げされているので極めてなめらかであり、また漁船のように複雑な形態ではない。さらに材質が完全導体でないとともに、シーカヤックの形状と鏡現象が複雑にレーダ波の反射に影響し、急激に後方反射エネルギーが減少したこと、更に人間のレーダ波反射特性が複合的に影響したものと推定される。

次にシーカヤックの最大探知距離について試算した。今回測定に使用したレーダの仕様の下に、10トン前後の沿岸漁船を想定してアンテナ高を3mに、シーカヤックのレーダ波反射中心高を幾何学的投影面積より推算し、0.11mとした。そして(1)式から距離に対する受信電力(dBm)の変化をシミュレートし、受信感度を最大とした場合においても受信機ビデオ出力が0に極めて近い値となる -120dBm を閾値とした。この結果、2人艇に2名乗艇したとき、各 θ に対する有効反射面積の違いにより最大探知距離は1500m~1800m、1人艇に1名乗艇したときは1400m~1700mの間であった。これはレーダ水平線距離7000m、視地平距離5500mより小さいことに注目しなければならない。無人および転覆の状態では最大探知距離はさらに小さくなる。しかし、ここに示した最大探知距離は送信出力、受信感度、アンテナゲイン、セットノイズの大小など使用するレーダの仕様により、またアンテナ高により異なる。今回のシミュレーションはレーダ映像判読に際し、気象・海象の影響は無視した。しかし現実問題として、波浪が大きくなるに従い、レーダ波反射中心高の低いシーカヤックの、レーダ画面上で

の発見の難易度は増加し、レーダ取扱者の技量に負うところ大となることに注意する必要がある。

要 約

海洋レジャーの1つであるシーカヤックはその行動範囲も広く、ツーリング時、他船との衝突ならびに遭難の危険に常に曝されている。そこで海上での事故に対する安全・救助対策に船用レーダを有効に利用するため、シーカヤック1人艇、2人艇のレーダ有効反射面積の測定を実施した。

海上における種々の場面、すなわちシーカヤックでの通常のツーリング時、遭難、転覆時などを想定して測定を実施した。その結果、それらを総合して有効反射面積は、2人艇 $0.725\text{m}^2 \sim 0.011\text{m}^2$ 、1人艇 $0.503\text{m}^2 \sim 0.017\text{m}^2$ の間であった。また、シーカヤックはレーダアンテナに対して艇正横を向けたとき有効反射面積が最大、それより 30° 方向が変わると急激に減少し、それより艇首または艇尾を向ける間に最小となった。また人間が乗艇しているときと無人の場合を比較すると、同面積比は2人艇約8 dB、1人艇約6 dB以上を見積もる必要がある。更に、各アスペクト角に対する有効反射面積と幾何学的投影面積は大略似通ったパターンを示した。

ここで得られた有効反射面積を参考に、一般通行船舶は自船に装備されたレーダ仕様等に基づき、操船する各人が最大探知距離を推定することが可能である。特に夜間や視界不良時に、船用レーダを使用してのシーカヤックの発見ならびに衝突回避のための一助になるものと考ええる。またシーカヤッカーは、沿岸を航行する10トン前後以下の漁船では、極めて近距离に近づくまでレーダによってシーカヤックを探知できないことに充分注意する必要がある。

最後に、この実験を行うにあたり、レーダ装置の設定、シーカヤックの運搬、操艇、アスペクト固定など、環境情報科学講座航海グループに所属する学生諸君に多大なる加勢を頂いた。ここに感謝する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 井関 貢 (1955): 船用3種レーダーの小型船反射強度について (第3報). 日本航海学会誌, 13, 43-51.
- 3) 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.
- 4) 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.