大島大橋におけるエクスパンドメタルによる 偽像対策効果について

——橋の反射パターンの測定を含む——

中 島 裕*・藤 井 英 信*

On the Effect of "Aluminum Expanded Metal" for the Prevention of Radar False Echoes

——The Measurement of the Radar Reflection Patterns on
the Osima Ohasi Bridge——

Yutaka NAKASHIMA and Hidenobu FUJII

Abstract

In order to prevent radar false echoes caused by a bridge, the structure of a bridge and its materials for absorbing electromagnetic waves from the radar have been investigated in various methods.

About the Osima Ohasi Bridge, the front side of No. 3 bridge pier and the triangular part of the span structure were covered with "Aluminum Expanded Metal". And experiments on the effect of "The Metal" have been carried out.

The radar reflection patterns were measured on the cross sections of the middle part and the triangular part of the span structure on No. 3 pier.

The radar reflection patterns were also measured on the vertical section of the side views of the same parts above mentioned.

1. は じ め に

橋が原因となり発生するレーダ偽像の防止については、現在各方面で橋体の構造から電波吸収材にいたる広範囲の分野で研究開発が進められている。大島大橋においても現在レーダ偽像防止用の対策材としてアルミエクスパンドメタルを第3橋脚とその上の橋体の一部に実験的に装着してあるが、今回この対策効果の測定と橋の横方向反射面および垂直面反射パターンの下半分、その他の測定を実施した。

2. 対策材と対策範囲について

対策材としては図1のようなアルミエクスパンドメタル（以下 AEM と略）を使用、仰角 8° とし主として跳ねあげ効果を期待したものである。また水平方向については、橋軸線に対して1部分は 15° （以下角度については大島側を基準に東側西側とも $0\sim 180^\circ$ で表示）他は 20° としてあるが、（面積比約 1 : 10）指定航路に沿って東航する際に橋による反射波が2次反射面となる大島側に向うのを防止し対策効果をあげる目的である。対策材の仮設範囲は図2のとおりで総面積は鉄枠 31 m^2 AEM 131 m^2 であり、AEM は同サイズの鉄板と比較し正面

* 正会員 大島商船高等専門学校（山口県大島郡大島町小松）

図 1 アルミエクスパンドメタル (対策材)

図 2 対策範囲とマイクロ波照射範囲

照射時の反射レベルは -3 dB と測定されている。

3. 対策効果の測定について

このような実橋実験における対策効果の測定については、まず未対策部の影響について考えねばならない。測定にマリンレーダを使用した場合、垂直ビーム幅の関係から今回のような装着面積であれば、ビームの照射範囲の面積が対策範囲と比較して格段に大きくなるため、未対策部分の影響が強く現われて総合された対策効果として低下してしまう。正面照射として図 1 の対策材についてレーダ方程式を使用し対策効果を検討してみたのが図

図 3 未対策部分による対策効果の減少

3 で、1 次反射の場合の対策効果比を実線で偽像の場合を破線で示してある。

対策材の AEM 部分の面積と鉄枠を含めた総面積の比は 0.791 となり、AEM の効果 $\beta = -3\text{ dB}$ として対策材の効果は -2.7 dB となる。また対策材と同サイズの金属板の仰角 8° に対する反射パターンのエンベロップの値は、その正面 (0°) ピークに対して約 -16 dB となるので対策材 1 枚の効果は -18.7 dB 前後と推定出来る。今回の実験のようにこのような対策板を 1034 枚集合させた場合の総合された指向性係数の計算は困難であるし、また未対策部分の反射も含まれる。この実験での結果では対策材 1 枚の推定値を上回る -22 dB 程度の値が得られている。対策材については橋軸線に対して 15° と 20° に角度を持たせた 2 群がありその効果が加わり上記の結果を得たものと考えられるが照射範囲中の未対策部分が大きい場合はこの

限りでない。未対策部分の大きい例として笠佐島海岸の固定点からレーダを使用して観測したレーダ写真の映像図による結果を図 4 の円内に示しておく。使用レーダは 7 段階にゲインが切換えられるようにゲイン回路を改造しており、図 4 は段階 [4] での結果で他のゲイン段階では対策効果は殆んど認められなかった。この場合アンテナビーム幅 1.8° で橋の P_3 での照射水平幅は約 36 m となりこれから未対策部と対策部の面積を算出すると面積比は約 $1:2$ となるため図 3 を使用し $K=0.3$ として対策効果を推定すると約 2 dB でありレーダ受信機の特性を考慮すれば上記の結果は当然ともいえる。

図 4

以上のような点を検討し次のような測定方法を採用した。まず P_3 (第3橋脚) と P_4 (第4橋脚) がその上の橋体を含めて殆んど相似であることを利用し橋の橋脚の先端から 15 m のアームを出し (アームは左右 30° 上下約 20° まで動かすこと可能) その先に上下, 左右に首振り可能な構造として, 電力半値幅 20° のホーンアンテナを取りつけ対策面を照射し, ホーンには簡単な照準装置をつけ橋脚側からのずれが観測出来, その修正が出来る構造とした。

ホーンの電力半値幅の照射範囲は図2で示されるように未対策部分は殆んど含まれていない。ホーンの照射方向は橋軸線に対して 90° と 110° としたがこれは対策材の水平取り付け角度 15° と 20° に対応して正面照射の時の反射レベルを知りたいためである。送信系についてはハードチューブタイプの変調器を使用した

9 GHz 帯のマイクロ波送信機を使用し, 出力 0.78 kW パルス幅は $0.08 \mu\text{s}$ である。

受信系との同期は過去の事例を参考⁽¹⁾にし高安定度の水晶発振器を用いた独立同期とし受信装置は図5のブロック

ダイアグラムのものを船に搭載し, 受信アンテナはホーンを使用, 船体の影響を考え船首にセットし照準装置により常に橋の照射点を狙うこととした。

船位については交差方位法によりレコーダー上の記録と同期させ 10 秒間隔で測定した。

4. 測定結果について

図 6, 7 は測定のため航走したコースと得られた反射パターンの 1 例で航走コースは原則として近距離 (約 300 m~500 m) と遠距離 (約 1000~1300 m) の 2 コース往復とし, 得られた反射パターンはそのピーク値に従って平滑化しピーク値の得られた距離を中心とした円上のレベルに換算してある。伝播距離補正用のデータは図

図 6

図 5 受信系ブロックダイアグラム

図 7 110° 照射のパターン例

図 8 距離対受信電力

図 9 90° 照射のパターン例

8 であるがこれは $P_4(90^\circ)$ 照射で距離 1650 m の地点から P_4 に向け直進し測定したものである。

図 9 は P_3, P_4 で橋軸線 90° [$P_3(90^\circ)$ $P_4(90^\circ)$ と表示] からの照射の反射パターンで $P_4(90^\circ)$ はほぼ 90° 方向にピークがあるが、 $P_3(90^\circ)$ は対策板の水平方向取り付け角が利いているため面積の多い 20° の鏡面反射方向 130° 附近がピークとなっている。 $P_3(90^\circ)$ で 120° と 130° 方向 (対策材 15° と 20° の鏡面反射方向) に反射のピークが認められるかどうか得られたデータを細かく点検してみたがはっきりしなかった。反射パターンがかなり凸凹に描かれているのはこのためである。

4.1 90° 方向照射の場合の対策効果

$P_4(90^\circ)$ と $P_3(90^\circ)$ の対策効果については正面反射レベルで検討することにし、測定した各反射パターンのピーク値は $P_4(90^\circ)_1$ を [300 m] 基準とし距離の補正と垂直面の仰角 φ (6 章参照) の補正をほどこした値を表 1 に記入してある。距離補正には今回の実験で得られた実測値 $R^{-1.77}$ は垂直面の φ の変化を含んだものと考えられるので理論値 R^{-2} と 2 つの値を使用したものを並記してある。補正については注参照。

φ の補正には図 13 の P_3 のデータを使用したがこのデータは P_3 の高さ 37.5 m の点を照射した時のパターンで $P_4(90^\circ)$ のように高さ 12.5 m の点を照射した場合のパターンとは多少異なるものと思われ従って補正後の

表 1

		P3 (90°)		P4 (90°)		対策効果			
測定 No.	距離 m	90°方向 受信ピーク レベル dBm	130°方向 受信ピーク レベル dBm	距離補正 300m基準 R-1.77 dBm	垂直補正 φ°補正 dBm	補正後 受信レベル dBm	平均値 dBm	対策効果 dB	
P4(90°) ₁	300	-8.5		0	1.7° +8	-0.5	-0.33	-21.77	
P4(90°) ₂	300	-8.3		0	1.7° +8	-0.3	-0.3	-21.14	
P4(90°) ₃	433	-7.0		+2.8dB +8.2dB	1.2° +4	-0.2	-0.46	-22.7	
P4(90°) ₄	1044	-15.2		+9.6 +1	0.49° +1.3	-4.3	-3.8	-22.4	
P4(90°) ₅	1083	-14.2		+9.7 +1	0.47° +1.3	-3.2	-2.4	-22.4	
P3(90°) ₁	478	-29.0	-27.0	+8.5 +4	1.0° +4	-21.5	-22.1	-21.6	
P3(90°) ₂	443	-29.6	-27.0	+2.9 +3.4	1.16° +4	-22.7	-22.2	-26.5	
P3(90°) ₃	1330	-38.4	-31.0	+1.4 +3	0.38° +1	-26	-24.4	-25.0	
P3(90°) ₄	1241	-39.0	-31.6	+0.9 +2.3	0.41° +1.2	-26.9	-25.5		

注

値については遠距離の場合 3 dB 程度の誤差を生じている。表 1 で近距離グループと遠距離グループにわけ各平均値から対策効果を算出すると 22 dB 前後の値が得られた。

4.2 110° 方向照射の場合の対策効果

図 7 は照射方向を 110° とした時の $[P_3(110^\circ) P_4(110^\circ)]$ と表示] 反射パターンで、 $P_4(110^\circ)$ については鏡面反射方向 70° 附近に、 $P_3(110^\circ)$ では 100°~110° 方向にピークが認められるが 15° 対策板の影響が現われているものと思われる。照射方向 110° の対策効果については、大島瀬戸を東航する際のレーダ偽像の成生原因が 2 次反射面にあるとすれば無対策のメインビームの反射方向 70° で対策効果を考えるのが妥当と思われる。 P_3 , P_4 の 70° 方向の垂直パターンの測定は実施してないが図 13 を適用し、4.1 と同様の手法で 70° 方向の対策効果を算出し 22.4 dB を得た。これらの実験から未対策の P_4 において $P_4(90^\circ)$ の Monostatic な反射レベルの補正後の値は $-0.46 \text{ dBm}|_{300 \text{ m}}^{90^\circ}$ であり、 $P_4(110^\circ)$ の Bistatic なそれは、 $-1.0 \text{ dBm}|_{300 \text{ m}}^{70^\circ}$ となった。従ってその差約 0.5 dB は $\cos^2 20^\circ = 0.54 \text{ dB}$ と一致する。

5. 同一照射点における横および縦方向反射パターンについて

大島大橋が 1 次反射面となり発生するレーダ偽像のうち、小松港沖より北上の際にみられるレーダ偽像は特異な形をしているが〔図 10〕この偽像は橋軸線に対して直交している橋の部材が 1 次反射面と（以後横方向反射面と呼び橋軸線方向に考えられる反射面を縦方向反射面と呼ぶ）なり、大島側の陸地が 2 次反射面を形成して生じたもので、今後の架橋についても地形上の条件が満足されるとレーダ偽像の生じる可能性が存在する。これ等の測定のため図 11 の B 点（中央径間と同じ高さ）に送信系を設置し、中央径間および P_3 を照射、各点における縦および横方向反射パターンの測定を実施した。送信系については海面反射の影響を避けるためゲイン 29 dB, $\theta_{-3 \text{ dB}} 2^\circ$ のパラボラアンテナを使用、その他導波管系が短くなったのをのぞき 3 章と同一で、受信系については 3 章と同じである。

図 10

図 11

5.1 測定された反射パターンおよび縦方向、横方向反射パターンのレベル差について

図 12 はこの実験で得られた反射パターンの 1 例で距離および φ の補正は実施していない。A-B の部分は図 14 にも認められるが今回の実験では中央径間に関する反射パターンのみに現われている特徴である。また P_3 の縦方向反射面についてはメインビームの反射方向と大島側の地形から受信ピークが確実に把握出来なかったので除外してあるが、一般的に P_3 中央径間とも縦方向反射パターンと比較すると横方向反射パターンの θ_{-3dB} が小さい。

測定された 13 例の反射パターンについて受信ピークレベル、電力半値幅その他を表 2 に記載してあるが、図 13 を使用し仰角 φ および距離補正を行った値から縦方向と横方向反射面での受信電力ピーク値のレベル差を示

図 12 中央径間縦方向反射パターンおよび横方向反射パターン

したのが右端である。まず中央径間の横方向と縦方向についてはなるべく距離差が少くなるよう CH_3 を基準とし距離補正をやり、仰角についてはやはり CH_3 を基準として補正しレベル差を算出した。遠距離の CH_5 , CH_6 と CV_7 , CV_8 については同様に CH_3 を基準にしてある。

横方向のデータを基準にしたのは横方向についての垂直面に関する反射特性のデータが無いので φ による補正を避けるためで、 P_3 についても同様な考え方で P_{H11} はレベル差の算出から除外した。水平面における入射角 θ については

$$\begin{aligned} \text{中央径間縦} &\cdots 49^\circ & \text{中央径間横} &\cdots 41^\circ \\ P_3 \text{ 縦} &\cdots 59^\circ & P_3 \text{ 横} &\cdots 31^\circ \\ \cos^2 49^\circ &= -3.6 \text{ dB} & \cos^2 41^\circ &= -2.4 \text{ dB} \\ \cos^2 59^\circ &= -5.7 \text{ dB} & \cos^2 31^\circ &= -1.3 \text{ dB} \end{aligned}$$

となるのでこれ等の値を考慮すると中央径間は縦方向、横方向ともほぼ等しいレーダ反射断面積を持ち、 P_3 では縦方向のそれが横方向よりやや大きいという結果が得られた。

6. 中央径間と P_3 の垂直面および水平面反射パターンについて

航路を横断してかけられる橋は、橋体のうち橋脚部分を除き大部分は通過する船舶のレーダアンテナより高いので、鏡面反射によるレーダ偽像を考える上で、垂直面での反射特性は重要であるが、従来物理的に困難な点もあり測定されてないが、今回大島大橋の東側の半島（田の尻鼻）の地形を利用し、橋の中央径間および P_3 の垂直面反射パターンの測定を実施した。

中央径間の測定には図 11 の C_1 （高さは中央径間中点 45.5 m と同等）に送信系を設置し、 P_3 についての測定には C_2 （高さ 37 m）に移動した。送信系は 5 章と同一であるが送信電力を 21 kW に増加してある。図 11 の S は橋に平行した線上での反射レベルのピークを示す点で、 S より橋の照射点に向け直進し受信電力を連続的に記録する。次いで送信アンテナの設置点で受信電力を測定し、この値を基準とし、 $S_1 S_2 S_3 \cdots$ でのレコーダの記録した受信レベルについて距離補正を行い垂直面反射パターンの下半分とした。図 13 はこのようにして

表 2 横方向反射面と縦方向反射面受信レベル差（ピーク値）

実験No.	距離 m	ピークレベル dBm	θ °	φ °	φ 補正 dBm	距離補正 R^{-2} dBm	平均値 dBm	受信 レベル差
中央径間 横反射	CH_1	556	-16	4°	4.7°	0	-0.5	-16.5
	CH_2	556	-16.5	2.3°	4.7°	0	-0.5	-17
	CH_3	590	-17	4°	4.4°	0	0	-17
	CH_4	941	-17	4°	4.8°	0	-0.7	-16.5
	CH_5	1477	-19	6°	1.8°	0	+1.2	-17.8
中央径間 縦反射	CH_6	1280	-16.8	6°	2.0°	0	0	-16.8
	CV_7	787	-18.5	3°	3.3°	-2	-20.5	-18
	CV_8	787	-17.5	3°	3.3°	-2	-19.5	-18.5
	CV_7	787	-18.5	3°	3.3°	+4	-14.5	-18.7
	CV_8	787	-17.5	3°	3.3°	+4	-13.5	-17.7
P_3 横反射	PH_9	615	-13	4°	3.3°	0	-0.6	-13.6
	PH_{10}	664	-10.5	4°	3.0°	0	0	-10.5
	PH_{11}	1221	-18.5	4°	1.1°	+1.5	-20	-18.5
P_3 縦反射	PY_2	1280	-21.5	2.0°	+1.5	-20	+6.7	-14.3
	PY_3	1329	-21.2	2.0°	+1.5	-20	+6.0	-13.7

図 13 垂直面反射パターン

得られた中央径間および P_3 の垂直面反射パターンは下半分である。今回の実験では θ_{-3dB} 附近から 0° 方向にかけて測定ポイントが海岸線から陸上にかかり、地形上の制約から観測値が得られなかったが中央径間についてはその構造から θ_{-3dB} は約 2° と推定出来る。

P_3 についてはその構造が複雑なため早急な推定は下せないと思う。測定中コースの直進を確保することは困難でこの点からも多少の誤差の混入はまぬがれない。同時に実施した水平面の反射パターンの測定と C_1 C_2 における受信レベルの観測から、 P_3 の正面反射レベルが中央径間に比較し約 3 dB 高いことが確かめられたが、従来のレーダ偽像の解析で P_3 を 1 次反射面とする偽像のレベルが中央径間を 1 次反射面とする偽像レベルより高いことが指摘されていたが 2 次反射面や P_3 と中央径間の高さの差を含めての結果であった。

図 14 は同時に測定した反射パターン（未補正）で中央径間の反射パターンには非対称性が強く表われている A-B 部分、図 12 も参照）が斜材の非対称性によるものと思われる。

この A-B 部分が偽像生成レベル以上であればその影響するところは大きく、つまり偽像領域が拡大されるこ

図 14 中央径間水平方向反射パターン例

表 3

実験 No.		距離 m	ピークレベル dBm	θ_{-3dB}	仰角 ϕ	距離補正 dB	ϕ 補正 dB	C_1, C_2 における 受信レベル
中央 径間	C_1	492	-27	5.2°	5.28°	-15.2 -42.3	+18 -24.3	C_1 -24.3 dBm
	C_2	398	-28.2	5.1°	6.52°	-17.1 -45.3	+19.5 -25.8	C_1 -25.8 dBm
	C_3	1142	-27.6	5.1°	2.28°	-7.9 -35	+12 -23.5	C_1 -23.5 dBm
	C_4	1270	-26.5	5.1°	2.05°	-7.0 -33.2	+10 -23.5	C_1 -23.5 dBm
P3	$P_{3,5}$	398	-25	8°	5.02°	-16.6 -41.6	+18 -23.6	C_2 -23.6 dBm
	$P_{3,6}$	337	-25	14.5°	5.92°	-18 -43	+19 -24	C_2 -24 dBm
	$P_{3,7}$	1137	-25	8°	1.76°	-8.0 -33	+11 -22	C_2 -22 dBm
	$P_{3,8}$	1169	-24.8	11.5°	1.71°	-7.8 -32.6	+10 -22.6	C_2 -22.6 dBm

となる。

測定した水平方向の反射パターン 8 例についての諸元が表 3 であるが、図 13 を用いて ϕ の補正をおこない、又距離補正により C_1, C_2 点の受信レベルに換算した値が C_1, C_2 における受信レベルとして示してある。前述の送信点 C_1, C_2 における受信レベルとほぼ一致した。なおこれまでに使用した ϕ の補正値はすべて垂直パターンの傾斜のゆるいものを使用した。垂直パターン測定時に直進コースよりはずれたデータの方がより傾斜が急となることを考慮したものである。

7. ま と め

(イ) エキスパンドメタルによる対策効果の確認については、未対策部の影響の混入を避け垂直パターンにより仰角の補正を考慮した結果 -22 dB 前後の値を得た。

(ロ) P_3 と中央径間の垂直面反射パターンについては下半分のみの測定であるが、水平面反射パターンの補正については充分であり、得られた結果を水平面反射パターンの補正に使用した結果妥当な値が得られた。

(ハ) 横方向反射パターンとそのレベルが測定され、縦方向反射パターンと比較した結果、 θ_{-3dB} はやや小さくそのピークレベルに関しては大差のないことが判明した。

(ニ) 中央径間の反射パターンにおける A-B 部分は一応斜材の非対称性にあると推定しているがそのレベルの大きいことに注目したい。構造的なことが原因であればトラス構造の橋については部材構成を検討する必要があると思うが今後の実験研究を通じて確かめたい。

(ロ) と (ハ) については今後の偽像予測その他に利用出来るものとする。なお (イ) の結果から偽像レベルに対する対策効果は 44 dB 前後となるので偽像消去に一步近づいたことは確かであるが、このような装着方法をとる場合、斜め入射による橋の裏側の部材の問題や、耐候性、工法上の問題等まだ解決すべき点が多いと思う。

謝 辞

この実験を実施するにあたって器材その他で格別の御配慮をお願いした防衛大学校九川武志教授、電気通信大学鈴木務教授、荒井郁男助手、東京商船大学飯島幸人教授、林尚吾講師、またデータのまとめその他で有益な助言を賜った「大島大橋レーダ対策調査研究委員会」の松行利忠委員長ほか委員の皆様や、日頃から格別の御指導を戴いている東京商船大学庄司和民教授ほかレーダ映像研究委員会の皆様に心から感謝いたしますとともに、実験その他に御協力下さった日本道路公団関係者各位と本校職員村上義博君に深甚な謝意を表する次第です。

参 考 文 献

- (1) 庄司和民・飯島幸人・杉崎昭生・今津隼馬・林 尚吾・木村小一・鈴木 務・荒井郁男：橋からのレーダ反射パターンおよびその反射断面積について、橋によるレーダ偽像の理論的考察、日本航海学会論文集, No. 59 (昭 53.8)