

合成開口レーダ用反射板の設計・製作と性能評価

伊藤 陽 介*, 山 本 学**

(キーワード: 合成開口レーダ, コーナリフレクタ, レーダ断面積)

1. はじめに

人工衛星や航空機に搭載されたセンサを用いて地球を観測するリモートセンシング技術は、広範囲にわたる地球環境の変動を把握するための重要な観測手段となっている。リモートセンシングでは、様々な電磁波に対して感度をもつセンサによる電磁波計測を観測手段とし、可視光領域を含む広帯域の電磁波を利用することによって人間の目では認識できない地表面や海面などの現象の観測が可能となっている¹⁾。

リモートセンシングに用いられるセンサは、主に地表や大気中で反射・散乱した太陽光を観測する受動型センサと、観測に用いる電磁波の発生源をセンサ自身に備えている能動型センサに大別される。受動型センサは、気象観測や可視光を複数の波長帯に分けて観測する場合に利用されている。とくに地表面が雲に覆われている確率の高い熱帯雨林地域や植生密度の高い地域では、地表面の情報を得ることが難しく、つぎに述べる能動型センサも併用されるようになってきている。

能動型センサのうちマルチスペクトル画像と同等な解像度の観測画像を得ることができ、気象条件や観測時間などに影響されにくいものとして合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) がある。SAR は、波長3 cm~30cm 程度の電磁波をアンテナから放射し、地表面で散乱した電磁波を再びアンテナで受信する。取得された信号データを合成開口処理することによって、高解像度な SAR 画像を得る²⁾。

観測に利用する電磁波の波長の違いから、SAR 画像には質的に異なる情報が含まれる。SAR では位相の揃ったコヒーレントな電磁波 (レーダ電波) を用いるため、電磁波の特性の一つである偏波を制御できる。送受信偏波を組み合わせて観測することによって森林植生などの構造も推定できる。さらに、複数の隣接した軌道から観測された SAR 画像を干渉処理することによって、標高や地震などによる地表面の微細な変動を計測することもできる³⁾。

航空機に搭載された SAR は、複数種類のレーダ波長、送受信偏波の組み合わせによる観測モード、及び、クロストラック干渉 SAR などの機能をもつことができ、高い地上分解能が特長である。航空機を使うため機動力が高い反面、軌道の不安定性や飛行区域の制限があり、周期的な観測にやや不向きな点がある。

一方、人工衛星に搭載された民生用 SAR は、1978年に打ち上げられた SEASAT が最初であり、その後、ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の ERS-1/2 や ENVISAT、カナダの RADARSAT などに搭載されるとともに、わが国の人工衛星では地球資源衛星 1号 (JERS-1) と陸域観測技術衛星 (ALOS) に SAR が搭載されている。とくに、2006年1月に打ち上げられた ALOS には、PALSAR と呼ばれる世界初の L バンド多偏波 SAR が搭載され、同年10月より定常運用となり高品質な SAR 画像を提供している⁴⁾。

SAR によって観測されたデータを生データと呼び、生データをレンジ方向にパルス圧縮、アジマス方向に合成開口処理する画像再生処理を用いて高解像度な SAR 画像を得る。さらに、SAR 画像の校正を行うことによって、物理量を推定することも可能となる。SAR 画像の校正には、既知のレーダ断面積 (RCS: Radar Cross Section) を持つ標準ターゲットとして、合成開口レーダ用反射板 (CR: Corner Reflector) が用いられている⁵⁾。従来、校正用として用いられてきた CR は、すべて導電性の金属で構成されていることが多く、重く経済性も低いいため容易に製作・設置することが難しい側面があった。

本論文では、前述した問題点を鑑み、構造を単純化し入手性が高く経済的な材料を使って容易に組立・設置・

*鳴門教育大学生活・健康系 (技術) 教育講座

**東京都練馬区立大泉北中学校 (平成19年3月鳴門教育大学大学院修了)

分解が可能な CR を設計・製作するとともに、その性能を評価することを目的とする。人工衛星と航空機に搭載された SAR による観測と同期して、製作した CR を設置し、実際にレーダ電波を反射させる観測実験を行う。得られた校正済みの SAR 画像を用いて各 CR に対する RCS を計測し、CR の構造から得られる RCS の理論値と比較することによって性能を評価する。

2. 合成開口レーダ用反射板 (CR) の設計・製作

2.1 CR の構造

レーダから送信された特定の電力をもつ電磁波が目標物に当たった場合、その表面の電気的特性と形状で決まる RCS に比例した電力をもつ電磁波が全方向に再放射され、一部は目標物に吸収されて熱となる。ここで、RCS の単位は $[\text{dBm}^2]$ が用いられる。SAR では一つのアンテナを送信と受信の両方で用いるため、目標物に対する入射角と同じ方向に反射する後方散乱波のみを計測できる。

SAR 画像を定量的に取り扱うためラジオメトリック校正、ジオメトリック校正、及び、ポラリメトリック校正などが実施されている。ここで、ラジオメトリック校正は、既知の RCS と SAR 画像から推定された RCS が合致するように補正係数を求めることをいい、ジオメトリック校正は、画像の幾何学的な歪を補正する係数を地上位置が既知の基準点 (GCP: Ground Control Point) から求めることをいう。ポラリメトリック校正では、能動型反射器 (PARC: Polarimetric Active Radar Calibrator) などを用いて位相差が既知の送受信電波を用いて校正する。

ここでは、最も基本的な校正であるラジオメトリック校正に用いられる標準目標物を取り扱う。通常標準目標物として、構造が簡単でかつ比較的大きな RCS が得られる CR が利用されることが多い。

最も簡単な CR として、導電性の金属板 1 枚 (大きさ $a[\text{m}] \times b[\text{m}]$) のみから構成される一面 CR がある。レーダ波長を $\lambda[\text{m}]$ とすると、一面 CR から得られる理論的な最大 RCS は、この平面に垂直に入射する場合であり、

$$\sigma_1 = \frac{2\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \quad (1)$$

となる⁶⁾。しかし、入射角が垂直から外れると急速に RCS が低下するため、設置条件が厳しく実用的でない。また、SAR のように入射角が異なる複数の反射波を合成開口処理して画像を得るセンサの校正に利用できない。

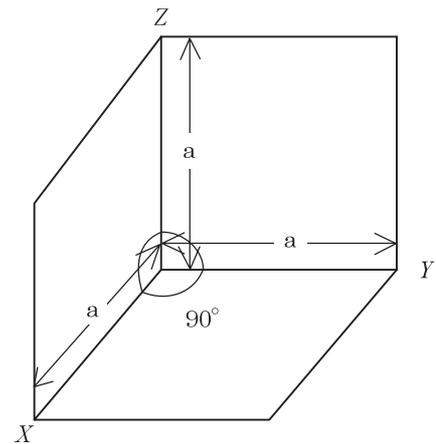
一面 CR で用いた金属板を 2 枚用いて垂直に交わるように構成した二面 CR を用いると、入射波が二面の法線方向から入射するとき最大 RCS は、

$$\sigma_2 = \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \quad (2)$$

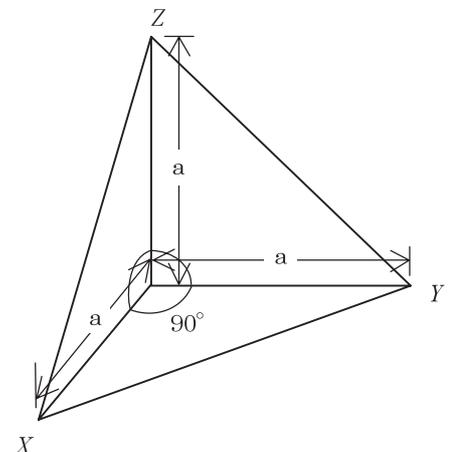
となり、一面 CR と比較して 4 倍の RCS が得られる⁶⁾。しかし、二面の法線方向から外れると急速に RCS が低下するため一面 CR と同様に設置条件が厳しく実用的ではないが、SAR への校正には利用可能である。

さらに設置条件を緩和するために、一辺 $a[\text{m}]$ の正方形の金属板 3 枚を互いに垂直に交わるように構成した三面 CR を用いる。三面 CR では入射波の方向に対する依存性が少なくなり、入射波と反射波の偏波面が一致するという特長をもつようになる (図 1(a))。

三面の交点を O とするとき、 θ を OZ と電磁波の入射方向のなす角、 ϕ を OX と電磁波の入射方向を XY 平面に投影した線分とのなす角とすると、RCS は $\theta = 54.74^\circ$ 、 $\phi = 45^\circ$ のときに最大となり、



(a) 正方形



(b) 直角二等辺三角形

図1 三面 CR の概略構造

$$\sigma_{3S} = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2} \tag{3}$$

となる⁷⁾。この三面 CR では、最大 RCS を得る対象軸に対して立体角約25°における RCS 低下量は 3 dB 程度と少なく利用しやすい。

同様に図 1 (b)に示す直角二等辺三角形のほか四分円から構成される三面 CR も利用でき、各最大 RCS は、

$$\sigma_{3T} = \frac{4\pi a^4}{\lambda^2} \tag{4}$$

$$\sigma_{3C} = \frac{15.6a^4}{\lambda^2} \tag{5}$$

となり、対象軸に対する許容入射角の範囲はそれぞれ立体角約40°、約32°である⁷⁾。

三種類の三面 CR のうち、最も設置条件が緩いものは直角二等辺三角形を用いた CR であるが、他の三面 CR と比較して最大 RCS が小さいという側面がある。バックグラウンドの後方散乱より大きな RCS が得られ、かつ、レーダの入射角と SAR の合成開口時間に対する入射角度の変化が許容入射角の範囲を超えないような三面 CR を用いる必要がある。とくに厳密な校正を行う場合、CR を校正する金属板の長さ a は、レーダ波長 λ の 10 倍以上が求められることが多い。

2. 2 三面 CR の設計

前節で述べたように三面 CR には、構成する金属板の形状により三種類あり、それぞれの特性と設置・製作する上で留意すべき点を比較したものを表 1 に示す。この結果から、最も汎用性の高い形状は直角二等辺三角形で構成される三面 CR と考えられるが、最大 RCS が正方形の場合と比較して 1/3 であり、同程度の RCS を得ようとするとき $\sqrt[3]{3} \approx 1.3$ 倍の a が必要となり大型化する。

SAR では指向性を広くするため矩形開口面のアンテナ (幅 l [m]) が用いられることが多い。その場合、アンテナから放射された電磁波の主ローブの半減値を示す角度 β_0 は、 λ/l [rad] で近似される。例えば、Lバンドのレーダ波長 $\lambda = 23.6$ cm でアンテナの幅が $l = 9$ m の場合、 $\beta_0 = 0.026$ [rad] = 1.5° となり、最も許容入射角の小さな正方形で構成される三面 CR でも十分利用できることがわかる。

以上の考察に基づき、ここでは最も製作が容易であり、かつ、大きな RCS が得られる正方形の金属板を三枚互いに垂直になるように組み合わせた三面 CR を設計する。未使用時の収納を考慮した大きさとし、短時間で容易に組立・設置・分解が可能な構造とするとともに、少人数で運搬できる重量とする。そのため、金属板をすべて金属から構成するものではなく、木材の合板にシート状の薄いアルミニウム板を粘着したものとす。3枚の金属板は、L字金折で固定し、斜めにスジカいを3ヶ所取り付けることによって、3枚の金属板の互いの垂直性を高めるとともに、CR 全体を補強する。図 2 に考案した CR の設計イメージを示す⁸⁾。

表 1 三面 CR の比較

金属板の形状	正方形	直角二等辺三角形	四分円
最大 RCS	$\frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$	$\frac{4\pi a^4}{\lambda^2}$	$\frac{15.6a^4}{\lambda^2}$
対象軸に対する許容入射角	立体角約25°以内	立体角約40°以内	立体角約32°以内
金属板の切削加工	容易	やや困難	困難
設置時の耐風性	低い	高い	中程度
CR 底面の傾斜角の調整	約30°を超える傾斜角の場合設置が困難	すべての傾斜角において容易	すべての傾斜角においてやや容易
設置時の安定性	中程度	高い	中程度

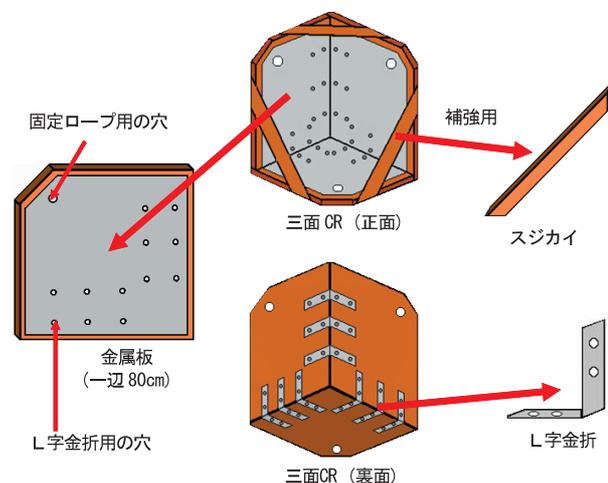


図 2 三面 CR の設計イメージ

つぎに、金属板の一辺の長さ a を決める。一般的な SAR では、XバンドからPバンドまでの波長帯が用いられ、その波長は3cm～30cm程度である。(3)～(5)式に示したように最大 RCS は、レーダ波長 λ の2乗に反比例するため、波長が長くなると RCS は小さくなる。

一般的に流通している合板は、90cm×180cmのサイズであり、大きな RCS を得るために a を大きくすると複数の部材を接合して一つの金属板を構成することとなり、そのつなぎ目で平面度が失われたり強度が低下する恐れがある。さらに、組立・分解作業も煩雑なものとなる。これらの点を考慮し、ここでは金属部分となる正方形の一辺の長さを $a=80$ cm とする。

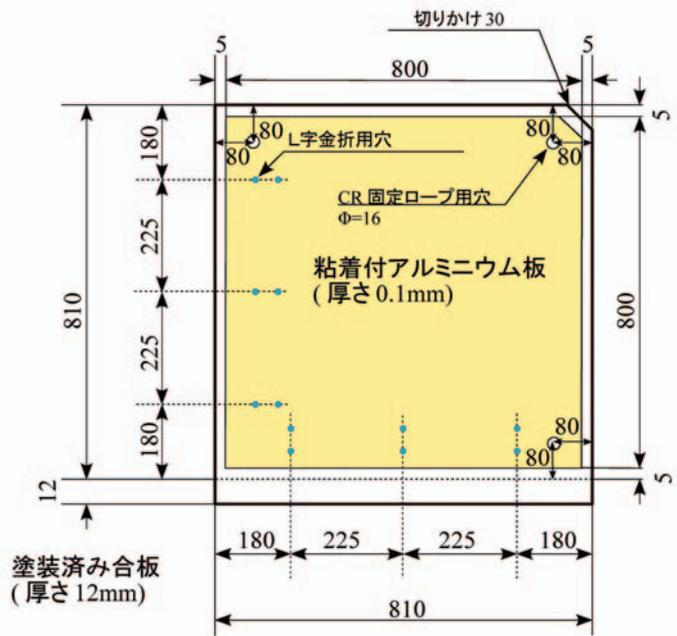
以上述べた条件下で設計した三面 CR の設計図を図3に示す。図3(a)に示した金属板(部材 A, B, C)は、シート状のアルミニウム板(厚さ0.1mm)を粘着する際に、平面度を保持するため、片面をペンキで塗装した合板を用いる。合板の大きさは、正方形のアルミニウム部分に対して5mmだけ上げたものとする。金属板の組立方向を明確にすること、及び、設置時の安全性を高めるために四隅の角のうち一ヶ所を切り落とす。2枚の金属板の接合には、L字金折3個を用いてボルトとナットで固定する。また、L字金折用穴を6ヶ所×2個、固定ロープを通す穴と水抜き用穴の合計3ヶ所、及び、スジカイ固定用穴を2ヶ所×2個あけておく。

図3(b)に組み立てた三面 CR の上面図を示す。部材 A と B, B と C, 及び、C と A は、それぞれ、斜め45°に入れたスジカイと、図3(c)で示した方法で結束バンド(25cm, 引張強度22kg) 2本を用いて結合される。

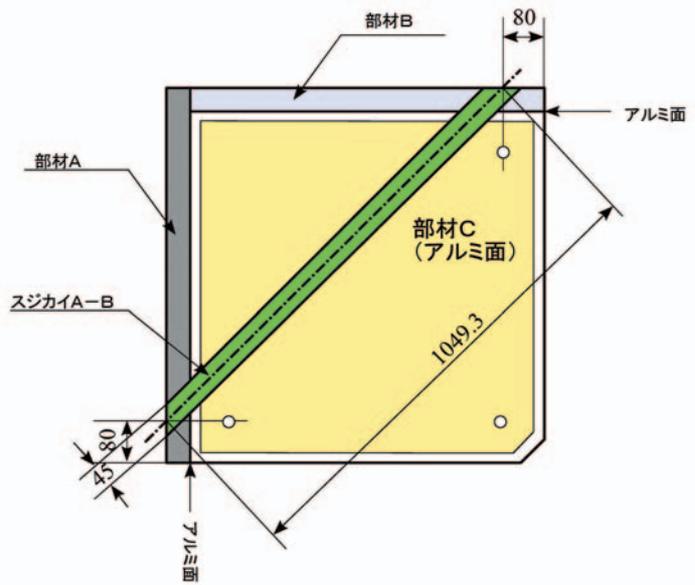
2. 3 三面 CR の製作と組立

三面 CR の製作は、塗装済み合板から所定の大きさの各部材を切り出し、図3(a)に示した位置に穴をあける。L字金折の穴の位置が、製造上の誤差により大きくばらついている場合は、L字金折に識別標を添付し、固定用穴との対応がつくようにしておく。

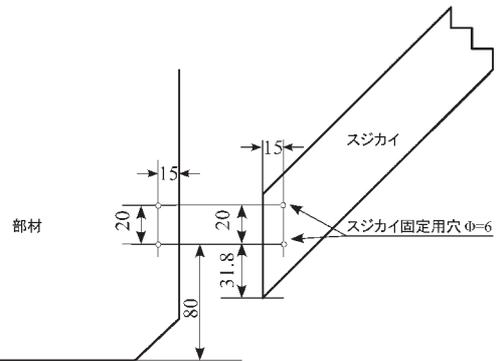
つぎに、塗装面をアルコールで洗浄した後、粘着材があらかじめ塗布されているシート状のアルミニウム板を凹凸がでないように空気を抜きながら慎重に合板に接着する(図



(a) 金属板 (部材 A, B, C)



(b) 組み立てた CR の上面図



(c) 金属板とスジカイの固定方法

図3 三面 CR の設計図

4)。接着後、周辺部分から剥がれないように釘でアルミニウム板の四隅を固定する。

三面 CR の組立は、2枚の金属板を L 字金折で仮固定した後、残りの1枚を L 字金折で仮固定する（図5(a)）。3枚が互いにほぼ垂直に交わるように仮固定していたボルトを所定のトルクで固定する。最後に、スジカいを3本用いて補強する（図5(b)）。

3. 三面 CR の性能評価方法

3. 1 評価対象とする SAR

製作した三面 CR の性能を評価するために使用する SAR は、航空機に搭載されている Pi-SAR と陸域観測技術衛星 (ALOS) に搭載されている PALSAR とする。それぞれの主な仕様を表2と表3に示す。なお、Pi-SAR の L バンドと PALSAR は同一レーダ波長である。

3. 2 設計した三面 CR の RCS

一辺の長さ $a=80\text{cm}$ の正方形の金属板から構成される三面 CR の最大 RCS は(3)式より求められる。Pi-SAR の X バンド ($\lambda=3.14\text{cm}$) より

$$\sigma_X = 15661.44 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6)$$

となり、この値をデシベル値に換算すると

$$\sigma_{dBX} = 10\log_{10}\sigma_X = 41.95 \text{ [dBm}^2\text{]} \quad (7)$$

を得る。同様に、Pi-SAR の L バンドと PALSAR は同じレーダ波長 ($\lambda=23.6\text{cm}$) であるから、

$$\sigma_L = 277.25 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8)$$

となり、この値をデシベル値に換算すると

$$\sigma_{dBL} = 10\log_{10}\sigma_L = 24.43 \text{ [dBm}^2\text{]} \quad (9)$$

を得る。

3. 3 SAR 画像を用いた RCS の計測

CR が判読できる SAR 画像から RCS を計測する方法は、Gray らによって提案された積分法を用いる¹⁰⁾。ここで、SAR 画像の各画素の値は複素数からなり、その実数部と虚数部をそれぞれ、 I 、 Q とする。

まず、CR とその周囲を含む領域を選択し、その領域の画素数を N_{CR} とする。各画素に記録されている値からパワー値を算出し、 N_{CR} 点分の総和を求め

$$\epsilon_{CR+BK} = \sum_{N_{CR}} (I^2 + Q^2) \quad (10)$$

とする。

つぎに、選択した領域の中から CR の周囲にあるバックグラウンドとみなせる領域を抽出する。抽出した画素数を N_{BK} とし、バックグラウンドの平均パワー値を

$$\overline{\epsilon}_{BK} = \frac{1}{N_{BK}} \sum_{N_{BK}} (I^2 + Q^2) \quad (11)$$

と定義する。

CR のみの後方散乱係数の推定値 $\tilde{\sigma}$ を公表されてい



図4 合板にアルミニウム板を接着する作業



(a) L字金折を用いた仮組み



(b) スジカいをを用いた補強

図5 三面 CR の製作と組立作業の様子

る校正係数 C を用いて求める。

$$\tilde{\sigma} = (\epsilon_{CR+BK} - N_{CR}\bar{\epsilon}_{BK})S \times 10^{\frac{C}{10}} [m^2] \quad (12)$$

ここで、1画素分の面積を $S [m^2]$ とする。SAR 画像のアジマス方向の解像度を $\rho_a [m]$ 、スラントレンジ方向の解像度を $\rho_r [m]$ とすると、SLC (Single Look Complex) 画像の場合、 $S = \rho_a \rho_r$ である。

一方、CR を含む観測領域への入射角が ϕ のとき、グラントレンジ方向の解像度は、

$$\rho_{gr} = \frac{\rho_r}{\sin \phi} \quad (13)$$

となる。従って、グラントレンジ画像の場合、1画素分の面積は

$$S = \rho_a \rho_{gr} = \frac{\rho_a \rho_r}{\sin \phi} \quad (14)$$

で与えられる。

最後に、 $\tilde{\sigma}$ をデシベル値に換算して、

$$\tilde{\sigma}_{dB} = 10 \log_{10} \tilde{\sigma} [dBm^2] \quad (15)$$

を得る¹¹⁾。

4. 観測実験による性能評価

製作した三面 CR を鳴門教育大学構内に設置し、Pi-SAR 及び PALSAR による観測実験を行った。本節では、提供元において校正済みの SAR 画像を入手し、その画像から CR を特定するとともに、画素値から RCS を推定し性能評価を行う。なお、三面 CR は理論的に偏波面を保持する性質があるため、性能評価では送受信とも水平偏波で行う観測 (HH) のみとする。

4.1 Pi-SAR による観測実験結果

Pi-SAR による観測実験は、2004年11月7日に実施した。Pi-SAR の観測モードは、Xバンド、Lバンドとも全偏波 (HH+HV+VH+VV) とした¹²⁾。

製作した CR を鳴門教育大学多目的広場に約20m 間隔で3基設置した。その設置状態と位置を表4と図6に示す。CR の入射角の依存性を評価するため、最大 RCS を得られる CR に対するレーダ電波の入射角55°に対して±5°の3種類とした。観測日及びその前日の降水量は0mm であり、バックグラウンドは、平坦かつ主に芝生からなる薄い植生状態であった。

Pi-SAR の Xバンドと Lバンドによって観測された鳴門教育大学付近の校正済みグラントレンジ SAR 画像 (HH 偏波) を図7に示す。両バンドの SAR 画像とも3基の CR からの後方散乱を明瞭に判別できる。Xバンド及びLバンドの SAR 画像から設置した CR からの後方散乱を含む画素を抽出し積分法を適用して RCS を計測するとともに、

表2 Pi-SAR の主な仕様⁹⁾

(a) Xバンド SAR

レーダ電波	中間周波数：9.55GHz (波長：3.14cm)		
送信電力	6.3kW (ピーク時)		
バンド幅	100MHz		
観測モード	HH+HV/ VV+VH/ クロストラック干渉	HH+HV+VH+VV	HH+HV+VH+VV 及びクロストラック干渉
入射角	10~75°		
地上分解能	レンジ方向1.5m / 3m アジマス方向 (4-look) 1.5m / 3m		
観測幅	20.6km	9.4km	5.6km
量子化ビット数	8 bits		
アンテナサイズ	アジマス方向：1.05m エレベーション方向：0.19m		

(b) Lバンド SAR

レーダ電波	中間周波数：1.27GHz (波長：23.6cm)		
送信電力	3.0kW (ピーク時)		
バンド幅	50MHz		
観測モード	HH / VV	HH+HV+VH+VV	
入射角	20~60°		
地上分解能	レンジ方向3m / 5m / 10m / 20m アジマス方向 (4-look) 3m / 6m		
観測幅	42.9km	20.4km	
量子化ビット数	8 bits		
アンテナサイズ	アジマス方向：1.55m エレベーション方向：0.65m		

表3 PALSAR の高分解能観測モードの主な仕様⁴⁾

レーダ電波	中間周波数：1.27GHz (波長：23.6cm)	
送信電力	2.0kW (ピーク時)	
バンド幅	28MHz	14MHz
観測モード略称	FBS	FBD
偏波	HH または VV	HH+HV または VV+VH
入射角	8~60°	8~60°
地上分解能	7~44m	14~88m
観測幅	40~70km	40~70km
量子化ビット数	5 bits	5 bits
データ転送速度	240Mbps	240Mbps
雑音等価後 方散乱係数	観測幅70km 時 -23dB 以下 観測幅60km 時 -25dB 以下	
信号対不確定 性比 (S/A)	観測幅70km 時 16dB 以上 観測幅60km 時 21dB 以上	
ラジオメトリック 精度	1シーン内で1dB / 1軌道内で1.5dB	
アンテナサイズ	アジマス方向：8.9m エレベーション方向：3.1m	

誤差を求めた結果を表5(a)と(b)に示す。

4. 2 PALSAR による観測実験結果

PALSAR による観測実験は、上昇軌道の観測モード FBD (HH 偏波+HV 偏波) を用いて2007年8月14日に行った。製作した三面 CR 1基を鳴門教育大学陸上競技場のトラック内に設置した。その設置状態と位置を表6と図8に示す。RCS が最大となるように CR に対するレーダ電波の入射角を55°とした。観測日及びその前日の降水量は0mmであり、バックグラウンドは、平坦かつ主に芝生からなる薄い植生状態であった。

PALSAR によって観測された鳴門教育大学付近の校正済みグランドレンジ SAR 画像 (HH 偏波) を図9に示す。円で示された領域に、設置した CR からの後方散乱を明瞭に判別できる。この SAR 画像を用いて設置した CR からの後方散乱を含む画素を抽出し、積分法を適用して RCS を計測するとともに、誤差を求めた結果を表5(c)に示す。

4. 3 性能評価結果

表5に示した Pi-SAR 及び PALSAR を用いた三面 CR の観測実験結果に基づき、設計・製作した CR の性能を評価する。まず、Pi-SAR の Xバンドに対する RCS の誤差は、CR 番号1と2では、 -0.46dBm^2 となり理論値にほぼ一致している。CR 番号3では、誤差が他の CR と比較して -2.31dBm^2 と大きくなっている。この要因として CR 番号3の付近に林とフェンスがあり、これらからの後方散乱も CR を識別するための画素に混入したことが推定される。

一方、Pi-SAR の Lバンドに対する RCS の誤差は、Xバンドと同様に CR 番号1と2では、平均 $+1.19\text{dBm}^2$ となり理論値に近い値となっている。両者の入射角の差は5°であったがその影響は見られなかった。CR 番号3の誤差は $+0.73\text{dBm}^2$ で前者と比較して -0.46dBm^2 低く、CR 番号3の付近にある林とフェンスから影響を受けていると考えられる。しかし、Lバンドの波長は、Xバンドより長いため影響は少なくなっている。

PALSAR の Lバンドに対する RCS の誤差は、 -0.02dBm^2 となり理論値とほぼ一致した良好な結果を得た。Pi-SAR を搭載した航空機の飛行高度は約12kmであり、一方 PALSAR を搭載した人工衛星 ALOS の軌道高度は約710kmである。設置した三面 CR に対するレンジ長は、それぞれ、約16km, 約886kmであり、レーダ電波が伝播する距離は著しく異なる。表2に示すように Pi-SAR の Lバンドと PALSAR の送信電力は同程度であることを考慮すると、

表4 Pi-SAR を対象とする CR の設置状態

番号	CR に対する入射角	位置
1	50°	N34°12'13.4", E134°36'12.8"
2	55°	N34°12'13.8", E134°36'13.2"
3	60°	N34°12'14.3", E134°36'14.0"

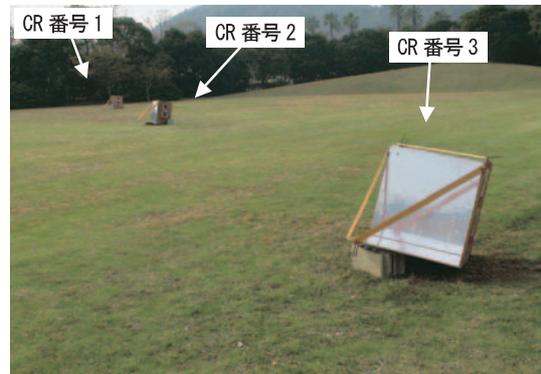
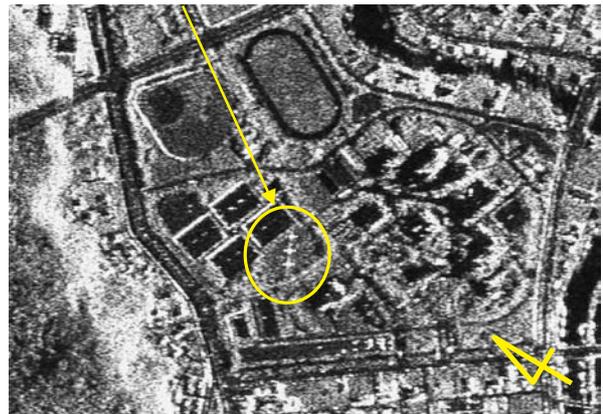


図6 3基の CR の設置状態 (南方方向に撮影) (鳴門教育大学多目的広場, 2004年11月7日)

3ヶ所に設置した CR からの後方散乱(上から CR 番号3, 2, 1)



(a) Pi-SAR Xバンド (地上解像度1.25m×1.25m)

3ヶ所に設置した CR からの後方散乱(上から CR 番号3, 2, 1)



(b) Pi-SAR Lバンド (地上解像度2.5m×2.5m)

図7 Pi-SAR によって観測された鳴門教育大学付近のグランドレンジ SAR 画像 (2004年11月7日, HH 偏波, 地表面に対する入射角37.3°)

ここで設計・製作した三面CRの大きさがLバンド用としては小さい部類に属するが、観測されたRCSの値から性能的に十分満たされていることがわかった。

5. まとめ

本論文では、SARのラジオメトリック校正に用いられるCRの構造と得られるRCSを考慮し、組立・設置・分解が容易であり、かつ、経済性の高い材料から構成される三面CRを設計した。このCRの設計図を示すとともに、具体的な製作例を述べ、本CRの取り扱い方法を示した。

さらに、製作したCRの性能を評価するために、航空機搭載型及び人工衛星搭載型SARを用いてXバンドとLバンドの各レーダ電波に対する観測実験を実施した。この観測実験から得られた校正済みグランドレンジSAR画像を用いて設計・製作した三面CRのRCSを計測した。計測されたRCSを理論値と比較した結果、RCSの誤差は小さく、Lバンド用CRとしては小型ではあるものの高い精度をもつCRであることが示された。

謝 辞

Pi-SARによる観測実験は、(独)情報通信研究機構と(独)宇宙航空研究開発機構によるPi-SAR研究公募に関する共同研究の一環として実施しました。PALSARによる観測実験では、(財)資源・環境観測解析センターにご協力いただきました。

参考文献

- 1) 久世宏明, 飯倉善和, 竹内章司, 吉森久, リモートセンシングの基礎, 森北出版, 2005年.
- 2) F. M. Henderson and A. J. Lewis, Principles and Applications of Imaging Radar, John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- 3) 日本写真測量学会, 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, 1998年.
- 4) (独)宇宙航空研究開発機構 地球観測利用推進センター, ALOS ユーザハンドブック, (独)宇宙航空研究開発機構, <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/doc/jhandbk.htm>, 2005年.
- 5) J. C. Curlander and R. N. McDonough, Synthetic Aperture Radar, John Wiley & Sons, 1991, pp.337-343.
- 6) (財)資源観測解析センター, 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ⑤合成開口レーダ

表5 計測されたRCSと誤差(HH偏波)

(a) Pi-SAR (Xバンド) 理論RCS: 41.95 [dBm²]

番号	計測RCS [dBm ²]	誤差 [dBm ²]
1	41.49	-0.46
2	41.49	-0.46
3	39.64	-2.31

(校正係数 $C=2.49$)

(b) Pi-SAR (Lバンド) 理論RCS: 24.43 [dBm²]

番号	計測RCS [dBm ²]	誤差 [dBm ²]
1	25.71	+1.29
2	25.57	+1.14
3	25.16	+0.73

(校正係数 $C=4.28$)

(c) PALSAR (Lバンド) 理論RCS: 24.43 [dBm²]

番号	計測RCS [dBm ²]	誤差 [dBm ²]
4	24.41	-0.02

(校正係数 $C=-83.0$)

表6 PALSARを対象とするCRの設置状態

番号	CRに対する入射角	位 置
4	55°	N34°12'20.7", E134°36'19.5"



図8 CRの設置状態(北東方向に撮影)
(鳴門教育大学陸上競技場, 2007年8月14日)

1ヶ所に設置したCRからの後方散乱(CR番号4)

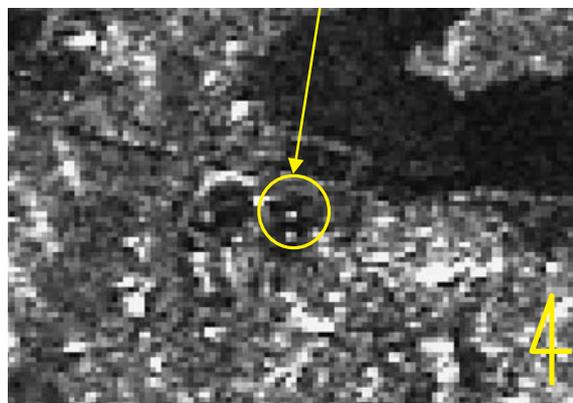


図9 PALSARによって観測された鳴門教育大学付近のグランドレンジSAR画像(2007年8月14日, (地上解像度12.5m×12.5m, FBD-HH偏波, 地表面に対する入射角39.1°)

- (SAR), (財) 資源観測解析センター, 1992年, pp. 53-63.
- 7) A.K. Bhattacharyya and D. L. Sengupta, Radar Cross Section Analysis and Control, Artech House, 1991, pp. 115-139.
 - 8) 山本学, 合成開口レーダ校正用反射板の設計製作と性能評価に関する研究, 鳴門教育大学学校教育学部中学校教育専修技術科教育コース, 平成16年度卒業論文, 2005年.
 - 9) 梅原俊彦, 浦塚清峰, 小林達治, 佐竹誠, 灘井章嗣, 前野英生, 増子治信, 島田政信, 航空機搭載3次元高分解能映像レーダ (Pi-SAR) システムの開発, 通信総合研究所季報, Vol. 48, No. 2, 2002, pp. 97-112.
 - 10) A. L. Gray, P. W. Vachon, C. E. Livingstone, and T. I. Lukowski, Synthetic aperture radar calibration using reference reflectors. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No. 3, 1990, pp. 374-383.
 - 11) 山本学, 伊藤陽介, 泓田昌信, 溝渕寛和, 合成開口レーダ校正用反射板の設計製作と観測実験, 日本産業技術教育学会第20回四国支部大会講演要旨集, 2004年, p.A5.
 - 12) 伊藤陽介, 泓田昌信, 香西克俊, 多偏波干渉 SAR データによるため池管理情報の抽出, Pi-SAR 研究公募成果報告書, (独) 情報通信研究機構, (独) 宇宙航空研究開発機構, 2006年, pp. 23-28.

(受理日: 2007年9月26日)

Design, production and performance evaluation of corner reflector for synthetic aperture radar

ITO Yosuke* and YAMAMOTO Manabu**

Earth observation images obtained by synthetic aperture radar (SAR) are utilized for making a digital elevation model and estimating ground displacement, and so on. The SAR data include both backscatter and phase information from targets. Calibration of SAR image is necessary for quantitative analysis. In this paper, a trihedral corner reflector (CR) is designed and produced in consideration of the structure, radar cross section (RCS), and use of reasonable materials. It is shown that the handling of the designed trihedral CR is easy in the case of assembling and installing this CR practically. Both the airborne SAR called Pi-SAR and the spaceborne SAR called PALSAR mounted on the Japanese satellite ALOS were employed to evaluate the RCS backscattered from the proposed CR. The observation experiments using both Pi-SAR X and L bands (Full polarimetric mode) and PALSAR (FBD 34.3 deg. HH-HV mode) were conducted in 2004 and 2007, respectively. The RCS of the deployed CRs was estimated using complex pixels in the calibrated grand range SAR images by the integral approach. In the experiment results, the difference between the estimated and the theoretical RCS indicated a small amount of error. Especially, the RCS observed by PALSAR was nearly equal to the theoretical value. It has been clarified that the designed trihedral CR has the planned performance and utility in spite of the simple structure and the small size for L band radar wave.

*Faculty of Health and Living Sciences Education, Naruto University of Education

**Ooizumi North Junior high school, Nerima-ward, Tokyo (Graduate of Naruto University of Education in 2007)