

1. 教育プログラムについて

だいち2号 (ALOS-2) はレーダー衛星です。電磁波パルスを放射し地上からの反射波を観測しています。そこで、この電磁波に強く反射するもの (リフレクターと呼びます) を子供たちが製作しこれを観測点に置いて、だいち2号の観測画像に写ろうというプログラムです。プログラム参加受付の詳細については (公財) 日本宇宙少年団の HP をご参照ください。

リフレクターは、立方体の角の3面を反射面とするコーナーリフレクター (CR) が一般的に使用されます。ここでもこの CR を中心に紹介します。なお、それ以外のものも少し紹介します。

2. 必要な情報

1) 観測点の緯度, 経度, 標高. 真北から見た磁北の偏角 (γ° : 西偏角 (西に傾いている場合) を+, 東偏角を-とします) (一般に真北と磁北とは異なります。国土地理院などの HP で調べます)

2) 観測日時分および観測点から見た衛星の方位角と仰角

観測点の地域周辺を衛星が観測する日・時・分を本部からお伝えします。

衛星が観測する日・時・分の情報から、各観測点での正確な日時分秒およびその時の観測点から見た衛星の方位角と仰角を算出する必要がありますが、これは各団体でお願いします。その方法は以下の通りです。

- ・サテライトトラッカー (Satellite Tracker 3D) (<https://stdkmd.net/sat/>) にて、観測日時分秒を変化させて観測点から見た衛星までの距離が一番近い時を検出する。このときの観測点から見た衛星の高度, 方位角 (α°), 仰角 (θ°) を記録する。
- ・ヘブンズアバブ (Heavens Above) (<https://www.heavens-above.com/PassSummary.aspx?satid=39766>) にて、観測地点と衛星名を選んで、最高通過点における時刻, 高度 (仰角のこと, θ°), 方位角 (α°) を読み取る。

3) 衛星軌道に平行な方向

衛星軌道に平行な方位 (真北に対して真北から東に回転する方向の角度) δ° は、

$$\delta^\circ = \text{衛星の方位角 } \alpha^\circ - 90^\circ \quad \dots (1)$$

で求められます。この方位角から、衛星軌道に平行な方向の方位の磁北からの偏角 β を次の式で導出します。

$$\beta = \delta^\circ + \text{観測点の真北からの磁北の偏角 } \gamma^\circ \quad \dots (2)$$

これにより、磁北から β だけ東回りの角度の方向が衛星軌道と平行な方向となります。

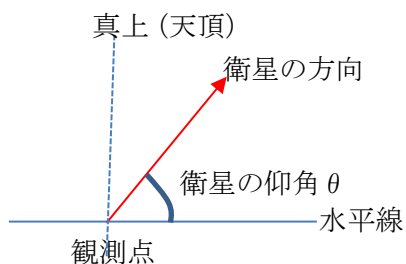


図1 観測点から見た衛星の仰角

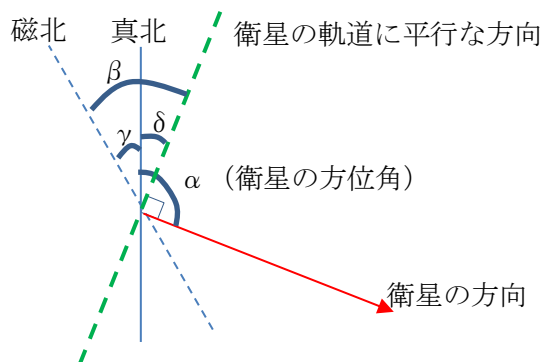


図2 観測地の地面での各方向

3. 観測点における準備

1) 衛星軌道と平行な方向にそって、リフレクターを置くためのベースラインを引いて置くと、リフレクター設置の助けになります。

2) リフレクターを衛星が観測する分解能（お知らせする日時ではほとんどの場合 3m 分解能です）の約 5 倍程度（すなわち 15 m 程度）離して置くと、各リフレクターの位置がほぼ分離できます（実証実験では 10 m 離してもほぼ分離できました）。

逆に、文字を描くように反射点をほぼ連続させたい場合は、分解能の 2 倍程度以内（すなわち 3 m ~ 6m）にリフレクターを次々と配置すると良いと思われます（実験では未確認）。

4. リフレクターについて

- 1) 最も一般的なリフレクターは、図 3 のような立方体の角の 3 面を反射面とするコーナーリフレクター（CR）です。
- 2) この CR の変形として、底面が正方形でその他の面が長方形のものもあります。また、2 面だけのリフレクターや、金属棒を並べただけのリフレクターもあります。
- 3) CR の一辺の長さは数波長以上が良いですが、実証実験では一辺 90cm の CR で十分な明るさを得ることができました。70cm であっても明るく写ることを確認しています。
- 4) 明るくするためには、CR の一辺の長さを長くします。その他に、一カ所（分解能(3m)四方以内）に置く CR を図 4 のように、2 個、3 個と増やすとその分だけ明るくなります。実験では 3 個まで増やして明るさがだんだんと増やすことが確認できました。水平に置く場合には大地が反射面として利用できるのも、底面は大地でも良いしあるいは広いアルミシートを用いても良いです。
- 5) 材料は、金属板、アルミ箔、アルミ蒸着シート、金網などです。

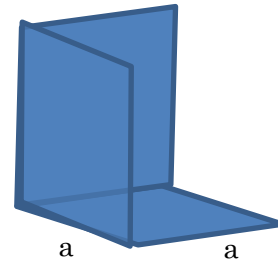


図 3 コーナーリフレクター（CR）

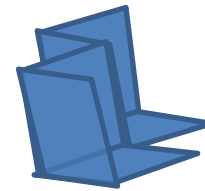


図 4 明るさを増すために一カ所に複数個の CR を設置

実験の結果、市販のアルミ箔、市販のアルミ蒸着シートで十分な反射特性を得ることがわかりました。大地 2 号の放射する波長（約 24cm）の電磁波は、金属ではない物体で水分を含まず厚さが 1 m 以内程度であれば、あまり減衰せず通過することができます。そこでたとえば、アルミシートを段ボールなどで挟み込むと強度も増し扱いやすくなるようです。また、立方体の発泡スチロールや段ボールの箱の角の 3 面にアルミシートを貼り付けるなどの方法もあります。アルミ箔は破れやすいので扱いが少しいへんです。

金網を用いる場合、金網の編目（穴）の最大径は理論上は波長の半分 12cm 以下であればよいのですが、実験からは網目の穴の径が小さいほど明るくなる傾向があるようですので、網目の径は小さい方が良いでしょう。実験では約 5cm 以下であれば十分でした※。

※金網の編目の最大径は波長の 1/2 以下である必要があります。だいち 2 号は L バンドと呼ばれる波長で観測しています。3m 分解能の観測モードでの（電磁波の基本周波数は 1257.5MHz ですから）基本波長は約 23.84cm です。従って、11.92cm 以下である必要がありますが、実験の結果、編目が正方形であるとき、一辺が 5cm 以下であれば良好な反射特性が得られました。

※アルミシートなどの厚さについて。電磁波の侵入深さ δ は、

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \times \text{周波数} \times \text{導電率} \times \text{透磁率}}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \times 1.26 \times 10^9 \times (2.65 \times 10^{-8}) \times 4\pi \times 10^{-7}}} = \text{約 } 2.31 \mu\text{m}$$

ですので、アルミシートの厚さは約 3 μm 程度以上が良いと思われます。ただし実験の結果では市販のアルミシートで十分な反射特性を有していました。

- 6) 明るく写るために大切なことは、CR の各面をなるべくなめらかにすること、CR の各面同士の角度を垂直になるようにすること、水ロケットなどの工作と同じで、丁寧にきれいに作ること、方位に関するベースラインの準備などをなるべく正確に行うこと、などです。ただし、これらが多少ずれ

ていても明るさは多少減じますもののちゃんと写りますので、小学校低学年の子供も活動できます。

5. コーナーリフレクター (CR) の中心線を衛星方向に合わせる場合

1) リフレクターの底面の水平面からの仰角 ϕ (CR 仰角と呼ぶことにします) が、

$$\phi = \text{衛星の仰角 } \theta - 35.26^\circ \quad \dots(3)$$

となるように、リフレクターを設置します。

例えば、衛星の仰角 θ が 50° のとき、

リフレクター底面からの CR 仰角 ϕ は、 14.74° となります。

こうして、衛星方向がリフレクターの中心線の方と一致するように、すなわち、衛星方向とリフレクターの底面とのあいだの角度が 35.26° となるようにします。

※ 35.26° は、リフレクター中心線とリフレクター各面とのあいだの角度であり

$$\cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right) \quad \dots(4) \quad \text{によって求められます。}$$

2) 上記 1) のために、角度計などがあれば良いのですが、

図 5 において、リフレクター一辺の長さを a とするとき、底面の一番高いところの高さ $h2$ を

$$h2 = \sqrt{2}a \sin\phi \quad \dots(5)$$

として求めて、これを参考に設置しても良いでしょう。なお、底面の途中の頂点の高さ $h1$ は $h2$ の半分の

$$h1 = \frac{h2}{2} = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin\phi \quad \dots(6) \quad \text{として求められます。}$$

たとえば、衛星仰角が 50° のとき CR 仰角は 14.74° であり、 $h2 = a \times 0.360$ 、 $h1 = a \times 0.180$ として求められます。

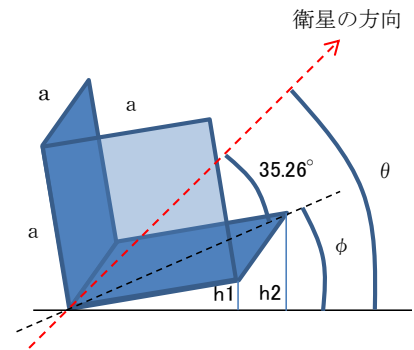


図 5 CR の設置方位など

6. コーナーリフレクター (CR) を水平に置く場合、

1) CR の水平面を正方形に、垂直面を長方形にします。このとき図 6 の垂直方向の一辺の長さ b 水平面の一辺の長さを a とすると、リフレクターを

$$b = a\sqrt{2} \tan\theta \quad \dots(7)$$

となるように作成すると、電磁波を無駄なく反射することができます。

例えば、 $a=60\text{cm}$ 、衛星仰角 50° の時、

$$b = 60\text{cm} \times \sqrt{2} \times \tan(50^\circ) = 101\text{cm} \quad \text{となります。}$$

辺の長さ b が上記(7)式よりも長い場合は、その長い部分を第 1 反射面とする電磁波は、最後に地面を反射して衛星に戻っていくことになるので、CR の下に、広いアルミシートをひいて置いても良いです。

逆に b が式(7)よりも短い場合は、底面について第 1 反射面としての底面の利用効率は下がりますが、少々であれば大きく明るさを減じることはないようです。

※底面の第 1 反射面としての有効面は一辺が $a/(\sqrt{2}\tan\theta)$ の面となる。たとえば、仰角が 50° で、CR の底面が $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ 、高さが 90cm で 101cm よりも短いとき、底面の第 1 反射面としての有効面は $53.4\text{cm} \times 53.4\text{cm}$ となります。

2) CR の底面の対角線が衛星の方位を向くように配置します。このためには、衛星の軌道に平行に引

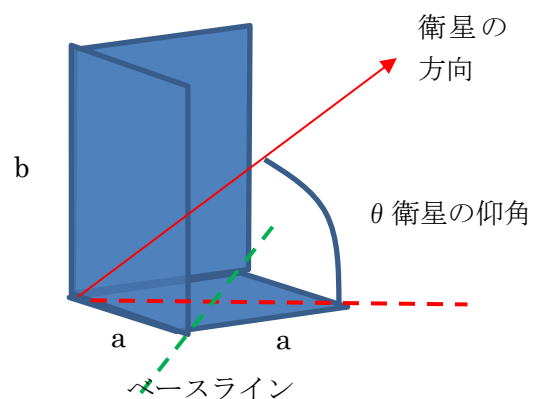


図 6 CR の水平設置

いたベースラインの上に、底面の対角線が一致するように置けば良いでしょう。

7. 2面リフレクター（またはT型リフレクター）

- 1) 2面を垂直にしたリフレクター. 2面の交線が衛星軌道に平行に（ベースラインに平行に）なるように配置すると、リフレクターとして機能します。（底面は地面のままでも、ある程度反射面として機能します。）

ただし、ベースラインのずれも考えて、上記5, 6の3面CRの底面の一辺を衛星軌道に平行に置きこれを2つ並べた形になるようにした反射体も可能です（図7参照）。これを、T型リフレクターと呼ぶことにします。

- 2) 各面の辺の長さが同じ場合は、底面から衛星を見た仰角が 45° となるようにすると電磁波を反射する上で効率が良いです。すなわち底面の仰角 ϕ' を

$$\phi' = \text{衛星の仰角 } \theta - 45^\circ \quad \dots(8)$$
 となるように設置すれば良いです。

- 3) 図7のように、水平に置く場合は、 b と a とが、

$$b = a \times \tan\theta \quad \dots(9)$$

となるように作成します。ただし、底面が反射特性

の良い大地の場合や底面に広いアルミシートをひいている場合には b は式(9)以上であれば良いです。 a, b のうち小さい方の長さが3波長から4波長以上あれば十分な明るさとなるようです。予備実験では衛星仰角 46.94° の場合、 $b=a=90\text{cm}$ であれば十分な明るさを得ることができました。

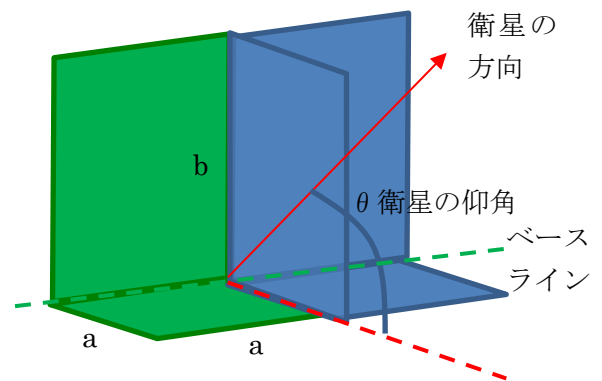


図7 2面リフレクター（緑色の部分）、あるいはT型リフレクター（緑と青）の水平設置

底面にCR仰角をつける場合は、 $b=a$ とする。