

# 合成開口レーダ：その原理と応用

唐沢 好男

目が届かないところのものを電波で見る技術：レーダとリモートセンシングを取り上げる。レーダは、遠距離物標に向かって電波を送り、反射されてきた信号を解析して、その位置や動き、形状を調べる技術である。敵の船や飛行機を察知するための手段、すなわち、軍用目的で発達してきた技術であるが、現代は、自動車の衝突防止や不審物探査など、日常生活の安全・安心に役立つ技術となっている。リモートセンシングは、レーダ技術の応用として、レーダを搭載した衛星や航空機からの地球観測を主な目的にしている。大地・海洋・気象・降雨など様々な地象・天象が観測対象になっている。本資料では、このレーダとリモートセンシングの技術、特に、その主要技術である合成開口レーダについて、その仕組みを詳しくまとめている。

## 目次

1. 物標探査レーダ .....	2
1. 1 レーダ断面積	
1. 2 レーダ方程式	
1. 3 目標物の位置評定	
2. 合成開口レーダ .....	9
2. 1 合成開口レーダとは	
2. 2 グラウンドレンジ方向の高分解能化	
2. 3 クロスレンジ方向の高分解能化	
3. リモートセンシング .....	15
3. 1 リモートセンシングの歴史	
3. 2 日本の合成開口レーダ搭載衛星	
3. 3 衛星リモートセンシングの活用	

## 参考文献

## 1. 物標探査レーダ

レーダ (RADAR) は Radio Detection and Ranging の略号で、電波を送信し、目的物標からの反射または散乱された電波を受信して、物標の検出と測距を行う装置である。対象となる物標は、航空機や船舶、地下埋設物、降雨、道路上を走る自動車など多岐にわたり、その役割は、目に見えないところにあるものを電波で探り当てることにある。本章では、物標を点と見なして、その位置を特定する物標探査レーダの仕組みを述べる。広いエリアを画像としてとらえることができる合成開口レーダは次章で述べる。

### 1. 1 レーダ断面積

レーダから放射された電波は物標に当たり、その表面に誘起電流を生み出す。この誘起電流から電波が再放射されレーダに到着する。その時の反射の強さを表す指標として、レーダ断面積 (radar cross section: RCS) がある。散乱断面積、レーダの場合は送信点に戻ってくる電波を拾うことになるので後方散乱断面積とも言われる。図1で説明する。レーダから十分遠方の距離  $R$  にある、すなわち、平面波が到達するエリアにある物標に、レーダからの電波が電力密度  $p_i$  で届き、これを面積  $\sigma$  で受け止めたとする。物標の受信電力は  $\sigma p_i$  となる。このエネルギーが3次元空間に均一に再放射されたと考え、その電波のレーダ到着点での電力密度を考える。この大きさが、実際の受信点での電力密度  $p_r$  に等しくなるよう面積  $\sigma$  を定める。電力密度  $p_i$  も  $p_r$  も距離  $R$  の関数になるが、 $R$  が十分大きくなると、面積  $\sigma$  は距離に依存しない値になる。受信点での電力密度  $p_r$  は  $\sigma p_i / (4\pi R^2)$  であるので、レーダ断面積は次式で定義される。

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{p_r(R)}{p_i(R)} \quad (1)$$

任意形状の物標のレーダ散乱断面積は、測定や電磁界解析によって求められる。物標が波長  $\lambda$  に比べて十分大きい単純形状の導体に対しては、以下の理論値が求められている。

$$\text{半径 } a \text{ の球} \quad \sigma = \pi a^2 \quad (2a)$$

$$\text{面積 } S \text{ の平板} \quad \sigma = 4\pi S^2 / \lambda^2 \quad (2b)$$

$$\text{長さが } L \text{ で半径が } a \text{ の円柱} \quad \sigma = 2\pi a L^2 / \lambda \quad (2c)$$

このような散乱 (反射と同義) を幾何光学散乱という。物標の大きさと波長が同じ程度になると、共振現象が起こり振る舞いは複雑になる。波長より十分小さい半径  $a$ 、誘電率  $\epsilon$  の球形誘電体に対しては、以下の式が導かれている。この散乱はレイリー散乱と呼ばれる。

$$\sigma = 4\pi \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 a^6 \quad (3)$$

ちなみに、このレイリー散乱は、「空はなぜ青い?」、「太陽はなぜ赤い?」、「雲はなぜ白い」という問いに答えを与えてくれる。考えてみよう。

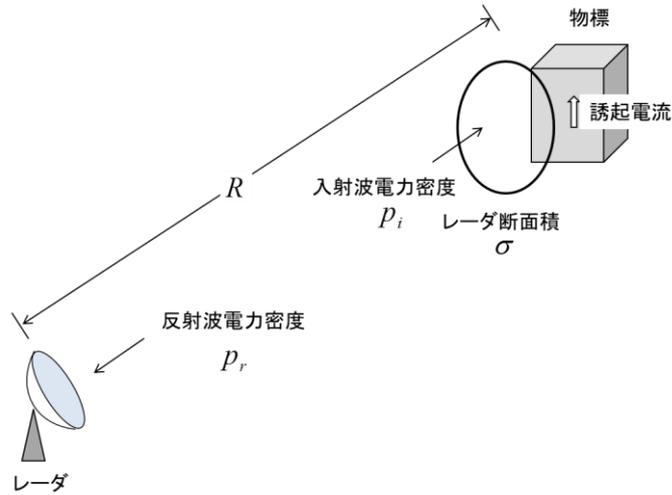


図1 レーダ断面積を説明するための図

1. 2 レーダ方程式

無線伝送の基本公式はフリスの伝達公式である。これに対して、レーダにおける送受信の電力比を定める公式がレーダ方程式である。レーダ装置の性能、すなわち、対象物の検知可能距離や SN 比などを求めるときの基本的な関係式である。

レーダ方程式は、フリスの公式とレーダ断面積の概念を用いて以下のように導かれる。

物標への入射波電力密度  $p_i$  は、レーダの送信アンテナ利得  $G_t$ 、送信電力を  $P_t$  として、次式で表される。

$$p_i = \frac{1}{4\pi R^2} G_t P_t \tag{4}$$

物標で反射された電波のレーダ受信地点での電力密度  $p_r$  は次式となる。

$$p_r = \frac{1}{4\pi R^2} \sigma p_i \tag{5}$$

結局、レーダの受信電力  $P_r$  は、受信アンテナ利得を  $G_r$  として、

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r p_r \\ &= \frac{\lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} G_r G_t P_t \end{aligned} \tag{6}$$

となる。この式が、レーダの送受信電力の関係を与えるもので、レーダ方程式と呼ばれる。送受信で同じアンテナが使われる場合には、アンテナ利得の送受信可逆性より  $G_t = G_r$  となる。この式より、受信強度は距離の 4 乗に反比例して弱くなるのが分かる。自由空間伝搬では距離の 2 乗に反比例したが、レーダではその往復のためと理解できる。

受信信号の SN 比が許容値以下になれば、探知ができなくなるため、最大探知距離は、受信電力の最小許容値  $P_{r, min}$  によって決まる。その時の最大探知距離を  $R_{max}$  とすると、式(6)を  $R$  について解くことにより次式となる。

$$R_{\max} = \left( \frac{\lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3} G^2 P_t / P_{r,\min} \right)^{1/4} \quad (7)$$

ここでは  $G_r G_t$  を  $G^2$  で置き換えている。ここで定まる最大探知距離はエネルギー的な視点での最大探知距離で、後述するレーダ信号の特質から決まる最大距離とは別の要因である。

### 1. 3 目標物の位置評定

#### 1. 3. 1 パルスレーダ

レーダによる目標物の位置評定には、距離と方向の情報が必要である。ここでは、距離（レンジ）を測定するための代表的な方法であるパルスレーダの測距法について述べる。

図2はパルスレーダの基本構成である。レーダからは繰り返し周期  $T$  間隔で、幅  $T_p$  のパルス信号が送出される。パルス生成器ではベースバンド信号のパルスが生成されるが、アンテナから電波として出てゆくときには、搬送波周波数がパルスで ON/OFF された変調信号である。出力が大きい送信信号が受信系に漏れこまないよう、送受切替器によりアンテナ給電線を送信・受信のタイミングで切り替える。

物標からの反射信号（受信エコー）は時間  $t$  だけ遅れて受信機に現れる。図3はこの様子をまとめている。遅延がパルス繰返し周期  $T$  を超えると、距離の特定に不確定性が生じるので、この意味での最大探知距離は  $cT/2$  ( $c$ : 光の速度) となる。最小距離は、送信信号のパルスが受信エコーに重ならない条件より、 $cT_p/2$  である。距離の分解能もパルス幅で決まり、最小距離で示した  $cT_p/2$  程度である。最大探知距離を大きくしたい場合には、式(7)で決まる SN 比条件を維持しつつ繰返し周期  $T$  を大きくすればよい。

パルスレーダでは、次のようにして、視線方向（レーダと物標を結び線の方向）の速度も測ることができる。

送信パルスは、搬送波周波数のパルス変調信号であるので、送信信号の位相を基準として、受信信号の位相も読み取ることができる。図3に示すように、ある送信パルスと受信エコーの位相差を  $\phi_1$  とする（送信信号の位相基準は送信パルスの存在時間以外でも連続的に維持されている）。次の送信パルスと受信エコーの位相差を  $\phi_2$  とする。位相差  $\phi_1$  も  $\phi_2$  も  $2\pi$  周期の不確定性があるので、位相差の位相差  $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$  が、不確定性が無く  $-\pi < \Delta\phi < \pi$  に収まる範囲に限定される。視線速度  $v$  と位相差変化  $\Delta\phi$  の関係は、 $\Delta\phi = 4\pi v T / \lambda$  より、 $T < \lambda / (4v)$  が条件になる。速い動きを捕えたいなら、周期  $T$  を小さくしなければならない。しかし、最大探知距離を大きくしたい場合に  $T$  を大きくしなければいけないことは、逆の方向であり、対象とする環境や測定目的（測距のみか、視線速度測定も加えるか）に応じて、 $T$  の値が定められることになる。

パルス幅  $T_p$  と繰返し周期  $T$  の比：  $T_p/T$  はデューティ比と呼ばれる。パルスレーダでは、デューティ比は  $1/10 \sim 1/100$  程度に設定されることが多いが、この値が小さくなると、平均電力が同じであってもピーク電力が大きくなり、装置の設計で高電力対策が求められる。このため、平均電力を変えず、ピーク電力を低減させる方式として拡散符号を用いて、パルスを連続信号に変える方法がある。この方法によるレーダを符号化パルスレーダと呼ぶ。図4により、この方式を説明する。同図(a)は、上述のパルスレーダの送信信号である。図では、ベースバンド信号で表している。これを、自己相関特性の良い疑似ランダム符号（バーカ符号など）で時間を引き伸ばし、連続信号にする（同図(b)）。平均電力を変えず、符号のチップ数  $N$  を  $T/T_p$  にすれば、ピーク電力を  $1/N$  に抑えられる。拡散符号の1チップの時間長は  $T_p$  なのでレンジ分解能は変わらない。受信側では、同じ符号を用いて相関演算を行えば、逆拡散によって、パルスレーダと同じ受信エコーが現れる（同図(c)）。原理は、多元接続方式で学んだ CDMA の伝送方式と共通する。

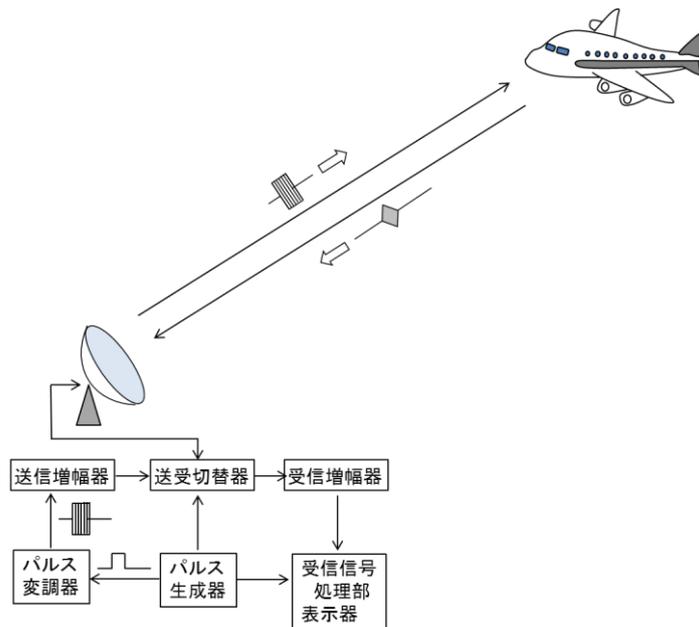


図2 パルスレーダの基本構成

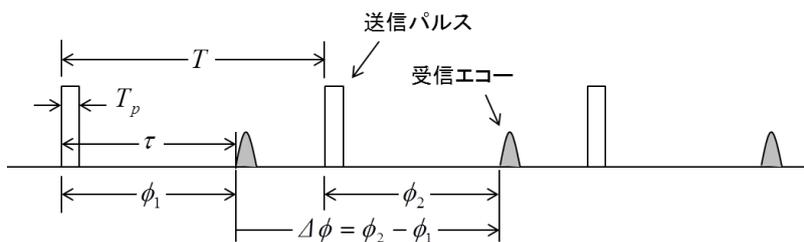


図3 パルスレーダの送信パルスと受信エコー

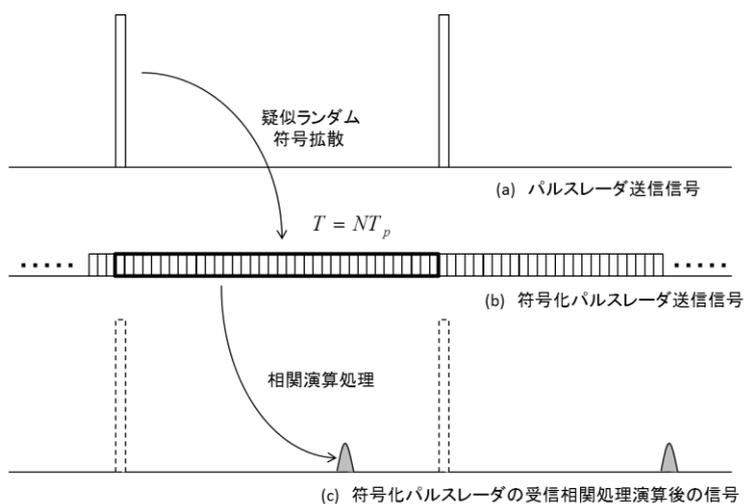


図4 疑似ランダム符号を用いたピーク電力の軽減

### 1. 3. 2 FM-CW レーダ

測距と視線方向速度を同時に測定できる連続信号送信タイプに FM-CW レーダがある。搬送波 (CW) 信号では、ドップラーシフトによる視線方向速度を求めることができるが、距離の情報を得ることができない。そのため、時間とともに周波数を徐々に変え、反射波到来時間差で生じる送信信号と受信信号の周波数差を観測して、距離を算定する方法である。周波数変調信号を送信するので、FM-CW レーダと呼ばれる。

FM-CW レーダの基本構成を図 5 に示す。ベースバンドで生成される三角波形を周波数変調してアンテナから送信する。同時に、反射波信号も受信するため、送信信号が受信信号に漏れこまないよう、分離度の高い方向性結合器を用いる。送信信号と受信信号をミキサで掛け算演算をし、その低周波成分を抽出すると距離に比例する周波数差のビート信号が現れる。

図 6 は、物標が静止している場合の送受信信号の周波数関係を示している。時間  $T$  の間に周波数を  $f_1$  から  $f_2$  まで連続的に変化させ、次の時間間隔  $T$  で  $f_2$  から  $f_1$  に戻し、これを 1 サイクル (周期:  $2T$ ) として繰り返す。最初の半周期では、周波数の変化速度は  $(f_2 - f_1)/T$  である。距離  $R$  の物標からの信号は  $2R/c$  の時間遅れがあるので、送信と受信では周波数差  $\Delta f$  は

$$\Delta f = \frac{2(f_2 - f_1)R}{cT} \quad (8)$$

となる。これより、求める距離  $R$  は次式で定められる。

$$R = \frac{cT\Delta f}{2(f_2 - f_1)} \quad (9)$$

この周波数差  $\Delta f$  が安定して現れるのは図 6 に示す時刻  $t_1$  から  $t_2$  までの間である。周波数が  $f_2$  から  $f_1$  に変化する残りの半周期では、 $t_3$  から  $t_4$  の間に、 $-\Delta f$  の周波数変化が現れる。物標に動きが無い場合には、周波数の一方向だけの变化で、目的とする距離測定ができることが分かる。

次に、物標が視線方向に動きを有する場合を考える。動きがある場合には、周波数の変化方向が異なる二つ半周期の双方に対して共通のドップラーシフトを持つ。レーダの場合、移動体自身に発信源を持つ場合のドップラーシフトに比べて倍の大きさになり、その大きさ  $f_d$  は、速度  $v$  に対して  $f_d = 2v/\lambda$  となり、 $v$  が定められる。図 7 は、物標が接近する状態での送受信信号の周波数の時間変化を示している。図 6 との比較から、物標に動きが無い場合には、中心周波数が  $(f_2 + f_1)/2$  であるのに対して、 $f_d$  だけずれる。この二つの半周期のそれぞれの送受信信号の周波数差  $\Delta f_{up}$ ,  $\Delta f_{down}$  を求めることによって、距離を定める周波数差  $\Delta f$  が  $(\Delta f_{up} + \Delta f_{down})/2$  で、視線速度を定めるドップラーシフト  $f_d$  が  $(\Delta f_{up} - \Delta f_{down})/2$  で定まり、距離と視線速度が求められる。

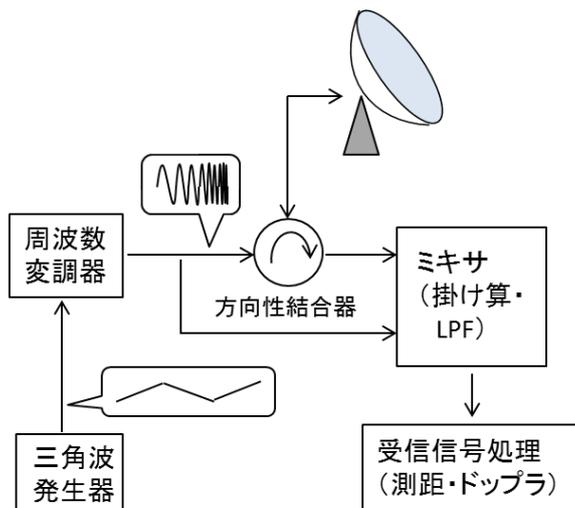


図5 FM-CW レーダの基本構成

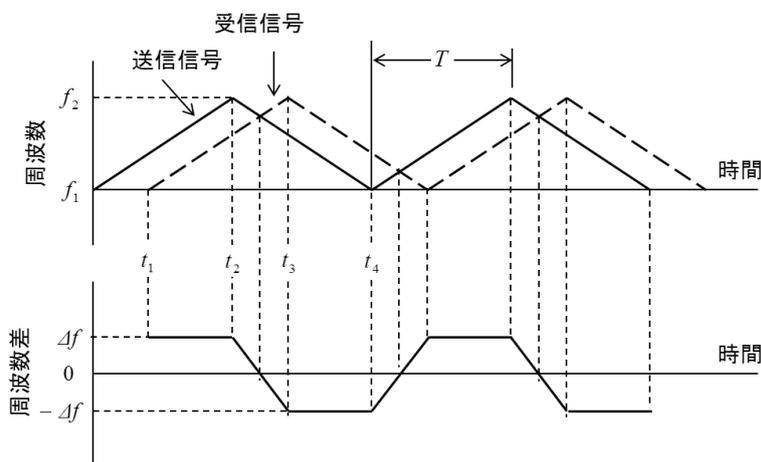


図6 FM-CW レーダの送受信信号

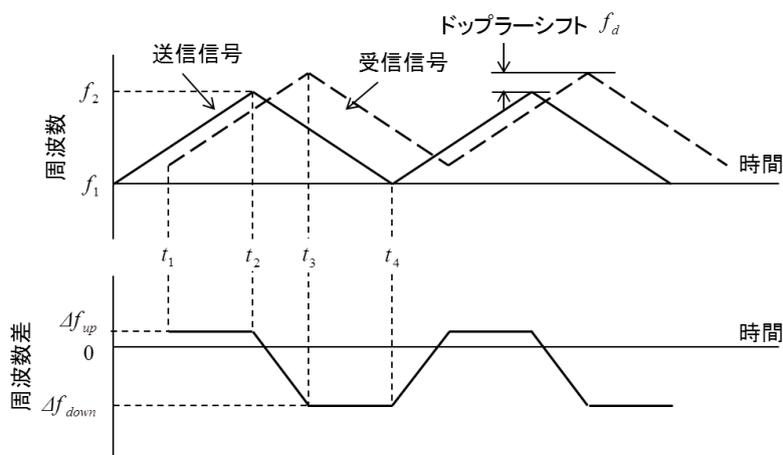


図7 物標に動きがある場合の FM-CW レーダの送受信信号 (接近方向)

### 1. 3. 3 到来方向測定

固定位置にあるレーダによって、物標の位置を定めるためには、距離と到来方向の両方の情報が必要である。ここでは、到来方向を求める方法を述べる。

機械的な方法から入りたい。レーダというと、パラボラアンテナがくるくる回転しているイメージがある。指向性を持つアンテナが物標の方向に向いたとき、受信強度が最大になるので、この角度を到来方向と定められる。アンテナの開口径  $D$  とビーム幅  $\theta$  (指向性利得がピーク値に比べて 3dB 低下する角度の幅：電力半値幅) は  $\theta \approx \lambda/D$  (単位：ラジアン) で近似できるので、角度分解能は、開口径と周波数で決まる。角度分解能を上げたいければ、大きなアンテナを用いるということになる。

次に、機械的制御を必要としないアレーアンテナによる到来方向特定の方法を述べる。もっとも簡単な到来方向同定はフェーズドアレーである。アレーアンテナ素子の位相制御で、ビームの方向を電氣的に制御でき、これで空間走査を行えば受信強度最大点方向を物標方向と特定できる。

機械的にせよ電氣的にせよ、空間操作をする方法は全角度範囲を覆うための走査時間が必要になるが、空間にマルチビームを張るアンテナでは、瞬時に方向特定ができる。図8はアレーアンテナによってマルチビームを形成し、ビーム出力から到来方向を特定する方法を示している。素子数  $M$  で構成されるアレーアンテナでは  $M$  個の独立なビームを空間に張ることができる。素子数を増やすほど、またアンテナ間隔を広げるほどビームは鋭くなる。ただし、素子間隔を半波長以上にすると、所望方向以外にも強い指向性をもつビームが発生し(これはグレーティングローブと呼ばれる)、方向特定に不確定問題が起きてくるので、グレーティングローブの抑圧対策が必要になる。マルチビームの形成は、アレー素子信号のフーリエ変換などの直交変換で実現できる。受信信号はこのようなビーム毎の並列処理で行うが、送信信号は探査したい空間に電波放射しなければならないため、同図の点線のような広いビームを用いることが多い。

電波の到来方向を特定するための方法として、上述のような受信強度の最大方向を探す方法と、アンテナパターンのヌル点を向けて受信信号を得ない方向を探す方法があり、原理的に後者の方が精度はるかに高い。MUSIC (Multiple Signal Classification) 法と呼ばれる高分解推定法は後者の代表である。高分解推定法には、他にも ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) 法とその拡張手法など高度な信号処理に基づくものが種々提案されている。(高分解能推定法の専門書は[1]、MUSIC法の計算例については[2]に詳しくまとめている)。

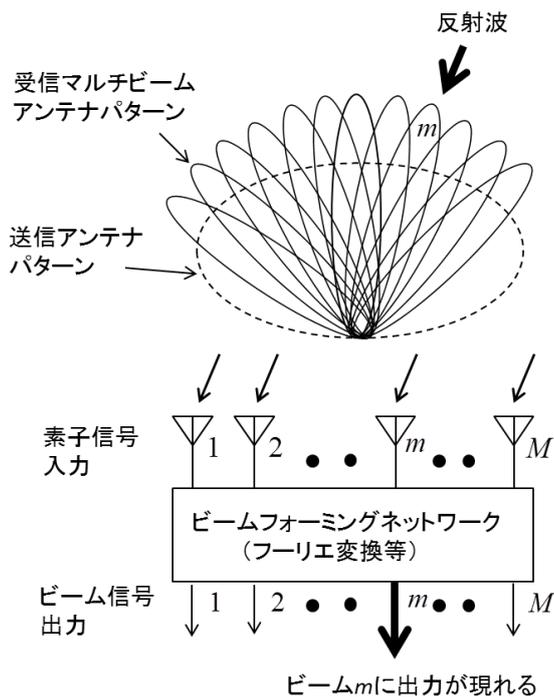


図8 マルチビームアンテナを用いた到来方向同定

## 2. 合成開口レーダ

前述の物標探査レーダは、物標を点として識別し、その位置を特定するものであった。それに対して、広がりのある物標に対して映像として把握する目的を持つレーダが、映像レーダであり、その代表が合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) である。合成開口レーダは、物標探査レーダの技術をベースに、次章で述べるリモートセンシング (航空機や衛星などの移動プラットフォームからの地球観測) のセンサーとして重要な働きをする。リモートセンシング応用については次章に譲り、ここでは、合成開口レーダの原理を述べる。

### 2. 1 合成開口レーダとは

例えば、地球の様子を宇宙から観測したい場合、大きなレンズを用いた光学観測がクリアな映像を得られるという意味で優れている。しかしながら、光学観測は太陽光の反射を利用するため、夜間や日中でも雲で地表が隠れてしまっている場合には観測ができない。このため、天候や昼夜を問わない観測手法として電波を用いるレーダが必要になる。衛星からの観測では電波伝搬が天候に左右されない周波数、すなわち 1GHz~10GHz 程度、いわゆる衛星通信における「電波の窓」に当たる周波数が用いられる。

開口径  $D$  のアンテナのビーム幅  $\theta_0$  は、大雑把な意味で次式で近似できる。

$$\theta_0 \approx \lambda / D \tag{10}$$

距離  $R_0$  の地点を照射すると、 $\tan \theta_0$  が  $\theta_0$  で近似できる比較的狭いビーム幅の場合には、その照射エリアサイズは

$$L \approx R_0 \theta_0 \approx R_0 \lambda / D \tag{11}$$

程度である。ビーム幅を用いた空間分解能もほぼこの程度になるが、レーダを乗せたプラットフォームが衛星であるような場合、レンジ  $R_0$  は極めて大きな値になり、十分な空間分解能を得ようとすれば、非常に大きなサイズのレーダアンテナが必要になって現実的ではない。そこで、レーダアンテナを動くプラットフォーム上に置き、受信信号処理によって一定の移動距離の長さを等価的なアンテナサイズとする方法が、以下説明する合成開口レーダである。地球環境を観測するリモートセンシングでは、このプラットフォームが、衛星や航空機になる。

図9は合成開口レーダの測定環境を表している。理解を簡単にするために、プラットフォームの位置を座標の  $z$  方向に、その動きを  $x$  方向に、そして、観測する方向を  $x$  軸と直交する方向とする。プラットフォームから照射エリアへ向かう方向をレンジ方向、それをグランド面に射影した  $y$  軸方向をグランドレンジ方向、プラットフォームの動く方向、すなわち  $x$  軸方向をクロスレンジ方向（あるいは、アジマス方向）と呼ぶ。衛星から地球表面を見るような場合、厳密には  $x, y$  軸はわずかに曲線であるが、ここでは、直線とみなしている。プラットフォームの移動によって、観測範囲を帯状に走査しながらデータを収集する方法をストリップマッピングと言う。移動方向とレンジ方向の角度はスキント角と呼ばれる。ここでの説明（式表示など）ではスキント角は  $90^\circ$  に固定している。図に楕円で示している大きなビーム照射エリアに対して、合成開口レーダの演算処理により、それよりはるかに小さいエリア（図の  $\Delta x \Delta y$  エリア）にまで分解能を上げ、この単位でストリップ上のエリアの目的に従った観測（海洋、大地形状など）を行う。

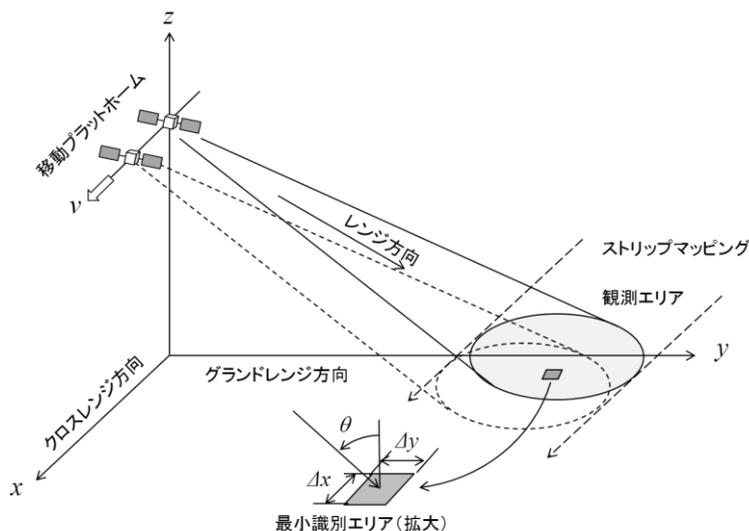


図9 合成開口レーダの観測エリアと最小識別エリア

## 2. 2 グランドレンジ方向の高分解能化

グランドレンジ方向 ( $y$  軸方向) の分解能は、レーダ信号の帯域幅  $B$  で決まる。パルスレーダで、パルス幅  $T_p$  のとき、レンジ分解能  $\Delta R$  が  $\Delta R = cT_p/2$  となることを学んでいる。信号の帯域幅  $B$  は  $B = 1/T_p$  で近似できるので、帯域幅  $B$  を用いて以下の関係になる。

$$\Delta R \approx \frac{c}{2B} \tag{12}$$

帯域幅はパルスの幅で決まるため、 $T_p$  の値を小さくしなければならないが、そうするとデューティファクタが小さくなりすぎて平均エネルギーが落ちるため、エネルギーが足りなくなり式(7)で定まる最大レン

ジが短くなる。このためにはピーク電力を上げることになり回路構成上の問題が生じる。このため、 $T_p$ が現実的な値を持つパルスレーダでありながら、実効的に広帯域化を図る方法が採られる。

パルス幅  $T_p$ を保ったまま広帯域化させるということは、パルス内の送信波形を工夫して、その相関関数の幅（相関帯域幅）を狭めるということになる。一般的に、帯域幅を  $N$ 倍にすると、相関帯域幅は  $1/N$ となり、距離分解能も  $1/N$ となる。パルス圧縮である。パルス圧縮の方法には、アナログ方式やデジタル方式の特徴を活かす様々な方法があるが、代表的なものは、リニア FM 方式（チャープ (chirp) 方式）と符号変調方式である。チャープ方式はパルス内を搬送波の代わりに FM-CW レーダで説明した送信周波数を線形に増加させる方法である。周波数の変化幅を調整することにより帯域幅制御ができる。符号変調方式では、パルス内を  $N$ 分割して符号で変調させる方式であり、符号には、自己相関特性が優れたバーカ符号 (Barker code) が用いられる。いずれの方式も送信信号の変調方法が既知であるので、受信側でそれぞれの整合フィルタで待ち受けることにより、単一パルスの SN 比を維持したままの短いパルス（実効パルス幅： $1/B$ ）を得ることができる。

グラウンドレンジ方向での分解能  $\Delta y$  は、斜め伝搬路（スラントパス）の分解能  $\Delta R$  より、入射角（測定面における天頂方向と入射パス方向との角度） $\theta$ を用いて

$$\Delta y = \frac{c}{2B \sin \theta} \quad (13)$$

となる。この式より、プラットホーム直下付近では、分解能が極めて悪くなるため、図9のように斜め下方向を観測エリアとする設定がなされる。

グラウンドレンジ方向の測定では斜め方向から照射し、パルス遅延時間をレンジとしているため、地形に大きな起伏があって影ができるような場合には、影の部分が測定できなくなり、画像化に際して工夫しなければいけないことが多い。

### 2. 3 クロスレンジ方向の高分解能化

合成開口レーダの威力は、クロスレンジ方向（アジマス方向とも呼ばれる）の分解能を上げることに発揮される。図10を用いてこの原理を説明する。

前項で、アンテナの移動軸方向のサイズを  $D$ とするとき、このアンテナのビーム幅  $\theta$ と観測面の照射幅  $L$ は式(10), (11)で与えられることを述べた。同図にはその照射エリアを楕円で示しその中心点を  $P$ としている。 $P$ 点からプラットホームを見たとき、レーダからの電波が主に受かるのは、軌道上で長さ  $L$ の範囲である。図で、この範囲内のある時刻  $t$ での  $P$ 点からの距離を  $R(t)$ 、プラットホームの移動速度を  $v$ とすると、 $R_0$ との差分は次式で近似できる。

$$R(t) - R_0 \approx \frac{v^2 t^2}{2R_0} \quad (14)$$

この距離を搬送波周波数の位相の変化を  $\Delta\phi(t)$ で表すと、距離が往復であることを考慮して次式となる。

$$\Delta\phi(t) = -2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (R(t) - R_0) = -\frac{2\pi v^2 t^2}{\lambda R_0} \quad (15)$$

この位相変化はドップラー周波数  $f_d$ として表され、次式となる。

$$f_d(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Delta\phi}{dt} = -\frac{2v^2 t}{\lambda R_0} \quad (16)$$

この式より、ドップラーシフトが時間と共に+側 ( $t < 0$ ) から-側 ( $t > 0$ )に変化してゆくこと、すなわち、チ

チャープ信号（FM 信号）になっていることが分かる。P 点の照射時間を  $T$  とすると、

$$T = \frac{L}{v} \approx \frac{R_0 \theta_0}{v} \approx \frac{R_0 \lambda}{v D} \quad (17)$$

であるので、このチャープ信号の帯域幅  $B_{CR}$  は、 $-\pi/2 \leq t \leq \pi/2$  の時間に变化する周波数の幅である次式で表される。

$$B_{CR} \approx 2|f_d(T/2)| \approx 2v/D \quad (18)$$

レンジ方向の精度は式(12)より、 $\Delta R = c/(2B)$  を学んでいる。分母に係数の 2 が付いているのは、時間遅れを往復距離に対して測っているためである。クロスレンジ方向の分解能に対しても同様の考えが成り立つ。この場合は、 $B_{CR}$  はプラットホーム移動に伴って生じた変動の帯域幅であり、移動速度は  $v$  であるため、クロスレンジ方向の分解能  $\Delta x$  は次式で表される。

$$\Delta x \approx v/B_{CR} \approx D/2 \quad (19)$$

このようにして、合成開口レーダのクロスレンジ方向の分解能は、周波数や観測エリアまでの距離によらず、すなわち、プラットホームが衛星であるか航空機であるかを問わず、分解能は搭載アンテナのサイズ  $D$  のオーダーだと言うことが分かる。これが合成開口レーダの特徴であり、しっかり頭に入れておいてほしい。式だけ見ると、 $D$  を小さくすれば分解能が上がってよいように見えるが、 $D$  が小さいアンテナは利得が低いので、受信信号の SN 比が低下するという別の問題が起きる。ゆえに、目的に合わせたサイズのアンテナを選ぶ必要がある。

式(19)で求められた分解能 ( $\approx D/2$ ) を、具体例で確認してみたい。低軌道周回衛星を想定し、 $R_0=1,000\text{km}$ 、周波数  $f=1\text{GHz}$  ( $\lambda=0.3\text{m}$ )、 $D=10\text{m}$  とする。アンテナビーム幅  $\theta_0 \approx \lambda/D=0.03\text{rad}=1.72^\circ$ 、 $L=R_0\theta_0=30\text{km}$  になる。この条件での信号処理例を図 1 1 を用いて説明する。同図(b)は観測面上の P 点 ( $x=0$  にある) からの反射信号のプラットホーム軌道上の変化  $\exp(j\Delta\phi(x/v))$  の実部を P 点方向に対するアンテナの利得変化も加味して描いている。この横軸スケールでは実際の位相変化は読み取れないので、 $x=0$  付近での拡大図を (a) に示している。 $|x|$  の値が大きくなるに従い位相変化が速くなる、すなわち変動周期が短くなる様子がわかる。P' の受信信号は  $x_{P'}$  だけずれた位置に現れる (同図(c))。実際には、アンテナビーム幅内の全ての場所からの反射信号が重なり合って受信される。一方、信号処理範囲内の中心位置 (図の点 P) からの反射波の位相変化は式(15)によりあらかじめ求められるので、この変化を  $a_{ref}(x)$  とする。また、受信信号中の P 点からの反射信号成分を  $a_P(x)$  とする (同図(b))。この二つの信号の相関を次式で計算する。

$$\rho(x_0) \propto \int_{-L/2+x_0}^{L/2+x_0} a_P(x) a_{ref}^*(x) dx \quad (20)$$

このような相関演算を行うことにより、P 点での反射信号は図 1 1 (d) の①の位置に、P' 点での反射信号は②の位置にインパルス状の変化として現れる。同図(d)の①の相関出力 ( $|\rho|^2$ ) の横軸を拡大した波形が(e) である。図より、相関出力が  $1/2$  となる幅を空間距離分解能  $\Delta x$  の目安値とすると、丁度、(19)式で算定した  $D/2 (=5\text{m})$  になっていることが確かめられる。繰り返しになるが、原理上、この分解能は、距離  $R_0$ 、周波数  $f$ 、移動速度  $v$  に依存せず、観測アンテナのサイズ  $D$  のみで定まると言うことである。

大雑把な意味では、次のような解釈が成り立つ。空間にサイズ  $L$  のアンテナがあるとする。P 点に対して、アンテナの各位置からパスの位相差が同相になるよう調整されているとする。このサイズ  $L$  のアンテナのビーム幅  $\theta_e$  は

$$\theta_e \approx \lambda/L \approx \lambda/(R_0\theta_0) \approx D/R_0 \quad (21)$$

となる。この時、照射エリアサイズは $\theta_0 R_0 \approx D$ となり、1/2の係数は違うものの式(19)の結果と同じオーダになる。ゆえに、合成開口レーダはプラットフォームの移動を利用して、実アンテナサイズ $D$ と距離 $R_0$ で決まるサイズ $L$ の超大型レーダアンテナを作り上げたと理解できる。

なお、レーダ送信信号自体が変調信号（例えば、チャープタイプFM信号）で、それに空間移動によるドップラーシフトのチャープ変動が重なり、一見、複雑に思えるが、レンジ方向の処理を先に行って、送信信号の変調操作は受信機の整合フィルタで取り除かれているので、クロスレンジ方向の整合フィルタ処理には、レーダ信号の変調方式の影響は表れない。

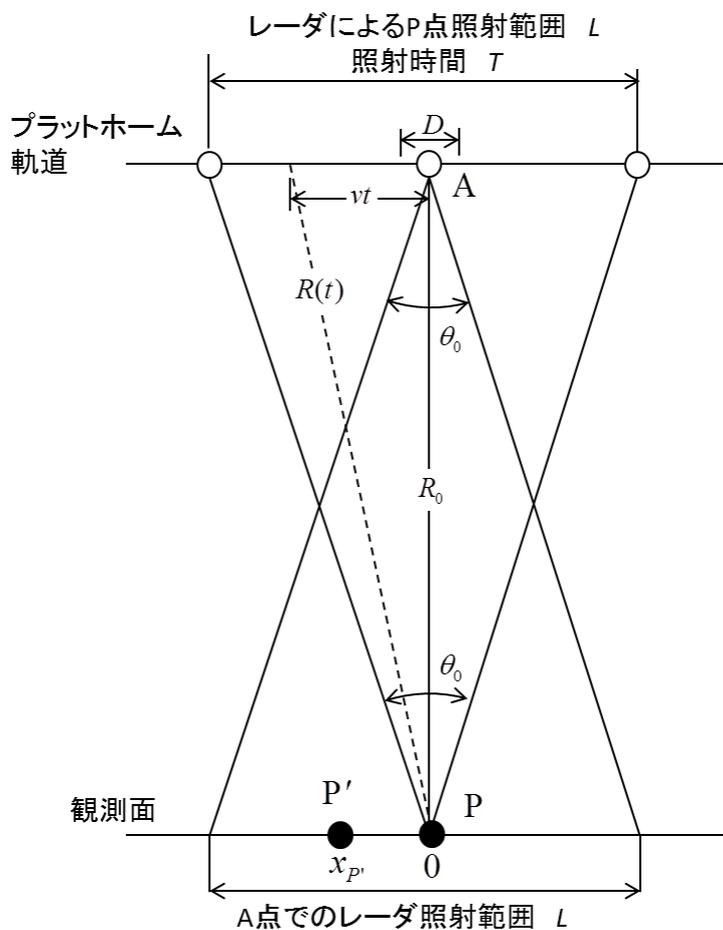


図10 合成開口レーダの原理説明図

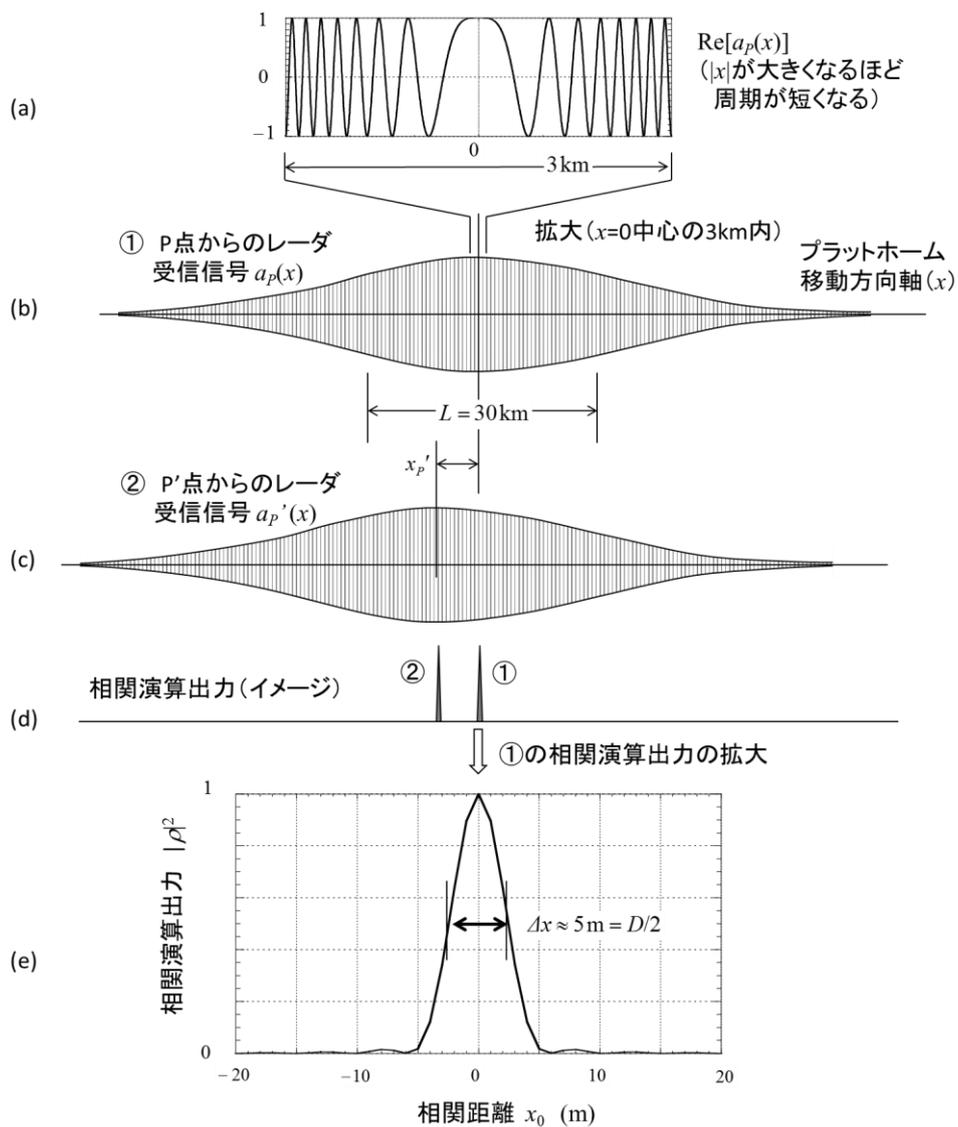


図 1 1 反射点 P 及び P'からのレーダ受信信号とその相関演算処理出力  
 ( $R_0=1,000\text{km}$ ,  $f=1\text{GHz}$ ,  $D=10\text{m}$  での計算例)

### 3. リモートセンシング

リモートセンシング (Remote Sensing : 通称「リモセン」) とは、対象を遠隔から測定する手段であり、この意味するところは非常に幅広い。しかし、狭義には、人工衛星や航空機などから地球表面付近を観測する技術を指すことが多い。本章でも主に衛星リモートセンシングについて、特に、合成開口レーダが利用される電波応用の視点から述べる。

#### 3. 1 リモートセンシングの歴史

リモートセンシングは、人工衛星や航空機をプラットフォームとして、主に地球観測を行う。そのセンサーは太陽光の反射等を利用する光学機器と、電波を用いる合成開口レーダに大別できる。光学観測も含めて、衛星リモートセンシングの歴史を簡単に述べる。

衛星リモートセンシングは、「宇宙から地上を見る軍事技術」として生まれ、発展してきたが、国際協力によって地球環境をモニタし、破壊に警鐘を鳴らす役割を担うことによって、我々の日常の安全・安心や豊かな生活に役立つ平和利用へと比重が移ってきている。緑あふれる宇宙船地球号を持続可能とするための健康診断とも言える。

歴史の最初に登場するリモートセンシング衛星は、アメリカ航空宇宙局 (NASA) が打ち上げたランドサット (Landsat) である。1972 年に 1 号機が打ち上げられて以来、8 号機まで打ち上げられている (2017 年現在)。この衛星は、光学機器を搭載した衛星で、長い期間にわたって膨大な量の地球画像を撮影してきた。これらは、一般科学のみならず、農業や都市計画、安全保障分野にまで活用されている。その後、光学機器を搭載したリモートセンシング衛星は、種々のミッションに応じて多数打ち上げられている。例えば、我が国の気象観測衛星「ひまわり」では、雲の画像がテレビを通じてお茶の間に届けられ、衛星リモートセンシングの有効性を肌で感じる時代になっている。

光学リモートセンシングは、得られたデータがそのまま映像として使え、かつ、大型レンズを用いれば、分解能も十分取れるので、有効性に論をまたないが、地球の地面や海面を測定したいような場合には、雲が邪魔になって測定ができず、また、夜間の測定もできず、弱点もある。このため、光学測定と並行して、電波による測定が生まれしてきた。

電波は光に比べて波長が桁違いに長いので、光学測定に比べて分解能が落ち、それを克服する目的で生まれたのが、前節で述べた合成開口レーダ (SAR) である。合成開口レーダの研究は、1950 年代、米軍の機密研究として非公開で行われていたが、1961 年に、民間への技術の公開がなされ、初の SAR 画像が発表されている。

地球観測目的としての初の合成開口レーダ搭載人工衛星はシーサット (SEASAT) で、1978 年 6 月に、NASA により打ち上げられ、NASA ジェット推進研究所 (JPL) で管理運営された。高度 800km、軌道傾斜角 108° の近円軌道、レーダの周波数は L バンドが用いられた。この衛星は、電気系統の問題が発生して 105 日間の運用という短命に終わったが、海洋観測で得られた画像は、合成開口レーダを用いた衛星リモートセンシングの有効性を知らしめるに十分なものがあつた。

有効性が確認された合成開口レーダによるリモートセンシングは、その後、大きな発展を遂げ、様々な測定ミッションを持った衛星や航空機搭載システムが生まれている。併せて、膨大なデータから目的画像を得るデジタル信号処理解析の研究が進み、今日に至っている。その詳細は、専門書 (例えば[3], [4]) を見てほしい。

次節では、我が国の合成開口レーダ衛星 ALOS, ALOS-2 (だいち、だいち 2 号) について、紹介する。

### 3. 2 日本の合成開口レーダ搭載衛星

#### (1) だいち2号

我が国の合成開口レーダ搭載衛星は、JAXA (宇宙航空開発機構) が開発した陸域観測技術衛星 (Advanced Land Observing Satellite : ALOS) で、「だいち」と名付けられている。現在 (2018年時点) 運用中の衛星は、その第二世代で「だいち2号」である。

「だいち」は、実験衛星 JERS-1 (合成開口レーダ搭載)、ADEOS (マイクロ波放射計搭載) の成果を引く次ぐもので、本格的な地球観測衛星である。だいちには、光学センサーと共に、Lバンドで動作する合成開口レーダが搭載されている。軌道高度は690kmで、太陽同期準回帰軌道 (回帰日数46日) である。2006年1月に打ち上げられ、2011年まで活躍した。この衛星により観測されたデータ (解像度30m) は、JAXAにより公開されている[4]。

「だいち2号」は「だいち」の後継機で、2014年5月に打ち上げられ、観測が継続されている。だいち2号はセンサーを合成開口レーダのみとし、観測時間の短縮と解像度の向上 (約3倍) を図っている。主要諸元を表1にまとめている。図12は衛星概観、図13は観測データの一例である[6]。電波による観測によって、写真のような画像が得られている。繰り返しになるが、昼夜・天候に左右されず、画像データが常に得られることが、電波による観測の特徴である。

表1 「だいち2号」の主要諸元 [6]

観測センサ	合成開口レーダ (SAR)	
SAR周波数	Lバンド (1.2GHz帯)	
観測モード	スポットライト	分解能 1m~3m 観測幅: 25km
	高分解能	分解能 3m~10m 観測幅: 50km, 70km
	広域観測	分解能 100m 観測幅: 350km
軌道	種類	太陽同期準回帰軌道
	高度	628 km
	回帰日数	14日
設計寿命	5年 (7年目標)	
質量	2トン級衛星	
ミッションデータ伝送	直接伝送及びデータ中継衛星経由	
打ち上げ日	2014年5月24日 (H-IIAロケット)	

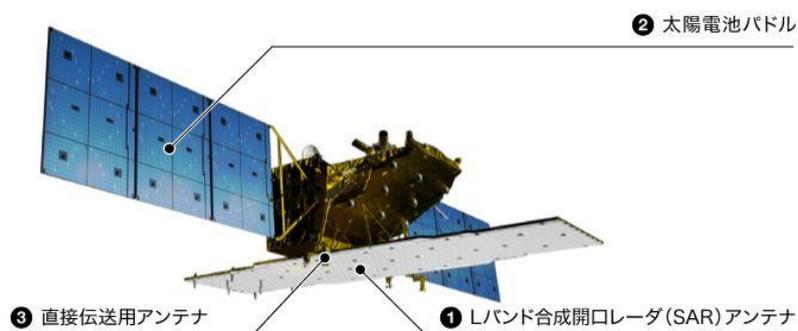


図12 「だいち2号」の外観 (JAXA ホームページより[6])

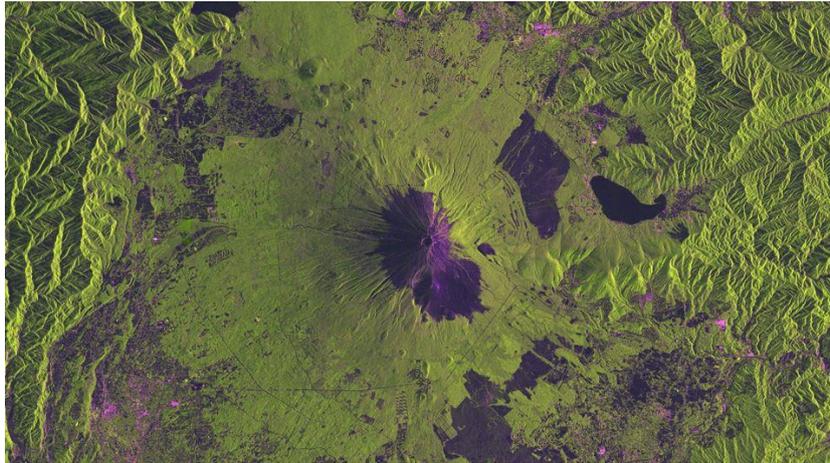


図13 「だいち2号」によって取得された富士山周辺の画像（JAXA ホームページより[6]）

## (2) データ収集システム

合成開口レーダ搭載の人工衛星は、軌道を動くことによってその性能が発揮できるため、必然的に低軌道周回衛星になる。衛星からの情報は、常時地上に伝送されることが望ましいが、周回する衛星では、待ち受けの地上局から見て陰になる位置にある場合が多く、常時データを伝送することができない。このため、静止軌道にデータ中継衛星（DRTS : Data Relay Test Satellite）を置いて、そこを中継してデータを転送すると、リモートセンシング衛星とリアルタイムの通信回線を得ることができる。図14はこのイメージ図である。

我が国（JAXA）では、このための衛星を有しており「こだま」と名付けられている。他国・他機関のリモートセンシング衛星や中継衛星とネットワークを構成することにより、グローバルな連携観測が可能になる。わが国では、リモートセンシング衛星のデータ受信局は、埼玉県鳩山町にある JAXA の地球観測センターである。ここには、リモートセンシング衛星（「だいち2号」他）の電波を直接受信するアンテナと、中継衛星「こだま」と通信するアンテナの2基が稼働している。図15は、後者の目的で静止衛星に向いているアンテナ（同センター第4受信アンテナ）の写真である。

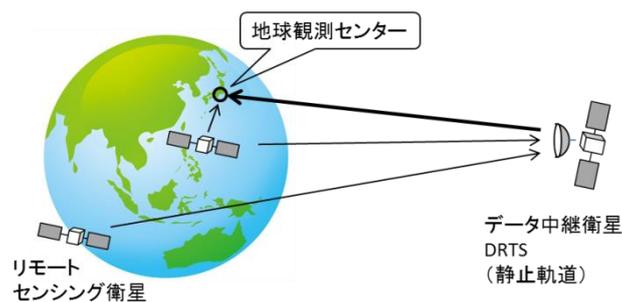


図14 データ中継衛星によるリモートセンシング衛星データの収集



図15 「こだま」電波の受信アンテナ（JAXA地球観測センター：第4アンテナ：直径13m）  
（センター公開日に筆者撮影）

### 3.3 衛星リモートセンシングの活用

3.1節でも述べたように、当初の衛星リモートセンシング目的は、軍事利用であった。敵の軍事施設を検知・監視する直接の目的から、海洋権益など、国家目的・国益を第一義とした利用から始まったことは事実である。しかしながら、現在においては、純粋に学術的な視点から、平和利用を目的とした国際協力ベースでの地球観測とそのデータ活用の時代へと進んできている。

様々なミッションを持つリモートセンシング衛星群により、海産物の安定供給・海洋資源の安定供給・安定した海上物資輸送など豊かな生活実現への貢献、地震や津波、洪水等の天災からの復旧・復興への活用などの安心・安全社会の実現に貢献するものとなっている。2011年に発生したタイの降水災害における工業団地の冠水・非冠水エリアの解析、同年の東日本大震災時の漂流物の検知と監視、地形変化など、具体的なところにも役立っている[7]。

リモートセンシングは、種々の技術が結集された総合技術であり、システム開発、信号処理技術にさらなる技術の深化が望まれている。観測システム構築という工学的な面とそのデータによって得られる地球環境理解という理学的な面を含んで学術的な多様性があり、地球温暖化問題・異常気象・非常災害などに晒されている宇宙船地球号の持続可能な未来に向けて大きな寄与が期待されている。

#### 本資料のまとめ

- ① レーダ原理の基本はレーダ断面積（散乱断面積）とレーダ方程式
- ② 目標物の位置評定には、距離（レンジ）と方向の測定が必要。距離測定は、パルスレーダ方式と FM-CW 方式が代表的。後者は、視線方向（レーダから見た物体の方向）の移動速度も測定できる。方向測定は、指向性アンテナを機械的に操作する方法や、アレーアンテナの信号処理（フェーズドアレーや MUSIC 法などの高分解推定）によるものなどがある。
- ③ 広がりのある物標に対して映像として把握するレーダが映像レーダであり、その代表が合成開口レーダ（SAR）である。合成開口レーダでは、衛星などの移動するプラットフォーム上で、その移動を利用して実効的に大開口のアンテナを作り出し、ほぼ実アンテナサイズの分解能で対象エリアを分離識別できる。
- ④ 電波によるリモートセンシングでは、衛星や航空機に合成開口レーダを搭載し、地球の観測（大地・海洋・気象・降雨など）を行う。日本では、現在（2018年時点で）、合成開口レーダ搭載の陸域観測技術衛星「だいち2号」がデータの収集を行っている。

## 参考文献

- [1] 菊間信良, アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, 1998.
- [2] 唐沢研 URL, 「YK-006 スペースダイバーシティ・アダプティブアレー・到来方向推定法: アレーアンテナによる空間信号処理の三兄弟」[http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR\\_YK\\_006\\_Adaptyive\\_Array.pdf](http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_006_Adaptyive_Array.pdf)
- [3] 日本リモートセンシング学会, 基礎からわかるリモートセンシング, 理工図書, 2011.
- [4] 岡本謙一 (編著), 地球環境計測, オーム社, 2009.
- [5] JAXA URL, 「だいち」 [http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_j.html)
- [6] JAXA URL, 「だいち2号」 <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/alos2/>
- [7] 有井基文, 小岩雅和, 青木佳史, 河谷嘉文, “衛星搭載合成開口レーダによる海洋監視技術の進化と深化,” MSS 技報, vol. 22, pp. 6-12, 2012.

本文で、直接の引用をしていないが、以下の書籍・文献を本章執筆の参考に使っている。

- [8] 近藤倫正, 電波情報工学, 共立出版, 1999. 【レーダ技術全般】
- [9] 石井吉徳, リモートセンシング読本, オーム社, 1981. 【リモセンの思想と初期の技術】
- [10] 岩男弘毅, リモートセンシング読本, 日本測量協会, 2005. 【リモセンに関する全般的な知識】