

1.5. SAR (合成開口レーダ、Synthetic Aperture Radar)

<利点>

人工衛星からマイクロ波を送信し、対象物からの反射を観測するため、太陽光を必要とせずに洋上の船舶からの反射情報を得ることができる。そのため、曇天時、夜間を含め、観測不能となることが少なく、安定した観測が可能である。AIS 信号を送信しない等の船舶も漏れなく観測できる。

複数の観測モードが利用でき、目的に応じて広域を観測すること（分解能は低くなる、広域の船舶の検出に有効）、狭域で分解能を高く観測すること（関心のある海域において、1 隻ごとの船舶の形状等を細かく観測するのに有効）といった使い方ができる。



図 3-25 合成開口レーダ (SAR) 衛星による船舶の観測原理

観測モード(分解能 / 観測幅)	
高分解能	3m~10m / 50km or 70km
広域観測	100m / 350km or 490km
スポットライト	1~3m/25km

図 3-26 SAR 衛星の観測モード例 (ALOS-2 は、) 観測目的に応じた観測モードの選択が可能。

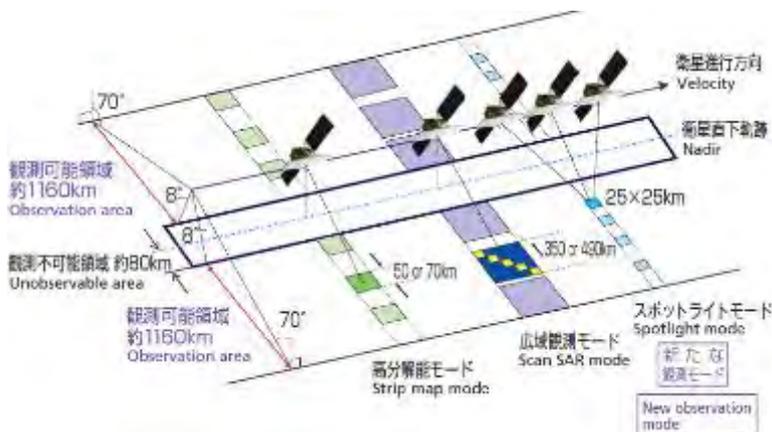


図 3-27 ALOS-2 観測モードのイメージ

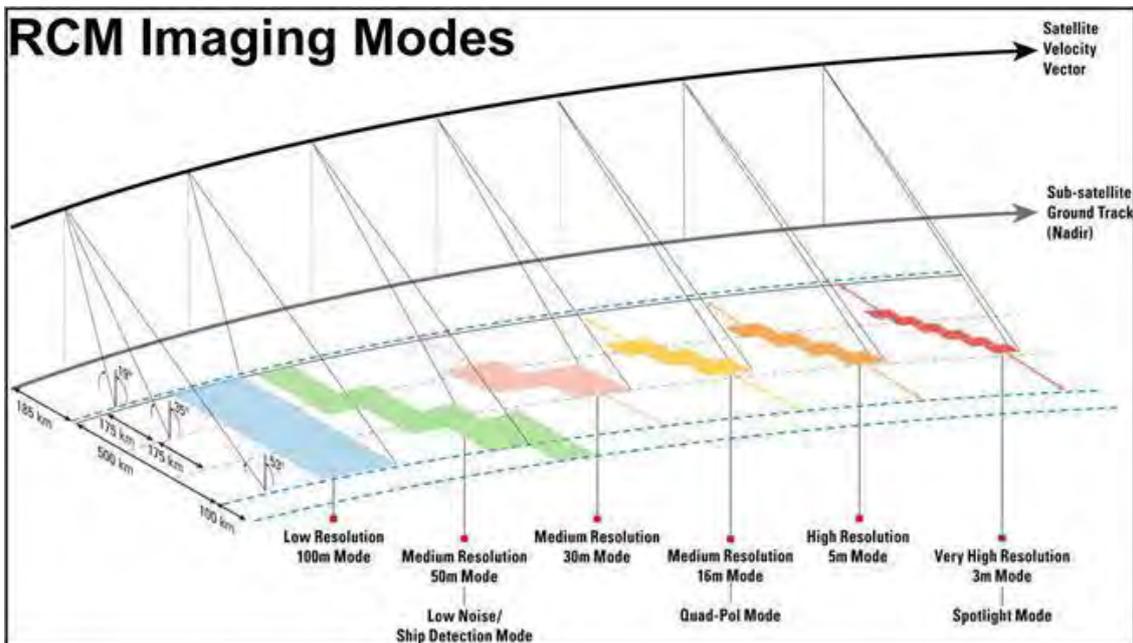


図 3-28 カナダの SAR 衛星 RCM の観測モードのイメージ²⁷

<課題>

光学衛星情報と比べると判読性、直感的な理解のしやすさの点で劣る。ごく小型の船舶、木造船や FRP 船はマイクロ波の反射が小さいため、検出できないこともある。多くの電力を必要とするため、衛星ごとに連続的に観測可能な時間が限られている。各国の宇宙開発機関が運用する SAR 衛星は観測可能時間が長く（日本の ALOS-2 では連続観測時間が 48 分）、広域の情報を得やすいのに対し、民間商用 SAR 衛星は連続観測可能時間が短く（ドイツの TerraSAR-X では 3 分）、代わりに機数を増やしニーズの高い場所をポイント的に頻度高く観測することに向いている。）

ALOS-2 などにおいて、小型に比べて連続観測時間が長いものの、広大な領海などをすべて観測してデータをダウンロードすることはデータ量上不可能な運用となっている。そのため、軌道上において船舶などを検知し、周囲部分についての観測データを下ろすことで MDA をすすめる研究がなされている。

<その他（用いるマイクロ波の違い）>

SAR 衛星では用いるマイクロ波の種類（波長、周波数）に応じ、観測される画像の特徴が異なる。JAXA の SAR 衛星は L バンドを用いている。一方で商用衛星は X バンドが多く用いられている。

L バンドは陸域の観測では樹木等を透過し、その下の地表面や、地表の存在物を観測することに向いている。海域観測では海面の状態に不敏感であるため、波立った海面からの反射を船舶と誤検知しにくい特徴がある。

X バンドは分解能が高い画像が得られるため、L バンドで広域の船舶分布やおおよそのサイズを観測し、さらに必要な船、場所に対し X バンドの商用衛星で詳細な形状を観測するといった組合せの利用が考えられる。商用の X バンド衛星は多数機コンステレーションも進み、観測サービスが得られやすくなっており、特定の場所を高頻度で観測できることも利点となる。

²⁷ <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/technical-features/characteristics.asp>

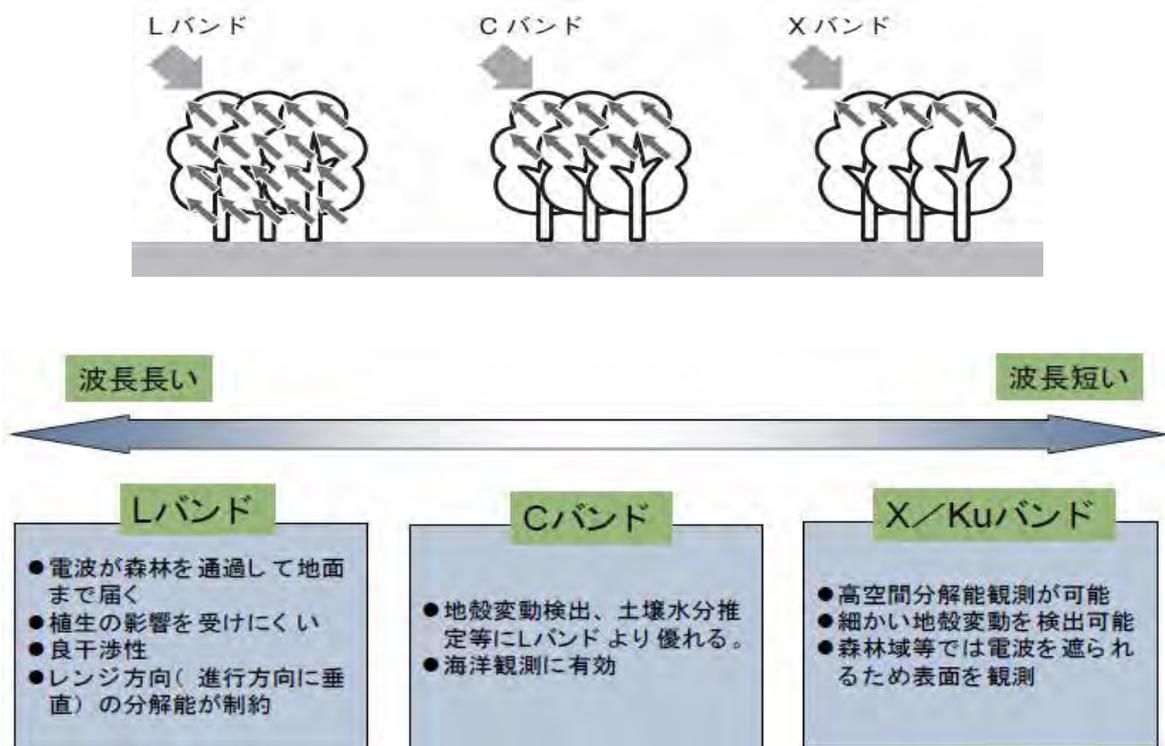
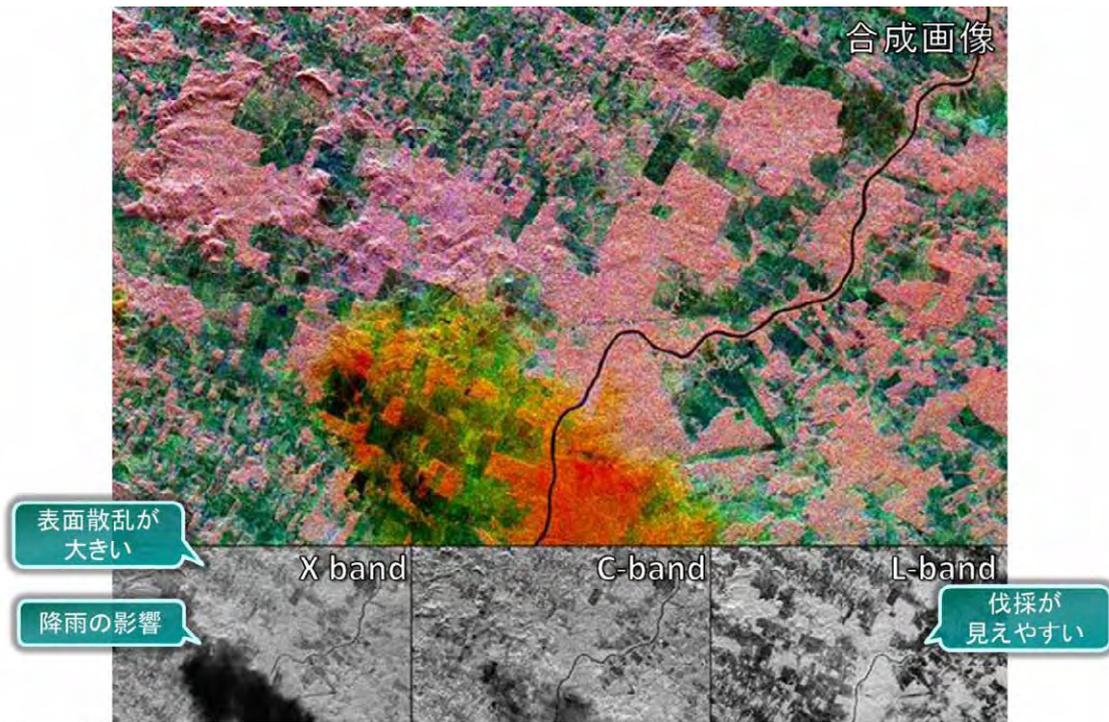


図 3-29 周波数毎の特徴

スペースシャトル エンデバー号に搭載された合成開口レーダによって撮像されたブラジルの熱帯雨林の画像である。LバンドおよびCバンドを観測するNASA/JPLによるSAR-C（米国のSARミッションの三代目、A, B, CのC）と、Xバンドを観測するDLR（ドイツ航空宇宙センター）/ASI（イタリア宇宙機関）によるX-SARによって得られた3バンドのレーダ画像である。

図に説明を加えているが、Xバンドは画面中央が黒くなっている。これは強雨の影響であり、Cバンドでもその影響が弱いものが見られている。これに対し、Lバンド画像では強雨の影響を受けずに陸域の状態が確認しやすい。（なお、この性質を利用してXバンドでは降雨の推定にも応用できると示唆されている。）

洋上の船舶監視の場合、Lバンドは強雨の影響を受けにくく、天候に対し安定した観測手段と言える。



Credit: NASA/JPL <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01821>

図 3-30 合成画像の例²⁸

項目		SIR-C Spaceborne Imaging Radar-C	X-SAR X-band Synthetic Aperture Radar
サイズ	メインアンテナ	12.0m×3.5m	12.0m×0.5m
	船外アンテナ	8.1m×0.9m	6m×0.4m
観測周波数		5.3GHz (Cバンド)	9.6GHz (Xバンド)
波長		5.8cm	3.1cm
解像度	水平方向	30m	30m
	垂直方向	16m	16m
観測高度		233km	233km
観測幅		225km *2	50km
偏波 *1		HH,HV,VH,VV	VV
オフナディア角		23~63° *2	52°

*1 : HH (Horizontal transmit,Horizontal receive);水平偏波にて送受信
 HV (Horizontal transmit,Vertical receive);水平偏波にて送信、垂直偏波にて受信
 VH (Vertical transmit,Horizontal receive);垂直偏波にて送信、水平偏波にて受信

²⁸ NASA/JPL. <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01821>

図 3-31 SIR-C、X-SAR の主要諸元²⁹

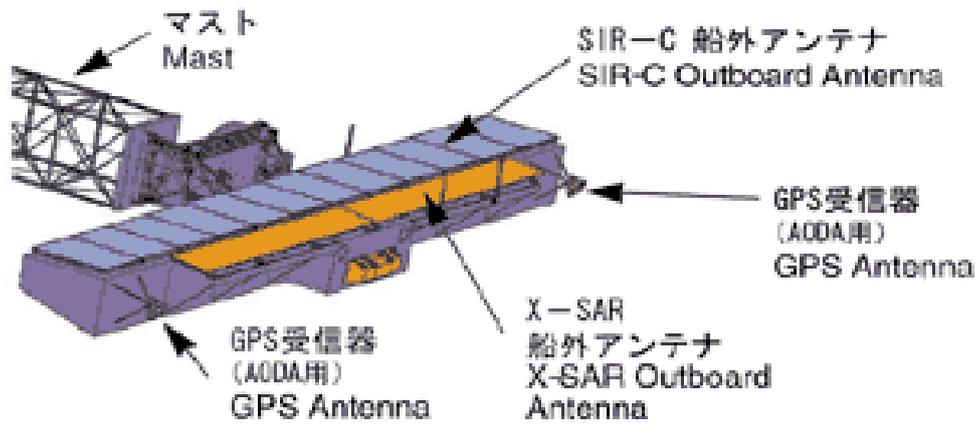


図 3-32 SIR-C、X-SAR の搭載構成³⁰

<偏波観測について>

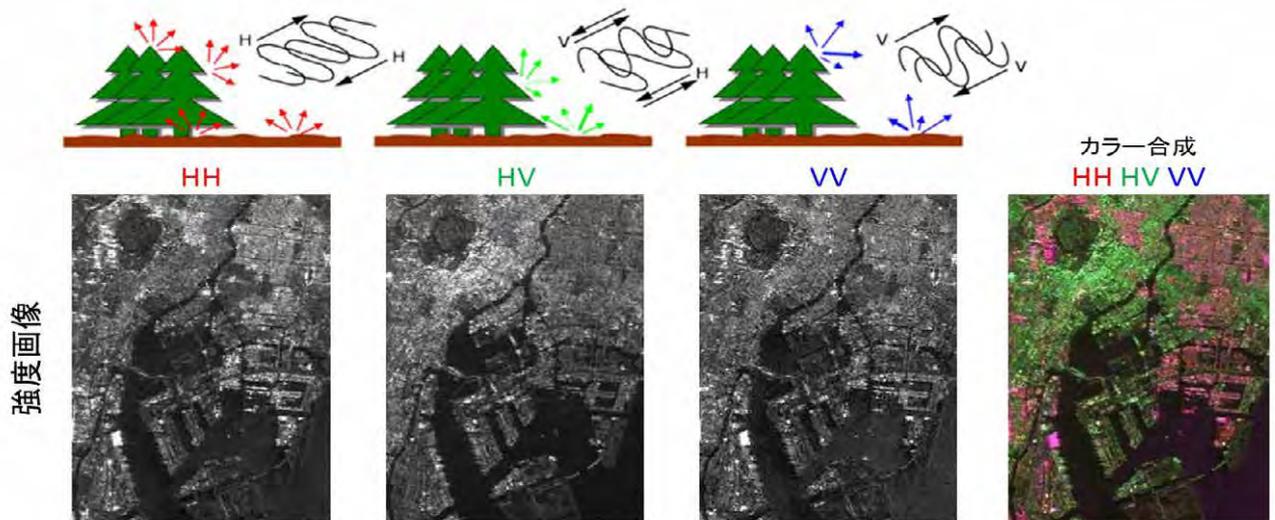
電波は進行方向に垂直な面に振動する横波であり、特定の方向に波の振動が偏る「偏波」という特性をもつ。電波が対象物から反射される際に、反射する対象物の種類によって偏波の特性が変化することがある。

SAR 衛星では、地上物による偏波の変化を捉えるため、水平に振動する直線偏波 (H) と垂直に振動する直線偏波 (V) を、送信と受信の際に切り替えて観測している。送信、受信の組合せで、送受信とも H のものを HH、V で送受信するものを VV、そして送信と受信で H と V を切り替えるものを HV (VH) と呼んでいる。それぞれの特徴は次のとおりである。

HH：透過性が強い。正対する建物や木からの 2 回反射や、電線などの水平な構造の反射が強い。

HV：森林や建物の反射が相対的に強い。

VV：透過性がやや強い。正対する建物や木からの二回反射、垂直な構造からの反射が強い。



ALOS PALSAR フルポラリメトリ画像(東京)

図 3-33 フルポラリメトリ画像

<洋上の船舶観測における偏波について>

²⁹ JAXA. 「SRTM とは」. https://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts99/mis_srtm.html

³⁰ Ibid.

海面状態ではなく、船舶を対象とした観測の場合、観測した SAR 画像は船舶のみが明るく際立ち（画像中の光点として船舶を識別できる）、海面は暗い方が便利である。

日本周辺海域等、広域な海域を観測する際は、できるだけ観測幅の広い ScanSAR（広域観測）モードが適しているが、より高分解能な狭域の観測と比べると、SAR 画像の分解能が低下する。そのため、電波を反射しにくい船（小型の船、材質が繊維強化プラスチック FRP や木造のもの）の検出漏れに注意を要する。加えて風が強く海面が荒れる際は、海面からの反射が増え（画像全体が明るくなる）、船舶からの反射が埋もれやすい。

このような中での船舶を対象とした SAR 広域観測では、HV モードの観測が有効である。HV モードでは、船舶からの反射はある程度強く、海面の反射を下げるることができる。その事例として、日本海を観測した ALOS-2 画像と、そこから検出した船舶位置を図 3-34 に示す。

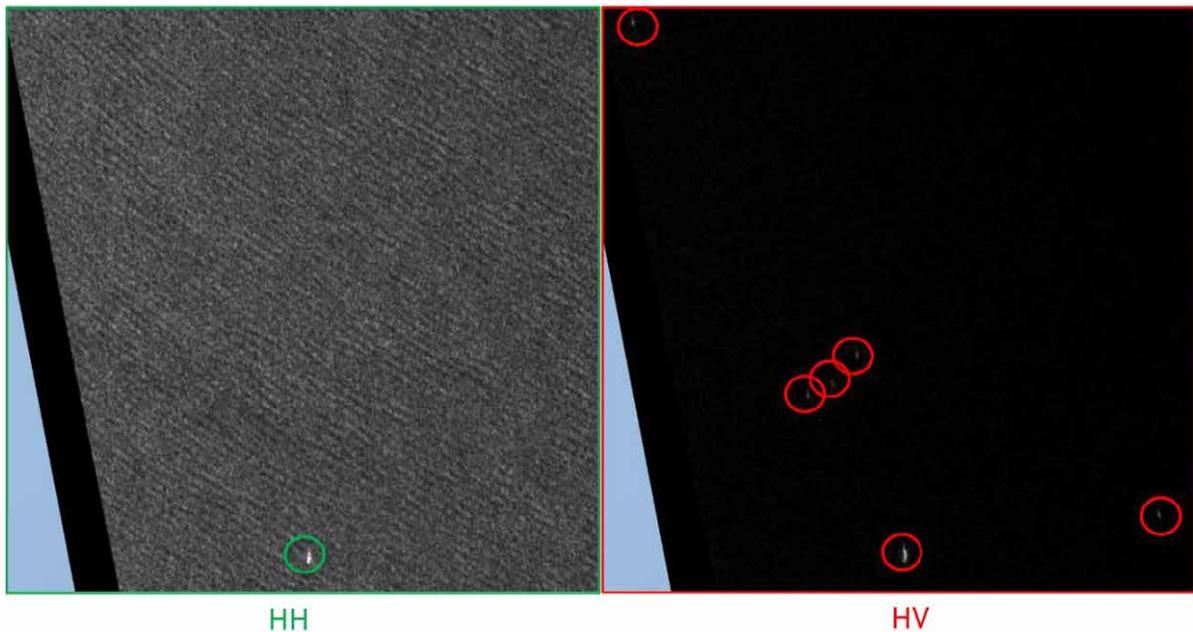


図 3-34 日本海における SAR 観測画像例 船舶が抽出された場所を丸で示している
左：HH モード、右：HV モード

HH モードでは海面全体が明るくなり、図中で検出された船舶は 1 隻（反射が強いもの）のみであった。これに対し HV モードでは海面全体が暗い中、反射が小さい船舶を捉えられている。

また、図 3-35 は沿岸域の SAR 画像であるが、SAR 観測画像特有の事象として、海面に対し反射が強い陸域がゴーストのように海面に映り込むことがある。海面に陸域のパターンが重なっているが、HV モード（左下）ではその影響が比較的小さくなっている。