干渉合成開口レーダーと地球観測衛星 ALOS 搭載 PALSAR での可能性

若　林　裕　之

1990年代に入ってから，人工衛星に搭載された合成開口レーダー（SAR: synthetic aperture radar）の定常的な運用が本格的に始まった．ヨーロッパ宇宙機関（ESA: European Space Agency）のヨーロッパ地球観測衛星（ERS-1 および 2: ESA Remote sensing Satellite-1 and 2），日本の地球資源衛星（JERS-1: Japanese Earth Resource Satellite-1）およびカナダ宇宙機関（CSA: Canadian Space Agency）の RADARSAT 等からのデータは，各研究分野において，SAR データの有効性を証明している．

SAR データを利用する多くの応用分野の中でも，インターフェロメトリック（干渉）SAR 技術は，ほぼ全天候で精度 10 m 程度の標高モデル（DEM: digital elevation model）を抽出できるとか，数 cm 程度の地表面の変動を検出できるという点で脚光をあびている．特に日本国内では，地震や火山活動による地表面の変動を 2 次元的に捕えられるという点で，多くの研究者が注目し，研究を続けている．

本文では，人工衛星に搭載された SAR によるインターフェロメトリーの原理を説明した後，JERS-1 データを使用した干渉 SAR の解析例を示す．さらに，2002 年度に打ち上げが計画されている陸域観測技術衛星（ALOS: Advanced Land Observing Satellite）に搭載されるフェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダー（PALSAR: Phased Array-type L-band SAR）の概要およびその干渉 SAR としての可能性を示す．

1. 干渉 SAR の原理

通常の SAR 画像は，観測対象物の後方散乱強度を画像化したものである．後方散乱強度は，マイクロ波の入射角，観測対象物の表面粗度および誘電率等に依存する量であり，SAR 画像の画素値はその大小を表現している．

しかし，基本的には SAR はレーダーであり，後方散乱強度を計測すると同時に，観測対象物までの距離を計測している．言いかえると，SAR で観測された散乱波の中には，観測対象物までの距離の情報，つまり位相情報が含まれていることになる．

1 つの SAR 搭載衛星の繰り返し観測を利用する，いわゆるリピートパスインターフェロメトリーで測定できるものは，図 1 に示すような 2 つの SAR 観測位置（マスターおよびスレーブ軌道上）の違いによる観測対象物からの散乱波の位相差 ϕ であり，次式で表現される．

$$\phi=(4\pi/\lambda)\{B\sin(\theta-\alpha)+\Delta\rho\}=(4\pi/\lambda)(B_{\mathrm{p}}+\Delta\rho) \quad (1)$$

ここに，B は軌道間距離，λ は波長，θ はオフナディア角（衛星直下方向と観測対象物の方向のなす角），α は軌道間方向の水平軸からのティルト角，$\Delta\rho$ は観測対象物の変化（動きおよび内部伝搬長の変化）によって生じる位相差，B_{p} は基線長（軌道間距離の垂直成分）を示している．

実際のデータ解析処理においては，2 時期に取得した SAR 画像の位置合わせが済んだ後の同一地点の複素数データをそれぞれ X_{m} および X_{s} とすると，位相差は以下に示すように算出される．

$$\Delta\phi=\tan^{-1}(\mathrm{Im}(X_{\mathrm{m}}X_{\mathrm{s}}^*)/\mathrm{Re}(X_{\mathrm{m}}X_{\mathrm{s}}^*)) \quad (2)$$

ここに，Re および Im は複素数の実部および虚部を，X_i^* は X_i の複素共役を示す．なお，式（2）で算出される $\Delta\phi$ と式（1）の ϕ との関係は

$$\phi=\Delta\phi+2\pi n \quad (3)$$

となる．ここに，n は整数であり，位相差 $\Delta\phi$ は $-\pi$ から π の間にラッピングされた値となる．$-\pi$ から π までの値

宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター（〒106-0032 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル）
E-mail: hirokawa@eorc.nasda.go.jp

は，適当に色付けされて２次元の位相差画像として表現される．この画像をフリンジ画像とよび，フリンジ画像上では位相情報がいわゆる縞模様で表現される．

式(１)から，フリンジ画像上の軌道間距離に依存する縞（軌道縞）や地面の標高差による縞（地形縞）は基線長に依存し，観測対象物の位置変化や観測対象物内での入射波と散乱波の位相変化は基線長と独立であることがわかる．２つのSAR画像を取得したときの基線長および観測領域の地形が明確であれば，軌道縞および地形縞は除去でき，観測対象物の変化による位相差が抽出できる．観測対象物の変化による位相差には，観測対象物の水平および垂直方向の動きによるものと，観測対象物内部での散乱の変化による位相変化が考えられる．この手法で検出できる観測対象物の動きは，スラントレンジ（衛星と観測対象物を結ぶ線）上へ投影されたものであるために，実際の水平方向および垂直方向の変動等を検出するためには，変動をモデル化するか，または，異なったアジマス方向から観測したデータを組み合わせて使用する等の工夫が必要である．

２時期のSAR画像を取得した時間間隔内に観測対象物の位置変化や散乱変化が存在しない場合には，基線長から観測領域の標高データが推定できる．ここで，干渉SARを使用した標高の抽出精度について考える．２時期において，式(１)中の第２項が０であったと仮定する．図１において標高 h は次式で算出される．

$$h = H - r\cos\theta \qquad (4)$$

ここに，H は衛星高度，r はスラントレンジを示す．位相差の抽出誤差を σ_ϕ とすると，標高抽出誤差 σ_h は次式で表現される．

$$\sigma_h = \frac{\lambda r \sin\theta}{4\pi B\cos(\theta-\alpha)}\sigma_\phi = \frac{\lambda r\sin\theta}{4\pi B_p}\sigma_\phi \qquad (5)$$

式(５)より，標高抽出誤差は，SARの波長および衛星から観測対象物までの距離に比例し，基線長に反比例することがわかる．標高抽出誤差を小さくするためには，基線長を大きくするほうが好ましいが，あまり大きくすると干渉性が低下する．干渉をおこす理論上最大の基線長は臨界基線長 B_c と呼ばれ，次式で与えられる．

$$B_c = \frac{\lambda r}{2\rho_r\cos\theta} \qquad (6)$$

ここに ρ_r は地上におけるレンジ方向の分解能を示す．

２時期のデータ干渉性に影響するものは，式(６)の基線長に依存するものやレーダーシステムの位相検出精度に依存するもののほかに，時間間隔での観測対象物の散乱特性の変化による干渉性の低下があり，より低い周波数のほうが干渉性の低下が小さいとされているが，定量的な解析例

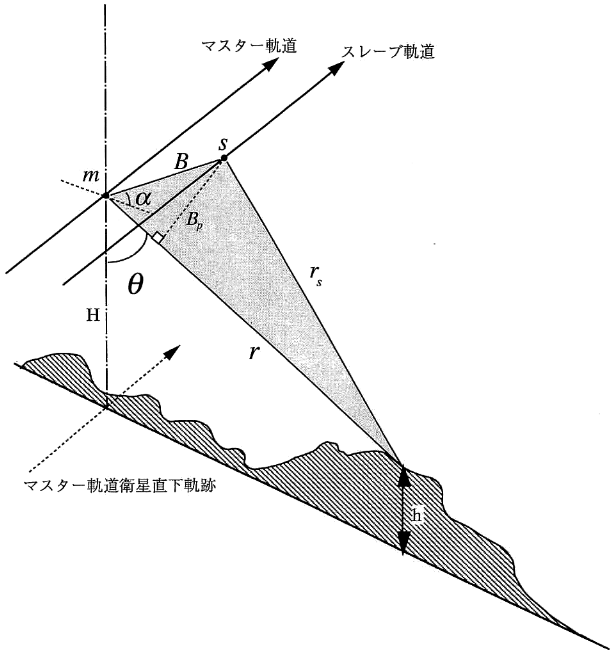

図１　衛星搭載SARによるリピートパスインターフェロメトリーの概念．

はまだ十分とはいえない．

干渉SARデータ解析では，位相差情報だけでなく，２つのSAR画像間の位相の相関についても注目し，これをコヒーレンスと称している．一般的には，データが取得された時間間隔で，観測対象物のマイクロ波後方散乱に影響する部分の変化が大きいとコヒーレンスが低下する．具体的には，地表面の植生の状態変化，土壌水分の変化等があるとコヒーレンスが低下する．このコヒーレンスの情報をSAR画像と併用することで，土地被覆分類精度の向上が期待できる．

また，$-\pi$ から π の間にラッピングされた位相差を本来の連続した位相に戻す位相アンラッピング処理についても，干渉SAR解析の重要な技術である．アンラッピング処理としては，ブランチカット法が位相の留数を指標として積分路探索を行うのに対し，最小二乗法が位相変化の微分方程式を解く．両者とも容易にプログラム化できかつ短時間で処理が可能である．しかし，両者ともに画像の隅々まで誤差のないアンラッピングは困難で，まだまだ発展途上であり，数多くの手法が提案されている．

2.　干渉SARデータ解析例

JERS-1のSARデータを使用した，干渉SARの解析例を紹介する．JERS-1のSARはLバンドの周波数（中心周波数：1275 MHz）を使用しているため，ERS-1やRADARSAT等のより高い周波数を使用したSARに比

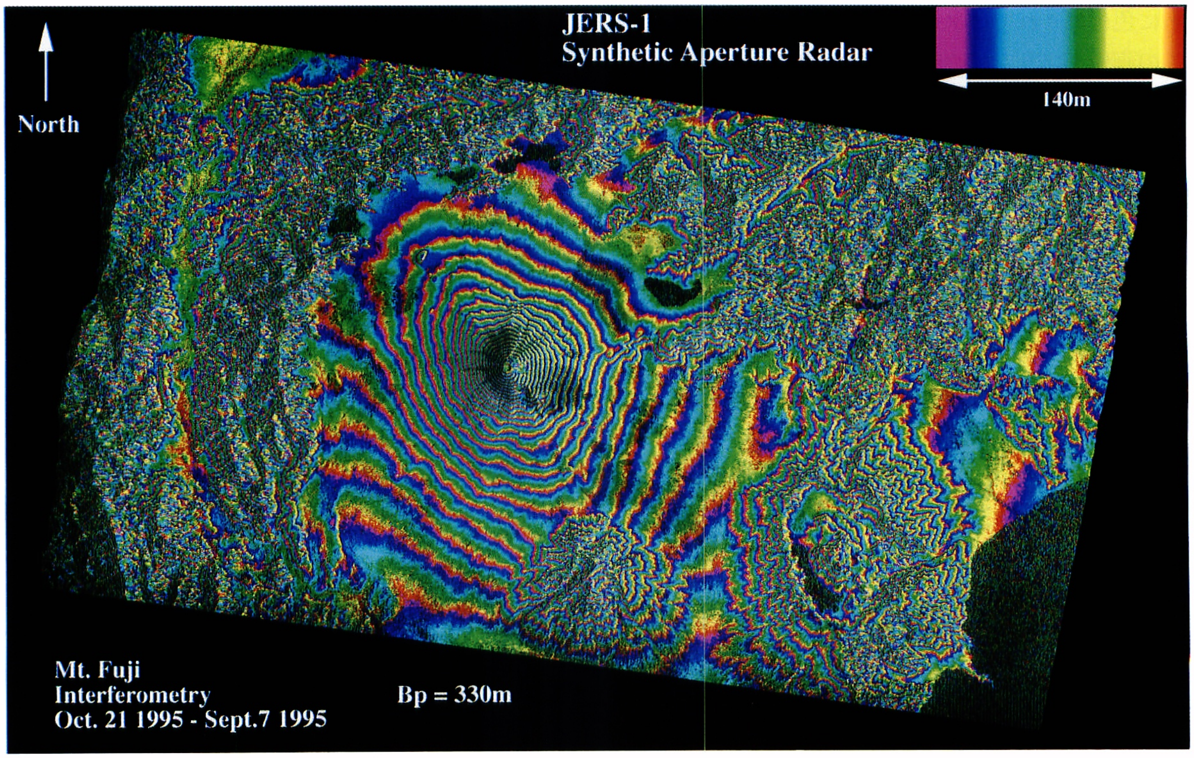

図2　干渉 SAR による標高抽出例（富士山およびその周辺領域）.

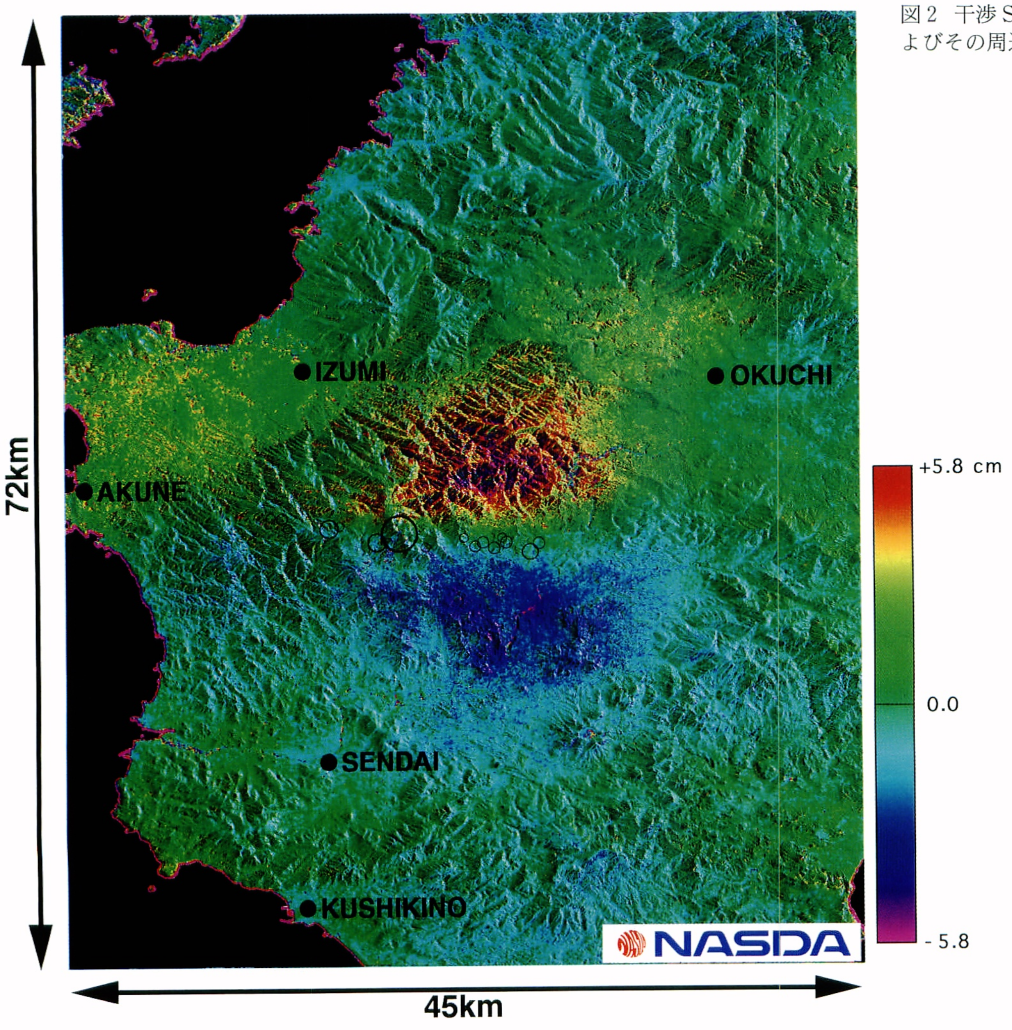

図3　干渉 SAR による地表面変動抽出例（鹿児島県北西部）.

表1　PALSARの観測モードと基本的性能．

	高分解能モード		広観測域モード (ScanSAR)	ポラリメトリックモード
入射角範囲（度）	8.0～60.0		18.0～43.0	8.0～30.0
アンテナビームパターン	FB＃1～FB＃18 (18パターン)		SB＃1～SB＃3 FB＃8～FB＃9 (5パターン)	FB＃1～FB＃5 (5パターン)
観測偏波	HH or VV	HH＋HV or VV＋VH	HH or VV	HH＋HV＋VH＋VV
レンジ方向空間分解能（m）	7.0～44.3	14.0～88.6	100 (マルチルック)	24.1～88.6
観測幅（km）	40～70	40～70	250～350	20～65
雑音等価後方散乱係数	≦－25 dB			≦－30 dB
信号対アンビギュイティー比	≧23 dB（オフナディア角35°）			
ラジオメトリック安定度	±1 dB/シーン			

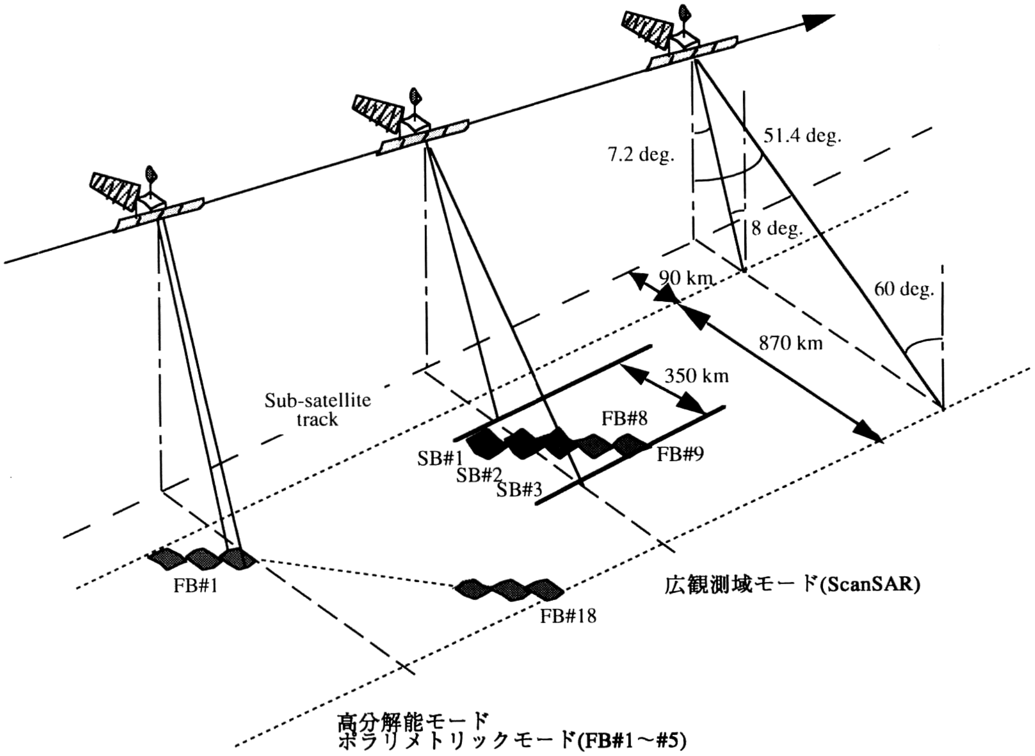

図4　PALSAR観測概念図．

較すると，一般的には干渉性が高いといえる．

図2に，JERS-1の干渉SARによる富士山周辺の標高抽出例を示す．使用したJERS-1データは1995年9月7日と同年10月21日に取得したもので，時間間隔はJERS-1の回帰日数である44日である．なお，基線長は約330 mであり，フリンジ画像の位相差の1周期は，標高差140 mに対応している．干渉SARで算出される標高は，光学センサーのステレオ視を使用して得られた標高と比較すると一般的な精度が低く，リピートパス観測の場合はその精度も基線長に依存するために一定ではない．しかし，SARの全天候観測を考慮すれば，雲の多い領域の標高データを算出するには非常に有効と考えられる．

図3には，地表面の変動抽出例として，鹿児島県薩摩地方の地震の例を示す．使用したJERS-1データは1997年3月2日と同年4月15日に取得したものであり，基線長は約400 mであった．図中の色づけは変動の大きさに対応している．

3. ALOS/PALSAR システム

3.1 PALSAR システムの基本的性能

ALOS の主ミッションは地図作成，地域観測，災害状況把握および資源探査であり，そのミッションを達成するために必要な観測センサーのひとつとして PALSAR の基本的な機能および性能が設定されている[1,2]．PALSAR の観測モードと性能を表 1 に示す．PALSAR の主な観測モードとして，高分解能モードおよび広観測域（ScanSAR）モードがあり，実験的な観測モードとしてポラリメトリックモードを設定している．図 4 に各モードの観測概念を示す．

高分解能モードでは，レンジ方向（衛星進行方向に垂直）の地上分解能が入射角 40° 付近で 10 m 程度のデータが取得可能となっていて，観測偏波は水平偏波送信水平偏波受信（HH）または垂直偏波送信垂直偏波受信（VV）である．この観測モードでは直交偏波の同時受信（HH＋HV または VV＋VH）も可能であるが，その場合はデータレートを抑えるためにレンジ方向の分解能を 2 倍に低下させる．観測オフナディア角は 10°～51° を 18 分割して観測することによって，地上での入射角範囲（8°～60°）をカバーし，約 870 km の観測可能範囲から任意の約 70 km を抽出して観測可能である．また，これによって短い観測周期（昇交軌道のみで赤道上で 5 日以内）を実現している．干渉 SAR データを取得する場合はこのモードを主に使用することになる．

ScanSAR モードでは，高い分解能を必要としないが広い観測幅が必要な場合に使用するモードであり，災害発生時の広範囲観測，海氷観測，および広域海上風観測に有効と考えられる．入射角範囲 18°～43° を 5 分割し，分割された領域を必要なアジマス方向の分解能に対応する時間分だけ照射した後，高速にビーム方向を切り替えて次の領域を観測する．これによって，最大 350 km（5 スキャン時）の観測幅を実現する．空間分解能はアジマスレンジともにマルチルック処理を前提にして 100 m 程度であり，観測偏波は HH/VV 切り替えによる単一偏波観測を基本としている．

ポラリメトリックモードでは，送信パルスを 1 パルスごとに水平偏波垂直偏波に切り替え，受信時は水平偏波と垂直偏波を同時に受信することによって，4 種類の偏波（HH，HV，VH，VV）の組み合わせのデータが取得できる．

3.2 ハードウェアの特徴

PALSAR のハードウェアの特徴は，短時間にアンテナエレベーションビーム方向の切り替えが可能であるアクティブフェーズドアレイアンテナの採用である．この方式のアンテナは，アンテナ上に多数の送受信モジュールを配置し，それぞれの送受信モジュールの中に送信および受信波の位相を制御する移相器が内蔵されていて，その移相を制御することによって電気的にアンテナビーム方向を制御する．

PALSAR の場合，アンテナ上には 96 個の送受信モジュールが配置され，それぞれの送信電力は 25 W 程度であるので，アンテナ全体で 2400 W の送信尖頭電力が得られる．各々の送受信モジュールの中には 5 ビットの移相器が内蔵されていて，個々に 11.25° 間隔で送受信波の位相を制御することが可能である．

SAR としての基本性能を決定する雑音等価後方散乱係数を −25 dB とし，ラジオメトリック安定度を 1 dB 以内に抑えるために，ハードウェアの設計上重点をおいている項目を列記する．

(1) 送受信モジュールの単体性能の向上： 衛星に搭載するためには，重量や消費電力等のリソースに制約がある．その制約の中で，送信電力の増加，雑音指数の減少，位相精度の向上を行っている．

(2) 送受信モジュールの振幅および位相特性の均一化： 製造上の性能ばらつきを抑えるのに加えて，送受信モジュールの温度制御範囲を狭くすることによって各モジュール特性のばらつきを抑える．

(3) アンテナ展開確実性および展開精度の向上： アンテナ部には多数の送受信モジュールが搭載されるため，重量が増加してしまう．この大型展開アンテナ（8.9 m×3.5 m）を確実に展開し，展開後のアンテナ平面精度を，アンテナパターン等の電気特性の劣化がない範囲に抑える必要がある．以上の理由により，アンテナパネルを背面のトラス構造で支える方式を採用し，軌道上での平面精度を ±14 mm 以内で実現する．

4. PALSAR システムにおける干渉 SAR の可能性

PALSAR は，JERS-1 のデータの継続性を考慮して，L バンド（中心周波数：1270 MHz）周波数を採用した．L バンドを使用することによって，C バンド等の高い周波数を使用する SAR に比較すると，時間間隔による散乱特性の変化に伴う干渉性の低下が小さいため，リピートパスインターフェロメトリーにおいては非常に有利である．JERS-1 で観測された阪神淡路地震の地表面変動[3] は，2 年半間隔の開いたデータを使用して算出された．しかし，C バンドを使用する ERS-1 を使用した報告例では 3 日間隔のデータまたはタンデム運用での 1 日間隔のデータが主であり，

長時間間隔での干渉の報告例は少ない．これは，干渉SARにおけるLバンドの優位性を示唆している．

PALSARのラジオメトリック性能の向上も干渉SARには有利となる．雑音等価後方散乱係数－25 dBに対して，観測対象物の後方散乱係数を－10 dBと仮定すると，信号対雑音比は15 dBとなる．この値に対応する位相検出精度は，Bamlerらのシミュレーション解析[4]によれば20°程度となり，JERS-1の実力値（SN：6 dB程度）に対応する50°程度と比較すると2/5の向上となる．

PALSARはJERS-1に比較してレンジ方向の空間分解能を向上させている．PALSARのパラメーターを式(6)に代入すると，入射角40°において臨界基線長は14 kmとなり，JERS-1に比較すると約2.4倍となる．さらに，ALOS自体の軌道回帰精度も赤道上で±2.5 kmで制御されるため，JERS-1の±7.5 kmと比較すると，格段に干渉するデータセットが増加する可能性が高い．

ALOSの軌道決定に関しては，搭載されたGPS受信機のデータを使用することによって1 m以内の決定精度を実現する．これは，干渉SARデータの解析にあたっては，基線長の推定に使用する初期値には十分な精度と考えられる．

JERS-1等に搭載されているSARを使用した干渉SARについて，その原理および解析データの例を示した．また，2002年度に打ち上げが計画されているALOSに搭載されるPALSARについて，その観測モードやシステム性能を示し，干渉SARとしての特徴および可能性についてまとめた．

NASDA地球観測データ解析研究センターの島田政信氏には，JERS-1の干渉SARデータの解析画像を提供していただいた．また，NASDAと共同でPALSAR開発を行っている財団法人資源観測システム開発機構およびPALSAR各部分のハードウェア開発を担当している日本電気株式会社，株式会社東芝および三菱電機株式会社の担当者の皆様には日頃からご支援をいただいている．ここに記して謝意を表する．

文　献

1) 若林裕之，伊藤徳政，浜崎　敬：“PALSARの開発状況”，第23回日本リモートセンシング学会学術講演会論文集（1997）pp. 239-240.

2) H. Wakabayashi, N. Ito and H. Hamazaki: “PALSAR system on the ALOS,” *Proc. SPIE EurOPTO series, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites II*, Barcelona (1998) pp. 181-189.

3) 地球環境観測委員会，宇宙開発事業団，リモートセンシング技術センター技術資料：阪神・淡路大震災関連調査 兵庫県南部地震災害調査報告（1995）pp. 91-96.

4) R. Bamler and D. Just: “Phase statistics and decorrelation in SAR interferograms,” *Proc. IGARSS*, Tokyo (1993) pp. 980-984.

(1999年2月23日受理)