

干渉SARデータの防災への有効利用に関する研究

(国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室)

1 研究概要

干渉SARデータの防災へ有効に利用するための条件を明らかにするため、国土地理院の航空機搭載 X-band SAR を利用して、火山地域である伊豆単性火山群地域(静岡県伊東市周辺)において地殻変動検出に適したリピートパスデータ取得を行った。これらのデータを使用して、干渉 SAR 手法を火山、地震、地すべり、地盤沈下等の災害に関連して発生する地殻変動・地表変動の面的把握に適用するために適した使用波長、観測条件、解析方法等のパラメータを明らかにするための分析を行った。これらの結果を基にして、面的地殻変動把握を目的とする干渉 SAR 観測における、2つの主要なセンサーである航空機 SAR と衛星 SAR の役割分担について整理し、航空機干渉 SAR に期待される用途が多くあることが明らかになった。本研究において、航空機干渉 SAR を実地に実験した結果、観測システムとして一層の完成度に磨きこむ必要はあるが、重要な要素技術はほぼ完成したことが確認できた。将来の応用を想定して、地震および火山活動の典型的な災害に対して、航空法規・電波関連法規や航空機の運用面等までできるだけ実際に近い、自然・社会条件を想定してモデル的な観測をシミュレートし、観測システムの提案を実施した。

2 研究成果の概要

この研究において、国土地理院の航空機搭載 X-band SAR 装置を用いて実験を行い、技術的にリピートパス干渉 SAR が航空機でも可能であることを確認した。下に、異なるパス間の干渉図を示す。これまで航空機リピートパスを実現した事例はまれであり、ほぼ確実に干渉を成立させる技術を確立したことは、世界的にも先導的な研究成果である。この実証実験により、干渉させるための条件がより厳しい短波長でも短期間ではあるが干渉が可能であること、実際の応用の場合には必要とされる数年間を経たりリピートパス観測に最適な波長は L-band であることが示唆された。しかし、軌道間距離、軌道の直進性等、より条件の厳しい X-band においてリピートパス干渉 SAR が可能であることを実証できた意義は大きく、防災への応用に適した L-band においては観測時における諸条件がさらに緩和され実用的な防災対応の観測システムが構築可能であることを実証できた。

3 研究の目的

3.1 リピートパス干渉処理の目的

航空機干渉 SAR の技術的到達点である実用的精度等を実証的に明らかにするため、代表的な火山地域である、伊豆半島東部、静岡県伊東市周辺において、現在までに本装置で取得したデータから干渉ペアを選択し、リピートパス干渉処理を実施する。各種の補正を施し、地殻変動成分を表す画像を作成する。得られた画像の品質を調査し、検出される地殻変動の精度を評価する。

3.2 Lバンド SAR システムの概念設計の目的

解析結果に基づき航空機搭載リピートパス Lバンド干渉システム の概念設計を行う。また、火山活動、大都市における直下型地震被災状況把握を対象として、Lバンドを用いたモデル的な観測条件を提案し、電波法規・航空法規等法的な必要条件、気象条件等観測に際しての自然的条件、必要機材、地上支援等を分析し、具体的にリストアップする。観測に必要なと見込まれる経費を積算する。最終的に、航空機干渉 SAR を防災に応用する場合の費用、装置等を具体化し、実用化に資する資料とする。

4 リピートパス干渉処理

4.1 データ解析対象地区

本業務におけるデータ解析対象地区は、以下の通りである。

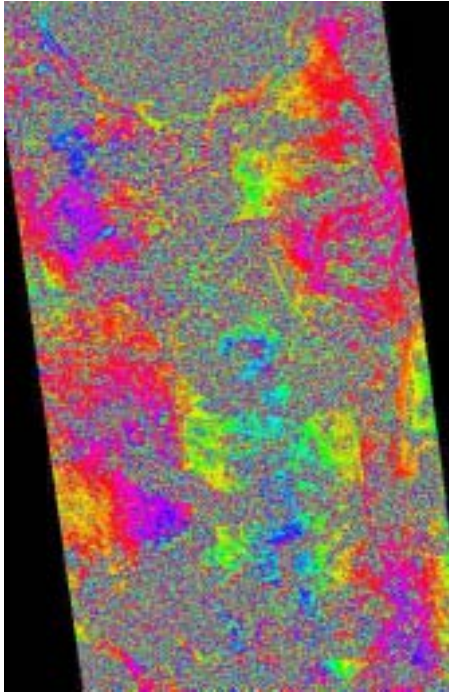
対象地区：伊豆半島東部

解析範囲：約 4km × 2.5km

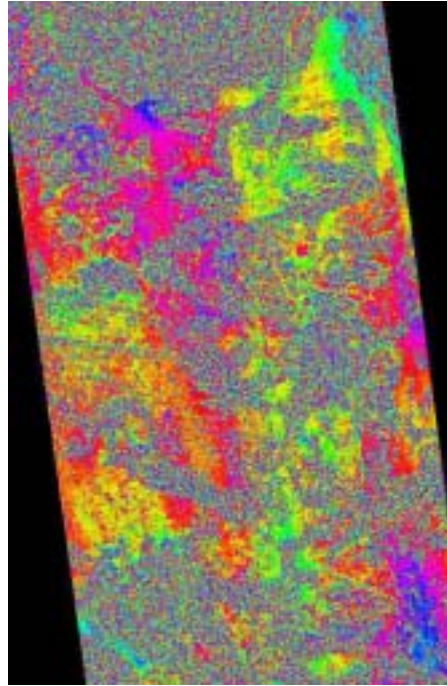
4.2 リピートパス干渉処理

リピートパス干渉処理結果

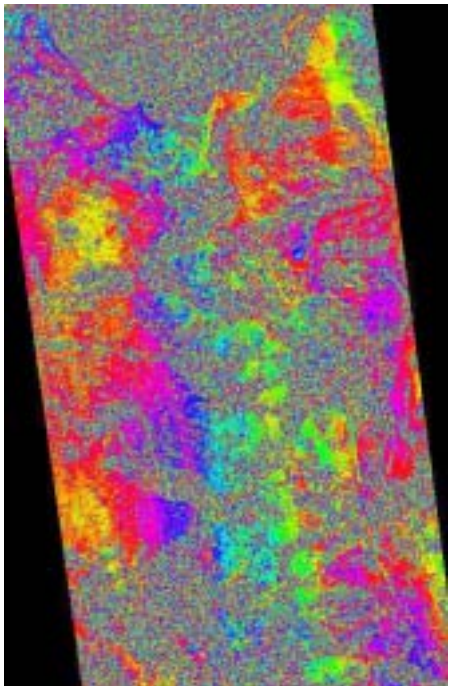
各種の補正を施し、地殻変動以外の要因で発生すると考えられる、位相変化を全て除去したリピートパス干渉処理結果（結果として地殻変動を示す干渉縞画像）を図-1（1999年12月15日取得データ）に示す。



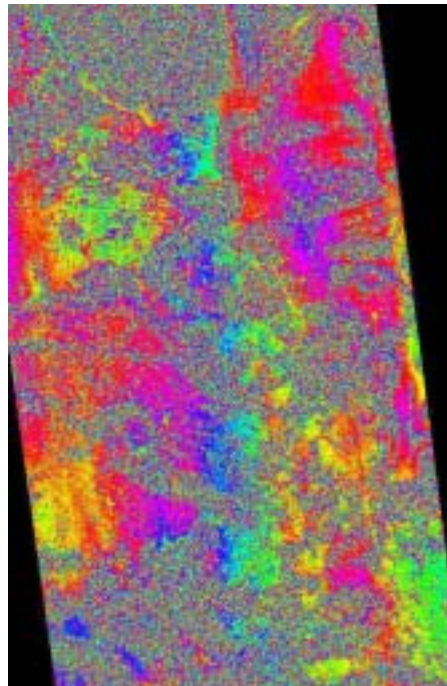
991215p1-p2



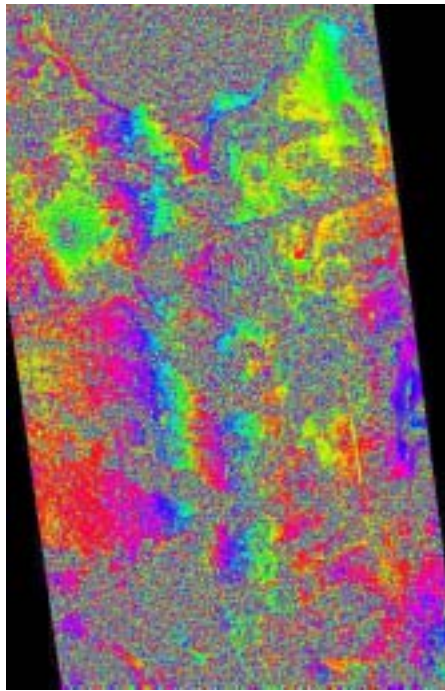
991215p1-p3



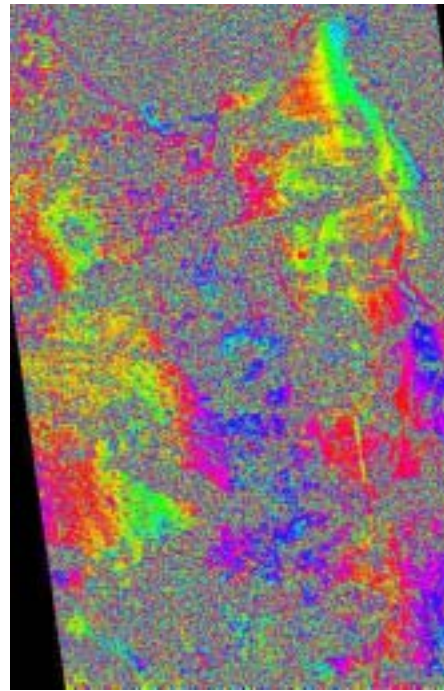
991215p1-p4



991215p2-p3



991215p2-p4



991215p3-p4

図-1 リピートパス干渉処理結果 (1999年2月25日取得データ)

4.3 評価

リピートパス干渉処理結果を用いて、品質の調査および検出される地殻変動の精度を評価した。

リピートパス干渉結果より、残存する干渉縞は、各画像で1～2周期分と見積られる。つまり、残存位相誤差は±360度程度ということになる。

これは一日以内で撮影した観測値の比較による画像であるので、地殻変動が実際に生じているとは考えられず、本来0であるべき、地殻変動に対して、補正の不十分さなどによる観測誤差の程度を見積もるために好適なデータであると考えられる。

位相誤差 と地殻変動検出誤差 d の関係は、

$$\delta d = \frac{\lambda}{4\pi} \delta\phi$$

で表せる。したがって、本干渉結果での地殻変動検出誤差は約1.6cmであると結論される。これは、面的な地殻変動検出手段としては、十分なものであり、技術的には、ほぼ目的を達していることが確認できた。航空機 SAR による面的地殻変動観測例としては世界でもトップレベルの成果である。

しかしながら、Xバンドは、干渉性が時間とともに急速に劣化する事が知られており、地殻変動観測を目的とする周波数帯としては、問題が多く、実用的な地殻変動観測には数年以上の干渉性が保存されるLバンドシステムを開発して使用することが不可欠である。

5. Lバンド SAR システムの概念

5.1 システム要求性能

航空機搭載リピートパスLバンド干渉システムの概念設計を行うにあたり、前提条件および要求性能をリストアップした。

<前提条件>

(1) システム要求条件

No.	項目	内容
1	リピートパスフライト制御	リピートパス干渉ベースライン条件を十分満たす範囲でフライト制御が可能なこと。 設定コースに対して±20m。±10m以内が望ましい。
2	アンテナヨー方向ビーム制御	観測時の偏流角と同程度のビーム制御ができること(進行角のおよそ真横方向にビームセンタを向けられること)
3	軌道決定精度	要求される地殻変動検出精度以上の軌道決定精度を有すること。 キネマティック GPS を用いることにより精度数 cm
4	DEM 精度	DEM 精度は良ければ良い方がよい。 Xバンド干渉 SAR により求められる DEM を前提とすると、精度 5m 程度。
5	SNR	画像の位相誤差が十分小さくなるよう SNR を確保する必要がある。 (TBD) dB 以上
6	観測幅	10km 程度
7	データ取得時間間隔	TBD

(2) 機体の制約条件

現在、3次元の地形情報取得用に使用している X バンド航空機搭載 SAR システム(セスナ 208 搭載)に対して、機器の追加、機能拡張により、リピートパス干渉 SAR による L バンドの地殻変動観測が可能なシステムとすることを前提とする。ただし、X バンドと L バンドの同時運用は不可とする。

No.	項目	内容
1	プラットフォーム	セスナ 208
2	観測高度	3,000 ~ 4,250 m (飛行規程で 14,000 feet 以下)
3	速度	40 ~ 125 m/s (現在の SAR 観測の実績では 45 ~ 120m/s)
4	偏流角	-30 ~ 30 deg (現在の SAR 観測の実績では絶対値の最大 28 deg)
5	ドア開口部寸法 (アンテナ寸法)	1.2m
6	乗員	3 名 パイロット 1 名 ナビゲータ 1 名 オペレータ 1 名
7	重量、寸法	X バンド SAR と同等程度
8	消費電力	X バンド SAR と同等程度

5.2 システム概要

(1) 主要機能

Lバンド観測

送信周波数をLバンドとすることにより、植生による干渉性劣化の影響を受けにくく、データ取得時期間隔の大きな干渉ペアでのリピートパス干渉を可能にする。

リピートパスフライトの実現

DGPS 地上局からの補正情報を基に、位置姿勢検出装置で、DGPS 位置データ (精度 1m 程度) を生成し、そのデータを飛行支援装置に送ることにより、設定コースから ±20m 以内のフライトを実現することが可能となる。これにより、リピートパス干渉のための干渉ベースライン条件を十分満足することが可能である。

アンテナヨー角制御を実施

干渉させるデータ間でヨー方向のビームずれがあると干渉性劣化が起こる。フライト時の偏流角に応じて、ヨー方向アンテナビームを制御することにより、干渉データ間のビームずれを小さくし、干渉性劣化を防ぐことを可能とする。

高精度位置・姿勢データの決定

フライト時に取得した GPS データ、慣性計測装置 (IMU) データ (角速度、加速度) を使って、オフライン解析処理において、高精度な航空機位置・姿勢データを算出します。位置データは、キネマティック GPS データ + IMU データのハイブリッド処理により数 cm の精度を実現します。そのため、データ取得時にコーナリフレクタの設置の必要はない。

地殻変動検出

Lバンド用航空機 SAR 処理ソフトウェアは、本システムに特化した非常に高精度な SAR 画像再生処理、リピートパス干渉処理を行う。特に、高精度位置・姿勢データを用いた航空機動揺補正処理、DEM を用いた地形による影響の除去を実施することにより、軌道縞、地形縞を除去し、地殻変動による変動縞を抽出可能。

5.3 運用性検討

5.3.1 運用条件

項目	条件	備考
運用地域	日本全国及びその周辺海域の上空 (他の無線局の運用に妨害を与えない場合に限る) 防衛庁施設周辺、災害時等で自衛隊が出動している場合は事前調整が必要	無線局免許状 (現状の GSI-SAR の場合)
運用高度	最大 14,000ft (気圧高度)	飛行規程 (現状の GSI-SAR の場合)
飛行方式	有視界飛行に限る 飛行高度 3,000m 以上の場合 飛行視程 : 8,000m 下方の雲 : 300m 上方の雲 : 300m 水平の雲 : 1,500m	飛行規程 (現状の GSI-SAR の場合)

運航時間	観測時 5H 程度 フェリー時は 6H 程度	搭載燃料による
飛行禁止区域・飛行制限区域	自衛隊・米軍の演習場等の上空（調整が必要） 民間・自衛隊の訓練 / 試験空域（調整が必要） 原子力施設上空 ノータム ^(*) による注意喚起	
管制	ACC(Area Control Center) に対し事前に（通常 1 週間～10 日前）に飛行計画の申請を行う。 ACC(Area Control Center) からの管制指示によりコース変更または待機させられる場合あり（定期便航空路等）	
発着可能な飛行場	どの飛行場でも良い。 ただし、混雑等により許可されない場合がある（羽田、成田、伊丹、千歳等）	
気象	離着陸する飛行場の周边上空一帯が雲に覆われている場合 飛行コースおよびその周辺に雲・噴煙がある場合（有視界飛行条件） 低温時（機体に付着した水分が凍結した場合） 強風等により安全な飛行ができない場合	
時間	運用時間の制限は特になし ただし、離着陸時は、使用する飛行場の運用時間内であること	
地形	対地高度 300m 以上あること 高山付近で気流が乱れているエリア（ex. 富士山東麓）	

^(*)ノータム（航空情報）

事件、事故、災害等が発生した場合、航空機が多数集中する可能性があり、災害の場合は近づく危険であるため、注意を促し、又は自粛等を求めるときがある。

2000 年有珠山噴火時におけるノータムによる飛行制限

- ・有珠山から半径 5km 以内、高度 10,000m 以下について飛行制限(2000.4.3～4.15)
- ・2つの火口を中心とする半径 3km 以内、高度 3,000m 以下の空域(2000.4.15～7/13)

2000 年三宅島火山活動時における管制指示

- ・三宅島北側 20 マイル、南側 10 マイルの空域を避けるよう管制指示(2000.8.10 8:30～)
- ・計器飛行方式の場合三宅島から半径 10 マイル以内、高度 20,000 フィート以下の空域を避けるよう管制指示(2000.8.10 17:00～)

- ・計器飛行方式の場合三宅島から半径 10 マイル以内の空域(高度に関わらず)を避けるよう管制指示(2000.8.18 ~)

5.4 運用方式

(1) 基本的な運用方式

・使用飛行場

飛行場は近地の場合はホンダエアポートを使用する。しかし、観測地域が遠方の場合、観測地域近くの飛行場まで SAR を搭載した航空機をキャリーし、そこをベースとして観測を行う。

1 観測フライト時間の目安は、観測地域までの往復移動時間 + 観測時間で 4 時間程度とする(安全のため 1 時間程度余裕を見て)。したがって、観測時間 2 時間とした場合、片道 1 時間、距離で 270km 程度まで、観測時間 1 時間とした場合、片道 1.5 時間、距離で 400km 程度までである。

・観測範囲

基本的には、10km × 10km ~ 20km × 20km 程度。

フライト時間は 4H 程度で計画。飛行場から観測地域への距離にもよるが、片道 1 時間程度(270km 以内)を想定すると、観測時間は 2 時間程度が望ましい。

・観測方向

観測結果から地殻変動の方向と大きさを決めるためには最低 3 方向からの観測が必要である。したがって、原則として 4 方向(東西南北)からの観測を行うことが望ましい。

・入射角

平地観測では特に考慮する必要はないが、特に山の観測の場合には地形起伏と航空機位置の関係から、レーダシャドウやレイオーバーとなりデータ欠損となる領域が存在してしまう。したがって、各観測領域に対して 2 種類以上の入射角で観測を行うことが理想である。

・GPS 地上局

GPS 地上局は、できるだけ観測地域の近くの上空が開けた場所(観測コースとの見通しがきくこと)に設置すること。また、設置点は国家三角点を使用することが望ましい。

ただし、緊急時、災害時等で、現地に作業員を派遣できない場合が想定される。その場合は、DGPS 地上局は設置せず、GPS 単独測位でのフライトとなることもやむを得ない。そのような場合のキネマティック GPS 基準局として、観測地域近くの国土地理院の電子基準点のデータロギングをお願いすることも考えられる(ただし、1 秒程度のロギングを行う必要があるため、相当量のメモリがあるところでなければならない)。

(2) 基本的な運用手順

観測計画を立てる(観測範囲、観測パラメータ、フライトコース、地上作業、日程等)

フライトコースを ACC (Area Control Center) に申請(観測の 1 週間 ~ 10 日前)、必要に応じて、防衛庁等と事前調整

SAR 機材を、航空機に取り付け、機能確認(観測前日)

地上作業員、現地待機(観測前日)

観測フライト(地上 DGPS 局運用)

観測終了後、キネマティック GPS 解析により軌道解析

データ処理・解析

噴火・地震発生等緊急時は、 、 をできるだけ短期間で行い、最短 2 ~ 3 日で観測可能？（ただし、状況による）

5.5 航空機 L バンド干渉システムとその効率的運用のシミュレーション

以上のように、L バンドを観測周波数とする実用的な航空機干渉 SAR システムはハード的には十分構築可能であり、また、運用も現在の関係法の体系や飛行場などのインフラの整備状況下において、災害対応に十分貢献できるデータが提供できることがわかった。さらに、代表的な火山災害を想定して伊豆大島を、また、都市型地震災害を想定して横浜市をそれぞれ対象として、概念設計した L バンドシステムを用いて観測する場合の観測シミュレーションを行った。紙数の関係で、詳細は省略するが、十分実用的な観測が可能であることが確認された。

一方、航空機 SAR による観測の費用は、概ね、空中写真撮影またはそれ以上となるので、緊急性が高い場合には航空機 SAR を採用し、必ずしも緊急ではないが、広範囲に定期的に観測を行う場合には衛星 SAR という目的による使い分けが有効かつ重要であると考えられる。

6. まとめ

航空機合成開口レーダーの地殻変動計測への応用の最大のネックであった、飛行経路の推定について、全体がフラットになるように調整する技術を開発し、解析を進めた結果、図-2 のようにならかなりフラットな干渉画像を得ることができた。全体的に位相の変化は 1 サイクル程度であり、1.5cm 程度の誤差で地殻変動が検出できる可能性を示す結果である。

このように、航空機搭載システムは、技術開発の結果十分に応用が可能な段階まで達してきたが、経費がかかることは否めず、全ての観測を航空機で行うことは合理的ではないと考えられる。航空機搭載システムと衛星搭載システムはそれぞれ長所・短所があり対象とする災害によってどちらのシステムがより有効かが異なるため、航空機システムと衛星システムとの合理的な役割分担について分析をおこなった。

本研究以前の類似の研究では、衛星 SAR については、各種の解析事例があるが、リピートパス航空機干渉 SAR については、解析の事例が少なく、また、その実現の可能性についても十分検討されていない。本研究では、航空機干渉 SAR による地殻変動把握の可能性を実証することができた。この成果は、防災に限らずリモートセンシングの各方面に応用可能な技術的情報を提供できるものである。

参考文献

宮脇 正典, 村田 稔, 村上 亮: 航空機搭載リピートパス干渉 SAR による地殻変動検出, 2002 年地球惑星関連学会合同大会予稿集.