

- 12 干渉 SAR を用いた地表面微小変動モニタの実用化

Practical Methods using Interferometric SAR for Subtle Land Surface Monitoring

葛岡成樹¹ 水野敏実²

Shigeki Kuzuoka, and Toshimi Mizuno

抄録：合成開口レーダ(SAR)干渉技術を使うと、微小地表面変動を正確に計測できることが知られている。しかし従来の手法では常に計測結果が得られる保証はなく、土木技術の中で実務として使われることは困難であった。

この論文では、干渉 SAR 技術による実用的な新しい手法として登場した 2 つの地表面微小変動計測手法を実例と共に紹介する。まず PSInSAR は衛星搭載 SAR 画像を用いる地盤沈下計測手法である。この手法では多数の SAR 画像を用いて、信頼性高く広域の地盤変動を計測できる。一方 LiSA は地上設置 SAR であり、地すべりや建造物変形などの局所的な変動を正確に計測できる。

キーワード：合成開口レーダ、リモートセンシング、地盤沈下、地すべり、人工衛星、トンネル、ガス管、地上設置レーダ

Keywords : Synthetic Aperture Radar, Interferometry, Remote Sensing, Land Subsidence, Land Slide, Tunnel, PSInSAR, Ground Based Radar

1. はじめに

日本では地震・火山・地すべりといった地盤変動をともなう災害が多く発生しており、これらの災害が発生すれば人命はもちろん経済的・社会的に多大な被害が生ずる¹⁾。地盤変動をともなう災害のリスク管理・防災のために、過去の災害前後の地表面変動を精密に計測してそのメカニズムを探り、地下構造モデルを構築して将来の地盤変動災害へ備えることが行われている²⁾。

一方トンネルなど地下構造物の建設が近隣家屋などに影響を与えるのかどうかの評価や、ガス管など地下埋設物維持管理において地盤沈下の精密な計測が求められるようになってきた³⁾。

このように地盤変動をともなう災害のリスク管理・防災や地盤変動に密接に関係する地下構造物・埋設物を維持管理するために、地表面変動を精密に計測することが求められている。従来から、水準測量・歪み計や GPS という手法などで地表面変動を精密に計測する手法があり実際に用いられているが、これらはいずれもある特定の点における地表面変動を計測する手法であり、広域な地表面変動を 2 次元面的にまた時間的に連続して計測しようとする場合の面などで制約が大きかった。

一方、リモートセンシング技術は広域を繰り返し観測するのに適している。とくにリモートセンシング技術の中でも、地表面変動を精密に計測するためには合成開口レーダ(SAR)を用いた差分干渉 SAR(DInSAR)技術が使われ、地震前後の地表面変動を計測するなどの成果を上げてきた⁴⁾。DInSAR は同一箇所をほぼ同じ位置から 2 回以上同じモードで観測した SAR 画像を干渉させ、地震前後の位相変化を計測することにより、位相変動の原因となった地表面変動を計測する手法である⁵⁾。

しかし DInSAR 技術を用いて地表面変動を計測しようとするといくつか課題のため、成功すれば精密な計測が出来るものの必ずしも計測に成功するとは限らない。研究目的でない実業務では、成功する保証がない技術を採用することは困難である。

この報告では、防災・土木など実業務で利用する場合考慮が必要な DInSAR の課題をまとめ、実際に現場で利用できる新しい DInSAR の技術である新しい手法について内容・実施事例などを報告する。

2. 差分干渉 SAR とは

地表面の変動を計測するには、地表面の形状・位置そのものを複数の時点で計測し、その差を求める

1 : 正会員 博士(学術)株式会社 イメージワン

(〒163-0712 東京都新宿区西新宿 2-7-1 新宿第一生命ビル 12F ,Tel :03-5908-2850, E-mail :

kuzuoka@imageone.co.jp)

2 : 正会員 応用地質株式会社 技術本部

方法が従来一般的である。水準測量や GPS 測量に基づく地盤沈下計測や、航空機/衛星からのステレオ視による標高抽出およびその後の変化計測がこの手法である。また岩盤崩壊観測のためのレーザを用いたトータルステーションなどの機器も、まずは斜面の形状を複数回精密に計測し、その差から斜面の移動量を計測している。

一方 DInSAR 技術は複数回の計測が必要なことは前手法と同一ではあるが、上記のように地表面の形状・位置を複数回求めてその変化を見るのとは全く異なり、地表面の変動量を直接計測する手法である。DInSAR では、SAR が規則正しい正弦波信号を能動的に送受信し、対象物と SAR との距離変動に応じて受信信号の位相量が変化することに着目して計測する。なお位相差を直接計測するのは困難なので、複数回の観測データを干渉させて、位相差を干渉後の波形の振幅に変換してから計測する。変動量を直接計測することにより、一度形状・位置を計測してから差分を求める方法に比べて、SAR の波長（通常数 m ～ 数 cm オーダ）よりもさらに小さい変動を計測することが可能である。

しかし DInSAR 技術を用いて地表面変動を計測しようとする以下の課題のため、成功すれば広域・二次元の精密な計測が出来るものの、必ずしも計測に成功するとは限らない。

- a) 用いるシーンの組み合わせ
- b) 大気による位相変動
- c) 植生などターゲットのゆらぎによる位相変動

課題 a) は、衛星搭載 SAR 画像を干渉させるための 2 回のデータ取得において制約があり、その制約内でないと SAR データが干渉しないことによる。課題 b) は、大気中の水蒸気が SAR 電波の位相のノイズとなることによる。また課題 c) は 2 回の SAR データ取得において計測すべき対象が変動してしまうことによる。とくに SAR 電波が地表面の植生によってのみ反射・吸収されて実際に計測したい植生下の地表面まで到達しない場合、植生の形状のゆらぎがそのままノイズとなり、実際に計測したい地盤地表面変動を捉えられない。SAR そのもののノイズおよび課題 b), c) のために計測する差異の位相誤差が生じ、位相計測において 2 の位相差を識別できなくなり結果として正しい計測ができなくなることがある。

さらに DInSAR の上記の課題を解決できるかどうか、すなわち計測結果が得られるかどうかは実際に

データを入手・処理して初めて判明することが多かった。このような課題・状況では、DInSAR の利点は多いものの実務的な計測手段として利用することは困難であった⁶⁾。

3 . PSInSAR

PSInSAR (Permanent Scatterers InSAR) は上記の DInSAR の課題のうち a), b) を解決して安定して正確な地表面変動を計測する手法である。Permanent Scatterers InSAR の名前が示すように恒久的な散乱点 (PS) にのみ着目して InSAR 処理を行う⁷⁾。PSInSAR では、特に都市部において 2 次元面的に地表面変動を求めることができ、かつ各地点での地表面変動の時間変化を取得計測することができるという特徴を持つ。

PSInSAR が 2 次元面的に地表面変動を求めることが出来る例として図 - 1 を示す。この図は御前崎周辺のプレート引き込みによる地盤変動を示している。また地盤変動の時系列情報が計測できる例として、図 - 2 を示す。この図は 1998 年 9 月 3 日に発生した岩手県内陸北部地震（マグニチュード 6.1）に伴い、岩手県葛根田川周辺に活断層による地表面変動が観測された事例を示す。

地表面変動が広域に、2 次元面的に計測できること、また時系列計測ができること（あるいは衛星データがある限り遡った時点における計測が出来ること）という PSInSAR の利点を活かし、上記地球科学の学術的研究とは別に PSInSAR が土木分野で実利用目的にも広く使われるようになった。

まずガス管のリスクアセスメントとして PSInSAR を利用した例を示す。埋設されたガス管は老朽化すると各種不具合を発生するので、逐次取り替える必要がある。しかし経年数の多いガス管から順に取り替えても不具合リスクを最小化させるとは限らない。これはガス管の上の道路通行量やガス管が埋設されている箇所の地盤沈下状況がガス管寿命に影響を与えているからである。このガス管リスクと地盤沈下状況との関係をモデル化することにより、ガス管リスクを評価することが可能となる。

また住宅地直下に高速道路などのトンネルを掘削する場合、トンネル建設が住宅地に与える影響を評価する必要がある。とくに軟弱地盤におけるトンネルの場合、トンネル建設以前から自然に発生していた地盤沈下とトンネル建設に伴って発生した地盤沈

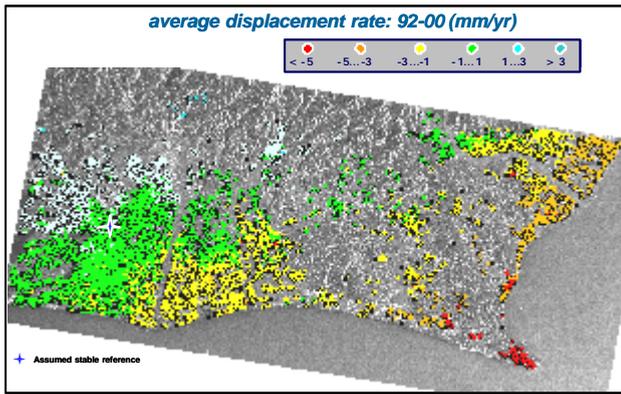


図 - 1 PSInSARによる御前崎周辺地盤変化計測

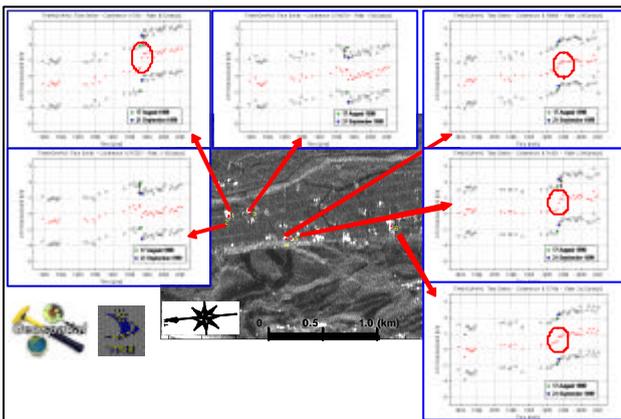


図 - 2 岩手県内陸北部の地震に伴う地盤変動

下とを識別することが求められている。

PSInSARの利点はこのような土木工事・維持管理に求められる地盤変動計測に適した技術である。従来研究として用いられてきたDInSARに比べ、結果が得られる信頼性が向上していることはもちろん、PSInSARでは得られた情報の精度にも正確な仕様を設定することが要求される。現在のところPSInSARにおける精度等は以下のとおりである。

- ・ 地盤変動速度計測誤差： 1mm/year
- ・ 計測点(PS)位置精度
バイアス誤差：通常 50m程度/最悪 400m
ランダム誤差：
東西方向：± 5m
南北方向：± 2m
- ・ PS理論的最大抽出密度：
東西方向：20m間隔
南北方向：4m間隔

なお PS 位置のバイアス誤差は、PSInSAR 解析時に航空写真など高分解能光学画像を背景画像として使用することによりほぼゼロにできる。また実際に

抽出される PS 密度は対象とする地域によって異なるが、都市部では 200~300 点/km² 以上だが、人工構造物の少ない地域だと数点/km² 程度の密度となることもある。

3 . LiSA

人工衛星搭載 SAR データを用いた PSInSAR 手法により、地盤沈下など地表面変動を広域にかつ mm/year の高精度で計測する技術が実用化されてきた。しかし日本の地すべり・岩盤崩壊のモニタには観測方向の制約・分解能の制約などのため、人工衛星からの計測では実用的な変動計測は困難であった。

地上設置型リニア合成開口レーダ(LiSA: Linear Synthetic Aperture Radar)は人工衛星 SAR と同じ原理を地上で実現したレーダである。LiSA では直線のレール上に送受信器を設置し、レール上を移動しながら Ku バンドの電波を送受信し、合成開口処理して高分解能を実現する。また繰り返し観測したデータを DInSAR 処理して 2 時点間における、LiSA と対象物との視線方向距離の変動を mm 単位で計測する⁸⁾。LiSA では繰り返し連続してデータを取得することにより、DInSAR の課題である b)などに起因するノイズのため位相が 2 ずれて計測してしまう誤りを、極力避けることができる。

LiSA の特徴を以下に示す。

- ・ 天候に左右されず、1km 離れて観測可能
- ・ 変動量を 2 次元で、高精度(mm 単位)で観測
- ・ 時系列データを取得可能

LiSA の主な仕様を以下に示す。

- ? 中心周波数： 16.75GHz(Lバンド)
- ? 周波数帯域幅： 中心周波数 ± 50MHz
- ? レンジ分解能 (constant)： ~1.5m
- ? 方位角分解能 at 700m： ~2m 程度
- ? 方位角分解能 at 200m： ~0.70m 程度
- ? 送信電力： 25dBm (0.3W)

LiSA の計測事例として、鳥取県内の地すべり計測を報告する。この地すべりの規模は、幅 300m、比高 500m、平均傾斜 40deg である。基盤の地質は主に泥質片岩からなり、片理面は NNE 方向に 35deg 程度傾斜し、地すべり地では流れ盤の地質構造を呈する。また片理面に斜交する石英脈が発達し、これらが地すべりの地質的素因である。また地すべりの上部において GPS/伸縮計などにより常時観測を実施しており、無降雨期ではほぼ地すべりは停止して

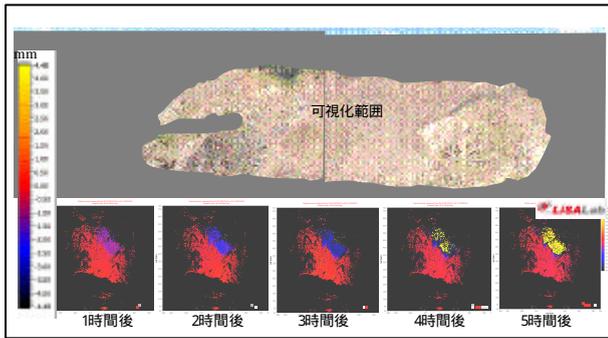


図 - 3 LiSA による継続計測結果例

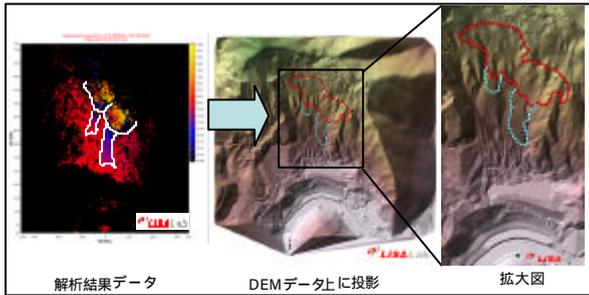


図 - 4 LiSA 計測変動速度による領域区分

いるが、連続的な降雨があると数 mm/hour 程度の変動が観測されている。

当該地すべりを計測するのに、LiSA を地すべり斜面の対岸の下方、河川の護岸壁上部に設置して斜め上方の地すべりを観測した。LiSA 設置位置は地形・地質的には地すべり範囲外の安定した領域である。この位置は地すべりに正対しており、地すべり方向と LiSA 観測方向がほぼ一致しており、地すべりの観測に対して最も感度が良い方向である。LiSA 設置個所からの地すべり観測対象領域の距離は 200m~700mであった。

LiSA による計測は、2003 年 6 月に 3 週間実施し、1 時間ごとの観測データの DInSAR 処理を行って、変動量を計測した。その結果地すべり斜面上部に観測方向 1~2mm/hour の変動速度をもつ領域が観測された。この変動領域の形状・位置は時間に対して不変であり、変動量のみが時間とともに次第に大きくなっていく様子がよく分かった(図 - 3)。また 24 時間連続観測で 7 日間計測した結果から、上記の変動とは別に 1~2mm/day のゆっくり変動している領域が判明した。

今回の LiSA の観測により対象地域を 1~2mm/hour の速い速度で変動している領域、1~2mm/day のゆっくり変動している領域、3 週間の観測ではほぼ安定している領域に容易に区分すること

ができた(図 - 4)。この領域区分は、従来の現地踏査、地すべり観測などで得られている結果とほぼ整合的ではあり、かつ急斜面で立入り困難な場所では、これまで不明確だった移動範囲を今回の計測で明確に把握することができた。

5 . おわりに

地盤沈下や地すべりなどの微小地表面変動を正確に計測する DInSAR 技術を、土木分野の実業務で利用できる PSInSAR、LiSA の手法が実用化された。この手法により、二次元面的にまた時系列的に地表面変動データを効率よく安定して取得することが可能となった。

PSInSAR は単に従来の水準/GPS 測量の置き換えによる地盤沈下計測だけに留まらず、地下埋設物のリスク管理やトンネルなど地下構造物の建設影響評価といった従来の手法では困難だった分野で使われるようになった。新しい手法により、地盤変動情報を生かした新しい応用分野が可能となってきた。

LiSA では危険な地すべりや岩盤崩壊地域に立ち入ることなく 1km 程度の距離から、晴雨天候に係わらず 24 時間連続で mm 単位の斜面変動を計測することができた。この技術はまたダム堤体や斜面防護工事完了後の長期連続計測にも適している。

参考文献

- 1) 土木学会関西支部(編): 地盤の科学, 講談社, 東京, 1995.
- 2) 鷲谷 威, 西村卓也, 畑中雄樹, 福山英一, W.L.Ellsworth: 2000 年鳥取県西部地震に伴う地殻変動と断層モデル, 地震 2 輯, 54, pp.523-534, 2002.
- 3) Hidetaka Minagata, Koji Yoshizaki, and Yoshito Hatsuda; "Risk Assessment of Gray Cast Iron Pipelines" ASCE, Baltimore, July 2003.
- 4) 矢来博司, 中川弘之, 飛田幹男, 村上 亮, 藤原 智: RADARSAT/SAR データ干渉処理による地殻変動検出の試み? 2000 年鳥取県西部地震の地殻変動-, 地震第 2 輯, 54, pp.535-546, 2002.
- 5) P. Rosen, S. Hensley, I. Joughin, F. Li, S. Madsen, E. Rodriguez, R. Goldstein: Synthetic Aperture Radar Interferometry
- 6) D. Massonnet, T. Rabaute: Radar Interferometry: Limits and Potential IEEE GE & RS, No. 31, No. 2, pp 455-464, 1993
- 7) A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca: Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, IEEE GE&RS, Vol.38, pp2202-2212, 2000.
- 8) D. Leva, G. Nico, D. Tarchi, J. Fortuny-Guasch, and A. J. Sieber; "Temporal Analysis of a Landslide by Means of a Ground-Based SAR Interferometer", IEEE Tr. GE&RS, Vol. 41, No. 4, APRIL 2003 pp: 745-752