

大規模岩盤斜面の長期的変形調査に関する研究

(土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム)

1. はじめに

大規模岩盤斜面の崩壊は、発生頻度は低いものの、崩壊が発生した場合には甚大な被害が生じる。このような大規模岩盤斜面に対しては、その地形の急峻さや規模からハード対策を実施することには困難を伴い、斜面監視等のソフト対策も併せて実施していく必要がある。しかしながら、広範囲に分布する大規模岩盤斜面の経年的な変状の監視は計測機器の設置やその管理が困難な場合があり、広範囲を長期的にわたり効率的に観測することが可能な非接触方式の監視手法の開発が望まれている。これに対し、広域かつ全天候型センサーという利点を持ち、かつ雲仙普賢岳溶岩ドームを対象に航空機型での検討¹⁾を行った経験のある SAR (合成開口レーダ) に着目し、ここではさらに広域的で航空機の不要な衛星 SAR データを用いて岩盤斜面の長期的変状を監視する手法の適用性の検討を行った。

2. 研究方法

モデル地域として雲仙普賢岳溶岩ドームを対象に、衛星 InSAR (干渉 SAR) 及び航空写真測量による変動量の計測を行い、光波測量結果と比較することにより、衛星 InSAR による地形変動量抽出の可能性について検討するとともに、良好な結果を得るための計測条件について検討を行った。また、SAR 強度画像 (後方散乱係数) による被災地域の抽出可能性の検討のため、雲仙、奥多摩、天鳥橋、大山の 4 地域の SAR データを用いて地表面の状況 (植生・岩質等) による後方散乱係数の比較を行った。

3. InSAR (干渉 SAR) の概要

レーダ波を地表に照射し、地表からの散乱波を振幅と位相を持つ画像として記録する。この位相情報を基に干渉処理を行うのが InSAR であり、図 - 1 に示すように観測した同地域の異なる時期の 2 つの画像 (A_s , A_m) を干渉させ、その位相差から地形変動量 (軸方向の距離変化) を計測する。InSAR により地表における数 cm の変動を広い範囲にわたって捉えることができるとされ、地殻変動検出事例が報告されている²⁾ことから、今回の検討対象としたものである。

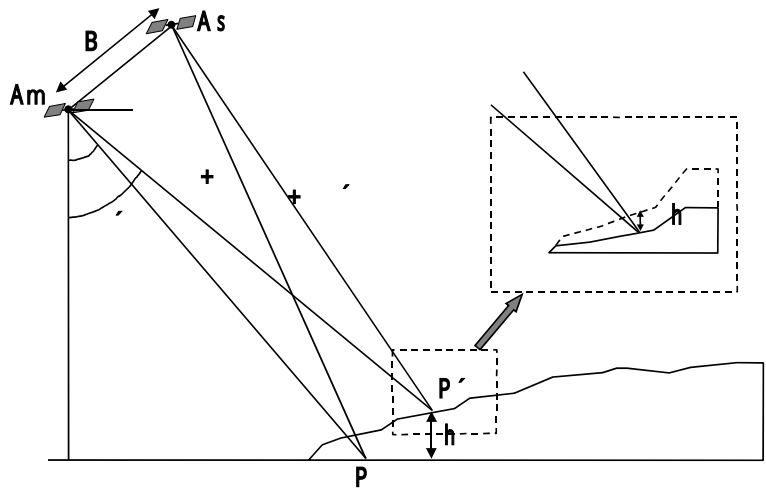


図 - 1 InSAR (干渉 SAR) の原理

位相差には、式 1 に示すように、地形変動量、軌道縞、地形縞、大気遅延、曖昧さ (波長) 等の影響が含まれており、これらの情報を解析処理の過程で取り除いて地形変動量だけを抽出する必要がある。

$$\begin{aligned}
 &= \frac{4}{\lambda} \left(\frac{B \sin(\theta)}{\cos(\theta)} + \left(\frac{h}{\cos(\theta)} + x \right) + 2N + C \right) \\
 &= \frac{4}{\lambda} \frac{B \sin(\theta)}{\cos(\theta)} - \frac{4}{\lambda} \frac{h B \cos(\theta)}{\sin(\theta)} - \frac{4}{\lambda} \frac{h}{\cos(\theta)} + \frac{4}{\lambda} x + 2N + C \quad (\text{式 1}) \\
 &\quad (\text{軌道縞}) \qquad \qquad (\text{地形縞}) \qquad \qquad (\text{地形変化縞}) \quad (\text{大気遅延}) \quad (\text{曖昧さ})
 \end{aligned}$$

x : 水蒸気遅延量、 ϕ : 観測される位相差、 λ : レーダ波の波長、
 B : 基線長 他は図 - 1 を参照

今回の一連の解析処理（データ再生処理、干渉処理及び変動抽出）には米国 Vexcel 社が開発した 3dSAR プロセッサを使用した。InSAR 解析処理フローを図 - 2 に示す。

4. 研究結果

4.1 衛星 InSAR による地形変動量抽出の可能性の検討

検討に用いたデータは表 - 1 のとおりである。衛星 InSAR による変動量計測については、JERS-1 による L バンド SAR の 3 時期のデータを用い、2 時期の組み合わせ（3 通り）での干渉処理を試みたが、普賢岳溶岩ドーム付近に処理不能の領域が少なく検討に使用したのは 1996 年 6 月 12 日及び 1997 年 3 月 3 日のデータによる 1 ペア（基線長 261m）の処理結果のみであった。本ペアの SAR 画像を図 - 3 に、それらの解析処理による垂直変動量マップを図 - 4 に示す。航空写真測量については、各時期のステレオペアから DEM（数値標高モデル）を作成し、 t_1 間及び t_2 間の変動量を求めた。各手法による垂直変動計測結果を図 - 5 に示す。航空写真測量結果ではメートルオーダーの変動量となったが、衛星 InSAR による結果では数 cm～数十 cm オーダーの変動量となった。なお、光波測量による変動量は約 2 年間で概ね 20cm 程度以内であり、InSAR と計測時期が違うため直接の比較はできないが、同程度の変動が継続していたとすると同じ沈下傾向を示していることになる。

また、InSAR 処理による干渉結果と基線長等の条件を比較することにより、衛星 InSAR による変動量計測において良好な結果を得るための計測条件に関する検討を行った。その結果、重要な条件としては以下のようなことが挙げられる。

- 基線長：長くなると干渉性が悪くなる。今回の検討においては、基線長が 1000m を越えるペアでは解析が困難であった。また、基線長が短い場合であっても、部分的に解析が困難な領域が生じたり、基線長の情報が不正確な場合には軌道縞の影響を除去しきれないなどの問題が残る。
- 撮影時期の相違による地表面の変化（植生等）の影響：変化が大きいと後方散乱の変化が大きく干渉性が悪くなる。
- 地形の影響：起伏に富んだ地形の方が干渉性が悪くなる。

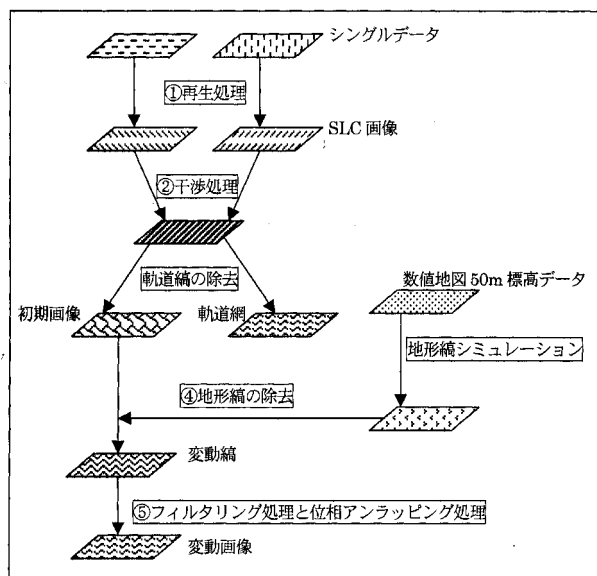


図 - 2 InSAR 解析処理フロー

以上の条件をクリアすることにより干渉処理をより良好に行うことができ、地形変動量抽出の

可能性が期待できるが、岩盤斜面監視の場合には、SAR の空間分解能（例えば JERS-1 の場合 18m 四方）と変動岩体の大きさが大差ないことから、

表 - 1 地形変動量抽出の検討に使用したデータとその時期

計測手法	1995	1996	1997	1998	1999	備考
人工衛星 (SAR)	(8/9)	6/12	3/3			JERS-1 (SAR) 1998/10運用停止
航空写真			2/27 10/11		2/17	ステレオペア1/8000
光波測量結果			3/18より2週間～1ヶ月おき			9地点

人工衛星 (SAR) については、（基線長：1262m）、（基線長：1456m）、（基線長：261m）の組み合わせについて InSAR を試みたが、良好な干渉結果が得られたのは のペアのみである。

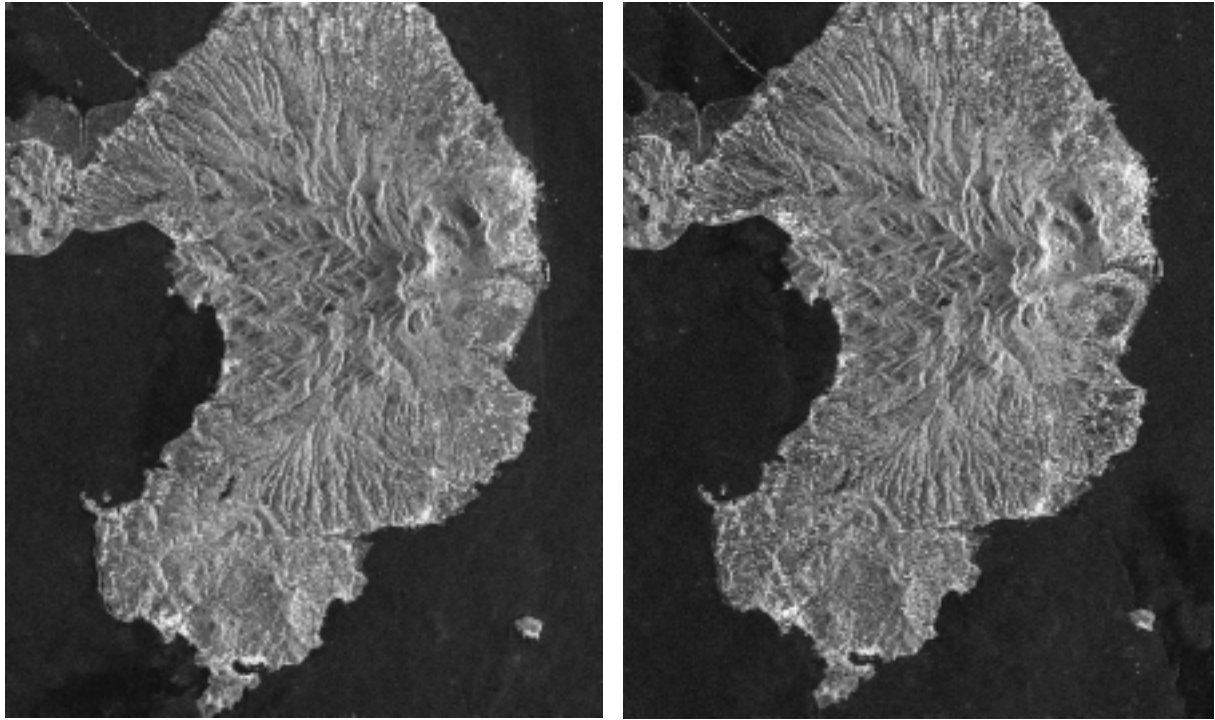


図 - 3 地形変動量抽出の検討に用いたSARデータの画像
(左:1996年6月12日、右:1997年3月3日、JERS-1のLバンド)

さらにノイズが存在しないという条件が必要である。しかしながら、現状ではデータに様々なノイズが含まれ、これを確実に除去することは不可能であることから、豊浜トンネルや第2白糸トンネル程度の規模の岩盤斜面の監視への適用は難しい。

4.2 SAR強度画像(後方散乱係数)による被災地域抽出の可能性の検討

雲仙、奥多摩、天鳥橋、大山の4地域のSARデータを用いて地表面の状況(植生・岩質等)による後方散乱係数の比較を行った。用いたデータを表-2に示す。雲仙、奥多摩、天鳥橋の各地域では地表面の状況毎にサンプル地を抽出し、後方散乱係数の頻度分布の比較を行った。また、大山地域では2時期のデータを用いて後方散乱係数の差分あるいは除算処理により、地表面状況の変化部分を抽出できるかどうかの検討を行った。

(1)スペックルノイズの低減処理

SARデータには、分解能セル内に多数の散乱体がランダムに分布することによってスペックルノイズが生じているため、これをフィルタリング(特定の局所領域

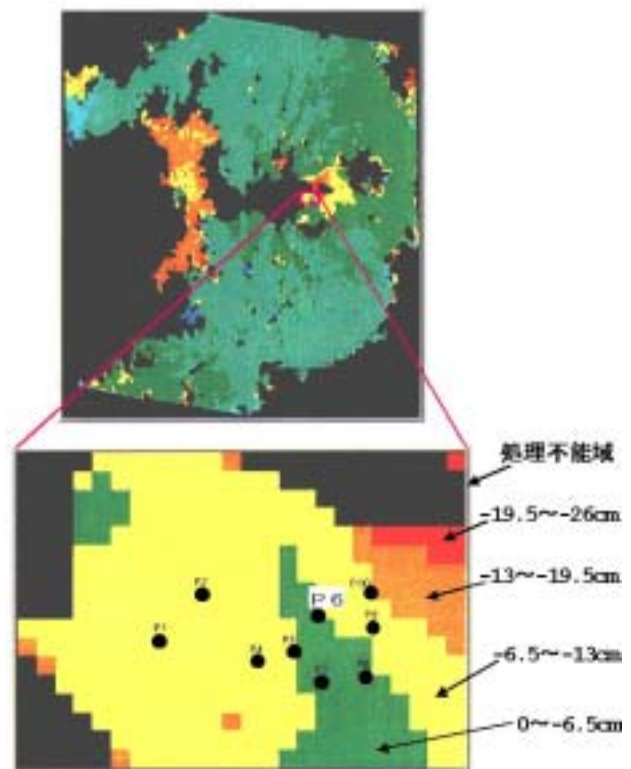


図 - 4 InSAR解析処理による垂直変動量マップ(正が隆起、負が沈下を示す。)

のピクセルの値を利用して平滑化を行うことによりノイズを除去する処理)によって除去あるいは低減させることが有効な解析のために必要である。フィルタリングにはいくつかの種類があるが、極大値・極小値が平滑化されつつも本来の後方散乱の空間的变化が保存されることが望ましいという観点から、試行錯誤の結果、今回は Lee-Sigma フィルタ (局所領域内(今回は 3×3 ピクセルとした)の中心ピクセルの値を平均値と仮定した時にその値を中心にして設定された範囲(通常は ± 2 を使用)に入るピクセル値のみを使用して平均値を算出し置き換える手法)によるフィルタリングを行った。

(2) 地表面の状況毎の後方散乱係数の頻度分布の比較

雲仙、奥多摩、天鳥橋の各地域における地表面の状況毎の後方散乱係数の頻度

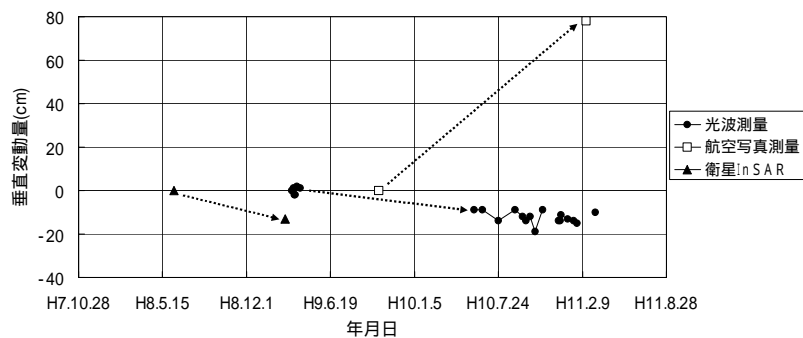
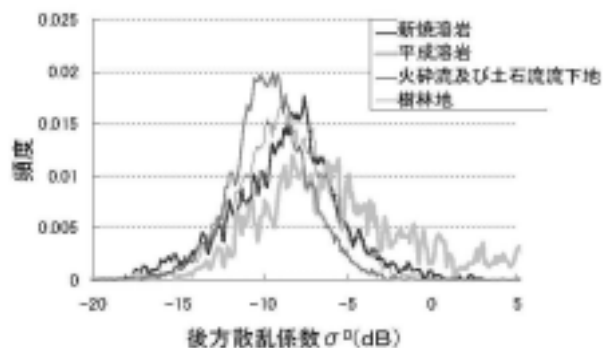


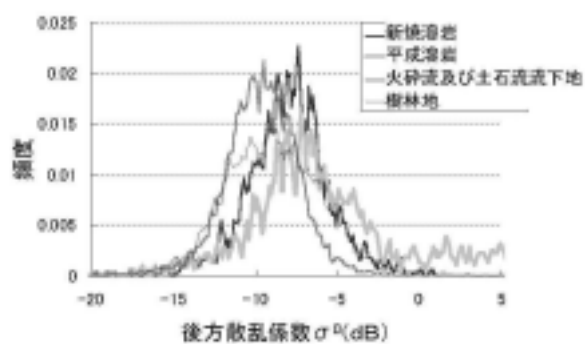
図 - 5 各手法による垂直地形変動量計測結果の比較

表 - 2 地表面の状況による後方散乱係数の比較検討に使用したデータ一覧

地域	使用データ	検討項目
雲仙	JERS-1 : 1998/2/18, Lバンド JERS-1 : 1998/4/3, Lバンド	地表面状況毎の後方散乱係数の頻度分布 サンプルデータ抽出地 ・新焼溶岩 ・平成溶岩 ・裸地 (火砕流及び土石流流下地) ・樹林地 (眉山斜面)
奥多摩	JERS-1 : 1998/7/29, Lバンド ERS-2 : 1998/8/1, Cバンド	地表面状況毎の後方散乱係数の頻度分布 サンプルデータ抽出地 ・石灰岩 1 (採石場) ・石灰岩 2 (露岩地) ・樹林地
天鳥橋	JERS-1 : 1997/12/26, Lバンド ERS-2 : 1997/12/5, Cバンド ERS-2 : 2000/3/24, Cバンド	地表面状況毎の後方散乱係数の頻度分布 サンプルデータ抽出地 ・砂岩 (モニタリング実施地周辺) ・牧草地 ・樹林地
大山	JERS-1 : 1996/10/17, Lバンド JERS-1 : 1998/9/21, Lバンド ERS-1 : 1996/3/20, Cバンド ERS-2 : 1998/11/26, Cバンド	2時期データの差分あるいは除算による 後方散乱係数の変化部分抽出



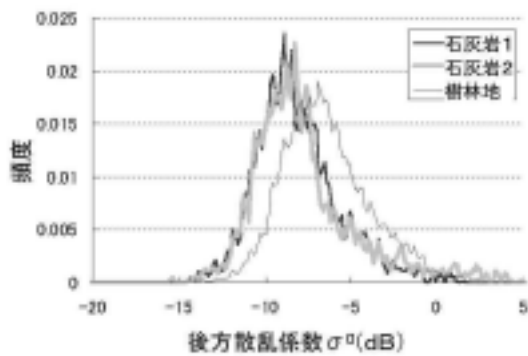
JERS-1:1998/2/18



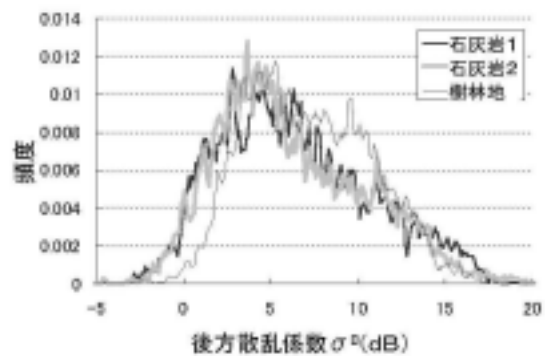
JERS-1:1998/4/3

図 - 6 地表面の状況毎の後方散乱係数の頻度分布 (雲仙地域)

分布を図 - 6 ~ 8 に示す。なお、各図の頻度分布とも、それぞれのサンプルデータ抽出地内の総ピクセル数を1すなわち100%としている。これらの結果、Lバンド(JERS-1)、Cバンド(ERS-1/2)ともに、樹林地では露岩地に比べて若干大きい後方散乱係数を示す傾向が見られた。また、奥多摩地域及び天鳥橋地域におけるERSデータ(図 - 7 右及び図 - 8 右上)を比較すると、石灰岩と砂岩で後方散乱係数に若干の差が見られた。しかしながら、これらの頻度分布は重なる部分が大きいため、後方散乱係数でしきい値等によって植生の有無や岩質の違いを判定するのは困難である。なお、JERS-1データにおいても天鳥橋地域の砂岩と他の地域の石灰岩及び溶岩で後方散乱係数に差が見られたが、JERS-1の場合、植生等を含め天鳥橋地域の後方散乱係数の分布範囲全体が他の地域より高い傾向にある(原因は不明)ため、直接の比較はできない。

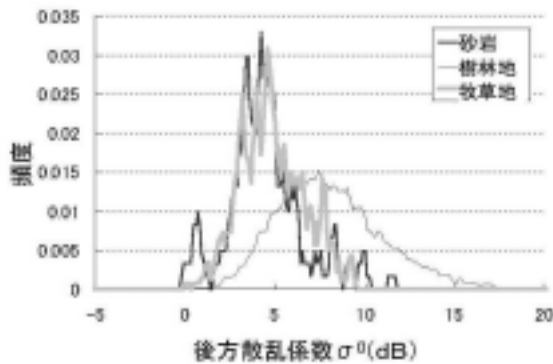


JERS-1:1998/7/29

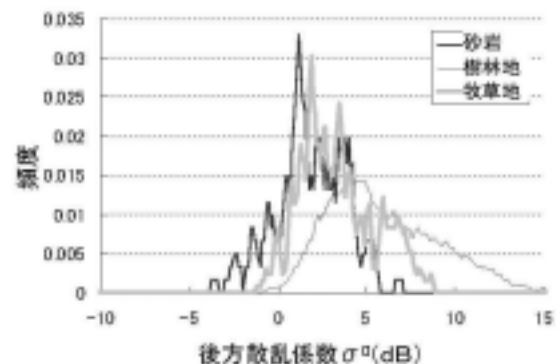


ERS-2:1998/8/1

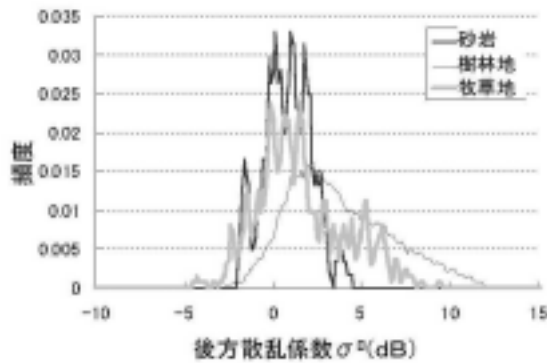
図 - 7 地表面の状況毎の後方散乱係数の頻度分布(奥多摩地域)



JERS-1:1997/12/26



ERS-2:1997/12/5



ERS-2:2000/3/24

図 - 8 地表面の状況毎の後方散乱係数の頻度分布(天鳥橋地域)

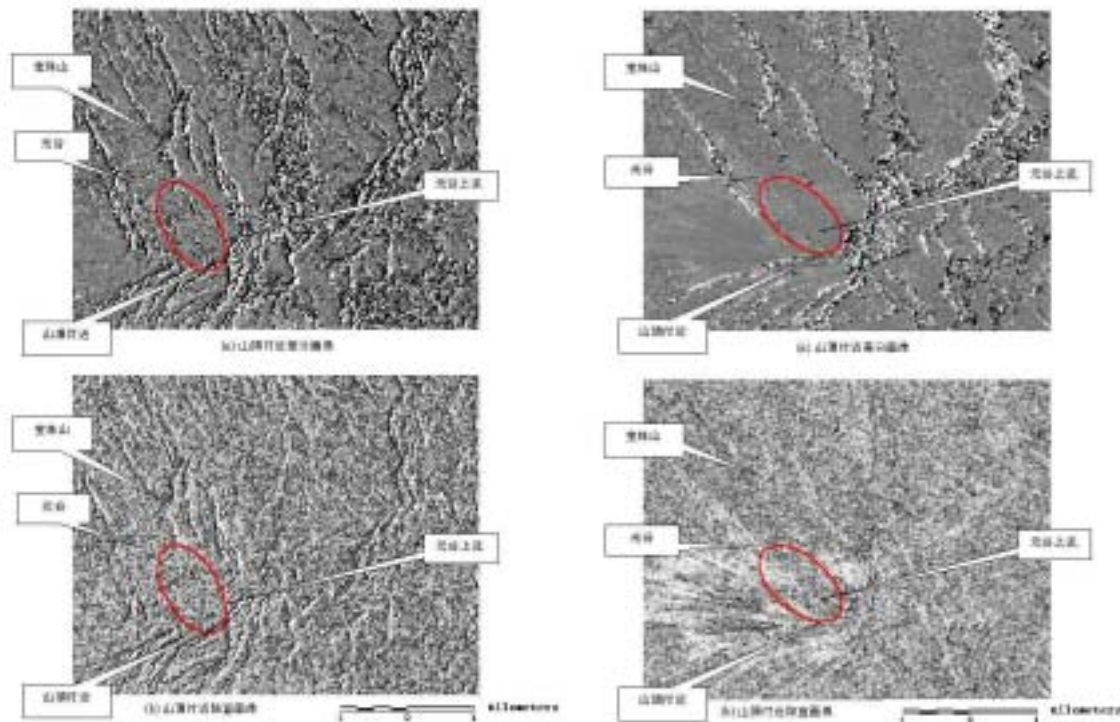


図 - 9 大山元谷周辺の後方散乱係数差分画像及び除算画像 (JERS-1) 図 - 10 大山元谷周辺の後方散乱係数差分画像及び除算画像 (ERS-1/2)

(3) 2 時期の後方散乱係数の差分・除算処理による地表面状況の変化部分の抽出可能性の検討

大山地域において、JERS-1 (Lバンド)、ERS-1/2 (Cバンド) それぞれの 2 時期データを用いて、差分処理及び除算処理を行った。その結果を画像化したものを図 - 9 及び図 - 10 に示す。図内の大山元谷上流においては 2 時期データ間の 1998 年 7 月 24 日に崩壊が発生したとされているが、差分画像、除算画像とも、尾根線や谷線に相当する線状模様は見られるものの、崩壊に相当すると思われるような変化部分は抽出できなかった。なお、ERS-1/2 の場合においても同様の結果となった。したがって、地表面状況の変化が起こったかどうかをこの手法 (2 時期の後方散乱係数の差分処理及び除算処理) で判定するのは困難であるといえる。

5. まとめ

岩盤斜面に対する衛星データによる監視手法の検討として、衛星 InSAR による地形変動量抽出の可能性及び SAR 強度画像 (後方散乱係数) による被災地域抽出の可能性の検討を行ったが、いずれも困難との結果となった。

また、地すべり滑動抽出の検討³⁾において、地すべりの分布する山林地では干渉性が悪く抽出困難であり、今後の課題として、SAR の分解能向上、少なくとも 200m 以下の基線長、重ね合わせの精度向上が必要であるとの結論が得られている。これらをクリアすることにより干渉性の向上は期待できるが、岩盤斜面監視の場合、岩盤崩壊のスケールが地すべりに比べて数オーダー小さいため、ノイズを確実に除去しきれない限り、衛星 SAR による監視は困難であるといえる。

参考文献

- 1) 建設省：「建設省総合技術開発プロジェクト 土砂災害に関する防災システムの開発報告書」、pp.223-228、1997.2
- 2) 村上真幸・藤原智・飛田幹男・新田浩・中川弘之・小沢慎三郎・矢来博司：「国土地理院における干渉 SAR による地殻変動検出技術の進展」、国土地理院時報、88 集、pp.1-9、1997.10.
- 3) 山越隆雄：「差分干渉 SAR 技術を用いた活動中の地すべりの抽出手法の研究」、土木技術資料、第 43 巻第 7 号、pp.16、2001.7.