

# 地上設置型合成開口レーダーLiSA<sup>®</sup>を用いた地すべり観測事例

## THE GROUND BASED SAR - LiSA<sup>®</sup> - AND ITS APPLICATION OF LANDSLIDE

○水野敏実\*、山根 誠\*\*、葛岡成樹\*\*\*

The ground based SAR - LiSA<sup>®</sup>(Linear Synthetic Aperture radar) - applied InSAR technology using satellite image is hi-precision and long-distance monitoring system developed for 7 years ore more by Joint Research Center of the European Commission<sup>1)</sup>. The system is a portable ground based SAR device, specifically designed and implemented for in-field use. Microwave component of the system is composed of continuous-wave, stepped-frequency scatter meter which includes a signal source. It allows measurements in the frequency band around 16-18 GHz, Ku band. The radar Transmits /Receive antennas are mounted on a computer controlled positioner that synthesizes a linear aperture along the x-axis or azimuth direction. The first experimental monitoring in Japan has been carried out for rapid landside in Tottori. This paper discussed LiSA<sup>®</sup> system and the underlined monitoring result.

**Key Words;** Ground based SAR, InSAR technology, LiSA<sup>®</sup>, landslide monitoring

### 1 はじめに

地上設置型合成開口レーダー(LiSA<sup>®</sup>: Linear Synthetic Aperture Radar)は人工衛星のSARと同じ原理を地上で実現した高精度測距システムである。LiSA<sup>®</sup>はマイクロ波の送受信器を装備しており、直線のレーン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精度観測を実現する。繰り返し観測したデータは干渉処理による位相差の解析(DInSAR)から、異なった計測時間の2回の観測結果を処理し、計測地点(LiSA<sup>®</sup>設置位置)と対象物との視線方向(Line Of Sight)の変動をmm単位で計測する。LiSA<sup>®</sup>はEuropean Committee(EC)の研究所であるJoint Research Center(JRC)で開発され、ヨーロッパ各地で7年以上にわたって検証された。今回、日本で初めてLiSA<sup>®</sup>による大規模な地すべり観測を実施した。地すべりの規模は、幅 300m、比高 500m、平均傾斜 40degである。LiSA<sup>®</sup>による計測は、地すべり正面から最大 700m位置からmm/hourの変動を約 10 分毎に観測し、地すべりのブロック区分を明確にした。本論文では、LiSA<sup>®</sup>の基本的なシステムと高精度広域地すべり観測の事例を紹介する。

### 2 InSAR 技術の地盤計測への適用

SAR 画像の特徴は、マイクロ波を掃射する能動センサーであるために、昼夜や多少の天候を問わずに撮影が可能である。最近では、高解像度の SAR 衛星の打上げも計画されており、その情報の価値やアプリケーションの開発に伴う種々の観測の可能性を広げるものと考ええる。

人工衛星搭載の合成開口レーダー(SAR)データを用いた差分干渉処理SAR (DInSAR)の一種であるPSInSAR<sup>2),3)</sup>技術により、地表面変動を広域・高密度(都市部では 150 点/km<sup>2</sup>~1,000 点/km<sup>2</sup>)で、mm/yearの高精度で計測する技術が実用化されてきた。また、衛星画像のアーカイブには日本全国のSAR画像が蓄積され、地盤変動観測箇所の1992年以降の地盤変動履歴を明らかにすることができる<sup>4)</sup>。

\* 正会員 応用地質(株)技術本部地盤工学センタージオスペイシャルグループ

\*\* 応用地質(株)技術本部地盤工学センター地質技術グループ

\*\*\* (株)イメージ ワン

図-1 はさいたま市における PSInSAR を使用した広域地盤変動解析事例である。過去 10 年間の解析結果は水準測量により観測された結果とほぼ整合し、その分布も告示している。また、この解析では、従来、ヨーロッパ宇宙庁(European Space Agency)が打上げた ERS-1/2 の画像を使用して解析を行っていたのに対して、カナダ宇宙庁(Canadian Space Agency)が打上げた RADARSAT-1 の画像を使用した PSInSAR の解析が行われている。現在では、日本の L バンド SAR 衛星である JERS の解析が行われ<sup>5)</sup>、多くの衛星のアーカイブを使用した解析が可能になっている<sup>6)</sup>。

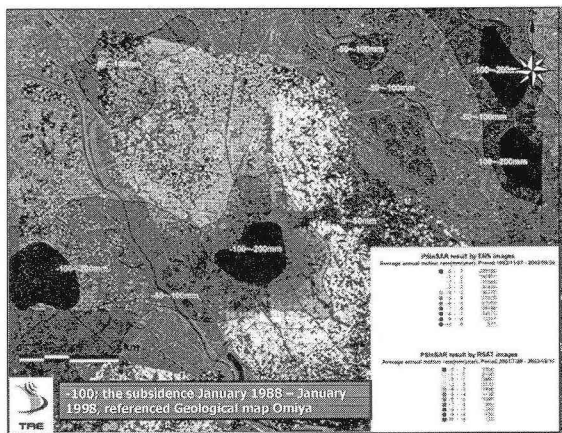


図-1 さいたま市における揚水による広域地盤沈下観測事例<sup>3)</sup>

ヨーロッパにおける PSInSAR を中心とした観測技術は、地すべり、断層、火山活動などに適用され、リスク軽減あるいは自然災害の防災技術として中核をなしている。ストロンボリ(Stromboli)における地すべりによる津波被害を契機に、常時は衛星画像による DinSAR で観測し、火山活動に伴う緊急時に LiSA<sup>®</sup>による観測を行うという災害リスクに応じた計測手法の適用が行われている<sup>7)</sup>。

### 3 InSAR 技術を適用した高精度測距システム LiSA<sup>®</sup>

#### (1) LiSA<sup>®</sup>の開発経緯

衛星画像による地盤変動解析は、広域のエリアの解析には適するが、地すべりなどの小規模のエリアで観測頻度を上げて観測するには、衛星軌道周期(ERS-1/2 は 35 日)間隔では有効な観測ができない場合がある。LiSA<sup>®</sup>は、衛星画像による観測に比べ高頻度で特定のエリアを 1mm 程度の高精度で観測するシステムとして開発された<sup>8)</sup>。

LiSA<sup>®</sup>は 1993 年～1997 年、EMSL(The European Microwave Signature Laboratory)において基礎研究と評価テストが行われ、1998 年からシステムの構築とダム・橋梁等の構造物を中心とした観測が開始された。現在は、常時観測サイトを複数持ち、Spin-off company **LiSALab** を中心に計測サービスを提供し、研究・開発に取り組んでいる。

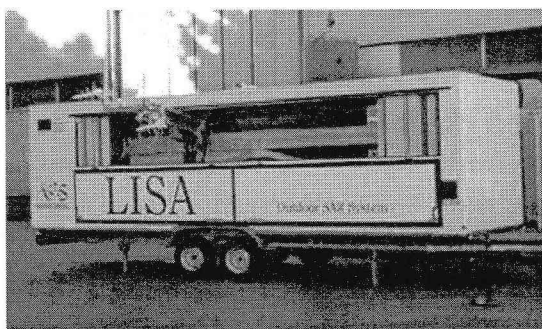


写真-1 LiSA<sup>®</sup>1 号機

#### (2) LiSA<sup>®</sup>システム

LiSA<sup>®</sup>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 処理して異なる時点間における LiSA<sup>®</sup>と対象物との視線(LOS)方向距離の変動を mm 単位で計測する。

LiSA<sup>®</sup>システムは野外計測システムとして設計されたポータブル SAR 装置である。システムのマイクロ波の構成は連続波であり、信号源を含む段階的な頻度でマイクロ波を送信する。マイクロ波は 16-18GHz の Ku バンド(波長 9mm)を使用している。マイクロ波の送受信アンテナはコンピュータ制御された装置に搭載され、X 軸(システムの移動方向、移動時間約 9 分)と方位方向の線形開口を合成する。使用されるアンテナは JRC で開発され、三次元あるいは変動分布図を整備することができる。

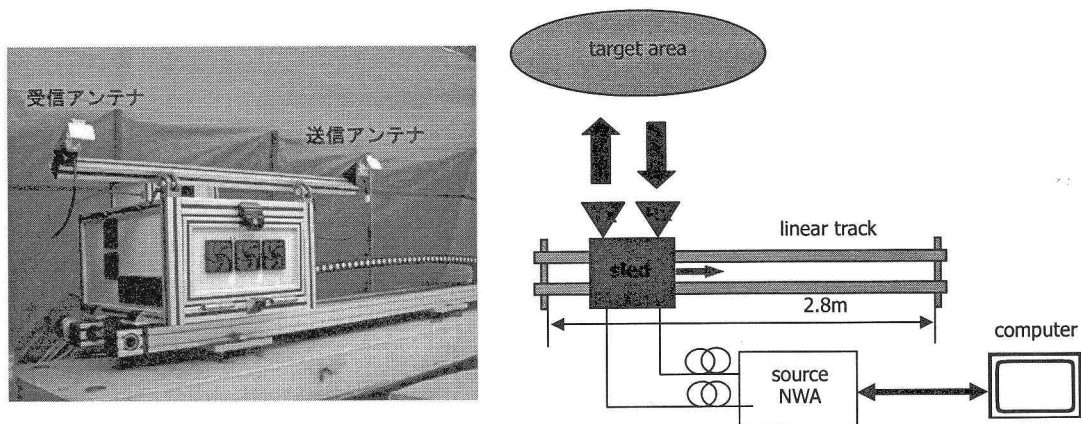


図-2 LiSA®システムの概要

### (3) 地上設置型 SAR における InSAR 技術

SAR の重要な技術として差分インタフェロメトリ SAR (Differential Interferometry SAR: DInSAR)がある。DInSAR は同一シーンを観測した 2 枚以上の SAR 画像の位相情報を用いて、画像を取得した間における対象物の位置変動を精密に計測する技術である。対象物の変動を波長(C バンドでは 5.6cm)の 1/10 以上の精度で計測できるので、地表の mm オーダの変動をモニタすることができる。

DInSAR による地表面変動計測

の原理は、図-3 に示すように SAR

の場合もレーダーからパルスを发射し、ターゲットから跳ね返ってきた電波を受信することはレーザ測距計と同様である。ただし DInSAR の場合、送信パルスや受信電波が高周波の正弦波であることを利用する。図-3 の右図において、

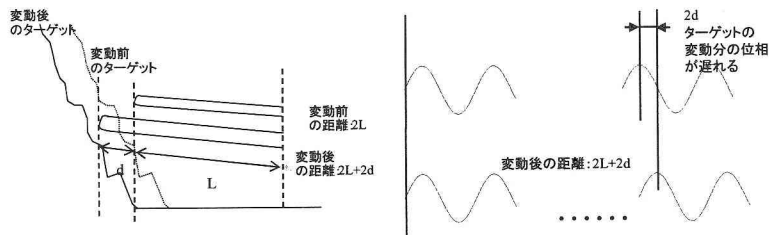


図-3 DInSAR による距離変動の計測原理

2 回の観測でターゲット位置が微

小に変動したとき、受信波を拡大してみると波の頂上の位置がわずかに移動し、ターゲットが変動した距離だけ受信波の位相が生じる。この位相のずれを計測することにより、ターゲットの変動量を高精度で検出する。DInSAR では SAR とターゲットの絶対距離は求めておらず、2 回の観測の間に生じたターゲットの変動量のみを求めている。

### 4 LiSA®による地すべり観測<sup>8)</sup>

地すべり観測は、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、斜め上方の地すべりへマイクロ波を掃射した。LiSA®設置位置は地すべり中央部に正対し、地すべり方向と LiSA®の LOS (Line Of Sight;電波掃射方向) 方向がほぼ一致しており、地すべりの移動方向に対して良好な観測位置である。LiSA®設置箇所からの地すべり観測対象領域の距離は 200m~700m であった (写真-2、図-4)。

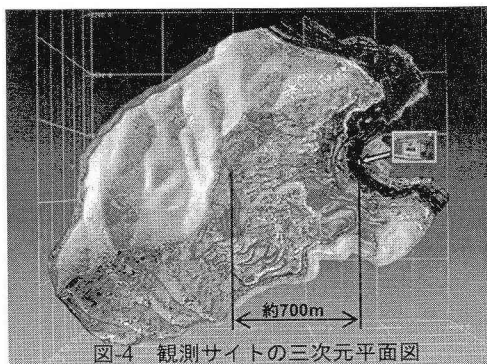


図-4 観測サイトの三次元平面図



写真-2 LiSA®の設置位置とサイト全景

斜面は過去に大規模な崩壊が発生し、岩盤が露出している。赤外線による連続撮影から、温度変化を測定し、図-5に示した。植生や露岩部、湧水点は温度変化が小さく、表層に崩壊堆積物が分布する地点では温度変化が大きい。地質は砂質片岩を主体とし、石英脈を挟む。過去の崩壊は石英脈とへき開を境界として崩壊が発生している。

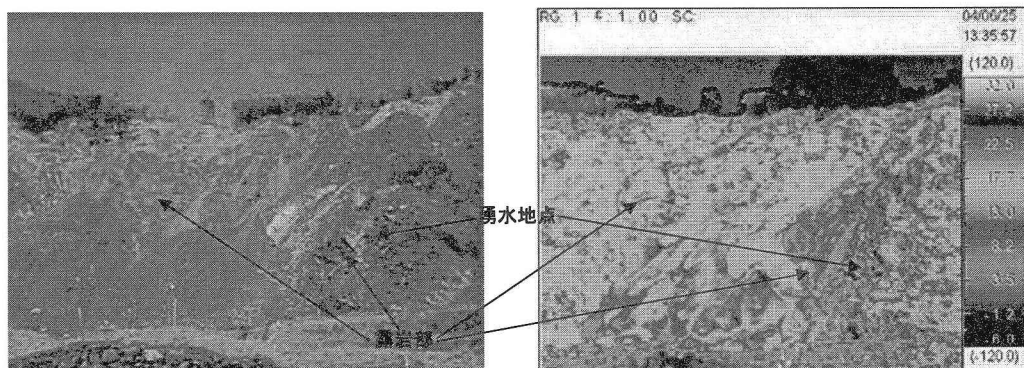


図-5 斜面の状況と赤外線画像

LiSA®による観測は、2004年6月に3週間実施した。まず無線局免許取得のための試験に引き続き、SAR パワー画像を用いて観測可能領域を確定した(図-6)。この結果、植生や前面の岩塊の死角となる箇所以外の LiSA®観測可能領域が明確になった。また、LiSA®での観測は図-7に示す解像度のピクセルを設定し、観測を行った。

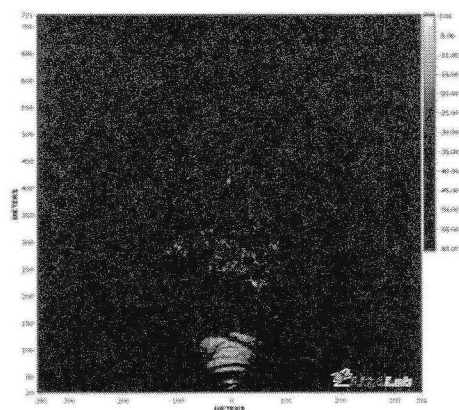


図-6 レーダーパワーイメージ

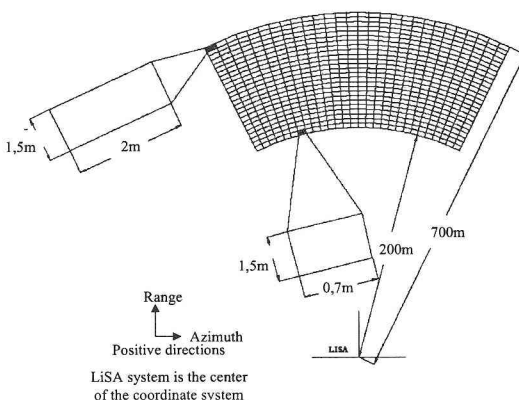
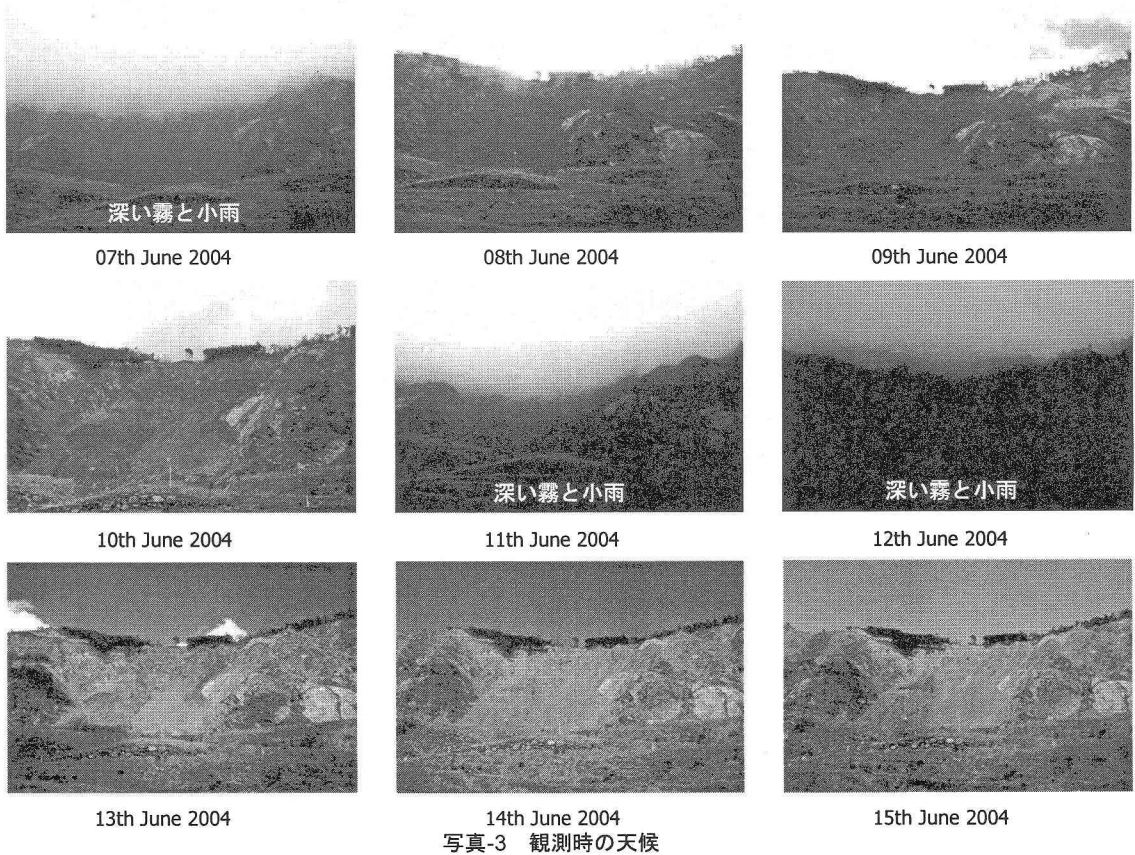
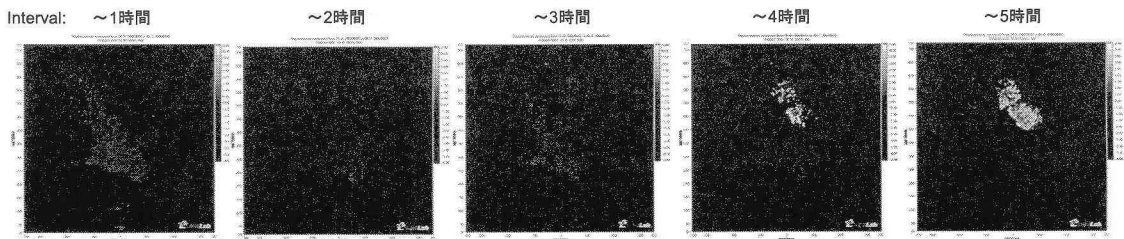


図-7 計測解像度設定

計測は、電波送受信装置が軌道上を移動する 9 分間隔で実施し、48 時間連続計測 2 回を含めて約 2 週間行った。この間、濃霧や小雨等の気象条件もあったが、夜間を含めて計測を実施することができた。LiSA<sup>®</sup>は高精度長距離測定の特徴の他、多少の気象条件や昼夜を問わず計測できるという連続観測を可能にする大きな特徴がある（写真-3 観測時の天候）。ちなみに写真中の霧や小雨の際にはレーザープロファイラーの測定はできなかった。



連続計測結果の一例を図-8 に示した。1 時間毎に、活動性の高い部分に変動していることが解る。この凡例は長さ 9mm で赤いゾーンから寒色系へ移行し、黄色の凡例上部に移って、更に赤に移行し、その変動量が 9mm となる。48 時間連続測定の結果、地すべりの特定の箇所に 48 時間で 40mm 程度の変動が生じている領域が明確になった（図-9）。



## 5 まとめ

今回、ヨーロッパで多くの地すべりや火山観測で優れた結果<sup>7)</sup>が防災上の重要な判断となっている **LiSA**<sup>®</sup>を国内で始めて実施した。長距離高精度計測と9分間隔の昼夜連続観測という優れた性能の上に、地すべり全体の変動を明確にし、不安定な高速変動箇所を明らかにすることができた(図-10)。

今後、困難な観測や高精度が要求される地盤変動や構造物の観測に大きな威力を発揮し、計測技術の新たな発展をもたらすものとする。

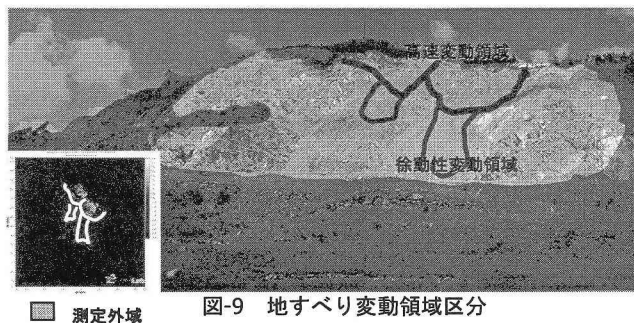


図-9 地すべり変動領域区分

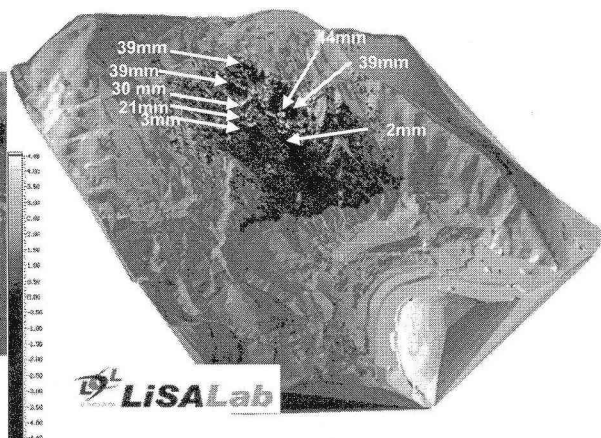


図-7 48時間連続観測 (2004/6/15 ~ 2004/6/17)

## 参考文献

- 1) 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 TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 41, NO. 4, APRIL 2003 pages: 745-752
- 2) 水野敏実, 山根 誠: 衛星画像を用いた広域地盤変動観測結果の検討方法について、物理探査学会第110回学術講演会論文集(2004)
- 3) Toshimi Mizuno, Makoto YAMANE: The applications of hi-precision measuring technique using InSAR technology in Japan, Oral session 2: Modeling for Groundwater-Land subsidence (2), EIT-JAPAN-AIT Joint Workshop, Bangkok, Kingdom of Thailand, September 21, 2004
- 4) 安田扶律, 西林素彦, 八ツ元仁, 水野敏実, 山根 誠: 人工衛星画像を用いた京都市街地における地盤変動履歴解析、(社)地盤工学会 第49回地盤工学シンポジウム、平成16年11月
- 5) 佐伯茂雄、大東憲二、水野敏実、葛岡成樹; JERS-1 PSInSAR による濃尾平野の地盤変動観測、土木学会中部支部、2003
- 6) Claudio Prati, Fabio Rocca, Alessandro Ferretti; PS InSAR analysis with different SAR sensors, EO Conference'04 - Tokyo - 16/07/2004
- 7) Nicola Casagli; Application of remote sensing techniques for geological hazards monitoring, "Risk Mitigation of Slope Instabilities" WS, Joint Research Centre, ISPR, 30 September 2004 to 1st October 2004
- 8) D. Tarchi: Advanced Monitoring Techniques for Risk Assessment of Landslides, "Risk Mitigation of Slope Instabilities" WS, Joint Research Centre, ISPR, 30 September 2004 to 1st October 2004
- 9) 葛岡成樹(イメージワン)、水野敏実: 地上設置型リニア合成開口レーダーを用いた地すべりモニタリング、(社)物理探査学会 第111回(平成16年度秋季)学術講演会