

DInSAR による広域地表面沈下の観測 —Semarang (Indonesia) および Tuzla (Bosnia & Herzegovina) への適用事例

亀山 光雄^{1*}・I.N. Sudi Parwata²・P. Edi Yastika²・清水 則一¹

¹ 山口大学大学院 創成科学研究科建設環境系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16-1)

² 山口大学大学院 理工学研究科システム設計系専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16-1)

*E-mail: i026ve@yamaguchi-u.ac.jp

Key Words : DInSAR, SBAS, 地盤沈下

1. はじめに

広範囲に渡る地表面変位を継続的に計測することは、安定評価や挙動予測をする上で非常に重要である。計測にあたっては、必要な領域を連続的にまた目的にかなった精度で経済的に実施することが求められる。近年、広大な領域の変位分布を得ることができる方法として、人工衛星に搭載した合成開口レーダー (SAR : Synthetic Aperture Radar) ^{1),2)} を利用した DInSAR (Differential Interferometry SAR) が注目されている ³⁾⁻⁵⁾。

SAR は 1978 年に初めて打ち上げられ (SEASAT, 米国)、以来、欧州宇宙機関 (ESA)、日本宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、カナダ宇宙局 (CSA) などが SAR 搭載の衛星を 1991~95 年、さらに、ドイツやイタリアが加わり 2000 年以降に打ち上げている ^{1),2)}。したがって、技術そのものは比較的早くからあったが、高感度、大容量、高速通信などの技術の進歩、また、SAR の専門研究者以外にも利用できる解析プログラムの普及によって、ユーザーの立場の他の専門分野 (地球物理学、地質工学、測地学、土木・資源工学など) の研究者や技術者が取り組むようになっていく。

DInSAR は、2 時期に取得された観測データを干渉させ (観測位相の差をとる)、数 100~数 1000km²、あるいは、それ以上にもおよぶ地表面変位分布を観測できる (図-1)。一方、実際に検出できるのは衛星と地表面を結ぶ一次元方向の距離の変化 (変位) であり、精度も実用的には数 cm 程度と考えられる。DInSAR による地表面変位計測の研究は盛んになってきた。

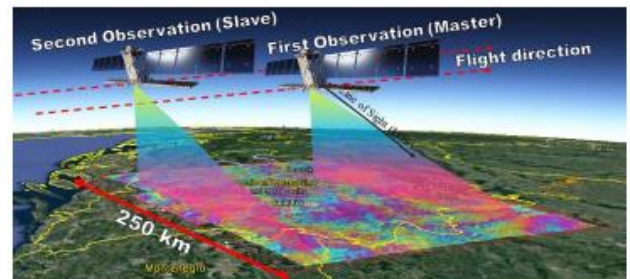


図-1 地表面変位を計測する DInSAR のイメージ⁷⁾

本報告では、長期的な地盤変位計測への DInSAR の適用性を検討することを目的として、2 つの地盤沈下の事例を取り上げる。すなわち、地下水汲み揚げによる圧密沈下 (Semarang 市, Indonesia) ⁶⁾、および、地下岩塩採掘のための塩水汲み揚げによる地表面沈下 (Tuzla 市, Bosnia & Herzegovina) ⁷⁾ に対する適用例を紹介する。

2. DInSAR による地表面変位観測

DInSAR 観測では、観測対象となる領域に対して、少なくとも異なる 2 時期に飛来した衛星が記録した SAR データを入手し、位相データを用いて各位置 (分解能セル) の位相の差を求める (干渉させる)。これは、2 時期における SAR 衛星と地表の距離の差を求めることに相当し、この位相差のことを干渉位相 (Interferogram) と呼ぶ。図-2 に示すように、1 度目に飛来した時の衛星位置を S_1 (この時のデータをマスター : master と呼ぶ)、2 度目に飛来した時の衛星位置を S_2 (この時のデータをスレーブ : slave と呼ぶ) とし地表点 P とで構成される三角形 S_1S_2P について余弦定理を適用し、さらに標高の影響の考慮、および、若干の近似を行うと、地表点 P に対する干渉位相 ϕ の式が求められる ⁵⁾。

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda}B\sin(\theta - \alpha) - \frac{4\pi}{\lambda}B_{\perp}\frac{H}{R_1\sin\theta_i} \quad (1)$$

λ はマイクロ波の波長で、他の記号は図-2 を参照されたい。干渉位相 φ は観測値として SAR データから得られ、また、衛星位置は既知で右辺第 1 項は計算できるので、式 (1) は右辺の点 P の高さ H (楕円体高さ：楕円体と仮定した地球表面からの高さ) を未知量とした方程式となり、高さ H を求めることができる。つまり、SAR データから数値標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) を求めることができる。これが、InSAR による DEM の導出の原理である。地表点 P から衛星方向の変位 (あらためて LOS : Line of Sight 方向と呼ぶ) の成分を d_{LOS} (LOS 方向変位) とすると、他の一般的な誤差成分とともに、位相差分 $\Delta\varphi$ は次のようにあらわされる⁵⁾。

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{disp} + \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{orb} + \Delta\varphi_{atmo} + \Delta\varphi_{scatt} + \Delta\varphi_{noise} \quad (2)$$

ここで、LOS 変位によって生じる位相差分は $\Delta\varphi_{disp} = (4\pi/\lambda)d_{LOS}$ と表され、誤差を適切に処理した位相差分 (観測値) から算出され、最終的に LOS 方向変位 d_{LOS} が求められる。なお、 $\Delta\varphi_{topo}$ は DEM の誤差、 $\Delta\varphi_{orb}$ は式 (1) の右辺第 1 項の誤差 (軌道誤差と呼ぶことがある)、 $\Delta\varphi_{atm}$ 、 $\Delta\varphi_{scatt}$ 、および、 $\Delta\varphi_{noise}$ は、それぞれ、マイクロ波の大気圏遅延、様々な要因による誤差、および、ランダム計測誤差、に基づく位相差分の誤差である。式 (2) に基づき、 d_{LOS} を求める方法が、DInSAR (差分干渉 SAR) であり、干渉位相の差分をとるため差分干渉 (Differential Interferometry) と呼ばれる。実際は、このような操作も含めて、図-3 に示す手順で解析を実施する。手順の中で位相アンラッピング (phase unwrapping) とあるのは、式 (2) から直接求められるのは 0 から 2π の間の位相であり、これを地表のある基準点から積算して絶対的な変位 (位相) とする必要がある (図-4)。これをアンラッピングという。また、ジオコーディング (geocoding) とは、ここまでの解析は衛星座標系 (アジマス-レンジ座標) で行われるので、結果を一般に用いる地理座標系 (緯度、経度、高さ) に変換することという。

さらに、本論文で紹介する事例の解析では時系列解析の方法の一つである SBAS (Small Baseline Subset)⁸⁾を用いている。この手法は、多数の SAR 画

像から垂直基線長およびデータ観測の時間間隔の短い干渉ペアを構成し、干渉処理を行い、干渉性の高いピクセルに対して変位の時間推移を検出する方法である。DInSAR の解析では、式 (2) で示した $\Delta\varphi_{topo}$ や $\Delta\varphi_{atm}$ 、 $\Delta\varphi_{scatt}$ 等の誤差が計測精度に影響を及ぼしているが、この手法を用いることで、これらの誤差や干渉性の低下を低減し、計測精度を向上させることが出来ると言われている⁸⁾。

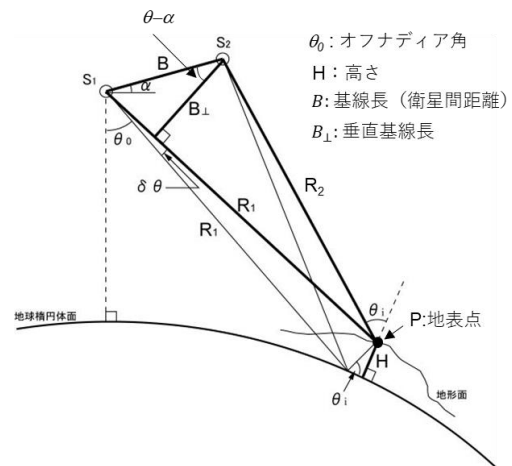


図-2 SAR衛星と地表点の幾何学関係 (日本測地学会ホームページから。一部著者追加)

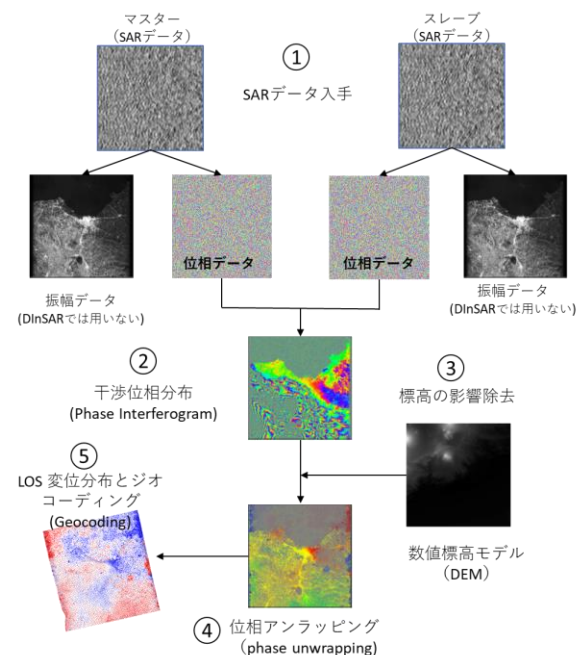
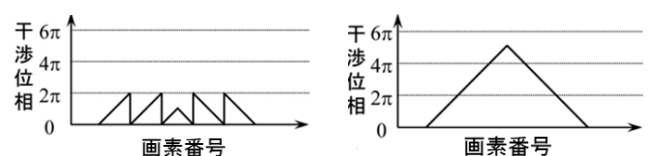


図-3 DInSARの解析の流れ



(a) アンラップ前の位相 (b) アンラップ後の位相
図-4 位相のアンラップ²⁾

3. 地下水汲み揚げによる広域地表面沈下— Semarang (Indonesia) の例⁶⁾

DInSAR 解析が用いられる現場の1つとして、広領域での地盤沈下がある。災害発生の予測とリスク管理には、地盤沈下の監視は重要であり、長期的で広範囲に適用可能な観測が必要となる。現場は、インドネシアのジャワ島北部に位置するスマラン市である(図-5 参照)。スマラン市の南西部はダマール層と呼ばれる火山性堆積岩、また、さらに南部はカリゲタス層(火山岩)、北部の海岸付近は沖積層で構成されている。

解析には、Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, および、Sentinel-1A の3つの異なる衛星によって取得された71個の SAR 画像を用いる。Envisat-ASAR は、2003年3月～2007年10月、ALOS1-PALSAR1 は、2007年1月～2011年2月、Sentinel-1A は、2014年12月～2017年3月までのデータである。SBAS DInSAR 解析には、SARscape (esri 社) を用いた。

図-6 に、それぞれの衛星から得られた時系列解析のそれぞれの期間の最終地表面変位分布を示す。この結果から、観測が始まった2003年3月から2017年3月までスマラン市北部で継続的に地盤沈下が起きていることがわかる。さらに図-7 には、沈下が進

行している北部の各地点における時系列地表面変位分布を示す。この結果は2007年3月から10月までに Envisat-ASAR と ALOS1-PALSAR1 から得られた結果である。図の赤色で分布する海岸付近では、直線的な沈降速度で地盤沈下が進行している。沈下が進んでいる地域は沖積層である。この地域では、住民および工場による地下水取水が継続されており、地下水くみ上げによる圧密沈下が進行していると考えられる。

この地域では2008年から2011年までの間に4回、GPS を用いた地表面変位計測が行われている⁹⁾。図-8 は、GPS 計測で得られた33地点での変位(2009～2010年)と DInSAR で得られた同地点を含むピクセル(25m×25m)の平均的な変位との比較である。この結果から、DInSAR と GPS による計測結果に強い相関関係があり、DInSAR は GPS の結果とおおむね2, 3cm 程度内の差で求められることがわかる。GPS 変位の精度が数 mm～1cm 程度あることを考えると、DInSAR による変位計測精度は数 cm 程度と評価される。以上のことから、DInSAR 解析は、広範囲の長期変位モニタリング手法として有効と考えられる。図-9 に現地で調査した沈下による被害状況の一部を示す。

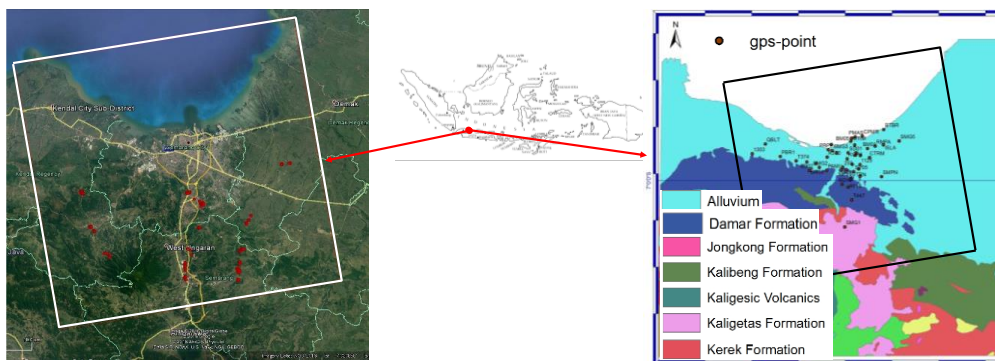


図-5 Google Earth 上のスマラン市の位置と地質分布⁶⁾

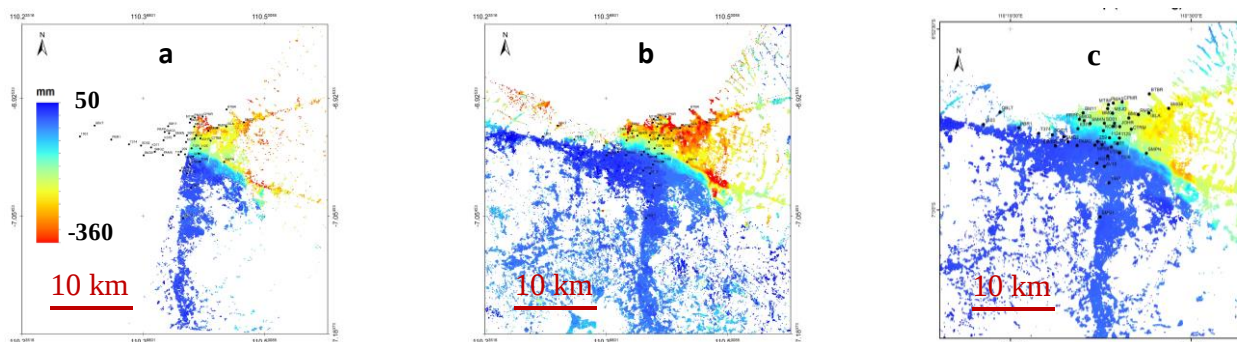


図-6 時系列 DInSAR による地表面沈下分布 (a: Envisat-ASAR (2003年3月～2007年10月),
b: ALOS1-PALSAR1 (2007年1月～2011年2月), c: Sentinel-1A (2014年12月～2017年3月))⁶⁾

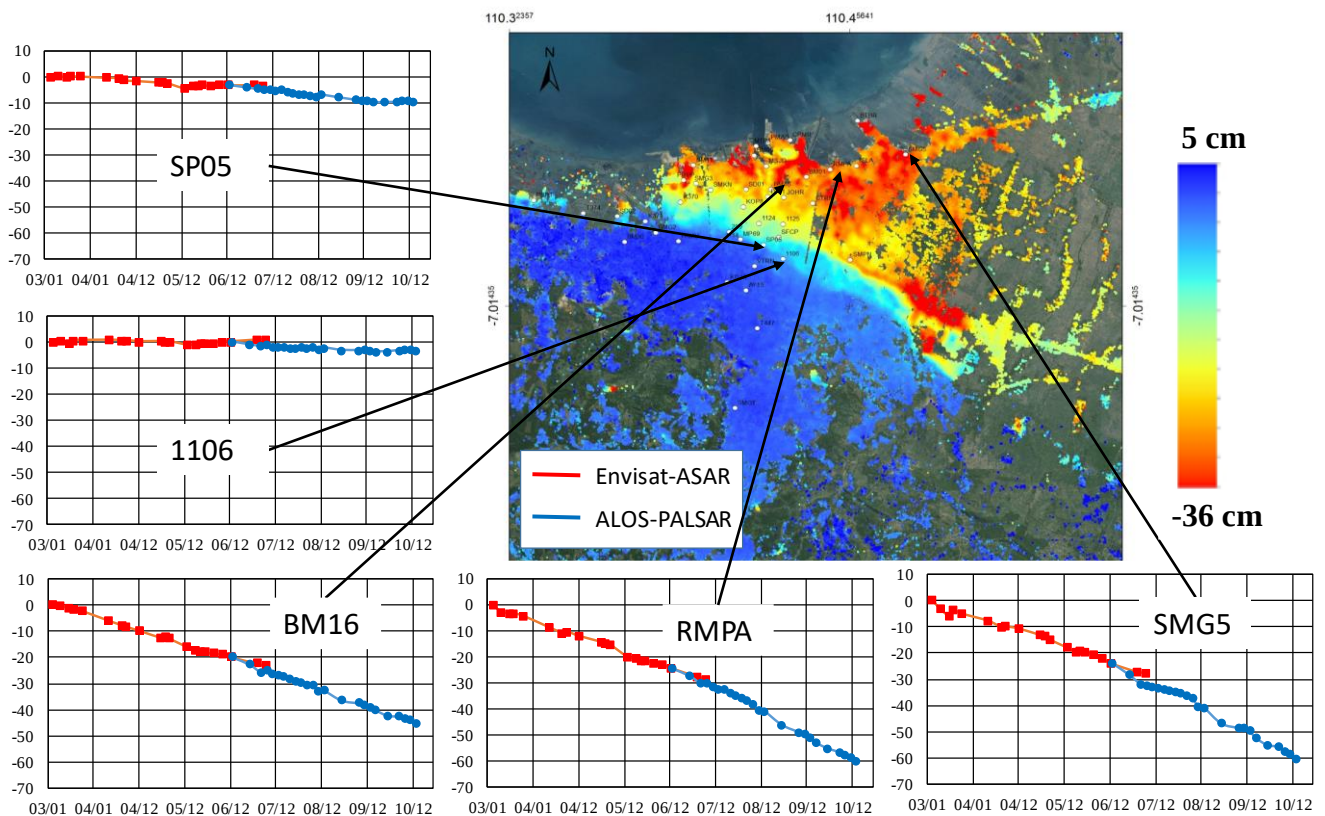
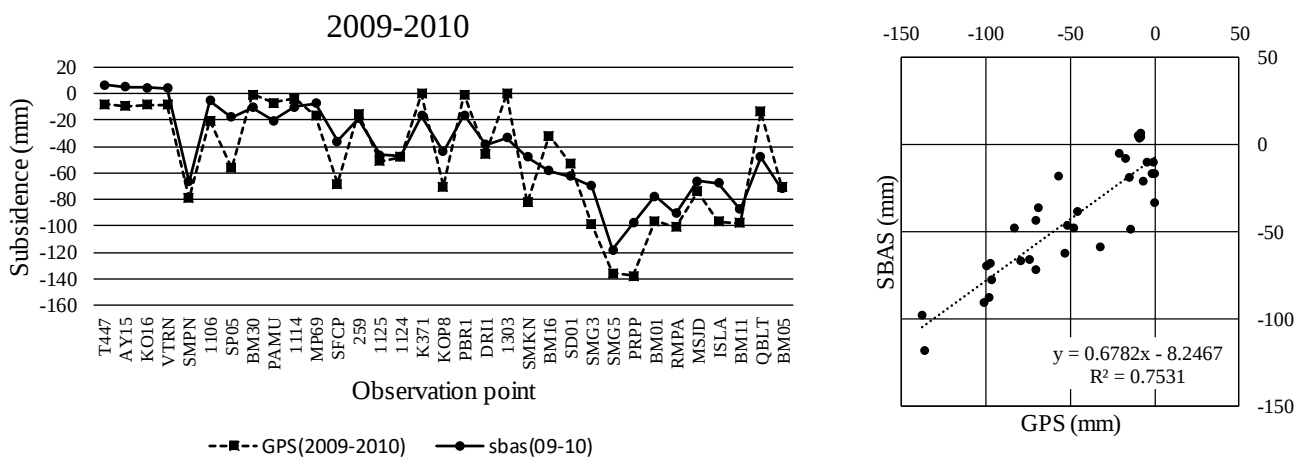


図-7 各地点における時系列地表面沈下分布（2007年3月～2007年10月）⁶⁾



(a) 各地点の比較

(b) 相関図

図-8 DInSAR 解析（SBAS）と GPS 計測結果の比較⁶⁾



(a) 北西部沿岸の状況



(b) 沈下により浸水、放棄された建物



(c) 沈下により浸水している住居

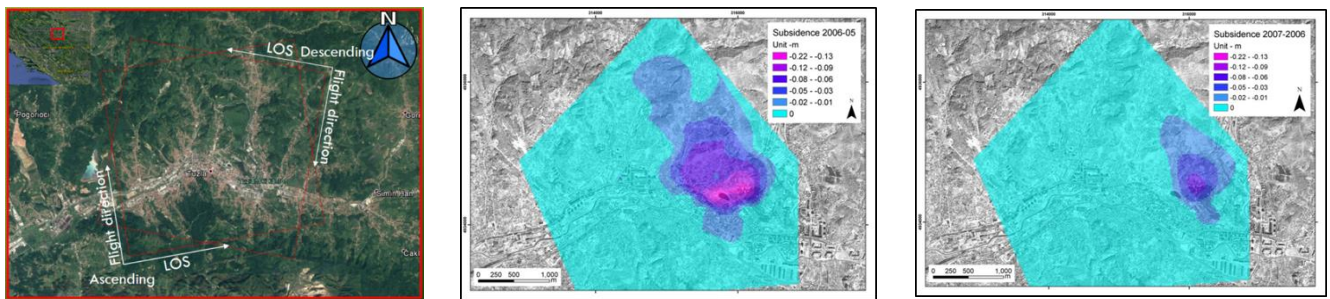
図-9 地盤沈下による被害状況調査⁶⁾

4. 地下岩塩採掘のための塩水汲み揚げによる地表沈下—Tuzla (Bosnia & Herzegovina) の例⁷⁾

DInSAR 解析の有用性を示す事例をもう一つ紹介する。現場は、Bosnia & Herzegovina の Tuzla 市であり（図-10 参照），この地域では塩鉱業の発展に伴った地下岩塩の採掘によって地盤沈下が発生している。これまで、長年にわたり測量手法で、また、2003-2008 年には、GPS を用いて沈下計測が行われた¹⁰⁾。2008 年時点では、場所によっては m なお、年 10 mm 以上の沈下が進行していた。なお、塩水汲み揚げはおおむね 2007 年に終了している。一方、最近の計測結果は公表されていないので、現在の沈下状況を知るために、SBAS DInSAR 技術を行った。SAR は Sentinel1-A と B を用いた。

図-11 は、DInSAR によって得られた 2014 年 10 月 21 日～2017 年 10 月 23 日にかけての地表面変位分布である。用いた SAR のデータ数は 111 である。図中の色のついていない部分は、結果が得られていないピクセルを意味する。地表の信号反射条件の変化や植生の影響で、干渉の良好度を表すコヒーレンスが低いことが原因と思われる。この結果から、Pannonia 付近で変位が大きいことがわかる。

図-12 に GPS 受信機の設置位置を含むピクセル (25m×25m) における DInSAR 解析による変位の時間推移を示す。塩水汲み揚げが終了した後も変位量が直線的に増加しており、場所により変位速度が異なる。今後も引き続きモニタリングが必要であり、DInSAR は経済的で継続性のある手法として期待される。



(a) トゥズラ市 (b) GPS による沈下計測 (2005-6 年)¹⁰⁾ (c) GPS による沈下計測 (2006-7 年)¹⁰⁾

図-10 トゥズラ市およびこれまでの沈下計測¹⁰⁾

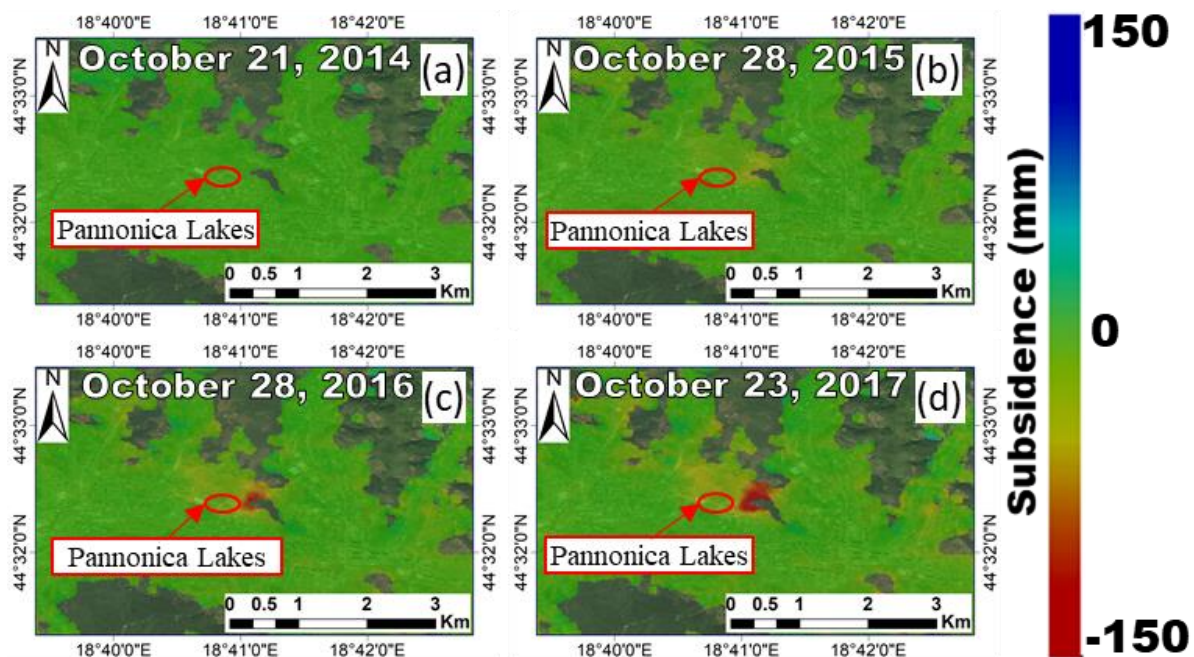
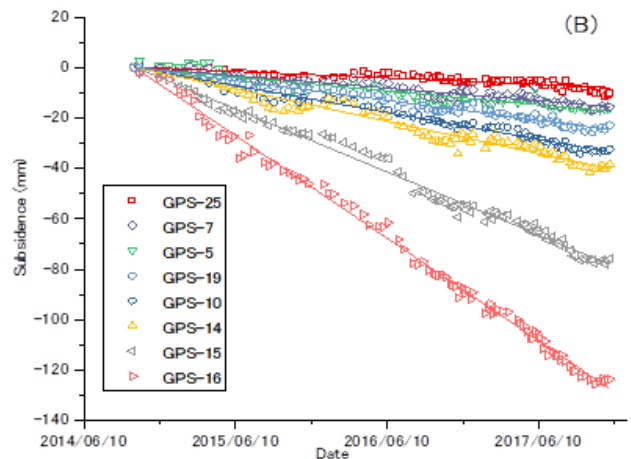
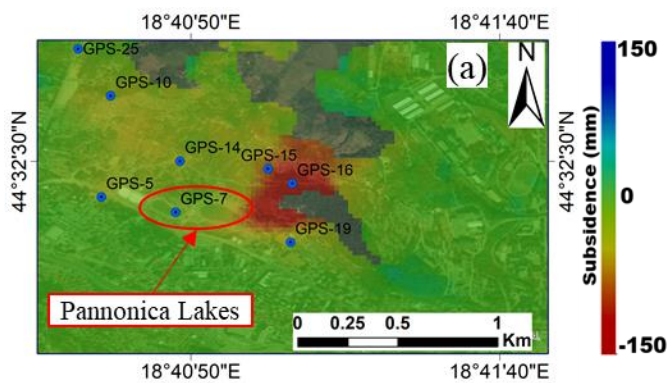


図-11 各時期に DInSAR によって得られた沈下分布⁷⁾

((a) 2014 年 10 月 21 日, (b) 2015 年 10 月 28 日, (c) 2016 年 10 月 28 日, (d) 2017 年 10 月 23 日)



(a) 変位が集中する付近の累積地表面沈下分布

(b) GPS 計測点における沈下の時系列推移

図-12 時系列 DInSR による解析結果 (2014 年 10 月 21 日～2017 年 10 月 23 日)

5. むすび

本研究では、DInSAR の長期的な地表面変位計測への適用性を検討することを目的として、2 つの地盤沈下の事例を取り上げた。いずれの事例においても、DInSAR を用いた連続的な変位モニタリングが有効であることが示された。

今後も継続した DInSAR によるモニタリングを継続するとともに、適用事例を拡大する予定である。

謝辞：

本研究を遂行するにあたり、スマランの地盤沈下事例においては、インドネシア地理情報庁 Abidin 長官、バンドン工科大学 Heri 博士に GPS 変位計測結果を提供いただいた。また、ディポネゴロ大学 Awardin 博士には現地調査の際に数々の便宜を図っていただいた。さらに、トゥズラの地盤沈下事例においては、トゥズラ大学の Zekan 教授、パニャルカ大学の Grujic 博士、リエカ大学の Vrkljan 名誉教授に現場にかかわる情報提供や多くの議論、また、現地調査についてご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

本研究で用いた一部の ALOS データは宇宙航空研究開発機構 (JAXA) から提供を受けた。ここに謝意を表する。なお、本研究の一部は、科学研究費助成基盤研究 (B) (16H03153) の援助を受けて遂行した。

参考文献

- 1) 大内和夫. リモートセンシングのための合成開口レーダーの基礎[第2版], 東京電機大学出版局, 2009.
- 2) 日本リモートセンシング学会編. 基礎からわかるリモートセンシング, 理工図書, 2011.
- 3) 国土地理院: 国土地理院の干渉 SAR, 閲覧日 2018-10-30, http://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/gsi_sar.html
- 4) A. Ferretti: Satellite InSAR Data, EAGE, 2014.
- 5) A. Pepe and F. Calò. A review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements, *Appl. Sci.*, 7, 1264; doi:10.3390/app7121264, 2017.
- 6) P. E. Yastika and N. Shimizu. Discussion on procedure of long-term land subsidence monitoring by Multi-temporal DInSAR, *Proc. of 2017 ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics (YSRM 2017)*, Jeju, Korea, pp.161-164, 2017.
- 7) I. N. S. Parwata, N. Shimizu, S. Zekan, B. Grujic, and I. Vrkljan. Application of DInSAR for Monitoring the Subsidence Induced by Salt Mining in Tuzla, Bosnia and Herzegovina, *10th Asian Rock Mechanics Symposium*, Singapore (in submission), 2018.
- 8) Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E., A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms, *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 40, 2375-2383, 2002.
- 9) Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T.P., Fukuda, Y., Land subsidence in coastal city of Semarang (Indonesia): Characteristics, impacts and causes. *Geomatics, Nat. Hazards Risk* 4, 226-240, 2013.
- 10) Mancini, F., Stecchi, F., Zanni, M. and Gabbianelli, G., Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla (Bosnia and Herzegovina), *Environmental Geology*, 58, 381-389, 2009.