干渉SARを活用した効率的な水準測量の実施へ向けた取り組み
Approach to Efficient Leveling by Using InSAR

測地部　森下　遊・鈴木　啓・雨貝知美・唐沢正夫
Geodetic Department
Yu MORISHITA, Akira SUZUKI, Tomomi AMAGAI and Masao KARASAWA
近畿地方測量部　藤原みどり
Kinki Regional Survey Department　Midori FUJIWARA

要　旨

国土地理院は，陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) に搭載されているＬバンド合成開口レーダー（PALSAR）の観測データを用いて，SAR 干渉解析を定常的に実施している．対象とする現象は，主に地震，火山，地盤沈下，地すべりであり，これまでに数多くの変動が検出されている．

地盤沈下に関しては，干渉SARを活用した効率的な水準測量の実施が期待されている．今回，水準測量が実施されていなかった地域において，干渉 SAR によって地盤沈下が検出された．そこで実証実験として，その干渉SARの結果を参考にして効率の良い水準路線を選定するという初めての試みを行い，当該地域で継続して水準測量とSAR干渉解析を実施した．その結果，少数の水準点の配点で詳細な変動を把握することができ，効率的な水準測量の実施に成功した．

また，干渉SARにおいて，複数の解析結果を平均するスタッキングという手法を用いることにより，ノイズの影響が軽減され，沈下量が小さくこれまで検出が困難であった地盤沈下も検出できる可能性があることがわかった．

今回の実証実験における水準測量の実施方法は，今後の地盤沈下監視のための水準測量におけるモデルケースとなるであろう．

１．はじめに

SAR（合成開口レーダー）は，分解能の高いマイクロ波レーダーであり，地表の対象物からのレーダー反射波の強度に加えて，反射波の位相情報を得ることができる．干渉SARとは，このレーダー観測を地表の同一地点に対して２回以上実施し，それらの位相差をとることによって，観測の間に発生した地表の変動量を面的に計測することのできるリモートセンシング技術である．

国土地理院は，基本測量に関する長期計画に基づき，2006 年 10 月から定常運用が開始された陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) のＬバンド合成開口レーダー（PALSAR）を用いて，高精度地盤変動測量を実施している．この高精度地盤変動測量では，地盤変動の継続的な監視を目的として，全国の地盤沈下，火山及び地すべり地域（平成 21 年度は計 54 地域）を定常的に解析し，その結果をHP（http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/result/result.html）で公開している．

また，研究開発基本計画（平成 21 年６月策定）に基づき，水準測量の効率的な実施に資するため，干渉SARにより面的かつ効率的に地盤沈下を把握するための研究開発を行っている．干渉SARによる地盤沈下検出事例は，1992 年から 1998 年まで運用されていた「ふよう１号」(JERS-1) のデータからも数多く報告されている（藤原ほか，2005）．さらに，干渉SAR と水準測量の結果の比較も行われており，高い相関が得られている（鈴木ほか，2008）．

今回は，実証実験として，実際に干渉SARの結果を参考に水準路線を選定し，効率的な水準測量の実施を試みた．地盤沈下監視のための水準測量への直接的な干渉SARの活用というのは，初めての試みである．

また，干渉SARの精度向上のために，スタッキングという手法を用い，水準測量の結果との比較を行い，その手法の有効性について検証した．

本稿では，まず地盤沈下監視への干渉SARの具体的な活用方法について述べる．次に，今回実施した効率的な水準測量の実証実験と干渉SARの結果について述べる．さらに，干渉SARの精度向上手法の検討について述べる．最後に，まとめと今後の課題について述べる．

２．地盤沈下監視への干渉SARの活用

２．１　地盤沈下

地盤沈下の発生原因は，地下水のくみ上げや天然ガスの採取など人為的なものであることが多く，一度沈下してしまうと元に戻ることはほとんどない．地盤沈下が進行すると，洪水や高潮による浸水被害の増大や，建物や路面，ライフライン等の破損を引き起こすことがある．沈下のスピードが遅いため，被害が大きくなるまで気づきにくく，原因を取り除いても即座に沈下を止めることは困難な現象である．

これらのことから，地盤沈下が発生している地域

を早期に特定し，継続的な監視・調査を行うことによってその原因を特定し，被害が大きくなる前に対策を講じることが重要である．

２．２　水準測量による地盤沈下監視

地盤沈下の発生状況を把握する手段として実施されているのが，国及び地方公共団体による水準測量である．平成20年度には，地盤沈下監視のための水準測量が22都道府県31地域で実施され，その総延長は10,285kmであった（環境省，2009）．

水準測量は,上下変動の計測精度が数mmと非常に高いため，沈下量を精密に計測するという点では，今のところ代替する手段はない．しかし，水準点における上下変動しか検出できないため，水準点が付近にない場合には地盤沈下を見逃してしまう可能性がある．さらに，実施には多大な労力・費用を要するため，日本全国の地盤沈下地域を高密度・高頻度で監視することは困難である．そのため，一部地方公共団体では，費用対効果を考慮して，広範囲を面的に観測可能な人工衛星のデータの活用を検討するなど,人工衛星による監視に期待が寄せられている．

２．３　干渉SARを活用した地盤沈下監視

干渉SARには，地盤沈下を監視する上で二つの大きな利点がある．一つ目は，面的に変動を把握できることである．１回の観測で幅約70kmの範囲を網羅することができるため，変動の中心や範囲を容易に推定することができる．二つ目は，地上に観測機器が不要なことである．人工衛星が観測したデータを解析するだけで変動量を得られるため，水準測量に比べて少ない労力で高頻度な監視が行える．

しかし，干渉SARにも欠点がある．最も大きな欠点は，計測精度である．大気をはじめとする様々な要因によるノイズの影響により，現状では単一のSAR干渉解析の計測精度は数cmにとどまっている．そのため，高精度な監視という点では水準測量には及ばない．

このように，干渉SARと水準測量のそれぞれに利点と欠点が存在するが，それらは相互に補える関係となっている（表－１）．よって，まず干渉SARで面的に変動の有無や範囲を把握し，その情報を参考にして水準測量を実施し，高精度な変動量を得る，といったような互いの利点を生かした効率的な地盤沈下の監視を行うことができる（図－１）．

３．津軽平野における実証実験

３．１　干渉SARによって検出された地盤沈下

2006年４月27日と2007年４月30日のALOS/PALSARの観測データを用いて解析を行ったところ，津軽平野の一部で約２km四方の地盤沈下が検出された（図－２）．最大の沈下量は４～５cmであり，原因は融雪のための地下水くみ上げと考えられる．しかし，現地において目立った被害は無く，青森県（2009）によると，「津軽平野においては，（中略）微小な変動にとどまっています」とされている．これは，津軽平野において水準測量は行われていたが，この地盤沈下地域は観測しておらず，この地盤沈下は見逃されていたためである．

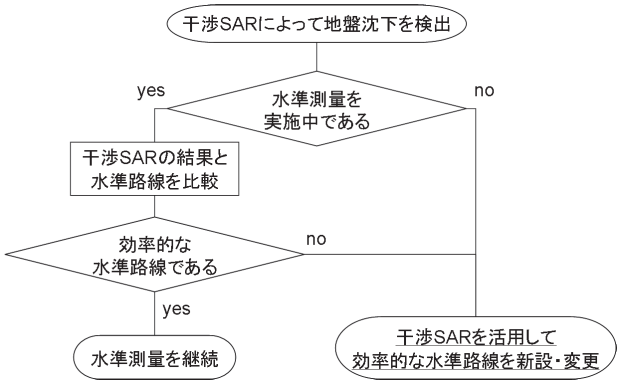
そこで，同地域において干渉SARの結果を参考に簡易な水準路線を選定し，2007年11月，2008年４月，11月及び2009年５月に水準測量を実施した．また，結果の比較のために，水準測量実施日と同時期におけるALOS/PALSARの観測要求を提出した．そして，水準測量と干渉SARによって得られた結果の比較を行った．

３．２　水準測量の実施

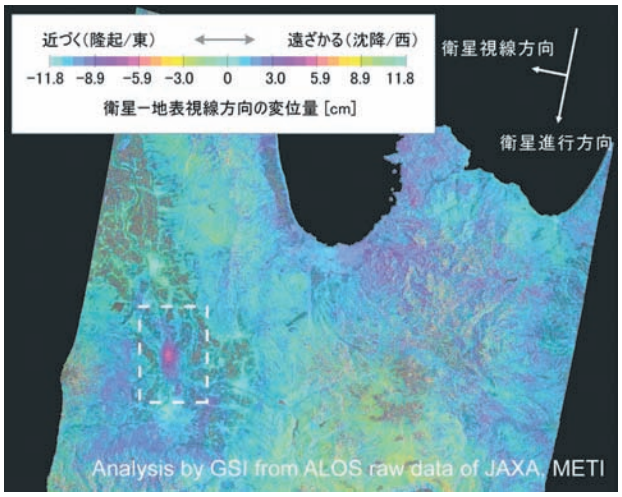
水準路線は，干渉画像からは沈下が認められない場所にある一等水準点5951を始点とし,沈下域の中心である仮②を通過し，沈下が認められない地点である仮⑤を終点とした（図－３）．沈下を詳細に把握するため，沈下の中心付近の仮①～仮②～仮③の間隔を約１km程度とし，密に配点した．このような水準路線の選定は，干渉SARによる面的な情報があって初めて可能になることである．

表－１　干渉SARと水準測量の利点・欠点

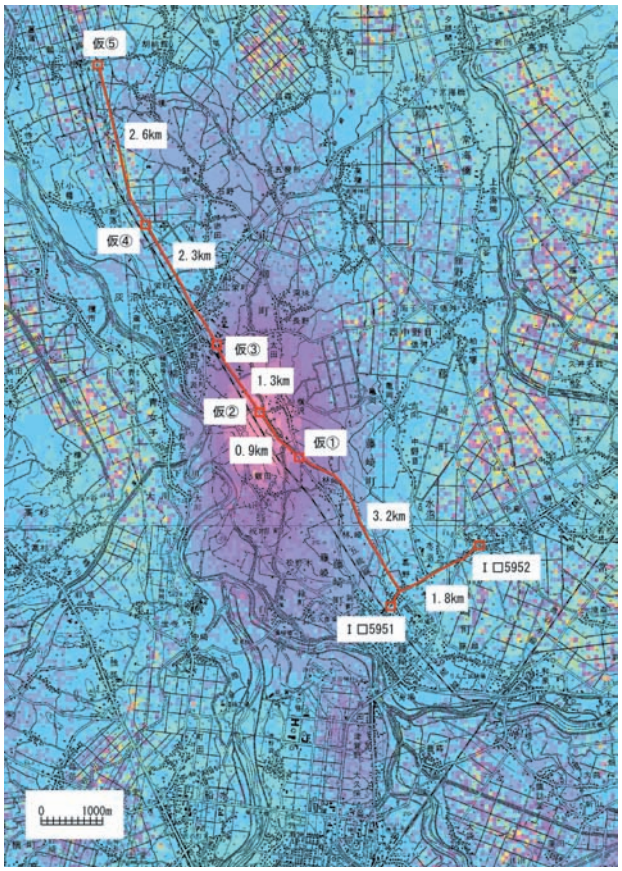
	干渉SAR	水準測量
計測精度	～数cm	～数mm
計算される変動量	面状（幅約70km）	点（線）状
観測頻度	46日回帰 最大８回/年	標準１回/年
地上の観測機器	不要	要



図－１　干渉SARを活用した効率的な水準測量の実施手順例



図－２　津軽平野における 2006 年 4 月 27 日と 2007 年 4 月 30 日のデータの干渉画像．図中の白破線枠内（図－３に拡大図）で衛星から遠ざかる向きの変動が見られる．



図－３　図－２の拡大図と水準路線

表－２　水準測量と干渉 SAR の観測日

			短期	長期
水準測量		観測日	2007/11/14 2008/04/22	2007/11/14 2009/05/26
		間隔日数	160 日	559 日
干渉 SAR	北行	観測日	2007/06/21 2008/06/23	2007/12/22 2009/06/26
		間隔日数	368 日	552 日
	南行	観測日	2007/09/15 2008/05/02	2007/11/17 2009/05/22
		間隔日数	230 日	552 日

2008 年 11 月の実施においては，作業中の激しい降雪及び路線上の積雪によって，十分な精度を持った結果を得られなかった．また，同時期に予定されていた ALOS/PALSAR の観測が校正検証のため急遽中止となった．これらのことから，水準測量と干渉 SAR の結果を比較することができないため，以下では 2007 年 11 月，2008 年４月及び 2009 年５月の結果のみを用いる．

３回の水準測量により，2007 年 11 月～2008 年４月の変動（短期間）と，2007 年 11 月～2009 年５月の変動（長期間）を計算した．不動点は一等水準点 5951 とした．

３．３　SAR 干渉解析

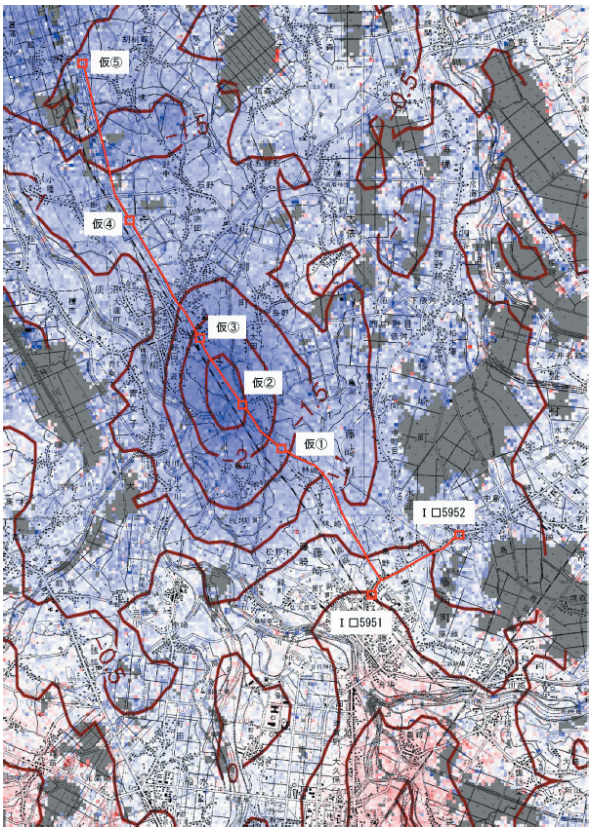
水準測量との比較のため，水準測量実施日に近い観測日のデータを用いて，短期間と長期間の２期間の解析を，２方向それぞれにおいて行った（表－２）．沈下速度を一定と仮定し，水準測量と間隔日数を合わせるように，解析によって得られた変動量に対して間隔日数に応じた係数を乗算した．そして，２方向の結果を合成する 2.5 次元解析（Fujiwara et al., 2000）を行い，上下方向の変動量を分離した．水準測量と同様に，不動点を一等水準点 5951 とした．

３．４　水準測量と干渉 SAR の結果の比較

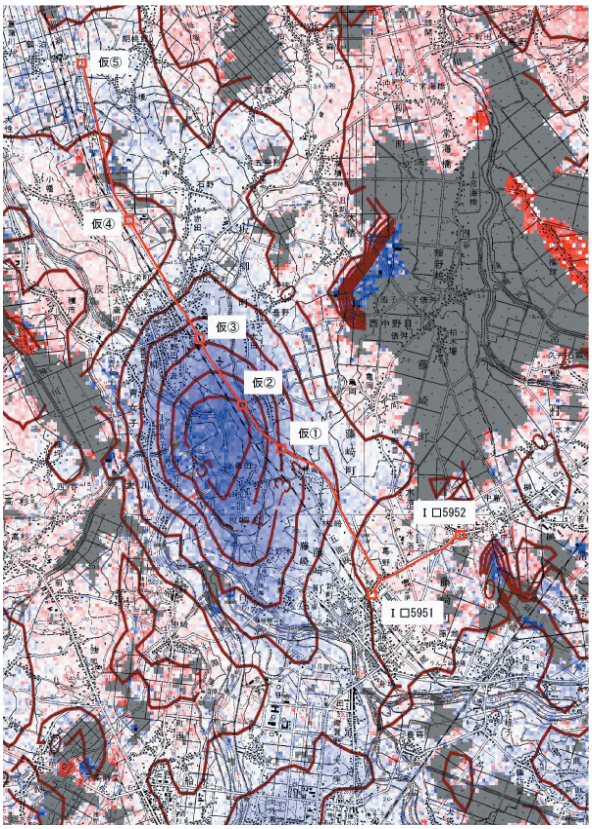
干渉 SAR で検出された地盤沈下域を縦断するように水準測量が実施されており，地盤沈下監視のためには最も効率の良い水準路線である（図－４，５）．変動量の比較では，地盤沈下の進行が水準測量，干渉 SAR 共に捉えられており，沈下の傾向や中心の位置は良く一致している（図－６）．水準測量と干渉 SAR の変動量の差の RMS は，短期間の比較で 0.9cm，長期間の比較で 1.4cm であり，干渉 SAR の計測精度の範囲内であるといえる．

３．５　実証実験のまとめ

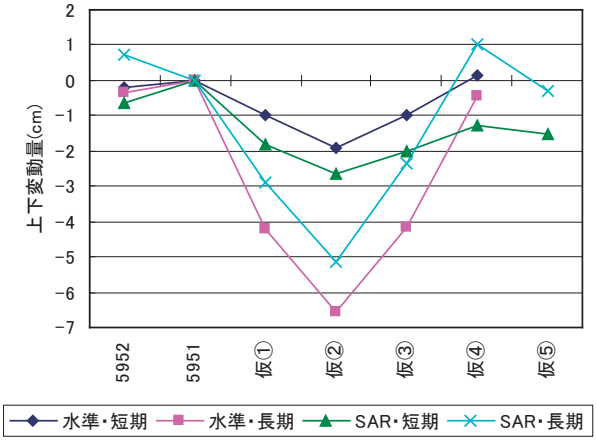
干渉 SAR で検出された地盤沈下地域において，干



図－４　短期間の干渉 SAR の結果と水準路線．茶線は等変動量線，数字はその等変動量線における変動量．灰色の部分は，干渉が悪く，変動量が得られなかった．



図－５　長期間の干渉 SAR の結果と水準路線



図－６　水準測量と干渉 SAR の上下変動量の比較．2007 年４月の水準測量では仮⑤を観測しなかったため，変動量が計算できなかった．

渉 SAR の結果を参考にして水準路線を選定するということを初めて試みた．水準測量を実施した結果，地盤沈下の進行を効率良く，高精度に捉え，干渉 SAR の結果とも整合的であった．

このことから，干渉 SAR を活用した効率的な水準測量の実施に成功したといえる．

４．干渉 SAR の精度向上手法の検討

４．１　スタッキング

３．の結果から，干渉 SAR を活用して効率的な水準測量が実施できることが証明された．しかし，それぞれから得られた変動量の間には cm オーダーの差があるため，それを超える変動がないと精度的に干渉 SAR で捉えるのは困難であるといえる．近年は様々な対策によって全国的に地盤沈下が抑制傾向にあり，年間の沈下量が１cm を超えるものは多くない．より長期間の解析であれば累積沈下量が大きくなるが，時間の経過と共に干渉性も低下するので，検出できない可能性もある．このままでは，検出できる地域が，ある程度変動の大きい地域に限られてしまう．

この精度の問題を解決する手法の一つとして，スタッキングが挙げられる．スタッキングとは，複数の SAR 干渉解析の結果を足し合わせ，期間の合計で割ることで，変動速度を求めるものである．複数のデータを足し合わせることで，大気等の時間的にランダムな誤差が打ち消され，継続的に発生している変動のみが残るのである．

スタッキングは，複数の解析の期間すべてにおいて，検出したい変動の速度を一定と仮定する．そのため，火山の膨張・収縮や地すべりのように，時間と共に変動速度が顕著に変化する現象に対して適用しても，この手法は効果を発揮しないおそれがある．

表－３　スタッキングに用いた解析データ

	マスター観測日	スレーブ観測日
北行	2007/06/21	2008/06/23
	2007/09/21	2009/09/26
	2007/12/22	2008/06/23
	2008/06/23	2009/06/26
南行	2006/04/24	2007/04/30
	2006/07/28	2007/09/15
	2006/09/12	2008/09/17
	2007/09/15	2009/09/20

しかし地盤沈下は，原因を取り除いても即座に沈下を止めることは困難であり，ある程度継続して発生する現象である．季節毎に沈下速度が異なる場合もあるが，長期的には沈下の傾向を示す．このことから，スタッキングは地盤沈下に適した手法であるといえる．

スタッキングにおいて重要な要素の一つが，データ量である．独立したデータの数が多いほど，より効果的な誤差の軽減が期待できる．これまでは当該地域における ALOS/PALSAR の観測データ量が十分ではなかったが，定常運用期間が３年を超え，ある程度のデータが蓄積されたことで，この手法の適用が可能となった．

今回は，２方向それぞれ４ペアずつの解析結果を用いてスタッキングを行い，１年間の変動速度を求めた（表－３）．得られた２方向の結果を用いて 2.5 次元解析を行い，上下方向の変動速度を分離した．

水準測量に関しては，３回の観測結果から回帰直線を求めることで，上下方向の変動速度を推定した．

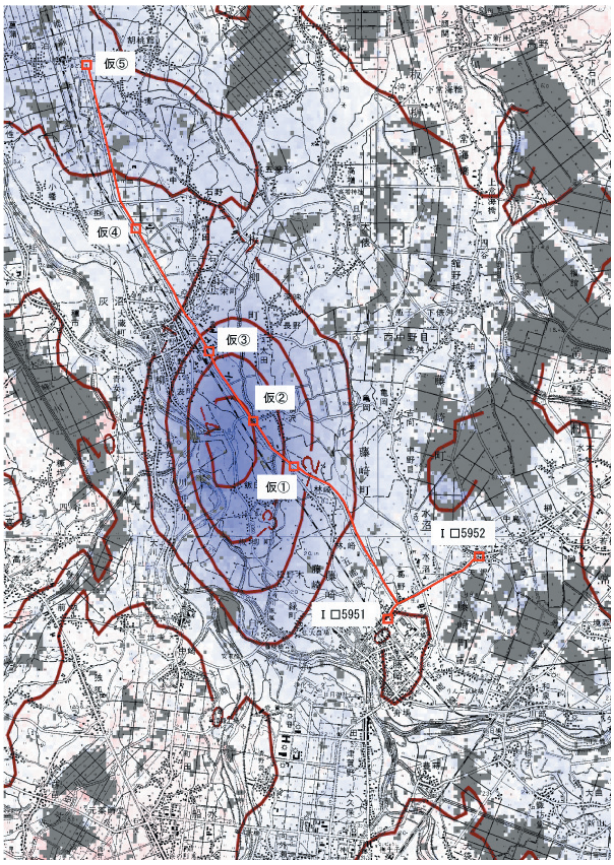
４．２　スタッキングの結果

図－４，５と図－７を比較すると，図－７の方が地盤沈下域以外の等変動量線が減少している．このことから，スタッキングによりノイズが軽減され，地盤沈下のみが強調されたといえる．変動速度の比較でも，水準測量と干渉 SAR の結果は良く一致している（図－８）．両者の差の RMS は 0.3mm であり，図－６に比べ大きく精度が向上したといえる．

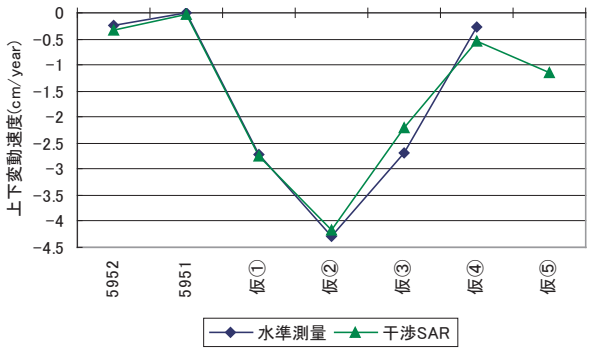
この結果から，個々の解析の精度が数 cm の干渉 SAR でも，スタッキングを施すことによって，これまで検出できなかった地盤沈下も検出できる可能性があるといえる．

５．まとめと今後の課題

干渉 SAR を参考に水準路線を選定し，水準測量を実施した結果，水準測量と干渉 SAR の両方で地盤沈下の進行が検出され，少数の配点で地盤沈下を詳細に監視することができた．このことから，干渉 SAR



図－７　干渉 SAR のスタッキングの結果と水準路線．等変動量線の数字は，１年間の上下変動速度



図－８　水準測量と干渉 SAR の上下変動速度の比較

を活用した効率的な水準測量の実施が有効であることが証明された．

また，スタッキングによるノイズ軽減により，干渉 SAR で捉えるのが困難と思われていた沈下速度の小さい地盤沈下を検出することができる可能性も示せた．

現時点では，今回の例で示した津軽平野ほど明瞭な地盤沈下が検出された地域は少ないため，すぐに日本全国で効率的な水準測量を実施することはできない．しかし，ALOS/PALSAR データのさらなる蓄積と，本稿で検討したスタッキングをはじめとする精

度向上手法によって，より多くの地盤沈下が検出できるようになるであろう．今後は，スタッキングの適用地域を拡大するなどして，地盤沈下検出事例を全国に拡大し，干渉SARを活用した効率的な水準測量の実施事例を増やしていく必要がある．

謝　辞

ここで使用した「だいち」のPALSARデータの所有権は，宇宙航空研究開発機構及び経済産業省にあります．また，これらのデータは，宇宙航空研究開発機構との共同研究協定に基づいて，提供を受けています．この場を借りて，御礼申し上げます．

参 考 文 献

青森県（2009）：平成20年度版環境白書，http://www.pref.aomori.lg.jp/nature/kankyo/20kankyouhakusho.html（accessed 10 Sep. 2010）.

藤原智，仲井博之，飛田幹男（2005）：干渉SARによる全国の地盤沈下検出に向けて，国土地理院時報，108，11-19，http://www.gsi.go.jp/common/000024852.pdf（accessed 10 Sep. 2010）.

Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa and M. Tobita (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, Geophysical Research Letters, 27, 2049-2052.

環境省（2009）：平成20年度　全国の地盤沈下地域の概況，http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=14628&hou_id=11834（accessed 10 Sep. 2010）.

鈴木啓，雨貝知美，藤原みどり，和田弘人，飛田幹男，矢来博司（2008）：衛星合成開口レーダーを用いた平成19年（2007年）新潟県中越沖地震に伴う地殻変動の検出，国土地理院時報，114，47-53，http://www.gsi.go.jp/common/000048559.pdf（accessed 10 Sep. 2010）.