干渉SARを活用した効率的な地盤沈下監視の実施へ向けた取り組み

鈴木　啓[1]・森下　遊[2]・雨貝　知美[3]・唐沢　正夫[1]

[1]国土地理院　測地部　宇宙測地課　（〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番）

[2]国土地理院　測地部　物理測地課　（〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番）

[3]国土地理院　測地部　計画課　（〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番）

国土地理院は，陸域観測技術衛星「だいち」に搭載されている PALSAR データを用いて，主に地震，火山，地盤沈下，地すべりを対象とした SAR 干渉解析を実施している．SAR 干渉解析の結果，津軽平野において地盤沈下（約 5 cm/year）が検出されたことから，SAR 干渉画像を活用して水準路線を選定し，継続的に水準測量と 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できたことから，干渉 SAR の有効性を示せた．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手法を用いることでノイズの影響が軽減され，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．

キーワード　干渉SAR，水準測量，地盤沈下監視，スタッキング

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，観測期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．

国土地理院では，1994 年以降，干渉 SAR を利用した定量的な地殻・地盤変動計測の実利用に向けて，解析手法やソフトウェアの研究開発を行ってきた [1) 2)]．この研究開発の結果，全国の地盤沈下，火山及び地すべり地域（2010 年度は計 66 地域）を対象とした定常的な SAR 干渉解析を実施し，その解析結果を HP（http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/result/result.html）で随時公開している．また，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．地盤沈下検出事例はこれまでも，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 [3)]．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 [4)]．今回は，SAR 干渉解析で検出された地盤沈下地域において水準路線を選定し，水準測量の実施を試みた．地盤沈下監視のため，直接的な干渉 SAR の活用は，初めての試みである．また，SAR 干渉解析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．

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．2008 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 10,285 km であった [5)]．

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，水準点が沈下域付近に設置されてい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，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，水準測量を軽減できる監視体制に期待が寄せられている．

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．干渉 SAR では，1 回の観測で幅約 70 km 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が得られるため，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，干渉 SAR と水準測量を組み合わせることで、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．

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
計測範囲	面状 （幅約 70 km）	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

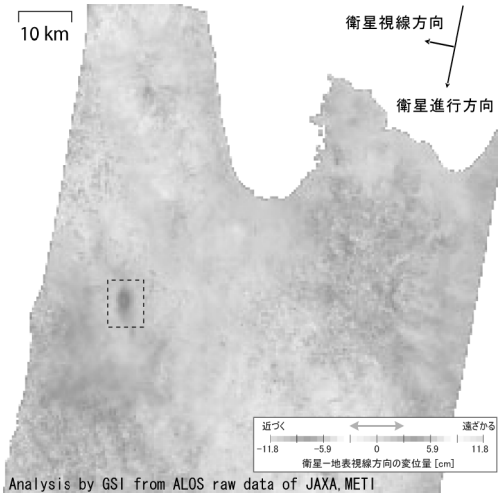

図-1 津軽平野における SAR 干渉画像．図中の黒破線枠内で衛星から遠ざかる向きの変動が見られる．

4. 津軽平野における実証実験

(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 2 km 四方の地盤沈下が検出された（**図-1**）．最大の沈下量は 4 ～ 5 cm 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 [6]．これは，津軽平野において水準測量は行われていたが，この地域は観測網から外れていたため，この地盤沈下は見逃されていた．

(2) 水準測量の実施

SAR 干渉解析の結果を参考に水準路線を選定し，2007 年 11 月，2008 年 4 月及び 2009 年 5 月に水準測量を実施した．水準路線は，SAR 干渉解析で沈下域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，沈下域が認められない地点である仮⑤を終点とした（**図-2**）．沈下域を詳細に把握するため，沈下域の中心付近（仮①～仮②～仮③）の間隔は約 1 km 程度の配点とした．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．

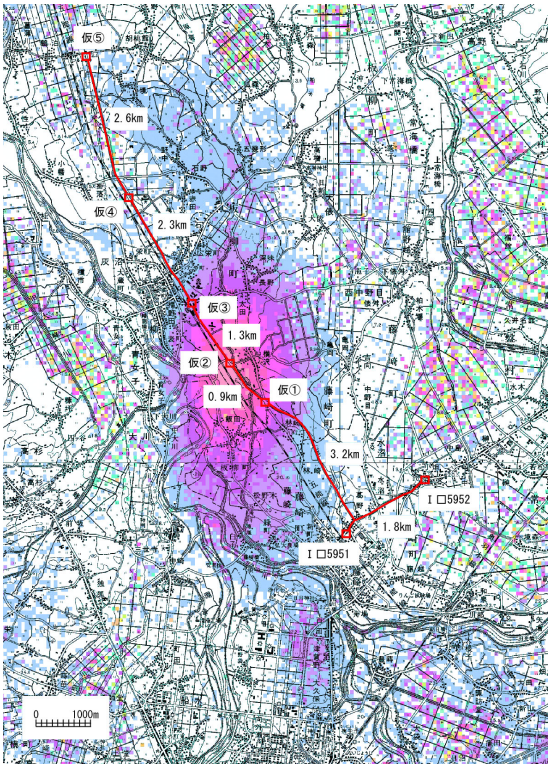

図-2 **図-1** の白破線周辺域の拡大図と水準路線

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

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．なお，不動点は一等水準点 5951 とした．

(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 ALOS/PALSAR 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（北行・南行軌道）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，SAR 干渉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 [7] を行い，衛星視線方向の変動量を上下方向の変動量へ分離した．なお，不動点は，水準測量と同様に一等水準点 5951 とした．

(4) 水準測量と干渉 SAR の結果の比較

地盤沈下の進行状況が水準測量，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-3, 図-4**）．水準測量と SAR 干渉解析の変動量の差の RMS は，短期間の比較で 0.9 cm，長期間の比較で 1.4 cm であり，干渉 SAR の計測精度の範囲内である．

5. 実証実験のまとめ

SAR 干渉解析で検出された地盤沈下地域において，SAR 干渉解析の結果を活用して水準路線を選定するということを初めて試みた．水準測量を継続的に実施した結果，地盤沈下の進行を高精度に捉え，SAR 干渉解析の結果とも整合的であった．

6. スタッキング

これまでの結果から，干渉 SAR を活用して効率的な

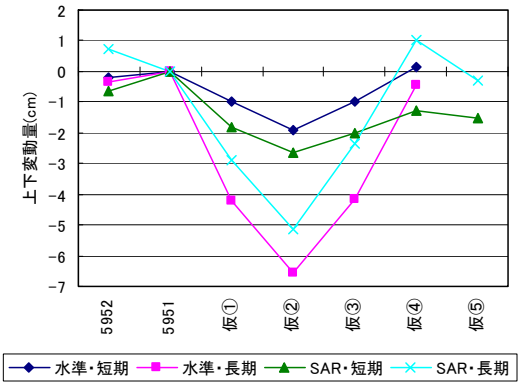

図-3 水準測量と干渉 SAR の上下変動量の比較．2007 年 4 月の水準測量では仮⑤を観測しなかったため，変動量が計算できなかった．

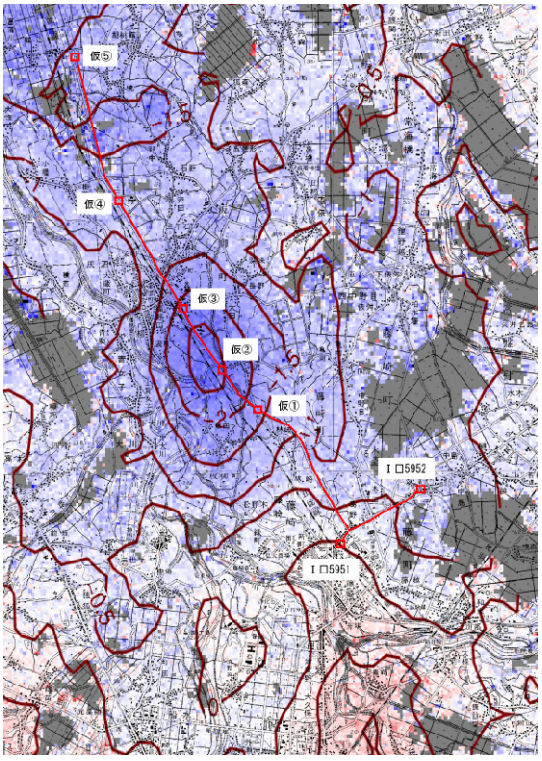

図-4 短期間の干渉 SAR の結果と水準路線．数字は等変動量線における変動量（cm）．

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，数 cm 以上の変動量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，全国的に地盤沈下が抑制傾向にあり，年間の沈下量が 1 cm を超える地域は多くない．長期間（数年）であれば累積沈下量が大きくなり，干渉 SAR でも検出可能と思われるが，時間の経過と共に干渉性も低下するため，検出できない可能性もある．よって，干渉 SAR を活用した効率的な地盤沈下を監視できる地域が，数 cm 以上の地域に限られてしまう．この問題を解決する手法の一

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

つとして，スタッキングが挙げられる．地盤沈下を監視できる地域が，数 cm 以上の地域に限られてしまう．こ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抽出できる手法である．よって，複数の解析結果を足し合わせた期間では，変動速度を一定と仮定する必要がある．地盤沈下は，季節毎に沈下速度が異なる場合もあるが，長期的には沈下速度が一定の傾向を示す．このことから，スタッキングは地盤沈下の検出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．独立したデータ数が多く，大気等によるノイズの影響が少ないデータを利用するほど，より効果的な誤差の軽減が期待できる．これまでは津軽平野における 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，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．

7. スタッキングの結果

図-4 と**図-5** を比較すると，**図-5** の方が変動を示す等変動量線が減少している．これは，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結果である．変動速度の比較でも，水準測量と SAR 干渉解析の結果は非常に良く一致している（**図-6**）．両者の差の RMS は 0.3 mm であり，**図-3** に比べ大きく精度が向上した．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．

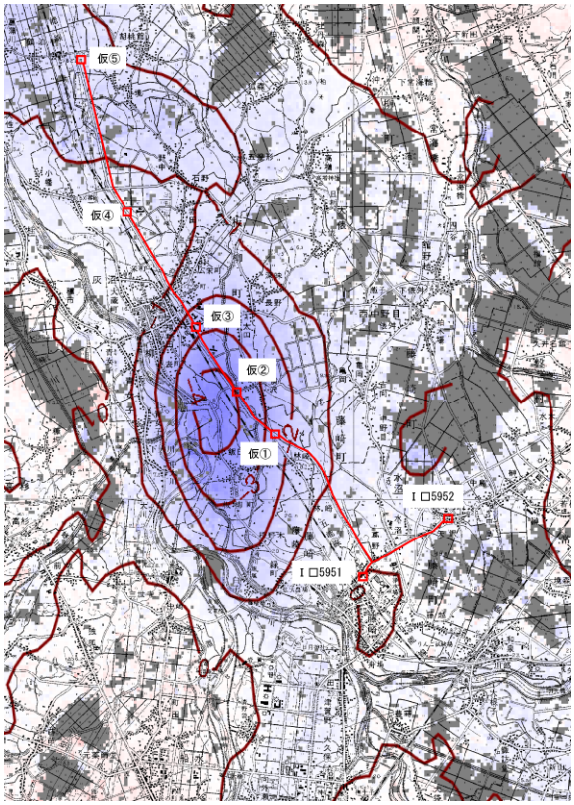

図-5 干渉 SAR のスタッキングの結果と水準路線．等変動量線の数字は，1 年間の上下変動速度（cm/year）

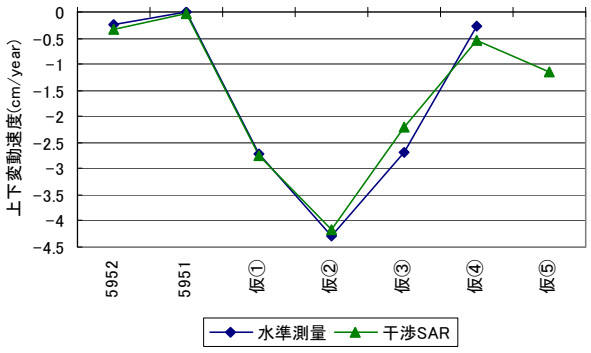

図-6 水準測量と干渉SARの上下変動速度の比較

8. 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，少数の水準点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 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，単一の SAR 干渉解析では捉えるのが困難と考えられていた沈下速度の小さい地盤沈下を検出する可能性を示すことができた.

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，早急に全国で干渉 SAR を組み合わせた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 データの更なる蓄積と，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，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．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．また，国土地理院企画部・宇宙測地課の皆様には，多大なるご助言を頂きました．この場を借りて，御礼申し上げます.

参考文献

1) 飛田幹男（2003）：合成開口レーダー干渉法の高度化と地殻変動解析への応用，測地学会誌，49，1-23.

2) 飛田幹男，宗包浩志，松坂茂，加藤敏，矢来博司，村上亮，藤原智，中川弘之，小澤拓（2005）：干渉合成開口レーダーの解析技術に関する研究，国土地理院時報，106，37-49.

3) 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.

4) 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.

5) 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 8 Dec. 2009）.

6) 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 8 Dec. 2009）.

7) 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.