

衛星画像を用いた広域地盤変動解析について

環境省 水・大気環境局 土壌環境課 地下水・地盤環境室
長面智志、 藤塚哲朗、 佐藤郁太郎

1. はじめに

(1) 調査の目的

近年、リモートセンシング（RS）技術の発展はめざましく、衛星画像を解析することによって、短時間での地盤変動や地上の水準点がない地域の地盤変動を高精度に把握することが可能となっている。広域的な地盤変動量の把握にこの技術を取り入れることは経済性からも期待されるが、適用条件等が整理されておらず、都道府県等による実施例はない。

本論文では、水準測量により地盤沈下の監視を行っている愛知県北東部において、衛星画像解析により地盤変動量を求め、地表面変動観測の精度や経済性などの特徴を水準測量成果と比較検討することにより、今後の衛星画像解析による広域地表面変動監視への適用可能性等を検討した結果について報告する。

(2) 検討内容

a) 衛星画像解析による地盤変動測量調査

水準測量により地盤沈下監視を行っている愛知県犬山市地域において、以下に示す条件で一定期間内の地盤変動量を求める。

- ・ 解析対象範囲：愛知県犬山市を中心とする南北約 16.5km・東西 23.5km=387.75km²
- ・ 解析精度：1mm 単位
- ・ 解析期間：平成 16 年 6 月 26 日 ～ 平成 18 年 12 月 25 日

b) 衛星画像解析による地盤変動測量結果の分析

① 解析精度整理

解析精度の分析を行い特徴を整理する。

② 衛星画像解析による特徴

衛星画像解析の特徴を水準測量の特徴と比較し、問題点・課題点を抽出する。

c) 地盤変動の確認

地盤変動の範囲、程度を整理する。

d) 地盤沈下の原因究明

解析期間①の結果から、地盤沈下の面的変化や季節変動について整理し地盤沈下の原因について考察する。

e) 衛星画像解析の水準測量の補完検討及び実用性検討

衛星画像解析による水準測量の欠測補完の可能性とその手法について検討する。また、上記の検討結果および各種資料より、衛星画像解析の精度、経済性、適用条件等の観点からメリット・デメリットを評価し、水準測量の代替としての実用化の可能性について検討する。

2. 解析手法（PSInSAR）について

ここで使用した地表面変動履歴観測の手法は、1992 年頃からヨーロッパや日本の人工衛星により取得さ

The Experimental Approach of the Regional Surface Deformation Using Satellite Radar Data

Satoshi Nagaomo

Office of Groundwater and Ground Environment, Environmental Management Bureau Ministry of the Environment

れている合成開口レーダ（SAR：Synthetic Aperture Radar）画像を使用し、変動履歴を 1992 年以降取得された SAR 画像を使用して過去の地表面変動履歴を算出する手法であり、国内においても多くの実績により精度と非接触の観測手法として建設プロジェクトや地震時の地盤変動並びに広域地盤沈下の観測に活用されつつある。

その観測手法は、イタリアにおいて開発され、EU の多くのプロジェクトでその偉力を発揮している。この技術は PSInSAR（Permanent Scatterers Interferometry SAR）と呼ばれ、そのアルゴリズムの合理性や精度検証、各種の防災技術への適用について多くの論文により報告されている。

永久散乱体(Permanent Scatterer)を用いたこの PSInSAR と呼ばれる干渉 SAR 解析の新技术は、一般には 30 枚以上の SAR データの時空間系列に対して、標高補正と変位場を未知パラメータとする位相モデルを当てはめて、逐次的な最小二乗法によって推定する手法である。従来の干渉 SAR 解析ではコヒーレンスの劣化のために捨てられた長基線データも無駄にせず、シグナルの検出を可能にする。また、数値モデルや GPS 等から得られる水蒸気データを用いずに、干渉 SAR における遅延ノイズを避けることも出来る。

PSInSAR では広域に面的地表面変動が捉えられるため、従来は地表面変動の計測対象となっていなかった場所での変動が見つかる可能性がある。局所的な変動、また事前に予測不能で水準測量や GPS での計測が実施されていない箇所における変動を発見することができる。たとえば都市部におけるトンネルなどの地下構造物建設による地盤沈下の発生・その影響範囲は PSInSAR 技術を用いて容易に計測可能である。

PS の取得点は、人工構造物や露岩などが主体である。人工構造物では、家屋、道路標識、鉄道標識、橋梁などである。取得できない場所の特徴は、植生の深い場所で反射波が弱いエリア及びコンクリートの平面、即ち滑走路やビルの屋上の平坦面である。これらは、衛星からの電波を衛星に向かって反射することなく、入射角度と同様の角度で衛星の反対側へ電波を反射するため、PS の取得は困難である。

PSInSAR の処理の概念図を図 2-1 に示す。干渉 SAR で行われている基線長補正は、ここではマスター画像に対するベースラインの補正を個々の画像に行うことにより、m 単位の補正が最初の段階の補正となる。この時点で地形による影響を衛星画像の DEM データから補正する。

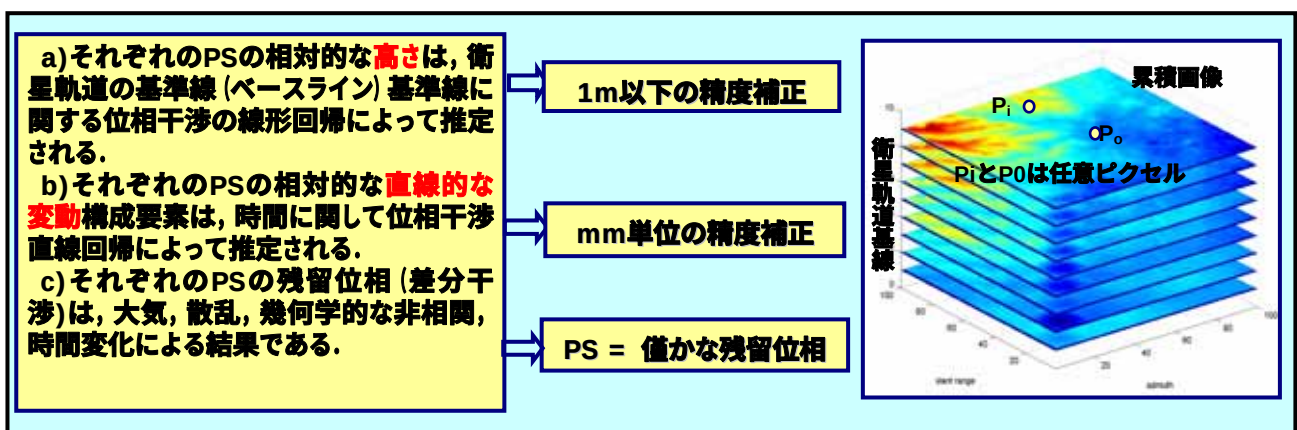


図 2-1 PSInSAR における幾何学補正ならびに画像処理の概念図

次のステップでは位相を線形モデルとし、この位相の量が非線形変動と大気位相項(大気・散乱の影響)およびノイズの3つの総和として求められることから、大気の補正フィルタを仮に取得した PS により作成し、各画像に含まれるノイズを除去する処理を行って、僅かな残留位相を求める。

3. 解析条件

解析に使用する衛星画像について、解析期間（平成 16 年 6 月 26 日～平成 18 年 12 月 25 日）内における 29 枚の画像を使用して水準測量結果と比較するものとする。

4. 水準測量による地盤変動の状況

愛知県独自の測量は1993年度から実施されており、**図4-1**はこの時点を初期値とする地盤変動量を示している。全体の測量成果が1cm以上の上下変動を示した年度が4回あり、平均的な変動量をどのように捉えるかが困難である。大きなスケールで見れば、図にはないが1974年以降については数cm単位の変動量はなく、愛知県での測量が実施された1993年度からは沈下曲線として収束傾向が見られる。しかし、平成11年度(1999年度)、平成17年度(2005年度)の広域の地盤沈下により、収束傾向が不明瞭になった。

図4-2には平成17年度の1cm以上沈下が生じた点を含む犬山市周辺域の水準測量成果と地質分布を示した。沈下の大きい箇所は解析領域の東側で、沖積層などの圧縮性の高い地盤が分布するエリアではない。

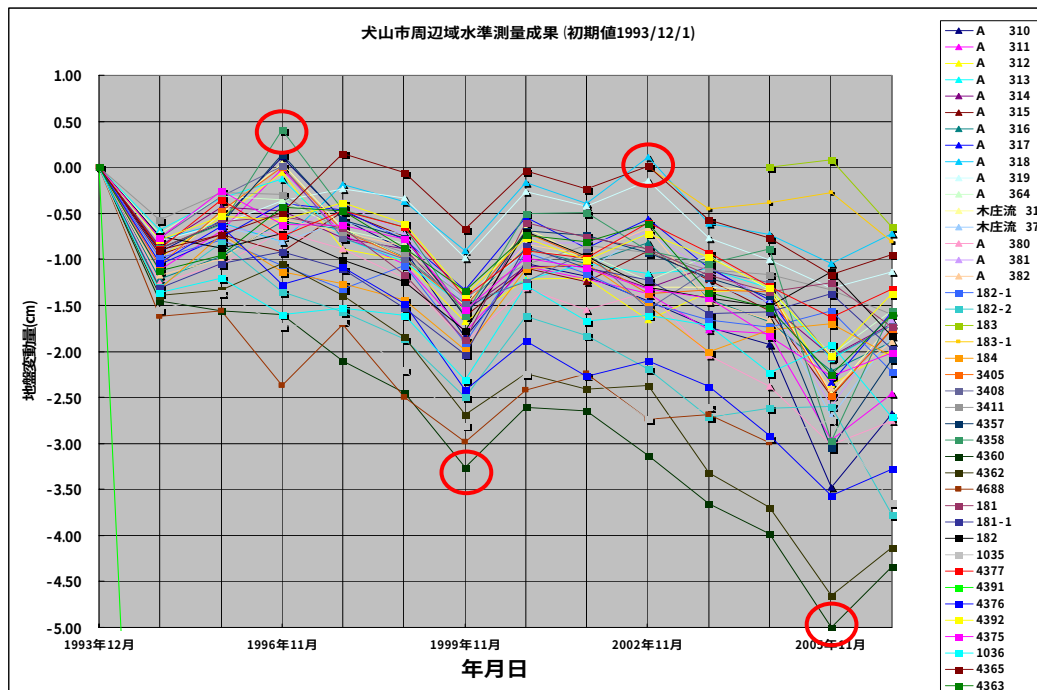


図4-1 1993年度を初期値とした過去14年間の水準測量成果

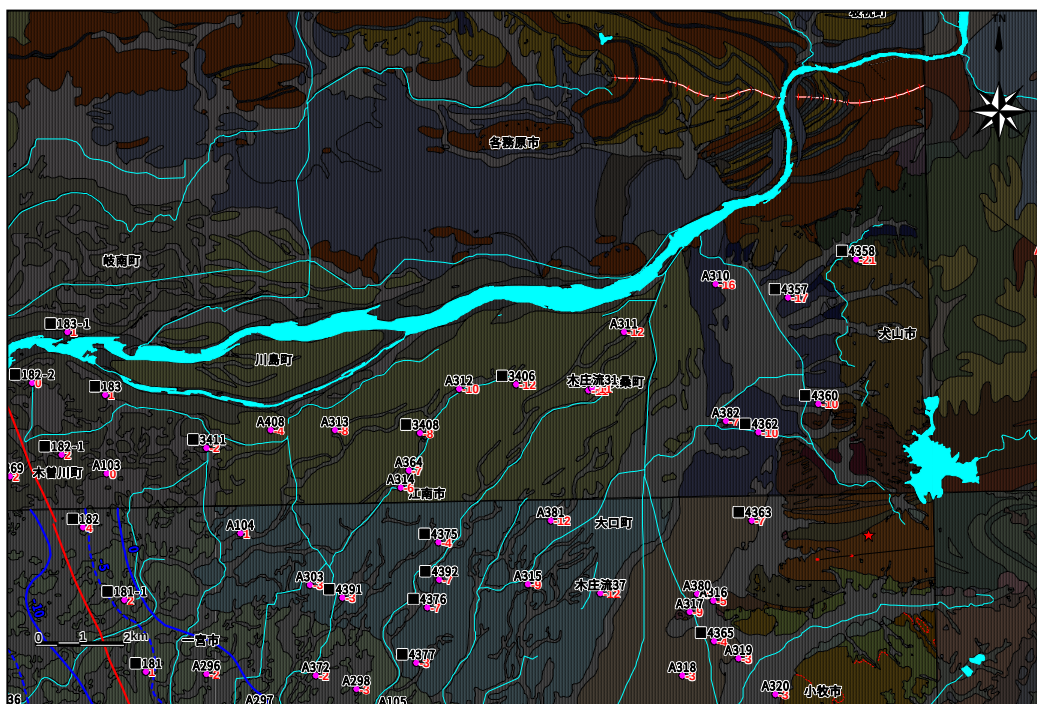


図4-2 水準測量成果と地質分布（青太線；旧海底面）

5. 水準測量と衛星画像による地盤変動の解析結果比較

衛星画像による解析結果と水準測量成果を年度ごとに検討することは、大きく変動が伴う測量成果が散見される中では十分な信頼性が得られないため、平均的な速度を求めて比較を行った。先に述べたように当該域では沈下の収束傾向がどのような位置づけにあるか、判断しがたいため、平均速度は1993年度を初期値とする13年間と最近5年間を求め、PSInSARによる平成16年6月26日から平成18年12月25日の期間の変動速度を比較した。その結果を図5-1に示す。

水準測量の平均値は、13年間の平均より、過去5年間の平均速度が大きい。単純に上昇量の多い1996年と2002年度の値が入らないためとも考えられるが、最近の平均速度が速くなっている可能性がある。

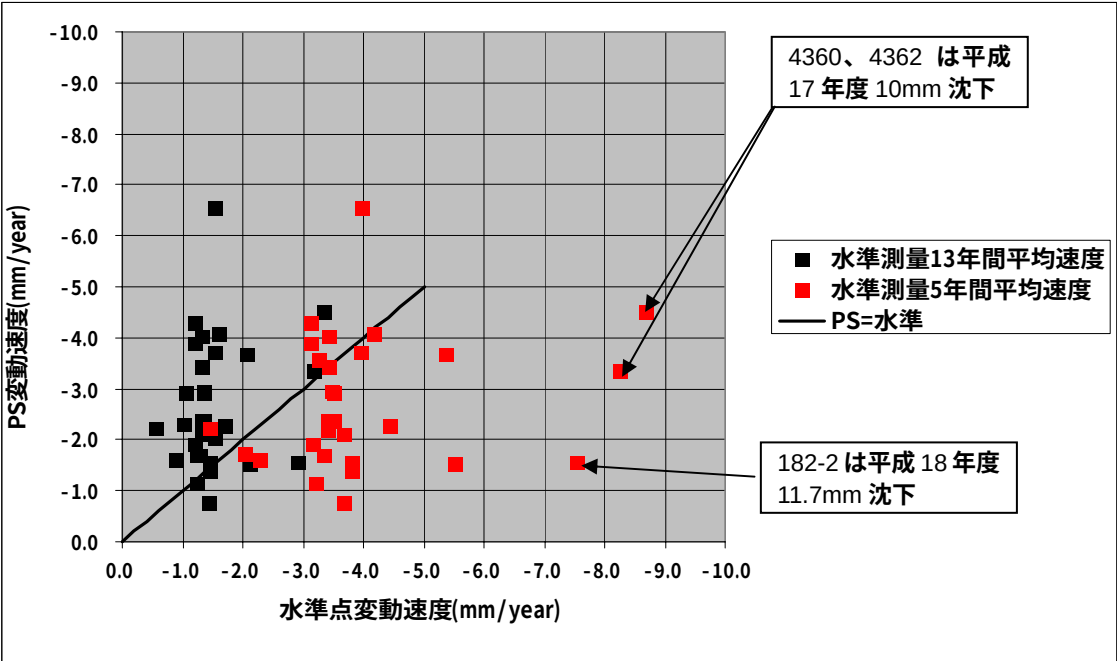


図5-1 水準測量点の変動速度とPS変動速度の相関

PSInSARによる変動速度が水準測量との相関性をもっているかという点に関しては、最近の13年間の変動速度の方が相関性は高いといえるが、水準測量成果と一致するかという点は明確ではない。

表5-1は、各点におけるPSInSARによる経時変化と水準測量による経時変化、並びに両変動速度(水準測量は1993年度を初期値とする累積値であり、平均速度は13年間で累積値を除いた)を示したものである。なお、各点の位置は、図5-2の変動速度分布上に示した。

表5-1 水準測量点の変動速度とPS変動速度一覧表

水準測量地点	5年間水準点変動速度	13年間水準点変動速度	PS変動速度	PCODE番号
A 310	-5.36	-2.06	-3.70	A5W00
A 312	-3.98	-1.53	-6.54	A7WAV
A 313	-3.42	-1.31	-4.01	A8GIQ
A 314	-3.40	-1.31	-2.20	A81PS
A 315	-3.52	-1.35	-2.94	BACZB
A 316	-3.80	-1.46	-1.40	A9XHO
A 317	-3.14	-1.21	-1.92	BAA8L
A 318	-1.44	-0.55	-2.23	BBG72
A 319	-2.28	-0.88	-1.61	BAN7Z
A 364	-3.12	-1.20	-3.90	A81G6
木庄流 31	-3.40	-1.31	-2.37	A7J40
木庄流 37	-3.68	-1.41	-2.11	BAB4Z
A 380	-5.52	-2.12	-1.51	A9XS4
A 381	-3.34	-1.28	-1.70	A9AE4
A 382	-3.80	-1.46	-1.55	A7IN6
182-1	-4.44	-1.71	-2.28	A9G0Q
182-2	-7.54	-2.90	-1.54	A8I2D
183	-3.25	-3.25	-3.58	A8H1M
183-1	-2.02	-2.02	-1.74	A7YOM
3405	-3.52	-1.35	-2.37	A7J40
3408	-3.44	-1.32	-3.43	A8FFP
3411	-3.20	-1.23	-1.17	A836P
4357	-4.16	-1.60	-4.10	A5VOB
4358	-3.12	-1.20	-4.29	A5ASG
4360	-8.68	-3.34	-4.52	A68YS
4362	-8.26	-3.17	-3.34	A7SHU
181	-3.48	-1.34	-2.96	BCT1N
181-1	-3.96	-1.52	-3.73	BBN2Y
182	-3.68	-1.41	-0.75	BAH4I
4377	-2.64	-1.01	-2.32	BBYGM
4392	-2.74	-1.05	-2.94	BAD3D
4375	-4.02	-1.55	-2.04	A90EH
4363	-3.20	-1.23	-1.72	A8W4H

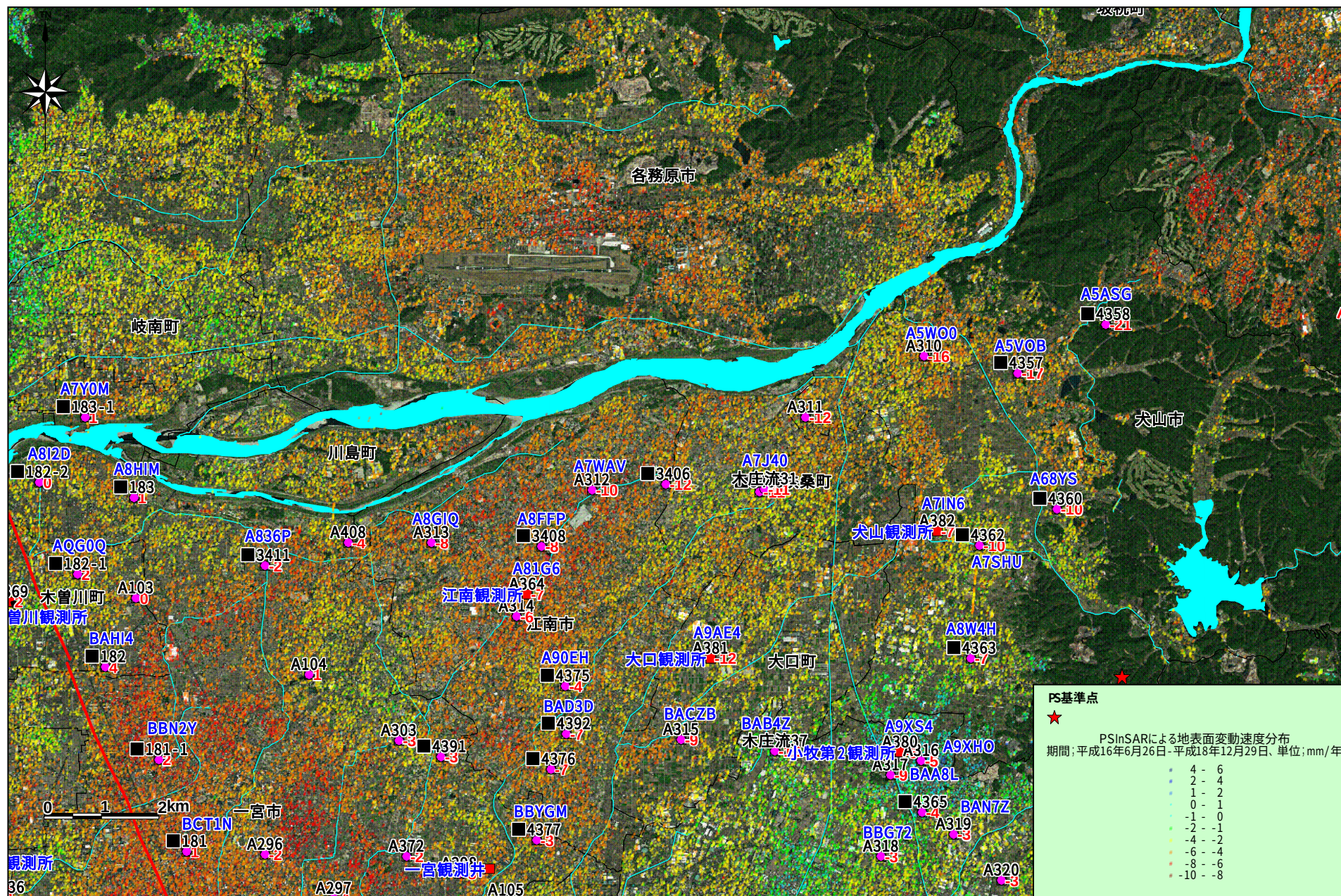


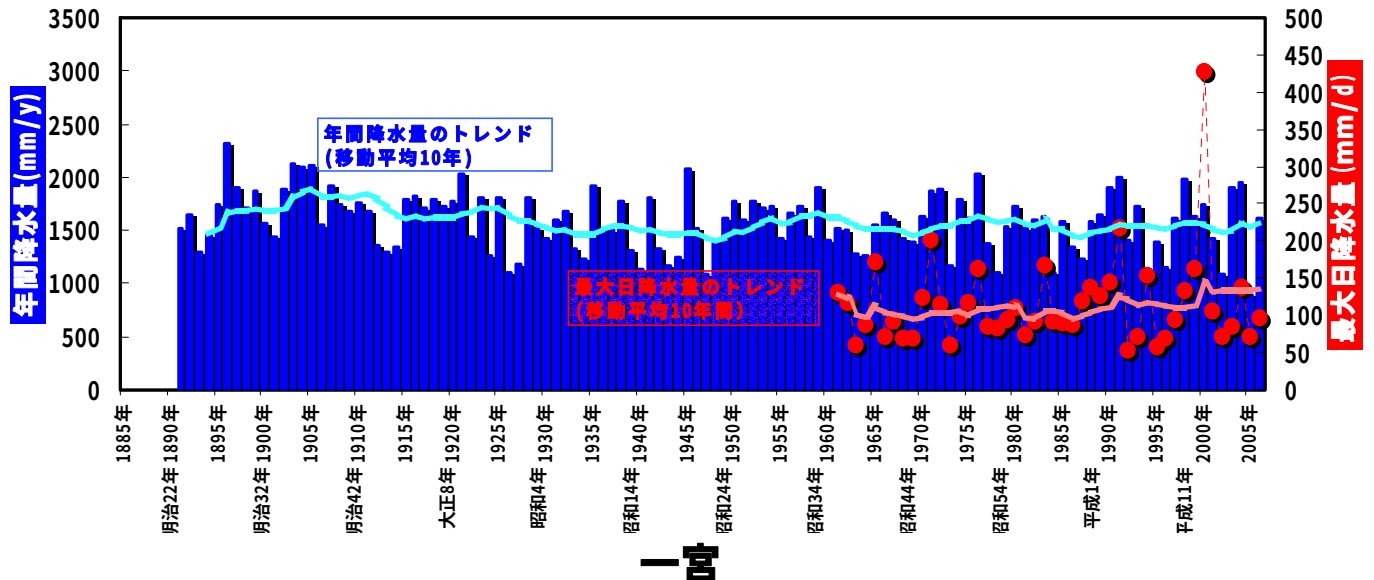
図5-2 水準点測量成果との比較を行ったPS点のコード番号 PS変動速度分布図

6 地盤沈下の原因究明

(1) 降水量

平成 17 年の年間降水量は特筆すべき渇水であることが図 6-1 の名古屋観測所の結果によって確認できる。犬山市地域に近い一宮観測所のアメダスの観測結果においても 1994 年以降、平成 6 年、平成 14 年および平成 17 年と頻繁である。

名古屋



一宮

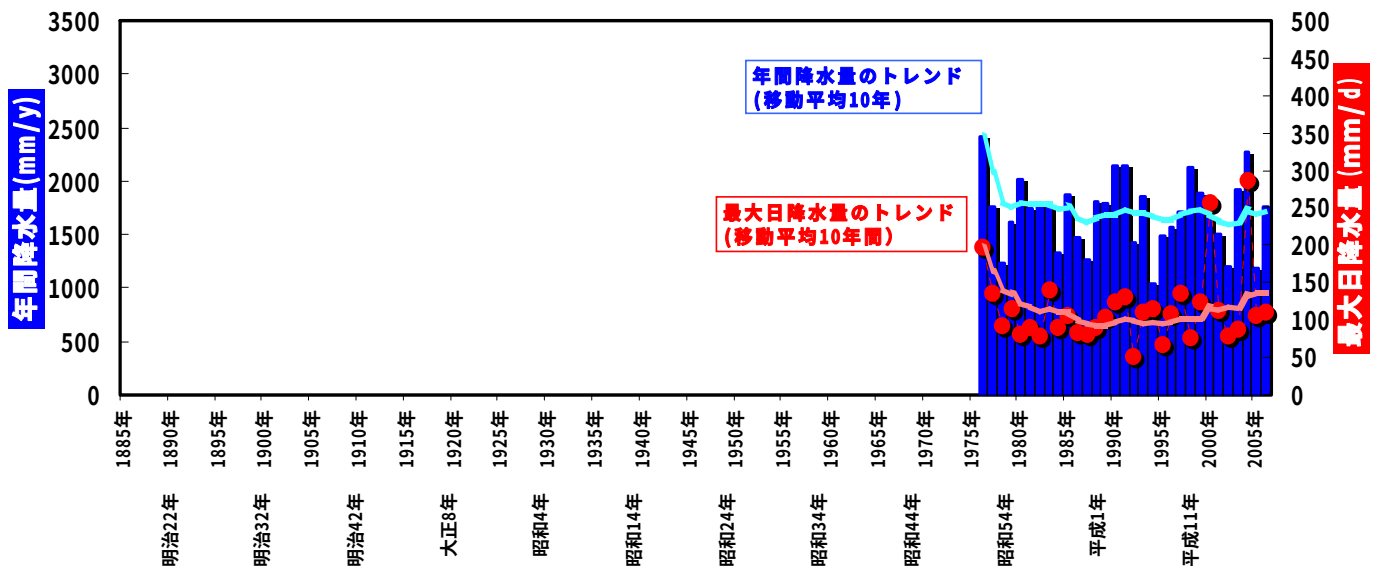


図 6-1 犬山市周辺地域の降水量変化

(2) 降水量と気温の長期的変動

都市部の開発が進み、地下水の浸透が被覆により低下する中で、昭和 49 年の地下水汲み上げ規制以降に急激に回復した地下水位も、最近では微小な回復あるいは平衡状態となっていたが、平成 6 年における異常気象による夏季の渇水では地盤沈下が生じた地域が名古屋市内で 42km² 発生した。

(3) 揚水量

犬山市周辺地域における揚水量については一宮市における使用量をもっとも多く、この三年間では大きな変化はない。しかし、使用量が一定であるということは、平成 17 年度のような降水量の少ない年に、地盤沈下が発生する可能性がある。

揚水を行っている施設の中で、昭和 59 年度からは犬山市でも地下水源を利用しており、全体の配水量の 25%程度を占めている。羽黒浄水場は水準点 A382 近傍、楽田浄水場は水準点 4363 近傍、平成 9 年に改良された城東浄水場は水準点 4357 に近接している。

江南市では下般若配水場（水準点 3406 近傍）で地下水が汲み上げられている。扶桑町でも日量 8,360t の地下水が汲み上げられているが、平成 25 年までに 6,800t/日の削減を目標にしている。

一宮市の地下水の回復は昭和 59 年から鈍化しており、上水道の地下水源利用の影響の可能性も考えられる。

(4) 原因に関するまとめ

a) 広域地盤沈下のメカニズム

広域地盤沈下の原因は、地下水を汲み上げることによって粘土層が収縮するために起こる、というのが一般的な考え方である。そのメカニズムは、地下水を汲み上げることにより地下水位が下がると、帯水層の水圧が低下するため、帯水層に接する粘土層に過剰間隙水圧が発生し、圧密が進行するというものである。

こうした圧密現象により発生した地盤沈下は、地下水の汲み上げを止め、地下水位が回復したとしても、ほとんど元に戻ることはない。

b) 渇水の影響

渇水年として濃尾平野で大きな沈下を生じた 1994 年（平成 6 年）には、犬山市周辺域の観測井で季節により 2m 以上の水頭差が観測されているが、沈下量は平成 17 年度の方が大きく、名古屋市市内での広域地盤沈下は発生していない。また、1999 年にも大きな沈下が発生しているが、この年は渇水年ではない。

現象が圧密で生じる場合にはリバウンドは考えにくいことや沈下の発生が 1999 年度のように必ずしも降雨量との関係で明確ではないことから、平成 17 年度の地盤沈下が渇水のみが原因ではないと考えられる。

c) 水収支

地盤変動観測の結果、広域に地表面沈下が発生している可能性があることや、水準測量成果でも、当該域の多くの点は変動速度を持っており、PS 点の変動速度との整合性していることは先に述べたとおりである。

ここで、先の地下水変動が昭和 59 年頃から回復がほぼ平衡していることや、地盤沈下が小さな速度ではあるが比較的明瞭に進行していることから、広域地盤沈下のメカニズムを水収支の面から考えてみる。

渇水年でなくても、渇水年であっても平均的に水準点の沈下が確認されている。上述のように地下水の回復と活用がバランスした状態にあるということは、昭和 30 年代から 40 年代に発生した地下水低下による圧密沈下が完全に収束した状態にない可能性がある。あるいは、過去に発生した粘土層内の過剰間隙水圧が地下水位とバランスするに到っていないとも言える。こうした仮説であれば、粘土層のサンプリングにより圧密特性や過剰間隙水圧の測定で容易に確認できる。

濃尾平野の広域の地下水盆を考えた場合、犬山市のように利水による季節変動が大きい場所では、水収支の上で地下水盆に供給される量と揚水される量がバランスし、1994 年のような異常気象による渇水では広域に地盤沈下が発生することになる。即ち、圧密の進行を抑制する地下水位が粘土層内に発生した過剰間隙水圧とバランスできなくなって沈下が進行するというメカニズムである。こうした量はこれまで、1cm

以上の沈下が発生した場合に広域の地盤沈下が発生したと言われてきているが、異常気象でない場合にも1cm以下の速度で沈下が進行していることは水準測量成果でも明らかである。

衛星画像解析による変動速度の観測期間は短く、広域の地盤変動が長い時間スケールの中で速度が速くなる期間であるのかは、今後の継続的な監視でしか明らかにされない。少なくとも過去の水準測量の変動速度からは5mm～6mm程度で進行し、PSが示す沈下の傾向や変動速度と整合している。

d) 結論

広域の地盤沈下は、1994年のような異常気象による渇水により明瞭に発生する。同時に渇水でなくても水準測量成果では1cm/年以下の速度で進行していることが確認された。これらの沈下は、広域の地下水盆の水収支という観点から、利水と地下水の供給がバランスし、完全に沈下が停止するまで地下水位が回復していないために、mm単位の変動速度の地盤沈下が発生しているものと考えられる。

7. 地盤の季節変動の有無について

今回の解析では、水準点と近傍のPS点を比較し、季節変動の有無についても検証を行った。1993年からの水準測量の変動と比較して線形性についての比較を行ったが、**図7-1**及び**図7-2**に線形的・非線形的特徴をもつ典型的な点をそれぞれ1点ずつ示す。

図7-1及び**図7-2**は各点におけるPSInSARによる経時変化と水準測量による経時変化、並びに両変動速度(水準測量は1993年を初期値とする累積値であり、平均速度は13年間で累積値を除いた)、を比較した。線形的・非線形的な特徴を代表する典型的なこの2点においては、季節に共通の地盤変動は見られない。

(それぞれの点の位置は**図5-2**を参照)

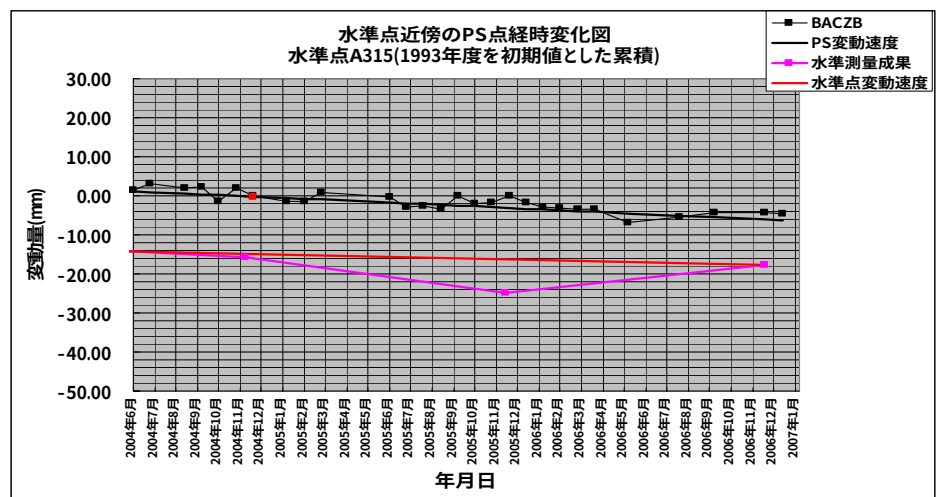


図7-1 線形的特徴のあった点

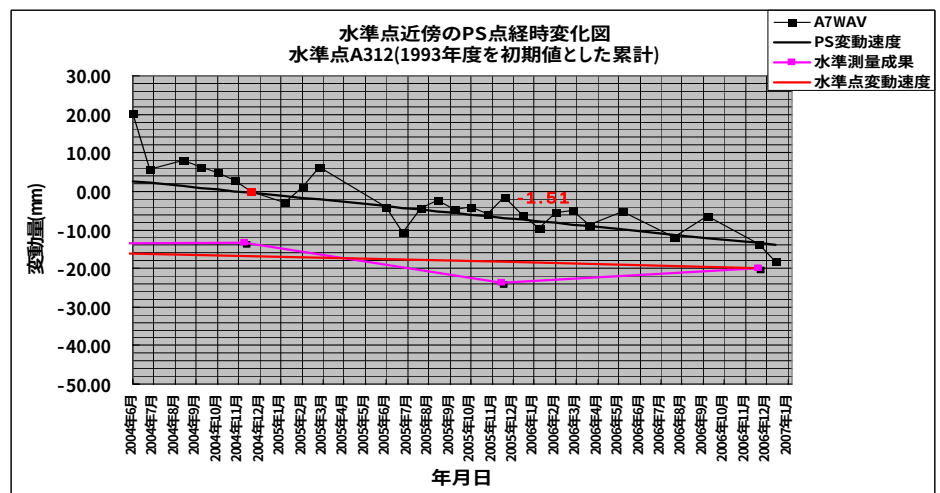


図7-2 非線形的特徴のあった点

8 衛星画像による地表面変動履歴解析の適用可能性の検討

(1) 水準測量の補完検討

衛星画像による地表面変動解析の特徴は、地上にターゲット（PS）を取得し、統計的な処理により高精度の地表面変動速度を観測することができる点にある。また、1992年以降の長期の地表面変動履歴を明らかにすることができることや、広域の観測が可能であることが大きな特徴である。

面的な補完性という点では、高密度のPSが地表面の変動傾向を詳細にし、メカニズムの解明に関するアプローチを容易にする。今回の木曽川右岸の水準点がない場所がどのような変動をしているか、それが広域の変動と関連があるかを補完することができる。

時間的な補間という点では、過去に撮影済みの蓄積された画像を解析することにより長期の履歴を観測することが可能である。また、画像は年間に最大10枚程度は取得できるため、条件を整えば、短期間の非線形の変動解析も可能である。

(2) 衛星画像解析の実用性検討

これまで犬山周辺域における地表面変動履歴の観測結果について述べた。衛星画像解析は、広域地盤沈下、地震時の変動、地殻変動、地下開発による地盤沈下（首都圏で実績あり）などに活用され、地表面変動履歴の高精度の解析とメカニズムの解明に実績をあげてきた。技術的な面で衛星画像による地表面変動観測が広域地盤沈下を的確に把握し、監視に有用であることは明確である。

経済性という点でも、水準測量を広域に展開することを考えれば、年間の予算程度で水準測量の実施範囲を解析することが可能であり、解析範囲が大きいほど経済的なメリットがあるといえる。

9. おわりに

全国の地盤沈下の状況はおおむね沈静化しているものの、積雪地域においては融雪用地下水の汲み上げにより沈下が見られる地域もあるなど、引き続き注意深く地盤状況を調査していく必要があるが、三位一体の改革により地盤沈下監視のための補助金が廃止されたことで、地方自治体においてはこの予算の確保に苦慮している。地盤沈下の監視は国土管理という意味でも重要であることから、経済的で合理的な方法の導入が求められている。

衛星画像を用いた広域地盤変動解析は、今後の技術の進歩によりますますその信頼性を高めていくことにより、地盤沈下の監視において水準測量の代替としての役割が期待される。

参考資料

- 1) 福和伸夫ほか；濃尾地震における震裂波動線生成の解明、平成12 年度～平成14 年度 文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(B)(2)研究成果報告書（研究課題番号12480110）
- 2) 渡辺 学：陸域観測技術衛星「だいち」データの、地盤工学への応用土と基礎，Vol.55, No.2, pp.30～32, 2007
- 3) 飛田幹男・藤原 智・村上 亮・中川弘之・P. A. Rosen：干渉SARのための高精度マッチング，日本測地学会誌，第45巻，pp.297～314, 1999.
- 4) 国土地理院 干渉SAR: [SAR Interferometry by GSI,](http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism.html)
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism.html>
- 5) 国土地理院 干渉SAR: [SAR Interferometry by GSI,](http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/displacement/earthquake.html)
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/displacement/earthquake.html>
- 6) 大倉博：インターフェログラム位相強調フィルタ，
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/KYODORIYO/report/2001_insar_ws/b5/
- 7) drawn from Deutsches Zentrum fuer Luft und Raumfahrt:
http://www.op.dlr.de/ne-hf/SRL-2/p44754_irwin.html
- 8) A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca: Permanent Scatterers in SAR Interferometry, submitted for publication to IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1999.
- 9) A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca: Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol.39, No.1, 2001.
- 10) 水野敏実・山根誠・西山昭一：衛星画による高精度地表面変動観測，土と基礎，Vol.54, No.5, pp.25～27, 2006
- 11) Furuya, M. Localized deformation at Miyakejima volcano based on JERS-1 radar interferometry: 1992-1998, Geophys. Res. Lett., doi 10.1 29/2003GL019364, 2004.
- 12) 葛岡 成樹・水野 敏実：PSInSAR技術の非都市部地表面変動計測への適用，日本リモートセンシング学会誌No.24-2, pp140-152, 2004
- 13) Claudio Prati, Fabio Rocca, Alessandro Ferretti: PSInSAR analysis with different SAR sensors, EO Conference '04-Tokyo, Canadian Embassy Japan, June 16, 2004.
- 14) drawn from Politecnico di Milano: <http://www.elet.polimi.it/upload/monti/papers/ceos/>
- 15) 葛岡成樹・水野敏実：宇宙からの防災監視，物理探査No. 55-6, pp495-504, 2002年掲載，物理探査学
- 16) 中沢努・遠藤秀典（2002）：大宮地域の地質，産業技術総合研究所地質調査総合センター，pp.34
- 17) A. Ferretti, S. Cespa, F. Novali, / F. Rocca, C. Prati: Using Satellite Radar Data to Measure Surface Deformation Remotely, GEO 2006, Manama, Bahrain, March 29th, 2006