

## 干渉 SAR 時系列解析による地盤沈下の検出 Detection of ground subsidence by InSAR time series analysis

測地部 山中雅之・森下 遊・大坂優子

Geodetic Department

Masayuki YAMANAKA, Yu MORISHITA and Yuko OSAKA

### 要 旨

国土地理院は、地盤沈下・地すべりによる地盤変動や火山活動や地震による地殻変動の監視を目的に、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)に搭載された 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。また、地盤変動の検出における干渉 SAR 技術の有効な活用方法を実証することを目的とした研究開発を継続して実施している。

今回、地盤変動の一種である地盤沈下について、干渉 SAR による検出能力を検証するために、ALOS/PALSAR データを用いたスタッキング及び干渉 SAR 時系列解析の精度の検証を行った。スタッキング及び時系列解析による変動量は、変動の範囲、大きさともにほぼ一致する。また、スタッキング及び時系列解析の結果と水準測量との結果の比較を行ったところ、その最大較差はいずれの地域、手法においても、年間 2cm 以上の地盤沈下地域を特定するのに十分な精度を得られることが示された。

### 1. はじめに

干渉合成開口レーダー (以下、「干渉 SAR」という) は、人工衛星等によるマイクロ波レーダー観測を地表の同一地点で異なる時期に 2 回以上実施し、反射波の位相の差をとることによって、地表の変動を捉える技術であり、数十 m 程度の高い空間分解能で数十 km から数百 km の範囲の地表変位を面的に捉えることができる。国土地理院は、2006 年 1 月に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS: Advanced Land Observing Satellite) に搭載されている L バンド合成開口レーダー (PALSAR: Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) の観測データを用いて、定常的に SAR 干渉解析を実施し、その結果をホームページ (<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/result/result.html>) 等で公開している。国土地理院では、この解析業務を、高精度地盤変動測量と位置づけており、地盤沈下や地すべりによる地盤変動及び火山活動や地震による地殻変動の監視を目的として実施している。

また、国土地理院研究開発基本計画に基づき、地盤変動検出における干渉 SAR の有効な活用方法を実証することを目的とした研究開発を継続して実施

している。これまでに、干渉 SAR を活用して地盤沈下地域における効率的な水準測量を行うことを実証した (森下ほか, 2010)。

しかし、現在のところ地盤沈下検出における干渉 SAR 技術が有効に活用されているとは言い難い。理由として、干渉 SAR の解析結果には、地盤の変動量以外に電離層の電子密度分布や水蒸気分布の変化等によるノイズや、散乱特性の変化等による干渉度の低下によるノイズが含まれ、微小な変動を検出することは困難であることが挙げられる。

これらのノイズは、用いるデータによって独立であるので、多数のデータを用いることによりノイズを低減し、変動量の測定精度を向上させることが可能である。その手法の一つとして、各干渉画像から変動速度を算出し、その平均を求めるスタッキングという手法がある。また、欧州を中心に、ノイズを統計的に推定・除去することで変動計測精度を向上させる干渉 SAR 時系列解析と呼ばれる手法が研究・開発されており (Ferretti et al., 2000, 2001; Berardino et al., 2002)、干渉 SAR 時系列解析を適用した地盤沈下の検出に関する研究も数多くなされている (例えば, Ketelaar, 2009)。しかし、日本国内では、欧州宇宙機関 (ESA) が打ち上げた Envisat のデータを用いた干渉 SAR 時系列解析に関する研究事例があるものの (出口ほか, 2009; 福島・Hooper, 2011)、ALOS/PALSAR データを利用した例はわずかであり、地盤沈下の検出に適用した例はほとんどない。

本稿では、干渉 SAR による地盤沈下検出能力を検証するために、ALOS/PALSAR データを用いたスタッキング及び干渉 SAR 時系列解析の結果を、地盤沈下調査のために自治体等により実施されている水準測量の結果と比較したので、その結果について報告する。

### 2. 検証地域

本研究では、九十九里平野 (図-1(a)) 及び新潟平野 (図-1(b)) を対象地域とした。両地域は自治体等により地盤沈下調査のための水準測量が実施されている地域である。

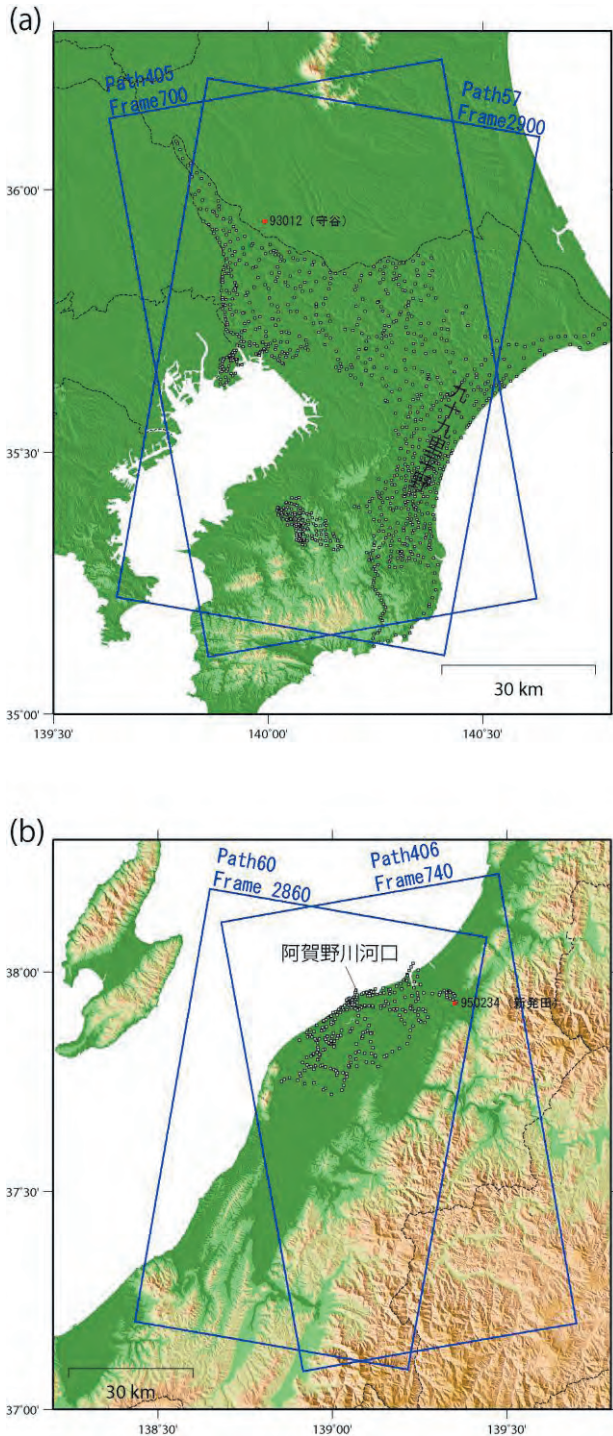


図-1 検証地域図.

(a)九十九里平野 (b)新潟平野. 青枠は本研究で使用した PALSAR 撮像範囲を示す. □印は検証地域で地盤沈下調査に使用している水準点の位置を示し, 赤■印は SAR 干渉解析の参照点とした電子基準点の位置を示す.

九十九里平野の地盤沈下は, 主として天然ガスを含む地下水の採取によるものとされ, 2006 年 1 月 1 日から 2011 年 1 月 1 日まで 5 年間の沈下量が

6 cm を超える地域の面積はおよそ 200km<sup>2</sup> におよび, 現在でも非常に広範囲で地盤沈下が継続している地域である (千葉県環境生活部, 2011).

新潟平野の地盤沈下は, 主に水溶性天然ガスの採取によるものとされる. 近年, 地盤沈下は沈静化してきており, 5 年間の沈下量が 6 cm を超える沈下は阿賀野川河口付近のみである (新潟県県民生活・環境部, 2012).

九十九里平野の解析には Path405, Frame700 (北行軌道) 及び Path57, Frame2900 (南行軌道) を使用した (図-1(a)). 両シーン共に観測回数が多く, データ量は豊富である. 新潟平野の解析には Path406, Frame740 (北行軌道) 及び, Path60, Frame2860 (南行軌道) のデータを使用した (図-1(b)). このうち Path60 は 2006 年には撮影が実施されていない. また, 干渉 SAR は積雪時期のデータを使用すると干渉性が著しく低下し, 測定精度が低下するため, 新潟平野では積雪時のデータは使用することができない. そのため, 新潟平野で使用したデータは, 九十九里平野と比較すると少ない.

### 3. SAR 干渉解析

#### 3.1 スタッキング

##### 3.1.1 解析手順

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, 期間の合計で除算することであり, これにより平均変動速度を求める手法である. 複数のデータを足し合わせることで, 電離層の電子密度分布や水蒸気分布の変化等による時間的にランダムな誤差が低減され S/N 比が向上する.

今回は以下の手順で解析を実施した.

- 1) 垂直基線長が短く, かつ, 年間数 cm というわずかな変動量を捉えるため時間間隔が 2~3 年のペアを抽出する. 新潟平野では, 積雪による影響を避けるために 1 月及び 2 月のデータは除外した. また, 新潟平野では, Path60 は 2006 年には撮影が実施されていないため, 北行軌道と南行軌道の期間を統一するために, Path406 でも 2006 年のデータは使用しないこととした.
- 2) 抽出したペアを解析し, ジオコードしたアンラップデータを得る. 解析の際には GPS 補正 (飛田ほか, 2005) を実施した. GPS 補正における参照点は, 九十九里平野における解析では 93012 (守谷), 新潟平野では 950234 (新発田) とした (図-1). なお, 解析の結果, ノイズが非常に大きなペアは除外した.
- 3) 2) で得られた結果を加算し, 解析ペアの期間の合計で除算し, 変動速度を計算した (スタッキング).
- 4) 3) で得られた結果から, 北行軌道と南行軌道の 2 方向の解析結果を合成し, 変動量を準東西方向と

準上下方向の成分へ分離する 2.5 次元解析 (Fujiwara et al., 2000) により, 準上下方向の変動量を算出した. 2.5 次元解析により求められる準上下方向の変動量は, 実際には地表面から約 83 度傾いた方向の変動量であるが, この変動量は鉛直方向の 0.99 倍であり, 本稿では上下方向の変動量と見なす.

3.1.2 解析結果

最終的にスタッキングに使用したペアは表-1 及び表-2 に示すとおりである. 九十九里平野ではそれぞれ 12 ペアを使用した, 新潟平野では, 手順 1) の条件に合致するペアが多くない上に, 特に北行軌道のデータでは電離層に起因すると思われる大きなノイズが含まれる画像が多かったために, 最終的に 7 ペアのみを使用した.

表-1 九十九里平野において解析に使用したペア.

(a) 北行軌道			(b) 南行軌道		
観測日 (マスター) 観測日 (スレーブ)	基線長 (m)		観測日 (マスター) 観測日 (スレーブ)	基線長 (m)	
2006/08/08 2009/02/13	159		2006/10/11 2008/12/01	-134	
2006/11/08 2008/06/28	-289		2006/10/11 2009/01/16	184	
2006/11/08 2009/11/16	58		2006/11/26 2008/10/16	-394	
2006/12/24 2008/09/28	-847		2007/02/26 2009/09/03	-438	
2006/12/24 2008/12/29	-445		2007/02/26 2009/10/19	-131	
2007/08/11 2009/11/16	-384		2007/07/14 2009/12/04	-200	
2007/09/26 2010/04/03	519		2007/11/29 2010/07/22	33	
2007/12/27 2010/02/16	-38		2008/01/14 2010/09/06	181	
2008/02/11 2010/07/04	-391		2008/05/31 2010/10/22	-527	
2008/03/28 2010/10/04	-96		2008/05/31 2010/12/07	0	
2008/03/28 2011/01/04	290		2008/05/31 2011/01/22	400	
2008/03/28 2011/02/19	996		2008/07/16 2009/06/03	96	

表-2 新潟平野において解析に使用したペア.

(a) 北行軌道			(b) 南行軌道		
観測日 (マスター) 観測日 (スレーブ)	基線長 (m)		観測日 (マスター) 観測日 (スレーブ)	基線長 (m)	
2007/08/27 2009/09/02	-894		2007/07/19 2009/12/09	-27	
2007/10/13 2009/12/03	-915		2007/07/19 2009/03/11	559	
2007/11/28 2010/03/05	2		2007/10/19 2010/06/11	469	
2007/11/28 2010/04/20	188		2007/10/19 2010/07/27	410	
2008/04/14 2010/10/21	-511		2007/12/04 2010/09/11	691	
2008/04/14 2010/12/06	-416		2008/06/05 2010/10/27	-235	
2008/05/30 2010/09/05	-567		2008/07/21 2009/09/08	62	

2.5 次元解析により算出した, 九十九里平野及び新潟平野の上下方向の変動速度図をそれぞれ, 図-2 及び図-3 に示す. 図-2 では, 九十九里平野から下総台地にかけての広い範囲, 東京湾岸の埋立地及び常総市付近において地盤沈下を示す変動が確認できる. 図-3 では, 阿賀野川河口付近及び三条市付近において地盤沈下を示す変動が確認できる. これらの地域は, 自治体等により水準測量による地盤沈下調査が実施されていない三条市付近を除き, 毎年の水準測量により地盤沈下の推移が詳細に計測されている地域である. 干渉 SAR による結果と水準測量による結果の比較については第 4 章で述べる.

スタッキングにおいて, 精度を向上させるための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くほどより効果的な誤差の軽減が期待できる. 最低どの程度のデータが必要かを検証するために, 九十九里平野において, 北行軌道及び南行軌道でそれぞれ, ノイズが少ない画像を独立した 3 ペアずつ選び, 上下方向の変動量を算出すると, 図-4 となる. 使用したペアは, 北行軌道が表-1 における 7, 8, 9 のペアであり, 南行軌道が 6, 7, 8 のペアである. 図-2 と図-4 とを比較すると, 地盤沈下の領域は範囲, 大きさ共に大きな違いはなく, 使用するデータが 3 ペア程度であっても, 誤差の軽減効果が確認できる.

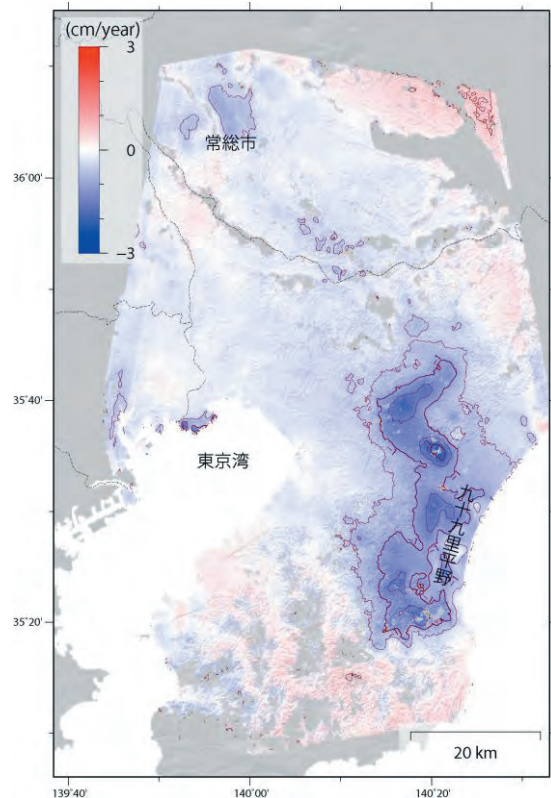


図-2 九十九里平野の上下方向の平均変動速度. 等量線間隔は 5mm.

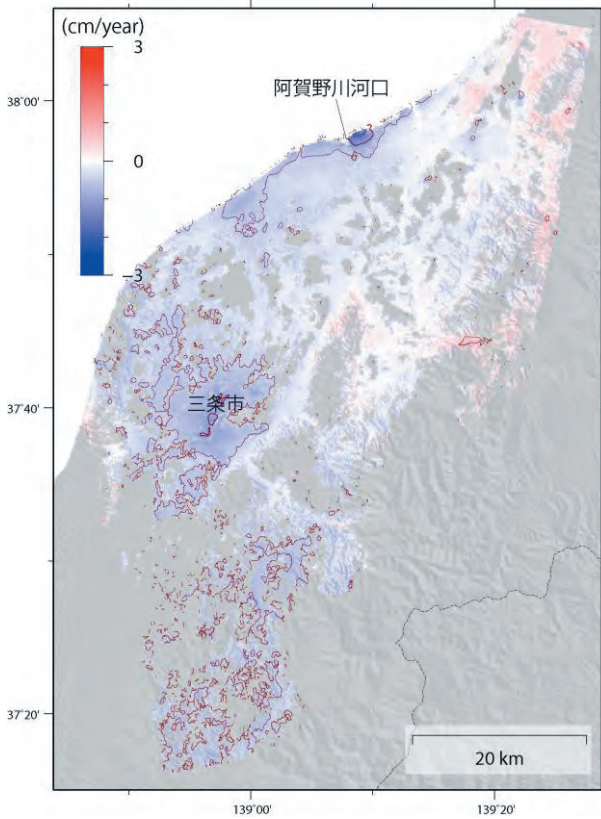


図-3 新潟平野の上下方向の平均変動速度. 等量線間隔は 5mm.

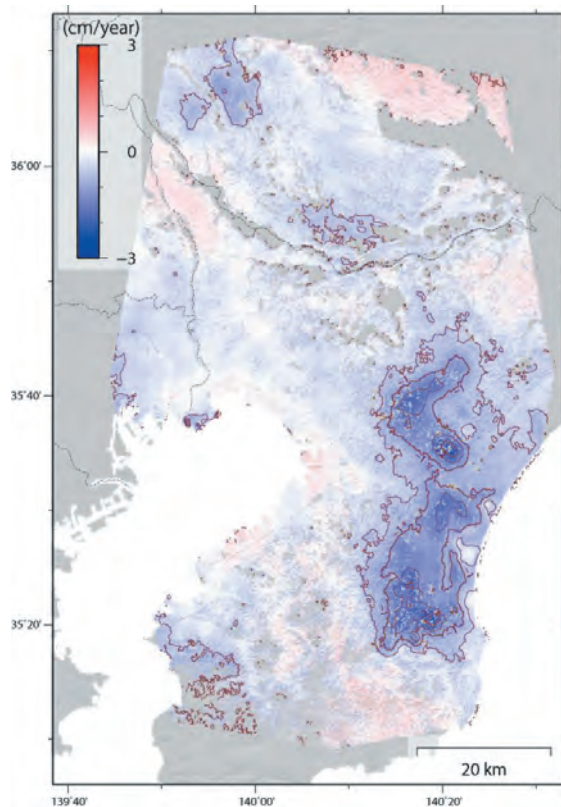


図-4 ノイズが少ない独立した 3 ペアずつの解析画像を用いて算出した九十九里平野の上下方向の平均変動速度. 等量線間隔は 5mm.

### 3.2 干渉 SAR 時系列解析

#### 3.2.1 干渉 SAR 時系列解析の概要

干渉 SAR 時系列解析は、多量のデータを使用して大気や軌道誤差に起因するノイズを統計的に推定・除去することで変動計測精度を向上させる解析手法である。統計的にノイズを推定するために、ある程度のデータ量が必要である。

干渉 SAR 時系列解析は、PSI (Persistent Scatterer Interferometry) と SBAS (Small Baseline Subset algorithm) という二つのカテゴリーに分類される。

PSI は全解析期間で後方散乱特性が変化しない点 (PS 点) を抽出し、それらのピクセルのみで変動を推定する (Ferretti et al., 2000, 2001)。PS 点においては、空間及び時間干渉度低下は小さく、長期間かつ長基線長のペアでも干渉度低下によるノイズが小さい干渉結果を得ることができる。人工構造物等のように長期間変化しない物体が PS 点となり得る。

一方、SBAS は、短い垂直基線長及び短い撮像日間隔の SAR 干渉画像を多数作成し、各観測時の変動量を推定する (Berardino et al., 2002)。これにより、空間及び時間干渉度低下の影響を最小限に抑えて、時系列的な変動を抽出できる。

また、両手法の利点を活かした統合的な解析手法も開発されている (Hooper, 2008)。

#### 3.2.2 解析手順

本研究では、非商用に限り無償で利用可能な PSI の解析ソフトウェアである StaMPS/MTI (Hooper et al., 2004, 2007) を使用した。StaMPS を使用した PSI のおおまかな解析手順は以下のとおりである。

- 1) 使用する画像のうち一枚をマスター画像とし、他の全ての画像 (スレーブ画像) と干渉解析処理を行う。
- 2) PS 点を抽出する。本解析では、抽出された PS 点を 50m 間隔のグリッド上に重み付平均処理を用いてリサンプリングしている。
- 3) 位相アンラップを行う。
- 4) すべての画像に含まれるマスター画像の誤差成分を除去する。また、軌道誤差に相当する位相傾斜平面を推定し、除去する。
- 5) 時間軸上のハイパスフィルタ及び空間ローパスフィルタをかけることにより時間軸に対し独立に表れるスレーブ画像の誤差成分を抽出し、抽出した誤差成分を除去する。

表-3 及び表-4 に本研究における解析で最終的に使用した ALOS/PALSAR データを垂直基線長と共に示す。九十九里平野における北行軌道の解析では、2008/06/28 のデータを、南行軌道の解析では 2008/07/16 のデータをマスター画像とした。また、新潟平野における北行軌道の解析では、2009/07/18

のデータを南行軌道の解析では2009/09/08をマスター画像とした。ただし、スタッキングにおける解析と同様に、新潟平野においては2006年のデータ及び1月、2月のデータは使用していない。また、理想的なPS点の干渉度は基線長に依存しないとされているが、実際には、基線長が極端に長いと干渉度が低下するため、基線長が5000mを超えるような長いデータは解析には使用していない。

表-3 九十九里平野における解析に使用したデータ。

(a) 北行軌道			(b) 南行軌道		
	観測日	基線長(m)		観測日	基線長(m)
1	2006/09/23	410	1	2006/08/26	-2568
2	2006/11/08	382	2	2006/10/11	-1390
3	2006/12/24	-1030	3	2006/11/26	-1461
4	2007/05/11	915	4	2007/01/11	1328
5	2007/06/26	546	5	2007/02/26	260
6	2007/08/11	732	6	2007/07/14	765
7	2007/09/26	852	7	2007/08/29	688
8	2007/12/27	1276	8	2007/10/14	1179
9	2008/02/11	2214	9	2007/11/29	1683
10	2008/03/28	2320	10	2008/01/14	1875
11	2008/06/28	0	11	2008/05/31	2882
12	2008/09/28	-1906	12	2008/07/16	0
13	2008/11/13	-1525	13	2008/10/16	-1882
14	2008/12/29	-1494	14	2008/12/01	-1544
15	2009/02/13	-765	15	2009/01/16	-1223
16	2009/07/01	-309	16	2009/06/03	178
17	2009/10/01	199	17	2009/07/19	-324
18	2009/11/16	347	18	2009/09/03	-199
19	2010/02/16	1229	19	2009/10/19	133
20	2010/04/03	1377	20	2009/12/04	565
21	2010/05/19	1590	21	2010/04/21	1830
22	2010/07/04	1822	22	2010/06/06	1716
23	2010/08/19	1971	23	2010/07/22	1722
24	2010/10/04	2216	24	2010/09/06	2057
25	2010/11/19	2179	25	2010/10/22	2349
26	2011/01/04	2608			

表-4 新潟平野における解析に使用したデータ。

(a) 北行軌道			(b) 南行軌道		
	観測日	基線長(m)		観測日	基線長(m)
1	2007/07/13	1043	1	2007/07/19	697
2	2007/08/28	1345	2	2007/10/09	1330
3	2007/10/13	1761	3	2007/12/04	1600
4	2007/11/28	1819	4	2008/06/05	2778
5	2008/04/14	3243	5	2008/07/21	-107
6	2008/05/30	3062	6	2008/09/05	-1920
7	2008/07/15	9	7	2008/10/21	-1920
8	2008/10/15	-1522	8	2009/04/23	-729
9	2008/11/30	-1306	9	2009/09/08	0
10	2009/07/18	0	10	2009/10/24	328
11	2009/09/02	443	11	2009/12/09	668
12	2009/10/18	780	12	2010/03/11	1265
13	2009/12/03	841	13	2010/04/26	1751
14	2010/03/05	1819	14	2010/06/11	1802
15	2010/04/20	2010	15	2010/07/27	1748
16	2010/06/05	2186	16	2010/09/11	2298
17	2010/07/21	2239	17	2010/10/27	2535
18	2010/09/05	2484			
19	2010/10/21	2727			
20	2010/12/06	2827			

### 3.2.3 解析結果

PSIによる九十九里平野の変動時系列を図-5に、新潟平野の変動時系列を図-6に示す。九十九里平野においては93012(守谷)、新潟平野では950234(新発田)を参照点とした。各変動図は、参照点から半径100m以内のPS点の変動量の平均値を0となるように固定し作成している。

九十九里平野の広い範囲(図-5(a))、茨城県常総市付近(図-5(b))及び東京湾岸の埋立地(図-5(c))等において、経年的な衛星一地上方向の伸びが見られる。また、新潟平野においては、阿賀野川河口付近(図-6(a))や柏崎市付近(図-6(b))等で経年的な衛星一地上方向の伸びが見られる。これら衛星一地上方向の伸びの変化は地盤沈下による変動を表している。

柏崎市等の新潟県内の地盤沈下地域では、冬季には融雪用の地下水汲上げによる季節的な地盤沈下が発生しているはずである(新潟県県民生活・環境部, 2012)が、図-6からはその季節的な変動を読みとることはできない。これは、スレーブ画像の誤差成分を除去する操作の過程で、時間軸に対して短周期の変動を除去してしまっている可能性がある。

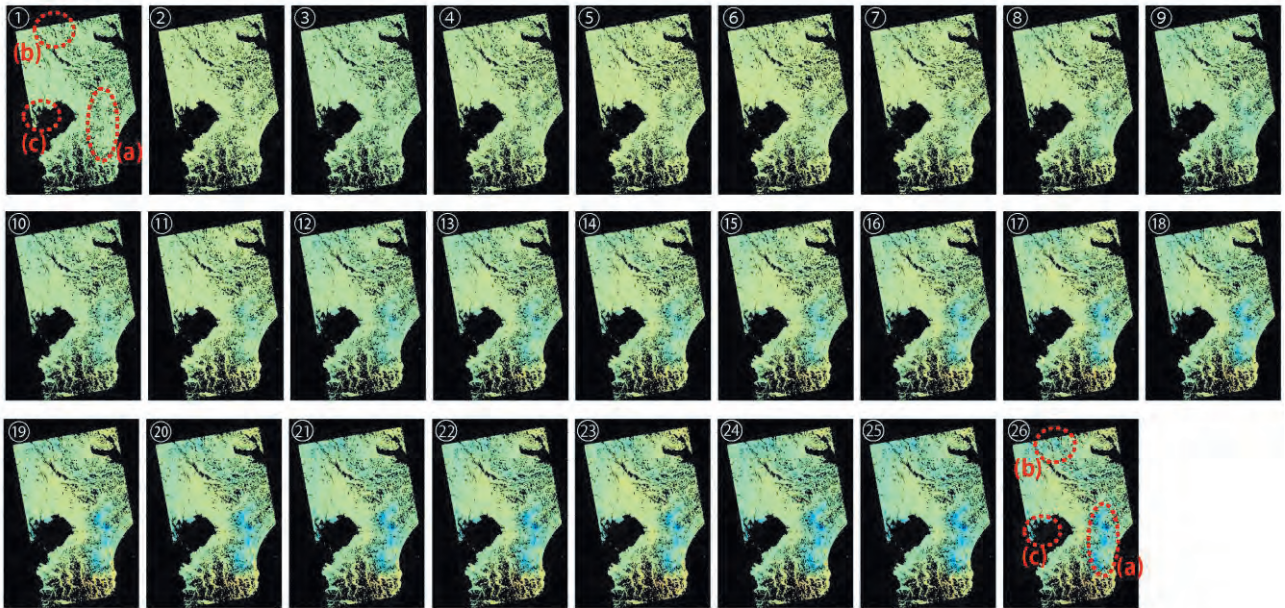
PSIにより求めた九十九里平野の平均変動速度を図-7に、新潟平野の平均変動速度を図-8に示す。

北行軌道の画像と南行軌道の画像では、PS点となり得る地物はほぼ同じはずである。また、前述の通り本解析では、抽出されたPS点を50m間隔のグリッド上にリサンプリングしており、北行軌道の画像と南行軌道の画像では、同じ地物を示すPS点は同じ座標値を持つ。そこで、PSIによる北行軌道及び南行軌道の結果から2.5次元解析により変動量を東西方向と上下方向の成分へ分離した。このとき変動量を分離するのは、北行軌道の画像と南行軌道の画像の双方に値が存在するピクセルのみである。

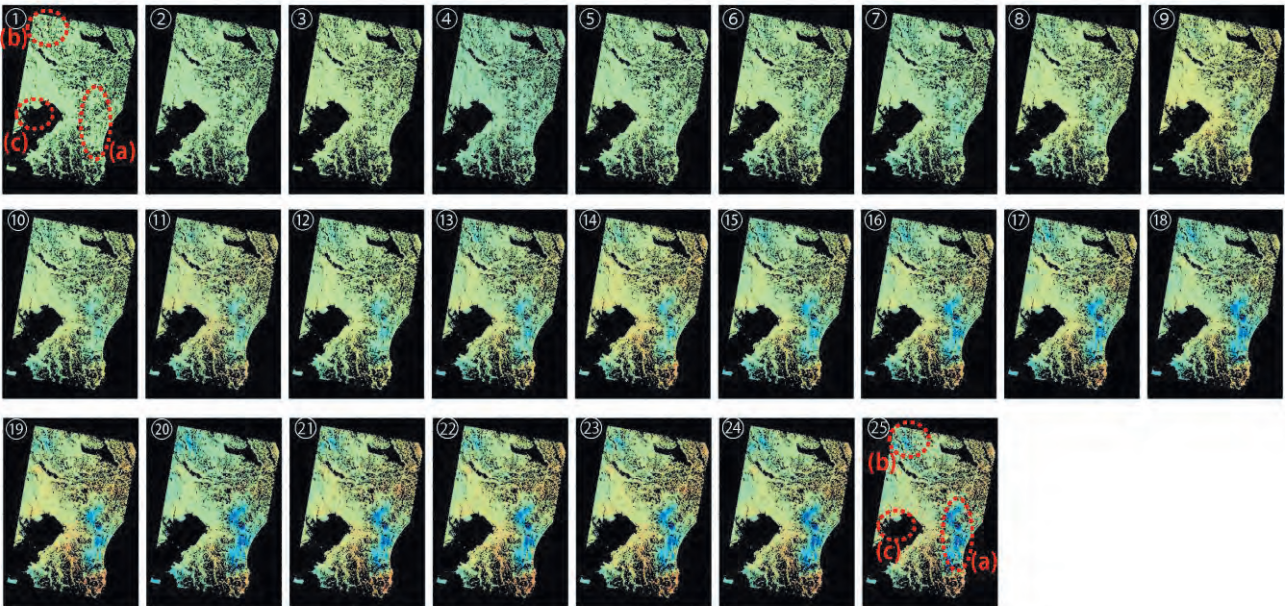
九十九里平野及び新潟平野の平均変動量から求めた上下方向の変動図をそれぞれ、図-9及び図-10に示す。

人工構造物が密集している東京都心部はPS点が密に存在し、東京湾埋立地の小規模な地盤沈下等を明瞭に検出している。一方、郊外は都市部と比較すると、PS点の密度が粗になるが、九十九里平野においても、新潟平野においても既知の地盤沈下が明瞭に確認できる。ただし、山間部においてはPS点がほとんど得られず、PSIでは、このような地域の変動を検出することはできない。

< 北行軌道 >



< 南行軌道 >



Analysis by GSI from ALOS raw data (c)JAXA, METI

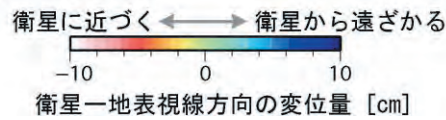
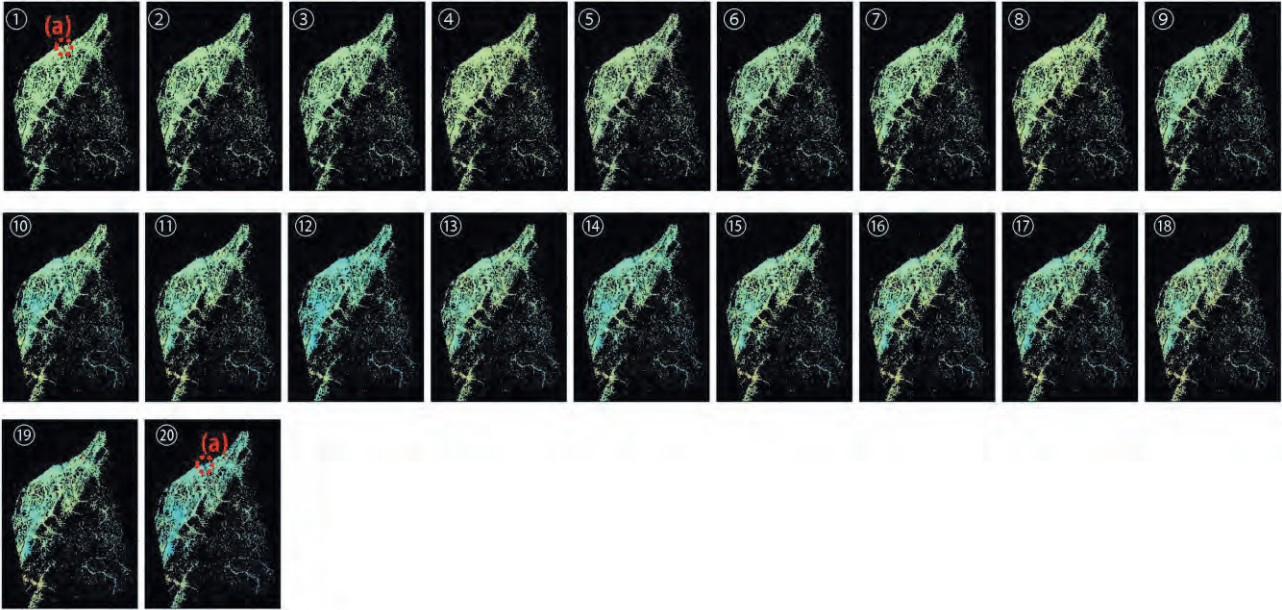


図-5 PSIによる九十九里平野の変動時系列.

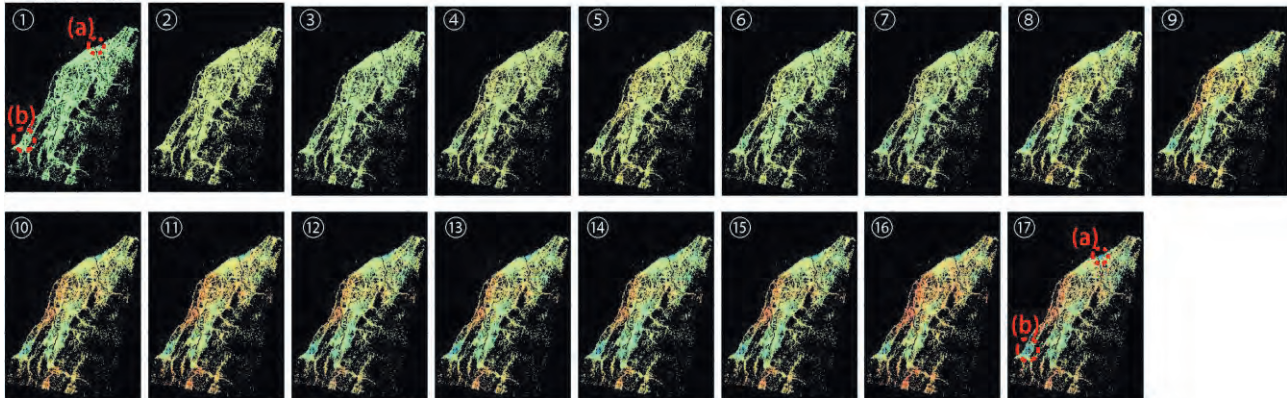
各図の左上に付した番号はそれぞれ表-3の番号と対応している。北行軌道は2006/09/23を南行軌道は2006/07/26を基準日とし、各図は基準日からの変動量を示しており、アンラップ位相からDEM誤差位相、全画像の大気、推定位相傾斜平面を差し引いた変動量である。

赤点線枠(a)は九十九里平野、(b)は茨城県常総市付近、(c)は東京湾岸地域を示し、これらの地域では経年的な衛星—地上方向の伸びが見られる。

< 北行軌道 >



< 南行軌道 >



Analysis by GSI from ALOS raw data (c)JAXA, METI

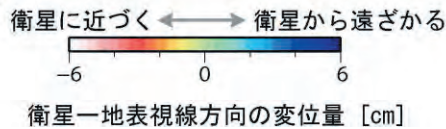


図-6 PSIによる新潟平野の変動時系列.

各図の左上に付した番号はそれぞれ表-4の番号と対応している。北行軌道は2007/07/13を南行軌道は2007/07/19を基準日とし、各図は基準日からの変動量を示しており、アンラップ位相からDEM誤差位相、全画像の大気、推定位相傾斜平面を差し引いた変動量である。

赤点線枠(a)は阿賀野川河口域、(b)は柏崎市付近を示し、これらの地域では経年的な衛星—地上方向の伸びが見られる。

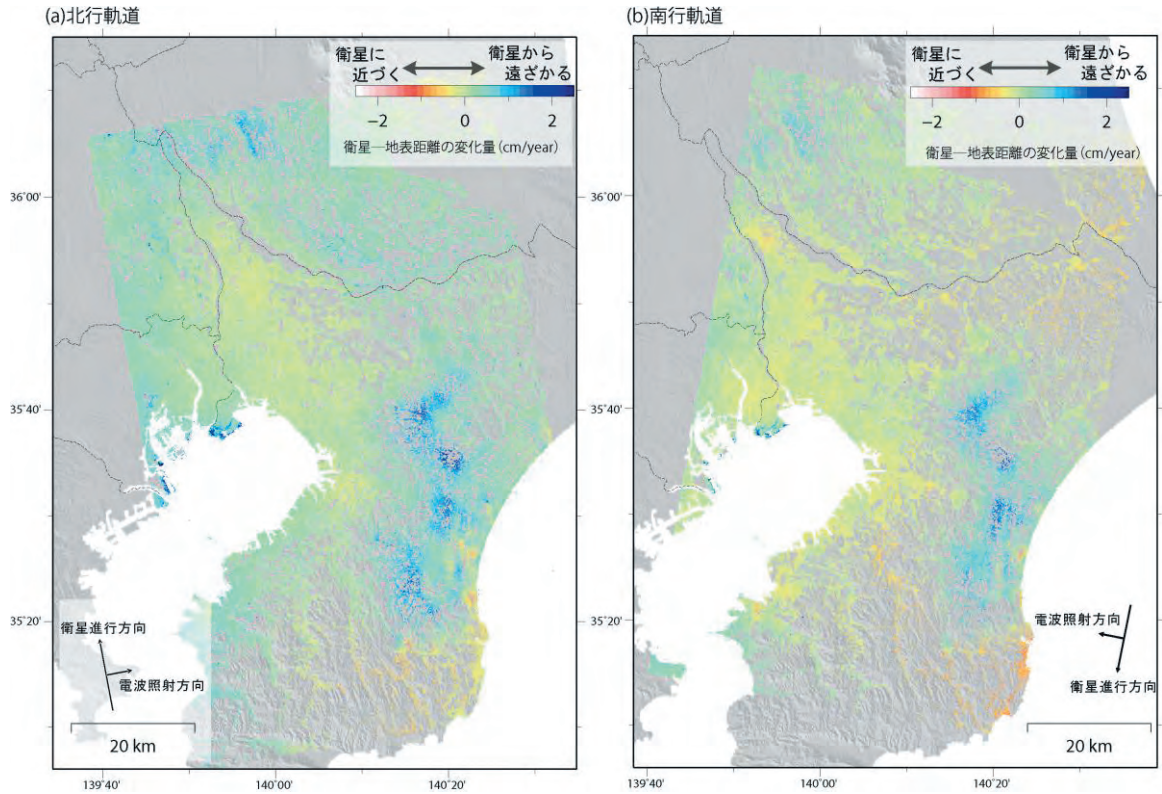


図-7 PSIにより求めた九十九里平野の平均変動速度.  
 図はアンラップ位相の平均変動量から DEM 誤差位相, 平均推定位相平面を差し引いた変動速度である.

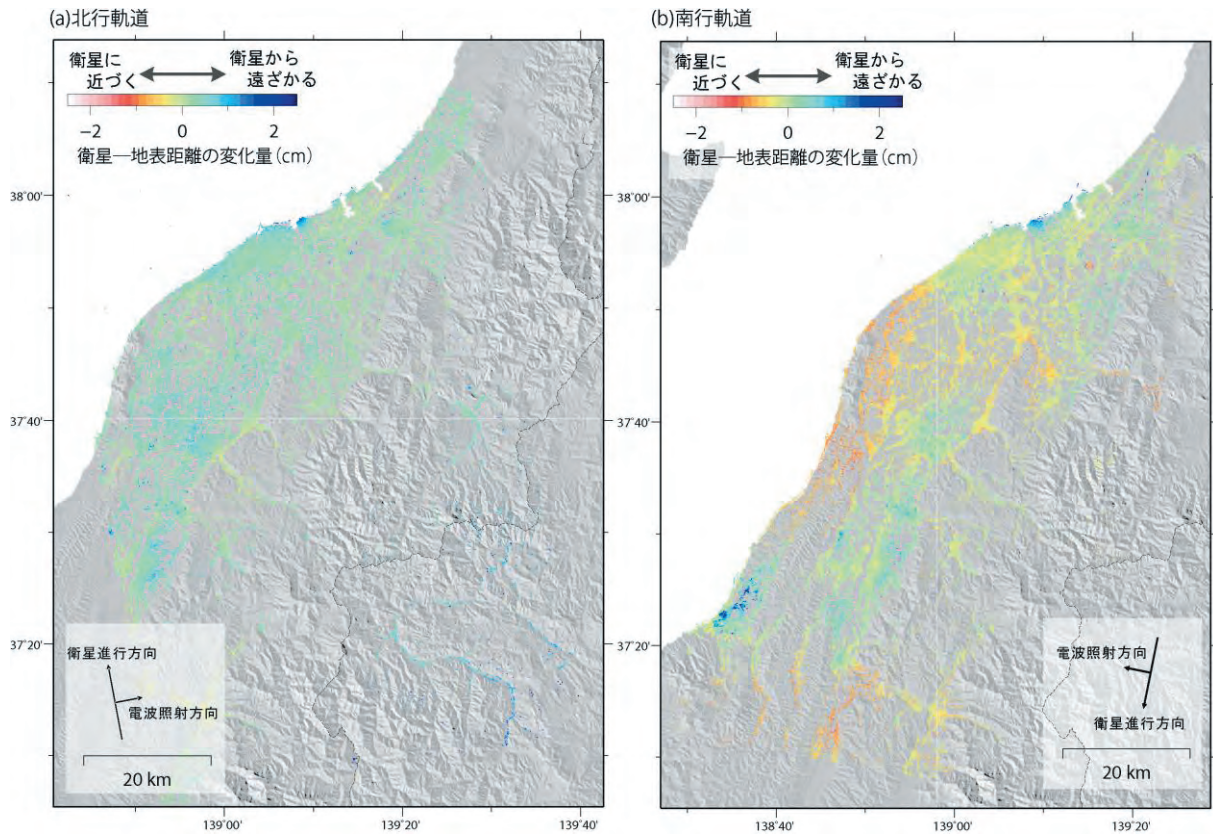


図-8 PSIにより求めた新潟平野の平均変動速度.  
 図はアンラップ位相の平均変動量から DEM 誤差位相, 平均推定位相平面を差し引いた変動速度である.

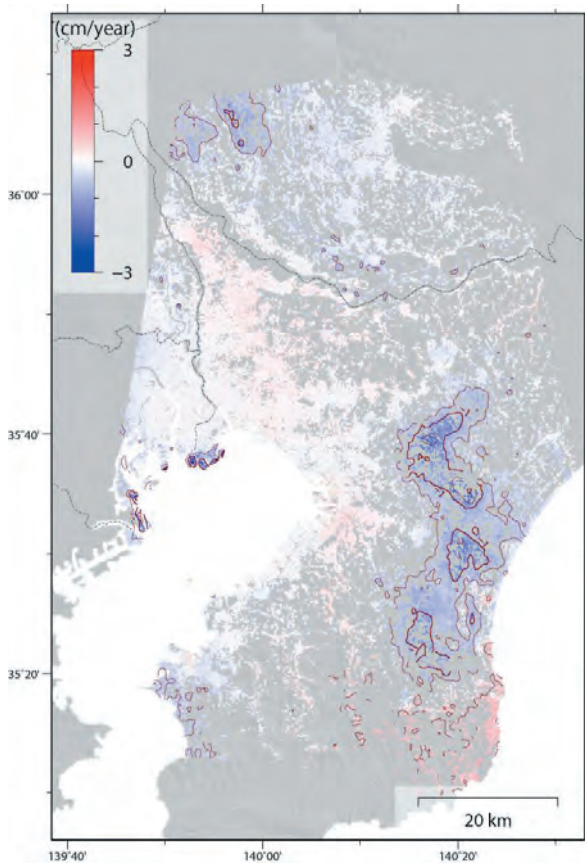


図-9 PSIにより求めた九十九里平野の上下方向の平均変動速度。等量線間隔は5mm.

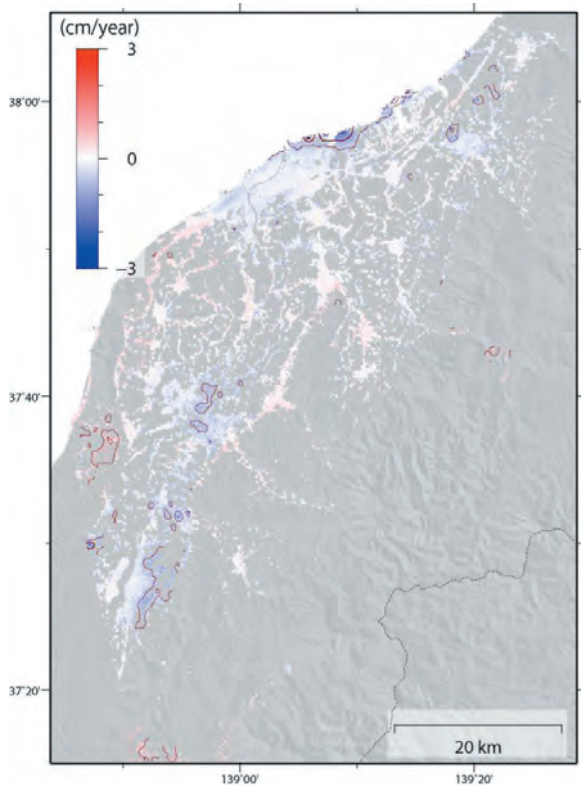


図-10 PSIにより求めた九十九里平野の上下方向の平均変動速度。等量線間隔は5mm.

## 4. 比較

### 4.1 スタッキングとPSIとの比較

スタッキングにより検出された地盤沈下の変動速度とPSIにより検出された地盤沈下の変動速度との比較を行った。

スタッキングにより作成した変動図は、ほとんどのピクセルが値を持っており、いわば面的なデータである。一方、PSIにより算出した変動図は、PS点となったピクセルのみが値を持つ点のデータである。これらと比較するために、PSIにより算出した変動図からKriging法による内挿補間により、各ピクセルの変動量を推定し、両者の比較を行った。

図-11及び図-12はそれぞれ九十九里平野及び新潟平野において比較を行った結果である。

第3章で述べたとおり、九十九里平野における解析においては、スタッキングによる結果でも、PSIにおいても、九十九里平野の広い範囲、茨城県常総市付近及び東京湾岸の埋立地等において地盤沈下が確認できる。両者の差をみると、これら地盤沈下地域において両解析手法による変動量は、変動の範囲、大きさともにほぼ一致していることがわかる(図-11, 赤点線枠部分)。

その一方で、房総半島の南部では、北行軌道、南行軌道の双方で、約1cmの解析手法による差が見られ、この差は東西方向の変動量の推定誤差として現われている(図-11, 青点線枠部分)。3.2.2節で述べたように本研究におけるPSIにおいては、軌道誤差成分を推定し、除去している。しかし、この処理は、たとえばプレート運動によるテクトニックな変動のような、画像全体に現れるような空間的に長波長の変動を誤差成分として消してしまう。この地域は、プレート運動により画像の北側と比較して画像の南側は北西方向に定常的に変動しているが(国土地理院, 2011)、PSIではこの変動を誤差として除去してしまったために、スタッキングによる結果との差がでたと考えられる。

新潟平野における解析においては、スタッキングによる結果でも、PSIにおいても、阿賀野川河口及び柏崎市付近(南行軌道のみ)等において地盤沈下が確認でき、これら地盤沈下地域において両解析手法による変動量は、変動の範囲、大きさともにほぼ一致している(図-12, 赤点線枠部分)。しかし、九十九里平野の場合と同様に、特に北行軌道の画像において5mm程度の空間的に長波長の変動量の差が見られる(図-12, 青点線枠部分)。

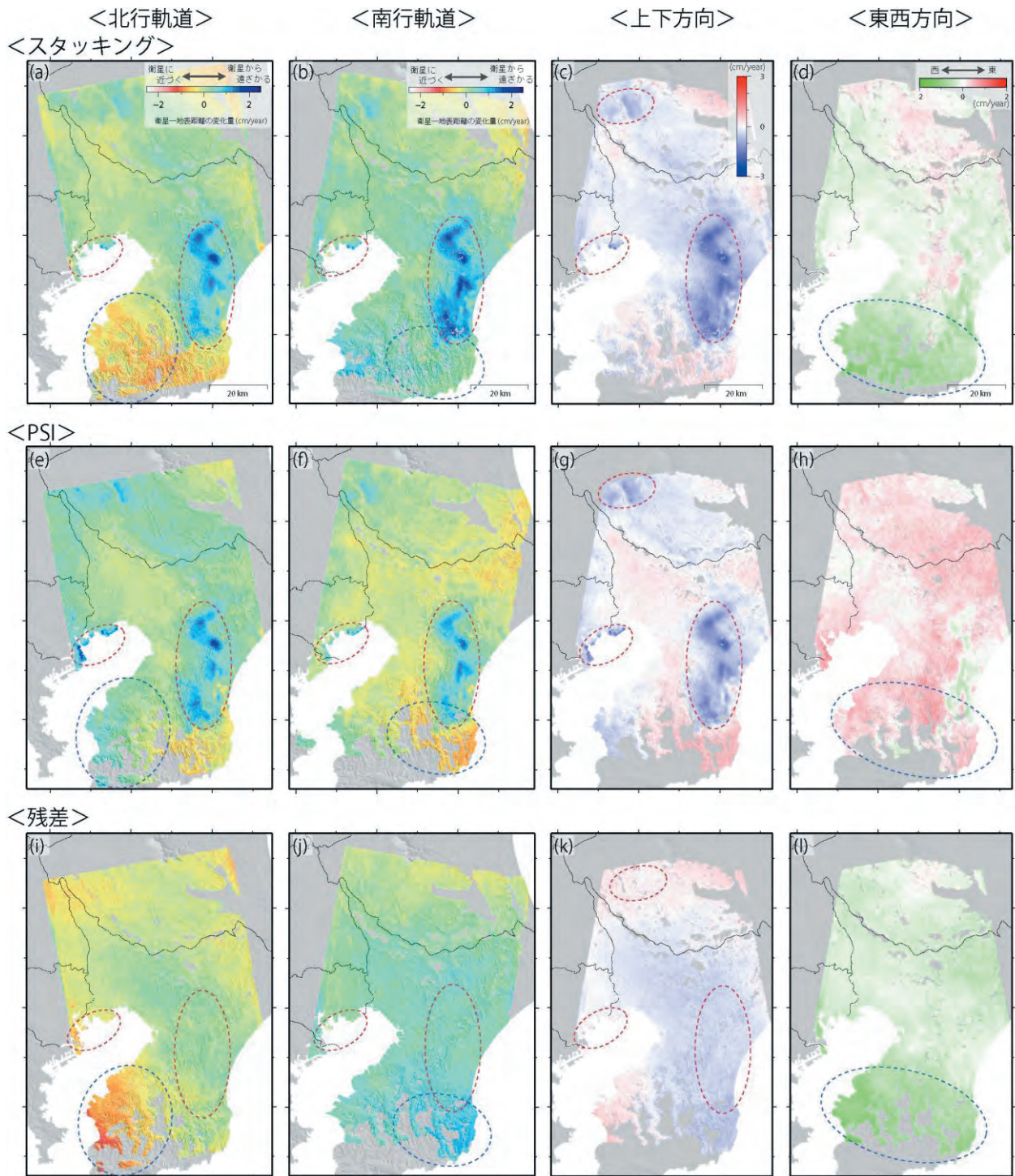


図-11 九十九里平野におけるスタッキングにより検出された変動量と PSI により検出された変動量との比較。  
 (a)~(d) : スタッキングにより求めた変動図。 (e)~(h) : PSI に求めた変動図から Kriging 法による補間により作成した変動図。 (i)~(l) : それぞれスタッキングによる変動量から PSI による変動量を差し引いた残差。 (a), (e), (i)は北行軌道, (b), (f), (j)は南行軌道, (c), (g), (k)は上下方向, (d), (h), (l)は東西方向の変動を示す。  
 赤点線枠は地盤沈下による局所的な変動を示し、この地域では変動量の範囲や大きさに、手法の違いによる大きな差は見られない。青点線枠は手法による変動量の差が見られる地域を示す。

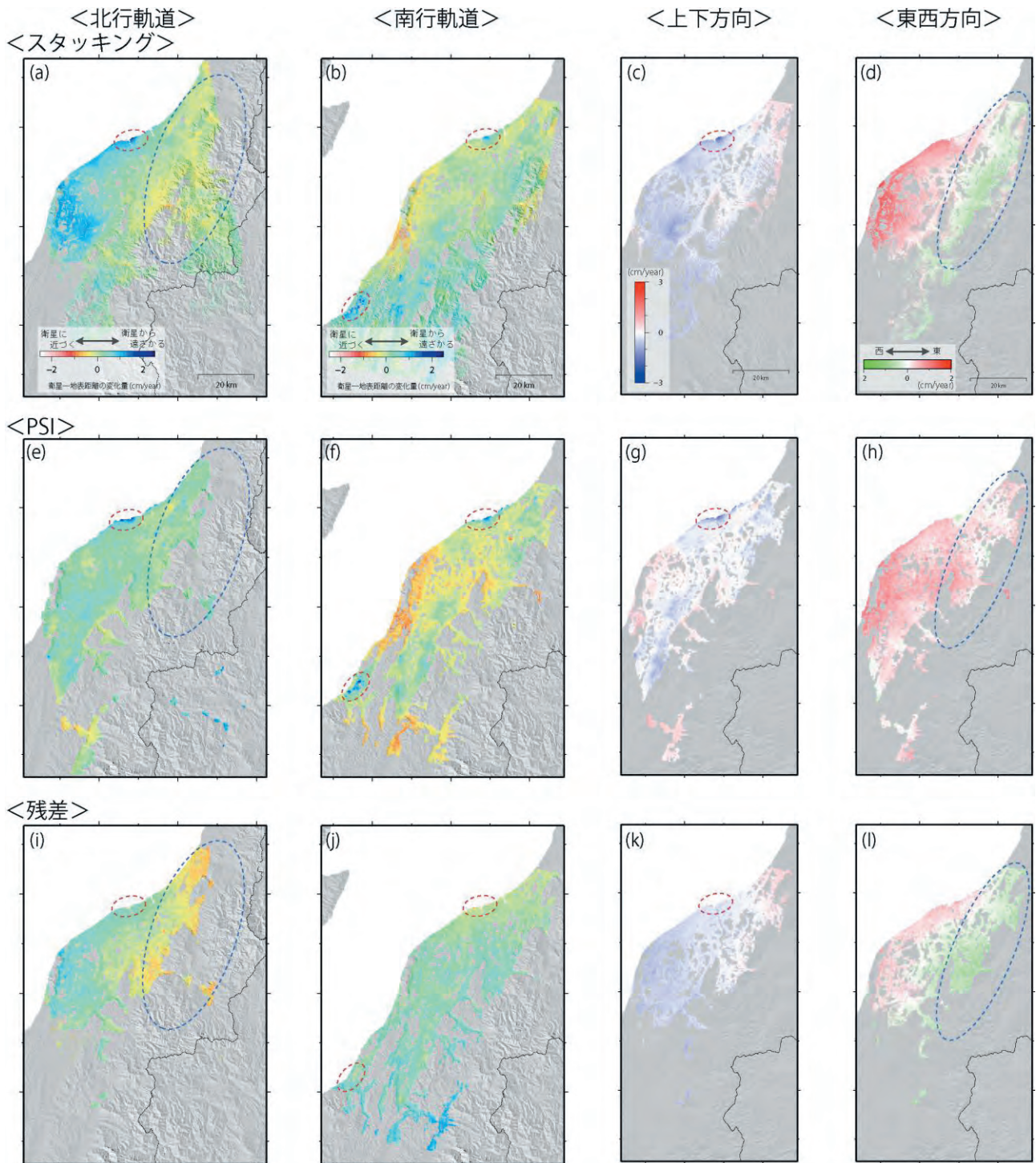


図-12 新潟平野におけるスタッキングにより検出された変動量と PSI により検出された変動量との比較。  
 (a)~(d) : スタッキングにより求めた変動図。 (e)~(h) : PSI により求めた変動図から Kriging 法による補間により作成した変動図。 (i)~(l) : それぞれスタッキングによる変動量から PSI による変動量を差し引いた残差。 (a), (e), (i)は北行軌道, (b), (f), (j)は南行軌道, (c), (g), (k)は上下方向, (d), (h), (l)は東西方向の変動を示す。赤点線枠は地盤沈下による局所的な変動を示し、この地域では変動量の範囲や大きさに、手法の違いによる大きな差は見られない。青点線枠は手法による変動量の差が見られる地域を示す。

#### 4.2 水準測量との比較

第3章で求めたスタッキング及び時系列解析の結果がどの程度の精度を持つのかを検証するために水準測量との結果の比較を行った。比較に使用した水

準測量のデータは、地盤沈下の調査のために一年に一回観測され、千葉県（九十九里平野）及び新潟県（新潟平野）によりとりまとめられたものである。比較に使用した水準点の位置は、図-1 に示すとおり

であり，SAR 干渉解析結果の上下方向の変動図において，水準点の座標から 100m 以内で最も近いピクセルを水準点と同じ位置であると見なし，比較を行った．100m 以内に値をもつピクセルが存在しない水準点については比較を行っていない．

図-13 は，グラフの横軸に水準測量の結果を，縦軸に干渉 SAR による結果をとり，九十九里平野及び新潟平野において，スタッキング及び PSI から求めた平均変動速度と水準測量の結果から求めた平均変

動速度を比較したものである．九十九里平野において比較に使用した水準測量のデータは2006年1月から2011年1月の観測データであり，この期間中の観測回数が3回以下の点は比較する点から除外した．

新潟平野において比較に使用した水準測量のデータは2007年9月から2010年9月の観測データであり，この期間中の観測回数が2回以下の点は比較する点から除外した．

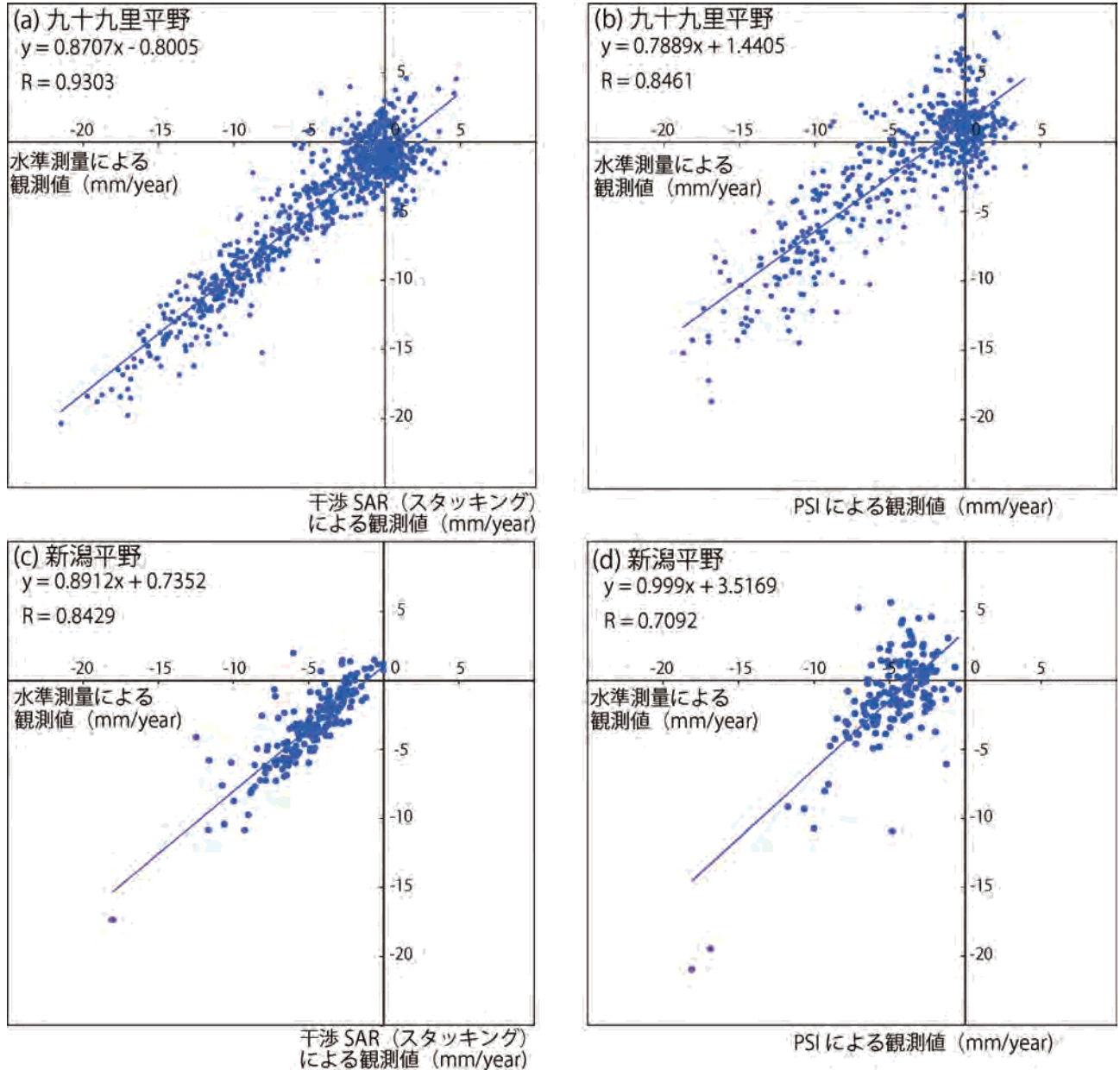


図-13 干渉 SAR により求めた変動速度と水準測量結果との比較.

- (a) : 九十九里平野におけるスタッキングにより求めた変動速度と水準測量結果との比較.
- (b) : 九十九里平野における PSI により求めた変動速度と水準測量結果との比較
- (c) : 新潟平野におけるスタッキングにより求めた変動速度と水準測量結果との比較.
- (d) : 新潟平野における PSI により求めた変動速度と水準測量結果との比較.

スタッキングによる観測値と水準測量の観測値は、九十九里平野においても、新潟平野においても、相関係数は非常に大きく、残差のRMSは2mm/year以下であり、非常によく一致している(表-5)。また、水準測量との較差は最大でも1cm以下である。ただし、回帰直線の傾きがおよそ0.9となり、干渉SARの結果は水準測量と比べると、全体として小さく計測される傾向がある。

表-5 干渉SARによる変動速度と水準測量結果との較差

地区	解析手法	比較に使用した点数(点)	残差の最大値(mm/year)	残差のRMS(mm/year)
九十九里平野	スタッキング	903	7.8	1.9
	PSI	534	10.2	2.6
新潟平野	スタッキング	178	7.5	1.4
	PSI	157	11.1	2.4

九十九里平野のような広域な沈下が見られる地域と、新潟平野のように沈下の範囲が局所的な地域においても、スタッキングにより求めた平均変動速度は水準測量の結果とよく一致したことから、長期間の地盤沈下の地域を特定するのに十分な精度を持っているといえる。

一方、PSIによる観測値は、九十九里平野においても、新潟平野においても、スタッキングと比較すると、水準測量の結果との較差が大きい(表-5)。この原因の一つとしては、位相傾斜平面を推定・除去していることが考えられる。上下方向の変動量は相対的にみると、九十九里平野においては南東側がマイナス(図-2)新潟平野においては西側がマイナス(図-3)に偏っている。そのために、この全体的な傾きを補正するように傾斜平面を推定している可能性がある。

広範囲の解析を実施する際には、衛星の軌道誤差を除去する必要がある。国土院では、通常のSAR干渉解析を実施する際に、GPS補正を行ってきた。軌道誤差の推定は、真の変動も消してしまう可能性があり、PSIを行う場合でも、この誤差成分を推定するのではなく、GPSを利用することで精度を向上させることができる可能性がある(福島・Hooper, 2011)。

年間2cm以上の地盤沈下が発生すると、建物等に影響が生じる可能性がある(環境庁水質保全局企画課・地盤沈下防止対策研究会, 1990)、地盤沈

下の調査の際には、年間2cm以上の変動の有無が、一つの基準となっている(環境省, 2012)。今回、干渉SARによる観測値と水準測量による観測値を比較したところ、残差のRMSはいずれの手法・地域においても3mm以下であり、残差は最大でも11mmであった。この結果は、干渉SARにおいて、多数のデータを用いることで、年間2cm以上の地盤沈下地域を特定するのに十分な精度が得られることを示している。

## 5. まとめ

定常的に地盤沈下が報告されている九十九里平野及び新潟平野において、スタッキング及びPSIを実施した。これら地盤沈下地域において両解析手法による変動量は、変動の範囲、大きさともにほぼ一致した。

また、スタッキング及びPSIの結果がどの程度の精度を持つのかを検証するために水準測量との結果の比較を行った。その結果、年間2cm以上の地盤沈下地域を特定するのに十分な精度が得られることが確認された。

今回、多数の画像を用いた解析を行うことが、長期間にわたり継続する微小な変動の監視に対して有効であることが確認できた。また、自治体等が地盤沈下調査の水準測量を計画する際に、干渉SARの結果を活用することにより、沈下範囲を面的に把握したうえで水準測量を実施することが可能となり、効率的な地盤沈下調査が実施できるものと期待される。

## 謝辞

本研究で使用した「だいち」のPALSARデータの所有権は、(独)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、「陸域観測技術衛星を用いた地理空間情報の整備及び高度利用に関する協定」に基づき、(独)宇宙航空研究開発機構から提供を受けています。また、千葉県及び新潟県がとりまとめた水準測量の結果を使用しました。この場を借りて、御礼申し上げます。

(公開日：平成25年3月26日)

## 参考文献

- Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 2375–2383.
- 出口知敬・六川修一・松島潤 (2009): 干渉SAR時系列解析による長期地盤変動計測, *日本リモートセンシング学会誌*, Vol.29, No.2, 418-428.
- Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca (2000): Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in

- differential SAR interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38, 2202-2212.
- Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca (2001) : Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, 8-20.
- 福島洋・Hooper Andrew (2011) : PS 干渉解析による 2004 年新潟県中越地震後の地殻変動, *測地学会誌*, 57, 195-214.
- 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.
- Hooper, A., H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes (2004) : A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737.
- Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker (2007) : Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, *J. Geophys. Res.*, 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763.
- Hooper, A. (2008) : A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L16302, doi:10.1029/2008GL034654
- 環境庁水質保全局企画課, 地盤沈下防止対策研究会 (1990) : 地盤沈下とその対策, 白亜書房.
- 環境省 (2012) : 平成 23 年度 全国の地盤沈下地域の概況, <http://www.env.go.jp/water/jiban/gaikyo/gaikyo23.pdf>(accessed 8 Jan. 2013).
- Ketelaar, V. B. H. (Gini) (2009) : *Satellite Radar Interferometry: Subsidence Monitoring Techniques*, Springer-Verlag.
- 国土地理院 (2011) : 日本全国の地殻変動, *地震予知連絡会会報*, 第 85 巻, 19-34.
- 森下遊・鈴木啓・雨貝知美・唐沢正夫・藤原みどり (2010) : 干渉 SAR を活用した効率的な水準測量実施に向けた取り組み, *国土地理院時報*第, 120 集, 17-22.
- 新潟県県民生活・環境部 (2012) : 新潟・新発田地域における地盤沈下, <http://www.pref.niigata.lg.jp/kankyotaisaku/1331240490933.html>(accessed 21 Dec. 2012).
- 千葉県環境生活部 (2011) : 千葉県の地盤沈下現況 (平成 22 年 千葉県水準測量結果概要), <http://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/jibanchinka/torikumi/documents/h22-23genkyou.pdf>(accessed 21 Dec. 2012).
- 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の解析技術に関する研究, *国土地理院時報*, 第 106 集, p.37-49.