

# 2008年岩手・宮城内陸地震の地表面変位と崩壊地分布の関係

水野正樹・森田保成・平田育士

## 1. はじめに

地震に伴う崩壊による被害を防止するためには事前に断層と崩壊分布の関係が推測できると有効である。しかし、地震断層による地表面変位量と崩壊地分布の関係を研究した成果は、地表面変位分布の正確な把握が難しいことから少ない。そこで、土砂崩壊や河道閉塞が多く発生した2008年6月14日発生の岩手・宮城内陸地震を対象として、微小地盤変位を把握する衛星干渉SAR画像の2方向の画像を合成処理する2.5次元解析を用いて、地震に伴う「崩壊発生分布」や「河道閉塞の位置」と「地表面変位量の分布」の関係を分析した。図-1に2008年岩手・宮城内陸地震の震度分布と概要を示す。

本研究における2.5次元解析は、地震による「地表面変位量の分布」をより精度良く図化するため、7枚の「差分干渉画像<sup>\*</sup>」を用いるとともに、電子基準点の計測結果を併用して、東西方向、南北方向、垂直方

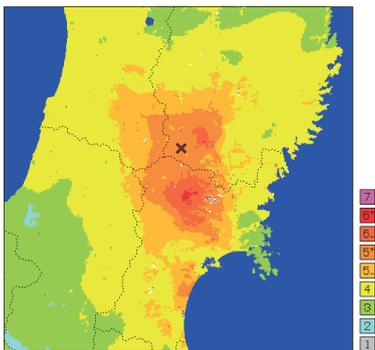


図-1 2008年岩手・宮城内陸地震の推計震度分布図  
 ・発生：2008年6月14日08時43分  
 ・地震の規模：(Mj)7.2  
 ・最大震度：6強  
 ・震源の深さ：8km、逆断層型

出典：気象庁、平成20年8月26日、  
[http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/200806tec-force/00\\_tokubetsu.pdf](http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/200806tec-force/00_tokubetsu.pdf)

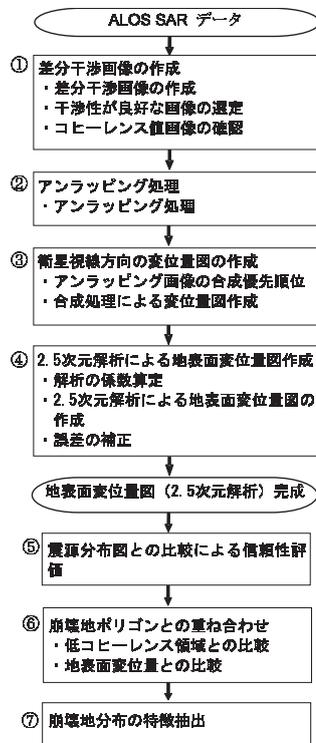


図-2 衛星干渉SARによる地表面変位量図作成と崩壊地分布の特徴抽出フロー

向の3方向の地表面変位量を計算した。

なお、国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部では、平成25年度から「衛星観測による大規模土砂災害監視手法」について研究を行っている。この一環として、「地震時の地表面変位と崩壊地分布を重ねて関係を明らかにする研究」について、委託研究を行っており、本稿はこの成果について報告するものである。

## 2. 解析方法

地球観測衛星「だいち」の合成開口レーダPALSAR（以下「ALOS SAR」という。）のデータを用いて解析を行った。解析方法は、図-2のフローに示す手順により、まず、地震による地表面変位を可能な限り精度良く再現した地表面変位量図を作成した。そして、地震による地表面変位と地震で発生した崩壊地分布や河道閉塞位置の関係を検討した。また、使用したソフトウェアは、GAMMA SAR、ArcGISである。

### 2.1 差分干渉画像

ALOS SAR画像のルック数をレンジ方向（衛星の進行方向）×アジマス方向（直角方向）：6×9と設定して、地震前後のペア画像となる全ての組み合わせについて差分干渉画像を作成した。作成した差分干渉画像は、北行軌道28枚、南行軌道66枚である。作成した各差分干渉画像を視認して干渉性が良好なものから、解析に用いる差分干渉画像を北行軌道3枚、南行軌道4枚、計7枚を選定した。選定した差分干渉画像で使用したALOS SAR画像ペアの撮影日を表-1、表-2に示す。

### 2.2 アンラッピング処理

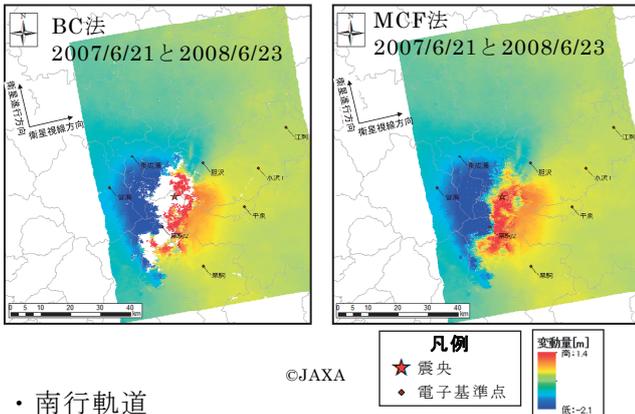
選定した差分干渉画像7枚に対して、「コヒーレンス<sup>\*</sup>」値画像を作成するとともに、Branch Cut法<sup>1)</sup>（以下「BC法」という。）とMinimum Cost Flow法<sup>2)</sup>（以下「MCF法」という。）の2種の「アンラッピング<sup>\*</sup>」処理方法を用いて、「衛星視線方向への変位量」を算出した（図-3）。アンラッピング処理においてコヒーレンスの閾値を

The Relationship Between A “Map of Ground Surface Displacement Induced by the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake” and the “Areas with High Density of Earthquake-induced Landslides”

\*土木用語解説：差分干渉画像、コヒーレンス、アンラッピング

設定すると、その閾値以上の領域のみをアンラッピング処理する。震央付近は、地表面が乱され位置変動が大きく急激に変化するため、差分干渉画像中に縞が不連続でありコヒーレンスが低い領域が広く確認できる。コヒーレンスが低い領域は、位相ノイズが大きいと考えられ、アンラッピングにおいて誤差の要因となりうる。BC法は、位相の連続性能が低い傾向にあるが精度の良い結果が得られるアンラッピング処理方法で、「コヒーレンスの閾値を0.3以上と設定」、かつ「処理可能な連続領域」に対して処理した。MCF法は、精度が低い傾向にあるが位相の連続性能が良い結果が得られるアンラッピング処理方法で、コヒーレンスの閾値を設けず全域を対象に処理した。

・北行軌道



・南行軌道

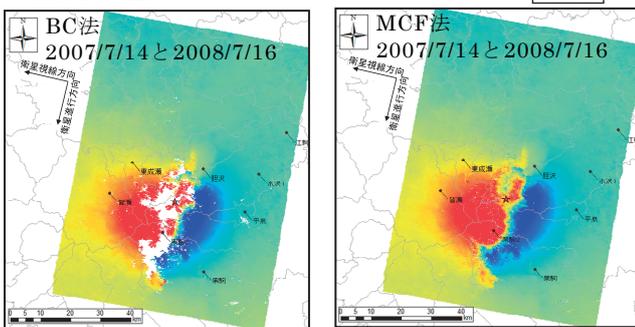


図-3 BC法とMCF法のアンラッピング結果（一部）  
（上：北行軌道、下：南行軌道）

2.3 衛星視線方向の変位量図の作成

2.2で作成したアンラップ画像を基に、より精度が良く、かつ計算不能領域（空白領域）が少ない、北行軌道・南行軌道で各1枚の衛星視線方向の変位量図画像を作成する。このため次に示す、データ合成の優先順位の考え方に従い、画像データの合成の優先順番を表-1と表-2として、北行・南行軌道別に画像データを合成処理した。合成処理の結果を図-4に示す。

・データ合成の優先順位の考え方

- i MCF法よりも、実際の変位量をより正確に反映した結果が得られるBC法の結果を優先。
- ii BC法の結果において、震央付近のアンラッピング処理不能領域の面積が最も小さい結果を優先。
- iii 残る空白領域（処理不能領域）を順に埋めるために、重ねる2番目以降のBC法の変位量図の順番は、震央付近のアンラッピング処理不能領域の面積がより小さい図から優先。
- iv 残る空白領域（処理不能領域）をiiで用いた画像ペアのMCF法の結果で埋める。

なお、BC法とMCF法の2種類のアンラッピング処理のコヒーレンスの閾値は0.3となる。

表-1 北行軌道の合成順番

合成順	アンラップ手法	画像ペア(ALOS撮像日)	
1		2007/6/21	2008/6/23
2	BC法	2007/8/6	2008/6/23
3		2007/9/21	2008/6/23
4	MCF法	2007/6/21	2008/6/23

表-2 南行軌道の合成順番

合成順	アンラップ手法	画像ペア(ALOS撮像日)	
1		2007/8/29	2008/7/16
2	BC法	2007/7/14	2008/7/16
3		2007/8/29	2009/12/4
4		2008/5/31	2010/10/22
5	MCF法	2007/8/29	2008/7/16

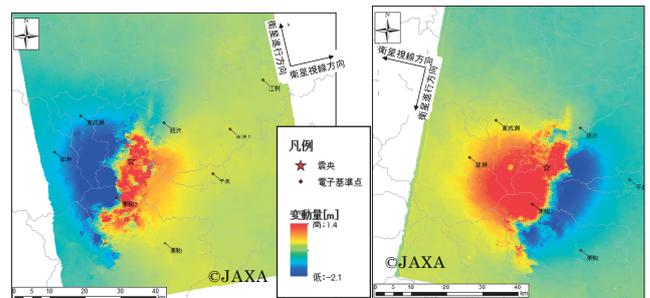


図-4 合成結果（衛星視線方向の変位量図）  
（左：北行軌道、右：南行軌道）

2.4 2.5次元解析による地表面変位量図の作成

まず、北行軌道、南行軌道の画像において、「楕円体誤差」及び、面全体に長周期の成分として現れる「残軌道縞による誤差」の除去を試みた。このうち「楕円体誤差」はほぼ無かったが、「残軌道縞による誤差」の除去は、効果が有り系統誤差が小さくなった。

2.4.1 電子基準点データを併用した2.5次元解析

三次元ユークリッド空間での地表面の変位量を、東西方向を  $\Delta x$ 、南北方向を  $\Delta y$ 、垂直方向  $\Delta z$  とした時、従来、2.5次元解析では、式(1)の仮定で

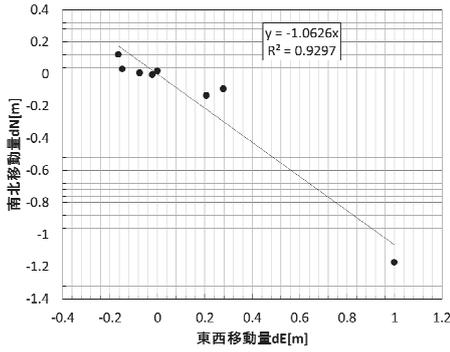


図-5 地震による電子基準点の東西方向と南北方向の移動量（国土地理院、図-7の電子基準点）

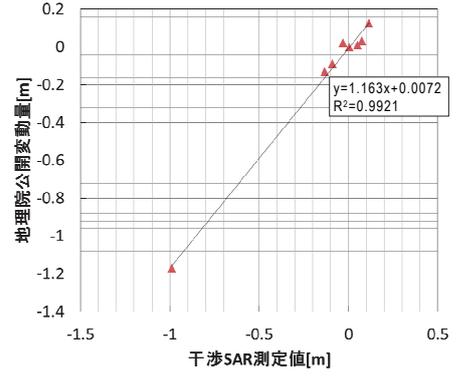
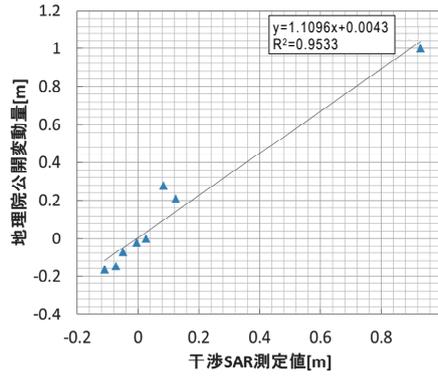


図-6 電子基準点成果と干渉SAR合成変位量との比較（左：東西方向、右：南北方向）

計算している。

$$\Delta y = 0 \quad (1)$$

しかし、今回のような地震での変位解析においては、地震による変位は断層やプレートの動きによって引き起こされるので、水平方向の変位量  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  は完全に独立な関係を持つてはならず、線形の相関があると仮定した。つまり本研究では、式(2)の

$$\Delta y = \alpha \Delta x \quad (2)$$

という条件を設定して、2.5次元解析の関係式<sup>3)</sup>を解いた。今回、係数  $\alpha$  は、図-7に示す各電子基準点における「東西方向の移動量」と「南北方向の移動量」をプロットし、最小二乗法により、 $\alpha = -1.0626$  と求めた（図-5）。

この  $\alpha$  の値と2.3において作成した北行軌道および南行軌道の2つの衛星視線方向の変位量図を基に、2.5次元解析によって垂直方向と水平方向の変位量図を作成した。

#### 2.4.2 電子基準点による誤差補正

「電子基準点における国土地理院公開の各方向の位置変動量」を正確な値として、「2.5次元解析結果による位置変動量」と比較した結果を、図-6に、東西方向と南北方向をそれぞれ示す。

東西方向、南北方向に関しては、電子基準点の地理院公開変動量と干渉SAR測定値の間に良好な線形相関が確認できた。一方、垂直方向に関しては、国土地理院から公開された電子基準点の変動量が、今回の2.5次元解析で検知できる変動量精度より小さく、補正することは適切でないと考えた。以上から、補正は水平方向のみ行うこととした。補正式は次の表-3のとおりである。

#### 2.5 作成した地表面変位量図（誤差補正後）

電子基準点による補正を行い、最終的に求めた

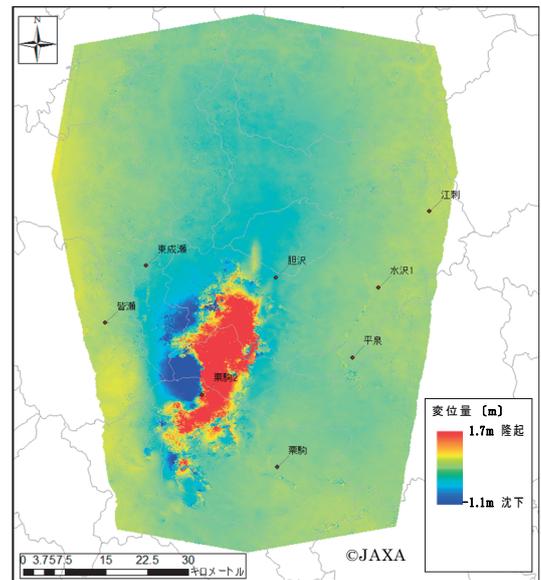


図-7 作成に用いた電子基準点位置と解析範囲と2.5次元解析結果の地表面変位量図（垂直方向）

表-3 水平方向の補正式

方向	補正式
東西	$1.1096 \times (\text{干渉SAR測定値}) + 0.0043$
南北	$1.163 \times (\text{干渉SAR測定値}) - 0.0072$

地表面変位量図を、垂直方向を図-7、図-8左、図-11、図-15に、東西方向を図-8右、図-12に、南北方向を図-13に、それぞれ示す。

### 3. 地表面変位量図の信頼性評価

地表面変位は、地震断層の動きによって引き起こされる。そこで、今回作成した地表面変位量図の信頼性を評価するため、全く異なる種類のデータである余震震源の分布と、今回作成した地表面変位量図の変位量分布を重ねて、傾向として概ね同様の結果が導き出せるかを確認した。震源データは気象庁が公開している2008年の地震月報(カタログ編)震源データを使用した。評価に使用した震源データの期間は、2008年6月14日8:43（本

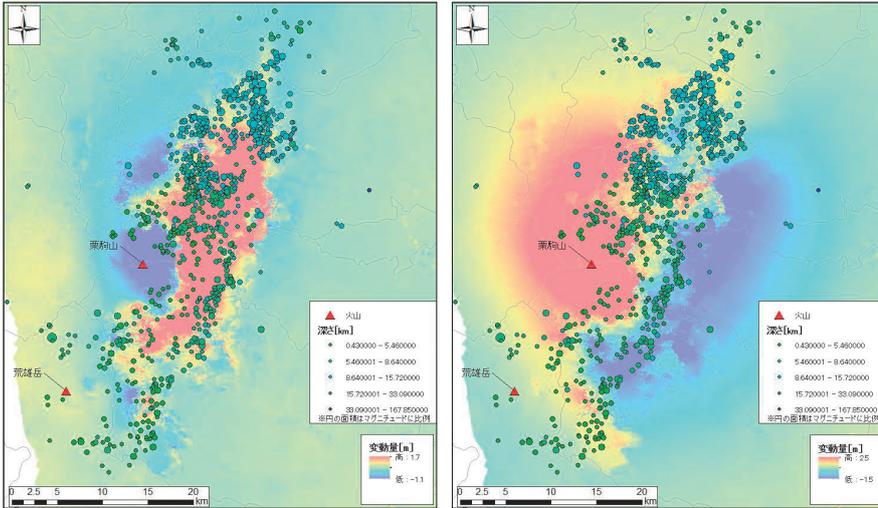


図-8 「地表面変位量図」とM2.5以上の余震震源分布との関係  
(左：垂直方向変位量図、右：東西方向変位量図)

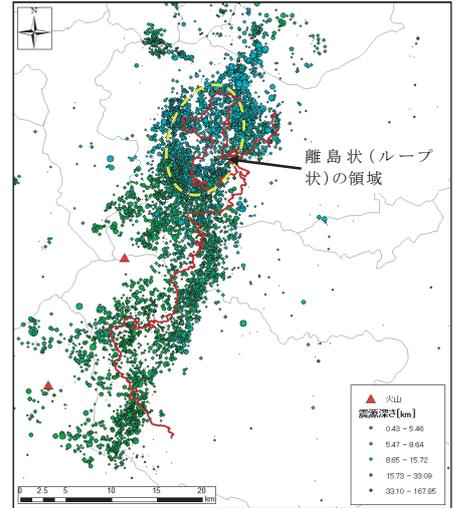


図-9 余震震源分布（全データ）と「東西移動方向が反転する位置の線（赤線）」

震地震の発生時刻) から10日間である。

作成した、地表面変位量と震源分布 (M2.5以上) の関係を図-8に示す。そして、「東西方向変位量図」の「東西移動方向が反転する位置の線」と震源分布の関係を図-9に示す。

・図-9に赤線で示す「東西移動方向が反転する位置の線」は、気象庁の震央分布図<sup>4)</sup>の各横断図における余震震源の分布を見ると、余震震源分布面の延長線上と概ね良好な関係があると考えられる。

・図-9で、赤線で示す「東西移動方向が反転する位置の線」において、離島状 (ループ状) の形状で黄色点線内に存在する変位方向が反転している領域は、図-8、図-9で余震が多く発生している領域と、概ね形状が類似し、位置が一致している。

これらから、作成した地震の地表面変位量図は、余震震源地分布と概ね矛盾の少ない変位量分布を示していると考えられる。

## 4. 解析結果

### 4.1 コヒーレンス値と崩壊地分布の関係

図-10に示すとおり、干渉性が良い画像において、崩壊地の約85%が、コヒーレンス値0.7以下の低コヒーレンス領域内に分布していた。このことから、低コヒーレンス領域を特定することで、崩壊地が多い領域が推測できると考えられる。

### 4.2 崩壊地分布と地表面変位量との関係

#### (1) 評価方法

作成した地表面変位量図と崩壊地分布図を重ね合わせて、関係を検討した。使用した崩壊地分布

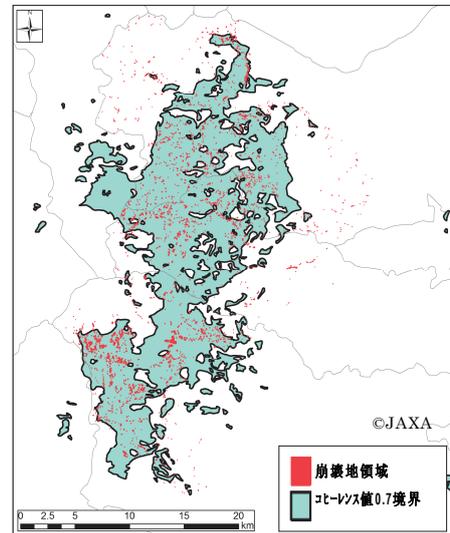


図-10 低コヒーレンス値(0.7以下)領域と崩壊地分布  
(南行軌道：2007/8/29と2008/7/16)

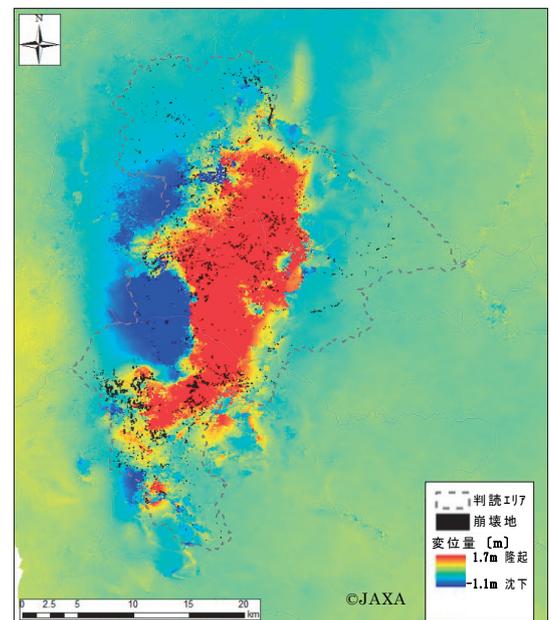


図-11 垂直変位量と崩壊地分布

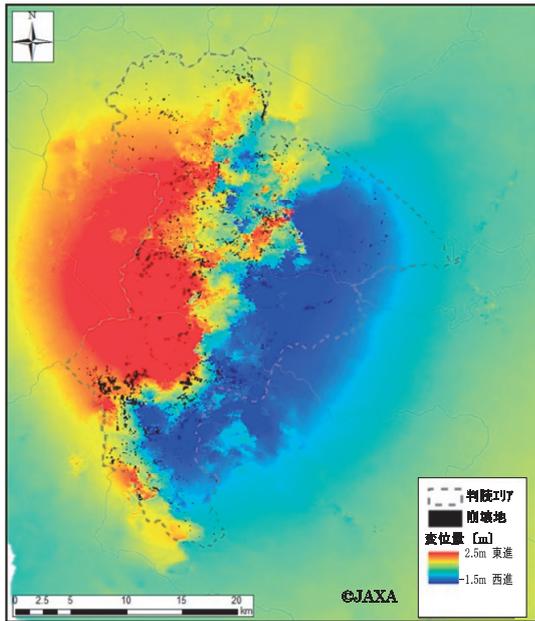


図-12 東西変位量と崩壊地分布

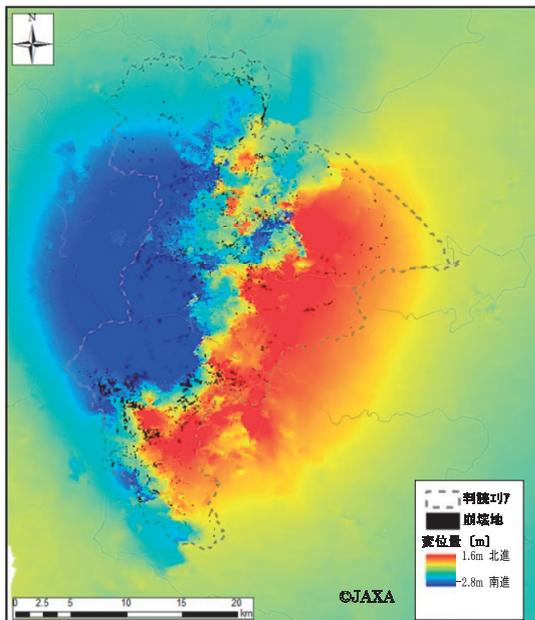


図-13 南北変位量と崩壊地分布

データは、地震直後の航空写真から判読された崩壊地分布のデータ（国総研砂防研究室2009.3）を使用した。地表面変位量と崩壊地分布の重ね合わせ図を図-11、図-12、図-13に示す。評価指標は、単位面積当たりの崩壊地数である。

(2) 「移動方向が反転する位置の線」からの距離と崩壊地分布との関係

崩壊地判読領域内を対象とした、「東西移動方向が反転する位置の線」（図-9）と崩壊地分布の関係を図-14に示す。

図-14から、断層線となることも多い「移動方向が反転する位置の線（水平方向）」からの距離



図-14 「東西移動方向が反転する位置の線」からの距離と「単位面積当たり(1km<sup>2</sup>)の崩壊地数」の関係

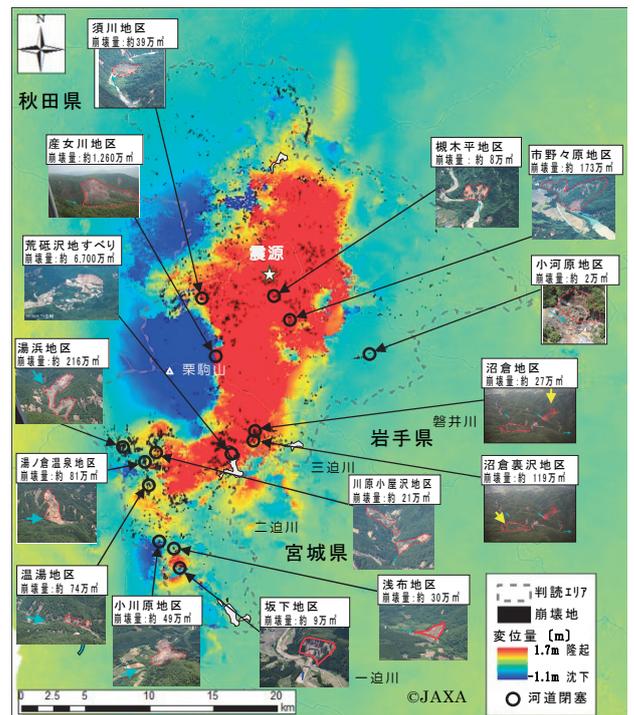


図-15 河道閉塞の位置と地震断層による地盤の垂直変位量

※河道閉塞の位置図：国土交通省砂防部HP、2008.6.25



図-16 三迫川上流ドゾウ沢の土石流と発生源

が近いと崩壊地の発生が多い傾向が明確に確認できる。

4.3 河道閉塞と変位量との関係

この地震で河道閉塞は、図-15に示すとおり、断層の動きで地表面が乱されコヒーレンス値が低い「地盤変位の急変領域」に14箇所、その他の地域に1箇所の合計15箇所形成しており、「断層

による地盤変位の急変領域」において大部分が形成していた。

また、三迫川上流ドゾウ沢で発生した土石流の発生源の領域（図-16）は、地盤変位量（移動量）は大きかったが、コヒーレンス値が高く地表面の乱れもなく、断層付近にある地盤変位量の急変領域ではなかった。

## 5. まとめ

今回の検討で得られた主な成果は以下のとおりである。

- より精度の良い地表面変位を再現するため、2.5次元解析方法を改良した。衛星視線方向の変位量図作成において、干渉性が良好な複数枚（本研究では、北行軌道3枚、南行軌道4枚）の差分干渉画像を用いて、解析不能領域のより少ない衛星視線方向の変位量図を作成した。ここで、より正確と考えるBC法の結果を優先し、BC法のアンラッピング処理不能領域の面積を信頼性の指標として用いて優先順位を付けて重ねあわせた。電子基準点の地震時移動データを用いて、干渉SAR測定値の変位量を補正し、東西方向、南北方向、垂直方向の3方向による地表面変位量図を作成した。
- 本研究で作成した地震の地表面変位量図と、気象庁の余震震源位置データによる余震震源地分布を重ねて比較し、信頼性を評価したところ、作成した地震の地表面変位量図は、余震震源地分布と概ね矛盾の少ない変位量分布を示していると考えられる。
- 断層線付近と考えられる「水平移動方向が反転する位置の線」からの距離が近いと崩壊地の発生が多い傾向が確認できた。

- この地震の大規模崩壊による河道閉塞は、地震による「地盤変位の急変領域」で大部分が形成していた。

本稿では、2008年岩手・宮城内陸地震を対象事例として、Lバンド差分干渉画像の2.5次元解析の改良手法により、従来よりも精度良く地震の地表面変位量図を作成した。これにより、コヒーレンスや地震の地表面変位量と、崩壊地分布や河道閉塞との関係を示した。この研究成果は、地震断層上や断層隣接地は崩壊が発生し易いことを示しており、「将来の地震発生確率」の高い断層における防災対策や、今後の大規模地震時の崩壊多発地域の推測の際等に有用であると考えられる。

## 謝 辞

本研究で用いたALOS SARデータは、一部を除き宇宙航空研究開発機構（JAXA）から提供を受けました。深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Goldstein, R.M., H. A. Zebker and C.L. Werner (1988): Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping, Radio Science, 23, 4, 713-720.
- 2) Mario Costantini (1998): "A novel phase unwrapping method based on network programming," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 3, p.p. 813-821, May 1998
- 3) S.Power, D., Youden, J., Gill, E. and Han, P. Sircar, (2002): "lateral movement estimation from space-borne radar by differential interferometry," St.John's,Newdoudland,Canada, 2002.
- 4) 気象庁地震津波監視課、気象庁地震予知情報課：（報道発表資料）「平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震」について（第9報）、平成20年6月26日、<http://www.jma.go.jp/jma/press/0806/26a/kaisetsu200806261030.pdf>

水野正樹



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部 深層崩壊対策研究官、博士(学術)  
Dr.MIZUNO Masaki

森田保成



(株) パスコ 衛星事業部  
MORITA Yasunari

平田育士



執筆当時 国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室 交流研究員、現 (株) パスコ  
HIRATA Ikushi