

人工衛星 SAR 画像を用いた土砂災害緊急対応時の  
現地状況把握手法の研究

2016 年 3 月

水野 正樹

## 要 旨

本論文は、土砂災害緊急対応時に国や都道府県の職員が状況把握すべき現地情報について、人工衛星 SAR 画像を用いて、より早期かつ正確に把握することを目指して、人工衛星 SAR 画像を用いた土砂災害緊急対応時の現地状況把握手法について研究したものである。

第 1 章では、人工衛星 SAR 画像を用いた土砂災害緊急対応時の現地状況把握手法を研究した背景や目的について言及した。土砂災害の緊急対応においては、従来から有視界飛行のヘリコプターによる目視調査が実施されている。そこで、土砂災害の緊急対応時における衛星 SAR 画像を用いた調査は、「航空機で観測できない場合の情報」、又は「航空機観測より早い情報」となる条件において有効な状況把握手段となり得る。

本論文では、土砂災害緊急対応時に国や都道府県の職員が状況把握すべき現地情報のうち、「大規模河道閉塞箇所」、「斜面の微小変位箇所」、「地震による崩壊多発領域」の 3 つの対象について、SAR 画像を用いることでより早期又は正確に状況把握できる手法を提案した。「大規模河道閉塞箇所」については、河道閉塞が湛水した後の河道閉塞箇所の決壊等による二次災害の発生を防止する目的で、形成の有無と規模を把握する。大規模河道閉塞（概ね閉塞ダム高 20m 以上、かつ被害想定概ね 10 戸以上）の緊急調査は、土砂災害防止法の規定で国の役割となっている。「斜面の微小変位箇所」は、崩壊の予兆となりえる微小変位が斜面に現れた箇所で、「豪雨から数日の間に発生する深層崩壊」や「次期の崩壊災害」等につながる可能性がある箇所である。この箇所は従来から「土砂災害危険箇所等の現地踏査による緊急点検」を実施して確認している。「地震による崩壊多発領域」については、震災対応としてこの領域を特定して、「土砂災害危険箇所等の現地踏査による緊急点検」や「土砂災害警戒情報における地震等発生後の暫定基準の設定」に利用することを提案する。

第 2 章では、「単偏波高分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所の判読調査手法」について記述した。豪雨や地震により大規模な河道閉塞が発生した恐れがある場合には、湛水後の決壊等による二次災害の発生を防止するため、「大規模河道閉塞箇所」の位置と規模を把握することが必要である。さらに、避難や河道閉塞箇所の対策を実施する上では、河道閉塞による天然ダムの湛水がより少ない早い段階において、河道閉塞箇所を発見することが重要である。しかし、災害時の緊急対応としての河道閉塞の探索は、従来、昼間の有視界飛行ヘリコプターによる目視調査や地上からの現地点検により実施されてきており、ヘリ目視調査や現地点検を行うことのできない夜間や悪天候時には、山間部における河道閉塞箇所の探索を行うことが困難であった。そこで、山間部の広域なエリアにおいて大規模な河道閉塞が発生した恐れがあり土砂災害が急迫した状況下において、災害発生情報の取得が出来ない空白時間を可能な限り減らし、より早く河道閉塞の発生状況を把握することを目的として夜間や悪天候時においても地表の状態を観測可能な「人工衛星の単偏波高分解能 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所の緊急判読調査手法」について研究を行った。高分解能 SAR 画像の判読による河道閉塞箇所の探索は、判読を行う技術者により、見落とし、過抽出等が生じて、得られる結果が大きく異なることが危惧される。本研究では、2011 年台風 12 号紀伊半島大水害で河道閉塞が多発した地域の河道閉塞画像を検討対象として、異なる撮影条件の単偏波高分解能人工衛星 SAR 画

像を用いて、河道閉塞箇所の視認性評価を行った。その視認性評価の結果を踏まえて、河道閉塞の探索時に入手が必要な単偏波 SAR 緊急観測画像の基本仕様を明確化した。明確化した項目は、必要な分解能、適する入射角、観測幅、照射方向、バンド等である。その際、判読者の違いにより結果に大きな差が生じないようにする目的で、単偏波 SAR 画像判読を用いた河道閉塞探索の際の重要な着眼点を標準的な判読基準として明確化して、判読チェックリストを作成した。さらに河道閉塞探索時の効率的な SAR 画像判読のため、留意事項として、グランドレンジ画像を用いた判読、判読時の SAR 画像の正立配置、判読時のエリア優先順序、スタック画像の利用について示した。そしてこれらの研究成果を取りまとめて、国土技術政策総合研究所資料として公表した。

第3章では、「多偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法」について記述した。前章で検討した、単偏波 SAR 画像は、モノクロ画像のため視認性が低く、崩壊地の判読見逃しが課題であった。そこで、前章と同様に 2011 年台風 12 号の河道閉塞画像を検討対象として、地表面の状況に応じて反射強度が異なるため視認性がより良い3種類の多偏波 SAR 画像を用いて、視認性を評価した。この視認性評価の結果から、「多偏波 SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞の緊急判読調査手法」に用いる画像として、8m より高い分解能の2偏波 HH+HV 単純合成画像を選定した。この画像は、裸地の判読視認性向上により、河道閉塞のみならず単偏波では判読困難であった土石流痕跡や表層崩壊や伐採跡地等が判別できる可能性がある。また、崩壊地や河道閉塞箇所をより早く正確に判読する事ができる。そして、この2偏波 HH+HV 単純合成画像の判読手法についても、河道閉塞探索の際の重要な着眼点を標準的な判読基準として明確化して、判読チェックリストを作成し、単偏波画像の判読と同様に、これらの研究成果を取りまとめて、災害時のマニュアルとして活用できるように、国土技術政策総合研究所資料として公表した。

第4章では、人工衛星 SAR 画像判読を用いた、海外で発生した天然ダムの緊急対応事例について示した。インドネシア共和国アンボン島で 2013 年 7 月に発生した大規模な天然ダムの決壊災害の際には、天然ダムの形成・決壊を高分解能衛星 SAR 画像で緊急に観測し、これらの SAR 画像と「衛星光学画像から作成した DEM」及び「天然ダム湛水域の深淺測量結果」を用いて緊急に決壊状況を推定した。そしてこれらの検討結果について土砂災害の技術支援として日本国政府からインドネシア政府へいち早く情報を提供した。

第5章では、「L バンド差分干渉 SAR (以下、DInSAR) による斜面の微小変位箇所の抽出手法」を災害時に実用するために手法の特徴や留意点を明らかにした。地震や豪雨災害等の直後に都道府県や国は、「土砂災害危険箇所等の現地踏査による緊急点検」を実施する。これは、被災状況把握の目的のほか、土砂災害につながる異常現象を早期に発見することを目的として実施するもので、地震や豪雨により崩壊が多く発生した災害では、「数時間から数日の時間をおいて発生する深層崩壊」や「次期の崩壊災害」等につながる「斜面の微小変位箇所」が発生している可能性がある。しかし、対象エリアの広い山間部においては崩壊発生前の予兆となる斜面の微小変位を現地踏査で見つけることは難しかった。そこで紀伊半島と長野県周

辺域を対象に、斜面の大規模土塊の微小変位を探索できる、ALOS PALSAR の「L バンド DInSAR による斜面の微小変位箇所抽出手法」について研究を行った。国や都道府県は、地震や豪雨等の直後の緊急点検の際に、崩壊発生の予兆となる「斜面の微小変位箇所」が発見できると、その後の斜面崩壊への警戒や対策が可能となると考えられる。明らかにした DInSAR の特徴は、地形条件として「平地に囲まれた単独峰」や「河川屈曲部に隣接する斜面」は誤抽出となりやすいこと、積雪があると干渉性が悪くなること、マスター画像とスレーブ画像の撮影日間隔が長いと干渉性が悪い場合があること、について事例やデータを基に図示した。また、ALOS PALSAR の DInSAR で抽出された「地すべり移動候補箇所」のうち、保全対象が重要な箇所について、地すべり移動の有無を確認する一連の GPS 測量手順を試行して、過去の海溝型地震時に大規模崩壊を起こしたとされる長野県稲子岳で大規模な山体移動が有ることを初めて確認した。これらを基に DInSAR 画像から抽出された「地すべり移動候補箇所」から、移動の有無を現地計測により確認する優先度の判定方法を提案した。

第 6 章では、2008 年岩手・宮城内陸地震を対象事例として ALOS PALSAR データを用いて、L バンド差分干渉画像の 2.5 次元解析の新たな手法で、従来よりも誤差の少ない「地震の地表面変位量図」を再現するとともに、「地震の地表面変位量」と「地震の崩壊多発領域」の関係を明らかにした。ここではまず、衛星視線方向の変位量図を作成において、①「Branch Cut 法と Minimum Cost Flow 法を併用」、②「Branch Cut 法の未アンラップ領域面積を信頼性の指標として『多数枚の差分干渉画像』を用いて作成」により、空白が無く、かつ、より誤差の少ない図を作成した。次いで、地表面変位量図の作成において、③「電子基準点の地震時移動データを利用して、東西、南北、垂直方向の 3 方向による地表面変位量を再現」、④「移動方向が異なる移動領域を持つ地震にも対応」等によって、誤差を低減した。これらにより、本研究では、震源地分布との適合性が良く、従来方法に比べて電子基準点データとの誤差が少ない、「地震の地表面変位量図」を作成した。また、地表面変位量と崩壊地分布の関係として「地表面の上方移動領域（上盤）に崩壊地が多い」及び「水平移動方向が反転する位置の線から近いと崩壊地が多い」ことを新たに明らかにした。また、「水平移動方向が反転する位置の線」が入り組んでいるほど、断層の力が複雑にかかることで、崩壊地が多くなる可能性について考察した。この新たな手法は、大規模地震時の崩壊多発領域の予測手法としても有効であり、この「地震による崩壊多発領域」を震災対応の対象エリアを特定する基準に利用することを提案する。

第 7 章では、研究成果の結論とともに、残る今後の課題についてまとめた。残る課題としては、海溝型地震のように「大規模な河道閉塞が発生した恐れがあるエリア」が広い場合の対応、DInSAR の成果を用いた警戒避難の対象エリアの設定方法等がある。

Investigation of the field situation using SAR satellite images for the emergency response following landslide disasters

This thesis deals with the research results on “Investigation of the field situation using SAR satellite images for the emergency response following landslide disasters”. The purpose of this research is to develop an investigation method to know the field situation quickly and accurately in affected areas through landslide disasters for state and prefectural government officials.

In the 1<sup>st</sup> chapter, the background and the purpose of the research is explained.

In this research, a new investigation method to know the field situation quickly or accurately using SAR satellite images is developed in relation to the following three targets: These are “large scale landslide dams”, “slope areas with slight deformation” and “densely collapsed areas by earthquakes”.

In the 2<sup>nd</sup> chapter, “emergency survey method to identify landslide dams using high-resolution single-polarization SAR image interpretation” is described. The targeting data of this research were collected in the Kii Peninsula region, where a lot of landslide dams were formed by the Typhoon Talas in 2011. On the basis of the results of the identifiability assessment, the necessary basic specifications of single-polarization SAR images for emergency survey of landslide dams are clarified. Important checkpoints and remarks for identification of the landslide dams are formulated as standard interpretation criteria.

In the 3<sup>rd</sup> chapter, “emergency survey method to identify large scale landslides and landslide dams using high-resolution multi-polarization SAR image interpretation”, which has better identifiability, is described. On the basis of the results of the identifiability assessment, simple HH+VV superposition of dual-polarization images with resolution higher than 8 m are selected. An appropriate interpretation checklist is formulated for this execution. These research results were published as a technical report for the NILIM. The technical report can be used as a guideline for emergency response in case of landslide disasters.

In the 4<sup>th</sup> chapter, a case study on emergency response using SAR satellite images is introduced regarding the collapse of a landslide dam at Ambon Island, Indonesia.

In the 5<sup>th</sup> chapter, an idea on the “priority of the field investigations” with necessary remarks and data of correct answer is explained regarding the “methods for identification of slope areas with slight deformation using DInSAR”. On the basis of the results of field measurements, slight movements of a large-scale landslide body was identified in the target area at Mount Inago, Nagano Prefecture.

In the 6<sup>th</sup> chapter, a new analysis method using 2.5 dimensional analysis of DInSAR images is proposed for the case of the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake. In this method, “multiple DInSAR images” are applied. Earthquake-induced movement in the horizontal direction is also applied as an input. A “map of ground surface

displacement induced by an earthquake”, which has higher resolution than other maps by conventional methods, was obtained by the proposed method mentioned above. Further, the relationship between this map and the “areas with high density of earthquake-induced landslides” is explained. This method is effective also for prediction of areas with high density of earthquake-induced landslide.

The 7<sup>th</sup> chapter summarizes conclusions of the research, and remaining tasks.

## 目 次

第1章 序論	…	1
1.1 土砂災害の緊急対応の現状	…	1
1.2 SAR画像の特徴	…	11
1.3 人工衛星 SAR画像を用いた土砂災害対応の既往研究	…	14
1.4 研究の目的	…	16
1.5 本論文の構成と内容	…	21
第2章 単偏波 SAR画像を用いた河道閉塞箇所の緊急判読調査手法	…	25
2.1 研究概要	…	25
2.2 SAR画像の判読不能領域	…	26
2.3 2011年台風12号通過直後における SAR画像判読	…	27
2.4 高分解能 SAR画像の撮影諸元の検討	…	31
2.5 標準的な判読方法の検討	…	46
2.6 本章のまとめ	…	51
第3章 多偏波 SAR画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞箇所の緊急判読調査手法	…	53
3.1 研究概要	…	53
3.2 視認性の評価方法	…	53
3.3 評価結果	…	54
3.4 本章のまとめ	…	61
第4章 衛星 SAR画像判読の海外の天然ダム災害への適用事例	…	63
4.1 概要	…	63
4.2 災害経過	…	63
4.3 単偏波 SAR重ね合わせ画像による決壊状況把握	…	66
4.4 決壊後の残存天然ダムの危険度判定	…	68
4.5 本章のまとめ	…	69
第5章 衛星差分干渉 SARによる発災前の初期微移動地すべりの探索	…	71
5.1 研究概要	…	71
5.2 DInSARによる地すべり移動の広域抽出	…	72
5.3 GPS測量による地すべり移動候補箇所の確認事例（稲子岳）	…	87
5.4 地すべり移動候補箇所の現地計測調査の優先度判定	…	98
5.5 差分干渉 SAR画像の観測条件や斜面条件が与える影響の評価	…	99
5.6 本章のまとめ	…	102
第6章 干渉 SARの2.5次元解析で抽出した地震の地表面変位と崩壊分布の関係	…	105
6.1 研究概要	…	105

6. 2	差分干渉画像の作成	… 108
6. 3	アンラッピング処理	… 119
6. 4	衛星視線方向の変位量図の作成	… 135
6. 5	合成処理による変位量図の合成精度評価	… 138
6. 6	合成処理による変位量図の誤差評価	… 146
6. 7	系統誤差の除去	… 149
6. 8	2.5次元解析による合成変位量の推定	… 152
6. 9	合成変位量の推定結果の誤差評価	… 164
6. 10	合成変位量の補正	… 166
6. 11	誤差評価	… 176
6. 12	「栗駒2」の誤差	… 179
6. 13	コヒーレンス値による信頼性評価	… 186
6. 14	余震震源分布との比較による信頼性評価	… 194
6. 15	崩壊地分布との関係の抽出	… 201
6. 16	2領域で変位する地震の変位量把握	… 219
6. 17	地震発生時の崩壊地発生予測の他の解析手法との比較	… 224
6. 18	本章のまとめ	… 227
第7章 結論及び展望		… 230
7. 1	本研究の結論	… 230
7. 2	今後の展望と課題	… 233
謝辞		… 237

# 第1章 序論

## 1. 1 土砂災害の緊急対応の現状

### 1. 1. 1 河道閉塞により大規模な土砂災害が急迫している場合の災害対応

河道閉塞により大規模な土砂災害が急迫している場合、国は、図 1.1.1 に示すように、土砂災害防止法に基づき「緊急調査」を実施して、緊急調査に基づき被害が想定される区域・時間の情報を「土砂災害緊急情報」として、市町村へ通知するとともに一般へ周知することとなる。ここで、対象とする河道閉塞は、土砂災害防止法施行令において「越流開始地点の堆積した土石等の高さがおおむね 20 m 以上であるとともに、土石流により被害が予想される土地の区域に存する居室を有する建築物の数がおおむね 10 戸以上であること」としている。

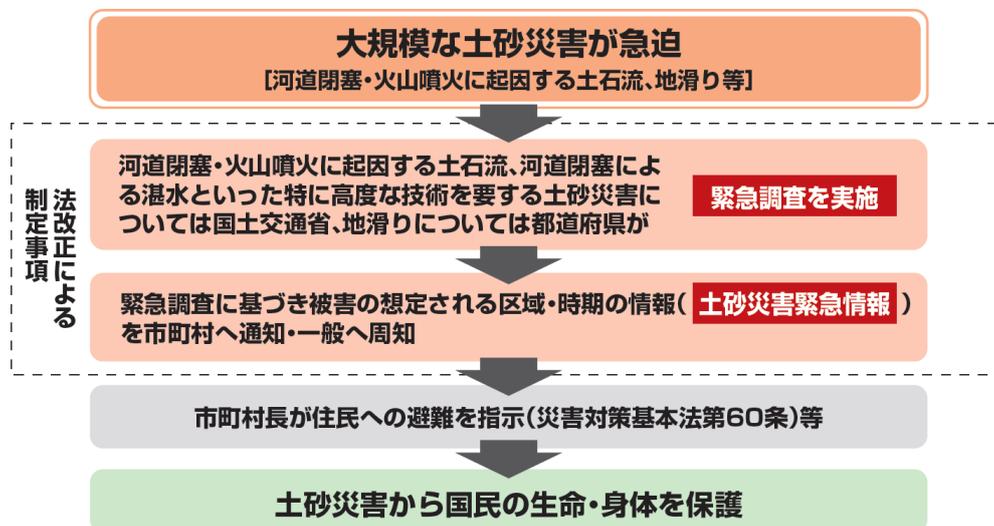


図 1.1.1 土砂災害防止法の概要<sup>1)</sup>

Fig. 1.1.1 Summary of the landslide disasters prevention act

出典：国土交通省水管理・国土保全局砂防部（2011）：土砂災害防止法の一部改正について（平成 23 年 5 月施行）パンフレット <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/H23kaisei.pdf>

大規模な土砂災害が急迫している場合の災害対応について、実際の災害の対応事例によりその流れを示すと、緊急調査対象 5 箇所を含む計 17 箇所の河道閉塞（図 1.1.2）が発生した 2011 年台風 12 号による紀伊半島大水害における、河道閉塞の「緊急調査」、「土砂災害緊急情報」の対応状況は、次のとおりである。

- ・ 2011 年 9 月 4 日 午前中まで降雨有り
- 9 月 6 日 大規模な河道閉塞が確認されたことから、緊急調査を開始することを報道発表<sup>2)</sup>
- 9 月 8 日 「土砂災害緊急情報」として、「河道閉塞による湛水を発生原因とする土石流等による被害が想定される土地の区域」を報道発表（図 1.1.3）<sup>3)</sup>



図 1.1.2 2011 年台風 12 号による河道閉塞の位置 4)

Fig. 1.1.2 The location of the landslide dams by Typhoon No.12 (TALAS) of 2011

出典：近畿地方整備局河川計画課（2013.4）：平成 23 年台風 12 号により紀伊山地で発生した河道閉塞への対応（初動体制、緊急調査等）、砂防事業に関する調査・研究の動向（その 9）、国土技術政策総合研究所資料第 732 号土木研究所資料第 4261 号、第 3 分科会、p107、一部加筆、<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tmn/tmn0732pdf/ks073207.pdf>

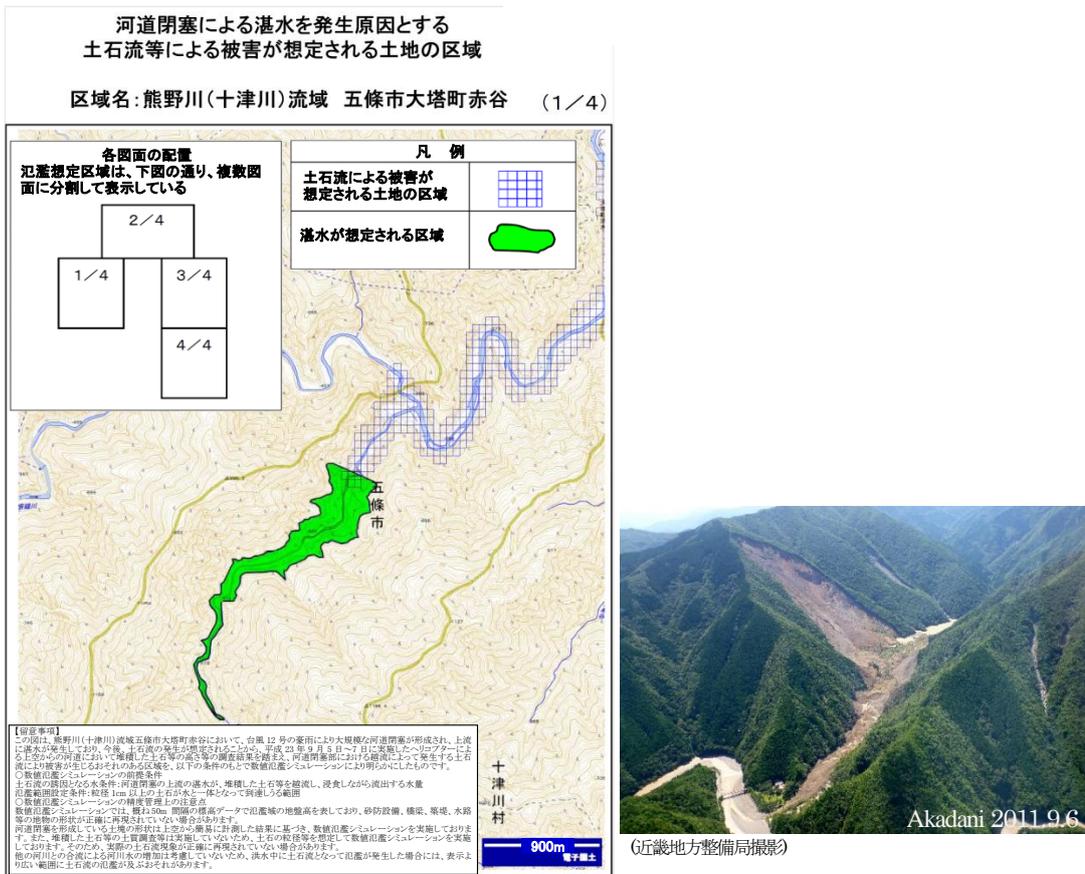


図 1.1.3 土砂災害緊急情報の事例<sup>3)</sup>

Fig. 1.1.3 Example of a landslide disaster emergency information

出典：国土交通省水管理・国土保全局砂防部：（平成 23 年 9 月 8 日報道発表資料）土砂災害防止法に基づく土砂災害緊急情報について

この2011年紀伊半島災害の際に発表された、「河道閉塞による湛水を発生原因とする土石流等による被害が想定される土地の区域」の発表事例を図1.1.3に示す。このように、大規模な河道閉塞が発生した恐れがある場合、河道閉塞の決壊等による被害を防止するために、河道閉塞の探索、規模の確認、緊急調査、氾濫範囲の算定、土石災害緊急情報の発表、住民避難、河道閉塞の監視(図1.1.4)、緊急工事といった一連の災害対応を、河道閉塞が満水して決壊する前に実施する必要がある。そこで、崩壊により河道閉塞が形成した場合には、出来る限り早期に、河道閉塞箇所を発見する事が重要である。この河道閉塞の形成確認調査は、従来から有視界飛行のヘリにより目視調査が実施されている。しかし、夜間や悪天候時は飛行や目視調査ができない。

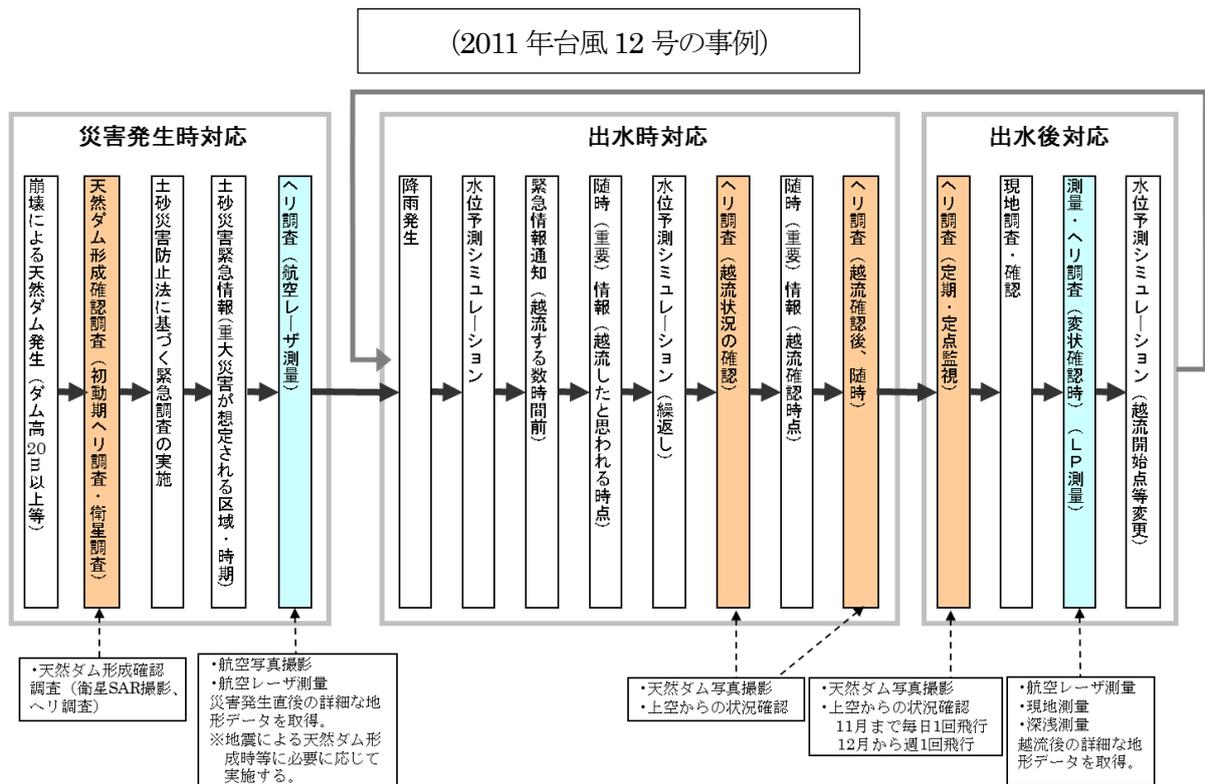


図 1.1.4 風水害による河道閉塞調査の流れ<sup>4)</sup>

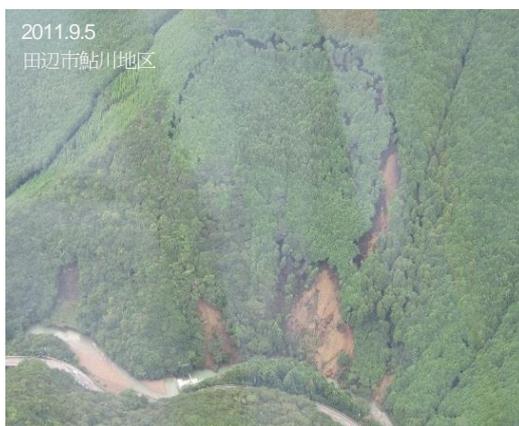
Fig. 1.1.4 Flow chart of the emergency investigation of landslide dams

出典：近畿地方整備局河川計画課(2013.4)：平成23年台風12号により紀伊山地で発生した河道閉塞への対応(初動体制、緊急調査等)、砂防事業に関する調査・研究の動向(その9)、国土技術政策総合研究所資料第732号土木研究所資料第4261号、第3分科会、p108,p115、一部加筆、<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0732pdf/ks073207.pdf>

## 1. 1. 2 「斜面の微小変位箇所」の調査

### (1) 災害直後の「斜面の微小変位箇所」の調査

地震や豪雨災害等の直後に県や国は、「土砂災害危険箇所等の現地踏査による緊急点検」や「ヘリによる目視調査」を実施する。これは、被災状況把握の目的のほか、土砂災害につながる異常現象を早期に発見することを目的として実施するもので、地震や豪雨により崩壊が多く発生した災害では、「数時間から数日の時間をおいて発生する深層崩壊」や「次期の崩壊災害」等につながる「斜面の微小変位箇所」が発生している可能性がある。しかし、対象エリアの広い山間部における現地調査は、変位量が小さい場合や亀裂が確認しやすい道路等が無い地域の場合、崩壊発生前の予兆となる土塊の変位を見つけることが難しい。(写真 1.1.1)



ヘリによる目視調査

現地調査

写真 1.1.1 「豪雨による斜面の微小変位箇所」の探索

Photo 1.1.1 Landslide movements by the heavy rain

## (2) 深層崩壊の危険の高いエリアの特定に関する調査

現地調査やヘリ目視調査により、「斜面の微小変位箇所」等の「深層崩壊」が発生する個別斜面を発災前に予め特定することは難しい。そこで、国土交通省は、深層崩壊に関する調査として、①「深層崩壊推定頻度マップ」、②「深層崩壊溪流レベル評価マップ」、③「深層崩壊跡地密度マップ」の3種類のマップを予め作成して、深層崩壊の危険の高いエリアの特定に努めている。

### ①「深層崩壊推定頻度マップ」<sup>5)</sup>

国土交通省は、明治期(1868年)以降に発生した深層崩壊事例を調査するとともに、隆起量の大きさや特定の地質との関係を分析して、統一的な指標で深層崩壊の危険性を検討した。これらの結果から国土交通省は、日本全国の深層崩壊の発生頻度を推定した「深層崩壊推定頻度マップ」を作成し、全国的な傾向を把握した。2010年に公表された「深層崩壊推定頻度マップ」を図1.1.4に示す。

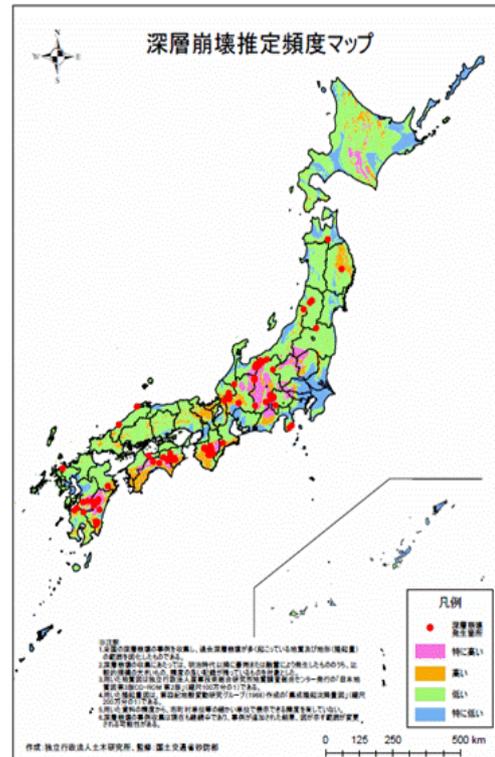


図 1.1.4 深層崩壊推定頻度マップ<sup>5)</sup>

Fig. 1.1.4 The estimated frequency map of deep-seated landslides

### ②「深層崩壊溪流レベル評価マップ」<sup>6)</sup>

国土交通省は、地質や気候条件が概ね等しいと考えられる地域を対象に、空中写真判読等により、「深層崩壊の発生実績」、「地質構造及び微地形要素」、「地形量(勾配及び集水面積)」の3要素を調査し、約1km<sup>2</sup>の溪流レベルで評価した。そして国土交通省は、評価区域内の相対的な危険度を、3要素の有無により4段階(3つあり、2つあり、1つあり、なし)で評価し、地図に色分けして表示した。2012年に作成された「深層崩壊溪流レベル評価マップ」の例を図1.1.5に示す。

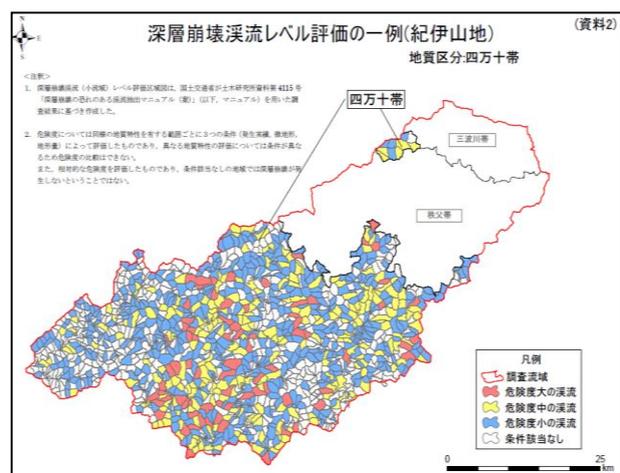


図 1.1.5 深層崩壊溪流レベル評価マップの例<sup>6)</sup>

Fig. 1.1.5 Example of the hazard map of deep-seated landslides in the mountain stream level

③ 「深層崩壊跡地密度マップ」<sup>6)</sup>

2012年に国土交通省が作成した「深層崩壊跡地密度マップ」(図 1.1.6)は、深層崩壊の跡地の分布状況から全国的な深層崩壊の発生傾向を整理した地図である。これは、図 1.1.4 で示した「深層崩壊推定頻度マップ」の「特に高い」地域について、図 1.1.4 の作成で用いた統計的な手法に加え、実際に深層崩壊の発生跡地を判読したものを追加し、深層崩壊の発生傾向をより詳細に分析して作成されている。

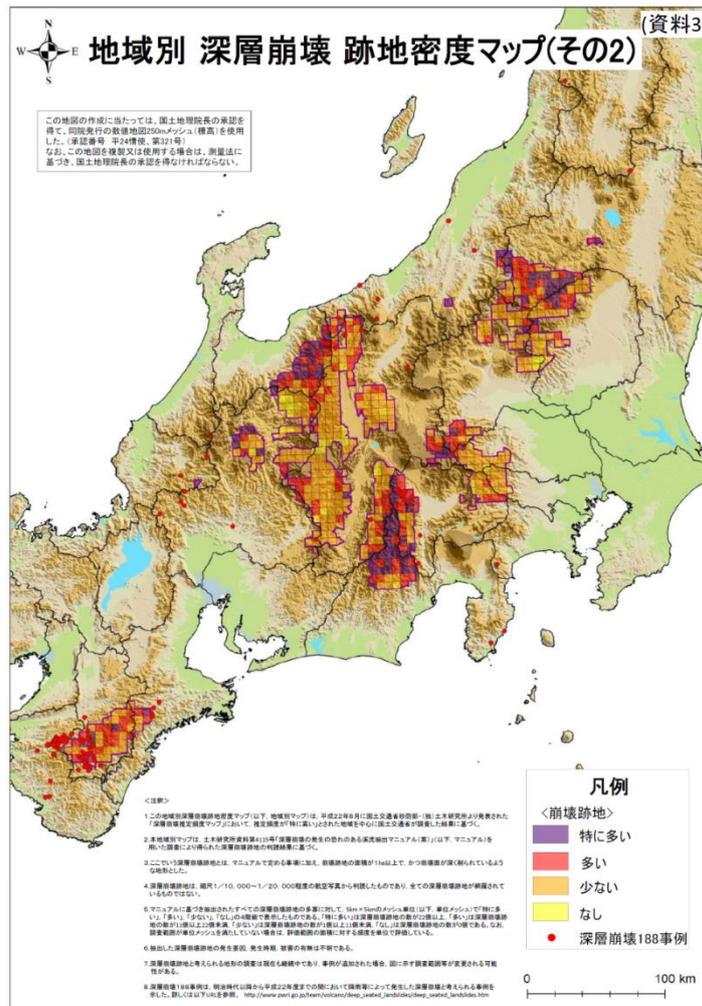


図 1.1.6 「深層崩壊跡地密度マップ」の例<sup>6)</sup>

Fig. 1.1.6 Example of the remained site density map of deep-seated landslides

### 1. 1. 3 地震発生時の崩壊多発領域や緩み領域の予測手法

地震災害が発生した場合、都道府県や国は、地震で発生した崩壊地や被災箇所、地震に伴い二次的な土砂災害発生危険性が懸念される地域を早期に把握するために、「被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検」<sup>7)</sup>を実施する。さらに、地盤条件等が変化して通常時よりも少ない降雨で土砂災害の発生する可能性があることから、都道府県や気象台は、「土砂災害警戒情報における地震等発生後の暫定基準の設定」<sup>8)</sup>を行う。この点検と設定の対象エリアは、「地震による崩壊多発領域」や地盤の「緩み領域」により対応したエリア設定手法が望ましい。現在、地震災害時に実運用される、又は、既存研究で提案されている設定手法は、**図 1.1.8**、**図 1.1.9**、**図 1.1.10**に示す3手法である。このうち、**図 1.1.8**の「震度分布」による手法は、「被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検」や「土砂災害警戒情報の暫定基準」<sup>8)</sup>の対象地域の設定において、既に実際の地震災害時に運用されている。また、東日本大震災以降、地震による山腹斜面の崩壊危険度評価法として、**図 1.1.9**に示す地震動の加速度分布による崩壊地発生予測手法や、**図 1.1.10**に示す「地震による斜面崩壊危険度評価判別式」による方法が試行されている。

なお、「土砂災害警戒情報の暫定基準」では、**図 1.1.7**に示す Critical Line (CL) が引き下げられる。

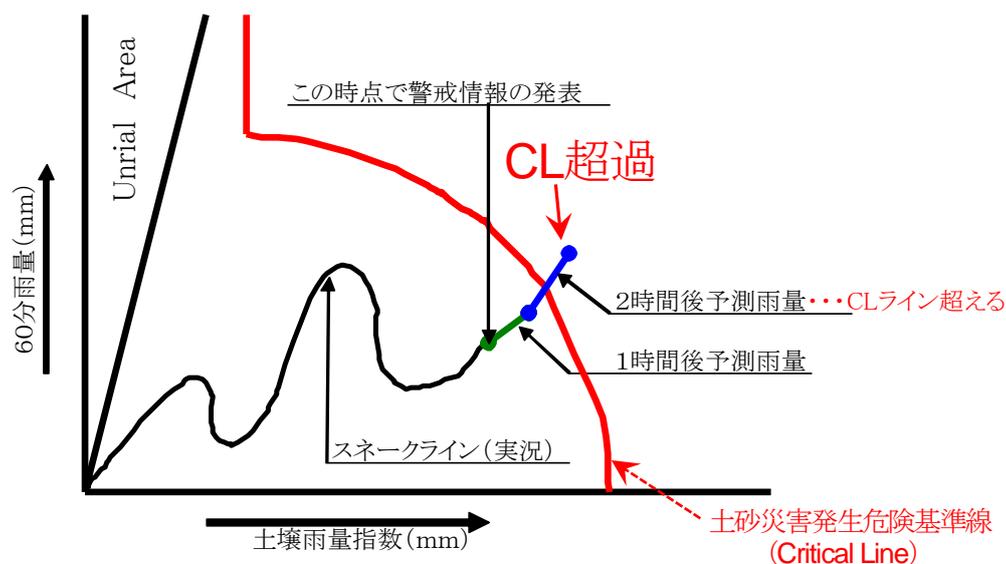
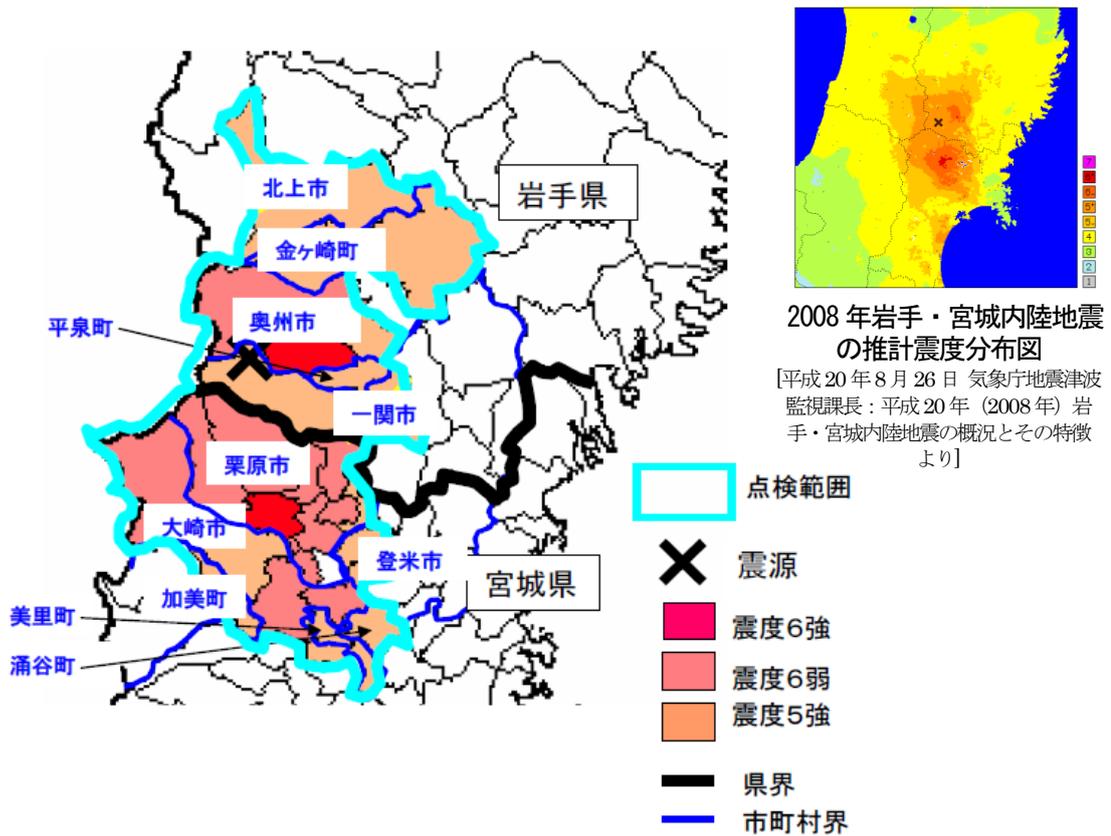


図 1.1.7 土砂災害警戒情報の発表方法

Fig. 1.1.7 Operation of the landslide disasters warning information

### (1) 震度分布による対象地域の設定

地震災害時の現在の実運用において、都道府県や国は、「被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検」<sup>7)</sup>や「土砂災害警戒情報暫定基準」<sup>8)</sup>を、地震に伴い土砂災害発生危険性が懸念される地域として、「震度分布」を基準に「震度5強以上が観測された市町村」<sup>7),8)</sup>を対象エリアとして実施している。2008年岩手・宮城内陸地震の際にも、「被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検」は、「地震に伴い今後の降雨等により土砂災害発生危険性が懸念されることから2次災害防止等に役立てること」を目的として、国と県により図1.1.8に示す震度5強以上の市町村を対象に実施された。



(点検期間：2008年6月15日～19日)

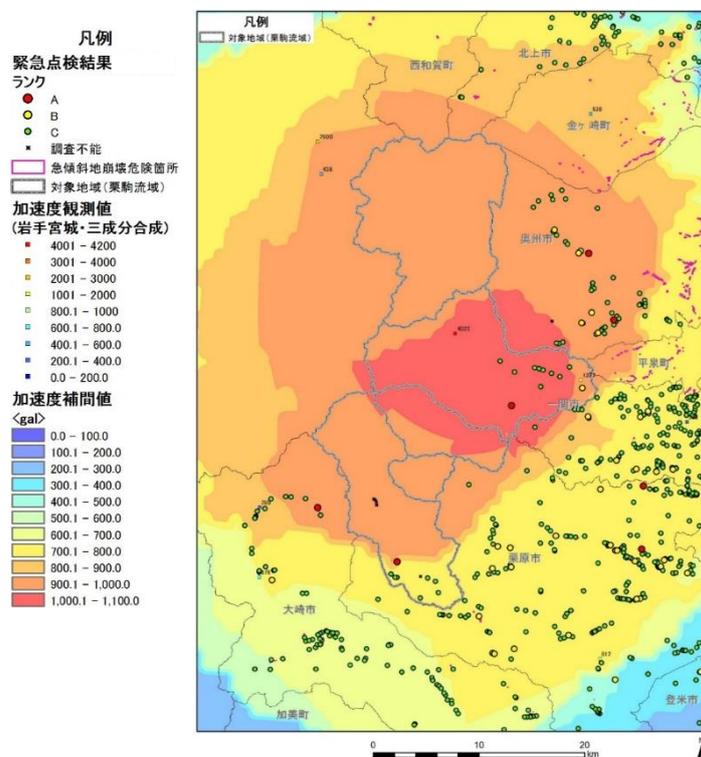
図 1.1.8 2008年岩手・宮城内陸地震の土砂災害危険箇所等の緊急点検の実施対象エリア<sup>7)</sup>

Fig. 1.1.8 Area where emergency inspections were done at landslide disaster risk locations etc. after the 2008 Iwate – Miyagi Inland Earthquake

出典：国土交通省河川局砂防部、土砂災害危険箇所点検緊急支援チームの活動結果(報告)「平成20年岩手・宮城内陸地震による被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検結果について」,記者発表資料、平成20年6月20日  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/river03\\_hh\\_000054.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000054.html)

## (2) 加速度分布による崩壊地発生予測手法

「地震による崩壊多発領域」の予測手法として、地震計データによる加速度分布を用いた手法が提案されている。2008年岩手・宮城内陸地震への適用事例を図 1.1.9 に示す。



※観測値をクリギング法により補間

図 1.1.9 加速度分布と緊急点検結果 (2008年岩手・宮城内陸地震)<sup>9)</sup>

Fig. 1.1.9 Acceleration distribution and emergency inspection results (the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake)

出典：地震時斜面崩壊危険度評価に関するデータ整理・分析業務報告書、平成25年3月、国土技術政策総合研究所 P5-43

### (3) 「地震による斜面崩壊危険度評価判別式」による崩壊地発生予測方法

「地震による崩壊多発領域」の予測手法として、国土交通省国土技術政策総合研究所が、「地震による斜面崩壊危険度評価判別式」を用いた手法を提案している。勾配(°)、平均曲率、最大加速度(cm/s<sup>2</sup>)の3項目から判別得点を算定して、予測するものである。この「地震による斜面崩壊危険度評価判別式」の2008年岩手・宮城内陸地震への適用事例を図1.1.10に示す。

「地震による斜面崩壊危険度評価判別式」<sup>10)</sup>

$$F=0.075I-8.92C+0.006A-3.228 \quad \dots \text{(式1)}$$

ここに、F：判別得点、I：勾配(°)、C：平均曲率、A：最大加速度(cm/s<sup>2</sup>)である。

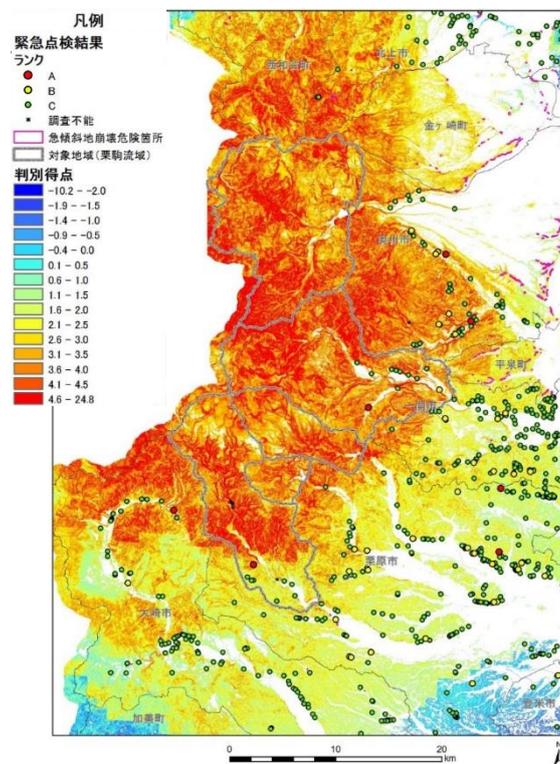


図 1.1.10 判別得点分布と緊急点検結果 (2008年岩手・宮城内陸地震)<sup>9)</sup>

Fig. 1.1.10 Discriminant score distribution and emergency inspection results (the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake)

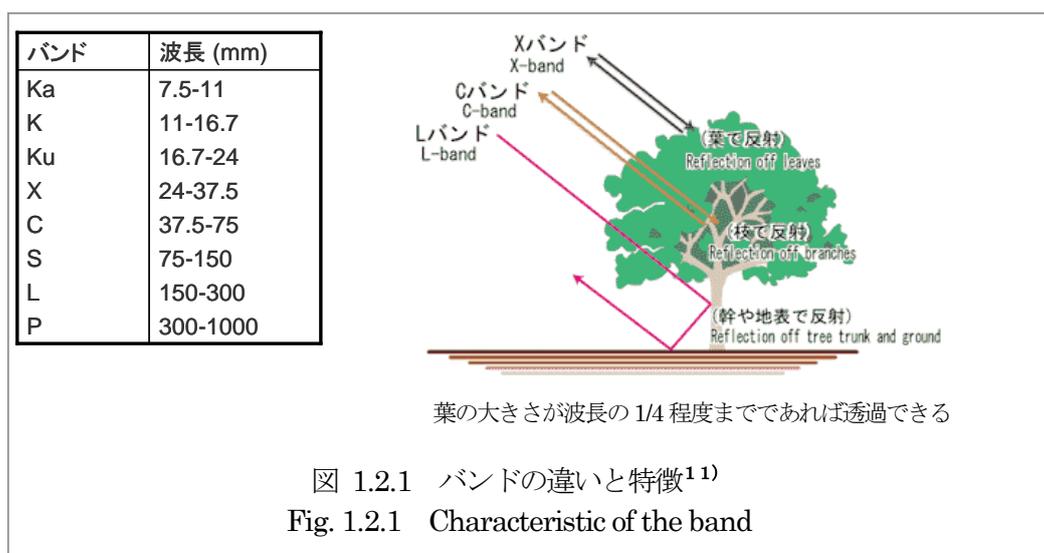
出典：地震時斜面崩壊危険度評価に関するデータ整理・分析業務報告書、平成25年3月、国土技術政策総合研究所 P5-40

## 1. 2 SAR 画像の特徴

### 1. 2. 1 SAR 画像について

地球観測衛星による SAR 画像の撮像は、衛星のアンテナからマイクロ波を地上に向けて斜め下方に照射し、地上からの後方散乱をアンテナからの距離に応じて記録するものである。撮像は、衛星からマイクロ波を直接地上へ照射するため、太陽光を必要とせず夜間においても観測可能である。

地球観測衛星の SAR で利用されるマイクロ波(Lバンド150mm~300mm、Cバンド37.5~75mm、Xバンド24~37.5mm)は、大気中の水蒸気、雨滴等に吸収されにくく、悪天候時においても地表の観測が可能である。さらに、SARは、バンドの波長の違いにより反射特性が異なる。図 1.2.1 に示すとおり、Lバンドのマイクロ波は、植生を透過することから、地表面の様子を把握することができる。また、SAR 観測の特徴としては、マイクロ波が地上に向けて斜め下方に照射されるため、図 1.2.2 に示すように、高い山等が実際の平面位置よりアンテナに近い位置に記録されて斜面が倒れ込む画像となるフォアショートニング(図 1.2.2 の E)、さらに急斜面等の上部が下部よりアンテナに近くなり画像が反転して白くつぶれるレイオーバ(図 1.2.2 の A、B)、マイクロ波が高い山等に遮られて影ができるレーダシャドウ等、SAR 画像特有の現象が画像に現れる。このため、撮影条件により画像の視認性が異なることに留意する必要がある。



出典：宇宙航空研究開発機構(JAXA)：SRIMの観測原理(詳細)その1、1999年8月27日  
<[http://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts99/mis\\_principle\\_1.html](http://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts99/mis_principle_1.html)>に加筆

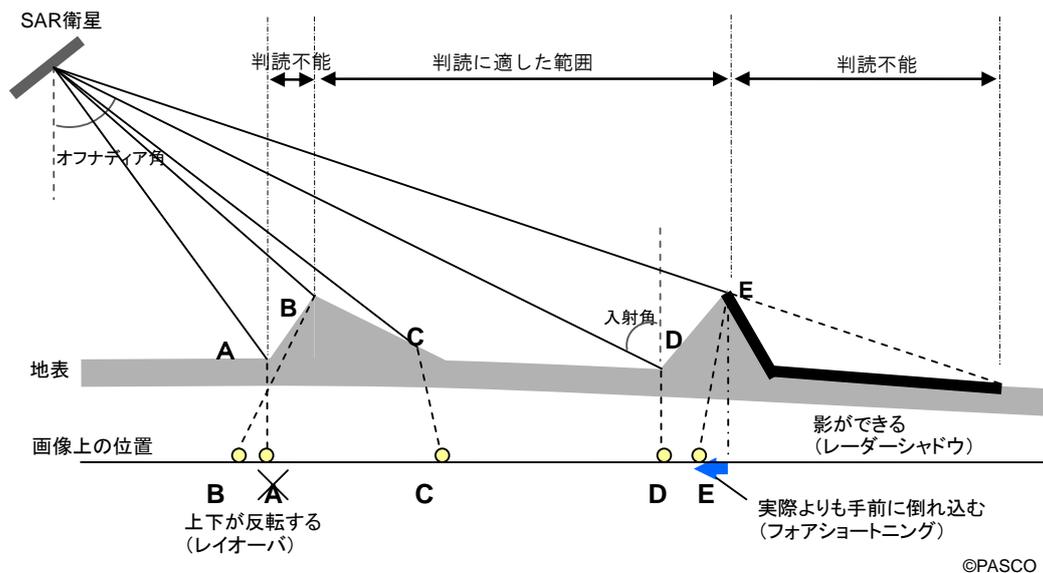


図 1.2.2 SAR 画像に特徴的な現象の概念図<sup>12)</sup>

Fig. 1.2.2 Diagram showing characteristic phenomena for SAR imagery

### 1. 2. 2 差分干渉 SAR について

Lバンド波長の SAR は植生を透過することから山間部における地表面の観測に有効であり、このLバンドの衛星 SAR による「干渉 SAR 解析 (以下、InSAR という)」は、2 時期において衛星から電波を照射して、得られた反射波データの位相の違いから地表面のわずかな変位量を面的に抽出することで、数千~数万 km<sup>2</sup> のエリアにおいて数cmオーダーの地表面移動の有無が観測できる。この InSAR には、差分干渉 SAR (Differential SAR Interferometry、以下 DInSAR という。)や PS-InSAR (Permanent Scatterer InSAR)等の手法がある。日本の山地地域においては大部分の地域で植生が繁茂していることから、PS-InSAR は観測対象に必要な「多数の permanent scatterers (固定的な散乱点)」の確保が難しい。それに比べて、DInSAR は、「固定的な散乱点」が無い場合でも、条件に合う SAR 画像があれば解析可能であり、PS-InSAR と比較すると DInSAR は山間部でも利用しやすい。国土地理院が作成した DInSAR の概念図を図 1.2.3 に示す。本研究で DInSAR に使用した ALOS/PALSAR データは、Lバンドで波長が 23.6cm、DInSAR 画像の1つの縞で 11.8cm の距離の変化 (地表面移動量) が表される。(図 1.2.4)

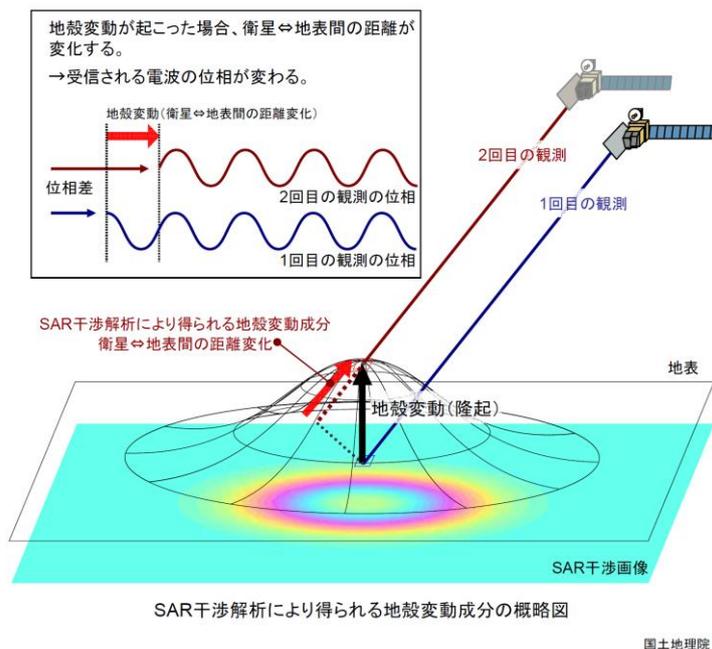


図 1.2.3 差分干渉 SAR の概念図<sup>13)</sup>

Fig. 1.2.3 Concept of DInSAR

出典：国土地理院：合成開口レーダー干渉解析の原理、人工衛星データを用いて岩手・宮城内陸地震に伴う面的な変動が明らかに（第1報）資料3、平成20年6月25日 <http://www.gsi.go.jp/johosystem/johosystem60031.html>

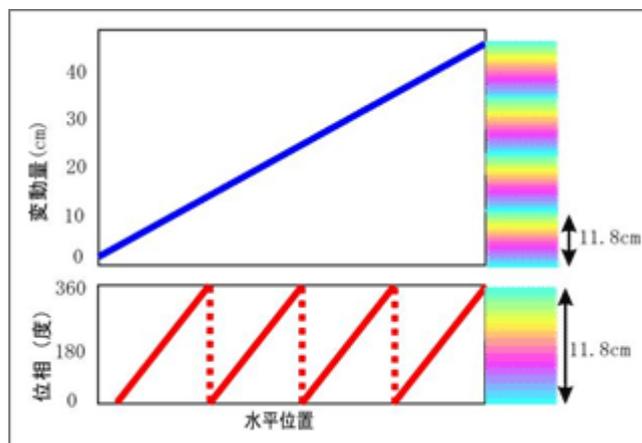


図 1.2.4 ALOS のLバンド DInSAR の変状監視<sup>14)</sup>

Fig. 1.2.4 Deformation monitoring in the L-band DInSAR of ALOS

出典：国土地理院，“SAR干渉画像をどうよむか？” 干渉SARのしくみ 中級編1、図8、  
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism04.html>

## 1. 3 人工衛星 SAR 画像を用いた土砂災害対応の既往研究

### 1. 3. 1 河道閉塞箇所及び土砂災害発生を検知

高分解能 SAR 画像を用いた土砂災害発生検知の取組としては、次の事例がある。

- ①下村等 (2011)<sup>15)</sup> は、中国四川大地震の災害後の SAR 単画像の判読により河道閉塞等の土砂移動状況を把握した。  
災害前後の同一パス・入射角の画像の重ね合わせを用いる手法として、
- ②厚井等 (2014)<sup>16)</sup> は、インドネシアのメラピ山を対象に、2 時期の強度画像をカラー合成するレイヤースタックによる手法を実施した。
- ③厚井等 (2014)<sup>16)</sup> は、インドネシアのメラピ山を対象に、2 時期画像の強度画像差分解析による手法を実施した。
- ④ Yamazaki et. al. (2011)<sup>17)</sup> は、岩手・宮城内陸地震の大規模崩壊を対象に、2 時期画像の相関係数の算出による手法を実施した
- ⑤中野等 (2011)<sup>18)</sup> は、桜島を対象に、2 時期画像の干渉処理による DEM を作成し精度を検証した多偏波画像を用いる手法として、
- ⑥山口 (2007)<sup>19)</sup> は、偏波解析による手法をとりまとめた。
- ⑦浦塚等 (2012)<sup>20)</sup> は、2011 年紀伊半島災害河道閉塞や新潟県中越地震等を対象に、航空機 SAR (Pi-SAR2、波長 X バンド) の偏波画像のカラー合成による手法を実施した。
- ⑧衛星の 2 偏波画像のカラー合成による手法

なお、2011 年紀伊半島大水害が発生した際には、四川大地震の崩壊地の推定<sup>15)</sup> 等により河道閉塞箇所を探索できる可能性が高い技術であることを把握していたことから、最も早く画像が入手でき河道閉塞箇所の探索が行える①の単偏波単画像の判読による調査を行うとともに、その手法を取りまとめた。この内容は、第 2 章で述べる。また、「⑧衛星の 2 偏波画像のカラー合成による手法」について、第 3 章で述べる。また、第 4 章の災害対応では、②の手法を用いている。

### 1. 3. 2 Lバンド差分干渉 SAR による「斜面の微小変位箇所」の探索

これまでも Lバンドの ALOS PALSAR を用いた DInSAR は、国土地理院等で火山活動、地盤沈下、地震、既知の地すべりの監視に実際に用いられて、既往の研究事例として下記に示すように多くの研究事例が有り、地すべりを対象としたものを含め、定常的に利用されてきた。

- ・宇根等 (2008)<sup>21)</sup> は、能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動を対象に DInSAR とともに 2.5 次元解析を行い、地震の地殻変動と地震に伴い生じた地すべり性の変動について報告した。
- ・佐藤等 (2012)<sup>22)</sup> は、差分干渉解析と 2.5 次元解析で、山形県鶴岡市の七五三掛地すべりの移動を検出し、解析結果と GPS 計測結果について、鉛直成分と東西成分の移動量を比較した。
- ・佐藤等 (2014)<sup>23)</sup> は、2011 東北地方太平洋沖地震を対象に DInSAR を行い、22 箇所の斜面変動域を検出した。
- ・小荒井等 (2014)<sup>24)</sup> は、静岡市口坂本地すべり、松本市坂巻温泉西側、天龍村虫川、大鹿村小塩、北アルプス赤男山東斜面、八ヶ岳天狗岳東斜面で、DInSAR 画像から明瞭な変動が認められたことを報告した。

しかし、DInSAR から抽出された「地すべり移動候補箇所」について、正答率や見逃しやすい条件、「変位が有るかどうかが現地を確認する方法」については、まだ明確に示されていない。

### 1. 3. 3 LバンドALOS PALSAR データを用いて地震による地表面変位を把握する手法

ALOS PALSAR のLバンド SAR データを用いて、地震による地表面変位を把握する手法に関する既往の研究事例としては、次の事例がある。

- ・Fujiwara et. al. (2000)<sup>25)</sup> は、2.5次元解析を考案して、地震の変位を把握した。
- ・高田等 (2008)<sup>26)</sup> は、ピクセルオフセット (Pixel offset) による岩手・宮城内陸地震の地殻変動の事例を報告した。

ピクセルオフセットの概念図を図 1.3.2 に示す。ピクセルオフセットは、2つの画像間のズレを計測することで変位量を算定する。大きな変位の計測には強いが、計測精度が低いとされる。

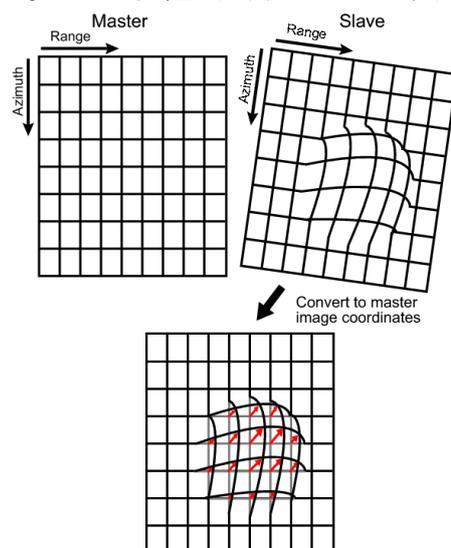


図 1.3.2 ピクセルオフセット解析の概念図<sup>27)</sup>

Fig. 1.3.2 Concept of pixel offset

出典：地震調査研究推進本部地震調査委員会：平成 23 年 10 月 7 日「合成開口レーダーによる地震活動に関連する地殻変動観測手法」報告書（本編）、p9、図 2.6 <http://www.jishin.go.jp/main/eisei/> より

- ・高田等 (2008)<sup>26)</sup> は、低コヒーレンス領域をマスクして MCF 法 (Minimum Cost Flow 法) によるアンラッピングを実施し、岩手・宮城内陸地震の衛星視線方向の変動を抽出した。
- ・宇根等 (2008)<sup>21)</sup> は、2.5次元解析を用いて能登半島地震の東西方向と上下方向の変動を図示した。
- ・前述のとおり、佐藤等 (2012)<sup>22)</sup> も、差分干渉解析と 2.5次元解析で、山形県鶴岡市の七五三掛地すべりの移動を検出し、解析結果と GPS 計測結果について、鉛直成分と東西成分の移動量を比較した。
- ・島田 (2009)<sup>28)</sup> は、低コヒーレンス領域についてもアンラップ処理して岩手・宮城内陸地震の東西方向と上下方向の変動を抽出した。
- ・小林 (2013)<sup>29)</sup> は、岩手・宮城内陸地震を対象に MAI (Multiple-Aperture Interferometry) の前方視と後方視の SAR 画像の InSAR から衛星進行方向の変位計測を実現して 3次元変位を検出し、さらにピクセルオフセット (Pixel offset) を重ねて、地殻変動を再現した。

これらの研究は、「地震の地表面変位量」と「地震の崩壊多発領域」の関係の解明を目的としたものではない。

## 1. 4 研究の目的

本論文は、土砂災害緊急対応時に国や都道府県の職員が状況把握すべき現地情報について、SAR 画像を用いてより早期かつ正確に把握できる手法を確立することを目的に、「衛星 SAR 画像を用いた土砂災害緊急対応時の現地状況把握手法について研究し、提案するものである。

土砂災害の緊急対応においては、従来から有視界飛行の航空機による目視調査が実施されている。そこで、土砂災害の緊急対応時における衛星 SAR 画像を用いた調査は、「航空機で観測できない場合の情報」、又は「航空機観測より早い情報」となる条件において有効な状況把握手段となり得る。観測衛星で観測される情報は、大きく分けて可視域から近赤外域等を観測する光学センサによる衛星光学画像と、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar、以下 SAR) による衛星 SAR 画像の 2 つに分類できる。このうち衛星 SAR 画像は、電磁波 (電波) のマイクロ波を送信し、反射波を観測するもので、夜間や悪天候時を問わず地表面の観測が可能なこと、位相情報を利用することで微小な距離変化を観測することが可能になることから、土砂災害の緊急対応におけるより早い状況把握や微小な地表面変状の把握手段として利用が期待されている。

本論文では、土砂災害緊急対応時に国や都道府県の職員が状況把握すべき情報のうち、主に次の「大規模河道閉塞箇所」、「斜面の微小変位箇所」、「地震による崩壊多発領域」の 3 つの対象について、SAR 画像を用いることでより早期又は正確に状況把握できる手法を提案した。

- ・「大規模河道閉塞箇所」については、河道閉塞が湛水した後の河道閉塞箇所の決壊等による二次災害の発生を防止する目的で、形成の有無と規模を把握する。大規模河道閉塞 (概ね閉塞ダム高 20m 以上、かつ被害想定概ね 10 戸以上) の緊急調査は、土砂災害防止法の規定で国の役割となっている。

### (図 1.1.1)

- ・「斜面の微小変位箇所」は、崩壊の予兆となりえる微小変位が斜面に現れた箇所で、「豪雨から数日の間に発生する深層崩壊災害」や「次期の崩壊災害」につながる可能性がある箇所である。従来から「土砂災害危険箇所等の現地踏査による緊急点検」を実施して確認している。

- ・「地震による崩壊多発領域」については、震災時の災害対応として、この領域を対象に「土砂災害危険箇所等の現地踏査による緊急点検」<sup>7)</sup> や「土砂災害警戒情報における地震等発生後の暫定基準の設定」<sup>8)</sup> を行うことを提案する。

### 1. 4. 1 第 2 章 単偏波 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所の緊急判読調査手法

#### 第 3 章 多偏波 SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞箇所の緊急判読調査手法

#### 第 4 章 衛星 SAR 画像判読の海外の天然ダム災害への適用事例

豪雨や地震により大規模な河道閉塞が発生した恐れのある場合には、湛水後の決壊等による二次災害の発生を防止するため、「大規模河道閉塞箇所」の位置と規模を把握することが必要である。さらに、避難や河道閉塞箇所の対策を実施する上では、河道閉塞による天然ダムの湛水のより少ない早い段階において、河道閉塞箇所を発見することが重要である。しかしながら、災害時の緊急対応としての河道閉塞の探索は、従来、昼間の有視界飛行によるヘリ目視調査や地上からの現地点検により実施されてきており、ヘリ目視調査や現地点検を行うことのできない夜間や悪天候時には、山間部における河道閉塞箇所の探索を行うことが困難であった。そこで、第 2 章～第 4 章では、山間部の広域なエリアにおいて大規模な河道閉塞の発生した恐れがあり土砂災害が急迫した状況下において、災害発生情報が取得出来ない空白時間を可能な限り減らし、より早く河道閉塞の発生状況を把握することを目的として夜間や悪天候時においても地表の状態を観測可能な「高分解能 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所

の緊急判読調査手法」について 2011 年台風 12 号の河道閉塞箇所画像を用いて研究を行った。ここで、SAR 画像判読に用いる高分解能 SAR 画像は、大きく分けて、単偏波 SAR 画像と、多偏波 SAR 画像があり、それぞれについて、画像判読による河道閉塞箇所の探索手法を明確化した。また、発災時に日本から短時間で現地調査へ行くことができない海外の土砂災害に対する衛星 SAR 画像による緊急対応事例を第 4 章に示す。

#### 1. 4. 2 第 5 章 衛星差分干渉 SAR による発災前の初期微移動地すべりの探索

地震や豪雨により崩壊が多く発生した災害では、「数時間から数日の時間をおいて発生する深層崩壊災害」や「次期の崩壊災害」につながる「斜面の微小変位箇所」が発生している可能性がある。国や都道府県は、地震や豪雨等の直後の緊急点検の際に、崩壊発生の予兆となる「斜面の微小変位箇所」が発見できると、その後の斜面崩壊への警戒や対策が可能となると考えられる。そこで斜面の大規模土塊の微小変位を探索できる、「L バンド DInSAR による微小変位箇所の抽出手法」について研究を行った。

現在、JAXA が L バンドの ALOS-2 を継続的に運用しており、今後も国土地理院は DInSAR で検出された全国の地盤変位の状況（地すべり性変位を含む）を、継続的に公表<sup>30)</sup>する予定である。このことから今後、公表される DInSAR 画像からの抽出結果が土砂災害の減災に役立つ可能性がある。しかし DInSAR 実施のために L バンドの ALOS PALSAR 画像を用いても、山間部においては、良好な干渉性を持つ画像の割合は高くない。また、DInSAR で抽出した変位画像箇所が不正解であったり、逆に、滑動中の地すべり箇所が DInSAR 画像に現れないことも多い。このように、「L バンド衛星 DInSAR による微小変位箇所の抽出手法」において災害対応として必要な、その正答率、抽出特性、変位有無の現地確認方法等は、まだ明確化されていなかった。このため、本研究では、紀伊半島と長野県周辺域の山間部を対象に、ALOS PALSAR の「L バンド DInSAR による微小変位箇所の抽出手法」を実施し、DInSAR から抽出した「地すべり移動候補箇所」について、正答率、不正解となりやすい箇所、見逃しやすい条件、「変位が有るかどうかを現地で確認する方法」について、明確化を試みた。

#### 1. 4. 3 第 6 章 干渉 SAR の 2.5 次元解析で抽出した地震の地表面変位と崩壊分布の関係

「地震による地表面変位」と「地震による崩壊分布」の関係については、「地震による地表面変位」の詳細な把握が難しく、研究事例が少ない。地震災害が発生した場合、前述のとおり、都道府県や国は、地震で発生した崩壊地や被災箇所、地震に伴い二次的な土砂災害発生の危険性が懸念される地域を早期に把握するために、「土砂災害危険箇所等の緊急点検」<sup>7)</sup>を実施する。さらに、地盤条件等が変化して通常時よりも少ない降雨で土砂災害の発生する可能性があることから、都道府県や気象台は、「土砂災害警戒情報における地震等発生後の暫定基準の設定」<sup>8)</sup>を行う。その対象エリアは、前述のとおり、主に震度を基準として「震度 5 強以上が観測された市町村」<sup>7),8)</sup>とされている。しかし震度強度は崩壊密度分布と必ずしも一致しないことから、「地震による崩壊多発領域」に対応した、より適切な対象エリア設定手法が望まれる。そこで、本研究では、2.5 次元解析の新たな方法により 2008 年岩手・宮城内陸地震（図 1.4.1、図 1.4.2、図 1.4.3）を対象に、「地震による地表面変位」を詳細に再現して、さらに崩壊地判読結果と比較して「地震による崩壊多発領域」との関係进行を明らかにした。この関係を使うと、地震災害時に「地震による地表面変位」を算出することで「地震による崩壊多発領域」をより正確に予測することができる。

### (1) 2008年岩手・宮城内陸地震の概要

- ・震源時：2008年6月14日08時43分45秒
- ・北緯：39度01.7分
- ・東経：140度52.8分
- ・深さ：8km
- ・規模：M7.2
- ・最大震度：6強（岩手県奥州市、宮城県栗原市）

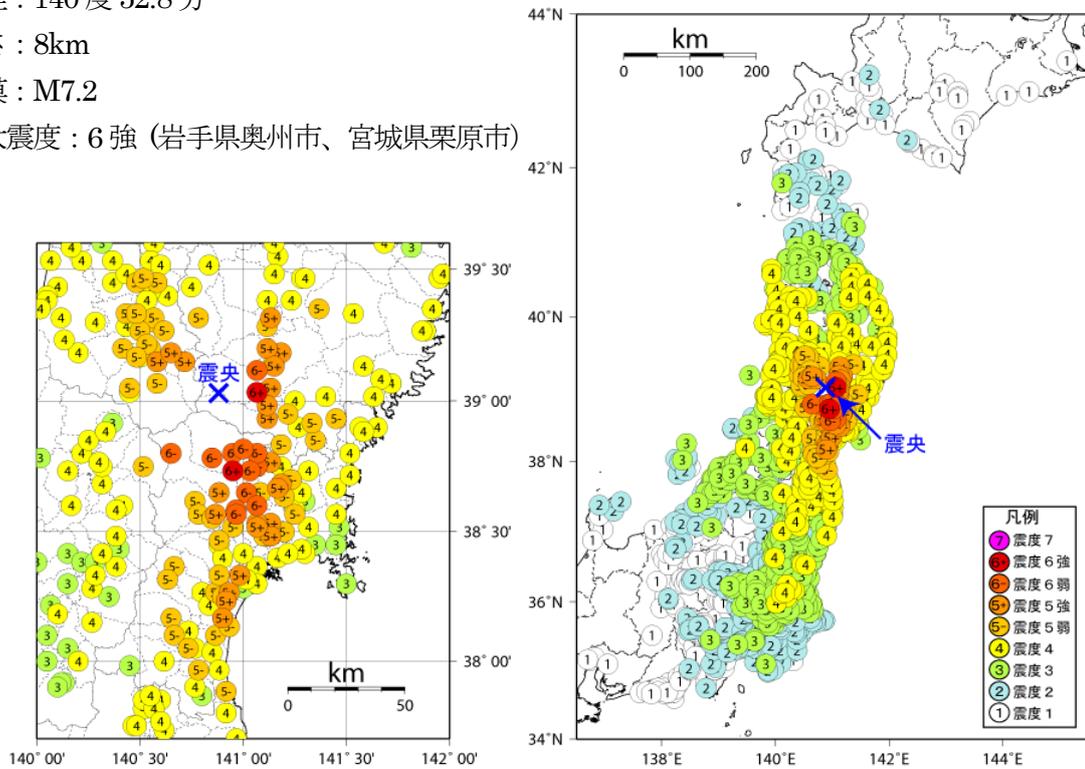


図 1.4.1 2008年岩手・宮城内陸地震の震度分布図<sup>31)</sup>

Fig. 1.4.1 Measured seismic intensity distribution during the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake  
 (出典：気象庁 (2008)：6月14日08時43分に発生した本震 (M7.2、最大震度6強) の震度分布、災害時地震速報 平成20年 (2008年) 岩手・宮城内陸地震、P10、平成20年7月31日、[http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji\\_200801.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_200801.pdf))

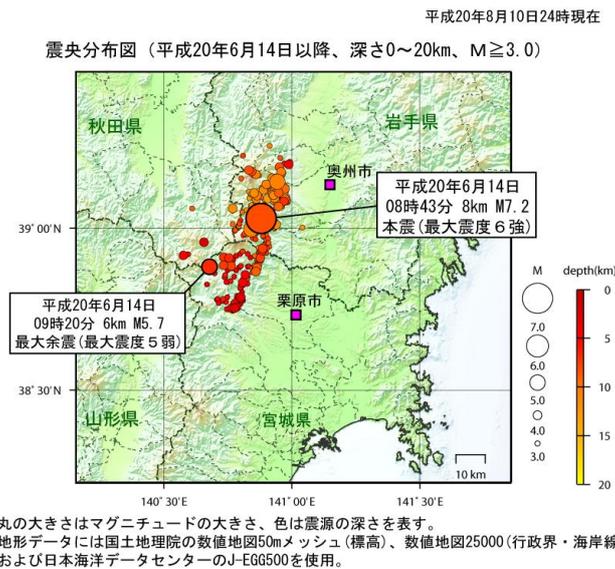


図 1.4.2 2008年岩手・宮城内陸地震の震央分布図<sup>32)</sup>

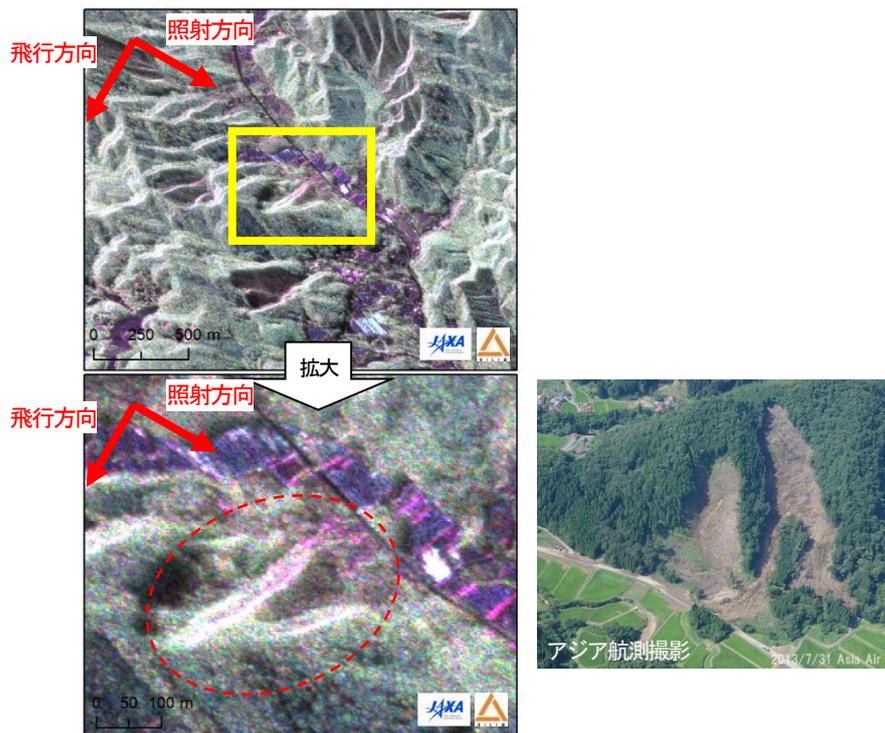
Fig. 1.4.2 The hypocenter distribution during the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake  
 (出典：平成20年8月26日 気象庁地震津波監視課長：平成20年 (2008年) 岩手・宮城内陸地震の概況とその特徴 より)



図 1.4.3 2008 岩手・宮城内陸地震による河道閉塞の位置 <sup>33)</sup>

Fig. 1.4.3 The location of the landslide dams by the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake

出典：国土技術政策総合研究所防災研究室(2008)：平成20年岩手・宮城内陸地震報告（土砂災害）、「平成20年岩手・宮城内陸地震」調査報告会、配付資料(3) 土石流・河道閉塞、平成20年8月26日、[http://www.pwri.go.jp/jpn/research/disaster/iwate-miyagi/03\\_dosekiryu.pdf](http://www.pwri.go.jp/jpn/research/disaster/iwate-miyagi/03_dosekiryu.pdf)



(2013年山口・島根災害 名賀地区、Lバンド、PiSAR/L2、JAXA、2013/8/1、HH+HV+VH+VV、カラー合成)

図 1.4.4 斜面崩壊の航空機 SAR 画像の例<sup>34)</sup>

Fig. 1.4.4 Example of the SAR image of the slope failure prepared from aircraft

(出典：国土技術政策総合研究所 (2014)：合成開口レーダー画像等を用いた被災状況把握手法の調査業務報告書、P5-40、平成 26 年 3 月 より)

#### 1. 4. 4 航空機 SAR と人工衛星 SAR について

SAR の強度画像を撮影するための観測手法としては、大きく分けて、SAR センサを航空機に搭載した航空機 SAR (図 1.4.4) と、人工衛星に搭載センサで観測する人工衛星 SAR があり、技術的には、航空機 SAR と人工衛星 SAR の両手法が、同様に強度画像判読による災害時の天然ダムの探索に利用できる。このうち、航空機 SAR は、研究を始めた 2011 年度時点において、既に SAR 機器を搭載した航空機が日本国内に存在し、災害後に試験的に SAR 観測をしている。しかし、航空機 SAR は、次の 3 点の理由により、運用体制や法令に関する制約があり、国土交通省地方整備局の職員が災害時に実利用する早期の実用化を目指す視点から考えると災害時の緊急対応 (実利用) を行う条件が、検討開始時点において整っていない。

- ・航空機の機体、SAR センサ、パイロットについて、災害時緊急対応として出勤し撮影する運用体制の整備が新たに必要である。
- ・航空機 SAR は電波法で定められた無線局免許を取得することを要するが、災害への実利用を目的とした実用局免許の取得に必要な技術基準が当時まだ策定されておらず、既存の航空機 SAR についてはこれまで実用に供しない実験試験局での運用となっている。(このこともあり、24 時間離発着可能な国内 8 拠点空港には航空機 SAR 搭載機体が常駐していない。)
- ・実験試験局の免許認定に際しては、他の無線局の電波利用に支障を与えることが懸念される場合は、当該免許人との調整を図ることが利用条件となる。そこで実験試験局である航空機 SAR を使用す

る際には、防衛省等との調整が必要で、観測範囲や利用期間を通達し、利用許可を得ることとなるが、離陸前の調整に時間がかかる場合がある。

これに対して、人工衛星 SAR は、既に海外（イタリア、ドイツ、カナダ）の SAR 衛星が運用と画像提供され、日本の JAXA も画像を提供する体制を整えており、必要な費用も実施可能な範囲内で、直ぐに SAR 画像を緊急観測し実利用できる状況にある。このため、本研究の研究成果は、当面、人工衛星 SAR を主な適用対象としている。しかし、衛星観測は基本的に、航空機では観測できない場合、又は航空機より早い情報となる場合に利用しており、災害時には情報がより早く来る手段を利用することとなる。そこで、今後、航空機 SAR が実運用で配備され、航空機 SAR の SAR 画像を人工衛星 SAR と同等以上に早く入手することが可能となれば、航空機 SAR で強度画像を撮像して、その判読に本研究の研究成果を適用して土砂災害に対応することとなる。

## 1. 5 本論文の構成と内容

本論文は、土砂災害緊急対応時に国や都道府県の職員が状況把握すべき現地情報について、SAR 画像を用いて、より早期かつ正確に把握できる手法を確立することを目的に、「人工衛星 SAR 画像を用いた土砂災害緊急対応時の現地状況把握手法の研究」を行った。

本論文は、以下に示す内容で構成されている。

### 第1章 序論

第1章では研究の背景や目的について述べる。本研究では、次の「大規模河道閉塞箇所」、「斜面の微小変位箇所」、「地震による崩壊多発領域」の3つの対象について、SAR 画像を用いることでより早期又は正確に状況把握できる手法を明確化した。このそれぞれの対象についての研究の背景や、本研究で、衛星 SAR 画像を対象とした理由について、説明する。

### 第2章 単偏波 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所の緊急判読調査手法

第2章では、「大規模河道閉塞箇所」を探索するための「単偏波 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所の緊急判読調査手法」の研究内容とその結果について述べる

### 第3章 多偏波 SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞箇所の緊急判読調査手法

第3章では、「大規模河道閉塞箇所」を探索するための「多偏波 SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞箇所の緊急判読調査手法」の研究内容とその成果について述べる。

### 第4章 衛星 SAR 画像判読の海外の天然ダム災害への適用事例

第4章では、「大規模河道閉塞箇所」への海外の対応事例として、インドネシア共和国アンボン島で発生した天然ダムの形成・決壊災害の高分解能衛星 SAR 画像による緊急対応事例について説明する。

### 第5章 衛星差分干渉 SAR による発災の初期微移動地すべりの探索

第5章では、「斜面の微小変位箇所」を L バンド差分干渉 SAR（以下、DInSAR）画像で抽出する手法を災害時に実利用するため、手法の特徴や留意点を明らかにした。その研究内容とその成果について述べる。また、ALOS PALSAR の DInSAR で抽出された斜面変位候補箇所のうち、保全対象が重要な箇所について、移動の有無を現地確認した事例について説明する。

## 第6章 干渉 SAR の 2.5 次元解析で抽出した地震の地表面変位と崩壊分布の関係

第6章では、「地震による崩壊多発領域」を地震発生時に精度よく予測することを目的に、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次元解析において、BC法の未アンラップ面積を指標に「多数枚のDInSAR画像」を用い、かつ地震の水平移動方向を入力した手法を提案した。この手法により、従来よりも誤差の少ない「地震の地表面変位量図」を再現するとともに、「地震の崩壊多発領域」との関係を示した。その研究内容と成果について述べる。

## 第7章 結論及び展望

第7章では、研究成果の結論とともに、残る今後の課題についてまとめた。

### 【引用文献】

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 (2011) : 土砂災害防止法の一部改正について (平成23年5月施行) パンフレット、<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/sinpoupdf/H23kaisei.pdf>
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 (2011) : (平成23年9月6日報道発表資料) 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律に基づく緊急調査について
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 (2011) : (平成23年9月8日報道発表資料) 土砂災害防止法に基づく土砂災害緊急情報について
- 4) 近畿地方整備局河川計画課 (2013) : 平成23年台風12号により紀伊山地で発生した河道閉塞への対応 (初動体制、緊急調査等)、砂防事業に関する調査・研究の動向 (その9)、国土技術政策総合研究所資料第732号土木研究所資料第4261号、第3分科会、p107, p108, p115、一部加筆、<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0732pdf/ks073207.pdf>
- 5) 国土交通省砂防部 (2010) : (報道発表資料) 深層崩壊に関する全国マップについて、平成22年8月11日、[http://www.mlit.go.jp/report/press/river03\\_hh\\_000252.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000252.html)
- 6) 国土交通省砂防部 (2012) : (報道発表資料) 深層崩壊に関する溪流 (小流域) レベルの調査について、平成24年9月10日、[http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03\\_hh\\_000552.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000552.html)
- 7) 国土交通省河川局砂防部 (2008) : 土砂災害危険箇所点検緊急支援チームの活動結果 (報告) 「平成20年岩手・宮城内陸地震による被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検結果について」, 記者発表資料、平成20年6月20日、[http://www.mlit.go.jp/report/press/river03\\_hh\\_000054.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000054.html)
- 8) 国土交通省砂防部砂防計画課地震・火山砂防室、国土交通省国土技術政策総合研究所砂防研究室、気象庁予報部業務課 (2013) : 土砂災害警戒情報における地震等発生後の暫定基準の設定と見直しについて、平成25年5月15日事務連絡
- 9) 国土技術政策総合研究所 (2013) : 地震時斜面崩壊危険度評価に関するデータ整理・分析業務報告書、平成25年3月、p5-40、p5-43
- 10) 国土技術政策総合研究所 (2013) : 2011年東日本大震災に対する国土技術政策総合研究所の取り組み—緊急対応及び復旧・復興への技術支援に関する活動記録—、国総研研究報告 第52号、p97、<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/rpn/rpn0052.htm>
- 11) 宇宙航空研究開発機構(JAXA) (1999) : SRTMの観測原理(詳細)その1、[http://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts99/mis\\_principle\\_1.html](http://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts99/mis_principle_1.html)

- 12) 水野正樹、神山嬢子、江川真史、佐藤匠、蒲原潤一、林真一郎 (2013) : 単偏波の高分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所判読調査手法 (案)、国土技術政策総合研究所資料、第 760 号、2013
- 13) 国土地理院 (2008) : 合成開口レーダー干渉解析の原理、人工衛星データを用いて岩手・宮城内陸地震に伴う面的な変動が明らかに (第 1 報) 資料 3、平成 20 年 6 月 25 日、  
<http://www.gsi.go.jp/johosystem/johosystem60031.html>
- 14) 国土地理院 : ” SAR 干渉画像をどうよむか? ” 干渉 SAR のしくみ中級編 1、図 8、  
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism04.html>
- 15) 下村博之・朝比奈利廣・鶴殿俊昭・横田浩・鈴木崇・野田敦夫 (2008) : 高解像度合成開口レーダー画像でみた中国四川省地震による土砂移動状況、砂防学会誌、Vol. 61、No. 2、pp.68-69
- 16) 厚井高志・加藤誠章・嶋丈示・吉川和男・板野友和・三五大輔・草野駿一 (2014) : ALOS 画像を用いた噴火活動に伴う現象の抽出手法の適用性、平成 26 年度砂防学会研究発表会概要、pp.376-377
- 17) Fumio Yamazaki, Wen Liu, Hisamitsu Inue (2011) : Characteristics of SAR backscattered intensity and its application to earthquake damage detection, Computational Stochastic Mechanics, pp.602-606
- 18) 中野陽子・清水武志・山越隆雄・石塚忠範・島田政信・浦塚清峰・柴山卓史 (2011) : 火山緊急減災のための衛星及び航空機を用いた DEM データの作成技術とその特性、平成 23 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.476-477、P-075
- 19) 山口芳雄 (2007) : レーダポーラリメトリの基礎と応用、社団法人電子情報通信学会
- 20) 浦塚清峰・梅原俊彦・上本順平・児島正一郎・佐竹誠・小林達治 (2012) : 航空機搭載合成開口レーダ Pi-SAR2 を用いた東日本大震災の被害推定、災害・危機管理 ICT シンポジウム 2012-東日本大震災から得た教訓一、2012.2.3、  
[http://ictfss.nict.go.jp/yokohama2012/DL/04\\_Uratsuka\\_20120203.pdf](http://ictfss.nict.go.jp/yokohama2012/DL/04_Uratsuka_20120203.pdf)
- 21) 宇根寛、佐藤浩、矢来博司、飛田幹男 (2008) : SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表面変動の解析、日本地すべり学会誌、Vol.45、No.2、pp.125~131
- 22) 佐藤浩、岡谷隆基、小荒井徹、鈴木啓、飛田幹男、矢来博司、関口辰夫 (2012) : SAR 干渉画像を用いた地すべり地表変動の検出について—山形県月山周辺を事例にして—、日本地すべり学会誌、Vol.49、No.2、pp.61~67
- 23) 佐藤浩、宮原伐折羅、岡谷隆基、小荒井衛、関口辰夫、八木幸司 (2014) : SAR 干渉画像で検出した 2011 年東北地方太平洋沖地震に関わる地すべり性地表変動、日本地すべり学会誌、Vol.51、No.2、pp.5~13
- 24) 小荒井衛、中埜貴元、戸田堅一郎、大丸裕武 (2014) : 地すべり性斜面変動の前兆を干渉 SAR と航空レーザ測量で捉える、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、HDS29-05、2014/4/28、  
<https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2014/subject/HDS29-05/detail?lang=ja>
- 25) Fujiwara S, Nishimura T, Murakami M, Nakagawa H, and Tobita M (2000) : 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, Geophysical Research Letters, Vol.27, pp.2049-2052.
- 26) 高田陽一郎、小林知勝、古屋正人、村上亮 (2008) : ALOS/PALSAR で捉えた 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動、研究集会「SAR・赤外センサによる地震・火山・地盤変動の監視・解析」セッション 5-20、2008.9.17、  
[http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/HIGHLIGHT/KYODO/ERI\\_2008-W-02/H20\\_20\\_takada.pdf](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/HIGHLIGHT/KYODO/ERI_2008-W-02/H20_20_takada.pdf)

- 27) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2011) : 「合成開口レーダーによる地震活動に関連する地殻変動観測手法」報告書 (本編)、平成 23 年 10 月 7 日、p9、図 2.6、  
<http://www.jishin.go.jp/main/eisei/>
- 28) 島田政信 (2009) : 「だいち」緊急観測観測から画像公開までのプロセス (その 2) SAR 干渉処理について、第 5 回 JAXA 人工衛星セミナー、2009 年 10 月 6 日、pp.39-41、  
[http://www.satnavi.jaxa.jp/basic/seminar/pdf/seminar\\_091006.pdf](http://www.satnavi.jaxa.jp/basic/seminar/pdf/seminar_091006.pdf)
- 29) 小林知勝 (2013) : 「SAR による地盤変動観測・研究のこれまで、そしてこれから ～国土地理院の SAR 解析～」、2013 年度京都大学防災研究所特定研究集会「SAR が切り拓く地球人間圏科学の新展開」へ向けて、2013.8.22、<http://pixel.eri.u-tokyo.ac.jp/sarws2013/Kobayashi.pdf>
- 30) 国土地理院測地部宇宙測地課 (2015) : だいち 2 号による日本全国地盤変動図の公表、第 1 回土砂ワーキンググループ会合、資料 6
- 31) 気象庁 (2008) : 6 月 14 日 08 時 43 分に発生した本震 (M7.2、最大震度 6 強) の震度分布、災害時地震速報 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震、P10、平成 20 年 7 月 31 日、  
[http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji\\_200801.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_200801.pdf)
- 32) 気象庁地震津波監視課長 (2008) : 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震の概況とその特徴、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)
- 33) 国土技術政策総合研究所砂防研究室(2008) : 平成 20 年岩手・宮城内陸地震報告 (土砂災害)、「平成 20 年岩手・宮城内陸地震」調査報告会、配付資料(3)土石流・河道閉塞、平成 20 年 8 月 26 日、[http://www.pwri.go.jp/jpn/research/disaster/iwate-miyagi/03\\_dosekiryu.pdf](http://www.pwri.go.jp/jpn/research/disaster/iwate-miyagi/03_dosekiryu.pdf)
- 34) 国土技術政策総合研究所砂防研究室 (2014) : 合成開口レーダー画像等を用いた被災状況把握手法の調査業務報告書、p5-40、2014.3

## 第2章 単偏波 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所の緊急判読調査手法

### 2.1 研究概要

高分解能 SAR 画像の判読による河道閉塞箇所の探索は、判読を行う技術者により、見落としや過抽出等、得られる結果に差が生じることが予想される。そのため、判読者による大きな差が生じない標準的な判読基準の整理を行う必要がある。画像の入手についても、SAR 画像の特徴に留意した上で、判読可能な高分解能 SAR 画像の撮影諸元について整理を行い、判読可能な画像を入手することが必要である。本研究時はまだ ALOS-2 の打上げ前であったが、ALOS-2 の利用も想定しつつ、海外の高分解能 SAR 衛星である COSMO-SkyMed (イタリア、X バンド)、TerraSAR-X (ドイツ、X バンド)、RADARSAT-2 (カナダ、C バンド) を対象として、利用可能性を検討した。高分解能 SAR 衛星は、地球全体を周回しているため、常に任意の地点を撮影できる位置にいるとは限らない。加えて、地球観測衛星ごとに撮影間隔が異なるため、台風通過後、地震発生後等において、河道閉塞を速やかに探索するためには、複数の SAR 衛星の利用が効果的と考えられる。

本章では、2011 年台風 12 号による紀伊半島大水害を事例として、異なる撮影条件の単偏波の衛星高分解能 SAR 画像を用いて、河道閉塞箇所の視認性評価を行った。その結果を踏まえて、SAR 撮影条件、SAR 画像判読に求められる標準的な判読基準を検討した成果について述べる。

## 2. 2 SAR 画像の判読不能領域

SAR 観測の特徴としては、マイクロ波が地上に向けて斜め下方に照射されるため、図 2.2.1 に示すように、高い山等が実際の平面位置よりアンテナに近い位置に記録されて斜面が倒れ込む画像となるフォアショートニング (図 2.2.1 の E)、さらに急斜面等の上部が下部よりアンテナに近くなり画像が反転して白くつぶれるレイオーバ (図 2.2.1 の A、B)、マイクロ波が高い山等に遮られて影ができるレーダシャドウ等、SAR 画像特有の現象が画像に現れる。このため、片側からの照射による 1 枚の SAR 画像だけでは、河道閉塞箇所を判読できる範囲が地形的に限られ判読不能領域が生じること、撮影条件により画像の視認性が異なることに留意する必要がある。

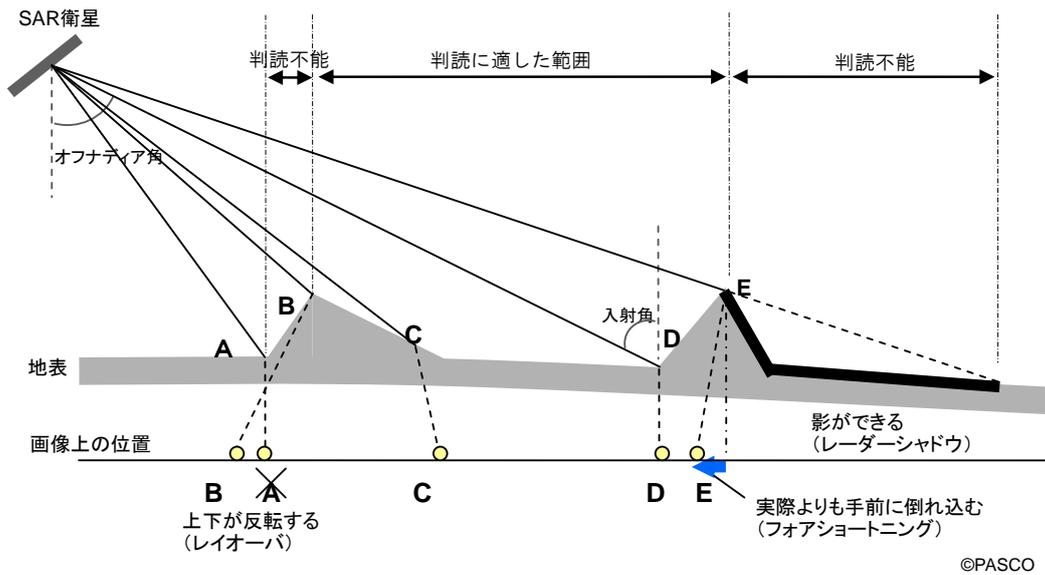


図 2.2.1 SAR 画像に特徴的な現象の概念図<sup>1)</sup>

Fig.2.2.1 Diagram showing characteristic phenomena for SAR imagery

### 2. 3 2011 年台風 12 号通過直後における SAR 画像判読

判読に用いた SAR 画像は、2011 年台風 12 号通過後の 2011 年 9 月 5 日 17:53 (JST) に撮影したドイツの高分解能 SAR 衛星 TerraSAR-X の画像 (波長 X バンド、HH 単偏波、撮影モード Strip Map、分解能約 3m、観測幅南北約 50km×東西約 30km、北行軌道、東向き照射、入射角 39.21°、処理レベル GEC(Geo-coded Ellipsoid Corrected)、正射投影なし) である。撮影範囲は、奈良県十津川村を中心とする図 2.3.1 の範囲である。台風 12 号による降雨 (図 2.3.2) が 9 月 4 日午前までであり、それ以後の画像判読実施のタイムラインは表 2.3.1 のとおりである。9 月 5 日午後に行われたヘリによる目視調査は、雲が多く、長殿地区の河道閉塞箇所の確認に留まった。得られた長殿地区河道閉塞箇所の位置情報を衛星画像判読チームに送付し、長殿地区と同様の画像パターンを探した。この河道閉塞箇所の判読に際しては、行政界 GIS データ、国土地理院 10m メッシュ DEM、災害前 ALOS パンシヤープン画像を補助的に使用した。

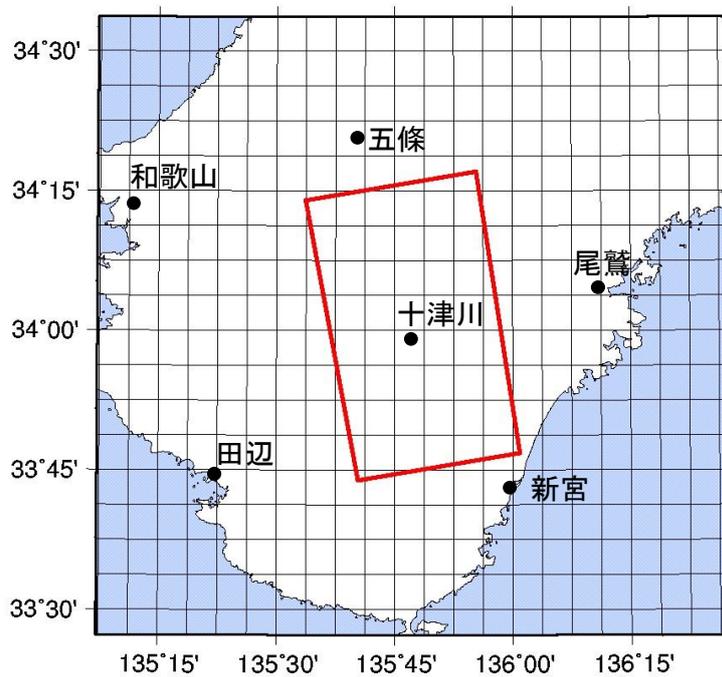


図 2.3.1 撮影範囲 (図中の赤色四角囲み)

Fig. 2.3.1 Area of SAR image

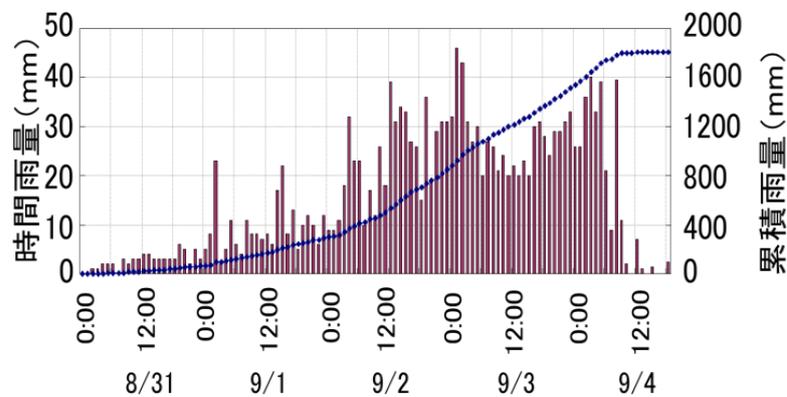


図2.3.2 2011年台風12号の雨量データ (気象庁、アメダス上北山)

Fig. 2.3.2 Rainfall data for Typhoon Talas, 2011 (from Japan Meteorological Agency, Kamikitayama)

表 2.3.1 SAR 画像の緊急判読調査のタイムライン<sup>2)</sup>

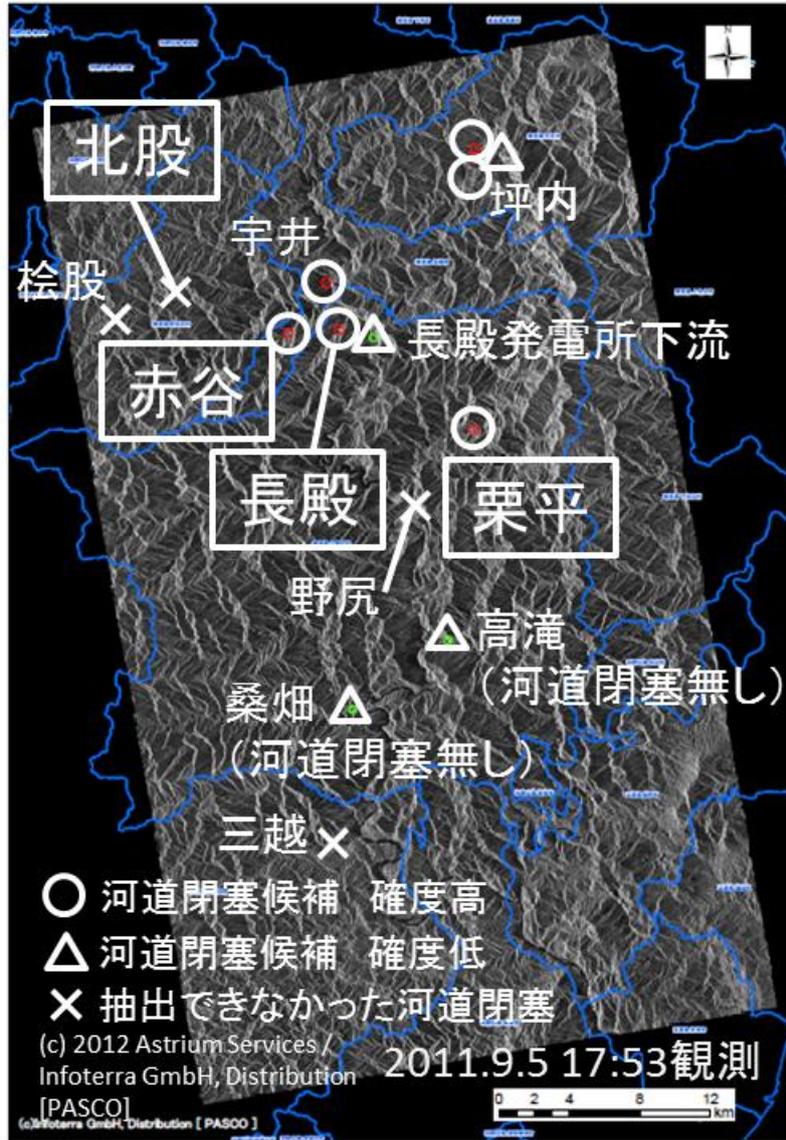
Table 2.3.1 Timeline of the emergency search

年月日	時刻	対応
平成 23 年	21 : 00	観測計画の立案開始。
9 月 4 日	23 : 00	観測計画の立案終了。
9 月 5 日	01 : 30 頃	TerraSAR-X 観測の依頼。
	14 : 00～	ヘリを使った目視調査により長殿地区の河道閉塞箇所のみ発見。 航空機による空中写真は雲が多く撮影できず、ヘリによる断片的情報のみ。
	17 : 53	TerraSAR-X が SAR 画像を撮影。 この間に、判読作業のため長殿地区の位置情報を衛星画像判読チーム（約 10 名）に送付。
	21 : 00 頃	SAR 画像の判読開始 高分解能 SAR 画像において、長殿地区の河道閉塞と湛水池が判読できた。 長殿地区と同様の画像パターンを探した。約 4 時間で SAR 画像判読が終了。
9 月 6 日	01 : 30 頃	SAR 画像判読終了。 赤谷地区、栗平地区等 8 箇所の河道閉塞を抽出。
	02 : 00 頃	近畿地方整備局に河道閉塞の抽出情報を送付。
	10:00 頃～	ヘリによる目視調査。 高分解能 SAR 判読で抽出されていた赤谷地区、栗平地区の河道閉塞を確認。
	夕方	土砂災害防止法に基づく緊急調査実施を報道発表。
9 月 8 日		土砂災害防止法に基づく土砂災害緊急情報の発表。
		五條市、十津川村が避難指示を発令し、住民が避難。

衛星高分解能 SAR 画像の判読により、河道閉塞箇所の候補として、発生の確度が高い箇所（以下、確度高）が 6 箇所（長殿地区含む）、確度が低い恐れのある箇所（以下、確度低）が 4 箇所を抽出した（図 2.3.3）。9 月 6 日の夜明け前に近畿地方整備局へ抽出箇所の位置情報を送付し、9 月 6 日午前のヘリ目視調査に活用された。その結果、赤谷地区、栗平地区で発生した大規模な河道閉塞が目視確認され、土砂災害防止法に基づく緊急調査に移行した。そして、9 月 8 日には緊急調査から得られた計測結果に基づいて、土砂災害防止法に基づく土砂災害緊急情報が発表されて、五條市、十津川村による避難指示の発令、住民の避難へとつながった。

抽出結果の評価としては、確度高の 6 箇所は全て河道閉塞を抽出しており、特に、土砂災害防止法の緊急調査の対象となった赤谷地区、栗平地区の河道閉塞を抽出することが出来た（図 2.3.4）。また、確度低の 4 箇所の確認結果は、河道閉塞 1 箇所（坪内）、大規模崩壊 1 箇所を抽出し、残る 2 箇所は誤抽出であった。また、画像エリア内に存在していたが抽出出来なかった河道閉塞や大規模崩壊（計 4 箇所：北股地区（緊急調査対象）、桧股、野尻、三越）もあった。河道閉塞の見逃しの原因は主に、河道閉塞や湛水地が小規模、河道閉塞部の越流侵食で湛水地が判読できず、山によるレーダーシャドウ、画像特性による斜面のレイオーバー、の原因に起因したと考えられる。

この災害対応における高分解能 SAR 画像判読の利用が有効であったため、以下のとおり、高分解能 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所判読手法について検討し明確化した。

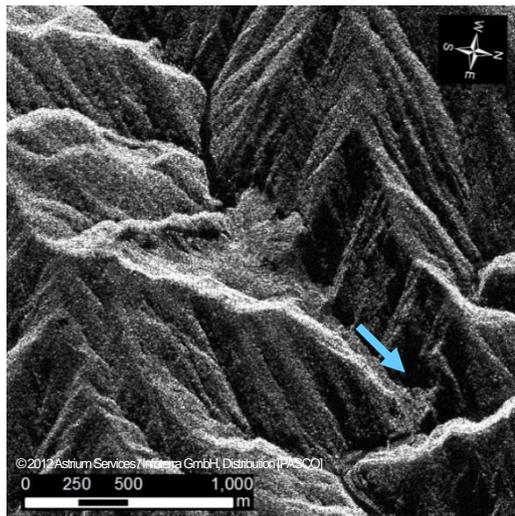


(箇所名の四角囲みは緊急調査実施箇所)

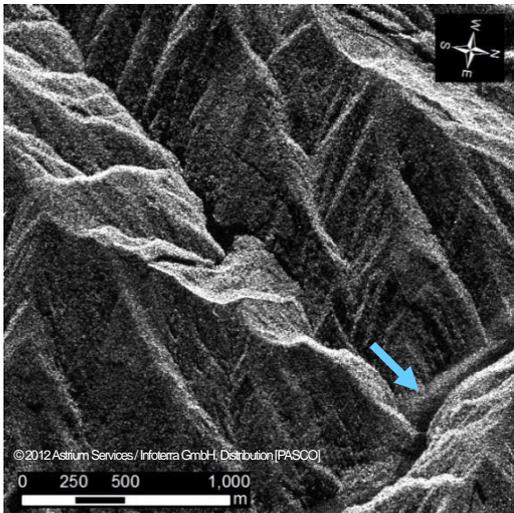
TerraSAR-X 地上分解能 3m、30km×50km、Strip Map Mode、GEC

図 2.3.3 抽出箇所と結果評価<sup>2)</sup>

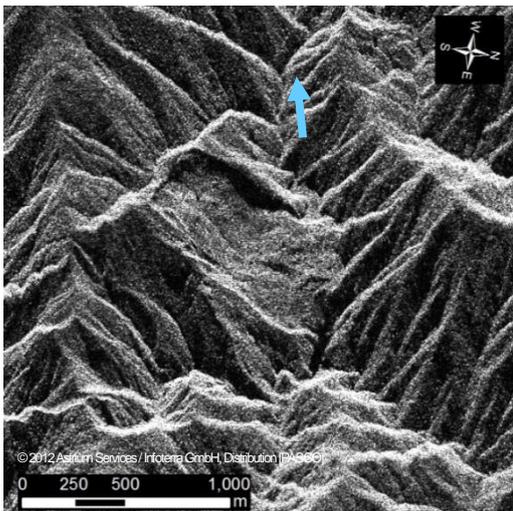
Fig. 2.3.3 Detected landslide dam candidates and evaluation of detection



Akadani 2011.9.6  
(近畿地方整備局撮影)



Nagatono 2011.9.6  
(土木研究所撮影)



Kuridaira 2011.9.22  
(近畿地方整備局撮影)

図 2.3.4 緊急調査対象の河道閉塞箇所 SAR 画像 (2011.9.5 17:53 JST 撮影)  
(上: 赤谷地区、中: 長殿地区、下: 栗平地区)

Fig. 2.3.4 SAR images of landslide dams targeted by the emergency investigation under the landslide disaster prevention act (2011.9.5 17:53 JST)

## 2. 4 高分解能 SAR 画像の撮影諸元の検討

河道閉塞箇所探索のための衛星高分解能 SAR 画像の撮影諸元を検討するため、COSMO-SkyMed、TerraSAR-X、RADARSAT-2 の 3 つの海外 SAR 衛星による撮影諸元の異なる画像を用いて、2011 年 9 月台風 12 号災害における紀伊半島の河道閉塞箇所に対し視認性の確認を行った。視認性の評価に用いた河道閉塞箇所は、国土交通省が公表している 17 箇所<sup>3)</sup>のうち、表 2.4.1 に示す 11 箇所（坪内 3 箇所①②③、宇井④、長殿⑤、赤谷⑥、栗平⑦、野尻⑧、桧股⑩、北股⑭、三越⑮、丸囲み数字は国土交通省発表資料<sup>3)</sup>中の箇所番号）である。

表 2.4.1 判読対象箇所

Table 2.4.1 Locations interpreted

崩壊箇所名	面積 <sup>4)</sup>	崩壊の向き	崩壊前平均勾配※
坪内①	2.3ha	南東	32°
坪内②	7.4 ha	東	31°
坪内③	3.6 ha	北西	33°
宇井④	6.5 ha	北東	38°
長殿⑤	19.1 ha	北西	37°
赤谷⑥	32.6 ha	北西	37°
栗平⑦	37.0 ha	北	35°
野尻⑧	14.0 ha	北西	36°
桧股⑩	1.2 ha	西	36°
北股⑭	5.4 ha	南西	35°
三越⑮	5.0 ha	北	36°

(※崩壊前の地理院 10mDEM の斜面メッシュ勾配の平均値)

## 2. 4. 1 検討に使用した画像と評価項目

検討に用いた高分解能 SAR 画像は表 2.4.2 に示す 9 画像である。それぞれの画像および関連する評価項目は、以下のとおりである。

表 2.4.2 視認性評価に用いた高分解能 SAR 画像一覧

Table 2.4.2 List of high resolution SAR images used to evaluate visibility

No	衛星名※	バンド	撮影日	軌道	照射方向	分解能	入射角	偏波	検討項目
0	TerraSAR-X	X	2011/09/05	北行	東向き	3m	39°	HH	基本画像（緊急観測）
1			2011/09/20	南行	西向き	1.7m	51°	HH	分解能
2			2011/10/06	南行	西向き	3m	37°	HH	照射方向
2'			2011/10/06	南行	西向き	3m	37°	HH	照射方向
3			2011/11/19	南行	西向き	3m	39°	HH	照射方向
4			2012/01/21	北行	東向き	3m	21°	HH	入射角
5	COSMO-SkyMed	X	2011/09/10	南行	西向き	3m	34°	HH	衛星センサ機器（バンド）
6	RADARSAT-2	C	2012/01/10	北行	東向き	3m	36°	HH	バンド（波長）
6'			2012/01/10	北行	東向き	8m	36°	HH	分解能（No1 のリサンプリング画像）

（※10m より高分解能で新規観測依頼が可能な SAR 衛星を対象とした（ALOS-2 は研究時打上げ前で含まない））

### ・基本画像（No.0）

平成 23 年台風 12 号通過直後に緊急観測して災害対応に使用した TerraSAR-X 画像である。比較に使用した画像の中で最も多くの河道閉塞箇所が判読できた画像であるため、この画像による判読可否を視認性評価の目安として、この画像を他画像との比較を行う際の基本画像とした。

### ・バンド（波長）の違い（No.6）

基本画像は X バンド高分解能センサで取得した画像であるが、他バンドで取得した場合の適用性について確認するために、C バンド高分解能センサを有す RADARSAT-2 の画像と比較した。

### ・衛星センサ機器の違い（No.5）

基本画像は、TerraSAR-X の画像であり、X バンドの高分解能センサである。他センサ機器の適用性について確認するために、同様に X バンド高分解能のセンサである COSMO-SkyMed の画像と比較した。

### ・分解能の違い（No.1、No.6'）

基本画像は概ね 3m 分解能であるが、これよりも高分解能な画像の場合について確認するために、1.7m 分解能の TerraSAR-X 画像（SpotLight 画像）と比較した（No.1）。また、分解能が低くなった

場合についても確認を行うため、3m 分解能の RADARSAT-2 の画像 (No.6) をリサンプリングして、8m 分解能の画像を作成 (No.6') して比較に用いた。

- ・入射角の違い (No.4)

基本画像は入射角  $39^\circ$  で撮像した画像であるが、入射角が異なる場合について確認を行うために、TerraSAR-X の入射角  $21^\circ$  で撮像した画像と比較した。

- ・レーダ照射方向の違い (No.2、2'、3)

基本画像は北行軌道・東向き照射であることから、逆向き照射 (南行軌道・西向き) 画像の場合について比較を行った。なお、北行軌道・南行軌道では撮影範囲が異なる。このため、基本画像の撮影範囲に含まれる河道閉塞位置を網羅するように TerraSAR-X 画像を 3 枚使用した (No.2、2' (No.2 の南側の画像)、3)。

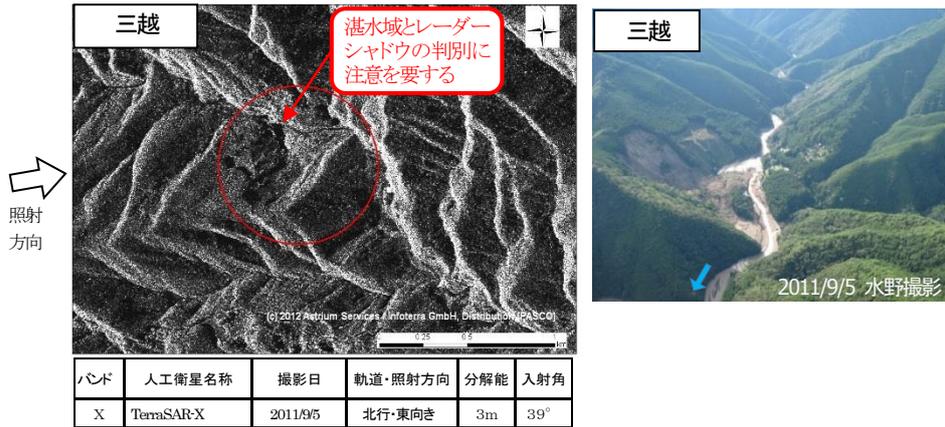
## 2. 4. 2 評価結果

視認性評価に用いた各画像の単画像としての評価結果の一覧を表 2.4.3 に示す。また、それぞれの評価結果について、以下に説明を行う。評価結果の○△×の定義は、「○：形状が読み取れる箇所、△：不明瞭だが形状が確認できる箇所、×：形状が読み取れない箇所」であり、後述する判読チェックリスト（表 2.5.1）の定義と同じである。なお、基本画像において、2011 年台風 12 号通過直後に実施した災害対応時の緊急判読において、判読抽出できなかった「三越」河道閉塞箇所の判読結果が○になっているが、これは、台風 12 号通過直後の緊急判読では湛水域をレーダーシャドウと誤判読して「三越」を抽出できなかったが（図 2.4.1）、今回、事後的に判読を行った結果、河道閉塞が判読可能であったため○としている。

表 2.4.3 単画像としての視認性評価結果一覧<sup>5)</sup>

Table 2.4.3 List of results of evaluations of landslide dam detection capability of each single image

衛星名					TerraSAR-X						COSMO-SkyMed	RADARSAT-2	
画像 No					0	1	2	2'	3	4	5	6	6'
撮影日					2011 /09/05	2011 /09/20	2011 /10/06	2011 /10/06	2011 /11/19	2012 /01/21	2011 /09/10	2012 /01/10	2012 /01/10
軌道					北行	南行	南行	南行	南行	北行	南行	北	北行
照射方向					東向き	西向き	西向き	西向き	西向き	東向き	西向き	東向き	西向き
分解能					3m	1.7m	3m	3m	3m	3m	3m	3m	8m
入射角					39°	51°	37°	37°	39°	21°	34°	36°	36°
偏波					HH								
箇所 No	箇所 名	面積 4)	方位	勾配	判 読 結 果								
①	坪内	2.3ha	南東	32°	○		×			×	×	○	×
②	坪内	7.4ha	東	31°	○		×			×	×	○	△
③	坪内	3.6ha	北西	33°	○		○			×	○	○	×
④	宇井	6.5ha	北東	38°	○	×	×		×	×	×	○	○
⑤	長殿	19.1ha	北西	37°	○	○	○		○	×	○	○	×
⑥	赤谷	32.6ha	北西	37°	○	○	○		○	×	○	○	○
⑦	栗平	37.0ha	北	35°	○		○			△	○	○	○
⑧	野尻	14.0ha	北西	36°	×		△			×	△		
⑩	桧股	1.2ha	西	36°	×				×				
⑭	北股	5.4ha	南西	35°	×				△	×			
⑮	三越	5.0ha	北	36°	○			×					
評価項目					基本	分解能	照射方向	照射方向	照射方向	入射角	センサ相違	バンド	分解能
集計	①対象数				11	3	8	1	5	9	8	7	7
	②○				8	2	4	0	2	0	4	7	3
	③△				0	0	1	0	1	1	1	0	1
	④×				3	1	3	1	2	8	3	0	3
	視認可(②+③)/①				73%	67%	63%	0%	60%	11%	63%	100%	57%



視認性が良好な衛星 SAR 画像 (No.0, X バンド, HH)

図 2.4.1 ⑮三越 河道閉塞箇所の SAR 画像

Fig. 2.4.1 [15] Mikoshi, SAR image of a landslide dam location

2011 年台風 12 号の通過直後に実施した災害対応時の SAR 画像の緊急判読において、湛水域をレーダーシャドウと誤判読して、判読抽出できなかった「三越」の河道閉塞箇所の画像を図 2.4.1 に示す。また、判読対象とした河道閉塞箇所の例を写真 2.4.1 に示す。

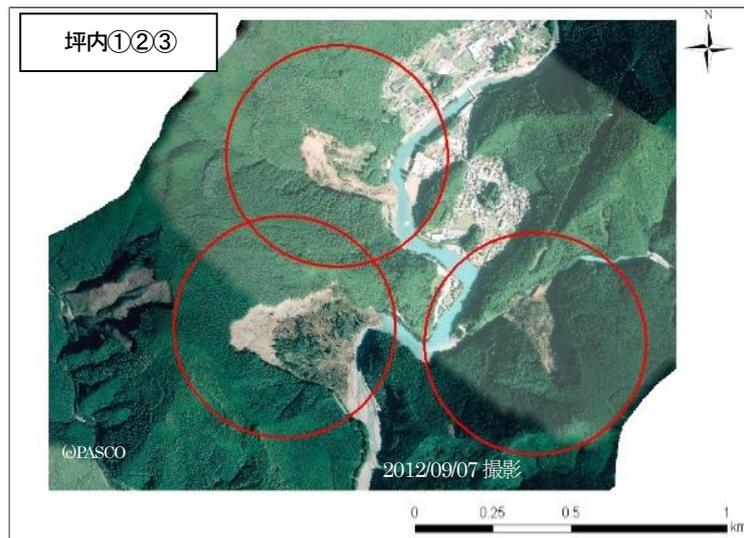


写真 2.4.1 航空機による垂直写真から作成した光学画像 (オルソ画像、坪内地区) <sup>6)</sup>

Photo 2.4.1 Optical photo (orthophoto image) prepared from photo taken vertically from aircraft

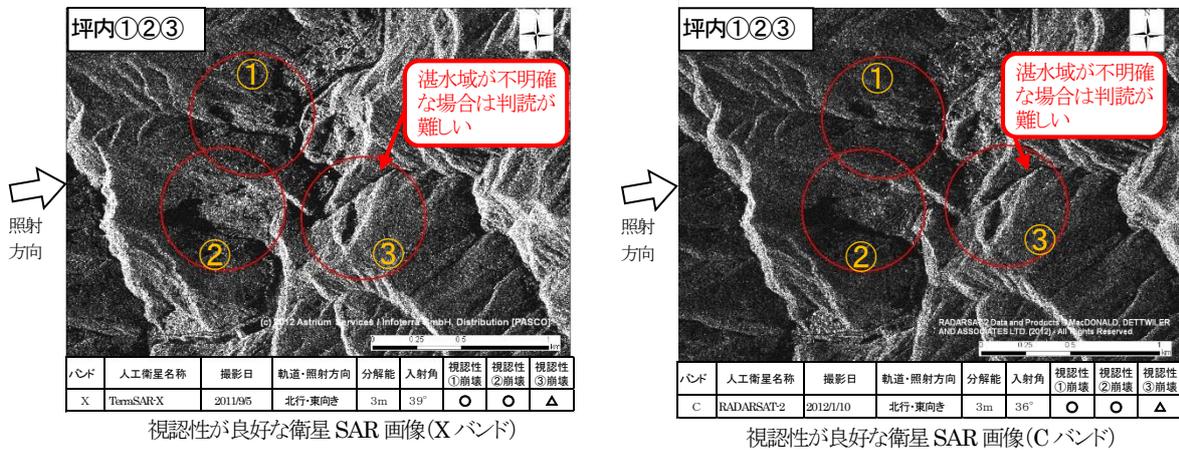
### (1) バンド (波長) の違い

X バンドの TerraSAR-X 画像と C バンドの RADARSAT-2 画像との視認性を比較した結果を表 2.4.4 に示す。個別の河道閉塞箇所の画像を比較すると、RADARSAT-2 画像の方がやや粗く見えるという差はあるが、比較対照とした 7 箇所の河道閉塞をいずれも全て抽出できており、両画像間に結果の差異は確認できない。このことから、X バンドと C バンドの違いによる視認性の差は、河道閉塞の抽出精度としては大きな差は生じていないといえる。バンドの違いによる視認性を比較した河道閉塞画像の例を図 2.4.2 に示す。

表 2.4.4 バンドの違いによる判読結果の比較

Table 2.4.4 Comparison of results of evaluations of landslide dam detection capability with different radar band images

衛星名					TerraSAR-X	RADARSAT-2																																	
画像 No					No.0	No.6																																	
バンド					X	C																																	
照射方向					東向き	東向き																																	
箇所 No	箇所名	面積 <sup>4)</sup>	方位	勾配	判読結果																																		
①	坪内	2.3ha	南東	32°	○	○																																	
②	坪内	7.4ha	東	31°	○	○																																	
③	坪内	3.6ha	北西	33°	○	○																																	
④	宇井	6.5ha	北東	38°	○	○																																	
⑤	長殿	19.1ha	北西	37°	○	○																																	
⑥	赤谷	32.6ha	北西	37° <td ○	○	⑦	栗平	37.0ha	北	35°	○	○	集計		①対象数			7	7	②○			7	7	③△			0	0	④×			0	0	視認可 (②+③) / ①			100%	100%
⑦	栗平	37.0ha	北	35°	○	○																																	
集計		①対象数			7	7																																	
		②○			7	7																																	
		③△			0	0																																	
		④×			0	0																																	
		視認可 (②+③) / ①			100%	100%																																	



左：画像番号 No.0、Xバンド、視認性○      右：画像番号 No.6、Cバンド、視認性○

図 2.4.2 バンドの違いによる視認性の比較<sup>6)</sup>

Fig. 2.4.2 Comparison of landslide dam detection capability of different radar band images

## (2) 衛星センサ機器の違い

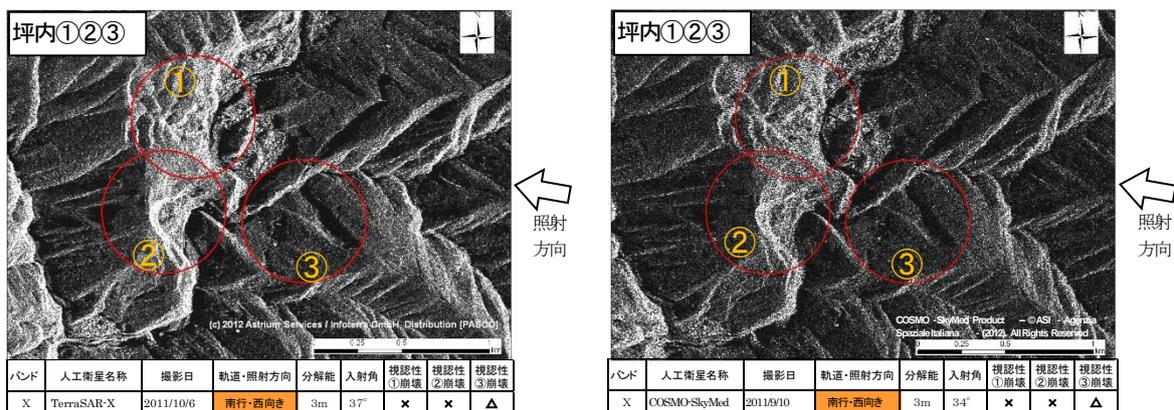
同じ X バンドセンサを有す TerraSAR-X と COSMO-SkyMed との視認性比較を行った結果を表 2.4.5 に示す。なお、TerraSAR-X 画像は、複数ある画像のうち、COSMO-SkyMed 画像と照射方向が同じで、撮影範囲も類似する No.2 TerraSAR-X 画像を比較対照とした。視認性を比較した 8 箇所の河道閉塞では、いずれも約 60%程度の箇所を判読抽出しており、両画像間に視認性の差異は確認さ

れなかった。このことから、衛星センサ機器の違いによる視認性の差はないといえる。参考として、**図 2.4.3** に衛星センサ機器の違いによる視認性を比較した画像を示す。

表 2.4.5 衛星センサ機器の違いによる判読結果の比較

Table 2.4.5 Comparison of results of evaluations of landslide dam detection capability with different radar sensor images

衛星名					TerraSAR-X	COSMO-SkyMed
画像 No					No.2	No.5
バンド					X	X
照射方向					西向き	西向き
箇所 No	箇所名	面積 <sup>4)</sup>	方位	勾配	判読結果	
①	坪内	2.3ha	南東	32°	×	×
②	坪内	7.4ha	東	31°	×	×
③	坪内	3.6ha	北西	33°	○	○
④	宇井	6.5ha	北東	38°	×	×
⑤	長殿	19.1ha	北西	37°	○	○
⑥	赤谷	32.6ha	北西	37°	○	○
⑦	栗平	37.0ha	北	35°	○	○
⑧	野尻	14.0ha	北西	36°	△	△
集計		①対象数			8	8
		②○			4	4
		③△			1	1
		④×			3	3
		視認可 (②+③) /①			63%	63%



左：画像番号 No.2、衛星名 TerraSAR-X、 右：画像番号 No.5、衛星名 COSMO-SkyMed)

図 2.4.3 衛星センサ機器の違いによる視認性の比較<sup>6)</sup>

Fig. 2.4.3 Comparison of landslide dam detection capability of different radar sensor images

### (3) 分解能の違い

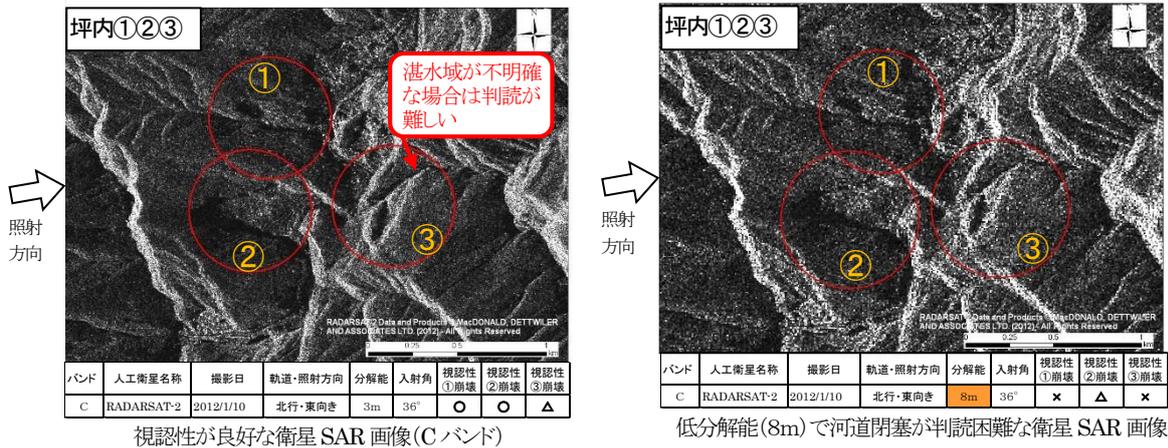
#### 低分解能画像との比較

3m 分解能の RADARSAT-2 の画像 (No.6) と、リサンプリングして作成した低分解能画像 (No.6'、分解能 8m) との視認性を比較した結果を表 2.4.6 に示す。比較対照とした河道閉塞 7 箇所について、3m 分解能では全て抽出可能と判断されたが、低分解能画像ではその半数程度の抽出結果となった。河道閉塞の判読に際して必要な分解能については、今回の検討では少なくとも分解能 8m より粗い画像では、視認性が大きく低下する可能性が示された。参考として、分解能の違いによる視認性を比較した画像を図 2.4.4 に示す。表 2.4.6 の比較結果より、河道閉塞を抽出する際の SAR 画像の分解能は、3m よりも高分解能であることが望ましいと考えられる。ここで、分解能 1m 程度の高分解能 SAR 画像ではより詳細な現地状況が判読されるが、今回比較に使用した観測衛星の性能では撮影範囲が、分解能 3m 画像と比べて、分解能 1m 画像では大幅に狭くなるため注意を要する。

表 2.4.6 分解能の違いによる判読結果の比較 (低分解能画像との比較)

Table 2.4.6 Comparison of results of evaluations of landslide dam detection capability with different radar resolution images (for low-resolution)

衛星名					RADARSAT-2	
画像 No					No.6	No.6'
撮影日					2012/01/10	2012/01/10
分解能					3m	8m
照射方向					東向き	東向き
箇所 No	箇所名	面積 <sup>4)</sup>	方位	勾配	判読結果	
①	坪内	2.3ha	南東	32°	○	×
②	坪内	7.4ha	東	31°	○	△
③	坪内	3.6ha	北西	33°	○	×
④	宇井	6.5ha	北東	38°	○	○
⑤	長殿	19.1ha	北西	37°	○	×
⑥	赤谷	32.6ha	北西	37°	○	○
⑦	栗平	37.0ha	北	35°	○	○
集計		①対象数			7	7
		②○			7	3
		③△			0	1
		④×			0	3
		視認可 (②+③) /①			100%	57%



視認性が良好な衛星 SAR 画像 (C バンド)

低分解能 (8m) で河道閉塞が判読困難な衛星 SAR 画像

左 : 画像番号 No.6、分解能 3m

右 : 画像番号 No.6'、分解能 8m)

図 2.4.4 分解能の違いによる視認性の比較 (低分解能画像との比較) <sup>6)</sup>

Fig.2.4.4 Comparison of landslide dam detection capability of different radar resolution images (for low-resolution)

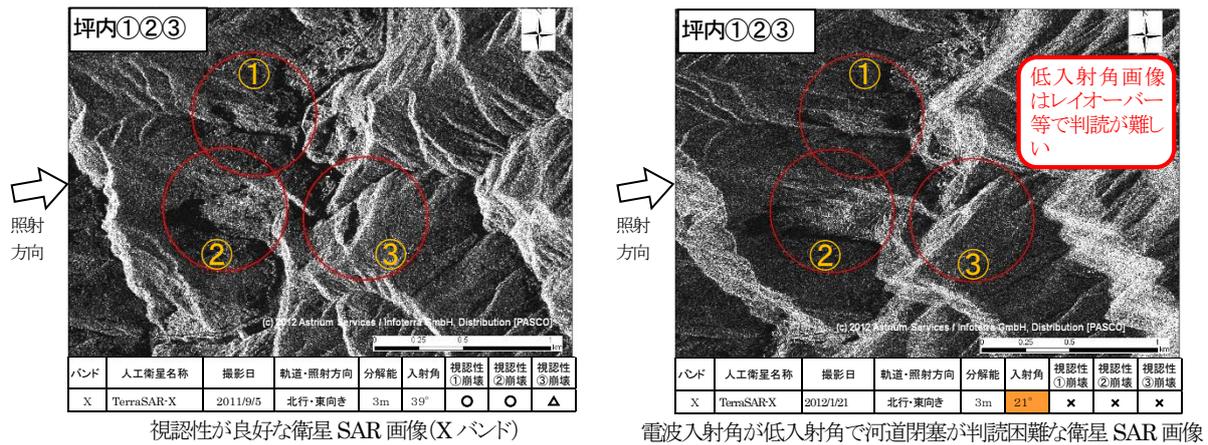
#### (4) 入射角

入射角の異なる 2 画像の視認性を比較した結果を表 2.4.7 に示す。入射角 39° の基本画像では約 80%程度の河道閉塞箇所が抽出できたが、入射角 21° の画像では約 10%程度の抽出となり、河道閉塞箇所の抽出割合が著しく低下した。これは、SAR 画像取得時の入射角が小さくなると、河道付近の低い場所よりも入射方向と正対する斜面が衛星に近くなり、画像上の地形が倒れこむレイオーバーとなることから、河道閉塞箇所を判読することが困難になるためである。ここで比較した No.0、No.4 以外の画像も、表 2.4.3 に示すように入射角はそれぞれ少々異なるが（最低 34°、最高 51°）、表 2.4.7 のような視認性の差は確認されなかった。ただし、入射角が大きくなると山の影に隠れるレーダシャドウによる不可視領域の割合が大きくなることにも留意する必要がある。これらのことより、河道閉塞を判別するためには、一定程度の入射角を確保する必要があり、SAR 画像取得時の入射角は、概ね 35°～45° 程度が望ましいと考えられる。参考として、入射角の違いによる視認性を比較した SAR 画像を図 2.4.5 に示す。

表 2.4.7 入射角の違いによる判読結果の比較

Table 2.4.7 Comparison of results of evaluations of landslide dam detection capability with different radar angle images

衛星名					TerraSAR-X	
画像 No					No.0	No.4
入射角					39°	21°
照射方向					東向き	東向き
箇所 No	箇所名	面積 <sup>4)</sup>	方位	勾配	判 読 結 果	
①	坪内	2.3ha	南東	32°	○	×
②	坪内	7.4ha	東	31°	○	×
③	坪内	3.6ha	北西	33°	○	×
④	宇井	6.5ha	北東	38°	○	×
⑤	長殿	19.1ha	北西	37°	○	×
⑥	赤谷	32.6ha	北西	37°	○	×
⑦	栗平	37.0ha	北	35°	○	△
⑧	野尻	14.0ha	北西	36°	×	×
⑭	北股	5.4ha	南西	35°	×	×
集計		①対象数			9	9
		②○			7	0
		③△			0	1
		④×			2	8
		視認可 (②+③) / ①			78%	11%



左：画像 No.0、入射角 39°、視認性○      右：画像 No.4、入射角 21°、視認性×

図 2.4.5 入射角の違いによる視認性の比較<sup>6)</sup>

Fig. 2.4.5 Comparison of landslide dam detection capability of different radar angle images

### (5) レーダ照射方向の違い

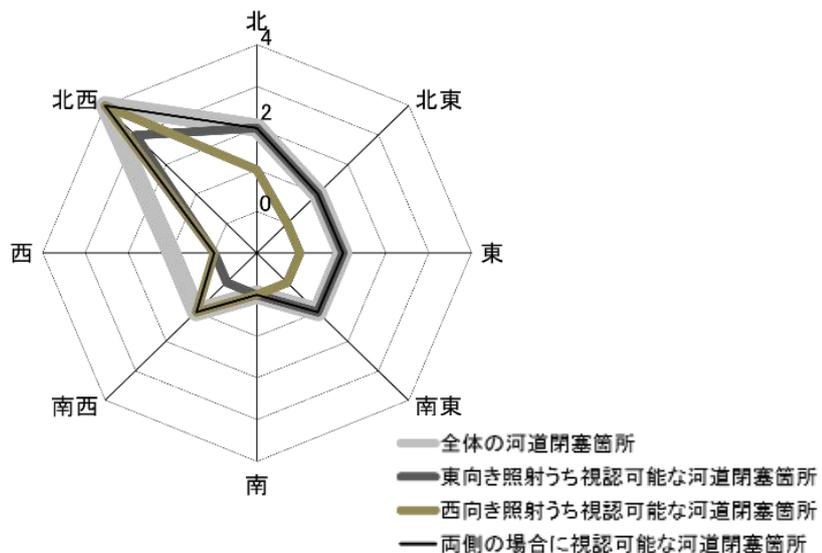
東向き照射画像 (No.0) と西向き照射画像 (No.2, 2', 3 を組み合わせたもの) の視認性を比較した結果を表 2.4.8 に示す。なお、東向き・西向き照射を組み合わせた場合 (異なる照射方向の画像で判読が実施できたと想定) として、「両側」も整理した。また、視認可 (○もしくは△と定義) となる箇所数の割合を集計欄に示した (以降、同じ)。表 2.4.8 よりこのエリアでは、片側のみの照射では東向きの視認性がやや高いが、両方向ともに概ね全体の 50~70%に該当する箇所を抽出することを確認した。また、両側から照射した場合は約 90%の抽出となって抽出率がより向上した。

次に、河道閉塞を引き起こした深層崩壊発生斜面の方位と、SAR 画像で視認可能かどうかの視認性との関係をまとめた。その結果を図 2.4.6 に示す。東向き照射の場合は東向きの斜面における現象把握にやや優位であり、西向き照射の場合は西向きがやや優位である傾向が分かる。両側の場合は双方の優位性が採用されることから、概ね全方位の把握が可能となる傾向となった。表 2.4.8、図 2.4.6 から、異なるレーダ照射方向の画像を用いた河道閉塞箇所の探索が有効であることが示された。参考として、レーダ照射方向の違いによる視認性を比較した画像を図 2.4.7 に示す。なお、両側の照射方向でも把握できなかった箇所が 1 箇所 (桧股⑩) 存在するが、当該箇所は崩壊面積が最小であり、崩壊規模が影響している可能性が考えられる。

表 2.5.8 レーダ照射方向の違いによる判読結果の比較<sup>7)</sup>

Table 2.5.8 Comparison of results of evaluations of landslide dam detection capability with different radar direction images

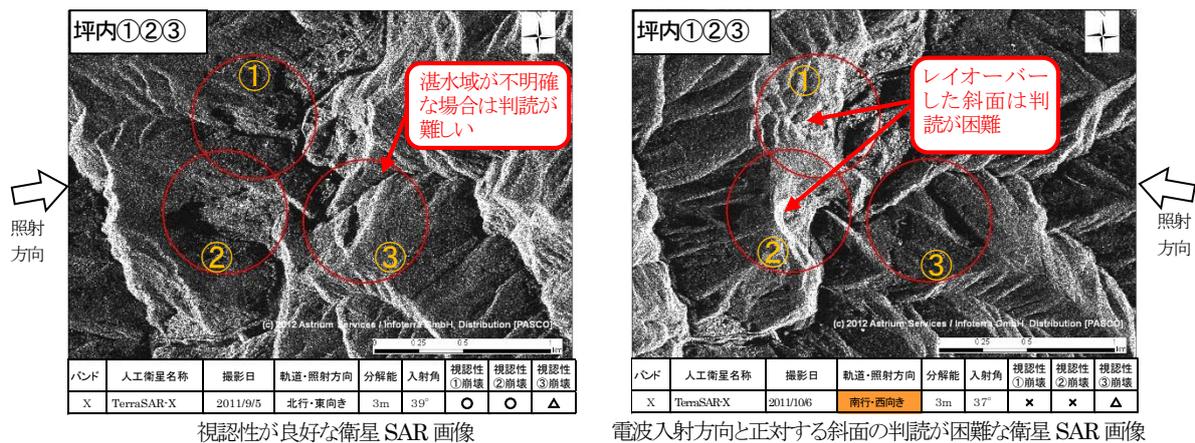
衛星名					TerraSAR-X		
画像 No					No.0	No.2、2'、3	No.0、2、2'、3
照射方向					東向き	西向き	両側
箇所 No	箇所名	面積 <sup>4)</sup>	方位	勾配	判読結果		
①	坪内	2.3ha	南東	32°	○	×	○
②	坪内	7.4ha	東	31°	○	×	○
③	坪内	3.6ha	北西	33°	○	○	○
④	宇井	6.5ha	北東	38°	○	×	○
⑤	長殿	19.1ha	北西	37°	○	○	○
⑥	赤谷	32.6ha	北西	37°	○	○	○
⑦	栗平	37.0ha	北	35°	○	○	○
⑧	野尻	14.0ha	北西	36°	×	△	△
⑩	桧股	1.2ha	西	36°	×	×	×
⑭	北股	5.4ha	南西	35°	×	△	△
⑮	三越	5.0ha	北	36°	○	×	○
集計		①対象数			11	11	11
		②○			8	4	8
		③△			0	2	2
		④×			3	5	1
		視認可 (②+③) / ①			73%	55%	91%



(図中の目盛は河道閉塞箇所数を示す)

図 2.4.6 崩壊発生斜面方位と視認性との関係<sup>7)</sup>

Fig.2.4.6 Relationship between landslide detections and landslide dam detection capability



左：画像 No.0、東向き照射、視認性良好      右：画像 No.2、西向き照射、視認性困難

図 2.4.7 レーダ照射方向の違いによる視認性の比較<sup>6)</sup>

Fig.2.4.7 Comparison of landslide dam detection capability of different radar direction images

### 2. 4. 3 地形条件から見た視認性評価

#### (1) 判読可能な崩壊規模

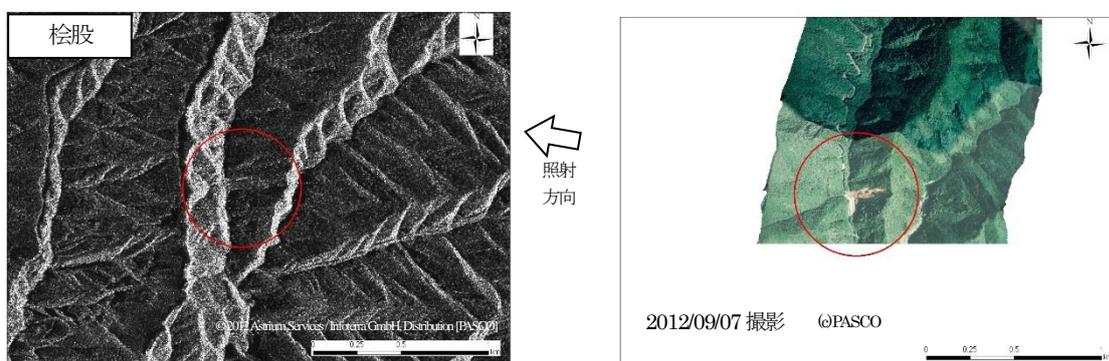
高分解能 SAR 画像の判読により探索可能な河道閉塞の崩壊規模を把握するために、河道閉塞を引き起こした深層崩壊の崩壊規模に対する視認性を表 2.4.9 に整理した。なお、レーダ照射方向の違いによる差を除くために、表 2.4.8 の「両側」の画像による確認可否で確認結果を示し、崩壊面積の規模で並べ替えた。また、検討に用いた崩壊面積は光学画像から判読した平面投影面積<sup>4)</sup>である。表 2.4.9 より、形状が判読できない×箇所は崩壊面積が最小の桧股⑩（崩壊面積は 1.2ha、図 2.4.8）のみであった。次に崩壊面積が小さい坪内①は崩壊面積 2.3ha であるが視認可能であった。

上記より、分解能 3m の SAR 画像の場合、平面投影面積 2ha 程度未満の現象規模は、探索が困難である可能性が考えられる。しかし、今回も土砂災害防止法に基づく緊急調査の対象となった規模の河道閉塞（栗平、赤谷、長殿、北股、基準：天然ダム高 20m 以上）は視認可（○もしくは△）の判読結果であり、分解能 3m の SAR 画像で必要な視認性は確保できると考えられる。

表 2.4.9 崩壊面積と視認性との関係

Table 2.4.9 Relationship between collapsed area and visibility

衛星名					TerraSAR-X
画像 No					No.0、2、2'、3
照射方向					両側
箇所 No	箇所名	面積 <sup>4)</sup>	方位	勾配	判読結果
⑩	桧股	1.2ha	西	36°	×
①	坪内	2.3ha	南東	32°	○
③	坪内	3.6ha	北西	33°	○
⑮	三越	5.0ha	北	36°	○
⑭	北股	5.4ha	南西	35°	△
④	宇井	6.5ha	北東	38°	○
②	坪内	7.4ha	東	31°	○
⑧	野尻	14.0ha	北西	36°	△
⑤	長殿	19.1ha	北西	37°	○
⑥	赤谷	32.6ha	北西	37°	○
⑦	栗平	37.0ha	北	35°	○



左：画像番号 No.3、分解能 3m、判読結果× 右：航空写真から作成した光学画像（オルソ）

図 2.4.8 ⑩桧股（崩壊面積 1.2ha）崩壊箇所の画像

Fig. 2.4.8 [10] Hinokimata (collapsed area: 1.2ha), image of collapsed location

## (2) 湛水域が不明確な崩壊地

表 2.4.9 に示す検討を行った 11 箇所のうち、全ての画像において視認性が○とならず、△の「不明瞭だが形状が確認できる箇所」となった北股⑭、野尻⑧は、いずれも湛水域が不明瞭である。野尻⑧

(図 2.4.9) は崩壊発生により生じる地形の段差が不明瞭で、かつ河道の流量が多く河道閉塞箇所が既に大部分は流失しており、湛水域が不明瞭で判読することが困難であった。規模が大きく緊急調査対象の北股⑭ (図 3.6) については、崩壊は読みとれたが既存地形かどうか判別できず、閉塞で生じた湛水面積が小さいことから閉塞部分を抽出することができず、判読が困難であった。このように湛水域が不明瞭な崩壊地は、単偏波 SAR 画像による判読が難しくなることに留意を要する。

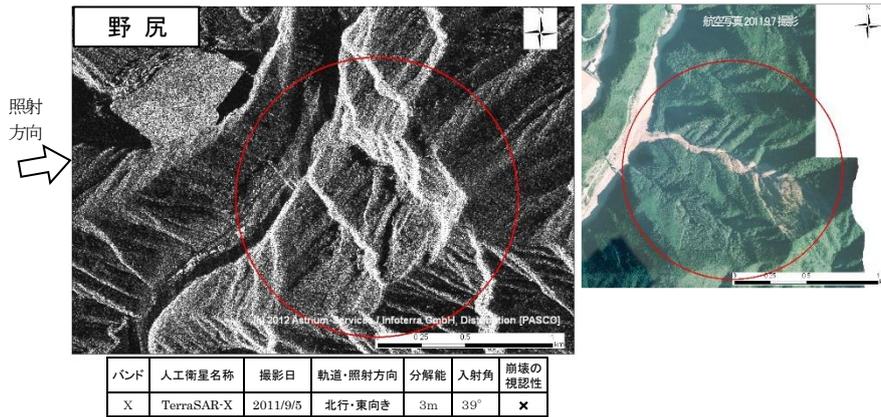


図 2.4.9 ⑧野尻崩壊箇所の画像  
 Fig. 2.4.9 [8] Noziri, image of collapsed location

### 2. 4. 4 SAR 画像の視認性を踏まえた緊急撮影時の基本仕様

前述の視認性評価の結果、地球観測衛星による SAR 画像の撮影条件を以下のとおり明確化した。

#### (1) バンドの違い

X、C のいずれのバンドでも可。

単偏波画像では、C バンド、X バンドの違いによる明瞭な視認性の差は生じないため、災害発生のおそれのある場合は画像入手が早い衛星画像を選定することが望ましい。

#### (2) 分解能

(平面投影面積 2ha 以上の現象把握を想定した場合) 分解能 3m 程度を推奨。

単偏波 SAR 画像で大規模崩壊および河道閉塞を抽出するためには、3m 程度より高い分解能が望ましい。ただし、2011 年紀伊半島大水害を対象とした分解能 3m の単偏波 SAR 画像の判読事例では、平面投影面積 1.2ha の河道閉塞は判読が困難であった。また、平面投影面積 2ha 以上の規模であっても、レイオーバやシャドウによる不可視領域や湛水域 (鏡面反射) とシャドウの識別が困難な場合、土石流形態のため土地被覆の変化が少ない場合は見逃し易いことに留意を要する。

#### (3) 観測幅

観測幅は概ね 20km 以上を推奨 (高分解能 (3m 程度) かつ観測幅の広いモードを選択)。

2011 年台風 12 号による紀伊半島大水害では、17 箇所の河道閉塞箇所が広域に分布しており、使用した SAR 画像は観測幅 30km であったが、6 箇所の河道閉塞箇所が画像エリア外で発生し判読できなかった。さらに、広域から効率良く大規模崩壊および河道閉塞を抽出するためには、ある程度の観測幅で撮影する必要がある。このことから、観測幅はより広い方が見逃しの可能性が少なくなり望ましいが、現在運用中の SAR 衛星の撮影モードと分解能 (推奨 3m 分解能) を考慮し、概ね 20km 以上の観測幅は最低必要であると考えられる。

#### (4) 入射角

入射角 35～45° 程度を推奨。

SAR 画像の入射角は、小さくなるとレイオーバー、大きくなるとシャドウとなり、抽出精度に影響を及ぼすことから、一定程度の入射角を確保する必要がある。これらを踏まえ、入射角は 35～45° 程度を推奨する。

#### (5) 照射方向

照射方向は東西どちら方向でも良い（画像入手予定時刻がもっとも早いものを選択する）。

SAR 画像は、照射方向と斜面方位や斜面の傾斜角度の関係によりレイオーバーやレーダーシャドウ等が生じて抽出率が落ち、2011 年台風 12 号の河道閉塞抽出の事例においては、照射方向が片側のみの SAR 画像では、50～70%程度の抽出率であった。東西両側からの画像を用いれば抽出率は約 90%に向上した。このため、片側照射方向の画像では読み取れない範囲において大規模崩壊および河道閉塞が発生している可能性に留意する必要がある、片側照射方向のみの画像では読みとれない範囲をカバーするために、時間を追って逆方向からの照射画像も取得し、見逃しを減らすことが望ましい。

## 2. 5 標準的な判読方法の検討

### 2. 5. 1 判読チェックリストの作成

SAR 画像判読時に特に重要な地形的特徴を重要な順に以下に示す。

- ・水面の出現：河道閉塞による河川上流域での湛水域の形成
- ・連続性の切断：谷・水みちや道路等の連続性の消滅
- ・深層崩壊の形状、地形変化：大きな凹地形や滑落崖と明瞭な地形境界（裸地化による樹木との高さの差、滑落崖や亀裂による段差）の出現、堆積物による大きな凸地形の出現
- ・肌理（きめ）の変化：新たな裸地化による周辺との地被状況の差
- ・上記要素の組み合わせ：上記要素の組み合わせと地形的な位置関係

紀伊半島大水害時の判読実績や河道閉塞の地形的特徴を踏まえ、判読の際の重要な着眼点を標準的な判読基準としてとりまとめ、判読チェックリスト（表 2.5.1）を作成した。このチェックリストは、実務的には以下のような活用を念頭においている。

- ・候補箇所ごとに作成する。
- ・上から順に確認を行い、評価（○、△、×）の三段階評価を行う。すべての項目で（○、△）が確認できる必要はない。
- ・最終判断は全ての項目を総合的に評価する。
- ・判断根拠として保存する。

判読チェックリストは定性的な判読基準ではあるが、基準化することで判読者による判読結果の差異を大いに軽減することに資するものと考えられる。

表 2.5.1 判読チェックリスト (単偏波画像) <sup>1)</sup>

Table 2.5.1 Interpretation checklist (single-polarization image)

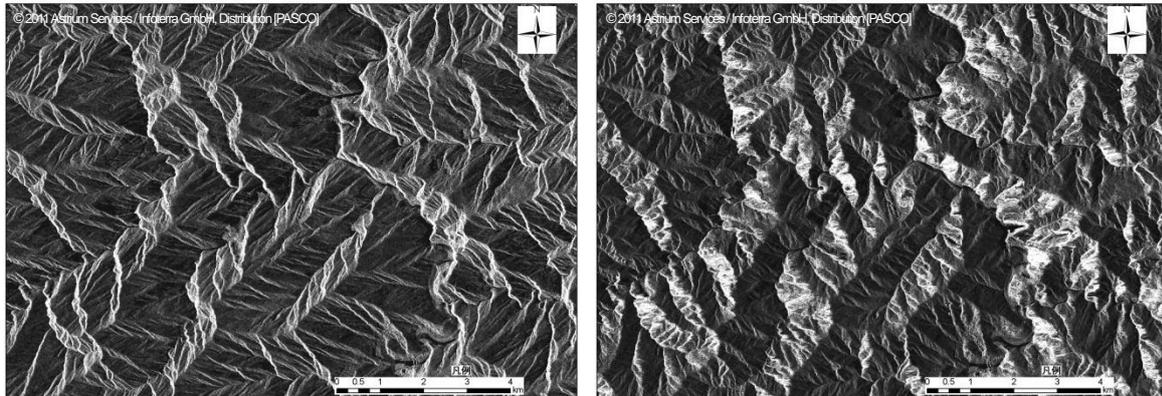
箇所番号		所在地・名称・座標	
確認範囲	チェック項目	判断基準	評価
河道	湛水域	湛水域と想定される暗い領域が確認されるか 上下流の滞筋幅と比べ不自然な幅となっているか ダム・取水堰等の人工構造物による湛水では無いか	
周辺地形	斜面勾配	湛水域近傍に斜面は存在するか 周辺斜面は発生する程度の急勾配斜面か 等	
崩壊地	滑落崖	湛水域周辺に滑落崖が確認できるか 滑落崖周辺に段差によるシャドウ・レイオーバーは確認できるか 滑落崖の形状は斜面方向に対し円弧状となっているか 等	
	崩壊地内	滑落崖の下に崩壊形状は確認されるか 崩壊形状は斜面方向と整合しているか 等	
	崩積土砂 (河道閉塞部)	崩壊地内から下部にかけて崩積土は確認できるか 崩積土の形状は舌状になっているか 崩積土の到達範囲は地形形状と整合しているか 河道閉塞部は谷を埋積する形状となっているか 河道閉塞部の上流に湛水域は形成されているか 崩積土上に倒木等の形状は確認されるか 等	
	崩壊規模	河道閉塞が発生する程度の崩壊規模か	
	画像の肌理	崩壊地内・崩積土等の表面は周辺林地と比べ平滑になっているか 周辺斜面にみられる強度パターンと違うパターンとなっているか 等	
相対的 位置関係	上下関係等	滑落崖・崩積土・湛水域等の位置関係に不自然さはないか 崩積土の到達範囲は地形と整合しているか 等	
	周辺地物	周辺の道路網に分断はないか 建物が埋積されているような状況は確認されるか	
総合評価			

【評価】○：形状が読み取れる箇所、△：不明瞭だが形状が確認できる箇所、×：形状が読み取れない箇所  
(通常、判読は上から順に実施)

## 2. 5. 2 グランドレンジ画像による判読

判読には、グランドレンジ画像を用いる。グランドレンジとは、SAR衛星が受信する対象物との距離を地表投影したものであり、ここではオルソ処理（正射投影）する前の GeoTiff 形式の画像を想定している。グランドレンジ画像をオルソ処理することで、地形図や行政界などの GIS データと正確に重ね合わせることができるが、画像が歪められることで崩壊地や河道などの視認性が低下する（図 2.5.1）。グランドレンジ画像の位置精度は正確さに欠けるが、いわば鳥瞰図や斜め写真のようなイメージで地物が撮影されるため、直感的な判読が容易である。加えて、オルソ処理には時間がかかるこ

とから、より迅速な判読が要求される河道閉塞抽出の際は、データ提供が早いグランドレンジ画像の利用が推奨される。



グランドレンジ画像

オルソ画像

図 2.5.1 グランドレンジ画像とオルソ画像の見え方の違い<sup>1)</sup>

Fig. 2.5.1 Differences in way of viewing ground range image and orthophoto image

### 2. 5. 3 SAR 画像の正立配置 (回転)

SAR 画像にはレーダ照射方向に伴う方向依存性があるため、立体感を持って正確に判読するには、画像が正立するように回転させる。図 2.5.2 に示すとおり、「SAR 画像の照射方向が上」となるように、白い尾根線を上向きに配置すると判読しやすい。

- ・北行軌道 東向き照射の画像：西から照射のため、右回りに約 100° 回転
- ・南行軌道 西向き照射の画像：東から照射のため、左回りに約 100° 回転

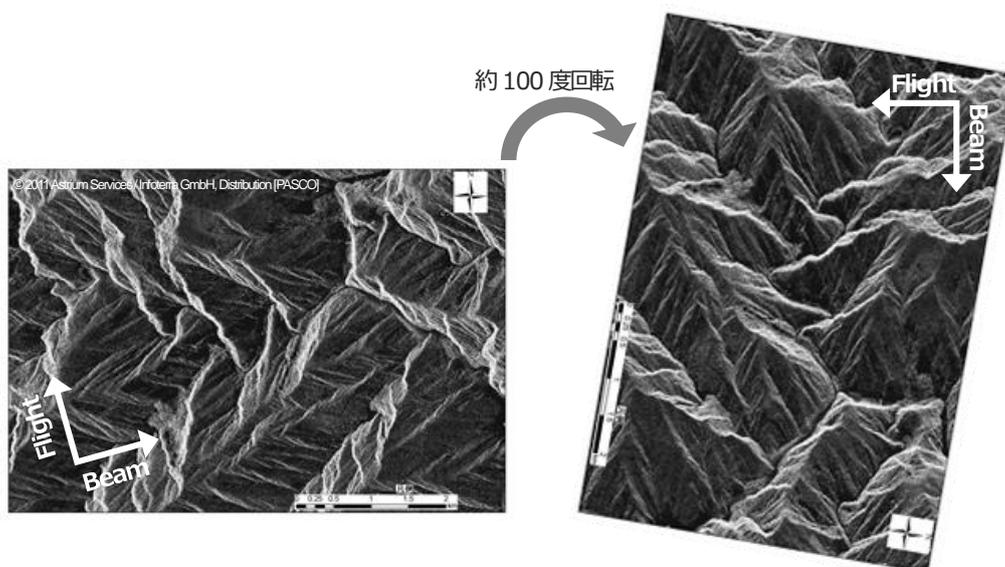


図 2.5.2 判読時の画像配置 (SAR 画像の照射方向が上になるように回転)<sup>1)</sup>

Fig. 2.5.2 Layout of images during interpretation (rotated so that the exposure direction of the SAR images is up)

#### 2. 5. 4 GIS 機能の利用

前述した SAR 画像の正立配置（回転）や既存の基盤地図情報との重ね合わせ等、GIS の描画機能を活用することで効率的な判読が可能となる。

#### 2. 5. 5 災害に係る情報の収集

衛星高分解能 SAR 画像の判読にあたっては、SAR 画像のみならず、災害前光学衛星画像等のリファレンス情報、報道、ヘリ目視調査結果、地上調査結果等の災害に係る情報を収集して、総合的に判断を行う必要がある。

また、緊急撮影されたものと同じ仕様（衛星名、モード、軌道、入射角など）の SAR 画像のアーカイブ画像（災害発生前）がある場合は、画像を重ね合わせたスタック画像を作ることによって、二時期の間の変化を容易に抽出することができる。図 2.5.3 は、奈良県十津川村付近のスタック画像の例である。赤のバンドに災害前の 2010 年 12 月 13 日撮影の画像を、緑・青のバンドに 2011 年 9 月台風 12 号災害後の 2011 年 11 月 19 日の画像を当てはめるとこのような画像が得られる。この画像では、前の画像よりも暗くなったところは赤く、明るくなったところは青く表現されるので、新たに生じた河道閉塞の湛水面（黒くなるので）は赤くなり、崩壊地は裸地化（明るいトーンになる）して青くなるので、簡単に見分けることができ、判読効率・精度の向上が期待できる。

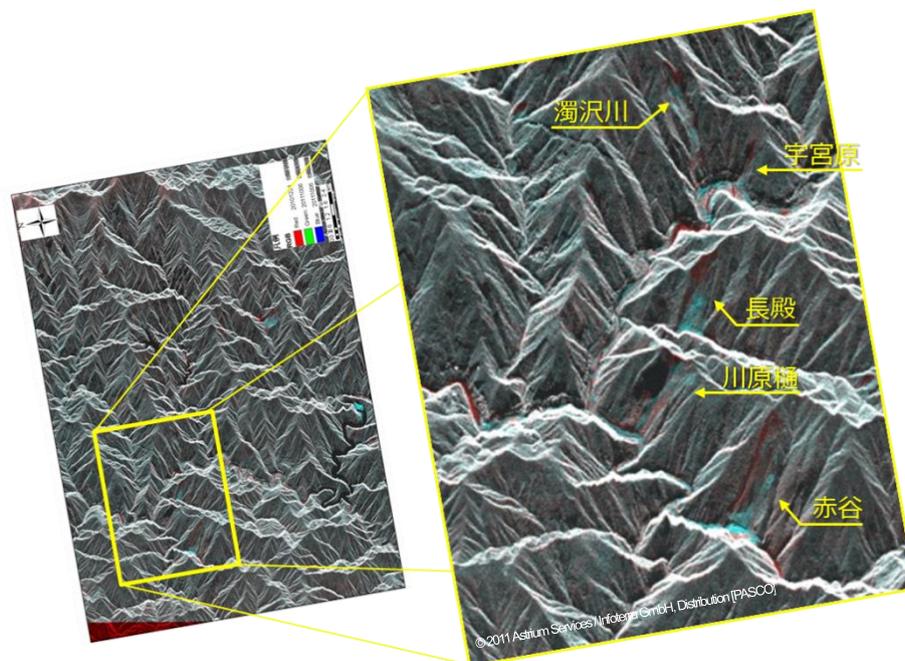


図 2.5.3 災害前後の SAR 画像を重ね合わせたスタック画像<sup>1)</sup>

Fig. 2.5.3 Stack image made by superimposing SAR images taken before and after the disaster

## 2. 5. 6 画像判読の順序

河道閉塞箇所判読・抽出を行う際には、第1ステップとして広域の概査判読を行い、全体の概要と特に大規模な崩壊地の有無を把握した上で、第2ステップとして順次細部詳細判読を行う。さらに、優先すべき判読箇所として、河道閉塞・決壊に伴う被害が甚大になると予測される集落の上流や、満水し越水までの時間が短いと予想される集水面積が大きい本川沿いを優先的に確認する。次に主要支川、支溪レベルへと順次判読確認を行う（図 2.5.4）。

### 【予察】 SAR 画像の撮影範囲とその位置関係等の概要把握

効率的な判読を実施するために、SAR 画像の撮影範囲とその位置関係（主要地名、ダムや道路などの主要地物）、SAR 画像特有の見え方（斜面の倒れ込み具合、谷の見え方、河川・道路の見え方）について確認する。

### 【概査】 本川河道及び主要集落上流域の判読

短時間で満水となり重大な二次災害を引き起こす可能性が高い主要河道の本川沿いや主要な集落の上流域について、優先的に判読する（図 2.5.4 の優先度①）。

### 【精査】 概査抽出箇所の詳細判読及び支川等の細部判読

概査により抽出した箇所の細部（湛水の有無、崩壊内部の構造、滞筋や道路の寸断）を詳細に判読する。次に主要支川、支溪レベルへと順次細部まで判読し、全域を把握する（図 2.5.4 の優先度②、③）。

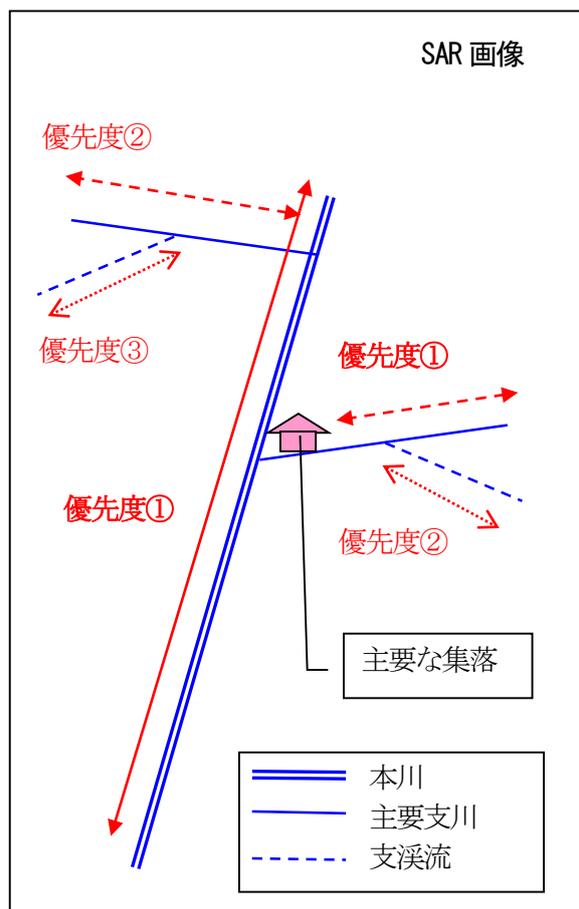


図 2.5.4 画像判読の優先度イメージ図<sup>1)</sup>

Fig. 2.5.4 Concepts of priority of image interpretation

## 2. 5. 7 SAR 画像の入手に必要な時間

衛星 SAR 画像を有効に活用するためには、航空機画像より早く、衛星 SAR 画像が入手できる必要があるが、衛星 SAR 画像の撮影発注から撮影までに要する時間、及び撮影から判読用画像の作成に要する時間が、衛星毎に異なる点に留意する必要がある。画像撮影発注から画像入手（判読開始前）までに必要な時間は、最短で海外 SAR 衛星では約 15 時間～数十時間、日本の ALOS-2 では 2 時間程度を要する。そして、衛星軌道位置から決まる各地球観測衛星の撮影頻度は、約 12 時間に 1 回～4 日に 1 回程度までである。これらについて確認し、SAR 画像が必要となった時点の軌道位置から最も早く必要な観測範囲の良好な条件の画像が入手できる地球観測衛星を迅速に選定する必要がある。

## 2. 6 本章のまとめ

本章では、2011年台風12号紀伊半島大水害を事例として、夜間や悪天候時でも地表の状態を観測可能な高分解能単偏波 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所探索手法を検討した。そして、この研究成果をとりまとめて、国土技術政策総合研究所資料<sup>1)</sup>として公表した。

本章で得られた成果を以下に列記する。

### (1) 河道閉塞探索時の単偏波 SAR 緊急観測画像の基本仕様を次のとおり明確化した。

- ・ バンドの違い

単偏波画像では、Cバンド、Xバンドの違いによる明瞭な視認性の差は生じない。

- ・ 分解能

単偏波 SAR 画像で大規模崩壊および河道閉塞を抽出するためには、3m 程度より高い分解能が望ましい。その場合、判読可能な崩壊規模は、概ね平面投影面積 2ha 以上である。ただし、平面投影面積 2ha 以上の規模であっても、レイオーバやシャドウによる不可視領域や湛水域（鏡面反射）の識別が困難な場合は見逃し易いことに留意を要する。

- ・ 観測幅

2011年台風12号による紀伊半島大水害では、17箇所の河道閉塞箇所が広域に分布しており、使用した SAR 画像は観測幅 30km であったが、6箇所の河道閉塞箇所が画像エリア外で発生し判読できなかった。観測幅はより広い方が見逃しの可能性が少なくなり望ましいが、現在運用中の SAR 衛星の撮影モードと分解能（推奨 3m 分解能）を考慮し、概ね 20km 以上の観測幅は最低必要であると考えられる。

- ・ 入射角

SAR 画像の入射角は、小さくなるとレイオーバ、大きくなるとシャドウとなり、抽出精度に影響を及ぼすことから、一定程度の入射角を確保する必要がある。これらを踏まえ、入射角は 35～45° 程度を推奨する。

- ・ 照射方向

SAR 画像は、照射方向と斜面方位や斜面の傾斜角度の関係により、レイオーバやレーダーシャドウ等が生じて抽出率が落ち、2011年台風12号の河道閉塞抽出の事例においては、照射方向が片側だけの SAR 画像では、50～70%程度の抽出率であった。東西両側からの画像を用いれば抽出率は約 90%に向上した。

### (2) 単偏波 SAR 画像判読を用いた河道閉塞探索の標準的な判読基準を作成。

単偏波 SAR 画像判読を用いた河道閉塞探索の際の重要な着眼点を標準的な判読基準としてとりまとめ、判読チェックリスト（表 2.5.1）を作成した。

### (3) 河道閉塞探索時の効率的な SAR 画像判読のため、次の留意事項を明確化した。

- ・ グランドレンジ画像による判読

グランドレンジ画像の位置精度は正確さに欠けるが、いわば鳥瞰図や斜め写真のようなイメージで地物が撮影されるため、直感的な判読が容易である。

- ・ 判読時の SAR 画像の正立配置

SAR 画像にはレーダ照射方向に伴う方向依存性があるため、立体感を持って正確に判読するには、

「SAR 画像の照射方向が上」となるように、画像が正立するように回転させると判読しやすい。

- ・ スタック画像の利用

緊急撮影されたものと同じ仕様（衛星名、モード、軌道、入射角など）の SAR 画像のアーカイブ画像（災害発生前）がある場合は、画像を重ね合わせたスタック画像を作ると判読効率・精度の向上が期待できる。

- ・ 画像判読の順序

優先すべき判読箇所として、河道閉塞・決壊に伴う被害が甚大になると予測される集落の上流や、満水し越水までの時間が短いと予想される集水面積が大きい本川沿いを優先的に確認する。次に主要支川、支溪レベルへと順次判読確認を行う。

### 【引用文献】

- 1) 水野正樹、神山嬢子、江川真史、佐藤匠、蒲原潤一、林真一郎 (2013) : 単偏波の高分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所判読調査手法 (案)、国土技術政策総合研究所資料、第 760 号、2013
- 2) 林真一郎、岡本敦、水野正樹、佐藤匠、山越隆雄、中野陽子、吉川知弘、横田浩、野田敦夫、吉川和男 (2012) : 高分解能 SAR 衛星画像を用いた台風 12 号災害での河道閉塞箇所の推定、平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集、R3-21、pp.186-187
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部 (2011) : 平成 23 年 9 月 13 日記者発表 台風 12 号豪雨に伴う河道閉塞箇所数について
- 4) 磯貝尚弘 (2012) : 台風 12 号による崩壊地総括表、土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム、2012.8.31
- 5) 鶴殿俊昭、吉川和男、野田敦夫、林真一郎、水野正樹、佐藤匠、岡本敦 (2012) : 高分解能 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所抽出手法の検討、平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集、R3-22、pp.188-189
- 6) 水野正樹、神山嬢子、佐藤匠、林真一郎、岡本敦 (2012) : 衛星 SAR 画像による大規模崩壊の緊急判読調査手法の実用化、土木技術資料、土木研究センター、Vol.54、No.10、pp.6-9
- 7) 林真一郎、水野正樹、佐藤匠、神山嬢子、岡本敦、吉川知弘、鶴殿俊昭、横田浩、野田敦夫、吉川和男 (2013) : 紀伊半島台風 12 号災害を事例とした人工衛星高分解能 SAR 画像の判読による河道閉塞箇所探索手法の確立、砂防学会誌、Vol.66、No.3、pp.32-39

### 第3章 多偏波 SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞箇所の緊急判読調査手法

#### 3. 1 研究概要

地震や豪雨等により、天然ダム形成につながる異常現象が広域的に発生した場合、天然ダム形成の有無と規模をより迅速に把握し、決壊等による二次災害を防止する必要がある。ヘリコプターによる目視調査が困難な夜間や悪天候時の場合、前章の検討の結果により、国土交通省では、衛星による高分解能単偏波 SAR 画像を用いた緊急判読の実施を想定している<sup>1)</sup>。しかし、単偏波 SAR 画像は、災害前後画像を重ね合わせたスタック画像を作成しないとモノクロ画像のため視認性が低く、崩壊地の判読見逃しが課題であった<sup>2)</sup>。

本章では、地表面の状況に応じて反射強度が異なる多偏波 SAR に着目して、大規模崩壊地の発生状況をより迅速に把握する目的で崩壊地判読に利用するための検討を実施した。検討対象は、2011 年台風 12 号により大規模崩壊及び河道閉塞が多数発生したエリアとし、多偏波 SAR 画像による判読を試みた。

#### 3. 2 視認性の評価方法

##### 3. 2. 1 偏波の仕組みと見え方の特徴

SAR 観測で用いる偏波は、水平偏波（振幅が進行方向に対して水平：H）と垂直偏波（振幅が進行方向に対して垂直：V）に分類され、送受信の組み合わせで HH、HV、VH、VV と表現される（図 3.2.1）。それぞれの偏波は地表面の状況によって後方散乱の特性が異なり、裸地では HH 及び VV が卓越し、森林では HV 及び VH が卓越する。

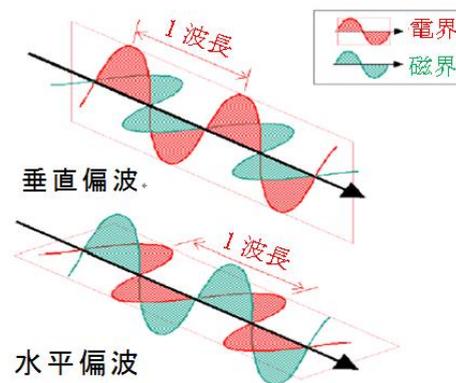


図 3.2.1 水平偏波、垂直偏波の概念図<sup>3)</sup>

Fig. 3.2.1 Concepts of horizontal polarization and vertical polarization

(出典：リモートセンシング技術研修テキスト「マイクロ波リモートセンシング」3-2 SAR 画像の特徴 ポラリメトリ (RESTEC 製作・編集) より)

### 3. 2. 2 評価に用いた多偏波 SAR 画像の種類

評価に用いた SAR 画像は、各偏波データをもとに画像処理した以下の 7 種類である。ここで、R、G、B とは、Red、Green、Blue の光の 3 原色に各偏波画像等を割り当ててカラー画像化することを示す。

- ・単偏波画像 (HH、HV、VH、VV の計 4 種類) (比較対象となる手法)
- ・HH+HV 単純合成画像 (R : HH、G : HV、B : HH)
- ・HH+VV 単純合成画像 (R : HH、G : VV、B : HH)
- ・HH+HV+VV 単純合成画像 (R : HH、G : HV、B : VV)

### 3. 2. 3 視認性評価方法

評価方法は、図 3.2.2 に示すとおりである。始めに作成した多偏波 SAR 画像の視認性を確認して (一次評価)、二次評価に用いる画像を選定した。そして、2011 年 紀伊半島大水害による大規模崩壊及び河道閉塞箇所 (10 箇所) を対象に、後述するチェックリストを用いて判読を行い、大規模崩壊の緊急判読における適用方法を明確化した (二次評価)。

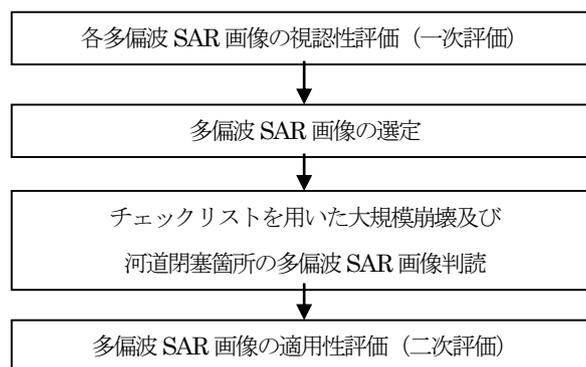


図 3.2.2 視認性評価の手順

Fig. 3.2.2 Visibility evaluation procedure

## 3. 3 評価結果

### 3. 3. 1 各多偏波 SAR 画像の視認性評価 (一次評価)

作成した各多偏波 SAR 画像の視認性を確認して、多偏波 SAR 画像の一次評価を行った。画像の対象範囲は、2011 年 紀伊半島大水害において深層崩壊および河道閉塞が集中して発生した地域とした (図 3.3.1)。なお、HH、HV、VH、VV の各偏波画像を図 3.3.2 に示す。

多偏波の単純合成画像である HH+HV、HH+VV、HH+HV+VV の 3 つの画像 (図 3.3.3) のうち、HH+HV と HH+HV+VV が、植生に覆われた山腹が緑色、裸地や集落が赤紫色に着色され、崩壊地 (裸地) を明瞭に色で判別でき、崩壊地が判別し易いと評価できる。そして、単純な画像合成のため、単偏波画像利用時と比べて、合成処理に数分程度時間を要するだけで作成可能である。

以上より、HH+HV 単純合成画像、HH+HV+VV 単純合成画像が、ほぼ同様の高い視認性と評価した。

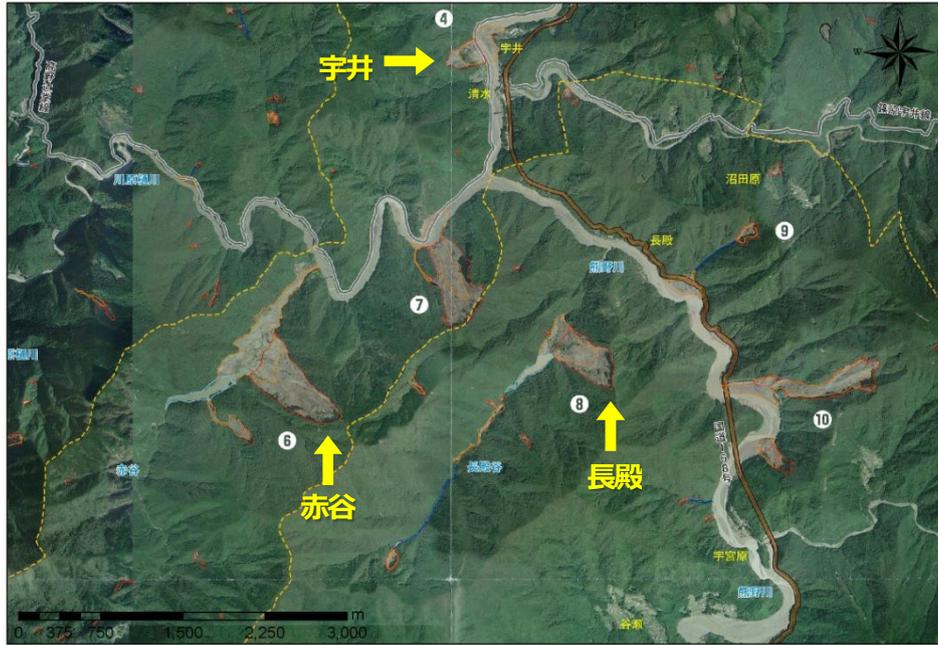


図 3.3.1 紀伊半島大水害時の深層崩壊および河道閉塞発生状況

Fig. 3.3.1 View of deep-seated landslides and of blockage of river courses after the Kii Peninsula floor disaster

(出典： H23 紀伊半島大水害大規模土砂災害の記録<sup>4)</sup>、奈良県砂防課)

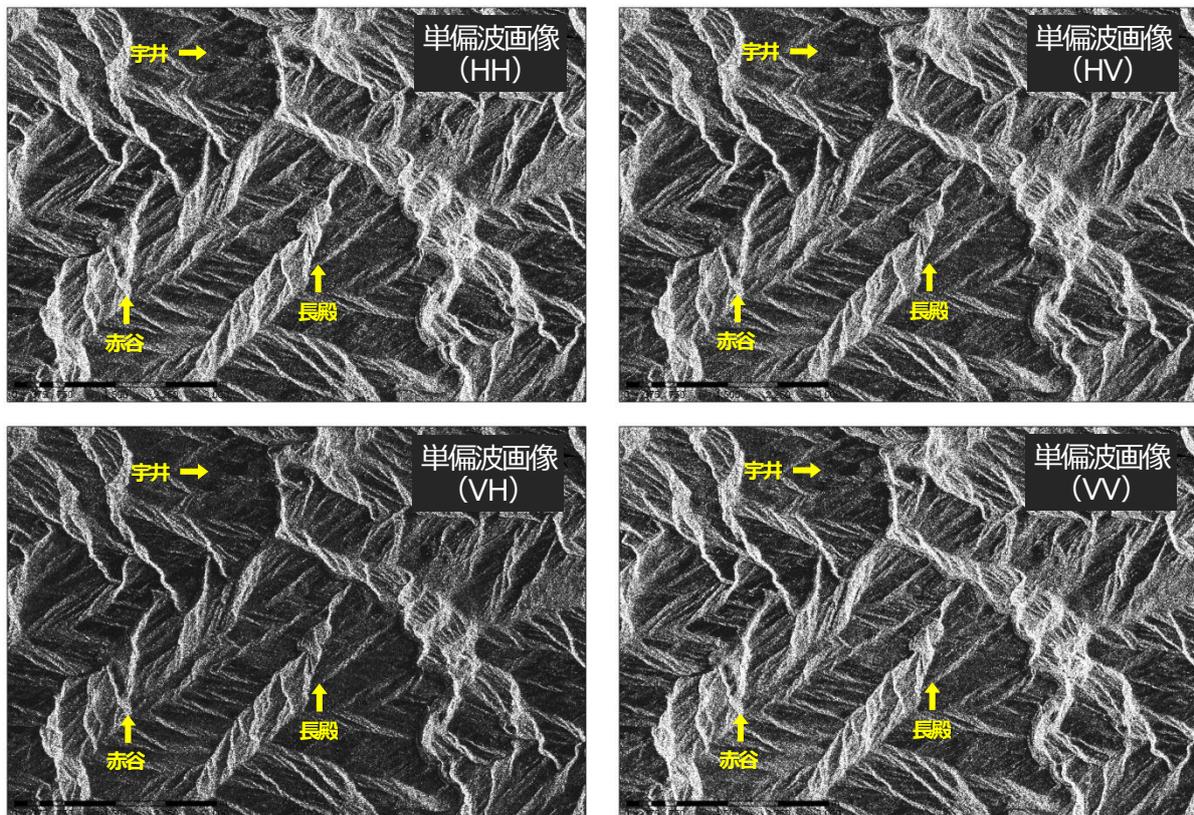


図 3.3.2 単偏波 SAR 画像<sup>5)</sup>

Fig. 3.3.2 Single-polarization SAR images

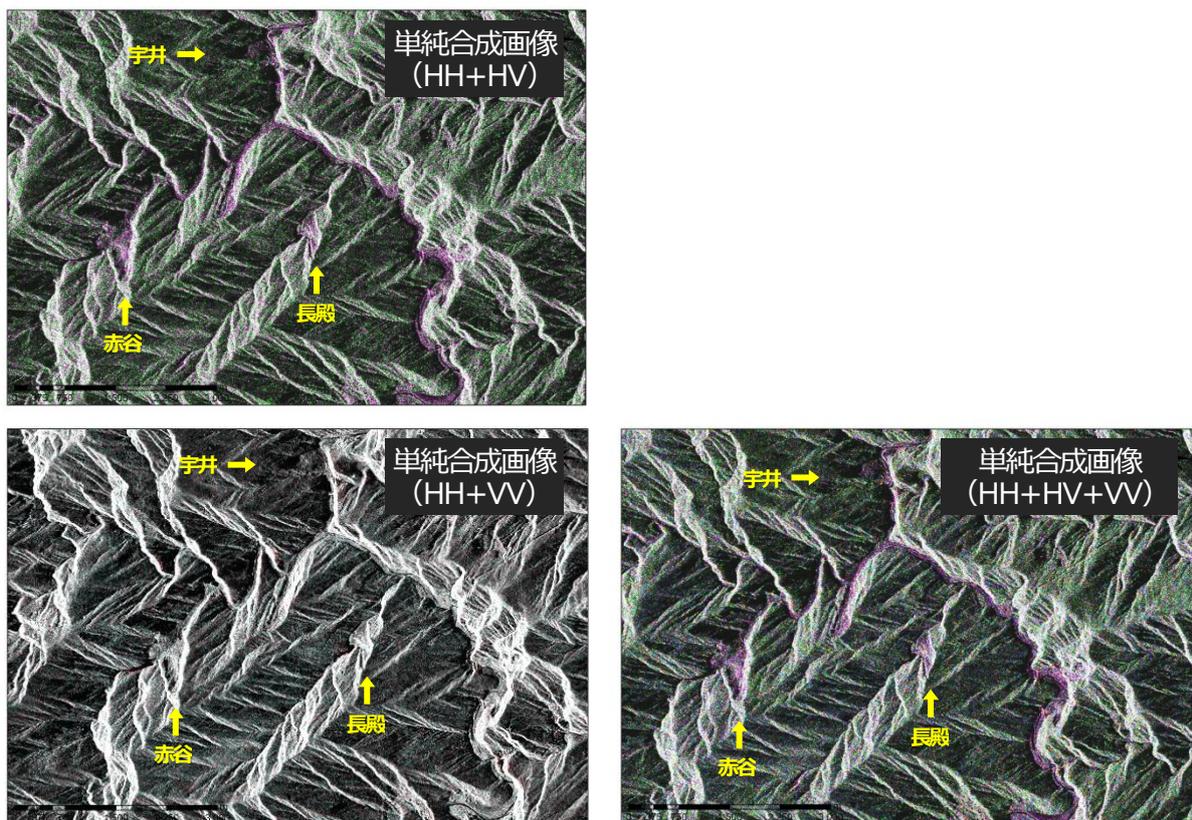


図 3.3.3 視認性を比較した多偏波 SAR 画像<sup>5)</sup>

Fig. 3.3.3 Multi-polarization SAR image for comparing visibility

※図 3.3.2、図 3.3.3 に利用した SAR 画像情報

利用衛星	RADARSAT-2
軌道方向	Ascending
観測日	2012/08/06
バンド・分解能	Cバンド・8m
入射角	39.6°
クレジット	RADARSAT-2 Data and Products © MacDONALD, DETTWILER AND ASSOCIATES LTD. (2012) - All Rights Reserved RADARSAT is an official mark of the Canadian

### 3.3.2 二次評価対象の多偏波 SAR 画像

一次評価で同様に高い視認性が得られた 2 種の多偏波 SAR 画像の中では、少ない利用偏波数から対象衛星数（撮像頻度）がより多く、かつ短時間で画像作成が可能な、HH+HV 単純合成画像が最も有効と考えられる。以降、HH+HV 単純合成画像について、大規模崩壊・河道閉塞箇所の判読方法を検討し、視認性を検証した。

### 3. 3. 3 2 偏波 SAR 画像の判読チェックリスト

従来手法の単偏波画像の場合は、水部で後方散乱強度が弱く画像が黒く表現されることを利用して、主に湛水池の発生に着目して判読を行うが、崩壊裸地と植生の判別は困難である。これに対し2偏波 SAR 画像では、裸地と植生の判別視認性が向上するため、湛水池に加えて崩壊地に着目した判読が可能となった。これらの特徴を踏まえて、2偏波 SAR 画像判読用チェックリスト(表 3.3.1)を作成した。

表 3.3.1 HH+HV 単純合成画像(2偏波 SAR 画像)判読用チェックリスト<sup>5)</sup>

Table 3.3.1 Interpretation checklist (HH+HV Dual-polarization SAR image)

箇所番号	所在地・名称・座標	判断基準		評価
確認範囲	チェック項目			
崩壊地	裸地	<ul style="list-style-type: none"> <li>多偏波画像で赤紫色の裸地を呈するか</li> <li>斜面に位置するか(平坦地や緩斜面の集落、河道ではないか)</li> </ul>		
	滑落崖	<ul style="list-style-type: none"> <li>湛水域周辺に滑落崖が確認できるか</li> <li>滑落崖周辺に段差によるシャドウ・レイオーバーは確認できるか</li> <li>滑落崖の形状は斜面方向に対し円弧状となっているか 等</li> </ul>		
	崩壊地内	<ul style="list-style-type: none"> <li>滑落崖の下に崩壊形状は確認できるか</li> <li>崩壊形状は斜面方向と整合しているか 等</li> </ul>		
	崩積土砂 (河道閉塞部)	<ul style="list-style-type: none"> <li>崩壊地内から下部にかけて崩積土は確認できるか</li> <li>崩積土の形状は舌状になっているか</li> <li>崩積土の到達範囲は地形形状と整合しているか</li> <li>河道閉塞部は谷を埋積する形状となっているか</li> <li>河道閉塞部の上流に湛水域は形成されているか</li> <li>崩積土上に倒木等の形状は確認されるか 等</li> </ul>		
	崩壊規模	<ul style="list-style-type: none"> <li>河道閉塞が発生する程度の崩壊規模か</li> </ul>		
土石流 痕跡	流下痕跡	<ul style="list-style-type: none"> <li>崩壊地下部から流送部が見られるか</li> <li>河道の拡幅、植生の流出等による土石流の流下痕跡が見られるか</li> </ul>		
	土石流堆積物	<ul style="list-style-type: none"> <li>土石流の堆積地(土石流段丘、沖積錐)が見られるか</li> </ul>		
周辺地形	斜面勾配	<ul style="list-style-type: none"> <li>湛水域近傍に斜面は存在するか</li> <li>周辺斜面は崩壊地が発生する程度の急勾配斜面か 等</li> </ul>		
相対的 位置関係	上下関係等	<ul style="list-style-type: none"> <li>滑落崖、崩積土、湛水域等の位置関係に不自然さはないか</li> <li>崩積土の到達範囲は地形と整合しているか 等</li> </ul>		
河道	湛水域	<ul style="list-style-type: none"> <li>湛水域と想定される暗い領域が確認されるか</li> <li>上下流の滞筋幅と比べ不自然な幅となっているか</li> <li>ダム、取水堰等の人工構造物による湛水ではないか</li> </ul>		
判 定	崩壊跡地、露岩地			
	新規崩壊	表層崩壊		
		大規模崩壊	深層崩壊	
			河道閉塞	
	土石流痕跡			
コメント/備考				

【評価】

○：形状が読み取れる。「ある」と言える。該当する。  
 △：「ある」ように見えるが不明瞭。不明瞭だが該当する。

×：形状が読み取れない。「ない」といえる。該当しない。  
 -：「ある」とも「ない」とも判断できない。わからない。

### 3. 3. 4 2 偏波 SAR 画像の適用性評価（二次評価）

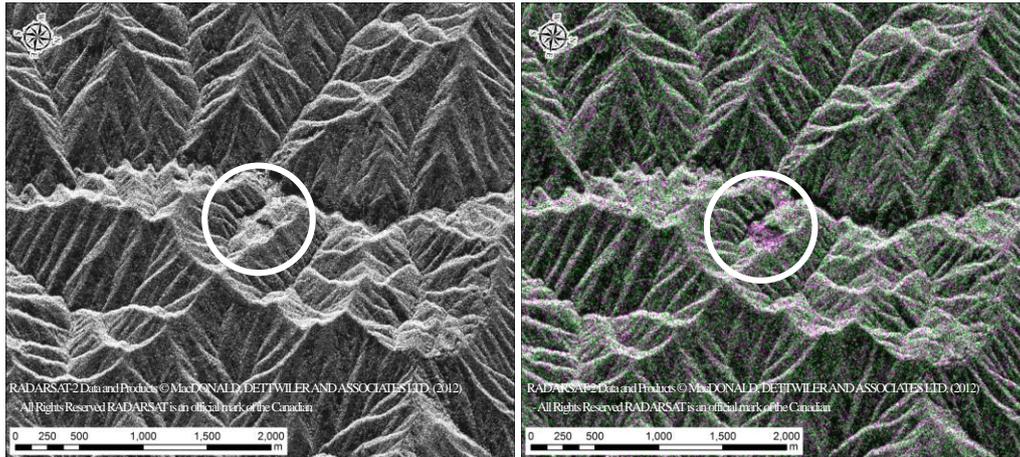
表 3.3.1 の判読チェックリストにより 2 つの人工衛星の HH+HV 単純合成画像の 2 偏波 SAR 画像を用いて大規模崩壊及び河道閉塞箇所 (10 箇所) の判読を行った。また、同一エリアで単偏波画像 HH (比較対象となる手法) による判読を行い、HH+HV 単純合成画像と単偏波画像の判読結果とを比較して視認性を評価した (表 3.3.2)。なお、それぞれ軌道や入射角、分解能が概ね同じ画像で 2 つの手法の比較を行った (表 3.3.2 の画像 No.1 と No.3、No.2 と No.4)。この検討に用いた画像のエリアでは、単偏波よりも 2 偏波で視認「可」と判断した割合が高く、この判読で用いた分解能 8m 程度以上の高分解能な 2 偏波 SAR 画像では、視認性がより良くなる結果が得られた。多偏波 SAR 画像は、カラー合成画像となり、大規模崩壊地や土石流痕跡の視認性が向上するためと考えられる (図 3.3.4 参照)。よって、本章で検討した HH+HV 単純合成画像は、視認性の向上に加え、少ない偏波数で対象衛星数が多く、短時間で画像作成できる利点を踏まえると、非常時の緊急判読において十分適用可能である。

表 3.3.2 単偏波画像と HH+HV 単純合成画像の視認性比較<sup>5)</sup>

Table 3.3.2 Comparison of visibility of single-polarization images and HH+HV simply-composite images

画像の仕様					単偏波 SAR 画像		2 偏波 SAR 画像	
画像 No					No.1	No.2	No.3	No.4
SAR 衛星名					RADARSAT-2	TerraSAR-X	RADARSAT-2	TerraSAR-X
撮影日					2012/8/6	2011/10/6	2012/8/6	2012/4/21
軌道					北行軌道	南行軌道	北行軌道	南行軌道
照射方向					東向き	西向き	東向き	西向き
分解能					8m	3m	8m	6m
入射角					39.6°	37.0°	39.6°	37.8°
偏波					HH	HH	HH、HV	HH、HV
表示					モノクロ画像	モノクロ画像	単純合成画像 R:HH、G:HV、 B:HH	単純合成画像 R:HH、 G:HV、B:HH
箇所 No	箇所名	面積 <sup>6)</sup>	方位	勾配	判 読 結 果			
①	坪内	2.3ha	南東	32°	×	×	(△)	×
②	坪内	7.4ha	東	31°	△	×	(△)	(△)
③	坪内	3.6ha	北西	33°	×	○	(△)	(△)
④	宇井	6.5ha	北東	38°	○	×	(△)	×
⑤	長殿	19.1ha	北西	37°	×	○	○	○
⑥	赤谷	32.6ha	北西	37°	○	○	○	○
⑦	栗平	37.0ha	北	35°	○	○	○	○
⑧	野尻	14.0ha	北西	36°	×	△	画像範囲外	△
⑩	桧股	1.2ha	西	36°	×	画像範囲外	△	画像範囲外
⑭	北股	5.4ha	南西	35°	×	画像範囲外	△	画像範囲外
集計		①対象数			10	8	9	8
		②○			3	4	3	3
		③△			1	1	6	3
		④×			6	3	0	2
視認可の割合 (②+③) / ①					40%	63%	100%	75%
備 考					(△) は湛水域が確認できれば○ (災害直後の画像であれば○と予測)			

○：形状が読み取れる。「ある」と言える。該当する。  
 △：「ある」ように見えるが不明瞭。不明瞭だが該当する。  
 ×：形状が読み取れない。「ない」といえる。該当しない。  
 -：「ある」とも「ない」とも判断できない。わからない。



左：画像番号 No.1、単偏波画像（HH、分解能 8m）

右：画像番号 No.3、2 偏波画像（HH+HV 単純合成画像、分解能 8m）

図 3.3.4 単偏波 SAR 画像では抽出が困難な崩壊地（2011 年崩壊地 北股）<sup>5)</sup>

Fig. 3.3.4 Collapsed grounds difficult to detect with single polarization SAR image

### 3. 3. 5 2 偏波 SAR 画像による緊急判読調査手法

HH+HV 単純合成画像（2 偏波 SAR 画像）の視認性を活かし、判読チェックリストを用いた大規模土砂災害時の判読ステップを図 3.3.5 にまとめた。また、2 偏波 SAR 画像を今後利用するにあたっての利点や留意点等を以下に整理した。

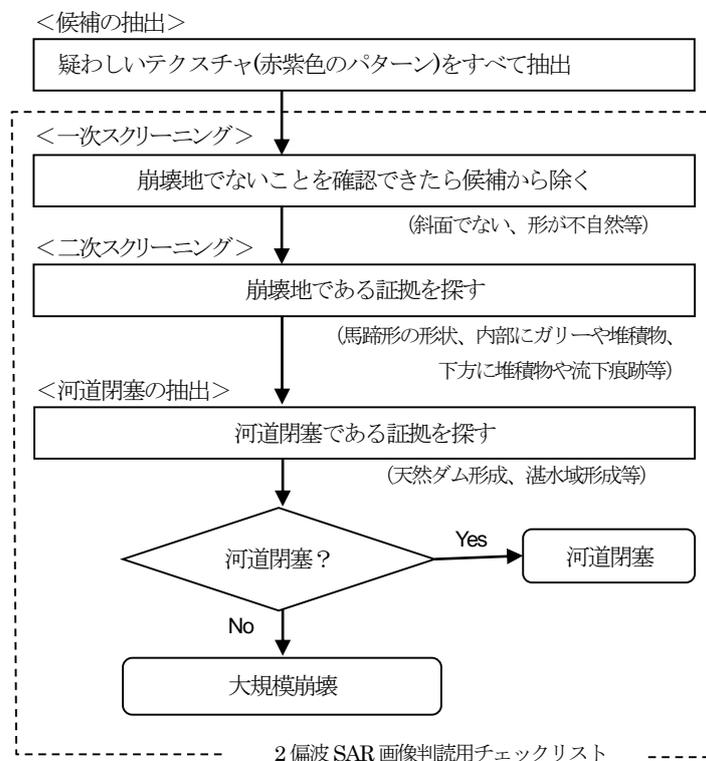


図 3.3.5 災害時の判読ステップ<sup>5)</sup>

Fig. 3.3.5 Interpretation procedure on landslide disasters

### (1) 分解能について

2 偏波での撮影は、単偏波と比較して分解能は低下するが、分解能 8m 程度よりも高分解能であれば、カラー合成画像を作成することで崩壊地の視認性がより向上する。

### (2) 撮影範囲について

2 偏波モードでの衛星 SAR 撮影は、単偏波と比較して、衛星性能から撮影幅が約半分となる場合がある。広域災害の場合、一回の撮影で被災範囲をカバーしきれない恐れがあることに留意して、撮影計画を立案する必要がある。

### (3) 作業時間について

HH+HV 単純合成画像は、単偏波画像と比較して、画像合成処理に 10 分程度の追加時間を要するが、視認性向上により判読作業及び画像合成含む作業全体の時間短縮が期待される。

### (4) 視認性について

2 偏波 SAR 画像は、裸地の判読視認性向上により、単偏波では判読困難であった土石流痕跡や表層崩壊、伐採跡地等を判別できる可能性がある。さらに、SAR 画像特性のフォアショートニング等により地形が歪んでみえる範囲でも判読できる可能性がある。ただし、2 偏波 SAR 画像は、単偏波画像と同様に、SAR 画像の性質上、照射方向と斜面方向の関係による影響（フォアショートニング、レイオーバー、シャドウ）が生ずるエリア又は湛水域が無い時に、崩壊地の判別が困難な場合があるため、東西両方向からの撮影が望ましい。

## 3. 4 本章のまとめ

本章では、多偏波 SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞箇所の緊急判読調査手法を確立するため、2011 年台風 12 号紀伊半島大水害を事例として検討した。今後、SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞箇所の緊急判読調査には、HH+HV 単純合成画像の 2 偏波 SAR 画像の使用がより有効である。

本章で得られた成果を以下に列記する。

(1) 河道閉塞探索時の 2 偏波 SAR 緊急観測画像の基本仕様を次のとおり明確化した。

- ・ 判読に適する SAR 画像として「HH+HV 単純合成画像」を選定

視認性が高く、少ない偏波数（対象衛星が多い）で画像化でき、かつ処理時間が短いことから、2 偏波を利用した HH+HV 単純合成画像（R : HH、G : HV、B : HH）が最も有効と判断した。HH+HV 単純合成画像の 2 偏波 SAR 画像は、裸地の判読視認性向上により、単偏波では判読困難であった土石流痕跡や表層崩壊、伐採跡地等を判別できる可能性がある。さらに、SAR 画像特性のフォアショートニング等により地形が歪んでみえる範囲でも判読できる可能性がある。

- ・ 分解能について

分解能 8m 程度よりも高分解能な HH+HV 単純合成画像は、単偏波 SAR 分解能 3m と比較して、崩壊地の視認性がより向上する。

(2) 2 偏波 SAR 画像判読を用いた河道閉塞探索の標準的な判読基準を作成。

HH+HV 単純合成画像の 2 偏波 SAR 画像判読を用いた河道閉塞探索の際の重要な着眼点を標準的な判読基準としてとりまとめ、判読チェックリスト (表 3.3.1) を作成した。

なお、この研究成果をとりまとめて、国土技術政策総合研究所資料<sup>7)</sup>として公表し、国の土砂災害防止法の対応の一部として実際の土砂災害時に用いられている。

### 【引用文献】

- 1) 鶴殿俊昭、林真一郎、水野正樹、佐藤匠、岡本敦、吉川和男、野田敦夫 (2012) : 高分解能 SAR 衛星画像を用いた河道閉塞箇所抽出手法の検討、平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集、pp.188～189
- 2) 佐藤匠 (2012) : 高分解能 SAR 衛星による大規模土砂災害監視体制の推進、第 4 回 ALOS-2/3 ワークショップ
- 3) 一般財団法人リモート・センシング技術センター : リモートセンシング技術研修テキスト「マイクロ波リモートセンシング」3-2 SAR 画像の特徴 ポラリメトリ
- 4) 奈良県砂防課 (2012) : H23 紀伊半島大水害大規模土砂災害の記録、2012.4
- 5) 水野正樹、江川真史、神山嬢子、佐藤匠、蒲原潤一 (2013) : 衛星多偏波 SAR 画像による大規模崩壊の緊急判読調査手法、土木技術資料、Vol.55、No.11、pp.35-38
- 6) 磯貝尚弘 (2012) : 台風 12 号による崩壊地総括表、土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム、2012.8.31
- 7) 水野正樹、神山嬢子、江川真史、佐藤匠、蒲原潤一 (2014) : 2 偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法 (案)、国土技術政策総合研究所資料、第 791 号

## 第4章 衛星 SAR 画像判読の海外の天然ダム災害への適用事例

—インドネシア国アンボン島の天然ダム発生・決壊における緊急対応—

### 4. 1 概要

第2章、第3章では、単偏波 SAR 画像と2偏波 SAR 画像の判読を用いた緊急時の河道閉塞や大規模崩壊地の探索抽出手法について述べてきた。ここまで述べたように、被災エリアが、夜間又は悪天候時の山間地災害、広域災害、海外災害の場合は、夜間あるいは悪天候にかかわらず広域に撮影が可能な人工衛星高分解能 SAR 画像を使った状況把握は非常に有効な手段となる。本章では、これらの SAR 画像判読手法を用いて、実際に海外災害の対応を実施した事例について述べる。

インドネシア共和国のアンボン島で2013年7月に発生した大規模な天然ダムの決壊災害の際には、国土交通省国土技術政策総合研究所の担当者として筆者が、天然ダムの形成・決壊を高分解能衛星 SAR 画像で緊急に観測し捉えた。そして、これらの SAR 画像と衛星ステレオペア画像解析から作成した DEM 等を用いて決壊状況を推定し<sup>1)</sup>、国土交通省砂防部へ伝達した。そして日本国政府からいち早くインドネシア政府に情報を提供<sup>3)</sup>した。本件において筆者は、高分解能衛星 SAR 画像の撮影から、国土交通省砂防部への伝達までを担当した。この事例は、海外の土砂災害緊急対応時の日本国政府の海外技術支援として高分解能 SAR 画像判読を用いた事例である。

### 4. 2 災害経過

2012年7月13日にインドネシア共和国マルク州 Ambon 島 Way Ela River 右岸において深層崩壊が発生、崩壊土砂により大規模な天然ダムが形成された。そして、この天然ダムは、徐々に湛水水位が上がり、2013年7月24日の豪雨の後に、天然ダムより越流が始まり、翌7月25日午前10時半頃に決壊した。インドネシア国家防災庁の発表や現地報道によると決壊により、水深6~7mの土石流が集落を襲い、470戸以上の家屋、学校やモスク等の主要施設に被害が及んだが、被災集落の住民5,200名以上が避難し、死者は3名であった。

このように大規模な天然ダムの決壊であったため、国際貢献のため本災害の緊急のモニタリングを目的として、決壊直後に SAR 撮影を依頼し、決壊後(2013年7月28日)、天然ダム形成前(2011年12月23日)、形成後(2012年12月9日)の3時期の高分解能 X バンド SAR 衛星 TerraSAR-X 画像を用いて比較して状況を把握した。用いた撮影画像を図 4.2.2 に示す。また、撮像範囲を図 4.2.1 に、撮像データの諸元を表 4.2.1 に示す。これら衛星画像等を用いた判読及び解析結果は、国土交通省よりインドネシア政府に速やかに提供された。

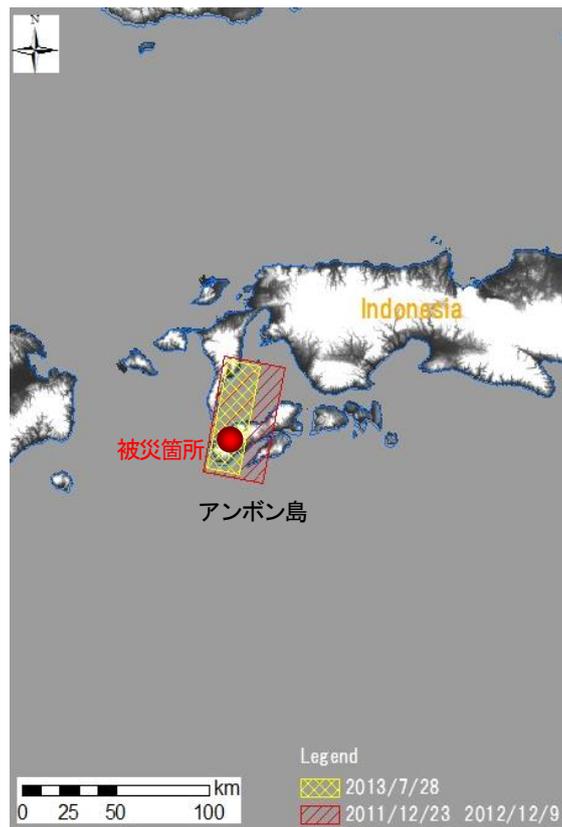
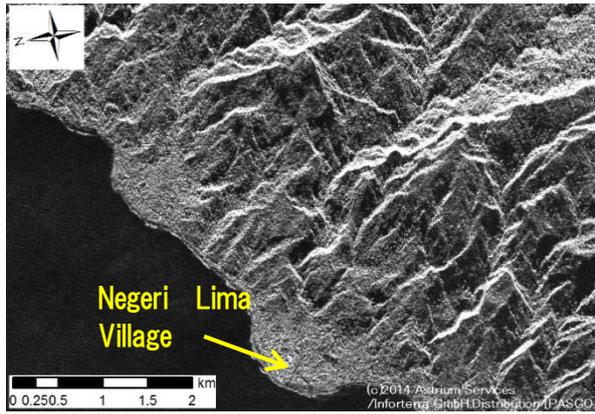


図 4.2.1 TerraSAR-X による撮影エリア  
 Fig. 4.2.1 The area captured by TerraSAR-X

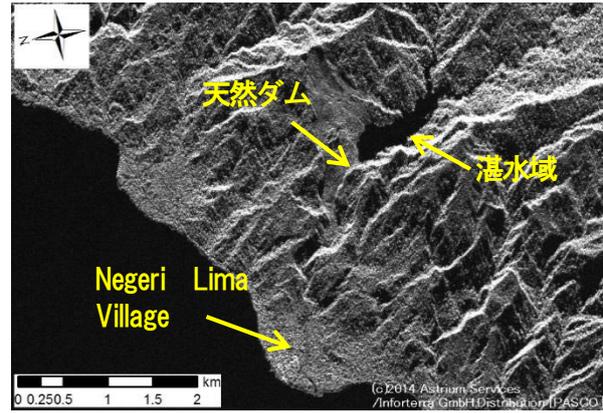
表 4.2.1 TerraSAR-X データの諸元  
 Table 4.2.1 TerraSAR-X data specification

撮影日 Date	Acq. Mode	入射角 Inc. angle	分解能 Resolution	偏波 Pol.
2011/12/23	StripMap	41°	3m	HH
2012/12/9	StripMap	41°	3m	HH
2013/7/28	StripMap	41°	6m	HH/HV



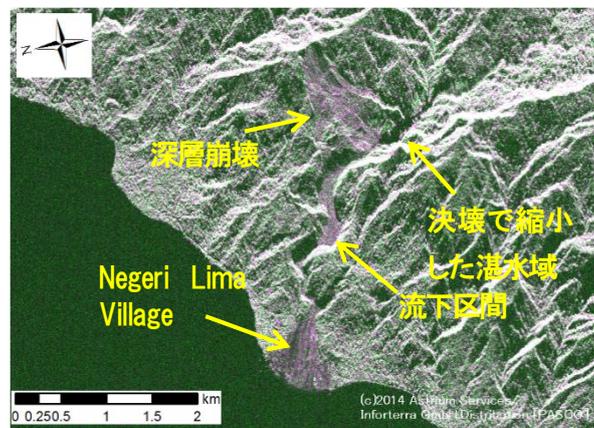
(a) 深層崩壊前 (2011/12/23)

(a) Before landslide (2011/12/23)



(b) 深層崩壊後 (2012/12/9)

(b) After landslide (2012/12/9)



(c) 天然ダム決壊後 (2013/7/28)

(c) After collapse of landslide dam (2013/7/28)

図 4.2.2 アンボンの SAR 画像 <sup>1)</sup>

Fig. 4.2.2 SAR image of Ambon

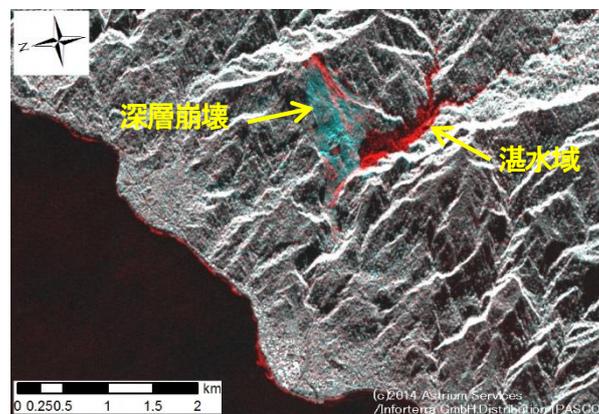


図 4.2.3 アンボンのスタッキング SAR 画像 (深層崩壊前と深層崩壊後) <sup>1)</sup>

Fig. 4.2.3 Stacking SAR image of Ambon (before-after landslide)

### 4. 3 単偏波 SAR 重ね合わせ画像による決壊状況把握

深層崩壊による天然ダム形成前後の重ね合わせ画像 (RGB 画像) を図 4.2.3 に示す。RGB の割り当ては R を 2012 年 12 月 9 日、G、B に 2011 年 12 月 23 日 (強度画像) と設定している。「湛水域」と表示されている範囲は、右岸斜面の大規模な深層崩壊により土砂が河道を閉塞して天然ダムが形成されたことにより水位が増加し、水面での反射で天然ダム形成前より後方散乱強度が低下した範囲と推定される。「深層崩壊」と表示されている範囲は、深層崩壊により地面の粗度が増加し、形成前より後方散乱強度が増大している箇所と推定される。崩壊箇所は崩壊前の画像では明瞭な尾根地形であることが判読できる。

天然ダム形成前後の重ね合わせ画像の判読結果より崩壊地は斜面頂部から発生し、上部では幅約 260m、下部では幅約 900mに及ぶと推定された。崩壊土砂は一部が下流に流下したが、ほぼ直下で停止し、天然ダム部の全長は約 900mに及ぶ。湛水域は上流約 1,700mにまで及んでおり、最大幅は 300 m以上と推定された。



図 4.3.1 アンボンの光学画像<sup>1)</sup>  
(天然ダムの決壊前)

Fig. 4.3.1 Optical image of Ambon  
(before collapse of the landslide dam)

(Photograph by the public works ministry of Indonesia)

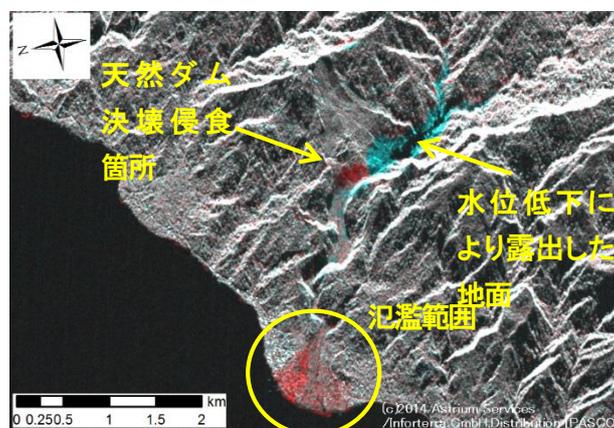


図 4.3.2 アンボンのスタッキング SAR 画像<sup>1)</sup>  
(天然ダムの決壊前と決壊後)

Fig. 4.3.2 Stacking SAR image of Ambon  
(before-after collapse of the landslide dam)

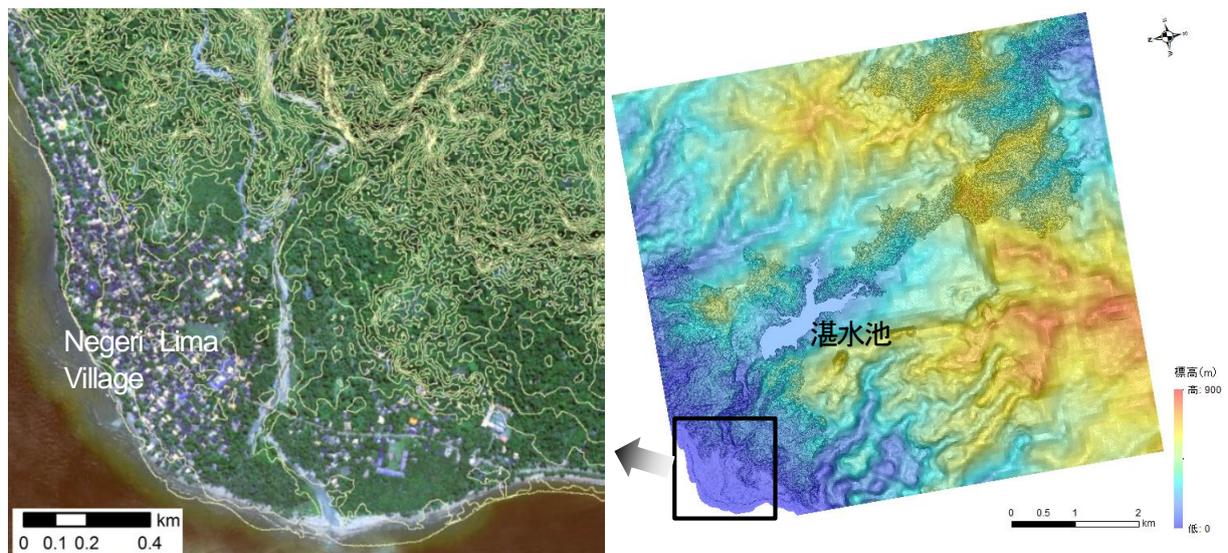
インドネシア政府が航空機により撮影した天然ダム形成後の写真を図 4.3.1 に示す。天然ダムの形成箇所は Way Ela River の下流部にあたり、天然ダム箇所から下流約 1 km で谷出口に至る。谷出口には海岸沿いに扇状地が形成されており、扇面上には多くの建物が確認できる。

天然ダム決壊前後の重ね合わせ画像を図 4.3.2 に示す。RGB の割り当ては、R を 2013 年 7 月 28 日（決壊後）、G、B を 2012 年 12 月 9 日と設定し、表示した。画像では、天然ダムの決壊箇所及び氾濫範囲が、赤く表示され、決壊前より後方散乱強度が低下した箇所を示す。天然ダムに湛水していた水が流出したことにより水位低下し地面が露出した範囲が、青く表示され、粗度が増大した箇所であり、決壊前より後方散乱強度が増大した箇所を示す。

表 4.4.1 DEM 作成に用いた高分解能光学衛星画像

Table 4.4.1 High-resolution optical satellite images used for creation of the DEM

	衛星名	解像度	撮影日	撮影角度
決壊前	WorldView-2	0.5m	2012/10/08	28.0°
	QuickBird	0.5m	2012/12/29	25.9°
	WorldView-2	0.5m	2013/02/02	5.1°
	WorldView-1	0.5m	2013/02/05	32.2°
	WorldView-1	0.5m	2013/02/08	40.7°
	WorldView-1	0.5m	2013/02/08	41.8°
	WorldView-2	0.5m	2013/02/10	18.5°



- ・等高線間隔：5m
- ・背景図：2013/2/2 撮影 WorldView-2

図 4.4.1 天然ダム形成後決壊前の 2m メッシュ DEM（下流域）<sup>1)</sup>

Fig. 4.4.1 2-m mesh DEM (downstream area) after formation but before collapse of the landslide dam

#### 4. 4 決壊後の残存天然ダムの危険度判定

天然ダム形成後、決壊前の時点で、天然ダムの形状や氾濫域を含む流域の地形を把握するため、高分解能光学衛星画像を用いたステレオ画像解析により、Way Ela River 流域の天然ダムの2m メッシュ DEM (形成後決壊前) を作成した。具体には、Way Ela River 流域は被雲の割合が多い気候のため、表 4.4.1 に示す光学画像 (決壊前 7 シーン) を用いて、複数のステレオペア画像を組み合わせて DEM を作成した。また、天然ダムによる地形変化の影響範囲外において、DEM が作成できない被雲エリアについては、主に ASTER-GDEM Ver.2 (30m メッシュ、垂直精度約 10m) で補間した。また、決壊時に氾濫域となる下流集落付近 (決壊前 DEM) については、現地での樹高調査結果を踏まえた樹高補正 (低木群の平均樹高 10m、高木群の平均樹高 15m) を実施した。作成した DEM を図 4.4.1 に示す。

天然ダムが決壊し洪水氾濫したことから、光学画像から作成した「天然ダム形成後決壊前の DEM」、及び「インドネシア政府が計測した決壊前湛水地の深淺測量結果」、及び「図 4.3.2 の決壊前後の衛星 SAR 画像」を重ね合せて、緊急に天然ダムの決壊状況把握と決壊後の残存天然ダムの高さの把握を行った。

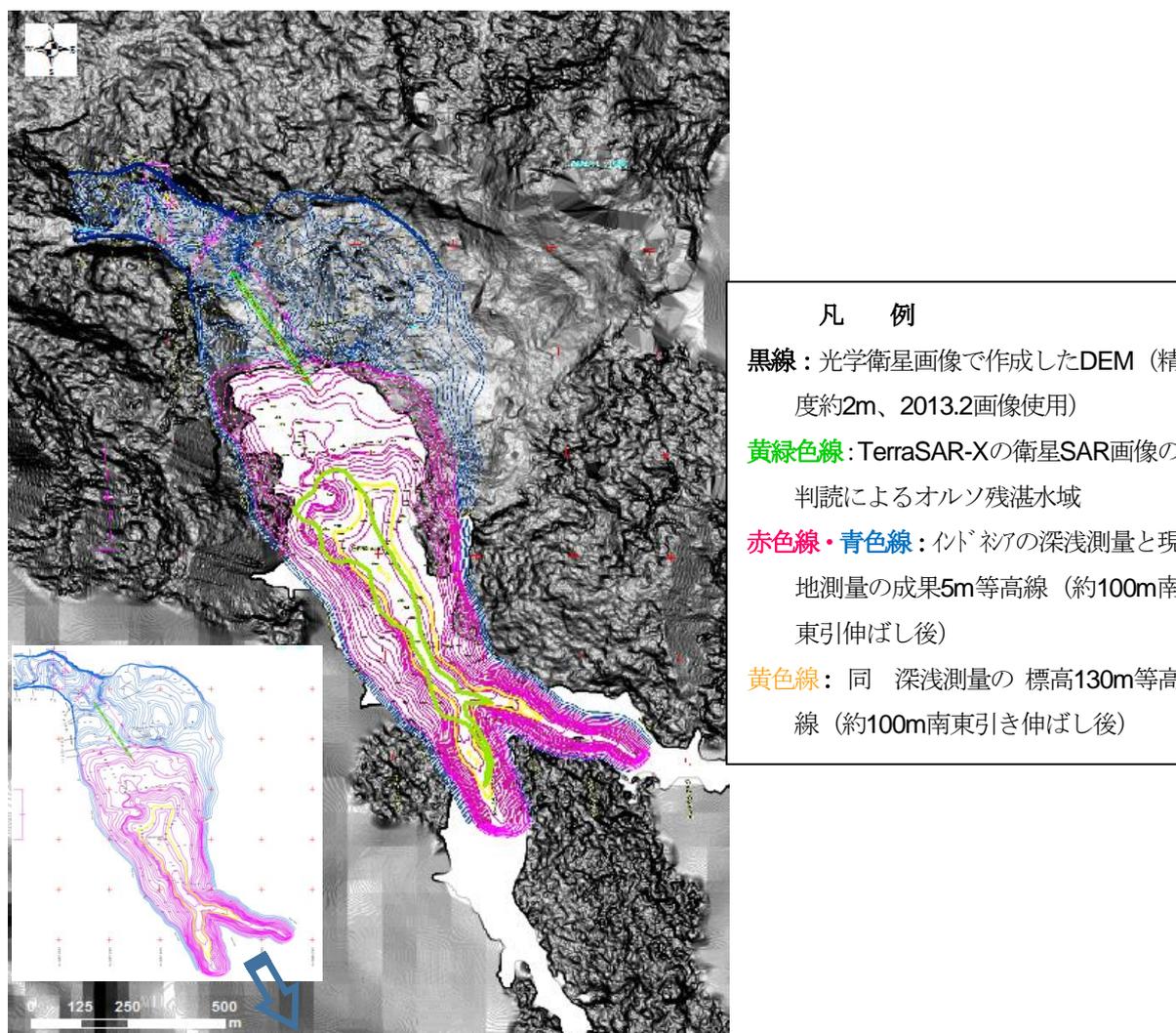


図 4.4.2 衛星画像を使った現地状況の把握

Fig. 4.4.2 Investigation of the field situation using satellite images

その結果、次のように現地の状況を推定した。

- ・ 決壊前後で家屋倒壊や立木の流出等、明瞭な変化が生じた陸地に限定した範囲の氾濫面積は、約 37 万  $m^2$  である。なお、水主体の氾濫範囲は更に広い。
- ・ 決壊前後の湛水池の形状変化を識別するため、**図 4.4.2** のとおり 3 種の画像を重ね合わせて、比較した。これらの結果から、決壊後の天然ダムの形状を推定した。推定内容は、残存湛水池の水深は 30m 程度、天然ダムの天端標高が侵食で約 55m 低下し（実際は約 65m）、標高約 140m へ崩壊し（実際は約 130m）、天然ダムの高さは約 110m から約 55m に半減した（実際は約 45m）。この天端侵食による洪水氾濫量は、約 1,300 万  $m^3$  と推定した。このように上部が侵食されたことで天端幅の長さ（溪流の縦断方向の長さ）は 400m 以上に幅広くなった。この形状と危険度判定に関わる早見判定図<sup>2)</sup> から、残存天然ダムは再決壊しないと予想した。
- ・ 侵食により脚部を洗われた深層崩壊地側からの拡大崩壊には、十分な警戒が必要と判断した。そして、そのうち天然ダムの決壊状況の情報については、国土交通本省が 8 月 5 日にインドネシア政府へ報告すると共に公表<sup>3)</sup> した。

#### 4. 5 本章のまとめ

インドネシア国アンボンの天然ダムの決壊災害の際には、SAR 画像と DEM 等を用いて決壊状況を推定した。そして日本国政府からいち早くインドネシア政府に情報を提供した。海外の土砂災害緊急対応時の日本政府の技術支援として SAR 画像判読を用いた事例である。

本章で得られた成果を以下に示す。

- ・ 海外で天然ダムが決壊し洪水氾濫したことから、「天然ダム形成後決壊前の DEM」、及び「現地政府が計測した決壊前湛水池の深浅測量結果」、及び「決壊前後の衛星 SAR 画像」を用いて、天然ダムの決壊状況の把握と決壊後の残存天然ダムの危険度判定を行った。海外災害に対して日本国内で判定を行うことで、より早期の情報提供が可能となった。

## 【引用文献】

- 1) Masaki MIZUNO, Jyoko KAMIYAMA, Masafumi EKAWA, Jyun-ichi KANBARA, Shin-ichiro HAYASHI, Koji MORITA, Shigeo HORIUCHI, Toshiaki UDONO, Kazuo YOSHIKAWA (2014), Application of High-Resolution SAR Satellite Images to Landslide Disasters - Report on landslide-dam formation and collapse events in the Kii Peninsula, Japan and Ambon, Indonesia -, INTERPRAEVENT 2014, P-10
- 2) 国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター 砂防研究室 (2013) : 早見判定図、天然ダム形成時対応の基本的考え方(案) 改訂版、平成 25 年 12 月、pp.92-113
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部、国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人土木研究所 (2013) : インドネシアにおける天然ダム決壊の規模は我が国の戦後最大規模の天然ダム決壊 (昭和 28 年和歌山県有田川災害) に相当することが判明、平成 25 年 8 月 5 日報道発表資料、[http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03\\_hh\\_000665.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000665.html)

## 第5章 衛星差分干渉 SAR による発災前の初期微移動地すべりの探索

### 5. 1 研究概要

人工衛星の「差分干渉 SAR (以下、DInSAR という)」は、2 時期において人工衛星から電波を照射して、得られた反射波データの位相の違いから地表面のわずかな変位量を面的に抽出することができる方法である。しかし、DInSAR 実施のためにLバンドのALOS PALSAR 画像を用いても、山間部においては、良好な干渉性を持つ画像の割合は高くない。また、DInSAR で抽出した変位画像箇所が不正解であったり、逆に、滑動中の地すべり箇所が DInSAR 画像に現れないことも多い。現在、JAXA がLバンドのALOS-2 を継続的に運用しており、今後も国土地理院は DInSAR で作成された全国の地盤変位の状況(地すべり性変位を含む)を、継続的に公表<sup>1)</sup>する予定である。これにより今後、DInSAR 画像からの抽出結果を災害対応として実利用することができる。しかしながら、「L バンド衛星 DInSAR による微小変位箇所の抽出手法」について、その正答率、抽出特性、変位有無の現地確認方法等はまだ明確化されていない。このため、本研究では、紀伊半島と長野県周辺域の山間部を対象に、ALOS PALSAR の「L バンド DInSAR による微小変位箇所の抽出手法」を実施し、DInSAR から抽出した「地すべり移動候補箇所」について、正答率、不正解となりやすい箇所、見逃しやすい条件、「変位が有るかどうかを現地で確認する方法」について、明確化を試みた。

今回の研究では、次の2つを主な目的として実施した。

- ・広域な山間部を対象にLバンド DInSAR 画像を用いて微移動する地表面変位候補箇所を抽出し、その確実性や、抽出された際の変位有無の確認方法について明らかにすること。
- ・SAR 画像の観測条件や斜面条件の影響を評価して、「L バンド衛星 DInSAR による土砂災害前微小移動箇所の抽出手法」の特性や実施条件を明らかにすること。

なお、この研究において使用したデータは、日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)のALOS [発射：2006年1月24日；終了：2011年5月12日]のPALSAR センサーの SAR データである。このALOS PALSAR の SAR データは、JAXA より提供を受けた。

## 5. 2 DInSARによる地すべり移動の広域抽出

### 5. 2. 1 解析手法

#### (1) DInSARの解析処理

DInSARの解析処理のフローを図 5.2.1 に示す。

干渉 SAR 処理には、ソフトウェアの GAMMA SAR を使用した。

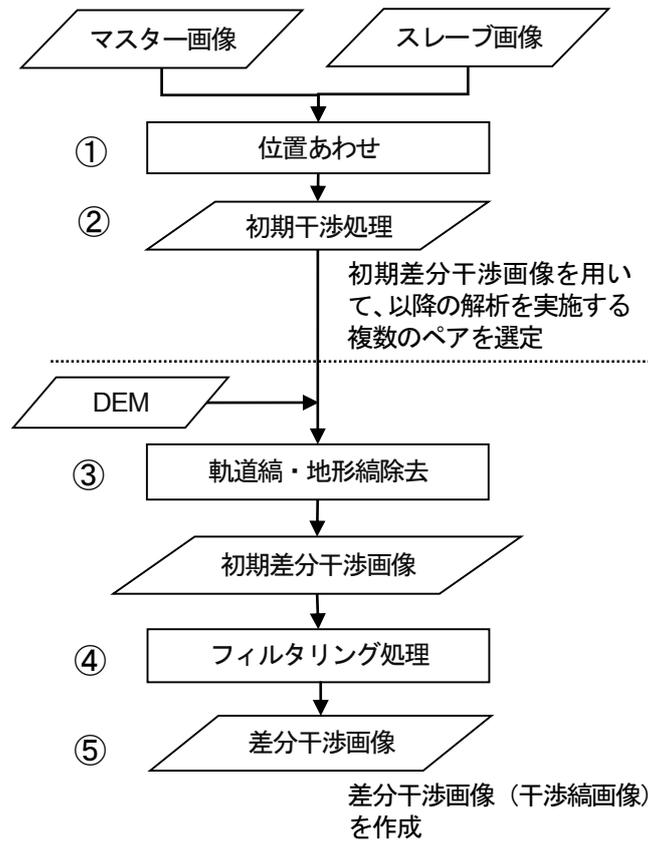


図 5. 2. 1 DInSAR処理のフロー

Fig. 5.2.1 L-band differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR) processing.

#### ① 位置合わせ

マスター画像とスレーブ画像の2時期の画像の位置合わせ(Registration)を行う。2画像の軌道情報から画像の大まかな位置ずれを推定することは可能であるが、サブピクセルオーダーでの位置合わせをするためには、2画像の相互相関を計算する。2つの画像を少しずつずらしながら相互相関を計算し、相関係数が最も高くなった時のずれ量を2画像の位置ずれとして、位置合わせを行う。

#### ② 初期干渉処理

初期干渉処理を行う前に、SLC画像(Single Look Complex)にレンジ6×アジマス9ピクセルの空間平均化処理を実施した。空間平均化処理はウィンドウ内ピクセル値の空間平均をとる処理のことであり、これによりノイズを低減させ、より干渉しやすくなるという利点がある。そして、各ピクセルの位相差 $\phi$ とコヒーレンス値 $\gamma$ を計算し、干渉画像を作成する。干渉性が高い地域では縦方向に軌道縞が確認できるが、干渉性が低い地域では軌道縞は見られずノイズのみ確認できる。なお、

軌道縞が歪んでいる箇所は地形（標高）による影響を受けている地域である。

③ 軌道縞・地形縞除去

初期干渉画像には、マスター画像とスレーブ画像の軌道が異なることに起因する軌道縞が含まれる。これは、衛星と地表との距離がマスター画像とスレーブ画像で異なり、レーダー反射波の位相が異なるためである。DEMを用いた地形縞除去は、国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ標高データなどの DEM データが利用可能である。衛星画像の持つ軌道情報、及び参照 DEM から軌道縞と地形縞のシミュレーション画像を作成し、軌道縞、地形縞を取り除く。軌道縞と地形縞を除去すると、地盤変状に起因する干渉縞が得られる。これを変動縞という。

④ フィルタリング処理

初期差分干渉画像には、コヒーレンスの低下に伴うノイズが含まれる。干渉 SAR 処理により得られた初期差分干渉画像から地盤変状を抽出するには、ノイズが少ない画像であることが望ましい。そこで、初期差分干渉画像に平滑化処理（フィルター）を施す必要がある。位相相強調フィルタの GW（Goldstein and Werner）フィルタ処理により差分干渉画像の位相ノイズを低減させた。

⑤ 差分干渉画像（アンラップ無）。

差分干渉画像を他の地図情報と重ね合わせて使用するため、平滑化処理を施した差分干渉画像をオルソ化し地図投影する。

DInSAR 画像の主な特徴は、以下の通りである。

- ALOS のLバンド SAR では、波長が 23.6cm で、DInSAR 画像の1つの縞で 11.8cm の距離の変化（地表面移動量）が表される。
- DInSAR 画像は、植生、水蒸気、電離層、その他の影響により、多くのノイズが含まれる。そこで、地表面の移動箇所を抽出する際の着目点は、ノイズに比べて比較的狭い範囲において連続的な色の变化がある場所が変動縞（地表面の移動箇所）である。
- SAR 画像は、電波の照射方向と視認できる斜面方向に関係がある。そこで、異なる軌道からの複数の SAR 画像ペアによる DInSAR 実施が望ましい。

## (2) 地すべり移動候補箇所の抽出

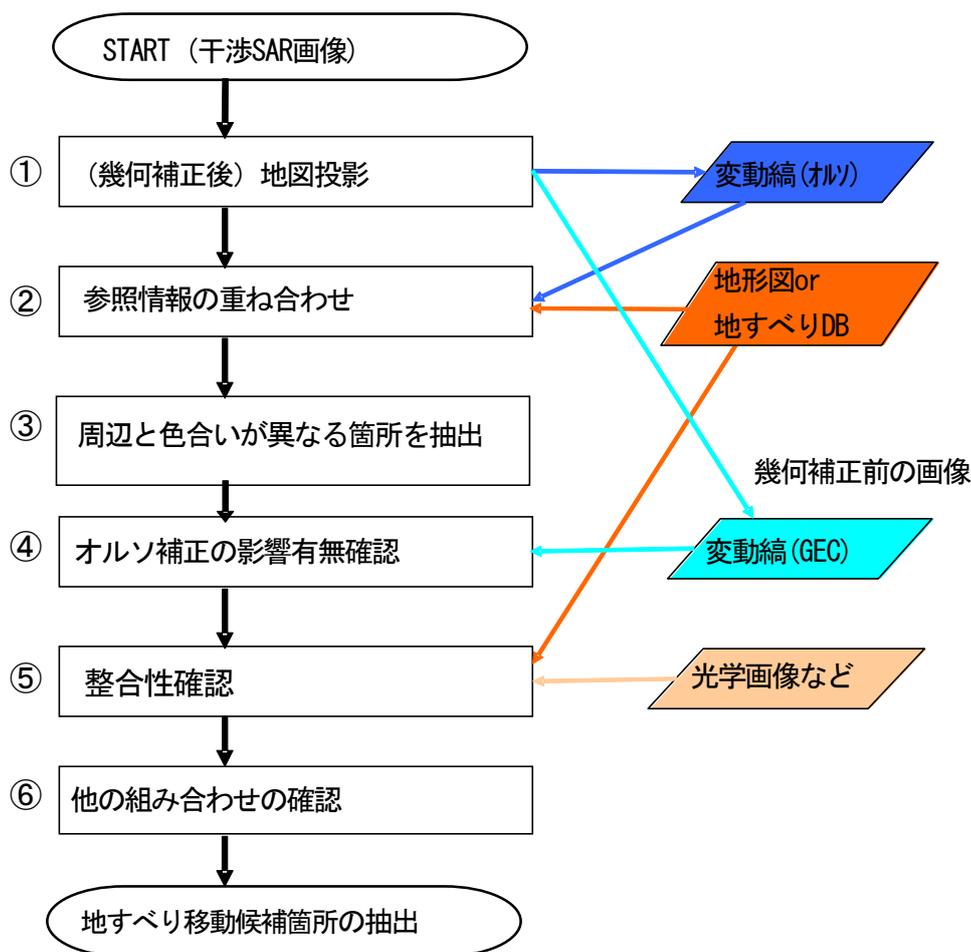


図 5.2.2 DInSAR画像からの地すべり移動候補箇所の抽出フロー

Fig. 5.2.2 Extraction of candidate locations for landslide movements from L-band differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR) images.

作成した広域な DInSAR 画像から、土砂災害につながる微小移動する地すべり移動箇所を抽出するために、図 5.2.2 に示す抽出フローにより実行した。

- ①～②：DInSAR 画像を GIS 情報と比較できるように幾何補正（オルソ化）した上で、地形図や地すべり地形図と重ね合わせて、判読性を良くする。
- ③：周辺と比較して色合いが異なる箇所を「変動縞候補地」として抽出する。
- ④～⑤：変動縞の誤判読の要因として、大気（水蒸気）や電離層の影響により出現する縞がある。この縞は、移動方向と斜面向きとの整合性の確認や、地形情報から地表面移動が起きうる地形かどうかを判断して排除する。
- ⑥：さらに、複数の DInSAR 画像で同様の場所に「変動縞候補地」の変動縞が見られるかを確認することで、誤判読を極力排除する。そして、「地すべり移動候補箇所」が抽出される。

なお、DInSAR 画像は誤差が多く発生<sup>2)</sup>することから、図 5.2.2 の「⑥他の組み合わせの確認」を実施し、複数の DInSAR 画像で同様の場所に変動縞が現れた箇所を「地すべり移動候補箇所」として抽出した。

### (3) 解析に用いた ALOS/PALSAR 画像

今回実施した DInSAR の対象地域は、図 5.2.3 に示す紀伊半島及び長野県周辺域であった。そして、使用した ALOS データは、紀伊半島エリアの DInSAR 解析が、ALOS PALSAR のアーカイブ画像の 4 パス 70 枚(25+45)である。長野県周辺域エリアの DInSAR 解析が、ALOS PALSAR アーカイブ画像の 3 パス 46 枚である。解析に使用した ALOS PALSAR 画像の画像数を表 5.2.1 に撮像年月日を表 5.2.2、表 5.2.3 に、観測範囲を図 5.2.3 に示す。なお、表 5.2.2 に示す軌道番号 408 以外の 6 つの軌道番号については、ALOS の入手可能な全てのアーカイブ画像を収集して、DInSAR を実施した。

表 5.2.1 解析に用いた ALOS/PALSAR 画像数

Table 5.2.1 Number of ALOS/PALSAR images used in the analysis

	長野県周辺域		紀伊半島	
	軌道番号	シーン数	軌道番号	シーン数
南行軌道	61	8	64	10
			65	15
北行軌道	408	14	413	21
	409	24	414	24

表 5.2.2 使用データ：ALOS/PALSAR アーカイブ（長野県周辺域）

Table 5.2.2 Data used: ALOS/PALSAR archive (region surrounding Nagano Prefecture)

軌道方向	北行軌道		南行軌道
軌道番号	408	409	061
フレーム番号	0710	0710・0720	2880・2890
撮像年月日	2007/07/01	2007/01/15	2007/11/05
	2007/08/16	2007/07/18	2007/12/21
	2007/10/01	2007/09/02	2008/03/22
	2008/05/18	2007/10/18	2008/05/07
	2008/07/03	2008/01/18	2008/08/07
	2008/08/18	2008/03/04	2008/09/22
	2008/10/03	2008/04/19	2009/12/26
	2009/07/06	2008/06/04	2010/11/13
	2009/08/21	2008/07/20	-
	2009/10/06	2008/09/04	-
	2010/05/24	2008/10/20	-
	2010/07/09	2009/01/20	-
	2010/08/24	2009/03/07	-
	2010/10/09	2009/07/23	-
	-	2009/09/07	-
	-	2009/10/23	-
	-	2010/01/23	-
	-	2010/03/10	-
	-	2010/04/25	-
	-	2010/06/10	-
-	2010/07/26	-	
-	2010/09/10	-	
-	2010/10/26	-	
-	2011/01/26	-	
シーン数の小計	14	24	8

表 5.2.3 使用データ : ALOS/PALSAR アーカイブデータ (紀伊半島)

Table 5.2.3 Data used: ALOS/PALSAR archive (Kii Peninsula)

軌道方向	北行軌道		南行軌道	
軌道番号	413	414	064	065
フレーム番号	0670	0670	2930	2930
撮像年月日	2006/12/22	2006/10/08	2006/12/23	2007/01/09
	2007/06/24	2007/01/08	2007/08/10	2007/05/27
	2007/08/09	2007/07/11	2007/12/26	2007/07/12
	2007/11/09	2007/08/26	2008/12/28	2007/08/27
	2008/02/09	2007/10/11	2009/09/30	2008/02/27
	2008/03/26	2008/01/11	2009/11/15	2008/05/29
	2008/05/11	2008/02/26	2010/05/18	2008/08/29
	2008/06/26	2008/04/12	2010/07/03	2008/10/14
	2008/09/26	2008/05/28	2010/08/18	2008/11/29
	2008/12/27	2008/07/13	2010/10/03	2009/04/16
	2009/02/11	2008/08/28	-	2009/12/02
	2009/06/29	2008/10/13	-	2010/06/04
	2009/09/29	2009/01/13	-	2010/07/20
	2009/11/14	2009/02/28	-	2010/09/04
	2009/12/30	2009/07/16	-	2010/10/20
	2010/02/14	2009/10/16	-	-
	2010/04/01	2009/12/01	-	-
	2010/05/17	2010/01/16	-	-
	2010/07/02	2010/03/03	-	-
	2010/08/17	2010/04/18	-	-
	2010/10/02	2010/06/03	-	-
-	2010/07/19	-	-	
-	2010/09/03	-	-	
-	2010/10/19	-	-	
シーン数の小計	21	24	10	15

## 5. 2. 2 地すべり移動候補箇所の抽出結果

最終的に図 5.2.2 のフローにしたがい、条件を満たした箇所を「地すべり移動候補箇所」として抽出した。その結果を図 5.2.3 に示す。長野県周辺域では小谷村赤倉山 (図 5.2.4) など3パスで合計 40 カ所、紀伊半島では4パスで合計 29 カ所の「地すべり移動候補箇所」を抽出した。

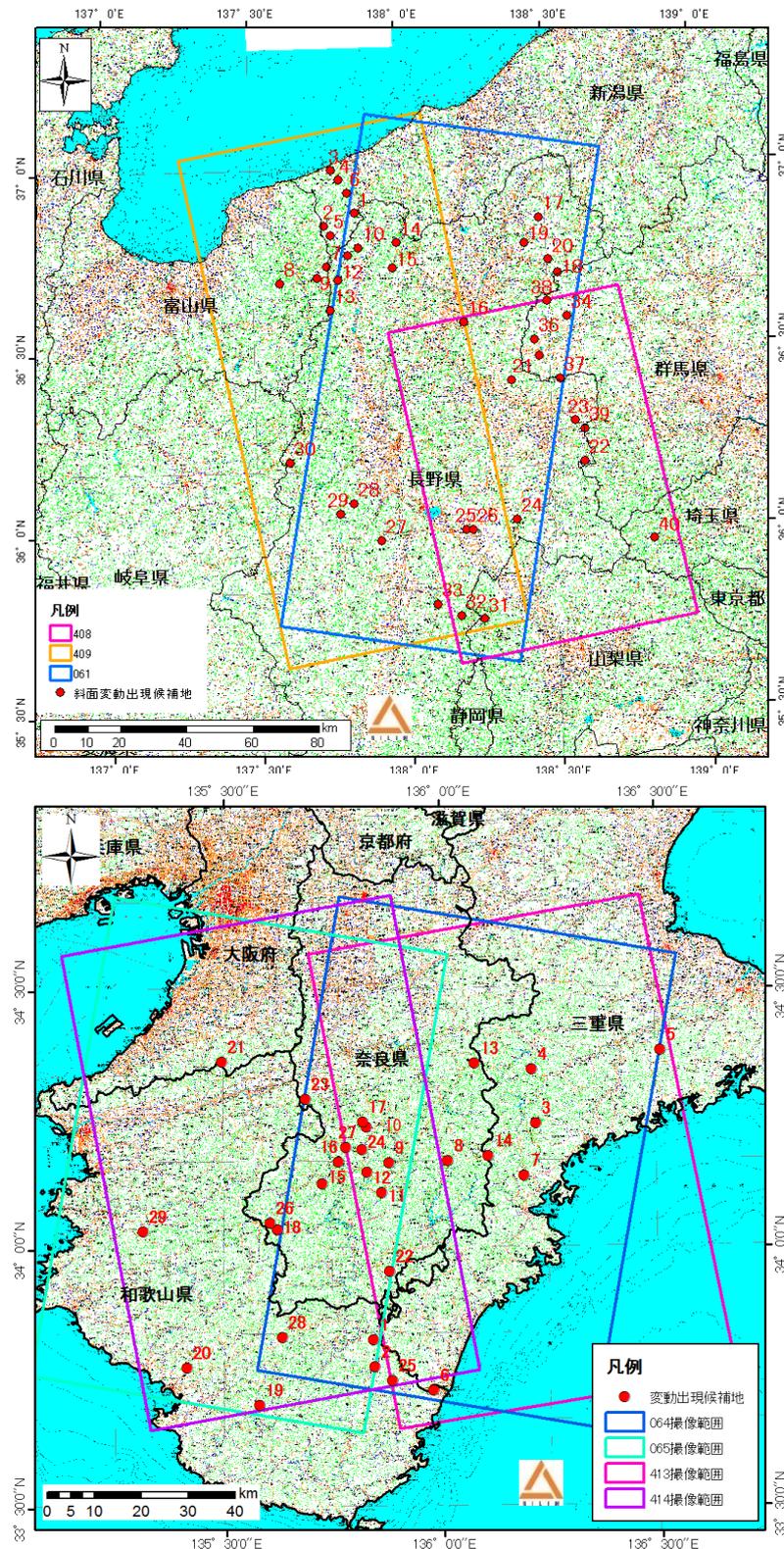


図 5.2.3 LバンドDInSARで抽出した地すべり移動候補箇所(上:長野県周辺域、下:紀伊半島)

Fig. 5.2.3 Candidate locations for landslide movement based on L-band DInSAR.

### 5. 2. 3 微小地すべり移動が抽出できる条件

今回の地すべり移動候補箇所の抽出から、DInSAR で変位が抽出できる地すべり移動の面積と変位量について考察した。

地すべり移動の面積が小さい場合、DInSAR では抽出できない可能性があると考えられる。本研究で使用した ALOS PALSAR 画像のピクセルサイズは、高分解能単偏波モードでレンジ方向およびアジマス方向でそれぞれ約 4.7m、約 3.2m である。干渉性および変位量を計算するためには、数ピクセルをひとまとめにして処理する必要がある、複数のピクセルの値は 1 つの代表値として表される。これをマルチルック処理と呼ぶ。マルチルック処理によりノイズが低減される。本研究では、レンジ方向、アジマス方向にそれぞれ 6×9 ピクセルをひとまとめにして計算を行っている。そこで、作成した差分干渉画像の 1 ピクセルは約 30m×30m となる。また今回の抽出では、差分干渉画像から斜面変位を読み取るためには、最低でも 5×5 グリッド程度のまとまった領域が均一な値を示す必要があった。したがって、ALOS PALSAR では、差分干渉画像から斜面変位を検出するにあたり、概ね 150m×150m 程度 (約 2 万 m<sup>2</sup>) の規模以上の斜面変位について、検出可能であると考えられる。さらに、L バンド波長の DInSAR による変位の抽出限界から、数 cm 程度以上の変位がないと抽出は困難であると考えられる。

#### 5. 2. 4 抽出箇所の地すべり移動有無の確認及び判定

DInSAR 画像から抽出した地すべり移動候補箇所について、次のとおり地すべり移動有無の確認及び判定を行った。

- ①収集した微地形判読資料や既存調査資料を用いて地すべり移動の有無の確認ができる箇所については、資料を確認した。
- ②現地へのアクセスが容易であると想定される箇所について、現地踏査を行った。
- ③抽出箇所が崩壊することを仮定した場合に、被害が大きいと考えた稲子岳については、移動有無の確認が重要必要と考えて、GPS 移動杭の設置・計測を実施した。(写真 5.2.1)
- ④抽出した全移動候補箇所を対象に、防災科学技術研究所が作成した「地すべり地形分布図」<sup>3)</sup>との位置的な一致の有無を確認した。

地すべり移動候補箇所の現地踏査や GPS 移動杭の設置・計測の事例を写真 5.2.1 に示す。現地踏査では、道路などの構造物に現れる亀裂等の変位の状況を確認した。



写真 5.2.1 現地調査（上）とGPS測量（下）の例

〔 上：長野県山ノ内町 西館山西側斜面  
下：長野県小海町 稲子岳 〕

**Photo 5.2.1** (top) Example of local survey and (bottom) *Global Positioning System* (GPS) survey.

〔 Top: Nagano-Pref., west side of Mount Nishitate.  
Bottom: Nagano-Pref., Mount Inago. 〕

干渉 SAR 画像から抽出した地すべり移動候補箇所とその判定結果は表 5.2.4、表 5.2.5 に示すとおりである。判定では、現地調査により移動を確認した箇所、又は、各種調査資料に移動が確認できる記載がある箇所を「◎：定性的正解」とした。防災科学技術研究所の地すべり地形分布図<sup>3)</sup>で地すべり地形と判定されている箇所、又は、微地形判読結果資料で深層崩壊に起因する微地形と判読されている箇所は、「△：正解の可能性あり」とした。採石場等の土砂災害の対象外現象の箇所を「対象外」とした。また、判定欄が空白の箇所は、地表変異の有無が確認できていない「未調査」の箇所である。

表 5.2.4 差分干渉画像から抽出した「地すべり移動候補箇所」と判定結果（長野県周辺域）

Table 5.2.4 “Candidate locations for landslide movement based on DInSAR” and verification (region surrounding Nagano Prefecture)

番号	箇所名	現地確認結果	地すべり地形分布図	微地形判読結果	斜面と移動方向の整合	判定	備考
1	大所	○				◎	
2	長柵山		○	○		△	
3	権現山近辺					対象外	採石場
4	黒姫山					対象外	採石場
5	白高地沢		○	○		△	
6	明星山		×				
7	鍵ヶ岳		×				
8	釜谷山		×				
9	中背山南		○			△	
10	赤倉山		○	○		◎	
11	柵池自然園		○	○		△	
12	八方山		○	○		△	
13	布引尾根		×	○		△	
14	奥裾花自然園		○	○		△	
15	奥裾花ダム		×				
16	松代温泉	対象外				対象外	地盤沈下の可能性
17	城蔵山		○			△	
18	大沼池		○			△	
19	飯盛山	×				×	
20	西館山西側斜面	○				◎	
21	金原ダム	対象外				対象外	ダムの堤体
22	霊仙峰		×				
23	茂沢川上流		×				
24	稲子岳	GPS計測				◎	
25	豊平(小泉山)	×				×	
26	豊平(大泉山)	×				×	
27	横川ダム		×				
28	中俣沢		×				
29	木曾川上流		×				
30	坂巻温泉		○	○		◎	既存調査資料
31	摩利支天		×				
32	三石山		○	○		△	
33	溝口		×				
34	草津町	対象外				対象外	耕作地
35	糠塚山	×				×	
36	大横川上流		×				
37	浅間山		×				
38	本白根沢		×				
39	矢川峠		○			△	
40	白泰山東側斜面		×				

判定の凡例

◎：定性的正解、△：正解の可能性あり、X：不正解、対象外：土砂災害の対象外現象、空白：未調査

表 5.2.5 差分干渉画像から抽出した「地すべり移動候補箇所」と判定結果（紀伊半島）

Table 5.2.5 “Candidate locations for landslide movement based on DInSAR” and verification (Kii Peninsula)

番号	箇所名	現地確認結果	地すべり地形分布図	微地形判読結果	斜面と移動方向の整合	判定	備考
1	宮井西方	○	○			◎	
2	長井						
3	仙千代ヶ峰		×				
4	迷岳		○			△	
5	七洞岳		○			△	
6	新宮市西方	×				×	
7	海山町		×		不整合	×	
8	小椽川(ことちがわ)						
9	明星ヶ岳		×				
10	沢原						
11	宇無ノ川左岸		×	○		△	
12	下辻山		○			△	
13	薊岳		×		不整合	×	
14	日出ヶ岳		×		不整合	×	
15	赤谷						
16	辻堂						
17	天狗倉山		○			△	
18	神納川上流	対象外	×			対象外	崖錐堆積
19	半田峯		○			△	
20	右会津川右岸	○	○	○		◎	既存調査資料
21	三国山南東方		×				
22	神下		×				
23	阪合部新田町	×	×			×	
24	和田南西方		○			△	
25	白見山南		×				
26	大野谷南		×				
27	山西		×				
28	野中		○			△	
29	川口		×				

判定の凡例

◎：定性的正解、△：正解の可能性あり、×：不正解、対象外：土砂災害の対象外現象、空白：未調査

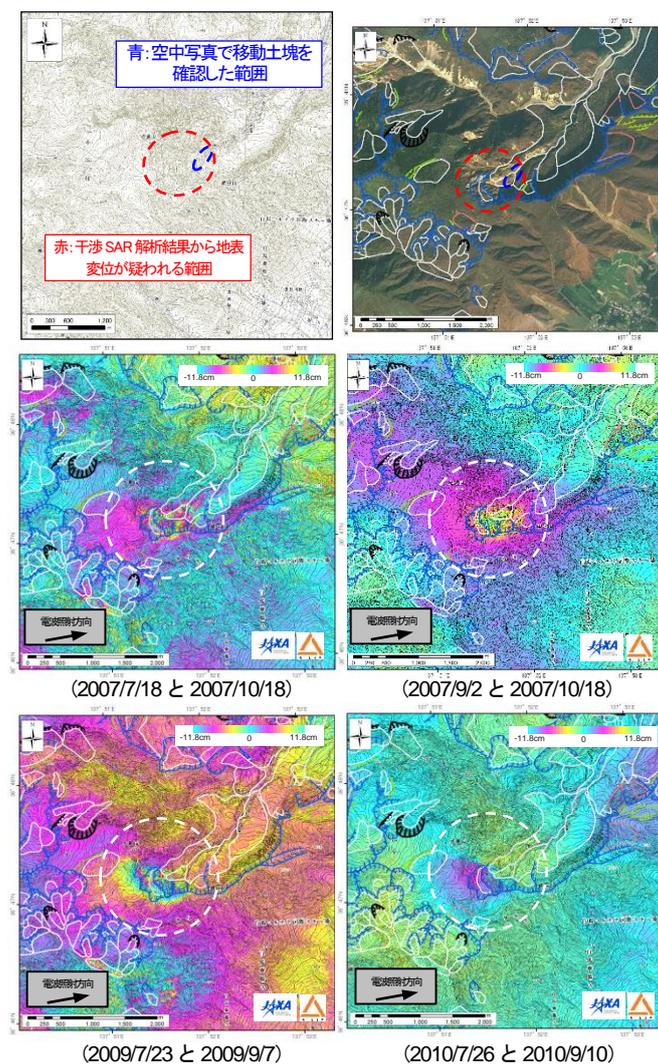
DInSAR による計 69 箇所の「地すべり移動候補箇所」における、地すべり移動有無の確認状況とその結果をまとめると、次のとおりであった。

- 定性的正解が 7 箇所。（その根拠は、現地調査の結果が 5 箇所、各種資料の結果が 2 箇所）
- 正解の可能性有りが 19 箇所。（その根拠は、地すべり地形分布図に記載有りが 17 箇所、微地形判読結果が 2 箇所）
- 不正解が 9 箇所。（その根拠は、現地調査の結果が 6 箇所、各種資料の結果が 3 箇所）
- 採石場等の土砂災害の対象外現象が 6 箇所。（その根拠は、現地調査の結果が 4 箇所、各種資料の結果が 2 箇所）
- 正解かどうか未調査箇所が 28 箇所。

## 5. 2. 5 既存調査資料による地すべり移動候補箇所の確認事例

### (1) 赤倉山

図 5.2.4 は、長野県北安曇郡小谷村赤倉山南東斜面における DInSAR による地すべり移動候補箇所の抽出事例である。ここでは、観測日が異なる SAR データから作成した DInSAR の4画像において、同じような位置で変動縞画像が現れている。そして、この DInSAR 画像による地すべり移動候補箇所の地すべり移動の有無を他の調査結果から確認した。DInSAR 画像で地すべり移動画像が現れた長野県北安曇郡小谷村赤倉山南東斜面のこのエリアでは、地すべり移動画像の下流端地域で北陸地方整備局が移動杭による移動量計測 (図 5.2.5) を実施すると共に、2時期の空中写真による土塊移動状況確認 (図 5.2.6) を実施していた。この2つの調査結果により、この箇所では、地すべり活動による地表面移動が確認できた。さらに DInSAR 地すべり移動画像は、地すべり移動しているエリアが、この2つの調査エリアより広い可能性を示した。



Analysis by NILIM from ALOS raw data of JAXA, METI

図 5.2.4 干渉 SAR で抽出した微小変動箇所  
(長野県北安曇郡小谷村赤倉山) (基図: 3)

Fig. 5.2.4 Examples of landslide movement extraction using L-band DInSAR images at Nagano-Prefecture, Mount Akakura.

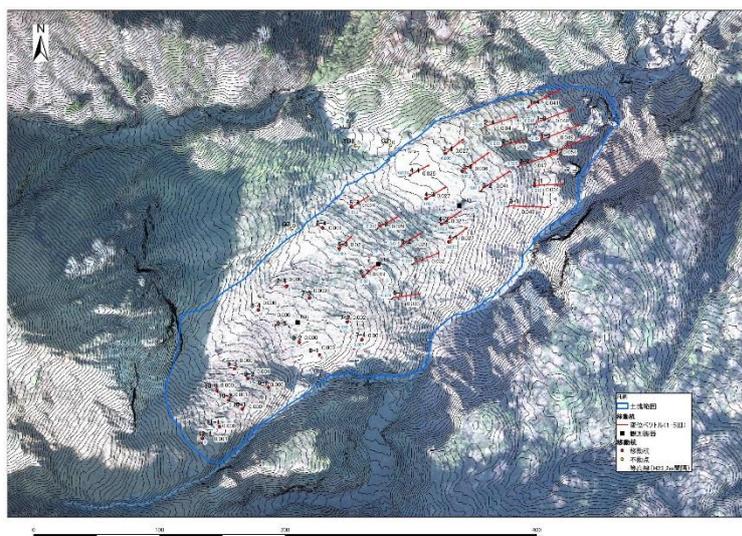


図 5.2.5 移動杭の変位状況 (2012年9月26日から2012年11月13日まで) <sup>4)</sup>

(赤線：水平変動ベクトル、黒文字：日変位量、青文字：日沈下量、  
背景：H23オルソ画像・航空レーザ等高線)

Fig. 5.2.5 Reference stud displacement (September 26 to November 13, 2012)

(Red line: vertical displacement level; black characters: daily displacement; blue characters: daily sinkage;  
Background: height lines of ortho-images, airplane laser in 2011)

(出典：金山沢不安定土塊対策概略検討業務報告書 (北陸地方整備局松本砂防事務所, 2013) 図3.3.1より)

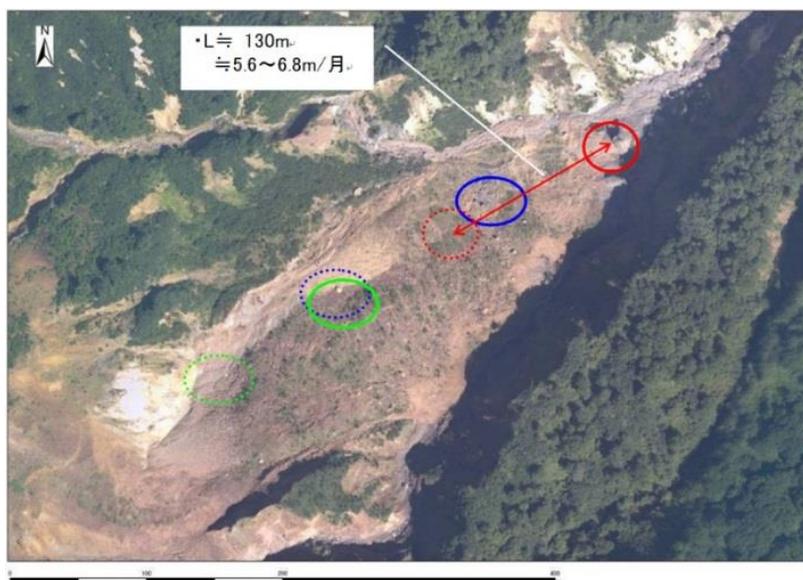


図 5.2.6 空中写真オルソ画像の比較結果 (2007年10月から2009年9月まで) <sup>5)</sup>

Fig. 5.2.6 Comparison of aerial photograph ortho-images captured in October 2007 and September 2009.

(出典：金山沢不安定土塊対策概略検討業務報告書 (北陸地方整備局松本砂防事務所, 2013) より)

## (2) 上秋津

図 5.2.7 は、紀伊半島の和歌山県田辺市上秋津における DInSAR 画像による地すべり移動箇所抽出事例である。ここでも観測日が異なる 2010 年 SAR データから作成した複数の DInSAR 画像において、同じような位置で変動縞画像が現れている。そこで県へのヒアリングや既往資料による確認調査を行った。その結果、この地すべり移動候補箇所では、県が 1986 年頃から斜面変位を確認し、県が設置した孔内傾斜計で 2007 年 3 月～11 月頃に 20～30cm/年程度の変位が確認されていた。そして、2011 年 6,7,9 月の豪雨時に崩壊が発生した。そして 2013 年に県が GPS 移動杭や孔内傾斜計による現地調査を改めて実施して、判明した地すべり移動土塊エリア (図 5.2.8) は、2010 年観測の DInSAR 画像の変動縞と同様のエリアであった。この例は、DInSAR が崩壊による災害発生前に微小な移動の地すべり箇所を抽出できる可能性を示唆している。

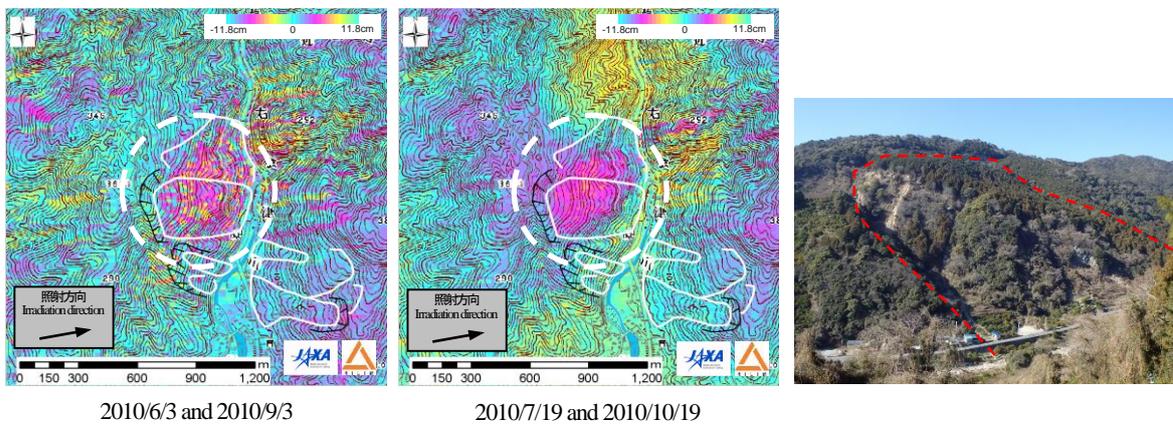
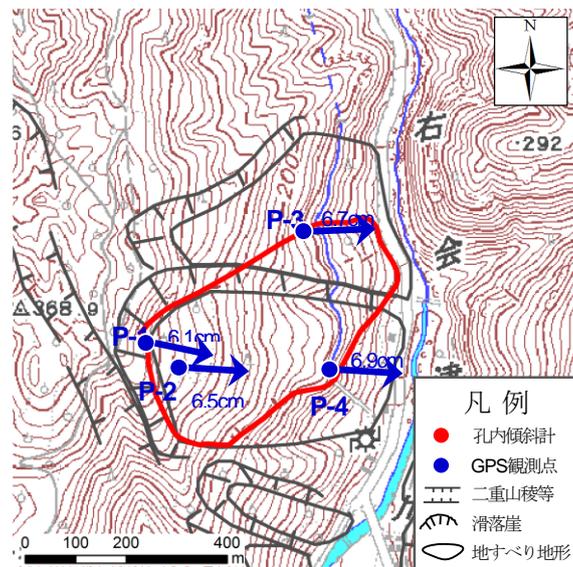


図 5.2.7 Lバンド DInSAR 画像による地表面変動の抽出事例 (和歌山県田辺市上秋津) (基図: 3)  
 Fig. 5.2.7 Examples of landslide movement extraction using L-band DInSAR images in Tababe-City, Kamiakizu, Kii Peninsula.



※赤実線が地すべり調査による移動土塊の範囲

図 5.2.8 崩壊後の地すべり調査の結果(2013 年 3 月 5 日～11 月 22 日 GPS 計測 (262 日間)、和歌山県西牟婁振興局林務課より)

Fig. 5.2.8 Results of investigation of landslide after collapse based on GPS measurement over 262 days from March 5 to November 22, 2013, recorded by the Forestry Affairs Division, Nishimuro Development Bureau, Wakayama-Prefecture.

### 5. 2. 6 斜面変位の不正解抽出箇所の特徴

ここで、DInSAR 画像から抽出した地すべり移動候補箇所が、現地調査の結果、斜面変位している可能性が低いと判断した場所について、原因を考察した。

DInSAR 画像による斜面変位の不正解抽出箇所として「周囲を平地で囲まれた独立峰の斜面」の事例が複数あり、この地形は不正解抽出となりやすいと考えられる。その1例としては、長野県茅野市豊平小泉山、大泉山がある。差分干渉画像を図 5.2.9 に示す長野県茅野市豊平小泉山、大泉山では、DInSAR 画像で山体の位置に変動縞が確認された。しかしながら現地調査した結果、斜面変位が生じている状況は見られなかった。その原因としては、「周囲を平地で囲まれた独立峰」周辺では水蒸気分布が不均一<sup>6)</sup>になると考えられ、それにより電波の伝搬距離が変化して、大気遅延誤差が発生した可能性がある。

また、DInSAR の不正解抽出となった地形の特徴の2つ目としては、「河川屈曲部に隣接する斜面」があった。その例として和歌山県新宮市新宮西方の DInSAR 画像を図 5.2.10 に示す。現地調査した結果、和歌山県新宮市新宮西方においては、斜面変位が生じている状況は見られなかった。この箇所のように「河川屈曲部に隣接する斜面」についても、水蒸気分布が不均一<sup>6)</sup>となり、不正解抽出となりやすいと考えられる。

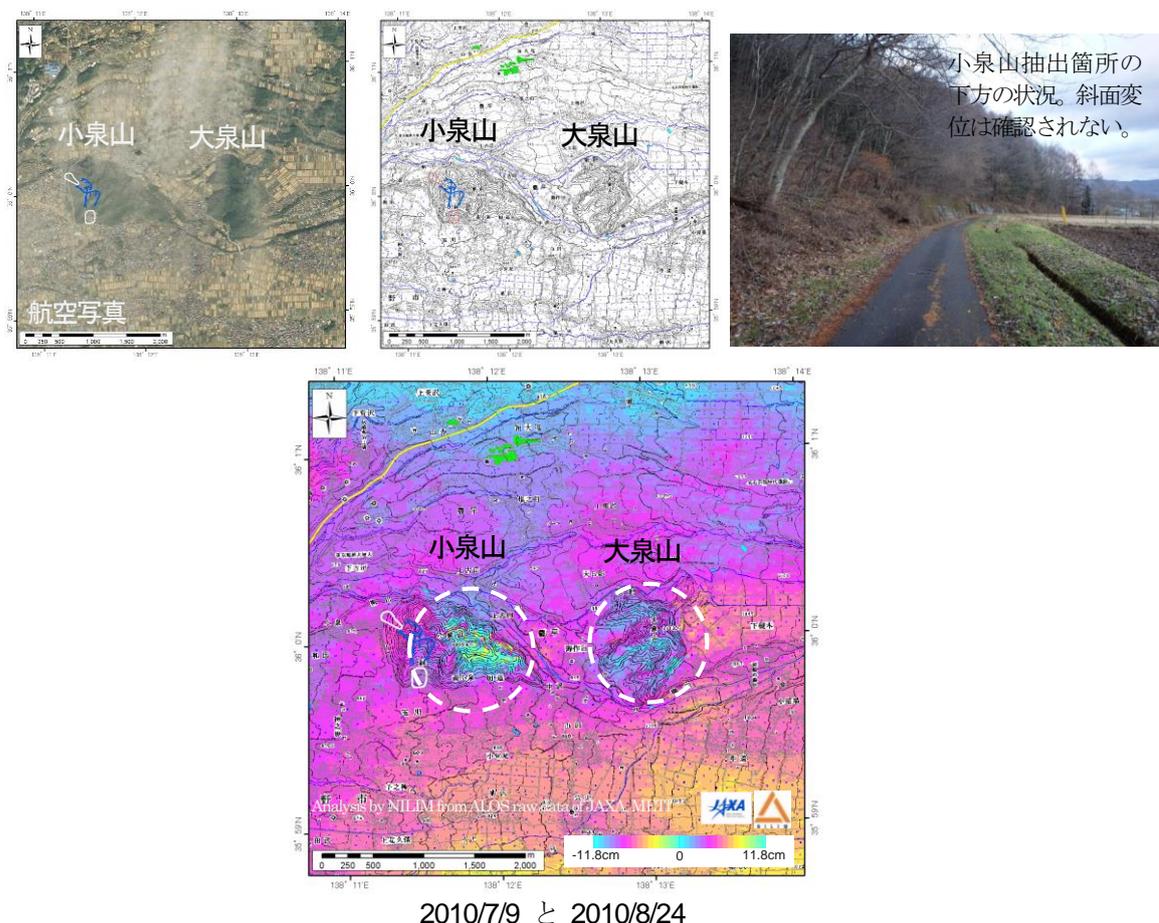
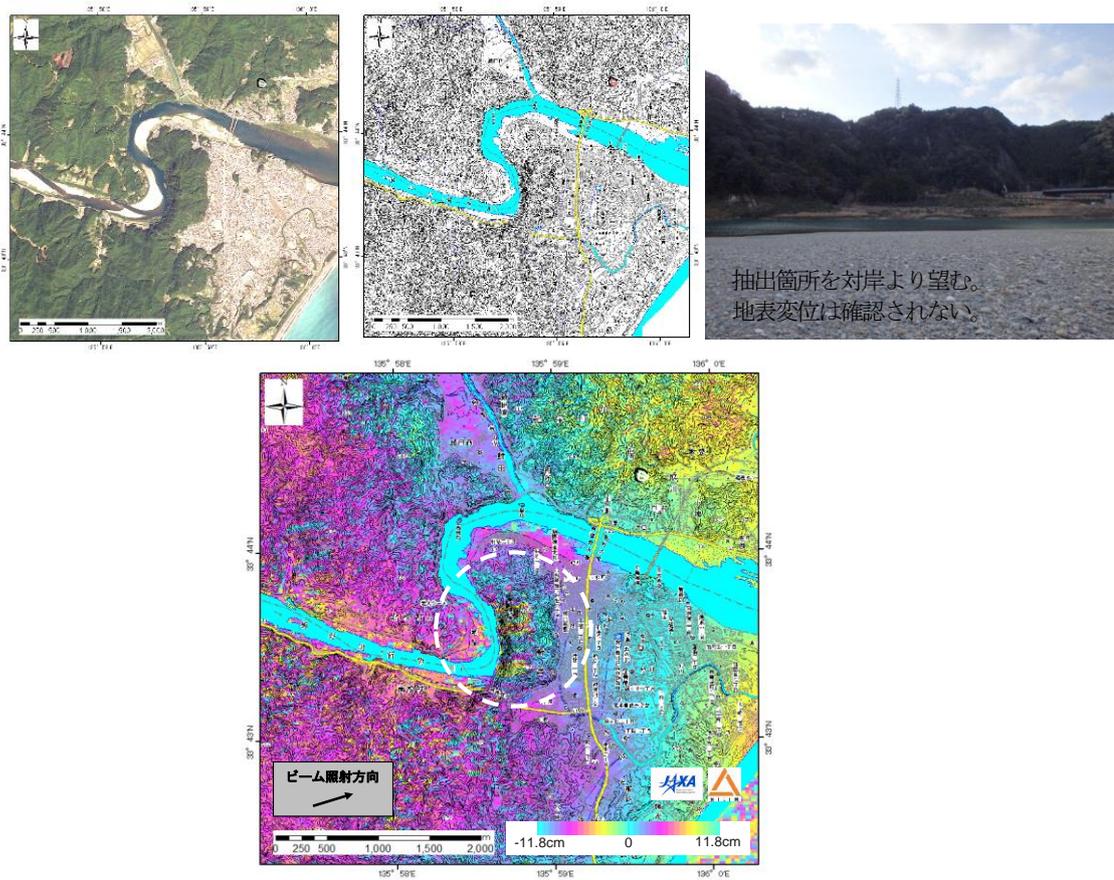


図 5.2.9 豊平における差分干渉画像 (基図: 3) )  
Fig. 5.2.9 DInSAR image and situation at Toyohira.



### 5. 3 GPS 測量による地すべり移動候補箇所の確認事例（稲子岳）

#### 5. 3. 1 差分干渉画像と過去の災害履歴

図 5.3.1 は、長野県南佐久郡小海町稲子岳における DInSAR 画像による地すべり移動候補箇所の抽出事例である。ここでも観測日が異なる SAR データから作成した DInSAR の4画像において、山体斜面の同じような場所に変動縞画像が現れている。この箇所は、小荒井ら<sup>5)</sup>により DInSAR 画像から全国を対象に抽出された数多くの地すべり移動候補箇所の一つとして抽出されていた。しかし、地すべり移動有無の確認等の詳細な調査はまだ実施されていなかった。この箇所は、カルデラ状の地形が見られ、衛星光学写真で付近に多くの崩壊地が確認できる。さらに、稲子岳(国有林内)は、図 5.3.2 に示すように、「西暦 887 年 8 月の五畿七道の地震(南海-東海の高溝型地震)」で発生した「大月川岩屑なだれ(約 3.5 億 m<sup>3</sup>)」の発生源域にあると指摘<sup>7)</sup>されており、この災害の推定土砂堆積域には、現在、多くの人家が存在する。そこで、もし DInSAR から抽出された山体移動が正解で、崩壊災害が

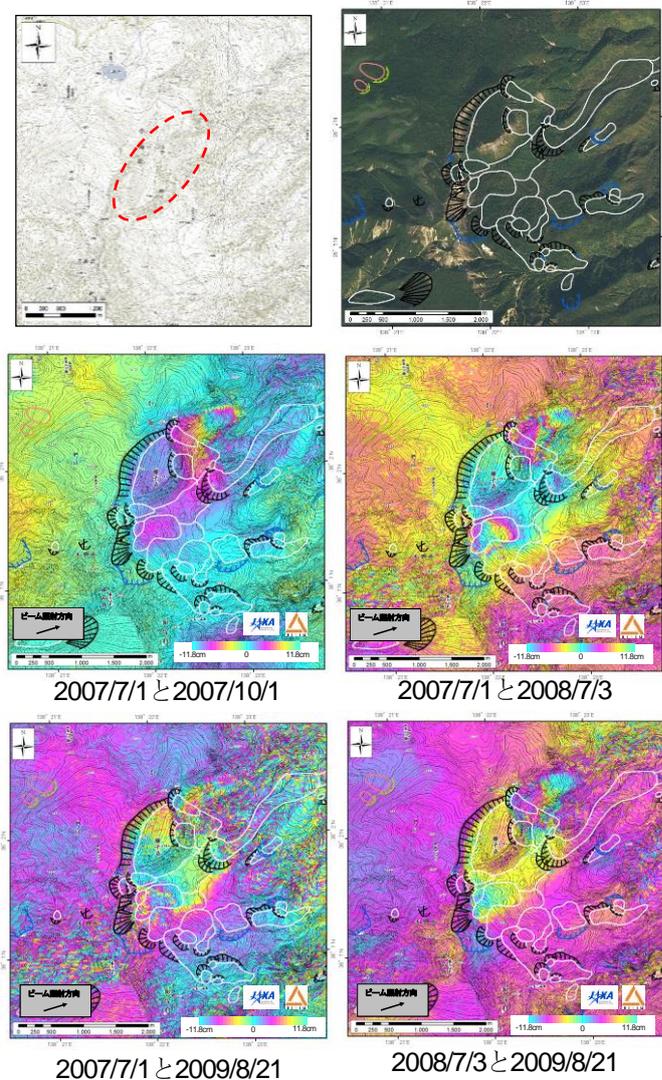


図 5.3.1 長野県南佐久郡小海町\_稲子岳における変動縞画像(基図: 3)

Fig. 5.3.1 Examples of landslide movement extraction using L-band DInSAR images at Nagano-Prefecture, Mount Inago.

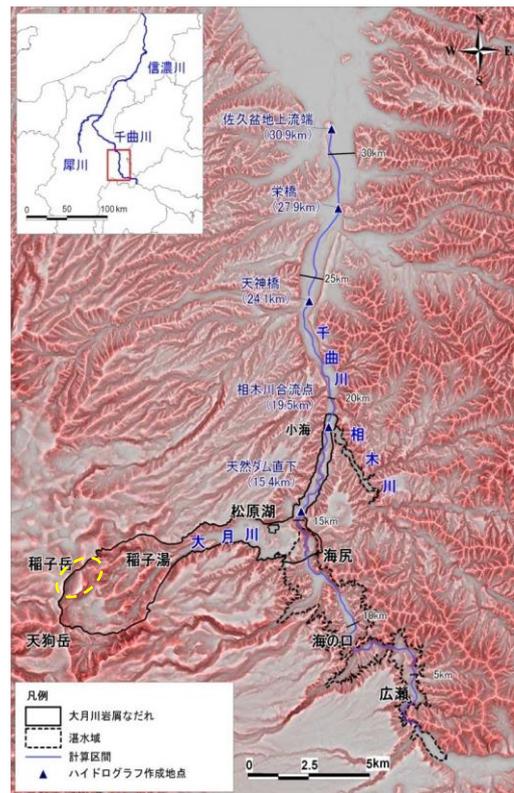


図 5.3.2 対象エリア位置(黄点線)と大月川岩屑なだれ<sup>7)</sup>

Fig. 5.3.2 Location of the target area (yellow dotted lines) and Otsuki river debris flow

出典: 「日本の天然ダムと対応策」 水山高久監修, 2011, P36 より

発生した場合には、甚大な被害が出ると判断して、微小移動の有無を確認するために GPS 移動杭計測を実施した。

### 5.3.2 GPS 測量の実施

GPS 測量を実施する計測点は、登山道からのアクセスも考慮しつつ、移動量の分布を DInSAR 画像から予測して、次のとおり選定した。P-1~P-3 の位置を図 5.3.3 に示す。

P-1 : DInSAR 画像から抽出した移動量が大きいエリア。移動がある場合には移動量を検知できる可能性が高い。

P-2 : 移動ブロックの範囲を確認する目的で設置。移動していないエリア内で境界に近い箇所と予想。

P-3 : 規模の大きな稲子岳山体の移動の有無を確認する目的で設置。

P-4 : 不動点として、確認対象エリアの外に設置。

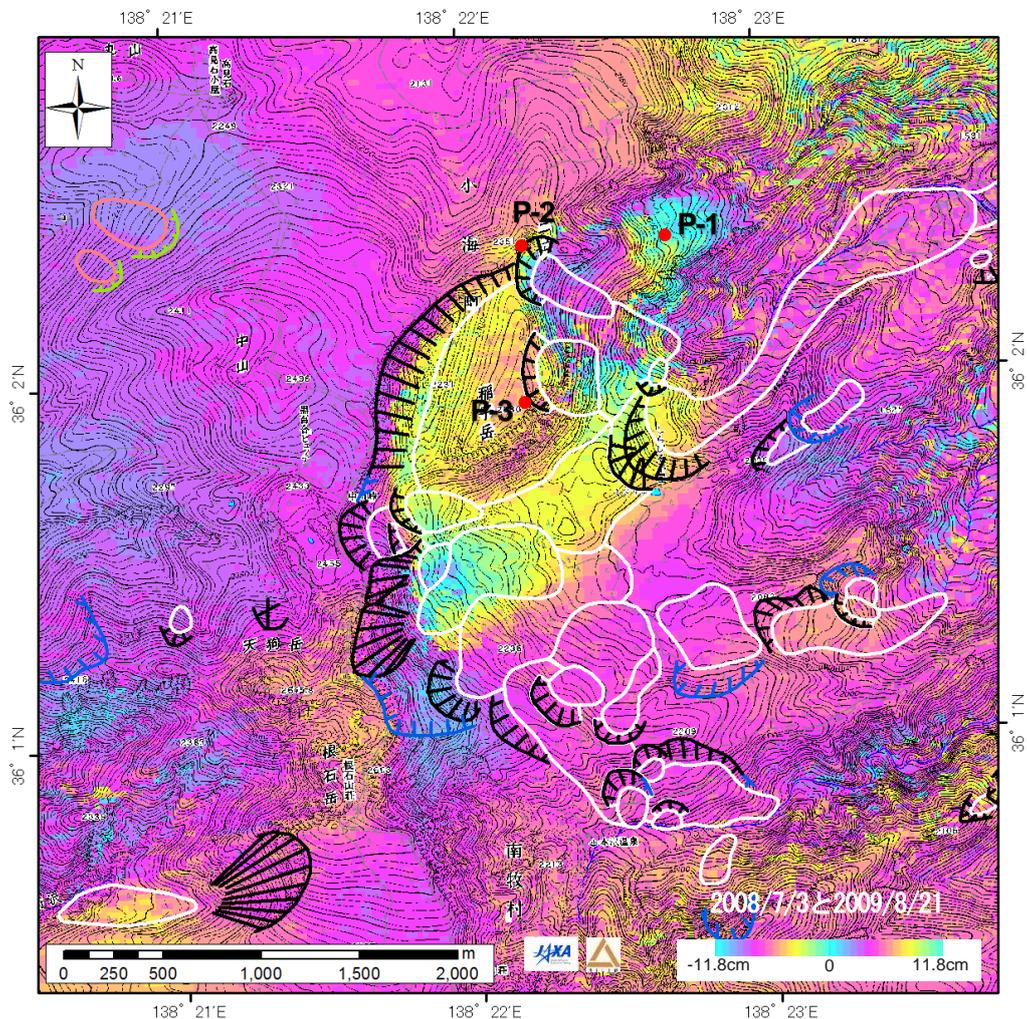


図 5.3.3 変動縞画像と各 GPS 計測点 (基図 : ③ )  
Fig. 5.3.3 L-band DInSAR images and observation points

GPS 測量は、〔電子基準点〕山梨高根、八千穂、茅野の 3 点を既知点とした 1 級基準点測量で、1 回目 2013/10/23、2 回目 2014/10/29、3 回目 2015/8/4 の計 3 時期において実施した。相当の結合多角網を形成し、GNSS 測量によるスタティック方式により P-1 から P-4 の 4 点について、水平位置ならびに標高を算出した。観測時間は、3 時間とした。なお、P-4 は比較する不動点として計測した。

(図 5.3.4)

- 観測方法：GNSS 測量によるスタティック方式
- 既知点：〔電子基準点〕山梨高根、八千穂、茅野

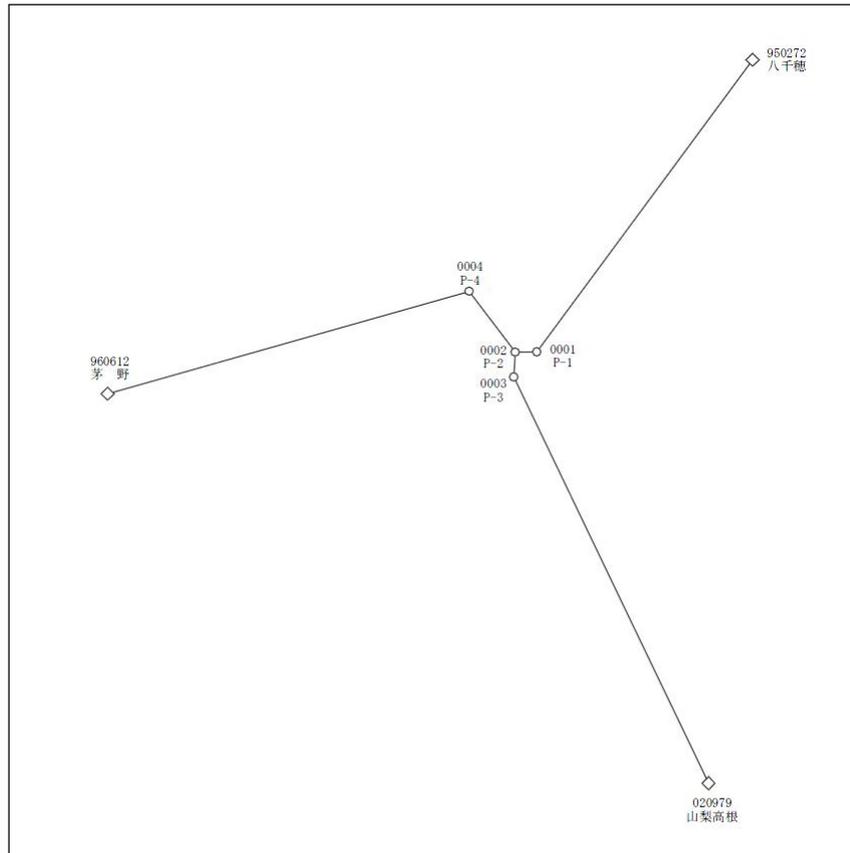


図 5.3.4 GNSS 観測における平均図

Fig. 5.3.4 GNSS Observation points

### (1) GPS 測量結果

P-1 から P-4 の 4 点について、1 回目 2013/10/23、2 回目 2014/10/29、3 回目 2015/8/4 の 3 時期の測量結果を比較し、移動量を確認した。各回とも位置精度を示す標準偏差は、国土交通省公共測量作業規定の定める許容範囲（水平位置：10cm）に収まっており、GNSS 観測結果として問題が無いことを確認した。この 3 時期の GPS 測量作業から得られた各計測点の座標、および標準偏差は、表 5.3.1、表 5.3.2、表 5.3.3 のとおりである。ここに、座標は GIS 上での利活用を考慮し、X 軸が東西方向、Y 軸が南北方向の数学座標系にてとりまとめる（測量座標系は X 軸が南北方向、Y 軸が東西方向である）。

表 5.3.1 測量結果（1 回目）[単位:m]

Table 5.3.1 Measurement results (first) (unit: m)

回数/観測日	計測点	X	Y	Z	標準偏差 (水平位置)	標準偏差 (標高)
1 回目 2013/10/23	P-1	-10,947.393	4,386.021	2,030.498	0.011	0.014
	P-2	-11,693.057	4,377.152	2,345.457	0.011	0.014
	P-3	-11,738.349	3,516.894	2,379.583	0.011	0.014
	P-4	-13,275.472	6,486.738	2,125.205	0.011	0.014

表 5.3.2 測量結果（2 回目）[単位:m]

Table 5.3.2 Measurement results (2nd) (unit: m)

回数/観測日	計測点	X	Y	Z	標準偏差 (水平位置)	標準偏差 (標高)
2 回目 2014/10/29	P-1	-10,947.297	4,386.088	2,030.492	0.012	0.052
	P-2	-11,693.050	4,377.160	2,345.511	0.011	0.049
	P-3	-11,738.317	3,516.892	2,379.663	0.012	0.049
	P-4	-13,275.469	6,486.760	2,125.245	0.012	0.051

表 5.3.3 測量結果（3 回目）[単位:m]

Table 5.3.3 Measurement results (3rd) (unit: m)

回数/観測日	計測点	X	Y	Z	標準偏差 (水平位置)	標準偏差 (標高)
3 回目 2015/8/4	P-1	-10,947.271	4,386.113	2,030.423	0.008	0.038
	P-2	-11,693.059	4,377.169	2,345.476	0.007	0.036
	P-3	-11,738.309	3,516.898	2,379.636	0.007	0.036
	P-4	-13,275.475	6,486.742	2,125.256	0.007	0.037

各測点における各回の差を計算し、移動量を表 5.3.4、表 5.3.5、表 5.3.6 にまとめた。このうち水平方向について 1 回目を原点に固定し、2 回目と 3 回目の移動量と移動方向を図 5.3.5 のグラフに示す。そして、各計測点の位置と、水平方向の 1 回目と 3 回目の移動量と移動方向を図 5.3.6 に示す。

表 5.3.4 1 回目（平成 25 年 10 月 23 日）と 2 回目（平成 26 年 10 月 29 日）の比較

Table 5.3.4 Comparison of 1st (Oct. 23, 2013) and 2nd (Oct. 29, 2014)

計測点	$\Delta X[m]$	$\Delta Y[m]$	$\Delta Z[m]$
P-1	0.096	0.067	-0.006
P-2	0.007	0.008	0.054
P-3	0.032	-0.002	0.080
P-4	0.003	0.022	0.040

\*1 回目と 2 回目の日数間隔：371 日

表 5.3.5 2 回目（平成 26 年 10 月 29 日）と 3 回目（平成 27 年 8 月 4 日）の比較

Table 5.3.5 Comparison of 2nd (Oct. 29, 2014) and 3rd (Aug. 4, 2015)

計測点	$\Delta X[m]$	$\Delta Y[m]$	$\Delta Z[m]$
P-1	0.026	0.025	-0.069
P-2	-0.009	0.009	-0.035
P-3	0.008	0.006	-0.027
P-4	-0.006	-0.018	0.011

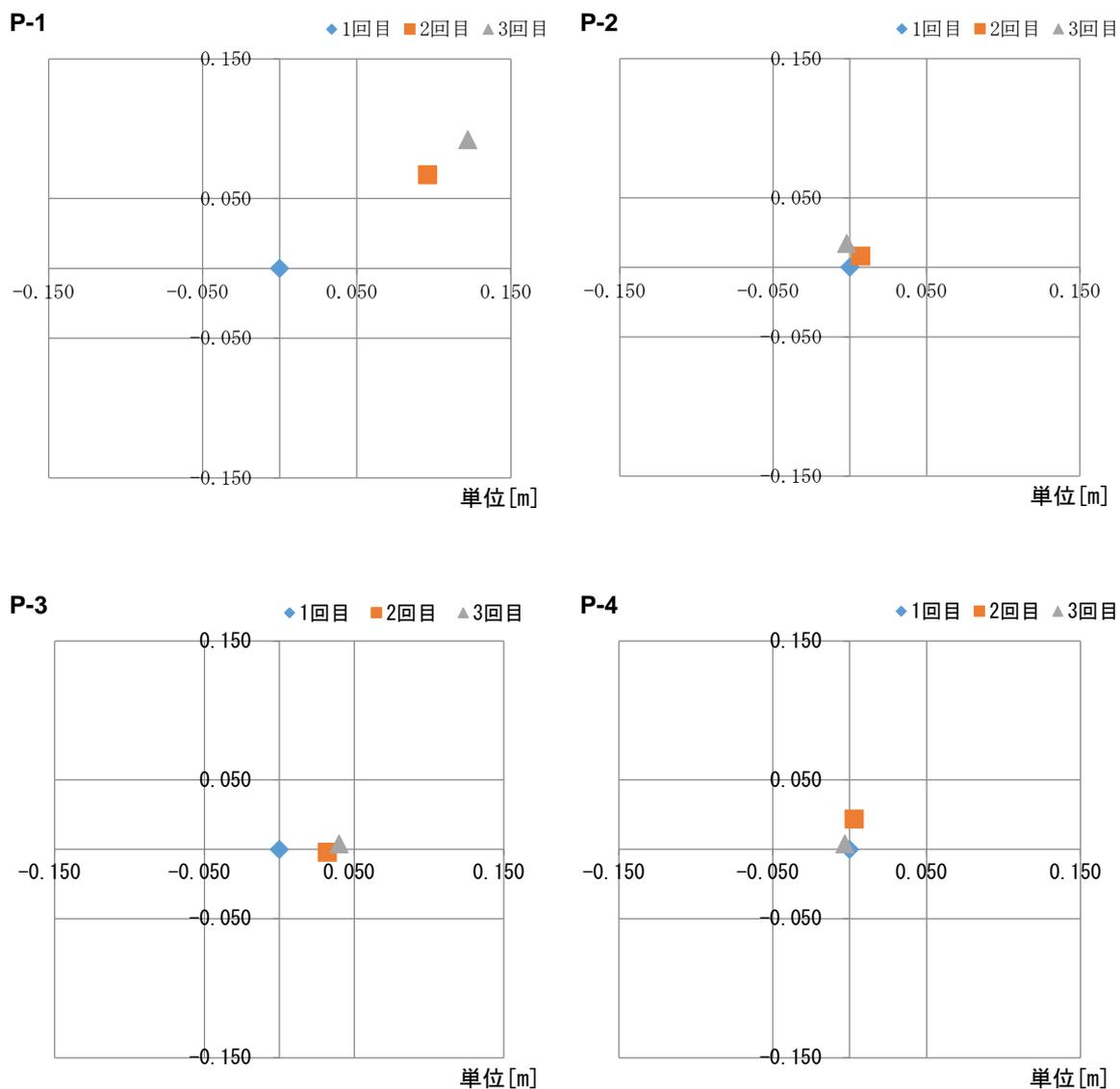
\*2 回目と 3 回目の日数間隔：279 日

表 5.3.6 1 回目（平成 25 年 10 月 23 日）と 3 回目（平成 27 年 8 月 4 日）の比較

Table 5.3.6 Comparison of 1st (Oct. 23, 2013) and 3rd (Aug. 4, 2015)

計測点	$\Delta X[m]$	$\Delta Y[m]$	$\Delta Z[m]$
P-1	0.122	0.092	-0.075
P-2	-0.002	0.017	0.019
P-3	0.040	0.004	0.053
P-4	-0.003	0.004	0.051

\*1 回目と 3 回目の日数間隔：650 日



\*横軸 (X 軸) が東西方向、縦軸 (Y 軸) が南北方向を表す。

図 5.3.5 各計測点の移動量と移動方向

Fig. 5.3.5 Quantity of movement and direction of movement at each measurement point

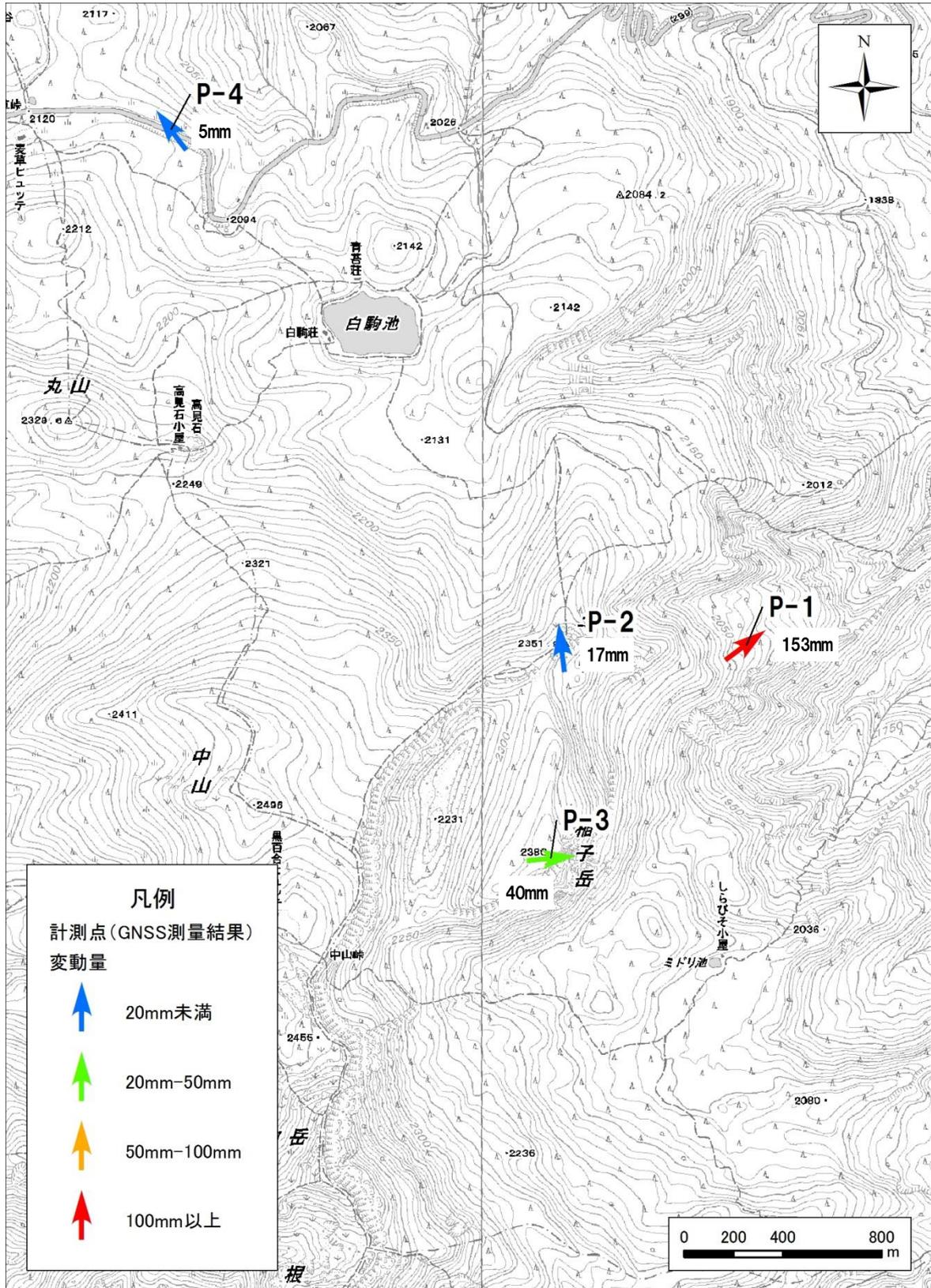


図 5.3.6 各計測点の移動方向と移動量

Fig. 5.3.6 Quantity of movement and direction of movement at each measurement point

## (2) 有意な地表移動かどうかの検討

測量結果の比較によって得られる移動量が有意な値かどうかを判定する基準として、以下のように最大誤差を推定し、判定することを試みた。なお、GNSS 測量は一般的に水平方向よりも鉛直方向の精度が悪く、標準誤差も大きくなることから、判定は水平変位のみを用いて行うこととした。

### 【誤差の考え方】

GNSS 測量において、測量結果の信頼性は標準偏差によって得られる。測量結果が正規分布に従うことを前提として誤差の伝播を考慮すると、 $n$  回目の観測の標準偏差を  $a$ 、 $n+1$  回目の観測の標準偏差を  $b$  とした場合、 $n$  回目と  $n+1$  回目の測量結果の差の標準偏差は、 $\sqrt{a^2 + b^2}$  で表される。

ここで、差の標準偏差の 2 倍の範囲 ( $2 \times \sqrt{a^2 + b^2}$ ) をとった場合、正規分布ではこれ以上の誤差が生じる可能性は約 5% と小さい。そこで、この値を「推定最大誤差」とする。

### 【有意な地表移動の判定基準】

2 時期の測量結果の差が推定最大誤差を超える場合、有意な地表移動であると判定した。

計算した推定最大誤差、水平変位と判定結果を表 5.3.7 から表 5.3.9 に示す。

表 5.3.7 1回目（平成25年10月23日）と2回目（平成26年10月29日）の比較

Table 5.3.7 Comparison of 1st (Oct. 23, 2013) and 2nd (Oct. 29, 2014)

計測点	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	水平変位 [m]	推定最大誤差 (水平) [m]	コメント
P-1	0.096	0.067	0.117	0.033	有意な地表変位が認められる。
P-2	0.007	0.008	0.011	0.031	
P-3	0.032	-0.002	0.032	0.033	
P-4	0.003	0.022	0.022	0.033	

表 5.3.8 2回目（平成26年10月29日）と3回目（平成27年8月4日）の比較

Table 5.3.8 Comparison of 2nd (Oct. 29, 2014) and 3rd (Aug. 4, 2015)

計測点	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	水平変位 [m]	推定最大誤差 (水平) [m]	コメント
P-1	0.026	0.025	0.036	0.029	有意な地表変位が認められる。
P-2	-0.009	0.009	0.013	0.026	
P-3	0.008	0.006	0.010	0.028	
P-4	-0.006	-0.018	0.019	0.028	

表 5.3.9 1回目（平成25年10月23日）と3回目（平成27年8月4日）の比較

Table 5.3.9 Comparison of 1st (Oct. 23, 2013) and 3rd (Aug. 4, 2015)

計測点	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	水平変位 [m]	推定最大誤差 (水平) [m]	コメント
P-1	0.122	0.092	0.153	0.027	有意な地表変位が認められる。
P-2	-0.002	0.017	0.017	0.026	
P-3	0.040	0.004	0.040	0.026	有意な地表変位が認められる。
P-4	-0.003	0.004	0.005	0.026	

### 5. 3. 3 地すべり移動有無の確認結果

判定結果より、P-1は1回目と2回目、2回目と3回目、1回目と3回目の全てにおいて、P-3は1回目と3回目において、有意な地表変位が認められた。測量結果から得られた移動方向は、差分干渉SAR解析の結果や斜面方向と概ね一致している。また、P-2とP-4は、有意な地表変位は認められなかった。これらより、稲子岳付近で計測した各点の地表面の移動状況は、表 5.3.10のようにまとめられる。そのうち、有意な地表面移動が認められたP-1付近とP-3付近の現地写真を写真 5.3.1に示す。

表 5.3.10 稲子岳付近計測の各点の地表移動状況まとめ

Table 5.3.10 Summarization of state of movement of ground surface at each point measured near Mt. Inagodake

計測点	有意な地表移動	地表面の移動状況
P-1	あり	継続的に有意な地表面移動が認められ、計測された移動量は 85.9mm/年であり、計測点の中で最も大きい。
P-2	なし	有意な地表面変動は認められない。
P-3	あり	有意な地表面移動が認められ、計測された移動量は P-1 のおよそ 1/4 程度の 22.5mm/年である。
P-4	なし	(不動点計測) 有意な地表面変動は認められない。

これらの GPS 計測結果を受けて、各担当所管機関で今後の防災対策の検討ができるように、国有林の管理者である森林管理署、及び関係する自治体である長野県、小海町、南牧村に対し、西暦 887 年の災害履歴、DInSAR 結果、GPS 計測結果及び稲子岳周辺が常時微小に移動しているとする判定結果について、2015 年 11 月 6 日に連絡した。

なお、稲子岳付近の国有林の管理者である森林管理署においても、稲子岳付近におけるこの地すべり的な地盤の動きは、未発見・未把握であった。



ニユウから下流 P-1 方向を望む



ニユウから P-3 方向の稲子岳山体を望む

写真 5.3.1 GPS 計測点方向の現地写真

Photo 5.3.1 GPS measurement points on the moving mountains

## 5. 4 地すべり移動候補箇所の現地計測調査の優先度判定

DInSAR 画像から抽出された「地すべり移動候補箇所」は、誤差により、移動の有無に不確実性が有る。このため移動の有無の確定には現地確認が必要である。しかし、全候補箇所について GPS 等により確認することは、費用的に難しい。そこで、DInSAR 画像から抽出された「地すべり移動候補箇所」から、災害対策のため移動有無を現地計測により確認する優先度の判定方法を検討し図 5.4.1 に示した。

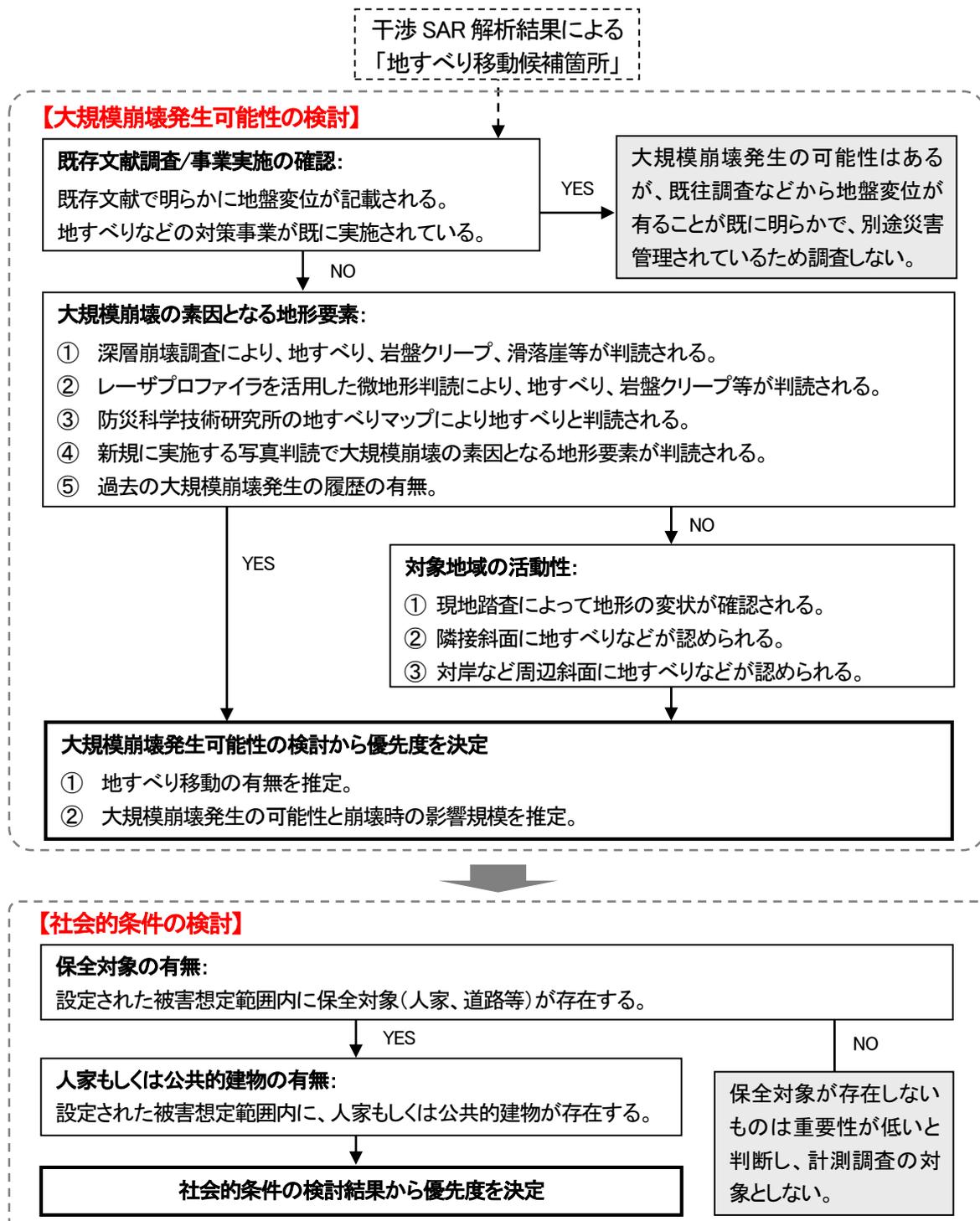


図 5.4.1 地すべり移動候補箇所の現地調査優先度の判定方法

Fig. 5.4.1 Judgment of the field work priority of the landslide movement candidate points

## 5. 5 差分干渉 SAR 画像の観測条件や斜面条件が与える影響の評価

DInSAR 画像により微小移動を抽出する際に、SAR 画像の観測条件や斜面条件が与える影響について検討した。まず、山地を対象として、SAR 画像の観測条件や斜面方向、斜面勾配の違いによる、干渉性の評価を行った。次に、移動抽出における斜面方位別の感度分析を行った。

### 5. 5. 1 山地における干渉性の評価

日本の山地部の大部分は、森林限界より上の標高の高い地域を除き、植生に覆われており、樹木の成長、落葉、積雪等の為に地表面は、季節的な変化が生じる。そしてこれらの地表面の変化は、干渉性の悪化を引き起こす場合があり、DInSAR において影響の大きい重要な要素である。そこでまず、DInSAR 画像作成に使用する 2 時期の SAR データにおける「撮影日間隔」、「軌道間距離」の 2 つの要因について、コヒーレンスを基準とした干渉性への影響を評価した。コヒーレンスは、干渉処理の際、2 画像データから計算した。このコヒーレンスの計算式<sup>8)</sup>を式 5.5.1 に記す。

$$\gamma = \frac{\sum_k s_{1,k} s_{2,k}^*}{\sqrt{\sum_k s_{1,k} s_{1,k}^* \sum_k s_{2,k} s_{2,k}^*}} \quad \text{式 5.5.1}$$

コヒーレンス： $|\gamma|$

干渉位相： $\angle \gamma$

ここで  $s_1, s_2$  は各画像の画素値（複素数）、 $k$  はコヒーレンスを計算する空間窓におけるピクセルのインデックスを表す。

コヒーレンスは 2 画像の相関を表しており、コヒーレンスが高ければ 2 画像の相関は高く、得られた干渉位相の信頼度が高いことを意味する。

ここで、DInSAR 画像の山地における干渉性は、画像ごとに異なる。そこで具体には、「軌道番号 409（長野県周辺域エリア・北行軌道）の SAR データのペアの全ての組み合わせを用いて作成した計 276 画像」の初期干渉画像を対象に、次の手順で山地における干渉性を定量的に評価した。

- ・ 傾斜 10 度以上の場所を山地と定義し、国土地理院公表 10m メッシュ DEM から山地マスクを作成した。この作成例を図 5.5.2 に示す。同じ場所の光学画像を図 5.5.1 に示す。
- ・ 経験上、変動の抽出が可能となるコヒーレンス値が 0.3 以上のピクセルを「干渉性が良好」と定義して、初期干渉画像ごとに山地マスク内でコヒーレンスの値が 0.3 以上（干渉性良好）となるピクセルの合計面積を計算し、「山地マスク全体の面積」と「山地において干渉性が良好な面積」の割合を干渉画像ごとに算出した。

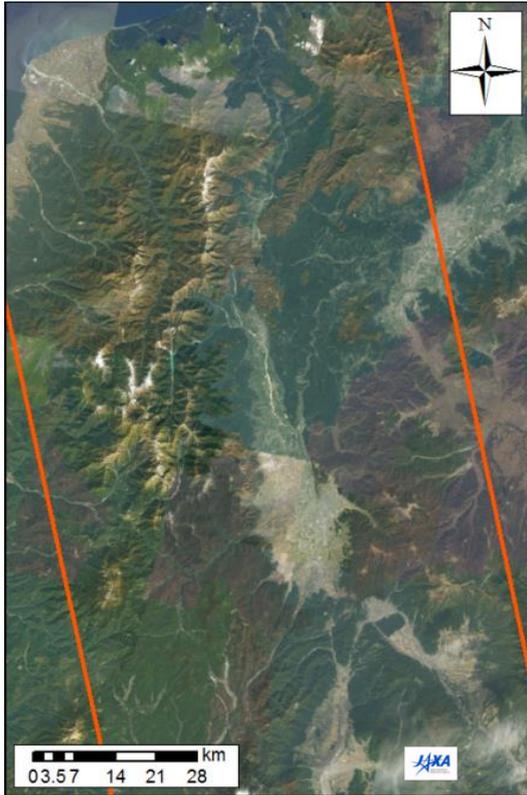


図 5.5.1 光学画像 (ALOS pan-sharpened image)  
Fig. 5.5.1 Optical image (ALOS pan-sharpened image).

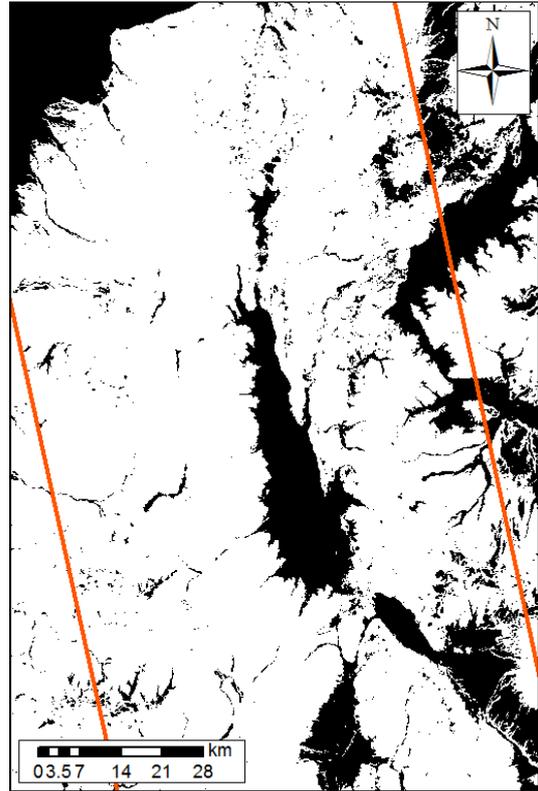


図 5.5.2 マスク画像 (白を山地として定義)  
Fig. 5.5.2 Mask image; white represents mountainous regions.

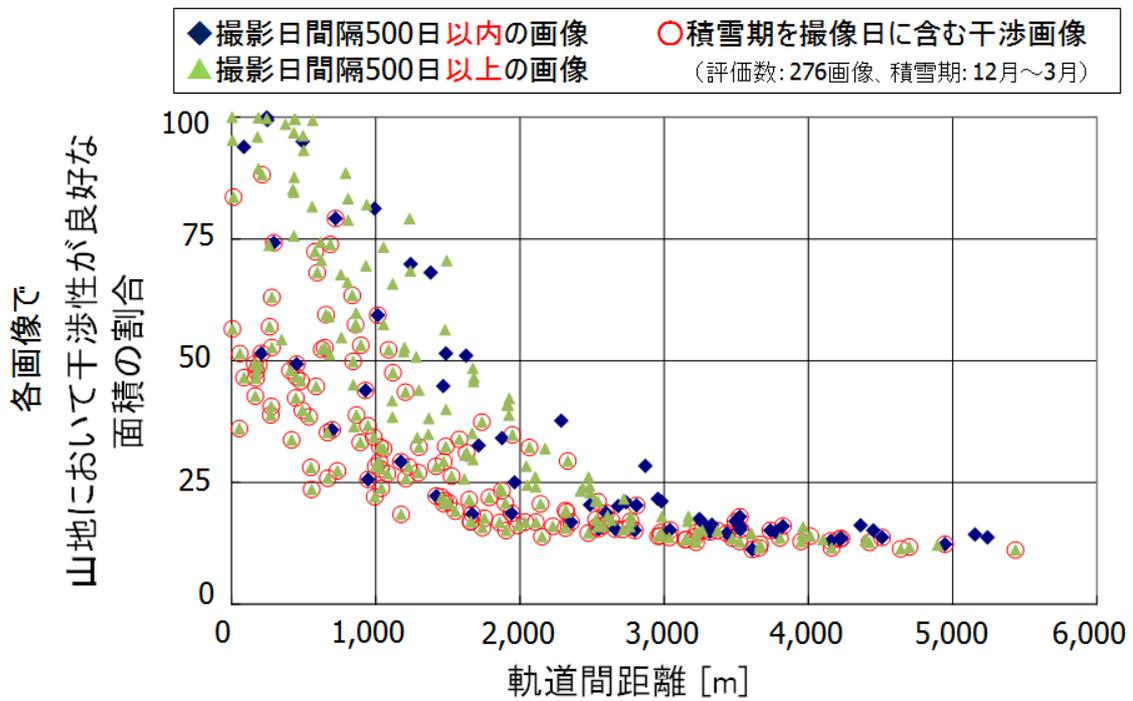


図 5.5.3 軌道間距離と干渉性の関係 (軌道番号 409)

Fig. 5.5.3 Relationship of distance between orbits and interference (orbit No. 409).

これら計 276 画像における干渉解析結果から、「山地 (傾斜 10 度以上の範囲) において干渉性が良

好な面積の割合」と「画像作成で使用したペア SAR データ間の軌道間距離」の関係を調査した結果を図 5.5.3 に示す。そして、図 5.5.3 の表示においては、画像作成で使用したペア SAR データについて、「撮影日間隔 500 日以上か未満か」、「ペアデータのいずれかの撮影時期が 12 月～3 月（積雪期）かどうか」で分類した。この図 5.5.3 から、次の 3 つの傾向がわかる。

- ・ 積雪期の SAR データを使用すると干渉性が低下する。この原因として、積雪によって地表面の状況が大きく変化したことが考えられる。
- ・ ペア SAR データの軌道間距離が小さいほど干渉性が良い。特に 500m 以内だと干渉性が良好である。
- ・ 軌道間距離 500m 以内、かつ無積雪期の場合でも、撮影日間隔が長いと干渉性が低下することがある（間隔が 500 日以上で 1 / 3 程度の頻度）。

### 5. 5. 2 地すべり移動抽出の斜面方位別の感度分析

DInSAR による地すべり移動候補箇所抽出における、斜面方位別の感度分析を実施した。DInSAR で観測する移動は、南北方向の軌道を回る衛星から、東又は西向き斜め下方に照射される SAR の照射方向の、衛星と対象物の差分距離であり、同じ斜面移動量であっても斜面の向きによって観測される移動量は異なる。例えば図 5.5.4 に示すとおり、北行軌道で東向き照射の場合、「東向き斜面」に比べて「南向き斜面」の地表面移動は計測感度が低く、移動量が微小な場合その抽出は困難となることが予想される。

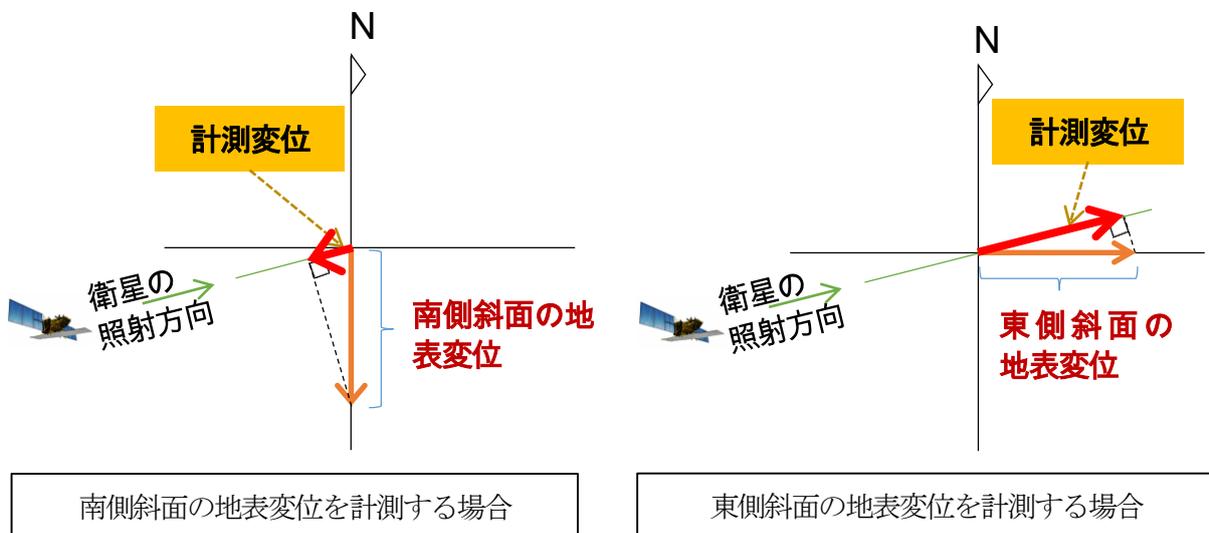


図 5.5.4 斜面方向と干渉 SAR 解析による地表面変動の計測感度

Fig. 5.5.4 Slope direction and sensitivity of ground surface movement measurement determined by using synthetic aperture radar (SAR) interferometry.

そこで、斜面方向と DInSAR による地表移動の計測感度との関係について計算し、**図 5.5.5** に示した。

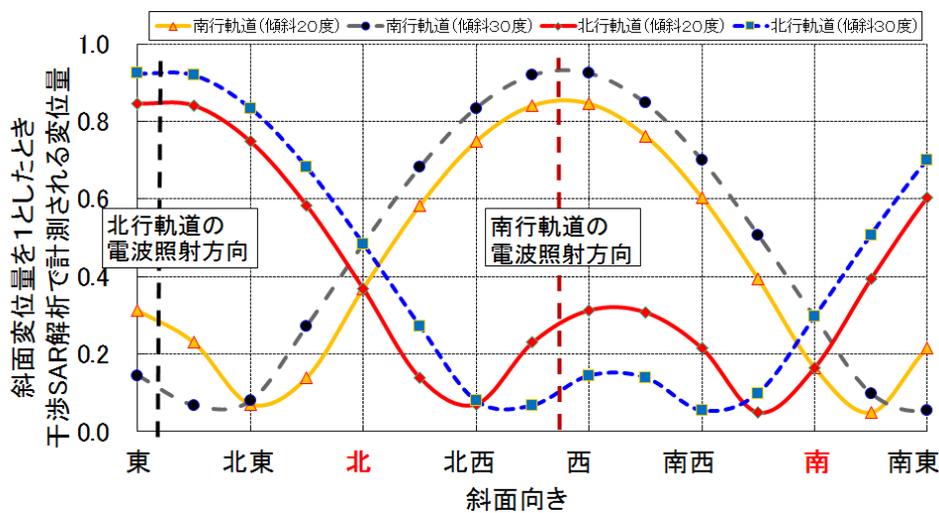


図 5.5.5 斜面方向と ALOS 干渉 SAR 解析による地表変位の計測感度

**Fig. 5.5.5** Measurement sensitivity for ground surface variations based on slope orientation and ALOS interference in synthetic aperture radar (SAR) analysis.

計算における設定値は次のとおり。

- ・ 斜面の移動が 1 cm 発生した場合に、DInSAR で計測する理論上の電波照射方向の移動量を計算。
- ・ 斜面の傾斜は、20 度、30 度の例について計算。移動は斜面に沿って下方に発生するものと仮定。
- ・ 衛星の電波照射方向は、ALOS PALSAR データの代表値として、入射角：38.7 度、入射方向：(北行軌道) 10 度、(南行軌道) 170 度 としている。

**図 5.5.5** から一般に、「北行軌道で東向き照射」の場合、「東向き斜面」に比べて、「北西向き斜面」と「南西向き斜面」は地表面移動の計測感度が低い。「南行軌道で西向き照射」の場合、「西向き斜面」に比べて、「南東向き斜面」と「北東向き斜面」は地表面移動の計測感度が低い。よって、DInSAR の両側から照射の 2 画像を考えると、南北方向は、地表面移動の計測感度が低い。そこで、南北方向の移動量が微小な場合、その地すべりの抽出が困難となると予想される。このことから、「地すべり移動候補箇所」を抽出できないエリアにも、地すべりが存在する可能性がある。

## 5. 6 本章のまとめ

ALOS PALSAR の SAR 画像から L バンド DInSAR 画像を作成して微小移動地すべりを探索する手法を試行し、その移動有無の確認を試みた。さらに、SAR 画像の観測条件や斜面条件が与える影響を評価した。この結果、DInSAR により長野県稲子岳で将来大規模土砂災害が発生するおそれがある箇所を抽出できたほか、地すべり土塊の移動範囲の推定にも有効性があることが示唆された。また一方でその限界や課題も確認できた。

本章の研究成果のまとめは次のとおりである。

- ・ DInSAR は、ALOS PALSAR で移動量が数 cm 以上、面積が概ね 2 万 $\text{m}^2$ 以上 (約 5 グリッド 150m $\times$ 150m 程度) の斜面変位箇所の移動有無の広域把握に有効である。

- DInSAR は、「周囲を平地で囲まれた独立峰の斜面」、「河川屈曲部に隣接する斜面」の地形において、斜面変位の不正解抽出が生じやすい。これらの条件以外にも不正解抽出が生じることが有り、斜面変位有無の確認のために現地調査や現地計測が必要である。
- DInSAR 画像から地すべり移動候補箇所を抽出した長野県稲子岳箇所は、カルデラ状の地形が見られ、過去に発生した大規模崩壊の発生源に隣接していることに加え、この災害の推定土砂堆積域には現在多くの人家が存在する。そこで、微小移動の有無を確認するために GPS 移動杭計測を実施した。その結果、稲子岳山体付近の 2 箇所の計測点で有意な地表面移動を確認した。
- 差の標準偏差の 2 倍の範囲 ( $2 \times \sqrt{a^2 + b^2}$ ) をとった場合、正規分布ではこれ以上の誤差が生じる可能性は約 5% と小さい。そこで、微小移動の有無を確認するための GPS 移動杭計測では、この値を「推定最大誤差」とした。そして、GPS 移動杭計測では、2 時期の測量結果の差が推定最大誤差を超える場合、有意な地表移動であると判定した。
- DInSAR 画像から抽出された「地すべり移動候補箇所」から、災害対策のため移動有無を現地計測により確認する優先度の判定方法を提案した。
- ペア SAR データに積雪期の SAR データを使用すると干渉性が低下する。この原因として、積雪によって地表面の状況が大きく変化したことが考えられる。
- ペア SAR データの軌道間距離が小さいほど干渉性が良い。特に 500m 以内だと干渉性が良好である。
- ペア SAR データの軌道間距離が 500m 以内、かつ無積雪期の場合でも、撮影日間隔が長いと干渉性が低下することがある（間隔が 500 日以上で 1 / 3 程度の頻度）。
- 一般に、「北行軌道で東向き照射」の場合、「東向き斜面」に比べて、「北西向き斜面」と「南西向き斜面」は地表面移動の計測感度が低い。「南行軌道で西向き照射」の場合、「西向き斜面」に比べて、「南東向き斜面」と「北東向き斜面」は地表面移動の計測感度が低い。
- DInSAR の両側から照射の 2 画像を考えると、南北方向は、地表面移動の計測感度が低い。そこで、南北方向の移動量が微小な場合、その抽出が困難となると予想される。

## 【引用文献】

- 1) 国土地理院測地部宇宙測地課：だいち 2 号による日本全国地盤変動図の公表、第 1 回土砂ワーキンググループ会合、資料 6、2015
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会（2011 年 10 月 7 日）：「合成開口レーダーによる地震活動に関連する地殻変動観測手法」報告書 本編、p8、<http://www.jishin.go.jp/main/eisei/>
- 3) 防災科学技術研究所(2007)：地すべり地形分布図データベース、  
<http://lswb1.ess.bosai.go.jp/index.html>
- 4) 北陸地方整備局松本砂防事務所（2013）：金山沢不安定土塊対策概略検討業務報告書、図 3.3.1
- 5) 北陸地方整備局松本砂防事務所（2013）：金山沢不安定土塊対策概略検討業務報告書、図 4.1.9,図 4.1.11
- 6) 国土地理院（2004）：宇宙から、地球の変動を見る。、  
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/qanda/qanda.html>
- 7) 水山高久監修、森俊勇・坂口哲夫・井上公夫編著（2012）：日本の天然ダムと対応策 改訂版、一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構、2012 年 9 月、p36、  
<http://www.sff.or.jp/content/uploads/full.pdf>
- 8) 飛田幹男、島田政信、藤原みどり、雨貝知美、和田弘人、藤原智、松坂茂（2006）：「InSAR の干渉条件」、平成 18 年 10 月 5,6 日、URL:[http://www.eri.utokyo.ac.jp/KOHO/HIGHLIGHT/KYODO/ERI\\_2006-W-02/H18\\_8\\_tobita.pdf](http://www.eri.utokyo.ac.jp/KOHO/HIGHLIGHT/KYODO/ERI_2006-W-02/H18_8_tobita.pdf)

## 第6章 干渉 SAR の 2.5 次元解析で抽出した地震の地表面変位と崩壊分布の関係

### 6.1 研究概要

大規模地震等の発生後が発生した場合、地盤条件等が変化し通常時よりも少ない降雨で土砂災害が発生する可能性があることから、県や国は、「土砂災害警戒情報における地震等発生後の暫定基準の設定」<sup>1)</sup>や、「土砂災害危険箇所等の緊急点検」を実施する。そしてこの対象エリアは、現在、主に震度を基準として「震度5強以上が観測された市町村」等と決められるが、地盤の「緩み領域」に対応したより適切なエリア設定手法が望まれる。そこで土砂崩壊が多く発生した2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震(図6.1.2)を対象として、広域微小地盤変位を把握する干渉 SAR 画像の2方向の画像を合成処理する2.5次元解析を行い、地震による「地表面変位量の分布」をより誤差が少なくなるように再現すると共に、地震に伴うこの「地表面変位量の分布」と「崩壊発生分布」の関係性を把握した。

本研究では地震による地表面変位をより詳細に把握するため、電子基準点の計測結果を併用して、東西方向、南北方向、垂直方向の3方向の地表面変位量を把握した。ここで、解析対象エリアは、図6.1.1に示すエリアとした。

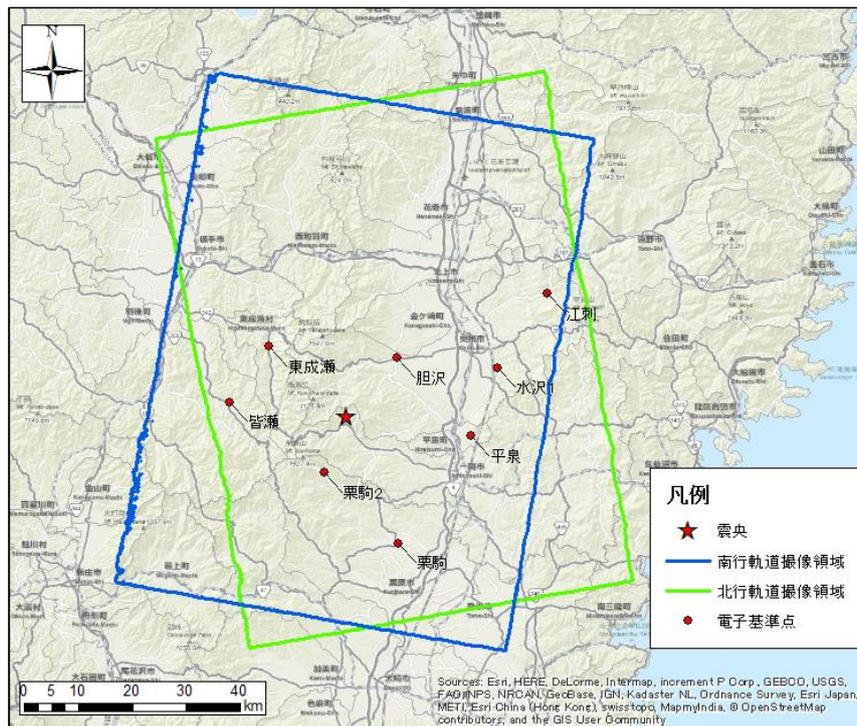


図 6.1.1 解析対象エリア

Fig. 6.1.1 Area analyzed

### 6. 1. 1 岩手・宮城内陸地震の震度分布

2008年岩手・宮城内陸地震の震度分布は、図 6.1.2 に示すとおりである。

#### 震源要素<sup>2)</sup>

- ・震源時：2008年6月14日08時43分45秒
- ・北緯：39度01.7分
- ・東経：140度52.8分
- ・深さ：8km
- ・規模：M7.2
- ・逆断層

最大震度：6強

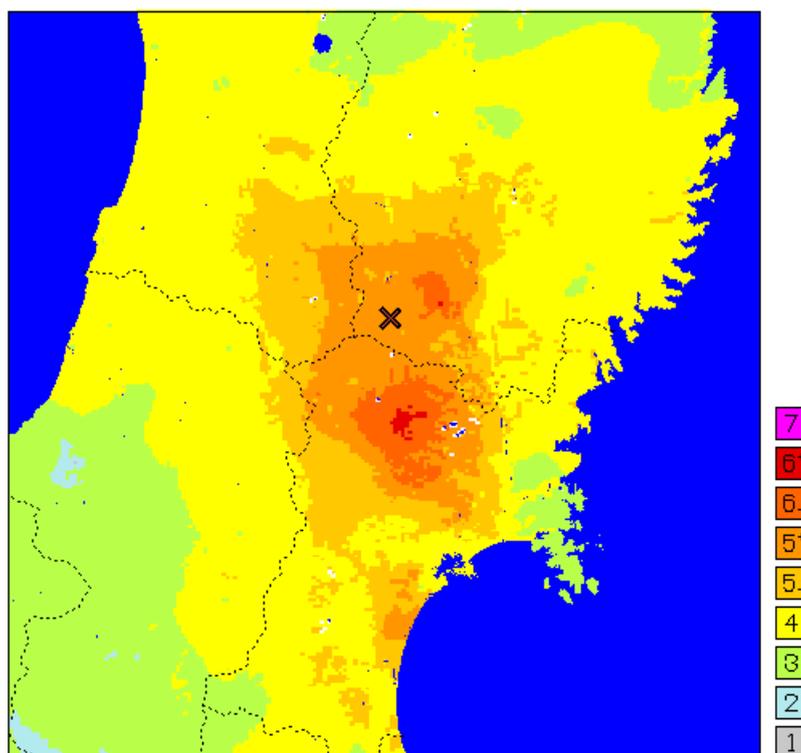


図 6.1.2 2008年岩手・宮城内陸地震の推計震度分布図<sup>2)</sup>

Fig. 6.1.2 Estimated seismic intensity distribution during the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake

(出典：平成20年8月26日 気象庁地震津波監視課長：平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の概況とその特徴 より)

### 6. 1. 2 検討の手順

地震による地表面変位と崩壊地分布との関係を把握するためには、より正確な地表面変位量の図化が必要である。この検討の手順は、ALOS PALSAR データを用いて、まず、図 6.1.5 のフローに示す手順により、地震による地表面変位をより正確に再現した地表面変位量図を作成した。ここで、衛星視線方向への位置変動量を算出するため、Branch Cut 法<sup>3)</sup> と Minimum Cost Flow 法<sup>4)</sup> の2種のアンラッピング処理法を用いた。そして、作成した地表面変位量図を基に、図 6.1.6 の手順により、地震による地表面変位と地震で発生した崩壊地分布の関係を検討した。また、使用したソフトウェアは、GAMMA SAR、ArcGIS である。

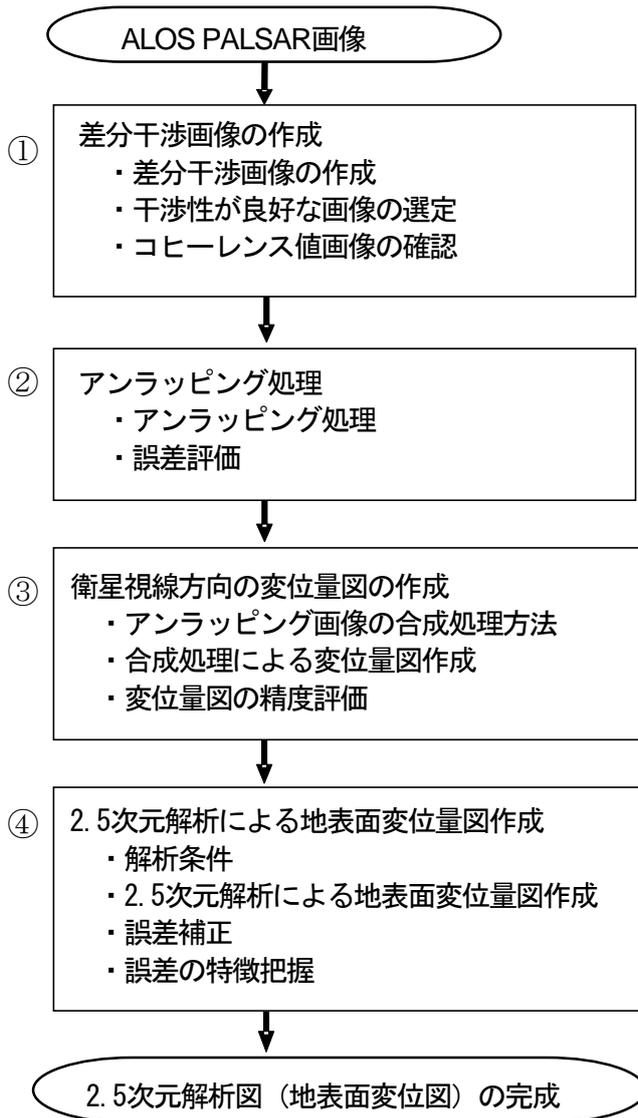


図 6.1.5 干渉 SAR による地震時の地表面変位の再現フロー

Fig. 6.1.5 Flow Chart of reproduction of ground surface displacement during an earthquake by SAR interferometry

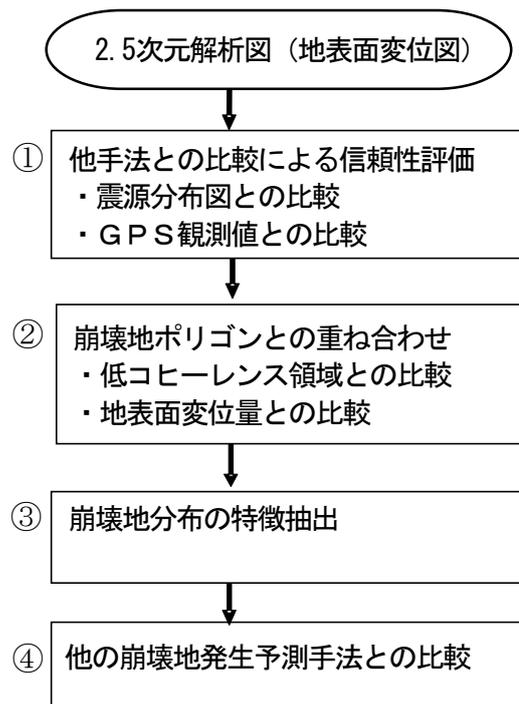


図 6.1.6 地震による地表面変位の特徴抽出フロー

Fig. 6.1.6 Earthquake induced ground surface displacement characteristics abstraction flow chart

## 6. 2 差分干渉画像の作成

### 6. 2. 1 差分干渉画像処理に用いたシーン

#### ・シーン諸元

地震による地表面変位量を把握するためには、解析に用いる地震前後の干渉性が良好な差分干渉画像が必要である。そこで、岩手・宮城内陸地震を対象とした干渉 SAR 解析を実施するため、当該地域を含む ALOS PALSAR 画像のうち、軌道間距離などから、干渉性が良好な差分干渉画像を作成できる可能性があると考えられる地震前後の ALOS PALSAR 画像を表 6.2.1 のとおり選定した。また、使用したデータは、地震前後の Lバンド ALOS PALSAR 高分解能モード Level 1.0 である。

表 6.2.1 検討に使用した ALOS PALSAR データ (岩手・宮城内陸地震)

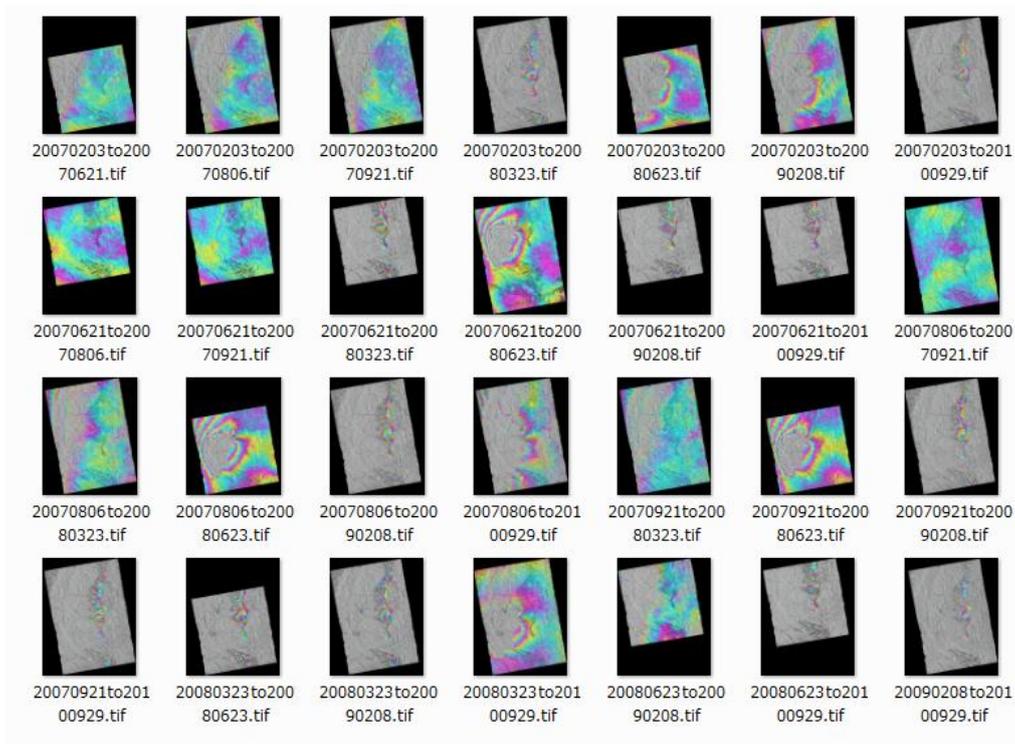
Table 6.2.1 ALOS PALSAR data used for the study (the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake)

軌道方向	軌道番号	フレーム番号	観測日
北行軌道	402	0770	2007/2/3
			<b>2007/6/21</b>
			<b>2007/8/6</b>
			<b>2007/9/21</b>
			2008/3/23
			<b>2008/6/23</b>
			2009/2/8
			2010/9/29
南行軌道	057	2830	<b>2007/7/14</b>
			<b>2007/8/29</b>
			2007/10/14
			2008/1/14
			<b>2008/5/31</b>
			<b>2008/7/16</b>
			2009/10/19
			<b>2009/12/4</b>
			2010/6/6
			2010/7/22
			<b>2010/10/22</b>
2011/1/22			

※最終的に解析に使用した画像の観測日を太字で示す。

## 6. 2. 2 差分干渉画像の作成

表 6.2.1 に示す各観測日の ALOS PALSAR 画像を地震前後のペアとなるように組み合わせるとともに、ルック数を、レンジ方向、アジマス方向にそれぞれ  $6 \times 9$  と設定して、差分干渉画像を作成した。なお、作成した差分干渉画像の 1 ピクセルの大きさは約  $30\text{m} \times 30\text{m}$  である。干渉性が良好な画像を選定するために作成した差分干渉画像は、図 6.2.1 に示す北行軌道 28 枚、図 6.2.2 に示す南行軌道 66 枚である。



Analysis by NILIM from ALOS raw data of JAXA, METI

図 6.2.1 差分干渉画像 (北行軌道 軌道番号 402)

Fig. 6.2.1 Differential Interferogram (ascending orbit, Orbit No. 402)

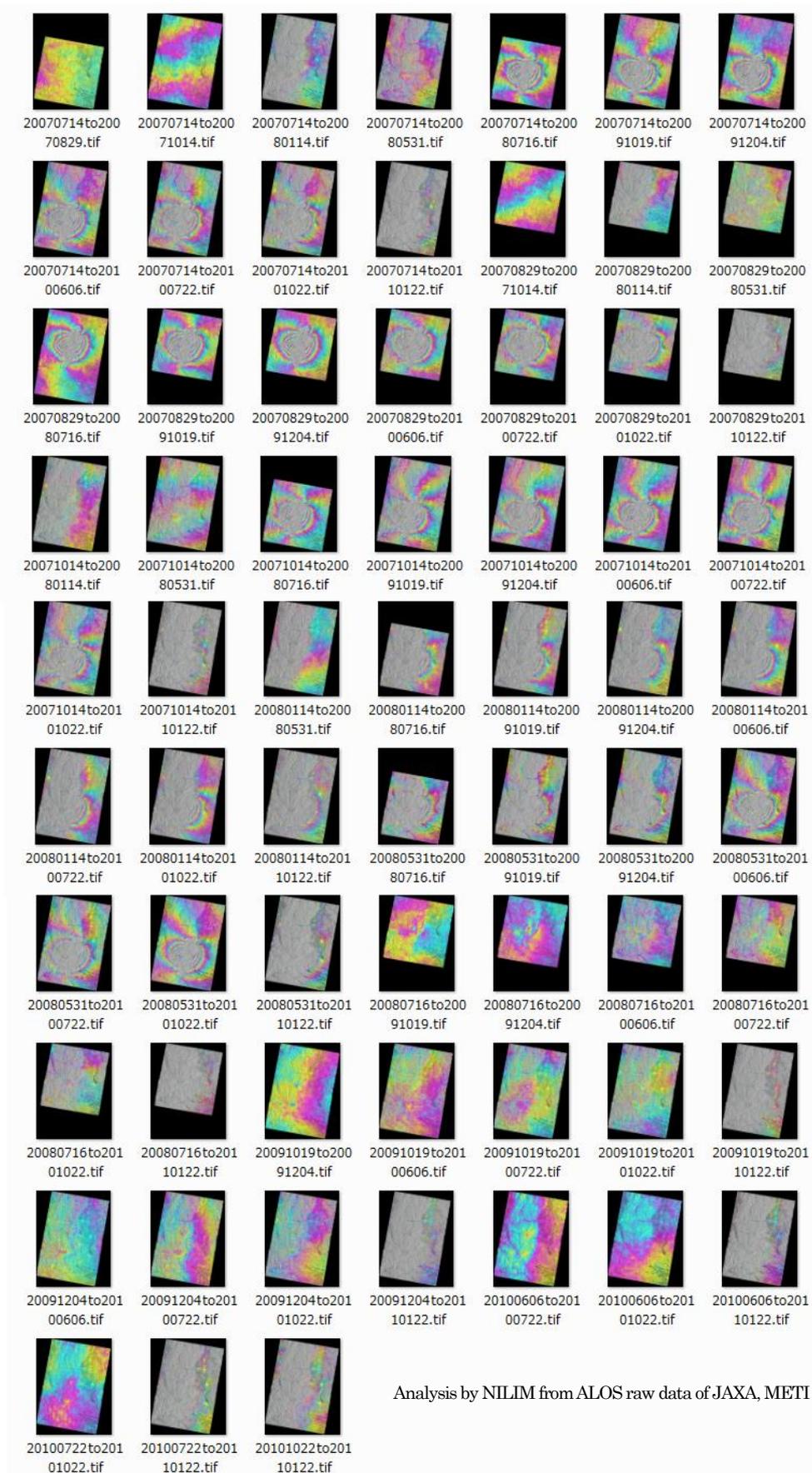


図 6.2.2 差分干渉画像 (南行軌道 軌道番号 057)

Fig. 6.2.2 Differential Interferogram (descending orbit, Orbit No. 057)

作成した各差分干渉画像の干渉性を確認して、解析に用いる干渉性が良好な差分干渉画像を北行軌道 3 枚、南行軌道 4 枚、それぞれ選定した。選定した差分干渉画像で使用した ALOS PALSAR 画像ペアの撮影日を表 6.2.2 に示す。

表 6.2.2 干渉 SAR 解析で使用する画像の組み合わせ

Table 6.2.2 Combination of images used for Interferometric SAR

軌道方向	画像ペア(撮像日)	
北行軌道	2007/6/21	2008/6/23
	2007/8/6	2008/6/23
	2007/9/21	2008/6/23
南行軌道	2007/7/14	2008/7/16
	2007/8/29	2008/7/16
	2007/8/29	2009/12/4
	2008/5/31	2010/10/22

表 6.2.2 で選定したペアについて、干渉処理の際、2 画像データから、コヒーレンスを計算して、コヒーレンス値画像を作成した。コヒーレンスの計算式を式 6.2.1 に記す<sup>5)</sup>

$$\gamma = \frac{\sum_k s_{1,k} s_{2,k}^*}{\sqrt{\sum_k s_{1,k} s_{1,k}^* \sum_k s_{2,k} s_{2,k}^*}} \quad \text{式 6.2.1}$$

コヒーレンス： $|\gamma|$

干渉位相： $\angle\gamma$

ここで $s_1, s_2$ は各画像の画素値（複素数）、 $k$ はコヒーレンスを計算する空間窓におけるピクセルのインデックスを表す。コヒーレンスは 2 画像の相関を表しており、コヒーレンスが高ければ 2 画像の相関は高く、得られた干渉位相の信頼度が高いことを意味する。

選定した表 6.2.2 の ALOS PALSAR 画像ペアを用いて作成した、差分干渉画像及びコヒーレンス値画像を図 6.2.3 ~ 図 6.2.16 に示す。

(1) 北行軌道

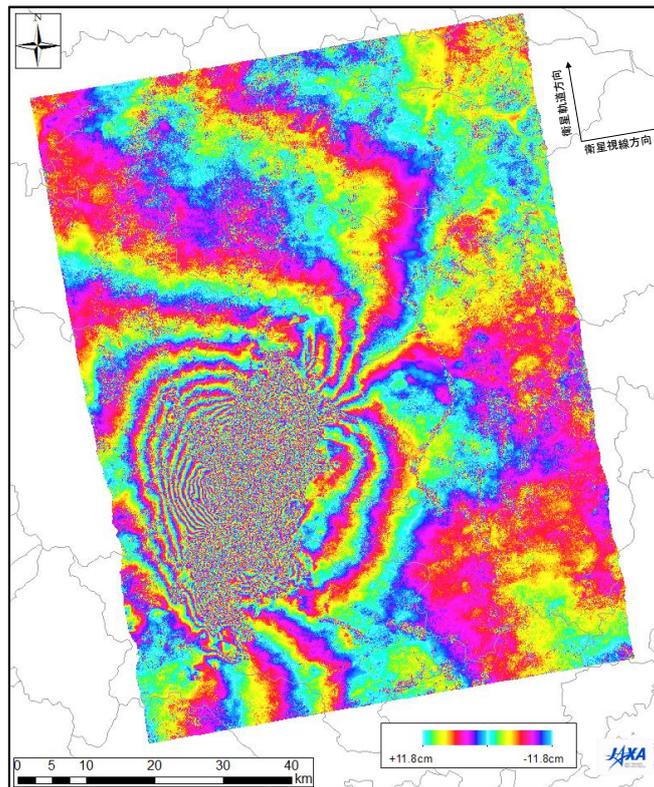


図 6.2.3 干渉縞 : 2007/6/21 と 2008/6/23 のペア

Fig. 6.2.3 Differential Interferogram: June 21, 2007 and June 23, 2008

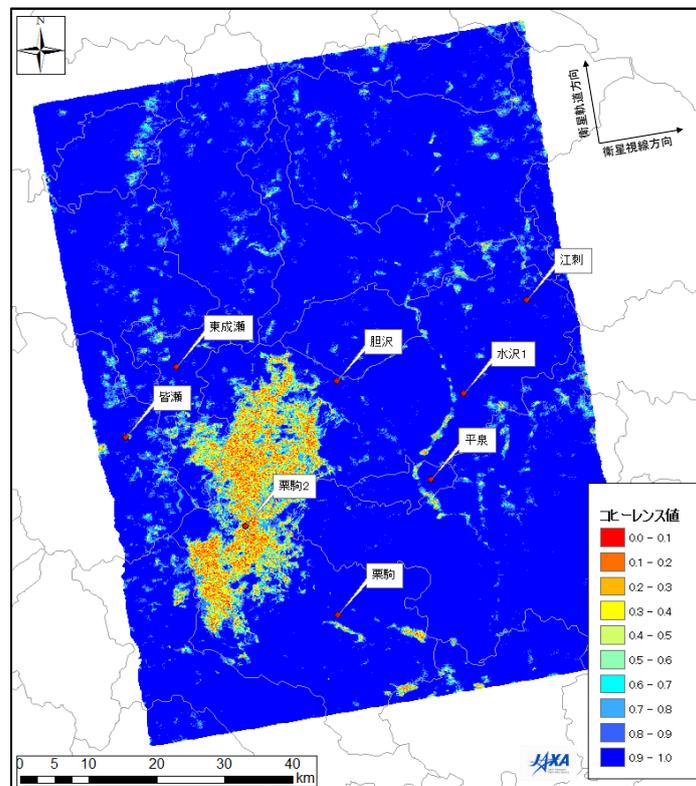


図 6.2.4 コヒーレンス値 : 2007/6/21 と 2008/6/23 のペア

Fig. 6.2.4 Coherence: June 21, 2007 and June 23, 2008

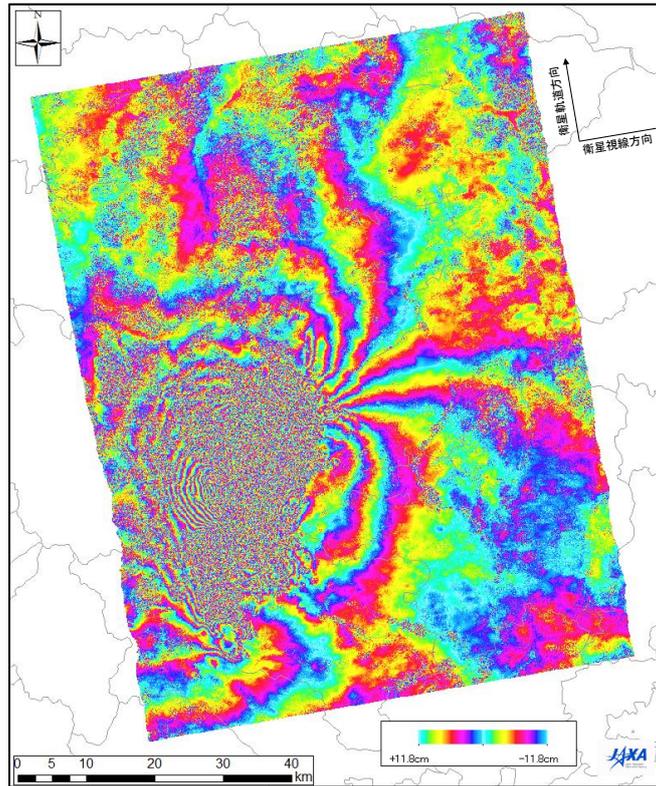


図 6.2.5 干渉縞 : 2007/8/6 と 2008/6/23 のペア

Fig. 6.2.5 Differential Interferogram: August 6, 2007 and June 23, 2008

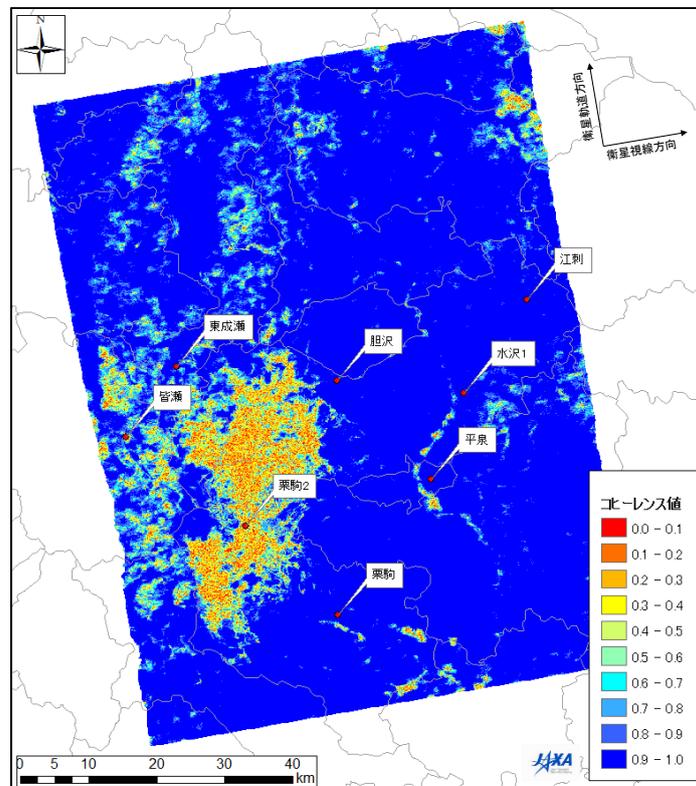


図 6.2.6 コヒーレンス値 : 2007/8/6 と 2008/6/23 のペア

Fig. 6.2.6 Coherence: August 6, 2007 and June 23, 2008

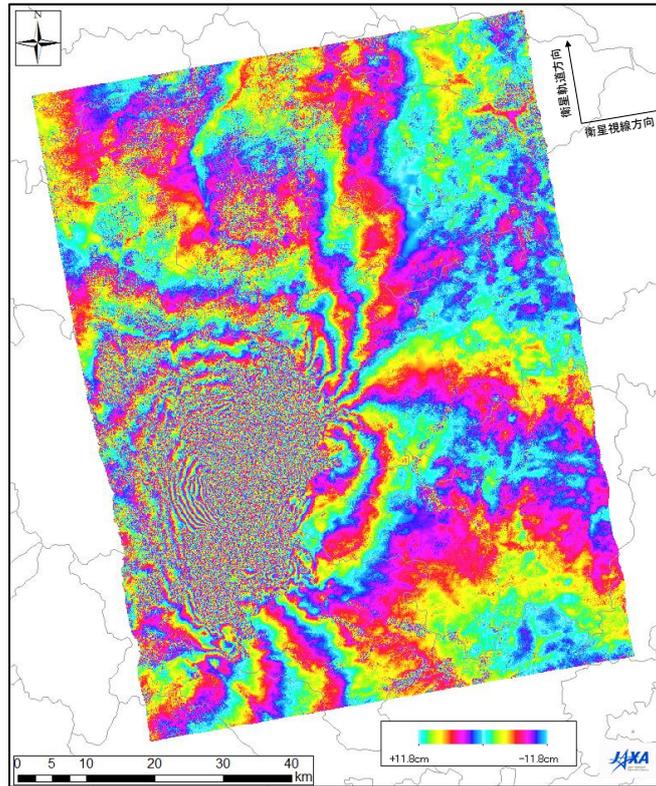


図 6.2.7 干渉縞 : 2007/9/21 と 2008/6/23 のペア

Fig. 6.2.7 Differential Interferogram: September 21, 2007 and June 23, 2008

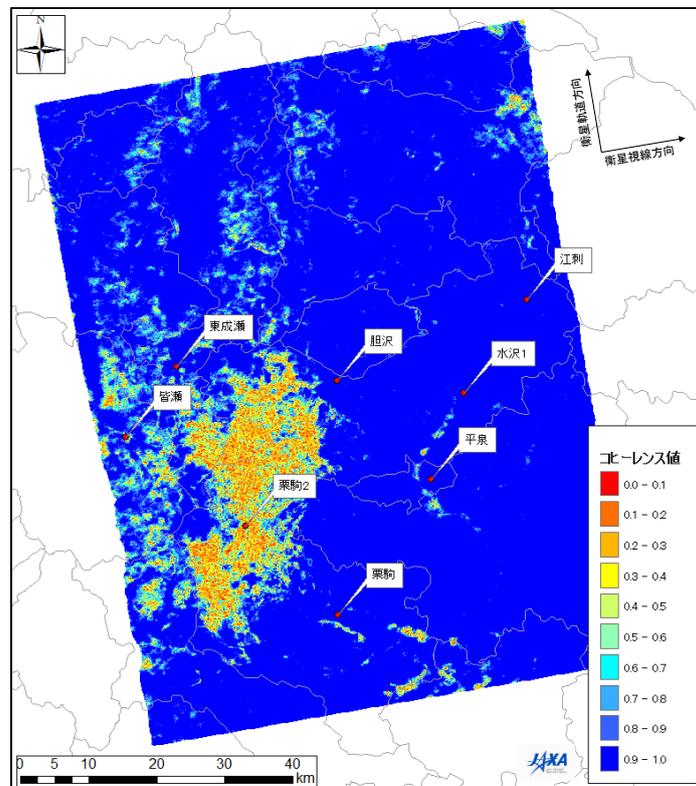


図 6.2.8 コヒーレンス値 : 2007/9/21 と 2008/6/23 のペア

Fig. 6.2.8 Coherence : September 21, 2007 and June 23, 2008

(2) 南行軌道

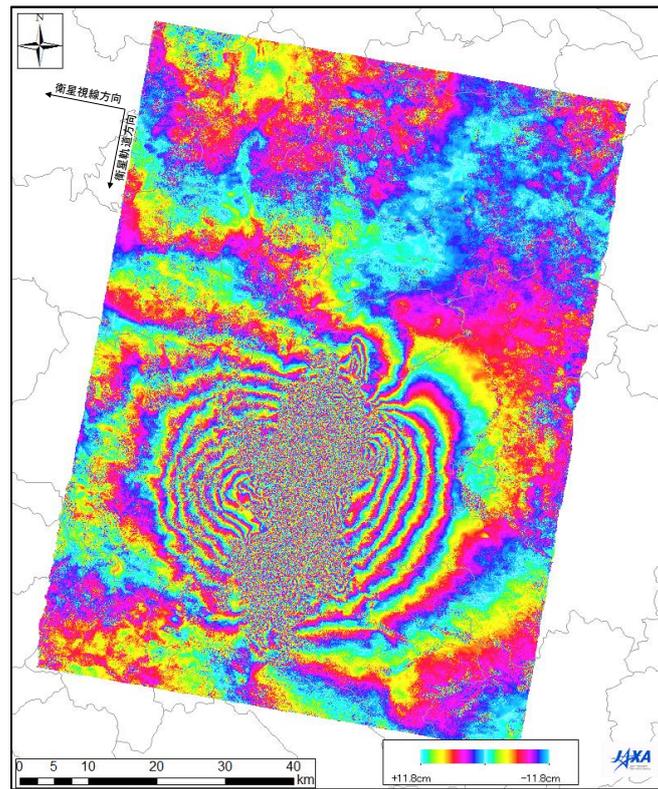


図 6.2.9 干渉縞 : 2007/7/14 と 2008/7/16 のペア

Fig. 6.2.9 Differential Interferogram: July 14, 2007 and July 16, 2008

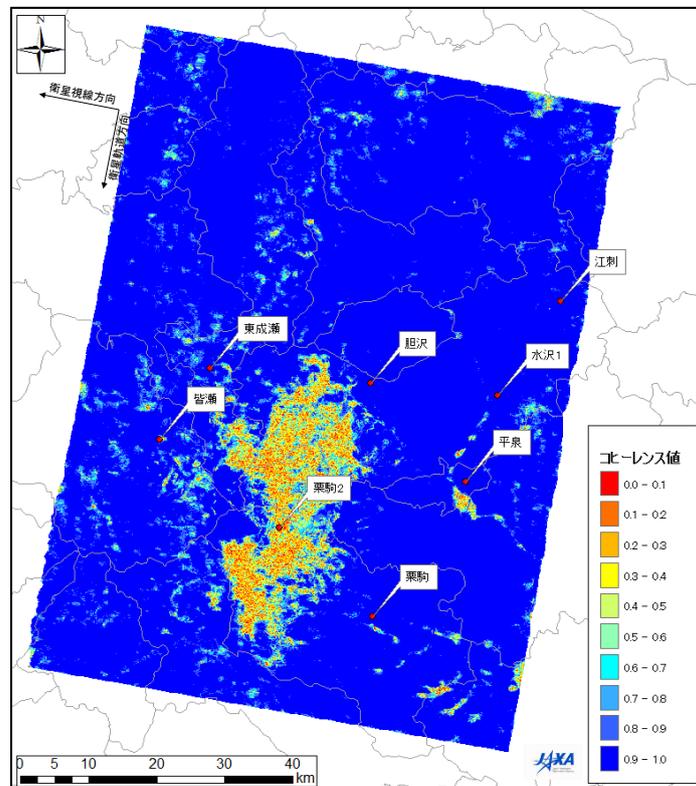


図 6.2.10 コヒーレンス値 : 2007/7/14 と 2008/7/16 のペア

Fig. 6.2.10 Coherence: July 14, 2007 and July 16, 2008

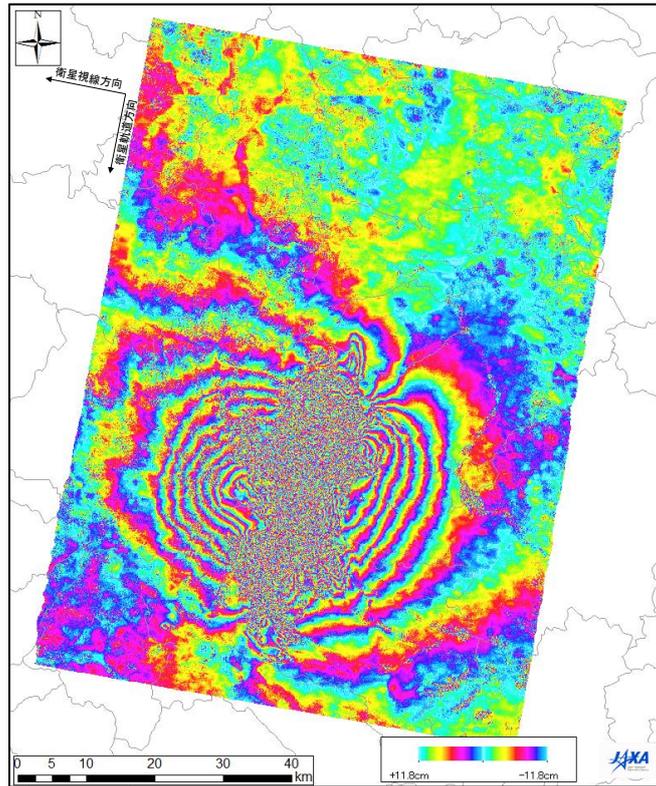


図 6.2.11 干渉縞 : 2007/8/29 と 2008/7/16 のペア  
 Fig. 6.2.11 Differential Interferogram: August 29, 2007 and July 16, 2008

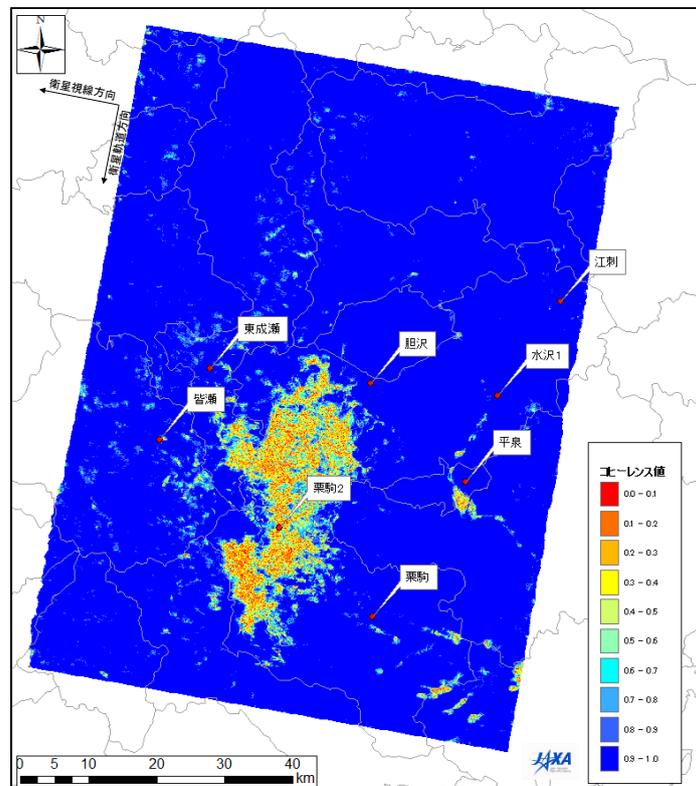


図 6.2.12 コヒーレンス値 : 2007/8/29 と 2008/7/16 のペア  
 Fig. 6.2.12 Coherence : August 29, 2007 and July 16, 2008

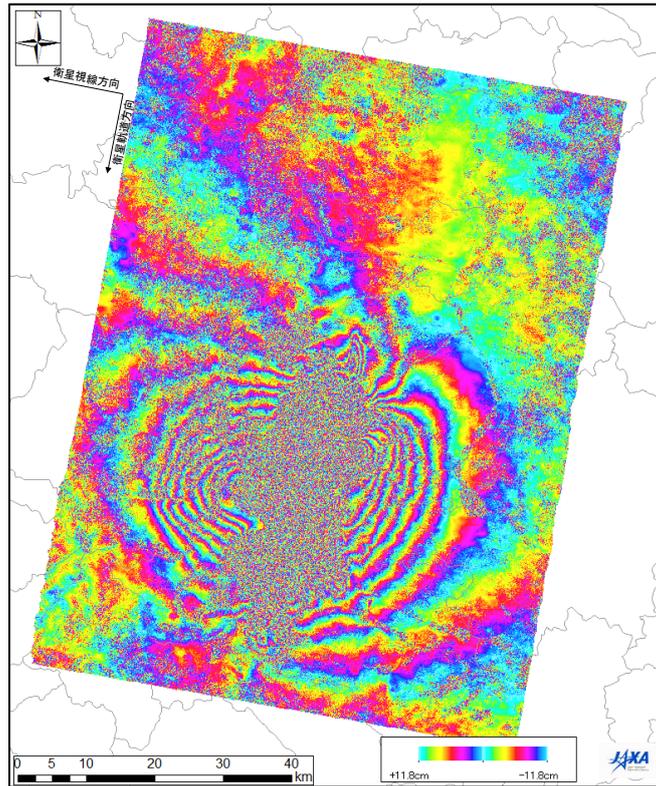


図 6.2.13 干渉縞 : 2007/8/29 と 2009/12/4 のペア

Fig. 6.2.13 Differential Interferogram: August 29, 2007 and December 4, 2009

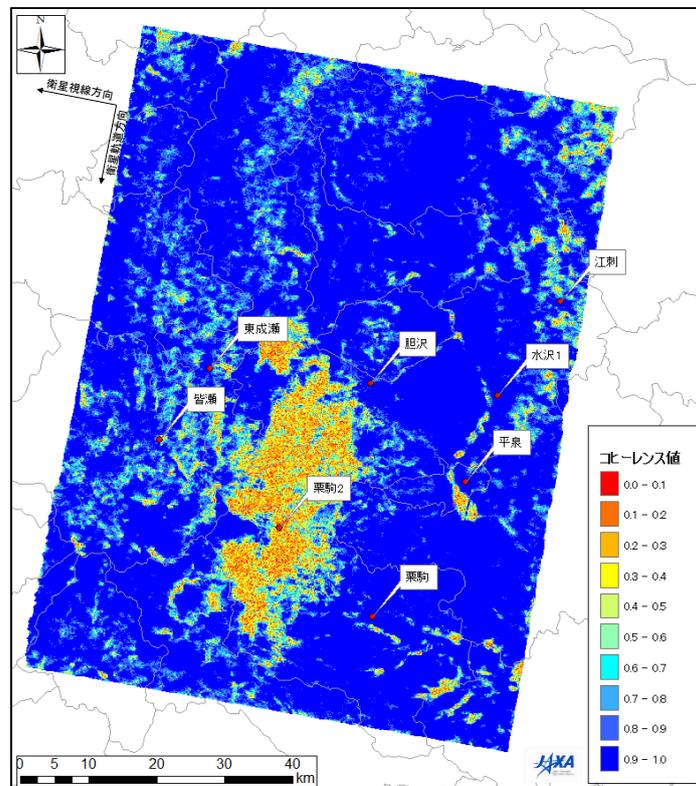


図 6.2.14 コヒーレンス値 : 2007/8/29 と 2009/12/4 のペア

Fig. 6.2.14 Coherence: August 29, 2007 and December 4, 2009

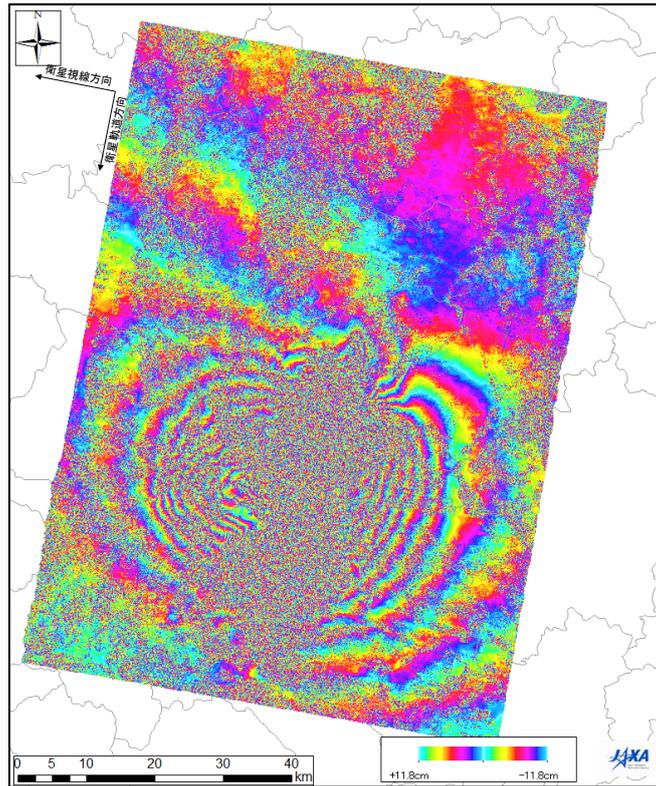


図 6.2.15 干渉縞 : 2008/5/31 と 2010/10/22 のペア

Fig. 6.2.15 Differential Interferogram: May 31, 2008 and October 22, 2010

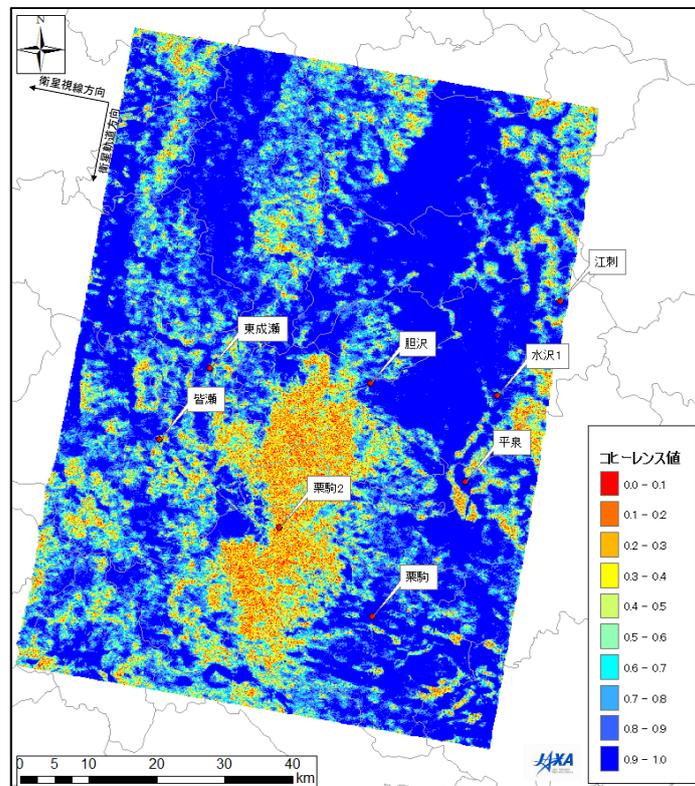


図 6.2.16 コヒーレンス値 : 2008/5/31 と 2010/10/22 のペア

Fig. 6.2.16 Coherence : May 31, 2008 and October 22, 2010

### 6. 2. 3 干渉性評価

干渉縞、コヒーレンス値画像からわかるように震央付近の領域ではかなり干渉性が悪い。また、干渉させるペア画像の組み合わせによっては、干渉性に違いがみられ、特に南行軌道の 2007/8/29 と 2009/12/4 のペアと 2008/5/31 と 2010/10/22 のペアにおいては干渉性が低い領域が多い。これは撮像時期の間隔が他の組み合わせではほぼ 1 年であるのに対し、2 年 4 か月と長く、該当する地震以外の位置変動の影響が反映されたものと推察される。また、干渉縞とコヒーレンス値の対応から、干渉縞ができるコヒーレンス値はおおよそ 0.7 以上であることが確認できる。

## 6. 3 アンラッピング処理

### 6. 3. 1 アンラッピング処理 (Unwrapping)

位相差は 2 つの画像間での変位に比例するが、位相は  $2\pi$  の周期をもつため、観測されるのは  $2\pi$  の剰余のみである。これを「位相がラップされている」と言う。そこで、実際の位置変動量を知るためには、観測された位相差から真の位相差を求めること、すなわち「位相をアンラップする」必要がある。

アンラップ処理は、

1. すべてのピクセルの値が  $(-\pi, \pi)$  の範囲にある
2. 隣接したピクセルで位相が滑らかに連続している

という仮定の下で、真の位相差が既知である参照点を用いて行われる。

今回作成した差分干渉画像 7 ペアに対して、以下の概説に示す、Branch Cut 法<sup>3)</sup>と Minimum Cost Flow 法<sup>4)</sup>の 2 種のアンラッピング処理方法をそれぞれ実施して、「衛星視線方向への変位量」を算出した。

図 6.2.3～図 6.2.16 で示したように、震央付近の位置変動が大きいため、縞が不連続である。そこで、Branch Cut 法と Minimum Cost Flow 法は共に、各ピクセル値の信頼性を表す指標としてコヒーレンスを用いた。アンラッピングの概念を図 6.3.1 に示す。干渉縞は  $\pm\pi$  の範囲であり、不連続となる。干渉縞を位置変動量に変換するため、これを連続となるように変換する。

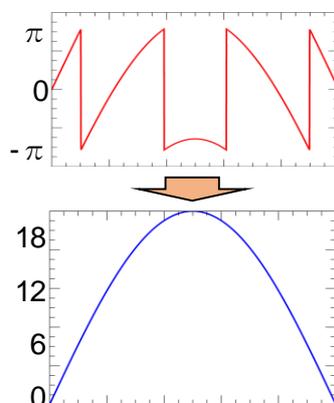


図 6.3.1 アンラッピングの概念

Fig. 6.3.1 Concept of unwrapping

## (1) アンラッピング法の概説

### • Branch Cut 法<sup>3)</sup>

Branch Cut 法 (以下、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方法である。BC 法は、特異点同士を、長さが最小かつ和が 0 となるように接続する。このようにして接続された線 (branch) をカットし、線と交差しないような経路でアンラッピング処理を行う。カットの状態によっては、干渉性がよい孤立した領域が発生しうる。特に、2 枚の画像間の時間が長い場合に生じやすい。GAMMA SAR では低コヒーレンス領域での特異点接続に改良が加えられており、高コヒーレンス領域あるいは低位相ノイズ領域に制限してアンラッピングすることにより誤差の少ない結果が得られる。BC 法では、アンラッピングする経路を決定するために、隣り合うピクセル間で位相差が  $\pi$  以下であることを仮定している。位相が滑らかに変化しているとき、あるピクセルから別のピクセルを通して元のピクセルに戻ってくるような周回積分を考えると、どのような経路を選んでも位相の積分値は 0 になるはずであるが、0 にならない場合、その経路は位相の不連続点を通過している。この考え方から位相の不連続点を見つけ、これら不連続点を避けた経路でアンラッピングを正常に行う。見つけた不連続点が高密度であると正常にアンラッピングを行うことはできない。隣接ピクセル同士の差分を順次累積してアンラッピングする。このとき、加える経路によらない (矛盾の生じない) 結果となる必要がある。

### • Minimum Cost Flow 法<sup>4)</sup>

Minimum Cost Flow 法 (以下、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方法である。MCF 法は基本的には BC 法の処理を踏襲するが、画像全体の連続性を重視して位相処理を行う。定義されたコスト関数が最小となるようにすべての特異点が接続され、アンラッピング経路が接続線と交差する場合、位相の変化量を調整し、最適化する。この方法では孤立点が発生しない。離島や干渉状態などで完全に孤立した領域があっても、 $2\pi$  の整数倍不連続のギャップを埋めるように最小二乗処理をして強制的につなぐことが可能である。不連続のギャップを埋める場合には、コヒーレンス値が高いところのみを繋げるなど、ある条件が整った領域で処理が行われる。従って、BC 法よりも比較的広い領域でアンラッピング処理を行うことが可能である。経路によって矛盾が生じる部分では、 $360^\circ \times N$  ( $N$  は整数) 分の傾きがあると考ええる。画像全体 (全ての隣接するピクセル間) について、それぞれ  $N$  の値を適切に推定することで矛盾のないアンラッピングが可能となる。画像の大部分は、矛盾がなくアンラッピングができる領域であり、そのような領域では、 $N$  はゼロとなる。そこで  $N$  を推定するにあたり、画像全体で  $N$  の和を最小化し、かつ矛盾のないアンラッピングを行うことが目的となる。

## (2) 不動点とコヒーレンス値閾値

### ・不動点選定

アンラッピング処理の際、両手法で不動点とコヒーレンス値閾値を入力する必要がある。不動点は以下の条件を考慮して決定した。

1. 北行軌道・南行軌道の両軌道の撮像範囲内にある
2. 震央から離れていて地震前後での移動量が小さい電子基準点

国土地理院より提供された「岩手・宮城内陸地震における各電子基準点の位置変動量」のうち表 6.3.1 に示す 8 地点の成果を電子基準点成果として検討に利用した。また、各電子基準点の位置を図 6.3.2 に示す。

表 6.3.1 電子基準点の各種情報

Table 6.3.1 Various information about GPS-based control stations

基準点名	緯度 [度]	経度 [度]	標高 [m]	東西移動量 [m]	南北移動量 [m]	垂直移動量 [m]
栗駒2	38.9340280	140.833187	691.773	0.999	-1.171	2.084
東成瀬	39.1462033	140.715048	322.017	0.207	-0.131	-0.005
皆瀬	39.0519034	140.629584	345.057	0.277	-0.090	-0.022
水沢1	39.1106250	141.203921	172.160	-0.075	0.009	0.008
平泉	38.9954629	141.148526	131.673	-0.150	0.032	0.007
栗駒	38.8153417	140.990584	108.542	-0.166	0.124	-0.017
胆沢	39.1270090	140.988456	228.121	-0.001	0.020	-0.003
江刺	39.2353751	141.311673	222.381	-0.022	-0.003	0.001

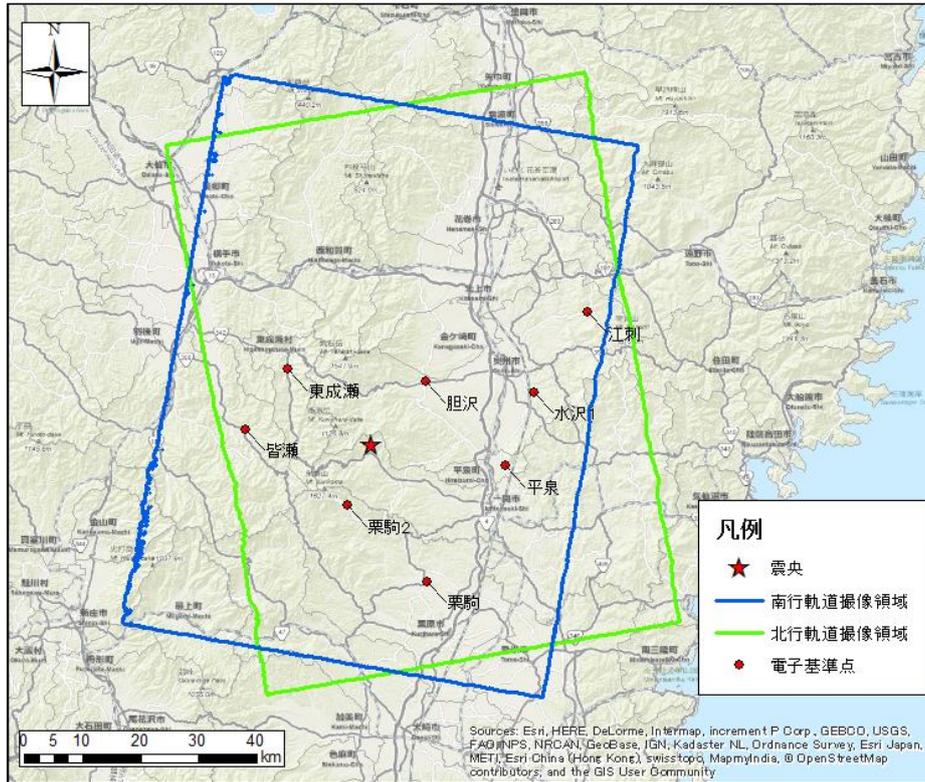


図 6.3.2 電子基準点の位置図

Fig. 6.3.2 Locations of GPS-based control stations

以上の条件から、地震の移動量が小さい電子基準点「江刺」を不動点として選択し、位相をゼロとした (図 6.3.2)。

#### ・コヒーレンス値の閾値設定

アンラッピング処理においてコヒーレンスの閾値を設定すると、その閾値以上の領域のみをアンラッピング処理する。図 6.2.3 から図 6.2.16 までのコヒーレンス値画像で示したように、震央付近の位置変動が大きかったため、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。

本研究では、BC 法において孤立領域を可能な限り減らし、かつ、両手法の特徴を活かしアンラップ結果の精度を確保するために、両手法の境界とする閾値をコヒーレンス値 0.3 と設定し、コヒーレンス値 0.3 以上の領域を BC 法で実施した。ここで、コヒーレンス値 0.3 以上の領域においても、不連続領域では、BC 法で処理できなかった領域があった。そこで、BC 法のアンラッピング処理においては、「コヒーレンスの閾値 0.3 以上」、かつ「処理可能な連続領域」に対して BC 法で処理している。なお、図 6.3.3 から図 6.3.16 に示す MCF 法の図は、閾値を設けず全域を対象に MCF 法で処理したものである。

### (3) アンラッピング結果

以上の手法、条件により作成した変位量図を図 6.3.3 から図 6.3.16 に示す。

・北行軌道

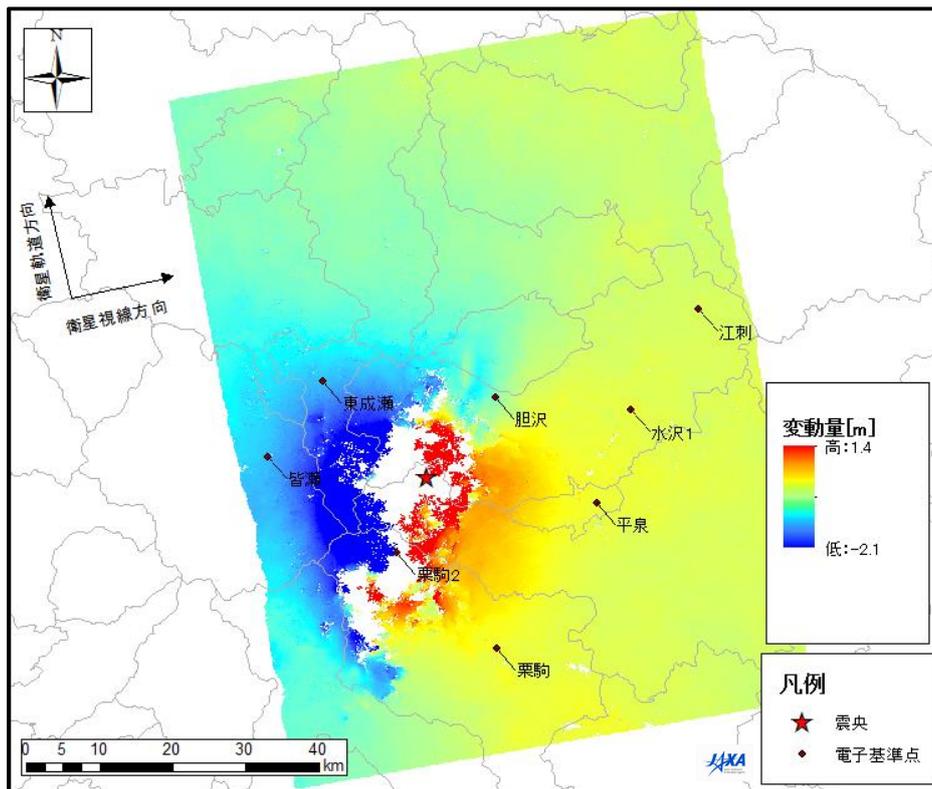


図 6.3.3 2007/6/21 と 2008/6/23 のペア (BC 法)

Fig. 6.3.3 June 21, 2007 and June 23, 2008 (BC method)

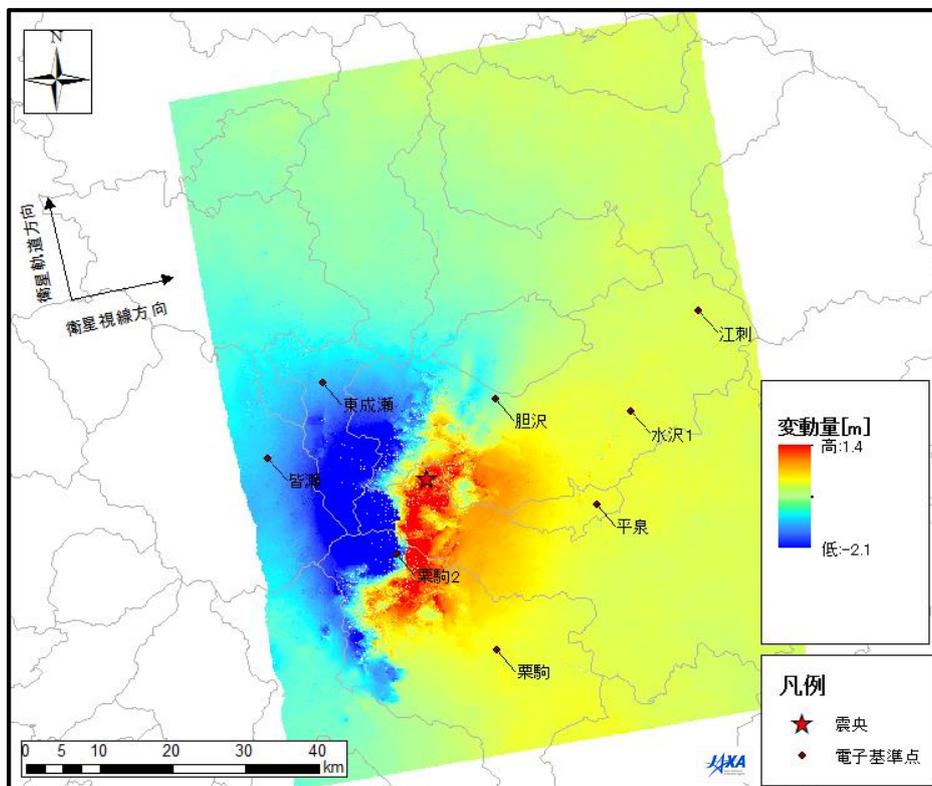


図 6.3.4 2007/6/21 と 2008/6/23 のペア (MCF 法)

Fig. 6.3.4 June 21, 2007 and June 23, 2008 (MCF method)

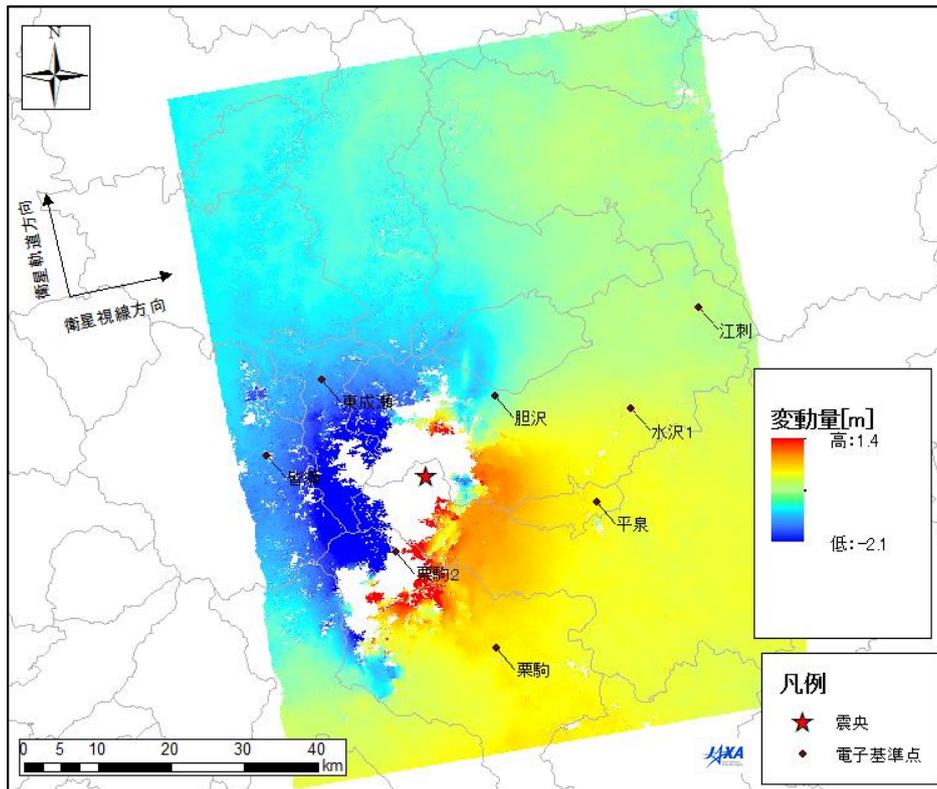


図 6.3.5 2007/8/6 と 2008/6/23 のペア (BC 法)  
 Fig. 6.3.5 August 6, 2007 and June 23, 2008 (BC method)

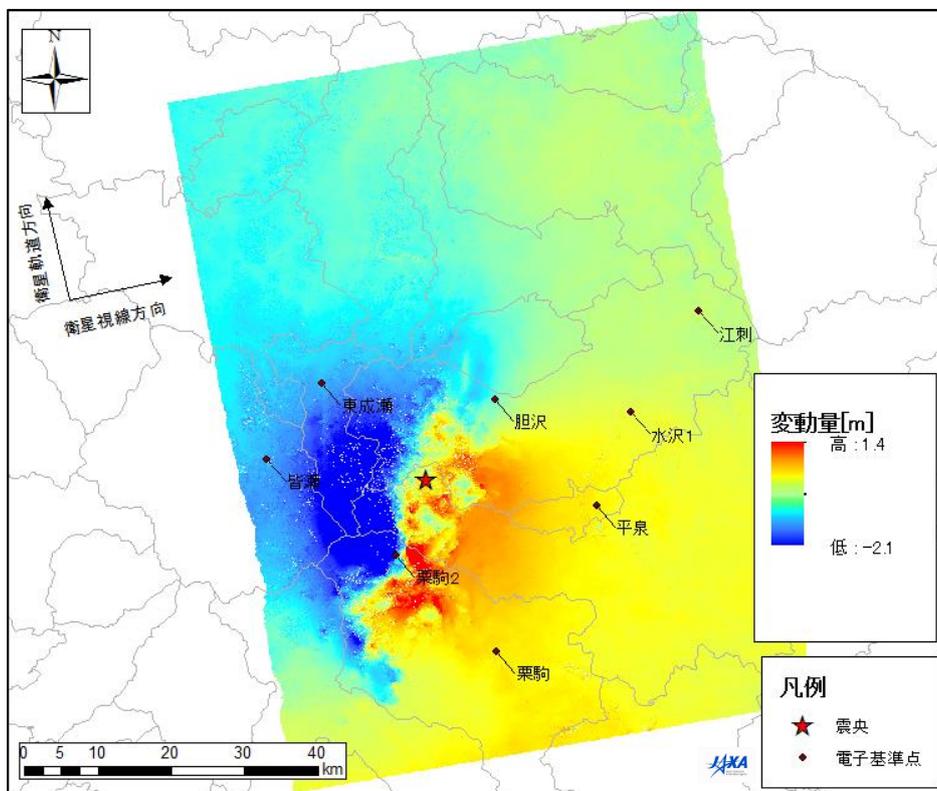


図 6.3.6 2007/8/6 と 2008/6/23 のペア (MCF 法)  
 Fig. 6.3.6 August 6, 2007 and June 23, 2008 (MCF method)

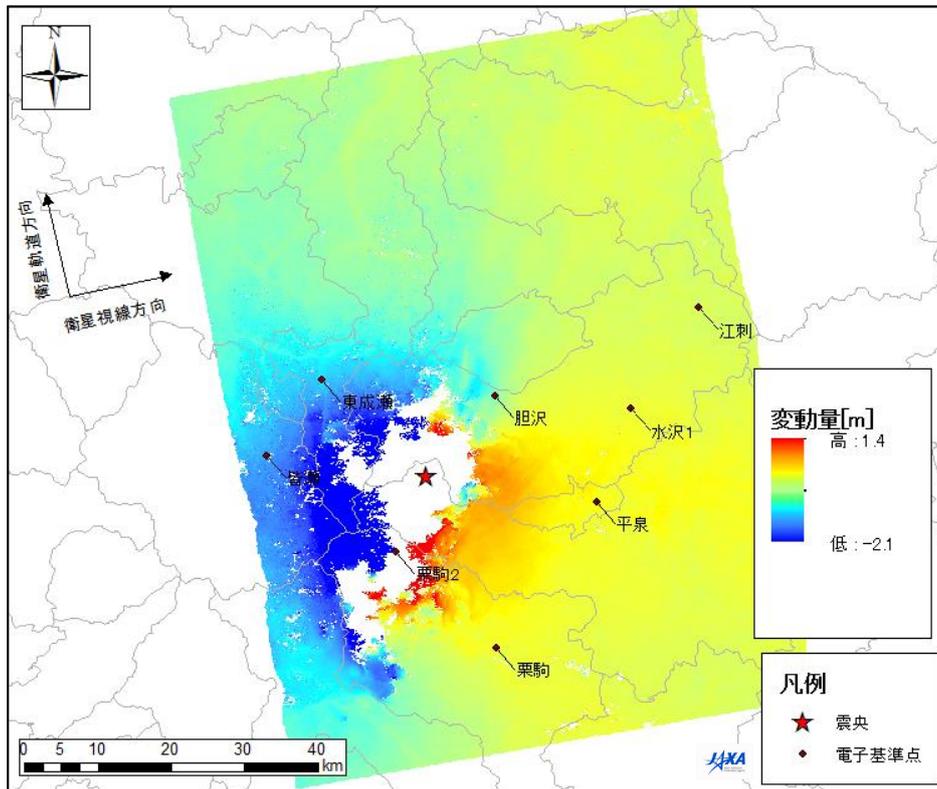


図 6.3.7 2007/9/21 と 2008/6/23 のペア (BC 法)  
 Fig. 6.3.7 September 21, 2007 and June 23, 2008 (BC method)

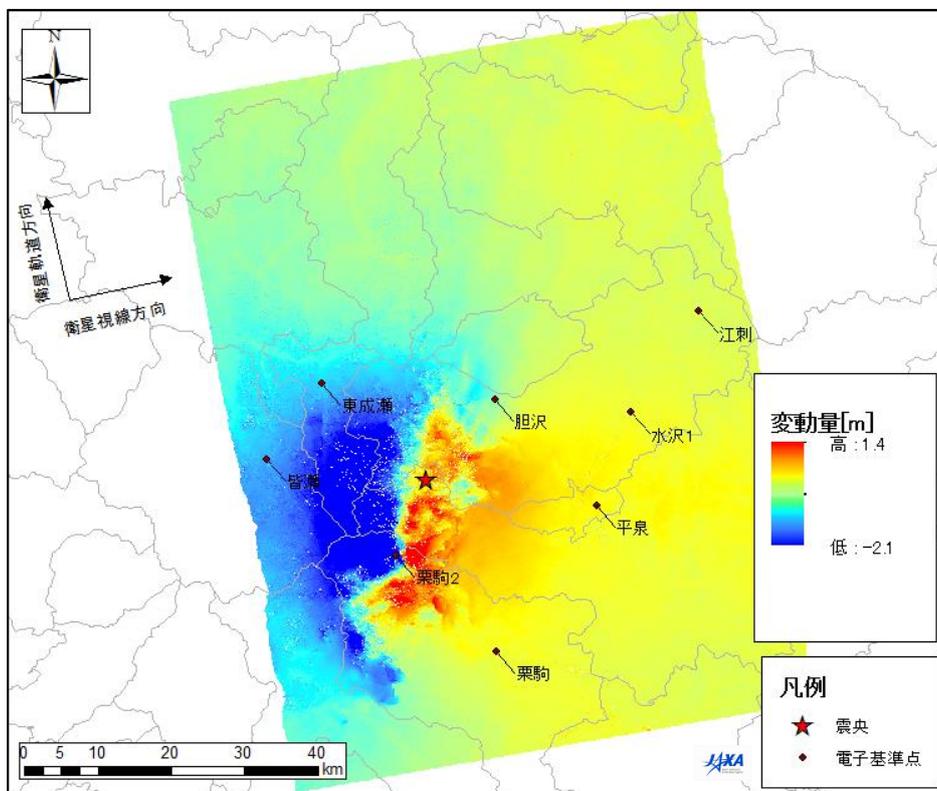


図 6.3.8 2007/9/21 と 2008/6/23 のペア (MCF 法)  
 Fig. 6.3.8 September 21, 2007 and June 23, 2008 (MCF method)

・南行軌道

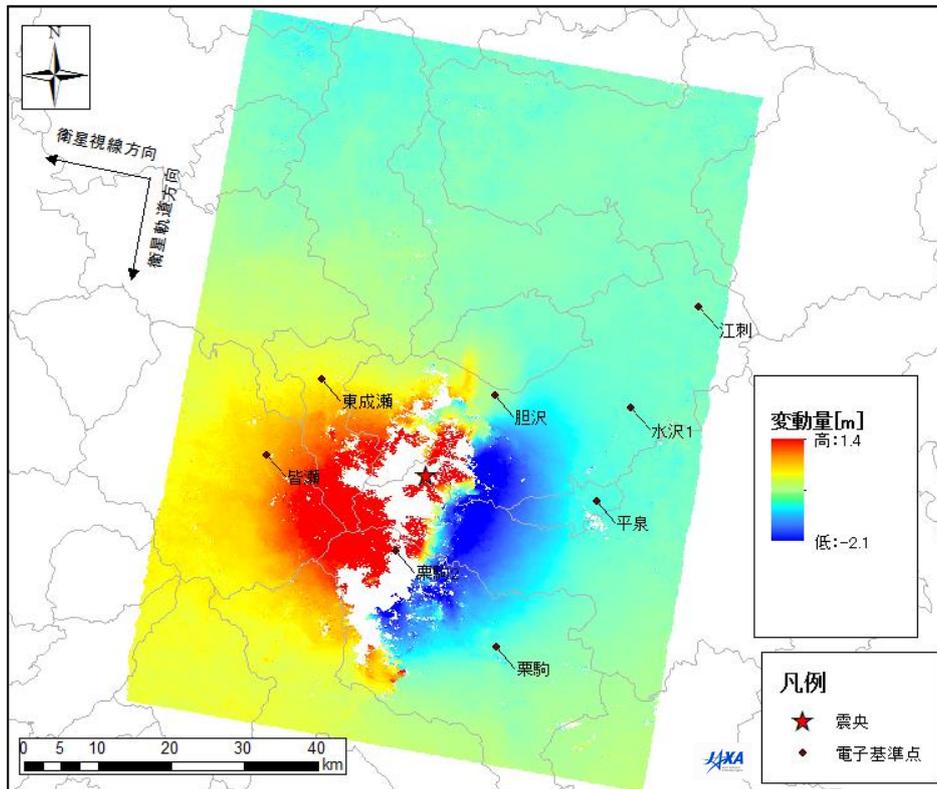


図 6.3.9 2007/7/14 と 2008/7/16 のペア (BC 法)  
Fig. 6.3.9 July 14, 2007 and July 16, 2008 (BC method)

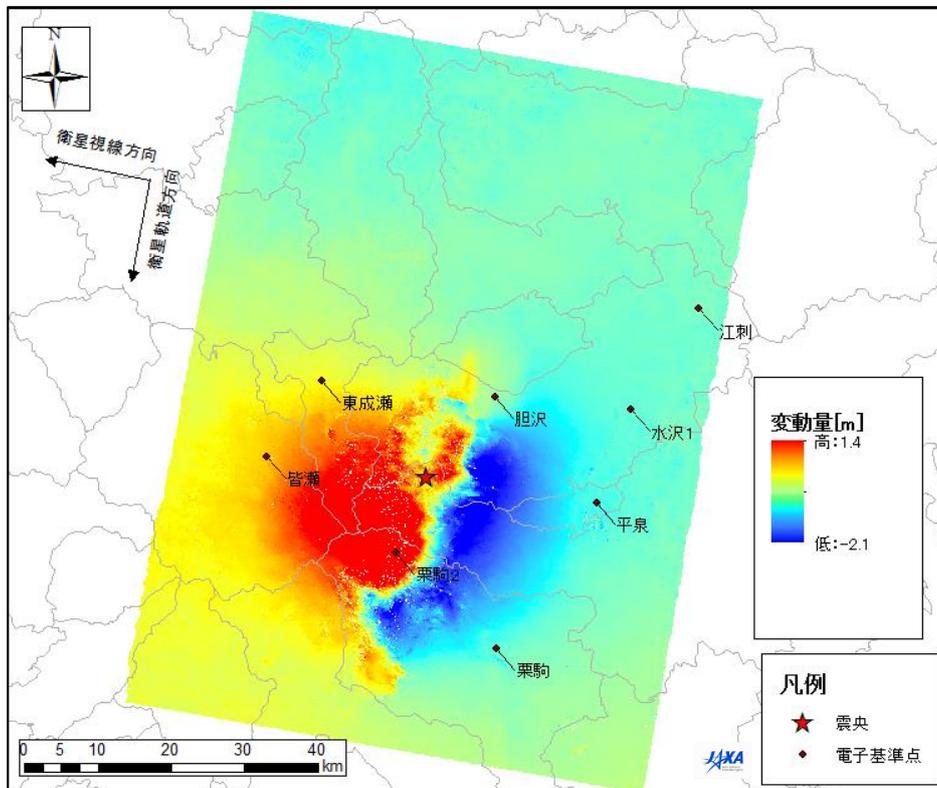


図 6.3.10 2007/7/14 と 2008/7/16 のペア (MCF 法)  
Fig. 6.3.10 July 14, 2007 and July 16, 2008 (MCF method)



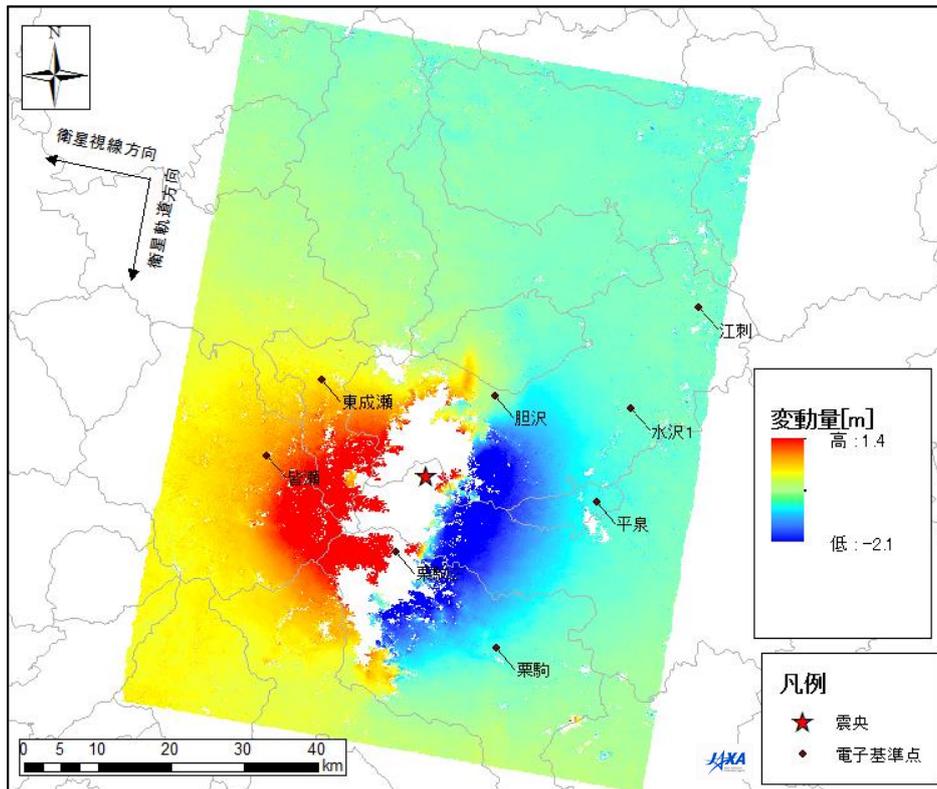


図 6.3.13 2007/8/29 と 2009/12/4 のペア (BC 法)  
 Fig. 6.3.13 August 29, 2007 and December 4, 2009 (BC method)

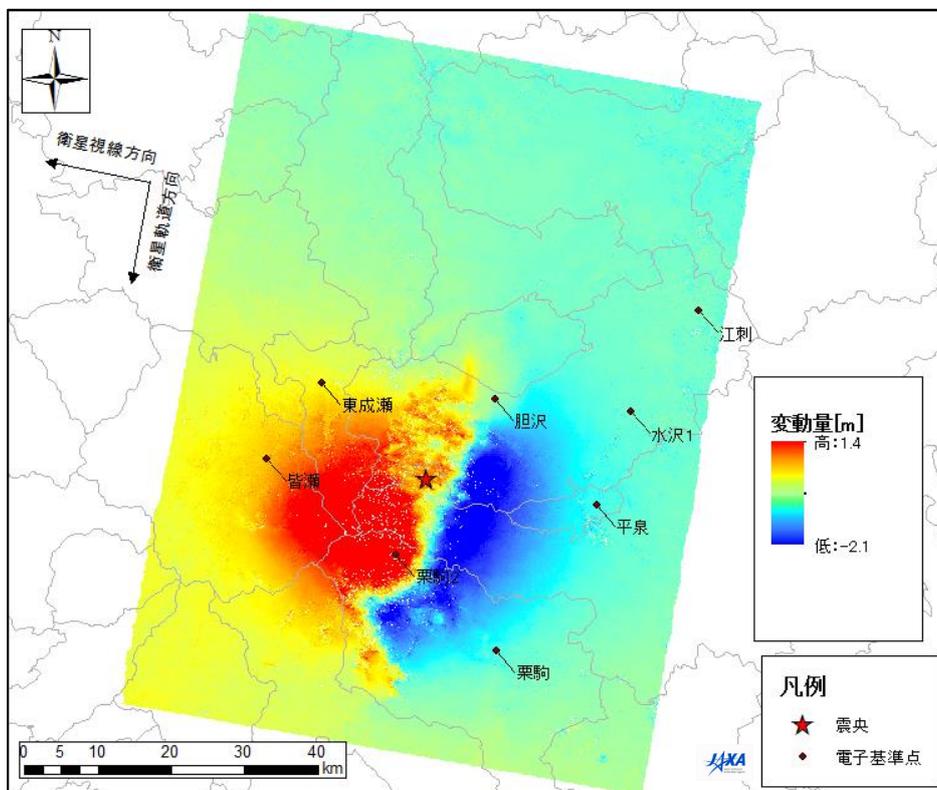


図 6.3.14 2007/8/29 と 2009/12/4 のペア (MCF 法)  
 Fig. 6.3.14 August 29, 2007 and December 4, 2009 (MCF method)

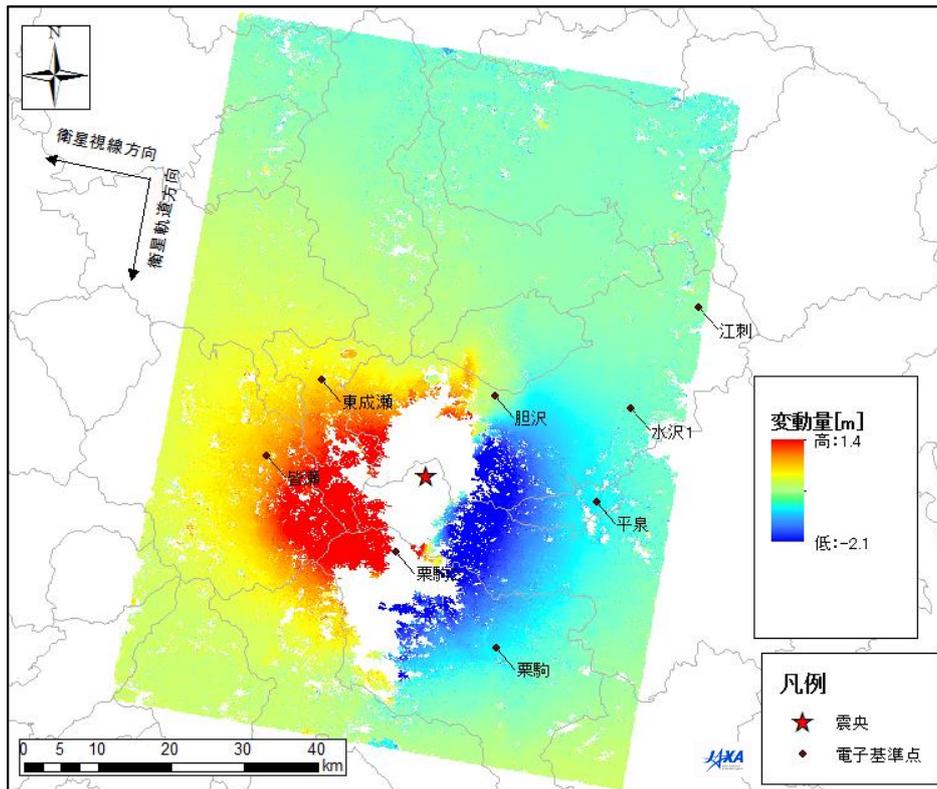


図 6.3.15 2008/5/31 と 2010/10/22 のペア (BC 法)  
 Fig. 6.3.15 May 31, 2008 and October 22, 2010 (BC method)

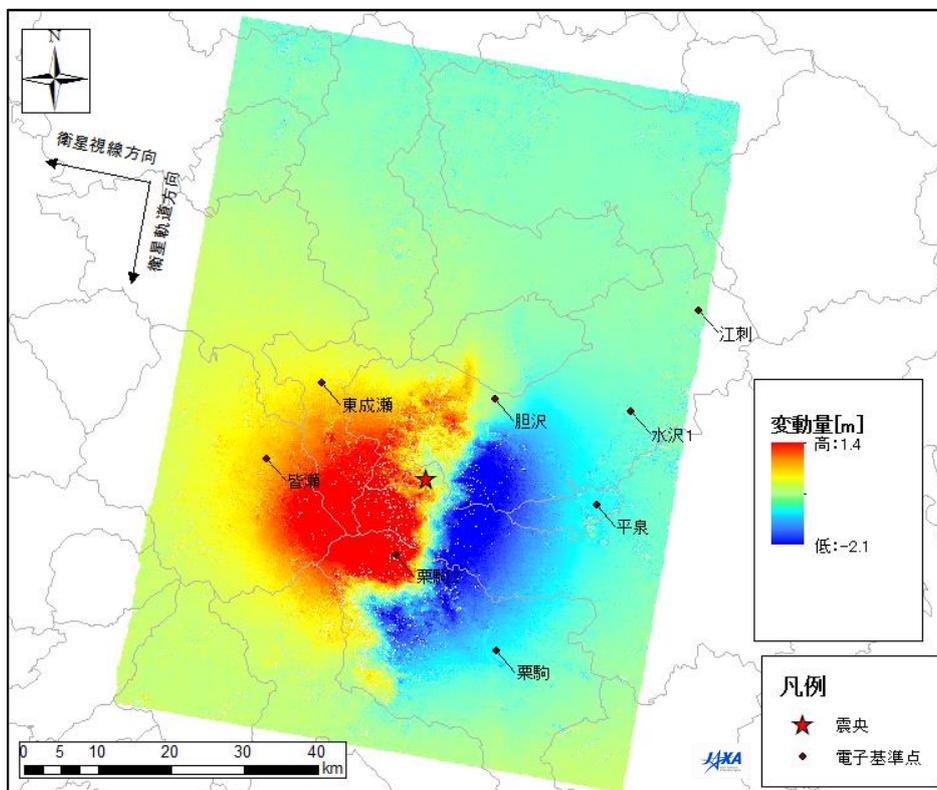


図 6.3.16 2008/5/31 と 2010/10/22 のペア (MCF 法)  
 Fig. 6.3.16 May 31, 2008 and October 22, 2010 (MCF method)

### 6. 3. 2 誤差評価方法

作成した変位量図の誤差を表 6.3.1 の電子基準点のデータを使用して評価した。誤差の評価は、干渉 SAR により求めた位置変動量を  $d_m$ 、国土地理院による位置変動量を各軌道の衛星視線方向への位置変動量に変換した値を  $d_T$  とすると下式のようにして行った。

$$|d_m - d_T| \tag{式6.3.1}$$

なお、国土地理院による位置変動量を各軌道の衛星視線方向の位置変動量への変換には下式<sup>6)</sup>を用いた。

$$\Delta x \cos \theta \sin \phi + \Delta y \cos \theta \cos \phi + \Delta z \sin \theta \tag{式6.3.2}$$

ここで、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ はそれぞれ国土地理院による東西方向、南北方向、垂直方向の位置変動量、 $\theta$ は領域の中心入射角、 $\phi$ は衛星の方位角（北方向を 0 とする）である。計算に使用した中心入射角と方位角を表 6.3.2 に示す。

表 6.3.2 各軌道における中心入射角と衛星方位角

Table 6.3.2 Center azimuth and satellite azimuth of each orbit

軌道	中心入射角 $\theta$ [°]	衛星方位角 $\phi$ [°]
北行軌道	38.73	79.95
南行軌道	38.80	-79.97

これより、各電子基準点の軌道ごとの位置変動量は表 6.3.3 の通りとなる。

表 6.3.3 各電子基準点の軌道ごとの衛星視線方向への位置変動量

Table 6.3.3 Quantity of change of position towards the satellite line-of-sight direction for each orbit at each GPS-based control station

軌道	栗駒2 [mm]	東成瀬 [mm]	皆瀬 [mm]	水沢1 [mm]	平泉 [mm]	栗駒 [mm]	胆沢 [mm]	江刺 [mm]
北行	1912	138	187	-52	-106	-122	1	-17
南行	380	-180	-239	64	124	134	2	17

### 6. 3. 3 評価結果

#### (1) BC法

結果は表 6.3.4 と図 6.3.17、図 6.3.18 に示す通りとなった。ここで、「栗駒2」の位置は、コヒーレンス 0.3 以下であったことから、BC 法では算定していない。

表 6.3.4 BC 法による各ペアの誤差値

Table 6.3.4 Error value of each pair according to the BC method

軌道	ペア		栗駒2	東成瀬	皆瀬	水沢1	平泉	栗駒	胆沢	江刺
			[mm]							
北行	2007/6/21	2008/6/23	-	383	438	85	145	162	110	15
	2007/8/6	2008/6/23	-	374	439	108	207	235	110	19
	2007/9/21	2008/6/23	-	362	468	73	157	145	119	17
南行	2007/7/14	2008/7/16	-	382	510	88	167	163	34	15
	2007/8/29	2008/7/16	-	382	491	91	171	172	21	21
	2007/8/29	2009/12/4	-	398	521	61	164	179	35	9
	2008/5/31	2010/10/22	-	380	491	106	213	235	31	15

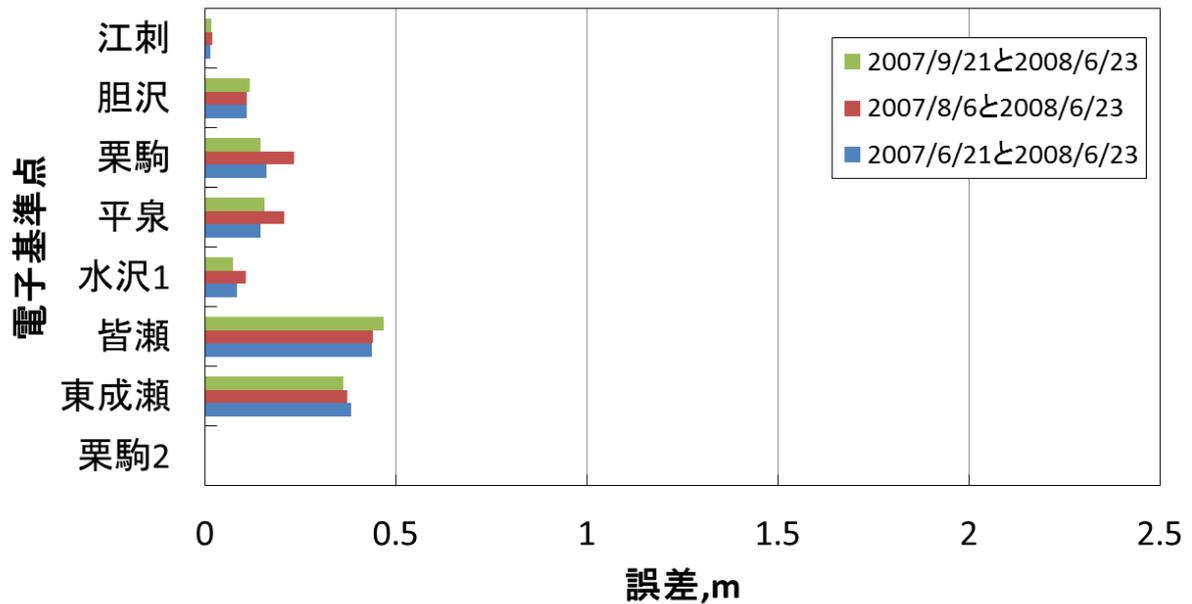


図 6.3.17 北行軌道における各ペアの誤差 (BC 法)

Fig. 6.3.17 Error of each pair in the ascending orbit (BC method)

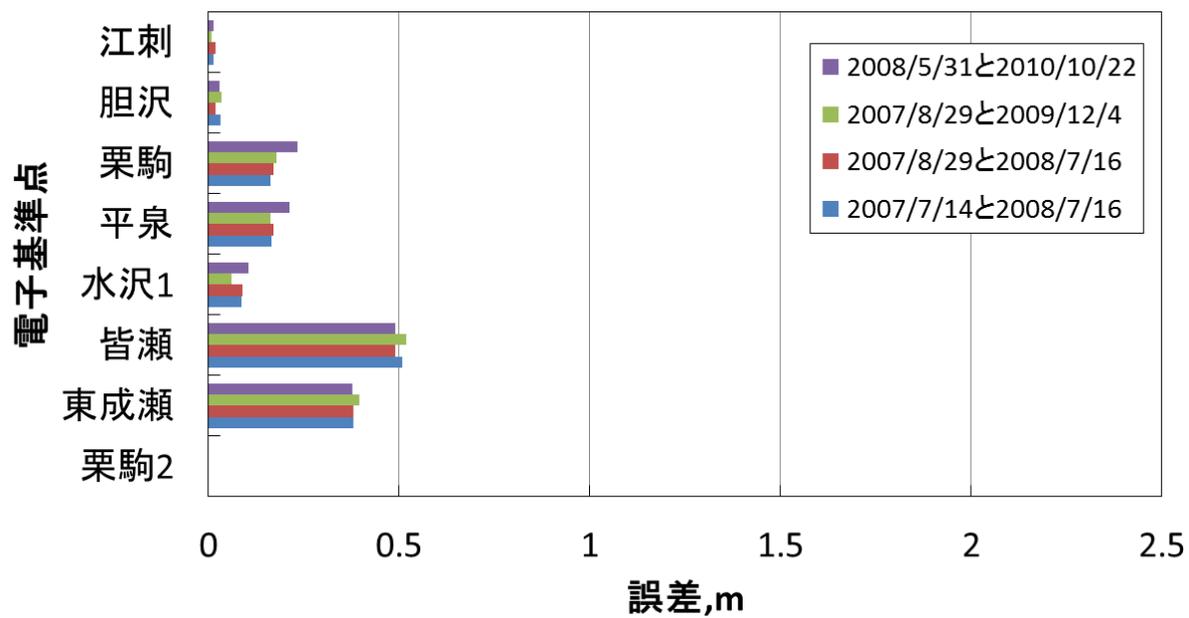


図 6.3.18 南行軌道における各ペアの誤差 (BC 法)

Fig. 6.3.18 Error of each pair in the descending orbit (BC method)

(2) MCF 法

結果は表 6.3.5 と図 6.3.19、図 6.3.20 に示す通りとなった。

表 6.3.5 MCF 法による各ペアの誤差値

Table 6.3.5 Error value of each pair according to the MCF method

軌道	ペア		栗駒2	東成瀬	皆瀬	水沢1	平泉	栗駒	胆沢	江刺
			[mm]							
北行	2007/6/21	2008/6/23	2348	383	438	85	146	162	110	15
	2007/8/6	2008/6/23	2402	374	439	108	207	235	110	19
	2007/9/21	2008/6/23	-	362	468	73	157	145	119	17
南行	2007/7/14	2008/7/16	671	671	510	88	167	163	34	15
	2007/8/29	2008/7/16	540	540	491	91	171	172	21	21
	2007/8/29	2009/12/4	428	428	521	61	164	179	35	9
	2008/5/31	2010/10/22	309	309	491	106	213	235	31	15

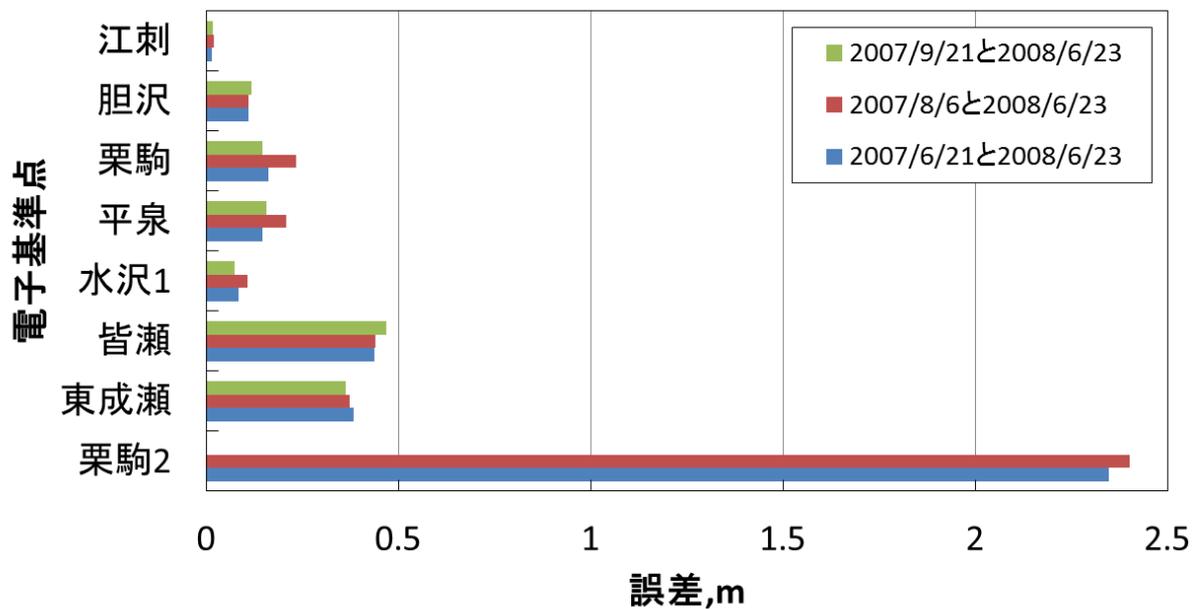


図 6.3.19 北行軌道における各ペアの誤差 (MCF 法)

Fig. 6.3.19 Error of each pair in the ascending orbit (MCF method)

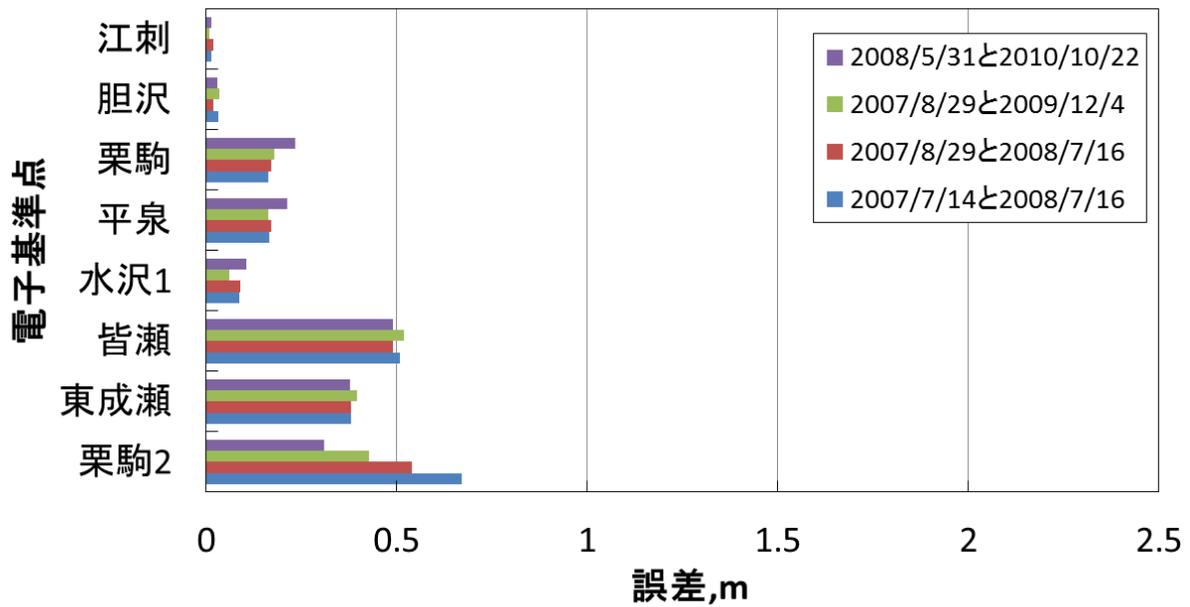


図 6.3.20 南行軌道における各ペアの誤差 (MCF 法)

Fig. 6.3.20 Error of each pair in the descending orbit (MCF method)

### (3) 考察

コヒーレンスの値が 0.3 以下である「栗駒 2」は、誤差が大きい。BC 法と MCF 法の電子基準点計測値に対する誤差値を比較すると、「東成瀬」の南行が、2008/5/31–2010/10/22 の 1 ペア画像で MCF 法が誤差小であったが、他の 3 ペアでは BC 法がより小さい誤差値であった。それ以外の電子基準点では、同じ誤差値であった。「栗駒 2」を除く電子基準点における精度比較では、少しの差ではあるが予想どおり BC 法の方が誤差が少ない。

## 6. 4 衛星視線方向の変位量図の作成

電子基準点による評価では、今回の地表面移動量の把握で重要となる震源断層付近の電子基準点の点数が少なく各ペアの精度を正しく評価できていないとは言えない。しかし、各ペアの BC 法による結果を見てみるとコヒーレンスの閾値が 0.3 と同一でありながら、震源断層付近のアンラップできた領域の面積に違いがみられる。面積が大きいということは干渉性の良い領域が広いと考えられ、さらに、干渉性の良い領域と悪い領域を比較すると、良い領域のアンラッピング結果は悪い領域の結果よりも精度がよいと考えることができる。この点に着目し、各ペアの結果の合成を試みた。

### 6. 4. 1 アンラッピング画像の合成処理方法

#### (1) アンラップ手法による結果の比較

BC 法は位相特異点を避け、かつ高コヒーレンス領域の測定によって得られて処理された位相値をそのまま使用してアンラップを行っているのに対し、MCF 法では位相値の変化量をコヒーレンス値によって変動させており、必ずしも測定によって得られて処理された位相値を使用していない。このことから、実際の位置変動量をより正確に反映した結果が得られるのは BC 法であると考えられる。よって BC 法の結果を優先して合成を行うことは妥当であると結論付けることができる。

#### (2) 干渉性の比較

各ペアにおける干渉性を比較したものを表 6.4.1 に示す。なお、干渉性の比較の際、BC 法と MCF 法の使用境界となるコヒーレンス閾値は 0.3、干渉縞ができる閾値として 0.7 を使用した。このため BC 法は、「コヒーレンスの閾値 0.3 以上」、かつ「処理可能な連続領域」において実施している。

表 6.4.1 各ペアにおける干渉性の比較

Table 6.4.1 Comparison of coherence in each pair

軌道方向	画像ペア (撮影日時)		コヒーレンス値	コヒーレンス値	未アンラップ領域 (BC 法) 面積 (km <sup>2</sup> )
			0.3 未満 領域の面積 (km <sup>2</sup> )	0.7 以上 領域の面積 (km <sup>2</sup> )	
北行軌道	2007/6/21	2008/6/23	158.0	6499.6	250.7
	2007/8/6	2008/6/23	221.0	6205.5	361.4
	2007/9/21	2008/6/23	204.6	6285.3	348.9
南行軌道	2007/7/14	2008/7/16	166.1	6363.8	258.5
	2007/8/29	2008/7/16	144.7	6440.7	227.7
	2007/8/29	2009/12/4	268.5	5920.1	415.0
	2008/5/31	2010/10/22	472.2	4742.3	700.7

#### (3) 合成処理手順

上記の比較から、合成処理手順を検討した。まず、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と考える BC 法の結果を優先することとした。変位量図の信頼性は、干渉性が主に影響すると考えるとともに、未アンラップ領域面積と干渉性には相関があるため、干渉性の比較として未アンラップ領域面積を指標として用いて、1 番目に優先する BC 法の変位量図を選定した。1 番

目優先の変位量図の未アンラップ領域を埋めるために、残りの変位量図を利用することとし、2番目以降のBC法の変位量図の順番は、未アンラップ領域面積と未アンラップ領域の分布状況を考慮した。その結果、以下に示す条件により、データの合成の優先順位を付けた。

1. 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と考えるBC法の結果を優先する
2. BC法の結果において、震央付近のアンラップされていない領域が小さい結果を優先する
3. 2番目以降のBC法の変位量図の順番は、未アンラップ領域面積と未アンラップ領域の分布状況を考慮する
4. MCF法の優先順位も1と同様とする

これより合成手順を表 6.4.2 と表 6.4.3 のように決定した。

表 6.4.2 北行軌道の合成順番

Table 6.4.2 Synthesis order of ascending orbit

合成順	アンラップ手法	ペア	
1	BC法	2007/6/21	2008/6/23
2		2007/8/6	2008/6/23
3		2007/9/21	2008/6/23
4	MCF法	2007/6/21	2008/6/23

表 6.4.3 南行軌道の合成順番

Table 6.4.3 Synthesis order of descending orbit

合成順	アンラップ手法	ペア	
1	BC法	2007/8/29	2008/7/16
2		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

表 6.4.2 と表 6.4.3 の合成順番に従い、次のとおり処理した。

BC法にて処理を行う。

↓

MCF法にて全領域の処理を行う。

↓

BC法で処理できなかったエリアのMCF法結果を抽出。

↓

BC法の処理結果と抽出したMCF法結果を合成。

### 6. 4. 2 合成処理による変位量図作成

合成処理を行った結果を図 6.4 1 と図 6.4 2 に示す。

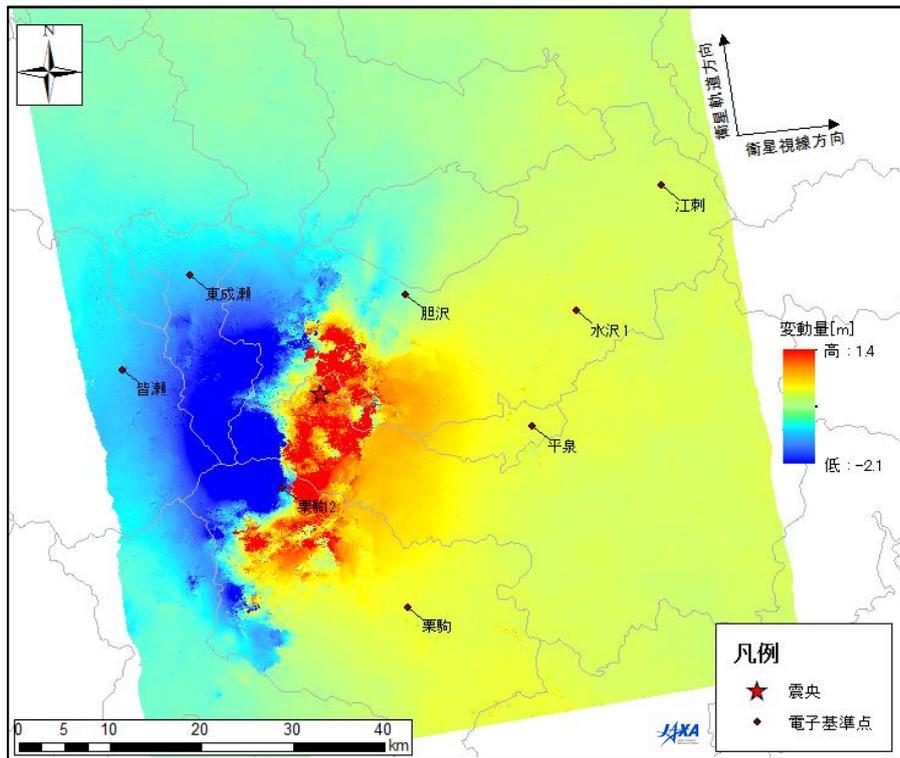


図 6.4 1 合成結果 (衛星視線方向の変位量図) : 北行軌道

Fig. 6.4 1 Synthesis results (quantity of displacement of satellite line-of-sight direction): ascending

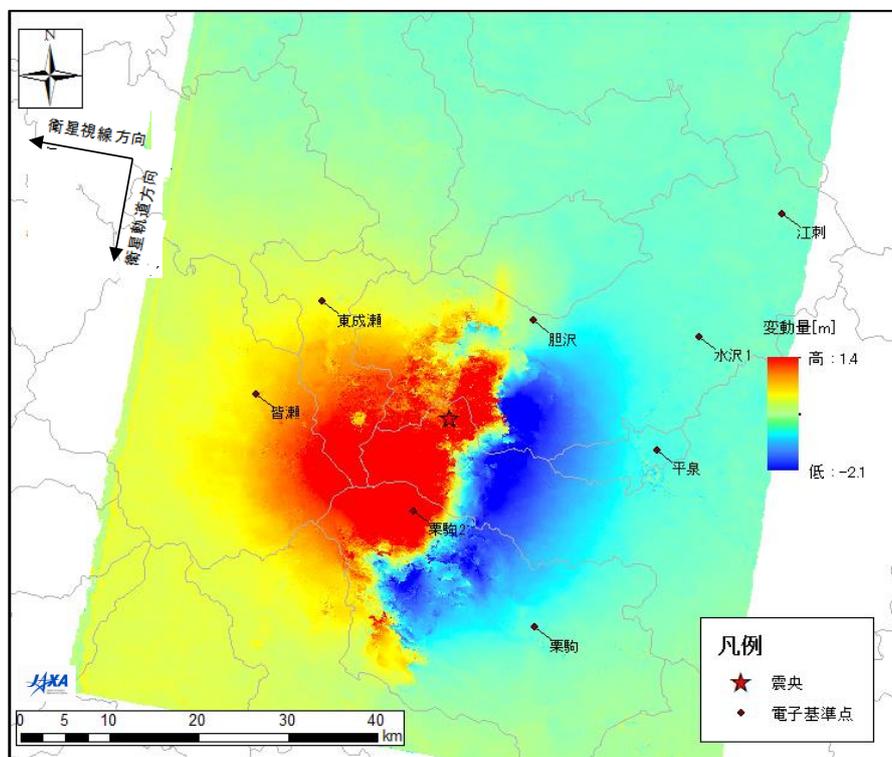


図 6.4 2 合成結果 (衛星視線方向の変位量図) : 南行軌道

Fig. 6.4 2 Synthesis results (quantity of displacement of satellite line-of-sight direction): descending

## 6.5 合成処理による変位量図の合成精度評価

単純に合成しただけでは元の画像が持っている画像全体にわたる連続性が失われている可能性がある。特に、合成境界において不連続となることは容易に想像できる。そのため、BC 法の結果同士を合成した境界部分と MCF 法の結果を合成した境界部分が滑らかにつながっているかを評価した。

### 6.5.1 合成精度評価方法

BC 法でのブランク領域を覆うグリッドを設置し、各ラインに対する断面図を計測した。ブランク領域は各軌道において優先順位 1 の画像から決定した。設置したグリッドは、グリッド間隔 3000m、衛星視線方向ライン 10 本、軌道方向ライン 9 本である。計測グリッドの位置を北行軌道の場合を図 6.5 1、南行軌道の場合を図 6.5 2 にそれぞれ示す。

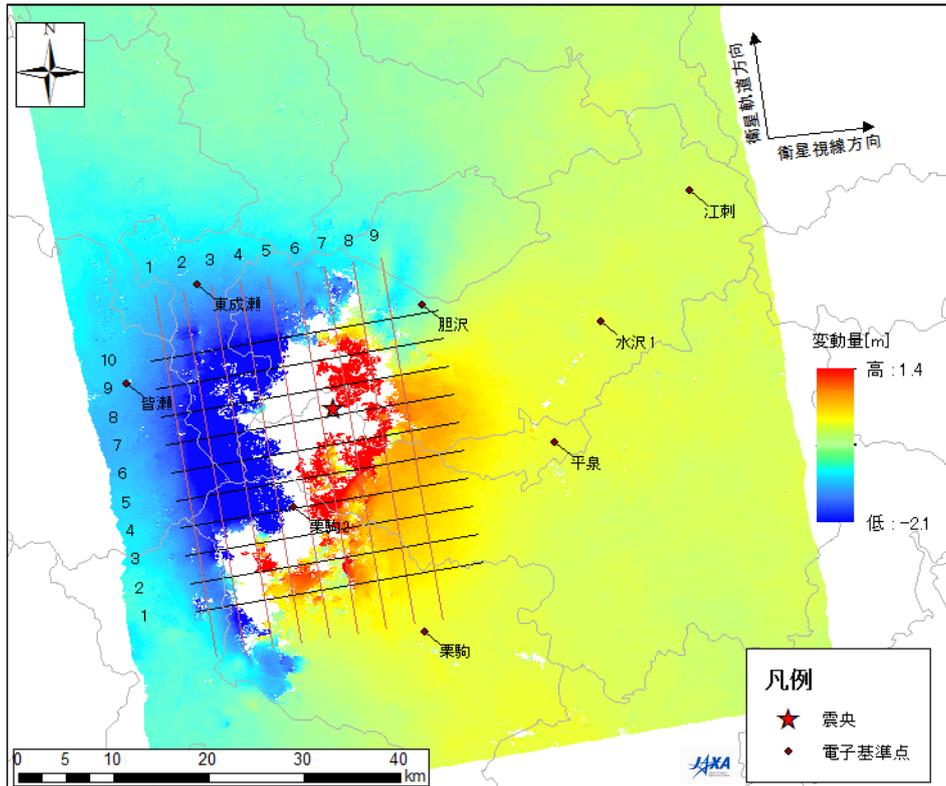


図 6.5 1 北行軌道の計測グリッド位置

Figure 6.5 1 Ascending orbit's measurement grid location

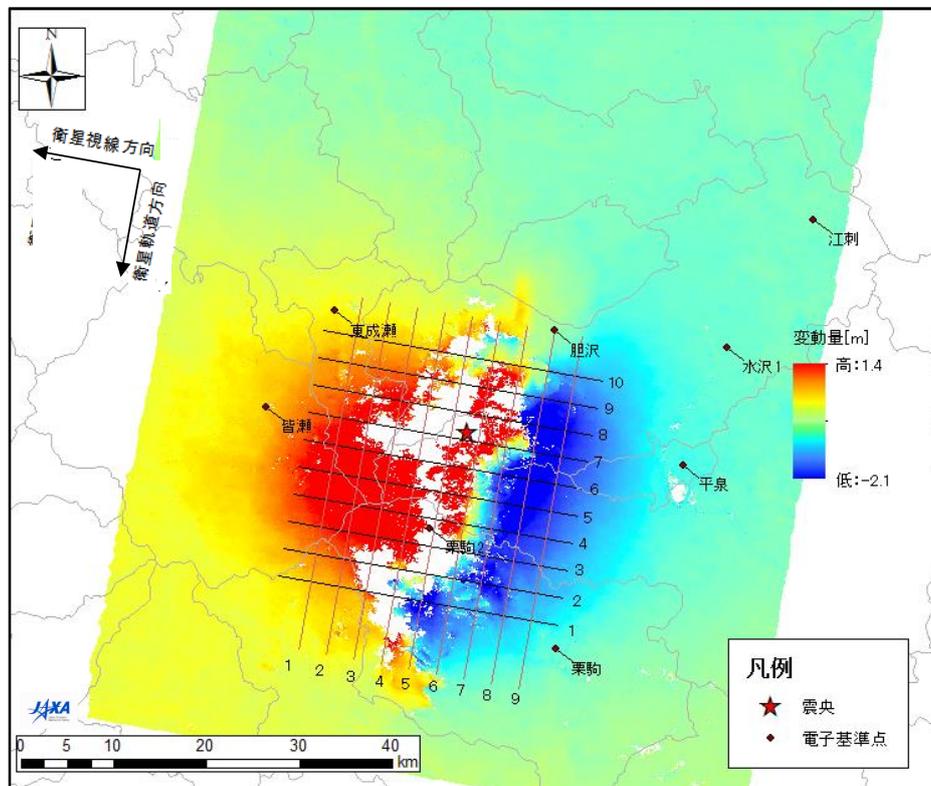


図 6.5 2 南行軌道の計測グリッド位置

Figure 6.5 2 Descending orbit's measurement grid location

## 6. 5. 2 評価結果

各ラインに対する断面図を図 6.5.3、図 6.5.4、図 6.5.5、図 6.5.6、図 6.5.7 に示す。断面図グラフの見方は以下のとおりである。

BASE : 優先順位 1 の変位量

北行 : 2007/6/21 と 2008/6/23、南行 : 2007/8/29 と 2008/7/16)

BC : BC 法による結果をすべて合成したもの

北行軌道 : 1~3、南行軌道 : 1~4 (詳細は表 6.5.1、表 6.5.2 参照)

FULL : BC 法による結果と MCF 法を合成したもの

北行軌道 : 1~4、南行軌道 : 1~5 (詳細は表 6.5.1、表 6.5.2 参照)

表 6.5.1 北行軌道の合成順番と断面データ表示

Table 6.5.1 Synthesis order and section data table of the ascending orbit

合成順	アンラップ手法	ペア		BASE	BC	FULL
1	BC法	2007/6/21	2008/6/23	○	○	○
2		2007/8/6	2008/6/23	-	○	○
3		2007/9/21	2008/6/23	-	○	○
4	MCF法	2007/6/21	2008/6/23	-	-	○

表 6.5.2 南行軌道の合成順番と断面データ表示

Table 6.5.2 Synthesis order and section data table of the descending orbit

合成順	アンラップ手法	ペア		BASE	BC	FULL
1	BC法	2007/8/29	2008/7/16	○	○	○
2		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	-	-	○

方向は

衛星視線方向 : 西方から東方

軌道方向 : 南方から北方

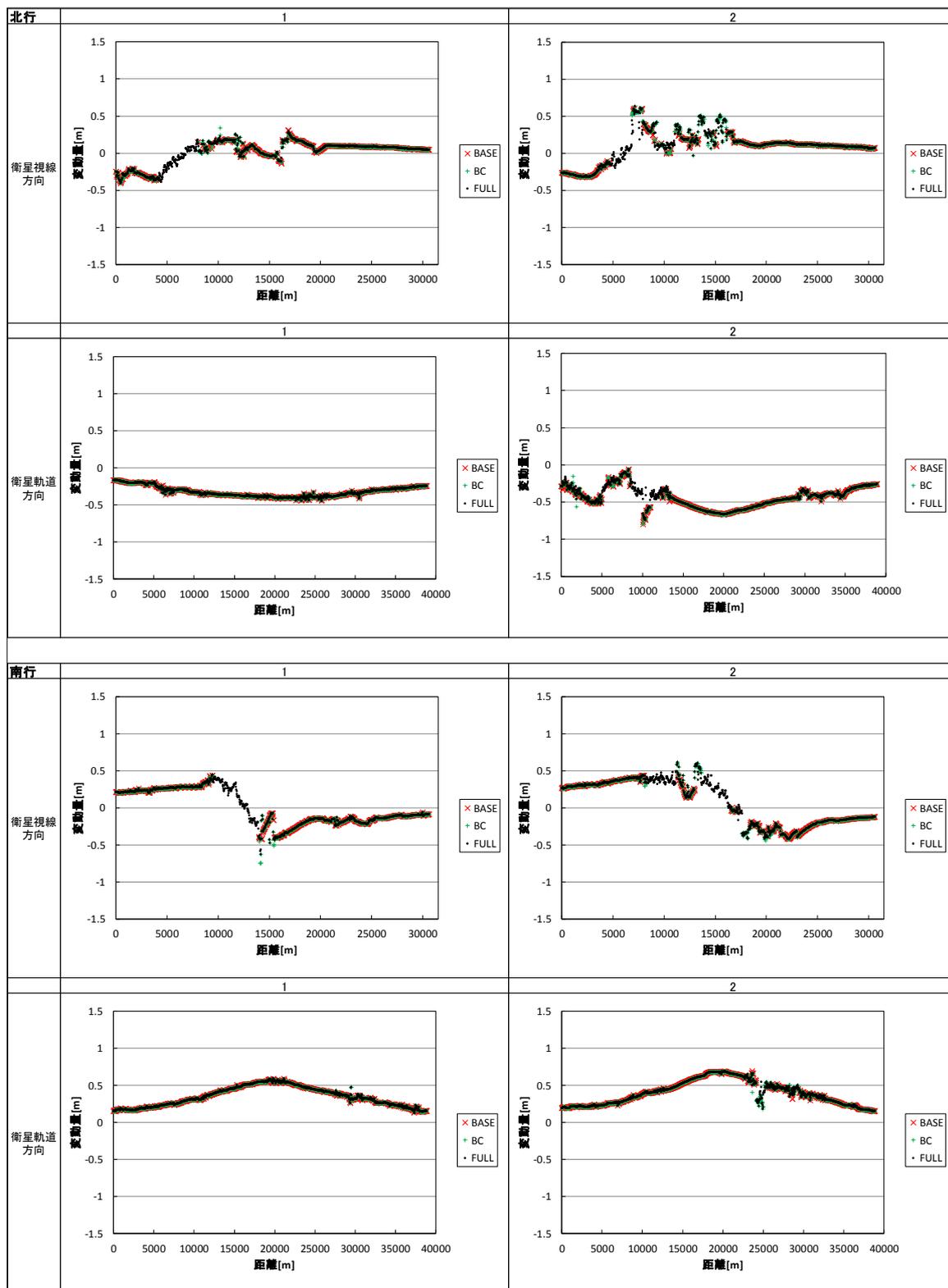


図 6.5 3 グリッド各ラインに対する断面図一覧 (ライン1・2)

Fig. 6.5 3 Section table of each line of the grid (line 1・2)

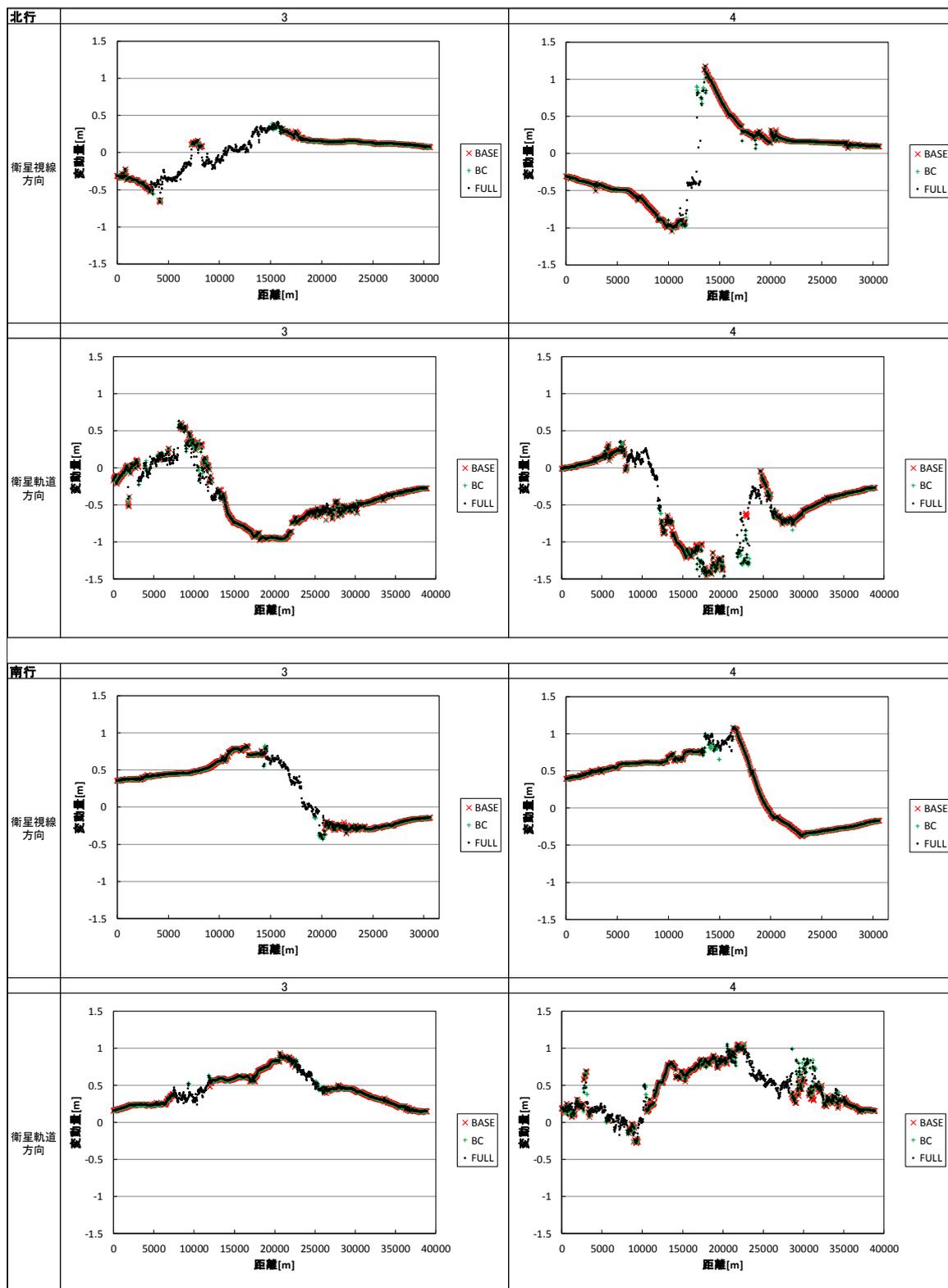


図 6.5 4 グリッド各ラインに対する断面図一覧 (ライン3・4)

Fig. 6.5 4 Section table of each line of the grid (line 3・4)

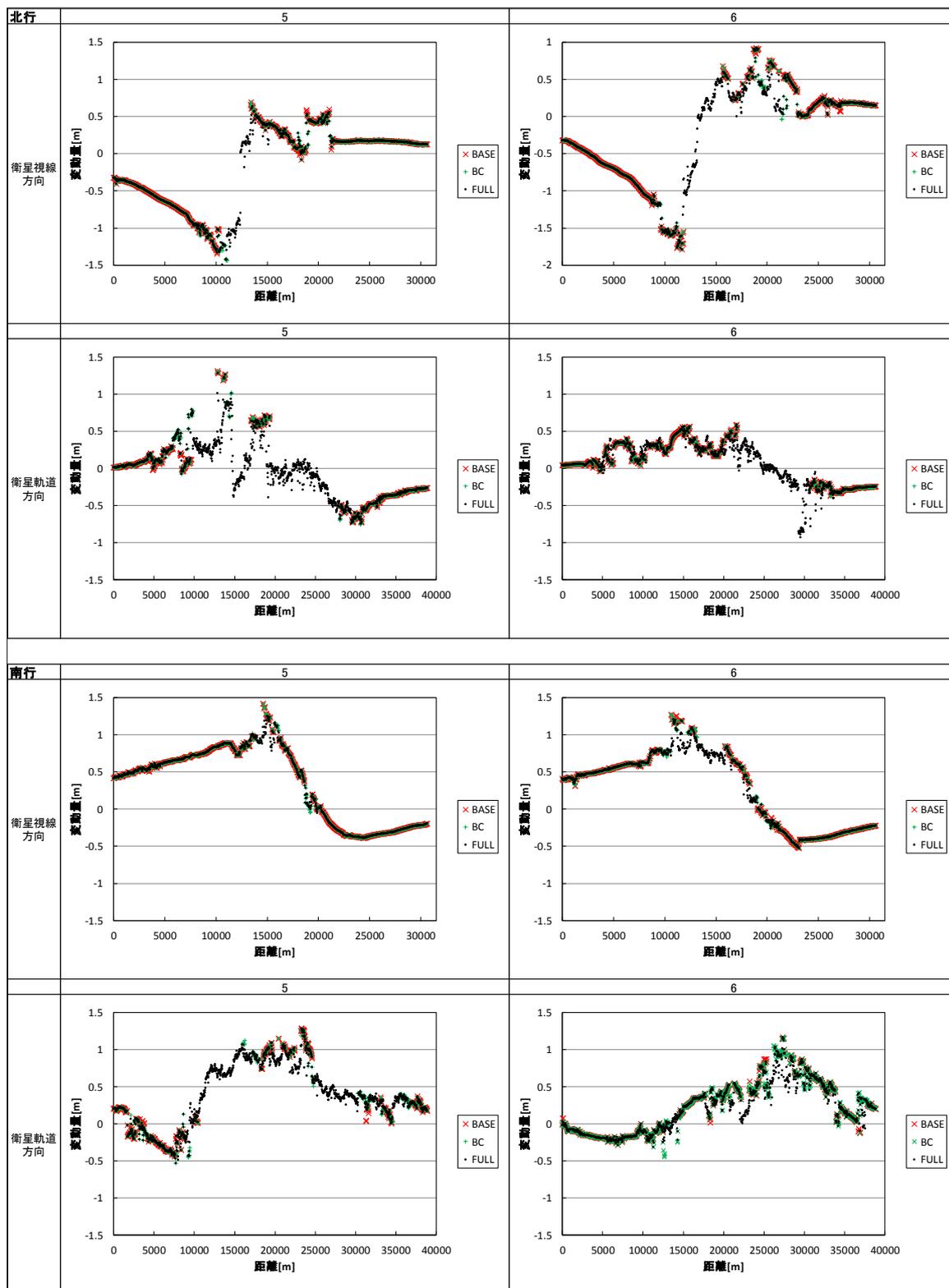


図 6.5 5 グリッド各ラインに対する断面図一覧(ライン 5・6)

Fig. 6.5 5 Section table of each line of the grid (line 5・6)

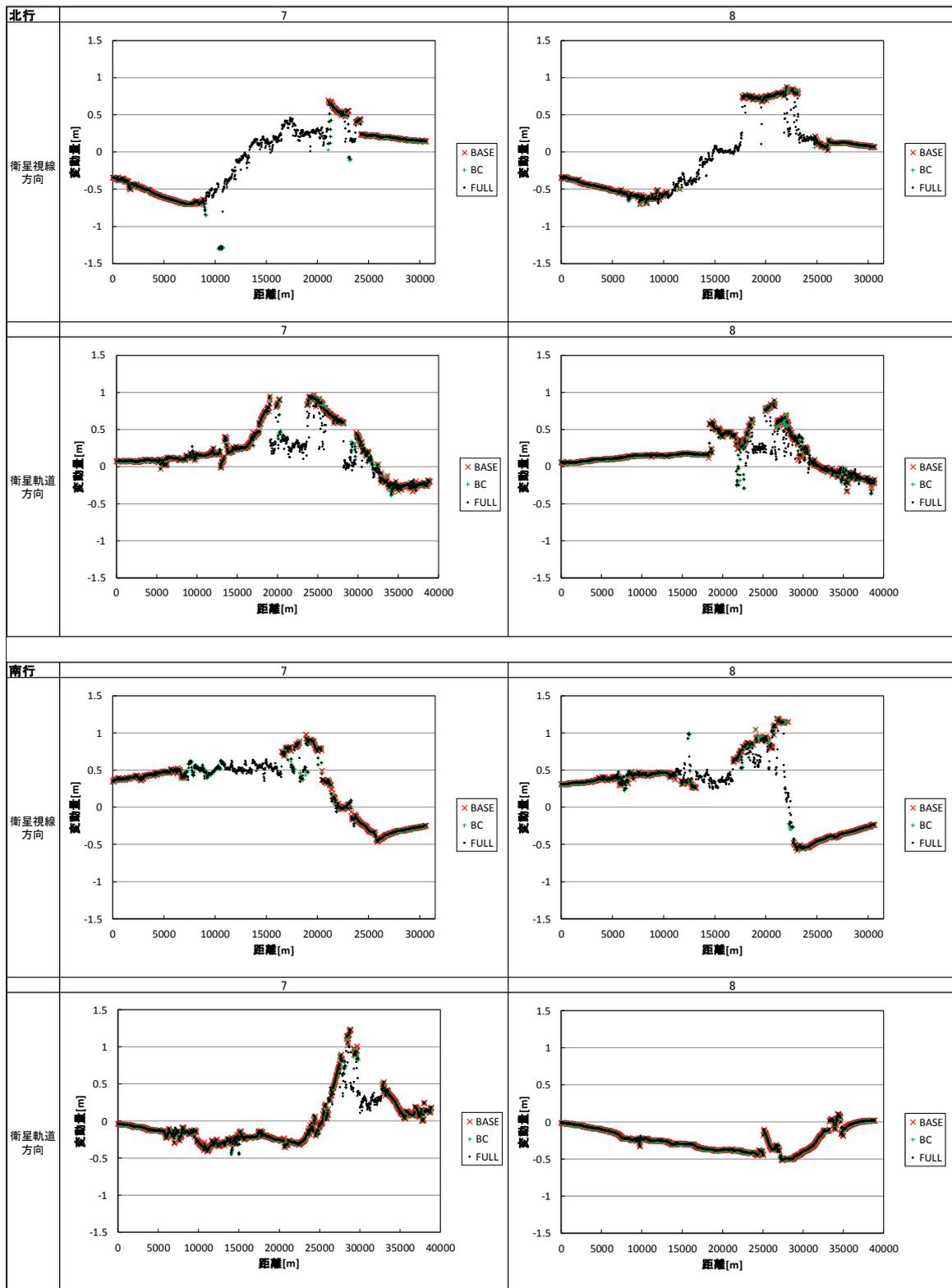


図 6.5 6 グリッド各ラインに対する断面図一覧(ライン7-8)

Fig. 6.5 6 Section table of each line of the grid (line 7・8)

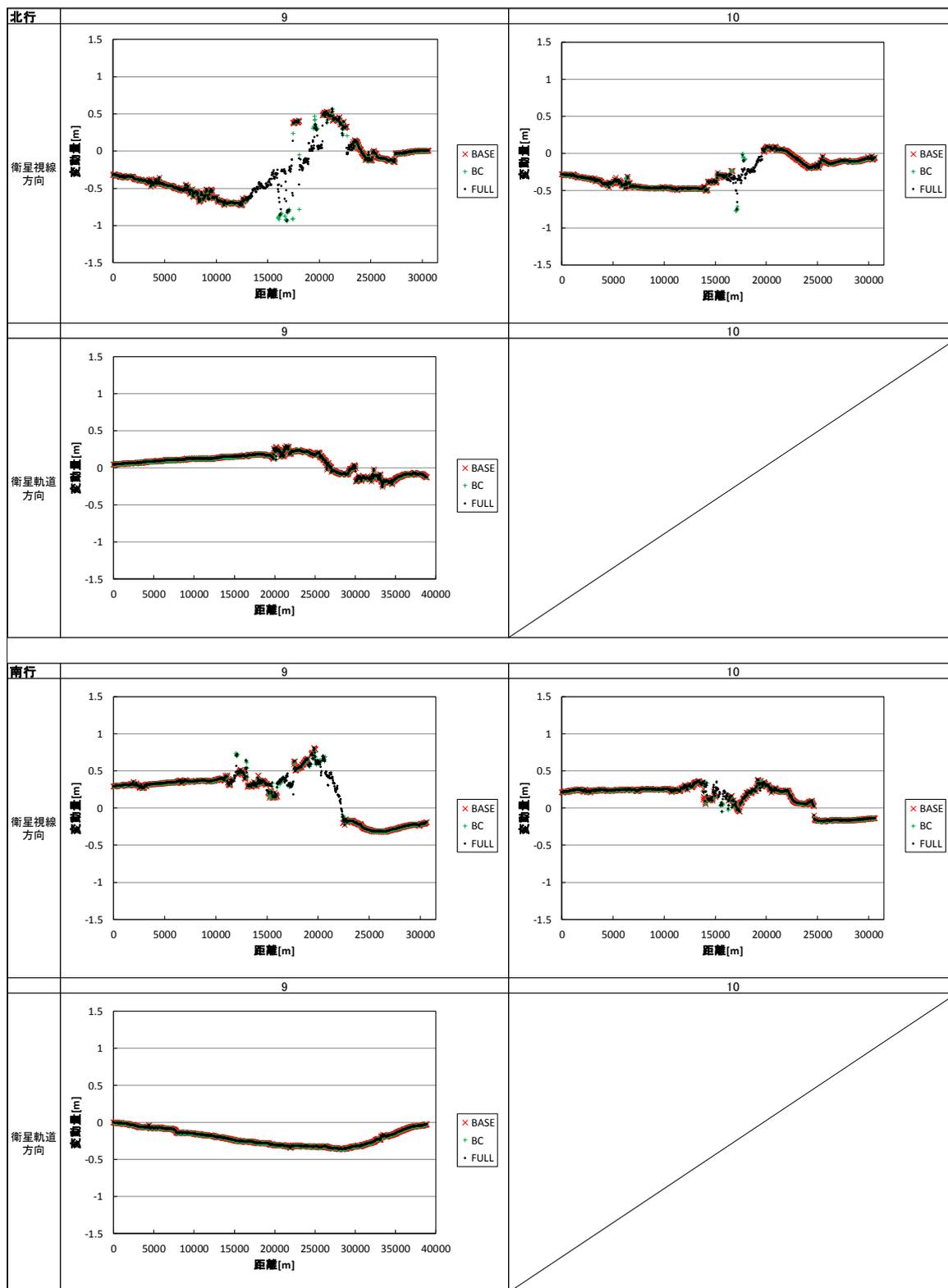


図 6.5.7 グリッド各ラインに対する断面図一覧(ライン 9-10)

Fig. 6.5.7 Section table of each line of the grid (line 9-10)

### 6. 5. 3 考察

合成優先順位 1 の変位量図に元からある段差を除けば、合成により生じた段差の大きさは 10cm 未満であった。また、BC 法での周辺からの孤立領域でも MCF 法との接続は滑らかであり、従って画像全体にわたり連続性を保ったまま滑らかに合成されていると考えられる。しかしながら、このような合成が必ず滑らかになるかどうかは、今回の地震のデータだけでは判断が難しく、検討が必要である。

## 6. 6 合成処理による変位量図の誤差評価

画像全体の連続性を保ちながら合成処理を行うことができたが、誤差への影響を調査するため、合成による画像全体の変位量誤差を評価した。

### 6. 6. 1 評価方法

表 6.3.1 の電子基準点のデータを使用し、各基準点における残差を求めた。残差は、干渉 SAR により求めた位置変動量を  $d_m$ 、国土地理院による位置変動量を  $d_T$  とすると式 6.6-1 のように定義される。

$$d_m - d_T \quad \text{式 6.6-1}$$

また、面的な誤差を評価するために各電子基準点の各軌道でのレンジ座標（地表面の衛星直角方向）とアジマス座標（衛星軌道方向）に対して残差をプロットした。各電子基準点の各軌道での座標値は表 6.6.1 の通りである。

表 6.6.1 電子基準点の各軌道での座標値

Table 6.6.1 Coordinate values at each orbit of GPS-based control stations

基準点名	北行		南行	
	レンジ座標	アジマス座標	レンジ座標	アジマス座標
栗駒 2	419.79	1051.23	832.93	2464.11
東成瀬	302.84	1933.27	1163.03	1709.73
皆瀬	106.06	1615.58	1287.47	2117.13
水沢 1	1215.17	1536.90	229.85	1588.48
平泉	1058.84	1120.83	283.54	2060.52
栗駒	679.90	508.84	500.17	2836.96
胆沢	807.39	1713.48	635.20	1640.19
江刺	1478.97	1963.33	85.35	1051.54

## 6. 6. 2 評価結果

評価結果を以下の図 6.6.1～図 6.6.4 に示す。

### (1) 北行軌道

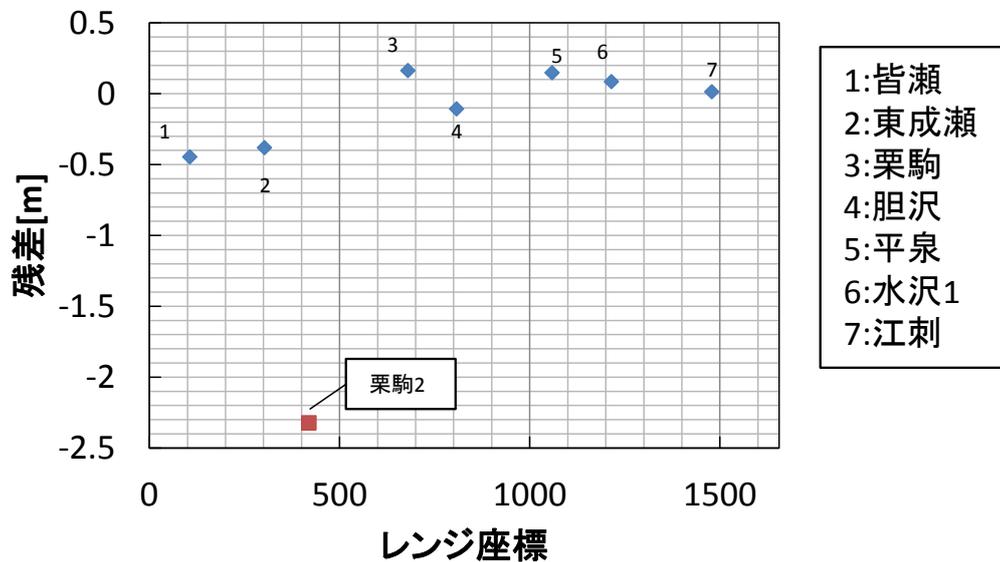


図 6.6.1 北行軌道における位置と残差

Fig. 6.6.1 Positions and residual errors in the ascending orbit

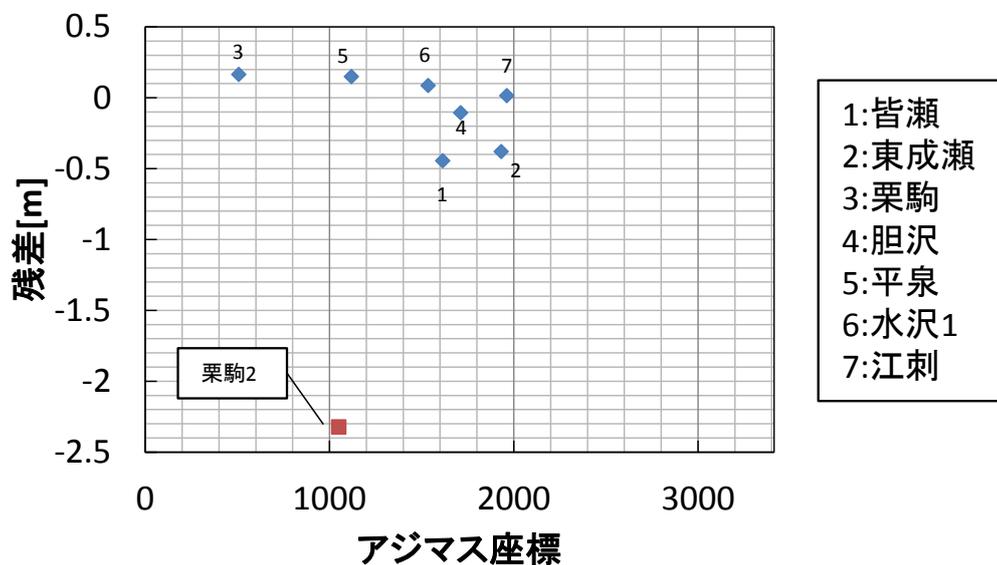


図 6.6.2 北行軌道における位置と残差(衛星軌道方向)

Fig. 6.6.2 Positions and residual errors in the ascending orbit (satellite orbit direction)

(2) 南行軌道

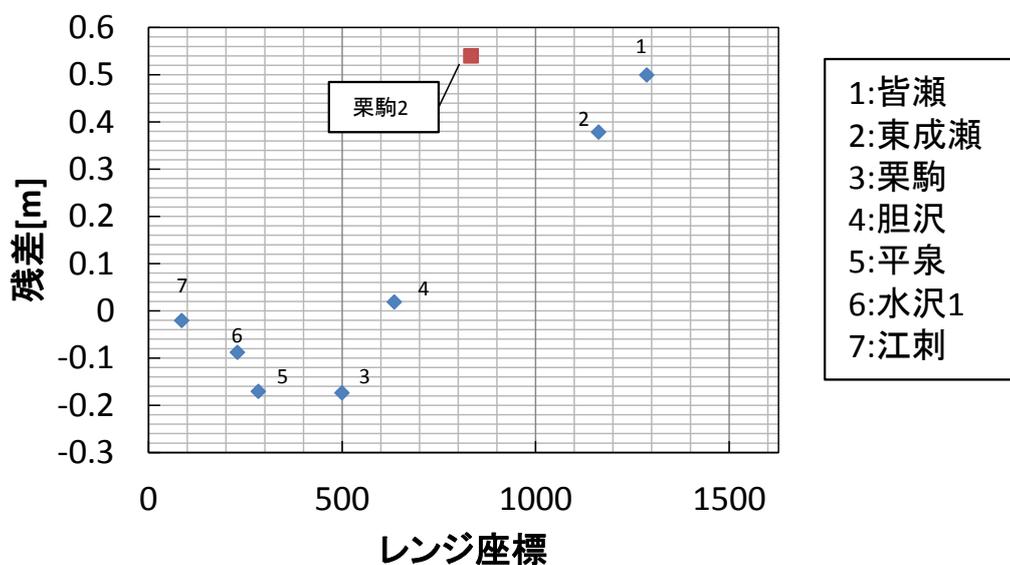


図 6.6.3 南行軌道における位置と残差

Fig. 6.6.3 Positions and residual errors in the descending orbit

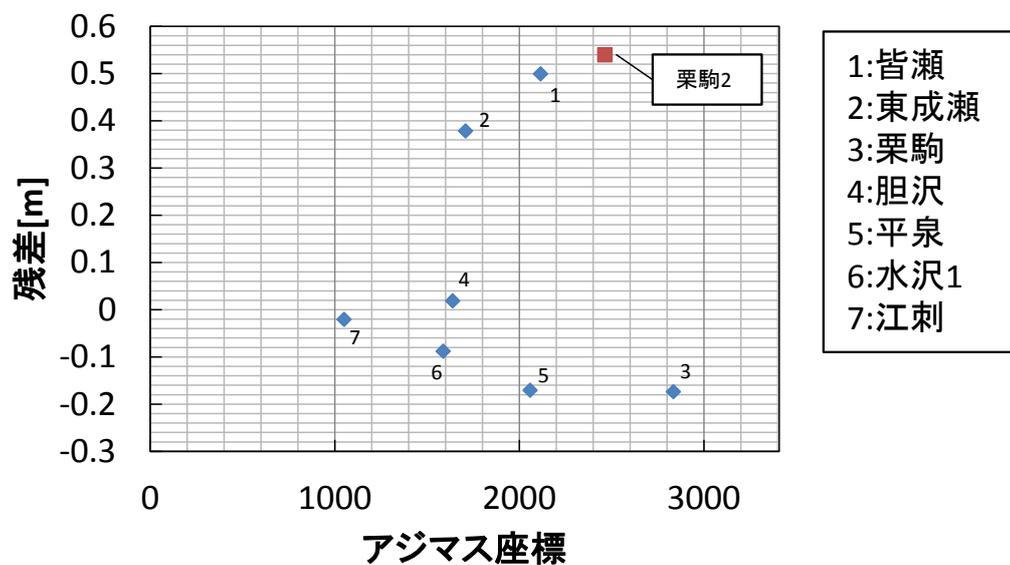


図 6.6.4 南行軌道における位置と残差(衛星軌道方向)

Fig. 6.6.4 Positions and residual errors in the descending orbit (satellite orbit direction)

6. 6. 3 考察

図 6.6.1 と図 6.6.3 の結果は、電子基準点「栗駒 2」を除くレンジ方向には系統的な誤差がある可能性を示唆している。一方で、図 6.6.2 と図 6.6.4 の結果は各軌道においてアジマス方向（衛星軌道方向）には系統的な誤差がないことを示している。

## 6. 7 系統誤差の除去

前節で示唆された、衛星視線方向の系統的な誤差の除去を試みる。この誤差は視線方向の位置と相関していると考えると以下の要因が想定される。

- ・変位量の計算で、シーン全体で中心の入射角を共通して使用しているが、実際の入射角は楕円体に対する局所入射角で地点により異なるため、その違いによる楕円体誤差
- ・残軌道縞による誤差

そこで本節では上記の誤差の除去を試みた。

### 6. 7. 1 楕円体誤差除去

干渉 SAR 処理に用いた対応地域の DEM データ（国土基盤情報 10m メッシュ DEM）より、楕円体に対する局所入射角を求めた。また、各電子基準点における衛星視線方向への位置変動量も局所入射角を用いて再計算した。各電子基準点に対する入射角、方位角を表 6.7.1 に示す。

表 6.7.1 電子基準点における入射角と方位角

Table 6.7.1 Angle of incidence and azimuth at GPS-based control stations

基準点名	北行軌道		南行軌道	
	入射角[°]	方位角[°]	入射角[°]	方位角[°]
栗駒2	37.72	79.88	38.95	280.18
東成瀬	37.33	79.91	39.80	280.15
皆瀬	36.75	79.90	40.10	280.16
水沢1	39.80	79.91	37.21	280.16
平泉	39.40	79.89	37.35	280.17
栗駒	38.39	79.86	37.99	280.20
胆沢	38.74	79.91	38.37	280.15
江刺	40.49	79.93	36.80	280.14

### 6. 7. 1 残軌道縞による誤差除去

アンラップ結果に残軌道縞に対応する系統誤差が存在した場合、面全体に長周期の位置変動成分として現れる。アンラッピングデータから、統計的処理により面的な位相関数を推定し、推定された位相関数を残軌道縞に対応する系統誤差として除去した。

### 6. 7. 2 誤差評価結果

6. 6 節と同様の方法で除去後の誤差の評価を行った。北行軌道における結果を図 6.7.1、図 6.7.2 に、南行軌道における結果を図 6.7.3、図 6.7.4 にそれぞれ示す。

(1) 北行軌道

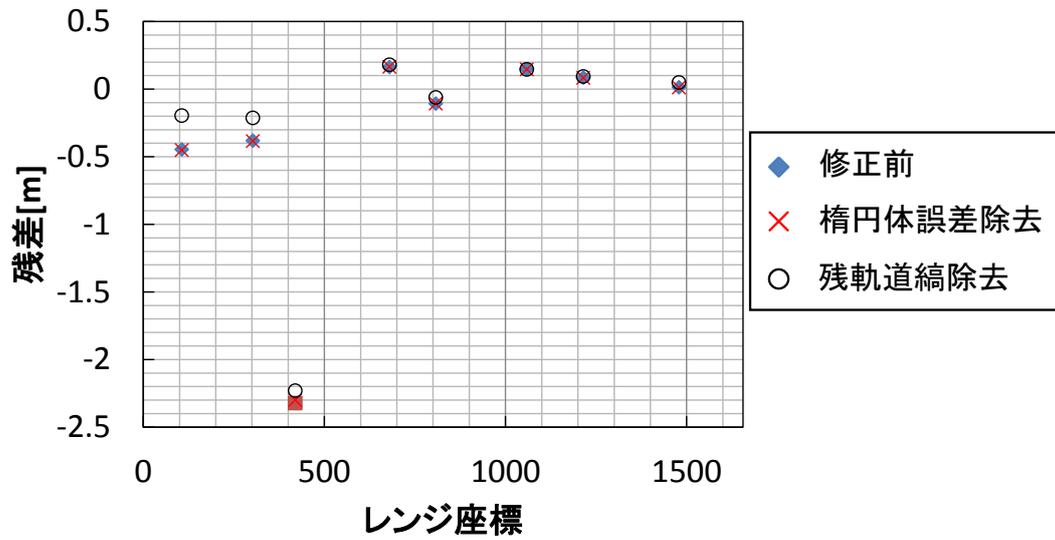


図 6.7.1 北行軌道における系統誤差除去後の残差(衛星視線方向)

Fig. 6.7.1 Residual error after removal of systematic error in ascending orbit (satellite line-of-sight direction)

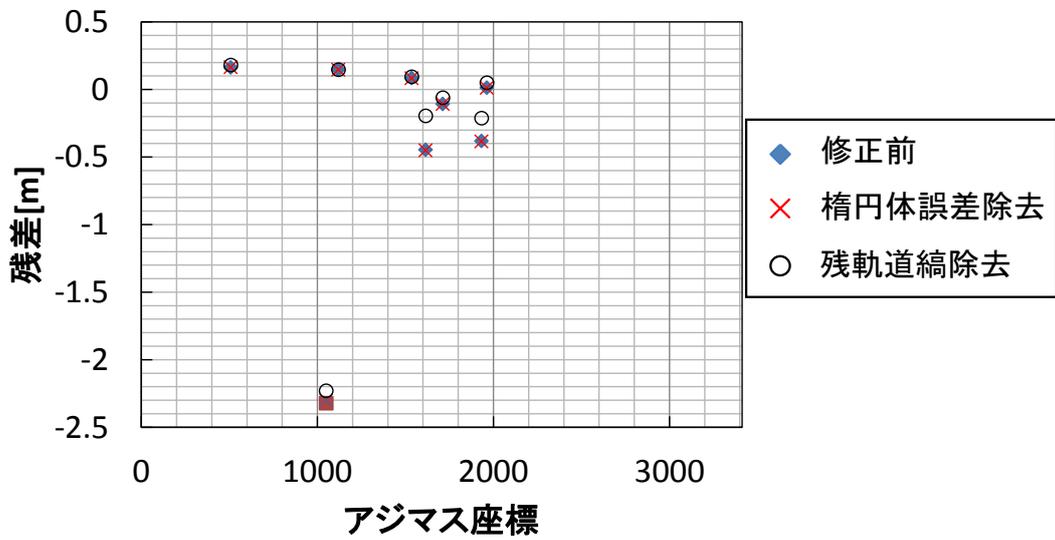


図 6.7.2 北行軌道における系統誤差除去後の残差(衛星軌道方向)

Fig. 6.7.2 Residual error after removal of systematic error in ascending orbit (satellite orbit direction)

(2) 南行軌道

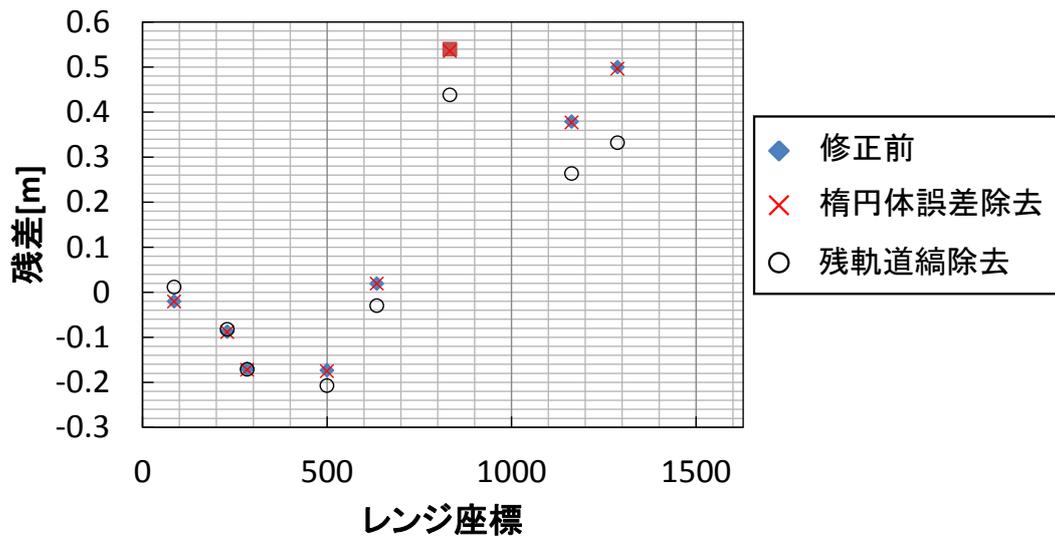


図 6.7.3 南行軌道における系統誤差除去後の残差(衛星視線方向)

Fig. 6.7.3 Residual error after removal of systematic error in descending orbit (satellite line-of-sight direction)

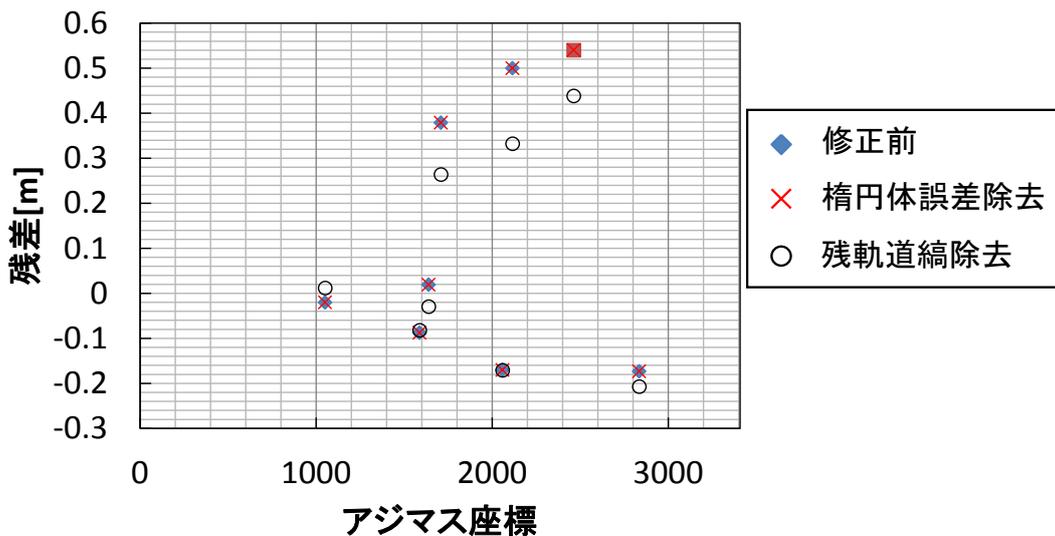


図 6.7.4 南行軌道における系統誤差除去後の残差(衛星軌道方向)

Fig. 6.7.4 Residual error after removal of systematic error in descending orbit (satellite orbit direction)

6. 7. 3 考察

楕円体誤差は、除去による修正量が両軌道においてレンジ方向、アジマス方向ともに小さく、影響は微々たるものであることが確認できた。また、残軌道縞の誤差は、影響が有り、残軌道縞の除去により全体として誤差が0に近づき減少していることがわかる。残軌道縞の除去により、面的な位置による処理を行っているため、位置に依存した系統誤差は、より小さくなったと考えられる。しかし、依然として図 6.7.1、図 6.7.3 に示されるレンジ方向の残差の分布は、図 6.6.1、図 6.6.3 の分布と類似している。

## 6. 8 2.5次元解析による合成変位量の推定

合成によって求めた北行軌道および南行軌道の2つの差分干渉結果から、2.5次元解析によって垂直方向と水平方向の変位量を推定した。

### 6. 8. 1 原理

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 $\Delta z$ とする。差分干渉SARにより計測される視線方向の変位量を $\Delta a$ とすると、 $\Delta a$ は地表面の変位量ベクトル $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)T$ を視線方向の単位ベクトル上に投影したものである。よって、

$$\Delta a = \Delta x \sin \theta \cos \phi + \Delta y \sin \theta \sin \phi + \Delta z \cos \theta \quad \text{式 6.8-1}$$

と表される<sup>6)</sup>。ここで $\theta$ は各点における入射角、 $\phi$ は衛星の方位角（東方向を0とする）である。北行軌道での変位量を $\Delta a$ 、南行軌道での変位量を $\Delta d$ とおくと、式6.8-1より、各軌道における入射角、方位角をそれぞれ添え字a、dで表すと

$$\Delta a = \Delta x \sin \theta_a \cos \phi_a + \Delta y \sin \theta_a \sin \phi_a + \Delta z \cos \theta \quad \text{式 6.8-2}$$

$$\Delta d = \Delta x \sin \theta_d \cos \phi_d + \Delta y \sin \theta_d \sin \phi_d + \Delta z \cos \theta_d \quad \text{式 6.8-3}$$

と書ける。ここで、未知数は変位量ベクトル $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)T$ の3つであり、それに対して方程式は2つであるため、条件が不足している。そこで $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ に何らかの仮定条件を設定して式6.8-2、式6.8-3を解く必要がある。

### 6. 8. 2 解析条件

#### (1) 従来の条件

ALOS PALSARの電波照射方向はおおよそ東西方向であるから、東西方向の移動量に対して、南北方向の移動量の視線方向の移動量への寄与は無視できると仮定し、

$$\Delta y = 0 \quad \text{式 6.8-4}$$

として、式6.8-2、式6.8-3を解くと

$$\Delta x = \frac{\Delta a \cos \theta_d - \Delta d \cos \theta_a}{\sin \theta_a \cos \phi_a - \sin \theta_d \cos \phi_d} \quad \text{式 6.8-5}$$

$$\Delta y = 0 \quad \text{式 6.8-6}$$

$$\Delta z = \frac{\Delta a \sin \theta_d \cos \phi_d - \Delta d \sin \theta_a \cos \phi_a}{\cos \theta_a \sin \theta_d \cos \phi_d - \cos \theta_d \sin \theta_a \cos \phi_a} \quad \text{式 6.8-7}$$

と求まる。

#### (2) 本研究における条件

表6.31からわかるように、水平方向の位置変動量 $\Delta x, \Delta y$ は同じオーダーとなっており、(1)での $\Delta x$ に対して $\Delta y$ は小さく無視できるという仮定が成り立っていない。そこで、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する。つまり、

$$\Delta y = \alpha \Delta x \quad \text{式 6.8-8}$$

という条件を設定し、式6.8-2、式6.8-3を解くと

$$\Delta x = \frac{\Delta a \cos \theta_d - \Delta d \cos \theta_a}{(\sin \theta_a \cos \phi_a + \alpha \sin \theta_a \sin \phi_a) \cos \theta_d - (\sin \theta_d \cos \phi_d + \alpha \sin \theta_d \sin \phi_d) \cos \theta_a} \quad \text{式 6.8-9}$$

$$\Delta y = \frac{\alpha(\Delta a \cos \theta_d - \Delta d \cos \theta_a)}{(\sin \theta_a \cos \phi_a + \alpha \sin \theta_a \sin \phi_a) \cos \theta_d - (\sin \theta_d \cos \phi_d + \alpha \sin \theta_d \sin \phi_d) \cos \theta_a} \quad \text{式 6.8-10}$$

$$\Delta z = -\frac{\Delta a(\sin \theta_d \cos \phi_d + \alpha \sin \theta_d \sin \phi_d) - \Delta d(\sin \theta_a \cos \phi_a + \alpha \sin \theta_a \sin \phi_a)}{(\sin \theta_a \cos \phi_a + \alpha \sin \theta_a \sin \phi_a) \cos \theta_d - (\sin \theta_d \cos \phi_d + \alpha \sin \theta_d \sin \phi_d) \cos \theta_a} \quad \text{式 6.8-11}$$

と求まる。

今回、係数 $\alpha$ は表 6.3.1 より各電子基準点の「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 $\alpha$ を求めた。東西方向と南北方向の移動量の相関を図 6.8.1 に示す。

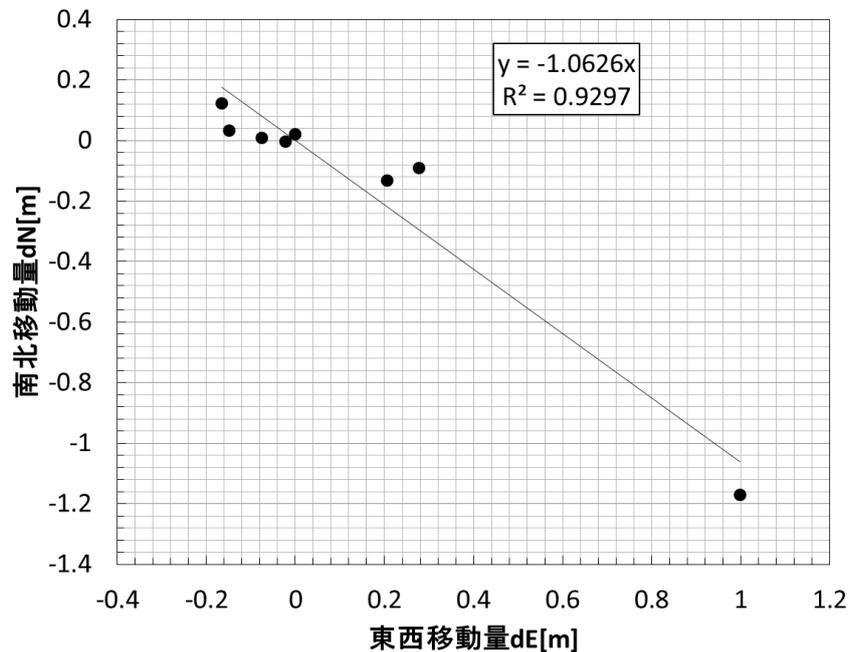


図 6.8.1 地震による電子基準点の東西方向と南北方向の移動量(国土地理院、表 6.3.1 の電子基準点)  
Figure 6.8.1 Quantity of movement displacement in east-west direction and south-north direction of GPS-based control stations caused by an earthquake

これにより $\alpha$ は-1.0626 と設定した。また、比較のために従来手法の条件である $\Delta y = 0$  とも計算した。

以上により、今回の解析条件は表 6.8.1 に示すとおりである。

表 6.8.1 本研究における解析条件

Table 6.8.1 Analysis conditions for this study

条件	式	備考
1	$\Delta y = 0$	従来条件
2	$\Delta y = -1.0626\Delta x$	$\alpha = -1.0626$

### 6. 8. 3 合成変位量図作成結果

条件1と条件2において合成変位量図を作成した結果を以下の図 6.8.2 ~ 図 6.8.16 に示す。そのうち、図 6.8.3、図 6.8.6、図 6.8.9、図 6.8.12、図 6.8.15 に、MCF 法による出力データから得られた (BC 法で計算不能、又はコヒーレンス値 0.3 未満) 領域を示す。さらに、図 6.8.4、図 6.8.7、図 6.8.10、図 6.8.13、図 6.8.16 に、MCF 法による出力データから得られた領域 (BC 法で計算不能、又はコヒーレンス値 0.3 未満) の境界線とともに、等変動量線で色分けして拡大した図を示す。

#### (1) 条件1

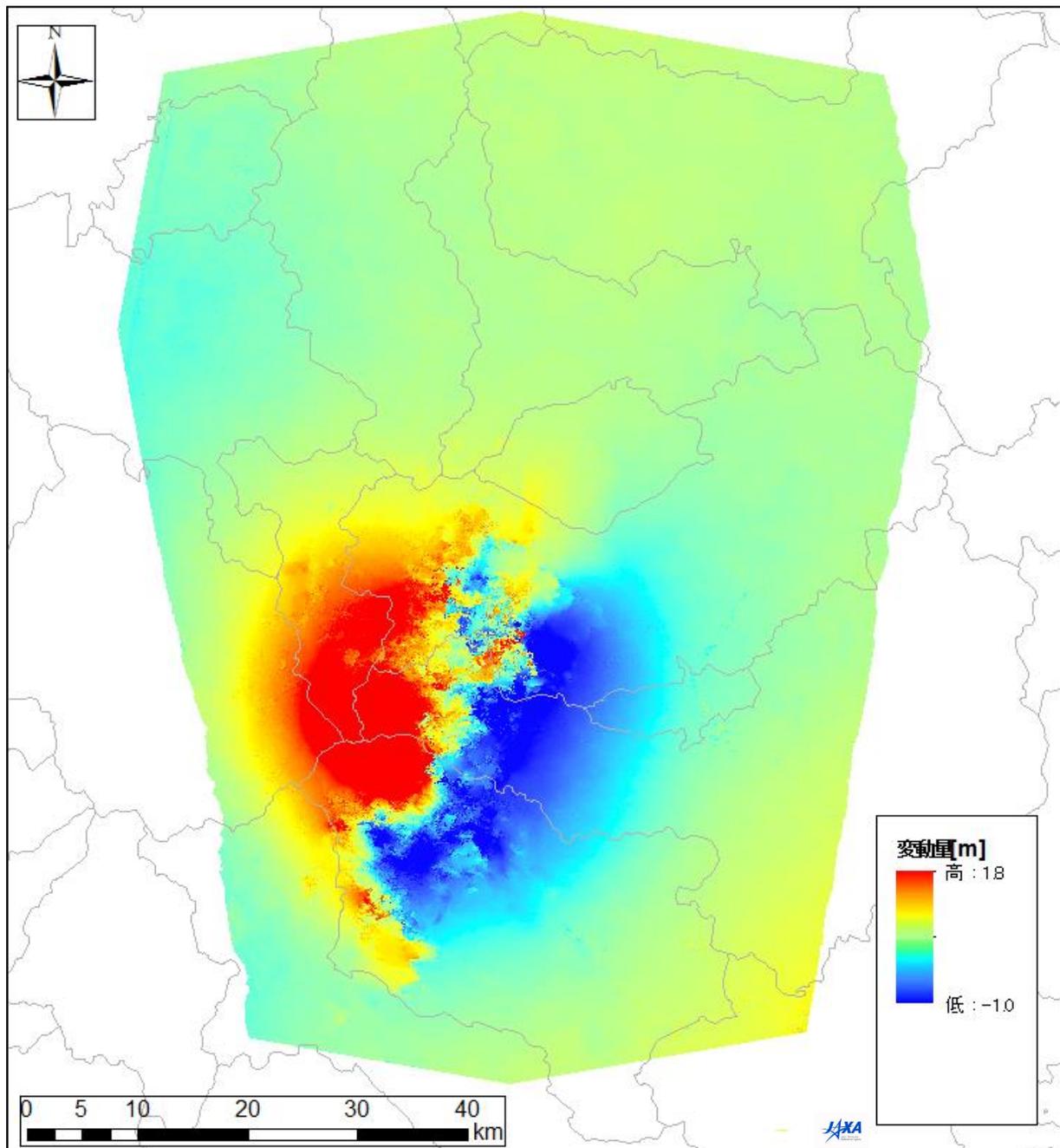


図 6.8.2 東西方向合成変位量図 (条件1)

Fig. 6.8.2 Quantity of east-west direction synthesis displacement (condition 1)

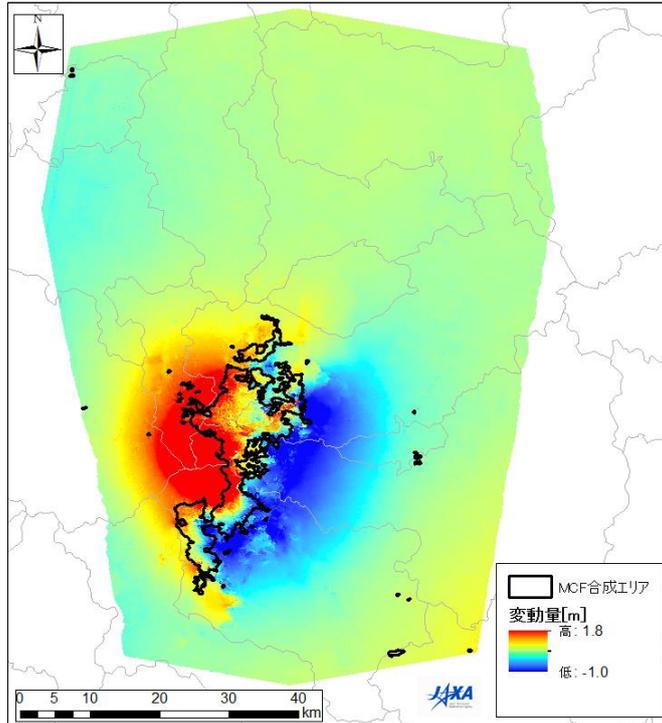


図 6.8.3 東西方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 1)

Fig. 6. 8.3 Quantity of east-west direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 1)

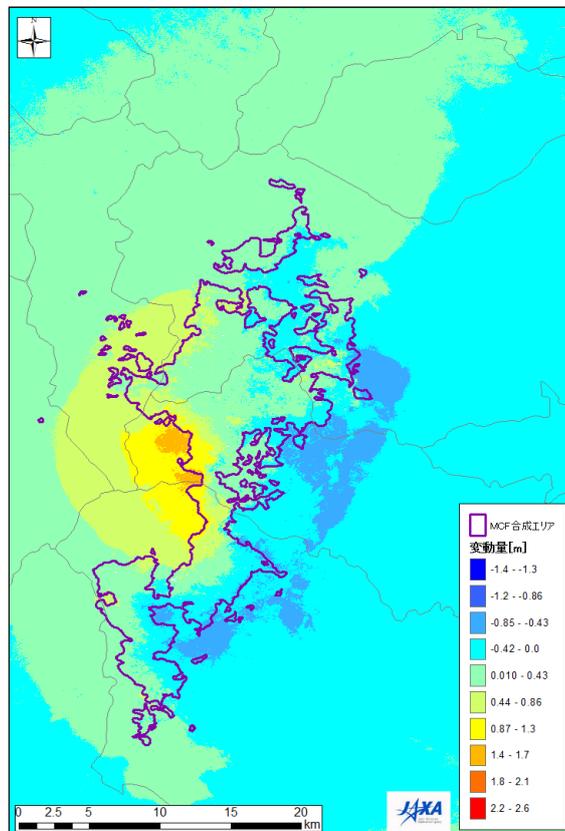


図 6.8.4 東西方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 1、拡大)

Fig. 6.8.4 Quantity of east-west direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 1, expansion)

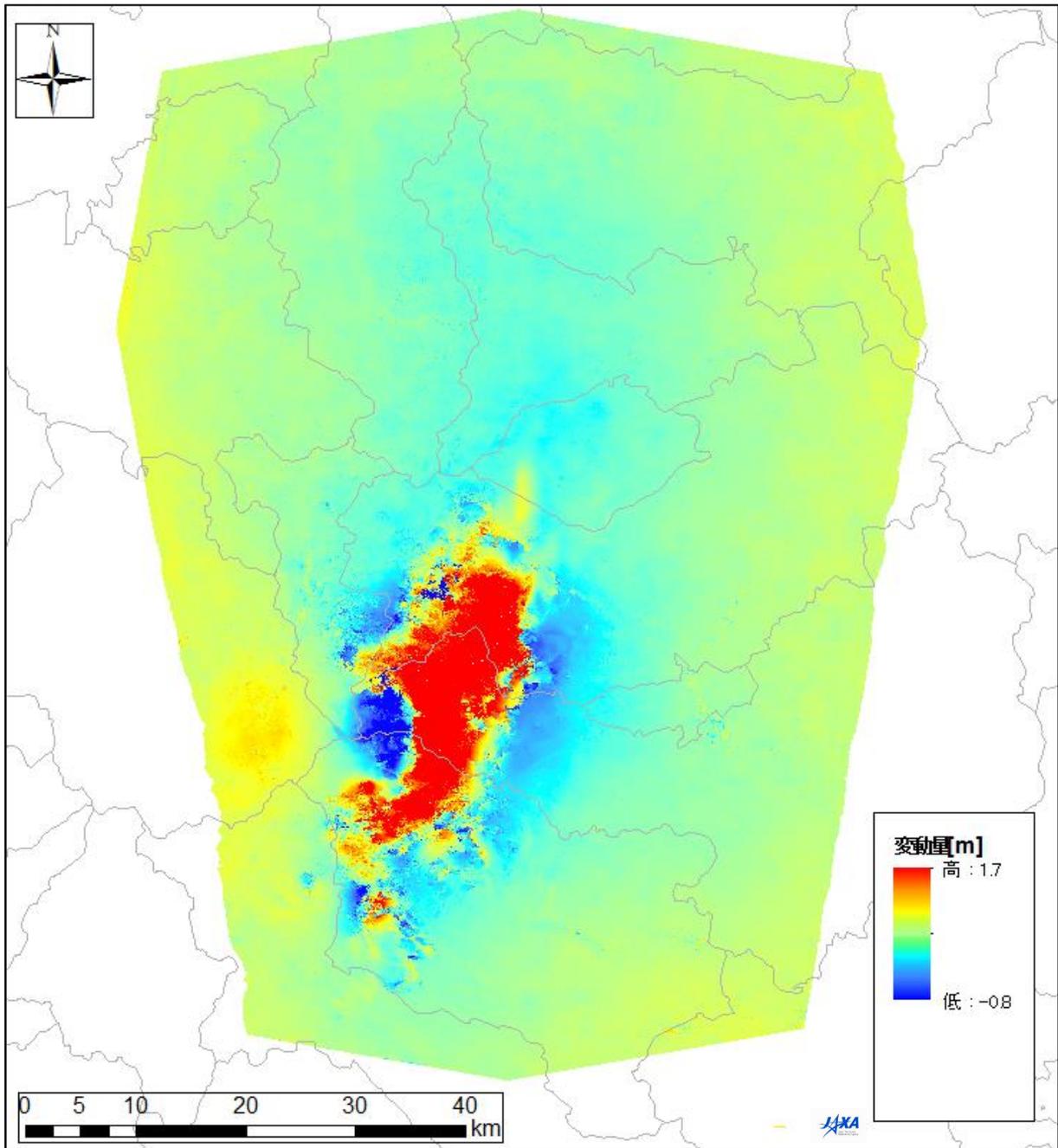


図 6.8.5 垂直方向合成変位量図 (条件1)

Fig. 6.8.5 Quantity of vertical direction synthesis displacement (condition 1)

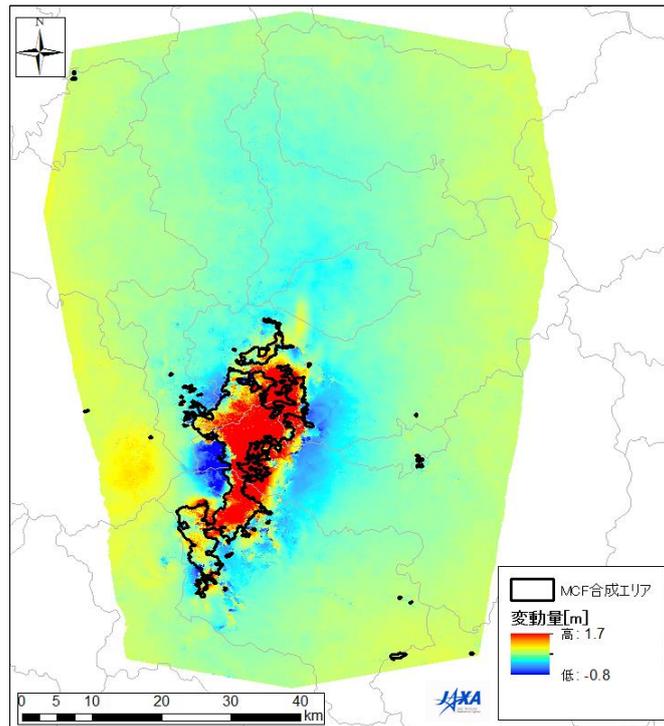


図 6.8.6 垂直方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 1)

Fig. 6.8.6 Quantity of vertical direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 1)

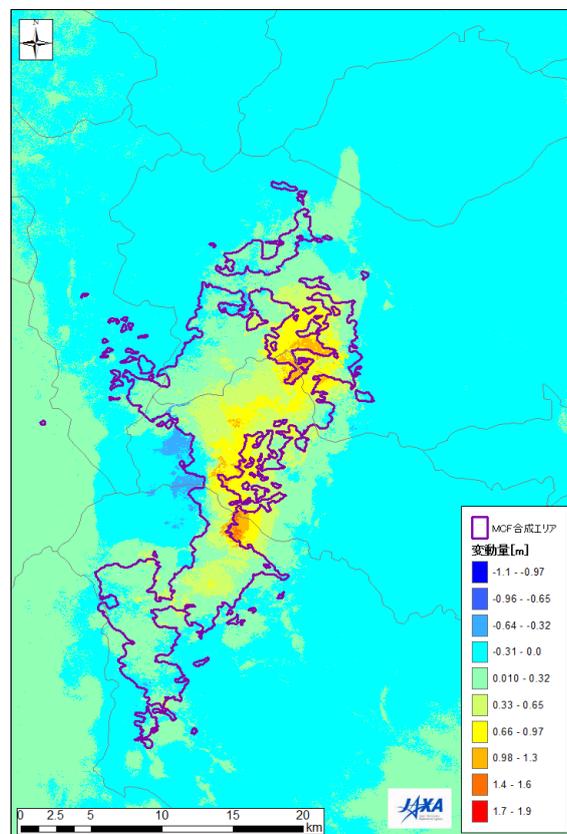


図 6.8.7 垂直方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 1、拡大)

Fig. 6.8.7 Quantity of vertical direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 1, expansion)

(3) 条件2

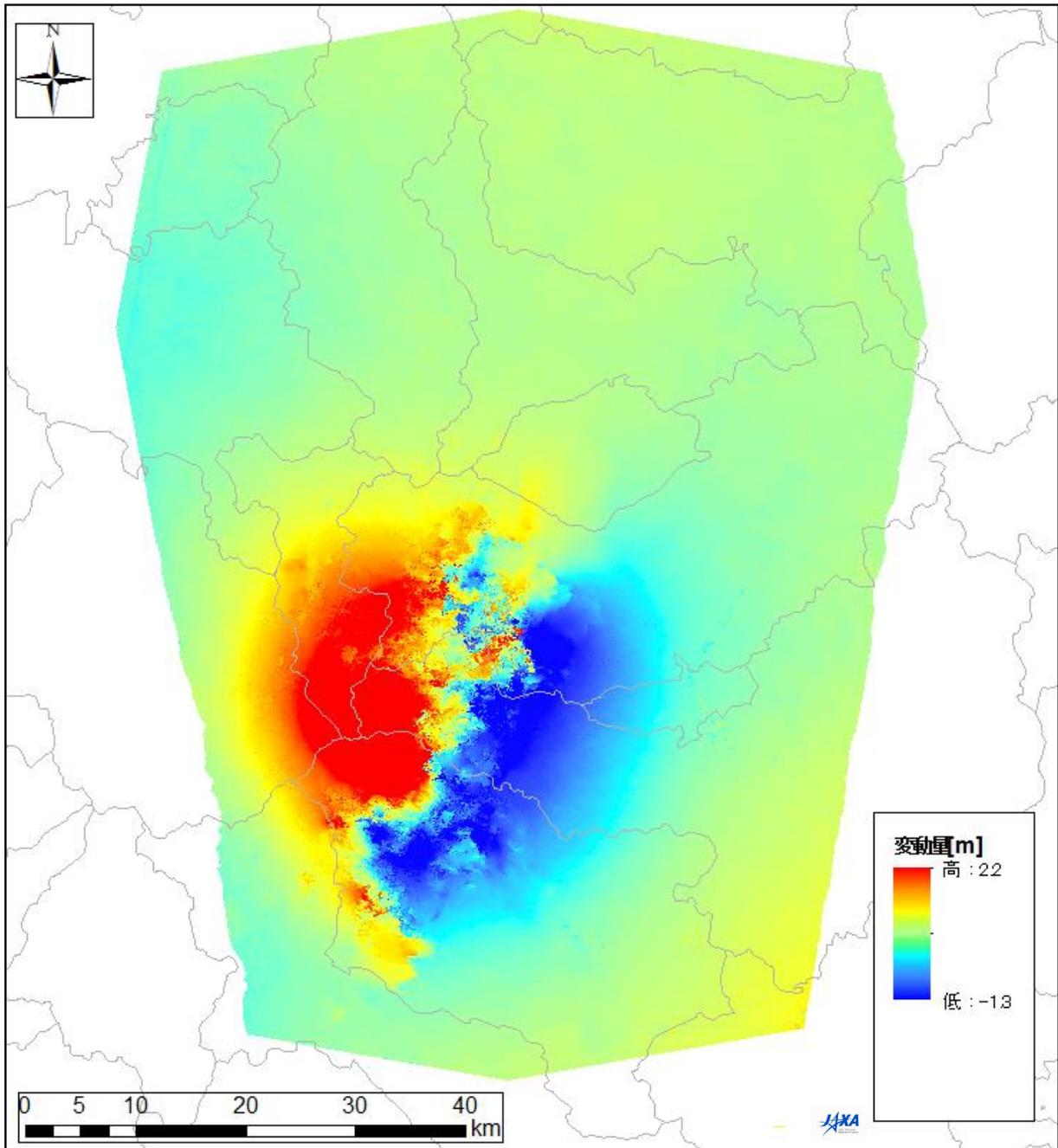


図 6.8.8 東西方向合成変位量図 (条件 2)

Fig. 6.8.8 Quantity of east-west direction synthesis displacement (condition 2)

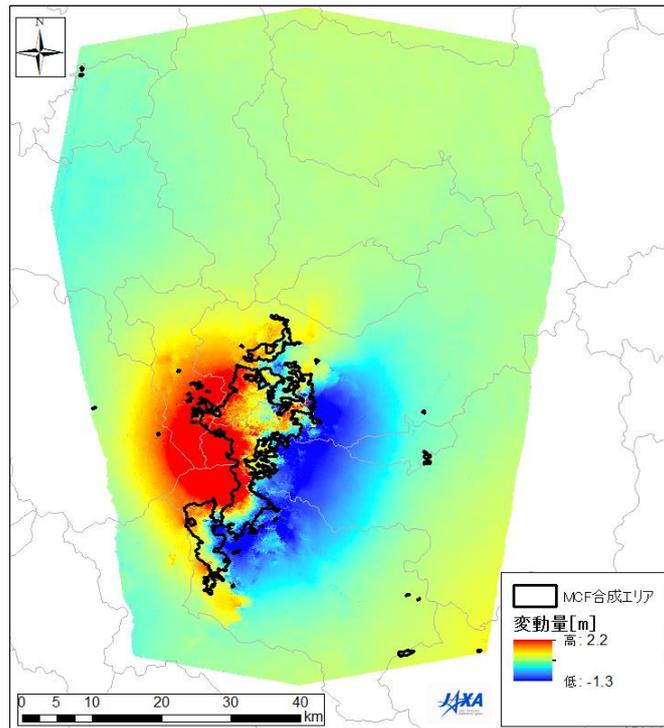


図 6.8.9 東西方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 2)

Fig. 6.8.9 Quantity of east-west direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 2)

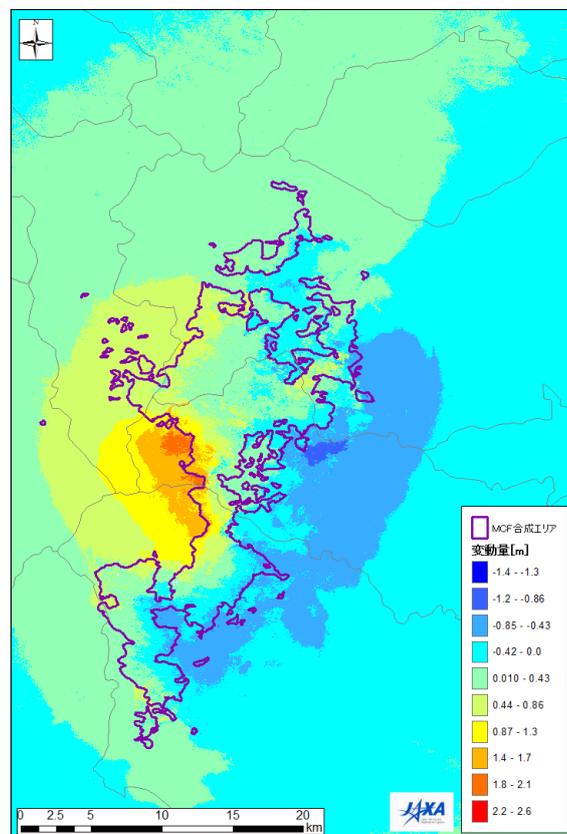


図 6.8.10 東西方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 2、拡大)

Fig. 6.8.10 Quantity of east-west direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 2, expansion)

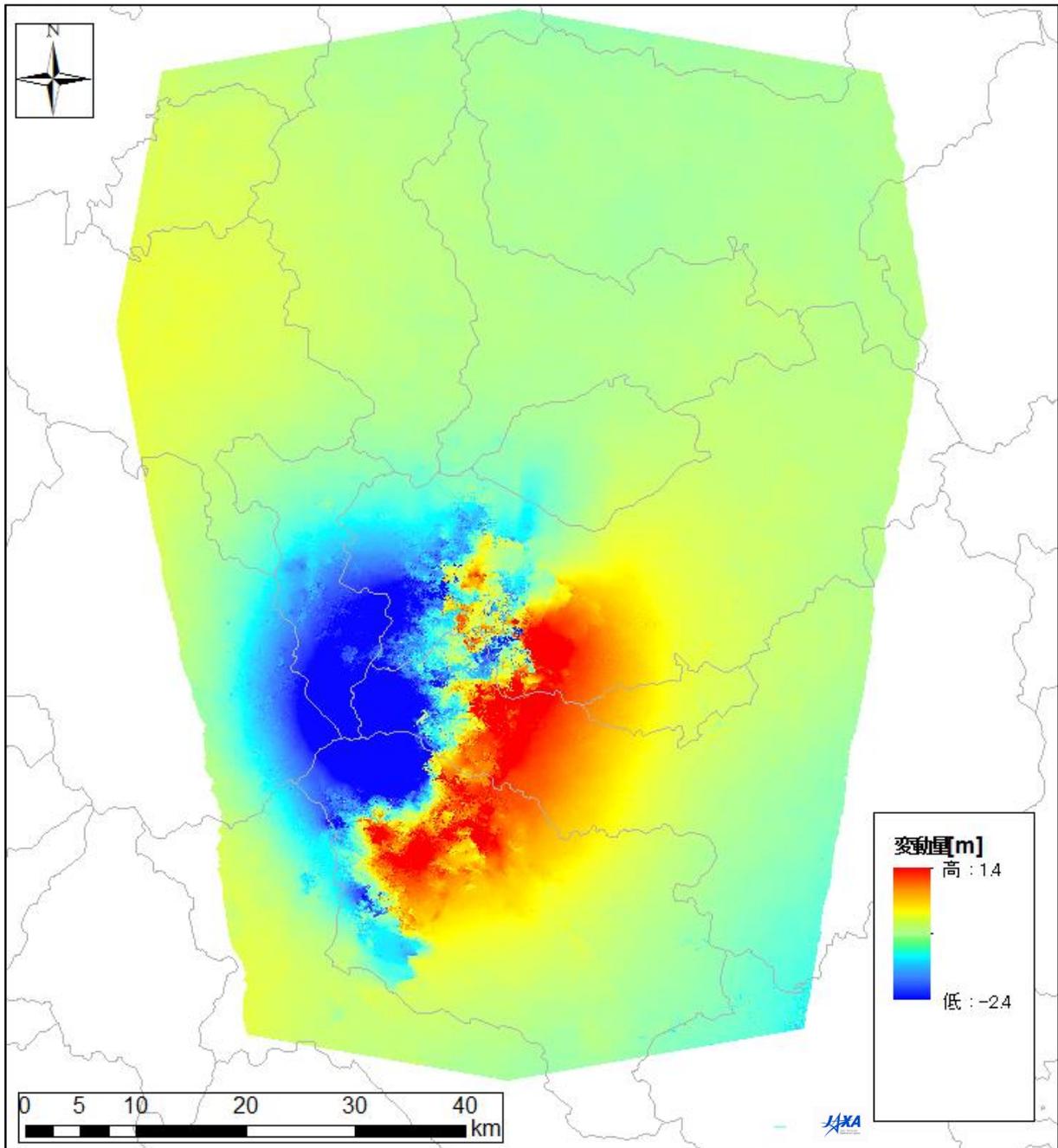


図 6.8.11 南北方向合成変位量図 (条件 2)

Fig. 6.8.11 Quantity of north-south direction synthesis displacement (condition 2)

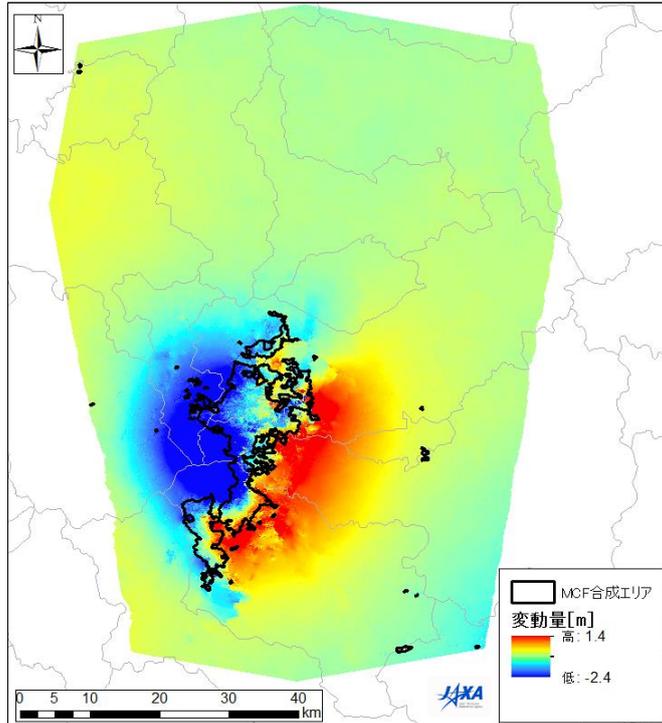


図 6.8.12 南北方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 2)

Fig. 6.8.12 Quantity of north-south direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 2)

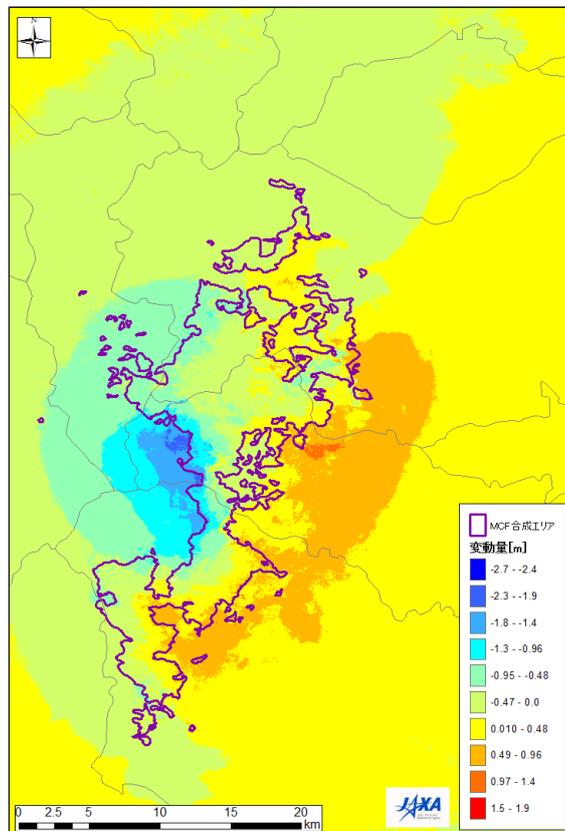


図 6.8.13 南北方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 2、拡大)

Fig. 6.8.13 Quantity of north-south direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 2, expansion)

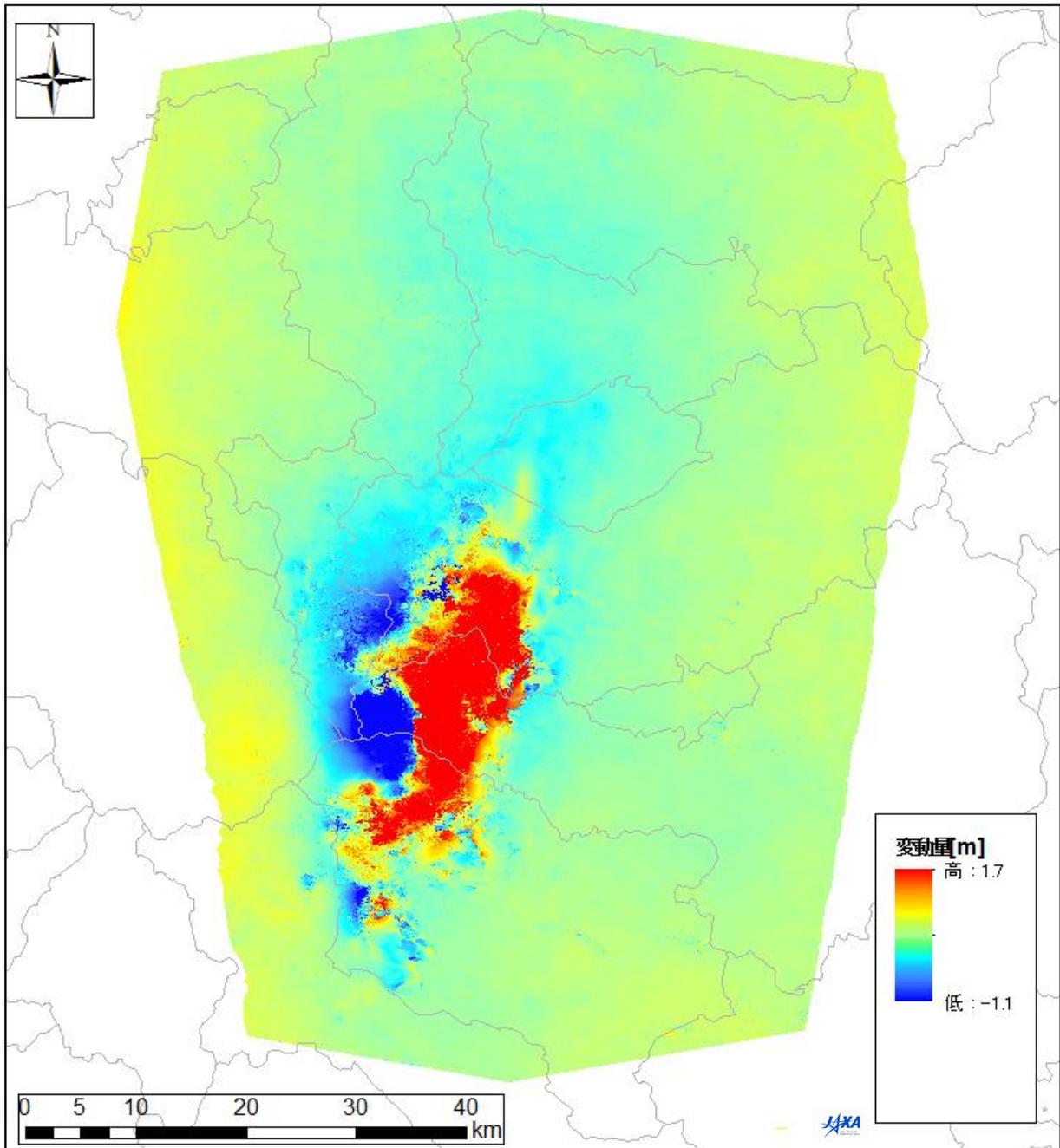


図 6.8.14 垂直方向合成変位量図 (条件 2)

Fig. 6.8.14 Quantity of vertical direction synthesis displacement (condition 2)

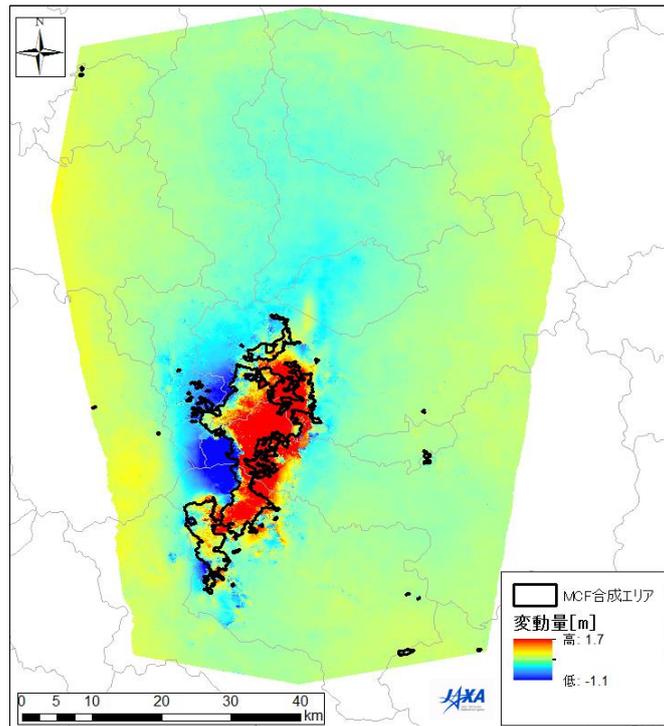


図 6.8.15 垂直方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 2)

Fig. 6.8.15 Quantity of vertical direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 2)

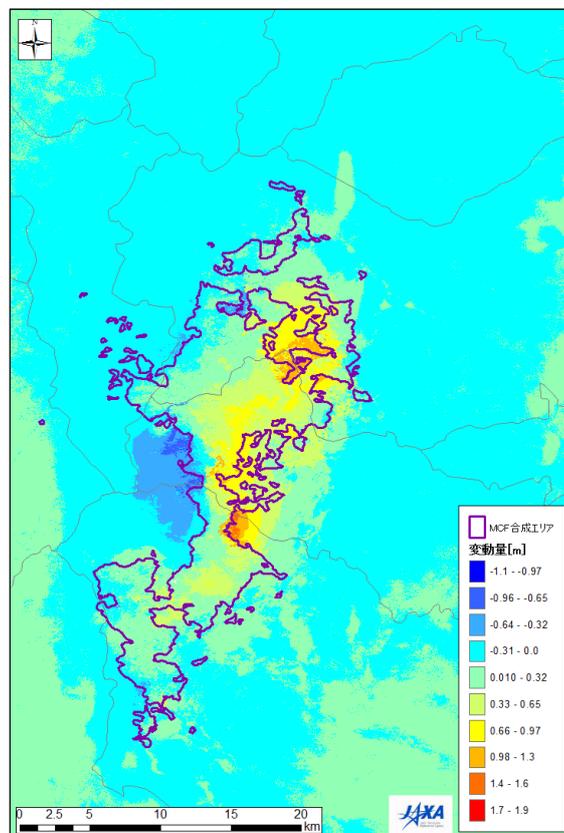


図 6.8.16 垂直方向合成変位量図と MCF 合成エリア (条件 2、拡大)

Fig. 6.8.16 Quantity of vertical direction synthesis displacement and the MCF synthesis area (condition 2, expansion)

## 6.9 合成変位量の推定結果の誤差評価

表 6.8.1 に示した条件で実施した解析結果 (図 6.8.2 ~ 図 6.8.16) の誤差を評価することによって、従来の解析条件である条件 1 と本研究で導入した条件である条件 2 との優劣を比較する。

### 6.9.1 誤差評価方法

誤差の評価は、干渉 SAR により求めた変位量を  $d_m$ 、国土地理院による位置変動量を各軌道の衛星視線方向への位置変動量に変換した値を  $d_T$  とすると下式のようにして行った。これは残差の絶対値の総和である。

$$\sum |d_m - d_T| \quad \text{式 6.9-1}$$

また、合成変位量には、BC 法から得られた領域と、精度が悪いコヒーレンス値 0.3 未満の領域で実施した MCF 法によりデータから得られた領域の 2 つの領域がある。図 6.9.1 に示すように電子基準点「栗駒 2」は、MCF 法によりデータから得られたコヒーレンス値 0.3 未満で精度が低い領域に存在している。そのため、誤差の評価も「栗駒 2」を含めた条件と、除いた条件で評価を行った。

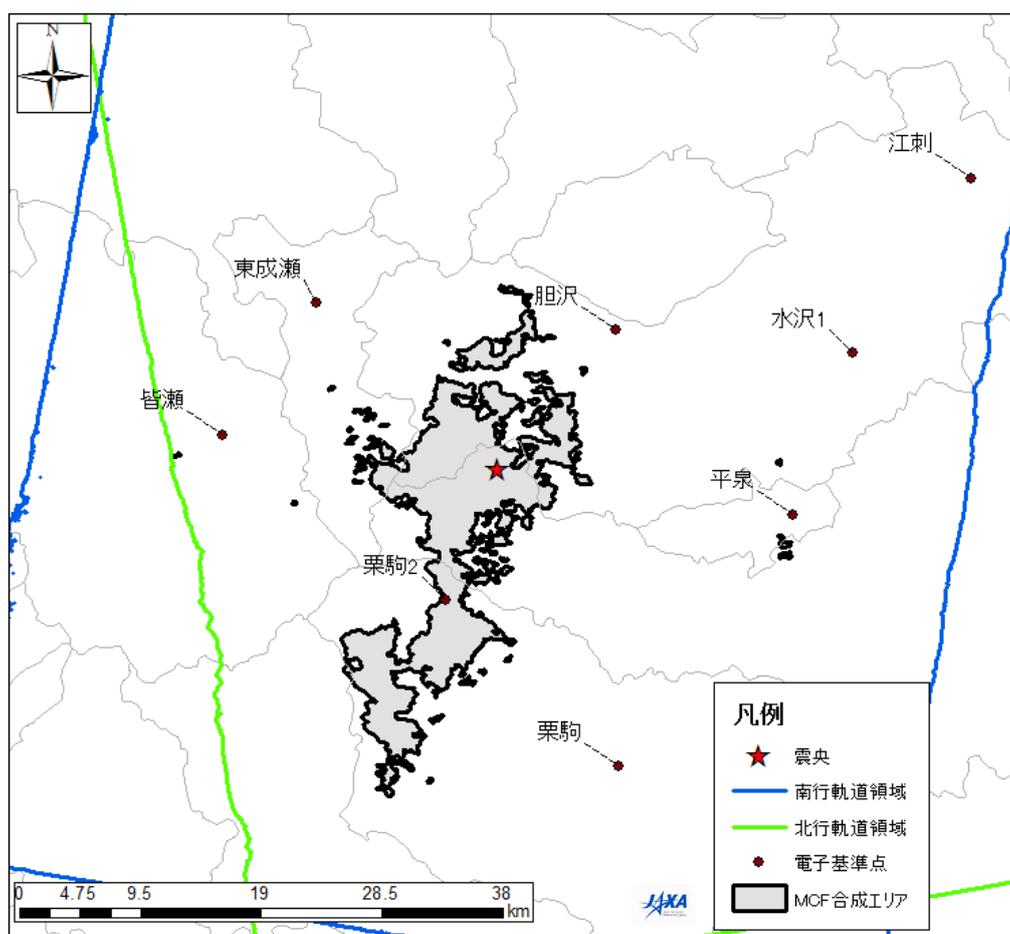


図 6.9.1 電子基準点と MCF 法による合成データ領域

Fig. 6.9.1 Synthesis data range according to GPS-based control stations and MCF method

### 6. 9. 2 評価結果

結果を図 6.9.2 に示す。また、「栗駒 2」を除いて評価した結果を図 6.9.3 に示す。

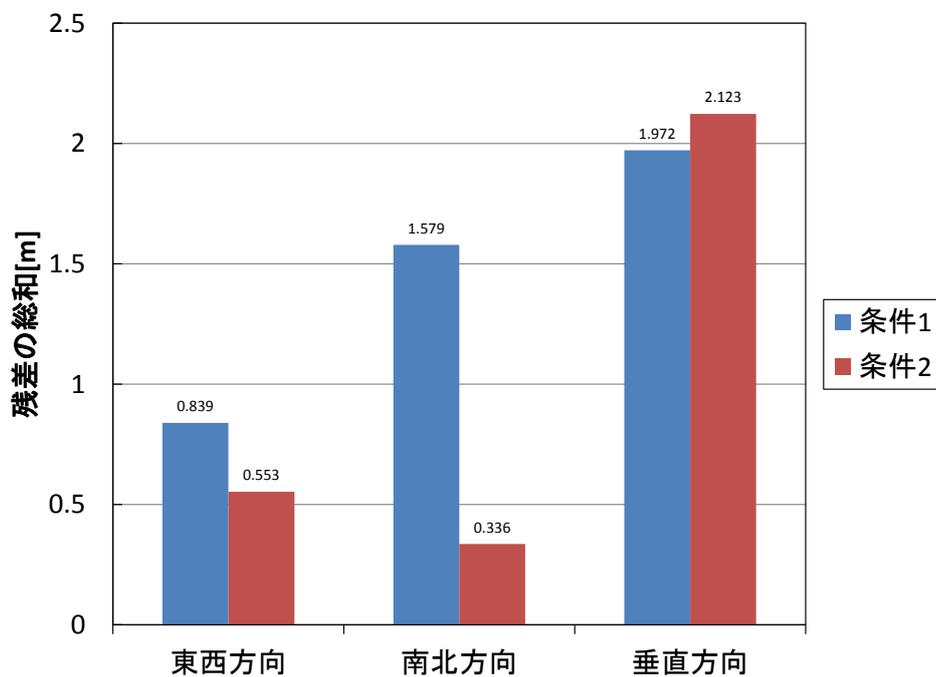


図 6.9.2 全電子基準点の残差総和の条件ごとの比較

Fig. 6.9.2 Comparison for each total residual error of all GPS-based control stations

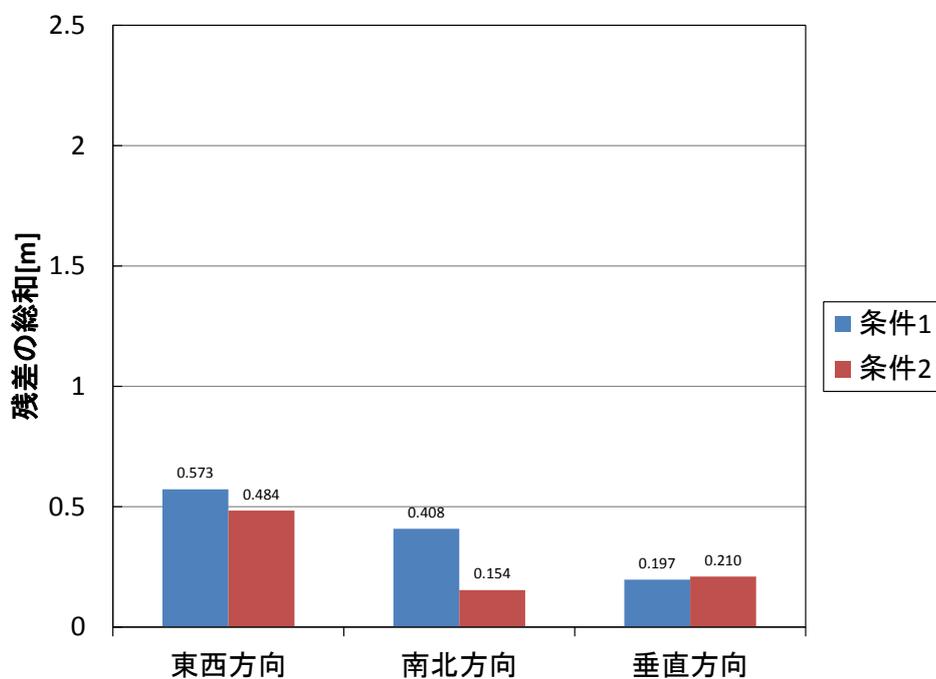


図 6.9.3 「栗駒 2」を除く電子基準点の残差総和の条件ごとの比較

Fig. 6.9.3 Comparison for each total residual error of all GPS-based control stations excluding Kurikoma 2

### 6. 9. 3 考察

図 6.9.2、図 6.9.3 より「条件 2」の設定において水平方向、特に南北方向の誤差が「条件 1」に比べ大きく改善している。東西方向では、「条件 1」と比べ今回新たに設定した「条件 2」で誤差が改善していることが示されている。また、垂直方向においても、コヒーレンス値が小さく誤差が大きい領域に存在する「栗駒 2」を除くと、誤差の範囲で両条件同等の精度となっている。このことから、「条件 2」により求めた結果がより良い精度を示しており、本研究で設定した「条件 2」は、従来手法の「条件 1」より優れていると考え、「条件 2」の結果を採用した。

### 6. 10 合成変位置の補正

2.5 次元解析においても、図 6.9.2 に示すように誤差が残っている。この誤差を電子基準点に使用して補正した。

#### 6. 10. 1 電子基準点による補正検討

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と本解析結果（条件 2）による位置変動量を比較した結果を、東西方向を図 6.10.1 に、南北方向を図 6.10.2 に、垂直方向を図 6.10.3 にそれぞれ示す。

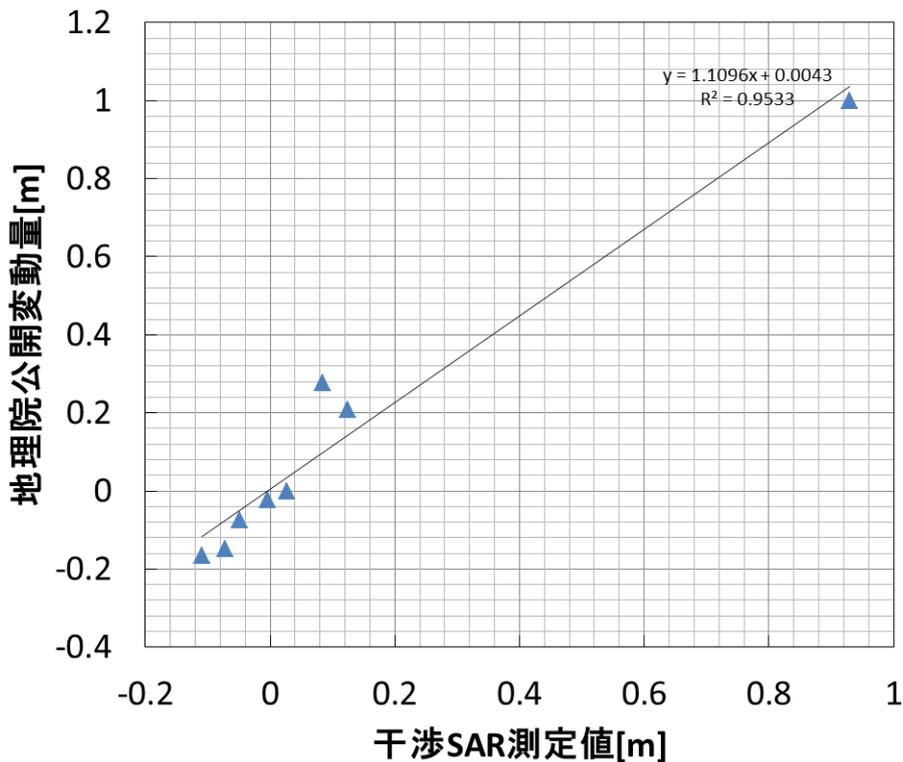


図 6.10.1 電子基準点成果と干渉 SAR 合成変位置との比較（東西方向）

Fig. 6.10.1 Comparison of GPS-based control station results with quantity of interferometry SAR synthesis displacement (east-west direction)

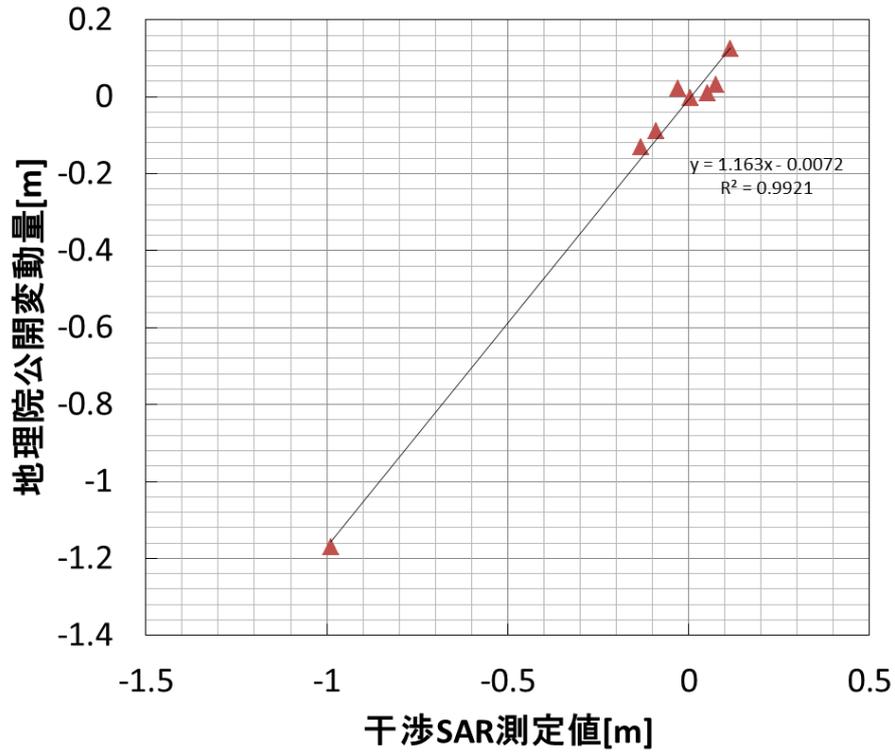


図 6.10.2 電子基準点成果と干渉 SAR 合成変位量との比較 (南北方向)  
 Fig. 6.10.2 Comparison of GPS-based control station results with quantity of interferometry SAR synthesis displacement (north-south direction)

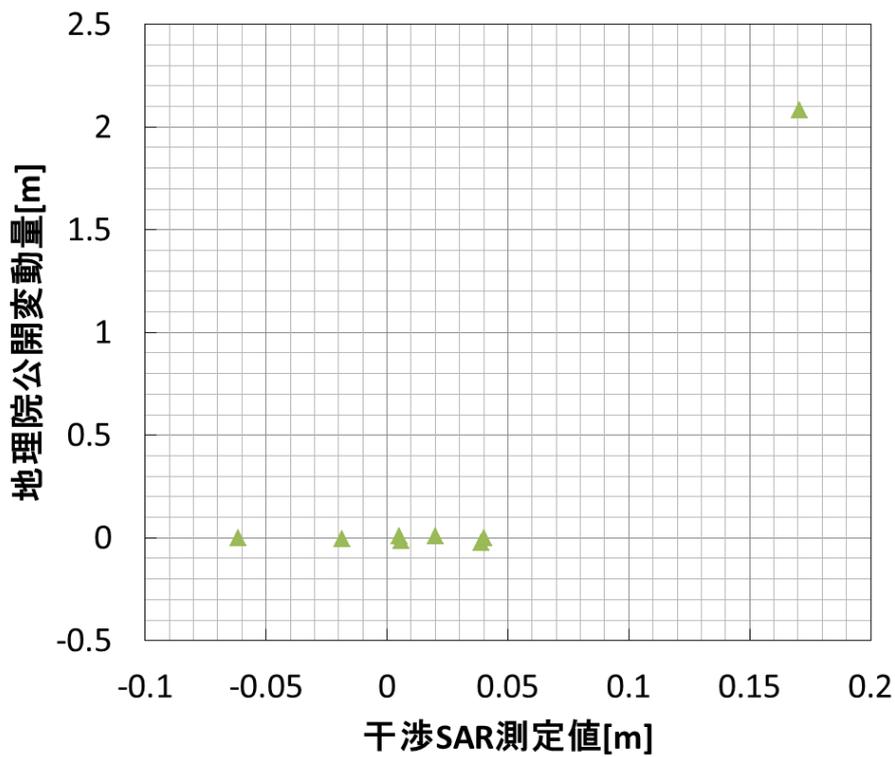


図 6.10.3 電子基準点成果と干渉 SAR 合成変位量との比較 (垂直方向)  
 Fig. 6.10.3 Comparison of GPS-based control station results with quantity of interferometry SAR synthesis displacement (vertical)

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、相関は低い結果となった。これは、「栗駒2」を除いた点においては、国土地理院から公開された電子基準点の変動量のほとんどが、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られる。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 6.10.1 のとおりである。

表 6.10.1 水平方向の補正式

Table 6.10.1 Horizontal direction correction formula

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

### 6.10.2 補正処理結果

電子基準点による補正を行い、最終的に求めた地表面変位量図を、東西方向を図 6.10.4 に、南北方向を図 6.10.5 に、垂直方向を図 6.10.6 にそれぞれ示す。また、同じく最終的に求めたこの地表面変位量図の移動量が大きいエリアが解るように、等移動量線で色分けした図を、東西方向を図 6.10.7 に、南北方向を図 6.10.8 に、垂直方向を図 6.10.9 にそれぞれ示す。

(1) 電子基準点により補正し最終的に求めた地表面変位量図

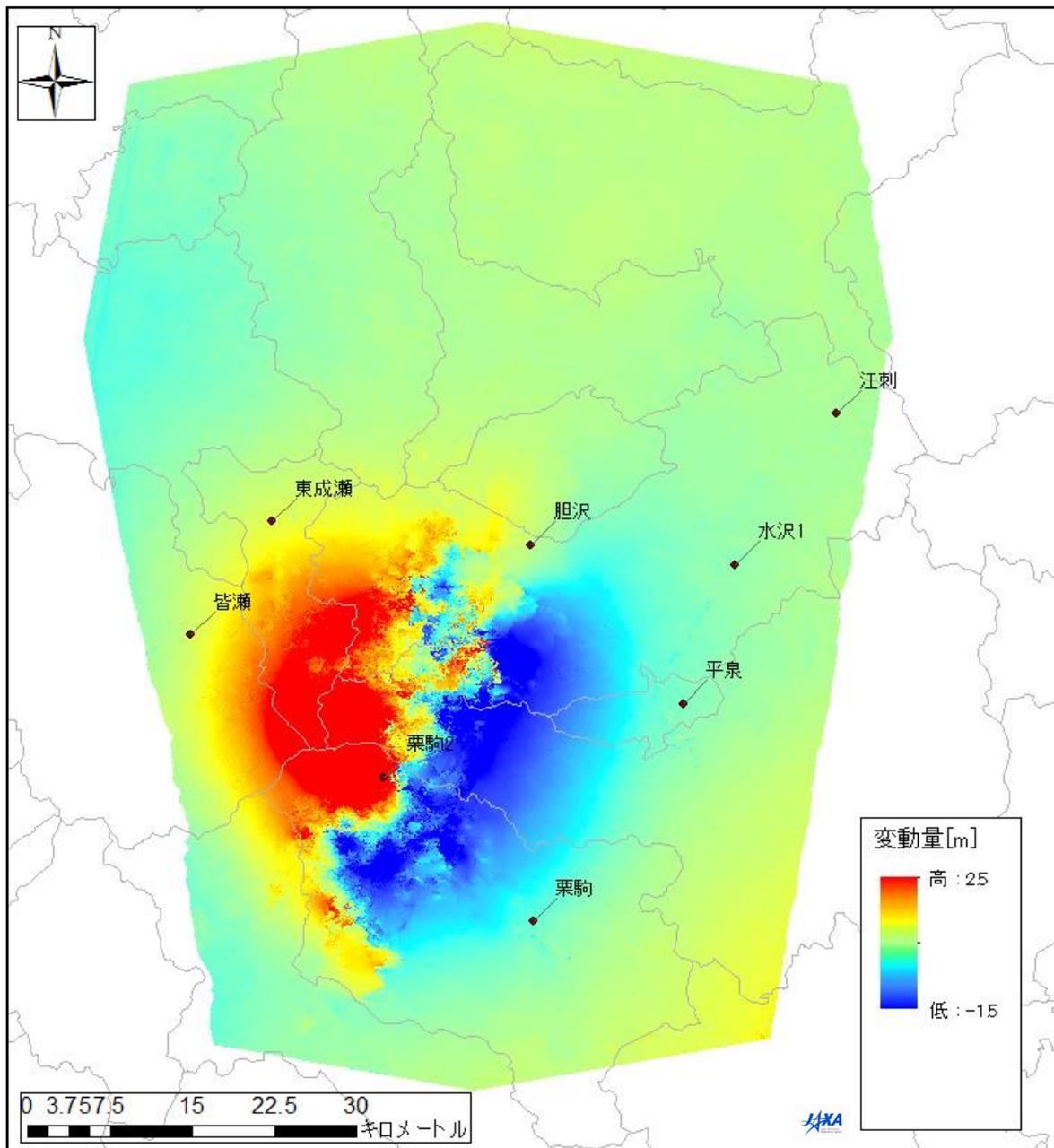


図 6.10.4 電子基準点データにより補正した地表面変位量 (東西方向)

Fig. 6.10.4 Quantity of ground surface displacement corrected based on GPS-based control station data (east-west direction)

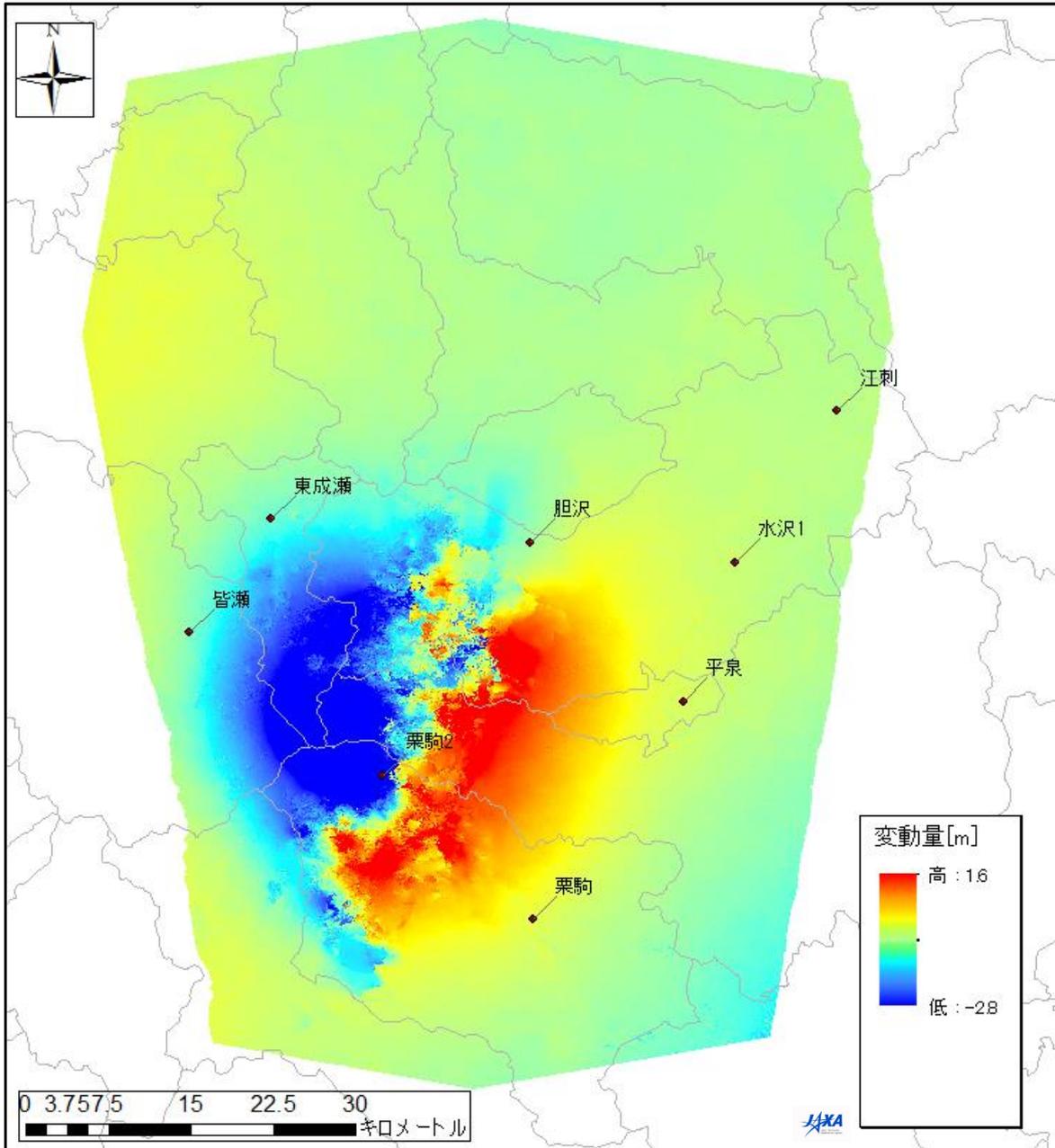


図 6.10.5 電子基準点データにより補正した地表面変位量図 (南北方向)

Fig. 6.10.5 Quantity of ground surface displacement corrected based on GPS-based control station data (north-south direction)

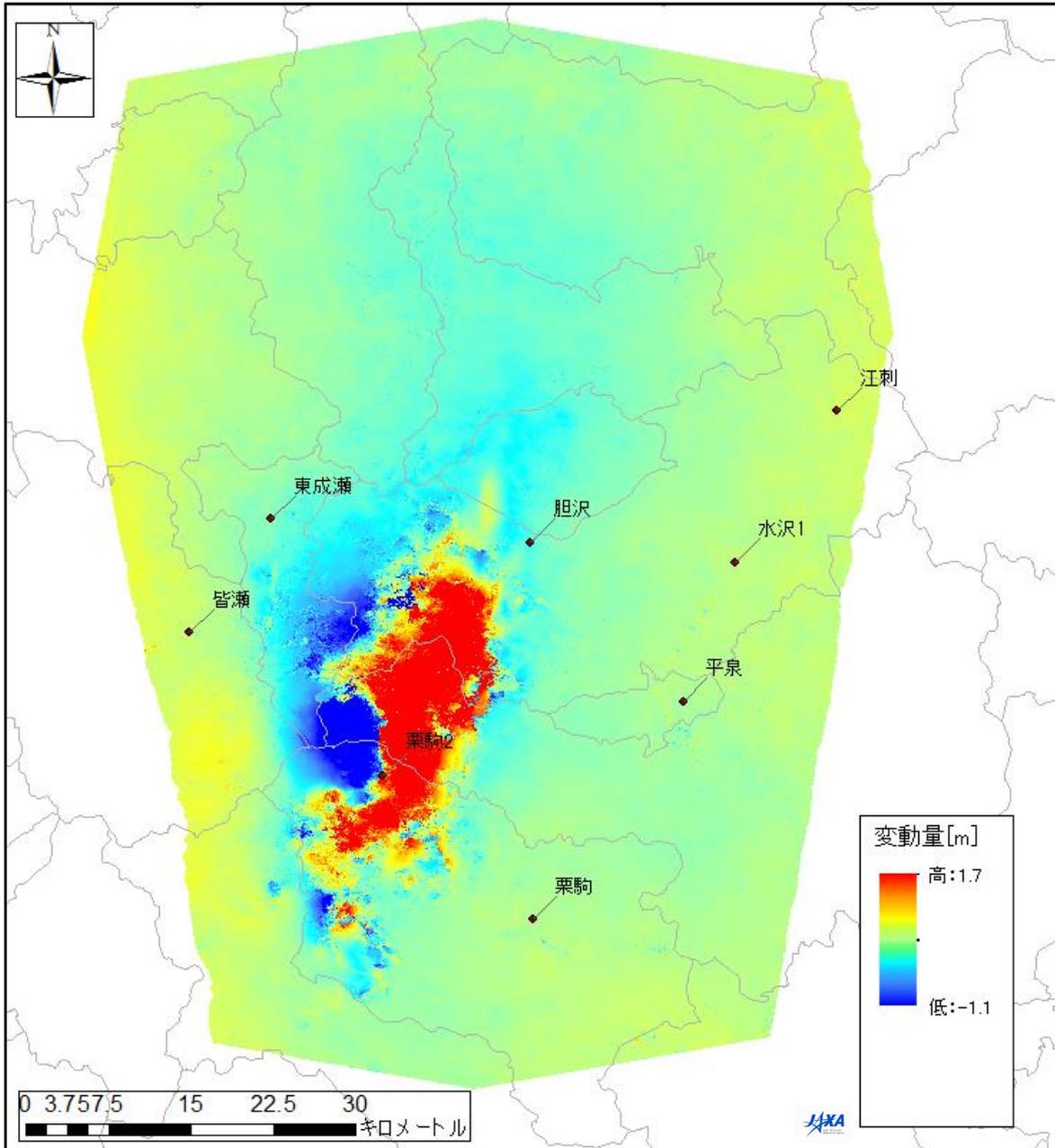


図 6.10.6 2.5次元解析結果の地表面変位量図（垂直方向）

Fig. 6.10.6 Quantity of ground surface displacement of 2.5 dimensional analysis results (vertical)

(2) 電子基準点により補正し最終的に求めた地表面変位量図（等変位量線で色分け）

・東西方向

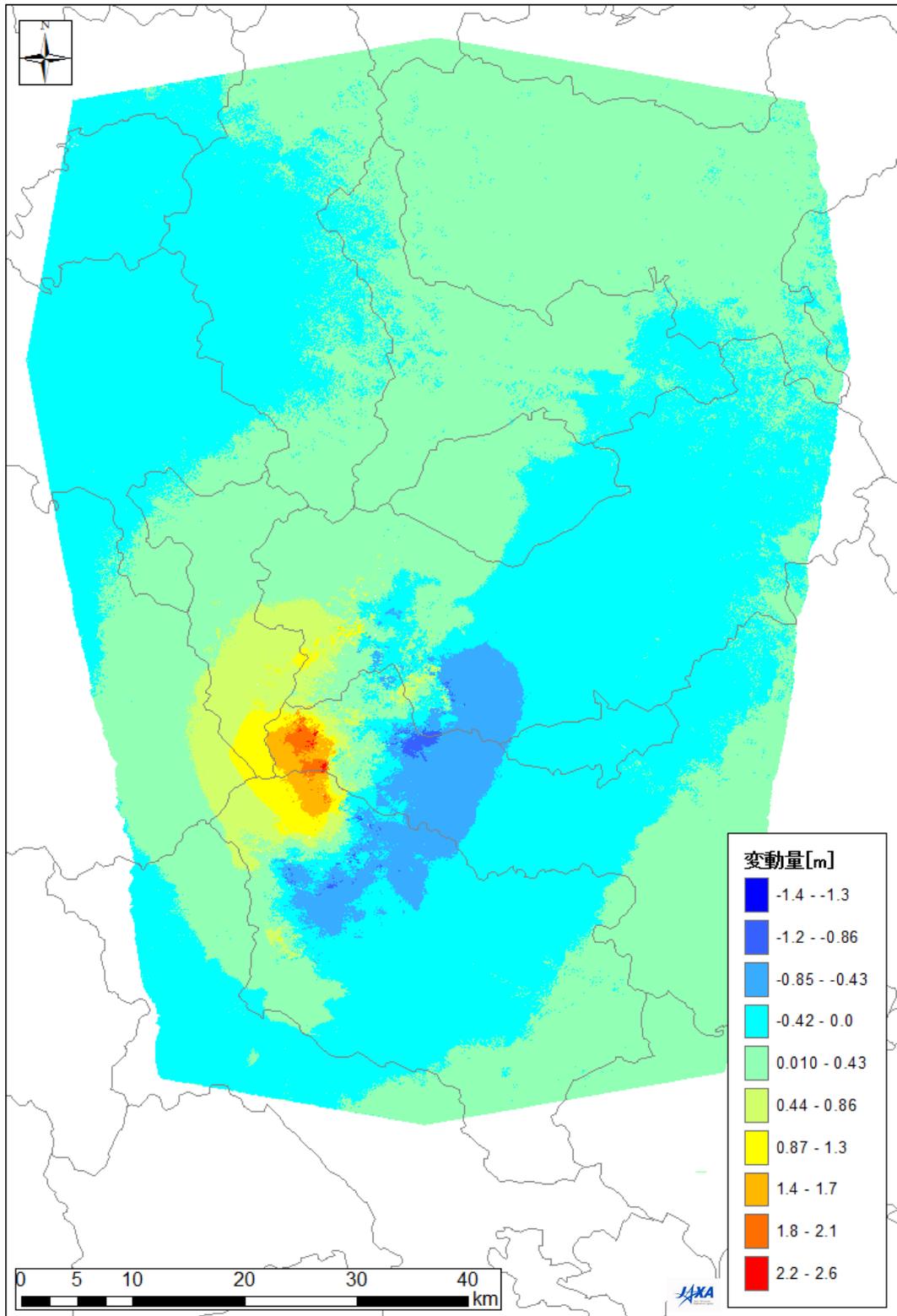


図 6.10.7 電子基準点データにより補正した地表面変位量（東西方向）

Fig. 6.10.7 Quantity of ground surface displacement corrected based on GPS-based control station data (east-west direction)

・南北方向

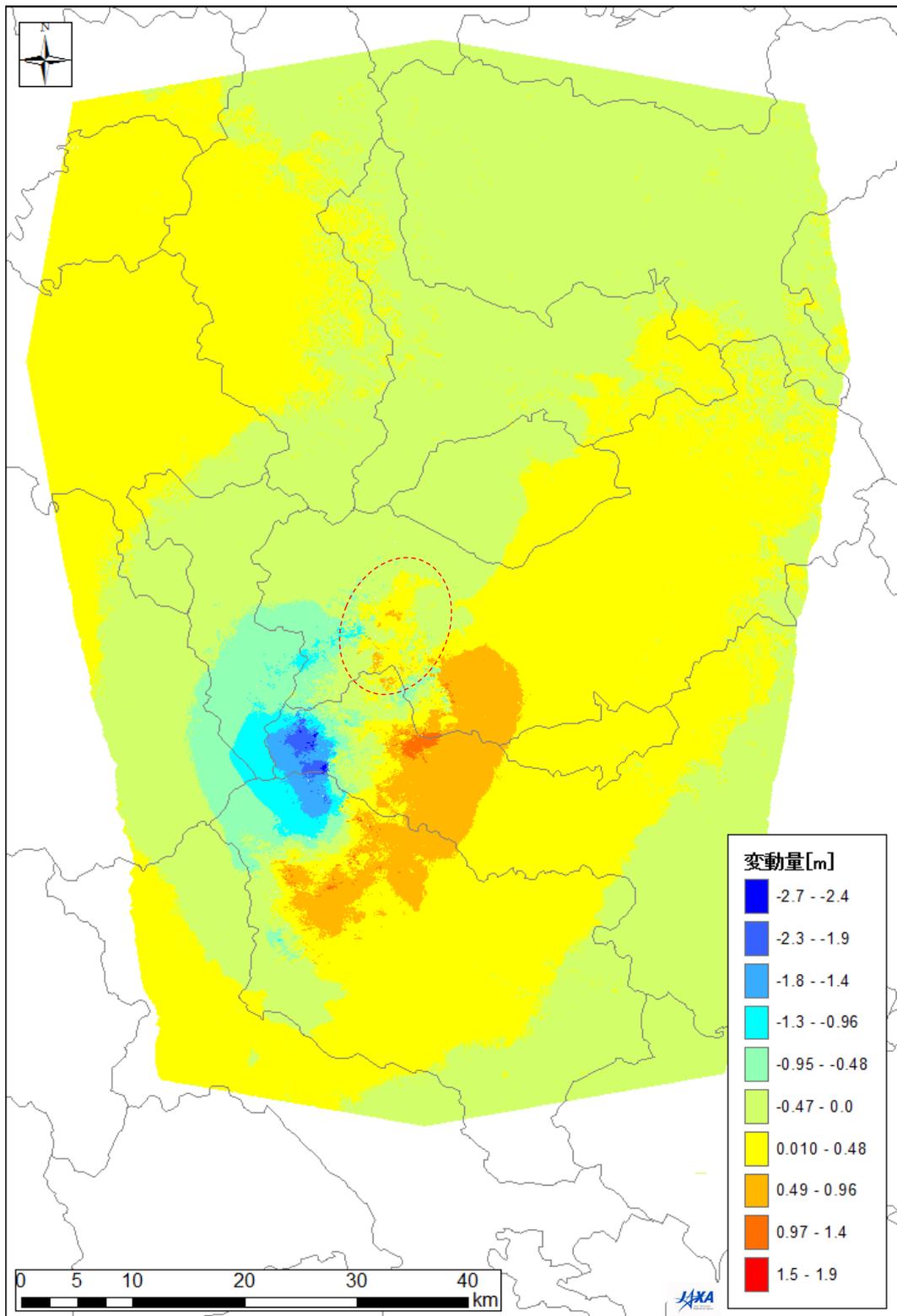


図 6.10.8 電子基準点データにより補正した地表面変位量図 (南北方向)

Fig. 6.10.8 Quantity of ground surface displacement corrected based on GPS-based control station data (north-south direction)

・垂直方向

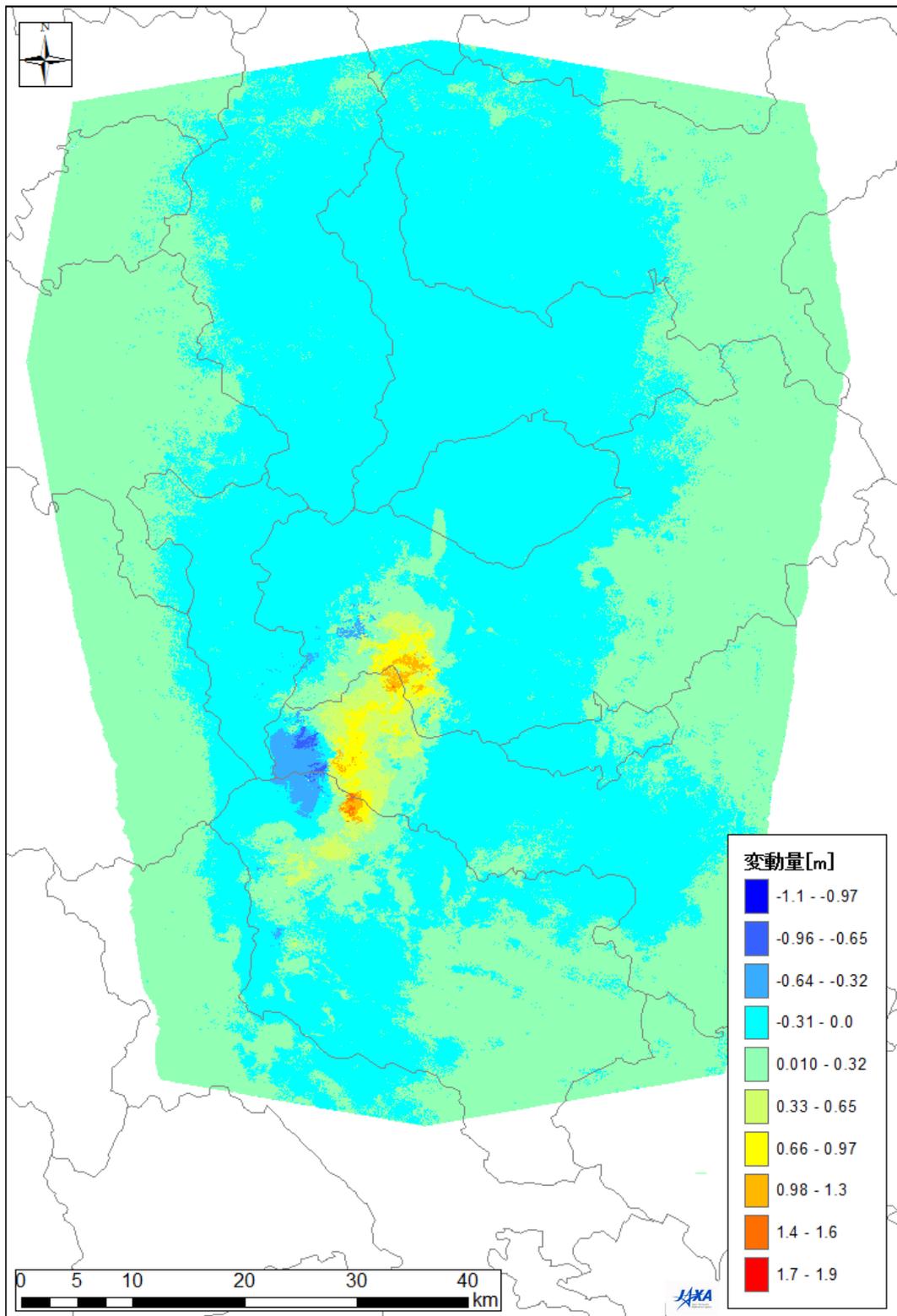


図 6.10.9 2.5次元解析結果の地表面変位量図 (垂直方向)

Fig. 6.10.9 Quantity of ground surface displacement of 2.5 dimensional analysis results (vertical)

### (3) 考察

東西方向と南北方向の両図において、**図 6.10.8** に赤点線で示す変位方向が逆転している離島状のエリアは、垂直方向の**図 6.10.9** において上方への変位量が大きいエリアと概ね重複していることがわかる。

## 6. 1 1 誤差評価

解析結果の最終的な誤差がどの程度残っているかを、国土地理院の電子基準点データを用いて評価した。

### 6. 1 1. 1 評価方法

水平方向、垂直方向の位置変動ベクトルを各電子基準点において求め、地理院公開の位置変動ベクトルと比較を行った。

### 6. 1 1. 2 評価結果

電子基準点の位置における「電子基準点の移動量」と、条件1、補正後条件2のそれぞれの移動量を表 6.11.1 に示す。また、表 6.11.1 の移動量を図示して、水平方向の結果を図 6.11 1 に、垂直方向の結果を図 6.11 2 にそれぞれ示す。

表 6.11.1 電子基準点と干渉 SAR 合成変位量との比較

Table 6.11.1 Comparison of GPS-based control station results with quantity of interferometry SAR synthesis displacement

電子基準点名	条件 1			条件 2(補正後)			電子基準点による移動量		
	東西 移動量 [m]	南北 移動量 [m]	垂直 移動量 [m]	東西 移動量 [m]	南北 移動量 [m]	垂直 移動量 [m]	東西 移動量 [m]	南北 移動量 [m]	垂直 移動量 [m]
栗駒 2	1.036	0	0.308	1.036	-1.157	0.171	0.999	-1.171	2.084
東成瀬	0.142	0	0.000	0.142	-0.161	-0.019	0.207	-0.131	-0.005
皆瀬	0.098	0	0.052	0.097	-0.111	0.039	0.277	-0.090	-0.022
水沢 1	-0.049	0	0.013	-0.050	0.053	0.020	-0.075	0.009	0.008
平泉	-0.075	0	-0.006	-0.075	0.082	0.005	-0.150	0.032	0.007
栗駒	-0.116	0	-0.010	-0.116	0.127	0.006	-0.166	0.124	-0.017
胆沢	0.034	0	-0.057	0.035	-0.041	-0.061	-0.001	0.020	-0.003
江刺	0.000	0	0.039	0.000	-0.002	0.040	-0.022	-0.003	0.001

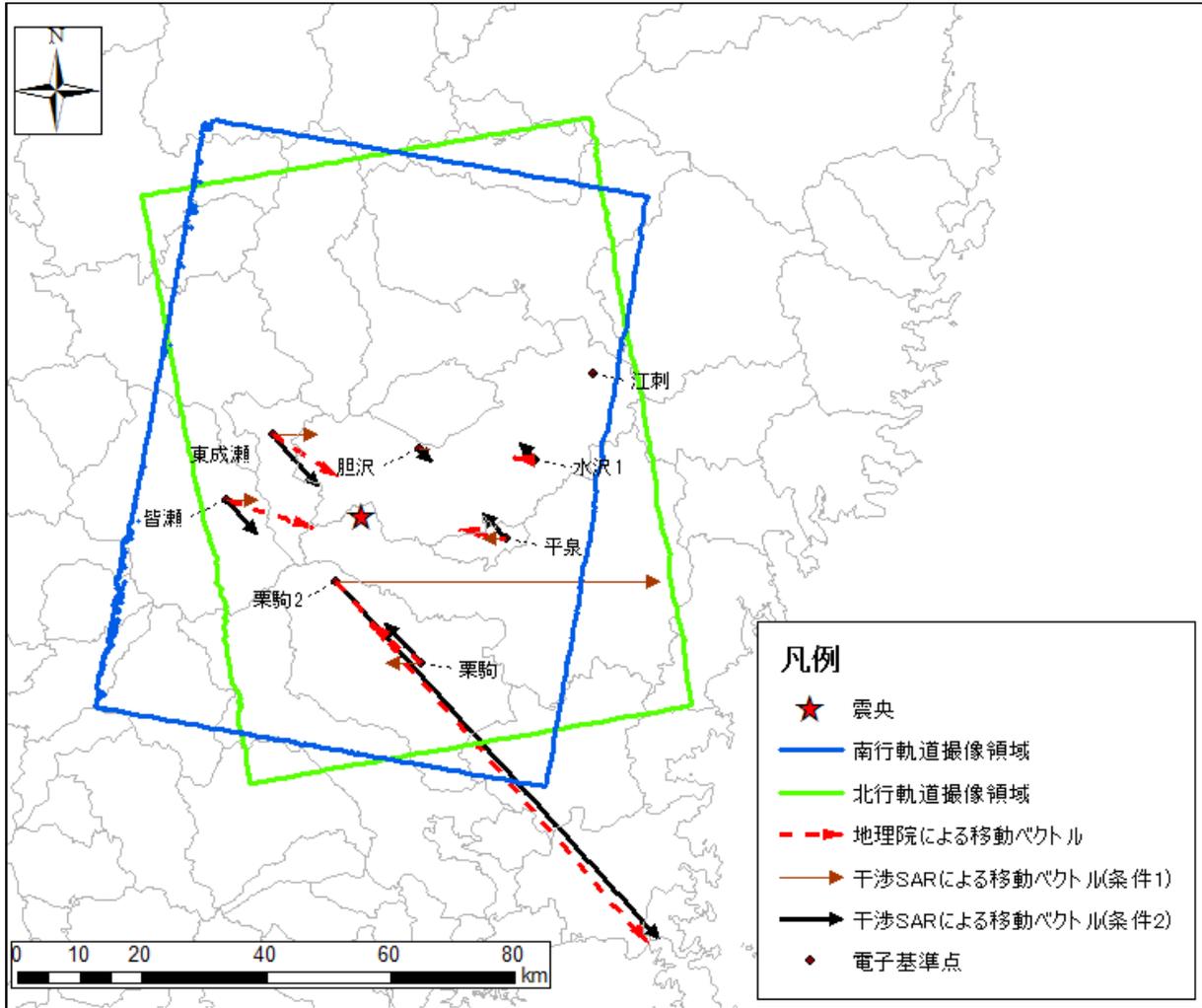


図 6.11 1 水平方向の誤差  
 Fig. 6.11 1 Horizontal direction error

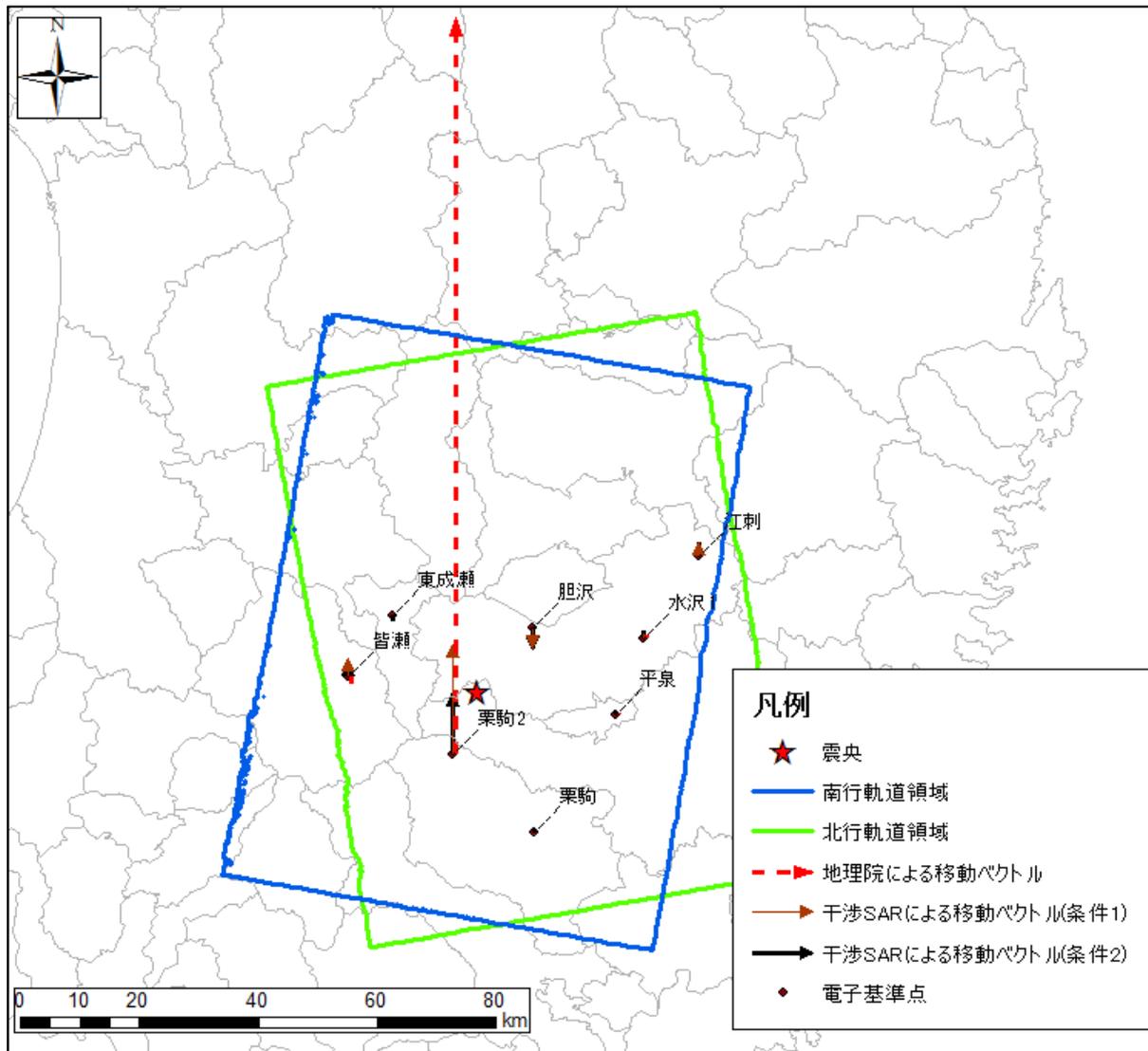


図 6.11 2 垂直方向の誤差

Fig. 6.11 2 Vertical direction error

### 6. 1. 1. 3 考察

#### ・水平方向

本研究において、条件2で南北方向を算出したことにより水平方向の合成ベクトルの誤差の評価が可能となった。国土地理院の電子基準点の地震による移動ベクトルを正解とし、従来手法である条件1と比べると、方向は、地震による電子基準点移動ベクトルが南北方向に近くなるほど、条件2の移動ベクトルの優位性が大きくなっている（誤差がより小）。ベクトルの大きさの誤差も、条件2の方が小さい傾向にある。それでも条件2の移動ベクトルは、大きさ、方向ともにまだばらつきのある結果となった。特に、震央から西側、東側で誤差の方向が入れ替わっていることがわかる。これは、図 6.9 2、図 6.9 3 からわかるように東西方向の誤差が大きくその影響であると推察される。

#### ・垂直方向

「栗駒 2」を除いた電子基準点では、合成変位量、基準点成果ともに小さく、誤差の範囲で一致していると結論付けられる。一方「栗駒 2」においては大幅な誤差が認められる。理由として「栗駒 2」のコヒーレンス値が小さく精度が悪いことによる影響が考えられる。

## 6.12 「栗駒2」の誤差

電子基準点の計測データと地表面変位量図の変位量の差が大きい電子基準点「栗駒2」地点の地表面変位量図の誤差について本節で具体的に分析した。

### 6.12.1 評価方法

電子基準点「栗駒2」を通る、各軌道における衛星視線方向と軌道方向の断面図で評価した。評価した断面ラインの位置を、北行軌道を図 6.121 に、南行軌道を図 6.122 に示す。

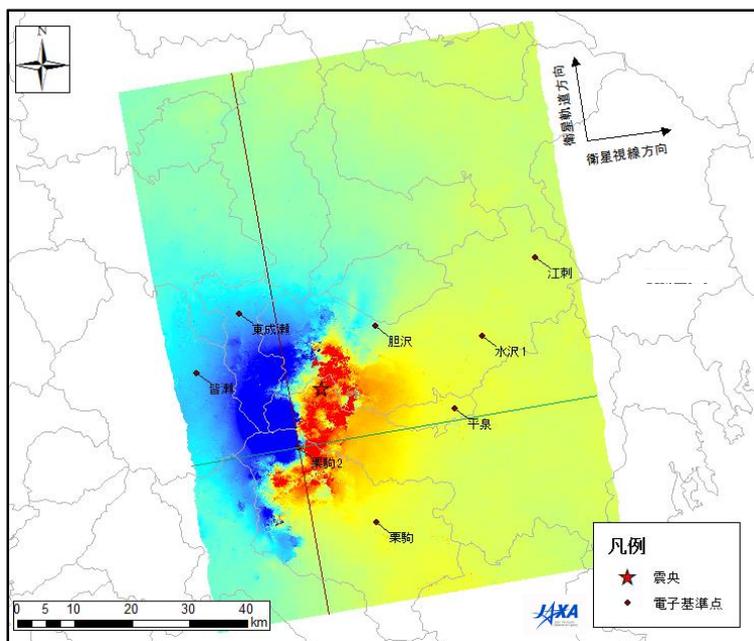


図 6.121 北行軌道における断面評価ライン

Fig. 6.121 Line of section evaluation in ascending orbit

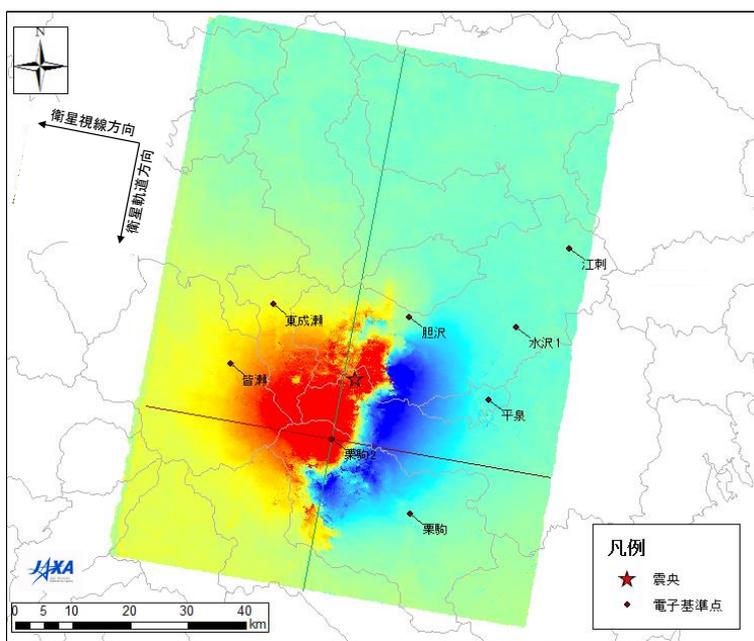


図 6.122 南行軌道における断面評価ライン

Fig. 6.122 Line of section evaluation in descending orbit

## 6. 1 2. 2 評価結果

各ペアの断面図を図 6.123、図 6.124 に示す。また、コヒーレンス値と重ね合わせたものを図 6.125、図 6.126 に示す。断面図グラフの見方は以下のとおりである。

coherence	: コヒーレンス値	— coherence
BC	: BC 法による結果	× bc
MCF	: MCF 法による結果	• mcf

方向は

衛星視線方向	: 西方から東方
軌道方向	: 南方から北方

「栗駒 2」の位置を点線で示す。

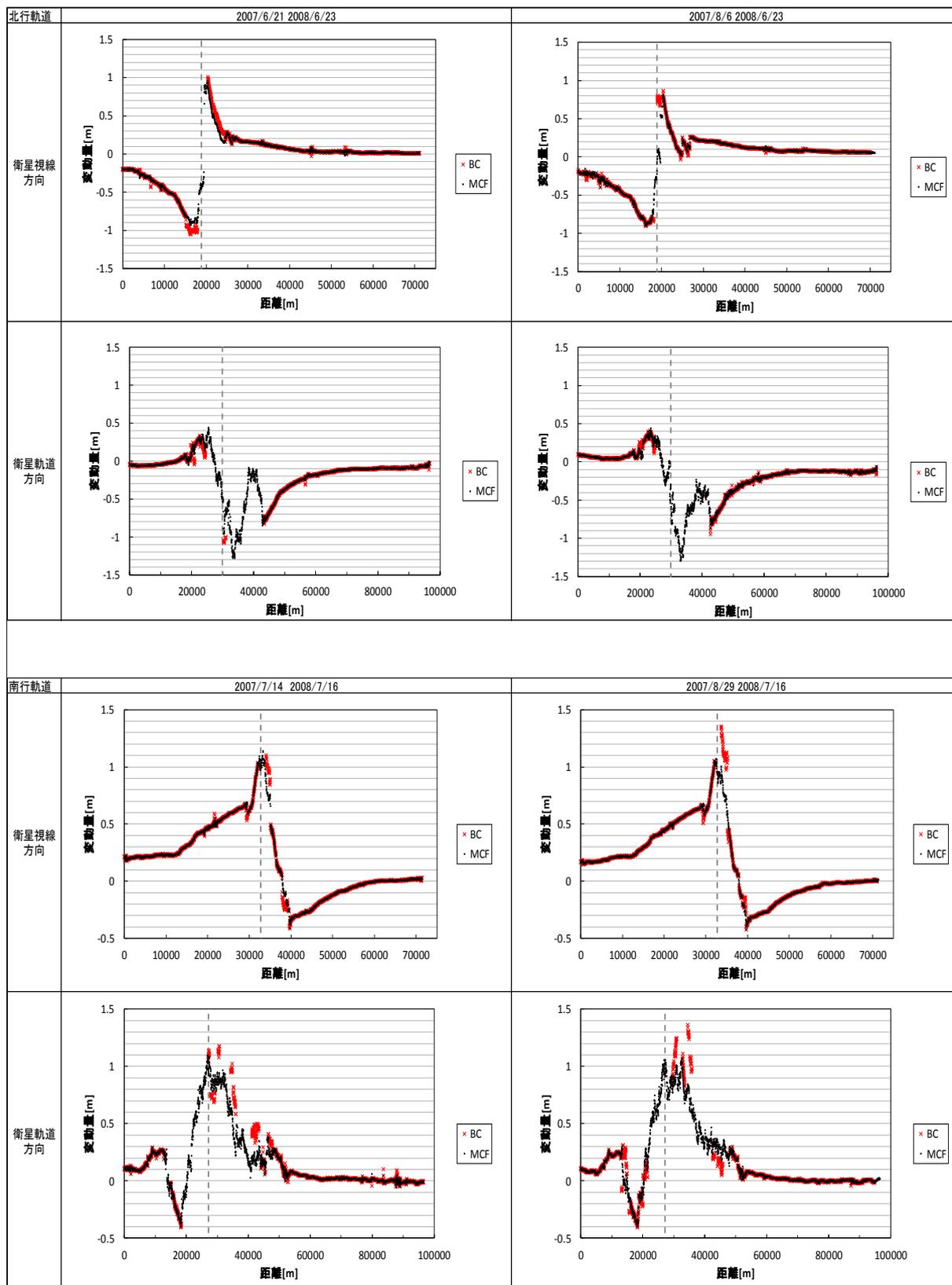


図 6.12 3 「栗駒 2」断面計測結果一覧 (1/2)

Fig. 6.12 3 Kurikoma 2 section measurement results table (1/2)

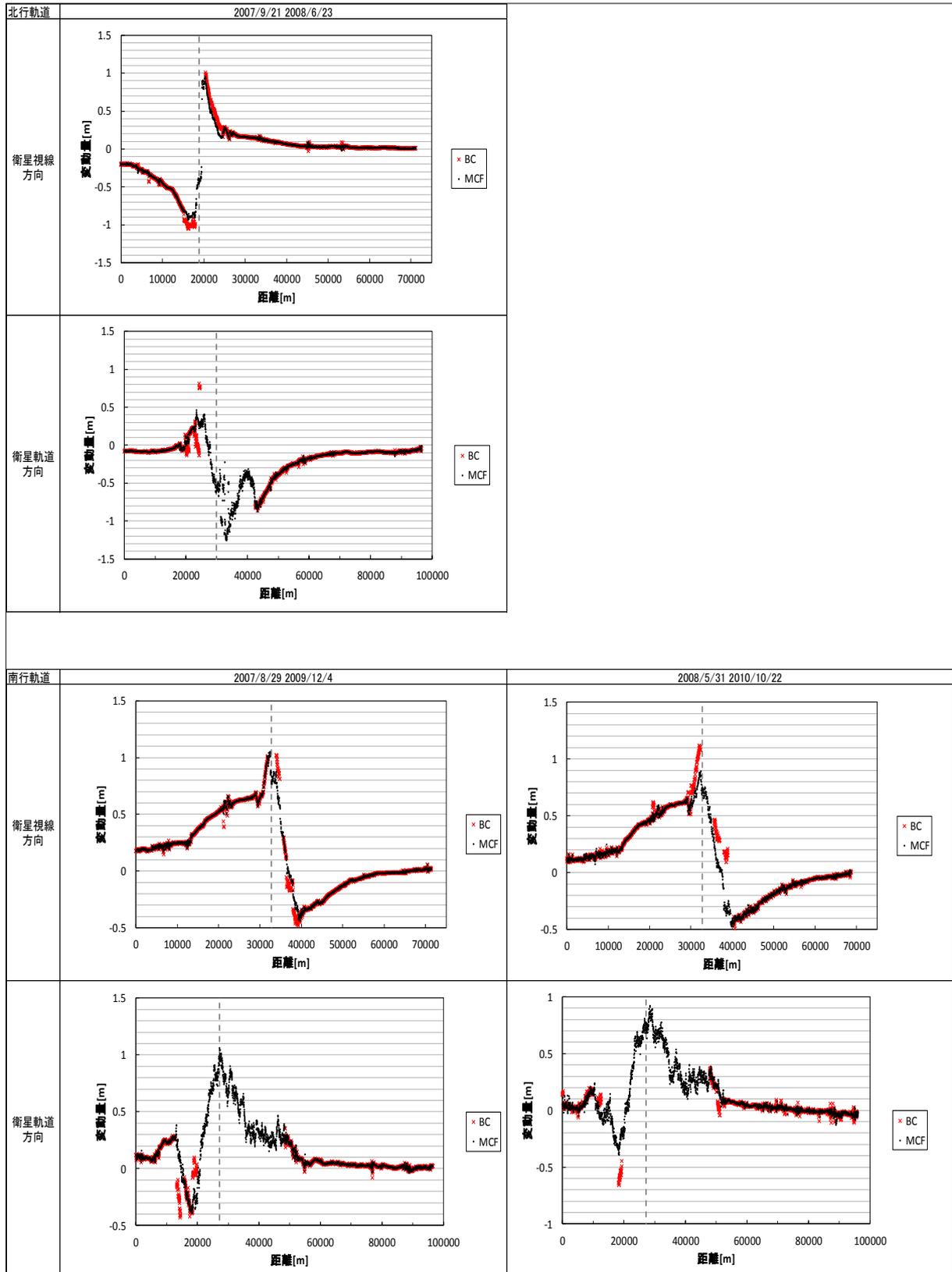


図 6.12 4 「栗駒 2」断面計測結果一覧 (2/2)

Fig. 6.12 4 Kurikoma 2 section measurement results table (2/2)

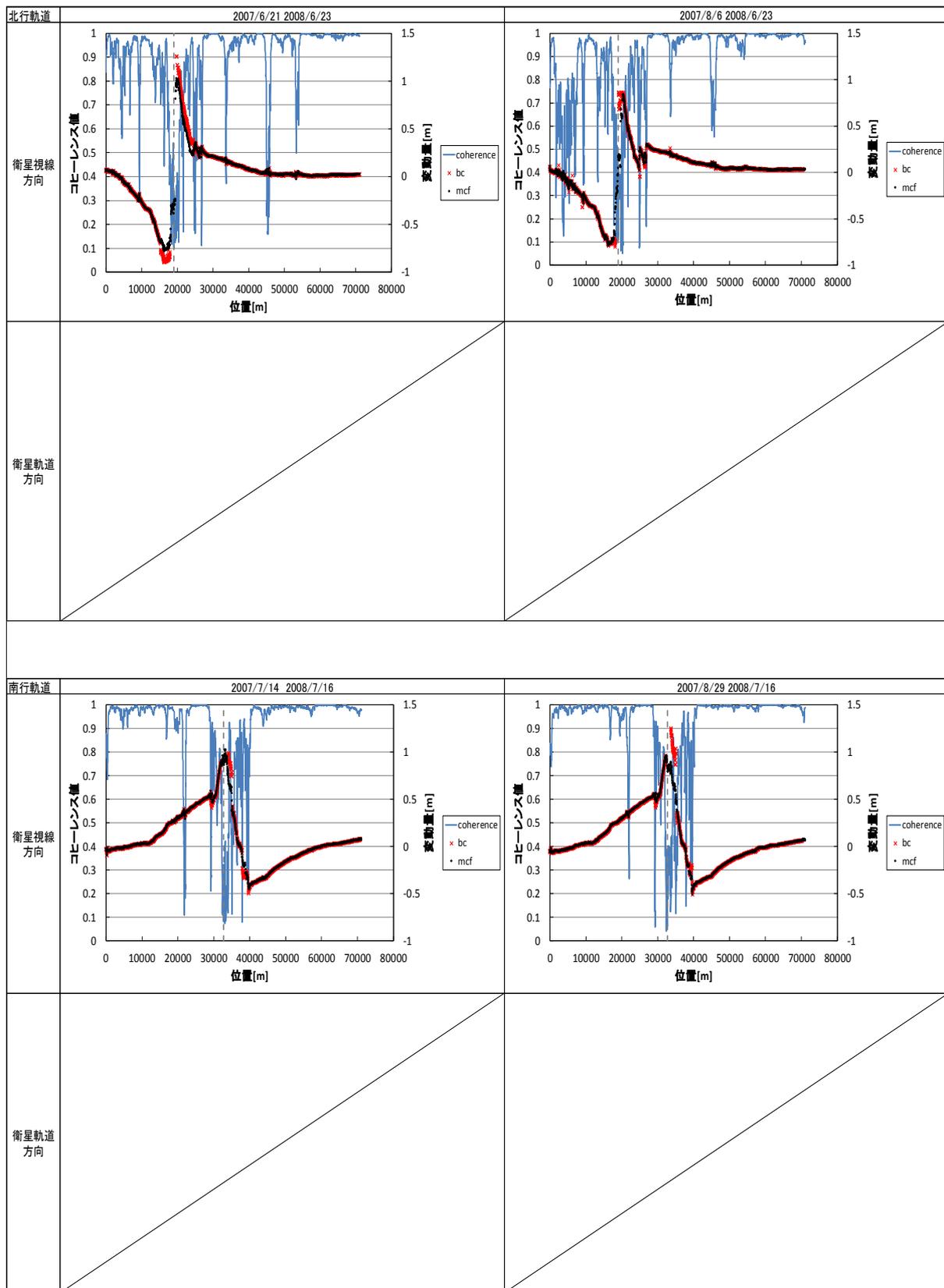


図 6.12 5 「栗駒2」断面計測結果一覧 (コヒーレンス値との対応) (1/2)

Fig. 6.12 5 Kurikoma 2 section measurement results table (correspondence with coherence values) (1/2)

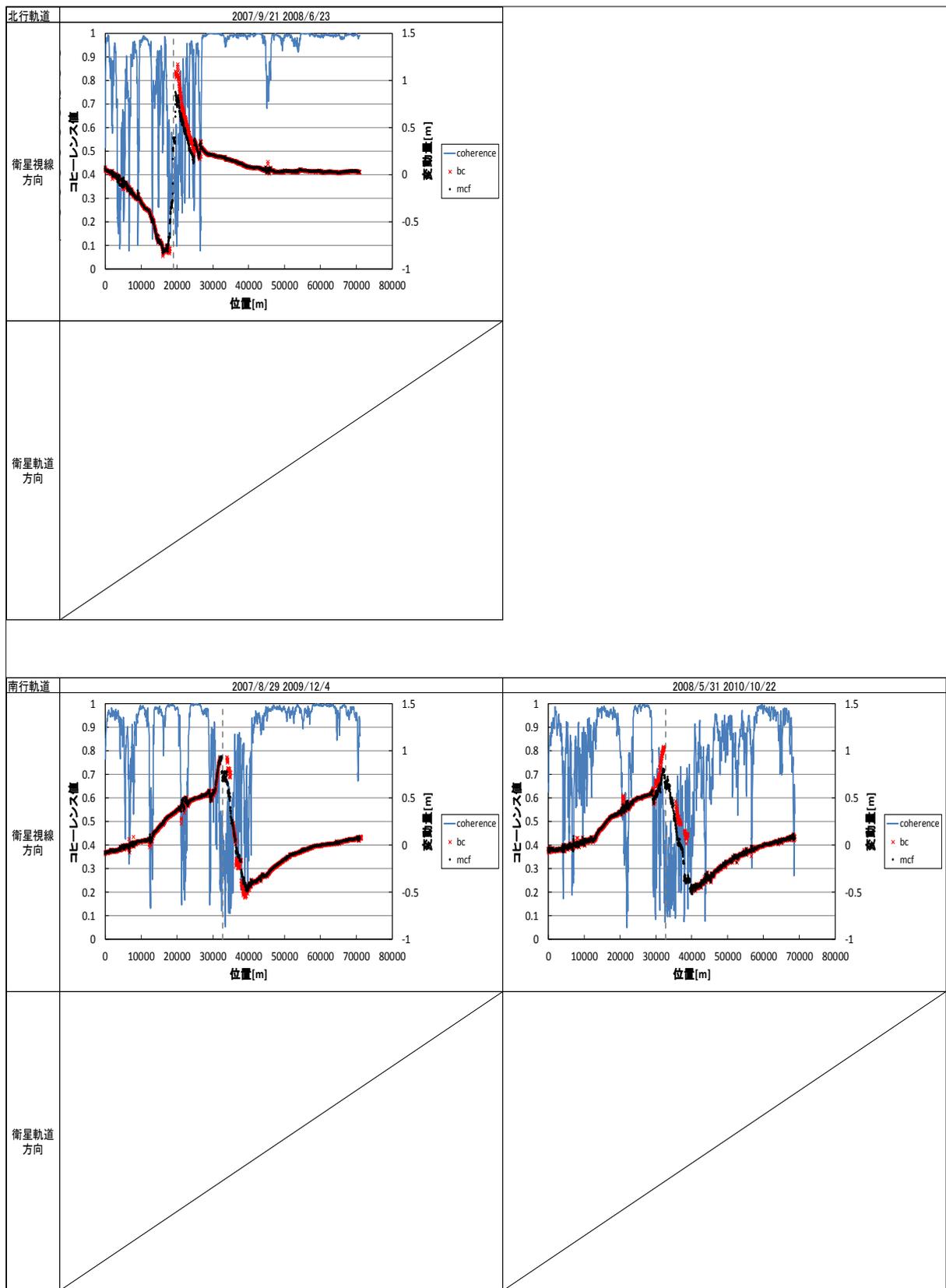


図 6.12 6 「栗駒 2」 断面計測結果一覧 (コヒーレンス値との対応) (2/2)

Fig. 6.12 6 Kurikoma 2 section measurement results table (correspondence with coherence values) (2/2)

### 6. 1 2. 3 考察

図 6.123、図 6.124 からわかるように、「栗駒 2」前後で位置変動量が急激に変化していることがわかる。この変化量は干渉 SAR による結果から求めると 1m 近くあり、これはピクセルあたりの最大計測変位量を超えている。また、図 6.125、図 6.126 より「栗駒 2」近辺ではコヒーレンス値がかなり小さいことがわかる。各電子基準点でコヒーレンス値を比較したものを北行軌道の場合を図 6.127 に、南行軌道の場合を図 6.128 に示す。

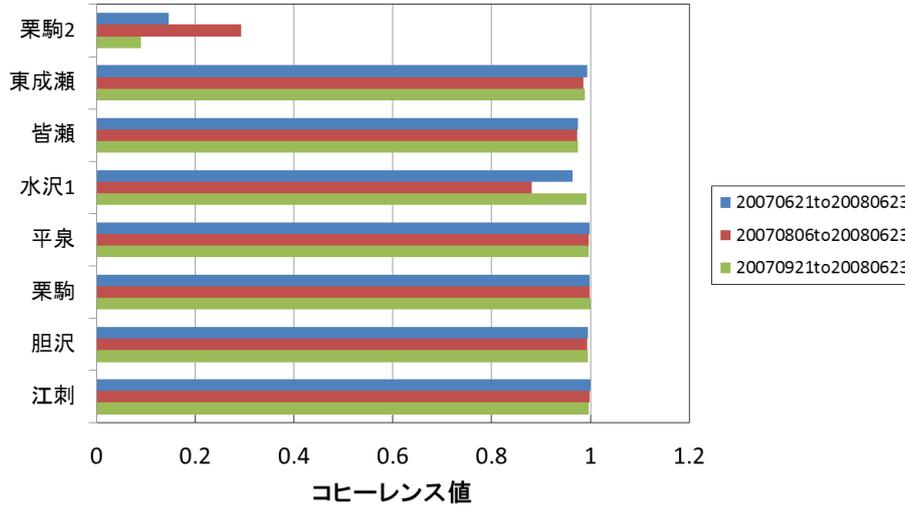


図 6.127 北行軌道における各電子基準点のコヒーレンス値

Fig. 6.127 Coherence value of each GPS-based control station on ascending orbit

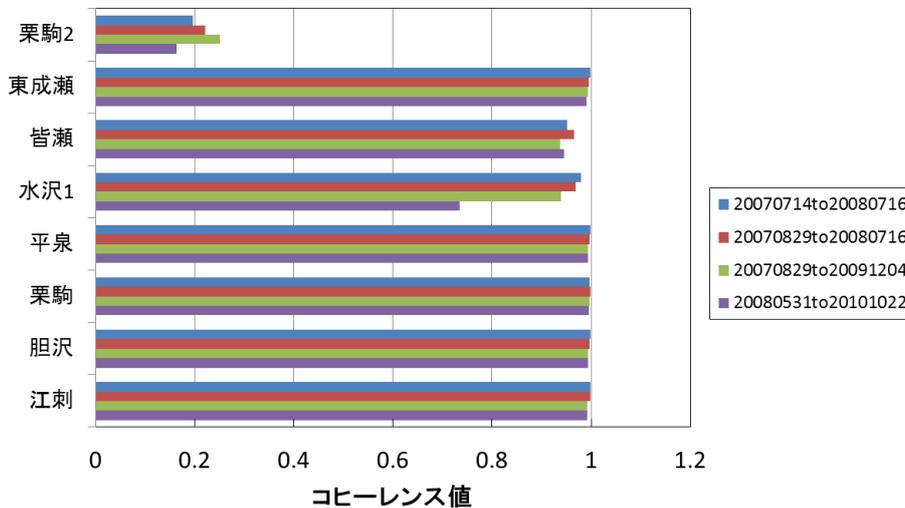


図 6.128 南行軌道における各電子基準点のコヒーレンス値

Fig. 6.128 Coherence value of each GPS-based control station on descending orbit

電子基準点「栗駒 2」の位置では、実際に測定した電子基準点の位置変動量が、解析結果の最大変位量に対し 4 倍近く大きい。この誤差の要因は、コヒーレンス値を確認した結果、「栗駒 2」の位置におけるコヒーレンス値が 0.3 以下と小さいことによるものであると考察される。

## 6. 13 コヒーレンス値による信頼性評価

前節における電子基準点の誤差評価から、コヒーレンス値が精度に大きな影響を与えていることが確認できた。そこで、2.5次元解析により得られた各変位量の結果の信頼性の評価を行った。

### 6. 13. 1 評価方法

#### (1) コヒーレンス値による信頼性閾値決定

6. 12. 3での電子基準点による評価からでは、計測コヒーレンス値に偏りがあるため信頼性のあるコヒーレンス値の閾値を決定することは難しい。しかし、**図 6.125**、**図 6.126**に示された断面図から、アンラップできた領域においてコヒーレンス値が急激に変化する部分において変位量も変化していることがわかる。に示したような部分的に急激にコヒーレンス値が低くなると、変位量の連続性が悪化している。**図 6.125**、**図 6.126**に見るように、このような連続性の悪化はコヒーレンス値が0.7未満において顕著に発生している。逆に0.7以上では連続性の悪化がみられない。よって、2.5次元解析により得られた変位量の信頼性の閾値としてコヒーレンス値0.7を設定する。

#### (2) 信頼性境界線作成

垂直、東西、南北変位量は、北行軌道での位置変動量と南行軌道での位置変動量の2つより計算される。各軌道におけるコヒーレンス値の信頼性の閾値を前節より0.7と設定すると、入力した各軌道におけるピクセルのコヒーレンス値の観点から、2.5次元解析による変位量値に信頼性があるピクセルは、「北行軌道及び南行軌道ともにコヒーレンス0.7以上」に対応するピクセルであると考えることができる。そこで、2.5次元解析結果から「北行軌道及び南行軌道ともにコヒーレンス0.7以上」に対応する領域を抽出し、2.5次元解析により得られた変位量の信頼性境界線を作成した。

### 6. 13. 2 評価結果

東西変位の結果を**図 6.13.1**、**図 6.13.2**、**図 6.13.3**に南北変位の結果を**図 6.13.4**、**図 6.13.5**、**図 6.13.6**、垂直変位の結果を**図 6.13.7**、**図 6.13.8**、**図 6.13.9**にそれぞれ示す。そのうち、**図 6.13.3**、**図 6.13.6**、**図 6.13.9**は、等移動量線で色分けした図である。

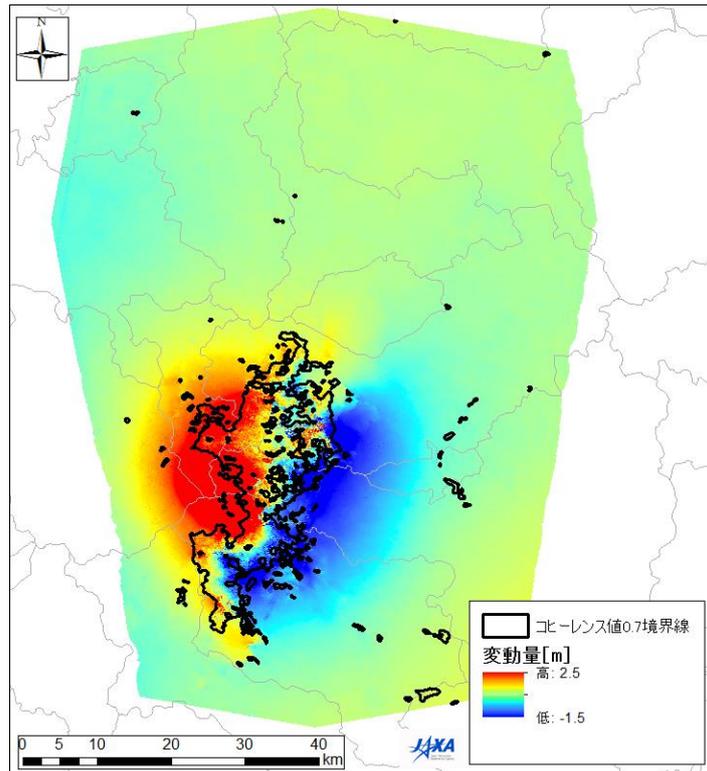


図 6.13.1 コヒーレンス境界と東西変位量 (全体)

Fig. 6.13.1 Coherence boundary line and quantity of east-west displacement (overall)

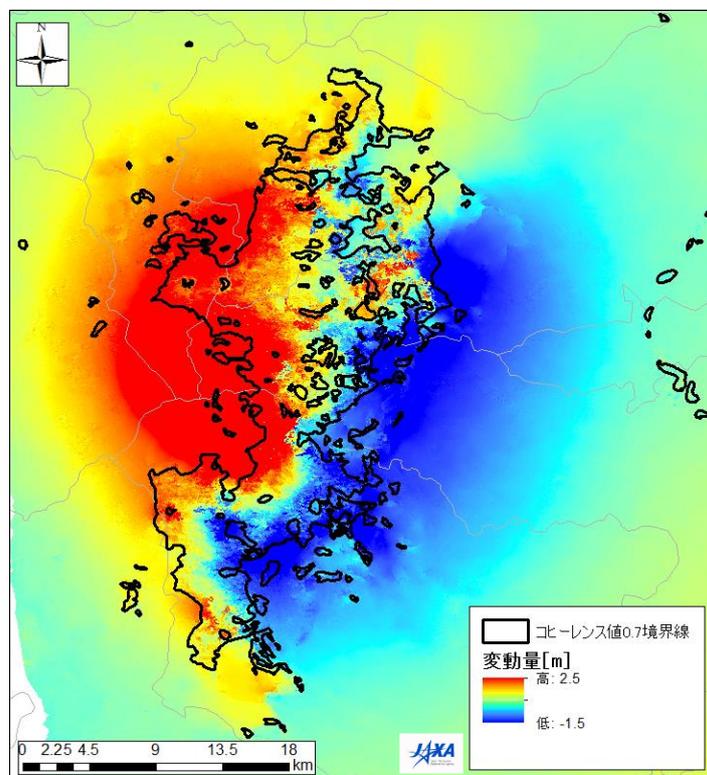


図 6.13.2 コヒーレンス境界と東西変位量 (拡大)

Fig. 6.13.2 Coherence boundary line and quantity of east-west displacement (expanded)

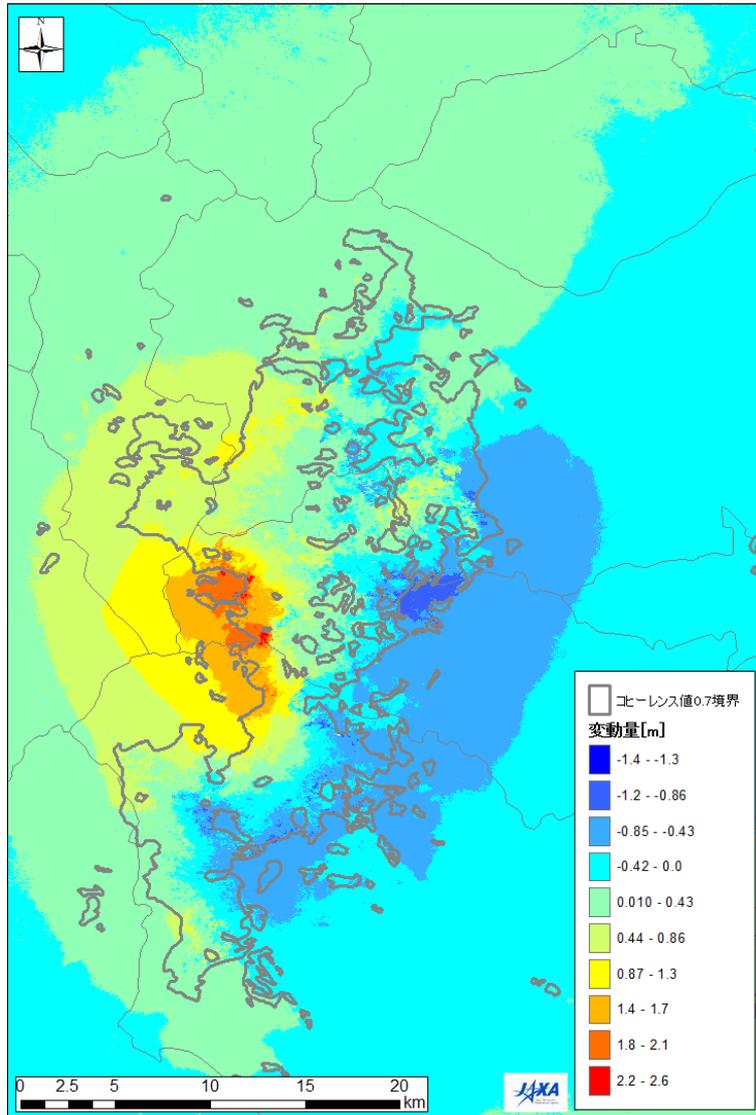


図 6.13.3 コヒーレンス境界と東西変位量 (拡大)

Fig. 6.13.3 Coherence boundary line and quantity of east-west displacement (expanded)

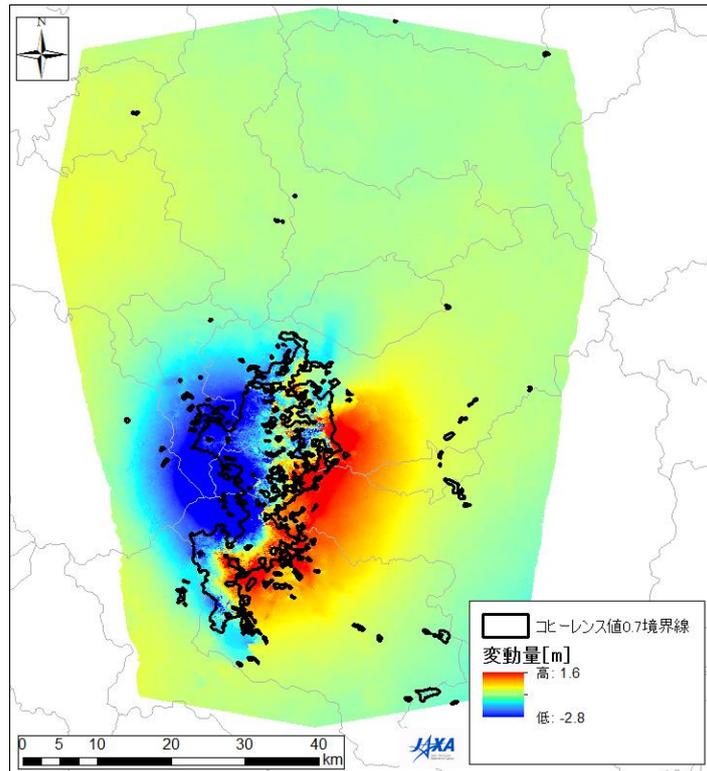


図 6.13.4 コヒーレンス境界と南北変位量 (全体)

Fig. 6.13.4 Coherence boundary line and quantity of north-south displacement (overall)

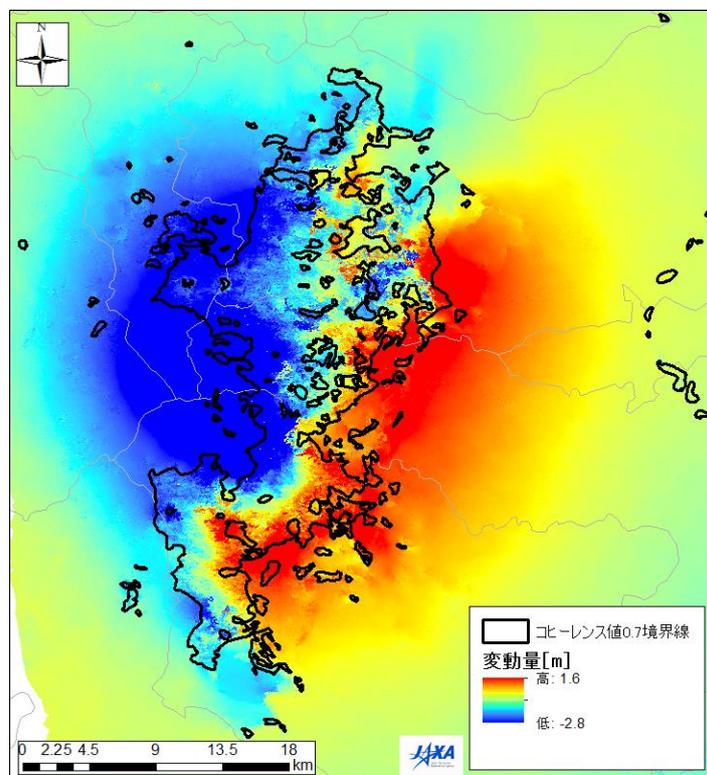


図 6.13.5 コヒーレンス境界と南北変位量 (拡大)

Fig. 6.13.5 Coherence boundary line and quantity of north-south displacement (expanded)

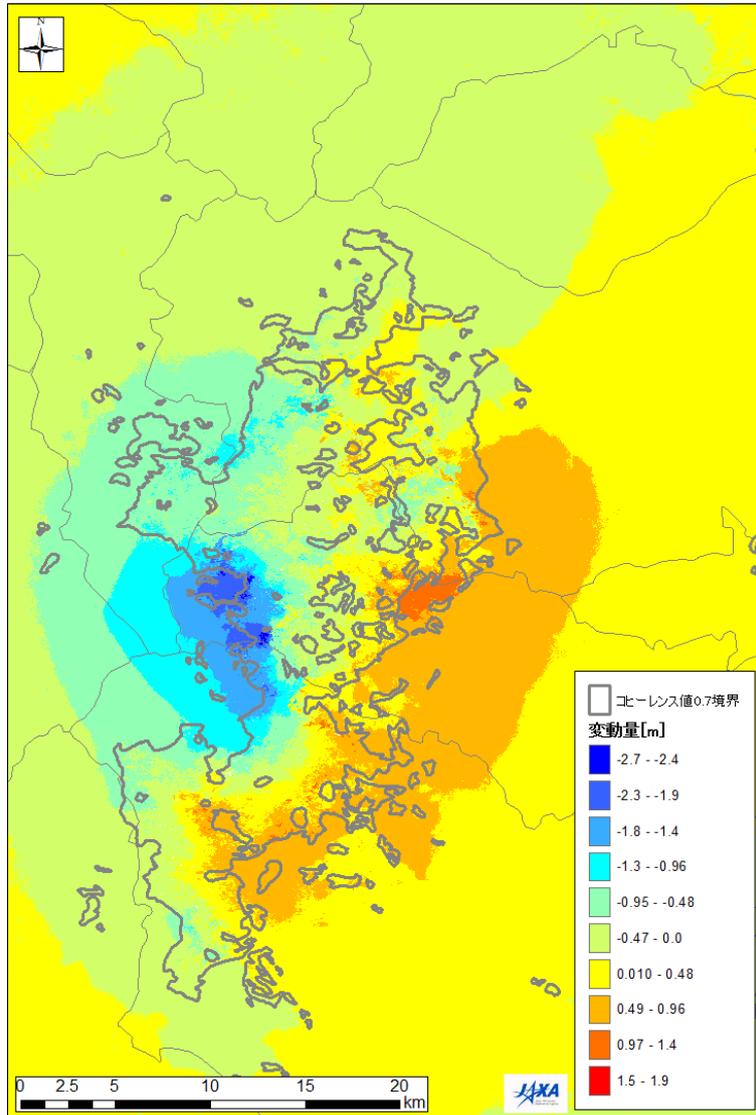


図 6.13.6 コヒーレンス境界と南北変位量 (拡大)

Fig. 6.13.6 Coherence boundary line and quantity of north-south displacement (expanded)

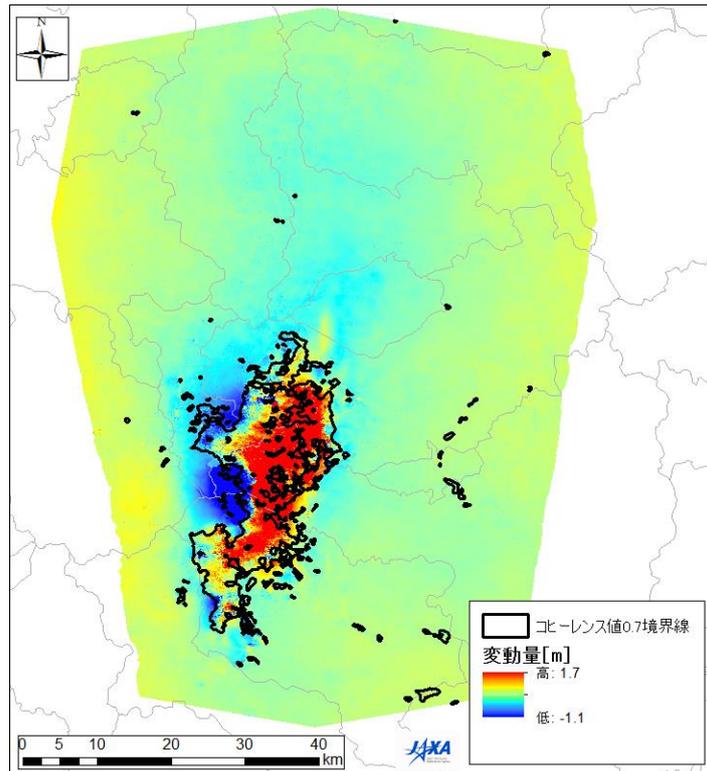


図 6.13.7 コヒーレンス境界と垂直変位量 (全体)

Fig. 6.13.7 Coherence boundary line and quantity of vertical displacement (overall)

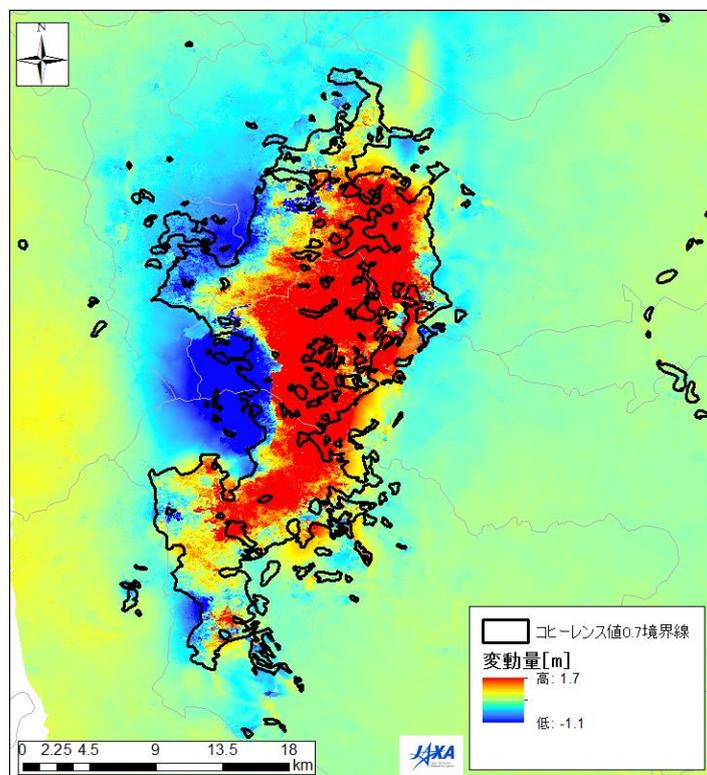


図 6.13.8 コヒーレンス境界と垂直変位量 (拡大)

Fig. 6.13.8 Coherence boundary line and quantity of vertical displacement (expanded)

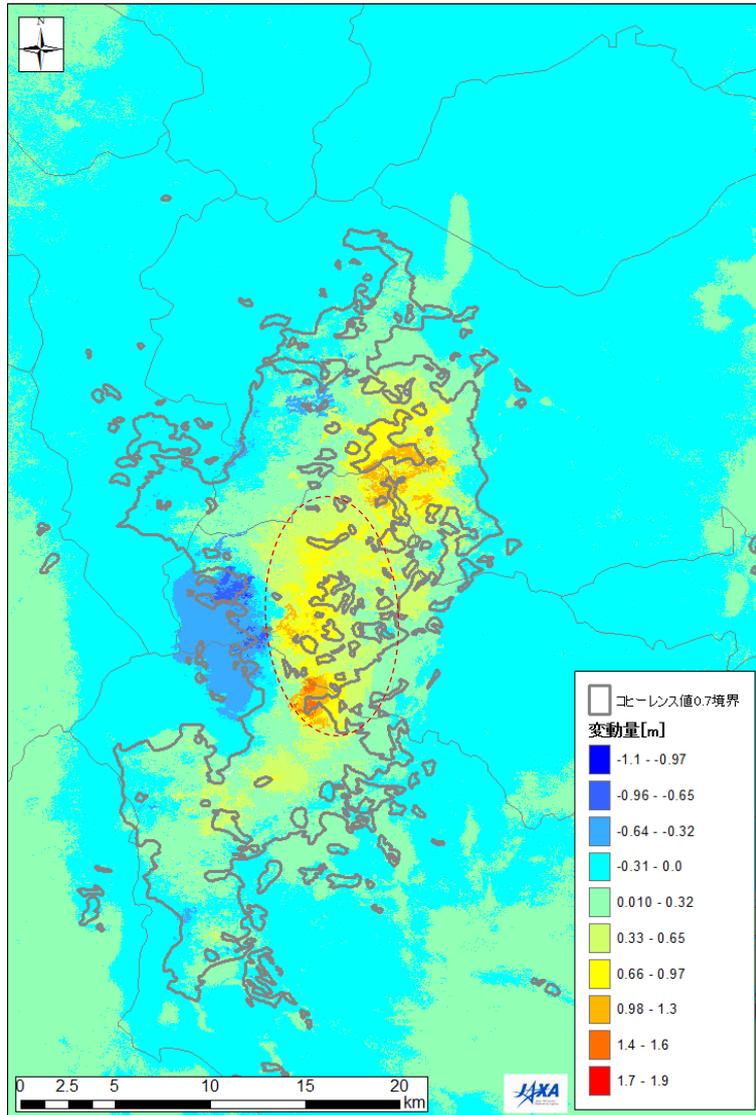


図 6.13.9 コヒーレンス境界と垂直変位量 (拡大)

Fig. 6.13.9 Coherence boundary line and quantity of vertical displacement (expanded)

### 6. 13. 3 考察

水平方向では、変位量の正負が反転する付近において、領域全体の中でコヒーレンス値 0.7 未満の領域が多く、変位量の値の信頼性が低いことがわかる。水平方向では、変位量の正負が反転する付近において、コヒーレンス 0.7 境界線が離島状に分布している。また、 $\alpha = -1.0626$  で計算しているため、東西方向と南北方向の移動量の全体的な分布傾向は似ている（プラス・マイナスは逆）。

また、垂直方向では、変位量大きい部分においてコヒーレンス値 0.7 未満の領域が多く、変位量の値の信頼性が低い結果となった。それでも、**図 6.13.9** で上方への変位量大きい領域のうち赤点線枠で示す県境に近い領域は、気象庁の作成した**図 6.13.10** の地震のすべり量分布と適合性が良い結果となった。

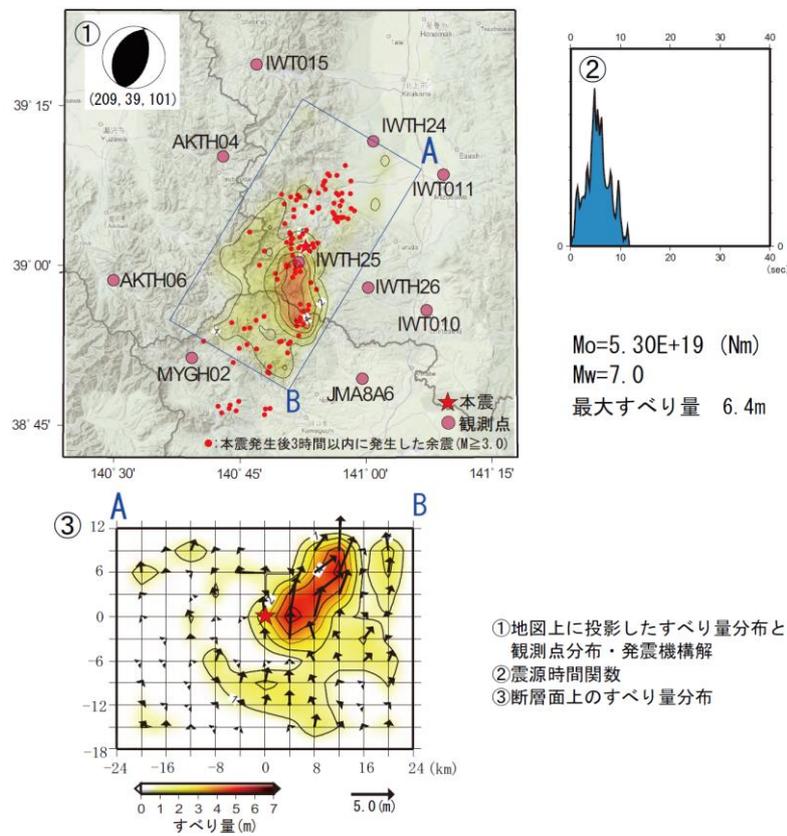


図 6.13.10 近地地震波形を用いた震源過程解析<sup>2)</sup>

Fig. 6.13.10 Slip distribution estimated by near-field waveform inversion

出典：気象庁地震津波監視課長（2008）：平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震の概況とその特徴、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)

## 6. 1 4 余震震源分布との比較による信頼性評価

今回作成した地表面変位量図の信頼性を評価するため、余震震源位置データを用いて比較した。地表面変位は、地震断層の動きによって引き起こされる。したがって、余震震源の分布と今回作成した地表面変位量図を重ねて、相関を確認した。震源データは気象庁より毎年の全震源データが公開されている。本稿では、地震が発生した2008年のデータ<sup>7)</sup>を使用した。

### 6. 1 4. 1 解析条件

解析に使用した震源データの条件を表 6.14.1 に示す。

表 6.14.1 使用震源データ<sup>7)</sup>  
Table 6.14.1 Hypocenter data used

絞り込み項目	抽出条件
震央地名	SOUTHERN IWATE PREF、NORTHERN MIYAGI PREF
使用したデータの期間	2008年6月14日 8:43 (本震地震の発生時刻) から10日間

### 6. 1 4. 2 解析結果

作成した、東西方向変位量と震源分布の関係を図 6.14.1 に示す。そして、「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 6.14.2 に示す。

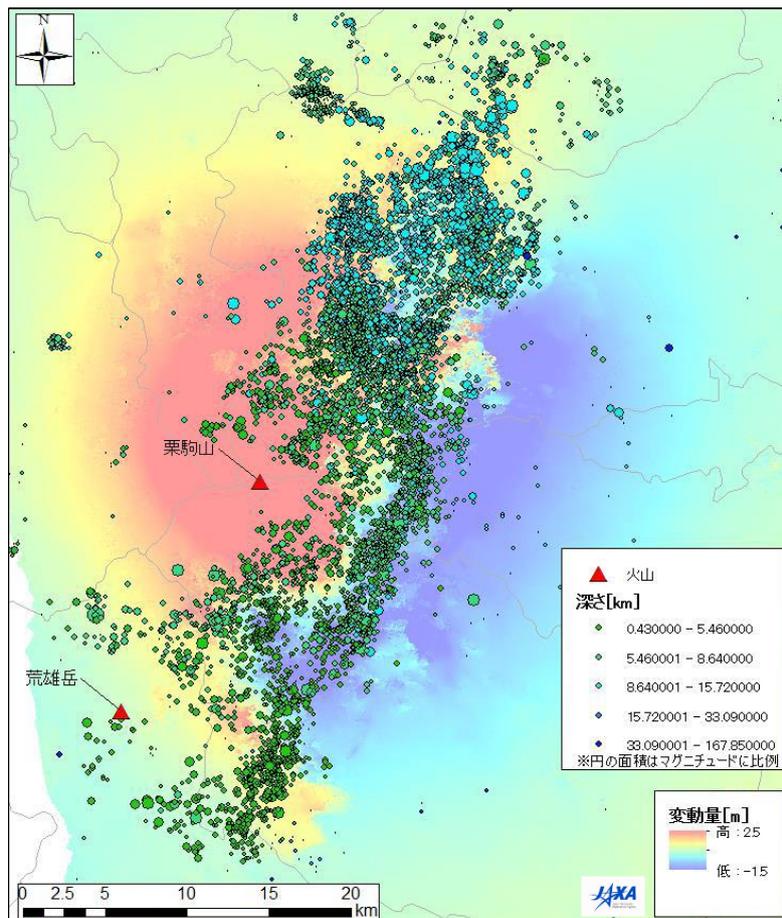


図 6.14.1 東西方向変位量と震源分布

Fig. 6.14.1 Quantity of east-west displacement and hypocenter distribution

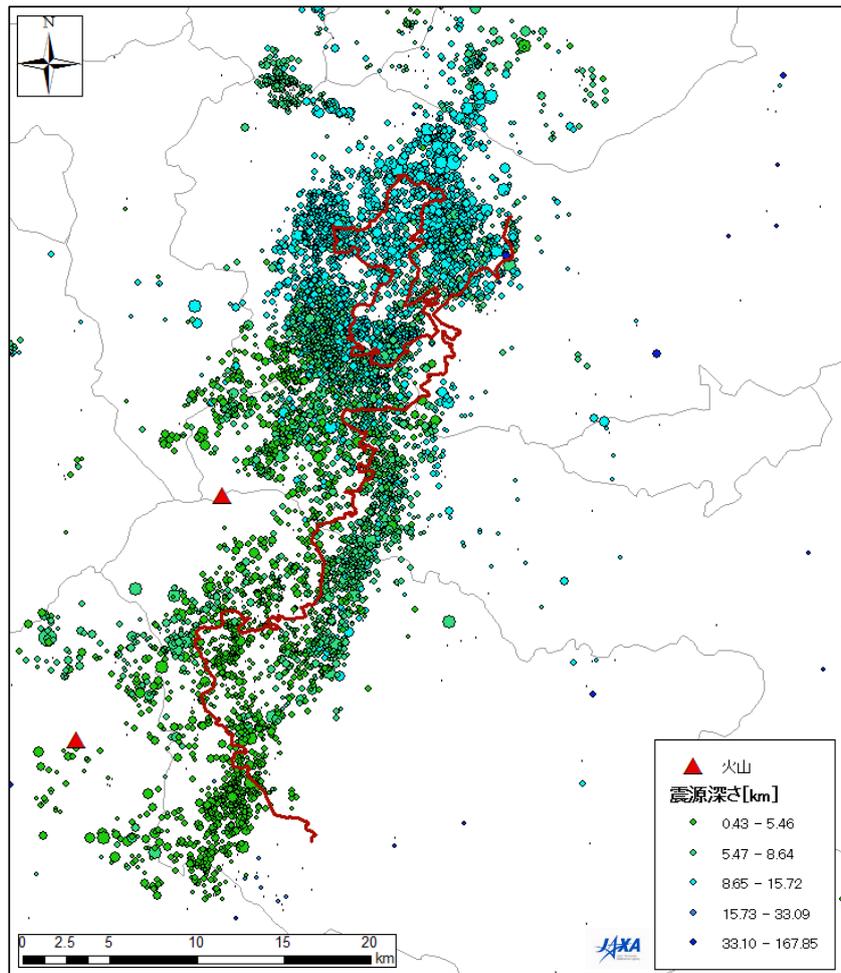


図 6.14.2 震源分布と「東西移動方向が反転する位置の線」

Fig. 6.14.2 Hypocenter distribution and line of position of reversal of east-west direction displacement (bottom)

・図 6.14.2 で、地表面変位量図の「東西移動方向が反転する位置の線」が、概ね余震震源が密集するエリアにある。

・図 6.14.2 で、赤線で示す「東西移動方向が反転する位置の線」のうち、離島状に変位方向が反転しているエリアと余震分布の密集するエリアが概ね重複しているように見える。

ここで、図 6.14.2 に示す「東西移動方向が反転する位置の線」は、地震による地盤の移動を抽出し、地すべり的な土塊移動を除くため、リング状（土塊状）となっている線を除外して、リング状になっていない「東西移動方向が反転する位置の線」のみをつないでいる。

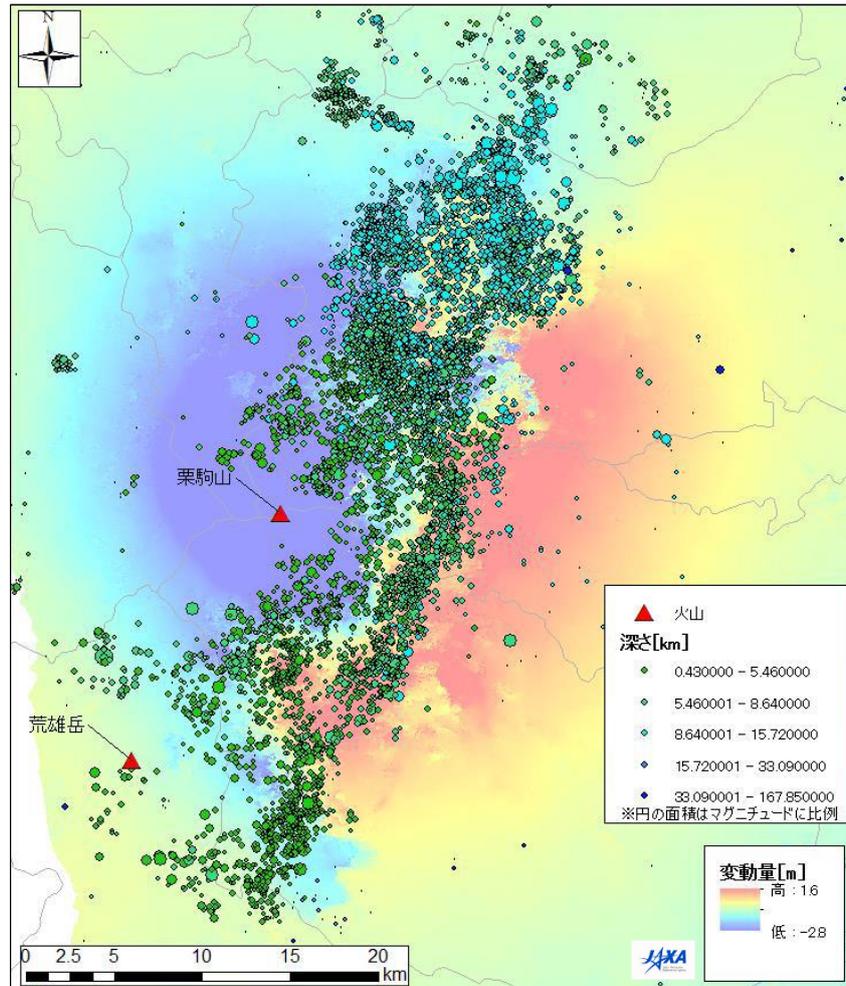


図 6.14.3 南北方向変位量と震源分布

Fig. 6.14.3 Correlation of “Quantity of north-south displacement” with the hypocenter distribution

図 6.14.3 に南北方向変位量と震源分布の関係を示す。南北方向変位量と震源分布は、図 6.14.1 の東西方向変位量と概ね同様の相関特徴を示す。

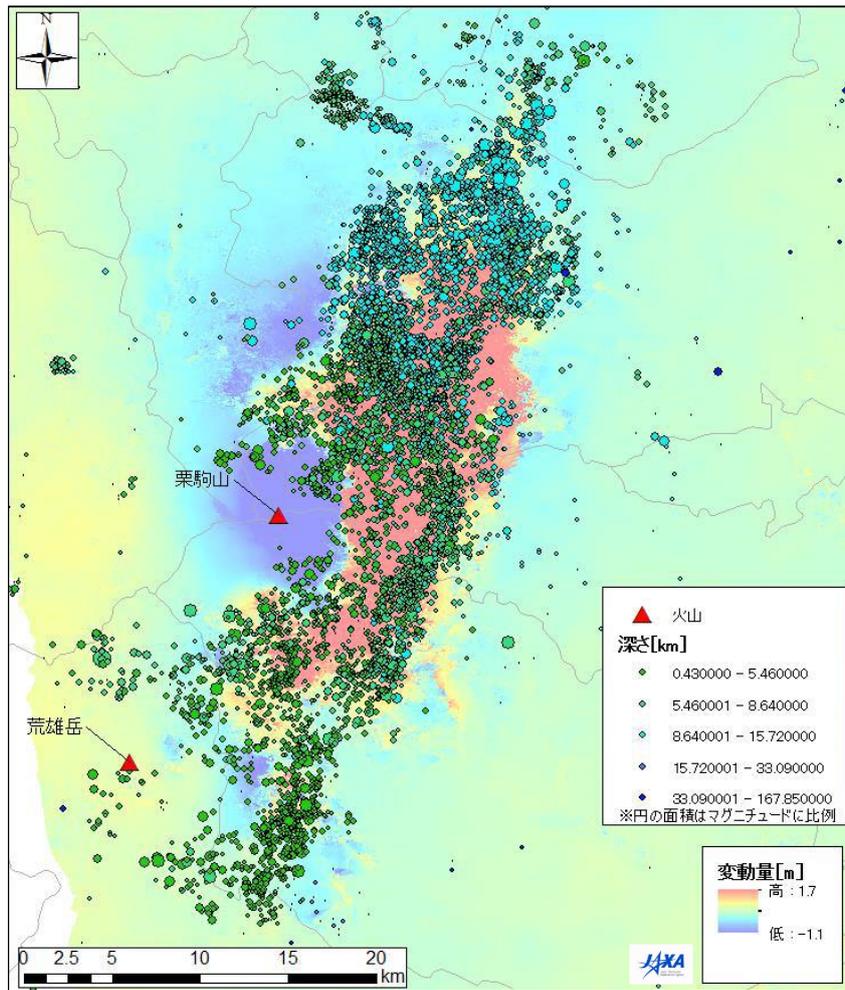


図 6.14.4 垂直方向変位量と震源分布

Fig. 6.14.4 Correlation of “Quantity of vertical displacement” with the hypocenter distribution

- ・ 図 6.14.4 に垂直方向変位量と震源分布の関係を示す。垂直方向変位量で上方に移動しているエリアは、余震震源が密集するエリアと概ね重複している。

図 6.14.5 及び図 6.14.6 は、M2.5 未満の地震を除き M2.5 以上の地震のみを集めた震源分布と地表面変位量図との比較である。図 6.14.5 及び図 6.14.6 は、全震源分布が含まれる図 6.14.1 及び図 6.14.4 と、概ね同様の相関特徴を示す。

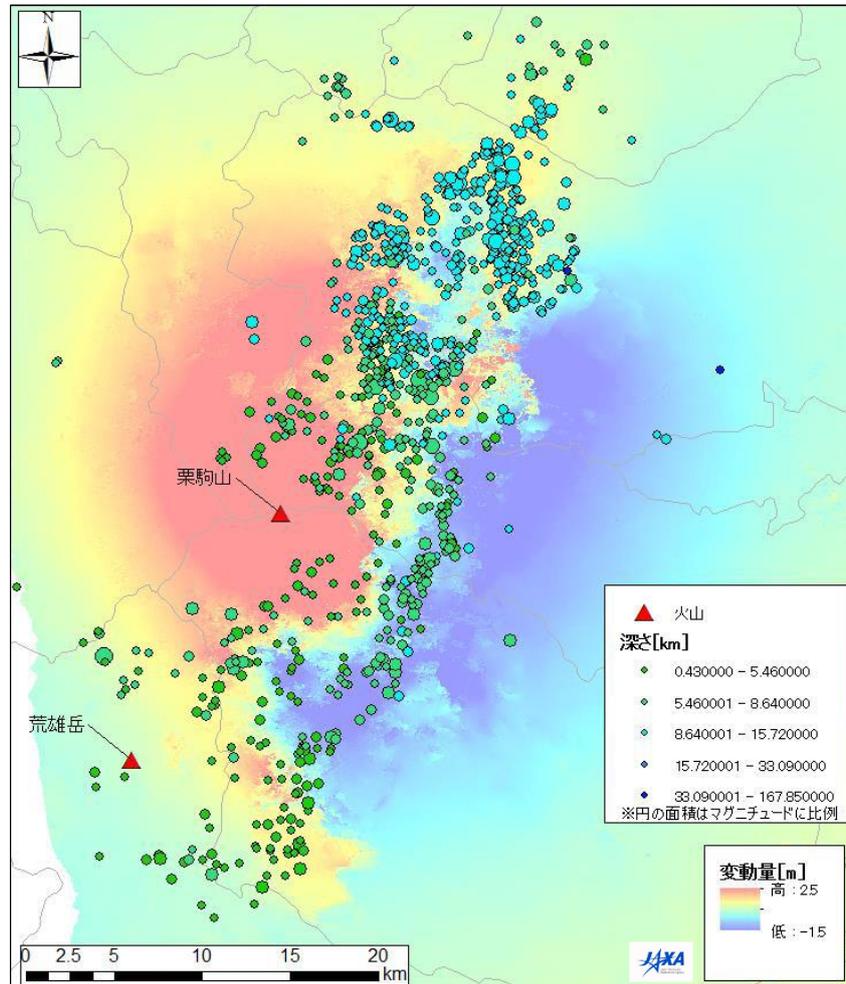


図 6.14.5 「東西方向変位量」と震源分布との相関-M2.5 以上の震源分布-

Fig. 6.14.5 Correlation of “Quantity of east-west displacement” with the hypocenter distribution  
- Hypocenter distribution of M2.5 or higher-

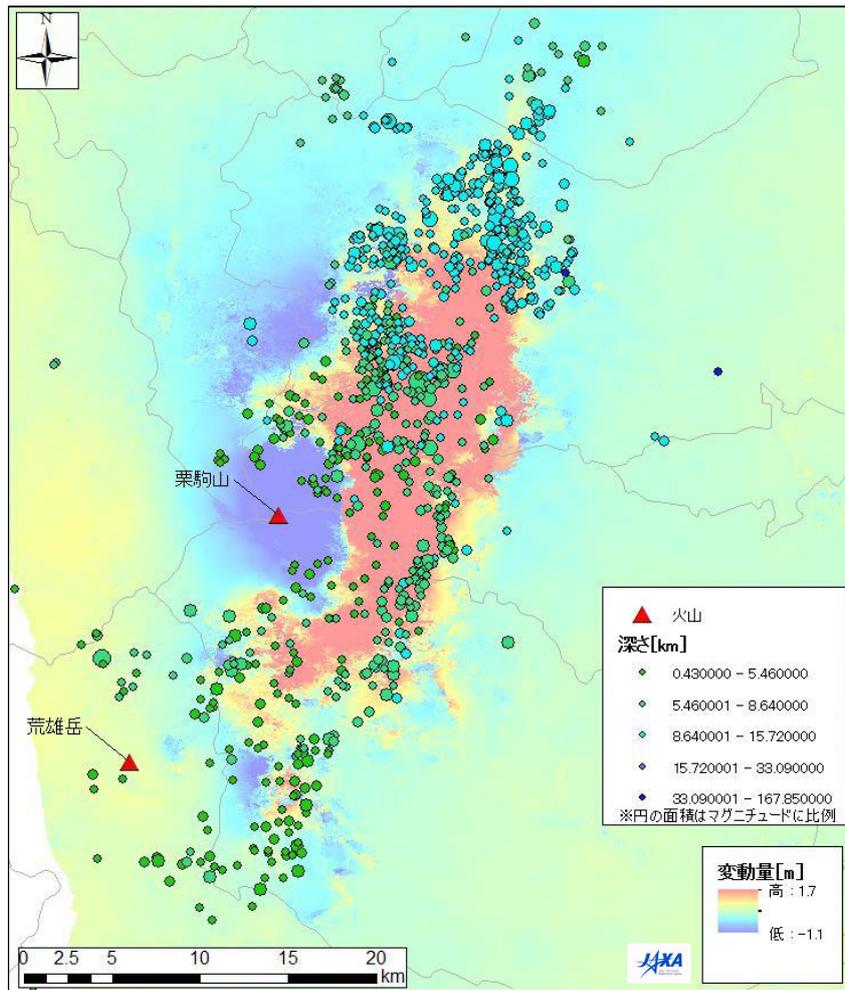


図 6.14.6 「垂直方向変位量」と震源分布との相関-M2.5以上の震源分布-

Fig. 6.14.6 Correlation of “Quantity of vertical displacement” with the hypocenter distribution – Hypocenter distribution of M2.5 or higher-

### 6. 14. 3 考察

平面的に重ねた地表面変位量と震源分布には、3方向ともに現象として良い相関がある。震源分布の断面図との比較についても、気象庁が作成した余震の断面図(図6.14.7、図6.14.8)と比較すると、図6.14.7の「②の断面図」に細い矢印で示された推定断層線の延長と図6.14.2の「東西移動方向が反転する位置の線」の位置が概ね一致している。図6.14.2で赤線で示す「東西移動方向が反転する位置の線」のうち、離島状に変位方向が反転しているエリアは、図6.14.7の「①の断面図」、図6.14.8の断面図から、逆断層で東西両側から押されて上方に移動したエリアの可能性はある。

以上から各方向の変位量と震源分布は、計測センサーが全く別の現象であるが、地表面変位量と震源分布には、3方向ともに現象として良い相関があり、今回作成した変位量図の妥当性が確認できる。

本震付近(領域2)及び南部領域(領域3)の断面詳細図

震央分布図(2008年6月14日08時~24時、 $M \geq 2.0$ 、深さ20km以浅)

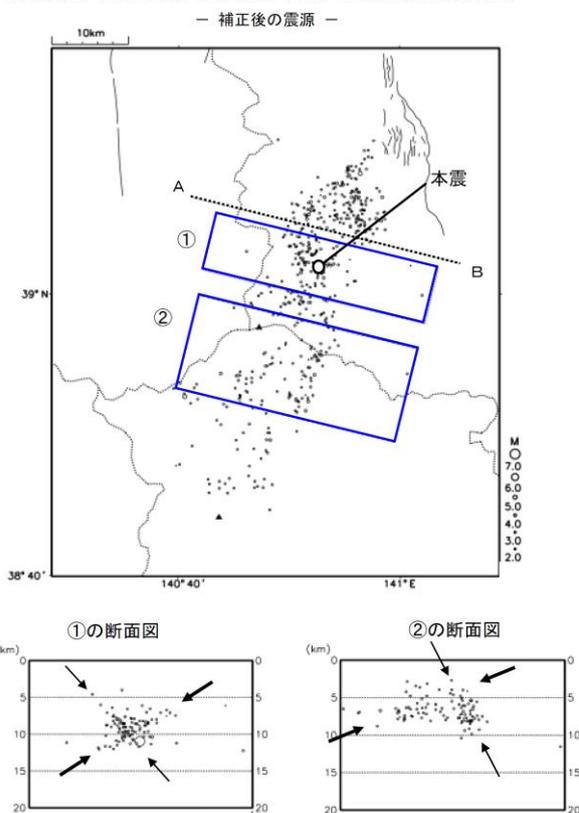


図 6.14.7 気象庁による余震の分析<sup>8)</sup>

Fig. 6.14.7 Analysis of the aftershocks by Japan Meteorological Agency

出典：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>

北部領域の活動状況

震央分布図(2008年6月14日~21日、 $M \geq 2.0$ )

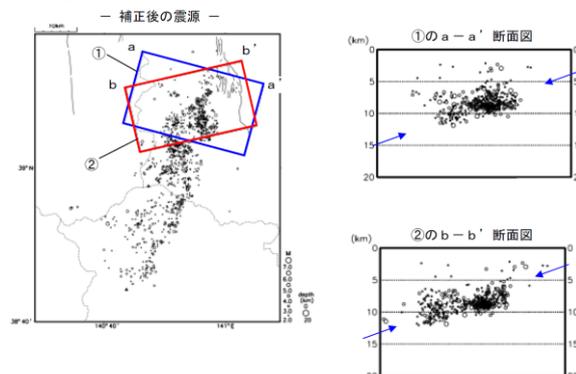


図 6.14.8 気象庁による余震の分析<sup>8)</sup>

Fig. 6.14.8 Analysis of the aftershocks by Japan Meteorological Agency

出典：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>

## 6.15 崩壊地分布との関係の抽出

地震直後の「溪流緊急点検」や「土砂災害警戒情報暫定基準」の対象エリアは、現在、主に震度を基準に決めているが、地盤の「緩み領域」に対応したエリア設定手法が望まれる。干渉 SAR 画像を用いてのエリア設定を検討するため、得られた変位量図を用いて、崩壊地分布との相関を分析した。

### 6.15.1 使用データ諸元

使用した崩壊地分布データは、国土交通省国土技術政策総合研究がおこなった、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<sup>9)</sup>を使用した。崩壊地の位置を図 6.15.1 に示す。

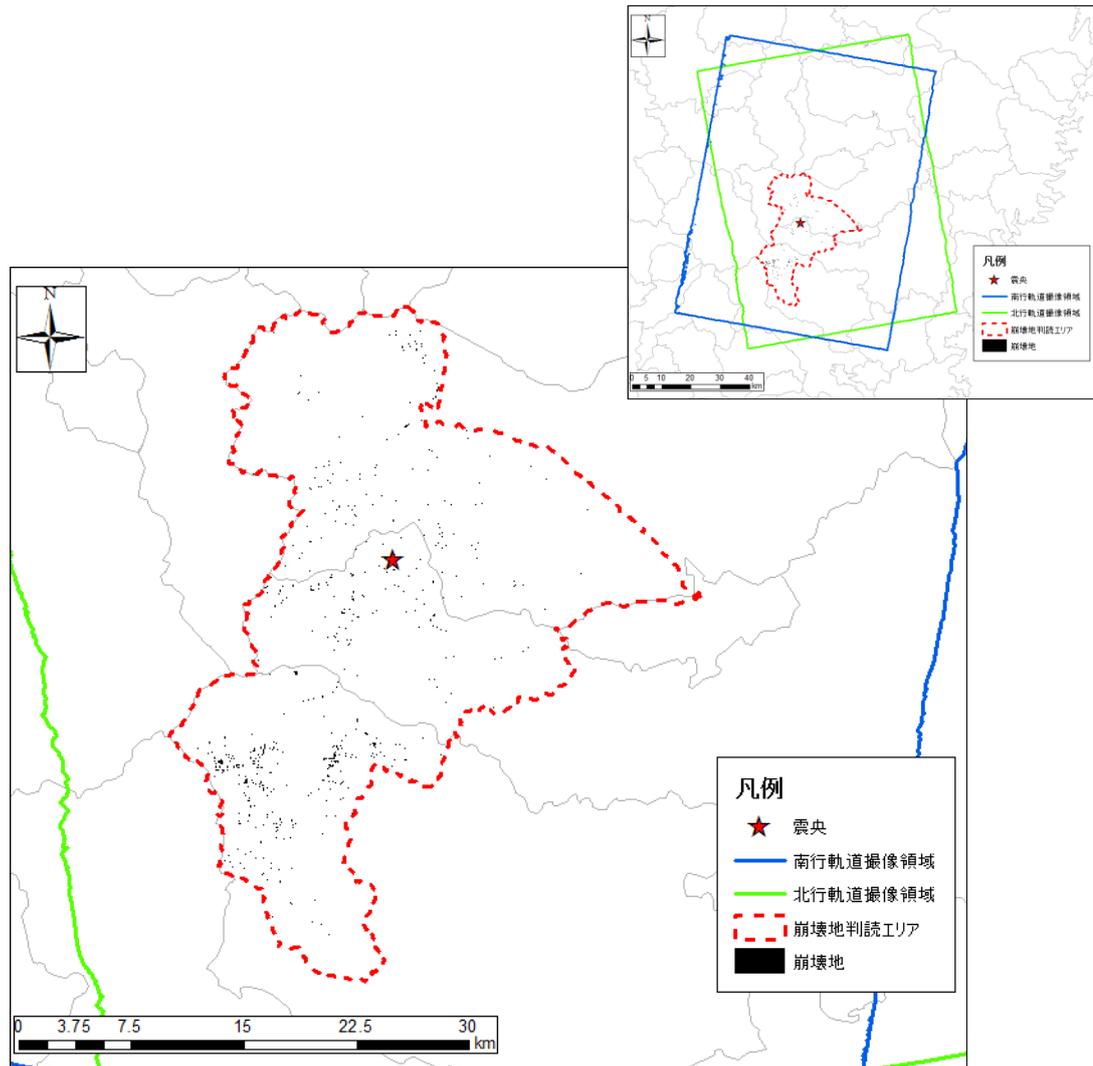


図 6.15.1 崩壊地判読領域（赤点線が崩壊地判読の領域を示す）

Fig. 6.15.1 Slope-failure interpretation range (broken red line shows range of slope-failure interpretation range)

### 6. 15. 2 コヒーレンス値と崩壊地分布の関係

コヒーレンス値 0.7 以下の低コヒーレンス領域と崩壊地分布の関係を図 6.15.2 に示す。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る。このことから、干渉性が良い画像において、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予測できると考えられる。

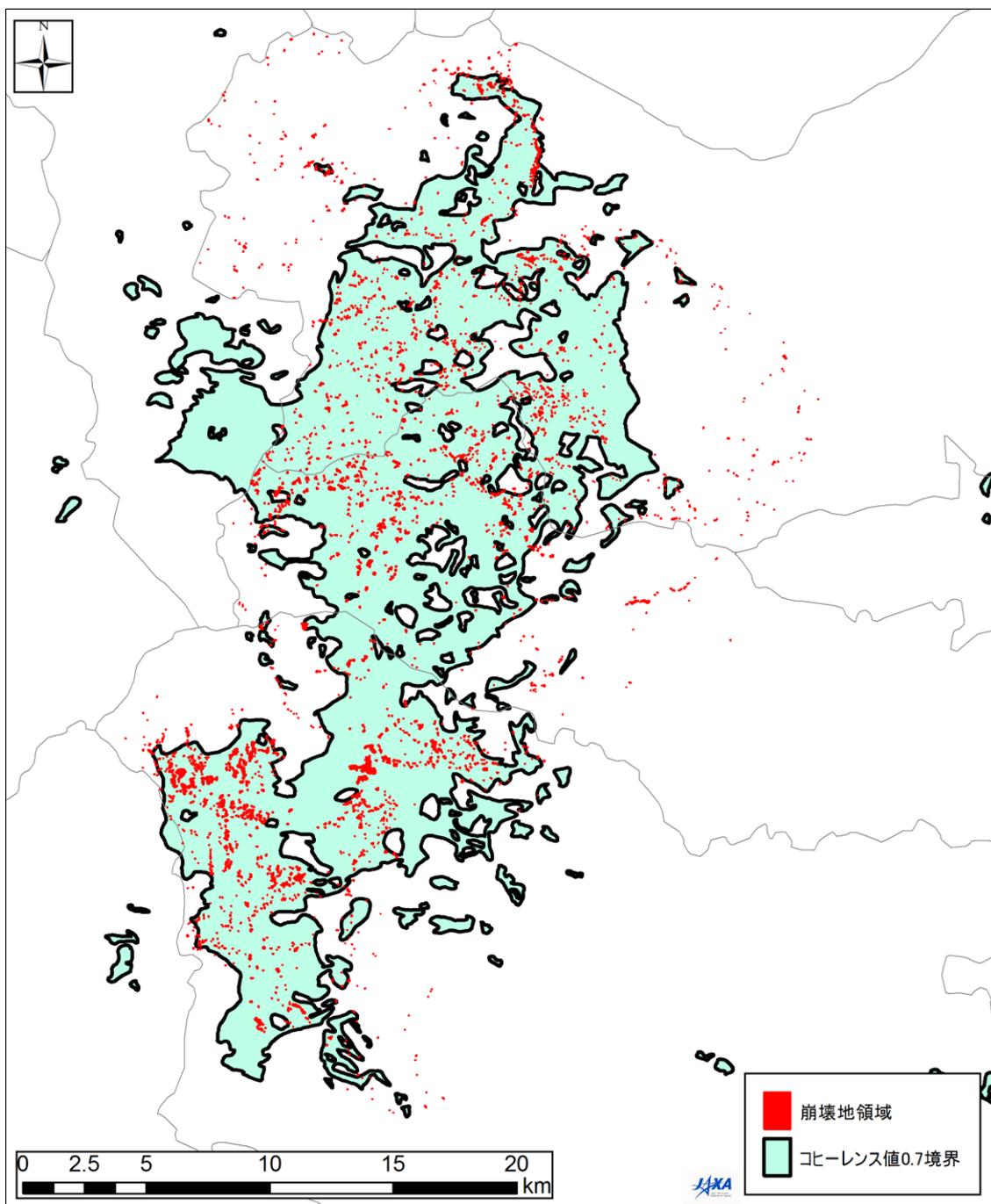


図 6.15.2 低コヒーレンス値(0.7 以下) 領域と崩壊地分布

Fig. 6.15.2 Low coherence range and slope-failure distribution

### 6. 15. 3 崩壊地分布と変位量との関係の検討

#### (1) 評価方法

地表面変位量図と崩壊地分布図を重ね合わせて、関係を検討検討した。地表面変位量と崩壊地分布の重ね合わせ図を図 6.15.3、図 6.15.4、図 6.15.5 に示す。評価指標は、次の2項目である。

- ・ 単位面積当たりの崩壊地数
- ・ 崩壊地面積率

そして、各方向の変位量に対してヒストグラムを作成した。

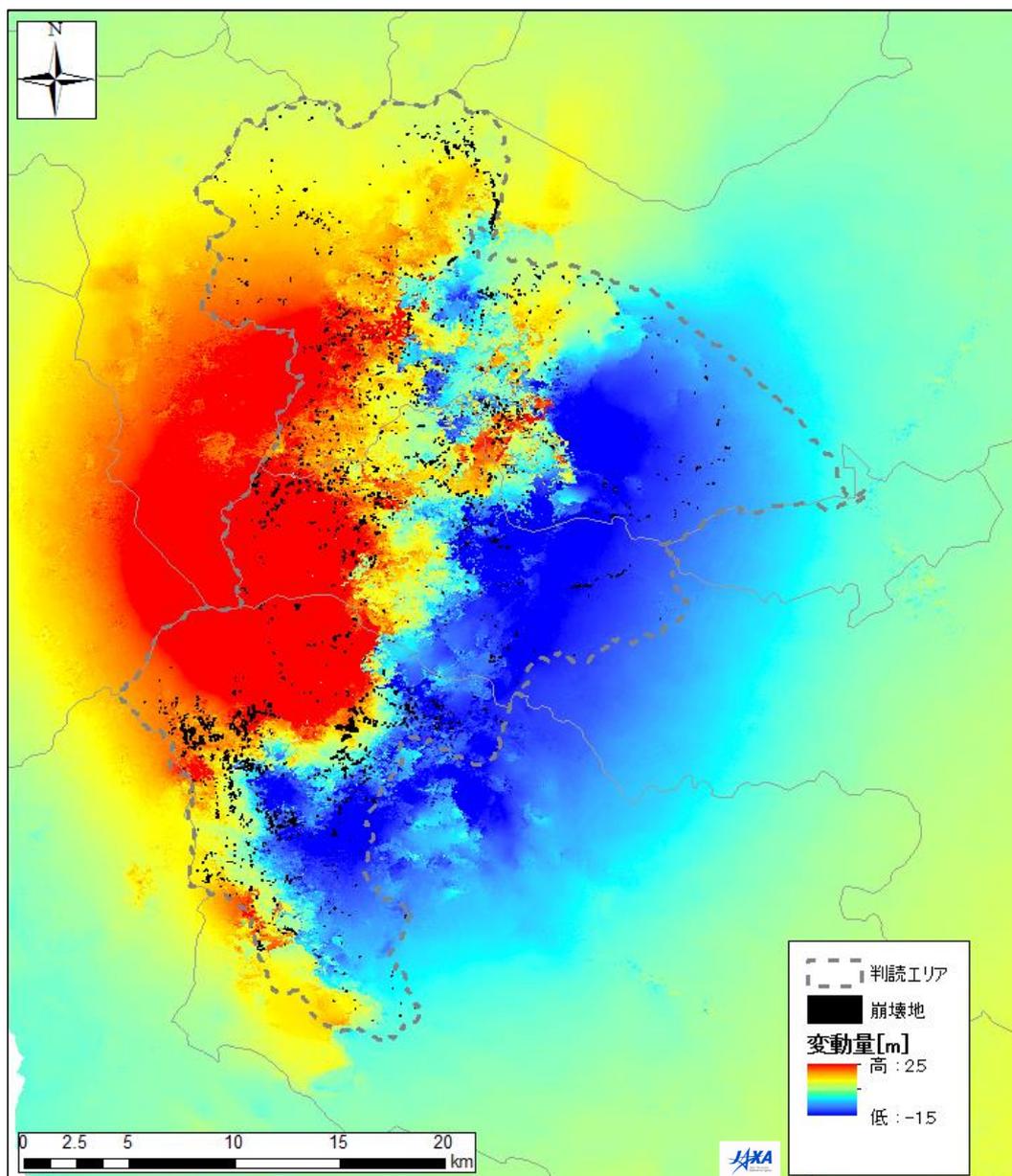


図 6.15.3 東西変位量と崩壊地分布

Fig. 6.15.3 Quantity of east-west displacement and slope-failure distribution

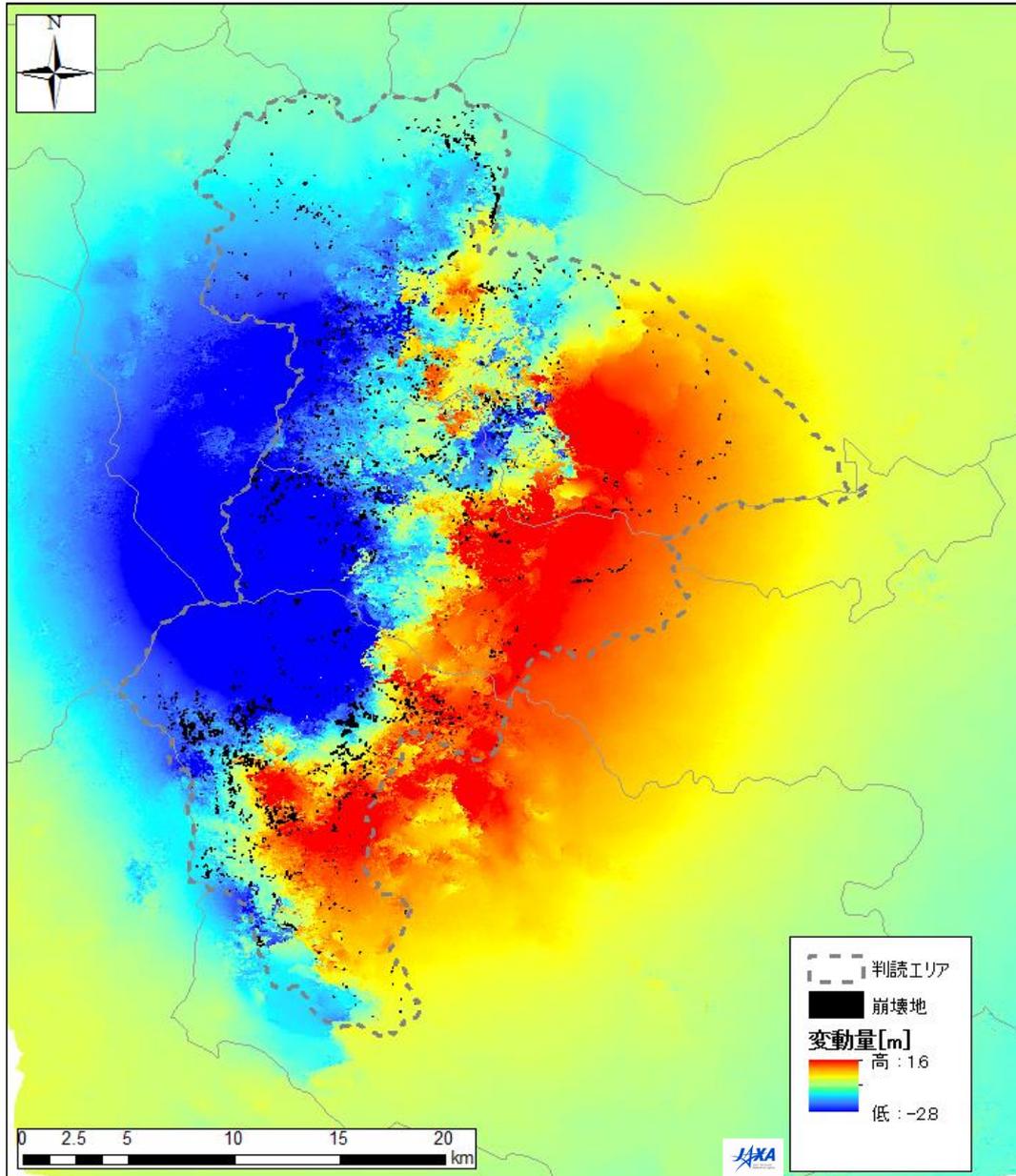


図 6.15.4 南北変位量と崩壊地分布

Fig. 6.15.4 Quantity of north-south displacement and slope-failure distribution

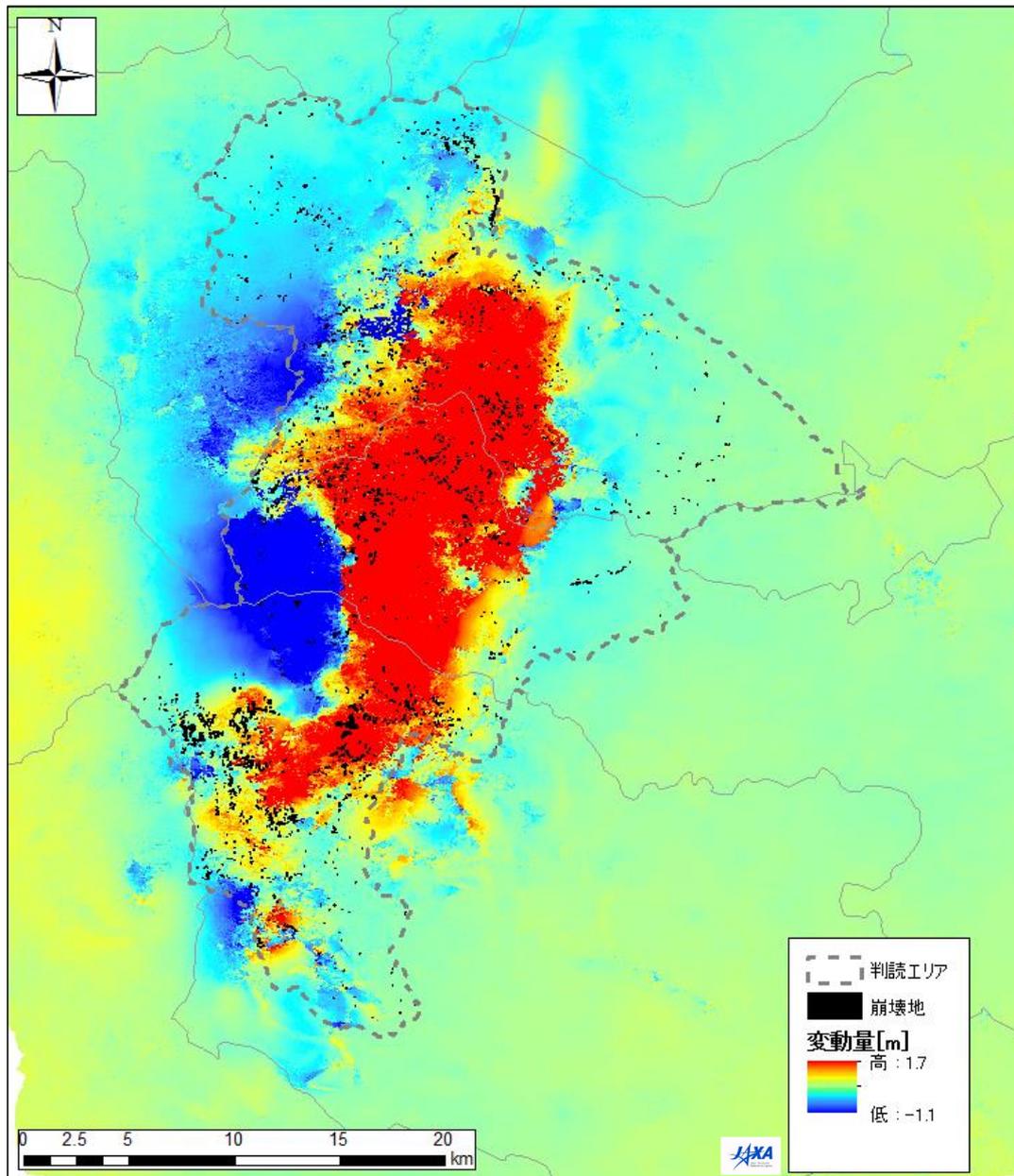


図 6.15.5 垂直変位量と崩壊地分布

Fig. 6.15.5 Quantity of vertical displacement and slope-failure distribution

## (2) 崩壊地の地表面変位量と斜面勾配の定義

各崩壊地において、「崩壊地の地表面変位量」及び「崩壊地の斜面勾配」の値の定義は、**図 6.15.6**に示すように、各崩壊地の崩壊地ポリゴンの重心を含むピクセルの値を各崩壊地に対応する値として用いた。

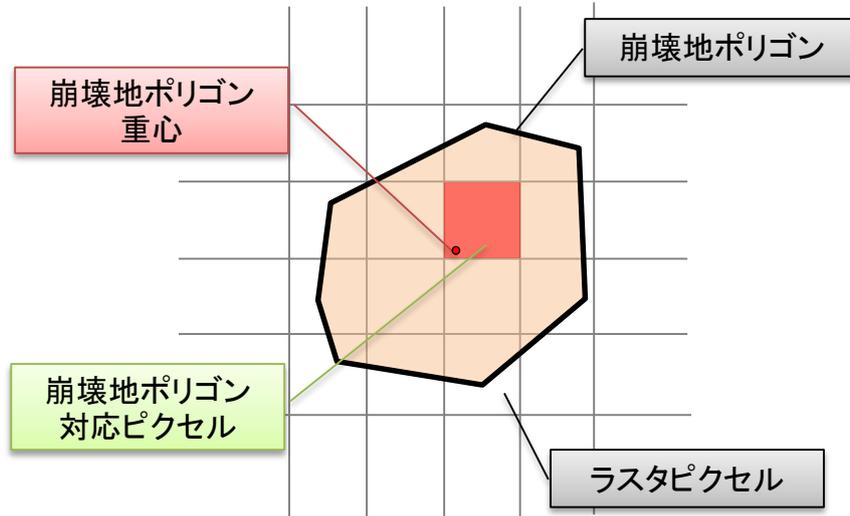
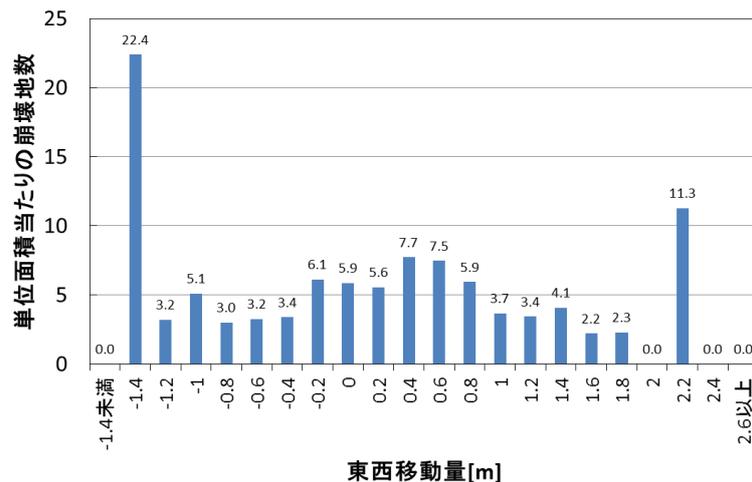


図 6.15.6 崩壊地の地表面変位量と斜面勾配の定義

Fig. 6.15.6 Definition of the quantity of ground surface displacement and the slope gradient of the slope-failure area

## (3) 「単位面積当たりの崩壊地数」と移動量の関係

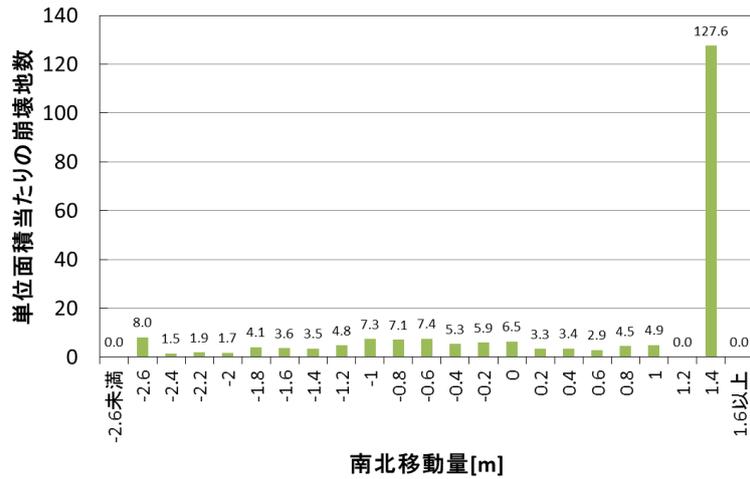
1km<sup>2</sup> 単位面積当たりの崩壊地数と移動量の関係を**図 6.15.6**、**図 6.15.7**、**図 6.15.8**に示す。



※東方向の移動がプラス

図 6.15.7 単位面積当たり(1km<sup>2</sup>)の崩壊地数と東西移動量

Fig. 6.15.7 “Number of slope-failure locations per unit of area (1km<sup>2</sup>)” and quantity of east-west displacement



※北方向の移動がプラス

図 6.15.8 単位面積当たり(1km<sup>2</sup>)の崩壊地数と南北移動量

Fig. 6.15.8 “Number of slope-failure locations per unit of area (1km<sup>2</sup>)” and quantity of north-south displacement

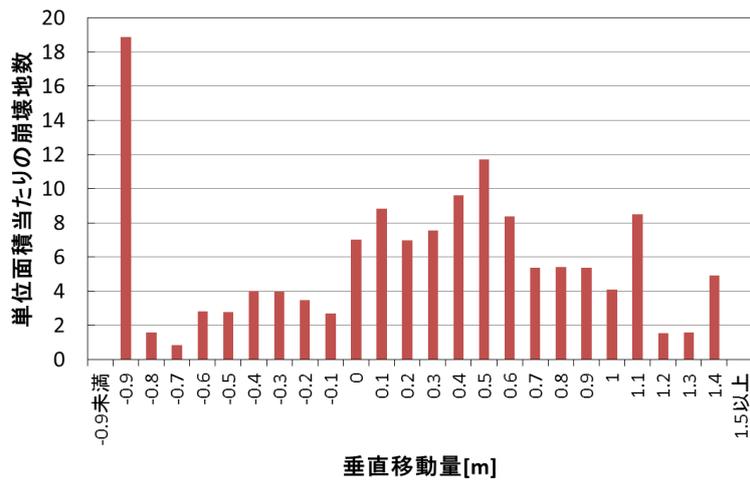


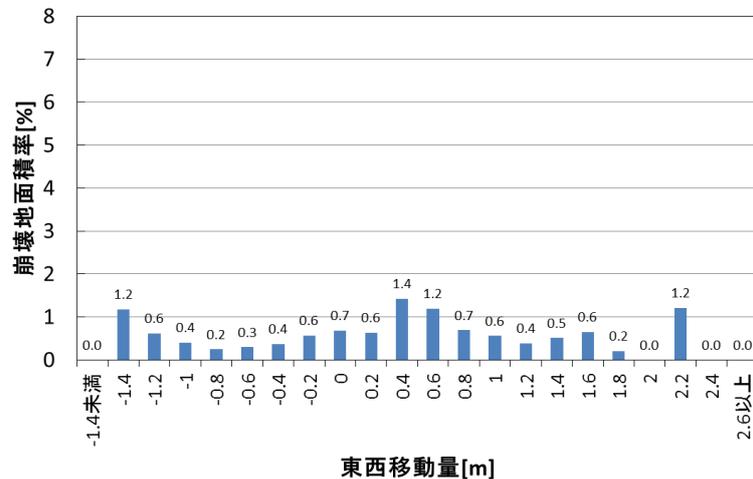
図 6.15.9 単位面積当たり(1km<sup>2</sup>)の崩壊地数と垂直移動量

Fig. 6.15.9 “Number of slope-failure locations per unit of area (1km<sup>2</sup>)” and quantity of vertical displacement

#### (4) 崩壊地面積率と移動量の関係

崩壊地面積率と移動量の関係を図 6.15.10、図 6.15.11、図 6.15.12 に示す。また、それぞれのグラフの基となる移動量毎の面積の数値を表 6.15.1、表 6.15.2、表 6.15.3 に示す。

##### ・崩壊地面積率と移動量（東西方向）



※東方向の移動がプラス

図 6.15.10 崩壊地面積率と東西移動量

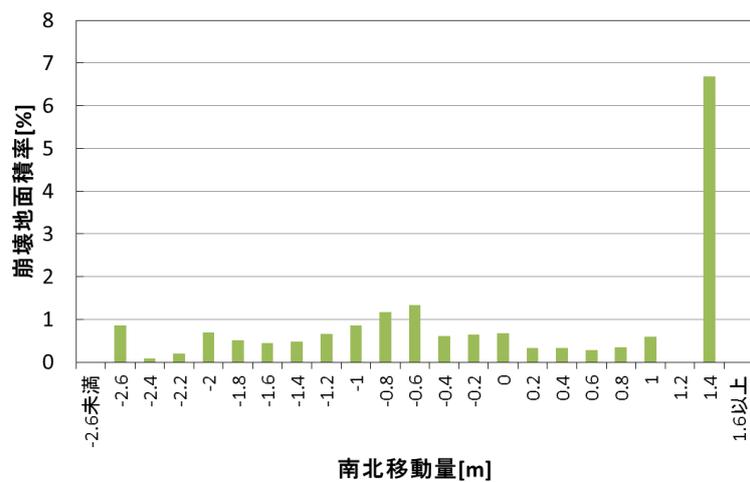
Fig. 6.15.10 Slope-failure area rate and quantity of east-west displacement

表 6.15.1 崩壊地面積率と東西移動量

Table 6.15.1 Slope-failure area rate and quantity of east-west displacement

移動量 (m)	全数(面積) (km <sup>2</sup> )	崩壊地の数 ②	崩壊地の面積 (km <sup>2</sup> ) ③	崩壊地面積率 (%)
	①			100 × ③ / ①
-1.4未満	0	0	0	0
-1.4 ~ -1.2	0.0447	1	0.00052	1.2
-1.2 ~ -1	1.87	6	0.0114	0.6
-1 ~ -0.8	8.81	45	0.0354	0.4
-0.8 ~ -0.6	49.52	149	0.122	0.2
-0.6 ~ -0.4	113.93	369	0.338	0.3
-0.4 ~ -0.2	92.86	314	0.338	0.4
-0.2 ~ 0	62.13	381	0.353	0.6
0 ~ 0.2	108.03	633	0.741	0.7
0.2 ~ 0.4	106.18	591	0.677	0.6
0.4 ~ 0.6	62.68	484	0.888	1.4
0.6 ~ 0.8	30.65	229	0.366	1.2
0.8 ~ 1	20.03	119	0.138	0.7
1 ~ 1.2	14.22	52	0.0794	0.6
1.2 ~ 1.4	10.19	35	0.0390	0.4
1.4 ~ 1.6	13.81	56	0.0700	0.5
1.6 ~ 1.8	7.26	16	0.0467	0.6
1.8 ~ 2	3.91	9	0.0081	0.2
2 ~ 2.2	1.84	0	0	0
2.2 ~ 2.4	0.354	4	0.0043	1.2
2.4 ~ 2.6	0.0024	0	0	0
2.6以上	0	0	0	0
合計	708.30	3,493	4.256	

・崩壊地面積率と移動量 (南北方向)



※北方向の移動がプラス

図 6.15.11 崩壊地面積率と南北移動量

Fig. 6.15.11 Slope-failure area rate and quantity of north-south displacement

表 6.15.2 崩壊地面積率と南北移動量

Table 6.15.2 Slope-failure area rate and quantity of north-south displacement

移動量 (m)	全数(面積) (km <sup>2</sup> )	崩壊地の数 (②)	崩壊地の面積 (km <sup>2</sup> ) (③)	崩壊地面積率 (%)
	(①)			100 × (③)/(①)
-2.6未満	0.022	0	0	0
-2.6 ~ -2.4	0.499	4	0.0043	0.9
-2.4 ~ -2.2	2.07	3	0.0016	0.1
-2.2 ~ -2	3.66	7	0.0071	0.2
-2 ~ -1.8	6.39	11	0.0444	0.7
-1.8 ~ -1.6	12.31	51	0.0623	0.5
-1.6 ~ -1.4	9.86	36	0.0446	0.5
-1.4 ~ -1.2	10.57	37	0.0496	0.5
-1.2 ~ -1	15.77	75	0.103	0.7
-1 ~ -0.8	20.95	154	0.181	0.9
-0.8 ~ -0.6	35.17	250	0.410	1.2
-0.6 ~ -0.4	65.88	489	0.874	1.3
-0.4 ~ -0.2	103.16	550	0.621	0.6
-0.2 ~ 0	93.45	555	0.604	0.6
0 ~ 0.2	54.41	351	0.369	0.7
0.2 ~ 0.4	81.84	274	0.272	0.3
0.4 ~ 0.6	97.55	336	0.324	0.3
0.6 ~ 0.8	75.01	220	0.205	0.3
0.8 ~ 1	14.57	65	0.0494	0.3
1 ~ 1.2	4.85	24	0.0285	0.6
1.2 ~ 1.4	0.281	0	0	0
1.4 ~ 1.6	0.0078	1	0.00052	6.7
1.6以上	0	0	0	0
合計	708.30	3,493	4.256	

・崩壊地面積率と移動量 (垂直方向)

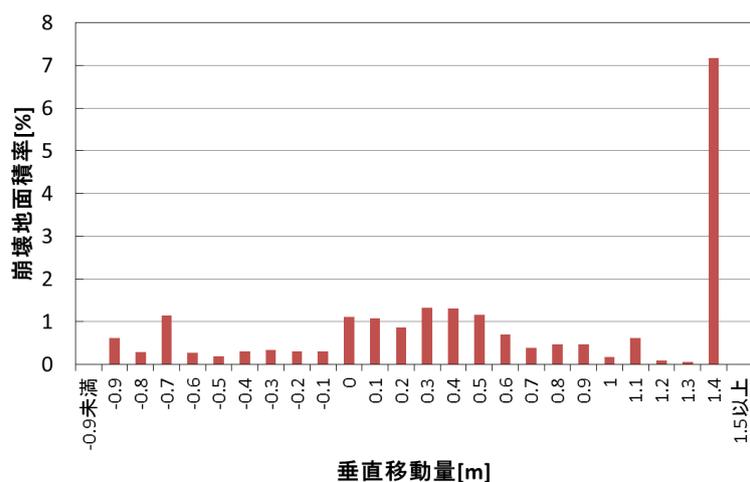


図 6.15.12 崩壊地面積率と垂直移動量

Fig. 6.15.12 Slope-failure area rate and quantity of vertical displacement

表 6.15.3 崩壊地面積率と垂直移動量

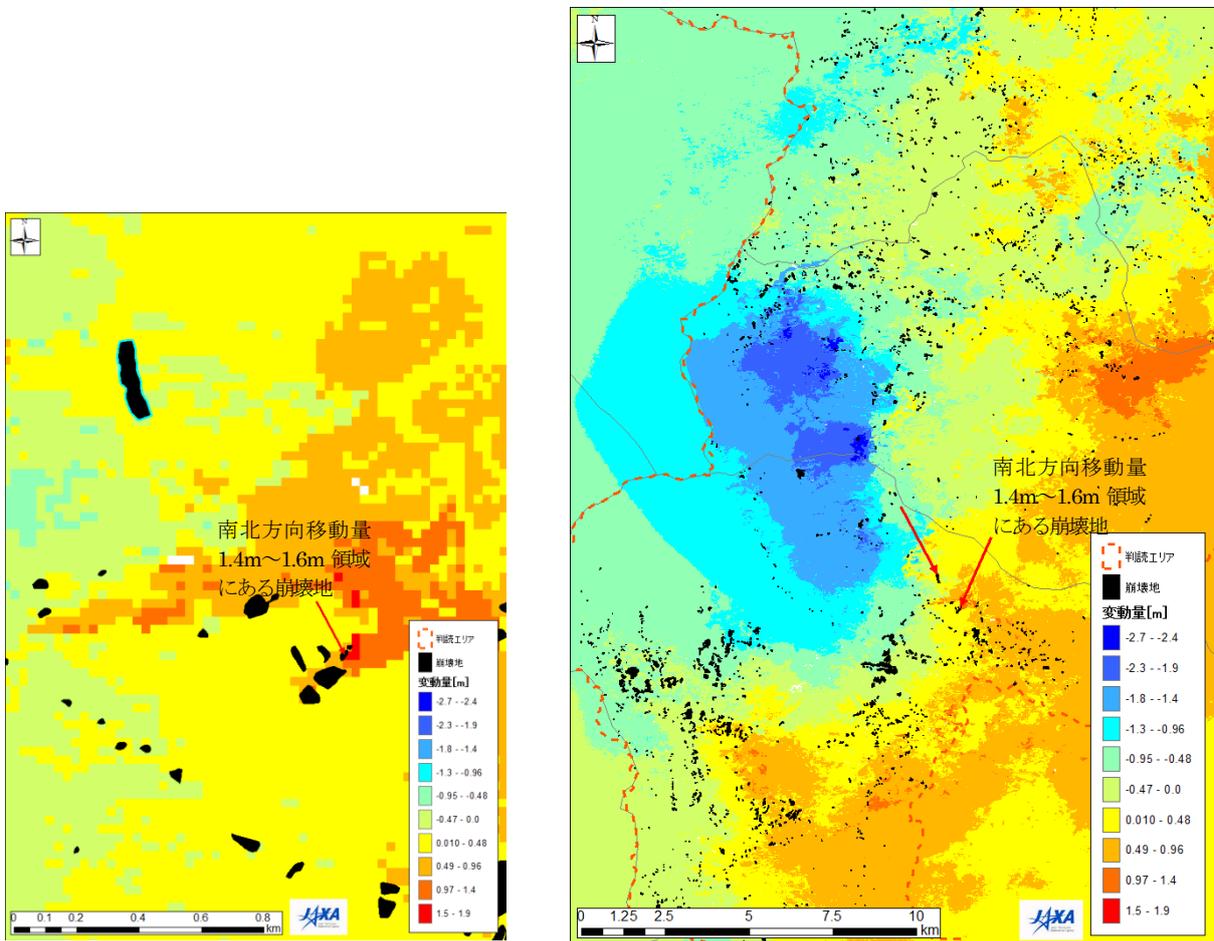
Table 6.15.3 Slope-failure area rate and quantity of vertical displacement

移動量 (m)	全数(面積) (km <sup>2</sup> )	崩壊地の数	崩壊地の面積 (km <sup>2</sup> )	崩壊地面積率 (%)
	①	②	③	100 × ③ / ①
-0.9未満	0.010	0	0	0
-0.9 ~ -0.8	0.106	2	0.00066	0.6
-0.8 ~ -0.7	1.27	2	0.0036	0.3
-0.7 ~ -0.6	3.48	3	0.0398	1.1
-0.6 ~ -0.5	5.32	15	0.0145	0.3
-0.5 ~ -0.4	11.53	32	0.0219	0.2
-0.4 ~ -0.3	12.98	52	0.0407	0.3
-0.3 ~ -0.2	17.42	69	0.0576	0.3
-0.2 ~ -0.1	60.79	211	0.185	0.3
-0.1 ~ 0	300.82	808	0.919	0.3
0 ~ 0.1	72.40	507	0.801	1.1
0.1 ~ 0.2	49.85	441	0.535	1.1
0.2 ~ 0.3	39.37	275	0.339	0.9
0.3 ~ 0.4	32.88	249	0.434	1.3
0.4 ~ 0.5	27.10	261	0.357	1.3
0.5 ~ 0.6	19.98	234	0.231	1.2
0.6 ~ 0.7	16.81	141	0.117	0.7
0.7 ~ 0.8	12.31	66	0.0485	0.4
0.8 ~ 0.9	8.52	46	0.0395	0.5
0.9 ~ 1	6.32	34	0.0300	0.5
1 ~ 1.1	3.91	16	0.0070	0.2
1.1 ~ 1.2	2.94	25	0.0180	0.6
1.2 ~ 1.3	1.28	2	0.00108	0.08
1.3 ~ 1.4	0.629	1	0.00038	0.06
1.4 ~ 1.5	0.203	1	0.0146	7.2
1.5以上	0.074	0	0	0
合計	708.30	3,493	4.256	

(5) 考察

水平方向の移動成分では、移動量と「単位面積あたりの崩壊地数」、移動量と「崩壊面積率」ともにばらつきが大きい。移動量の大きさと崩壊の発生しやすさは比例せず、移動量が大きくなると崩壊が発生しやすくなる傾向は確認できない。また、垂直方向の移動量では、下方移動の領域に比べて、逆断層の上盤側に当たる上方移動の領域の方が、「単位面積あたりの崩壊地数」(図 6.15.9)、崩壊面積率(図 6.15.12)ともに大きい。

なお、図 6.15.8、図 6.15.11 の南北方向移動量 1.4m~1.6m 領域の値が、「単位面積あたりの崩壊地数」、崩壊地面積率ともに特に大きい。この南北方向の「単位面積あたりの崩壊地数」と崩壊地面積率の値が大きい位置の拡大図である図 6.15.13 を確認しても、特に特徴を示すものでは無かった。値が大きい理由を表 6.15.2 から考えると、その分母となる全数面積 0.0078km<sup>2</sup>が、他の移動量の全数面積と比べて小さいことによるもので、特徴を示すものではないと考えられる。

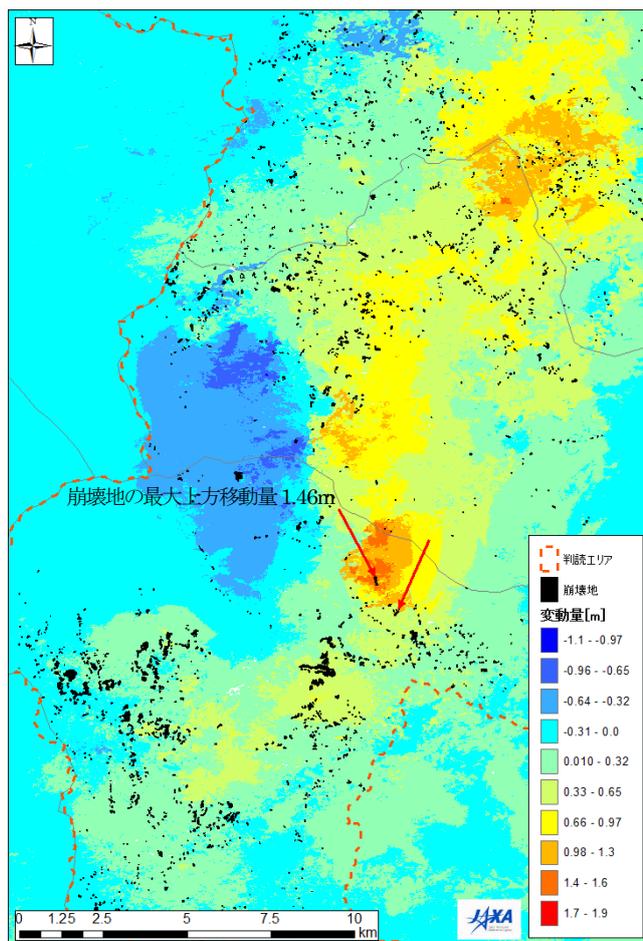
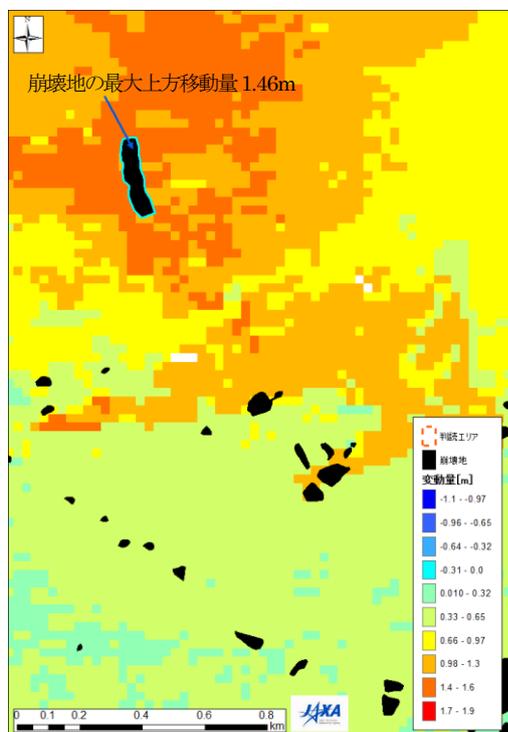


「移動量毎の崩壊地面積率」及び「北方向への移動量」が最も大きい箇所の拡大

広域図

図 6.15.13 南北移動量と崩壊地分布

Fig. 6.15.13 Quantity of north-south displacement and slope-failure distribution



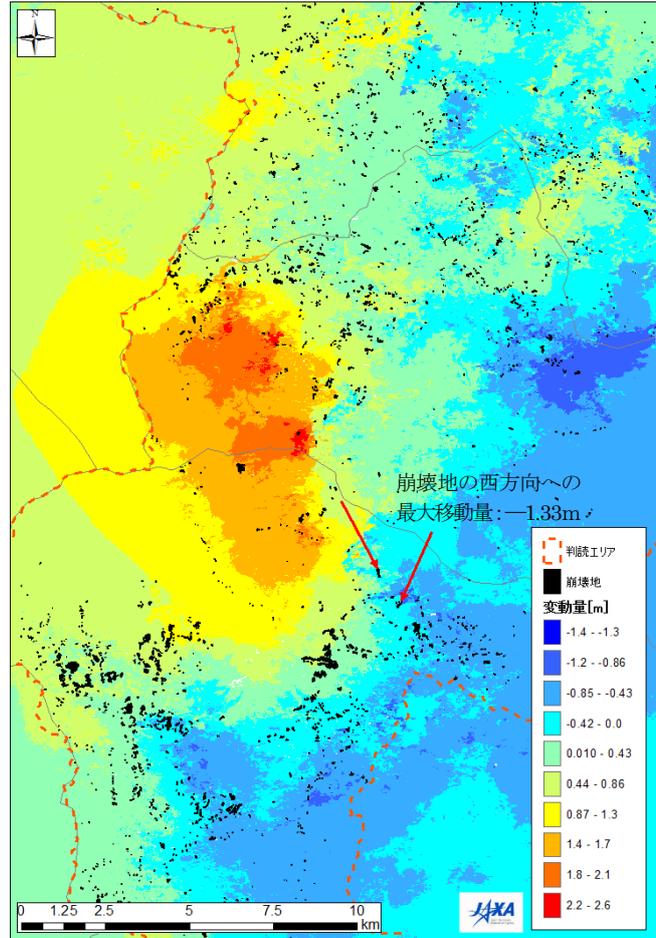
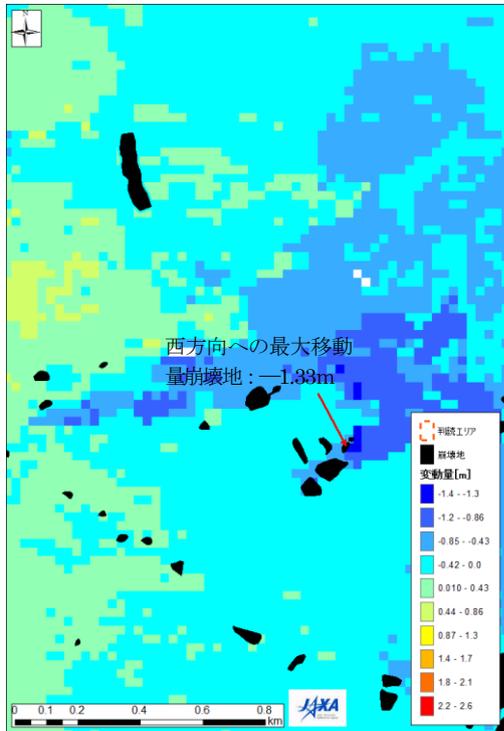
「移動量毎の崩壊地面積率」及び「上方への移動量」が最も大きい箇所の拡大

広域図

図 6.15.14 垂直移動量と崩壊地分布

Fig. 6.15.14 Quantity of vertical displacement and slope-failure distribution

また、南北方向と同様に、垂直方向（図 6.15.9、図 6.15.12）、東西方向（図 6.15.7、図 6.15.10）においても特に大きい値が生じる状況が見受けられる。これについても、垂直方向と東西方向の「単位面積当たりの崩壊地数」と崩壊地面積率の値が大きい位置の拡大図である図 6.15.14、図 6.15.15 を確認したが、南北方向と同様に、特に特徴を示すものではない。



「移動量毎の崩壊地面積率」及び「西方向への移動量」が最も大きい箇所の拡大

広域図

図 6.15.15 東西移動量と崩壊地分布

Fig. 6.15.15 Quantity of east-west displacement and slope-failure distribution

### (6) 上盤下盤と崩壊地分布の関係

断層型地震の場合、断層の上盤側と下盤側での振る舞いが重要となる。そこで、垂直変位量が上方移動又は下方移動のエリア別と、斜面勾配毎の崩壊地分布との相関を示したものが、**図 6.15.16**、**図 6.15.17**、**図 6.15.18**、**図 6.15.19** である。なお、傾斜データは国土数値情報の標高・傾斜度 5 次メッシュデータ<sup>10)</sup>を使用した。

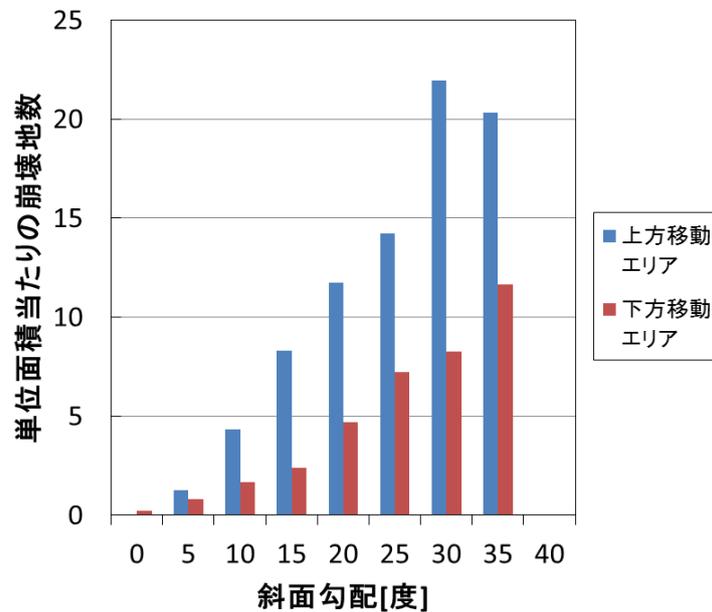


図 6.15.16 斜面勾配毎の上方下方移動エリアと「単位面積当たり(1km<sup>2</sup>)の崩壊地数」の関係  
 Fig. 6.15.16 Relationship of upward and downward movement area for each slope gradient with “Number of slope-failure locations per unit of area (1km<sup>2</sup>)”

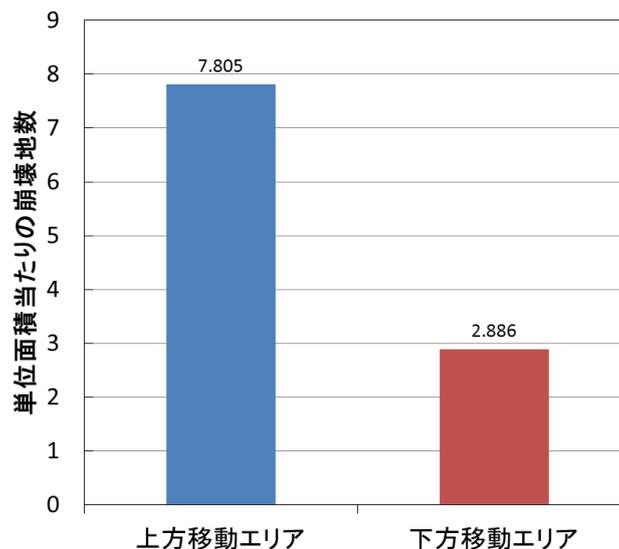


図 6.15.17 上方下方移動エリアと「単位面積当たり(1km<sup>2</sup>)の崩壊地数」の関係  
 Fig. 6.15.17 Relationship of “upward and downward movement area for each slope gradient area” with “Number of slope-failure locations per unit of area (1km<sup>2</sup>)”

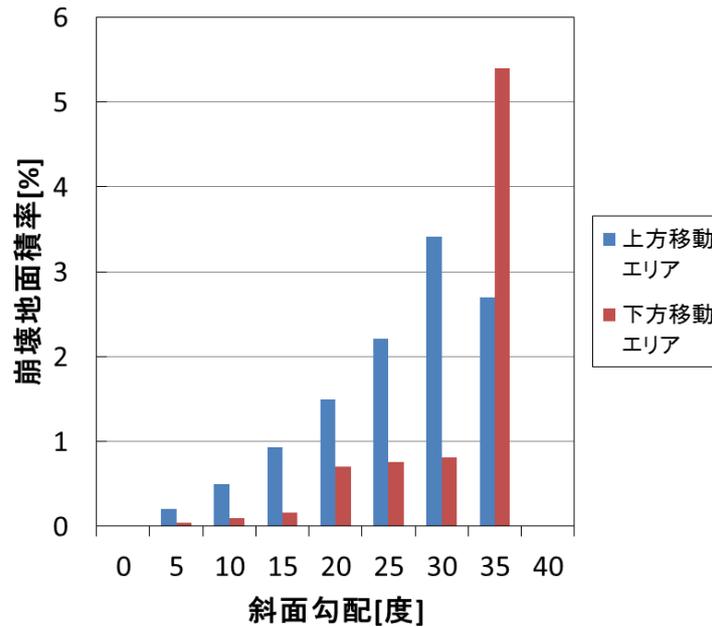


図 6.15.18 斜面勾配毎の上方下方移動エリアと崩壊地面積率の関係

Fig. 6.15.18 Relationship of “upward and downward movement area for each slope gradient area” with slope-failure area rate

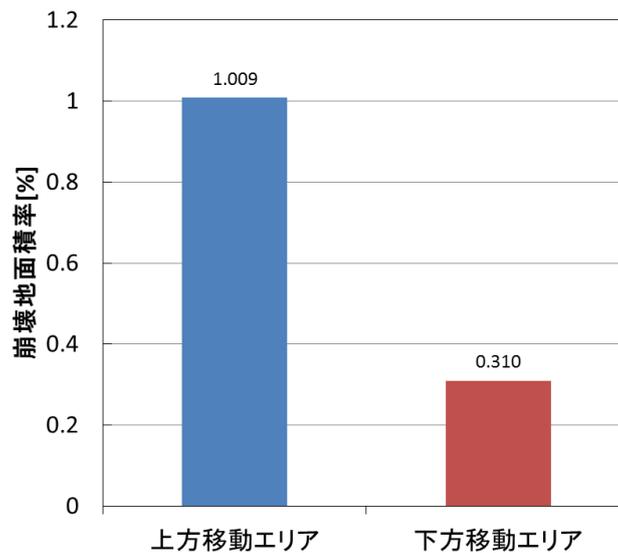


図 6.15.19 上方下方移動エリアと崩壊地面積率の関係

Fig. 6.15.19 Relationship of “upward and downward movement area” with slope-failure area rate

岩手・宮城内陸地震は逆断層であることから、上方移動エリアを断層の上盤側、下方移動エリアを下盤側と推測すると、図 6.15.16～図 6.15.19 に示すように、崩壊は断層の上盤側で多く起きていることがわかる。ただし、図 6.15.18 に示すように、 $35^{\circ}$  ～ $40^{\circ}$ の急な斜面では崩壊地面積率が下方移動エリアのほうが大きくなっており、急な斜面の場合は、上盤に位置することよりも他の要因の影響が大きくなると考えられる。

#### 6. 15. 4 「移動方向が反転する位置の線」と崩壊地分布との関係

「移動方向が反転する位置の線」と各崩壊地の重心との距離の分布を調べた。「東西移動方向が反転する位置の線」と崩壊地分布の状況を図 6.15.20 に示す。ここで、「東西移動方向が反転する位置の線」は、地震による地盤の移動を抽出し、地すべり的な土塊移動を除くため、リング状（土塊状）となっている線を除外して、リング状になっていない「東西移動方向が反転する位置の線」のみをつないでいる。

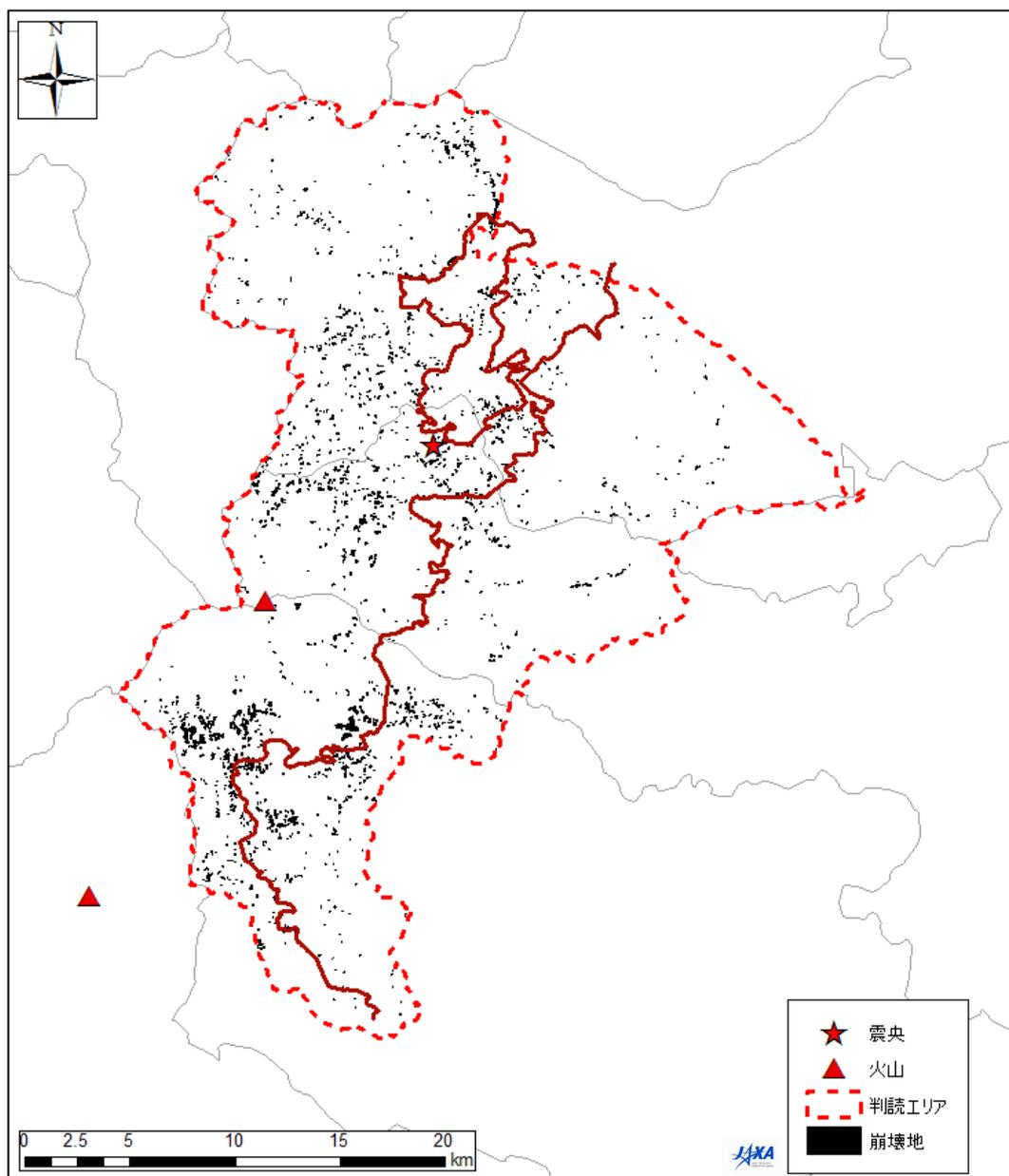


図 6.15.20 「東西移動方向が反転する位置の線」と崩壊地分布

Fig. 6.15.20 “Line of locations where east-west movement direction reverses” and slope-failure distribution

(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

判読エリア内を対象とした、「東西移動方向が反転する位置の線」と崩壊地分布の関係を図 6.15.21、図 6.15.22、図 6.15.23 に示す。ここで、崩壊地分布データの判読エリアより外側のエリア（崩壊地が少）は、図 6.15.22、図 6.15.23 の「単位面積当たりの崩壊地数」、「崩壊地面積率」の算定対象に含まれていないことに留意を要する。

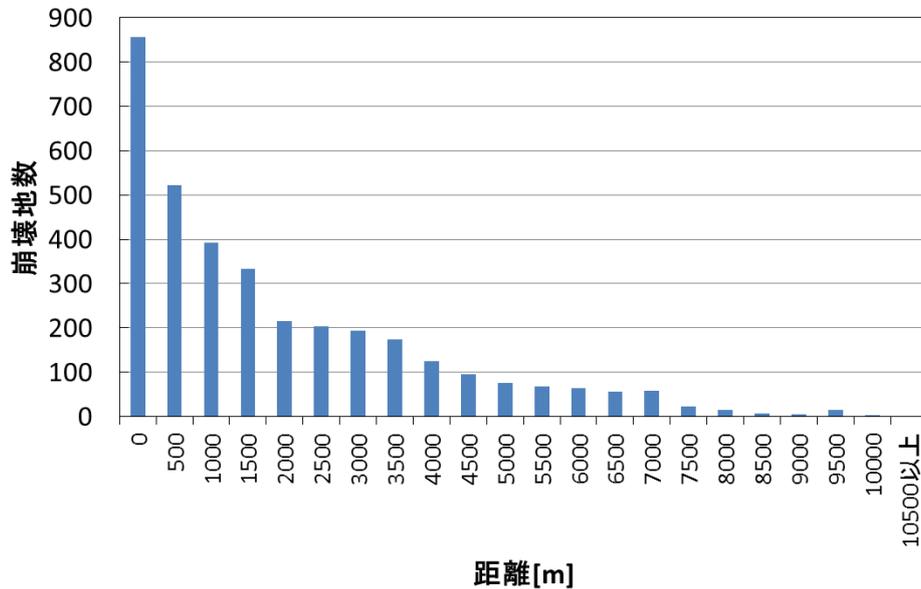


図 6.15.21 「東西移動方向が反転する位置の線」からの距離と崩壊地数の関係

Fig. 6.15.21 Relationship of distance from “Line of locations where east-west movement direction reverses” with “Number of slope-failure location”

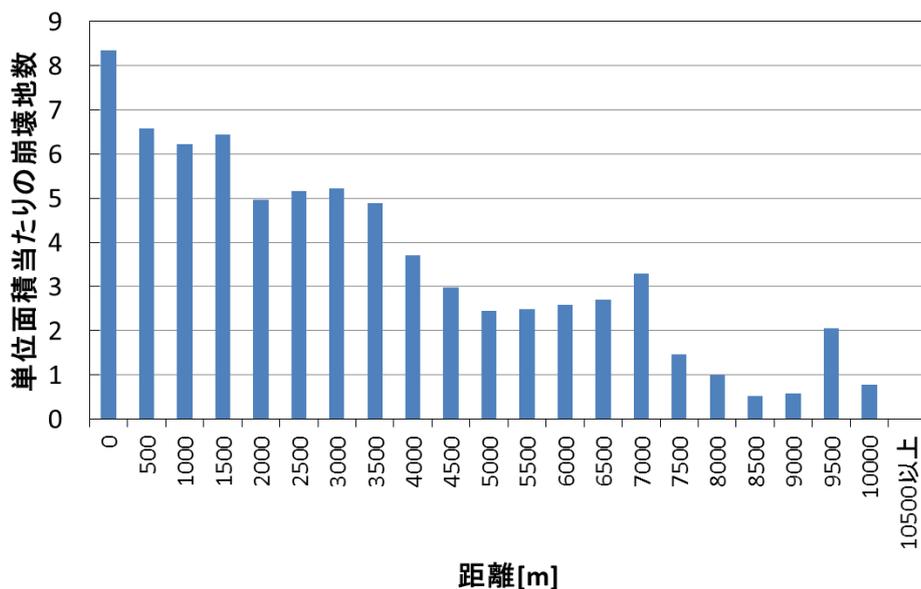


図 6.15.22 「東西移動方向が反転する位置の線」からの距離と「単位面積当たり(1km<sup>2</sup>)の崩壊地数」の関係

Fig. 6.15.22 Relationship of distance from “Line of locations where east-west movement direction reverses” with “Number of slope-failure location per unit of area (1km<sup>2</sup>)”

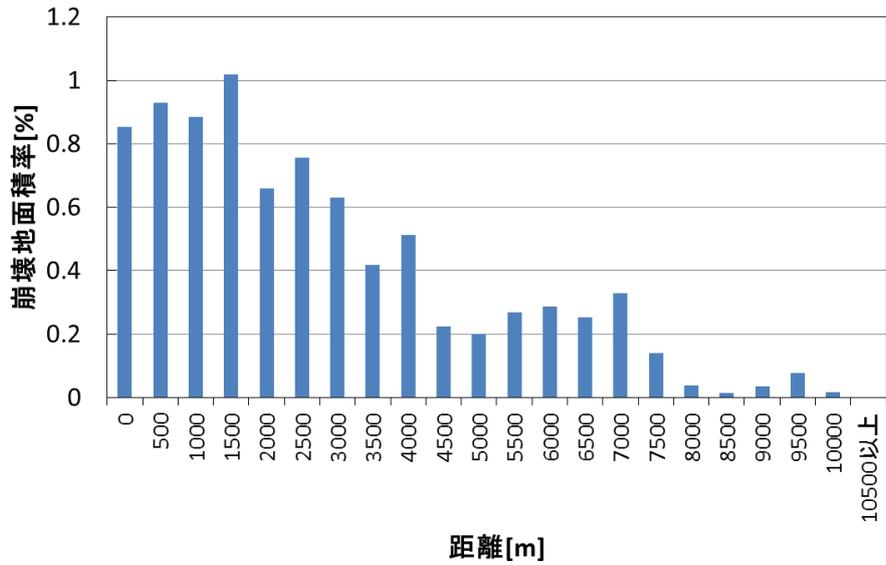


図 6.15.23 「東西移動方向が反転する位置の線」からの距離と崩壊地面積率の関係

Fig. 6.15.23 Relationship of distance from “Line of locations where east-west movement direction reverses” with slope-failure area rate

図 6.15.21、図 6.15.22、図 6.15.23 から、水平方向において「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明確に確認できる。このことから、水平方向の「移動方向が反転する位置の線」が判れば、崩壊地のより多い領域が予測できると考えられる。また、岩手・宮城内陸地震は、地震の規模を考慮すると発生した崩壊地の数が多い地震であったが、「移動方向が反転する位置の線」は、断層面の延長線とも考えられ、この線が入り組んでいるほど、断層の力が複雑にかかることで地盤がゆがみ、崩壊地が多くなる可能性があるとも考えられる。

## 6. 1.6 2領域で変位する地震の変位量把握

ここまでの2.5次元解析の変位量成果が、余震震源分布と適合性が良好なため、地表面変位量のさらなる精度向上を目的に、震源近傍に設置されていたGPS計測点の地震前後のGPSデータを用いて、領域分割を行い、2.5次元解析を実施した。GPS計測データは、太田らの論文<sup>14)</sup>に掲載されているデータを採用した。GPS計測データの内訳は、

- ① 国土地理院 GEONET 観測点 (電子基準点)
- ② 原子力安全基盤機構
- ③ 国立天文台水沢 VERA 観測所のデータ
- ④ 東北大学の観測データ

である。

変位量は、キネマティックGPS解析により算出し、地震(本震)発生前25分間での位置と、電力が回復した2008年6月14日午前11時15分ごろからの25分間の位置の差である。GPS計測点の分布を図6.16.1に示す。

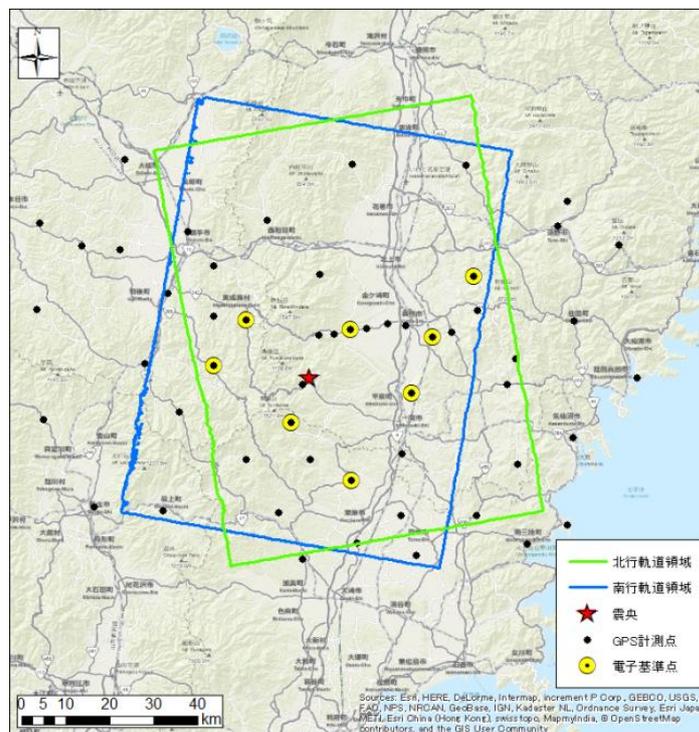


図 6.16.1 GPS計測点の位置図

Fig. 6.16.1 Locations of GPS measurement points

各GPS計測点における水平方向の変位量と移動方向を図6.16.2に、垂直方向の変位量と移動方向を図6.16.3にそれぞれ示す。

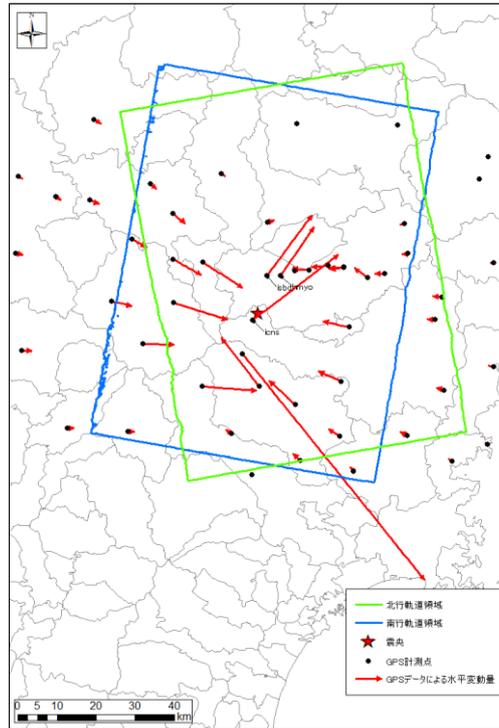


図 6.16.2 2008 岩手・宮城内陸地震の GPS データによる水平変位量<sup>11)</sup>

Fig. 6.16.2 Quantity of horizontal displacement according to GPS of the 2008 Iwate - Miyagi Inland Earthquake

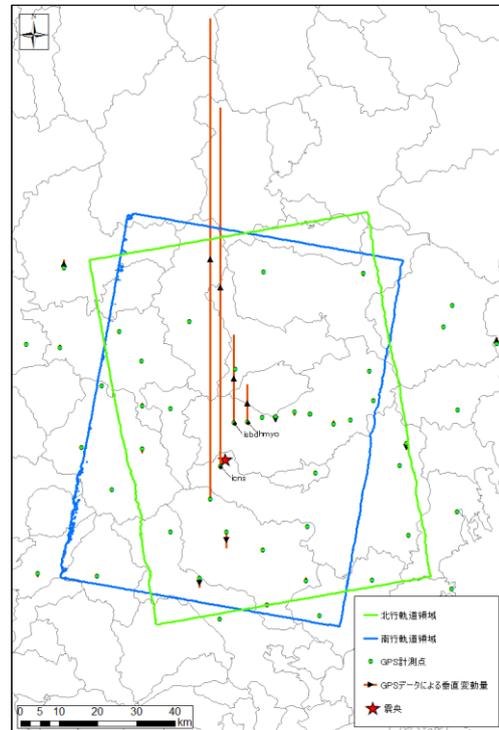


図 6.16.3 2008 岩手・宮城内陸地震の GPS データによる垂直変位量<sup>11)</sup>

(▲: 上方変動 ▼: 下方変動)

Fig. 6.16.3 Quantity of vertical displacement according to GPS of the 2008 Iwate - Miyagi Inland Earthquake (▲: upward movement, ▼: downward movement)

岩手・宮城内陸地震のGPS計測点の水平方向の移動量の図 6.16.2 と図 6.16.4 に示す変位データを確認すると、isbd、hmyo、icns の3計測点のみ北東方向へ移動していた。そこで、この3点のみ別の移動領域として、領域分割した。図 6.16.4 より作成した各領域の解析条件を表 6.16.1 に示す。

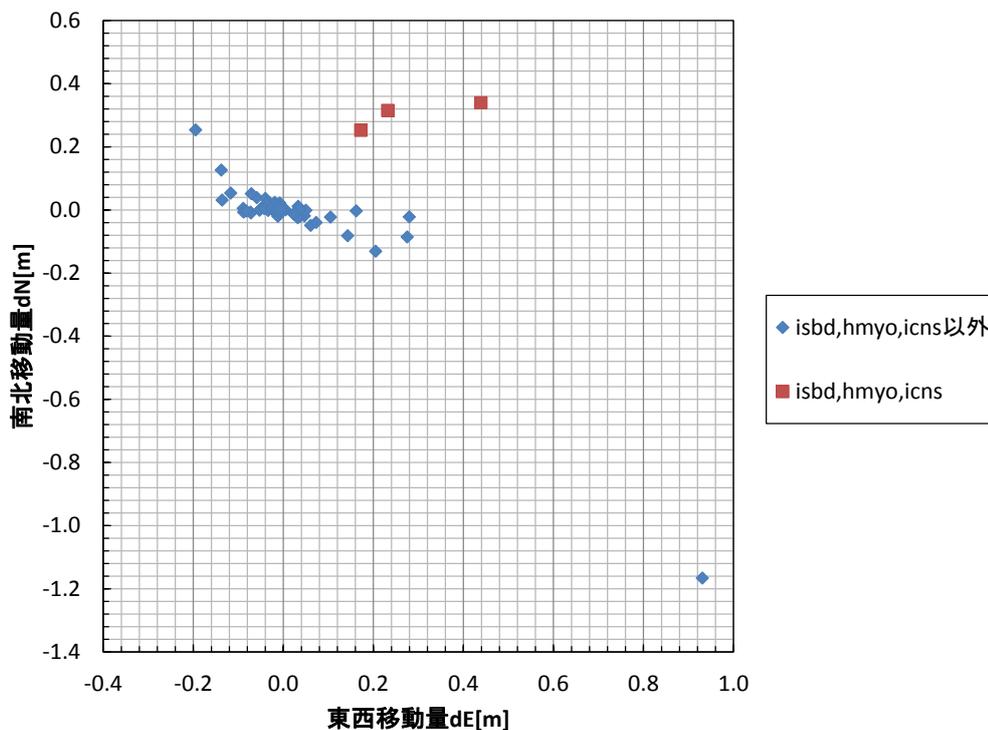


図 6.16.4 GPS 計測点の東西方向と南北方向の変位量

Fig. 6.16.4 Quantity of displacement in the east-west direction and north-south direction of GPS measurement points

表 6.16.1 分割領域ごとの GPS データを使用した 2.5 次元解析条件

Table 6.16.1 2.5 dimensional analysis conditions that used GPS data for each division range

領域	領域分けしたGPS計測点のグループ	$\alpha$
1	isbd、hmyo、icns以外 (電子基準点含む)	-0.97
2	isbd、hmyo、icnsのみ	0.9606

$$\Delta y = \alpha \Delta x$$

### 6. 1.6. 1 2領域における2. 5次元解析

表 6.16.1 に示す解析条件で作成した、各領域の地表面変位量図を図 6.16.5、図 6.16.6 に示す。

(1) 領域 1 : isbd、hmyo、icns 以外（電子基準点含む）

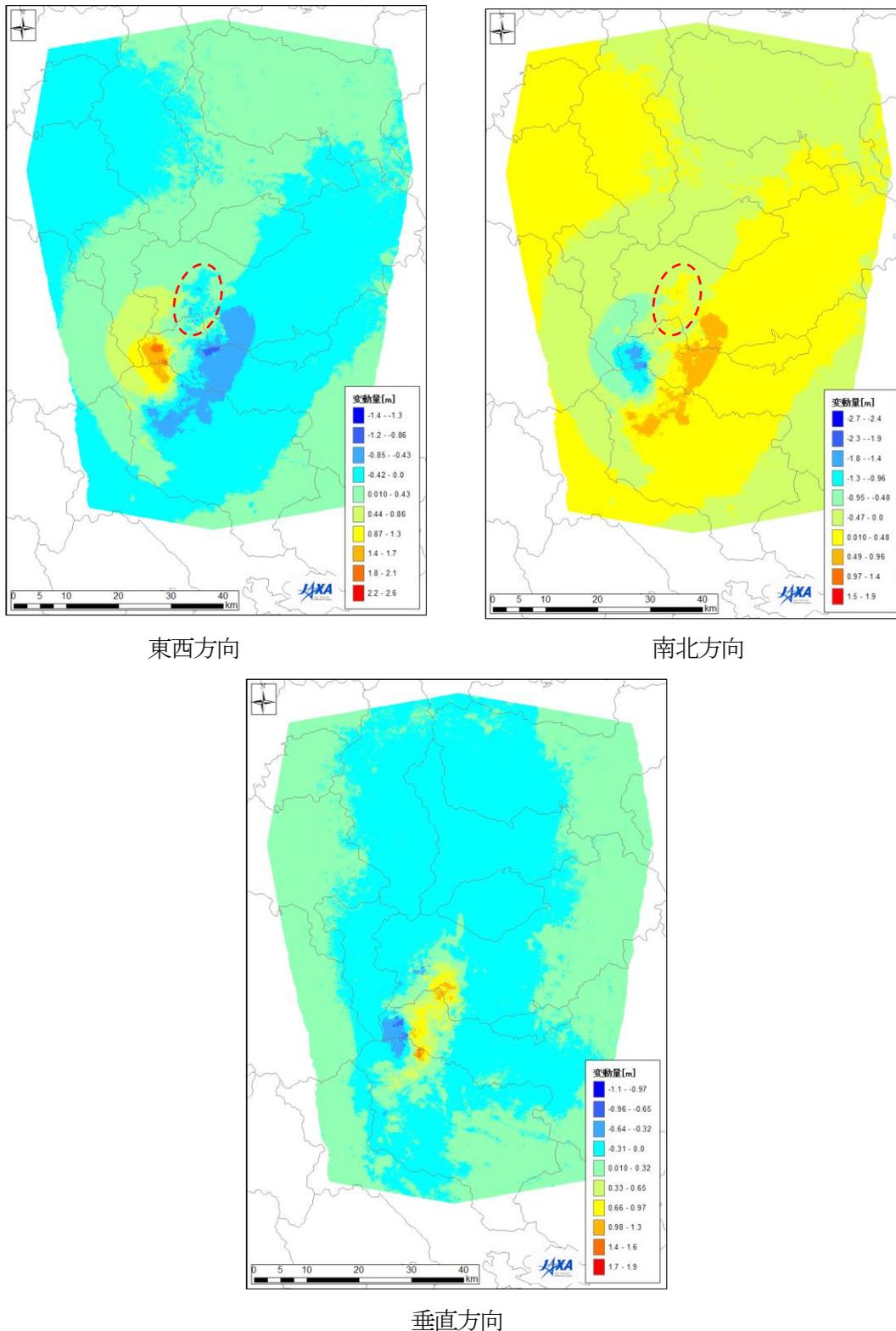
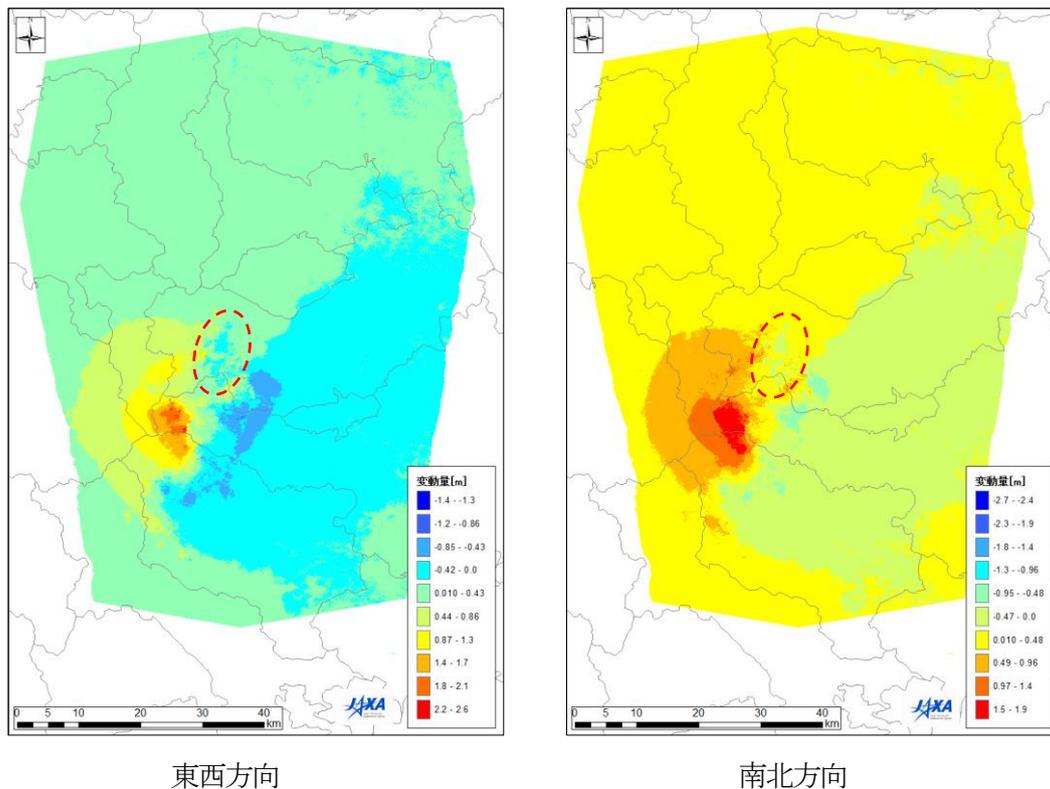


図 6.16.5 isbd、hmyo、icns 以外（電子基準点含む）の GPS 計測点による地表面変位量図  
 Fig. 6.16.5 “Quantity of ground surface displacement according to GPS measurement points”  
 (including GPS-based control stations) other than isbd, hmyo, and icns

(2) 領域 2 : isbd、hmyo、icns



※ 領域 2 の対象領域は、移動方向が他と異なる isbd、hmyo、icns の 3 点の GPS 計測点が存在する  内にある変位方向反転線を想定

図 6.16.6 isbd、hmyo、icns のみの GPS 計測点による東西南北方向の地表面変位量図

Fig. 6.16.6 “Quantity of ground surface displacement in the east-west and south-north directions according to GPS measurement points of only isbd, hmyo, and icns

領域 2 の範囲は、GPS 観測点の isbd、hmyo、icns の 3 点が含まれているエリアであるが、それ以上詳細なエリア境界を示す情報は観測されていない。そこで、 と  の 2、5 次元解析において、赤点線内にある変位方向が反転している領域を領域 2 の範囲と予想した。

今後発生する地震において、複数の断層が活動する等により 2 領域以上で変位する地震が発生した場合においても、今回の 、 と同様の手法により、詳細な変位量の把握が可能であると考えられる。

## 6. 17 地震発生時の崩壊地発生予測の他の解析手法との比較

本研究では、干渉 SAR 画像の 2.5 次元解析を用いた地震発生時の崩壊地発生予測の新たな手法を考案し試行した。そこで、本手法の優位性を確認するため、従来の地震発生時の崩壊地発生予測の解析手法の予測精度を確認し比較した。比較したのは、第 1 章の 1. 1. 3 でも説明した、図 6.17.1、図 6.17.2、図 6.17.3 に示す 3 手法である。

### (1) 震度分布による対象地域設定

「被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検」や「土砂災害警戒情報暫定基準」<sup>1)</sup>の対象地域として設定する、地震に伴い土砂災害発生の危険性が懸念される地域は、従来から、震度分布を根拠として、一般に震度 5 強以上の地域を対象としてきた。2008 年岩手・宮城内陸地震の際においても、「被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検」は、「地震に伴い今後の降雨等により土砂災害発生の危険性が懸念されることから 2 次災害防止等に役立てること」を目的として、国と県により図 6.17.1 に示す震度 5 強以上の市町村を対象に実施された。

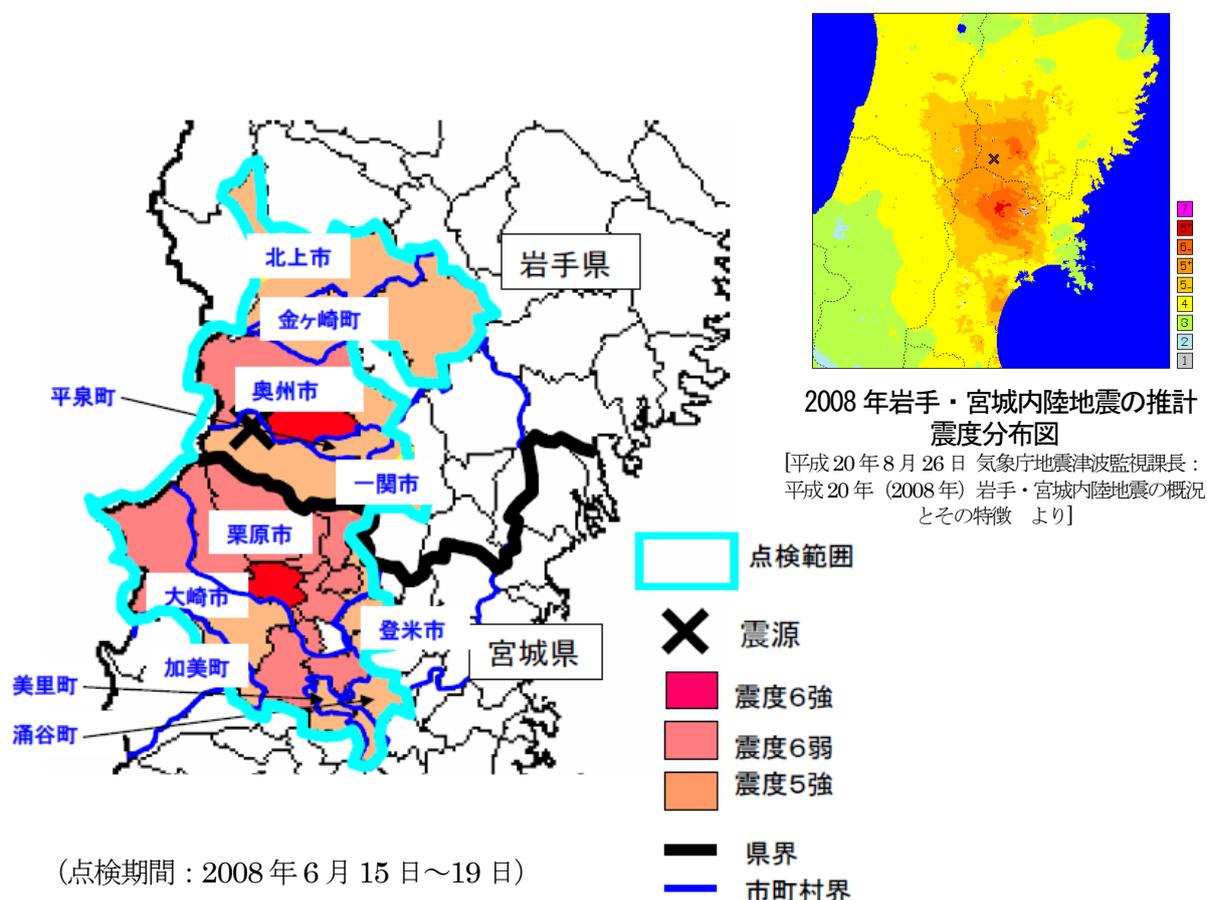


図 6.17.1 2008 年岩手・宮城内陸地震の土砂災害危険箇所等の緊急点検の実施対象エリア<sup>12)</sup>

Fig. 6.17.1 Area where emergency inspections were done at sediment disaster risk locations etc. after the 2008 Iwate – Miyagi Inland Earthquake

出典：国土交通省河川局砂防部、土砂災害危険箇所点検緊急支援チームの活動結果（報告）「平成 20 年岩手・宮城内陸地震による被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検結果について」, 記者発表資料、平成 20 年 6 月 20 日  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/river03\\_hh\\_000054.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000054.html)

(2) 加速度分布による崩壊地発生予測手法

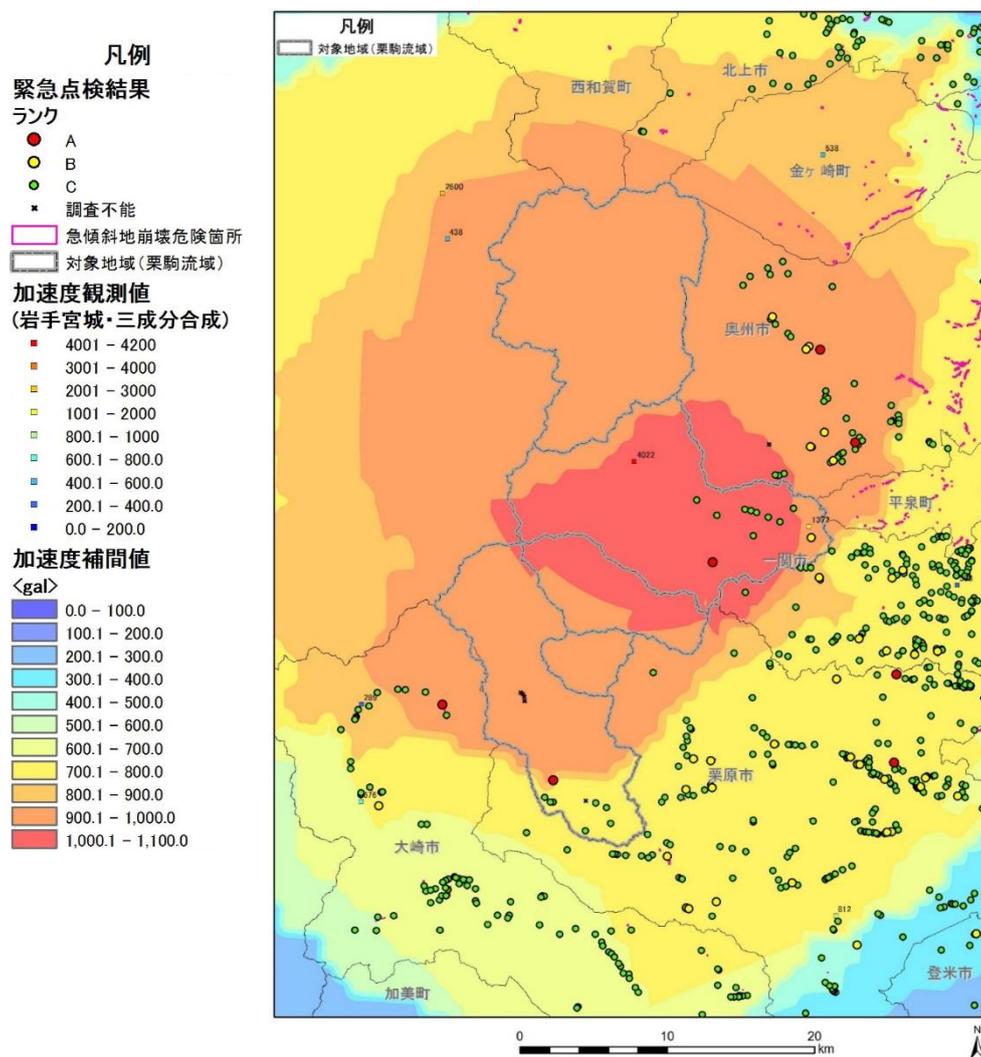


図 6.17.2 加速度分布と緊急点検結果 (2008 年岩手・宮城内陸地震) <sup>13)</sup>

※観測値をクリギング法により補間

Fig. 6.17.2 Acceleration distribution and emergency inspection results (the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake) (\* Observed values interpolated by the Kriging method)

出典：地震時斜面崩壊危険度評価に関するデータ整理・分析業務報告書、平成25年3月、国土技術政策総合研究所 P5-43

### (3) 判別式による崩壊地発生予測方法（国土技術政策総合研究所の予測計算方法）

「地震による斜面崩壊危険度評価判別式」<sup>14)</sup>

$$F=0.075I-8.92C+0.006A-3.228 \quad \dots \text{(式 1)}$$

ここに、F：判別得点、I：勾配（°）、C：平均曲率、A：最大加速度（cm/s<sup>2</sup>）である。

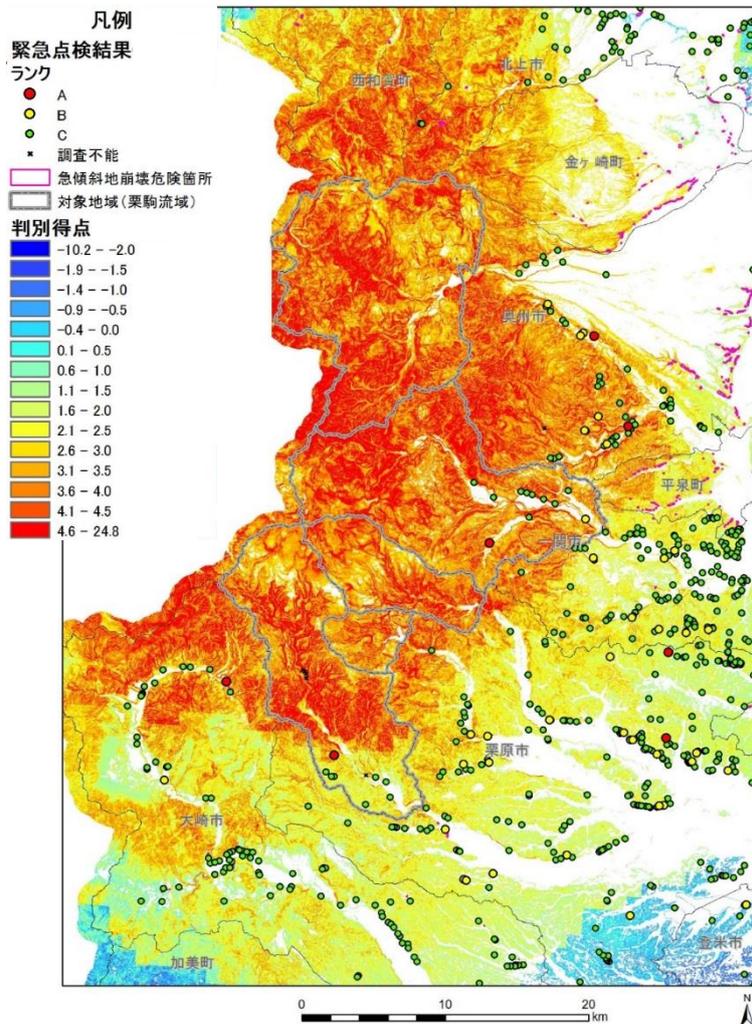


図 6.17.3 判別得点分布と緊急点検結果（2008年岩手・宮城内陸地震）<sup>13)</sup>

Fig. 6.17.3 Discriminant score distribution and emergency inspection results (the 2008 Iwate-Miyagi Inland Earthquake)

出典：地震時斜面崩壊危険度評価に関するデータ整理・分析業務報告書、平成25年3月、国土技術政策総合研究所 P5-40

### (4) 考察

震度5強以上のエリアを対象とすることや、図 6.17.2、図 6.17.3 に示す従来からの方法に比べても、今回実施した方法は、山腹斜面の地震発生時の崩壊地発生予測手法として、よりの確に発生エリアの予測が可能と考えられる。同様に、「土砂災害警戒情報暫定基準」等の対象エリアを決める崩壊危険度評価においても、今回実施した方法は、よりの確にエリアを示すことが可能であると考えられる。

## 6. 18 本章のまとめ

本章では、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次元解析の新たな手法を研究し、従来よりも精度良く地震の地表面変位量図を再現する手法を確立した。そして同時に、地表面変位量と崩壊地分布の関係を明らかにした。またこの研究成果は、今後の大規模地震時の崩壊発生予測手法としても有効である。

本章で得られた成果を以下に列挙する。

- ・ 2.5次元解析の衛星視線方向の変位量図作成において、従来、東西照射方向各1枚の計2枚の差分干渉画像を用いて作成していた。本研究では、干渉性が良好な多数枚（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、衛星視線方向の変位量図を作成した。なお、より正確と考えるBC法の結果を優先し、BC法の未アンラップ領域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。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を0.3とした。
- ・ 従来の2.5次元解析では、南北方向の移動量を0として計算していたが、より正確に地表面変位を再現するため、電子基準点の地震時移動データを利用して、水平方向の平均的移動方向を求め、東西方向、南北方向、垂直方向の3方向による、より精度の高い地表面変位量を再現した。
- ・ 電子基準点の地震時移動データを利用して干渉SAR測定値の変位量を補正し、より精度の高い地表面変位量を再現した。
- ・ 本研究で作成した地震の地表面変位量図は、移動方向が異なる2つの移動領域に対応して、地表面変位量を再現することが可能である。
- ・ 本研究で作成した「地震の垂直方向地表面変位量図で上方への変位量大きい領域」と、気象庁が作成した「地震断層のすべり量分布」を重ねて比較したところ、適合性が良いことが確認できた。
- ・ 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、作成した地震の地表面変位量図の信頼性を評価したところ、平面的にも断面的にも適合性が良いことが確認できた。
- ・ 衛星視線方向の変位量図の断面図における、コヒーレンス値と「変位量の連続性」から、コヒーレンス値の信頼性が確保できる閾値として0.7を新たに設定した。このコヒーレンス値0.7以下の低コヒーレンス領域内に、崩壊地の約85%が分布していたことから、干渉性が良い画像において、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予測できると考えられる。
- ・ 上方移動エリアを断層の上盤側、下方移動エリアを下盤側と推測すると、崩壊は断層の上盤側で多く発生していた。ただし、急な斜面（35°～40°）では崩壊地面積率が下方移動エリアのほうが大きくなっており、急な斜面の場合は、上盤に位置することよりも他の要因の影響が大きくなると

考えられる。

- 水平方向において「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。このことから、水平方向の「移動方向が反転する位置の線」が判れば、崩壊地のより多い領域が予測できると考えられる。
- 岩手・宮城内陸地震は、発生した崩壊地の数が多い地震であったが、水平方向の「移動方向が反転する位置の線」は、断層面の延長線とも考えられ、この線が入り組んでいるほど、断層の力が複雑にかかることで地盤がゆがみ、崩壊地が多くなる可能性があるとも考えられる。
- 地震発生時の崩壊地発生予測手法を比較すると、「震度分布」や「加速度分布」に比べて、本研究の新たな 2.5 次元解析で作成した「地表面変位量」を用いると、地震発生時の崩壊地発生エリアの予測精度が良いと考えられる。

ただし、今回はまだ 2008 年岩手・宮城内陸地震のみで実施した成果であり、今後、この手法を他の地震において適用し、成果を確認する必要がある。

#### 【引用文献】

- 1) 国土交通省砂防部砂防計画課地震・火山砂防室、国土交通省国土技術政策総合研究所砂防研究室、気象庁予報部業務課 (2013) : 土砂災害警戒情報における地震等発生後の暫定基準の設定と見直しについて、平成 25 年 5 月 15 日事務連絡
- 2) 気象庁地震津波監視課長 (2008) : 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震の概況とその特徴、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)
- 3) Goldstein, R.M., H. A. Zebker and C.L. Werner (1988): Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping, *Radio Science*, 23, 4, 713-720.
- 4) 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
- 5) 飛田幹男、島田政信、藤原みどり、雨貝知美、和田弘人・藤原智、松坂茂 (2006) : InSAR の干渉条件、東京大学地震研究所研究集会「新世代の干渉 SAR」、2006 年 10 月、URL:[http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/HIGHLIGHT/KYODO/ERI\\_2006-W-02/H18\\_8\\_tobita.pdf](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/HIGHLIGHT/KYODO/ERI_2006-W-02/H18_8_tobita.pdf)
- 6) 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.
- 7) 気象庁 : 震源データ、<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html>
- 8) 気象庁地震津波監視課、気象庁地震予知情報課 (2008) : (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>
- 9) 国土技術政策総合研究所 (2009) : 平成 20 年度岩手・宮城内陸地震で発生した斜面崩壊の数値データ作成および空中写真撮影業務報告書、平成 21 年 3 月
- 10) 国土交通省国土政策局国土情報課 (2011) : 国土数値情報 標高・傾斜度 5 次メッシュデータ、

<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-d.html>

- 11) M Ohzono, S Miura, T Inuma, K Tachibana, K Takatsuka, K Miyao, T Sato, and N Umino Y Ohta, (2008), "Coseismic fault model of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake deduced by a dense GPS network," Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University.
- 12) 国土交通省河川局砂防部 (2008) : 土砂災害危険箇所点検緊急支援チームの活動結果 (報告) 「平成 20 年岩手・宮城内陸地震による被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検結果について」, 記者発表資料、平成 20 年 6 月 20 日、[http://www.mlit.go.jp/report/press/river03\\_hh\\_000054.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000054.html)
- 13) 国土技術政策総合研究所 (2013) : 地震時斜面崩壊危険度評価に関するデータ整理・分析業務報告書、平成 25 年 3 月、P5-40、P5-43
- 14) 国土技術政策総合研究所 (2013) : 2011 年東日本大震災に対する国土技術政策総合研究所の取り組み—緊急対応及び復旧・復興への技術支援に関する活動記録—、国総研研究報告 第 52 号、P97、<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/rpn/rpn0052.htm>

## 第7章 結論及び展望

### 7.1 本研究の結論

本研究は、「大規模河道閉塞箇所」、「斜面の微小変位箇所」、「地震による崩壊多発領域」といった、土砂災害緊急対応時に国や都道府県の職員が状況把握すべき現地情報について、人工衛星 SAR 画像を用いて、より早期又は正確に現地状況把握できる手法を明確化することを目的に、「人工衛星 SAR 画像を用いた土砂災害緊急対応時の現地状況把握手法の研究」を実施したものである。土砂災害の緊急対応時には、従来から都道府県や国により、有視界飛行のヘリコプターを使った目視調査が実施されてきたが、悪天候時、夜間、広域災害、海外災害、斜面の微小変位については、これまで目視調査では十分な状況把握が困難であった。しかし、これまで目視による現地状況把握が困難であった、悪天候時、夜間、広域災害、海外災害、斜面の微小な変位といった条件においても SAR 画像を用いることにより、現地状況把握が可能である。そして災害時の観測に利用できる SAR 衛星が既に運用されている。そこで本論文では、「人工衛星 SAR 画像を用いた土砂災害緊急対応時の現地状況把握手法」として、大きく分けて「衛星画像判読による崩壊地・天然ダムの抽出手法」と「Lバンド差分干渉画像を用いた手法」の2つの手法について研究を行い、その成果を取りまとめた。このうち、「衛星画像判読による崩壊地・天然ダムの抽出手法」については、豪雨や地震により大規模な河道閉塞が発生、又は発生する恐れがある場合に、衛星 SAR 画像を用いて主に「大規模河道閉塞箇所」の発生状況把握を行うもので、災害時に実際に運用するため、その観測限界や手法の特徴を明らかにしつつ手法を明確化した。「Lバンド差分干渉画像を用いた手法」については、崩壊の予兆的な「斜面の微小変位箇所」の把握を実運用するために必要な研究を行うとともに、2.5次元解析の精度を向上させる新たな手法を提案して「地震による崩壊多発領域」の予測に必要な「地震による地表面変位」と「発生する崩壊地の分布」の関係を把握した。

以下に、本研究で得られた結論をまとめる。

#### (1) 第1章 序論

本研究では、土砂災害緊急対応時に国や都道府県の職員が状況把握すべき現地情報のうち、主に次の「大規模河道閉塞箇所」、「斜面の微小変位箇所」、「地震による崩壊多発領域」の3つの対象について、人工衛星 SAR 画像を用いることでより早期又は正確に現地状況把握できる手法を提案した。「大規模河道閉塞箇所」については、河道閉塞が湛水した後の河道閉塞箇所の決壊等による二次災害の発生を防止する目的で、形成の有無と規模を把握する。大規模河道閉塞（概ね閉塞ダム高 20m 以上、かつ被害想定概ね 10 戸以上）の緊急調査<sup>1)</sup>は、土砂災害防止法の規定で国の役割となっている。「斜面の微小変位箇所」は、崩壊の予兆となりえる微小変位が斜面に現れた箇所で、「豪雨から数日の間に発生する深層崩壊災害」や「次期の崩壊災害」につながる可能性がある箇所である。従来から「土砂災害危険箇所等の現地踏査による緊急点検」を実施して確認している。「地震による崩壊多発領域」については、地震の災害対応として、この領域を対象に「土砂災害危険箇所等の現地踏査による緊急点検<sup>2)</sup>」や「土砂災害警戒情報における地震等発生後の暫定基準の設定<sup>3)</sup>」を行うことを提案する。

#### (2) 第2章 単偏波 SAR 画像を用いた河道閉塞箇所の緊急判読調査手法

第2章では、「単偏波高分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所の判読調査手法」について記述した。高分解能 SAR 画像の判読による「大規模河道閉塞箇所」の探索は、判読を行う技術者により、見落と

し、過抽出等が生じて、得られる結果が大きく異なることが危惧される。そこで、本研究では、2011年台風12号紀伊半島大水害で河道閉塞が多発したエリアを検討対象にして、異なる撮影条件の単偏波高分解能 SAR 画像を用いて、河道閉塞箇所の視認性評価を行った。その視認性評価の結果を踏まえて、河道閉塞の探索時に入手が必要な単偏波 SAR 緊急観測画像の基本仕様を明確化した。明確化した項目は、必要な分解能、適する入射角、観測幅、照射方向、バンド等である。そして、判読者の違いにより結果に大きな差が生じないようにする目的で、単偏波 SAR 画像判読を用いた河道閉塞探索の際の重要な着眼点を、標準的な判読基準として明確化して、判読チェックリストを作成した。さらに河道閉塞探索時の効率的な SAR 画像判読のため、留意事項として、グランドレンジ画像を用いた判読、判読時の SAR 画像の正立配置、判読時のエリア優先順序、スタック画像の利用について明確化した。これらの研究成果を取りまとめて、災害時のマニュアルとして活用できるように、国土技術政策総合研究所資料<sup>4)</sup>として公表した

### (3) 第3章 多偏波 SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞箇所の緊急判読調査手法

第3章では、「多偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法」について記述した。前章で検討した、単偏波 SAR 画像は、モノクロ画像のため視認性が低く、崩壊地の判読見逃しが課題であった。そこで本章では、前章と同様に「大規模河道閉塞箇所」の探索のため、2011年台風12号の河道閉塞が多発したエリアを検討対象にして、地表面の状況に応じて反射強度が異なるため視認性がより良い多偏波 SAR 画像3種類を用いて、視認性を評価した。この視認性評価の結果から、「多偏波 SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞の緊急判読調査手法」に用いる画像として、8m より高い分解能の2偏波 HH+HV 単純合成画像 (R : HH, G : HV, B : HH) を選定した。この画像は、裸地の判読視認性向上により、河道閉塞のみならず単偏波では判読困難であった土石流痕跡や表層崩壊や伐採跡地等が判別できる可能性がある。また、崩壊地や河道閉塞箇所をより早く正確に判読する事ができる。また、少ない2つの偏波数で画像化できる。そして、この2偏波 HH+HV 単純合成画像の判読による河道閉塞探索の際の重要な着眼点を、標準的な判読基準として明確化して、判読チェックリストを作成した。単偏波と同様に、これらの研究成果を取りまとめて、災害時のマニュアルとして活用できるように、国土技術政策総合研究所資料<sup>5)</sup>として公表した。

### (4) 第4章 衛星 SAR 画像判読の海外の天然ダム災害への適用事例

第4章では、海外で発生した天然ダムの形成・決壊災害の緊急対応事例について示した。インドネシア共和国アンボン島で2013年7月に発生した大規模な天然ダムの決壊災害の際には、国土交通省国土技術政策総合研究所の担当者として筆者が、天然ダムの形成・決壊を高分解能衛星 SAR 画像で緊急に観測し、これらの SAR 画像と「衛星光学画像から作成した DEM」及び「天然ダム湛水域の深淺測量結果」のみを用いて早急に決壊状況を推定した。そして日本国政府からインドネシア政府へいち早く情報を提供した。このケースは、海外の土砂災害緊急対応時の日本政府の技術支援として高分解能 SAR 画像判読を用いた事例である。

### (5) 第5章 衛星差分干渉 SAR による発災前の初期微移動地すべりの探索

DInSAR 実施のためにLバンドの ALOS PALSAR 画像を用いても、山間部においては、良好な干渉性を持つ画像の割合は高くない。また、DInSAR で抽出した変位画像箇所が不正解であったり、逆に、滑動中の地すべり箇所が DInSAR 画像に現れないことも多い。現在、JAXA が L バンドの ALOS-

2を継続的に運用しており、今後も国土地理院はDInSARで作成された全国の地盤変位の状況（地すべり性変位を含む）を、継続的に公表<sup>6)</sup>する予定である。そこで今後、DInSAR画像からの抽出結果が土砂災害の減災に役立つ可能性がある。しかしこの状況においても、「Lバンド衛星DInSARによる微小変位箇所抽出手法」について、その正答率、抽出特性、変位有無の現地確認方法等は明確化されていなかった。このため、本研究では、紀伊半島と長野県周辺域を対象に、ALOS PALSARの「LバンドDInSARによる微小変位箇所抽出手法」を実施し、DInSARから抽出した「地すべり移動候補箇所」について、正答率、不正解となりやすい箇所、見逃ししやすい条件、「変位が有るかどうかを現地で確認する方法」について、明確化を試みた。明らかにしたDInSARの特徴は、地形条件として「平地に囲まれた単独峰」や「河川屈曲部に隣接する斜面」は誤抽出となりやすいこと、積雪があると干渉性が悪くなること、マスター画像とスレーブ画像の撮影日間隔が長い（500日以上）と干渉性が悪い場合があること、について事例やデータを基に図示した。また、ALOS PALSARのDInSARで抽出された「地すべり移動候補箇所」のうち、保全対象が重要な箇所について、地すべり移動の有無を確認する一連のGPS測量手順を試行して、西暦887年の海溝型地震時に大規模崩壊（約3.5億 $m^3$ ）<sup>7)</sup>を起こしたとされる長野県稲子岳で大規模な山体移動が有ることを初めて確認した。これらを基にDInSAR画像から抽出された「地すべり移動候補箇所」から、移動の有無を現地計測により確認する優先度の判定方法を提案した。

#### (6) 第6章 干渉SARの2.5次元解析で抽出した地震の地表面変位と崩壊分布の関係

第6章は、2008年岩手・宮城内陸地震を対象事例としてALOS PALSARデータを用いて、Lバンド差分干渉画像の2.5次元解析の新たな手法で、従来よりも誤差の少ない「地震の地表面変位量図」を再現するとともに、「地震の地表面変位量」と「地震の崩壊多発領域」の関係を示した。ここではまず、衛星視線方向の変位量図を作成において、①「コヒーレンス値0.3の閾値で、Branch Cut法（精度が高い）とMinimum Cost Flow法（連続性能が高い）の2種類のアンラッピング処理方法を組み合わせて作成」、②「従来は東西照射方向各1枚の計2枚の差分干渉画像を用いて作成していたものを、Branch Cut法の未アンラップ領域面積を信頼性の指標として『多数枚の差分干渉画像』を用いて作成」により、空白が無く、かつ、より誤差の少ない図を作成した。次いで、地表面変位量図の作成において、③「電子基準点の地震時移動データを利用して、東西、南北、垂直方向の3方向による地表面変位量を再現」、④「電子基準点を利用して変位量を補正」、⑤「移動方向が異なる移動領域を持つ地震にも対応」によって、誤差を低減した。これらにより、本研究では、震源地分布との適合性が良く、従来方法に比べて電子基準点データとの誤差が少ない、「地震の地表面変位量図」を作成した。また、コヒーレンス値の信頼性が確保できる閾値0.7を新たに設定して、崩壊地分布との関係として、「コヒーレンス値0.7以下の干渉性が低い領域に崩壊地が多い」特徴が判明した。さらに、地表面変位量と崩壊地分布の関係として「地表面の上方移動領域（上盤）に崩壊地が多い」及び「水平移動方向が反転する位置の線から近いと崩壊地が多い」ことを新たに明らかにした。加えて、「水平移動方向が反転する位置の線」が入り組んでいるほど、断層の力が複雑にかかることで、崩壊地が多くなる可能性について考察した。そしてこの新たな手法は、大規模地震時の崩壊多発領域の予測手法としても有効であり、この「地震による崩壊多発領域」を震災対応の対象エリアを特定する基準に利用することを提案する。

## 7. 2 今後の展望と課題

### 7. 2. 1 SAR 画像を用いた大規模崩壊及び河道閉塞箇所の緊急判読調査手法についての課題

#### (1) 南海トラフの海溝型地震等の広域災害への対応

現在、国が対応している河道閉塞の探索は、主に台風等の風水害により発生した河道閉塞を想定しており、地震計で概ねの大規模崩壊発生範囲を絞込み、そこを対象として撮影した SAR 画像で判読抽出することとしている。このためこの場合には、SAR 画像判読の範囲も、数十 km<sup>2</sup> 程度が想定され、衛星 SAR 画像 1 枚で収まる範囲である。しかし、2011 年 3 月には東日本大震災が発生し、現在、切迫する南海トラフ地震の発生に備えた対策が重要となっている。このような非常に広域で巨大な地震災害が発生した場合においても、稲子岳で過去の海溝型地震で発生したように、大規模な河道閉塞が発生する危険性が高いため、河道閉塞の形成の有無を早期に把握する必要がある。2011 年 3 月に東日本大震災が発生した際には、ALOS 等の衛星光学画像（晴天時画像）を用いて、震度 5 強以上のエリアを対象に大規模河道閉塞が発生したかどうかの確認を行った<sup>8)</sup>。しかし、ALOS の光学画像の分解能は、表 7.2.1 のとおりで高くなく、崩壊地や河道閉塞を広域なエリアにおいて見逃し無く判読す

表 7.2.1 衛星画像の分解能

Table 7.2.1 Resolution of satellite image

画像名	ALOS-2 高分解能	ALOS AVNIR-2 画像	・ALOS パンシャープン画像 ・ALOS ステレオセット（ペア）画像
種類	Lバンド SAR 画像	光学画像	光学画像
センサ名称	PALSAR-2	・ALOS AVNIR-2	・ALOS AVNIR-2 ・ALOS PRISM 直下視 ・ALOS PRISM 前方視（又は後方視）
地上分解能	3m	10m	2.5m

表 7.2.2 SAR 衛星の仕様<sup>5)</sup>

Table 7.2.2 Specification of SAR satellites

SAR 衛星名	ALOS-2	COSMO-SkyMed	RADARSAT-2	TerraSAR-X
打ち上げ年	2014 年 5 月	1 号機 2007 年 6 月 2 号機 2007 年 12 月 3 号機 2008 年 10 月 4 号機 2010 年 11 月	2007 年 12 月	2007 年 6 月
開発国	日本	イタリア	カナダ	ドイツ
高度	628 km	620 km	798 km	514 km
傾斜角	97.9°	98.6°	98.6°	97.4°
回帰日数	14 日	16 日	24 日	11 日
周期	97.3 分	98 分	101 分	95 分
設計寿命	5 年（目標 7 年）	—	7 年	5.5 年
周波数	Lバンド (1.2GHz 帯)	Xバンド (9.6GHz)	Cバンド (5.3GHz)	Xバンド (9.65 GHz)

※ 2015 年現在

出典：水野正樹、神山嬢子、江川真史、佐藤匠、蒲原潤一（2014）：2 偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法（案）、国土技術政策総合研究所資料、第 791 号、巻末資料 1.1、一部加筆

るのは難しかった。今後、災害時の使用を想定している L バンド SAR の ALOS-2 画像の分解能は、ALOS パンシャープン画像より高分解能とは言えない。光学画像の崩壊地判読では、石礫が判別できる 1m より高い分解能が有効であるとしたが、衛星 SAR 画像では、そこまで高分解能で広域撮影が可能な SAR 衛星は、現在運用されていない。今後、実際に南海トラフの巨大地震が発生した場合には、東日本大震災の災害対応の際の ALOS 光学画像による崩壊地判読と同様に、今回、対象とした単偏波 SAR、2 偏波 SAR の単独画像では、見逃しが多く発生する恐れがある。さらに、南海トラフ地震は、東西に長く、南北方向の軌道となる観測衛星でエリア全域を撮影するのは、東日本大震災の南北方向に長い被災エリアと比べて、時間を要する。そこで、複数の SAR 衛星を使い分けて撮像する必要がある。なお、現在、SAR 画像判読による河道閉塞探索に使用できる人工衛星は、表 7.2.2 に示すとおりである。また、序章でも述べたが、航空機 SAR による運用が開始できると有効である。

## 7. 2. 2 衛星差分干渉 SAR による発災前の初期微移動地すべりの探索について

### (1) 抽出した「発災前の初期微移動地すべり箇所」の崩壊・流下危険度評価手法の確立

本研究の結果、5. 3 で述べたとおり、長野県稲子岳の山体が地すべりの的に常時、微小に移動していることが、判明した。この場合、深層崩壊による被災を減らすためには、深層崩壊が発生するかどうかの斜面安定性や崩壊危険度の評価、及び、崩壊土砂が流下する範囲の予測が必要である。しかし、この稲子岳のように、深層崩壊の恐れがある斜面の地震時の動的安定性と移動土塊の挙動を解析して、深層崩壊の発生の可能性や、崩壊後の流下氾濫範囲を予測する方法は、まだ確立していない。そこで、抽出した「斜面の微小変位箇所」の崩壊・流下危険度評価手法の確立に向け、今後への研究の進展が望まれる。

### (2) 「発災前の初期微移動地すべり箇所」を活用した土砂災害警戒区域等への指定

現在、大規模な深層崩壊を想定した、土砂災害特別警戒区域や土砂災害警戒区域のエリア指定の方法は、明確化されていない。今後、ALOS-2 データを使った DInSAR により抽出し、変位を現地確認した地表面変位箇所に対して、崩壊危険度を判定し、被害が想定されるエリアを設定して、土砂災害特別警戒区域や土砂災害警戒区域に指定することができると、被災の防止に役立つ警戒避難が促進され有効性が有る<sup>9)</sup>。(表 7.2.3) 2014 年の土砂災害防止法改正以前は、風水害で土砂災害警戒情報が出されても、市町村から避難勧告等が発令されないことが多かった<sup>10)</sup>。改正後は土砂災害警戒情報と避難勧告等の発令が関連付けられ、避難を促す情報の効果が高まっていると考えられる。今後、DInSAR により抽出し変位を現地確認した「発災前の初期微移動地すべり」の想定被害エリアに対して、必要ならば土砂災害特別警戒区域や土砂災害警戒区域に指定できるようにするため、崩壊危険度の判定方法、被害が想定されるエリアの設定方法を明確化する必要がある。

表 7.2.3 土砂災害警戒区域等の指定の有無別平均避難率<sup>9)</sup>

Table 7.2.3 Average evacuation ratio calculated for areas with and without designation of sediment-related disaster (special) warning area

対象世帯数	平均避難率 (%)	
	指定無	指定有
全体	45	49
50 世帯以下	63	91
51 世帯以上	10	3

## 7. 2. 3 衛星干渉 SAR の 2.5 次元解析から抽出した地震の地表面変位量と崩壊分布の関係について

### (1) 大規模地震時の崩壊多発領域の予測手法としての活用

本研究では、気象庁の電子基準点の地震前後の計測データを用いて、地震の水平方向の動きを算定した。本手法を、大規模地震時の崩壊多発領域の予測手法として災害対応時に活用する場合は、より短い時間で算出する必要があることから、電子基準点データの代わりに、気象庁が発表している CMT 解 (図 7.2.1) 又は初動発震機構解の移動方向を利用すると手間が少なく、より短時間で算定できると考えられる。

また今回は、2008 年岩手・宮城内陸地震のみで実施した成果であり、今後、この手法を他の地震において適用し、成果を確認する必要がある。

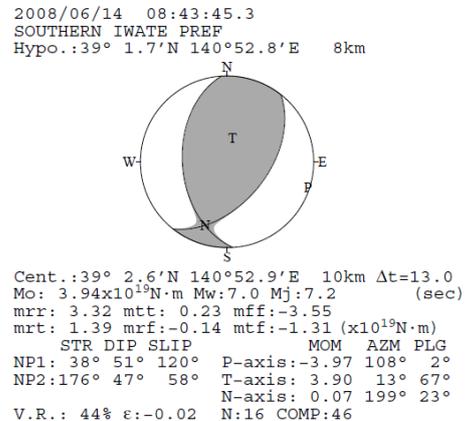


図 7.2.1 CMT 解 (2008 年岩手・宮城内陸地震) <sup>1)</sup>

Fig. 7.2.1 Centroid Moment Tensor (the 2008 Iwate - Miyagi Inland Earthquake)

### 【引用文献】

- 1) 国土交通省ホームページ：土砂災害防止法の一部改正に基づく「緊急調査」及び「土砂災害緊急情報」の概要、<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/linksinpou.htm>
- 2) 国土交通省河川局砂防部 (2008)：土砂災害危険箇所点検緊急支援チームの活動結果 (報告)「平成 20 年岩手・宮城内陸地震による被災地域の土砂災害危険箇所等の緊急点検結果について」, 記者発表資料、平成 20 年 6 月 20 日、[http://www.mlit.go.jp/report/press/river03\\_hh\\_000054.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000054.html)
- 3) 国土交通省砂防部砂防計画課地震・火山砂防室、国土交通省国土技術政策総合研究所砂防研究室、気象庁予報部業務課 (2013)：土砂災害警戒情報における地震等発生後の暫定基準の設定と見直しについて、平成 25 年 5 月 15 日事務連絡
- 4) 水野正樹、神山嬢子、江川真史、佐藤匠、蒲原潤一、林真一郎 (2013)：単偏波の高分解能 SAR 画像による河道閉塞箇所判読調査手法 (案)、国土技術政策総合研究所資料、第 760 号
- 5) 水野正樹、神山嬢子、江川真史、佐藤匠、蒲原潤一 (2014)：2 偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法 (案)、国土技術政策総合研究所資料、第 791 号
- 6) 国土地理院測地部宇宙測地課 (2015)：だいち 2 号による日本全国地盤変動図の公表、第 1 回土砂ワーキンググループ会合、資料 6
- 7) 水山高久監修、森俊勇・坂口哲夫・井上公夫編著 (2012)：日本の天然ダムと対応策 改訂版、一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構、2012 年 9 月、p36、<http://www.sff.or.jp/content/uploads/full.pdf>
- 8) Masaki MIZUNO, Takumi SATO, Shin-ichiro HAYASHI, Masato NISHI, Shin'ya, KATSURA, Kazuo NAKAGAWA (2011)：Investigation of Landslides Caused by the 2011 Tohoku

Earthquake Using Optical Satellite Images, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol.4, No.2, pp.48-56

- 9) 水野正樹、富田陽子、桂真也、小山内信智、花田良太、安田武道 (2012) : 災害情報を用いた土砂災害時の住民の避難率の分析、砂防学会誌, Vol.65 No.3, pp.29-34
- 10) 権田 豊, 水野正樹, 大場勝一郎, 藤原一啓 (2015) : 2014年8月15日から17日にかけての大雨による石川県内の土砂災害、砂防学会誌, Vol.67, No.5, pp.55-62
- 11) 気象庁 (2008) : CMT SOLUTIONS FOR EARTHQUAKES IN 2008、気象庁ホームページ 地震月報(カタログ編)、<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/pdf/cmt2008.pdf>

## 謝 辞

本論文の5章、6章で用いたALOS/PALSARデータは、一部を除き宇宙航空研究開発機構(JAXA)の土砂ワーキンググループを通じて提供を受けました。ここで使用したALOS/PALSARデータの所有権は、経済産業省及び宇宙航空研究開発機構にあります。

図の作成にあたり、震源データは、気象庁震源カタログのデータを使用させて頂きました。地すべり地形のデータは、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図データベースの図を使用させて頂きました。和歌山県内の地すべり観測データは、和歌山県西牟婁振興局林務課から提供を受けました。長野県金山沢の地すべり調査資料は、北陸地方整備局松本砂防事務所から提供を受けました。測量データの一部は、国土技術政策総合研究所土砂災害研究部から提供を受けました。記して感謝いたします。また、画像処理には、株式会社パスコ 森田保成氏、寶楽裕氏の協力があり、感謝いたします。

研究への予算支援や応援をいただいた、北陸地域づくり協会大林厚次理事長に感謝申し上げます。

1年以上の長い期間、終始、御助言と応援、励ましをいただいた、新潟大学災害・復興科学研究所丸井英明特任教授に感謝申し上げます。

最後に、研究や講義等で大変ご多忙にもかかわらず、私のために多くの時間をいただき、激励と熱心な御指導、御助言をいただいた新潟大学農学部川邊洋教授には、深く感謝し御礼申し上げます。