

航空機・衛星による災害状況把握技術の発展

キーワード：災害状況把握
航空機SAR
正射写真図

測図技術開発室長補佐

浦部 ぼくろう

航空機・衛星による災害状況把握技術の発展

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震に伴う阪神淡路大震災は、6千人を超える死者とおびただしい建造物被害をもたらした。当時、インターネットや電子メールの利用者はごく限られており、携帯電話も普及しておらず、被災地住民や関係者にとっての情報収集の手段はテレビや新聞が主体であった。

航空機による状況把握技術は、アナログ空中写真からの図化、目視判読がほぼ唯一の手段であり、移動体へのGPS測位技術の適用も研究途上、電子基準点も未整備であった。被災地の救援・復興作業に資するための災害情報の提供も、写真製版による印刷図以外に手段がなかった。

それから10年を経た今日、災害状況把握に関する技術は、情報取得段階、処理加工段階、提供段階の全てで大きく進歩している。本稿では、この10年間に起こった主な自然災害に際し、国土地理院が実施した航空機等による状況把握の実績を要約すると共に、今後の災害対応に求められる技術的課題を考察する。

2. 阪神淡路大震災(1995年)における状況把握

戦後最大の自然災害となった阪神淡路大震災では、国土地理院の総力を挙げて、緊急測量と被害状況の調査が実施された。緊急写真撮影による被災地の写真測量、地形図の緊急修正・現況図等の作成が大規模に行われたのは、この災害が初めてである。

このときの航空機による状況把握手段はアナログ空中写真であり、測量・調査結果の提供は地方測量部窓口での空中写真の閲覧、写真判読により作成した災害現況図の刊行、2万5千分1地形図及び1万分1地形図の緊急修正図の刊行が主なものであった。

2.1 緊急空中写真撮影

1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震による被害の状況を把握するため、当時として可能な限りの緊急体制が敷かれた。17日当日に1/7,000及び1/20,000で5コース223枚の空中写真撮影を実施したのを始めとして、21日までに合計34コース1,097枚の撮影が行われている。いずれの写真も、撮影当日夜に空輸して徹夜で現像・焼き付けを行い、翌日朝には提供・閲覧の準備を整えるという、迅速な作業体制が取られた。

2.2 空中写真の提供

当時、ネットワークやデジタルメディアによる情報配信はまだ普及前であり、一般市民が手に入れられる災害情報は印刷図や写真に限られていた。

撮影後突貫作業で焼き付けられた空中写真は、直ちに関係機関に配布すると同時に、地方測量部での閲覧に供した。また、被災地域をカバーするカラーモザイク写真を、震災前と震災後双方の空中写真を用いて作成し、建設省(当時)を始めとする関係機関に提出した。これらは震災による被害の広がり把握するのに非常に有効だったことから、多くの

関心を集めた。

これらの成果の配布に当たっては、被災地域の輸送機関が著しく混乱していたため、職員が直接関係機関窓口に向いて手渡したと報告されている（長壁・他、1995）。

2.3 災害現況図及び地形図の提供

緊急撮影による空中写真を元に、災害現況図の作成と地形図の緊急修正が実施された。災害現況図は、空中写真の判読によって 1/10,000 及び 1/25,000 の縮尺で作成され、地震発生9日後の1月26日に関係機関に配布・一般公開された。上空から視認できない損壊建物が表示されていないなどの制約はあったが、被害が集中した地域の状況を広範囲にわたり極めて迅速に把握したのものとして、高い評価を受けた。

また、1万分1地形図及び2万5千分1地形図の緊急修正作業が実施され、写真測量・判読、現地調査結果などに基づいて、震災による被害区域を表示するための特別な図式を用いた地形図が刊行された（図-1）。図化はアナログ図化機で行われ、1万分1地形図の編集はスクライプによる作業であり、2万5千分1地形図の編集はラスター方式のデジタル編集で行われた。これらの地形図は、震災約3か月後の5月1日に刊行されている。



図-1 阪神淡路大震災における緊急修正版1万分の1地形図

2.4 衛星SARによる地殻変動の検出

兵庫県南部地震において、日本で初めて、人工衛星搭載の合成開口レーダ（SAR）による地殻変動検出の試みがなされた。地球資源衛星「ふよう1号」搭載のSARにより取得された、地震前(1992年9月9日)の画像と地震後(1995年2月6日)の画像を使用し、干渉処理により地震前後の地表形状変化の検出を試みた。この結果、神戸市須磨区から東灘区にかけて幅数km長さ20kmほどの帯状の地殻変動などが認められ、衛星SAR画像による地殻変動の把握が可能であることを実証した(村上・他、1995)。

3. 有珠山噴火(1999年)における状況把握

3.1 有珠山噴火における国土地理院の対応

1999年3月末から活発化した有珠山の火山活動における行政対応は、住民への的確な避難勧告により被害を最小限に抑えることに成功した貴重な事例であった。噴火活動は山麓の農地や国道を破壊し、さらに伊達紋別市などの市街地への被害拡大も懸念されたことから、国土地理院では現地対策本部を拠点にし、広範な手法による火山活動の監視と状況把握を実施した。

航空機による状況把握の関連では、空中写真を用いた標高の計測やデジタルステレオマッチングによる数値標高モデル(DEM)の作成、地図画像とDEMによる鳥瞰図の作成などが行われた。

3.2 GPS空中三角測量の適用

有珠山噴火対応では、通常の空中写真撮影の他、GPS空中三角測量技術を利用した地形計測が実施された。噴火直後の現地は、噴煙や噴石が頻繁に上がるなど危険な状態が続き、写真測量のための地上基準点を必要数設置することができなかった。このため、航空機に取り付けたGPSアンテナによる受信データと電子基準点の観測データから得られる解析結果を空中三角測量調整計算に直接利用する、整数値バイアス同時決定法(CPAS法)と呼ばれる手法を用いたGPS空中三角測量を実施した。

4月26日撮影の空中写真による空中三角測量のために当初に設置できた地上基準点は、作業規程に定める個数の半分以下であったが、GPS空中三角測量技術を用いたことにより作業規程の精度を十分満足する結果が得られた。この成果を元に、ステレオ図化機により有珠山周辺の標高計測を実施し、噴火前の実測値との較差を求めて「有珠山西山周辺の高さの変化」として公表した。これにより、金比羅山付近の顕著な隆起が明らかになり、噴火活動を予測した防災体制の整備に寄与することができた。図-2に、GPS空中三角測量を利用した写真測量による標高変化図を示す。

3.3 地図・写真成果のインターネット公開

有珠山の災害においては、急速に普及の進んだインターネットを活用した情報提供が大きな役割を果たした。阪神淡路大震災においても、パソコン通信による電子基準点データの提供などは行われたが、写真や地図などの画像データが一般の利用のためにインターネットで公開されるようになったのはこの頃からである。これらの情報はただちに関係機関でも利用され、以降の災害対応において、インターネットは通常の交通機関や輸送機能が混乱する現地において有用な資料を迅速に提供するための強力な手段となった。



図-2 有珠山西山周辺の標高変化計測図

4. 三宅島噴火(2000年)における状況把握

4.1 三宅島噴火の概要

2000年6月に活発化した伊豆諸島群発地震に続く三宅島噴火は、その後4年半にわたり全島民が避難を余儀なくされる大規模な災害となった。この火山活動では、山腹噴火と溶岩流の流出が主体であった過去の噴火と異なり、山頂噴火に伴う山頂部の陥没とカルデラの形成を経てSO₂の大量排出が起これ、現在も完全な沈静化には至っていない。山頂部の陥没・カルデラ形成と噴火活動の関係に関してそれまで詳しい調査事例がなかったため、陥没の進行状況を定量的に計測することにより防災・噴火予知に役立てる試みがなされた(長谷川・他、2004)。

4.2 航空機SAR及び航空レーザ測定の導入

この調査では、通常の中空写真からのステレオ計測による陥没量算出のほか、国土地理院が災害状況把握のために運用している航空機搭載合成開口レーダ(航空機SAR)による地形計測、さらに実用化されて間もない航空レーザ測量技術による詳細な地形計測も実施されている。

SARは、マイクロ波を能動的に照射して対象物の形状などを面的に計測するリモートセンシング技術で、標高計測精度は数m程度と低いものの、マイクロ波が雲や噴煙を透過するため、雲・噴煙下や夜間でも地表の状況を把握することができる。特に航空機に搭載

したSARによる観測は、多方向観測が可能であることや、高頻度撮影が可能なこと、また高度など撮影パラメータの設定が比較的自由であることから、火山観測に適した方法である。

航空レーザ測量は、航空機に搭載したレーザスキャナを用い、広範囲かつ高密度な標高測定を短時間に行える技術である。機上のレーザ発射装置と地上対象物との距離をレーザパルスの往復所要時間により高精度に計測することができ、反射パルスを解析することにより樹木の影響をある程度取り除くことができるなど、従来の写真測量技術の弱点を補完する特長を有している。一方、SARと異なり、噴煙や雲は光学カメラ同様に障害となる。広範囲に多数の測点を配置した標高データ取得は、兵庫県南部地震において写真測量により実施した事例があり、地形と被害の関係を明らかにする重要な資料として高い評価を得た(星野・他, 1996)。この事例では、880点の計測におよそ25人日を要したが、最新のレーザスキャナは1秒間に10万点以上を計測できる。

国土地理院では三宅島の一連の火山活動に際し、2000年9月の爆発的な噴火直後から2003年9月にかけて航空機SAR、航空レーザ測量の双方による観測を実施した。その結果、噴火以降約3年間のカルデラ内の地形変化を明らかにすることに成功し、カルデラの外周と面積が時間とともに拡大していることが確認された。また、2001年2月と2003年9月の航空レーザ測量成果を比較することにより、火口壁が崩落して堆積物が火口底に堆積している様子が観測された(図-3)。

以上のように、新たな地形計測技術の導入により、火山活動による地形の変化を詳細に把握することが可能となった。こうした成果と火山学上の知見を組み合わせれば、噴火活動の予見や災害の予防に貢献できると期待される。

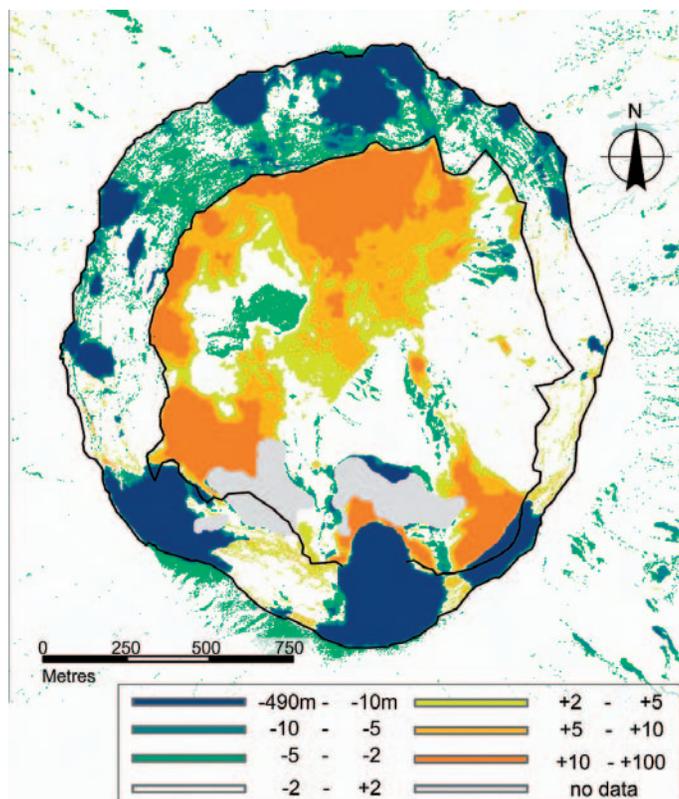


図-3 2001年3月から2003年9月までの三宅島カルデラ内の標高変化量

5. 浅間山噴火(2004年)における状況把握

5.1 浅間山噴火の概要

浅間山火山では、2004年9月1日に噴火が始まり、以降活発な活動が続いている。噴火により発生する災害を予測するためには火口周辺の状況を観察することが重要であるが、噴火開始以来浅間山の火口クレーター内は常時噴煙に覆われており、火口内の状況を光学カメラやレーザ機器によって観測することは困難を極めていた。

5.2 航空機SARによる観測

前述のとおり、SARは雲や噴煙を透過するマイクロ波を使用するため、雲・噴煙下や夜間でも地表の状況を把握することができる。2004年9月1日の噴火以降、国土地理院は航空機SARによる火口付近の観測を繰り返し行い、火口内部の地形の変化を調査した。

観測は、シャドウにより掩蔽され見えない部分の面積を可能な限り極小化するため、東西南北の4方向から実施し、反射強度を可視化した画像により地形判読を実施したほか、干渉SARの解析も実施して各観測時点の火口内のDEMを作成した。噴火の前には、国土交通省関東地方整備局利根川水系砂防事務所によりレーザ観測が実施されており、そのデータより作成したDEMと噴火後のSARによるDEMを比較して、火口内に現れた噴出物の体積を算出した。

5.3 溶岩噴出量の算定結果

図-4に、航空機SARにより測定された火口地形の時系列断面図を示す。

1回目(9月16日)の観測データでは、火口底に同心円状に噴出した溶岩が認められ、そのピークは火口外縁の最も低い所から約120m下のところまで達していた。DEMの差分を取ったところ、火口底に噴出した溶岩は約90万 m^3 であること、最厚部で噴火前に比べ約65m盛り上がっていることが確認できた。

2回目(10月22日)の観測では、火口底に噴出した溶岩の総量は約210万 m^3 に達し、溶岩の最厚部は約75m、溶岩のピークは火口外縁の最も低い所から約70m下のところまで達していた。

3回目(12月15日)の観測では、火口底の北東部に20m程度盛り上がった部分があるが、全体としては10~15m程度低くなっていた。

5.4 航空機SARによる火口地形観測の有用性

一連の浅間山観測の結果、噴煙のため通常の写真観測が不可能な火口底の地形について、航空機SARにより詳細に把握できることが実証された。また、比較的短期間に繰り返し観測を実施したことにより、火口底の地形変化を逐次把握することができ、危険の兆候を予見する可能性が示された。今回の噴火では、幸い大きな災害には至っていないが、今後も航空機SARによる観測を続けることにより火山活動の動静を見守っていくことが必要と考える。

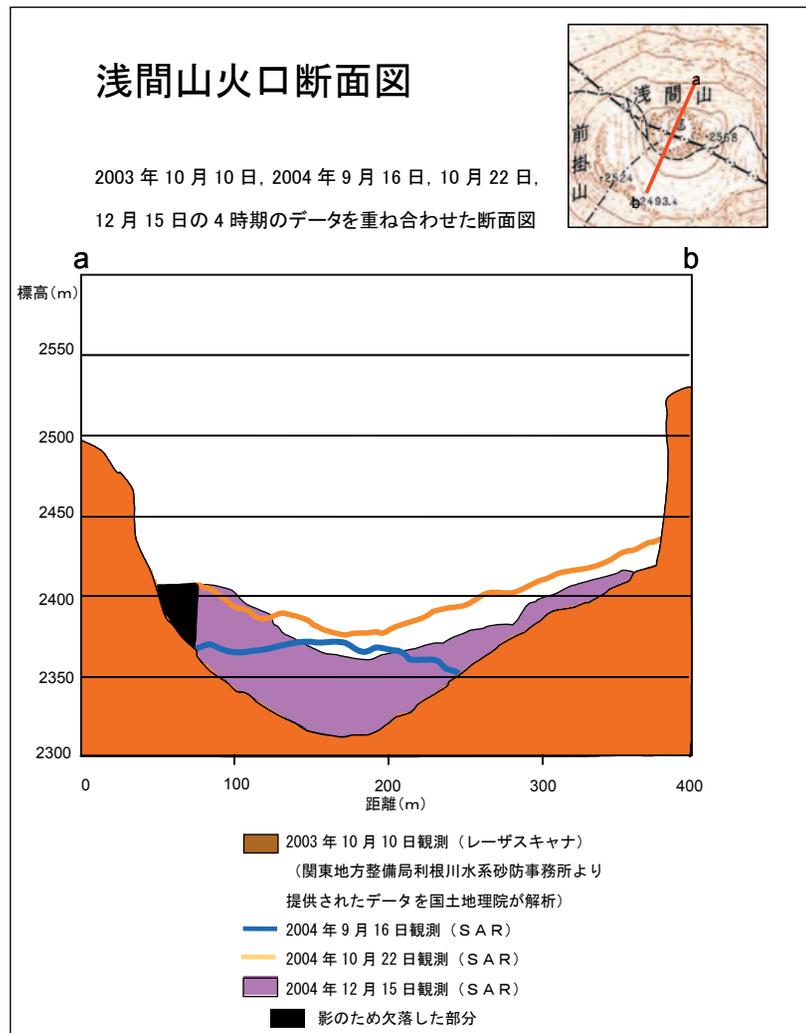


図-4 航空機SARにより観測された浅間山火口地形の時系列断面図

6. 新潟県中越地震(2004年)、福岡県西方沖地震(2005年)における状況把握

6.1 新潟県中越地震の概要と国土地理院の対応

平成16年10月23日、新潟県中越地方でM6.8の地震が発生し、川口町で震度7を観測するなど広い地域で強い揺れを観測した。その後も10月27日にM6.1の余震が発生するなど大きな余震活動が続いた。

この地震によって各地で建物の倒壊や土砂崩れが相次いで発生した。加えて、同年7月の「新潟豪雨」などで地盤が緩んでいたため被害が拡大し、震源に近い小千谷市、長岡市などをはじめ新潟県内で40人の死者を出した。また土砂崩れにより道路が寸断され、山古志村(現長岡市)が全地区孤立したのをはじめ、各地で集落が孤立した。

国土地理院は、本地震に際して対策本部を設置し、地殻変動の監視や現地調査を実施した他、地震発生翌朝から空中写真緊急撮影を実施し、デジタル化した写真データを速やかにホームページで公開した。さらに、正射写真図の作成、災害対策用地図作成等を特別体制で実施した。

6.2 正射写真図及び余色立体写真の作成

本地震の対応において、航空機による災害状況把握業務として、新しい技術であるデジタル写真測量機器による正射写真図及び余色立体写真の作成を行った。

その手順は、まず撮影したカラー空中写真をスキャナによりデジタル化する。その画像データをデジタル写真測量システムに取り込み、パスポイント等を観測し、相互標定・対地標定を行う。地上基準点は2万5千分1地形図データ上で座標計測して取得する。その上で、50m間隔DEM（国土地理院「数値地図50mメッシュ標高」）を適用して正射変換し、NTIS（新地形図情報システム）により地形図ベクトルデータと重ね合わせて正射写真図データを作成する。

こうして作成された正射写真図データは、地震発生6日後の10月29日に国土地理院ホームページに公開された。また、縮尺約1/6,500及び1/13,000でA1判光沢紙に印刷出力した正射写真図を、現地の災害対策関係部署や政府現地支援対策室などの各機関に配布した。さらに、要請に応じてCD-ROMによる画像データの提供も実施した。この正射写真図は現地復興関係機関から非常に高い評価を受け、多くの増刷要望があり、できる限りの対応を行った。

余色立体写真は、復旧工事担当者が現場の地形を直感的に把握することを想定して作成した。空中写真画像データを使用し、前述と同様の手法で対地標定したデータから、デジタル写真測量システムを用いて歪み修正したステレオペア画像を作成した。これを立体画像作成ソフトに取り込み、余色立体図作成機能によりデータを作成した。これをA2判のカラー印刷図にし、赤青余色立体メガネを添付の上、正射写真図と合わせて現地復興作業担当機関に提供した。

6.3 福岡県西方沖を震源とする地震における災害状況把握

2005年3月20日、福岡県西方沖を震源とするM7.0の地震が発生し、玄界島を始めとする沿岸域に液状化や斜面崩壊などの被害をもたらした。

本地震の対応においても、新潟県中越地震の対応と同様に、緊急撮影された空中写真と地形図データによる正射写真図を作成した。作成手法も同様に、デジタル化された空中写真と数値地図50mメッシュ標高を使用してデジタル写真測量システムにより正射変換し、NTISにより地形図データと重ね合わせて印刷する手法を採った。さらに、それまで機能が未整備でできなかった正射写真図の平面直角座標への投影が可能となり、正確な座標を付した出力図を提供することができた（図-5）。

本地震対応においては、正射写真図作成・提供体制整備が進んだことから、地震発生3日後に玄界島の正射写真図をホームページ公開し、その翌日には現地関係機関に印刷図を配布するなど、より迅速な対応が実現した。

7. まとめと今後の課題

10年前の阪神淡路大震災以降、航空機等を利用した災害状況把握技術及び情報提供の手法は飛躍的な発展を果した。それぞれの災害における特徴的な事項をまとめると表-1のようになる。これらの技術により、災害状況把握はより迅速に、より精密に、より安全

にできるようになり、より早く、使いやすい形態での情報提供が可能となった。

以上に述べたように、この 10 年間における技術の進歩はめざましく、災害時における状況把握の対応も非常に迅速になってきている。中でも、デジタル写真測量システムによる正射写真図作成とインターネットによる画像提供が災害対応の大きな柱となっている。

今後、さらに迅速な、多様な形態での情報提供を計る上で、以下のような技術の利用を検討する必要がある。



図一5 福岡県西方沖地震 正射写真図(玄界島)

表一1 主な災害において導入された状況把握技術と提供手法

発生年	災害	状況把握技術、情報提供手法
1995	阪神淡路大震災	空中写真緊急撮影、目視判読による災害現況図作成、地形図の緊急修正、人工衛星 SAR による地殻変動検出、窓口での閲覧
1999	有珠山噴火	GPS 空中三角測量、画像のインターネット公開
2000	三宅島噴火	航空レーザ測量、航空機 SAR
2004	浅間山噴火	航空機 SAR による時系列観測
2004・5	新潟県中越地震 福岡県西方沖地震	デジタル写真測量による正射写真図の作成、デジタルメディアによる画像の提供

7.1 航空デジタルカメラ及びGPS/IMU(慣性計測装置)

国土地理院による空中写真撮影は現在フィルムカメラで実施しており、撮影後の現像、スキャニング処理などに時間を要している。さらに、正射写真図作成工程で使用する地上基準点は、災害時には既存の地図上で取得するほか無く、精度的コスト的に課題が大きい。

近年は航空カメラもデジタルカメラへの移行が進んでいる。アナログカメラと同等の光学特性を持ち、課題であったデータ取得範囲(1コースの撮影幅)に関してもフィルムにかなり近い機種が開発されている。また、GPS/IMUは、空中写真上の計測値を地上座標に関連づけるのに必要な撮影時のカメラの位置及び姿勢(外部標定要素)を、地上基準点に頼ることなく決定できる画期的な技術である。

これらの技術を導入することにより、例えば新潟県中越地震の正射写真図作成に要した約70枚の空中写真の場合、デジタルデータ化やデジタル写真測量システムでの処理工程に要した約4日間のうち2.5日間を短縮できると見込まれる。

7.2 高解像度衛星及びALOSデータの利用

近年、地上解像度1mクラスの高解像度衛星画像の普及が進んでいるが、国土地理院の災害対応においてはまだ活用の機会が少ない。これは、天候の影響を受けやすく、必要な地区の画像をすぐに入手できないことが多いことや、画像単価が高価であることなどの要因によると思われる。これらの課題の解決は簡単ではないが、より安価かつ緊急時にも迅速に入手できるようになれば、十分な利用価値が生まれると思われる。特に、今年度に打ち上げが予定されている陸域観測技術衛星(ALOS)の画像データは、地上基準点無しでの高い絶対位置精度の実現と低コストでの画像提供を予定しており、災害対応での利用が期待される。

《参考文献》

- 長壁正幸, 寺林敏之(1995) 阪神・淡路大震災に伴う緊急撮影及び地形図緊急修正等. 国土地理院時報, No.83,52-57.
- 村上 亮, 藤原 智, 斉藤 隆(1995) 干渉合成開口レーダーを使用した平成7年兵庫県南部地震による地殻変動の検出. 国土地理院時報, No.83,24-27.
- 星野 実, 水越博子, 海野芳聖, 村上広史, 山後公二(1996)野島地震断層周辺の地殻変動および被害・地形との関係. 国土地理院時報, No.86,20-36
- 浦部ぼくろう, 野口真弓, 小荒井 衛(2001) 整数値バイアス同時決定法GPS空中三角測量の精度検証. 写真測量とリモートセンシング, Vol.40-4,37-44.
- 鈴木 弘(2001)有珠山西山周辺の火山活動に伴う標高値の変化. 国土地理院時報, No.95,49-55.
- 長谷川裕之, 村上 亮, 政春尋志, 松尾 馨, 小荒井 衛(2001)三宅島山頂の陥没地形の計測. 国土地理院時報, No.95,121-127.
- 長谷川裕之, 佐藤 浩, 岩橋純子, 吉田幸子(2004)三宅島・陥没カルデラと雲仙普賢岳・水無川流域における地形変化について. 国土地理院時報, No.105,83-95.
- 大木章一, 村上 亮, 渡辺信之, 浦部ぼくろう, 宮脇正典(2005) 航空機搭載型合成開口レーダーによる浅間山火口内の観測. 火山, 投稿中
- 国土地理院(2005) 国土地理院の災害対応—2004年新潟県中越地震—. 国土地理院技術資料 A1-No.299