

4 複数の地球観測データを統合利用した広域被災状況判読システムの開発

Development of damaged areas interpretation system using various earth observation data

古田明広¹・白木渡²・大林成行³

Furuta Akihiro, Shiraki Wataru, and Obayashi Shigeyuki

抄録：本研究では観測方式や空間分解能、観測波長帯域、観測周期、観測刈幅の仕様が異なる複数の地球観測データを相互補完的に活用できる広域被災状況判読システムを開発した。異種地球観測データを統合利用する際に不可欠となるデータの幾何学的歪の補正方法を「光学方式」と「SAR方式」に分けて開発した。また、災害対応の局面を「定常時」、「災害発生時」、「復旧時」、「復興時」の4つに分類し、各タイミングにおける本システムの運用方針を明確にするとともに、「災害発生時」において広域被災状況判読を迅速かつ効率的に実施できるように、システムが搭載する各種機能を整理した。さらに、新潟県中越地震被災地を対象として本システムの試験稼働を実施し、広域被災状況調査へ複数の地球観測データを活用することの効果を示した。

Abstract: This research was development of damaged areas interpretation system that integrating and complements to various remote sensing data with different observation methods and specifications. It proposed the methods of correcting geometrical distortions for observation data by "the optical method" and "the SAR method", in the purpose of integrating with various remote sensing data. Moreover, to classify periods of the disaster for four phases "Normal", "Disaster occurs", "Restore" and "Reconstruction", and to distinguish operation policy of the this system at each phase efficiently, the administration and analysis functions were constructed. In addition, the Niigata-Chuuetu quake disaster area was selected as a subject area, and the effect of various remote sensing data in the damaged areas investigation were concretely shown.

キーワード：自然災害，被災状況判読，地球観測データ，時系列分析，オルソ補正，高分解能 SAR データ，データベース

Keywords：Natural Hazards, Damaged area interpretation, Earth observation data, Temporal analysis, Ortho rectification, High resolution SAR data, Database

1. はじめに

地震、台風、火山噴火、林野火災といった災害発生時には被災領域の位置やその規模を特定し、2次災害の防止、住民の避難誘導、災害復旧計画の立案などに資する情報の整備が不可欠となる。現状における被災状況調査は陸上でのパトロールや定点に設置されている各種検知センサによる変動モニタリングが主である。陸上調査やセンサによる被災情報収集では、微細な地盤の動きや施設の損壊状況を確認できるとともに、地表面のみならず地下やトンネル内の被災の有無についても詳細に把握できる利点がある。しかしながら、被災領域が広域におよぶ場合や交通ネットワークの寸断により被災地に立ち入ることが困難な場合には調査範囲が限定されてしまう。

被災範囲が不特定の場合、被災状況把握の広域性と迅速性、データの客観性を確保するために上空からの情報収集が効果的となる。航空機から撮影された空中写真は被災の種類やその規模および周辺環境へのイン

パクトを把握する際に欠かすことのできない情報として従来から広く利用されてきている。また、広域を繰り返し観測できる人工衛星を利用した宇宙からのリモートセンシングについても分光分解能、空間分解能ともに向上してきており、現在に至るまで被災領域の状況把握に関する検証事例が多数報告されている^{1) - 5)}。

一方で、光学式のカメラやセンサによる観測（撮影）は昼間の時間帯に限られるとともに、雲の影響が少ない天候時しか良好なデータが観測できない。災害は時間・場所・天候を問わずに発生するものである。また、火山噴火や林野火災など、噴煙や火災の煙が著しく地表面の状況が視認できない状況も想定できる。このような点から、光学式のリモートセンシングのみでは災害発生時の迅速なデータ収集に限界があることが指摘されている。

このような光学式リモートセンシングの欠点を補うものとして、合成開口レーダ（SAR：Synthetic Aperture Radar）の適用が期待されている⁶⁾。SARはアンテナからマイクロ波を送信して地表面からのエコーを観測するリモートセンシングシステムであり、天候・昼夜を問わ

1：正会員 工修 香川大学大学院工学研究科信頼性情報システム工学専攻

(〒762-0007 香川県坂出市室町 2-5-20, Tel : 0877-44-3111, E-mail : furuta@comet.ocn.ne.jp)

2：正会員 工博 香川大学工学部信頼性情報システム工学科

3：正会員 工博 株式会社国土情報技術研究所

ず広域観測が可能である。近年では航空機搭載型 SAR も複数運用を開始している^{7) -10)}。航空機搭載型 SAR は地球周回軌道を通る人工衛星搭載型 SAR と比較して飛行高度や方向、観測時刻に制約が少なくデータ収集の機動性に優れている特徴がある。

このように、現在、観測方式や観測周期、空間分解能、観測刈幅の仕様が異なる様々なリモートセンシングデータ（以下、地球観測データ）が被災状況調査に活用できるようになってきている。このような中、データ利用者は地球観測データの特徴を把握して、各地球観測データの利点を考慮した役割分担のもと相互補間的な活用方法を検討していくことが必要になる。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、災害発生時における被災状況把握の効率化を目的に、光学式のセンサやカメラで観測（撮影）されたリモートセンシングデータ（以下、光学式データ）と SAR 方式で観測されたリモートセンシングデータ（以下、SAR データ）を統合利用した広域被災状況判読システムの開発に着手した。本研究の目的は以下の4点になる。

- ①特徴の異なる複数の地球観測データを統合的に活用することの意義を明確にする。
- ②災害対応の局面と本システムの運用方針を明確にするとともに、広域被災状況判読システムの全体構成とデータの入出力関係を整理する。
- ③異種地球観測データの統合利用を進める際に不可欠となる地球観測データの幾何学的歪の補正方法を検討する。
- ④新潟県中越地震被災地を対象に本システムの試験稼働を実施し、異種地球観測データを活用することの効果を検証する。

3. 異種地球観測データの統合利用上の留意点

（1）地球観測システムのトレードオフ

人工衛星や航空機をプラットフォームとした地球観測システムには、上空から広域を均一の精度で繰り返し観測できるといった共通の特徴がある。しかしながら、観測（撮影）されるデータの仕様は個々の観測システムによって異なる場合が多い。このため、複数の地球観測データを同時に取り扱おうとする場合には、各地球観測システムで観測・収集されるデータの観測方式や観測頻度、空間分解能などの差異を調査・整理しておく必要がある。

a) 地球観測システムの空間分解能と周期性の関係

データ観測の広域性および周期性とデータの空間分解能の間にはトレードオフの関係が強い。空間分解能

の高いデータを観測できる地球観測システムになるほど、一度に観測できる領域が限定されてしまい、同一地点の観測頻度も低下する傾向にある。近年ではセンサにポインティング機能を搭載した地球観測システムが増加しているため、緊急観測のニーズに対しては柔軟に対応できるようになってきているが、継続的に同一地点を繰り返し観測する点においては限界がある。

一方で、広域観測が可能で同一地点の観測頻度も高い地球観測システムでは、空間分解能が低くなり、詳細な被災状況調査には不向きな面がある。

b) プラットフォームの種類とデータ観測時の特徴

プラットフォームの種類から地球観測システムを大別すると、データ観測の周期性（定期性）と機動性にトレードオフの関係が確認できる。すなわち、地球を周回する「人工衛星」を用いる場合はデータ観測の周期性（定期性）が利点となるものの、観測時刻に制約がある。一方で、機動的な観測が可能な「航空機」は観測時刻や観測対象へ柔軟に対応できるものの、データ観測の広域性、周期性の面では「人工衛星」に比べて一般的に劣る。

c) データ観測の柔軟性と画像判読の複雑性

地球観測システムの観測方式は、観測対象からの反射・放射エネルギーをセンシングする受動型の「光学方式」とマイクロ波を照射してその反射成分をセンシングする能動型の「SAR 方式」に大別できる。「光学方式」は太陽光の強弱や大気に影響を受けやすいが、可視化した画像は判読作業に適している。一方で、昼夜全天候で観測可能な「SAR 方式」の画像はレーダから照射されたマイクロ波の後方散乱強度の分布を示すものであり、画像判読には専門的な知識を必要とする場合も少なくない。

（2）異種地球観測データの統合利用の効果

単一の地球観測システムでは仕様が限定されてしまうが、複数の地球観測システムを併用することにより、各システムの利点・欠点を補い合うことが期待できる。被災状況判読において異種地球観測データを統合利用することの効果としては以下の点が挙げられる。

a) 災害発生前後の地球観測データの安定的な確保

被災状況の判読へ地球観測データを適用する場合、災害発生前後に観測された高分解能の地球観測データから変化箇所を抽出することが効果的となる。この際、災害発生前のデータの観測時期は災害発生時期に近く同じ季節のデータを利用すると都合が良い。しかしながら、単一の高分解能地球観測システムで都合よく災害発生前の良好なデータが観測されていることは稀である。この場合、仕様の類似した他の地球観測システムのデータで代替することが方策の一つとして考えられる。本研究の目的の一つもここにある。

b) 光学式データによる SAR データの判読支援

雲や噴煙を透過した観測が可能な SAR データには観測方式に起因する独特の幾何学的な歪が生じるため、画

像判読が困難な場合がある。また、マイクロ波の後方散乱強度と地表面被覆の関連性は解釈が難解な部分が多い。このため、SAR データを用いた被災状況判読を補助する情報として同一時期に観測された光学式データを併用することが効果的となる。

c) 幅広い観測波長帯域の利用

Terra/ASTER などの光学式地球観測システムでは短波長赤外域、熱赤外域のデータが観測されている。IKONOS や Quick bird などに代表される高分解能の光学式地球観測システムではこれらの波長帯域の観測機能は装備されていない。短波長赤外域では雲域と積雪域の分類が可能であり、熱赤外域では地表面温度情報が把握できる⁶⁾。これらの情報は斜面災害、火山災害の被災状況調査に利用できる情報である。各地球観測システム固有のスペクトル特性を考慮した複数地球観測データの統合利用を進めることで多面的な被災状況調査を実施できる。

d) 高さデータの抽出

SAR データでは、インターフェロメトリ処理により詳細な高さデータの抽出が可能である。また、光学式データでは、異なる2地点から同一領域を観測したデータを用いて、立体視の理論に基づき広域の高さデータを作成できる。地表面データと併せて高さデータを利用することにより、地表面被覆の変化と地形形状の変化を同時に評価・分析することができる。

(3) 異種地球観測データを利用していく際の画像処理・解析面における問題

通信技術やコンピュータの処理能力の向上に伴い、データ観測・収集に掛かる時間が短縮されてきており、

人工衛星や航空機から観測（撮影）された地球観測データは従来に比べて迅速にデータ利用者の手元へ届くようになってきた。

しかしながら、入手したデータから即座に有益な情報を抽出できるとは限らない。地球観測データはそれぞれフォーマットが異なるとともに、データの幾何学的な特徴や位置情報の精度も異なる。このため、異種地球観測データを統合利用する際には、座標変換や幾何学的歪の補正といった前処理が不可欠となる。特に、SAR データには観測方式に起因する独特の地形歪が内在しており、起伏の激しい地形ではその影響が顕著となる。被災状況判読に光学方式と SAR 方式のデータを併用する場合、両データ間において画像間マッチングを確保することが、重要な処理工程の一つとなる。

4. 広域被災状況判読システムの開発

(1) 災害対応の局面と本システムの利用

本研究では、図-1 に示すように災害対応の局面を「定常時」、「災害発生時（災害発生直後）」、「復旧時」、「復興時」の4つのタイミングに分類した後、各タイミングで本システムが担う役割とシステムの運用方針について検討している。以下、災害対応の各局面における本システムの運用方針とその意義を述べる。

a) 定常時の運用方針

災害発生時の被災状況判読で利用する災害発生前データの蓄積が主な役割となる。3章(2)で述べた通り、広域の被災状況を判読する際には、災害発生前の同一領域のデータを併用することが効果的となる。災害発生前

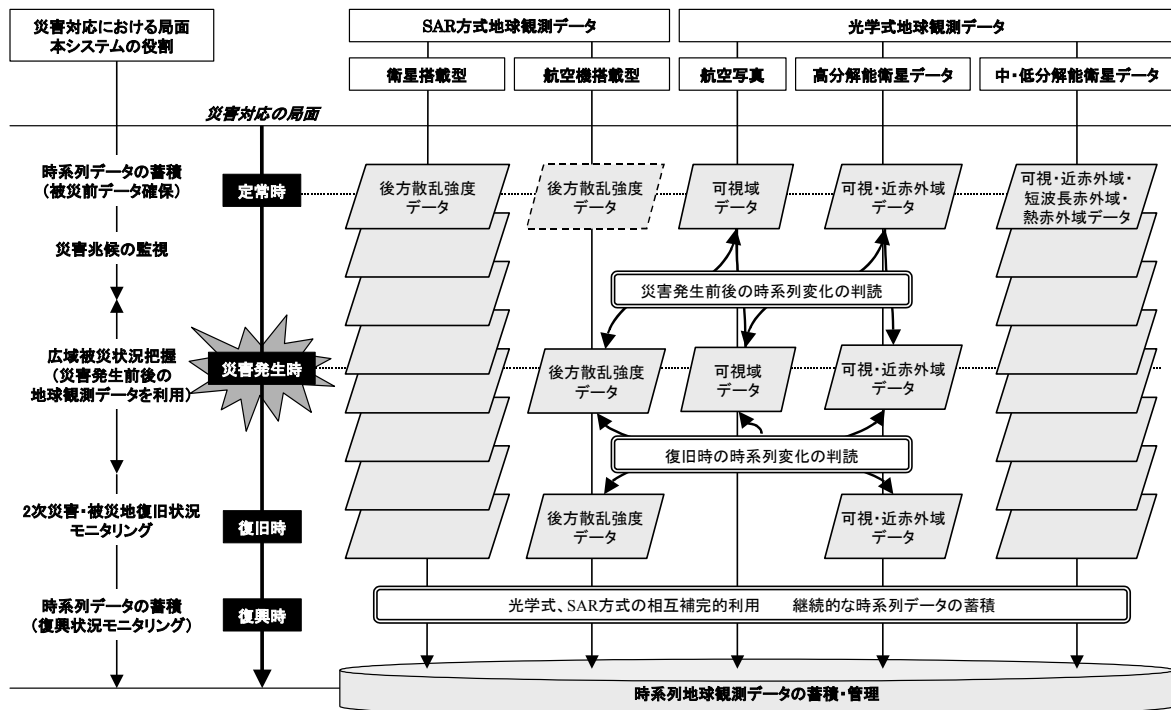


図-1 災害対応の局面と本システムの運用方針

後の地球観測データを用いて時系列分析を実施することにより、地表面被覆の変化箇所として被災領域を自動判読することも可能になる。また、災害発生前後の画像をディスプレイ装置上で並列して表示するだけでも災害発生後のデータのみを判読する場合と比べて被災領域判読が効率化できる。

なお、本システムでは実際に新潟県中越地震被災地を対象領域として、各種地球観測データの蓄積を実施した。蓄積するデータは後述する「データ前処理機能」によってオルソ補正処理を施している。

b) 災害発生時の運用方針

災害発生前と災害発生直後の地球観測データを利用して被災領域の分析・判読を実施する役割を担う。災害発生時の観測条件により、光学式地球観測システムのみを使用したのではデータが即座に観測・収集できない場合も想定できる。本システムでは昼夜全天候型の SAR データを併用できるように工夫している。

また、本システムでは、災害発生前後に観測・収集された航空写真や高分解能光学式地球観測データ、航空機搭載型高分解能 SAR データを統合して時系列分析を実施する機能を装備している。

なお、多くの航空機搭載型高分解能 SAR システムは運用を開始してからの時間が短いため、定常時のデータの蓄積は始まったばかりである。被災状況調査に高分解能 SAR データを効果的に活用していくためにも、定常時データの蓄積が今後の課題となる。

c) 復旧時の運用方針

2次災害の危険性の監視や周辺環境へのインパクトおよび復旧状況のモニタリングを目的に、災害発生後に一定間隔で観測・収集されたデータを用いて被災領域の時系列変化を分析・判読する役割を担う。単一の地球観測システムのみでは観測頻度に限界があるため、複数地球観測データの併用が前提となる。

d) 復興時の運用方針

被災領域の復旧・復興過程の変遷を把握することを目的に、広域の繰り返し観測に適している中・低分解能の光学式データや衛星搭載型 SAR データを主に利用して月別、季節別、年度別での時系列変化のモニタリングを実施する。地球観測データは被害の全体像を客観的に記録するのに効果的なデータのの一つである。データを蓄積することは災害履歴の蓄積といった面でも有効となる。

(2) 本システムで取り扱うデータの種類の種類

本システムで使用する主な地球観測データの種類を表-1に整理する。被災状況把握を目的とした場合、空間分解能は出来るだけ高いものを使用することが有効である。現在、光学式の衛星データは空間分解能が 1m 程度のデータが入手可能となっている。

SAR データについては、光学方式のデータとは空間分解能の意味合いが異なるものの、航空機搭載型 SAR システムにおいて、2点間の最大識別能力が最大で数 10cm のデータを観測できるまでになっている。SAR 方式の分解能はレンジ・アジマス方向ともに照射するマイクロ波の帯域やアンテナの仕様によって変化する。このため、同一の SAR システムであれば、理論的に飛行高度に関わらず人工衛星でも航空機でも同じ分解能を有するといった特徴がある。しかし実際には、マイクロ波の減衰やノイズの影響などによって、高度が低いほど地表面の識別能力は高くなる傾向にある。

(3) 本システムの特徴

本研究では、異種地球観測データを統合した被災状況判読の効果を高めるために、システムの運用方法やシステムで利用する地球観測データの補正処理方法、システムが具備すべき各種機能について検討している。以下に本システムの特徴を述べる。

a) 航空機搭載型高分解能 SAR データの利用

本システムでは、災害発生時の被災状況把握の迅速性

表-1 本システムで取り扱う地球観測データの種類の種類

観測方式	データ区分	空間分解能 (可視域)	観測刈幅	特徴
光学方式	航空写真	—	約 2,300m (撮影縮尺が 1/10,000 の場合)	<ul style="list-style-type: none"> ・スキャナーでデジタル化して利用する。(撮影縮尺 1/10,000 の場合 1200dpi でデジタル化すると空間分解能は約 20cm となる。) ・ラインスキャナやカメラなどによるデジタルデータの観測・収集も近年多数実施されるようになってきている。
	高分解能衛星データ	約 1~4m	約 10km	<ul style="list-style-type: none"> ・可視・近赤外域スペクトルデータを収集できる。 ・地表面被覆を詳細に判読できる。
	中分解能衛星データ	約 15~30m	約 60~180km	<ul style="list-style-type: none"> ・可視・近赤外域、短波長赤外域、熱赤外域のスペクトルデータを収集できる。 ・広域の繰り返し観測に適している。
	低分解能衛星データ	約 250m 以上	約 1,000km 以上	
SAR 方式	航空機搭載型 SAR データ	約 0.3~3m	約 0.5~10km	<ul style="list-style-type: none"> ・フルボラリメトリックデータの収集が進んでいる。 ・観測高度、マイクロ波の照射方向を柔軟に選定可能である。
	衛星搭載型 SAR データ	約 10~100m	約 50~500km	<ul style="list-style-type: none"> ・広域の繰り返し観測に適している。 ・観測時の衛星軌道は固定されているため、同一方向からの観測となる。

を確保するために、航空機搭載型の高分解能 SAR データを活用できる点に特徴がある。

SAR データには観測方式に起因する地形歪みが内在している。他の空間データと統合利用する場合には、この地形歪みの除去が必要となる。本システムでは、SAR データの簡易的なオルソ補正処理機能を開発・装備している。

b) 時系列分析と判読技術の併用

本システムは地球観測データの時系列分析による自動判読とオペレータの視覚による判読を併用できるようにデータ解析・表示機能に工夫を施している。

従来から広域の被災状況把握は災害発生後に観測された航空写真の判読が実施されてきた。航空写真の判読に際しては熟練した写真判読技術者が介在することもあって、精度的には十分に満足できる成果が得られる。しかしながら、判読作業には膨大な時間と労力を要するといった問題が無視できないものとなっている。被災状況の調査に関わるコスト、労力の低減、従来に比べてより迅速に被災状況を把握できるような調査手法の改善・改良が求められている。

このようなニーズに対して、本システムでは、地表被覆の特徴量抽出や時系列変化箇所抽出に関する既往の画像処理・解析手法に立脚した自動判読機能を併用することで、作業の短縮化、判読精度の均一化の改善を図っている。判読者はこの自動判読処理結果を参考に、被災箇所とその周辺環境への影響や2次災害の危険性の有無などを分析・評価できる。

また、本システムは地球観測データから抽出・推定した植生の活性度に関する情報や地表面温度に関する情報、高さ情報などを利用して多角的な被災状況調査を実施できる点も特徴の一つである。

c) 継続的な時系列データの蓄積・管理

本システムでは時系列データの蓄積・管理を効率化するために、システムで蓄積する全ての地球観測データを共通のメタデータを付与して管理する方法を採用している。これにより領域別、観測時期別で異種地球観測データを横断的に検索することができる。多くのデータは再利用されることなく膨大な既観測データ群に埋もれてしまうケースが多かったが、本システムは全ての地球観測データを資源として効果的に活用できる。

(4) 本システムの全体構成

本システムは図-2に示すような4つの機能を装備している。以下、各機能の役割と特徴について述べる。

a) データ前処理機能

光学方式、SAR方式で観測された複数の地球観測データを統合利用するために不可欠な作業となるデータの幾何学的歪みの補正を実施する機能である。光学式データとSARデータの簡易的なオルソ補正処理を実施する。補正処理における地形の倒れ込み歪はDEM (Digital Elevation Model) データを入力データとして低減する。

①光学式データの前処理：現在入手可能な光学方式データは航空写真を除いて殆どが位置情報を付与された形で提供される。しかしながら、付与されている位置情報は各地球観測データの仕様により異なり、前処理を施さず

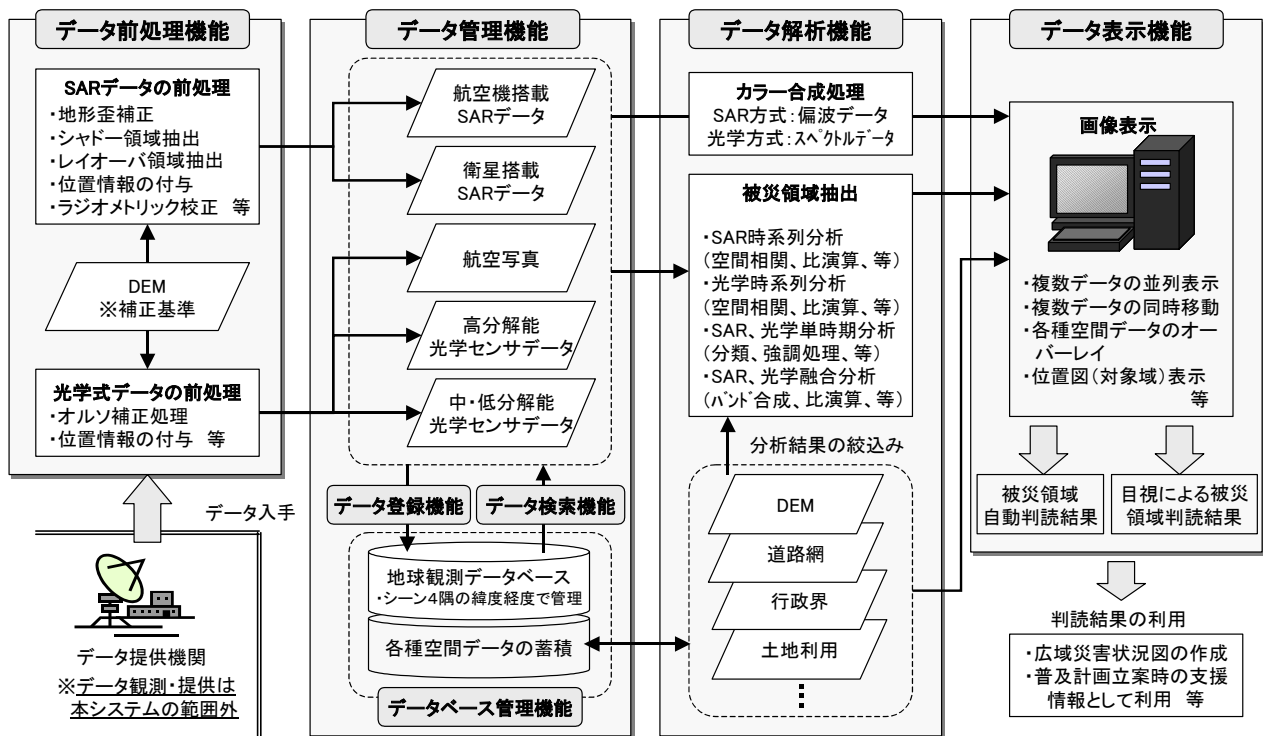


図-2 本システムの全体構成

に異種地球観測データ間で画像間マッチングが取れることは稀である。空間分解能が高い地球観測データほど地表面被覆の状況が詳細に判読できるため、データ間のズレや歪が目立つ傾向にある。

光学方式で観測されたデータは、プラットフォームの位置と観測対象点の標高の相対関係から地形の倒れ込み歪が発生する。この歪を低減するために、DEM データを入力データとしたオルソ補正処理を実施する。正確な位置情報を各データに付与するのであれば、位置情報が既知である地上の標定点を用いる必要がある。しかしながら全国で常に標定点が設置されているわけではなく、データ観測毎に測量作業を行うこともデータ整備の効率性からは困難な点が多い。本システムでは、同一領域の地球観測データを同一の DEM データを基準としてオルソ補正を実施することにより、異種データ間のマッチングを確保する方法を採用している。

② SAR データの前処理 : SAR データでは、斜め方向に照射したマイクロ波の後方散乱強度データを観測するため、標高や構造物の高さに伴う倒れ込み歪が光学方式に比べて顕著となる。この歪を除去しなければ他の地球観測データとの融合は困難である。本研究では SAR データに内在する地形歪を除去する簡易的なオルソ補正処理システムを開発した。SAR データのオルソ補正方法については 4 章 (5) において詳述する。

b) データ管理機能

本システムで取り扱う地球観測データと既存空間データを蓄積・管理する役割を担う。データ管理機能はサブ機能として「データ登録機能」と「データベース管理機能」、「データ検索機能」から構成されている。

本システムのデータベースは災害発生時に「定常時」の地球観測データを効率よく検索・抽出できるようにするために、データは地球観測システム毎に蓄積されている。また、データの観測領域は逐次変化するため、各地球観測データはシーン四隅の緯度経度情報によって管理している。これにより、災害発生時に対象領域の緯度経度が大よそ把握できていれば、データベースに蓄積されている同一領域の仕様の異なる地球観測データを横断的に検索することが可能となる。なお、蓄積する地球観測データは「データ前処理機能」において、幾何学的歪の補正を施したものとなる。事前に補正処理を施したデータを一元管理することで、被災状況判読時に余分な作業を低減できる。

c) データ解析機能

災害発生前後および災害発生後に一定間隔で観測されたデータを用いて時系列分析を実施する機能である。観測時期の異なる 2 つの地球観測データから地表面の変化箇所を抽出するために、本システムでは時系列分析機能を装備している。地球観測データの時系列分析に関しては従来から様々な手法が開発されてきている。

本システムでは、処理作業の簡易性、分析結果の客観性を確保するために、時系列分析方法として一般的に広く利用されている「空間相関」や「比演算」などの手法を採用している。

分析に仕様する時系列データは幾何学的な歪が事前に補正されているものの、影域の影響や観測波長帯域などが異なることから、時系列変化箇所を過剰に抽出してしまうケースが想定できる。このため、判読作業を効率化するために DEM や土地利用図などの既存の空間データにより時系列分析結果を絞り込めるように工夫している。

d) データ表示機能

「データ解析機能」での処理結果や各地球観測データのカラー合成画像を表示する機能である。道路網や建物分布、土地利用に関する空間データを画像に対して階層的に付与できる機能を装備している。表示される災害発生前後のカラー合成画像や時系列分析結果はデータに付与されている位置情報をもとに、全データが常に同一領域を示すスクロール機能も装備している。また、移動や拡大・縮小、バンド間合成も可能である。判読者はデータ表示機能を参照して、被災領域を判読・評価していくことになる。

なお、4 章 (3) で詳述したとおり、本システムは時系列分析結果のみを用いて被災箇所を自動的に抽出するものではなく、災害発生前後のカラー合成画像を比較するなど、判読者による被災状況調査も併用できる特徴がある。

(5) SAR データのオルソ補正処理方法

高分解能 SAR データと異種地球観測データ、既存の空間データを統合利用していくためには、データ間の位置情報が合致していなければならない。また、観測方向の異なる SAR データを統合利用しようとする場合にも、両データ間に生じる幾何学的な歪を補正することが必要となる。そこで本研究では、高分解能 SAR データの簡易オルソ補正方法を開発した。

a) オルソ補正処理の流れ

本研究で開発した高分解能 SAR データのオルソ補正処理の流れを図-3 に示す。以下、図の流れに従い処理工程の詳細を述べる。

①観測時のパラメータの入力 : グランドレンジに投影されている SAR データに画像中心の緯度・経度、グランドレンジ距離のパラメータを入力するとともに、観測時におけるプラットフォームの軌道の位置と向きを計算する。また、オルソ補正処理に利用する DEM データにも位置情報を付与する。この際、SAR データと DEM データは正射図法 (Orthographic 法) へ投影する。

②位置情報のオフセット : SAR データの観測時のパラメータに含まれる位置情報は、レーダのオフナディア角やスラントレンジ距離から間接的に計算されたものであるため、誤差が含まれていることが多い。このため、DEM

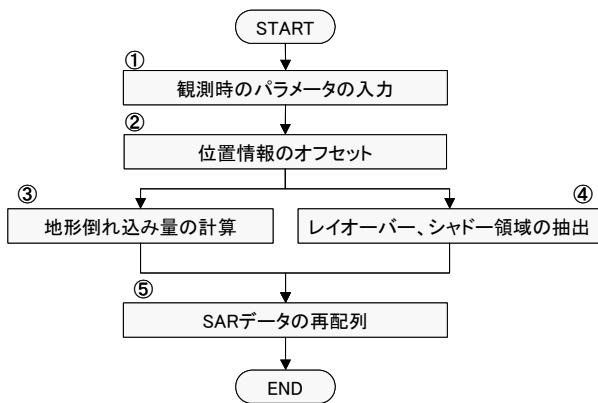


図-3 SARデータの簡易オルソ補正の流れ

の位置情報を基準として SAR データの位置情報をオフセット補正する。

③地形倒れ込み量の計算：SAR データの各点では、実際の平面位置からプラットフォーム方向へ標高に依存する倒れ込みを生じる。図-4 にプラットフォームと観測対象点のレンジ方向における幾何学的関係を示す¹¹⁾。観測対象点の高さ (h_i) が既知である場合、飛行高度 (h_0) とグランドレンジ距離 (y_i) から、観測対象点の地形倒れ込み量 (dy_i) が式-1 で計算できる。

$$dy_i = y_i - \{r(h_i)^2 - h_0^2\}^{1/2} \quad \text{式-1}$$

$$r(h_i) = \{(h_0 - h_i)^2 + y_i^2\}^{1/2}$$

④レイオーバー、シャドー領域の抽出：注目している観測対象点 (A 点) の標高が高く地形の倒れ込み量が大きいため、プラットフォームに近い側の任意の点 (B 点) の倒れ込み量より大きくなり、A' 点が B 点よりプラットフォームに近い側に現れる現象 (レイオーバー) が SAR 観測では発生する。レイオーバーが発生している領域は地表面被覆の後方散乱特性が判読できないため、欠損領域として判読対象範囲より除外する。また、図-4 の (ds_i) で示す領域のように、観測対象点によってマイクロ波が遮断されてしまい、後方にマイクロ波が到達しない領域 (シャドー) が発生する。シャドー量 (ds_i) は式-2 で計算できる。

$$ds_i = h_i * \tan(\theta(h_i)) \quad \text{式-2}$$

$$\theta(h_i) = \text{atan}(y_i / (h_0 - h_i))$$

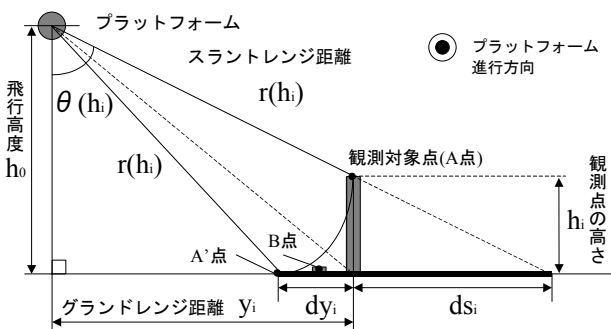


図-4 プラットフォームと観測対象点の幾何学的関係

シャドー領域もレイオーバー領域と同様に地表面被覆の後方散乱特性が判読できない領域であるため、欠損領域として抽出する。

⑤SAR データの再配列：図-5 に示すように、地形倒れ込み量 (dy_i) をパラメータとして SAR データの各点を再配列して SAR データをオルソ補正する。なお本処理では、フォアショートニングに伴う各点の単位面積辺りにおける散乱体の密度の差異についての補正は含めない。

b) 高分解能 SAR データのオルソ補正処理の効果

図-6 に簡易オルソ補正処理前後の SAR データを示す。プラットフォーム方向への地形歪みが補正されている様子が分かる。

オルソ補正処理後の高分解能 SAR データに数値地図 (位置精度は縮尺 1/25,000 地形図相当) の空間データを付与した結果、道路網の配置がほぼ合致した。この結果から、オルソ補正処理によって地形の倒れ込みがある程度除去できており、異種地球観測データや既存空間データとの統合利用が可能となることが確認できた。しかしながら、起伏の激しい領域 (図-6 黒枠部等) ではオルソ補正を施しても画像が引き伸ばされているのみであり、

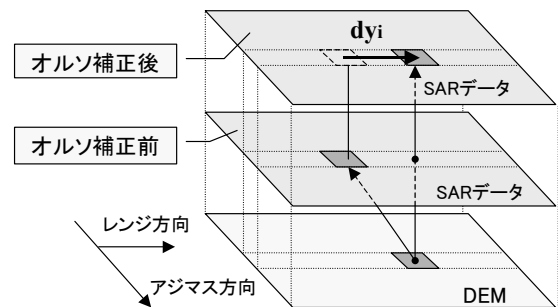
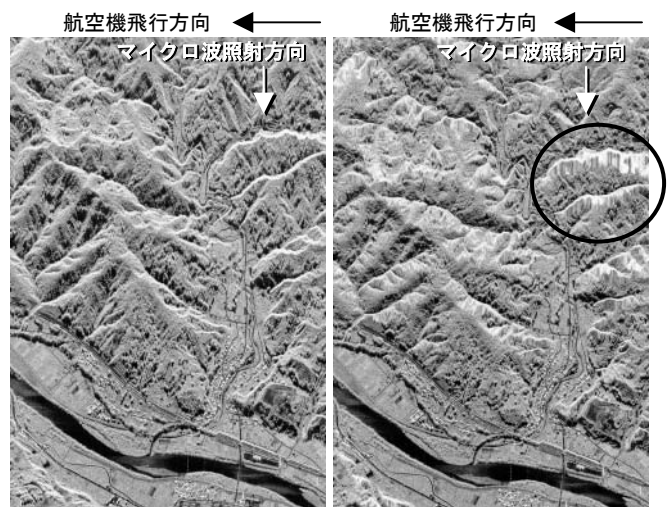


図-5 SARデータの再配列の概念



4 補正前 補正後 (対象: 航空機搭載型 Pi-SAR 偏波データ)

図-6 簡易オルソ補正処理前後の SAR データ

地表面状況の判読は困難であった。地形歪みの影響が著しい山間部では、レイオーバーやシャドールの影響により地表面状況を判読できる範囲が限られてくるため、災害状況調査では観測方向や高度が異なる複数の観測データを併用する必要がある。

5. 本システムの試験稼働

2004年10月23日に発生した地震とそれ以降の余震により大規模斜面崩壊、ライフライン寸断、道路・鉄道寸断、建物倒壊などが広範囲で発生した新潟県中越地方を対象として、本システムの試験稼働を実施した。

(1) 試験稼働で使用した地球観測データ

本試験稼働において広域被災状況判読に使用した地球観測データの緒元を表-2に示す。災害発生前のデータとしては航空写真をスキャニングした数値データを使用した。災害発生後は IKONOS データと航空機 Pi-SAR X バンドデータを使用した。Pi-SAR データの観測日は両日共に雨天であったが高分解能のフルポリリメトリックデータとして観測・収集されている。

DEM データについては現在入手可能な分解能の異なる複数のデータを対象にデータ前処理への適用性を事前検討した。分解能ができるだけ高いこと、国内各所で汎用的に利用できることの2点を考慮して、本システムでは 10m メッシュ標高データを利用した。

(2) 被災領域判読事例

図-7に主な被災領域判読事例を示す。以下、各被災領域の判読状況について整理する。

a) 液状化被災領域

信濃川右岸側に位置する水田地帯（圃場内）の液状化被災領域である。IKONOS カラー合成画像（①-1）

では、液状化の被災領域が周辺より輝度の高い斑状として判読できる。また、Pi-SAR 偏波カラー合成画像（①-2）では、輝度値の低い黒色系の領域として判読できる。SAR 方式では水面のような滑らかな面においてマイクロ波が鏡面反射するため、後方散乱強度は低くなる。液状化に伴い地表面の含水量が上昇したため、被災領域が後方散乱強度の低い領域として現れたものと推察できる。

液状化被災領域の後方散乱強度が低くなることに着目し、単時期の Pi-SAR 偏波データに教師無し分類処理を適用して、被害領域を抽出した（①-3）。災害発生後の単時期の SAR データのみでも、液状化被災領域はある程度、自動的な抽出が可能であることが分かった。

b) 湛水被災領域

旧山古志村東竹沢地区（現：長岡市古志東竹沢）に位置する芋河流域の湛水被災領域である。芋河左岸、右岸の大規模な崩壊に伴い河道閉塞が発生している。2004年10月26日と11月4日に観測された時系列の Pi-SAR 偏波カラー合成画像（②-1,2）では、輝度値の低い黒色系の領域として湛水被災領域が判読でき、2時間期間で湛水領域が広がっている様子が判読できる。

②-3は2時期の Pi-SAR 時系列データを利用して「空間相関」の手法により変化箇所を抽出した結果である。湛水被災領域が自動判読できている様子が確認できる。

c) 斜面崩壊被災領域

小千谷市と長岡市の字界に位置する、信濃川、朝日川、野辺川の合流地点である。信濃川に沿って設置されている国道 291 号線では、大規模な斜面崩壊が発生した領域である（③-2,3の赤枠 A）。また、信濃川、野辺川合流部には河道閉塞により湛水被害が発生している（③-2,3の赤枠 B）。

赤枠 A のような大規模の斜面崩壊領域であれば、高分解能 SAR データ単独でも被災領域として判読できる。しかしながら、赤枠 B のような小規模の斜面崩壊領域の場合、高分解能 SAR データ単独では判読に限界がある。

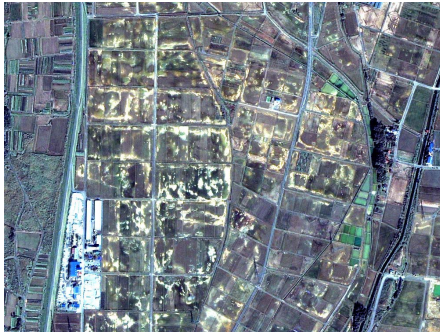
d) 道路損壊被災領域

関越自動車道の盛土崩壊被害が発生した領域である。マイクロ波の照射方向が異なる2種類の Pi-SAR 偏波カラー合成画像（②-2,3）では、道路中央に後方散乱強度の高い線が判読できる。②-2では道路の両側においても後方散乱強度の高い線が判読でき、その線が途中で切れている様子が確認できる。IKONOS カラー合成画像（②-1）から②-2,3で後方散乱強度の強い線は中央分離体と側壁であると判読できる。②-3は北東から南西方向（道路と平行）にマイクロ波が照射されているため側壁からの後方散乱が低いが、②-2は北から南方向に照射されているため側壁での後方散乱が高く、側壁の倒壊箇所では後方散乱が低くなり被災領域として判読できたものと推察できる。観測方向の違いが被災領域観測状況に影響を及ぼした顕著な事例である。

表-2 試験稼働で使用した地球観測データの緒元

	データ	観測日	特徴	データ販売・提供
災害発生前データ	航空写真	1999/6/10 2000/8/1 2001/5/14	・スキャニング処理により、デジタル化（分解能:1m相当）	国土地理院
災害発生後データ	IKONOS	2004/10/24	・パンシャープデータ（分解能:1m） ・波長:可視・近赤外域（4バンド）	日本スペースイメージング(株)
	Pi-SAR	2004/10/26 2004/11/4 (両日雨天)	・垂直、水平偏波（HH,HV,VV） ・マイクロ波:Xバンド（分解能:1.25m） ※オルソ補正の後、分解能 1m へ補間	(独)情報通信研究機構
オルソ補正	DEM	—	・10m Mesh 標高データ	北海道地図(株)

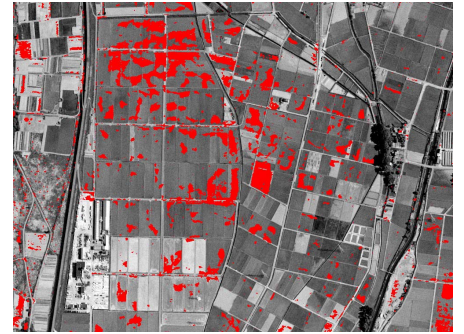
①液状化被災領域（対象領域：新潟県長岡市大川原町）



①-1 災害発生後の IKONOS 画像
観測日：2004/10/24

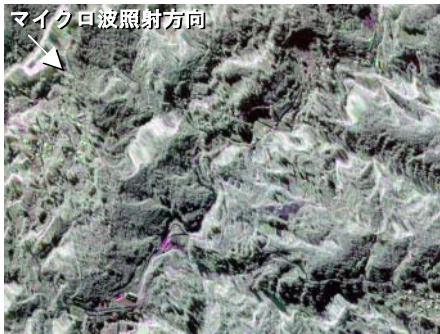


①-2 災害発生後の Pi-SAR 画像
観測日 2004/10/26



①-3 液状化被災領域抽出図
背景：災害前の航空写真（2001/5/14）
■ 液状化被災領域

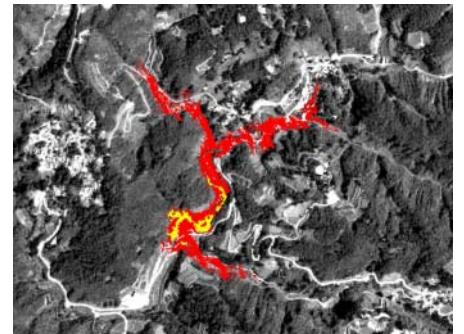
②湛水被災領域（対象領域：新潟県長岡市古志東竹沢-芋川）



②-1 災害発生後の Pi-SAR 画像
観測日 2004/10/26



②-2 災害発生後の Pi-SAR 画像
観測日 2004/11/4

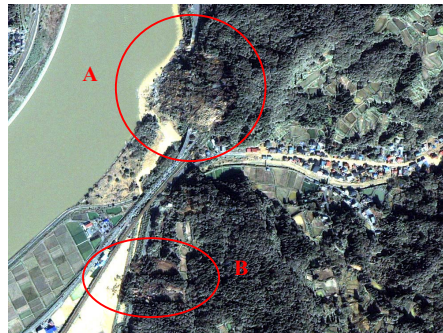


②-3 湛水被災領域抽出図
背景：災害前の航空写真（1999/6/10）
■ 10/26 の被災領域 ■ 11/4 の被災領域

③斜面崩壊被災領域（対象領域：新潟県小千谷市浦柄）



③-1 災害発生前の航空写真
観測日：2000/8/1



③-2 災害発生後の IKONOS 画像
観測日：2004/10/24



③-3 災害発生後の Pi-SAR 画像
観測日 2004/10/26

④道路損壊被災領域（対象領域：新潟県魚沼市下島-関越自動車道）



④-1 災害発生後の IKONOS 画像
観測日：2004/10/24



④-2 災害発生後の Pi-SAR 画像
マイクロ波照射方向：北→南



④-3 災害発生後 Pi-SAR 画像
マイクロ波照射方向：北西→南東
④-2,3 観測日 2004/10/26

図-7 被災領域判読事例

(3) 広域被災状況判読における併用効果

新潟県中越地方を対象に、災害発生前に観測された航空写真と災害発生後に観測された光学式高分解能衛星データ (IKONOS) および高分解能 SAR データ (Pi-SAR データ) の 3 種類のデータを利用して、広域被災状況判読における異種地球観測データの併用効果を検討した。

a) 高分解能 SAR データの利用効果

液状化被害や湛水被害のように水域が関連する被災領域の自動判読において高分解能 SAR データは効果的に利用できることが分かった。しかしながら、広域に点在する斜面崩壊被災地を取りこぼし無く判読しようとする場合には、SAR データ単独では限界がある。

災害発生後の観測条件によっては光学式データが観測できないことがあり、SAR データのみを利用して被災領域を特定しなければならないことも想定できる。この場合には、災害発生前に観測された光学式データを併用して、地表面被覆と後方散乱強度の関連性や道路、河川、溜池などの位置を比較判読することが効果的となる。また、道路網や土地利用に関する既存の空間データを併用することも方策の一つである。

広域被災状況調査に高分解能 SAR データを活用していくためには、観測時の飛行方向や高度、レーダ照射角、同一地点の観測回数の選定が重要となることが試験稼働より明らかになった。道路線形や橋梁、家屋などからの後方散乱はマイクロ波の照射方向・角度によって観測結果が大きく異なる傾向にある。観測条件によっては判読できる被災規模や種類が異なる可能性がある点を事前に考慮しておくことが大切である。

b) 光学式時系列データの利用効果

光学式異種地球観測データである航空写真と IKONOS データを使用した被災領域の自動抽出では良好な結果が得られなかった。これは、斜面崩壊領域や液状化被災領域、湛水被災領域といった災害に伴う地表面変化箇所と耕作物や樹木などの植生域における 2 時期間の季節変化箇所を明確に区分できなかったことに起因している。本研究で使用した航空写真と IKONOS データの観測時期に最大 5 年以上のズレがあったこと、データを観測した季節が異なることも原因の一つと言える。

一方で、ディスプレイ装置に航空写真と IKONOS データを同時に表示させて比較判読した場合、2 つのデータ間で変化した領域が災害に伴う地表面変化であるのか否かを容易に判断できるため、自動抽出結果を修正することが可能であった。正確に被災領域を特定するためには、時系列分析による自動抽出と判読による修正を組み合わせることで利用することが効果的である。

6. まとめ

被災状況調査へ地球観測データを利用することの利点

は地上での調査で即座に把握することが困難な広域範囲におよぶ被災状況を一定の精度を持つデータを用いて分析・判読できることにある。また、災害発生前後や災害発生後の一定期間毎における時系列データを用いて被災箇所や被災領域の変遷を把握できる点も地球観測データを適用する利点の一つである。本システムを活用することにより、複数の地球観測データの相互補完的な活用が可能となり、異種地球観測データの特徴を効率よく広域被災状況判読へ適用できるようになる。

今日、災害対応の分野のみならず様々な分野で複数の地球観測データを統合利用していくことの必要性が指摘されてきている。本研究の内容が地球観測データの効率的利用に何らかの形で寄与できれば幸いである。

謝辞: 本研究開発に利用した航空機 Pi-SAR X バンドデータは独立行政法人情報通信研究機構より提供頂きました。また、同機構電磁波計測部門 環境システムグループの浦塚清峰グループリーダーと佐竹誠主任研究員には Pi-SAR データの基礎処理について丁寧なご指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 竹田厚, 宝馨, 立川康人, 他: 自然災害防止・軽減のためのリモートセンシング技術の可能性, 自然災害科学, Vol.20, No.2, pp.131-160, 2001 年.
- 2) 松岡昌志, 山崎文雄, 翠川三郎: 1995 年兵庫県南部地震での被災地域における人工衛星光学センサ画像の特徴, 土木学会論文集 I, Vol.668, No.54, pp.177-185, 2001 年.
- 3) Koutsias, N., Karteris, M. and Chuvieco, E.: The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformation of Landsat-5 Thematic Mapper Data for Burned Land Mapping, *Photogramm Eng Remote Sensing*, Vol.66, No.7, pp.829- 839, 2000.
- 4) Phulpin, T., Lavenu, F., Bellan, M. F., Mougnot, B. and Blasco, F.: Using SPOT-4 HRVIR and VEGETATION sensors to assess impact of tropical forest fires in Roraima, Brazil, *Int J Remote Sensing*, Vol.23, No.10, pp.1943- 1966, 2002.
- 5) 国土交通省総合技術開発プロジェクト報告書「災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究」災害復旧作業における高分解能衛星データ利用に関する研究, 2001 年.
- 6) 噴火災害観測データ検討グループ: 航空機および人工衛星搭載センサによる火山噴火観測について-有珠山・三宅島を中心として-, 通信総合研究所, 地球科学技術振興機構, 2000 年.
- 7) 浦塚清峰, 小林達治, 佐竹誠, 他: Pi-SAR による地形変動の把握と森林への応用例, 写真測量とリモートセンシング, Vol.41, No.2, pp.56-60, 2002 年.
- 8) 飯田洋, 渡辺信之, 佐藤潤: 高分解能 SAR を利用した災害状況把握, 国土地理院時報, No.99, pp.49-56, 2002 年.
- 9) 岩本雅史, 志村誠一, 山本和彦, 他: 画像レーダ技術, 三菱電機技報, Vol.73, No.8, pp.40, 1999 年.
- 10) J.Bryan Mercer and Steven Schnick: Comparison of DEMs from STAR-3i Interferometric SAR and Scanning Laser, *ISPRS Commission III Workshop*, pp.1-8, 1999.
- 11) 浦井稔: PiSAR を用いた薩摩硫黄島における火山地形の観測計画, 日本リモートセンシング学会第 37 回学術講演会論文集, pp141-142, 2004 年.

(2006.5.19受付)