人工衛星SAR画像による被害地域検出手法の 2004年新潟県中越地震への適用と高度化

APPLICATION OF SATELLITE SAR BASED DAMAGE DETECTION TECHNIQUE TO THE 2004 NIIGATA-KEN CHUETSU EARTHQUAKE AND ITS UPGRADE

松岡 昌志*, 堀江 啓**, 大倉 博***
Masashi MATSUOKA, Kei HORIE and Hiroshi OHKURA

Building damage detection technique which we had developed, has been successfully applied to past earthquakes such as the 1995 Kobe, the 2001 India, and the 2003 Bam, by using the compound index, z-value, which is the value derived from the correlation and difference in intensities between pre- and post-event SAR images. This technique was applied to the affected areas due to the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake on October 23, 2004, by using one pair of Radarsat images taken before and after the earthquake. However, it was not possible to identify any significant distribution of damaged buildings. In this study, we examined the reason and proposed a new technique by using two pairs (pre-seismic and co-seismic) of SAR images, to identify smaller building damage ratios in less densely built-up areas compared to previous techniques. The main idea is to minimize the effect of signal noise and temporal changes of the earth's surface, on building damage estimation, by calculating the difference values from the two pre-event images and one post-event image. In a macroscopic point of view, the distributions of the both difference values of z-value and correlation coefficient in built-up areas were in good agreement with damage by survey reports. In Yamakoshi village, located in highland, we also could identify large-scale landslides with accuracy as good as interpretation from aerial photos.

Keywords : *Synthetic aperture radar (SAR) image, Damaged area detection, Building damage, Ojiya city, the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake, Correlation coefficient*

合成開口レーダ (SAR) 画像, 被害検出, 建物被害, 小千谷市, 2004 年新潟県中越地震, 相関係数

1. はじめに

最近では, 各国が打ち上げた人工衛星観測データの相互利用に係わる国際的な枠組みが整備され, 世界各地で多発する災害状況の早期把握手段としてのリモートセンシング技術の活用が高まってきている。その枠組みのひとつに国際災害チャータ¹⁾があり, これは, 地球観測衛星による災害管理への貢献の促進を目指した憲章「自然または人為的災害時における宇宙設備の調和された利用を達成するための協力に関する憲章」である。この憲章に基づき, 世界で災害の発生が予測される地域あるいは災害が発生した地域を, 地球観測衛星により優先的に観測し, 防災関係機関などへのデータの無償提供を通して, 緊急事態の支援, 復興および事後処理に資することを目的とした宇宙機関を中心とする国際協力体制が確立された。1999年にフランス宇宙研究センター (CNES) と欧州宇宙機関 (ESA) がチャータを発表, 2000年に調印した後, 複数の宇宙機関が次々と参加し, 日本も2005年2月に加入した。これにより, 防災関係機関等のユーザからの要求に基づき, 可能な限りの地球観測衛星を用いて被災地を観測し, その画像データや被災地判読結果は早期かつ無償で提供されるようになった。

2003年以降, チャータは年間約20回発動されており, 世界では月2回程度のペースで大規模な自然災害が発生していることがわかる。主題図はWeb¹⁾でも公開されており, 2004年12月のスマトラ沖地震津波や2005年のハリケーン・カトリナ水害でも発災前後の数多くの観測画像から被災地を推定した主題図が作成された。

衛星画像からは, 例えば, スマトラ沖地震津波では, 画像の地上解像度が30m程度であっても, 津波による被害範囲が概ね推定でき, 1mの解像度ともなると建物や橋梁などは目視により被害が把握できる^{2),3)}。ただし, このような目視判読は光学センサ画像に基づくものであることから, 早期に観測できたとしても雲や雲影の影響で被災地が見えないことも多い。昼夜を問わず, かつ, 雲を透過して地表の状況を観測できる合成開口レーダ (SAR)⁴⁾を搭載した人工衛星についても被災地を観測するが, 洪水による冠水などの後方散乱特性に大きな影響を与えるような状況を別とすると, SAR画像からの目視による被害判読は非常に困難である。建物や道路等の社会基盤施設を対象とした場合, 国際災害チャータにて公開された主題図の内, SAR画像に基づいたものはほとんどない。SAR画像を被害検出に利用する際には, 適切な画像処理をすることが必要不可欠である。

* 防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター
チームリーダー・博士(工学)
(現在 産業技術総合研究所グリッド研究センター)

** 阪神・淡路大震災記念人と防災未来センター
専任研究員・博士(工学)(研究当時 防災科学技術研究所
地震防災フロンティア研究センター)

*** 防災科学技術研究所 総括主任研究員・博士(理学)

Team Leader, Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED, Dr. Eng.

Researcher, Disaster Reduction and Human Renovation Institute, Dr. Eng.

Senior Researcher, National Res. Inst. for Earth Sci. and Disaster Prevention, Dr. Sci.

著者らは既に、1995年兵庫県南部地震の地震前後に被災地を観測した人工衛星 SAR 画像（2 シーン）に記録される後方散乱^(注2)の強度の比較から、建物倒壊等の大規模な被害地域を自動検出する手法を提案し⁴⁾、他の被害地震に適用することで手法の妥当性を確認してきた^{5),6)}。また、地震動情報による被害推定と統合処理する高精度化も試みている⁷⁾。本報では、SAR 画像による被害検出手法を2004年新潟県中越地震に適用し、小千谷市での建物被害調査データとの比較から、手法の適用限界を明らかにする。そして、地震前に観測された SAR 画像を新たに1シーン追加することで、建物密集度の低い地域にも適用可能で、かつ、中程度の被害を受けた地域を含む被害検出が可能な手法を新たに提案する。

2. 既往の被害検出手法の新潟県中越地震への適用

2.1 被害検出手法の概要

1995年兵庫県南部地震以降、建物被害と SAR 画像の強度情報あるいは位相情報との比較研究が精力的に進められてきた^{5),8),9)}。とくに、重要なことは SAR から得られる強度情報は軌道等の観測条件に大きくは依存しないことから、強度情報に基づく変化抽出手法は他の地域への移植性が高い。兵庫県南部地震の前後に観測された欧州宇宙機関の ERS 衛星の SAR 画像と現地調査データから導かれた被害地域の検出の考え方と手法^{4),5)}の概要を以下に示す。

後方散乱強度の大きさはマイクロ波の波長や地表への進入角度（照射角と入射角）、地表面の凹凸や誘電特性の影響を受けるが、このうち凹凸だけを考えると図1に示すように人工衛星により市街地に対して照射されたマイクロ波は地面と建物との間での複数反射（カージナル効果^(注3)）によって後方散乱強度は大きくなる。一方、建物の倒壊地域や空地に照射されたマイクロ波は多方向散乱によって衛星に戻る成分は小さくなる。その変化は地震前後の後方散乱係数 σ^0 (dB)^(注4)の差分や相関係数の値で表現できる。

まず、2 時期の SAR 画像の正確な位置合わせの後、それぞれの画像に 21×21 ピクセルウィンドウのスペックルノイズ^(注5)低減フィルタ¹⁰⁾を施す。差分は 13×13 ピクセルウィンドウ内の後方散乱係数の平均値について差分を求め（(1) 式）、相関係数についても 13×13 ピクセルウィンドウから算出する（(2) 式）。そして、差分と相関係数を説明変数とした（3）式に示す合成変量（判別得点）に基づき被害地域を検出する。

$$d = 10 \cdot \log_{10} \bar{I}a_i - 10 \cdot \log_{10} \bar{I}b_i \quad (1)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N I a_i I b_i - \sum_{i=1}^N I a_i \sum_{i=1}^N I b_i}{\sqrt{\left(N \sum_{i=1}^N I a_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N I a_i \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N I b_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N I b_i \right)^2 \right)}} \quad (2)$$

$$z = -2.140 d - 12.465 r + 4.183 \quad (3)$$

ここで、 d は後方散乱係数の差分値、 r は相関係数、 z は判別得点を表し、 N は計算するウィンドウ内のピクセル数を表す。 13×13 ピクセルのウィンドウを用いるため、 N は 169 となる。地震前後の 2 時期であれば、 $I a_i$ 、 $I b_i$ は地震後と地震前のそれぞれの画像の i 番目にお

図1 人工衛星 SAR による観測の模式図。

図2 2004年新潟中越地震の解析対象範囲（矩形部分）。

けるピクセル値、 $I a_i$ 、 $I b_i$ は i 番目におけるピクセルの周囲 13×13 ピクセルの平均値である。ここで用いるフィルタやウィンドウサイズは ERS 画像（ピクセルサイズ 30m）と兵庫県南部地震での街区単位で整理された建物被害調査データ¹¹⁾との比較に基づき、スペックルノイズを低減しつつ被害の判読精度が高くなるように経験的に決定したものである。判別得点 z の値が大きいくほど地表変化が大きく、被害が甚大である可能性が高い。なお、対象地域をカージナル効果が期待される市街地に限定するため、後方散乱係数が $-5 \sim -6$ dB 以下の地域はマスクする。

2.2 新潟県中越地震への適用

2004年10月23日にマグニチュード (Mw) 6.5 の地震が新潟県中越地方で発生し、死者 40 名、負傷者約 3,000 名、住宅の全半壊 1 万棟以上という大きな被害をもたらした。また、斜面崩壊、液状化等によって道路施設、農業施設、ライフラインにも大きな被害をもたらし、

図3 新潟県中越地震後の2004年10月25日に観測されたRadarsat/Fine強度画像。白線は小千谷市の行政界。

図4 小千谷市周辺での判別得点 z の分布（背景は地震前の2004年10月1日観測の強度画像）。

とくに、全国有数の地すべり多発地域である旧山古志村は震源直近ということもあり、多数の斜面崩壊や地すべりが発生した。夕刻の地震ということもあり、地震直後から収集できた被害情報は限られていたが、翌日からのヘリテレ映像や航空写真¹²⁾、そして、高分解能 IKONOS 衛星の画像¹³⁾から被害の全体像を理解した人も多い。

SARを搭載した衛星は、地震の2日後にカナダ宇宙庁のRadarsat衛星¹⁴⁾がFineモード（Cバンド、HH偏波、地上解像度は約9m）にて被災地を観測している。本研究では、SLC(Single Look Complex)データ¹⁵⁾から幾何補正および後方散乱強度への変換を行った。図2には画像の範囲を、図3には地震後の強度画像を示す。地震前の画像には2004年10月1日に観測されたものがある。そこで、前述し

図5 小千谷市の建物全壊率（250mメッシュ単位）の分布。(a)メッシュ内に調査建物がある地域、(b)メッシュ内に調査建物が10棟以上ある地域。なお、北東部の網がけの部分は積雪による被害の影響が含まれる地域。

図6 被害調査データに基づく建物全壊率の分布。(a)兵庫県南部地震における阪神地域、(b)新潟県中越地震における小千谷市（メッシュ内の建物が50棟以上ある地域）。

た手法を地震前後のRadarsat画像に適用し、建物被害地域の検出について検討した。図4にその小千谷市周辺の結果を示す。兵庫県南部地震⁴⁾や1999年トルコ・コジャエリ地震⁵⁾などとは異なり、市街地において被害地域がほとんど検出されない。

以降では、小千谷市において地震後に実施された建物被害調査を整理したデータに基づき、この検出結果の評価を行うと共に、小千谷市の建物被害を検出できる方法の開発を進める。

3. 建物被害と後方散乱特性の関係

3.1 小千谷市の建物群と被害についての考察

震源に比較的近い小千谷市（図3、図4中の白線が行政界を表す）では、罹災証明書発行のために、国の被害認定基準に従って判定訓練を受けた行政職員が主体となって建物の悉皆調査を実施し、結果がGISデータベースとして収録されている¹⁵⁾。それによると、全半壊あわせて約3,300棟の住家で被害が発生している。非住家を含

めた建物の全壊率は町字単位での集計によると、中心市街地で概ね0~20%程度であるのに対して、市の北東部や西から西南部にかけての地域では10~50%程度と中心市街地よりも大きい傾向が確認されている¹⁵⁾。しかし、建物の密集度の地域によるバラツキが非常に大きい。より明確に被害の大きい地域を同定するために、調査対象建物が存在する地域についてのみ選定し、1/4基準地域メッシュ（約250m四方）単位で全壊率を算出した結果を図5(a)に示す¹⁵⁾。全壊率は中心市街地よりも北東地区や南西地区において高いことが読み取れる。しかし、メッシュ内の調査建物が1棟しかないなど、母数が極端に少ない地域も多いことから、依然として信頼性の高い被害分布とは言い難い。そこで、調査建物が10棟以上あるメッシュに限定した場合の全壊率分布を図5(b)に示す。中心市街地を除く広い範囲で対象メッシュ数が減少し、全壊率が高い地域がやや少なくなる。

次に、2章にて紹介した手法に基づいて推定した被害分布（図4）が実際の被害状況を説明できなかった要因について、検出手法構築の基礎となった兵庫県南部地震での被害や建物密集度と対比させて検討する。前述したように本検出手法は、SAR画像に特徴的な建物群のカージナル効果とその変化に基づいていることから、建物密集度や都市域の広がり重要なファクターとなる。

図6(a)には兵庫県南部地震における被害調査データ¹¹⁾に基づき、街区単位で整理した阪神地域の低層建物全壊率を示す。東西方向に全壊率の高い地域（いわゆる震災の帯）が分布する。なお、地震動強さを考慮したフラジリティ関数によると、兵庫県南部地震における被害調査データから求まる全壊率と小千谷市が参考にした国の被害認定基準による全壊率とは大差がない¹⁶⁾。このGISデータからは、街区内における平均的な建物密度は約580m²に対して1棟となり、阪神地域は建物密集度が比較的高い。これは、250mメッシュ（面積は62,500m²）であれば、約100棟存在するということになる。250mメッシュで分割した際には街区の外の道路部分も含むこと、地方の市では建築面積が大都市よりも大きいことなどを考慮して、小千谷市については、250mメッシュ内に50棟以上の建物がある地域を建物密度が高い地域として選定すると、図6(b)のようになる。阪神地域での被害分布（図6(a)）と比較しても明らかなように、小千谷市において建物密度が高い地域は非常に狭い地域に限定され、しかも、建物全壊率が12.5%以下が大半を占める。

したがって、この結果を既往の報告^{4)~6)}と総合すると、本被害検出手法の適用範囲は、建物が密集している都市域において建物全壊率が25%程度以上であり、被害域がある程度の広がりを持っている場合に、無被害あるいは小被害地域と区別して検出する能力があると考えられる。

3.2 後方散乱特性の時系列変化と建物全壊率との関係

前節で示したように、カージナル効果が地震後には減少する現象のみを主として期待する本被害検出手法は、地震前後の2シーンを利用するという簡便性があるものの、適用限界があることも明らかになった。そこで、用いるシーン数が増えることを許容しても、小規模な市町村が分布する地域に適用可能な被害検出手法を構築することを試みる。

リモートセンシング画像を利用して地震による被災地の推定を試みる際には、地震前後の2シーンの単純比較よりも、複数シーンを用いた時系列分析の方が良好な結果を示すことが、DMSP衛星の夜

(a) 後方散乱係数差の差分 d_{diff}

(b) 相関係数の差分 r_{diff}

(c) 判別得点の差分 z_{diff}

図7 後方散乱特性の変化と小千谷市の建物被害レベル（A: 建物全壊率0~6.25%, B: 6.25~12.5%, C: 12.5~25%, D: 25~50%, E: 50~100%）との関係。

間画像の解析から示唆され¹⁷⁾、また、夜間の光の動態だけでなく、昼間に光学センサ画像が記録した分光反射情報の時系列解析からも、甚大被害地域が検出可能との事例がある¹⁸⁾。SAR 画像については、地震前 2 シーンと地震後 1 シーンを利用して、これらの位相情報の組み合わせによる干渉処理から建物被害の確率を推定する試みもある⁹⁾。これは地震前ペアから求まるコヒーレンス^{注7)}と地震前後ペアのコヒーレンスを比較することで、時間経過に伴うコヒーレンスの減少を評価しつつ建物被害を推定するものであるが⁹⁾、衛星間距離に起因するコヒーレンスの S/N 比の低下は避けられず、3 時期における衛星軌道に近いことが適用の条件となる。

そこで、本研究においても地震による大きな変化がない時期における SAR の後方散乱特性の定常的な変化状態をあらかじめ把握して、地震後における後方散乱特性の変化を相対評価する考え方を応用し、その指標の変化と建物被害率との関係を検討する。しかし、文献 9) とは異なり、指標の算出に SAR 画像の強度情報を利用することで、衛星軌道等の観測条件の影響を受けない汎用性の高い手法の構築を試みる。

地震前の Radarsat 画像 (2004 年 10 月 1 日) よりも前に新潟県中越地方を観測した画像に 2004 年 9 月 7 日のものがある。本研究では、この画像を地震前画像として新たに追加した。そして、地震前画像のペアから、後方散乱係数の差分 (d_{bb})、相関係数 (r_{bb})、判別得点 (z_{bb}) を (1)~(3) 式を用いて算出した。そして、地震前後画像のペアから既に算出済みの d, r, z から、後方散乱係数の差分のさらに差分 ($d_{diff} = d - d_{bb}$)、相関係数の差分 ($r_{diff} = r - r_{bb}$)、判別得点の差分 ($z_{diff} = z - z_{bb}$) を求め、これらの指標の変化と建物全壊率との関係を検討する。

検討にあたっては、建物が存在する地域をあらかじめ抽出しておく必要がある。2 章に示した検出手法では、建物群のカージナル効果を想定し、地震前画像において後方散乱強度が大きい地域を選定しているが、本検討では、地震前画像を新たに追加したことによる利点を生かし、地震前画像ペアにおいて変化が小さい (後方散乱特性が安定している) 地域を選定することにした。今回のデータセットは、地震前同士の衛星軌道間距離 Bp が約 340m と比較的短いことから、マイクロ波の位相情報から求まるコヒーレンスを利用した。コヒーレンスの方が地表の凹凸に敏感であり、建物群の判別に適しているからである¹⁹⁾。コヒーレンスは 5×5 ピクセルのウィンドウ窓から算出し、その空間分布から閾値を 0.3 と判断して、その値以上の地域は建物が存在する可能性が高いと考え、検討対象地域として抽出した。

図 7 には小千谷市の被害調査結果の 250m メッシュデータに基づく被害レベルと各種指標の差分、 d_{diff} 、 r_{diff} 、 z_{diff} の関係を示す。なお、メッシュ内の調査建物棟数が 10 棟未満の地域と冬期積雪による影響が含まれる地域は除いた。ここで、被害レベルとは建物全壊率に応じて 5 区分したもので、既往研究⁹⁾を踏襲して、全壊率が 0~6.25% を被害レベル A、6.25~12.5% を B、12.5~25% を C、25~50% を D、50~100% を E とした。また、被害レベルごとに該当するピクセル数にはバラツキがあるので、それぞれ 1,000 ピクセルを無作為に抽出し、平均値と標準偏差を求めている。図 7 より、大局的にみれば被害レベルが大きくなるにつれて、 d_{diff} と r_{diff} の値は減少し、それに伴い、 z_{diff} の値は大きくなる。被害地域では後方散乱強度が減少し、相関も低下するという 2 章での仮定と矛盾しない。分散分析²⁰⁾によれば、被

害レベル A と E との間では、有意水準 1% で F 比は有意となる。また、相関比は大きい順に、 $z_{diff} > d_{diff} > r_{diff}$ となり、判別得点の差分 z_{diff} が被害レベルを区分するのに最も適していることになる。しかし、 r_{diff} の

図 8 小千谷市周辺での判別得点の差分 z_{diff} の分布 (背景は地震前の 2004 年 10 月 1 日観測の強度画像)。対象地域は地震前画像ペアのコヒーレンスが 0.3 以上の地域。

図 9 Radarsat/Fine 画像全域から算出した判別得点の差分 z_{diff} の分布 (背景は地震前の 2004 年 10 月 1 日観測の強度画像)。対象地域は地震前画像ペアのコヒーレンスが 0.3 以上の地域。

大小は被害レベルとの傾向に合っているものの、 z_{dif} と d_{dif} は被害レベルBの値が逆転しており、被害レベルが小さい範囲での傾向にはややバラツキがある。

4. 時系列変化を利用した被害地域の検出手法

4.1 判別得点の差分による被害地域の検出

3章での検討を踏まえ、地震前2シーン、地震後1シーンのRadarsat画像から、判別得点の差分 z_{dif} の分布を求め、地震前の強度画像に重ねた。小千谷市と川口町、旧堀之内町周辺の拡大図を図8に示す。コヒーレンスが0.3以上の範囲を対象地域としている。着色されていない地域や寒色系の地域は建物被害の可能性が低いことを示している。小千谷市では中心市街地よりも西部から南西部にかけて被害が大きい傾向(図5)を z_{dif} の分布も表しており、大きな被害を受けた川口町の中心市街地や田麦山地区についても z_{dif} の値は大きい。全壊率が50%以上の地域は判別得点の差分 z_{dif} が2.5程度以上の地域に概ね対応する。

実用的な被害検出手法とは被害地域を検出するだけでは不十分であり、無被害地域については被害として検出されないことが肝要である。そこで、画像全域について判別得点の差分 z_{dif} の分布を求めた(図9参照)。これより、長岡市南部から小千谷市、川口町、旧堀之内町、旧川西町にかけて z_{dif} の値が大きい(被害の可能性が高い)地域が分布し、一方、長岡市中心部や旧越路町、十日町市では逆に z_{dif} の値が小さい。この特徴は広域的に建物被害を調査した報告²¹⁾と良い対応を示す。以上のように、判別得点の差分 z_{dif} を用いることで、建物密集度が低い地域についても被害地域が検出でき、かつ、被害域の全体像が把握できることがわかる。

4.2 相関係数のみを利用した被害地域の検出

上述のように検討対象地域(後方散乱特性が安定した地域)の選定には、位相情報から算出したコヒーレンスを用いたが、この値は衛星の軌道間距離 Bp や観測間隔などの観測条件に強く依存し⁸⁾、利用できる機会が少ない。一方、強度画像の相関は観測条件の制約をそれほど受けない⁸⁾。したがって、災害時や緊急時の実用的な被害把握を考えた場合、相関係数を用いる方が現実的である。そこで、地震前画像のペアから算出した相関係数 r_{bb} から対象地域を選定することを考えた。また、相関係数はピクセル値の較正が十分でない場合でも、安定した値が得られることから、相関係数のみに着目した被害地域検出が可能であれば、より冗長的な被害検出システムの構築が可能となる。

相関係数差分 r_{dif} の分布を強度画像に重ねた結果を図10に示す。 r_{bb} の値が0.8以上を対象地域としている。被害を受けた可能性高い地域(r_{dif} の値が小さい地域)を暖色系にしている。大きな被害を受けた小千谷市から川口町や田麦山にかけて r_{dif} の値が小さい地域が分布し、実際の被害²¹⁾との対応も良い。図11には画像全域における結果を示すが、 r_{dif} の分布は z_{dif} の分布(図9)と定性的には良く類似し、小千谷市や川口町と比べると長岡市中心部や旧越路町では r_{dif} の値が大きい地域が分布する。建物全壊率が50%以上の地域は r_{dif} が-0.15程度以下の地域と概ね対応する。

さらに、図11からは、旧山古志村を中心とした山間地において、 r_{dif} の値が小さい地域(緑~赤色)が局所的に存在することがわかる。その分布は航空写真等から判読した斜面災害発生箇所²²⁾やIKONOS

衛星の植生指標から推定した被害地域²³⁾と良い対応を示すことから、地すべりや斜面崩壊によって地表の凹凸が変化したことに伴い、相関係数が低下したと考えられる。しかし、山間地においては、SAR

図10 小千谷市周辺での相関係数の差分 r_{dif} の分布(背景は地震前の2004年10月1日観測の強度画像)。対象地域は地震前画像ペアの相関係数が0.8以上の地域。

図11 Radarsat/Fine 画像全域から算出した相関係数の差分 r_{dif} の分布(背景は地震前の2004年10月1日観測の強度画像)。対象地域は地震前画像ペアの相関係数が0.8以上の地域。

画像特有の幾何学的な歪み（レイオーバー^{注8)}、フォアショートニング^{注9)}、陰影効果^{注10)}）があるために、位置によっては検出が困難なものがある。今後、標高データなどから地形の影響を考慮し、検出限界を明らかにしていく必要がある。

以上のように、相関係数のみに着目した場合、市街地における建物被害だけではなく、山間部における地盤災害も検出できる能力があることが示唆される。しかし、河川の中州や調整池などの水域境界部の変化が大きい地域も検出されてしまう欠点もある。画像処理による検出結果のみから被害地域を判断するのではなく、原画像との対比をすることが誤判断を防ぐには重要である。

5. まとめ

地震前後の人工衛星 SAR 画像（2 シーン）の後方散乱係数の変化と相関係数から算出される合成変量（判別得点）に基づく建物被害地域の検出手法を、2004 年新潟県中越地震の Radarsat 画像に適用し、小千谷市の建物被害調査データとの比較から、建物密集度が低い地域における手法の適用限界を明らかにした。さらに、地震前の画像を新たに 1 シーン追加した 3 シーンを用いて、地震前画像ペアから得られる定常状態での相関係数や判別得点に対する地震後のそれらの変化を差分値として算出し、建物全壊率との関係を検討した。その結果、これらの差分値と被害レベルとは良い関係にあり、建物密集度が低い地域であっても被害が検出できることを示した。また、相関係数のみに基づく手法では、斜面災害地域の検出も示唆され、広範な形態の被害地域を検出できる可能性を示した。相関係数を利用する場合は、SAR 画像の後方散乱強度の厳密な較正が必要ないことから、より冗長的かつ実用的な被害地域の早期検出システムへと容易に発展させることが可能と考えられる。

しかし、提案手法から得られる推定被害域には、画像取得間隔が長い場合には地震被害以外の地表変化も含まれる。さらに、SAR 画像に含まれるスペックルノイズを考えると、画像解像度と比べてより大規模な被害域が検出対象となる。今後、災害把握を目的として複数の高解像度衛星を打ち上げる計画がある²⁴⁾。これにより、観測頻度が格段に増し、さらに、解像度も現状より向上することから、上記の問題点は克服され、被害検出精度が高まることが期待される。

謝辞

この研究の一部は科学研究費補助金（課題番号：17510155）によった。Radarsat はカナダ宇宙庁所有のものである。図 6 の一部は建築研究所が国土地理院長の承認を得て、同院発行の数値地図 10000（総合）を複製した CD-ROM データに基づいて作成したものである（承認番号 平 8 総複，第 26 号）。記して謝意を表する次第である。

注

- 注 1) 高分解能のマイクロ波映像レーダ。航空機や衛星などのプラットフォームに搭載され、小さな寸法のアンテナを用いたままプラットフォームの移動に伴い仮想的に大きなアンテナを合成し、それによって高分解能を実現する。
- 注 2) プラットフォームの側方からマイクロ波を照射し、地表で散乱された波のうち、そのプラットフォームに戻ってきたマイクロ波。記録したマイクロ波からは振幅（強度）と位相が算出できる。
- 注 3) 対象物をレーダで走査する場合、同じ対象物であっても視る角度によって反射強度が異なる。都市域では建物壁と道路面がリフレクタの働きをすることが多く、反射強度は大きくなる場合が多い。

- 注 4) 単位面積あたりのレーダ散乱断面積（散乱物体のレーダ再放射の大きさに比例）を散乱係数と呼ぶ。そのうち、後方への散乱のみを考えたもの。
- 注 5) レーダ画像など、コヒーレント光学系で撮影された画像に現れるノイズ。レーダ画像を拡大して 1 分解能セル程度の尺度で見ると、たとえ地表が均一な散乱体であっても、セルごとに濃度のゆらぎが認められる。散乱の際の干渉効果によるもので、コヒーレントな波を利用するレーダでは避けられないもの。完全にノイズ除去することは出来ないが、ノイズを低減させるための画像処理フィルタはスペックルノイズ低減フィルタと呼ばれている。
- 注 6) 合成開口レーダの画像フォーマットのひとつで、画像として認識できる振幅（強度）の情報に加え、位相の情報もあわせもつデータ（複素データ）。
- 注 7) 2 つの波動の可干渉性を表す指標。レーダはコヒーレントな電磁波なため可干渉性が優れている。
- 注 8) マイクロ波映像レーダにおいて、地表対象物がマイクロ波の照射方向上で軌道に向かって倒れ込むように表現されるレーダ画像特有の幾何学的歪み。
- 注 9) マイクロ波映像レーダにおいて、レイオーバーの効果に伴い、相対的に軌道に向かって傾斜する斜面は実際よりも短くかつ急傾斜に、逆方向に傾斜する斜面はより長くかつ緩傾斜に画像上に表現される現象のこと。
- 注 10) 影の分布により地形特徴などが強調される効果。マイクロ波映像レーダでは、照射源側の斜面が光輝部、その反対側が陰影部となる。

参考文献

- 1) 国際災害チャータ：International Charter "Space and Major Disaster", (オンライン), 入手先 <<http://www.disasterscharter.org/>>, (参照 2006-10-1)。
- 2) Yamazaki, F., Matsuoka, M., Warnitchai, P. Polngam, S., and Ghosh, S.: Tsunami Reconnaissance Survey in Thailand Using Satellite Images and GPS, Asian Journal of Geoinformatics, Asian Association on Remote Sensing, Vol.5, No.2, pp.53-61, 2005.5.
- 3) Miura, H., Wijeyewickrema, A., and Inoue, S.: Evaluation of Tsunami Damage in the Eastern Part of Sri Lanka due to the 2004 Sumatra Earthquake Using Remote Sensing Technique, Proc. 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Paper No.856, 2006.4.
- 4) Matsuoka, M. and Yamazaki, F.: Use of Satellite SAR Intensity Imagery for Detecting Building Areas Damaged due to Earthquakes, Earthquake Spectra, Vol.20, No.3, pp.975-994, 2004.8.
- 5) 松岡昌志, 山崎文雄: 人工衛星 SAR 強度画像を用いた被害地域検出手法の最近の地震への適用とその妥当性の検討, 日本建築学会構造系論文集, No.558, pp.139-147, 2002.8.
- 6) Matsuoka, M., and Yamazaki, F.: Building Damage Mapping of Iran Earthquake Using Envisat/ASAR Intensity Imagery, Earthquake Spectra, Vol.21, No.S1, pp.S285-S294, 2005.12.
- 7) 能島暢呂, 松岡昌志, 杉戸真太, 江崎賢一: 地震動情報と人工衛星 SAR 画像情報の統合処理による建物全壊率の定量的推定手法の開発, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.808-821, 2006.10.
- 8) Yonezawa, C. and Takeuchi, S.: Decorrelation of SAR Data by Urban Damages Caused by the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, International Journal of Remote Sensing, Vol.22, No.8, pp.1585-1600, 2001.5.
- 9) 伊藤陽介, 細川直史: 干渉 SAR データを用いた地震被害度推定モデル, 電気学会論文誌 C, Vol.122-C, No.4, pp.617-623, 2002.4.
- 10) Lee, J. S.: Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.2, No.2, pp.165-168, 1980.3.
- 11) 建設省建築研究所: 平成 7 年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 1996.
- 12) 大木章一, 浦部ぼくろう: 新潟県中越地震における国土地理院の写真測量分野の対応, 写真測量とリモートセンシング, Vol.44, No.1, pp.44-45, 2005.3.
- 13) 向山栄: IKONOS 衛星画像を利用した地震発生直後における総覧的災害情報の取得, 写真測量とリモートセンシング, Vol.44, No.1, pp.55-57, 2005.3.
- 14) カナダ宇宙庁: Canadian Space Agency, (オンライン), 入手先 <<http://www.espace.gc.ca/asc/eng/satellites/radarsat1/>>, (参照 2006-10-1)。
- 15) 堀江啓, 林春男, 牧紀男, 吉富望, 重川希志依, 田中聡, 沖村孝, 鳥居宣之: 新潟県中越地震による小千谷市の建物被害分布に関する一考察, 第 24 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.7-8, 2005.11.
- 16) 堀江啓, 林春男, 田中聡, 長谷川浩一, 牧紀男, 沖村孝: 地震による木造建物の損傷度を反映する被害関数の構築, 地域安全学会論文集, No.5,

- pp.123-132, 2003.11.
- 17) Kohiyama, M., Hayashi, H., Maki, N., Higashida, M., Kroehl, H. W., Elvidge, C. D., and Hobson, V. R.: Early Damaged Area Estimation System Using DMSP-OLS Night-Time Imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.25, No.11, pp.2015-2036, 2004.6.
- 18) Kohiyama, M. and Yamazaki, F.: Image Fluctuation Model for Damage Detection Using Middle-resolution Satellite Imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.26, No.24, pp.5603-5627, 2005.12.
- 19) Zebker, H. A. and Villasenor, J.: Decorrelation in Interferometric Radar Echoes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.30, No.5, pp.950-959, 1992.9.
- 20) 石川貞夫：分散分析のはなし，東京図書，1992.2.
- 21) 吉見雅行，小松原琢，宮地 良典，木村克己，吉田邦一，関口春子，佐伯昌之，尾崎正紀，中澤努，中島礼，国松直，竿本英貴：2004 年 10 月 23 日新潟県中越地震被害調査-構造物被害と地形との関係．*地質ニュース*，No.607，pp.18-28, 2005.3.
- 22) 国土地理院：新潟県中越地震災害状況図，2004.10.
- 23) 三浦弘之，翠川三郎：高分解能衛星画像にみられる 2004 年新潟県中越地震での斜面災害発生箇所の特徴，第 12 回日本地震工学シンポジウム，pp.1514-1517, 2006.11.
- 24) 産経新聞：地球観測衛星新たに 4 基～1 時間で被災地画像「偵察」並み分解能～，2006 年 10 月 29 日朝刊 3 面，2006.10.

(2006年9月6日原稿受理，2007年3月9日採用決定)