467

人工衛星搭載合成開口レーダを用いた 都市域の地震による被害地域の抽出

米澤 千夏[○] (財団法人リモート・センシング技術センター)
竹内 章司、菅 雄三、小黑 剛成、小川 博道 (広島工業大学)
A. J. Chen (台湾宇宙リモートセンシング研究センター)

Detecting earthquake damaged urban areas using spaceborne Synthetic Aperture Radar

Chinatsu YONEZAWA, Shoji TAKEUCHI, Yuzo SUGA, Yoshinari OGURO,
Hiromichi OGAWA and A. J. CHEN

ABSTRACT

The authors attempted to detect collapsed built-up areas in urban district by the earthquakes using ERS/SAR data. For detecting damaged area by 1995 Hyogoken nanbu earthquake, both norm type correlation coefficient of single-look intensity data and complex correlation coefficient of single-look complex data (coherence) were computed from couples of data. The data pairs between before and after the earthquake indicate decorrelation at damaged urban area observed by aerial photographs. The decorrelation by the earthquake is detected obviously in comparison with the correlation of the data pairs which interval did not include the earthquake occurrence. The damaged urban areas by 1999 Great Taiwan earthquake also indicate the coherence decorrelation. The result of this study suggests the usefulness of SAR data correlation for monitoring and visualization of urban disaster.

Keywords: Disaster monitoring, Interferometry, Coherence, Intensity correlation, ERS

1. はじめに

大地震が都市域を直撃すると被害は甚大となる。地震による死傷者の多くは家屋の倒壊や火災によって犠牲となる場合が多い。建造物の被害状況を人工衛星によるリモートセンシングによって可視化することは、多くの死傷者をもたらした地震の被害状況を一度に把握するために有効な手法の一つである。

合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)は能動型のマイクロ波センサであり、光学センサとは異なり、昼夜・天候を問わずに地表面の情報を得ることができる。また、2 時期のデータの干渉性を利用することも可能である。ここでは、1995 年の兵庫県南部地震における都市域の建造物の被害状況を地震前後の ERS(European Remote Sensing Satellite)搭載 SAR データの干渉性を利用することによって可視化・抽出したこと¹⁾²⁾を報告する。さらに、1999 年の台湾大地震(集集地震)においても同様の手法で被害地域の抽出を試み³⁾、建造物被害地域の可視化・抽出への ERS/SAR データの干渉性の利用可能性を検証した。

2. 兵庫県南部地震における建造物被害地域の抽出

2.1 兵庫県南部地震

1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震では死不明者数は 6400 人を越え、全半壊戸数は約 42 万世帯を数えた。被害集中地域の中心部では震度は 7 に達し、木造家屋の全壊率は 30%を越えた。地震直後から被害状況についての詳細な各種調査がおこなわれた。うち、航空写真の詳細な判読結果である平成 7 年度兵庫県南部地震災害現況図⁴⁾をスキャナで読み込み、色区分された被害地域のうち、「家屋・建物の倒壊及び大きな破損」「火災(焼失範囲)」「道路・高速道路・鉄道の破損」「海岸堤防の破損」の各区分を抽出し、抽出された情報を残すように画像を縮小し、SAR 画像にあわせて歪ませた結果を Fig. 1 に示す。

2.2 使用データおよびデータ処理

使用したデータは ERS-1/SAR のパスローウ: 72-243 のレベル 0 データ(生データ)である。兵庫県南部地震前の 3 つのデータ(取得日時: 92 年 11 月 1 日、93 年 9 月 12 日、94 年 10 月 12 日)、および地震後の 3 つのデータ(取得日時: 95 年 5 月 23 日、96 年 5 月 7 日、96 年 2 月 27 日)を用いた。

レベル 0 データを Atlantis Scientific System 社の ERGOvista SAR Processor で処理することにより、1 ルック複素画像(SLC)を生成した。SLC 画像を強度

画像へ変換し、二次多項式を用いて画像間の重ね合わせをおこなった。幾何補正後の画像はレンジ方向 2 アジマス方向 10 のウィンドウで平均化した。

2.3 強度画像の相関およびコヒーレンスの計算

平均化後の地震後の神戸市内から西宮市にかけての強度画像を Fig.2 に示す。被害地域の強度画像は、地震前でははっきりとあらわれていた道路のパターンが地震後には不明瞭になるなど地震前後で違いが認められた。強度画像に見られる地震前後の後方散乱特性の変化をより明瞭に抽出するため、2 画像間のノルム相関を計算した。

$$\rho_I = \frac{|E(I_1 I_2)|}{[E(I_1^2)E(I_2^2)]^{1/2}} \quad (1)$$

I_1, I_2 は 2 つの SAR のシングルルックの強度画像で同じ位置にあたるそれぞれの画素値を、 $E(\)$ は画像の小領域内における期待値を表す。重ね合わせ済みの 2 つの強度画像間で、式(1)より 4×20 の小領域でノルム相関を計算した。このとき画像間での重ね合わせのずれを補正するため、基準画像の画素の周囲 3×5 について相関値を求め、最大値をとる画素を最適画素とした。その後 3×3 のウィンドウサイズで平滑化をおこなった。

一方コヒーレンスは 2 画像間の干渉性の良し悪しの目安として一般に複素相関から計算される。

$$\rho_c = \frac{|E(c_1 c_2^*)|}{[E(c_1 c_1^*)E(c_2 c_2^*)]^{1/2}} \quad (2)$$

c_1, c_2 は 2 つの SAR 画像で同じ位置にあたるそれぞれの画素の複素データを、 $*$ は複素共役を表す。コヒーレンスは 2 つの衛星の基線長やデータ取得間隔などに左右されることが知られている⁵⁾。コヒーレンスの計算においても強度画像のノルム相関と同様、重ね合わせ済みデータ組み合わせにおいて 4×20 の領域でコヒーレンスを計算し、周囲 3×5 画素の最適画素からコヒーレンスを求め、さらに 3×3 のウィンドウサイズで平滑化を行った。

2.4 相関による変化抽出

強度画像間の相関およびコヒーレンスにより、被害集中地域における地震前後の差異はより明確になった。相関の値は地震前同士・地震後同士のデータ組み合わせでは、市街地では大きく、地表面の変化のおきやすい植生地域では小さくなるのに対し、地震前後のデータ組み合わせでは、神戸から西宮にかけての市街地の相関は明らかに低下した。ただし、強度画像の相関、コヒーレンスとも、基線長の垂直成分が短い(139m 以下)データ組み合わせでは相関の良し悪しが明瞭であったのに対し、長いデータ組み合わせ(858m 以上)では、神戸から西宮にかけて以外の都市域における相関の値が低下し、パターンがかなりぼやけることが明らかになった。このように

コヒーレンスと類似した挙動を示したことから、強度画像の相関も 2 データ間の干渉性を反映していることが推察される⁶⁾。

地震前後の画像の相関を、地震前同士ないしは地震後同士の相関と比較するため、2 組のデータ組み合わせの相関性 ρ_1, ρ_2 の和分の差 (Normalized Difference) Nd を計算した。

$$Nd = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \times Gn + Of \quad (3)$$

ここで Gn はゲイン、 Of はオフセットであり、それぞれ 100 を用いた。

式(3)で ρ_1 を 93 年 9 月 12 日と 92 年 11 月 1 日に取得された強度画像の相関、 ρ_2 を 93 年 9 月 12 日と 96 年 2 月 27 日に取得された強度画像の相関として計算し、 3×3 で平滑化後、一定値以上を示す画素を抽出した結果が Fig.3 である。

Fig.3 は Fig.1 にみられる被害地域の分布とよく一致している。例えば Fig.1 では被害集中地域の西端は須磨区であり、長田区にかけての大規模な火災による焼失も含めて被害は広範囲に及んでいる。Fig. 3 においても後方散乱特性の変化が集中しはじめる西端は須磨区付近である。また、被害の空白域も Fig.1 と Fig.3 で一致している。東神戸港周辺、西宮港周辺では工場、公園などの占める面積が大きく、被害を受けた建造物はほとんどみられず、被害の空白域となっている。Fig.3 をみるとこれらの地域では後方散乱の変化は抽出されていないことがわかる。

3. 台湾大地震(集集地震)における被害地域抽出への応用

3.1 台湾大地震(集集地震)

1999 年 9 月 21 日に発生した台湾大地震は死不明者 4800 人以上、建物全壊 5 万戸以上の被害をもたらした。被害の大きかった都市には、震源地である集集のほか、東勢、埔里、日月潭、中寮、南投、霧峰などの山間部の小都市が挙げられる⁷⁾。台湾で 3 番目に大きい都市である台中市では建造物の被害は全半壊あわせて約 1000 戸であり、市街地の 1 割以下であった。

3.2 使用データおよびデータ処理

使用したデータは 99 年 1 月 21 日、99 年 5 月 6 日、99 年 9 月 23 日に CSRSR (Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University in Taiwan) で受信された ERS-2/SAR データである。生データを Vexcel 社の SAR プロセッサで処理することにより、SLC を生成した。SLC 画像から干渉処理を行うことによって 2 データ間のコヒーレンス画像および、また各データについて 2×10 のマルチルックの強度画像を生成した。

Fig.1 Damaged urban area from aerial photograph²⁾.

Fig.2 Intensity image of Kobe city (27 Feb. 1996)²⁾.

Fig.3 Area where the computed normalized difference of two intensity correlation was higher than a threshold²⁾.

3.3 解析結果

Fig.4 に地震後データのマルチルック強度画像を示す。被害のあった都市域について地震前後の強度画像を比較したものの、目視では明瞭な変化を見いだすことができなかった。

Fig.5 は 1 月 21 日取得データと 5 月 6 日取得データのコヒーレンスを ρ_1 、1 月 21 日取得データと 9 月 23 日取得データのコヒーレンスを ρ_2 とし、式(3)によって相関の変化があった地域を抽出し、3x3 ウィンドウで平滑化処理を 2 回おこない、一定値以上を示す画素を抽出した結果である。Fig.5 は河川流域の一部と都市域の一部で、地震前同士と地震前後のコヒーレンスに変化があったことを示している。河川流域の変化には季節的な影響も含まれていることが考えられる。しかし、河川流域以外に位置する都市域の変化は兵庫県南部地震の場合と同様、地震による建造物の倒壊による土地被覆の変化を表していることが推察される。特に、東勢、霧峰、埔里などの建造物倒壊が 5~6 割を越えた地域では、明らかなコヒーレンスの低下がおきたことが確認できる。

4. おわりに

兵庫県南部地震、台湾大地震とも光学センサ画像による被害地域の抽出が試みられているが、火災による焼失など被害の一部については検出されているものの建造物倒壊地域全域を把握するには至っていない。このことから本検討によって、ERS/SAR データの干渉性が人工衛星リモートセンシングによる都市災害の可視化に有用であることを示すことができたのは重要である。また、ここでは抽出された情報をよりわかりやすく可視化するために 2 組の相関の和分の差を用いた。干渉性を利用

するためにはデータ取得条件などに左右されるところが大きいため、データ組み合わせの選定に留意する必要がある。今後、他衛星搭載 SAR データの利用可能性についても検討していきたい。

謝辞

本研究で用いた ERS-1/SAR データは宇宙開発事業団から研究目的で提供をうけたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 米澤千夏, 竹内章司: SAR 画像における地表の後方散乱特性の変化抽出, (社)日本リモートセンシング学会第 24 回学術講演会論文集, pp.119-120, 1998.
- 2) 米澤千夏, 竹内章司: ERS-1/SAR 強度画像を用いた兵庫県南部地震による建造物被害地域の抽出, 写真測量とリモートセンシング, Vol.37, No.4, pp.57-61, 1998.
- 3) 竹内章司, 菅雄三, 小黒剛成, 小川博道, 米澤千夏, A. J. Chen: 1999 台湾大地震(集集地震)被害抽出のための SAR データ解析の試み, (社)日本リモートセンシング学会第 28 回学術講演会論文集, 2000.
- 4) 国土地理院: 平成 7 年兵庫県南部地震災害現況図(第・版), 国土地理院技術資料, D-1-No.322, 1995.
- 5) Zebker, H. A., and Villasenor, J.: Decorrelation in Interferometric Radar Echoes, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 30, No. 5, 1992.
- 6) Yonezawa, C. and Takeuchi, S.: Detection of Urban Damage Using Interferometric SAR Decorrelation, Proceedings of IGARSS'99 Symposium, pp.925-927, 1999.
- 7) 国際航業株式会社, 1999 年 9 月 21 日台湾大地震(集集地震)の記録, 1999.

Fig.4 Intensity image of central Taiwan (23 Sep.1999).

Fig.5 Area where the computed normalized difference of two coherence was higher than a threshold.