

トルコ・コジャエリ地震の被災地における 人工衛星 SAR 画像の特徴

松岡 昌志¹, 山崎 文雄²

¹博士(工学) 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山 2465-1)

²正会員 工博 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山 2465-1)

合成開口レーダ(SAR)は衛星から照射したマイクロ波の地表での後方散乱特性(強度と位相)を測定することから、建物の倒壊など地表に凹凸の変化がある場合にはそれを検知できる可能性を持っている。本報告では1999年のトルコ・コジャエリ地震を対象に、マルマラ海周辺の広い地域を観測したERS衛星の地震前後SAR画像の特徴を調べ、被害調査結果との比較を行った。その結果、建物の倒壊等あるいは瓦礫化した地域では、地震後の画像において後方散乱強度が小さくなり、被害が報告されていない地域では位相がほぼ保存されていることがわかった。

Key Words: Synthetic Aperture Radar (SAR), Satellite Remote Sensing, Earthquake Damage, Backscattering Feature, the 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake

1. はじめに

合成開口レーダ(SAR)を搭載した人工衛星によるリモートセンシングは天候の制約を受けないため、夜間や曇天の状況下においても地表の観測が可能である。そのため、地震や火山等に伴う地殻変動や災害状況等の面的把握への利用において、最も期待されている技術のひとつである。SARは衛星から照射されたマイクロ波の地表における反射(後方散乱成分)を観測し、その画像には後方散乱成分の振幅(強度)情報と位相情報が含まれる。著者らはその内の強度情報を利用することで、建物に甚大な被害を受けた地域の概略把握ができることを1995年の兵庫県南部地震を例に示した¹⁾。これは、建物被害の著しい地域では後方散乱強度が低下することを利用して

一方、位相情報を利用するインターフェロメトリ解析では地盤変動の把握が可能であることが1992年のLanders地震や兵庫県南部地震での事例から既に明らかにされていたが^{2),3)}、位相の干渉性を評価するコヒーレンス解析からも建物被害地域の抽出が可能であることを示唆する事例が兵庫県南部地震での検討から示されている^{4),5)}。以上のように、SAR画像に基づいた建物被害地域の把握に関する検討は神戸での地震を対象にした例があるものの、他地域での地震被害に対して検討していないため、その一般性については確定的ではない。

1999年8月17日にトルコ・コジャエリ県周辺で発生した地震(Mw7.4)は、マルマラ海沿岸の主要都市とその周辺地域の極めて広範囲に甚大な被害をもたらした。この地震の前後ではSARを搭載したERS衛星が被害地域を観測している。ここでは、SAR画像にみられる建物被害地域の特徴を明らかにし、建物被害地域の広域的把握を試みた。

2. SARによる観測

SARが用いる電磁波は可視域や赤外域よりも長い波長を持った位相のそろったコヒーレントなマイクロ波である。従って、可視域から赤外域における地表での反射/放射特性を観測する光学センサ画像とは質的に異なった情報がSAR画像には含まれている。SARによって照射されたマイクロ波は、地表付近の物質の形状や物性、表面の状態などによって変化する。そして、センサは地表で反射して戻ってきた後方散乱成分を観測する。後方散乱強度の大きさはマイクロ波の波長や地表への入射角度、地表面の凹凸等の影響を受ける。観測される位相についても大気や地表付近の状態によって複雑になる。

地震などによって地表に何らかの変化が発生した場合、後方散乱の強度や位相が変化するため、地震前後のSAR画像を比較することで、その変化域を抽出することが可能である。図-1に人工衛星が地震前後に被害地域を観測する模式図を示す。地震前に人

工衛星 Sat-1 により照射されたマイクロ波は、建物と道路との間での複数反射（カージナル効果）によって後方散乱強度は大きくなるが、地震後の衛星 Sat-2 によって被害地域に照射されたマイクロ波は、例えば倒壊建物による多方向散乱の影響で衛星に戻る成分は小さい。つまり、地震前後では後方散乱特性の空間分布（スペックルパターン）が異なることが予想され、その変化は後方散乱強度の差分や相関で表現できる。

また、2 時期の SAR 画像に含まれる位相情報の干渉性を評価するコヒーレンス解析からも観測期間内での地表の微小な変化を表現できる。ただし、マイクロ波の波長以上の感度を有している位相情報を利用する場合には、2 時期の画像の空間的および時間的制約を受ける。空間的な制約とは、図-1 に示すように 2 つの衛星間の距離（ベースライン長） B が大きいと画像全体で干渉性が低下するため、抽出したい地表変化に起因する低コヒーレンス地域が埋もれてしまう。時間的な制約とは 2 時期の観測間隔であり、それが長い場合は抽出したい変化だけではなく経年的な変化が起こることから、両者を区別することが困難になる。

従って、地震による被害地域の抽出に位相情報を利用する際には 2 時期の衛星軌道ができるだけ等しく、地震前と後の観測間隔が短い方がよい。強度情報を利用する場合にも同様の条件が望ましいが、位相情報ほど敏感ではないため、甚大な被害域を抽出する上ではそれほど問題ないと考えられる。

3. SAR 画像データ

トルコ・コジャエリ地震での被害地域を推定するにあたり、前述の観測条件をほぼ満足する画像のペアとして欧州宇宙機関の ERS 衛星が 1999 年 8 月 13 日（地震前）と 1999 年 9 月 17 日（地震後）に観測したものがある。衛星軌道間のベースライン長は約 30m と干渉させることが十分期待できる。ERS/SAR

の仕様を表-1 に示す。データはシングルルック複素画像であり、地上分解能はマイクロ波の照射方向（ほぼ東西）に約 20m、衛星の軌道方向（ほぼ南北）に約 4m、である。シングルルック画像にはスペックルノイズが多く含まれているため、それを軽減するために 1×5 ピクセルのウィンドウを用いて 5 ルック相当のマルチルック強度画像を作成した。地震後の強度画像を図-2 に示す。イズミット、ギョルジュク、アダパザルなどの市街地は強度が大きく、画像上では白色で表現される。水域でも波浪のない地域や植生域では後方散乱強度が小さく、画像上では黒色で表現される。

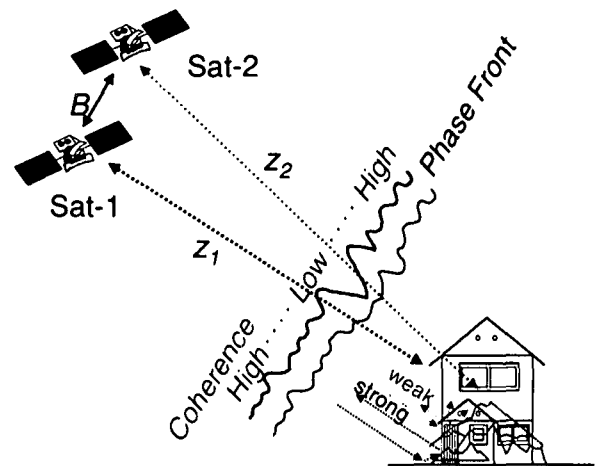


図-1 人工衛星 SAR による被害地域観測の模式図

表-1 ERS/SAR の仕様

Frequency	5.3GHz (C-band)
Wavelength	5.7 cm
Polarization	VV
Incidence Angle	23°
Swath Width	100 km

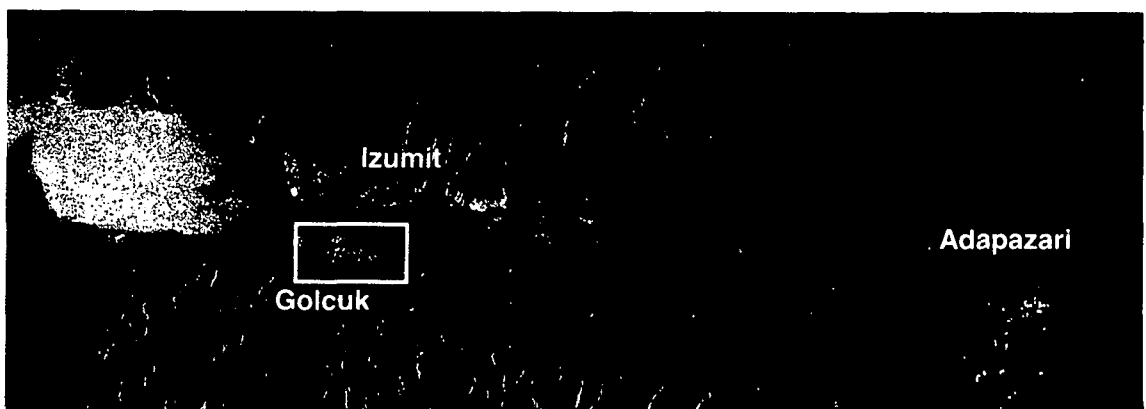


図-2 地震後（1999/9/17）の ERS/SAR 強度画像

地震前後での強度の変化を求めるために、地震後の強度画像から地震前それを引いた差分画像を作成した。また、地震前後の強度画像の空間的な違いを評価するために相関計数を算出し、相関画像を作成した。その際のウインドウサイズは3 x 15ピクセルとし、得られた画像に対し1 x 5ピクセルのウインドウで平均化を施した。

次に2時期のSAR画像に含まれる位相成分の干渉性を評価するためにコヒーレンスを(1)式により算出した。

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{i=1}^N Z_{1i} Z_{2i}^* \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |Z_{1i}|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N |Z_{2i}|^2}} \quad (1)$$

ここで、 γ はコヒーレンスの程度、 Z_1, Z_2 はそれぞれ地震前と後の複素画像データ、 N は計算するウインドウ内のピクセル数を表す。ここでは、相関係数の算出の場合と同様に3 x 15ピクセルのウインドウを用いたため、 N は45となる。さらに、得られたコヒーレンス画像に対し1 x 5ピクセルのウインドウで平均化を施した。

4. ギョルジュクにおけるSAR画像の特徴

この地震ではギョルジュク及びその周辺において、日本建築学会が被害建物の全数調査を行っている⁶⁾。図-3にギョルジュクにおける倒壊率の分布を示す。

東西に走るアタチュルク通りより北側で建物倒壊が多く発生している。本研究では建物の被害程度とSAR画像の変化を定量的に検討するためにギョルジュク地域において詳細な検討を行った。

ギョルジュク周辺(図-2の矩形)における地震後の強度画像、強度画像の差分、強度画像の相関、コヒーレンス画像を図-4(a)~(d)に示す。図-4(b)の差分画像中の黒色で示す地域(地震後に強度が低下した地域)は図-3に示す倒壊率の高い地域と概ね対応する。一般に相関係数やコヒーレンスは市街地で大きく、植生地域や裸地では小さくなる。しかし、建物被害などの変化が起こった地域では市街地であっ

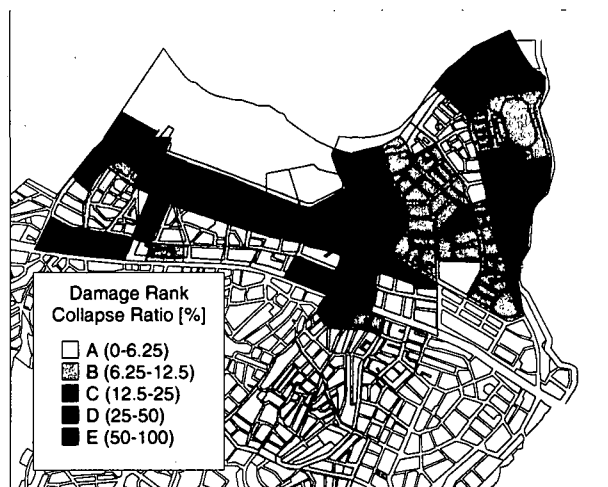
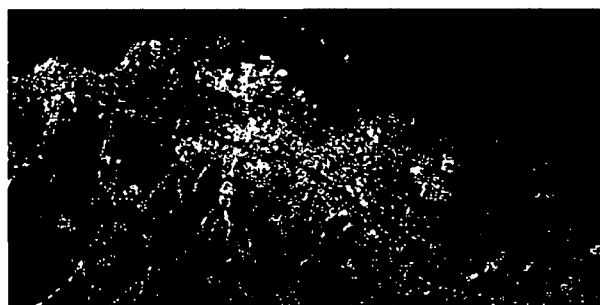
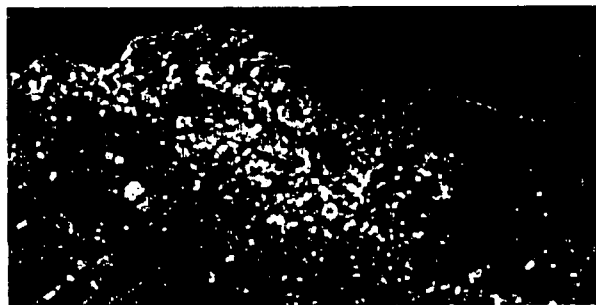


図-3 ギョルジュクでの建物倒壊率分布⁶⁾



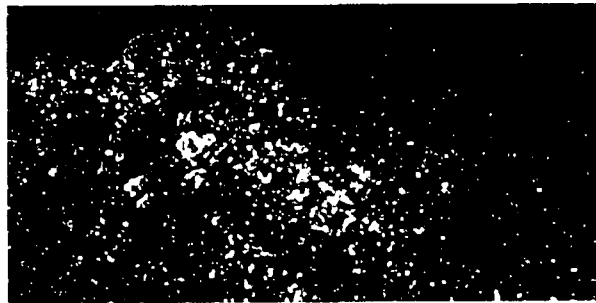
(a) 地震後の強度画像



(c) 地震前後の強度の相関画像



(b) 地震前後の強度の差分画像



(d) 地震前後のコヒーレンス画像

図-4 ギョルジュクにおけるSAR画像

表-2 被害程度ごとの後方散乱強度、強度差分、相関係数、コヒーレンスの平均値（標準偏差）

Damage Rank Collapse Ratio[%]	Number of Pixels	Intensity [dB]		Difference After-Before	Correlation of Intensity Image	Degree of Coherence
		Before	After			
A (0-6.25)	2,791	42.7 (4.7)	42.4 (4.8)	-0.3 (3.9)	0.36 (0.24)	0.32 (0.17)
B (6.25-12.5)	835	43.5 (4.6)	43.8 (4.8)	0.3 (4.5)	0.29 (0.25)	0.30 (0.16)
C (12.5-25)	719	43.7 (4.4)	43.6 (4.2)	-0.1 (4.0)	0.29 (0.23)	0.26 (0.13)
D (25-50)	1,003	44.2 (4.9)	42.9 (5.2)	-1.3 (5.1)	0.24 (0.25)	0.26 (0.14)
E (50-100)	83	46.6 (5.0)	44.1 (4.1)	-2.5 (6.2)	0.16 (0.19)	0.26 (0.12)

でもこれらの値が低下すると考えられる。鮮明ではないが、図-4 (c), (d)の画像中の市街地内に分布する黒色の地域は倒壊率の高い地域と概ね対応する。

次に、図-3と図-4をGISで重ね合わせ、被害ランクごとにピクセルを抽出した。ここで、被害ランクAとは倒壊率が0~6.25%の地域を、ランクBは6.25~12.5%、ランクCは12.5~25%を、ランクDは25~50%を、ランクEを倒壊率が50~100%の地域とした。それぞれの被害ランクにおける地震前後の後方散乱強度値、強度の差分値、相関係数、コヒーレンスのそれぞれの平均値と標準偏差を表-2に示す。いずれに指標においても標準偏差が大きく、値にバラツキがある。しかし、平均値をみると被害程度と傾向がみられる。例えば、差分は被害程度の大きい範囲（ランクC~D）での値の低下が顕著であり、コヒーレンスは被害程度の小さい範囲（ランクA~C）で違いがみられ、被害の小さい地域でコヒーレンスの値が大きい、相関係数は被害程度が大きくなるほど値が小さくなる。

以上のような傾向は神戸での結果^{1),4),5)}と調和的であり、倒壊建物が多く存在する地域ほど地表の凹凸や材質的な変化が著しく、それがマイクロ波の後方散乱強度と位相に影響を及ぼすと考えられる。

5. SAR 画像による被害地域の推定

ギョルジュクでの被害調査結果とSAR画像の特徴から、被害程度が大きいほど地震前後のSAR画像の強度差分値、相関係数、コヒーレンスが概ね小さくなることを確認した。衛星画像全域に対して被害地域分布を推定するためには、本来これらの指標の変化が被害程度に及ぼす影響を多変量解析等によって詳細に検討する必要があるが、ここでは適当な閾値を用いたレベルスライスによって簡便に被害地域の推定を試みた。

まず、被害程度が小さい場合にコヒーレンスが大きいことを利用し、コヒーレンスが0.35以上の地域を無被害地域と推定する。コヒーレンスが0.35未満の地域は、さらに、地震前後の強度の差分値を考慮し、その値が-2以上の地域について小被害地域と推定する。差分値が-2未満の地域については、さらに、

相関係数を考慮し、その値が0.2以上の地域について中被害、0.2未満の地域について大被害と推定する。その結果、イズミットでは無被害あるいは小被害地域が広く分布し、アダパザルでは広い範囲で中~大被害地域が分布する。これらは現地調査に基づく被害報告とほぼ対応する。

6. まとめ

トルコ・コジャエリ地震を対象に、人工衛星SAR画像による被害把握に関する基礎的検討を行い、被害地域におけるSAR画像の特徴を定量的に明らかにした。その結果、倒壊建物が多く分布する地域では地震後のSAR画像の後方散乱強度が地震前に比べて低下し、そのスペックルパターンが変化することがわかった。また、被害が報告されていない地域では地震前後で位相がほぼ保存されることがわかった。

謝辞：ERS画像は欧州宇宙機関より提供を受けた。

参考文献

- 1) Aoki, H., Matsuoka, M. and Yamazaki, F. (1998) : Characteristics of Satellite SAR Images in the Damaged Areas due to the Hyogoken-Nanbu Earthquake, *Proc. 19th Asian Conference of Remote Sensing*, pp.C7/1-6.
- 2) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Fiegl, K. and Rabaute, T. (1993) : The Displacement Field of the Landars Earthquake Mapped by Radar Interferometry, *Nature*, 364, pp.138-142.
- 3) Ozawa, S., Murakami, M., Fujiwara, S. and Tobita, M. (1997) : Synthetic Aperture Radar Interferogram of the 1995 Kobe Earthquake and Its Geodetic Inversion, *Geophysical Research Letters*, Vol.24, No.18, pp.2327-2330.
- 4) Yonezawa, C. and Takeuchi, S. (1999) : Detection of Urban Damage Using Interferometric SAR Decorrelation, *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, CD-ROM.
- 5) Matsuoka, M. and Yamazaki, F. (2000) : Interferometric Characterization of Areas Damaged by the 1995 Kobe Earthquake Using Satellite SAR Images, *Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering (CD-ROM)*, Paper ID 2141, 2000.
- 6) AIJ reconnaissance team, Kabeyasawa, T. et al. (1999) : Progress Report on Damage Investigation after Kocaeli Earthquake by Architectural Institute of Japan, *Proc. ITU-IAHS International Conference on the Kocaeli Earthquake 17 August 1999*, pp.239-270.