

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

APPLICATION OF A METHODOLOGY FOR DETECTING BUILDING-DAMAGE AREA TO RECENT EARTHQUAKES USING SATELLITE SAR INTENSITY IMAGERIES AND ITS VALIDATION

松岡昌志*, 山崎文雄**

Masashi MATSUOKA and Fumio YAMAZAKI

The 1994 Northridge and the 1995 Kobe earthquakes realized us the importance of grasping damage information on built-up areas in the early stage for recovery activities and restoration planning. One of the remarkable characteristics of synthetic aperture radar (SAR) is its capability of recording the physical value, called the backscattering coefficient, of the earth's surface under independence of weather condition and sun illumination. Therefore SAR could be a powerful tool and possibly be used to develop a universal method for grasping damaged areas during disasters such as earthquakes, forest fires and floods. Detailed ground truth data with building damage due to the 1995 Kobe earthquake provided us the opportunity to examine the relationship between the backscattering property and degree of damage. From the above analysis we have already developed a method to detect areas of building damage. In this paper, we introduced the automated detection method using the average difference in the backscattering coefficient and the spatial correlation derived from the pre- and post-event speckle-reduction-filtered images. Then we applied this method to the images taken over the area hit by the 1993 Hokkaido Nansei-Oki, Japan, the 1999 Kocaeli, Turkey, and the 2000 Gujarat, India earthquakes, and then the accuracy of the proposed method was examined by comparing the results of the analyses with those from the damage surveys.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR) Intensity Images, Building Damage Area, Automated Detection, the 1999 Kocaeli (Turkey) Earthquake, the 2001 Gujarat (India) Earthquake, the 1993 Hokkaido Nansei-oki Earthquake

合成開口レーダ(SAR)強度画像, 建物被害地域, 自動判読, 1999年トルコ・コジャエリ地震, 2001年インド・グジャラート地震, 1993年北海道南西沖地震

1. はじめに

発展途上国などの大都市における大規模・広域災害においては、被害の全体像の把握は容易ではない。また、地震動モニタリングやライフライン関連のフロー・モニタリングを活用したリアルタイム地震防災システム^{1),2)}が利用可能だとしても即時被害推定と実被害情報との間にはある種のタイムラグが存在し、被害が広範囲になるほど被害量の確認には時間がかかることが予想される。そのため、適切な被害対応には所要時間と要求精度のバランスを考慮した上で、時間の経過とともに蓄積される被害情報を逐次取り入れて意志決定を行うことが重要である³⁾。ところで、ヘリコプター、航空機、人工衛星などから被災地を観測することは、即時被害推定と実被害情報との間に存在する時間面・空間面・精度面でのギャップを埋める有望な手段との指摘がある⁴⁾。とくに人工衛星によるリモートセンシングでは広範囲を一度に観測できることから、大規模・広域被害の全貌の概略推定や逐次推定の面的な精度向上に活用できる可能性がある。

リモートセンシングは地球環境のモニタリング手法として発達した技術であり、都市の空間構造解析⁵⁾など都市環境の分野では以前から

応用されてきた⁶⁾。人工衛星の回帰観測を利用することで、土地利用(被覆)の経年変化を抽出する研究も多い^{例え⁷⁾}。都市防災の観点では避難空間の把握^{8),9)}や火災の延焼危険度分析¹⁰⁾に衛星データが活用され、地震被害と対比する研究には、液状化の発生しやすい地域を推定するといった危険度判定の観点で論じたものが幾つかある^{例え¹¹⁾}。しかし、人工衛星の地上解像度が粗いこともあり、地震後に観測された画像から被害判読を試みた例は数少なく、土地被覆の経年変化の抽出と同様に過去に得られた画像との比較から判読することになる^{12),13)}。

ところで、災害時にリモートセンシング技術を適用して被害地域の判読をする場合、それは冗長性に富んだ観測形態のもと、できるだけ現地検証用(グラウンドトゥルース)データを使わずに、処理時間を必要としない簡便かつ汎用的な手法を用いることが望ましい。リモートセンシングのレーダセンサのひとつである合成開口レーダ(SAR)はマイクロ波の地表での反射(後方散乱)強度と位相差などを計測する能動型システムである。受動型の光学センサとは異なり、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。さらに重要なことはSARから得られる強度情報は地表の凹凸や誘電率に強く依存した物理量

* 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
副チームリーダー・博士(工学)

** 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・工博

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

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

(後方散乱係数)である。この特徴は地表での変化の様相を相対的ではなく絶対的に計測できることを意味している。複数時期に観測された画像から後方散乱係数の変化が計測でき、これが目的とする地表での変化量(ここでは建物被害の程度)と対応するならば、それは異なる観測環境の他の地域においてもそのまま適用できる可能性がある。このような着眼のもと、著者らは1995年兵庫県南部地震の前後に観測された欧州宇宙機関のERS(European Remote Sensing Satellite)のSAR画像と建物被害に関する詳細な現地調査のデータセットに基づいて、後方散乱係数の変化と建物被害の関係を明確にした上で¹⁴⁾、建物の甚大被害地域を検出する手法を構築した¹⁵⁾、¹⁶⁾。ただし、この検出手法は一般性や汎用性を重視した考え方に基いてはいるものの、事例がこの一地震にすぎないことから世界各国で発生している他の被害地震に適用することで手法の妥当性を検証する必要がある。そこで、本報では最近の被害地震のうち、広い範囲で建物の甚大被害が発生した1999年トルコ・コジャエリ地震と2001年インド・グジャラート地震に被害検出手法を適用して現地調査データ等との比較を行う。また、兵庫県南部地震以外のわが国の被害地震への適用例として、津波により多くの建物流出を被った1993年北海道南西沖地震も取り上げた。

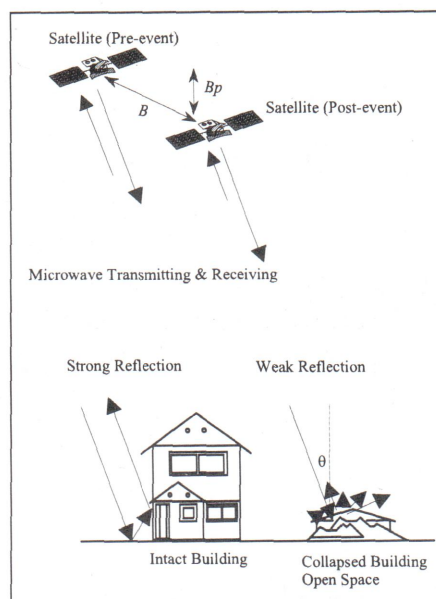


図-1 人工衛星 SAR による観測の模式図

2. SARによる建物被害地域の検出手法

2.1 被害検出手法の概要

可視光域や赤外線域よりも長い波長の電磁波にマイクロ波がある。SARは航空機や人工衛星などのプラットフォームの進行方向に対して横向きでかつ斜め下方の地表に向けて位相のそろったマイクロ波を照射して、地表での後方散乱の強度と位相をスペックルパターンとして観測する¹⁷⁾。そのため、可視光～赤外域における地表での反射/放射特性を観測するランドサット衛星などの光学センサ画像とは質的にまったく異なった画像が取得される。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)によって後方散乱強度は大きくなる¹⁷⁾。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] の差分や相関係数で表現できることが兵庫県南部地震でのデータセットから明らかになっている¹⁴⁾。また、SAR画像の時系列解析からこれらの指標の変化は地震の発生と密接な関係がある¹⁶⁾。この後方散乱係数の変化から建物の被害程度を推定することが検出手法の基本的な考え方である。

被害地域の検出までのフローを図-2に示す。まず、マルチルック処理された地震前後の強度画像を用意する。地震前の画像は季節や天候などの条件ができるだけ地震後と同等のものを選定することが好ましいが、光学センサと比較するとこれらの影響は格段に小さい。次に、準備した地震前後の衛星画像のピクセル(画素)を正確に合わせる(レジストレーション)。両方の画像から相関係数の高い対応点を求め、アフィン変換などにより幾何補正係数を算出し、ひとつの画像に対して最近隣挿法¹⁸⁾などによりピクセルの再配列を行う処理である。自動的かつ高精度にレジストレーションを行う技術も開発されている¹⁹⁾。画像の位置合わせの後、それぞれの画像に21x21ピクセルウインドウのスペックル低減フィルタ(Leeフィルタ²⁰⁾)を施す。強度差分は13x13ピクセルウインドウ内の後方散乱係数の平均値について地震後の値から地震前のそれを引くことで求め((1)式)、相関係数についても13x13ピクセルウイ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。

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

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

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

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 は計算するウインドウ内のピクセル数を表す。13x13ピクセルのウインドウを用いるため、 N は169となる。 $I a_i$ 、 $I b_i$ は地震後と地震前のそれぞれの画像の*i*番目におけるピクセル値、 $\hat{I} a_i$ 、 $\hat{I} b_i$ は*i*番目におけるピクセルの周囲13x13ピクセルの平均値である。ここで用いるフィルタやウインドウサイズは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²¹⁾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¹⁵⁾。なお、甚大被害地域とそれ以外の地域という判別境界線に基づいた離散値的な表現¹⁴⁾、¹⁶⁾ではなく、本報では判別関数から求まる判別得点という連続値で表すことで、建物被害の程度との関連について検討する。

2.2 災害時に適用可能な要件と手法の特徴

図-3は兵庫県南部地震前後のERS画像から求めた判別得点 z の分布(z が1以上を赤色濃淡表示)を地震前の強度画像に重ねたものである。 z の値が大きい地域は現地調査²¹⁾による甚大被害の帯とよく対応するが、大阪平野や兵庫県内の谷底平野にも部分的に被害地域が抽出されることから、本手法からは広域での被害地域の概略推定が可能といえる。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-5dB以下の地域はマスクしている。このマスク処理はマイクロ波の波長や入射角、市街地の構造などに依存す

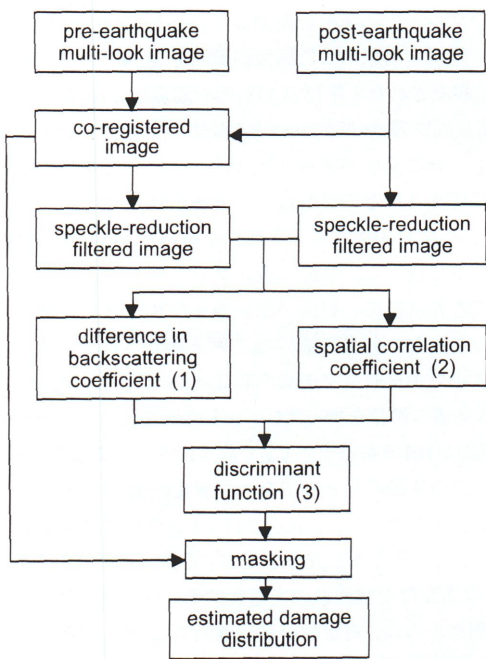


図-2 建物被害地域の検出手法

ることが予想されるが、以降の章で示すようにその閾値は経験的にマイナス数 dB である。

ところで、SAR画像に含まれるもうひとつの情報である位相情報が利用できる条件下であれば、干渉処理により相対的な地殻変動の面的把握^{22), 23)}や、干渉の度合いを表す指標(コヒーレンス)からは軽微な被害を含む建物被害地域を検出できるとの指摘がある^{24), 27)}。この条件とは主に2時期の衛星間隔と観測の時間間隔である。図-1に示す2つの衛星間距離(ベースライン長)の鉛直成分 B_p が長いと画像全体でコヒーレンスが低下するため、検出したいはずの低コヒーレンス地域(被害地域)が埋もれてしまう。そして、観測間隔が長い場合には検出したい変化だけでなく経年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。後者の問題については、コヒーレンス比を導入することで時間の経過に伴うコヒーレンスの減少を評価しつつ、被害の程度を推定するモデルが提案されているが²⁷⁾、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ない。したがって、コヒーレンスから被害地域と無被害地域を区別するための第一条件は2時期の衛星の軌道が近いことである^{26), 28)}。この条件を満足するためには、1995年兵庫県南部地震ではわが国のJERS(Japanese Earth Resources Satellite)が地震の20日後²⁹⁾と比較的に恵まれていたが、ERSの場合は軌道変更などの時期と重なり約1年後の画像取得となった^{26), 27)}。1994年ノースリッジ地震では干渉処理が適用可能な画像はJERSが半年後^{29), 30)}、ERSが1年3ヶ月後²⁹⁾に観測したものである。このように、コヒーレンスを利用できる観測機会が非常に少ないのが現状である。ただし、今後打ち上がる衛星に対しては高精度の軌道制御を可能にすることから干渉処理できる画像は格段に増えるとの指摘もある³¹⁾。

一方、強度相関はスペックルパターンの変化がコヒーレンスと等価であり³²⁾、観測事実として市街地での強度相関には衛星間距離の影響が小さいことが示されている²⁶⁾。観測条件の制約を受けけない指標を利用することが災害時や緊急時の被害把握にリモートセンシング技術を実用化するための必須要件との考えで、本研究では強度情報を利用している。ちなみに、図-3の結果は地震発生日の1995年1月17日に対

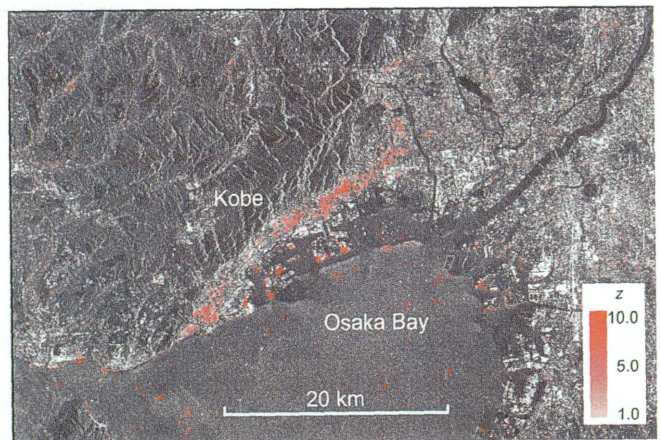


図-3 1995年1月17日兵庫県南部地震前後のSAR画像から抽出した建物被害地域の分布(赤色)
(ERS: 1994/10/12 - 1995/05/23)

して時期的に最も近いペア(1994年10月12日と1995年5月23日)を使用している。1993年12月から1995年3月まではERSの軌道変更が実施されていたために定期的な観測ができず、被災地を観測した初めての画像が地震の4ヶ月後であった²⁹⁾。よって、地震前に画像を取得した時は軌道変更中のため地震後とは全く異なる軌道である。このようなペアでは位相が干渉しないため、コヒーレンスを用いた被害地域の特定は不可能であるが、強度情報からは被害地域の大局的な分布を浮き立たせることができています。

とはいえ、現状の人工衛星は数が限られており、それぞれの回帰日数が数〜数十日と長いことから、地震後の観測画像がリアルタイム地震防災システムの要求する被害の早期把握のフェーズに応えることが困難な場合もある。例えば、地震直後における衛星への観測要求や受信施設へのデータのダウンリンク、解析処理を行う施設までのデータ伝送や解析に要する時間など課題も多い。また、地震前の画像を絶えず蓄積・更新するアーカイブも必要であろう。しかし、将来わが国をはじめとして複数の衛星が打ち上げられ³³⁾、データ処理や転送技術の高度化も進み³⁴⁾、世界的枠組みの中で上記の課題を克服する方向に進むことが期待されることから³⁵⁾、世界各地で多発する災害状況の把握手段としての人工衛星の利用価値が高まっていくものと予想される。そのため、本報での内容は衛星リモートセンシングによる早期被害把握の可能性をリアルタイム地震防災システムへの実用化を念頭に置いて検討した実証的事例研究として位置づけられよう。

3. 被害地震と被害地域の検出に用いた SAR データ

最近発生した被害地震に対して上述の手法を適用し、現地調査報告や詳細な建物被害データとの比較を行う。対象とする被害地震として、層崩壊などの建物倒壊が集中して多数発生し、それが面的に広い範囲に分布した1999年のトルコ・コジャエリ地震、2001年のインド・グジャラート地震を取り上げた。また、1993年の北海道南西沖地震にも適用し、地震直後の大津波によって多くの木造家屋が流失した地域の検出可能性についても検討した。

1999年8月17日にトルコ共和国の西部で発生したMw7.4のコジャエリ地震はイズミット市とその周辺地域において広域かつ甚大な被害が生じ、死者数が1万7千人、全壊家屋は7万7千戸を超える大災害となった³⁶⁾。この地震ではERSが地震後にトルコ西部地域を観測しており³⁷⁾、ここでは西はイズミット湾南岸のアルティノア半島付近から

表-1 SAR搭載の人工衛星の仕様

	ERS	RADARSAT	JERS
Frequency	C-band	C-band	L-band
Wavelength	5.7 cm	5.7 cm	23.5 cm
Polarization	VV	HH	HH
Incidence angle	23°	10~60°	38.7°
Swath width	100 km	50~500 km	75 km
Spatial resolution	30 m	8~150 m	18 m
Recurrence period	35 days	—	44 days

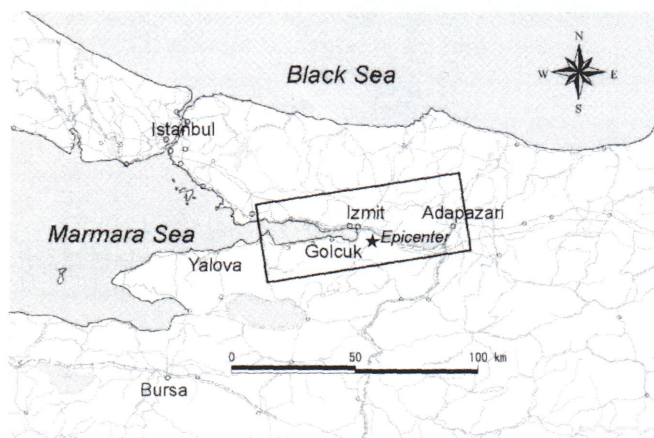


図-4 1999年トルコ・コジャエリ地震の解析対象範囲(ERS衛星)

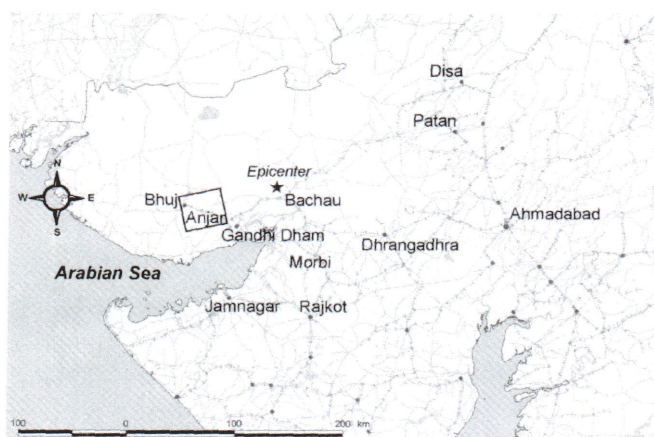


図-5 2001年インド・グジャラート地震の解析対象範囲(RADARSAT衛星Fineモード)

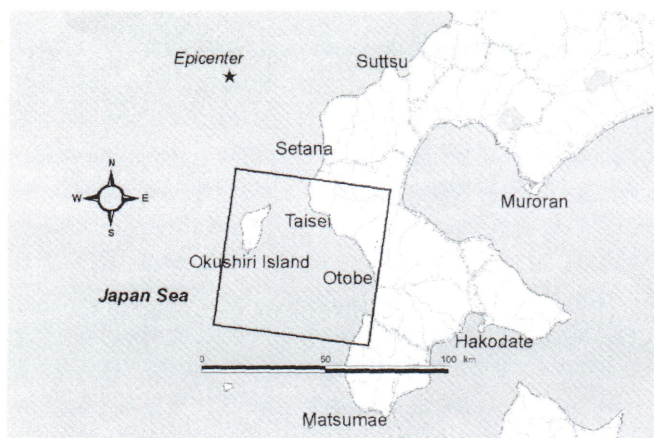


図-6 1993年北海道南西沖地震の解析対象範囲(JERS衛星)

東はアダパザルまでの範囲を観測している1999年9月17日の画像を利用した。解析の対象にした画像の範囲を図-4に示す。なお、地震の4日前に観測された8月13日のものを地震前の画像として用いた。2時期の衛星間距離 Bp は約30mと短いことからマイクロ波の位相を利用して十分な干渉が得られ³⁸⁾、コヒーレンスも被害判読のための指標として使えるほどの良好なペアである²⁴⁾。

2001年1月26日未明にインド西部を襲ったMw7.7(USGS発表)のグジャラート地震では、震源に近いブジから300km離れたアーメダバードまでの非常に広い範囲が被災地となり³⁹⁾、インド政府の発表では死者数は2万人、全壊家屋が72万戸と報告されている。この地震での解析にはカナダ航空宇宙局のRADARSATを用いた。この衛星はERSとほぼ同様の波長を持ったCバンドの周波数にて地表を観測するが、偏波制御がHHである点がVVであるERSとは異なる(表-1参照)。SARは電磁波の特徴のひとつである偏波を制御でき、Hは水平偏波をVは垂直偏波を表す。ここで表現されるHHの記号はSARから送信する偏波と地表での後方散乱成分を受信する偏波が水平であることを意味し、VVは送受信が垂直偏波を意味する。市街地を観測した高分解能のSAR画像からは、対象物が高層建物でない限りVVとHHでは得られる後方散乱強度に大きな違いがみられないことから⁴⁰⁾、この地震での被害検出にも本手法が適用できると考えられる。RADARSATは複数の観測モードやビームポジションによりマイクロ波の入射角、観測幅、地上解像度が可変である。ここでは、地震前画像の有無の関係から、Fineモードのビームポジション5を用いた。これは入射角が約46°、地上解像度とピクセルサイズは約8mであり、詳細な被害地域の検出が期待される。ただし、地上解像度が高いことから観測幅は狭く、図-5に示すように西はブジから東はアンジャールまでの約40kmの範囲である。なお、地震前(1999年12月31日)と地震後(2001年2月11日)の衛星間距離 Bp は6km以上も離れている。したがって、マイクロ波の位相はまったく干渉しないためコヒーレンスによる被害検出は期待できない。

1993年7月12日に北海道奥尻島の北を震源とするMw7.7の北海道南西沖地震が発生し、家屋、船舶、港湾施設に多くの被害をもたらした。奥尻島では大津波の来襲により沿岸付近に立地していた多くの家屋が流失し、青苗では地震火災が同時多発的に発生して約200棟が焼失した。津波と崖崩れによって201名が犠牲になり、全壊家屋は1,157棟に達した⁴¹⁾。この地震ではJERS(地上解像度とピクセルサイズは18m)が1993年8月21日に被災地を観測している(図-6参照)。JERSがERSやRADARSATと比べて大きく異なる点はマイクロ波の周波数がLバンド、つまり波長が約23cmと長いことである(表-1参照)。理論的にはERSやRADARSATが採用している波長の短いマイクロ波の方が地表の変化に対して敏感であるが、建物倒壊のような大きな地表変化を検出する目的では波長の長さの影響は小さいことが確認されている^{15), 16), 42)}。この地震では発生前の画像として1993年7月8日に観測したものを用意した。2時期の衛星間距離 Bp は約220mで位相情報でも十分な干渉が期待できるペアである。

4. 被害地域の検出結果と実被害との関係

図-2のフローにしたがい建物被害地域の検出を試みる。まず、地震前後の画像のレジストレーションを既報¹⁶⁾と同様の方法で行い、その後、21x21ピクセルウインドウのスペックル低減フィルタを適用した。フィルタサイズが大きいことから、フィルタ済みの画像は全体的にぼやけたものになり、対象物の目視による判読は困難になるが、画像処理に基づき被害地域を特定する上では都合がよい¹⁵⁾。そして、

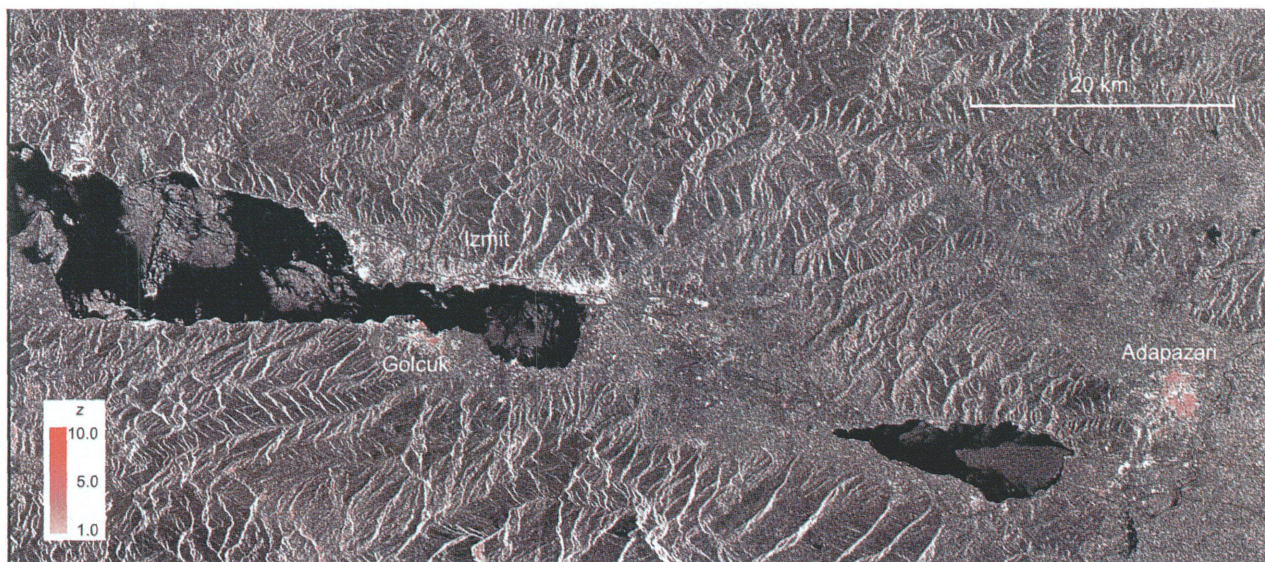


図-7 1999年8月17日トルコ・コジャエリ地震前後のSAR画像から抽出した建物被害地域の分布(赤色)
(ERS: 1999/08/13 - 1999/09/17)

フィルタ済みの画像から後方散乱係数の差分と相関係数を算出し、画像全域について判別得点 z を求めた。その際のウィンドウサイズは兵庫県南部地震での例と同様に13x13ピクセルとしている。

4.1 1999年トルコ・コジャエリ地震

地震前の画像に判別得点 z の分布を重ねた結果を図-7に示す。対象地域を市街地に限定するための閾値は-6dBとした。ギョルジュクとアダパザルの広い範囲において赤色で示す被害地域が検出され、イズミットやイズミット湾の北側の都市域では甚大被害地域がそれほど抽出されない。この分布は現地調査による被害建物統計⁴³⁾とよく対応する。この調査は地震後1週間以内実施され、集計単位が近隣や街区であったり、市内であったりと統一されたものではない⁴³⁾。したがって、正確な被害量を表しているデータとはいえないが、被害の全体像としては大きな間違いがないものと考えられる。より詳細な被害データにはギョルジュク及びその周辺において実施された被害建物の全数調査がある³⁶⁾。ギョルジュクにおける街区単位の建物倒壊率(EMS-98⁴⁴⁾のD5に該当する建物の割合が0~6.25, 6.25~12.5, 12.5~25, 25~50, 50~100%の地域に区分けしたデータ⁴⁵⁾を、SARに基づき被害抽出し

た画像に重ねて図-8に示す。沿岸の海没した地域はマスク処理により解析対象外となっているため、検出される被害画素(黒色)はないが、それ以外の被害レベルが大きい地域では被害画素が多く含まれる。被害レベルごとの判別得点 z の平均値と標準偏差を表-2に示す。図-3に示す兵庫県南部地震での結果と被害調査データ²¹⁾から算出した被害レベルごとの z の値も併せて載せている。ただし、神戸の地震では倒壊建物が明確に調査されていないため、ここでは全壊あるいは大破建物の割合としている。建物の被害状況はEMS-98のD5~D4とD3の一部に概ね該当する⁴⁶⁾。標準偏差が大きくバラツキがあるものの被害レベルが大きくなるに従い z の平均値が大きくなる傾向は両方の地震において共通である。ギョルジュクでの値が神戸での値よりもやや大きい。表-2に示す後方散乱係数の差分値と相関係数の平均値から判断すると、ギョルジュクにおける相関係数が小さいことが z の違いに反映している。これは上述のように、建物被害の判定基準が両者では異なり、倒壊建物が全壊や大破建物よりも大きな地表変化として捉えられることによる。また、被害率が0~6.25%と小さい地域であっても相関係数には0.1もの差がある。これは、建物構造や市街地

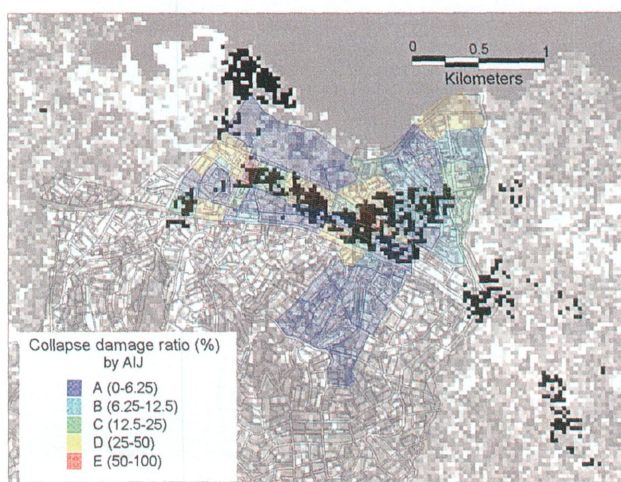


図-8 SAR画像から抽出したギョルジュクでの建物被害地域(判別得点 z が1以上を黒色)と現地調査データ⁴⁵⁾の分布

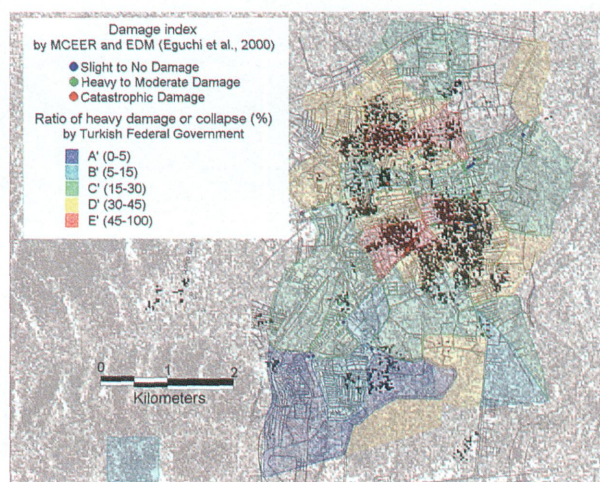


図-9 SAR画像から抽出したアダパザルでの建物被害地域(判別得点 z が1以上を黒色)と現地調査データ^{37), 47)}の分布

構造などが両地域では必ずしも同等ではなく、また、大都市である神戸市域のほとんどはアスファルト等で舗装されているのに対し、ギョルジュクでは未舗装地域が多いことが、後者の地域での地表変化が大きく観測される要因とも考えられる。

アダパザルにおいてはトルコ政府が発表した被害統計があり、これから計算される被害率の分布⁴⁷⁾をSARに基づき被害抽出した画像に重ねて図-9に示す。ここでの被害率とはD5~D3に該当する建物の地区ごとの割合を示している。地区が広いにもかかわらず母数の建物棟数が極端に少ない地域もあることから⁴⁷⁾、被害率と抽出画素とを直接的には比較できないが、被害率の高い地区には被害画素が多く分布する。また、表-2に示すように被害率が高くなると z の値も大きくなる。アダパザルでは地震後の10月2日に著者らのグループが車窓からの目視に基づいて周辺の被害程度を調査した³⁷⁾。表-2にはその調査結果を3段階(無被害~小被害, 中被害, 大被害)に区分した際の z の値も載せている。抽出されるピクセル数が少ないため信頼性が高いとはいえないが、 z の値と被害程度とは矛盾しない。

4.2 2001年インド・グジャラート地震

次に、トルコにおける市街地構造や地震による建物被害のパターンはインドにおいても類似していることを想定して、被災地を観測したRADARSAT画像に本手法を適用した結果を図-10に示す。市街地抽出の閾値はトルコの場合と同様に -6dB としている。ブジヤアンジャールおよび両市の間に点在するいくつかの集落では局所的に被害地域が抽出される。アンジャールとその周辺における抽出被害地域(図-10(a)の拡大図参照)は地震の16日後の空撮写真やLandsat衛星の地震前後の画像から推定される被害地域⁴⁸⁾ともよく対応する。高解像度衛星であるIKONOS(観測幅11km, 地上分解能は疑似的に1m)が地震の2日後にブジヤを観測している。約2km四方に切り出した画像を用いた目視判読による被害建物の分布⁴⁹⁾と本手法で抽出される被害画素を重ね合わせ、建物が完全に崩壊した地域と大破地域における z の値を計算したところ、平均値がそれぞれ約2.7と約2.1と大きな値になった(表-2参照)。そして、無被害地域を含むそれ以外の被害地域では z の値が約0.6になる。ここでも z の値は建物の被害程度を表し、トル

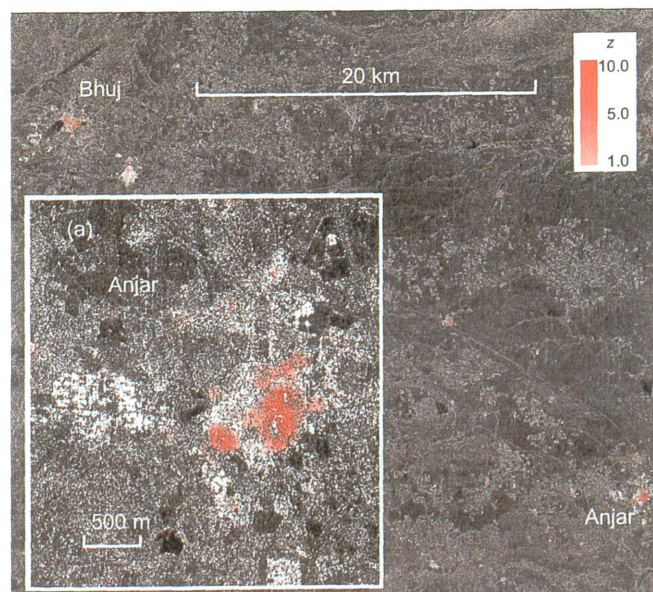


図-10 2001年1月26日インド・グジャラート地震前後のSAR画像から抽出した建物被害地域の分布(赤色)
(RADARSAT/Fine: 1999/12/31 - 2001/02/11)

コのギョルジュクでの値とも近い。

4.3 1993年北海道南西沖地震

奥尻島を含む北海道南西部に被害検出手法を適用し、地震前の画像に重ねた結果を図-11に示す。市街地抽出の閾値は他の地震と同様に -6dB としている。津波被害により多くの建物が流出した奥尻島南部の青苗と初松前において被害画素が抽出される(図-11(a)の奥尻島の拡大図参照)。被害調査報告書⁴¹⁾によると青苗では半島先端部での津波被害がとくに甚大であり、地区の北部でも建物が流された。そして、その間の地域には火災と津波の被害を免れた建物群が存在する。図-11(b)には青苗地区の拡大図を示すが、JERSによって検出された被害画素の分布はその状況をほぼ的確に表現している。奥尻島北部の稲穂などでも津波が押し寄せて建物が甚大な被害が発生しているが、被害範囲の広がりが青苗よりも狭い。したがって、この衛星の空間分解能では被害の検出が困難と考えられる。被害調査報告書⁴¹⁾および地震前後の航空写真を参考に、青苗、松江、奥尻、藻内、稲穂について建物が流出・焼失・倒壊した地域と建物が健全と見受けられる2つの地域を判読して z の分布と重ね合わせた。その結果、表-2に示すように被害地域では z の平均値が約4.3、無被害地域では約-5.3であり、上述までのCバンド衛星での結果と比較すると両者の差がやや大きい。無被害地域において値が小さいのは、波長の長いLバンドは観測条件や地表変化にやや鈍感なために地震前後の画像の相関係数が0.7と非常に高いからである。一方、建物倒壊地域で z の値が大きいのは、地震後の後方散乱係数が約 -2dB も減少しているからであり、津波によって地域のほとんどが空地化されて、カージナル効果が著しく減少したことで説明できる。

4.4 考察

これまでの検討から、兵庫県南部地震以外の地震であっても建物被害地域では地震後の後方散乱係数が低下し、地震前後画像の相関係数も減少することが確認できる。したがって、これらの指標は判別得点

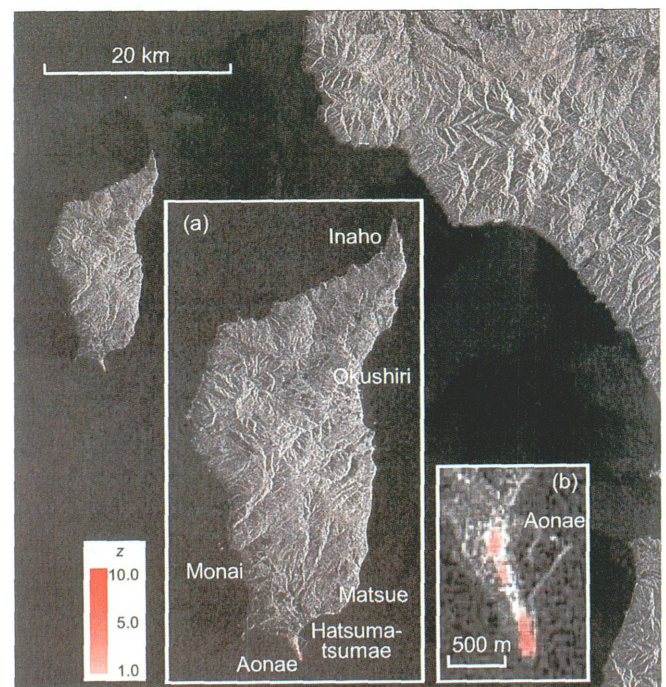


図-11 1993年7月12日北海道南西沖地震前後のSAR画像から抽出した建物被害地域の分布(赤色)
(JERS: 1993/07/08 - 1993/08/21)

表-2 被害地域における後方散乱係数の差分値 d , 相関係数 r , 判別得点 z の平均値と標準偏差

Earthquakes and analyzed areas	Number of pixels	Mean and standard deviation		
		d [dB]	r	z
The 1995 Kobe, Japan earthquake				
Hanshin district (severe damage ratio [%]) ²¹⁾				
0 ~ 6.25	2000	-0.29 (0.35)	0.54 (0.14)	-1.96 (2.02)
6.25 ~ 12.5	2000	-0.37 (0.43)	0.50 (0.15)	-1.24 (2.30)
12.5 ~ 25	2000	-0.54 (0.47)	0.48 (0.16)	-0.60 (2.44)
25 ~ 50	2000	-0.71 (0.60)	0.43 (0.17)	0.32 (2.85)
50 ~ 100	2000	-0.95 (0.79)	0.36 (0.18)	1.70 (3.41)
The 1999 Kocaeli, Turkey earthquake				
Golcuk (collapse damage ratio [%]) ⁴⁵⁾				
0 ~ 6.25	363	-0.36 (0.30)	0.44 (0.14)	-0.55 (1.74)
6.25 ~ 12.5	117	-0.13 (0.30)	0.40 (0.21)	-0.54 (2.66)
12.5 ~ 25	140	-0.49 (0.47)	0.41 (0.16)	0.13 (2.21)
25 ~ 50	218	-0.69 (0.27)	0.36 (0.15)	1.21 (1.85)
50 ~ 100	24	-1.01 (0.07)	0.33 (0.13)	2.18 (1.61)
Adapazari (ratio of heavy damage or collapse [%]) ⁴⁷⁾				
0 ~ 5	666	0.07 (0.29)	0.46 (0.21)	-1.65 (2.38)
5 ~ 15	589	-0.01 (0.19)	0.46 (0.14)	-1.49 (1.81)
15 ~ 30	2967	-0.04 (0.27)	0.43 (0.14)	-1.07 (1.77)
30 ~ 45	2799	-0.30 (0.29)	0.33 (0.13)	0.74 (1.68)
45 ~ 100	1102	-0.40 (0.28)	0.32 (0.10)	1.07 (1.30)
Adapazari (damage level) ³⁷⁾				
No to slight damage	13	-0.10 (0.20)	0.46 (0.12)	-1.30 (1.63)
Moderate to Heavy damage	25	-0.16 (0.36)	0.40 (0.10)	-0.43 (1.64)
Catastrophic damage	10	-0.53 (0.20)	0.28 (0.06)	1.81 (1.01)
The 2001 Gujarat, India earthquake				
Bhuj (building damage level) ⁴⁹⁾				
Areas without extensive or complete damage	6743	-0.17 (0.91)	0.32 (0.14)	0.58 (2.52)
Extensive damage	1011	-0.80 (0.91)	0.30 (0.11)	2.13 (2.69)
Complete damage	738	-0.92 (0.78)	0.28 (0.11)	2.66 (2.43)
The 1993 Hokkaido Nansei-oki, Japan earthquake				
Aonae, Hatsumatsumae, Matsue, Monai, Okushiri and Inaho (building damage level)				
No damage	279	0.31 (0.87)	0.71 (0.15)	-5.27 (2.98)
Complete damage	328	-2.04 (1.43)	0.34 (0.24)	4.26 (5.52)

Before the earthquake (1993/05/25 - 1993/07/08)				
No damage	279	0.40 (0.57)	0.69 (0.14)	-5.23 (2.00)
Complete damage	328	0.37 (0.36)	0.70 (0.13)	-5.33 (1.97)

z の算出のための説明変数として妥当と判断できる。そして、判別得点 z は被害の程度を概ね表し、その傾向は兵庫県南部地震での結果とも符合する。

後方散乱特性の変化が地震被害に起因する現象かどうかを確認するために、北海道南西沖地震について地震前の画像ペア(1993年5月25日と1993年7月8日:衛星間距離 B_p は約2.8km)を用いて被害地域と無被害地域の z の値を求めたところ、両地域での値は同程度で約-5と小さい。差分値 d や相関係数 r の値もほぼ等しく、 B_p が大きいにもかかわらず相関係数は約0.7と高い。前節での地震前後画像(B_p は約220m)を用いた際の無被害地域での値とも同程度であることから、カージナル効果が優勢な建物群が存在する地域では衛星間距離 B_p の影響は小さいことがわかる。衛星データや観測モードが地震ごとに異なることから断定的なことはいえないが、既往研究^{15), 16), 26), 42)}と本報での検討を総合すると、市街地での甚大被害地域の概略を検出する目的において、著者らが提案する手法は地震前後の衛星間距離 B_p やマイクロ波の波長の影響を受けず、そして、グジャラート地震での結果からマイクロ波の入射角の影響も小さいことが示唆される。

しかし、本手法の結果には図-7のコジャエリ地震や図-11の北海道南西沖地震での例からわかるように、マイクロ波の照射・入射角度とほぼ垂直になるような傾斜を持つ山岳部の尾根付近においても被害

地域として判定される画素が多く存在する。図-3の兵庫県南部地震での例では海域においても被害地域として検出される画素がある。このような地域での誤検出は市街地と同程度の大きな後方散乱強度が得られているためにマスク処理が機能していないことに起因する。ここでは簡便性を優先して、後方散乱係数のみの閾値からマスク処理により解析対象地域を選定しているが、光学センサ画像による判読あるいは既存のGISデータなどから事前に市街地の範囲が特定できれば、このような誤検出は防ぐことができる。

なお、市街地において誤検出が見受けられる地域は、スペックルノイズの低減化が不十分であったり、地震被害以外の地表の凹凸変化を拾ったりしているからと考えられる。地震前後での観測環境が多少異なることや2時期画像のレジストレーションの精度なども影響している。より精度の高い抽出手法の構築のためには、現地状況の詳細なデータや、衛星軌道の違いや大気および地表面の湿度度などのデータとの比較も行っていく必要がある。

コジャエリ地震やグジャラート地震では被害が広範囲にわたっていることから、被災地全域について手法の妥当性を評価するための、地上踏査に基づく適切かつ詳細なグラウンドトゥルースデータが存在しない。そもそも本研究の趣旨のひとつは現地踏査が困難な広域での被害状況の統一的把握である。したがって、本報では限られた地域内で

の街区や地区ごとに集計された被害レベルとの比較にならざるを得なかった。今後は建物群のカージナル効果を考慮した後方散乱特性のシミュレーション^{50), 51)}などの理論的な考察から、本手法の精度や適用限界などを明らかにしていく予定である。

5. まとめ

1995年兵庫県南部地震での被害調査データと地震の前後に被災地を観測したERS衛星のSAR強度画像との比較に基づいて構築した建物被害地域の検出手法を1993年北海道南西沖地震、1999年トルコ・コジャエリ地震、2001年インド・グジャラート地震に適用し、実際の被害データとの比較から手法の妥当性の検討を試みた。その結果、これらの地震においても後方散乱係数の差分値と相関係数を説明変量とした合成変量に基づき検出した被害地域が現地調査報告や高解像度衛星画像などから判読される甚大被害地域の分布と概ね対応することを示した。そして、本検出手法はマイクロ波の周波数や入射角、地震前後の衛星間距離にそれほど依存しないことを示した。

現在運行中の人工衛星を利用する限り、本手法は建物倒壊など地表面が著しく変化した地域がある程度の広がりをもった場合に検出可能である。そして、絶対物理量の計測に基づく手法であることから他の被害地震にもそのまま適用でき、かつ実被害情報(トレーニングデータ)を必要としないことから、途上国などでの広域被害の早期把握への応用が容易である。今後は対象地域の観測頻度を高めるべく、複数のSAR衛星の利用を念頭に置いたより実用化へ向けた研究として、地震前後において異なる観測条件(マイクロ波の周波数や入射角、地上分解能)での被害検出の可能性について検討を進める予定である。

謝辞

ImageCat, Inc. の R. T. Eguchi 氏, C. K. Huyck 氏, B. Mansouri 氏との議論は本研究を進める上で参考になった。岐阜大学の能島暢呂助教授からは判別分析に関するご教示を賜った。奥尻島での被害地域のGIS化には基礎地盤コンサルタンツの青木久氏の協力を得た。この研究の一部は科学研究費補助金(課題番号:1033577)によった。記して謝意を表する次第である。JERSは経済産業省と宇宙開発事業団、ERSは欧州宇宙機関、RADARSATはカナダ航空宇宙局所有のものである。

参考文献

- 1) 山崎文雄: リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集, No.577/I-41, pp.1-16, 1997.10.
- 2) 翠川三郎: リアルタイム地震防災システム, 地震ジャーナル, No.28, pp.52-65, 1999.12.
- 3) 能島暢呂, 杉戸真太, 金澤伸治: 被害情報の逐次処理による地震時緊急対応の意思決定支援モデル, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.129-142, 2001.7.
- 4) 能島暢呂, 杉戸真太: リアルタイム地震防災システムにおける被害情報の統合処理について, 第1回日本地震工学研究発表・討論会梗概集, pp.259, 2001.11.
- 5) 尾島俊雄, 円満隆平, 飯坂譲二: リモートセンシングによる都市空間の構造解析—ランドサットデータによる東京の都市空間構造調査—, 日本建築学会論文集, No.305, pp.122-130, 1981.7.
- 6) 梅干野晃: 日本建築学会・環境工学分野におけるリモートセンシング研究の動向, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.8, No.2, pp.71-74, 1988.
- 7) 渡辺浩文, 鈴木博司: ランドサットデータによる仙台都市域の土地被覆変化に関する調査研究 仙台都市域における都市環境計画策定に関する基礎的研究 その3, 日本建築学会東北支部研究報告集, pp.339-342, 1999.9.
- 8) 依田浩敏, 尾島俊雄: 広域災害におけるリモートセンシング利用に関する研究—東京都区部の広域避難場所の検討—, 日本建築学会計画系論文報告集, No.411, pp.1-8, 1990.5.
- 9) 鍵屋浩司, 尾島俊雄: 広域避難場所における防火性からみた緑の評価のためのリモートセンシング調査, 日本建築学会計画系論文報告集, No.498, pp.89-94, 1997.8.
- 10) 宮崎ひろ志, 森山正和: 阪神・淡路大震災における地震火災規模と緑被率, 建ぺい率等市街地特性との相関解析, 日本建築学会計画系論文集, No.520, pp.77-81, 1999.6.

- 11) 戸松征夫, 佐藤晴彦: リモートセンシングデータを利用した液状化危険度解析の事例的研究, 第9回日本地震工学シンポジウム, Vol.1, pp.127-132, 1994.12.
- 12) 藤岡宏一郎: ランドサットTMデータを利用した地震時広域被害調査の可能性に関する研究, 東京工業大学修士論文, 1990.3.
- 13) 松岡昌志, 山崎文雄, 翠川三郎: 1995年兵庫県南部地震での被害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, No.668/I-54, pp.177-185, 2001.1.
- 14) 松岡昌志, 山崎文雄: 1995年兵庫県南部地震での建物被害地域における人工衛星SAR強度画像の特徴, 日本建築学会構造系論文集, No.546, pp.54-61, 2001.8.
- 15) 松岡昌志, 山崎文雄: SAR画像を利用した建物被害地域の判読のための画像処理に関する考察, 日本リモートセンシング学会第31回学術講演会論文集, pp.269-270, 2001.12.
- 16) 松岡昌志, 山崎文雄: 人工衛星SAR強度画像による建物被害地域の検出手法, 日本建築学会構造系論文集, No.551, pp.53-60, 2002.1.
- 17) 日本写真測量学会: 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, 1998.
- 18) 高木幹雄, 下田陽久: 画像処理ハンドブック, 東京大学出版会, 1991.
- 19) 飛田幹男, 藤原智, 村上亮, 中川弘之, Rosen, P. A.: 干渉SARのための高精度画像マッチング, 測地学会誌, Vol.45, No.4, pp.297-314, 1999.12.
- 20) Lee, J. S.: Digital Correlation of Noisy Filtering by Use of Local Statistics, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.2, No.2, pp.165-168, 1980.3.
- 21) 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.
- 22) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Fiagi, K., and Rabaute, T.: The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry, Nature, Vol.364, pp.138-142, 1993.1.
- 23) Ozawa, S., Murakami, M., Fujiwara, S., and Tobita, M.: Synthetic Aperture Radar Interferogram of the 1995 Kobe Earthquake and Its Geodetic Inversion, Geophysical Research Letters, Vol.24, No.18, pp.2327-2330, 1997.9.
- 24) Matsuoka, M. and Yamazaki, F.: Use of Interferometric Satellite SAR for Earthquake Damage Detection, Proc. 6th International Conference on Seismic Zonation, EERI, CD-ROM, 2000.11.
- 25) Ito, Y., Hosokawa, M., Lee, H., and Liu, J. G.: Extraction of Damaged Regions Using SAR Data and Neural Networks, ISPRS2000, International Activities of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B1, pp.156-163, 2000.7.
- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) Matsuoka, M. and Yamazaki, F.: Interferometric Characterization of Areas Damaged by the 1995 Kobe Earthquake Using Satellite SAR Images, Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, ID2141, CD-ROM, 2000.1.
- 29) Massonnet, D., Feigl, K. L., Vadon, H., and Rossi, M.: Coseismic Deformation Field of the M = 6.7 Northridge, California, Earthquake of January 17, 1994, Recorded by Two Radar Satellites Using Interferometry, Geophysical Research Letters, Vol.23, No.9, pp.969-972, 1996.5.
- 30) Murakami, M., Tobita, M., Fujiwara, S., Saito, T., and Masaharu, H.: Coseismic Crustal Deformations of 1994 Northridge, California Earthquake Detected by Interferometric JERS-1 Synthetic Aperture Radar, Journal of Geophysical Research, Vol.101, pp.8605-8614, 1996.4.
- 31) 飛田幹男, 松坂茂, 村上亮: PALSARデータの干渉処理, SAR Workshop 2002 報告書, 地球科学技術フォーラム/地球観測委員会, ALOS/PALSAR センサチーム 航空機SAR利用・実験WG, pp.66-73, 2001.12.
- 32) 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.
- 33) 田岡俊次: 偵察衛星「情報独立」への日本の転機, 朝日新聞週刊AERA1月11日号, 1999.1.
- 34) 津 宏治: 21世紀わが国衛星リモートセンシング推進の方向性, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.21, No.1, pp.21-29, 2001.
- 35) Committee on Earth Observation Satellites: The Use of Earth Observing Satellites for Hazard Support, A Report of the CEOS Disaster Management Support Group, 2000.
- 36) 日本建築学会, 土木学会, 地盤工学会: 1999年トルココジャエリ地震災害調査報告, 2001.
- 37) Eguchi, R. T., Huyck, C. K., Houshmand, B., Mansouri, B., Shinozuka, M., Yamazaki, F., Matsuoka, M., and Ulgen, S.: The Marmara Earthquake: A View from Space, the Marmara Turkey Earthquake of August 17, 1999, Reconnaissance Report, Technical Report MCEER-00-0001, pp.151-169, 2000.3.
- 38) Delouis, B., Lundgren, P., Salichon, J., and Giardini, D.: Joint Inversion of InSAR and Telesismic Data for the Slip History of the 1999 Izmit (Turkey) Earthquake, Geophysical Research Letters, Vol.27, No.20, pp.3389-3392, 2000.10.
- 39) 新井 洋: 被害の概要, 2001年インド西部グジャラート地震被害調査報告会, 日本建築学会, pp.8-16, 2001.5.
- 40) 青木久, 松岡昌志, 山崎文雄, 浦塚清峰, 小林達治, 佐竹 誠: 都市域における

- 航空機 SAR 画像の特徴, 日本写真測量学会秋季学術講演会発表論文集, pp.137-140, 1999.11.
- 41) 日本建築学会: 1993年釧路沖地震災害調査報告・1993年北海道南西沖地震災害調査報告, 1995.
- 42) 米澤千夏, 竹内章司: 建造物倒壊地域における SAR 画像の相関の低下についての定量的評価, 日本リモートセンシング学会第31回学術講演会論文集, pp.105-106, 2001.12.
- 43) Johnson, L. A., Coburn, A., and Rahnama, M.: Damage Survey Approach to Estimating Insurance Losses, Earthquake Spectra, 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake Reconnaissance Report, pp.281-293, 2000.12.
- 44) European Seismological Commission: European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), 1998.
- 45) AIJ reconnaissance team, Kabeyasawa, T. et al.: 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.300-305, 1999.12.
- 46) 牧紀男, 堀江啓, 林春男, 田中聡: 阪神・淡路大震災における建物被害調査結果の分析, 地域安全学会論文集, No.3, pp.117-122, 2001.11.
- 47) Bray, J. D. and Stewart, J. P.: Damage Pattern and Foundation Performance in Adapazari, Earthquake Spectra, 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake Reconnaissance Report, pp.163-189, 2000.12.
- 48) Yusuf, Y., Matsuoka, M., and Yamazaki, F.: Damage Detection after 2001 Gujarat Earthquake Using Landsat-7 Satellite Images, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol.1&2, pp.17-22, 2001.3.
- 49) Chiroiu, L. and Andre, G.: Damage Assessment Using High Resolution Satellite Imagery: Application to 2001 Bhuj, India, Earthquake, Proc. 7th National Conference on Earthquake Engineering, 2002 (in press).
- 50) 飯野秋成, 梅干野晃, 大澤孝元: SAR 画像を用いた都市上空の風系解析のための空間形態の情報抽出, 日本リモートセンシング学会第22回学術講演会論文集, pp.251-254, 1997.5.
- 51) Shinozuka, M., Ghanem, R., Houshmand, B., Mansouri, B.: Damage Detection in Urban Areas by SAR Imagery, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.126, No.7, pp.769-777, 2000.7.

(2002年3月10日原稿受理, 2002年5月28日採用決定)

