

# 人工衛星 SAR 強度画像による建物被害地域の検出手法

## DETECTION OF BUILDING DAMAGE AREAS DUE TO EARTHQUAKES USING SATELLITE SAR INTENSITY IMAGES

松岡昌志\*, 山崎文雄\*\*

Masashi MATSUOKA and Fumio YAMAZAKI

An imaging radar called synthetic aperture radar (SAR) has rapidly become one of the major tools for observing the earth's surface and its change. One of the distinctive characteristics of SAR systems is their capability of recording both amplitude and phase of the backscattering echoes from objects on the earth's surface in all weather conditions, day and night, and independence of sun illumination. SAR installed on the satellites JERS and ERS observed Kobe area before and after the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan earthquake. Backscattering properties such as the difference and the correlation of the backscattering coefficient called Sigma-nought from the damaged areas by the earthquake were investigated. By analyzing the time-series SAR data, we clarified that the decreasing of the values of the difference and the correlation in the hard-hit areas was due to the surface changes by the event. Then, we developed an automated method to detect hard-hit areas based on the discriminant analysis using pre- and post-event SAR images. Furthermore, the accuracy of the proposed method was verified by comparing the results from detected areas and the one of the actual damage survey.

**Keywords :** Synthetic Aperture Radar (SAR) Intensity Images, Building Damage Area, Backscattering Characteristics, the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, ERS(European Remote Sensing Satellite), JERS(Japanese Earth Resources Satellite)  
合成開口レーダ(SAR)強度画像, 建物被害地域, 後方散乱特性, 1995年兵庫県南部地震,  
ERS(欧州リモートセンシング衛星), JERS(地球資源衛星)

### 1. はじめに

被害が広域にわたる都市直下地震などの大規模災害においては被害の把握に時間と労力がかかる。我が国のように発災直後から刻々と集まる詳細な被害情報や地震計ネットワークを利用した被害推定が実施可能な場合はその結果を補完する目的として、また、強震観測態勢や情報インフラが十分でない途上国やヘリコプター等の低軌道からの観測が困難な地域、例えば放射能施設の被害や有毒ガスを伴う火山噴火の際には被害地域を早期に特定する目的として、人工衛星による被災地の観測が考えられる。現状の人工衛星は都市建造物の認識に十分な空間分解能を有しているわけではなく、回帰日数も数～十数日と長いことから、災害発生直後に詳細な被害情報を得ることは困難である。しかし、次々に解像度が飛躍的に高い衛星が打ち上げられる計画が進められており、世界各地で続発する自然災害の状況を的確に把握する手段として、人工衛星の利用は急増するものと予想される。

人工衛星を利用したリモートセンシングは大きくは光学センサとレーダによる観測に分かれる。レーダ観測のひとつである合成開口レーダ(SAR)は人工衛星等のプラットフォームから照射したマイクロ波パルスの地表での反射を測定する能動型センサである。そのため、昼夜を問わず、かつ、雲を透過して地表を観測できることから発災後における被害状況把握への利用が期待されるセンサのひとつである。

SARから得られる画像には地表からの反射(後方散乱)強度および送信したパルスの位相差が含まれる。2時期の観測画像の位相情報を利用したコヒーレンス(干渉)解析はマイクロ波の波長以下の地表変化を検出できる感度を有していることから、地震後の地表変動の面的把握<sup>2,3)</sup>や軽微な被害を含む建物被害地域の検出<sup>4,5)</sup>の可能性がある。ただし、コヒーレンス処理は2時期の観測条件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コヒーレンスが低下するため、抽出したいはずの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。つまり、理想的には2時期の衛星軌道ができるだけ近く、地震前後の観測間隔が短い方がよい<sup>6)</sup>。しかし、このような条件を満足する観測は非常に少ない。一方、SAR画像に含まれるもうひとつの情報である後方散乱強度はコヒーレンスと比較すると観測条件の違いに影響を受けず<sup>4)</sup>、定常的な地表変化モニタリングの指標として有効と考えられる。

既に著者らは1995年兵庫県南部地震の前後に阪神・淡路地域を観測した欧州宇宙機関のERS(European Remote Sensing Satellite)の強度画像解析から、人工衛星により照射されたマイクロ波は建物と道路と

\* 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.

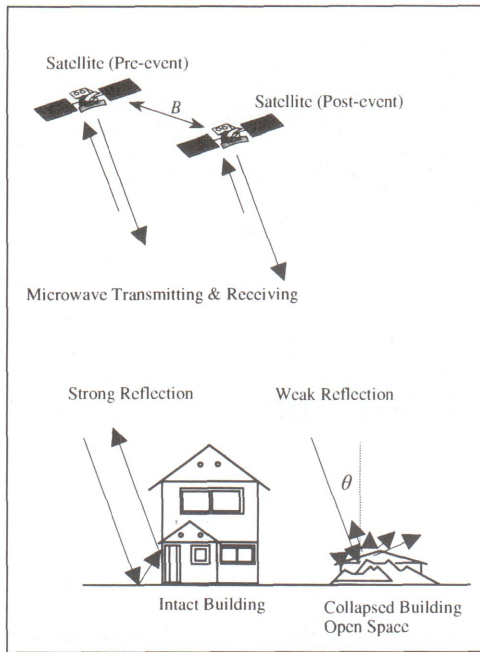


図-1 SARによる観測の模式図

の間での複数反射によって後方散乱強度は大きくなり(カージナル効果), 一方, 建物の倒壊地域やオープンスペースに照射されたマイクロ波は多方向散乱の影響により, 衛星に戻る成分は小さくなることを明らかにし(図-1参照), 被害程度は地震前後の後方散乱強度の差分と空間相関から特徴づけられることを示した<sup>7)</sup>。しかし, 用いた画像は地震後約4ヶ月経過したものであったことから, 地震直後の被害状況を観測していない。そして, 地震前後の1組のペアで得られた結果であることから, その一般性について検証する必要がある。そこで, 本報では, ERSだけではなく, 地震後の比較的早い時期に観測された我が国のJERS (Japanese Earth Resources Satellite)の画像を含めた地震後と地震前のそれぞれの期間における複数のSAR画像を用意し, SAR強度画像の変化が地震被害による影響であることを時系列解析から明らかにする。さらに, 地震前後のSAR強度画像から被害地域を抽出する手法を提案する。

## 2. データ

### 2.1 SAR強度画像

表-1にERSおよびJERSのセンサの特徴を示す。両者は用いるマイクロ波の偏波方向や地上分解能が異なるが, 最も大きな点はマイクロ波の波長と地表への入射角が異なることである。理論的には波長が短い方が地表の変化に対して敏感であり, また, 入射角 $\theta$ (図-1参照)が小さい方が地表からの反射強度が大きく, みかけのS/N比が大きくなることから対象物の識別がしやすい。そのような点ではERSが有利である。しかし, 2時期画像の比較に基づいて, 地震による被害を検出する場合, 衛星間距離などの観測条件の影響が少ない方がよく, また, 被害以外の変化をできるだけ検出しない方がよいことから, 波長が長いJERSの方が有利ともいえる。そこで, 本報では被害検出の観点からの両衛星の比較も試みる。

表-2に画像のリストを示す。ERSは既報<sup>7)</sup>で用いた地震前の1994年10月12日と地震後の1995年5月23日を含む9シーン, JERSは地

表-1 ERS, JERSの仕様

	ERS	JERS
Frequency	5.3GHz (C-band)	1.275GHz (L-band)
Wavelength	5.7 cm	23.5 cm
Polarization	VV	HH
Incidence Angle	23°	38.7°
Orbit Inclination	98.5°	97.7°
Swath Width	100 km	75 km
Spatial Resolution	30 m (3 look)	18 m (3 look)
Peak Electric Power	4.8 kW	325 W
Recurrence Period	35 days	44 days

表-2 使用したデータ

ERS	JERS
1992/11/01	1992/10/22
1993/08/08	—
1994/06/03	—
1994/10/12	1994/05/17
—	1995/02/05
1995/05/23	1995/05/04
1995/08/01	—
1996/02/27	—
1996/04/02	—
1997/09/10	1997/08/17

震前2シーンと地震後3シーンを用意した。都市域を観測したJERS画像には観測システムに起因するノイズが含まれる場合があることから, できるだけノイズが少ないものを選定した。しかし, 1995年2月5日の画像にも多くのノイズが存在する<sup>8)</sup>。したがって, 以降のJERSの解析にはノイズの影響があることは否めないが, 被害地域の抽出手法を構築するためには, 発災後の状況を保持しているであろう地震後早い時期に観測された画像を用いることは重要と判断した。

なお, SAR画像にはスペckルノイズ<sup>9)</sup>と呼ばれるゴマ塩状のランダムな濃度のゆらぎも存在する。そのため, SAR画像の1ピクセルの意味するところは, その情報が後方散乱強度に比例しているのではなく, その情報の期待値が後方散乱強度に比例している。従って, 1ピクセルの情報のみからは正確な後方散乱強度は算出できず, 均質と見なせる広い面積について平均化できれば, 比較的高い精度で後方散乱強度が推定できる<sup>9), 10)</sup>。ただし, 複数の異なる建物が密集する市街地ではこの条件を満足することはほとんどないため, 既報<sup>7)</sup>と同様に, ここではノイズ除去を目的とした特別なフィルタ<sup>11)</sup>は施さず, ピクセル値が後方散乱強度に比例しているとみなした。なお, 用いているERS, JERS画像のピクセルサイズは30mである。

### 2.2 画像データセットの作成

複数時期の画像比較のために画像間の位置合わせ(レジストレーション)を行う。(1)式に示す両画像の相関係数が高い対応点を画像全域から約100点自動探索して<sup>12)</sup>, 地震前画像にアフィン変換を施し, 最近隣挿法<sup>13)</sup>によりピクセルの再配列を行った。全てのERS, JERS画像は1994年10月12日のERS画像に合うようにレジストレーションした。

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

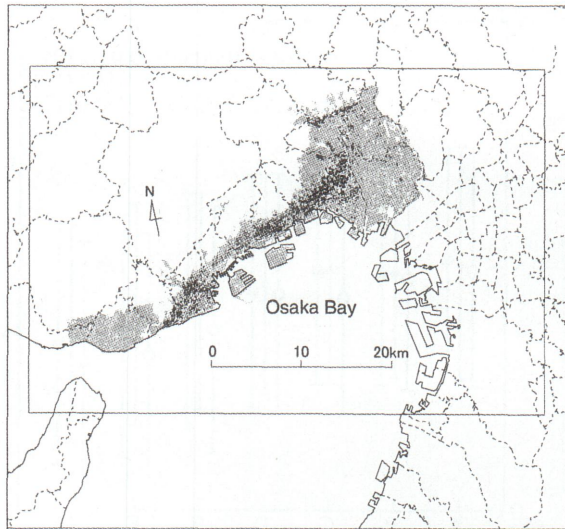


図-2 対象地域(灰色は建物被害調査データ<sup>14)</sup>の範囲、その内、黒色は全壊または大破建物の割合が10%以上の地域)



(a) ERS (1995年5月23日観測)



(b) JERS (1995年5月4日観測)

図-3 地震後の強度画像

ここで、 $r$ は相関係数、 $Ia_i, Ib_i$ は $a$ 画像と $b$ 画像の $i$ 番目におけるピクセル値、 $N$ は計算するウィンドウ内のピクセル数を表す。7x7ピクセルのウィンドウを用いたため、 $N$ は49となる。図-2には画像の範囲を、図-3にはほぼ同時期に観測された地震後のERSとJERS画像(レジストレーション済み)を示す。後方散乱強度が大きい地域ほど



図-4 衛星画像のピクセルと街区および建物のサイズ比較  
(例えば、黒色の建物は全壊または大破被害、太線メッシュは大破率100%を代表するピクセルを表す)

明るく表示している。市街地ではカージナル効果により強度が大きく、海や山岳部では値は小さい。ERSとJERSを比較すると、強度の大きい地域と小さい地域の分布が必ずしも同じにならない。これは、両衛星のマイクロ波の波長や入射角の違いから、対象物の形状や物性、表面の状態などによって後方散乱特性が異なるからである。

被害地域を抽出する指標として後方散乱強度の差分や空間相関が考えられることは前に述べたが、空間相関は(1)式から計算される相関係数で表す。そして、後方散乱強度の差分値 $d$ は、(2)式に示すようにピクセル値を後方散乱特性の基本物理量である後方散乱係数 $\sigma^0$ (dB)に変換して<sup>15)</sup>、 $a$ 画像の値から $b$ 画像のそれを引くことで求める。その際、スペckルノイズの影響を少しでも低減することを目的に、 $i$ 番目におけるピクセル値は7x7ピクセルのウィンドウの平均値 $\hat{I}a_i, \hat{I}b_i$ から算出した。

$$d = 10 \cdot \log_{10} \hat{I}a_i - 10 \cdot \log_{10} \hat{I}b_i \quad (2)$$

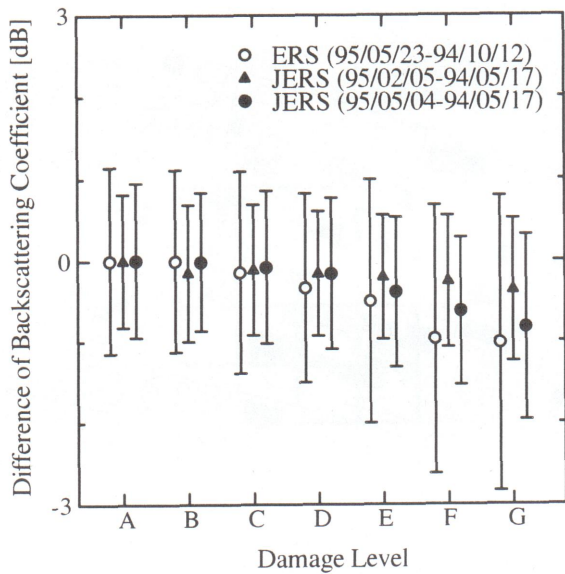
これらSAR画像及び2時期のSAR画像から計算される相関画像、強度差画像については地図に合うように幾何補正を行い、経緯度情報を付加してGISデータ化した。

### 2.3 建物被害データ

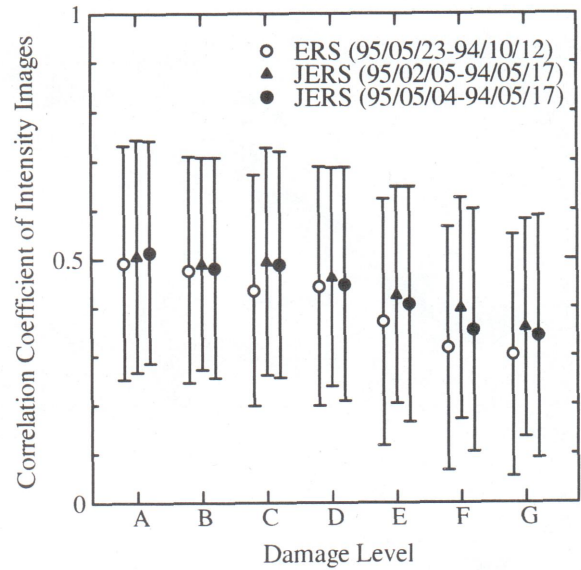
SAR画像と比較するグラウンドトゥルスデータには建築研究所により整理されている建物被害調査結果<sup>14)</sup>を用いる。これは建物の被災度を全壊または大破、中程度の損傷、軽微な損傷、火災による焼失、外観上の被害なしと判定したもので、街区ないし町丁目単位でまとめられGISデータ化されている。ここでは、街区単位で整理された低層建物の被災度データを用いた。図-2には全壊または大破建物が10%以上の街区を黒色で表示している。

### 3. 建物被害地域におけるJERS画像の特徴

JERS画像に建物被害データを重ね合わせ、建物の大破率(D)と地震前後のJERS画像から算出される後方散乱強度の差分と相関値の関係を検討し、ERS画像での結果<sup>7)</sup>と比較した。大破率とは全壊または大破の建物と焼失建物を合わせた棟数を街区内の全建物で除した値で



(a) 後方散乱強度の差分(地震後-地震前)



(b) 後方散乱強度の空間相関

図-5 被害程度ごとの地震前後における後方散乱特性の変化

あり、街区ごとに集計されている。大破率ごとにそれぞれ無作為に2000ピクセルを選定し、ピクセル値の平均値と標準偏差を算出した。無被害地域を被害レベルAとし、大破率6.25%未満、12.5%未満、25%未満、50%未満、100%未満、そして大破率100%までをそれぞれ被害レベルB~Gとした。無被害地域のピクセルは全ての建物が外観上被害のない地域から選定した。

なお、ここでは街区単位で集計されたデータを用いているため、大破率100%のピクセルであっても被害建物を主として観測しているとは限らないことに注意する必要がある。図-4に衛星画像のピクセルサイズ(約30m)と街区および建物のサイズの比較を模式的に示す。神戸市灘区の市街地構成を参考にしている。例えば、図中の中央に位置する街区は全ての建物が全壊または大破被害を受けていることから、大破率100%の街区とみなせる。そして、衛星画像との重ね合わせから太線で示すピクセルが大破率100%のピクセルとして選定される。しかし、街区内にはオープンスペースも存在し、その占める割合はピクセルごとに様々である。したがって、ピクセル内に全壊または大破の建物が均等に分布しているわけではなく、建物被害に伴う地表変化の程度にある程度幅があるものをひとまとめに大破率100%として選定しているといえる。以上のことは他の大破率のピクセルについても同様であり、甚大な被害建物を観ているピクセルもあれば、無被害建物やオープンスペースのみを観ているピクセルもあることになる。

図-5(a)に1995年2月5日(地震後約3週間)の後方散乱強度から1994年5月17日(地震前)のそれを引いた強度差を大破率ごとに示す(▲印参照)。また、1995年5月23日(地震後約4ヶ月)と1994年10月12日(地震前)のERSによる結果を○印に示す。なお、1994年6月3日と10月12日はERSの姿勢制御を実施していた期間に含まれ、他の画像とは観測軌道が異なる。そのため、無被害地域(被害レベルA)における1995年5月23日と1994年10月12日の強度差分値がゼロになるように、1994年6月3日と10月12日の強度画像のピクセル値を補正している。▲印で示すJERSペアの平均値をみると、非常に若干で

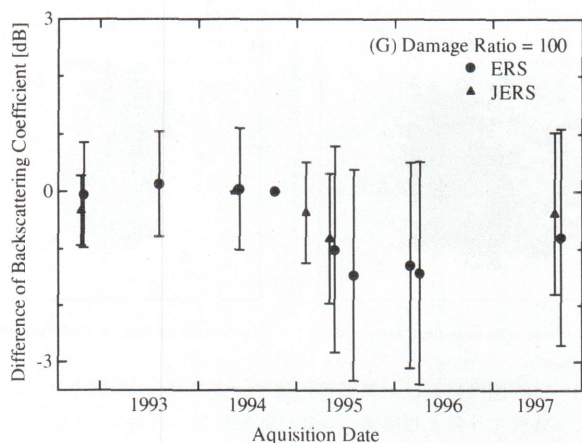
はあるが被害程度が大きくなると強度差が小さくなる。次に、1995年5月4日(地震後約4ヶ月)と1994年5月17日のJERSペアから算出される強度差を●印で示す。○印で示すERSペアでの値に近づき、被害程度が大きくなるにしたがい強度差の低下が著しくなる。これは、1995年2月5日から5月17日の間に倒壊建物や大破建物の瓦礫が撤去されて空地になるなど、地表面の状況が大きく変化したと考えると妥当である。標準偏差はJERSがERSより小さい。これは、JERSは、マイクロ波の波長が長い、入射角が大きい、送信電力が小さいなどの様々な要因が重なり、観測される強度値のダイナミックレンジが狭くなっていると考えられる。

図-5(b)には上記のペアから算出される相関係数を大破率ごとに示す。地震前と地震後約3週間の画像との相関係数の平均値(▲印)は地震後約4ヶ月の画像との相関係数(●印)と同程度の傾向を示す。それは、○印で示すERSペアの相関係数の値ともほぼ等しく、被害程度が大きくなるにしたがい相関係数が低下する。これは、被害が生じて地表の状況が変化したことが後方散乱の空間分布に影響を及ぼしたものと考えられる。また、強度値の差分の場合とは異なり、被害程度と相関係数の関係は観測時期に依存しない(瓦礫撤去等の地表状況の変化に係わらない)。

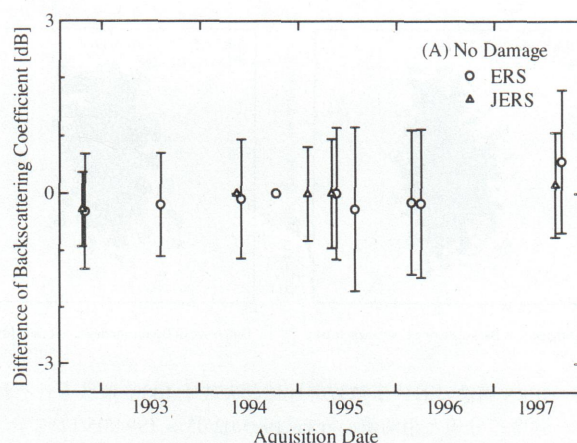
#### 4. 地震前後の時系列 SAR 画像の特徴

以上までに、地震の前後で得られた SAR 画像から、建物被害が甚大であった地域では地震後の後方散乱強度が低下し、地震前後の画像の相関性も低下することが明らかになったが、ここでは、地震前と地震後のそれぞれの期間における複数の SAR 画像の時系列分析を行い、SAR 画像の強度差分値と相関値の経年変化を検討する。その際、ERS については地震前の1994年10月12日を、JERSは1994年5月17日の画像をそれぞれ基準とする。つまり、これらを(1)式および(2)式の  $b$  画像に、他の画像を  $a$  画像として強度差分値と相関値を算出する。

図-6に大破率100%(被害レベルG)と無被害地域(被害レベルA)

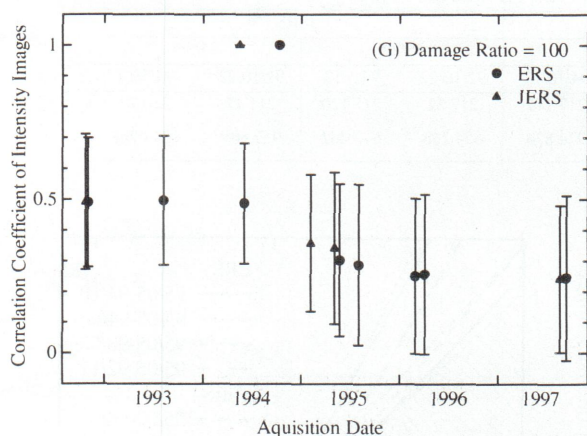


(a) 大破率 100% 地域

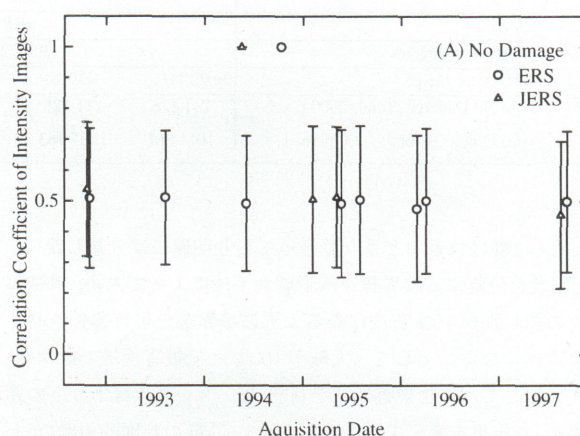


(b) 無被害地域

図-6 強度差分値の経年変化



(a) 大破率 100% 地域



(b) 無被害地域

図-7 相関係数の経年変化

における差分値の経年変化を示す。平均値の推移をみると、大破率 100% 地域の差分値は 1995 年 1 月の地震発生以前では 0dB 付近であるが、地震後から値が低下し、約半年後には -1.5dB 程度にまで下がる。ただし、標準偏差が大きく、特に地震発生後の強度差分値のパラツキは大きい。一方、無被害地域における差分値の平均値は -0.4 ~ 0.6dB の幅があるものの、地震前後の期間で特徴的な変化はみられない。なお、いったん低下した強度値が 1997 年にかけて大きくなる傾向が大破率 100% 地域で見られる。新築建物の増加に伴うカージナル効果の影響とも考えられるが、無被害地域においても同様に強度値がやや増加していることから、地表での散乱環境の変化だけでなく衛星軌道等の観測環境の影響が含まれている可能性がある。

図-7 には相関係数の経年変化を示す。地震発生以前は大破率 100% 地域と無被害地域ともに相関係数の平均値が 0.5 程度であるが、地震後約 3 週間における大破率 100% 地域の相関係数は 0.35 である。その後、徐々に値が低下し、最終的には 0.25 程度になり変動しなくなる。一方、無被害地域における値は 0.5 程度でほとんど変化しない。しかも、図-6 に示す強度差分の経年変化と比べると非常に安定しており、大破率 100% 地域における標準偏差の値も地震前後それぞれの期間でほとんど変わらない。

なお、差分値と相関係数の時系列解析から、差分値における標準偏差が JERS の方が ERS より小さい傾向があるものの、平均値の推移をみる限りでは両者の間に明確な違いはみられない。従って、差分値と相関係数という指標で建物被害に伴う地表変化をモニタリングする上では、マイクロ波の波長や入射角等の影響はそれほどないものと考えられる。

#### 5. 後方散乱特性の変化に基づく被害地域の抽出手法

JERS, ERS 画像と建物被害データとを比較したところ、大破率が大きくなるほど強度差と空間相関が小さくなる傾向がみられた。また、2つの衛星の解析結果には大きな違いがみられない。そこで、地震前後の SAR 強度画像の強度差と相関係数を説明変数とした被害地域の抽出手法を提案する。複数の被害程度を推定するには、被害ごとの差分値や相関係数のバラツキが大きいことから(図-5 参照)、大破率 100% の地域と無被害地域の 2 群を分離する境界を求めて、対象地域から大被害地域のみを抽出することを考える。

地震後もっとも早い時期に観測された JERS の 1995 年 2 月 5 日と地震前の 1994 年 5 月 17 日の画像ペアから算出される無被害と大破率 100% それぞれの地域における強度差と相関係数の分布を図-8 に示

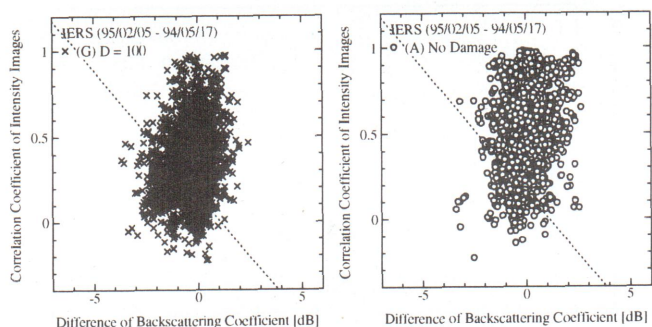


図-8 JERS 画像における無被害地域と大破率 100% 地域それぞれの強度差分値と相関値の分布 (1995/02/05 - 1994/05/17)

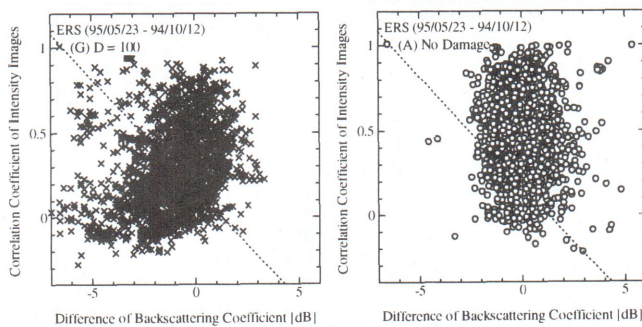


図-9 ERS 画像における無被害地域と大破率 100% 地域それぞれの強度差分値と相関値の分布 (1995/05/23 - 1994/10/12)

表-3 無被害地域と大破率 100% 地域の 2 群判別結果 (細字が地震前後の各画像ペアから得られる判別境界線に基づく判別、太字が図-8 中の斜線領域から判別した結果)

Satellite	Number of Pixels Classified into D=100							
	ERS				JERS			
	95/5/23				95/2/5	95/5/4		
Post-event Image					92/10/22	94/5/17	92/10/22	94/5/17
Pre-event Image	92/11/1	93/8/8	94/6/3	94/10/12	92/10/22	94/5/17	92/10/22	94/5/17
(A) No Damage (Total: 2000 pixels)	211 <b>126</b>	211 <b>125</b>	214 <b>143</b>	217 <b>147</b>	217 <b>52</b>	217 <b>120</b>	211 <b>47</b>	210 <b>77</b>
(G) D = 100 (Total: 2000 pixels)	1011 <b>861</b>	1097 <b>963</b>	1003 <b>911</b>	974 <b>874</b>	654 <b>268</b>	647 <b>462</b>	957 <b>609</b>	1048 <b>747</b>

す。これら 2 群はほとんど重なり合っており明確には分離し難い。しかし、両者を分離する境界線を線形判別手法によって求め、無被害ピクセルの誤判別が 10% 程度になるように境界線を平行移動させると点線のようにになる。そして、大破率 100% と無被害地域の計 4000 ピクセルに対して、建物被害地域を判別 (図-8 中の点線より下の領域を抽出) した結果を表-3 中に斜体で示す。2 群の判別率 (正しく判別されたピクセル数の全ピクセルに対する割合) は約 61% となる。また、大破率 100% の地域は約 32% が判別されるにとどまる。これは、地震後 3 週間では甚大被害地域であっても地表の変化が大きくないため、無被害地域と区別し難いからと考えられる。一方、地震後 4 ヶ月経過した ERS 画像を用いた場合には、無被害地域と大破率 100% 地域の分離度がやや高くなり (図-9 参照)、既報<sup>7)</sup>で示すように的中率は 69% と向上する。

早期における被害把握の観点からは、地震後の画像は発災直後のものを利用すべきであり、被害以外の地表変化を検出しないためには、発災前の画像もできるだけ地震発生日に近いものを利用することが望ましい。発災後はユーザからの観測要求に基づいて、被災地を観測する仕組みが考えられ、それは実際に運用されている<sup>15)</sup>。定常的に地表を観測し、画像がアーカイブされている場合は地震前の画像の選択にも問題がない。しかし、地域にもよるが、表-1 に示す回帰日数ごとに必ずしも画像が取得されていないのが現状である。そこで、地震前の画像については利用できる画像に限られることを想定し、ここでは、地震前の画像が異なる場合の大破率 100% の地域と無被害地域の判別性について検討する。

ERS については地震後の画像として 1995 年 5 月 23 日のものを、地震前の画像には 1992 年 11 月 1 日、1993 年 8 月 8 日、1994 年 6 月 3 日、1994 年 10 月 12 日を用いた。線形判別から導かれる 2 群の境界線を 4 ペアについて計算した結果を図-10 に示す。一点鎖線で示す 1995 年 5 月 23 日と 1994 年 6 月 3 日以外の他の組み合わせから得られる境界

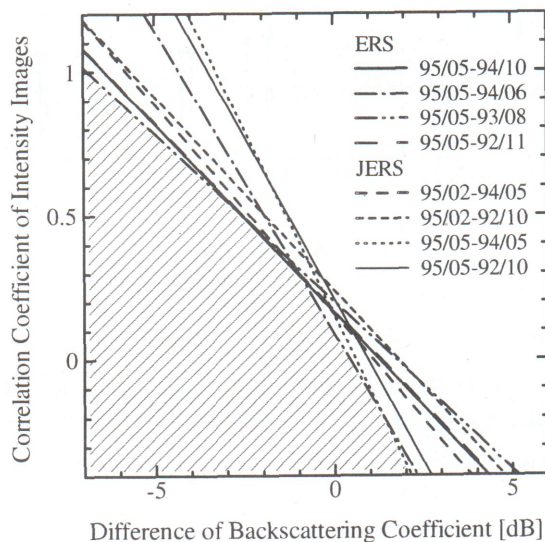


図-10 無被害地域と大破率 100% 地域を分離する判別境界

線の傾向はほぼ等しい。JERS については 1995 年 2 月 5 日のものを地震後に、1992 年 10 月 22 日、1994 年 5 月 17 日を地震前の画像として、同様に境界線を求めた。また、地震後の ERS とほぼ同時期の画像である 1995 年 5 月 4 日のものを用いた場合の結果も併せて示す。1995 年 5 月 4 日を地震後として用いた場合の境界線の傾きが ERS での 1995 年 5 月 23 日と 1994 年 6 月 3 日の境界線と類似するが、1995 年 2 月 5 日を地震後として用いた場合の境界線は、ERS での他の組み合わせから得られる境界線にほぼ等しい。なお、表-3 にはそれぞれの境界線から判別された大被害地域のピクセル数も載せている。

以上のように、用いる地震前の画像によって境界線が若干異なる。これは、衛星の位置を含む観測環境、天候等のマイクロ波の伝播環

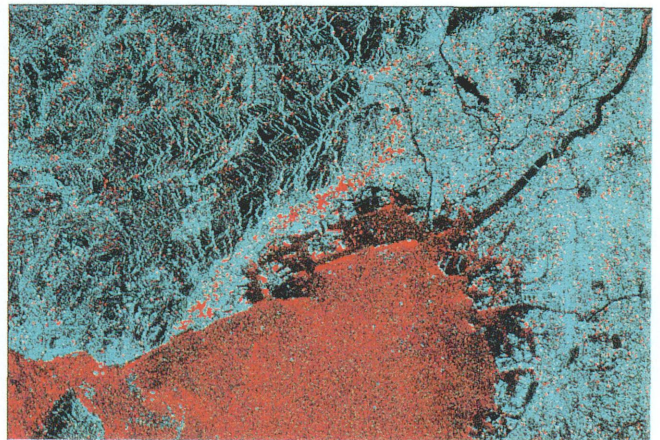
境、被害以外による地表面の凹凸環境の変化や湿潤度等の散乱環境が画像取得日によって微妙に違うからと考えられる。しかし、ここではこれらの影響は小さいとみなし、甚大被害地域を抽出するとの観点から、全ての境界線から判別される大破率100%の地域(図-10中の斜線範囲)を建物被害地域とする。表-3中の太字にその場合の判別結果を示す。ERSでは大破率100%地域の判別精度が50%弱に低下するが、甚大被害地域は概ね抽出していると考えられる。なぜなら、前述したように大破率100%地域であってもオープンスペースが広く分布していたり、全壊と認定されても倒壊等に至らない建物も存在しており、後方散乱特性に大きな影響を及ぼさないこのような地域が地震前後での地表変化が小さいとみなされて判別から漏れていると考えられるからである。判別境界線を下げたことにより、無被害地域の誤判別も7%程度に下がる。そのため、2群の判別の中率は約70%にとどまり、それぞれの境界線により判別した場合の的中率と大差がない。また、4つの画像ペアによる判別精度は概ね等しい。

一方、JERSでは1995年5月4日(約4ヶ月後)の画像の方が1995年2月4日(約3週間後)の画像よりも判別の中率が高い傾向があるものの、画像ペアによって、判別精度にバラツキがあり、大破率100%地域の判別精度もERSと比較すると低い。前述したように、JERSの強度画像にはスペckルノイズだけでなく観測機器に起因するノイズが多く含まれ、それが判別精度の低下や大きなバラツキの原因のひとつと考えられる。特に、1995年2月5日と1992年10月22日の画像にはノイズが多く含まれることから、これらを利用した際の判別精度は低くなる。

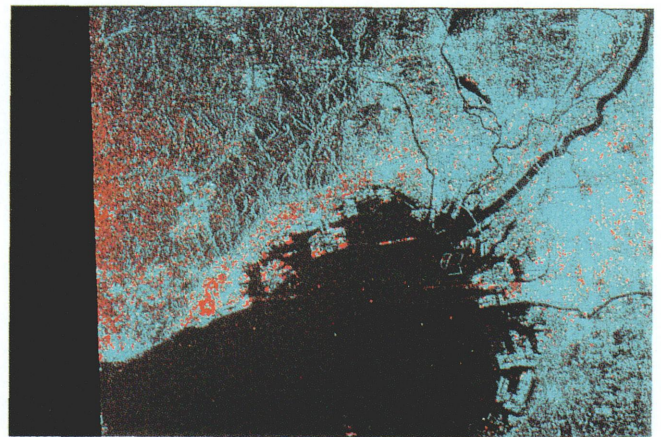
## 6. SAR画像により抽出された被害地域の分布

前章の手順に基づき、1995年5月23日取得のERS画像の全域に対して抽出した大被害地域の分布を図-11(a)に示す。地震前として1994年10月12日の画像を用い、この画像に被害分布を重ねている。なお、この判別手順を適用する前処理として、対象地域を市街地に限定するために、後方散乱強度がある程度大きい地域を閾値(-4dB)<sup>7)</sup>により選定している。図より、神戸から西宮や宝塚にかけて多くのピクセルが抽出されており、図-2に示す被害調査データに基づく被害分布と対応する。ただし、実際には大きな被害がないにもかかわらず、大阪平野や兵庫県内の谷底平野にも部分的に大被害と判定される地域が存在する。これはスペckルノイズの影響が最も大きい、観測期間内で地震とは無関係の地表変化(例えば、再開発や建物の新築、立て替えなど)があった可能性も考えられる。したがって、今後は建物一棟レベルでの地表での凹凸等のマイクロ波の散乱環境に係るより詳細なデータとの比較により誤判読の原因を究明する必要がある。

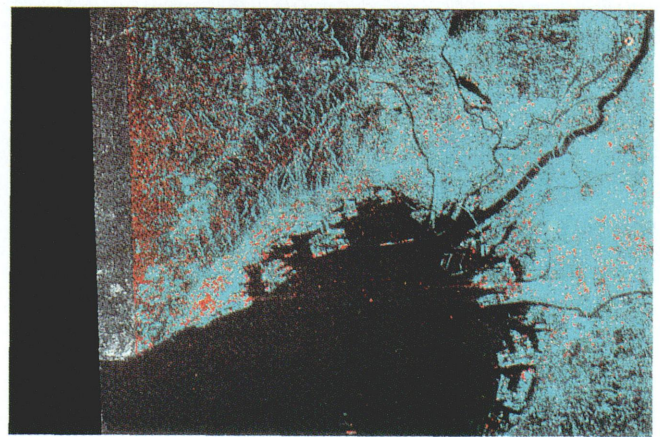
ERSとほぼ同じ時期に観測された1995年5月4日のJERS画像による抽出結果を図-11(b)に示す。地震前の画像には1994年5月17日の画像を用いている。結果は甚大被害地域を概ね抽出していると考えられるが、西宮から宝塚にかけての被害地域を抽出できていない点でERSとは異なる。これらの地域での地表面の状況(被害形態や市街地の構成)がマイクロ波の波長や入射角に依存していたことが示唆されるが、詳細なデータを持ち合わせていないため断定はできない。図-11(c)には地震後約3週間の1995年2月5日観測によるJERS画像での抽出結果を示す。焼失地域を含む甚大被害を受けた長田区では被害地域が概ね抽出できるが、長田区から西宮にかけての被害地域(震災



(a) ERS(1995/5/23 - 1994/6/3)



(b) JERS(1995/5/4 - 1994/5/17)



(c) JERS(1995/2/5 - 1994/5/17)

図-11 地震前後の画像から抽出した大被害地域の分布(赤色)

の帯)の抽出は十分とは言い難い。都市域をSARで観測した場合、高層建物の分布している地域の方が低層建物の分布している地域よりも後方散乱強度は大きくなる傾向がある<sup>16)</sup>。この地震では、中高層の建物も倒壊等の甚大な被害を被っているが、空間的な広がりという点では、低層建物の被害の方が圧倒的に多い。低層の建物が倒壊した程度の凹凸の変化では、後方散乱強度に与える影響が比較的小さいため、地震後3週間の画像から推定される被害地域の分布が明瞭でないもの

と考えられる。そして、JERS 画像(図-11(b), (c))の結果については、特に図中の左側から画像全体にかけてノイズの影響により山岳部であっても被害地域と誤判読されるピクセルが多数分布する。観測機器に起因するこれらのノイズは、SARの観測システムが安定さえすれば減少すると考えられる。

ここで提案した手法は、被害地域の内でも特にマイクロ波の後方散乱に影響を及ぼすような甚大被害地域を浮き立たせ、大局的な被害分布を推定するものとして位置づけられ、低層建物の場合、焼失により更地化した地域など、極端に地表面が変化した地域が含まれる。しかし、スペckルノイズ等により誤判読される地域もみられることから、今後はノイズの影響や除去についての詳細な検討が必要である。そして、世界各国で発生している被害地震に対してこの手法を適用することで、層崩壊を含む中高層建物の被害の検出精度を明らかにしていく予定である。なお、本手法は兵庫県南部地震を観測した既存の衛星の性能に基づいている。近い将来打ち上げられる衛星には高い空間分解能とS/N比が期待でき、より小さな地表変化を検出できることから、被害抽出の精度は向上する可能性がある。

## 7. 結論

人工衛星に搭載した合成開口レーダ(SAR)による地震被害検出手法の構築のために、地震前と地震後のそれぞれの期間において、阪神・淡路地域を観測したERSとJERSの複数のSAR画像の時系列解析を行った。その結果、建物被害地域での後方散乱強度の差分値と相関値の低下は地震に起因することを明らかにし、これらの指標で建物被害に伴う地表変化をモニタリングする上では、マイクロ波の波長や入射角等の影響はそれほどないことがわかった。そして、後方散乱強度の差分値と相関値に基づく被害検出手法を複数時期の画像に適用し、実際の被害データと比較することでその検出精度を明らかにした。今後、画像に含まれるノイズの影響やその軽減について検討し、より精度の高い被害検出手法を構築していく予定である。

## 謝辞

JERS 画像は経済産業省と宇宙開発事業団、ERS 画像は欧州宇宙機関所有のものであり、宇宙開発事業団より提供を受けた。図-2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)。

## 参考文献

- 1) ストーニー・ウィリアム、ヒューズ・ジョン: 新たなスペースレースが始まる 2000年までに打ち上げられる31の地上観測用衛星, GIS WORLD 日本版, No.01, pp.74-77, 1999.
- 2) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Fiegl, K., and Rabaute, T.: The Displacement Fields of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry, *Nature*, Vol.364, pp.138-142, 1993.
- 3) 島田政信: 地震解析中間報告, 阪神・淡路大震災関連調査, 兵庫県南部地震災害調査報告, 地球環境観測委員会・宇宙開発事業団・(財)リモートセンシング技術センター, pp.91-96, 1995.
- 4) Yonezawa, C. and Takeuchi, S.: Detection of Urban Damage Using Interferometric SAR Decorrelation, *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, CD-ROM, 1999.*
- 5) 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.*
- 6) 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, CD-ROM, 2000.*
- 7) 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.
- 8) 大倉 博, 実測哲也: SAR 画像による兵庫県南部地震の地表面変化の観測, 阪神・淡路大震災関連調査, 兵庫県南部地震災害調査報告, 地球環境観測委員会・宇宙開発事業団・(財)リモートセンシング技術センター, pp.75-90, 1995.
- 9) 資源・環境観測解析センター: 新編リモートセンシング用語辞典, 1996.
- 10) 日本リモートセンシング研究会: リモートセンシング用語辞典, 共立出版, 1989.
- 11) Lee, J.S.: Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.PAMI-2, No.2, pp.165-168, 1980.
- 12) 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.
- 13) 宇宙開発事業団: JERS SAR / ERS AMI IMAGE データフォーマット説明書, 1996.
- 14) 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.
- 15) Radarsat International Inc.: <http://www.rsi.ca/>.
- 16) 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.

## 注)

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雑音。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、たとえ地表面が均一な散乱面であっても、セルごとに濃度のゆらぎが認められる。これは散乱の際の干渉効果によるもので、コヒーレントな電波を利用するレーダでは避けられないものである。このスペckルノイズを減らすためには、周辺のセルの平均化を行うが、これにより空間分解能の低下が生じる。この処理をマルチルック処理と呼び、平均をとるセル数をルック数と呼ぶ<sup>10)</sup>。

(2001年5月1日原稿受理, 2001年10月10日採用決定)