

スペックルノイズが SAR 強度画像を利用した
建物被害地域の判別に及ぼす影響

**Effect of Speckle Noise for Detection of Damaged
Building Area Using SAR Intensity Images**

松岡昌志

Masashi MATSUOKA

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

山崎文雄

Fumio YAMAZAKI

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

スペckルノイズが SAR 強度画像を利用した 建物被害地域の判別に及ぼす影響

Effect of Speckle Noise for Detection of Damaged Building Area Using SAR Intensity Images

松岡 昌志*・山崎 文雄*

Masashi MATSUOKA and Fumio YAMAZAKI

Abstract: One of the remarkable characteristics of synthetic aperture radar (SAR) is to record physical value called backscattering coefficient of the earth's surface, regardless of weather condition or sun illumination. Therefore, SAR is a powerful tool which can be utilized to develop a universal method to fully comprehend damaged areas in natural hazards such as earthquakes, forest fires and floods. We performed a feasibility study on backscattering characteristics of damaged areas in the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe), Japan earthquake using the pre- and post-event ERS-1 images, revealing that the backscattering coefficient and intensity correlation between the two attained values were significantly lowered in hard-hit areas. The evaluation, however, was performed without speckle noise reduction. In this study, we investigated the effect of pixel-window size in evaluating building damage using the difference in the backscattering coefficient and correlation coefficient of pre- and post-event ERS images filtered for speckle noise reduction. From the above analysis an optimum window size for the damage evaluation was obtained. It was also found that the accuracy of damage detection was not significantly improved for speckle-reduction filtering of window size larger than 21×21 pixels.

1. はじめに

都市直下地震などの大規模災害においては被害が広域にわたることから、その全体像の把握は容易なことではなく、多大な時間と労力がかかる。現地踏査が困難な地域や時期における地表モニタリングの手段として、人工衛星や航空機等を利用したリモートセンシングがある。その中でも、有毒ガスを伴う火山噴火の際や、放射能施設被害など低軌道からの観測が困難な場合、および情報インフラが十分でない途上国での被害地域を早期に特定する目的には、人工衛星リモートセンシングが有利である。例えば地震災害の早期把握の観点では、全世界を1日に2度以上観測する軍事気象衛星のDMSP/OLS画像を利用し、都市における光の

量の低下域を被災地として推定する手法が提案されている¹⁾。より空間分解能の高い衛星を利用した被害地域判読の試みは1995年兵庫県南部地震を契機に本格的に実施され²⁾、Landsat画像からは焼失地域などの甚大建物被害や液状化に伴う噴砂地域が検出できることが現地調査データとの定量的比較に基づいた解析から明らかにされている³⁾。しかし、これらの光学センサ画像は天候の制約を受け、得られる画像情報は地表からの反射/放射成分の強さに依存することから、一般的かつ汎用的な被害抽出手法の構築は比較的困難と考えられる。

一方、雲の影響や昼夜を問わず観測可能なレーダによる被害判読も試みられ、この地震前後の合成開口レーダ(SAR)画像から被害地域では後方散乱特性が変化することが観測事実として確認された⁴⁾⁻⁶⁾。そして、松岡・山崎(2001)⁷⁾は汎用的な被害抽出手法の構築を目指すため、基本物理量である後方散乱係数を用いて地震前後の後方散乱係数の変化と建物の被害程度との関係を定量的に示し、後方散乱係数の差分と相関値から建物被害の甚大な地域を判別することを試みた。そ

*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
Earthquake Disaster Mitigation Research Center,
NIED, Japan

〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山2465-1

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 41, NO. 5, 2002

の際、7×7ピクセルのウィンドウ内の平均的な後方散乱係数の差分を用い、相関係数もそのウィンドウから算出していたが、本来、対象物の特徴やその空間サイズ、センサの性質や空間分解能、画像のピクセルサイズなどによって変化域の抽出に適したウィンドウサイズが存在するものと考えられる。また、マルチルック処理したERS-1画像を利用したとはいえ、スペckルノイズ低減を目的としたフィルタをかけていないため、判別結果にはスペckルノイズの影響が多少なりとも含まれている。

地上対象物ごとの判別に適したスペckル低減フィルタの評価は以前よりされてお⁹⁾、最近では微小な対象物を良好に抽出するためのフィルタも提案されている¹⁰⁾。しかし、建物被害地域のような小さな変化、つまり、ERS-1画像の利用の場合、無被害地域と比較すると地震後の建物被害地域では後方散乱係数が約1dB、相関係数が0.2程度低下する⁷⁾ような変化について、その判別に適したフィルタを検討した例はみあたらない。そこで本報では1995年1月17日の兵庫県南部地震の前(1994年10月12日)と後(1995年5月23日)に被災地を観測したERS-1画像および現地調査データを用いて、建物被害地域の判別に適したウィンドウサイズについて考察し、スペckルノイズ低減フィルタが建物被害地域の判別に及ぼす影響について検討した。なお、本報では混乱を避けるために地震前後の画像の変化指標(本研究では差分と相関係数)を算出する際のウィンドウの大きさを“ウィンドウサイズ”、地震前後それぞれの画像に対して適用するスペckル低減フィルタのサイズについては“フィルタサイズ”と記述する。

2. 後方散乱特性による建物被害地域と無被害地域との判別

地震などによって地表に何らかの変化が発生した場合、後方散乱特性も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と考えられる。図1に示すように、人工衛星から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¹¹⁾。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り衛星に戻る成分は小さくなる。つまり、地震前後では建物被害地域における後方

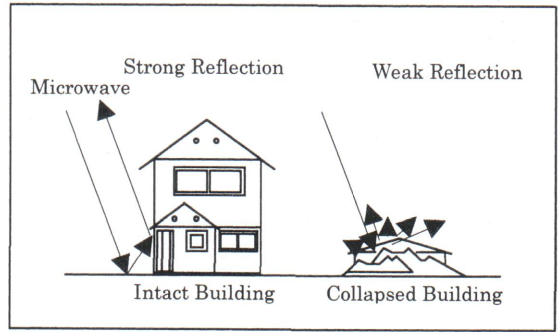


図1 後方散乱の模式図

散乱特性の空間分布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値で表現できると考えられる。前者は対象ピクセルを中心としたウィンドウ内の後方散乱係数 σ^0 [dB]の平均値について地震後から地震前の値を引いたもの、後者はそのウィンドウから計算される相関係数が考えられる。

以上の仮説を立証するために、既報⁷⁾では1995年兵庫県南部地震の被災地を観測したデータを用いて、建物被害地域における後方散乱特性を検討し、建物被害地域の判別を試みた。以降ではその内容を簡単にまとめる。

地震の前後に図2に示す被災地を観測したERS-1画像(空間分解能とピクセルサイズ:約30m)を用意し

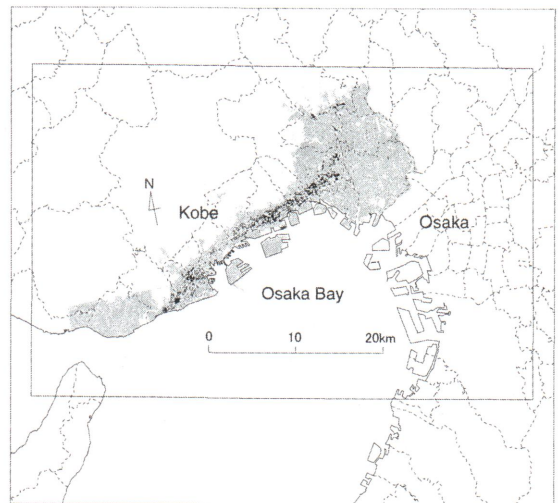


図2 対象地域(矩形はERS-1画像の範囲、灰色は建物被害調査データ¹³⁾の範囲。その内、黒色は全壊または大破建物の割合が30%以上の地域)。一部は建築研究所が国土地理院の承認を得て、同院発行の数値地図10000(総合)を複製したCD-ROMに基づいて作成(承認番号 平8総複, 第26号)

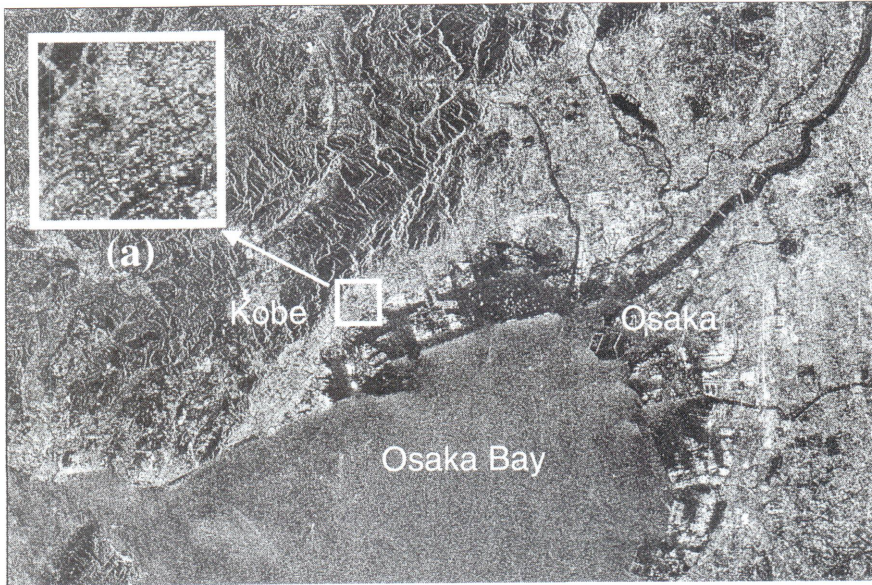


図3 地震前の ERS-1 強度画像 (1994年10月12日観測)

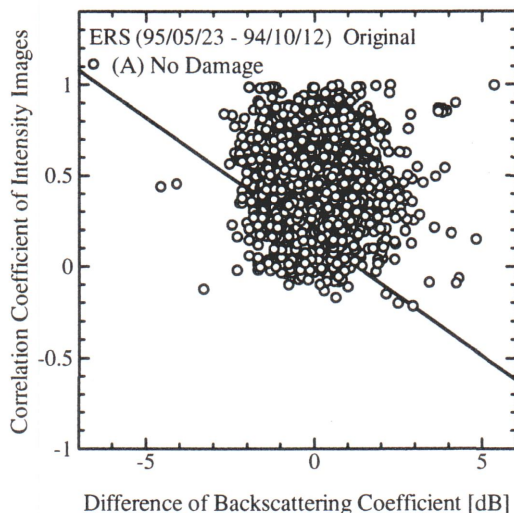
た。図3には地震前に観測された強度画像を示す。2つの画像のレジストレーションの後、差分値と相関係数を算出した。レジストレーションの方法は相関係数が高い対応点を画像全域から約100点を自動探索¹²⁾して、地震前の画像にアフィン変換を施し、最近隣内挿法によりピクセルの再配列を行った。なお、差分値と相関係数の算出は、ここでは7×7ピクセルのウィンドウサイズを用いた。SAR画像との比較に用いるグラウンドトゥルスデータは、被災地全域を統一的評価に基づいて現地調査されたものである必要がある。その条件を満足する建物被害調査データとして、建築研究所が震災復興都市づくり特別委員会の調査に兵庫県都市住宅部計画課による調査結果を加えて整理したもの¹³⁾を用いた。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。このデータの内、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30%以上の街区を黒色で表示している。そして、SAR画像に建物被害調査データを重ね合わせることで、建物被害地域における後方散乱特性の変化が検討可能になる。地域の被害レベルを表す指標として建物の大破率(D)を用い、大破率ごとにそれぞれ無作為に2000ピクセルをトレーニングデータとして選定した。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あり、街区ごとに集計した。無被害地域を被害レベルAとし、大破率6.25%未満をレベルB、12.5%未満をレベルC、25%未満レベルD、50%未満レベルE、100%未満レベルF、そして大破率100%地域を被害レベル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。

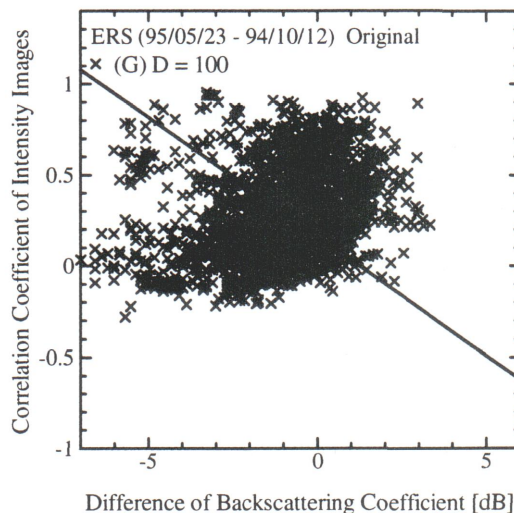
以上のような手順によって導きだされた無被害地域と大破率100%地域それぞれの地域における後方散乱係数の差分と相関係数の分布を図4に再掲する。これら2群は重なり合っており明確には分離し難い。しかし、両者を分離する境界線を線形判別手法¹⁴⁾によって求め、無被害ピクセルの誤判別率が10%になるように判別得点を求めると、その判別関数は太実線のようにになる。なお、以降の章でも判別関数および判別境界線と明記したものについては、この手順に基づいて得られた関数および境界線を指す。表1中の斜体には判別関数に基づき、大破率100%地域(太実線の下領域)を判別した際の抽出ピクセル数を被害レベルごとに示している。

3. ウィンドウサイズが被害判別精度に与える影響

前章に示した既報⁷⁾での検討結果により、建物被害地域を判別することができたものの、大破率100%地域



(a) 無被害地域



(b) 大破率100%地域

図4 無被害地域(a)と大破率100%地域(b)における後方散乱係数の差分と相関値の分布 (ウィンドウサイズは7×7ピクセル)。図中の実線は差分と相関値を変数としたときの、両地域を判別する線形判別境界線

表1 無被害地域と大破率100%地域の2群判別結果

Damage level severe damage ratio: D (%)	Total number of pixels	Number of pixels classified into D=100	
		Non-filtered 7×7 pixel window	21×21 Lee filtered 13×13 pixel window
(A) No Damage	2000	217	215
(B) D<6.25	2000	246	288
(C) D<12.5	2000	403	516
(D) D<25	2000	446	703
(E) D<50	2000	693	1005
(F) D<100	2000	948	1361
(G) D=100	2000	974	1377

と無被害地域の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数に対する割合) は68.9%であった。また、大破率100%の地域が正しく判別された割合は50%弱なので、判別精度が高いわけではない。ただし、前述したようにこれまでの結果は差分値と相関係数を算出する際のウィンドウサイズが7×7ピクセル (約210m 四方) の場合であり、そのサイズが被害判別に最適であるかは不明である。相関係数を算出するウィンドウサイズを大きくするほど、被害地域と無被害地域の分離性が高くなるとの指摘もある¹⁵⁾。そこで、ここでは他のウィンドウサイズについても前章で示した手順で判別率を算出し、ウィンドウサイズが判別精度に与える影響について定量的に検討する。

ウィンドウサイズを3×3~51×51ピクセルまで変

化させ、そのウィンドウ内の差分と相関係数を算出し、上述の手順に従い無被害地域と大破率100%地域の判別境界線を求めた。図5にウィンドウサイズから計算される面積を横軸に判別率を縦軸に示す。ウィンドウサイズが大きくなると的中率が高くなり、21×21ピクセルで最も高くなる。的中率が増加するのは被害を受けた建物が、ある程度の空間的広がりを持っているためと考えられる。また、差分値算出の際にウィンドウ内の平均値を用いていることから、平均化フィルタをかけたことと同等となり、スペックルノイズが軽減されたことによる的中率が増加したとも考えられる。ただし、31×31ピクセル以上の大きさになると、無被害地域として選定したピクセルであっても被害建物を含み、またその逆もありえることからの中率が減

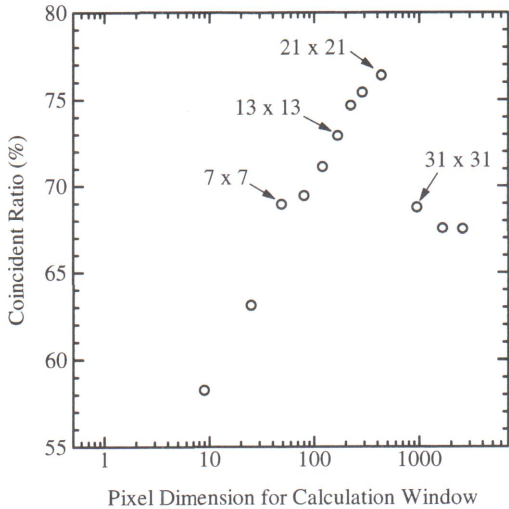


図5 差分値および相関係数を算出するウィンドウサイズと無被害地域と大破率100%地域の判別の中率の関係

少していく。

4. スペックルノイズが被害判別精度に与える影響

4.1 スペックル低減フィルタの効果

スペックルノイズはコヒーレントな電波を利用するレーダ観測では避けられないものであるが、その低減手法は既に提案されており¹⁶⁾、フィルタ処理はそのひとつである。そこで、地震前後の強度画像にスペックル低減フィルタをかけた場合の建物被害地域の判別精度について検討する。典型的なスペックル低減フィルタとして、Median、Lee¹⁷⁾、Frost¹⁸⁾の3種類を取り上げ、レジストレーションした地震前後の画像に適用し

た。フィルタサイズは 5×5 ピクセルとした。図6(a)~(c)にそれぞれのフィルタ処理後の地震前画像について図3中の矩形領域を拡大したものを示す。なお、画像はみやすいようにヒストグラム平滑化による濃度変換をしている。図3(a)に示す原画像と比較するとMedianフィルタはローパスフィルタをかけた画像のようにぼんやりとしたものになる。LeeフィルタとFrostフィルタでは道路などの街区境界線がやや鮮明にみられる。

地震前後のスペックル低減フィルタ処理後の画像から差分値と相関係数を計算する。ウィンドウサイズは 7×7 、 13×13 、 21×21 ピクセルについて検討した。図7~9にはウィンドウサイズが 7×7 の場合の無被害地域と大破率100%地域における地震前後の差分値と相関係数の関係を3種類のフィルタごとに示す。程度の差があるにしても全てに共通することは、フィルタをかけることによって後方散乱係数の差分のばらつきが小さくなる。Frostフィルタでその傾向は著しい。しかし、相関係数に関してはMedianフィルタやFrostフィルタの場合においてばらつきが大きくなる。大破率100%地域でのばらつきの方が特に大きい。Leeフィルタに関しては図4に示す原画像とそれほど大きな違いがないが、無被害地域および大破率100%地域ともに相関係数のばらつきは同程度かあるいは小さくなる。図7~9には2群の判別境界線も示している。原画像に基づいて算出した判別境界線(図4参照)より、MedianフィルタとFrostフィルタの場合には、右肩下がりで傾きが大きくなり、これは相関係数のばらつきが大きくなったことに起因する。それぞれの境界線から判別の中率を計算した結果を図10に示す。ウィンドウサイズが 13×13 、 21×21 ピクセルの場合も併せ

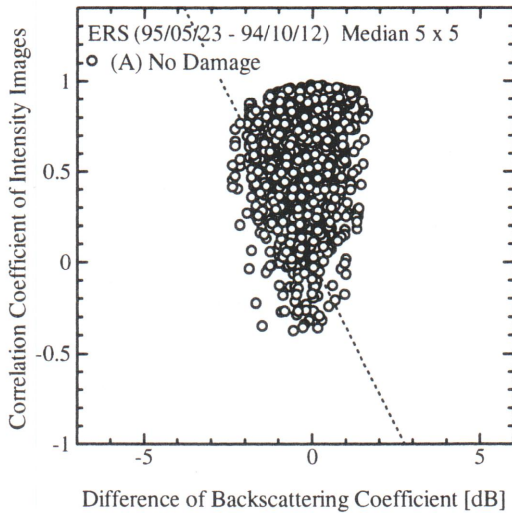


(a) Median

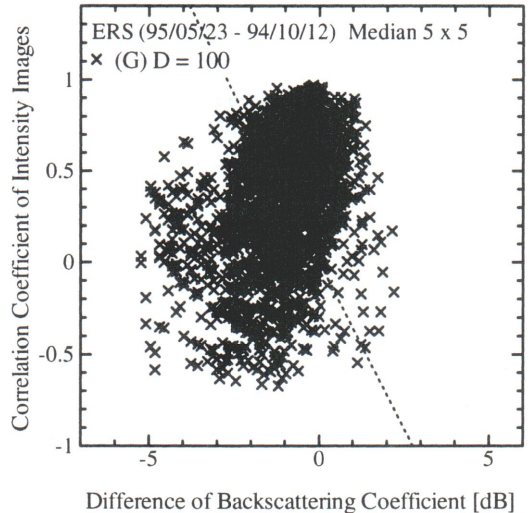
(b) Lee

(c) Frost

図6 5×5 ピクセルウィンドウによるフィルタ処理画像

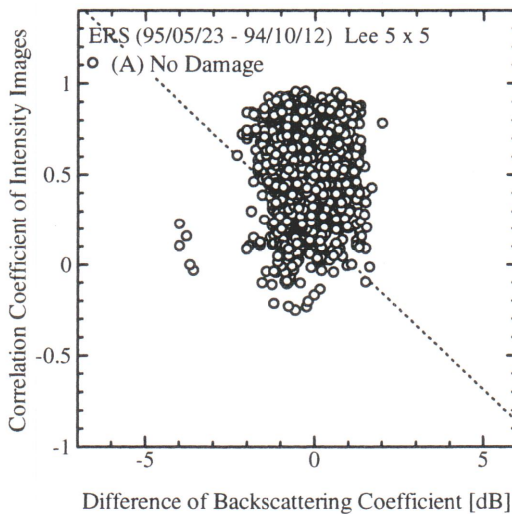


(a) 無被害地域

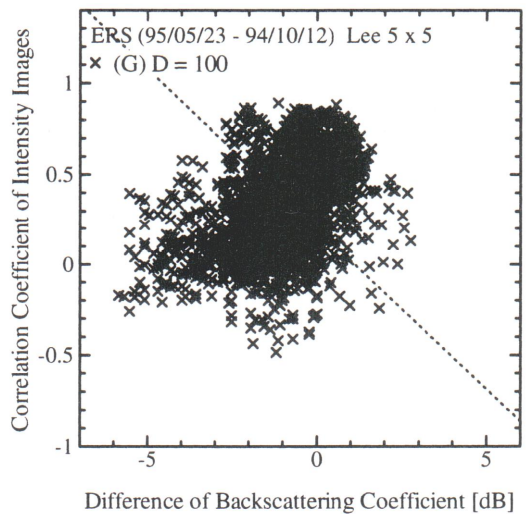


(b) 大破率100%地域

図7 5×5ピクセルウィンドウのMedianフィルタ処理をかけたSAR画像を利用した際の無被害地域(a)と大破率100%地域(b)における後方散乱係数の差分値と相関係数の分布(差分値および相関係数の算出の際のウィンドウサイズは7×7ピクセル)。図中の点線は差分と相関値を変数としたときの、両地域を判別する線形判別境界線



(a) 無被害地域



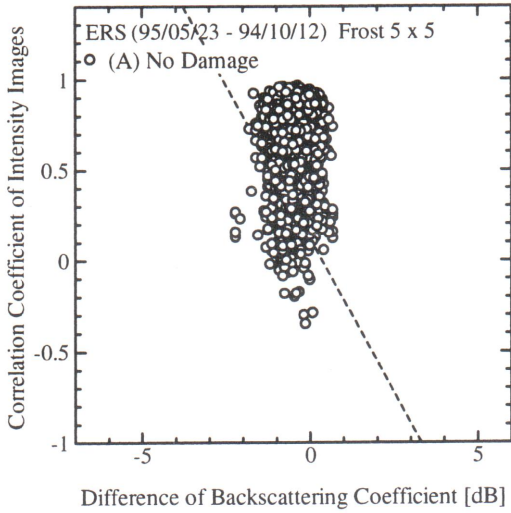
(b) 大破率100%地域

図8 5×5ピクセルウィンドウのLeeフィルタ処理をかけたSAR画像を利用した際の無被害地域(a)と大破率100%地域(b)における後方散乱係数の差分値と相関係数の分布(差分値および相関係数の算出の際のウィンドウサイズは7×7ピクセル)。図中の点線は差分と相関値を変数としたときの、両地域を判別する線形判別境界線

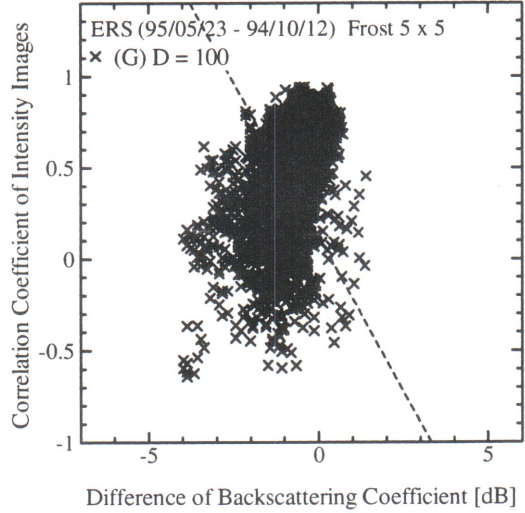
で示している。Medianフィルタをかけて、かつウィンドウサイズが7×7の際に的中率がやや低いものの、それ以外ではスペックル低減フィルタをかけることによって原画像を利用するよりは的中率が高くなる。3種類のフィルタを比較するとLeeフィルタとFrostフィルタを用いた場合に判別の中率がやや高い。

4.2 フィルタサイズの影響

スペックル低減フィルタが被害判別精度の向上に効果があることが明らかになったが、ここでは用いるフィルタサイズと判別の中率の関係について検討する。Leeフィルタを用いた際に相関係数のばらつきが小さくなり、また判別の中率が高いことから、計算が



(a) 無被害地域



(b) 大破率100%地域

図9 5×5ピクセルウィンドウのFrostフィルタ処理をかけたSAR画像を利用した際の無被害地域(a)と大破率100%地域(b)における後方散乱係数の差分値と相関係数の分布(差分値および相関係数の算出の際のウィンドウサイズは7×7ピクセル)。図中の点線は差分と相関値を変数としたときの、両地域を判別する線形判別境界線

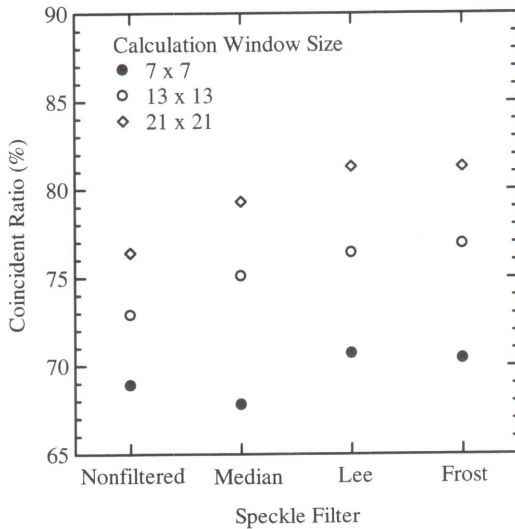


図10 スペックル低減フィルタごとの無被害地域と大破率100%地域の判別の中率(差分値および相関係数を算出する際のウィンドウサイズは、●: 7×7, ○: 13×13, ◇: 21×21ピクセル)

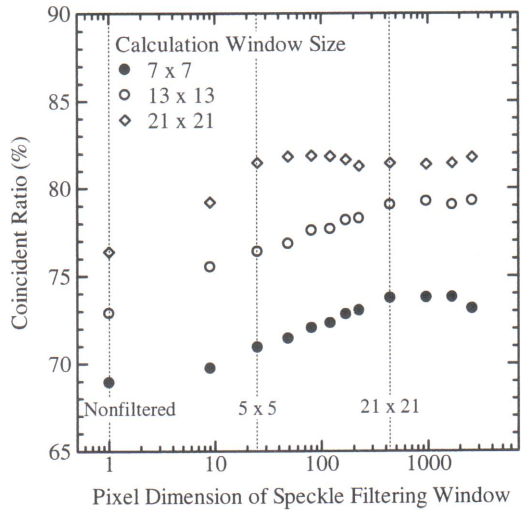


図11 Leeフィルタのフィルタサイズを変えた場合の無被害地域と大破率100%地域の判別の中率(差分値および相関係数を算出する際のウィンドウサイズは、●: 7×7, ○: 13×13, ◇: 21×21ピクセル)

容易なLeeフィルタを採用する。フィルタサイズを3×3から51×51まで変化させた場合のウィンドウ内の面積と、無被害地域と大破率100%地域の判別の中率との関係を図11に示す。ウィンドウサイズが7×7, 13×13, 21×21ピクセルのいずれのウィンドウにおいても、フィルタサイズが大きくなるほどの中率が高くなり、ウィンドウサイズが7×7と13×13ピクセルの

場合に上記の傾向がほぼ類似しており、フィルタサイズが21×21ピクセルあたりでの中率の増加が顕著でなくなる。一方、ウィンドウサイズが21×21ピクセルについてはフィルタサイズを5×5ピクセルより大きくしてもの中率はそれほど増加しない。図12には一例としてウィンドウサイズが13×13ピクセルの場合の無被害地域と大破率100%地域の判別境界線をフィルタサ

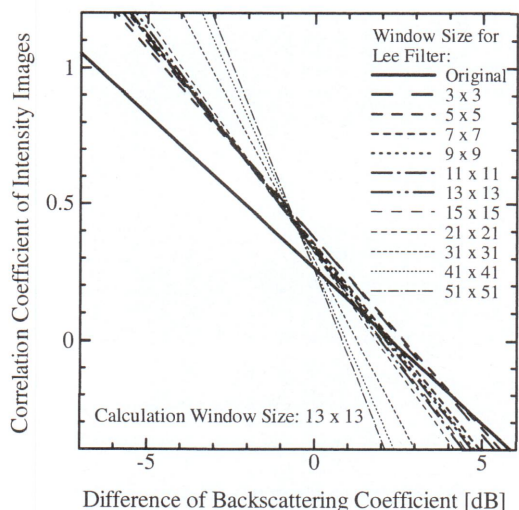


図12 Lee フィルタのフィルタサイズを変えた場合の無被害地域と大破率100%地域を分離する線形判別境界線（差分値および相関係数を算出する際のウィンドウサイズは13×13ピクセル）

イズごとに示す。スペックル低減フィルタをかけない画像（原画像）を用いた場合の判別境界線と比較すると、フィルタをかけることによって境界線が左肩上がりになり、フィルタサイズが大きくなるにしたがいその傾きも大きくなる。3章で述べたように計算するウィンドウサイズが21×21ピクセルの場合に的中率が最も高くなり、また、的中率をより高めるためにはスペックル低減フィルタのサイズも21×21ピクセル程度の大

きが必要ということになり、両者に共通して21×21がクライテリアになっている。

5. 建物被害地域の抽出結果の比較と考察

以上の解析からは、ウィンドウサイズが21×21ピクセルを用いた際に被害の判別精度は高い。しかし、ウィンドウサイズが大きいほど空間的に小さい変化に対して鈍感になり、得られる判別結果の分布は概略的なものとなる。したがって、空間的に小規模な建物被害地域を検出するためには、できるだけ小さいウィンドウサイズを選定することが望ましい¹⁵⁾。そのような視点で図11をみると、フィルタサイズが21×21ピクセル以上のスペックル低減フィルタをかけた画像に対してはウィンドウサイズが13×13ピクセルでの的中率も21×21ピクセルのそれと大差がない。したがって、ここではウィンドウサイズとして13×13ピクセルを採用することにした。つまり、フィルタサイズが21×21ピクセルのLeeフィルタをかけた画像について（地震前については図13参照）、13×13ピクセルのウィンドウ内から算出した後方散乱係数の差分と相関係数を説明変量とした判別境界線（図12中のフィルタサイズが21×21ピクセル）を用いる。トレーニングデータに対してこの判別境界線を適用し、大破率100%地域として判別したピクセル数を表1の右欄に示す。原画像を利用した場合（表1の左欄）に比べ、大破率が高い地域では

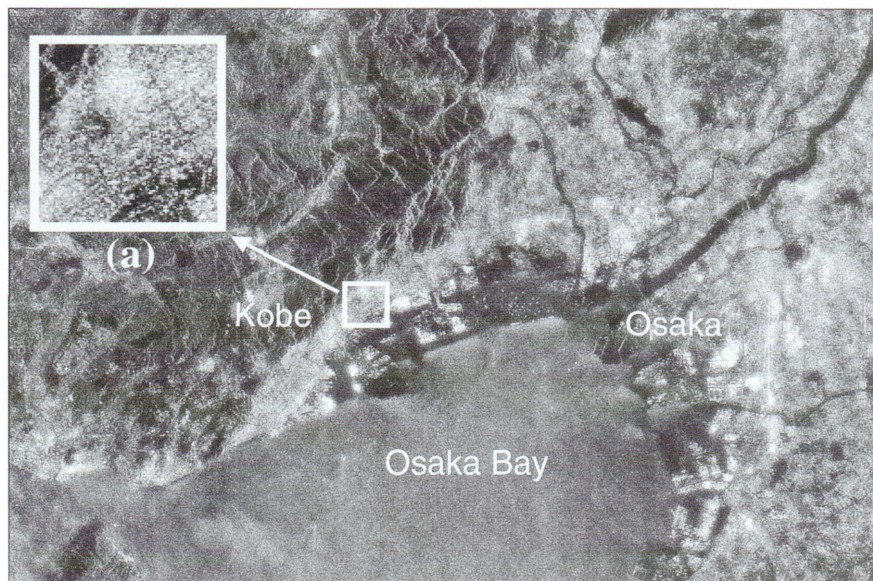
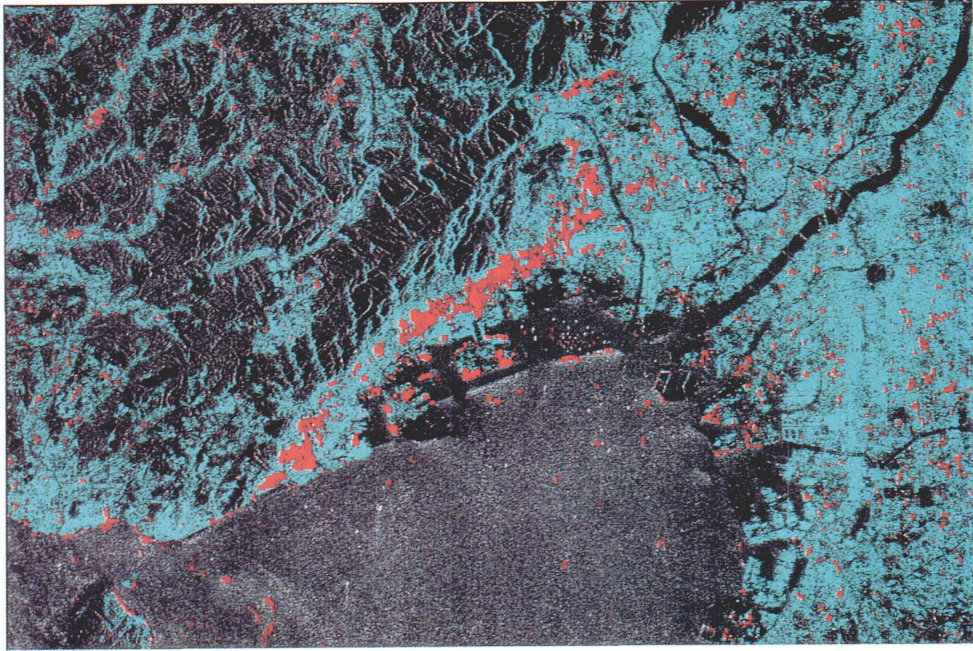
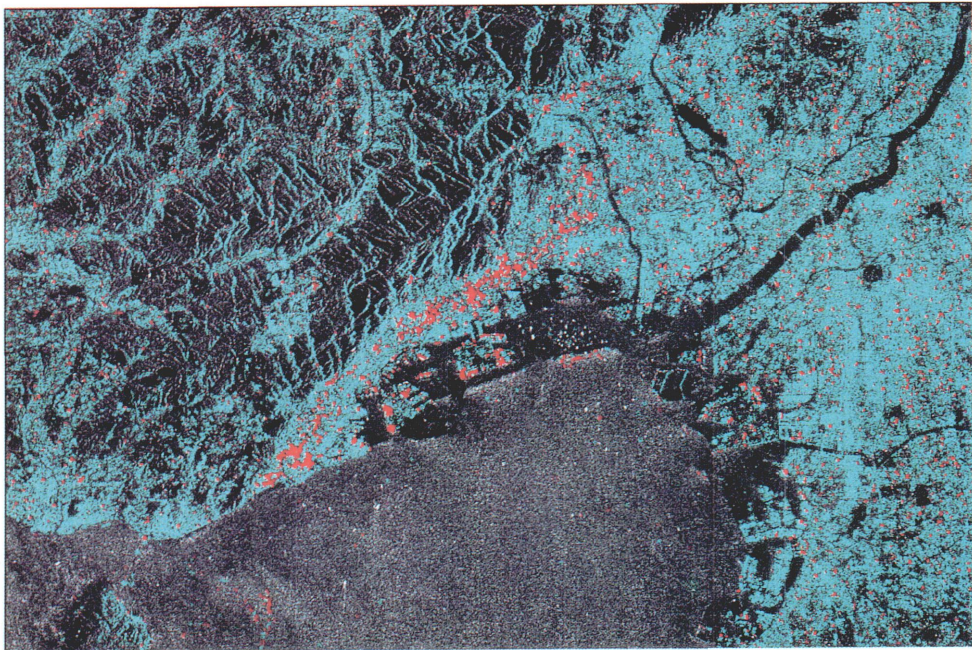


図13 21×21ピクセルのLeeフィルタ処理後のERS-1強度画像（1994年10月12日観測）



(a) 21×21 ピクセルの Lee フィルタを適用。ウィンドウサイズは 13×13 ピクセル



(b) 原画像。ウィンドウサイズは 7×7 ピクセル

図14 地震前後の ERS-1 強度画像から抽出した大被害地域の分布 (赤色)

より多くのピクセルが抽出されており、甚大被害地域の推定精度が向上していることを確認できる。

画像全域に対して甚大被害地域を抽出した結果を図14(a)に示す。地震前の画像に重ねて示している。原画像に対してウインドウサイズを7×7ピクセルとして推定した既報⁷⁾での結果を図14(b)に示す。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係数がある程度大きい地域を閾値(-4 dB)⁷⁾を決めて選定している。既報⁷⁾での判別率的中率が約69%であるのに対し、本手法ではそれが79%に向上し(図11参照)、かつ大破率が高い地域の判別精度も向上していることから(表1参照)、図14(a)に示す甚大被害地域の全体的な分布は現地調査による被害分布(図2)とよく対応する。しかし、大きな被害が実際にはない海岸線付近や大阪平野および兵庫県内の谷底平野に大被害と判定される地域が存在する。海岸線近くの誤判別については、ウインドウサイズを13×13ピクセルに大きくしたことにより、低相関を有する海域がウインドウ内に含まれたことによる。平野内についてはスペックル低減フィルタをかけたことにより、スペックルノイズに起因する誤判別地域の数は減少したものの、ウインドウサイズを大きくしたことにより、かえって誤判別が目立つ地域も見受けられる。このような誤判別は地震被害以外の地表の凹凸変化や地震前後では観測環境などが異なることに起因するものと考えられる。今回利用した地震後のERS-1画像は地震後に利用可能な最も早い時期のものではあるものの地震後約4ヶ月が経過している。そのため、地震直後の状況を観ているわけではなく、1994年10月から1995年5月までの間の被害以外の地表変化も被害として判別している可能性がある。今後は再開発や建物の新築等に係わる現地状況の詳細なデータや、衛星の軌道情報、観測時の大気や地表面の湿潤度の影響を評価した上で、誤判別の要因を分析していく必要がある。

ここで提案する手法は、都市構造物の認識に十分な空間分解能を有していない現状の人工衛星の性能に基づいている。そのため、本手法は概略的な被害分布を推定するものとして位置づけられる。しかし、次々に空間分解能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いることから、将来的には小さな地表変化を検出できるようになることが予想され、被害抽出の精度は向上するものと考えられる。また、兵庫県南部地震での建物被害地域を対象とした一例にすぎず、

手法の妥当性については世界各国で発生している被害地震に対して適用することで検証する必要がある。

6. まとめ

ERS-1/SAR強度画像を利用した建物被害地域の判別に関して、判別のための説明変量(地震前後の後方散乱係数の差分と相関係数)を算出する際のウインドウサイズと判別精度との関係について検討した。また、SAR画像にスペックル低減フィルタをかけた場合の判別精度についても、そのフィルタサイズとの関係から定量的に評価した。その結果、スペックルノイズが建物被害地域の判別に大きな影響を及ぼすことを確認し、被害建物群を精度よく判別するには21×21ピクセル以上のスペックル低減フィルタをかけたSAR画像を用いて、13×13ピクセル程度のウインドウサイズから後方散乱係数の差分と相関係数を算出することが適当であることを示した。ただし、ここでの値は空間分解能とピクセルサイズが約30mのERS-1画像を用いた場合での経験則であることから、今後は対象物のサイズ、SARの空間分解能やスペックルノイズとの関係について理論的な考察が必要であろう。

謝 辞

査読者からは非常に懇切丁寧なご指摘をいただき、内容の改善に役立った。本研究の一部は科学研究費補助金(課題番号:10333577)によった。記して謝意を表す。ERS-1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。

(受付日2001.10.10, 受理日2002.9.10)

参考文献

- 1) 小檜山雅之, 林 春男, 牧 紀男, 橋寺 晋, 松岡昌志, ハーバート・クレール, クリストファー・エルビッジ, ルース・ホブソン: DMSP/OLS夜間可視画像を用いた早期被害推定システム(EDES)の開発, 地域安全学会論文集, No. 2, pp.79-86, 2000.
- 2) 地球環境観測委員会, 宇宙開発事業団, (勸)リモート・センシング技術センター: 阪神・淡路大震災関連調査 兵庫県南部地震災害調査報告, 1995.
- 3) 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. 648/I-54, pp.177-

- 185, 2001.
- 4) 米澤千夏, 竹内章司: ERS/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.
 - 5) 青木 久, 松岡昌志, 山崎文雄: 兵庫県南部地震の被害地域における人工衛星 SAR 画像の特徴, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp. 423-426, 1998.
 - 6) 小荒井衛, 茂木公一, 渡辺信之, 徳田正幸, 大石哲, 夏 淑輝, 河合雅己: SAR 強度画像による地震の建物被害地域の抽出法, 日本リモートセンシング学会第29回学術講演会論文集, pp.31-34, 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) 資源観測解析センター: スペックル雑音低減手法の研究, 昭和63年度石油資源遠隔探知技術研究開発報告書, 1989.
 - 9) 若林裕之, 新井康平: SAR スペックルノイズ低減化に関する一手法, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 34, No. 2, pp.15-24, 1995.
 - 10) Sakurai-Amano, T. and J. Iisaka: Speckle Reduction of SAR Images for Small Feature Extraction, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 38, No. 3, pp.32-43, 1999.
 - 11) 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.
 - 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) 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.
 - 14) 有馬 哲, 石村貞夫: 多変量解析のはなし, 東京図書, 1987.
 - 15) Yonezawa, C. and S. Takeuchi: 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.
 - 16) 資源観測解析センター: 合成開口レーダ (SAR), 資源探査のためのリモートセンシング実用シリーズ 5, 1992.
 - 17) Lee, J.S.: Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-2, No. 2, pp.165-168, 1980.
 - 18) Frost, V.S., J.A. Stiles, K.S. Shanmugan, and J. C. Holtzman: A Model for Radar Images and its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-4, No. 24, pp.157-166, 1982.