



人工衛星 L バンド SAR に基づく建物の地震被害推定モデルの構築と ALOS/PALSAR 画像への適用

松岡昌志¹⁾, 能島暢呂²⁾

1) 正会員 産業技術総合研究所, 主任研究員 博士 (工学)

e-mail : m.matsuoka@aist.go.jp

2) 正会員 岐阜大学工学部社会基盤工学科, 教授 博士 (工学)

e-mail : nojima@gifu-u.ac.jp

要 約

国内外の巨大地震後の情報空白期における早期かつ確実なる被害情報の収集にALOS衛星のPALSAR画像を活用することを目的として, CバンドSARセンサに基づく既往の建物被害推定モデルをLバンドSARセンサであるPALSAR画像に適用できるよう, 1995年兵庫県南部地震を観測したJERS-1衛星のSAR画像(Lバンド)から全壊率に関する尤度関数を再構築した。そして, 震度情報の被害関数との統合処理により, SAR画像から建物全壊率分布を定量的に推定できることを示した。さらに, 構築したモデルを2007年のペルー地震と2008年の中国四川地震を観測したPALSAR画像に適用し, 現地調査や被害判読結果との比較から手法の妥当性を検証した。

キーワード: Lバンド合成開口レーダ, 建物被害, 震度情報, 統合処理, JERS-1/SAR, ALOS/PALSAR

1. はじめに

各国が保有する地球観測衛星を利用して自然災害の発生直後に被災地を観測する体制が2000年頃に立ち上がり¹⁾, さらに, 時期をほぼ同じくして地上解像度が1m以下の高解像度衛星画像が民生で利用可能になったことで, 世界で多発する地震や津波, 洪水等による被害状況の収集において宇宙からのリモートセンシング画像がより身近になった。人工衛星リモートセンシングによる地球観測は大きくは2つのセンサが使われる。可視域から近赤外域・中間赤外域, さらには, 熱赤外域の反射・放射特性を観測する光学系と, 波長が数cm~数十cmのマイクロ波を用いるレーダ系であり, それぞれの長所を活かして各種の自然災害を観測してきた。高解像度の光学センサ画像からは建物単位の被害判別^{2),3)}や現地調査が困難な地域での地すべりなどの地盤災害を抽出できることから⁴⁾, 災害後の応急対応等への活用が期待されている。しかし, 対象地域に雲や雲影があると被害判読ができない欠点もある。一方, 天候の影響を受けずに昼夜を問わず地表を観測できるレーダセンサは被災地を確実に観測することができ, 被害の全体像を把握する手段として注目を浴びてきた。とくに合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) の位相情報の干渉処理に基づく地殻変動モニタリング技術⁵⁾は多くの解析事例⁶⁾の蓄積を経て実用レベルに達してきた。

効果的な災害対応や復旧活動には建物など社会基盤施設の直接被害とその空間分布の把握が必要になる。そのような背景を受けて、SAR画像の後方散乱強度情報あるいは位相情報と建物被害の比較研究が1995年兵庫県南部地震のデータセットを使って精力的に進められた⁷⁾⁹⁾。地震動情報との重畳も試みられている¹⁰⁾。そして、Matsuoka and Yamazaki¹¹⁾は兵庫県南部地震前後に被災地を観測した欧州宇宙機関のERS-1/SAR画像を用いて、建物被害地域と相関の高い指標として地震前後の後方散乱係数の差分値と相関係数を変数とした線形判別スコアを提案し、さらに、能島ら¹²⁾はSAR画像から建物被害率を評価するために、さらに、震度情報などの異種情報との統合処理を出来るようにするために、差分値と相関係数から建物被害率に関する回帰判別関数を導出し、これに基づく基準化尤度関数から建物全壊率を定量的に推定するモデルを構築した。被害地域の抽出は後方散乱係数という強度情報を利用するため、観測条件や地域性の影響をそれほど受けないことから、そのモデルの汎用性は定性的には検証されている¹³⁾。しかし、能島らのモデルはCバンド（波長が約5.7cm）のERS-1/SAR画像に基づいているため、我が国が所有するLバンド（波長が約23cm）のJERS-1/SARやALOS/PALSAR画像に対しては厳密には適用できない。波長が異なると、対象物への透過性、誘電率や凹凸に起因した後方散乱特性が異なるからである。

そこで本報では、2006年1月の衛星打ち上げ以降、多くの地震被害を観測しているALOS/PALSAR画像に対して適用可能な建物全壊率推定モデルを能島らの手順を踏襲して構築することを目的としている。具体的には1995年兵庫県南部地震を観測したJERS-1/SAR画像から全壊率に関する基準化尤度関数を求め、震度情報の被害関数との統合処理により、建物被害分布を精度良く推定できることを示す。さらに、構築したモデルを2007年のペルー沖地震と2008年の中国四川地震を観測したALOS/PALSAR画像に適用し、現地調査や被害判読結果との比較から検証する。

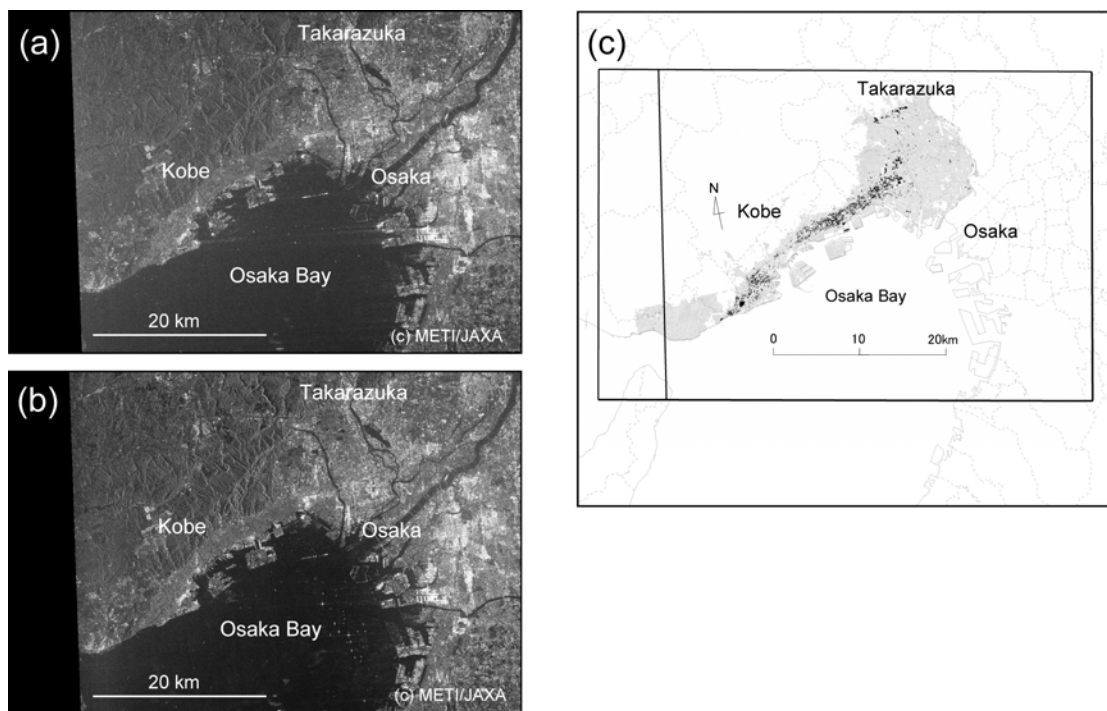


図1 1995年兵庫県南部地震前後のJERS-1/SAR画像と解析範囲。(a) 1994年5月17日観測、(b) 1995年5月4日観測。(c) 建物被害データ¹⁴⁾との対応(黒色は全壊率が30%以上の地域)

2. JERS-1/SAR画像からの尤度関数の構築

2.1 SAR画像とグラウンドトゥルスデータ

我が国が1992年に打ち上げたJERS-1衛星は1998年まで運用され、1995年には兵庫県南部地震の被災地

を観測している。この衛星には光学センサ（OPS: Optical Sensor）とレーダセンサ（SAR）が搭載されていた。地震前後のSAR画像（地震前：1994年5月17日，地震後：1995年5月4日）を図1(a),(b)に示す。また，図1(c)にはグラウンドトゥールースとして用いた旧建設省（現独立行政法人）建築研究所の建物被害データ¹⁴⁾を示す。低層建物の全壊または大破率（本研究では「全壊率」と呼ぶ）が30%以上の地域を黒色にしている。建物被害データの全壊率は街区単位にて求められている。当時のSARセンサはS/N比がやや低いことに加え画像には細かい線状のノイズが目立つ。よって，以降の解析にはノイズの影響が含まれることは否めないが，LバンドSARによって観測され，かつ，統計解析できるほどの詳細な建物被害データが整理されている地震は他に例がないことから，本研究ではこれらのデータセットを利用した。なお，地震後の画像は地震から約4ヶ月後に観測されたものであり，被害を受けた建物の一部は取り壊されたり，撤去されたりしていたと考えられるが，同時期に観測したERS/SAR画像での尤度関数との比較ができるよう，この画像を選定した。なお，SAR画像の1ピクセルの大きさは30mとしている。

2.1 後方散乱係数の差分値と相関係数の算出

地震前後のSAR画像の後方散乱係数の差分値と相関係数の2つの特性値を以下の方法で求める。まず，2時期のSAR画像の正確な位置合わせの後，それぞれの画像に21×21ピクセルウィンドウのスペックルノイズ低減フィルタ¹⁵⁾を施す。差分値は13×13ピクセルウィ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値を引くことで求め，相関係数も同じ13×13ピクセルウィンドウから算出する¹⁶⁾。

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

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

ここで， d は後方散乱係数の差分値[dB]， r は相関係数， N は計算するウィンドウ内のピクセル数を表す。13×13ピクセルのウィ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， $\bar{I} a_i$ ， $\bar{I} b_i$ は*i*番目におけるピクセルの周囲13×13ピクセルの平均値である。

表1 被災ランクの建物全壊率のレンジと中央値

被災ランク	全壊率 D (%)	中央値 (%)
C1	$D = 0$	0.0
C2	$0.0 \leq D < 6.25$	3.13
C3	$6.25 \leq D < 12.5$	9.38
C4	$12.5 \leq D < 25$	18.75
C5	$25 \leq D < 50$	37.5
C6	$50 \leq D < 100$	75.0
C7	$D = 100$	100.0

そして，建物被害データの街区にSAR画像を重ね合わせ，表1に示す7つの被災ランクの地域から各2,000ピクセル（計14,000ピクセル）をランダムに抽出してトレーニングサンプルを作成した。図2に被災ランクごとの d と r の散布図を示す。被害が大きいくほど差分値は負で大きな絶対値をとり，かつ，相関係数が小さくなる傾向にある。これは，地震前の健全な建物に照射し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）によって人工衛星に戻る後方散乱が大きくなるが，倒壊建物や空地に照射されたマイクロ波は多方向に散乱するため衛星に戻る成分は小さくなり，その結果として，差分値が

負となるからである。また、建物被害によって後方散乱係数の空間的な分布が地震前のそれとは異なり規則性が低下することから、相関係数も低下する。

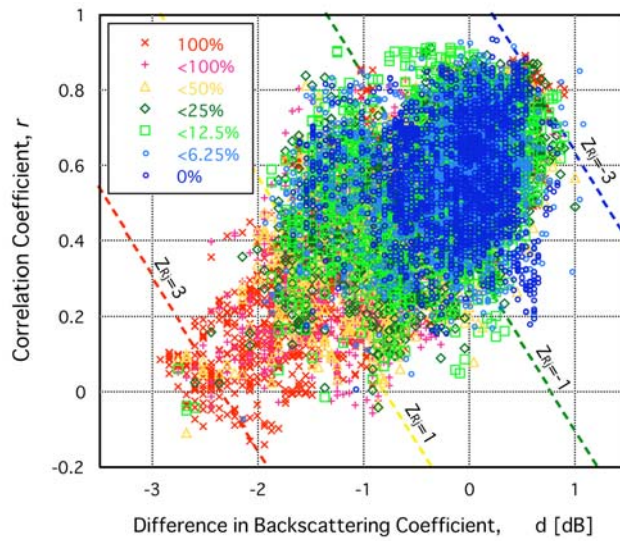


図2 各被災ランクの後方散乱係数の差分値と相関係数の散布図

2.2 回帰判別関数と尤度関数の導出

能島ら¹²⁾にならい、建物被害に関する回帰判別関数は地震前後のSAR画像の後方散乱係数の差分値と相関係数の2つの特性値から算出する。建物全壊率の定量評価のために、7つの被災ランクの d , r を用いて、多群判別の一手法である回帰判別分析¹⁷⁾を適用した結果を式(3)に示す。

$$Z_{Rj} = -1.277 d - 2.729 r \quad (3)$$

ここで、 Z_{Rj} はJERS-1/SARから求めた判別スコアを表す。いくつかの判別スコアに対応する判別式を図2に併記した。ちなみに、ERS-1/SAR画像から求めた判別スコア Z_R の d と r の係数がそれぞれ-1.210と-4.360であったことから¹²⁾、JERS-1/SARによる判別スコア Z_{Rj} は相対的に後方散乱係数の差分値 d を重視するものといえる。図3に地震前後のJERS-1/SAR画像から求めた Z_{Rj} の分布を示す。

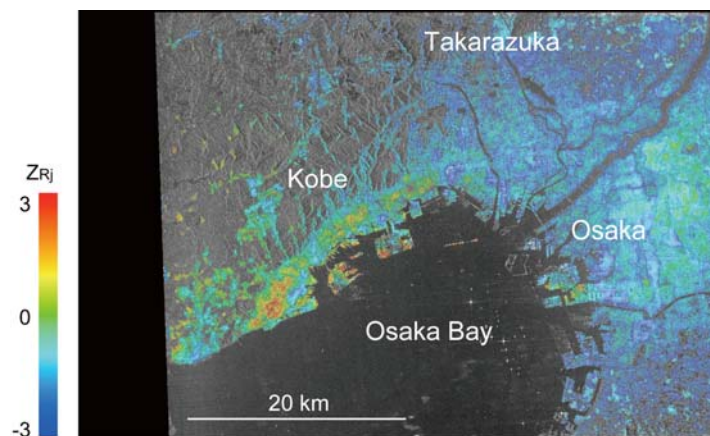


図3 JERS-1/SARから求めた判別スコア Z_{Rj} の分布

神戸市長田区から北東方向にかけて、 Z_{Rj} がやや大きい。宝塚地域での甚大被災地の Z_{Rj} はそれほど大きくはない。建物の密集度や家屋の破壊形式が神戸の被災地とは異なっているため、Cバンドと比較すると波長が長く地表の凹凸に鈍感なLバンドSARからの検出が難しいと考えられる。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、地震前のSAR画像において後方散乱係数が小さい地域（-7dB以下）はマスクしている。

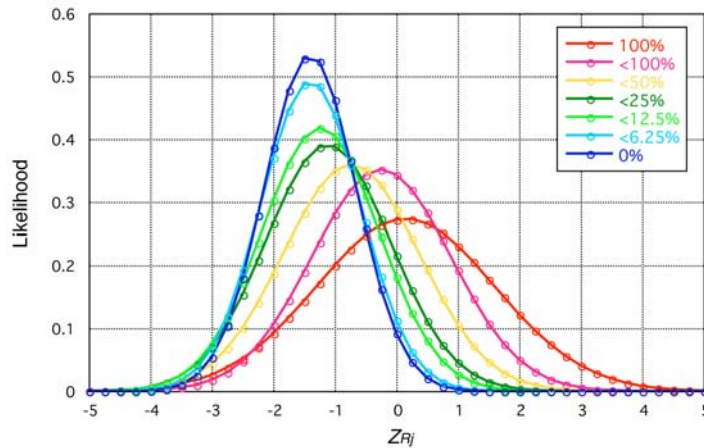


図4 判別スコア Z_{Rj} の頻度分布の正規分布モデル

表2 SAR強度画像情報の尤度関数の平均値と標準偏差

被災ランク	Z_{Rj} の平均値	標準偏差
C1	-1.399	0.747
C2	-1.390	0.809
C3	-1.233	0.955
C4	-1.110	1.018
C5	-0.733	1.107
C6	-0.241	1.134
C7	0.151	1.457

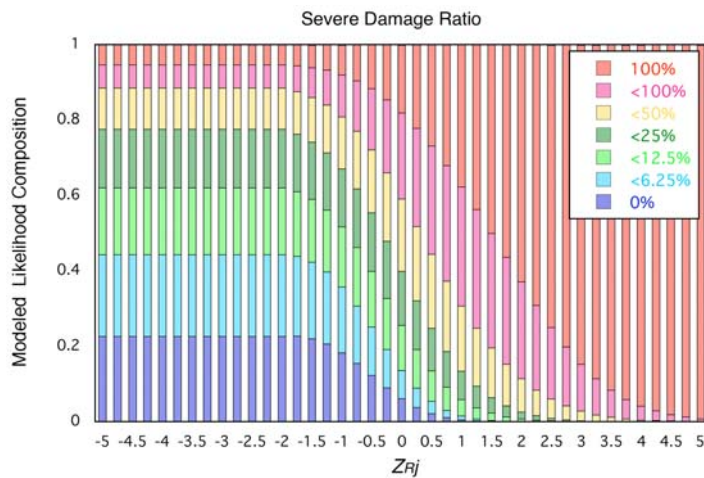


図5 判別スコア Z_{Rj} による基準化尤度関数

次に、判別スコア Z_{Rj} から建物全壊率を推定するための尤度関数を構築する。各被災ランク2,000ピクセルの Z_{Rj} の頻度分布を求め、さらに、正規分布でモデル化したものを図4に示す。表2には各被災ランクにおける Z_{Rj} の平均値と標準偏差を示す。被災ランクが高いほど判別スコア Z_{Rj} が大きくなる。しかし、ERS-1/SARの時と同様に、判別スコアが小さい領域では一部の被災ランクで分布曲線が交錯するため、被災ランクが低い地域での判別能力に限界がある。図4の全被災ランクの尤度の総和が1になるように基準化した基準化尤度関数を図5に示す。 Z_{Rj} が -2.0 以下の範囲は、分布曲線の交錯により生じる全壊率の序列の逆転を回避するため、 $Z_{Rj} = -2.0$ における値を外挿した一定値としている。そして、表1の被災ランクの中央値、表2および図5の分布から判別スコア Z_{Rj} に対する推定全壊率の平均値と標準偏差が得られる。図6に Z_{Rj} から推定される全壊率の平均値と平均値±標準偏差の曲線を示す。この曲線は震度情報なしの被害関数と等価であり、 Z_{Rj} が大きくなると全壊率も増加する。判別スコアは定数項がゼロとなるように調整されているため、図6の横軸の相対的な位置には任意性がある。このことを考慮すると、JERS-1/SARはERS-1/SARから構築した基準化尤度関数¹²⁾(図6の中に併記)と比べて判別スコアが高い領域でやや高い全壊率(平均値)を与えるほかは、両者はほぼ類似の傾向を示す曲線が得られた。

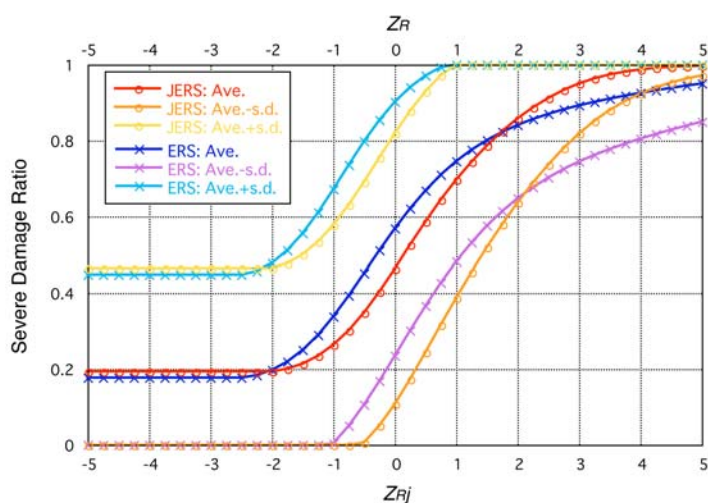


図6 判別スコア Z_{Rj} (JERS)および Z_R (ERS)と全壊率(平均値と標準偏差)の関係

3. 震度情報との統合処理による建物全壊率の推定

3.1 SAR画像と震度情報の統合処理

SAR画像を単独で利用した場合の判別スコア Z_{Rj} 7種類における全壊率の平均値と標準偏差を図7(a)に示す。 $Z_{Rj} < -2.0$ では、図4および図5に示したように分布が重なり合っており、完全な無情報(各被災ランクが等確率=1/7で、平均全壊率34.8%、標準偏差35.8%)と比較して多少の情報量を持つ程度でしかない(平均全壊率19.4%、標準偏差27.1%)。そこで、全壊率が小さい範囲までを含めて高精度に推定するために震度情報を補完情報として活用する。すでに、震度情報からの被害関数は構築しており¹²⁾、図7(b)には震度情報7種類を単独に用いた場合の全壊率の平均値および標準偏差を再掲する。SAR画像と震度情報の統合処理は、ベイズ確率の方法を適用して行うことができる。具体的には、震度情報が与えられた時の各被災ランクへの帰属確率と、各被災ランクに対する Z_{Rj} の基準化尤度(Z_{Rj} が与えられた時の各被災ランクへの帰属確率と等価)をかけ合わせ、それらの総和が1となるように正規化することによって、各被災ランクへの帰属確率を更新するものである¹²⁾。図7の二つの情報を組み合わせにより得られる計 $7 \times 7 = 49$ パターンについて確率更新を行い、全壊率の平均値と標準偏差を求めた結果を図8(a), (b)にそれぞれ示す。両者の情報を組み合わせることで全壊率が小さいところから大きいところまで推定できるようになる。以降では、兵庫県南部地震について統合処理の実例を示す。

3.2 兵庫県南部地震での建物全壊率の推定

震度情報は硬質地盤上での地震動強さに表層地盤の増幅度を乗じることで推定する。断層の位置についてはWald¹⁸⁾によるモデルを参考にし、硬質地盤上での地震動強さは司・翠川¹⁹⁾の最大速度の距離減衰式(地殻内地震で距離が断層面最短距離)を用いた。地盤の増幅度分布は、日本の地形・地盤デジタルマップ²⁰⁾の250mメッシュ版²¹⁾から地盤の平均S波速度を算出し²²⁾、変換式²³⁾により推定した²⁴⁾。以上より求めた地表での最大速度値から藤本・翠川による式²⁵⁾を用いて計測震度に変換した。

陰影図にオーバーレイした震度分布と被害関数から推定した全壊率(平均値)の分布を図9に示す。低地部において震度が大きい傾向がみられる。また、震度情報のみからも神戸の沿岸域にてやや全壊率が高いことが推定される。しかし、被害の早期推定に主眼を置いているため断層の破壊進行方向などを考慮しない簡便な手法に基づいている。その影響が顕著だった宝塚周辺については震度が実際よりやや小さく見積もられている。

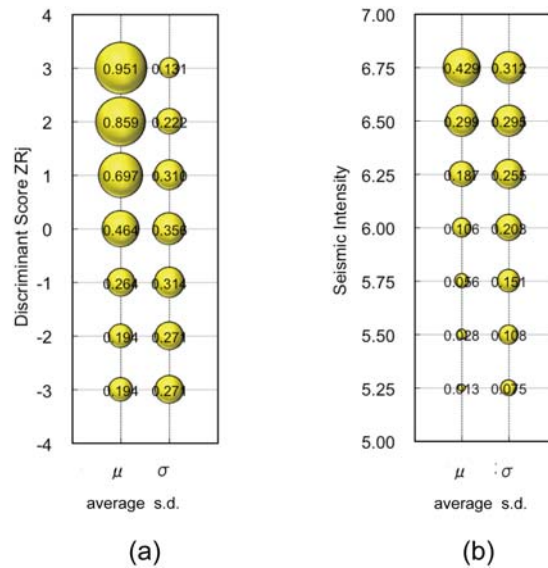


図7 単独利用した場合の推定全壊率の平均値と標準偏差, (a) SAR情報, (b) 震度情報

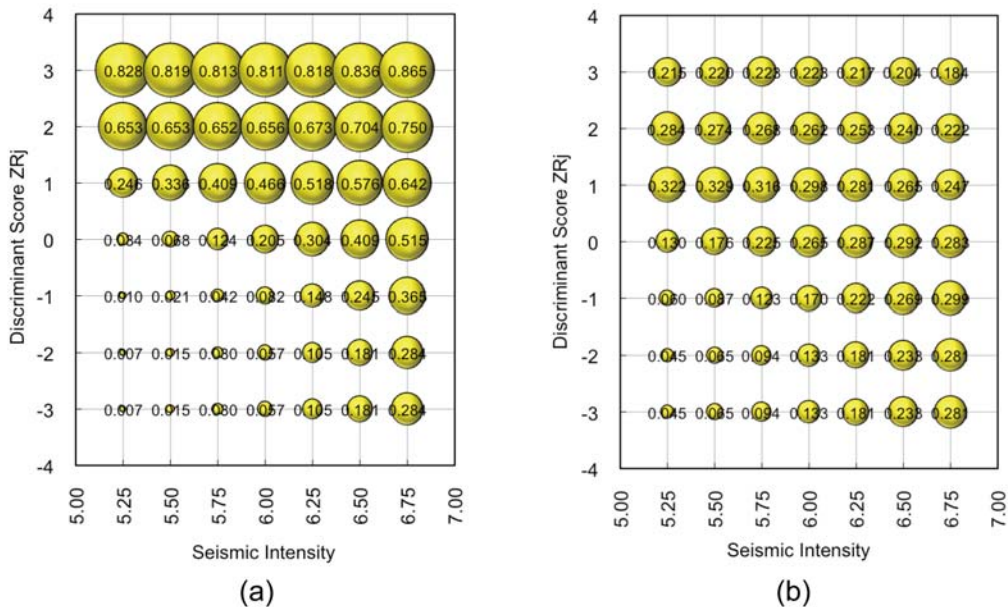


図8 SAR情報と震度情報の統合処理による推定全壊率, (a) 平均値, (b) 標準偏差

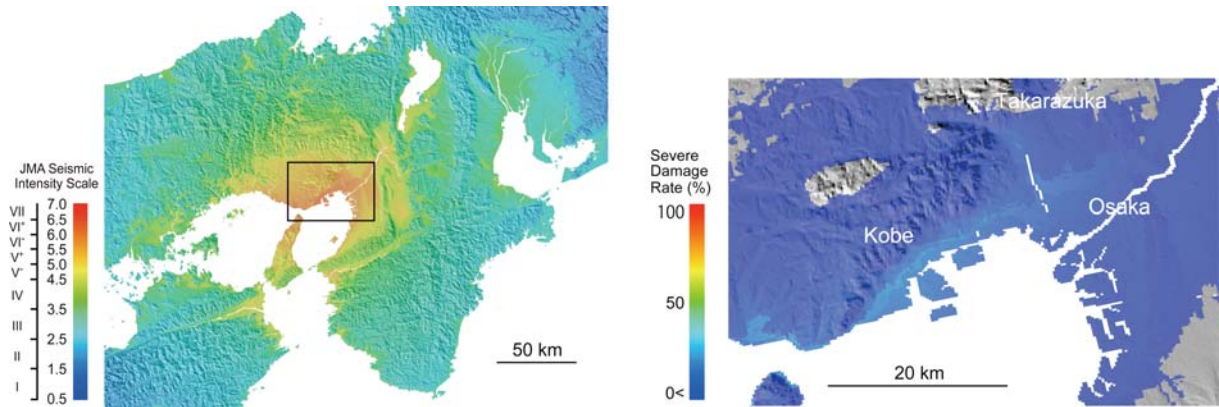


図9 兵庫県南部地震の推定震度分布(左図)と震度情報による推定全壊率(平均値)の分布(右図)

図10にはSAR画像の判別スコア Z_{Rj} (図3) と震度情報(図9)を統合処理した全壊率(平均値)の推定結果を示す。震度情報のみからの全壊率推定に比べ、被害の大きいところと小さいところの差が明瞭になり、神戸から西宮にかけてのいわゆる「震災の帯」(図1(c)の黒色の地域)と類似した分布が得られる。震度について過小評価されていた宝塚については、SARによる判別スコア Z_{Rj} も大きい値ではないため(図3参照)、統合処理により推定した全壊率が小さく評価される。今後、より精度の高い地震動推定の必要性やJERS-1/SAR画像の地表面検出能力について詳細に検討する必要がある。

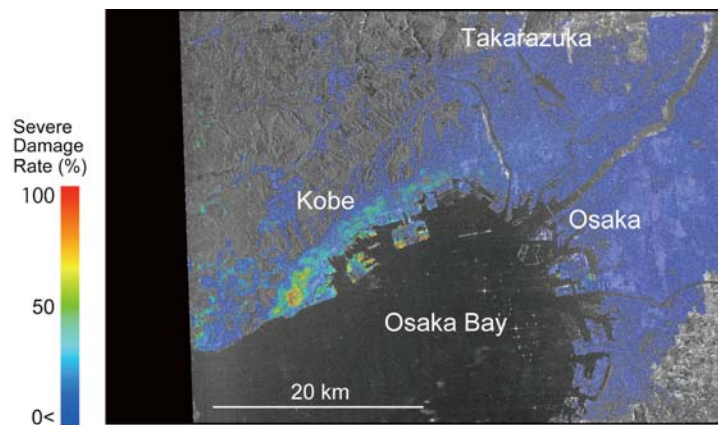


図10 JERS-1/SAR画像の判別スコア Z_{Rj} と震度情報の統合処理による推定全壊率(平均値)の分布

4. 最近の被害地震を観測したALOS/PALSAR画像への適用

上述にて構築したLバンドSAR用の建物全壊率推定モデルを2007年ペルー沖地震、2008年中国四川地震を観測したALOS/PALSAR画像に適用し、さらに、震度情報との統合処理結果と実際の被害状況との比較からモデルの妥当性を検証する。ALOS/PALSAR画像の分解能はJERS-1/SARとは異なり10mであるが、判別スコア算出の際のウィンドウサイズは同じにしている。本来は、地表対象物の大小、センサの空間分解能に応じて変化すべきであるが、それを支持する十分な検証事例がないため、ここでは同じパラメタとして処理をした。なお、震度情報は米国地質調査所(USGS)が地震直後に速やかに公開するShakeMap^{26,27)}およびPAGER²⁸⁾の地表面最大速度のグリッドデータを利用し、変換式²⁵⁾により最大速度から計測震度を求めた。また、諸外国の建物の脆弱性を鑑み、平均値に標準偏差の3割を上乗せした値が全

壊率の平均値になるよう仮定して被害関数を修正した。例えば、計測震度6.25では全壊率の平均値が18.7%になるが(図7(b)参照), 修正後は, $26.4\% (= 18.7 + 25.5 * 0.3)$ とやや大きくなる。これは、既往の被害関数^{29),30)}とも概ね対応する。

4.1 2007年ペルー沖地震

2007年8月15日にチンチャ市の40 km北西の沖合で発生したペルー沖地震(M8.0)では、500名以上の死者・行方不明者、35,000棟以上の建物が全壊するなどピスコ市内とその周辺の地域で甚大な被害が生じた。この地震では、ALOS/PALSARが地震の約2週間後に沿岸付近を高分解能モード観測している。地震前後の画像(地震前:2007年7月12日, 地震後:2007年8月27日)を図11(a), (b)に示す。地上分解能は約10mである。また、USGSの最大速度分布³¹⁾をPALSAR画像に重ねて図11(c)に示す。画像全域にわたり最大速度の値は約50 cm/sである。

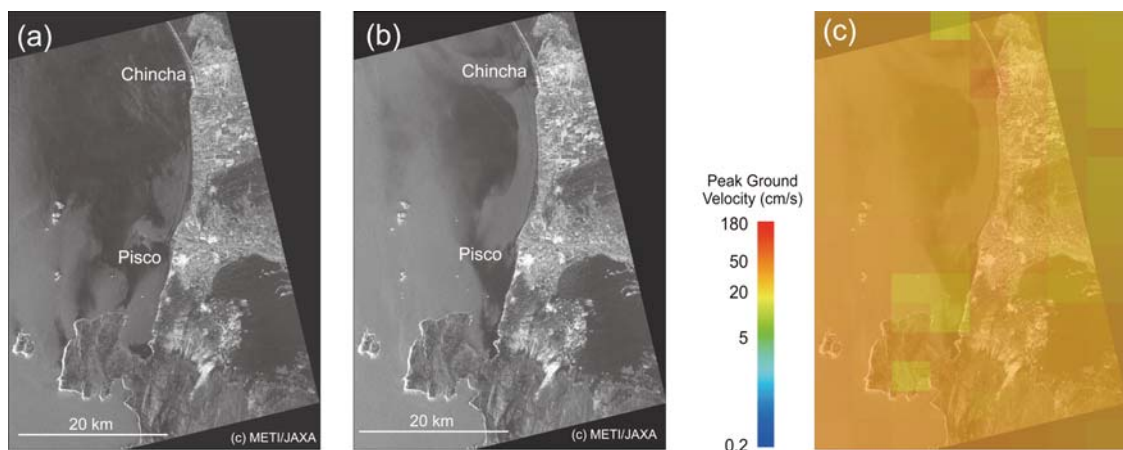


図 11 2007年ペルー沖地震前後のALOS/PALSAR画像と地震動分布, (a)2007年7月12日観測, (b)2007年8月27日観測, (c)USGSが推定した最大速度分布³¹⁾

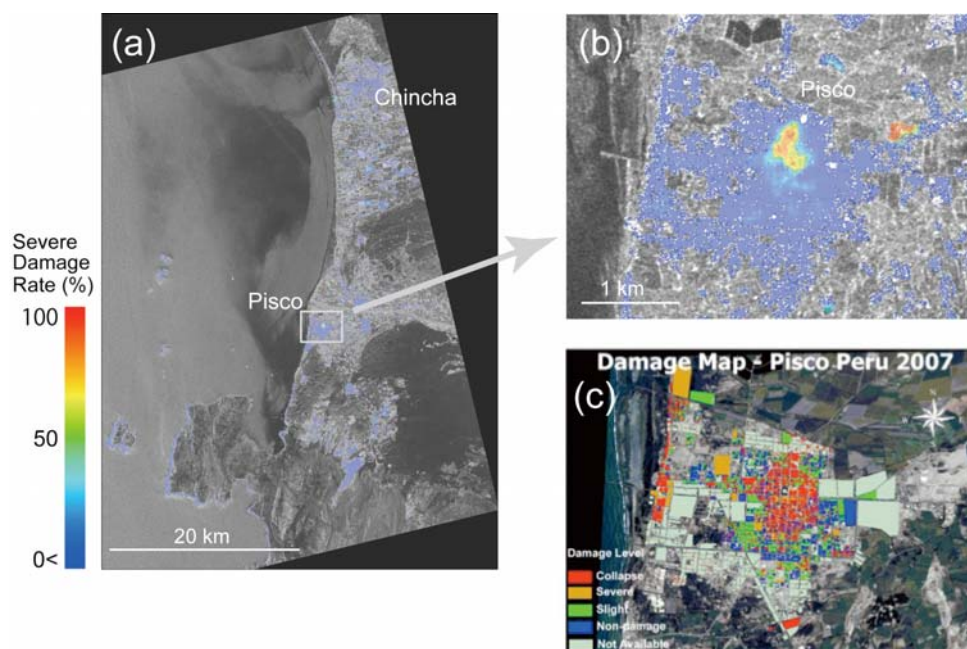


図 12 PALSAR画像と震度情報の統合処理から推定した全壊率(平均値)の分布と被害調査データの比較, (a)画像全域, (b)ピスコの拡大図, (c)ピスコにおける建物調査結果³²⁾(赤色は倒壊, 橙色は大破, 緑色は軽微被害, 青色は無被害, 灰色は未調査建物)

PALSAR画像から判別スコア Z_R を求め、最大速度から計測震度に変換し、両者をそれぞれ基準化尤度関数と被害関数を介して統合処理した全壊率推定結果を図12(a)に、ピスコ市を拡大したものを図12(b)に示す。建物が分布する地域を対象とするため、後方散乱係数が-5dB以下の地域はマスクしている。図12(c)に示す地震後の現地調査によるピスコ市内での建物被害の分布³²⁾と比較したところ、市中心部における倒壊あるいは全壊建物が多く集中している地域とPALSARから推定した全壊率が高い地域は良く対応する。なお、ピスコ市の西側沿岸域での被害はPALSARからは抽出できていない。被害範囲が局所的で狭いため地上分解能10mの画像から大きな変化として捉えられなかった可能性がある。計算ウィンドウのサイズが13×13ピクセル(約130m四方)と大きいため、市中心部の被害域のようにある程度広い範囲にて被害建物が集まっていないと検出できない。被害域の大きさと検出能力については今後の課題としたい。

4.2 2008年中国四川地震

2008年5月12日に中国の四川省付近で発生した内陸での巨大地震(M8.0)は、約8万人の死者・行方不明者をもたらす甚大な被害地震であった。また、広域かつ膨大な数の建物が被害を受け、とくに、山岳部に位置する集落の被害情報が現地のみからでは集まりにくく、空や宇宙からのリモートセンシングによる観測が活躍する機会でもあった。国際災害チャータ¹⁾が発動され、各国の人工衛星が画像を取得し、インターネット上に情報が発信されたが、その多くが光学センサを用いていたため、雲の隙間の地域の情報に偏るなど断片的だった。そこで、雲の影響をほとんど受けないレーダセンサを活用することが期待された。図13(a),(b)に地震前後を観測したPALSAR高分解能モード画像(地震前:2007年11月18日,地震後:2008年5月19日)と図13(c)にはUSGSの最大速度分布³³⁾を示す。震源近傍では100cm/s程度の大きな最大速度が推定されている。PALSAR画像と震度情報を統合処理した全壊率推定の結果を図14(a)に、被害が大きかった北川県(Beichuan-xian)につて拡大したものを図14(b)に示す。小さな集落までを解析対象としたため、マスクのための後方散乱係数の閾値は-7dB以下と小さい値を設定している。したがって、山の稜線や農地の一部までが全壊率推定の対象になっていることは否めない。これは地面の傾斜方向とマイクロ波の局所入射角との関係で1回反射にて衛星に戻るマイクロ波成分が大きく、マイクロ波の複数反射が起こる都市域と類似した後方散乱係数を持ち、そして、地震前後の衛星軌道の若干の違いから変化となって現れてしまうからである。高解像度衛星から判読した被害分布³⁴⁾を図14(c)に示す。図より、北川県など震源域に近い集落では、全壊率が高い地域が局所的に分布しており、被害報道や他の被害判読結果³⁵⁾とも概ね対応する。綿陽市(Mianyang)などの都市域での被害についてはその詳細分布が不明なためここでは比較をしていない。なお、SAR画像から得られる Z_R 値からは変化が読み取れるものの、USGSの推定最大速度が小さいため、統合処理では被害推定が小さく抑えられている。

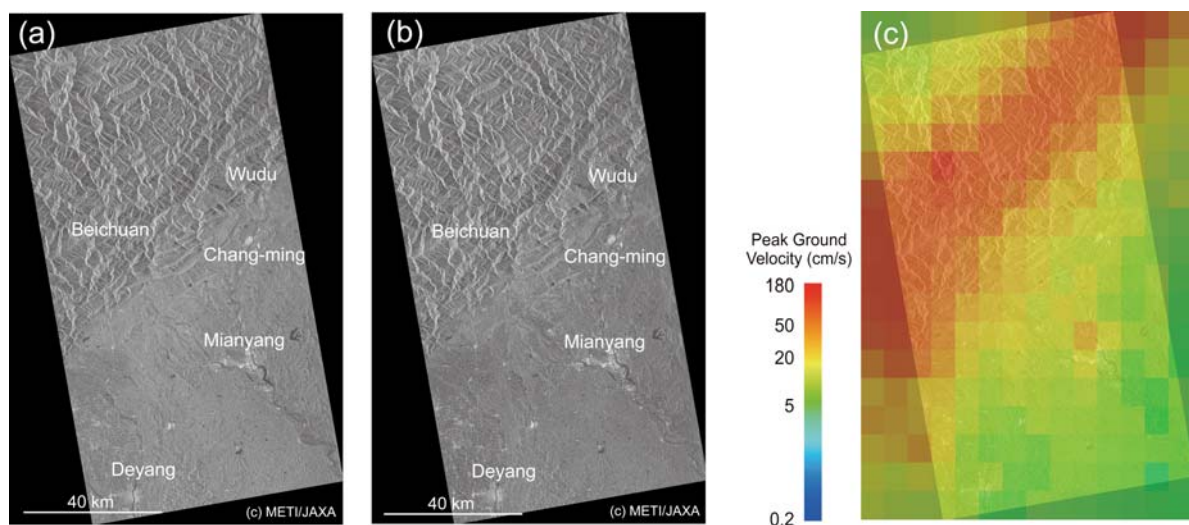


図13 2008年中国四川地震前後のALOS/PALSAR画像と地震動分布, (a) 2008年2月17日観測, (b) 2008年5月19日観測, (c) USGSが推定した最大速度分布³³⁾

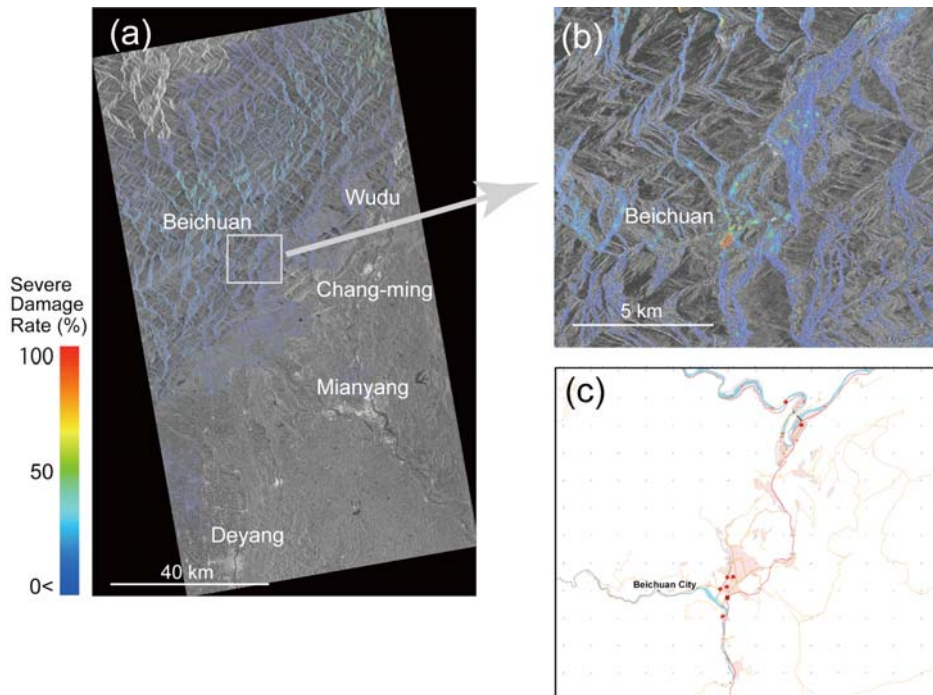


図 14 PALSAR 画像と震度情報の統合処理から推定した全壊率(平均値)の分布と被害調査報告の比較, (a) 画像全域, (b) 北川の拡大図, (c) 北川における被害判読結果³⁴⁾(赤色が被害建物)

5. 結論

1995年兵庫県南部地震の被災地を対象として、地震前後に観測されたJERS-1/SAR画像の差分値と相関係数を説明変量とし、建物被害率に基づく7つの被災ランクを判別対象の群とした回帰判別分析を行い、求めた判別スコアから建物全壊率に関する基準化尤度関数を構築した。そして、この地震の震度情報の被害関数との統合処理により、SAR画像から建物全壊率分布を推定できることを示した。さらに、構築したモデルを2007年のペルー沖地震と2008年の中国四川地震を観測したALOS/PALSAR画像に適用し、現地調査や被害判読結果との比較から手法の妥当性を検証した。国外の地震後の早期推定への適用という面では、世界規模で展開された地震動推定システムの利用が現実的選択であり、今回はShakeMapを利用したが、強震観測や高精度シミュレーションによる詳細な地震動分布が得られた段階で、推定更新することが望ましい。また、建物被害推定については、兵庫県南部地震の関数で代用したが、より精度良く被害を推定するためにはその国の実状³⁶⁾にあわせた被害関数を使用すべきであろう。今後の課題としたい。

謝 辞

PALSARデータは経済産業省および宇宙航空研究開発機構が所有し、資源・環境観測解析センターから提供を受けた。研究の一部について、NEDO産業技術研究助成事業「我が国およびASEAN諸国の災害救援活動の迅速性を飛躍的に向上させるリアルタイム津波被災地認定技術の開発(代表:越村俊一)」および科学研究費補助金「No. 21310119(代表:山崎文雄)」の助成を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国際災害チャータ: International Charter Space and Major Disaster, <http://www.disasterscharter.org>, as of June 2009.
- 2) Yamazaki, F., Yano, Y., Matsuoka, M.: Visual Damage Interpretation of Buildings in Bam City Using QuickBird Images Following the 2003 Bam, Iran, Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.21, No.S1, 2005, pp.S329-S336.
- 3) Gusella, L., Adams, B. J., Bitelli, G., Huyck, C. K., Mognola A.: Object-Oriented Image Understanding and Post-Earthquake Damage Assessment for the 2003 Bam, Iran, Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.21, No.S1, 2005, pp.S225-S238.
- 4) 三浦弘之, 翠川三郎: 高分解能衛星画像と数値標高モデルを用いた2004年新潟県中越地震での斜面崩壊地の検出, *日本地震工学会論文集*, Vol.7, No.5, 2007, pp.1-14.
- 5) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Fiegl, K., Rabaut, T.: The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry, *Nature*, Vol.364, 1993, pp.138-142.
- 6) 例えば, Hao, K. X., Si, H., Fujiwara, H., Ozawa, T.: Coseismic Surface-Ruptures and Crustal Deformations of the 2008 Wenchuan Earthquake Mw7.9, China, *Geophysical Research Letters*, Vol.36, L11303, 2009, 5p.
- 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, 2001, pp.55-61.
- 8) Yonezawa, C., 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, 2001, pp.1585-1600.
- 9) 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, 2002, pp.617-623.
- 10) Hosokawa, M., Jeong, B., Takizawa, O., Matsuoka, M.: Disaster Risk Evaluation and Damage Detection Using Remote Sensing Data for Global Rescue Operations, *Proc. 21st International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress 2008*, Vol.XXXVII, B8, VIII, 2008, pp.183-186.
- 11) Matsuoka, M., Yamazaki, F.: Use of Satellite SAR Intensity Imagery for Detecting Building Areas Damaged due to Earthquakes, *Earthquake Spectra*, Vol.20, No.3, 2004, pp.975-994.
- 12) 能島暢呂, 松岡昌志, 杉戸真太, 江崎賢一: 地震動情報と人工衛星SAR画像情報の統合処理による建物全壊率の定量的推定手法の開発, *土木学会論文集A*, Vol.62, No.4, 2006, pp.808-821.
- 13) 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, 2002, pp.53-60.
- 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(CR-ROM添付), 1996, 303p.
- 15) Lee, J. S.: Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.2, No.2, 1980, pp.165-168.
- 16) 松岡昌志, 山崎文雄: 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, *写真測量とリモートセンシング*, Vol.41, No.5, 2002, pp.4-14.
- 17) 奥野忠一, 久米均, 芳賀敏郎, 吉澤正: [改訂版]多変量解析法, *日科技連*, 1981, pp.259-321.
- 18) Wald, D.J.: Slip History of the 1995 Kobe, Japan, Earthquake Determined from Strong Motion, *Teleseismic and Geodetic Data*, *Journal of Physical Earth*, Vol.44, 1996, pp.489-503.
- 19) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, *日本建築学会構造系論文集*, No.523, 1999, pp.63-70.
- 20) 若松加寿江, 久保純子, 松岡昌志, 長谷川浩一, 杉浦正美: 日本の地形・地盤デジタルマップ(CD-ROM付), 東京大学出版会, 2005, 112p.
- 21) 若松加寿江, 松岡昌志: 地形・地盤分類250mメッシュマップ全国版の構築, *日本地震工学会大会-2008梗概集*, 2008, pp.222-223.
- 22) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤のS波速度分布の推定, *土木学会論文集*, No.794/I-72, 2005, pp.239-251.
- 23) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係,

- 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, 2006, pp.11-22.
- 24) 松岡昌志, 若松加寿江: 地形・地盤分類250mメッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ, 産業技術総合研究所, 知的財産管理番号H20PRO-936, 2008.
 - 25) 藤本一雄, 翠川三郎: 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集, No.7, 2005, pp.214-246.
 - 26) US Geological Survey: ShakeMap, <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/shakemap/>, as of June 2009.
 - 27) Wald, D. J., Worden, B. C., Quitoriano, V., Pankow, K. L.: ShakeMap Manual: Technical Manual, User's Guide, and Software Guide Ver. 1.0, Techniques and Methods 12-A1, US Geological Survey, 2006, 156p.
 - 28) US Geological Survey: PAGER: Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response, <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/pager/>, as of June 2009.
 - 29) Coburn, A., Spence, R.: Earthquake Protection -Chapter 9 Earthquake Risk Modeling-, John Wiley & Sons, 2002, 436p.
 - 30) O'Rourke, T. D., Sang-Soo, J., Eguchi, R. T., Huyck, C. K.: Advanced GIS for Loss Estimation and Rapid Post-Earthquake Assessment of Building Damage, Research Progress and Accomplishment, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2000, pp.157-164.
 - 31) US Geological Survey: ShakeMap us2007gbcv, <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/shakemap/global/shake/2007gbcv/>, as of June 2009.
 - 32) エストラダ・ミゲル: GISと衛星画像によるペルー太平洋岸地震の被害調査, 地震に対して安全な住宅のための国際ワークショップ, 建築研究所, 2008.
 - 33) US Geological Survey: ShakeMap us2008ryan, <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/shakemap/global/shake/2008ryan/>, as of June 2009.
 - 34) Infoterra GmbH Germany: http://unosat.web.cern.ch/unosat/freeproducts/china/Earthquake2008/Beichuan_Infrastructure_2008-05-18_high.jpeg, as of June 2009.
 - 35) UNOSAT: http://unosat.web.cern.ch/unosat/freeproducts/china/Earthquake2008/UNOSAT_CHN_Overview_Tangjiashan_Lake_8June2008_Highres.pdf, as of June 2009.
 - 36) Jaiswal, K., Wald, D. J.: Creating a Global Building Inventory for Earthquake Loss Assessment and Risk Management, Open-file Report 2008-1160, US Geological Survey, 2008, 103p.

(受理: 2009年7月31日)

(掲載決定: 2010年2月22日)

Development of Earthquake-induced Building Damage Estimation Model Based on Satellite L-band SAR and its Application to ALOS/PALSAR

MATSUOKA Masashi ¹⁾ and NOJIMA Nobuoto ²⁾

1) Member, Senior Research Scientist, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Dr. Eng.

2) Member, Professor, Gifu University, Dr. Eng.

ABSTRACT

For quick and stable estimation of damaged buildings due to earthquakes all over the world using PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) loaded on the ALOS satellite, a model using combined usage of satellite SAR imagery and seismic intensity is proposed. In order to expand the existing C-band SAR based damage estimation model into L-band SAR, this paper rebuilds a likelihood function for severe damage ratio

on the basis of dataset from JERS-1/SAR (L-band SAR) images observed the 1995 Kobe earthquake and its detailed ground truth data. The model which integrates the fragility functions of building damage in terms of seismic intensity and proposed likelihood function is then applied to PALSAR images taken over the areas affected by the 2007 Pisco, Peru, and the 2008 Sichuan, China, earthquakes. The accuracy of the proposed damage estimation model is examined by comparing the results of the analyses with field investigations and/or interpretation of high-resolution satellite images.

Key Words: L-band Synthetic Aperture Radar, Building Damage, Seismic Intensity, Data Integration, JERS-1/SAR, ALOS/PALSAR