

空撮画像を用いた地震による建物被害地域の自動抽出手法とその適用可能性について



三富 創¹⁾

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では阪神・淡路地域の広範にわたり甚大な被害が発生し、地震発生当日に5,500人の人命が失われた。このうち、建物倒壊による損傷・窒息等を原因とするものが83.3%を占めた。つまり、地震発生初期の被害情報収集段階において、大局的な建物等の被害状況を把握することは、救急・救助の方針決定、応援要請の必要性の判断、応急対策の基本方針決定等のために重要である。

ヘリコプター、航空機、人工衛星をプラットフォームとしたリモートセンシングは、容易に立ち入ることが困難な被災地を上空または宇宙から観測できるため、災害把握の高度利用が期待されている。ヘリコプターや航空機はプラットフォームの機動力と取得画像の地上解像度に優れる。最近では人工衛星画像の地上解像度も向上しており、国際災害チャーター¹⁾やセンチネルアジア²⁾の枠組みなど、衛星画像の即時提供も可能となってきた。

本稿では、ヘリコプターや航空機をプラットフォームとして得られた地震発生後の画像から、画像処理によって主に低層木造建物の被害を抽出する技術について紹介する³⁾。人工衛星画像を用いて変化地域の抽出を試みる場合、変化前と変化後の画像の位置をあわせて差分をとる方法が一般的であるが、プラットフォームの機動力を生かすため、災害発生後に撮影された画像のみを用いることが大き

な特徴である。ここでは本技術の概要と適用例を紹介するとともに、衛星画像への適用の可能性など、今後期待される方向性についてまとめる。

2. 被害抽出手法

被害抽出の流れを図1に示す。著しい建物被害を4種類のエッジのテクスチャ、すなわちエッジ強度の分散 E_v 、エッジ方向の最頻度 E_d 、角2次モーメント T_a 、エントロピー T_e の4指標で特徴づけ、マルチレベルスライス法で画素の抽出を行った後、フィルタリング処理を行う。

2.1 倒壊建物の特徴

図2は、兵庫県南部地震の建物被害状況を撮影した空撮画像から倒壊建物、無被害建物、グラウンドを抽出し、エッジのテクスチャを比較したものである。倒壊建物は、瓦礫による細かいエッジの集合体で特徴づけられる。無被害建物では明瞭な建物輪郭線が特徴的である。一方、グラウンドは、瓦礫が散らばる倒壊建物と類似した茶系統の色を呈すものの、エッジの要素はほとんど持たない。このことから、木造建物の倒壊によって発生する瓦礫の散らばりは「輪郭が不規則に散らばっている状態」で特徴づけることができる。

2.2 被害抽出指標の計算

ビットマップのRGB画像から明度画像を作成し、7x7画素領域に拡張したPrewitt型エッジ検出テンプレートを用いてエッジ抽出を行

¹⁾ アジア航測株式会社

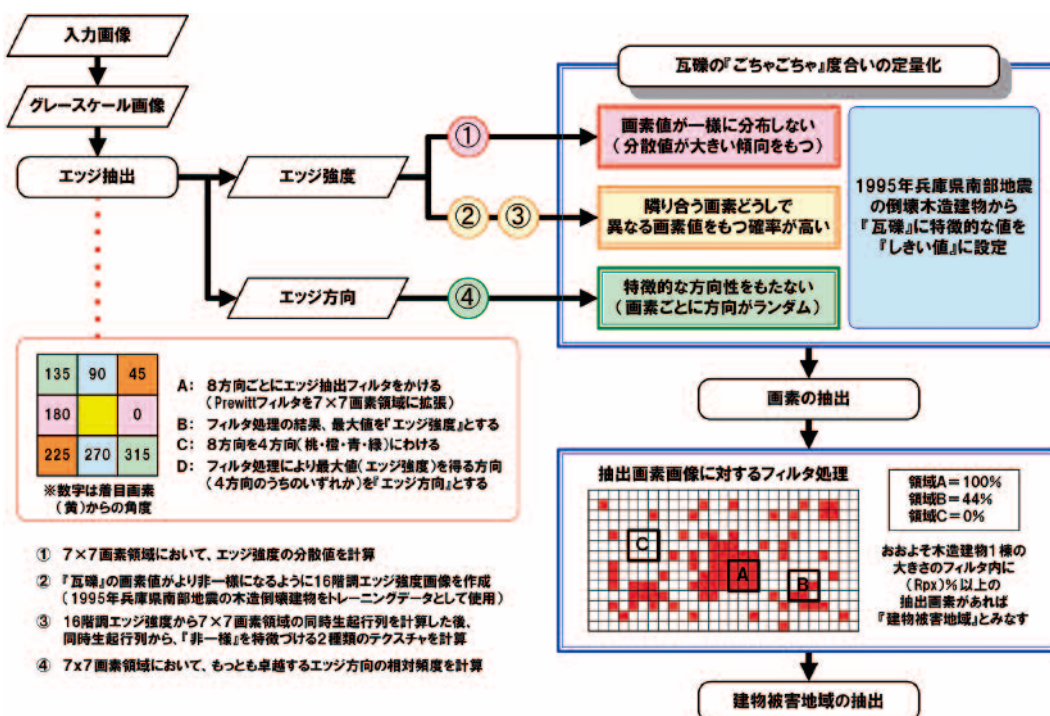


図1 建物被害抽出処理の流れ

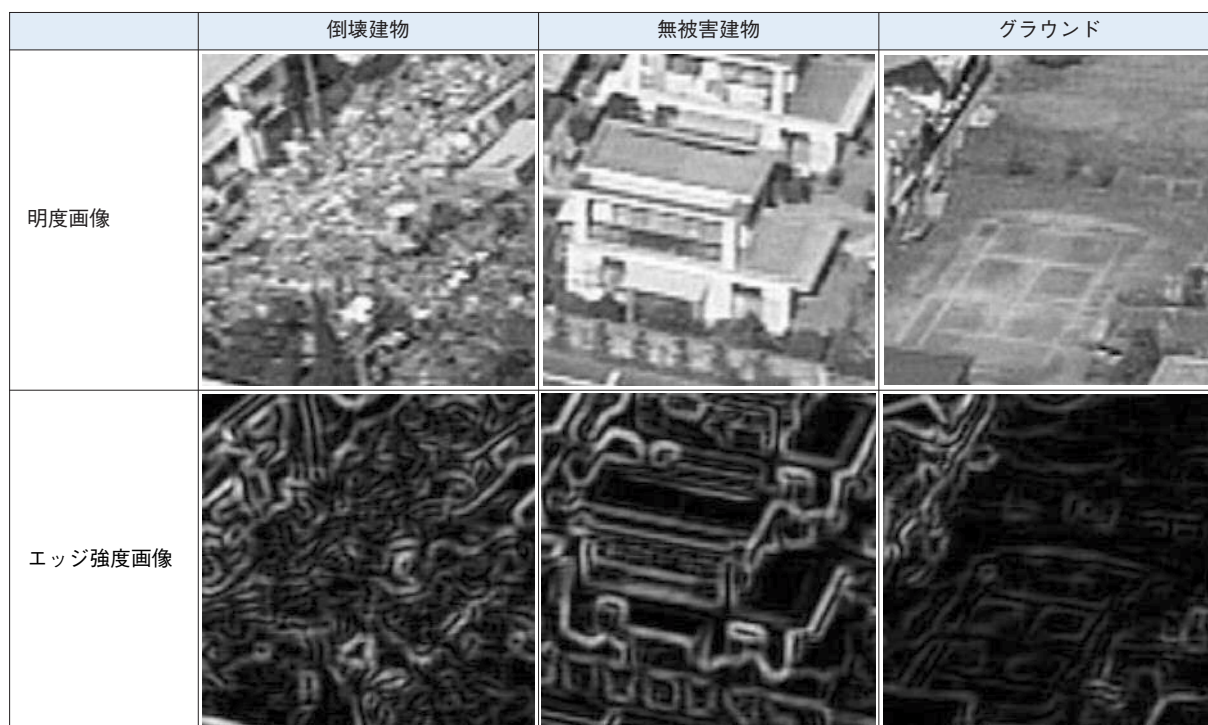


図2 エッジ強度の空間的特徴の比較

う⁴⁾。8方向のテンプレートのうち、最大値を「エッジ強度」、最大値を得るテンプレートの方向を「エッジ方向」とする。被害抽出の指標のうち「エッジ強度の分散 Ev 」は、エッジ強度の値から7x7画素領域の分散値を計算

したものである。被害抽出の指標である「エッジ方向の最頻度 Ed 」を求めるにあたり、「エッジ方向」を0-180度(左右方向)、45-225度(右上-左下方向)、90-270度(上下方向)、135-315度(右下-左上方向)の4種

類に分類する。「エッジ方向の最頻度 Ed 」は、7x7画素領域においてもっとも卓越する「エッジ方向」の相対頻度である。この指標は、鉄道の軌道のような連続する線分を、倒壊建物と区別する効果をもつ。

「角2次モーメント Ta 」と「エントロピー Te 」は同時生起行列⁵⁾から求める。濃淡画像の明るさが k の画素から一定の相対位置 $\delta=(r, \theta)$ に、明るさ l の画素が出現する確率を $P(k, l)$ とする。一定の δ に対して、全ての明るさの組み合わせ (k, l) についてその生起確率 $P(k, l)$ を求め、 k 列 l 行の行列で表したものを同時生起行列という。同時生起行列の計算を行う前に、エッジ強度における倒壊建物の累積相対頻度を m 等分するように m 階調のエッジ強度画像を作成する。ここではエッジ強度から $m=16$ 階調のエッジ強度を求め、倒壊建物を構成する各画素値(0から15の整数値)の相対頻度を、ほぼ $100/16=6.25\%$ の一定値になるようにする。次に m 階調のエッジ強度画像を用いて、注目画素から見て隣接する画素の0-180度(左右方向)、45-225度(右上-左下方向)、90-270度(上下方向)、135-315度(右下-左上方向)の4方向について同時生起行列を作成した後、行列の要素から下記の式によってテクスチャを計算し、4方向のうち最大値を呈す場合を注目画素のテクスチャ代表値とする。なお、テクスチャ算出のためのウィンドウサイズは、これまでと同じ7x7画素領域とする。

$$Ta = \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{m-1} \{P(k, l)\}^2$$

$$Te = - \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{m-1} P(k, l) \log_e \{P(k, l)\}$$

角2次モーメント Ta は、同時生起行列の値の分布がどの程度密集しているかを表す。したがって、周辺画素どうしの値の変化が小さい場合、角2次モーメント Ta の値は大きくな

る。エントロピー Te は、同時生起行列の値の分布がどの程度乱雑かを表す。具体的には、周辺画素における値の変化のパターンが多様な場合、エントロピー Te の値は大きくなる。本手法では、倒壊建物を構成する m 階調エッジ強度の各階調で、ほぼ同数の画素が配分されるようにエッジ強度の値を変換した。よって、倒壊建物における同時生起行列の要素は特定の組み合わせに集中せず、乱雑に分布することが予想される。これは、倒壊建物の角2次モーメント Ta が小さく、エントロピー Te が大きくなることを意味する。

2.3 被害画素の密度によるフィルタ処理

エッジのテクスチャ4指標から倒壊建物を特徴づけ、設定したしきい値を表1に示す。4種類のしきい値を同時に満たす画素を抽出し、おおよそ建物1棟の大きさとなる領域内に抽出画素がどの程度含まれているかを計算する。当初、この解析を行う領域内に占める抽出画素の割合 Rpx 値のしきい値を30%以上としていたが、その後、「おおよそ建物1棟の大きさ」を表す画素領域と地上解像度の関係から最適な Rpx 値を調整することで、面的に甚大な建物被害を被った地域が抽出できることを示した。

表1 建物被害抽出のために用いたしきい値一覧

抽出指標	しきい値
Ev エッジ強度の分散	$2.0 \times 10^5 - 6.8 \times 10^5$
Ed エッジ方向の最頻度	0.30-0.60
Ta 角2次モーメント	$0.74 \times 10^{-2} - 6.6 \times 10^{-2}$
Te エントロピー	3.4-4.2

3. 被害抽出の事例と今後の方向性

これまでに斜め撮影の空撮画像を主として、兵庫県南部地震、トルコ・コジャエリ地震(1999年8月)、台湾・集集地震(1999年9月)、インド・グジャラート地震(2001年1月)の建物被害抽出を試みてきた⁶⁾。ここで

は、垂直撮影の航空写真と、高解像度衛星画像への適用例を紹介する。

3.1 航空写真への適用例ー 兵庫県南部地震⁷⁾

図3は、兵庫県南部地震の後に撮影された航空写真を地上解像度10cmとなるよう電子化

したもので、(a) は建物1棟単位で瓦礫化した木造建物が散見される地域、(b) は面的な延焼地域を示している。これらの画像から「おおよそ建物1棟の大きさ」を101×101画素とみなし、被害抽出を行った結果を図4と図5にそれぞれ示す。被害抽出の結果が、倒壊または焼失地域を概ね説明していることがわ

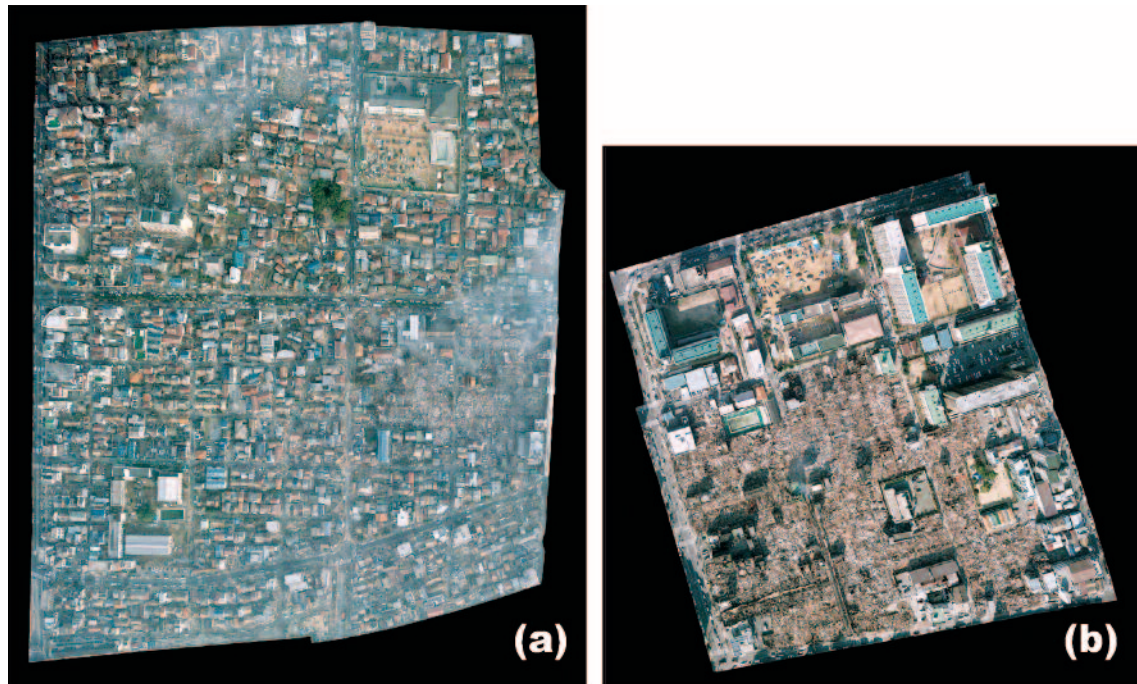


図3 被害抽出処理を試みた兵庫県南部地震の航空写真
(a) 建物1棟単位で瓦礫化した木造建物が散見される地域
(b) 面的な延焼地域

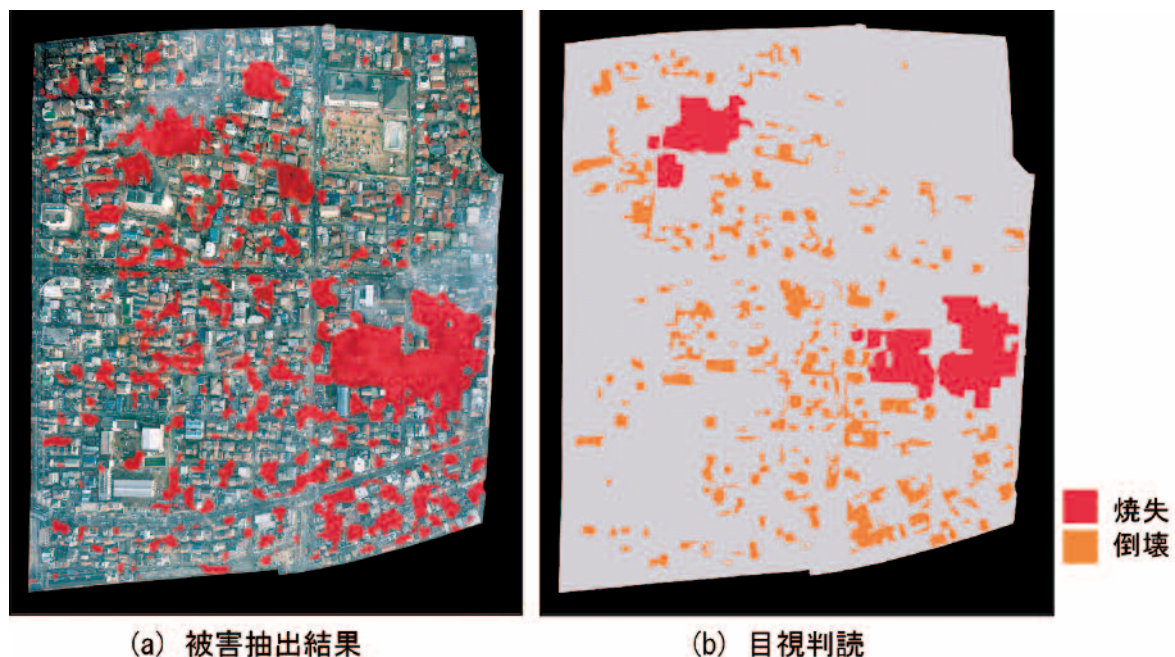


図4 図3 (a) に対する建物被害抽出の結果

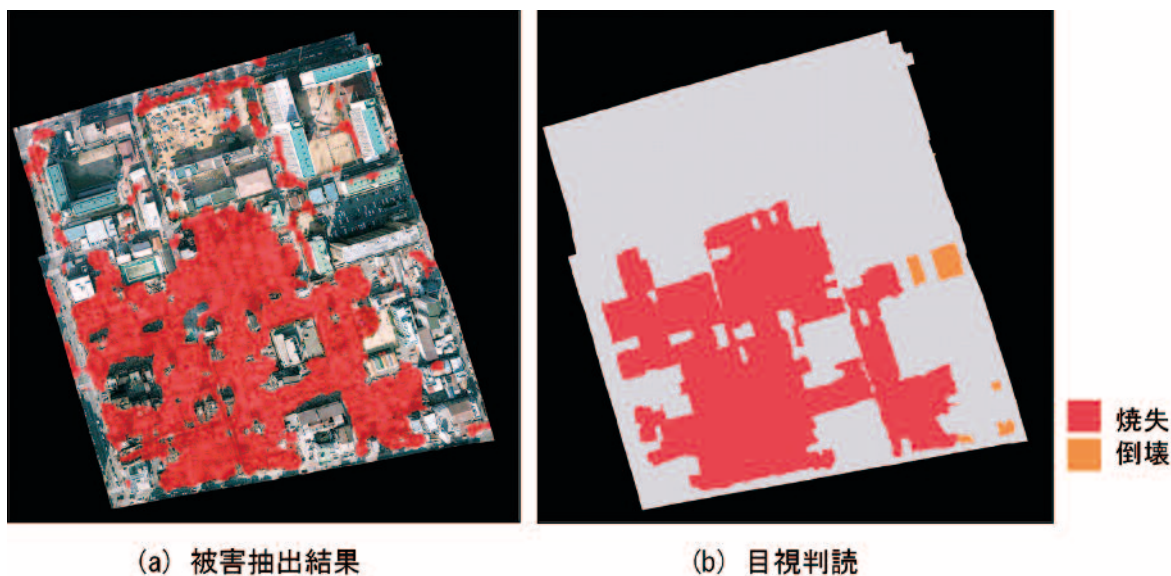


図5 図3 (b) に対する建物被害抽出の結果

かる。なお、既往研究では、これらの画像から、地上解像度を10～80cmまで変化させて被害抽出の精度を検証したところ、被害抽出の効果が最も高いのは地上解像度10cmの場合であること、地上解像度50～80cmであっても面的に甚大な被害を被った地域は抽出可能なことを検証している。

次に、被害抽出の効果が最も高い地上解像度10cm、「おおよそ建物1棟の大きさ」を101×101画素、 Rpx 値24%以上とした場合について、街区を単位とした抽出精度の評価を行った。図6は、街区ごとの抽出面積に対する目視判読面積（焼失+倒壊）の関係を表しており、本条件下において、街区単位の建物被害状況は以下の回帰式によって回帰できる。

$$Y = 0.86X \quad (\text{相関係数}0.91)$$

X：被害抽出面積（㎡）

Y：目視判読により抽出した延焼・倒壊の面積（㎡）

つまり、街区において、被害抽出結果の約86%が実際の瓦礫面積になっているとみなすことができる。これをふまえ、被害抽出の結果から街区単位の被害分布図を作成した結果

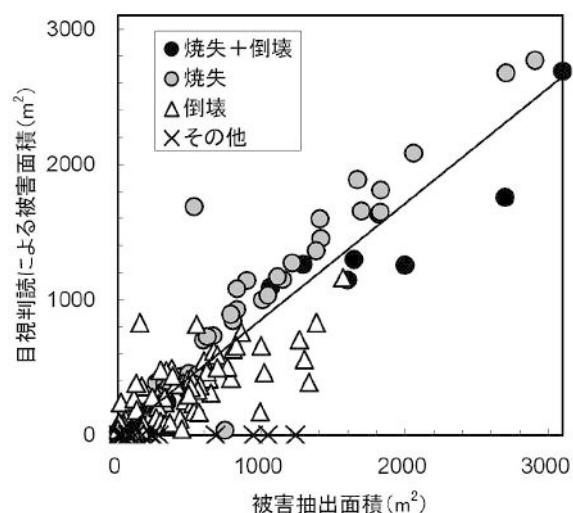


図6 街区ごとの抽出面積に対する被害面積（地上解像度10cm、ウィンドウ101×101画素）

を図7及び図8に示す。この凡例区分に従った場合、図3 (a) の環境下で66.7%、(b) の環境下で91.4%の街区が目視判読の結果と対応した。この結果は、画像処理による被害抽出の結果をGISデータとして表現する一手法を提案するものである。

3.2 高解像度衛星画像への適用例ーイラン・バム地震⁸⁾

2003年12月26日の早朝にイラン南東部のバム市近郊で発生したマグニチュード（Mw）

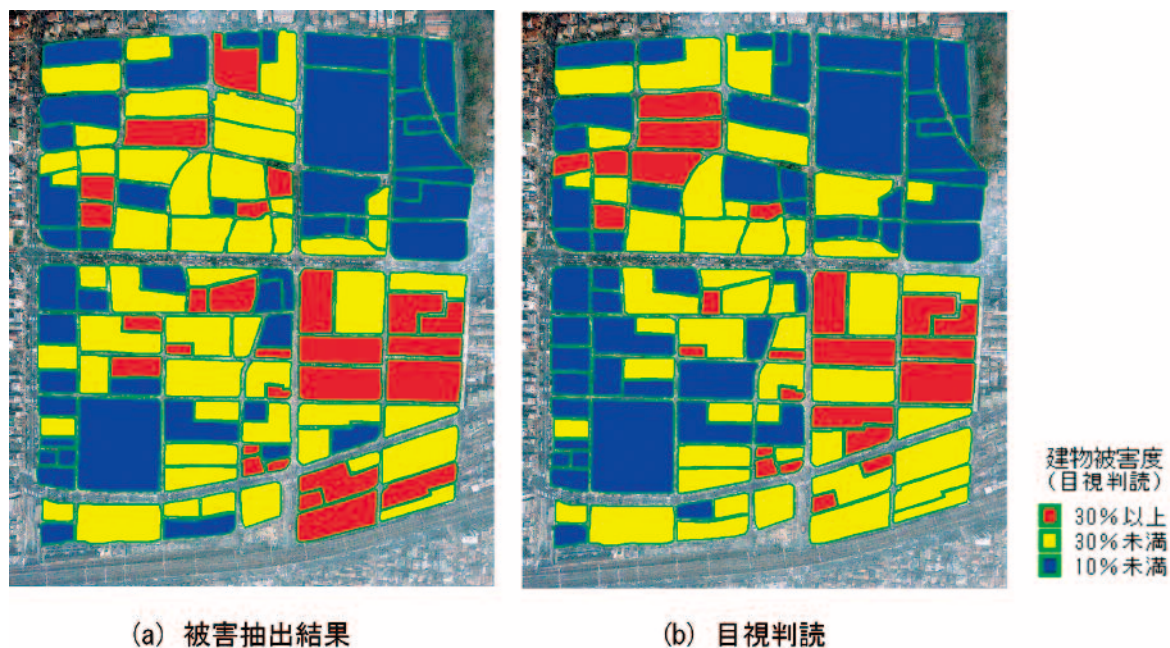


図7 図4の結果を街区単位のGISデータに変換した結果

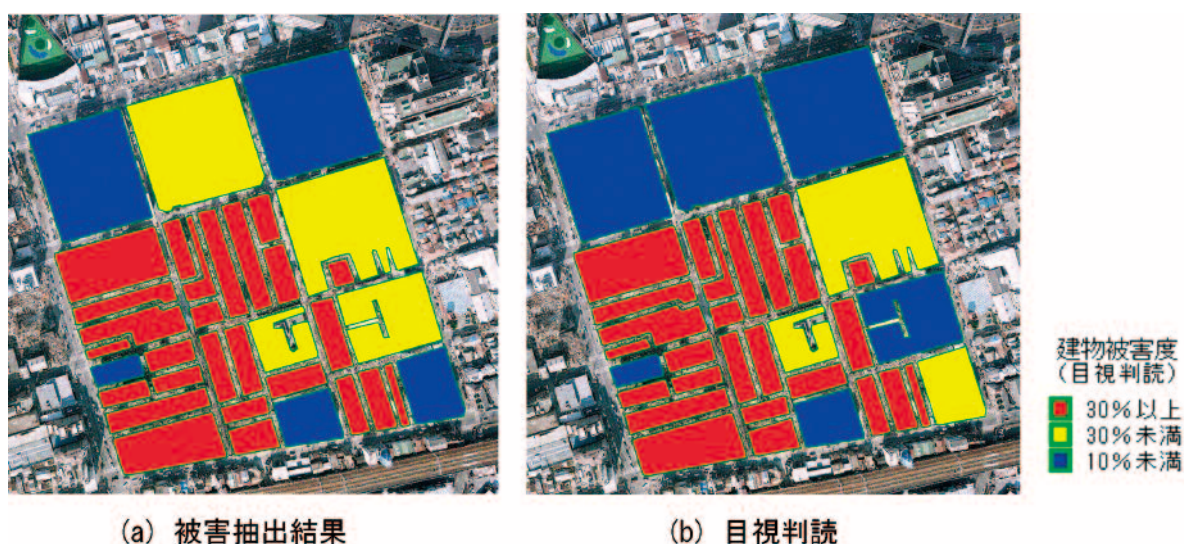


図8 図5の結果を街区単位のGISデータに変換した結果

6.6の地震ではアドベ造建物の多くが倒壊し、約4万9千棟の建物倒壊と、それに伴う4万人を超える死者が発生した。ここでは、地震から9日後の2004年1月4日に被災地を観測したQuickBird衛星のパンシャープン画像から、建物被害地域の抽出を試みた事例を示す。

図9は、RGBの各画像に対して線形濃度変換を施した後、明度画像に変換し、表1のしきい値を適用して画素を抽出、さらに「およそ建物1棟単位の大きさ」を 51×51 画素領

域、 R_{px} 値30%以上として建物被害地域の抽出を行った結果である。あわせて、土木学会の初動調査による建物全壊率分布を図10に示す⁹⁾。大まかではあるが、建物被害が著しい市の中心から南東にかけて首尾よく抽出されていることがわかる。

4. おわりに

内閣府中央防災会議では、表2に示す地震被害想定を公表している。いずれも兵庫県南

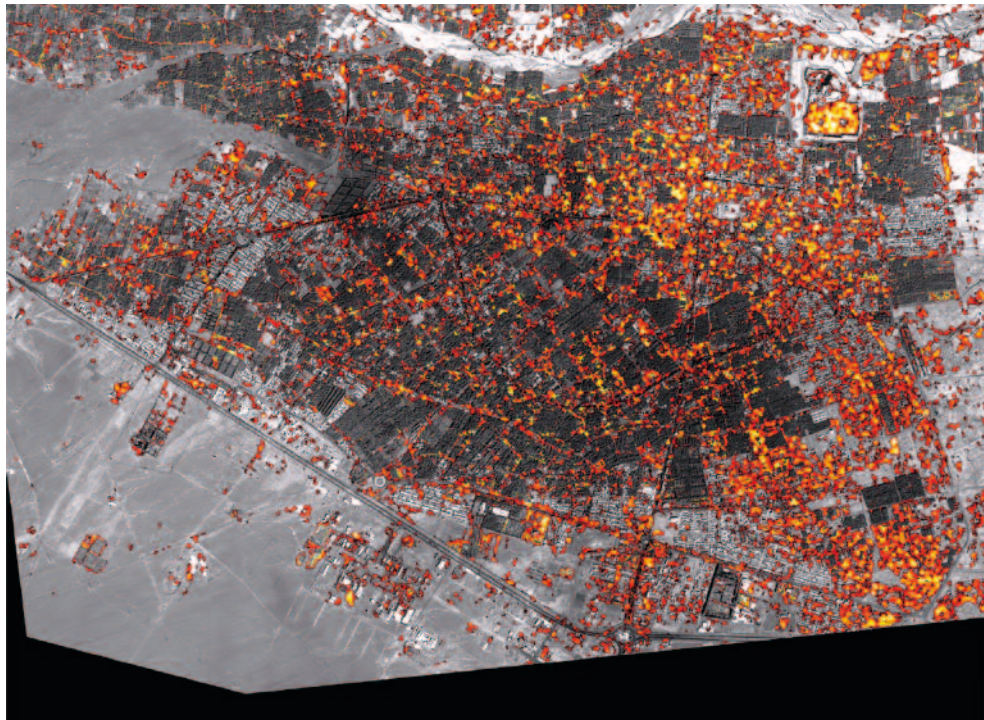


図9 イラン・バム地震のQuick Bird衛星画像から被害抽出処理を施した結果⁹⁾

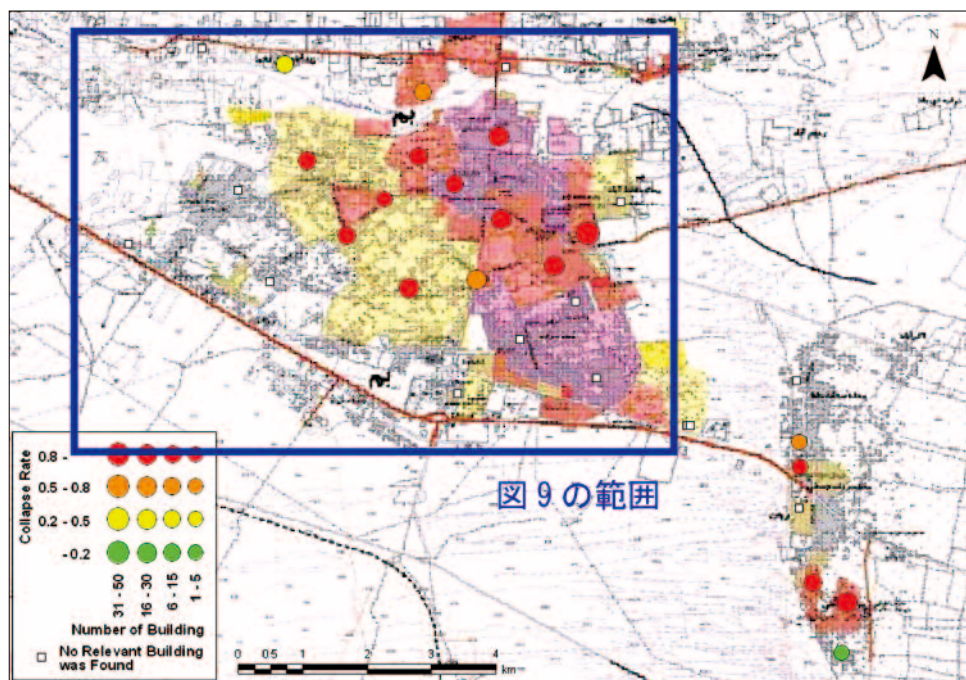


図10 イラン・バム地震によるアドベ造全壊率分布⁹⁾

表2 内閣府中央防災会議による地震被害想定結果と兵庫県南部地震の被災状況の比較

主な被害	東海地震（M8級）	東南海・南海地震（M8級）	首都直下地震（M7級）	兵庫県南部地震（M7級）
建物全壊棟数	約46万棟	約63万棟	約85万棟	約10万棟
死者数	9,200人	17,800人	13,000人	6,400人
避難者数	約180万人	約420万人	約700万人	約31万人
経済的被害	約37兆円	約57兆円	約112兆円	約10兆円

※東海地震、東南海・南海地震、首都直下地震は内閣府中央防災会議の専門調査会資料から引用
 ※兵庫県南部地震の被害状況については消防白書（平成11年版）等から引用

部地震を上回る広域かつ大災害が予測されている。

ところで、自治体が行う建物被害調査には、①ごく初動の意思決定のための概況調査、②応急危険度判定調査、③り災証明発行を目的とした家屋被災度判定調査の3通りがある。とくに③において、兵庫県南部地震では自治体による違いはあるものの約3~4ヶ月、新潟県中越沖地震のときの柏崎市では、住家被害約2万8千棟（うち全壊1万3千棟）に対して1ヶ月を要した。表2の想定結果に対して従来どおりの対応を前提とすれば、調査に相当の人員かつ多大な時間を要することがわかる。広域大災害であれば、人員を確保することだけでも相当苦勞するであろう。

内閣府では、航空写真等による建物被害把握の可能性について検討を始めている¹⁰⁾。本稿で紹介した技術の適用にあたっては、災害時におけるプラットフォームの運用形態や取得画像の転送などの問題がある。しかし、将来的にこれらの問題が解決され、画像処理によって抽出された結果をもとに、人手をかけずとも効率的な初動対応や応急対策活動が支援できるようになることを期待するものである。

発表日：2008年6月18日

■謝辞

本稿は、独立行政法人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奉職中、千葉大学大学院工学研究科の山崎文雄教授と、独立行政法人産業技術総合研究所の松岡昌志主任研究員のご指導のもと行った研究成果を発展させ、まとめたものである。兵庫県南部地震の航空写真は、アジア航測株式会社が撮影したものである。QuickBird衛星画像の解析結果は、松岡昌志主任研究員（前出）より提供を受けた。イラン・バム地震の建物

被害状況に関する資料は、東京大学生産技術研究所の大原美保准教授を通して、富士常葉大学の高島正典准教授より提供を受けた。兵庫県南部地震における街区のGISデータは、建設省（現・独立行政法人）建築研究所が建設省（現・国土交通省）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データをもとに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) 国際災害チャーター：http://www.disasterscharter.org/index_j.html
- 2) センチネルアジア：<http://dmss.tksc.jaxa.jp/sentinel/index.html>
- 3) 三富創、松岡昌志、山崎文雄：空撮画像を用いた汎用的な建物被害抽出方法に関する考察、土木学会論文集、No.710/I-60, pp.413-425, 2002.
- 4) 青木久、松岡昌志、山崎文雄：空撮画像を用いた地震による被害建物の抽出、写真測量とリモートセンシング、Vol.40, No.4, pp.27-36, 2001.
- 5) R. M. Haralich, K. Shanmugan and I. Dinstein：“Texture features for image classification”, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, Vol.SMC-3, no.6, pp.610-621, 1973.
- 6) 三富創、松岡昌志、山崎文雄：最尤法を用いた空撮画像からの建物被害抽出とその早期被害把握への応用、土木学会論文集、No.717/I-61, pp.37-148, 2002.
- 7) 三富創、松岡昌志、山崎文雄：航空写真を用いた建物被害地域の抽出手法の適用範囲に関する検討、土木学会第60回年次学術講演会講演概要集、I, pp.1305-1306, 2005.
- 8) 松岡昌志、山崎文雄、T. Thuy VU：高分

解能衛星画像を利用したイラン・バム地震での被害地域の自動抽出、リアルタイム災害情報検知とその利用に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp.75-82, 2004.

- 9) 目黒公郎、吉村美保、パオラ・マヨルカ、高島正典：イラン・バム地震における建物被害状況、2003年12月26日イラン・バム地震被害調査速報会概要集、土木学会、pp.16-19, 2004.
- 10) 内閣府：「航空写真等を活用した首都直下地震に対応した被害認定方法の検討」調査報告書、2008.
(http://www.bousai.go.jp/fukukou/pdf/kouku_shashin/01_houkoku.pdf)

■発表者

三富 創（みとみ はじめ）
アジア航測株式会社