

## 上空および宇宙からのリモートセンシングによる 最近の被害地震のモニタリング

松岡 昌志<sup>1</sup>

Masashi MATSUOKA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

現地調査が困難な地域や時期および被害が広範囲にわたっている場合においては、被害把握のために上空あるいは宇宙からの観測（リモートセンシング）の利用は有効と考えられる。ヘリコプターや航空機、人工衛星などの様々なプラットフォームから得られる情報は即時性や広域性、分解能において長所と短所を兼ね備えている。本報はそれぞれのプラットフォームや搭載されるセンサの特徴に応じた画像処理に基づく被害地域の自動推定手法について紹介する。そして、2001年のインド・グジャラート地震の被災地を観測した画像に適用し、現地踏査との比較から手法の妥当性を示し、各種プラットフォームから得られる推定結果には矛盾がないことを示す。

### 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<sup>1),2)</sup>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、時間の経過にともない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<sup>3)</sup>。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り<sup>4)</sup>、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ことが示されている<sup>5)</sup>。

このような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<sup>6)</sup>など都市環境の分野では以前から応用されてきた<sup>7)</sup>。都市防災の観点では避難空間の把握<sup>例えは8)</sup>や火災の延焼危険度分析<sup>9)</sup>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<sup>例えは10)</sup>。地震後に観測された画像から被害地域を検出した例は数少なく、1995年兵庫県南部地震以降の被害地震については著者らのグループが幾つか試みている<sup>11),12)</sup>。

表1に示すようにリモートセンシングのためのプラットフォームはその観測能力（機動性、観測範囲、空間分解能）が様々である。ヘリコプターや航空機は機動性や空間分解能に優れているものの観測範囲が狭いことから、広域被害の把握のためには何度も飛行を重ねる必要がある。一方、人工衛星は観測範囲が広く、広域被害の全体像の

把握には適している。しかし、空間分解能が低く、気象衛星を除くと回帰日数が長いことから、機動性に富んでいるとはいえない。ただし、将来わが国をはじめとして複数の衛星が打ち上げられ<sup>13)</sup>、データ処理や転送技術の高度化も進むことから<sup>14)</sup>、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を含むリモートセンシング技術の活用は高まっていくものと予想される。そこで、本報ではそれぞれのプラットフォームやセンサの能力に応じた被害地域検出手法について概略を説明し、2001年のインド・グジャラート地震に対して手法を適用した事例を紹介する。

表1 プラットフォームによる観測能力の違い

Platform	Response	Coverage	Resolution
Meteorological Satellite (e.g. DMSP, NOAA)	○	◎	×
Earth Observatory Satellite (e.g. Landsat, ERS)	△	◎	△
Airplane	○	△	○
Helicopter	◎	×	◎

◎: Excellent, ○: Good, △: Fair, ×: Poor

### 2. 各種プラットフォーム/センサと被害地域推定手法の概要

リモートセンシングは用いる電磁波の波長帯によって、大きくは光学センサと電波センサによる観測に分かれる。光学センサには航空写真や Landsat 衛星などのマルチスペクトル画像が含まれ、レーザなどもこの範疇である。電波センサには、最近脚光を浴びている合成開口レーダ (SAR) がある。ここでは、光学センサとして、DMSP 衛

星, Landsat 衛星および空撮映像を取りあげ, SAR は RADARSAT などの人工衛星に搭載されているものとした。それぞれのセンサの特徴と被害判読の手法について以下に示す。

### (1) DMSP 衛星による被災地推定手法

人工衛星の場合, 一般に空間分解能の高さと観測頻度は相反する関係にある。Landsat や ERS 衛星等の地球観測衛星は, 回帰日数が長すぎるため地震発生直後に被災地の観測を行うまでに数日を要する場合がある。しかし, 早期被災地推定としては概略的なものであっても, より広域での被災地の情報を収集する目的には分解能が低い衛星も利用できる。米国の軍事気象衛星 DMSP は空間分解能が 2.7 km と低いものの, 対象地域を 1 日に少なくとも 2 回は観測する。複数の衛星が運用されており, 天候が良ければ地震発生後 24 時間以内には対象地域の夜間画像が取得できる。また, DMSP に搭載されている可視光と赤外線センサ OLS は Landsat 衛星の TM センサに比べ 4 桁以上のオーダーの感度をもち, 都市の光に留まらず, 焼畑・森林火災の火や操業漁船の集魚灯など, 夜間の微弱な可視光の観測も可能である。

都市が大地震の被害を受けた場合, 発電送電施設や建物の損傷や倒壊, 被災者の避難所への移動, 飲食店や娯楽施設等の営業の停止等により, 夜間の町の光が著しく減少することが予想される。したがって, DMSP により夜間の可視光のリモートセンシングを行い, 平常時に比べ著しく光量が減少した地域を特定することで地震による被災地の推定が可能である。推定手法の詳細については小椋山他<sup>15),16)</sup>を参照されたい。ここでは文献 16)の手法の概略を紹介する。まず, 過去数十日間の地震前の時系列画像から各画素(ピクセル)位置ごとに平常時のピクセル値の平均値と標準偏差を算出しておく。次に, 有意水準(信頼率)を設定し, 各ピクセル位置ごとに正規分布検定の閾値を設定する。そして, 地震発生後に取得した画像のピクセル値を参照し, 正規分布検定により被災地を判定する。これまでに, 1995 年兵庫県南部地震, 1999 年トルコ・コジャエリ地震と台湾集集地震, 2001 年のエルサルバドル地震などにおいて被災地推定を行い, 空撮画像や現地踏査などとの比較から手法の妥当性が確認されている<sup>15)-17)</sup>。世界で発生する大規模な地震については被災地の自動推定を行い, 結果をホームページにアップロードするシステムが近日公開予定である。

### (2) Landsat 衛星による被害地域検出手法

Landsat などの地球観測衛星になると, 空間分解能が数十メートルにまで向上し, 可視光から熱赤外までの広い波長帯において複数の目(バンド)を持つ。そのため, 地表の被覆状況を推定することが容易になる。複数バンドの画像を RGB に割り当てることで, カラー合成画像が作成でき, 地震前後のカラー合成画像を目視にて比較することだけでも, 顕著な違いは判読できる。画像処理的には, 被災地におけるトレーニングデータ(実際の限られた被害情報)から被害地域におけるピクセル値を特徴づけ, 次に, その特徴と類似の傾向を示すピクセルを観測画像全域にわたり抽出することで被害地域の分布が求められる<sup>18),19)</sup>。トレーニングデータを必要とせず, より簡便に被害地域を自動推定するためには上述した DMSP 画像と同様の画像処理が考えられる。ここでは, 文献 15)の考え方を一部踏襲し, 地震前後での被害地域におけるピクセル値が他の無被害地域のそれと比較して有意に変化

すると仮定する。建物が倒壊し瓦礫や土が散乱することで, 可視から近赤外域の波長帯で画像のピクセル値が増加する傾向があり<sup>18),19)</sup>, 火災によって延焼した地域では逆に減少する<sup>18)</sup>事例があることが理由である。

まず, 観測条件や季節条件がほぼ同様な地震前後の画像を用意し, 雲, 雲影, 植生, 海域などの影響がある場合はそれらの範囲をあらかじめ除去する。そして, 地震後のピクセル値から地震前のそれを引いた差分を求め, ある画像領域内についてはそれが正規分布していると仮定し, その平均値( $M$ )と標準偏差( $\sigma$ )を求め, 差分が  $M+2\sigma$ 以上, または,  $M-2\sigma$ 以下の地域を被害地域とみなすものである<sup>20)</sup>。

### (3) 空撮映像による被害地域特定手法

ヘリコプターや航空機から得られる空撮画像は, その画像取得における即時性を生かすため, また, 災害前の画像がないことが予想されるため, 著者らは災害発生後のみの空撮画像から被害建物を目視判読<sup>21),22)</sup>および自動抽出<sup>23)</sup>することを検討している。自動抽出に関する研究<sup>23)</sup>では, 取得された RGB 情報から色彩情報とエッジ情報を求めて被害建物の特徴づけた。ところが色彩情報は, 撮影時における太陽光の影響や地域による建築環境の違いにより, 被害建物の特徴づける閾値が地域や画像ごとに異なる<sup>24)</sup>。そこで最近の研究<sup>25)</sup>では, 画像によって被害建物の閾値の変化が小さいエッジ情報のみを用いて被害建物地域の抽出を試みている。この方法は他の地震での被害地域にもそのまま適用できる可能性がある。以下には, 兵庫県南部地震の被災地を観測した空撮画像から導き出された文献 25)の方法について概略を示す。

- ・原画像の各 R, G, B から HSI 変換<sup>26)</sup>によってグレースケール画像(明度に相当)を作成する。
- ・ $7 \times 7$ ピクセル領域に拡張した<sup>23)</sup>Prewitt 型エッジ検出テンプレート<sup>27)</sup>をグレースケール画像に適用し, エッジ強度値  $E_i$  を求める。このテンプレートは注目ピクセルから水平右方向を 0 度として 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 度の 8 方向のエッジ強度を考慮できる。エッジ強度値  $E_i$  は, これら 8 方向テンプレートの最大値とする。
- ・エッジ強度値  $E_i$  から,  $7 \times 7$ ピクセル領域におけるエッジ強度の分散値  $E_v$  を求める。
- ・エッジ強度が最大となる方向を注目ピクセルにおけるエッジ方向とし,  $7 \times 7$ ピクセル領域において最も多い方向成分について相対頻度を求め, エッジ方向の最頻度値  $E_d$  とする。
- ・画像の同時生起行列から定義される角 2 次モーメント  $Ta$ ([1]式)とエントロピー  $Te$ ([2]式)<sup>27)</sup>を算出する。

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

$$Te = - \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{m-1} P(k,l) \log\{P(k,l)\} \quad [2]$$

ここで,  $P(k,l)$ はグレースケール画像の明るさが  $k$  のピクセルから一定の相対位置に明るさ  $l$  のピクセルが出現する生起確率を表し, 一定の位置につい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(同時生起行列)で表す。明るさとはエッジ強度  $E_i$  を 16 階調に等分した値である。 $P(k,l)$ が

どこかの $(k,l)$ で大きな値をとる(周辺ピクセルどうしの値の変化が小さい)場合、角 2 次モーメント  $Ta$  の値は大きくなり、エントロピー  $Te$  の値は小さくなる。一方、周辺ピクセルにおける値のパターンが多様に分布する場合、傾向が逆になる。つまり、瓦礫化した建物のようにエッジ強度の値が乱雑に分布する地域では角 2 次モーメント  $Ta$  の値は小さく、エントロピー  $Te$  の値は大きくなる。ここでは、これらの値は  $7 \times 7$  ピクセル領域から算出する。

以上の手順によって、被災地を観測した画像から被害建物の判別に必要な指標が算出される。兵庫県南部地震の際の倒壊建物のピクセルの特徴は、 $E_v$  が  $2.0 \sim 6.8 \times 10^5$ 、 $E_d$  が  $0.30 \sim 0.60$ 、 $Ta$  が  $0.74 \sim 6.6 \times 10^2$ 、 $Te$  が  $3.4 \sim 4.2$  であった。各指標におけるこれらの範囲を閾値として、被害建物に特徴的なピクセルを抽出できる。そして、被害建物の分布をよりわかりやすく表現するために、さらに以下に示すフィルタ処理を施す。

- ・画像の中で建物 1 棟程度の大きさのウィンドウサイズを決定する(例えば、インドの空撮画像では  $31 \times 31$  ピクセル)。
- ・画像全域でこのウィンドウを移動させ、ウィンドウ内に含まれる抽出ピクセルの割合  $R_{px}$  を算出する。

兵庫県南部地震での空撮画像から  $R_{px}$  が 30%以上のピクセルが倒壊建物の分布と類似したことから、この閾値を採用する。

#### (4) SAR 搭載衛星による被害地域検出手法

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。前節までに説明した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(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、ある事例に基づき構築された変化抽出手法は他地域にも適用できる可能性がある。兵庫県南部地震の前後に観測された欧州宇宙機関の ERS 衛星の SAR 画像と現地調査データから導かれた被害地域の検出の考え方と手法<sup>28),29)</sup>を以下に示す。

人工衛星により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。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 $\sigma^0$ (dB)の差分や相関係数の値で表現できる。被害地域抽出までのフローを図 1 に示す。まず、地震前後の画像の正確な位置合わせの後、それぞれの画像に  $21 \times 21$  ピクセルウィンドウのスペックル低減フィルタ(Lee フィルタ<sup>30)</sup>)を施す。強度差分は  $13 \times 13$  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それを引くことで求め([3]式)、相関係数についても  $13 \times 13$  ピクセルウィンドウから算出する([4]式)。被害地域は求めた差分と相関係数を説明変数とした線形判別式による判別得点([5]式)に基づき抽出する。

$$d = 10 \cdot \log_{10} \hat{I}a_i - 10 \cdot \log_{10} \hat{I}b_i \quad [3]$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N I a_i I b_i - \sum_{i=1}^N I a_i \sum_{i=1}^N I b_i}{\sqrt{\left( N \sum_{i=1}^N I a_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N I a_i \right)^2 \right) \cdot \left( N \sum_{i=1}^N I b_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N I b_i \right)^2 \right)}} \quad [4]$$

$$z = -2.140 d - 12.465 r + 4.183 \quad [5]$$

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、 $N$  は計算するウィンドウ内のピクセル数を表す。 $13 \times 13$  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、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  $13 \times 13$  ピクセルの平均値である。なお、用いるフィルタやウィンドウサイズは ERS 衛星の SAR 画像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<sup>31)</sup>との比較に基づき、被害の判別精度が高くなるように経験的に決定したものである<sup>32)</sup>。判別得点  $z$  の値が大きいくほど地表変化が大きく、被害が甚大である可能性が高い。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、地震前画像の後方散乱係数がある値以下の地域はマスクする。このマスク処理はマイクロ波の波長や入射角、市街地の構造等に依存することが予想されるが、その閾値は兵庫県南部地震やトルコ・コジャエリ地震から経験的に約  $-6 \sim -5$  dB である。

### 3. 2001 年インド・グジャラート地震の被害地域の抽出

2001 年 1 月 26 日にインド Gujarat 州西部の Bhachau 付近を震源とした Mw 7.7 (USGS 発表)の大地震が発生し、同州の Kachchh 地方を中心に広範囲で極めて甚大な被害が発生した。この地震による被害地域は Gujarat 州の Kachchh 地方だけでなく、震源から 300km 東に離れた

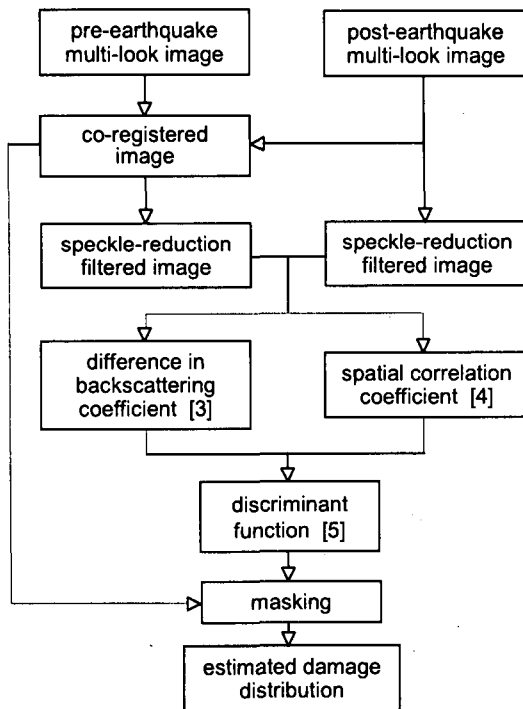


図 1 SAR 画像による建物被害地域の検出手法

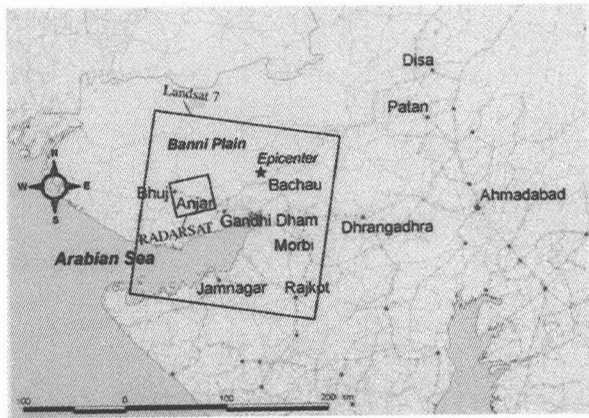


図2 リモートセンシングによるインド・グジャラート地震の被災地推定の検討対象地域

Ahmedabad や Jamnagar, Rajkot, Surendranagar にまで及んだとされている<sup>33)</sup>。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。

以上のように、この地震の被害地域は広範囲にわたっており、これを地上踏査のみから把握するのは容易ではない。そこで、広範囲を一度に見渡すことのできるDMSP, Landsat 衛星, SAR 搭載衛星画像に対して被害地域分布の推定を行い、さらに被害建物の特定を目的とした空撮映像による被害検出を試みた例を示す。なお、この報告は文献<sup>34)</sup>において既に発表されている内容の一部を引用及び加筆している。

(1) 光学センサ画像による被害の概略推定および検証

DMSP 衛星の観測範囲は約 600km と非常に広い。図2に示す領域よりもひとまわり広い範囲である。地震発生

の当日夜に被災地域を観測した、震源を中心とする600km 四方を解析対象地域とした。時期が乾季ということもあり、画像には雲の影響がほとんどない。そして、地震前の画像には2000年10月20日から2001年1月24日までに観測された32シーンの画像を使用した。

図3にはDMSP衛星画像から推定される被災地の分布を示す<sup>16)</sup>。夜間の光が著しく減少した地域を黒色、やや減少した地域を濃い灰色で示す。震源近くのBhachau, Gandhī Dham, Anjar, Kandla, Bhujなどで特に被害が大きかったことが伺える。しかし、これら以外の震源から約300kmも離れた都市や町なども被災地として推定される。ただし、図において最も薄い灰色で示される地域(例えば、Karachi, Ahmadabad など)では、都市の光が可視光センサの測定レンジを超えるほど明るかったため、光の減少量を求めることができていない。

Landsat 衛星は地震の14日後の2月9日に被災地を観測している(範囲は図2参照)。地震前の画像には1月8日のものを利用した。両画像とも雲がほとんどなく、1ヶ月しか間隔が開いていないことから、太陽光や植生活性の季節変動もほとんどないことが予想される。可視～近赤外域の波長帯での輝度値を観測するパンクロマティック画像(空間分解能: 15m)を用いて、画像全域について2章(2)節の手法を適用し、被害地域を推定したところ、DMSP 衛星において被災地(黒色)として推定された地域では、Landsat 衛星からも被害地域として判定されるピクセルが多数分布した。図4(a)～(c)はAnjar, Gandhī Dham, Bhachauにおける推定被害地域を黒色で示す。これらの地域では地震後画像のピクセル値が著しく増加しており、多数の建物が倒壊していることが予想される。Gandhī Dham では詳細な現地調査が実施されており<sup>35)</sup>、その結果とも矛盾がない。

一方、地震後にピクセル値が減少することで抽出される地域もある。図5にはBhujの北側に広がるBanni plain

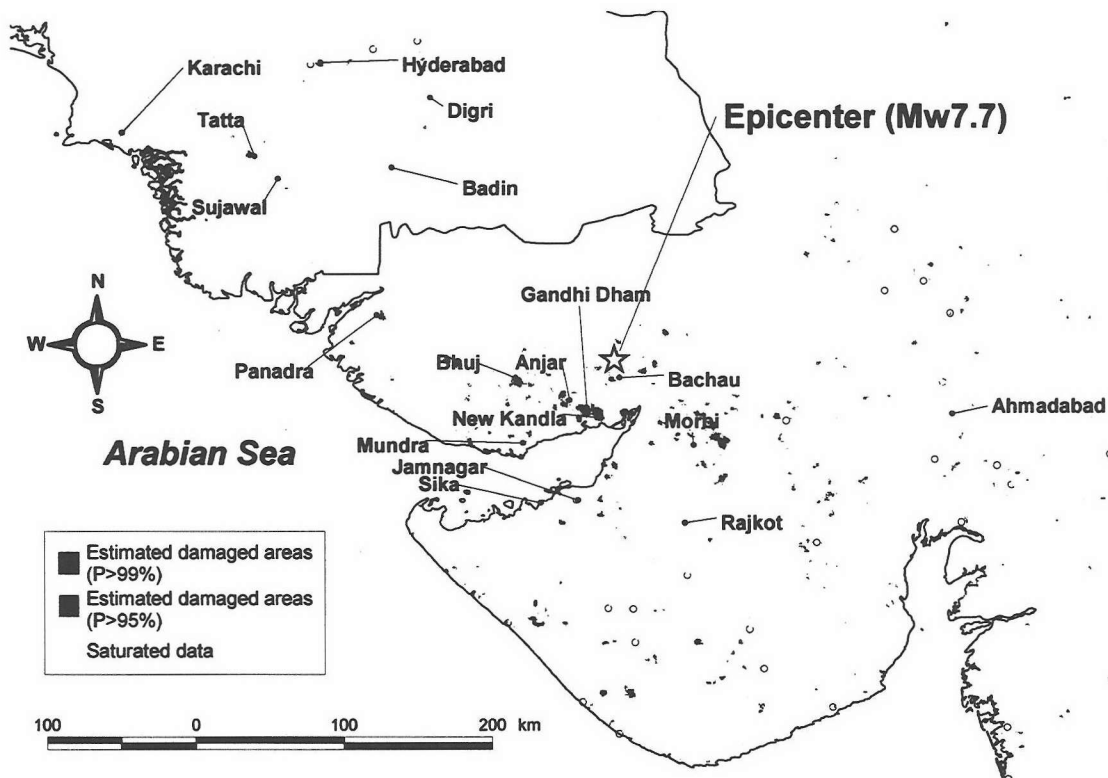
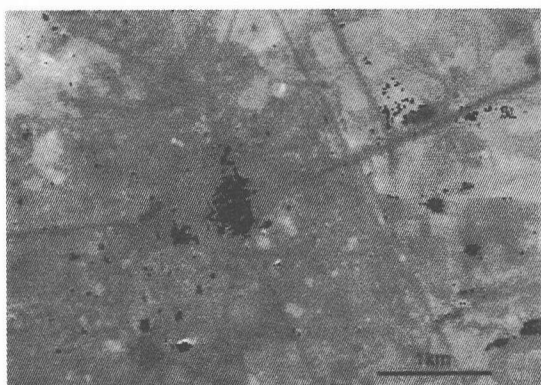


図3 DMSP衛星画像から推定されたインド・グジャラート地震の被災地<sup>16)</sup>



(a) Anjar



(c) Bhachau



(b) Gandhi Dham

図4 Landsat衛星画像から抽出された被害地域  
(主に地震後画像のピクセル値が増加した地域)

における推定被害地域を示す。この広大な地域(湖)の中に蛇行した線状で被害地域が検出される。この地域は、雨季に水没し、乾季には干上がった塩分が地表に広がる。地震の発生時期は乾季であり、地震前の衛星画像は塩の影響により輝度値が高かった。パングロマティック画像では水の反射輝度がほとんどないことから、線状の物質は水の可能性が高い。地震前の1月8日から2月9日の間にはほとんど雨が降っていないことから<sup>36)</sup>、これだけの湖水が溜まったとは考え難い。この地域では地震の際に液化化によって地下から泥水が地表に噴出した地域があることが報告されている<sup>37),38)</sup>。したがって、地震後画像でピクセル値が減少した地域はこの泥水であると推定される。現地調査では限られた地点でしか、この現象が確認できないが<sup>37),38)</sup>、衛星画像からはその全体像が容易に把握できる。

なお、ここではLandsatの観測画像全域について手法を適用し、ピクセル値が有意に増加あるいは減少した地域を被害地域として判定しているが、対象地域を図4や図5の狭い範囲を切り出した画像に対して、それぞれ適用しても、ほぼ同様の結果が得られた。しかし、本来この手法は判定の際に用いる画像領域の広さや閾値(ここでは $M \pm 2\sigma$ )によって推定結果が異なることが予想される。これらの適切な設定の方法や実際の被害程度との関係については今後の検討課題である。

地震防災フロンティア研究センターでは、現地初動調査を2月10~15日の日程で実施した。この調査の一環として、2月11日に小型飛行機による空撮調査を行い、主要な都市の被災状況をデジタルビデオおよびアナログカメラで撮影した。DMSPによる被災地推定結果やLandsat画像に基づく検討から、比較的建物被害が集中している



図5 Landsat衛星画像から抽出されたBanni Plain付近の被害地域  
(主に地震後画像のピクセル値が減少した地域)

として推定されたAnjarとGandhi Dhamにおける空撮画像(空間分解能: 約50cm)を図6(a), (b)に示す。建物被害および無被害地域が目視からも判読でき、Landsat画像での結果(図4(a), (b))が妥当であることが確認できる。目視では多数の画像の判読には時間がかかり、また判読者





(a) Anjar (図 4(a) 中央の推定被害地域を北から臨む)



(b) Gandhi Dham (図 4(b) 中央やや東の推定被害地域を北から臨む)

図 6 空撮画像の例

によって結果が異なることもある。そこで、2章(3)節で説明した被害建物の自動判別手法を空撮画像に適用した。Bhachau における被害建物の抽出結果を図 7 に示す。抽出された地域(黒色)は瓦礫あるいは倒壊建物を概ね含んでおり、兵庫県南部地震の空撮画像に基づき構築した手法や閾値がインド・グジャラート地震の画像にも適用できることがわかる。

## (2) SAR 画像による被害地域の抽出と他の地震との比較

この地震では 2001 年 2 月 11 日にカナダ航空宇宙局の RADARSAT 衛星が被災地を観測した。RADARSAT 衛星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(1999 年 12 月 31 日)の有無の関係から、Fine モードのビームポジション 5(空間分解能: 約 8m)を用いた。これは、現在運行中の SAR 衛星の中では分解能がもっとも高いことから、詳細な被害地域の検出が期待される。ただし、観測幅は狭く、図 2 に示すように西は Bhuj から東は Anjar までの約 40km の範囲である。

RADARSAT 画像に 2 章(4)節の手法を適用して得られた判別得点  $z$  の分布を図 8 に示す。Bhuj や Anjar 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黒色で示す  $z$  の値が大きい地域(被害地域)が抽出される。Anjar とその周辺における抽出被害地域(図 8(a)の拡大図)は前節での Landsat 画像から推定される被害地域(図 4(a))や空撮画像(図 6(a))ともよく対応する。Bhuj では民間の高解像度衛星である IKONOS(観測幅 11km, 空間分解能は



図 7 Bhachau の空撮画像(図 4(c) 中央付近)から被害地域を自動判読した結果

疑似的に 1m)が地震の 2 日後に観測している。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<sup>39)</sup>と本手法で抽出される被害地域のピクセルを重ね合わせ、建物が完全に崩壊した地域と大破地域における判別得点  $z$  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 であった(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 と小さい。表には[3]式と[4]式から得られる地震前後の後方散乱係数の差分値  $d$  と相関係数  $r$  についても示し、比較のため兵庫県南部地震やトルコ・コジャエリ地震での建物被害地域における値<sup>40)</sup>についても載せている。標準偏差が大きくバラツキがあるものの、過去の地震で得られた特徴と同様に、 $z$  の値が大きいほど被害の程度が大きくなる。また、Bhuj の被害地域での  $d, r, z$  の値はトルコの Golcuk での値とも近い。これは、SAR 画像からみた場合、インドとトルコでは市街地構造や地震による建物被害のパターンが類似していることを示唆している。

以上より、本報で紹介した画像処理に基づく被害地域の推定手法は、最近発生した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

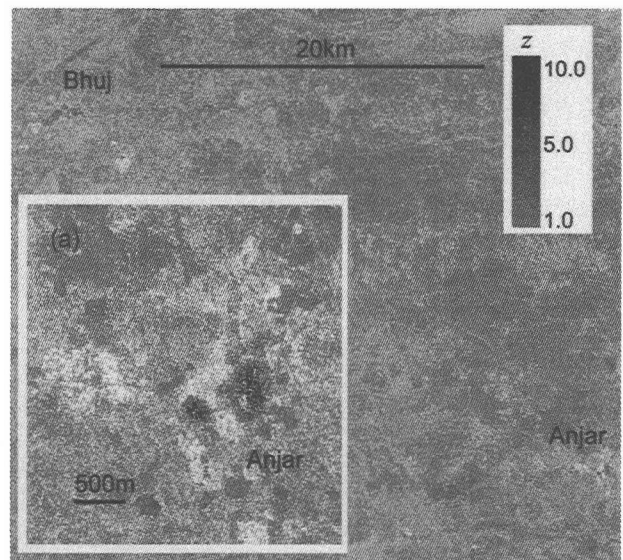


図 8 RADARSAT 衛星の SAR 画像から抽出された建物被害地域の分布

表2 最近の被害地震での被災地における地震前後の SAR 画像から得られる後方散乱係数の差分値、相関係数、判別得点

Earthquakes and analyzed areas	Number of pixels	Mean and standard deviation		
		<i>d</i> [dB]	<i>r</i>	<i>z</i>
<b>The 1995 Kobe, Japan earthquake</b>				
Hanshin district (severe damage ratio [%]) <sup>31)</sup>				
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)
<b>The 1999 Kocaeli, Turkey earthquake</b>				
Golcuk (collapse damage ratio [%]) <sup>41)</sup>				
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 [%]) <sup>42)</sup>				
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) <sup>43)</sup>				
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)
<b>The 2001 Gujarat, India earthquake</b>				
Bhuj (building damage level) <sup>39)</sup>				
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)

ないことから、途上国などでの広域被害の早期把握への実用化が期待できる。

#### 4. まとめ

上空および宇宙からのモニタリングによる地震被害情報収集の可能性に関する研究として、人工衛星画像やヘリコプターからの空撮画像を利用した被害地域の推定手法について紹介し、2001年インド・グジャラート地震の被災地を観測した画像に適用した。その結果、推定された被害地域は、空撮画像の目視判読や現地踏査から確認された被害地域と概ね対応した。今後、高性能な人工衛星が増え、地上システムなどの技術が発達することから、広域での被害把握手段としての画像情報の利用は増すものと予想される。実用化のために事例の蓄積と推定精度のより詳細な検証を行っていく予定である。

#### 謝辞

DMSP 画像は米国海洋大気局地球物理データセンターより、画像処理結果は東京大学生産技術研究所助手の小椋山雅之氏から提供を受けた。インド・グジャラート地震の被害状況等については地震防災フロンティア研究センターの新井洋氏の報告を参考としている。記して謝意を表す。Landsat は米国政府と米国地質調査所、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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 5) 立石陽輝, 能島暢呂, 杉戸真太, 松岡昌志, 金澤伸治: 地震動情報とリモートセンシング情報の統合処理による被害推定の逐次更新モデル, 土木学会中部支部平成13年度研究発表会, 1, pp.9-10, 2002.
- 6) 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) 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.
- 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, 日本建築学会計画系論文報告集, No.411,

- pp.1-8, 1990.
- 9) 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.
  - 10) 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化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.
  - 11) 山崎文雄, 松岡昌志, 小川直樹, 長谷川弘忠, 青木久: 上空および人工衛星からのリモートセンシング被害把握技術, 第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, pp.75-80, 1998.
  - 12) 松岡昌志: リモートセンシングによる地震被害の把握, 「1995年兵庫県南部地震」5周年特別企画 日本地震あれからこれから, 土木学会, pp.173-176, 2000.
  - 13) 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.
  - 14) 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.
  - 15) 小椋山雅之, 林春男, 牧紀男, 橋寺晋, 松岡昌志, Kroehl, H., Elvidge, C., Hobson, R.: 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.
  - 16) 小椋山雅之, 林春男, 牧紀男, 東田光裕, Kroehl, H., Elvidge, C., Hobson, R.: DMSP/OLS夜間可視画像を用いた早期被害推定システム(EDES)の時系列画像法を用いた推定精度の向上, 地域安全学会論文集, No.3, pp.173-180, 2001.
  - 17) 高島正典, 林春男: DMSP/OLS夜間可視画像を用いた被災地推定の妥当性の検証—トルコ・マルマラ地震(1999)及び阪神・淡路大震災(1995)への適用—, 地域安全学会論文集, No.2, pp.69-78, 2000.
  - 18) 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.
  - 19) Estrada, M., Matsuoka, M. and Yamazaki, F.: Digital Damage Detection due to the 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, Univ. of Tokyo, No.34, pp.55-56, 2001.
  - 20) Yusuf, Y., Matsuoka, M., and Yamazaki, F.: Detection of Building Damages due to the 2001 Gujarat, India Earthquake Using Satellite Remote Sensing, Proc. 7th National Conference on Earthquake Engineering, 2002 (in press).
  - 21) 小川直樹, 山崎文雄: 航空写真を用いた兵庫県南部地震における建物被害の目視判読, 地域安全学会論文集, No.2, pp.119-128, 2000.
  - 22) 長谷川弘忠, 山崎文雄, 松岡昌志: 空撮ハイビジョン映像を用いた兵庫県南部地震による建物被害の目視判読, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.257-265, 2001.
  - 23) 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.
  - 24) 三富創, 松岡昌志, 山崎文雄: 最近の地震災害の空撮画像を用いた建物被害地域の自動抽出の試み, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.267-278, 2002.
  - 25) 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 (投稿中).
  - 26) 井上誠喜, 八木伸行, 林正樹, 中須英輔, 三谷公二, 奥井誠人: C言語で学ぶ実践画像処理, 株式会社オーム社, 1999.
  - 27) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1991.
  - 28) 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.
  - 29) 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.
  - 30) 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, pp.165-168, 1980.
  - 31) 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.
  - 32) 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 (投稿中).
  - 33) Earthquake Disaster Mitigation Res. Ctr., NIED and IIT-Bombay: The Bhuj Earthquake of January 26, 2001.
  - 34) 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.
  - 35) 林 康裕, 澤田純男, Pareek, S., 久田嘉章: 2001年インド西部地震における Gandhidham の建物被害, 地域安全学会論文集, No.3, pp.65-72, 2001.
  - 36) India Meteorological Department: <http://www.ind.emet.in/main#new.htm>, 2001.
  - 37) The University of Memphis: <http://www.ceri.memphis.edu/gujarat/report/sld008.htm>, Homepage of Center for Earthquake Research and Information, 2001.
  - 38) India Institute of Technology: <http://home.iitk.ac.in/~ramesh/gujarat/gujarat.htm>, 2001.
  - 39) 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).
  - 40) 松岡昌志, 山崎文雄: 人工衛星 SAR 強度画像による被害地域検出手法の最近の被害地震への適用とその妥当性の検討, 日本建築学会構造系論文集 (投稿中).
  - 41) AIJ reconnaissance team, Kabeyasawa, T. et al.: Progress Report on Damage Investigation after Kocaeli Earthquake by Architectural Institute of Japan, Proc. ITU-IAHS Intern. Conf. on the Kocaeli Earthquake 17 August 1999, pp.300-305, 2001.
  - 42) 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.
  - 43) 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, Tech. Report MCEER-00-0001, pp.151-169, 2000.