

人工衛星リモートセンシングを利用した 地震被害分布の把握

松岡 昌志¹, 青木 久², 山崎 文雄³

¹博士(工学) 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山 2465-1)

²修士(工学) 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山 2465-1)

³正会員 工博 理化学研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 兵庫県三木市福井三木山 2465-1)

人工衛星によるリモートセンシングにより、広域での地震被害分布の把握可能性を検討することを目的とし、1995年兵庫県南部地震の前後に得られた光学センサ画像(LANDSAT/TM 及び SPOT/HRV)、合成開口レーダ画像(ERS-1/SAR)と地震被害調査データとを用いて、液状化、建物焼失、建物大被害地域における衛星画像の特徴及び地震前後でのその変化を定量的に評価した。地震前後の画像の情報を利用した線形判別手法により被害分布を推定し、それが実際の被害調査結果と概ね対応することを確認した。

Key Words: Satellite Remote Sensing, Optical and SAR Images, Earthquake Damage, the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Spectral Characteristics, Backscattering Feature

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では阪神・淡路地域の広域にわたり甚大な被害が発生し、災害発生初期における被害情報の重要性が認識された。近年、地震発生直後から地震計ネットワークと地理情報システム(GIS)に基づいて早期被害推定を行う、リアルタイム地震防災システムの開発・導入が盛んになっている¹⁾。しかし、この推定結果はあくまでも推定であってばらつきも大きい。従って、なるべく早期に実際の被害の大まかな把握を行うことが必要となる。

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として航空機や人工衛星等を利用したリモートセンシングがある(図-1)。特に人工衛星によるリモートセンシングは広範囲の情報を、ほぼ同一時刻に、かつ同一地域の状況の経時変化を容易に得ることができることから、被災地における人工衛星画像から地震被害の分布が把握できれば、復旧・復興計画立案時に有効な情報となりうる。

この地震では、地震後の航空機リモートセンシングにより、液状化や焼失地域と無被害地域とではスペクトル特性が違うことが明らかにされ²⁾、地震前後の衛星画像による目視判読やスペクトルパターンの変化から被害地域の抽出可能性を示唆する例が示されている³⁾⁴⁾。また、地震前後に得られた複数の合成開口レーダー(SAR)画像の相関解析から、被害

の著しい地域を抽出できることを示している⁵⁾。しかし、いずれの研究も現地踏査による詳細な被害調査結果と衛星画像の特徴の関係を定量的に調べ、被害分布の抽出可能性を検討していない。

本報告は、著者らが実施した人工衛星リモートセンシングによる被害判読可能性に関する一連の研究^{6)~9)}についてまとめたもので、兵庫県南部地震を対象として、光学センサ画像及び SAR 画像と地上踏査による建物被害調査結果¹⁰⁾との比較を行い、これらの利用性について議論する。また、航空機搭載の SAR 画像についても一部紹介し、リモートセンシング画像を利用した地震被害把握に関する考察を行う。

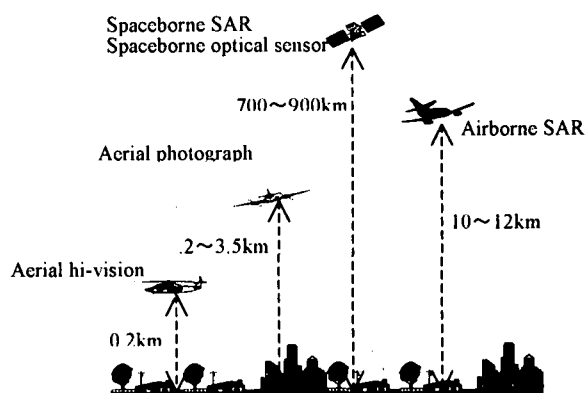


図-1 リモートセンシングによるモニタリング

2. 人工衛星画像

兵庫県南部地震では、光学センサや SAR を搭載した複数の地球観測衛星が阪神・淡路地域を観測した¹¹⁾。ここでは、可視光域から熱赤外域における地表の反射/放射強度を記録した光学センサ画像と地表におけるマイクロ波の後方散乱強度を記録した SAR 画像の両者にみられる被害地域の特徴について検討した。

(1) 光学センサ画像

地震後の 1995 年 1 月 24 日に LANDSAT 衛星の TM センサが、1995 年 1 月 20 日に SPOT 衛星の HRV センサが震災地域を観測している。これらのセンサから得られる画像は可視域から赤外域までの波長帯域の地表における輝度情報である。LANDSAT/TM は 7 つのバンドを有し、地上での分解能は可視から中間赤外のバンド 1~5, 7 で約 30m、熱赤外のバンド 6 で約 120m である。SPOT/HRV の XS(マルチスペクトルモード)は地上分解能が約 20m という衛星画像ではトップクラスの性能を持っているが、観測バンド数が 3 バンドと少ない。図-2 には LANDSAT/TM 及び SPOT/HRV の可視~中間赤外での観測波長帯を植物、土壌、水分の分光反射率と共に示す。

また、被害地域における地震前後のスペクトル特性の変化(輝度値変化)を検討するため、地震前のデータとして LANDSAT については 1994 年 8 月 17 日、SPOT については 1990 年 3 月 22 日の画像も用意した。

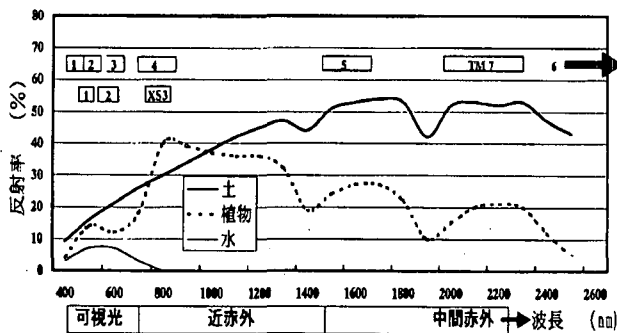


図-2 人工衛星の観測波長帯と分光反射特性 (文献 12 に加筆)

(2) SAR 画像

SAR が用いる電磁波は可視域や赤外域よりも長い波長を持った位相のそろったコヒーレントなマイクロ波である。従って、可視域から赤外域における地表での反射/放射特性を観測する光学センサ画像とは質的に異なった情報が SAR 画像には含まれている。SAR によって照射されたマイクロ波は、地表付近の物質の形状や物性、表面の状態などによって変化する。そして、センサは地表で反射して戻ってきた後方散乱成分を観測する。

後方散乱の大きさはマイクロ波の波長や地表への入

射角度、地表面の粗さ等の影響を受ける。単純には図-3 に示すように、地面のように凹凸の少ない面では後方散乱が小さく、建物等は道路との間での複数反射(カージナル効果)により大きな後方散乱が観測される場合が多い¹³⁾。

また、SAR は電磁波の特徴のひとつである偏波を制御できることから、地表での散乱波の位相や偏波の変化を測定できる。レーダにおいて最も普通に使われる偏波は水平偏波 H と垂直偏波 V であり、これらの2つを用いて送受信することで、HH, VV, HV, VH で表現される4種類の偏波の組み合わせが可能である。ここで、はじめの記号が送信の偏波、後の記号が受信の偏波を表している。HH や VV はライク偏波、HV や VH はクロス偏波と呼ばれる。対象物体によっては観測される後方散乱成分の偏波特性が特徴的なものもある。例えば、図-3 に示す単純な建物と地面との反射を考えた場合、理論的にはクロス偏波が発生しない。偏波特性を利用することで、地表物体のより高精度な識別等が可能になることが期待されているが、現在までのところ、この観測が可能なのは航空機に限られ、人工衛星の場合には重量や電力等の理由から、ライク偏波の観測しかできないのが一般的である。

SAR を搭載した衛星についても地震後の早い時期に阪神・淡路地域を観測しているが、利用可能な画像は

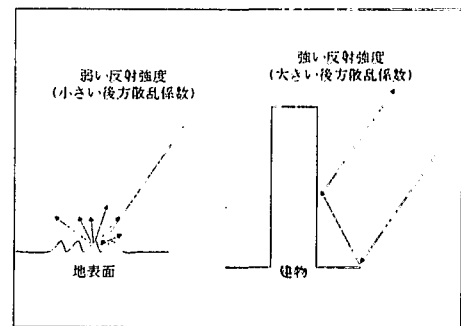


図-3 後方散乱の模式図

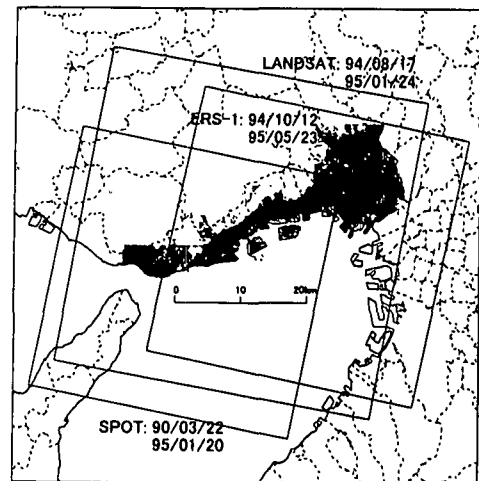


図-4 対象地域

ERS-1 衛星が 1995 年 5 月 23 日に観測したものである。SAR 画像で得られている情報は衛星から照射されたマイクロ波の地表で反射した後方散乱成分(強度と位相情報)である。ここでは後方散乱の大きさに比例する強度画像を利用した。マイクロ波の波長は約 5.6cm、地上での分解能は 30m であるが、データの 1 画素のサイズは 12.5m で記録されている。地震後の画像は地震後 4 ヶ月のものであるため、被害状況との直接的な対応は検討できないものの、都市域での地表の変化把握に関する SAR 画像のポテンシャルについての基礎的な検討はできるものと考えられる。なお、地震前の画像として 1994 年 10 月 12 日に観測したものをを用いた。

準備した衛星画像はそれぞれ図-4 に示す領域である。なお、地震前後の衛星画像の特徴を定量的に比較する必要があるために、2 時期の画像に対する位置合わせの後、光学画像については雲や影、植生地域等を除去した後、輝度値補正を行った。SAR 画像については強度画像の輝度値から基本物理量である後方散乱係数へ変換した¹⁴⁾。

3. 被害地域における画素の抽出

地震被害として液状化と建物被害を取り上げた。液状化は Hamada et al. (1995) の報告¹⁵⁾ の内、「阪神地区地震盤変状概要図(縮尺 5 万分の 1)」中の噴砂・堆砂の確認された地域を数値化して利用した。建物被害は建設省建築研究所により整理された被災度データ¹⁰⁾ を用いた。

被害地域における衛星画像の特徴を検討するために、被害データを衛星画像に重ね合わせ、液状化、建物焼失、建物被害を代表する画素を抽出した。液状化は液状化データを含む画素より、建物焼失は街区内の全建物が火災により焼失した街区に含まれる画素より、建物大被害は全壊あるいは大破建物で占められている街区に含まれる画素より、中被害は全建物が中程度の損傷で占められている街区に含まれる画素より、小被害とは全建物が軽微損傷と判定された街区に含まれる画素より、それぞれ無作為に同じ数の画素を抽出した。また、無被害の画素として、街区内の全建物が外観上被害なしと判定された街区に含まれる画素より抽出した。

なお、ERS-1 画像については地震後の画像が地震後 4 ヶ月であることから、液状化や建物焼失地域については検討対象外とした。そして、抽出した画素における輝度値変化の簡単な検討したところ、LANDSAT 及び SPOT 画像については大被害地域と中被害地域に大差がなく、ERS-1 画像については中被害地域と小被害地域では大差がなかった。そこで、LANDSAT と SPOT 画像については大被害と中被害を統合して大被害とし、ERS-1 画像については中被害と小被害を統合して小被害とした。

結局、選定した被害地域は LANDSAT と SPOT 画像

では液状化、建物焼失、建物大被害、小被害、無被害の 5 地域、ERS-1 画像については建物大被害、小被害、無被害の 3 地域となる。なお、無作為に抽出した画素数は LANDSAT 画像で各 300 画素、SPOT 画像で各 500 画素、ERS-1 画像で各 8000 画素である。

4. 光学センサ画像による被害分布の推定

(1) 被害地域における光学センサ画像の特徴

図-5 には地震後での被害地における LANDSAT 画像の輝度値の平均を示し、図-6 には地震後から地震前の輝度値を差し引いた差分を示す。地震前後での輝度値の差分より、液状化地域は無被害地域と比べるとバンド 6 以外のバンドで輝度値が高い。建物焼失地域は特にバンド 1 の青色光での輝度値が低くなっている。建物被害を受けた地域における輝度値は、液状化地域と類似の傾向を示し、バンド 6 以外で輝度値が高く、また、青色光でやや輝度値が高い。

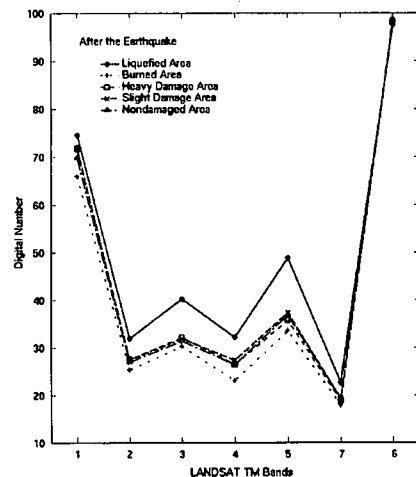


図-5 LANDSAT 画像における地震後での被害地域の輝度値

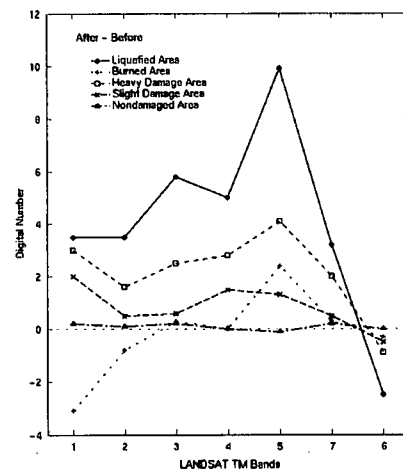


図-6 LANDSAT 画像における地震前後での輝度値の変化

一般的に砂は、アスファルトよりも可視域から中間赤外域での反射率が大きいことから、液状化地域での輝度値の増加は妥当といえる。また、建物の大被害地域において近赤外・中間赤外域での輝度値が大きくなる現象は、古い木造住宅の倒壊に伴い、土壁や屋根瓦の下の土が現れて、反射率を高めたと考えられる。建物被害を受けた地域での青色光の増加は、建物の屋根が青色のビニルシートで覆われたことによるものと考えられる。建物焼失地域は黒褐色を呈することから、可視光での反射輝度は低下する。

SPOT 画像についても同様の検討を行い、被害地域における地震後での輝度値を図-7 に、地震前後の輝度値変化を図-8 に示す。なお、SPOT のバンド 1, 2, 3 の観測波長帯は LANDSAT のバンド 2, 3, 4 にほぼ対応する。地震後における被害地域の輝度値の変化は LANDSAT のそれと同様の傾向を示し、液状化地域では輝度値が高くなる。しかし、建物焼失地域や大被害地域での輝度値の変化は無被害地域とそれほど大差がない。SPOT と LANDSAT とではセンサの形式が異なっていることから、両者の感度が違う可

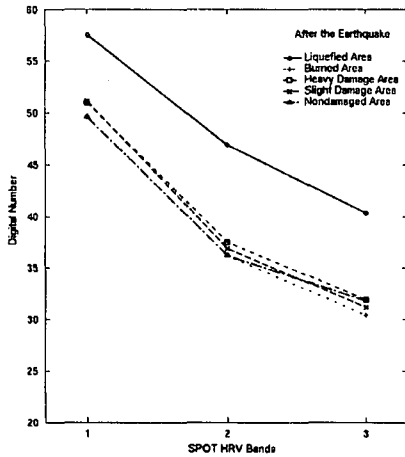


図-7 SPOT 画像における地震後での被害地域の輝度値

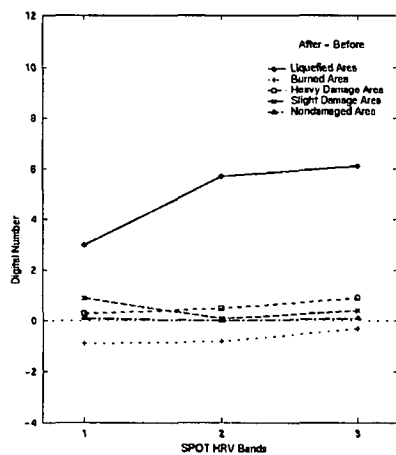


図-8 SPOT 画像における地震前後での輝度値の変化

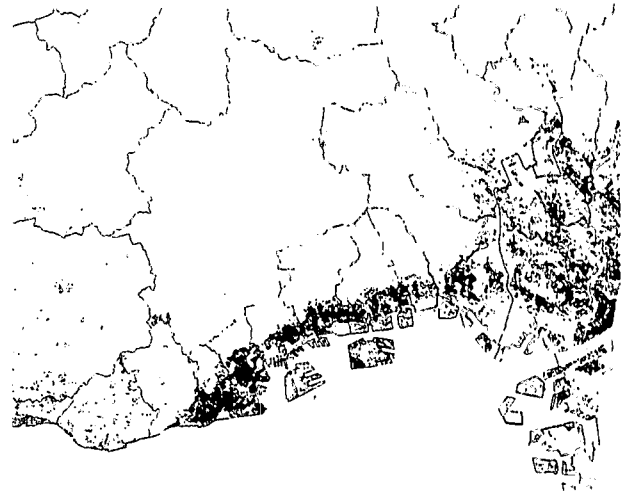


図-9 LANDSAT 画像から推定した被害分布

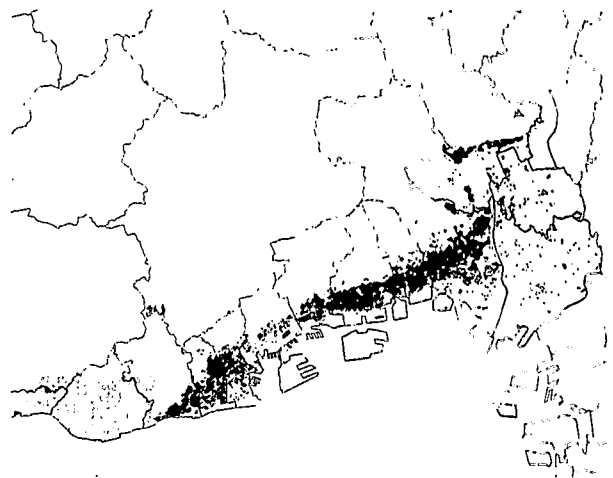


図-10 建物の大被害分布 (黒は大破率 10%以上)

能性もあり、今後、詳細な検討が必要である。

(2) LANDSAT 画像による被害分布の抽出

特に LANDSAT 画像において、地震後の輝度値と地震前後での輝度値に変化がみられたことから、これらの変化を利用して衛星画像から液状化、建物焼失、建物大被害、小被害、無被害に判別することを試みた。判別には線形判別手法を用いた。説明変数として用いるバンド数を増やすとほど判別精度が増加する傾向があるが、バンド数を 6 より多くしても的中精度はそれほど変わらない。

そこで、バンド 2 を除く 6 つのバンドを用いた場合の判別を行ったところ、液状化や建物焼失地域では、地震後の状態が特徴的であることから比較的精度よく抽出できる。建物被害地域は液状化や家屋焼失地域と比べて上空から見た地表の変化が著しくないことや、衛星画像の地上分解能が 30m とそれほど細かくない等の理由から、判別性はそれほど高くない。しかし、画像から抽出した大被害地域の分布(図-9 の黒部分)は実際の被害分布(図-10 の黒部分)と概ね対応する。

5. SAR 画像による被害分布の推定

(1) 被害地域における SAR 画像の特徴

被害地域における後方散乱強度の変化を表す指標として、地震後の後方散乱強度から地震前のそれを引いた強度差及び地震前後での画像相関値を用いた。図-11 には地震後から地震前の後方散乱強度を引いた強度差画像を示す。地震前に比べて強度が小さくなった地域ほど黒く表示している。神戸から西宮にかけての市街地において、帯状に強度が小さくなった地域が確認できる。

図-12 には被害程度ごとの地震前後での強度差と相関値との関係を示す。標準偏差が大きいので、値にバラツキはあるものの、無被害地域と比較すると、大被害地域では地震後の後方散乱強度から地震前のそれを引いた強度差が小さい値となっている。地震前後の画像の相関については、大きな被害を受けた地域ほど低い値となり、地表面に変化が生じていることが示唆される。

図-3 に示すように建物が存在する地域では地面との反射により、大きな後方散乱が得られるが、その反面、平地などの開けた空間は比較的滑らかなため、後方散乱が小さくなる。被害の大きかった地域は、観測時には建物撤去等により空き地になっていたと考えると、これらは妥当な結果といえる。

(2) ERS-1 画像による被害分布の抽出

地震前後での後方散乱強度の差及び画像相関値を説明変数として、SAR 画像から建物大被害、小被害、無被害に判別し、建物大被害に判読された地域を黒色で表示したものを図-13 に示す。神戸から西宮にかけての市街地において、帯状に被害地域が判別でき、実際の被害分布とも概ね対応する。

6. リモートセンシングによる被害分布把握の利用可能性

衛星リモートセンシングでは広域の地表情報が取得できることから、地震前後の画像を利用することで、詳細な被害は判読できないものの、大域的な被害分布が把握できる可能性があることが明らかになった。特に、光学センサ画像では分光反射特性が特徴的な物質が地表に現れた場合、SAR 画像では照射マイクロ波に影響を及ぼすような地表での物的な変化が生じた場合に変化地域を判読しやすい。

しかし、必要な時期で、対象地域において良好な画像が取得できない場合もある。例えば、光学センサは対象地域が雲に覆われている場合には使えない。また、地球観測衛星と呼ばれる地表から 700~900km の高さにある衛星は、ある一定の周期で地球を回っており、同じ地域の上空に戻ってくる周期(回帰日数)は LANDSAT 衛星で 16 日、SPOT 衛星で 26 日である。ただし、SPOT

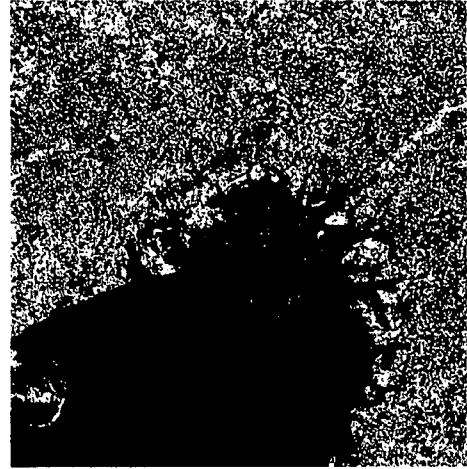


図-11 地震前後での強度差画像

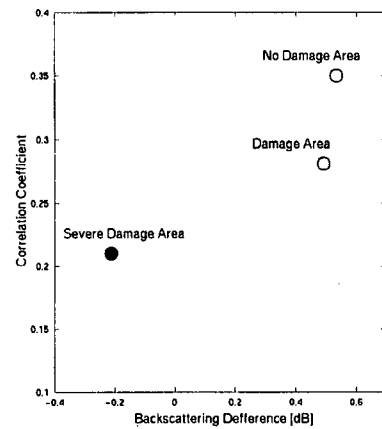


図-12 被害地域における後方散乱強度の差と画像相関値の関係



図-13 ERS-1 画像から推定した被害分布

衛星は2機あること、センサに首振り機能があることから、例えば緯度 45 度の地域では最短1日後、平均 2.5 日ごとに同一地点の観測が可能である。

SAR 搭載衛星については、ERS 衛星が 36 日、日本が打ち上げた JERS 衛星は 44 日と回帰日数が長いが、

雲の影響をほとんど受けないことや、夜間の観測も可能なことから、実際はより短い周期でほぼ確実に画像を取得できる。カナダの民間衛星の RADARSAT 衛星は観測ビームモード(地表分解能可変モード)にもよるが、2～3日で同一地点の観測ができる。しかも、この衛星も首振り機能を有することから、この機能を生かせば、より観測周期は短くなる。ただし、これらのセンサの首振り等の機能を生かした観測は、ユーザーからの観測要求が必要であることから、何時でも最短の周期で画像が撮れるという訳ではないことに注意が必要である。

そこで、特に短期・即時的かつ確実な地表モニタリング技術として航空機 SAR がある。我が国では郵政省通信総合研究所と宇宙開発事業団の共同で開発されている航空機搭載多機能 SAR が代表的なものである。ここでいう多機能とは、Xバンドと C バンドの複数の観測波長帯を有していること(地上での分解能はそれぞれ 1.5m と 3m)、ポーラリメトリやインターフェロメトリ観測が可能なことを意味している。

ポーラリメトリ観測とは偏波観測のことであり、電磁波の特徴のひとつである偏波を制御できることから、地表での散乱波の位相や偏波の変化を垂直・水平方向成分の組み合わせで測定できる。偏波特性を利用することで、地表物体のより高精度な識別等が可能になることが期待されている。インターフェロメトリ観測では2個のアンテナを利用して得られた画像の位相差から、地表面の高さを求めることができる。また、異なる時期によるインターフェロメトリ観測の位相差の差分から、観測時期に生じた地殻のわずかな動きを観測できることも明らかになっている。

図-14には1997年5月に神戸市ポートアイランドを観測した航空機 SAR の X バンド画像を示す。道路や建物のような小さい対象物も判読できる高分解能でかつ機動的なリモートセンシングは地震等の被害分布の詳細かつ早期把握に利用できるものとして期待される。

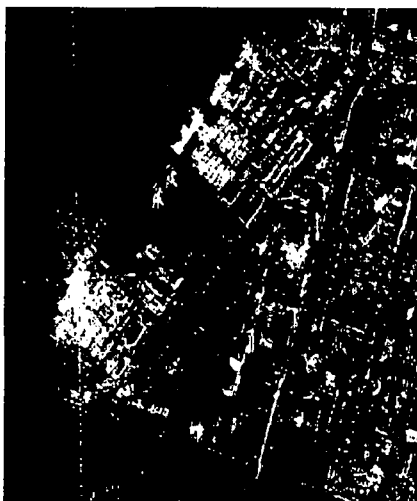


図-14 ポートアイランドにおける航空機 SAR

7. まとめ

兵庫県南部地震を対象に、人工衛星による光学センサ画像及び SAR 画像による被害把握に関する基礎的検討を行い、被害地域における衛星画像の特徴を明らかにした。地震前後の変化から判別手法により被害分布を推定し、推定精度を液状化及び建物被害調査結果との比較から検討したところ、大きな被害を受けた地域の大局的な分布が推定できた。今後、他の地震被害についての衛星リモートセンシングによる被害推定事例と利用可能性についての知見を蓄積すると共に、様々なプラットフォームからリモートセンシング被害把握技術についての研究も行う予定である。

謝辞

衛星画像の解析には東京工業大学の翠川教授及び RESTEC の稲永研究員より御助言いただいた。本研究で利用した衛星画像は宇宙開発事業団より提供を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山崎文雄(1997):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, 1-16.
- 2) 見富 恭, 竹内章司(1995):航空機 MSS データによる液状化および焼失地域のスペクトル特性の解析, 日本リモートセンシング学会 第18回学術講演会論文集, 117-118.
- 3) Inanaga, A. et al.(1995): Remote Sensing Data for Investigation of Earthquake Disaster, Proc. Of the 21st Annual Conference of the Remote Sensing Society, 1089-1096.
- 4) 吉江 隆, 津 宏治(1995):衛星データによる1995年兵庫県南部地震被災状況推定画像の作成-特に神戸市中央区の木造住宅の被災域と液状化現象発生地域について, 日本リモートセンシング学会 第18回学術講演会論文集, 119-122.
- 5) 米澤千夏, 竹内章司(1998):ERS-1/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, 57-61.
- 6) 松岡昌志, 稲永麻子, 藤本一雄, 翠川三郎(1998):LANDSAT TM データによる1995年兵庫県南部地震被害分布の抽出, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集.
- 7) 松岡昌志, 山崎文雄(1998):人工衛星光学画像を用いた1995年兵庫県南部地震での被害地域の抽出, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム.
- 8) 松岡昌志, 青木 久, 山崎文雄(1998):阪神大震災の被害地域における人工衛星合成開口レーダ画像の特徴, 地理情報システム学会講演論文集, Vol.7, 5-8.
- 9) 青木 久, 松岡昌志, 山崎文雄(1998):兵庫県南部地震の被災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.
- 10)建設省建築研究所(1996):平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書.
- 11)地球環境観測委員会ほか(1995):阪神・淡路大震災関連調査 兵庫県南部地震災害調査報告.
- 12)長谷川均(1998):リモートセンシングデータ解析の基礎 The ABCs of RS, 古今書院.
- 13)写真測量学会(1998):合成開口レーダ画像, 朝倉書店
- 14)宇宙開発協議場(1996):JERS SAR / ERS AMI IMAGE データフォーマット説明書.
- 15) Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K.,(1995) The 1995 Hyogoken-nanbu (Kobe) earthquake, liquefaction, ground displacement, and soil condition in Hanshin area, 地震予知総合研究振興会