

航空機 MSS の多バンド画像を用いた 1995 年兵庫県南部地震の建物被害地域の抽出
DETECTION OF THE AREAS WITH BUILDING DAMAGE DUE TO
THE 1995 KOBE EARTHQUAKE USING AIRBORNE MSS IMAGES

三富 創¹, 松岡昌志², 山崎文雄³, 谷口仁士⁴, 小川雄二郎⁵

¹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

Hajime Mitomi, Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED, mitomi@edm.bosai.go.jp

²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, 博士(工学)

Matsuoka Masashi, Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED, Dr. Eng., matsuoka@edm.bosai.go.jp

³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, 工博

Fumio Yamazaki, Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED, Dr. Eng., yamazaki@edm.bosai.go.jp

⁴名古屋工業大学 システムマネジメント工学科, 工博

Hitoshi Taniguchi, Professor, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng., taniguchi@manage.nitech.ac.jp

⁵富士常葉大学 環境防災学部, 工博

Yujiro Ogawa, College of Environment and Disaster Research, Fuji Tokoha University, Dr. Eng.

SUMMARY

In multi-stage remote sensing performed by NASDA just after the 1995 Kobe earthquake, the stricken areas were observed by airborne MSS, which has twelve bands between visible and thermal infrared. In this study, after some training areas were selected in Nada Ward using GIS data based on field damage survey, spectral characteristics of damaged and non-damaged buildings were investigated. Then, the distribution corresponding to the damage level of buildings in the hard-hit area of Kobe City was estimated by the maximum likelihood classifier. The estimated result of areas with burned and severely damaged buildings was relatively in good agreement with the field survey data. An application of this method, based solely on the post-event image, to early damage assessment systems can be expected.

キーワード: 航空機 MSS 画像, スペクトル特性, 建物被害地域, 1995 年兵庫県南部地震

Key words: Airborne MSS image, Spectral characteristics, Building damage areas, The 1995 Kobe earthquake

1 はじめに

ヘリコプターや航空機をプラットフォームとしたリモートセンシングは機動性に富み、被災地の情報を面的に高い空間分解能で取得できる。そのため、大規模地震災害などのように災害規模が甚大・広域にわたる場合には、迅速かつ正確な救援・復旧活動のための被害情報収集などの高度利用が期待できる。長谷川ら¹⁾、小川・山崎²⁾は、1995年兵庫県南部地震の後に撮影された空撮画像の目視判読により、建物1棟レベルでの被害判読精度を検証した。また福西ら³⁾は災害発生前と発生後の航空写真をデジタル化し、脳型情報処理を応用した画像位置合わせ技術を用いて災害後の変化域抽出を試みた。しかしながら広域にわたる画像の目視判読には時間を要すること、災害前後画像の比較には対象地域の災害前の画像が必要であることなど

から、空撮画像取得の即時性を有効に生かしているとはいえない。そこで、最近では空撮画像を用いた画像処理による建物被害地域の抽出が試みられ、実際の建物被害地域が概ね抽出できることが明らかにされた⁴⁾⁻⁶⁾。これらの取り組みは、能島ら^{7), 8)}が提案しているリアルタイム地震防災システムの統合処理に応用することによって実用化が期待できると思われる。すなわち、発災直後からの経過時間と必要精度とのバランスを考慮して、地震動モニタリングと地理情報システム(GIS)を組み合わせた被害推定結果を一次情報、リモートセンシングによる被害推定結果を二次情報、目視判読や実被害調査等による直接的な被害情報を三次情報と位置づけ、被害情報を更新しながら迅速かつ正確な救援・復旧活動に資する情報提供を行うことが期待できる。例えば総務省消防庁^{9), 10)}では、消防防災ヘリコプター等から取得される映像の自動解析処理とGISとの併

Table 1: Specification of the airborne MSS image

Band		Wavelength (μ m)
Visible (blue)	b02	0.41 - 0.46
	b04	0.49 - 0.53
Visible (green)	b05	0.53 - 0.57
	b06	0.57 - 0.60
	b07	0.60 - 0.65
Visible (red)	b08	0.65 - 0.70
	b09	0.69 - 0.72
Infrared (near)	b11	0.76 - 0.80
	b12	0.82 - 0.90
Infrared (middle)	b15	1.52 - 1.72
	b16	2.06 - 2.45
Infrared (thermal)	b17	8.00 - 12.00
Acquisition date		Jan. 24, 1995
IFOV		2.5 mrad
Altitude		2,500 m
Observation width		4,000 m

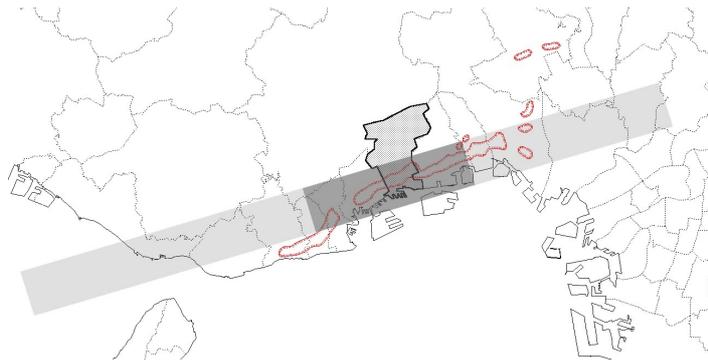


Fig. 1. Observed (light) and studied (dark) areas in this study. Hatched area and red polygon indicate Nada Ward and seismic intensity VII in the JMA scale, respectively.

用により被害状況の定量的把握を目指す緊急支援情報システムの開発・研究を行っている。

ところで、以上の取り組みは R,G,B 表色系で表される空撮画像についての検討である。1995 年兵庫県南部地震の後、地震災害把握のためのリモートセンシングデータの利用方法を検討するため、宇宙開発事業団 (NASDA) を中心に多段階リモートセンシングが行われた^{11), 12)}。その中で、可視光から赤外領域までのバンドを有したマルチスペクトルスキャナ (MSS) を航空機に搭載して神戸・阪神地域の被災地が観測された¹³⁾。しかし、このプロジェクトは速報だったこともあり、被害状況が大規模だった長田区の延焼地域とポートアイランドの液状化地域のスペクトル特性が把握されるにとどまった^{11), 13)}。兵庫県南部地震による被害地域のスペクトル特性は、その後、Landsat/TM などの人工衛星光学センサを用いたいくつかの研究が行われている。細川・座間¹⁴⁾は、このような画像にいくつかの分類手法を適用し、脳型情報処理を組み合わせた分類手法が火災の焼失地域の抽出に有効なことを示した。松岡ら¹⁵⁾は、地震後の画像、および地震後から地震前を差し引いた場合の 2 通りについて地震による被害地域のスペクトル特性を調べ、被害地域の分類を試みた。本研究では、地震後に取得された航空機 MSS 画像のみを用いて、建物被害地域のスペクトル特性を明らかにするとともに、建物被害甚大地域の抽出を試みた。また、地上調査にもとづく家屋被害データ¹⁶⁾と比較することで、発災直後における航空機 MSS 画像の利用可能性を検討した。

2 航空機 MSS 画像

NASDA のプロジェクトで取得された航空機 MSS 画像の仕様を Table 1 に示す。観測は地震発生から 1 週間後の 1995 年 1 月 24 日と 2 月 15 日の 2 回行われた。本研究では地震発生から時間経過が短い 1 月 24 日の観測画像のう

ち、神戸市東灘区、灘区、中央区、兵庫区を撮影したものをを用いた。研究対象地域の位置を Fig.1 に示す。MSS の観測波長帯は人工衛星 Landsat とほぼ同じ可視光から熱赤外領域であるが、観測バンド数は可視光 7、近赤外 2、中間赤外 2、熱赤外 1 の計 12 個であった。センサの空間分解能は 2.5mrad であった。これは、対地高度が 1,000m のとき、地表におけるセンサの瞬時視野 (IFOV) が 2.5m になることを示す。1 月 24 日の観測は高度約 2,500m で行われたため IFOV は約 6m であるが、観測画像は航空機の姿勢や地形などの影響が幾何学的に補正されるため、実際に利用できる画像の地上解像度は約 8m/pixel であった。画像は 8 ビットで取得され、磁気テープに記録された。本報では画像のデジタル値を CCT 値と呼ぶことにする。

航空機 MSS では、撮影幅のおよそ中央から進行方向に対してほぼ直角の方向にセンサの角度を連続的に変化させつつ画像を取得する。そのため、取得画像のカラム方向においてセンサから地上までの距離が一定でない。つまり、太陽光の大気に与える影響が、取得画像のカラム方向で不均質になる。この影響を補正するため、同一対象物の画素値がカラム方向で均質になるように、簡易的な多項式補正を行った。具体的には、取得画像の最西部に位置する明石海峡から 1024 ライン x 512 カラムを切り出し、カラムごとに 1024 ラインの画素値の平均を求め、バンドごとに 3 次式の下に凸な部分で近似した。その後、各バンドにおける海の観測値が、この近似式の最小値になるような補正を行った。熱赤外画像 (b17) では、カラム方向における観測画素値の不均質が確認されなかったことから、このような大気の影響の補正は行わなかった。

3 トレーニングデータの抽出

地震発生後の航空機 MSS 画像における建物被害地域のスペクトル特性を明らかにするため、建物被害地域を含むトレーニングデータを 400 画素ずつ抽出した。その際、兵庫県南部地震による建物被害の地上調査結果をもとに建築研究所が GIS データ化した家屋被害データ¹⁶⁾を参考にした。このデータは建物の被災度を全壊または大破、中程

Table 2: Digital number of MSS bands for training data

Category	CCT	b02	b04	b05	b06	b07	b08	b09	b11	b12	b15	b16	b17
Burned	Average	74	63	60	84	77	79	112	75	87	106	96	141
	Standard deviation	6	5	6	8	9	7	11	6	8	8	8	22
Severely damaged	Average	85	73	68	91	83	83	118	79	96	110	100	142
	Standard deviation	13	10	10	12	14	9	15	8	11	8	10	22
Slightly damaged	Average	95	84	78	101	94	90	129	83	101	110	97	150
	Standard deviation	16	11	12	14	15	9	15	8	11	8	9	32
Liquefaction	Average	87	80	83	114	113	106	155	90	111	124	105	95
	Standard deviation	10	10	12	14	16	12	19	9	11	12	14	15
Bare ground	Average	84	80	83	115	115	111	165	98	122	137	114	120
	Standard deviation	9	11	12	17	21	16	25	10	13	13	12	28
Railway	Average	70	57	54	75	67	70	95	67	74	89	78	129
	Standard deviation	6	4	5	6	7	5	9	5	7	8	7	19
Vegetation	Average	66	51	52	72	59	61	84	89	112	101	78	116
	Standard deviation	7	7	7	9	10	8	13	12	17	9	9	20

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数値化されている。ここでは, 街区単位で整理された低層建物の被災度データを家屋被害データとして用いた。トレーニングデータは, 大気や雲の影響が比較的小さく, 多くの家屋被害が発生した灘区から抽出した。地上解像度が約8mのため, 家屋1棟レベルで精密にトレーニングデータを抽出するのは困難である。したがって, 焼失家屋を1棟以上含む街区を焼失地域, 全壊または大破の家屋を30%以上含む街区を建物大被害地域, それ以外の被災度を含む街区を建物小被害地域とした。画像に含まれる灘区の範囲において, 無被害の低層建物を主に含む街区はきわめて少なかったことから, 無被害をカテゴリーとしたトレーニングデータの抽出は行わなかった。建物以外にも, 画像に含まれる灘区の範囲において特徴的な液化化地域, グラウンド, 鉄道の軌道からもトレーニングデータを抽出した。液化化地域の抽出にあたっては, Hamada *et al.*(1995)¹⁷⁾の報告のうち, 「阪神地区地盤変状概要図(縮尺5万分の1)」中の噴砂・堆砂の確認された地域を参考にした。また, 液化化地域とグラウンドからは400画素の抽出が困難であったため, 抽出画素数は200とした。植生は山地だけでなく, 市街地においても公園緑地, 街路樹, 庭の草木として分布する。本研究ではこれを建物被害地域と区別するため, 植生のカテゴリーを設けた。

4 スペクトル特性

各バンドに対して各トレーニングデータが示す平均値と標準偏差をTable 2に示す。Fig.2は各トレーニングデータの平均値から焼失地域の平均値を差し引いたもので, 焼失地域に対する各トレーニングデータの相対的なスペクトル特性を表している。建物地域については, 被害レベルが大きくなるほど可視光(b02-b09)でやや小さな平均値となる。この傾向は, とくに短波長可視光(b02)で大きい。これは見富・竹内¹³⁾の結果と調和的である。建物小被害地域で短波長可視光の反射が比較的強いのは, 被害建

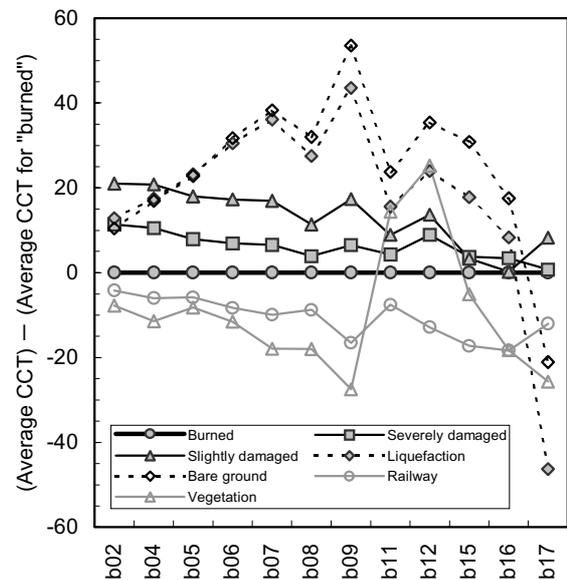


Fig. 2. Relative spectral characteristics for training data

物を覆うブルーシートの影響の可能性がある。液化化地域とグラウンドのスペクトルパターンは比較的類似する。これらは, 可視光から中間赤外領域(b06-b16)において建物地域よりも強い反射特性をもつ。しかし, 長波長可視光から赤外領域にかけて(b08-b17)は, 液化化地域の方がグラウンドよりも10から20ほど小さい平均値をもつ。熱赤外画像(b17)では両者とも焼失地域と比べて20から40程度小さな平均値をもつ。鉄道の軌道は, 全体的に小さい平均値を呈す。これは, 線路沿いの建物の影や敷石などの分光特性が他と比べて小さいためと考えられる。植生の平均値は可視光(b02-b09)で小さく, 近赤外(b11-b12)で大きい。

松岡ら¹⁵⁾は, 人工衛星Landsat/TMにおいて熱赤外バンドを除いた地上解像度30mの6個の観測バンドを用い, 兵庫県南部地震による被災地域のスペクトル特性を明らかにした。この研究では, 地震後の画像における各カテゴリーのスペクトル特性から, 以下のことが明らかにされた。

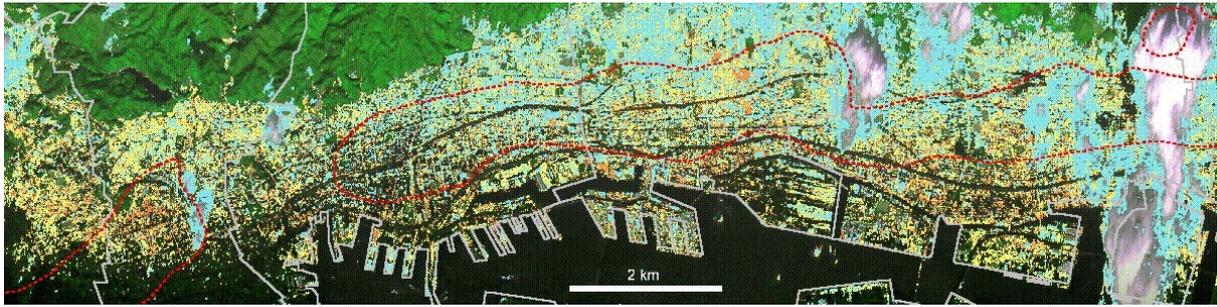


Fig. 3. Estimated distribution of the areas with burned (orange), severely damaged buildings (yellow), and slightly damaged buildings (blue) using maximum likelihood classification. Red polygon indicates the area of seismic intensity VII in the JMA scale.

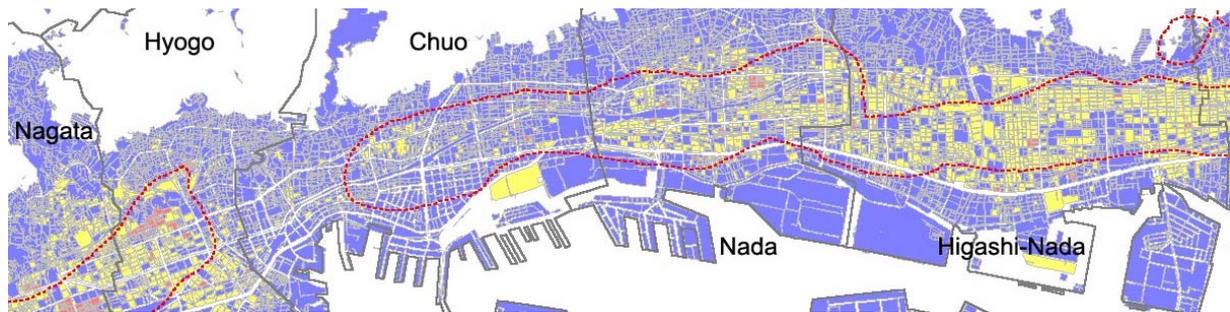


Fig. 4. Result of the field survey on building damage¹⁶⁾. Red and yellow represent the areas with “burned” and “severely damaged buildings”, respectively. Red polygon indicates the area of seismic intensity VII in the JMA scale.

使用した6個のバンドにおいて、液状化地域の平均値は建物被害などの他のカテゴリと比べて大きい。この傾向は長波長可視光から中間赤外領域にかけて特徴的である。

焼失地域は建物大被害および建物小被害と比べてCCT値の平均値が1から5程度小さい。

建物大被害および建物小被害のスペクトルパターンはきわめて類似している。

と は本研究の結果と調和的である。液状化地域と焼失地域のスペクトルパターンの傾向については既往の研究¹³⁾⁻¹⁵⁾と同様の結果を得た。一方、と については、航空機MSS画像において焼失、建物大被害、建物小被害の順で平均値が小さく、それぞれの間に10程度の差が生じた。これは、人工衛星画像よりも航空機MSSの方がS/N比が高いことや、画像の地上解像度が8mとなり、スペクトル特性から建物大被害と建物小被害の分離がやや向上したことを意味すると考えられる。

5 建物被害地域の推定

灘区から抽出した7種類のトレーニングデータを用いて、最尤法¹⁸⁾による建物被害甚大地域の抽出を試みた。この方法では、各分類クラスにおいて選定したトレーニングデータの画素値の分布を正規分布と仮定して尤度を求め、尤度が最大となるクラスにその画素を分類する方法である。使用する画像は可視光から熱赤外までの全12バン

ド画像、分類クラスは焼失地域(c1)、建物大被害地域(c2)、建物小被害地域(c3)、液状化・グラウンド(c4)、鉄道の軌道(c5)、植生(c6)とした。液状化地域とグラウンドは、Fig.2に示したスペクトルパターンが類似していることから、一つの分類クラスとして扱うこととした。なお、画像中の雲は、熱赤外画像(b17)から表面温度を求める換算式¹¹⁾を用いて ρ 以下を表すCCT値40以下とした。海域は、長波長可視光画像(b09)におけるCCT値60以下とした。各クラスの最尤分類の結果から雲と海域を除去して、最終的な分類結果とした。建物地域(c1-c3)として分類された結果をFig.3に示す。比較のために、地上調査の結果、街区内に1棟以上の焼失建物がある地域、全壊または大破の低層建物が30%以上となる街区の分布をFig.4に示す。この図から、神戸市域の海側で建物被害が著しかったこと、および灘区や東灘区における建物被害地域の分布がわかる。しかしながら、実際には低層建物の被害が少なかった中央区や兵庫区の一部が建物大被害地域(c2)に分類された。ここでは、Table 3に示すように、トレーニングデータを構成する画素がどのクラスに分類されたかで分類精度を評価した。あるトレーニングデータにおいて、正しく分類された画素の割合を分類的中率と呼ぶことにする。非建物地域(c4-c6)の分類的中率は全て90%以上なのに対し、建物地域(c1-c3)の分類的中率は焼失83.5%、建物大被害60.0%、建物小被害77.3%と、やや小さかった。誤抽出は主に建物地域どうし(c1-c3)でみられた。これは、例えば建物大被害のトレーニングデータは、正確に「全壊または大破」を表しているわけではなく、

Table 3: Classification accuracy (%)

Class	c1	c2	c3	c4	c5	c6
c1: Burned	83.5	19.0	2.0	2.7	5.2	0.2
c2: Severely damaged	7.3	60.0	19.0	1.5	1.8	0.8
c3: Slightly damaged	2.5	18.3	77.2	3.3	1.5	1.7
c4: Liquefaction / Ground	0.2	0.2	0.0	91.0	0.0	0.0
c5: Railway	5.5	2.3	0.3	0.0	91.0	0.0
c6: Vegetation	1.0	0.2	0.8	1.3	0.5	97.3
※ Cloud	-	-	0.7	0.2	-	-
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

「全壊または大破が 30%以上の街区」から抽出している。したがって、このような誤抽出は、その街区の中に、何棟かの「中程度の損傷」や「軽微な損傷」が含まれている可能性があることを反映したものと考えられる。

画素抽出レベルでは建物被害甚大地域の雰囲気がつまみづらい。そこで、Fig.2 より建物大被害のスペクトルパターンが焼失と類似していることから、焼失(c1)の分類結果をもとにテクスチャ解析を試みた。具体的には約 160m x 160m に相当する 21x21 画素ウィンドウ内において、焼失(c1)と分類された画素がどの程度含まれているかを計算した。この割合を R_{px} とした。各トレーニングデータにおける R_{px} の累積相対頻度分布を Fig.5 に示す。焼失(c1)は R_{px} 30%以上に多くの画素をもつ。建物大被害(c2)と鉄道の軌道(c5)は R_{px} が 20%から 30%で累積 100%に達する。それ以外の分類クラスは R_{px} 10%程度で累積 100%に達する。ここでは建物大被害(c2)の累積が 5%を越える R_{px} 10%以上を建物被害甚大地域とした。その中でも焼失(c1)の累積が 5%を越える R_{px} 30%以上を焼失地域とした。この方法で抽出された被害地域と、最尤法により建物地域(c1-c3)に分類された地域から雲域と海域を除いたものとを重ね合わせ、両者を同時に満たす画素を最終的な結果とした。結果を Fig.6 に示す。Fig.4 の地上調査データと比べると、中央区や兵庫区の一部に誤って抽出された地域があるものの、全体としては建物被害が大きかった地域が概ね抽出されているようにみえる。とくにトレーニングデータを抽出した灘区の焼失地域と建物大被害地域をはじめ、東灘区の建物大被害地域、兵庫区上沢付近の焼失

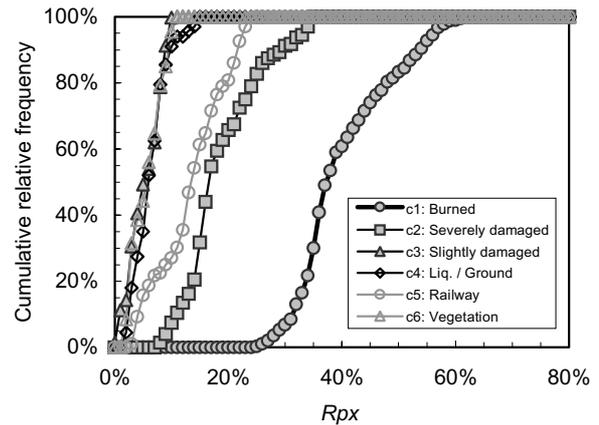


Fig. 5. Cumulative relative frequency of R_{px} for each set of class for maximum likelihood classification

地域が抽出された。このように、灘区からトレーニングデータを抽出することによって、東灘区から兵庫区までの建物被害甚大地域が抽出できた。これは、発災時に、灘区からの被害状況が伝えられたとき、その結果をもとに地震後の航空機 MSS 画像から、灘区の近隣地域における建物被害甚大地域を推定できる可能性を示唆している。

6 結論

1995 年兵庫県南部地震の 1 週間後に取得された航空機 MSS 画像を用いて、地震による建物被害地域などのスペクトル特性を明らかにするとともに、最尤法とテクスチャ解析を組み合わせ、東灘区から兵庫区までの建物被害甚大地域の抽出を試みた。この MSS は可視光から熱赤外領域までの 12 個のバンドを有し、取得画像の地上解像度は約 8m であった。トレーニングデータは地上調査データをもとに灘区から抽出した。各バンドにおけるトレーニングデータの平均値から相対的なスペクトル特性を調べたところ、建物地域では焼失地域の平均値が最も小さく、建物小被害地域の CCT 値の平均値が最も大きかった。この傾向は可視光領域でみられ、その差は短波長可視光で 20 程度、長波長可視光で 10 程度であった。液状化とグラウンドの

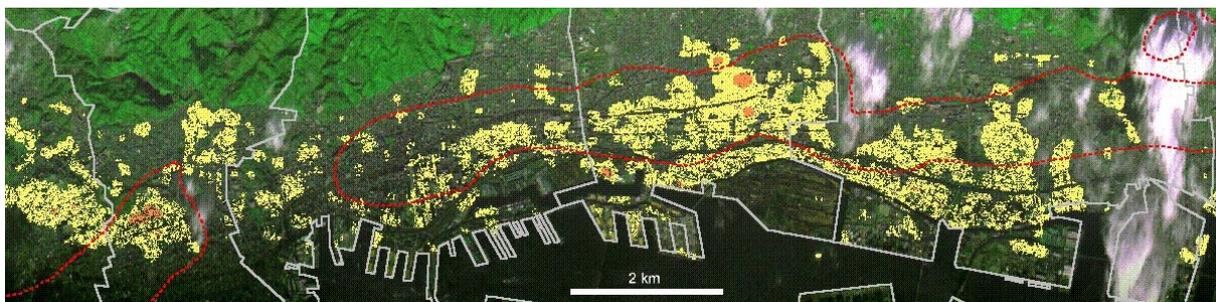


Fig. 6. Estimated result of the areas with heavy building damage. Orange and yellow represent the area with $R_{px} \geq 30\%$ and $R_{px} \geq 10\%$, respectively in texture analysis. Red polygon indicates the area of seismic intensity VII in the JMA scale.

スペクトル特性は類似しており、とくに長波長可視光から中間赤外領域では他と比べてやや大きな平均値であった。最尤法の適用にあたっては焼失、建物大被害、建物小被害、液化化・グラウンド、鉄道の軌道、植生の6個の分類クラスを設定した。焼失の分類結果をもとにテクスチャ解析を行ったところ、建物被害甚大地域と焼失地域を概ね抽出することができた。本研究は地震後の画像のみしか用いていないこと、航空機による画像取得は人工衛星プラットフォームよりも即時性に優れていることから、発災時における緊急対応に資する被害情報の提供が可能であることを示唆している。

謝辞

中日本航空株式会社の宮坂聡氏には、航空機 MSS 画像の画像取得から大気補正、地形や航空機の姿勢に起因する画像の歪みの補正方法などについてご教示いただいた。記して感謝の意を表す。家屋被害に関する地上調査データは、建設省建築研究所が建設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 データにもとづいて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) 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.
- 2) 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, Vol.2, pp.119-128, 2000.
- 3) 福西宗憲, 小杉幸夫, Tchimev, P., 葛城大介, 土居原健: 地理画像変化域抽出における特徴量の選択, 第 11 回機能図形情報システムシンポジウム講演論文集, pp.19-23, 2000.
- 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) 三富創, 松岡昌志, 山崎文雄: 空撮画像におけるエッジ成分のテクスチャによる地震建物被害抽出の試み, (社)日本リモートセンシング学会第 31 回学術講演会論文集, pp.85-86, 2001.
- 6) 佐野晃一, 近津博文: 画像ベクトルを用いた航空写真からの倒壊家屋の自動検出に関する研究, 日本写真測量学会平成 13 年度秋季学術講演会発表論文集, pp.97-100, 2001.
- 7) 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.
- 8) 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, 第一回日本地震工学研究発表・討論会梗概集, pp.259, 2001.
- 9) 自治省消防庁防災情報室: 緊急支援情報システムの構築について, 近代消防, Vol.474, pp.52-57, 2000.
- 10) 総務省消防庁防災課防災情報室, 通信・放送機構: 災害情報収集電気通信システムに関する研究開発報告書, 2001.
- 11) 地球環境観測委員会, 宇宙開発事業団, (財)リモートセンシング技術センター: 兵庫県南部地震災害調査報告, 1995.
- 12) 須藤昇, 多田孝, 中野良志, 長幸平, 下田陽久, 坂田俊文: 多段階リモートセンシングによる阪神大震災調査, (社)日本リモートセンシング学会第 18 回学術講演会論文集, pp.115-116, 1995.
- 13) 見富恭, 竹内章司: 航空機 MSS データによる液化化および焼失地域のスペクトル特性の解析, (社)日本リモートセンシング学会第 18 回学術講演会論文集, pp.117-118, 1995.
- 14) 細川直史, 座間信作: 地震被害地域抽出のための衛星データ分類手法の比較, 消防研究所報告 第 85 号, 1998.
- 15) 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.668/I-54, pp.177-185, 2001.
- 16) 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.
- 17) Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K.: 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, 1995.
- 18) 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.