

熊本地震における航空写真を用いた 画像解析手法による建物被害抽出

内藤 昌平¹・門馬 直一²・山田 哲也³・下村 博之⁴・望月 貫一郎⁵・
本田 禎人⁶・中村 洋光⁷・藤原 広行⁸・庄司 学⁹

¹学生会員 防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門 研究員
(〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

E-mail: naito@bosai.go.jp

²非会員 株式会社パスコ (〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-10)

E-mail: naamon8759@pasco.co.jp

³非会員 株式会社パスコ (同上)

E-mail: taedta8234@pasco.co.jp

⁴正会員 株式会社パスコ (同上)

E-mail: hairru1717@pasco.co.jp

⁵非会員 株式会社パスコ (同上)

E-mail: kiaknu9993@pasco.co.jp

⁶非会員 株式会社パスコ (同上)

E-mail: yaodsh6468@pasco.co.jp

⁷非会員 防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門 主任研究員
(〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

E-mail: manta@bosai.go.jp

⁸正会員 防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門 部門長 (同上)

E-mail: fujiwara@bosai.go.jp

⁹正会員 筑波大学准教授 大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

熊本地震の前震直後、および本震直後に取得された航空写真を用いて DSM 差分解析、テクスチャ解析、ブルーシート抽出の各画像解析手法を用いた被害抽出を、益城町及びその周辺地域における 15,000 棟以上を対象として行った。また、それぞれの解析結果について航空写真の目視判読により 4 段階に分類した被害区分との比較を行い、分類精度の検証を行った。結果、DSM 差分解析およびテクスチャ解析は倒壊建物の検出に優れており、それらを組み合わせることにより判別精度が向上することが分かった。また、ブルーシート抽出は中間レベルの被害の一部を抽出し、復旧状況等の把握に活用可能な指標として有効であることが分かった。

Key Words : remote sensing, aerial photograph, DSM, texture analysis, GLCM, region segmentation

1. はじめに

災害発生直後に被害状況を迅速に把握することは災害対応の上で極めて重要である。このような被害状況の早期把握を目的として開発されたシステムには内閣府の地震防災情報システム(DIS)¹⁾等がある。また町丁目単位で

のより細かい情報配信を目的とし、地震計の観測記録および 250m メッシュ毎の地盤増幅率、人口データおよび建物データを用いて被害を推定するリアルタイム被害推定システム²⁾が開発されている。これらのシステムは発災直後に被害の分布や被災程度の概要を把握する上で有益な情報である。一方、上記のシステムで使用されてい

るような被害関数に基づく推定モデルや、メッシュ単位のデータ精度に起因する不確実性のため、推定結果が実際の被害と一致しない場合が生じる。従って、正確な意思決定のためには巡視等によって確認された実被害情報を用いた更新が必要となる³⁾。しかし被害が甚大であるほど巡視による全容解明には長期間を要する。

一方で、多数の人的被害が予想される大規模災害が発生すると、発災当日から1週間程度の間産官学の様々な機関により衛星、飛行機、ヘリコプター等を活用したリモートセンシング手法による調査が実施される。そこで、これらの調査結果を用いることにより広域にわたる実被害状況を即時に把握することが可能となる。

ところが、被害規模が大きいほどリモートセンシング画像から目視により被害を抽出する作業には労力や時間を要する。そこで近年様々な分野において有効性が確認されている、画像解析の技術を用いて目視による被害判読を自動化することにより、これまで以上に即時的な被害状況把握が可能になるものと考えられる。

本研究では、2016年熊本地震発災直後に取得された多数の航空写真を用いて目視により建物被害を判読した結果⁴⁾を基準として、同一地域において実施した画像解析手法による被害抽出結果と比較し、各手法による被害抽出精度に関する検証を行った。

また、本研究において開発した手法を用いることにより、地震動によって生じた広域にわたる被害状況を、即時かつ詳細に把握することが可能になるものと考えられる。なお、既往の研究⁵⁾においてはリモートセンシング画像を用いた調査結果を地震動に基づく被害推定情報と統合することにより、被害推定結果を更新する手法が示されている。本研究では画像解析により抽出した建物被害状況を用いて目視判読を補完することにより、別途開発中のリアルタイム被害推定システム²⁾による推定結果をより高精度なものに更新し、応急期から復旧期の災害対応に有効活用することを目標とする(図-1)。

2. 航空写真目視判読による建物被害区分

2016年4月14日に発生した熊本地震前震(M6.5)直後の4月15日、および4月16日に発生した本震(M7.3)直後の4月19日に、それぞれ固定翼航空機に搭載されたデジタルマルチラインセンサーシステム(ADS)を用いて、株式会社パスコにより取得されたいずれも解像度20cm/pixelのオルソ化された航空写真を使用し、目視により建物被害を4段階に区分した(表-1)。

次に、これらの被害区分を国土地理院が公開する基盤地図情報(建築物)ポリゴンデータを用いてGIS上で入力した。作成した目視判読データの範囲は、前震直後(本震直前)については益城町全域、本震直後については熊本市東区、熊本市中央区、嘉島町、益城町、西原村、南阿蘇村の各地域である(図-2)。以上の手順により、前震直後について計15,352個(表-2)、本震直後について計110,943個(表-3)の目視判読ポリゴンデータ⁴⁾を作成した。

判読結果の例として、前震直後、本震直後の各航空写真目視判読結果に基づく益城町宮園地区付近における建物被害判別結果(図-3)を示す。また、被害集中域の把握を目的に、基準地域メッシュ⁷⁾を10分の1に分割した100mメッシュを用いて、LEVEL4の被害建物が全建物に占める割合をメッシュ毎に計算した図を示す(図-4)。

以下では、航空写真目視判読データを正解とみなし、判読に使用したのと同じ航空写真画像を用いて3種類の画像解析手法を用いた被害抽出を行い、それぞれの場合における被害抽出精度について検証を行う。

表-1 航空写真目視判読による被害区分

被害区分	写真上の特徴
LEVEL1	被害なし
LEVEL2	屋根瓦の一部が崩落
LEVEL3	屋根瓦の大部分が崩落 または壁が剥離
LEVEL4	層破壊, 倒壊

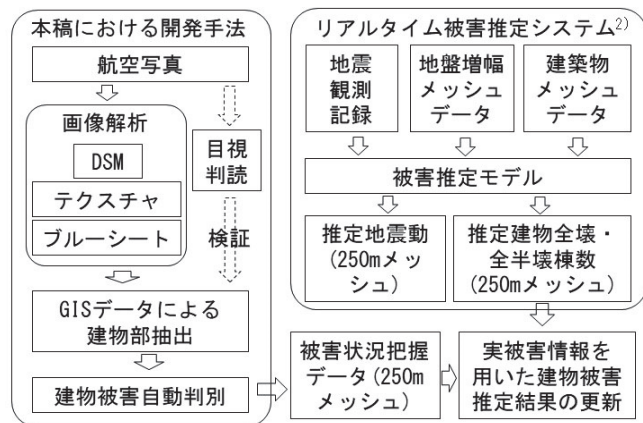


図-1 本研究において目標とするシステムの全体像

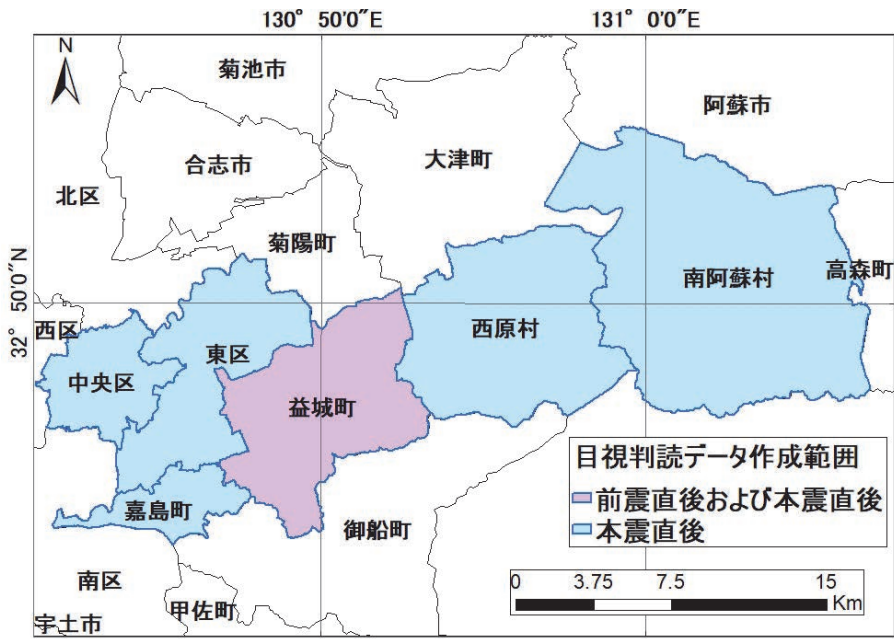


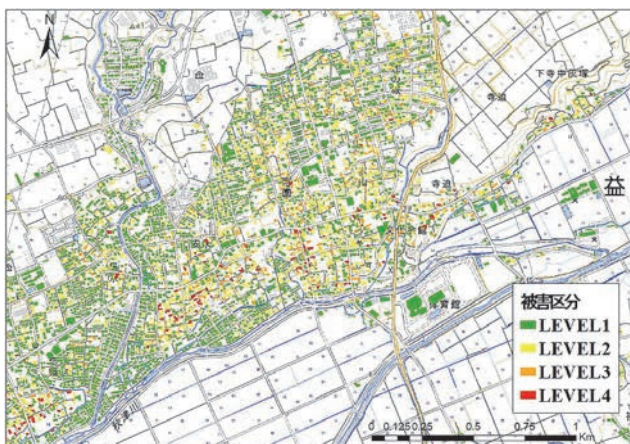
図2 航空写真目視判読データの作成範囲

表2 航空写真目視判読による被害区分別棟数 (前震直後)

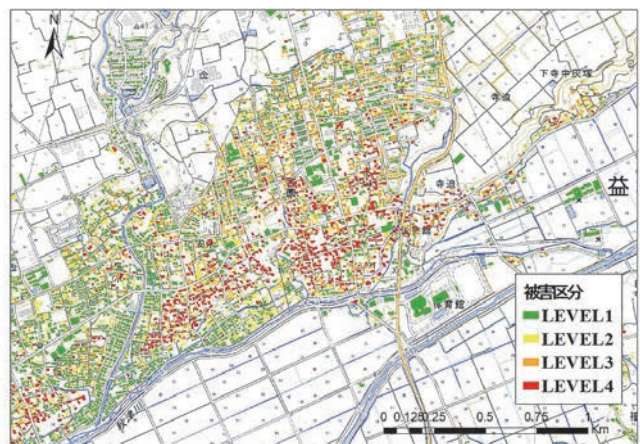
市町村名	LEVEL1	LEVEL2	LEVEL3	LEVEL4	合計
益城町	11,733	2,861	533	225	15,352

表3 航空写真目視判読による被害区分別棟数 (本震直後)

市町村名	LEVEL1	LEVEL2	LEVEL3	LEVEL4	合計
熊本市東区	35,423	9,333	2,947	141	47,844
熊本市中央区	34,784	4,442	647	30	39,903
嘉島町	3,400	968	397	171	4,936
益城町	9,650	2,607	1,639	1,456	15,352
西原村	757	240	109	28	1,134
南阿蘇村	1,336	328	72	38	1,774
合計	85,350	17,918	5,811	1,864	110,943



前震直後の目視判読結果



本震直後の目視判読結果

図3 益城町宮園地区付近における航空写真目視判読による建物被害区分

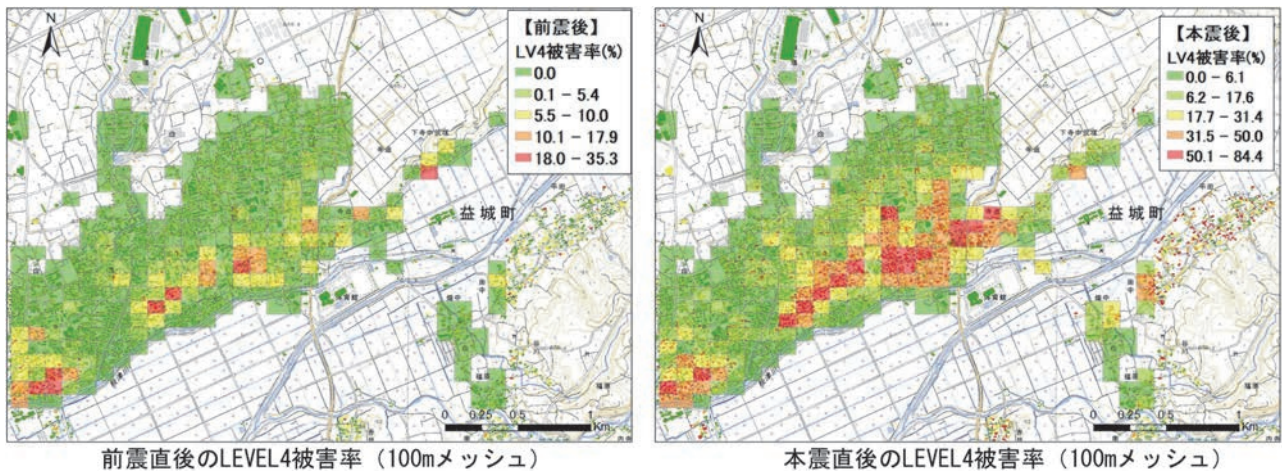


図4 航空写真目視判読結果に基づき全建物に占める LEVEL4 被害建物の割合を 100m メッシュ毎に集計したもの

3. DSM 差分解析

航空機にレーザー測距儀および GPS を搭載し、地上基準局の GPS 受信データと照合することでセンサ位置を求め、姿勢制御装置 (IMU) によってレーザーの照射方向を把握することにより、建物や樹木等を含む地表面の高さデータである DSM (Digital Surface Model) を取得することができる⁸⁾。この DSM を用いた解析により地形の水平、鉛直方向の変動量を算出することが可能である。例えば、佐川ら⁹⁾は熊本地震前後の DSM 差分を用いて地盤の側方流動や亀裂、斜面崩壊を抽出している。

また、DSM 差分データを地震による建物被害抽出に活用することができる。例えば、田代ら¹⁰⁾は新潟県中越沖地震前後に取得された航空写真から DSM を作成し、閾値以上の高さ低下が確認された建物を倒壊として抽出している。

本研究では熊本地震発生前、4月14日に発生した M6.5 の前震直後、および4月16日に発生した M7.3 の本震直後においてそれぞれ DSM を作成し、地震前後における差分を算出した。

具体的には、地震前のデータ作成にあたっては 2005 年に国土地理院が実施した航空レーザー測定のデータを ArcGIS™ で読み込み、TIN (不規則三角形網) に変換後、解像度 50cm/pixel の DSM を作成した。なお、地震前の航空レーザー測量データの長さ方向の精度は約 ±15cm である。

また、前震直後、本震直後のデータ作成についてはそれぞれ 4月15日、4月20日に株式会社パスコがデジタルマルチラインセンサーシステム (ADS) により撮影した航空写真を用いて、ArcGIS™ 上でステレオマッチング

を行うことにより解像度 50cm/pixel の DSM を作成した。なお、これらのデータ取得時において電子基準点の測量成果の公開が停止¹¹⁾されていたため、リアルタイムキネマティック測位を行っていない。従って、航空写真画像のステレオマッチングにより作成した DSM の高さ方向の精度は通常よりも低下し、いずれも ±1m 以内となっている。

次に、各地震前後について DSM の差分を計算後、国土地理院が公開する基盤地図情報 (建築物) のポリゴンデータを用いて建物毎に差分データの平均値を記録した (図-5)。

上記手順により図-6 左側に示す網掛けの範囲内において地震前と前震直後、地震前と本震直後、及び前震直後と本震直後の DSM 差分を計算し、さらに熊本市中央区、東区、嘉島町、益城町、西原村において DSM 差分データ作成範囲と重なる領域内にそれぞれ合計 100,916 個のポリゴンデータを作成した。

続いて、これらの DSM 差分データを用いた建物被害集中領域の検出を目的に、図-4 に示した 100m メッシュ毎に建物ポリゴン内 DSM 差分の平均値を計算し、前震、本震それぞれの影響による LEVEL4 建物被害率と各地震前後の DSM 差分との関係を図-7 にプロットした。結果、いずれにおいても正の相関がみられ、地震前後の DSM 差分が建物被害集中領域抽出に有効な指標であることを確認することができた。

ここで、地震前後の DSM 差分には建物被害のほかに、地表面の隆起・沈降の影響が含まれていることを考慮しなければならない。なお、熊本地震においては布田川断層帯の活動により最大 2m 程度の上下方向の変動が発生したことが報告されている¹²⁾。

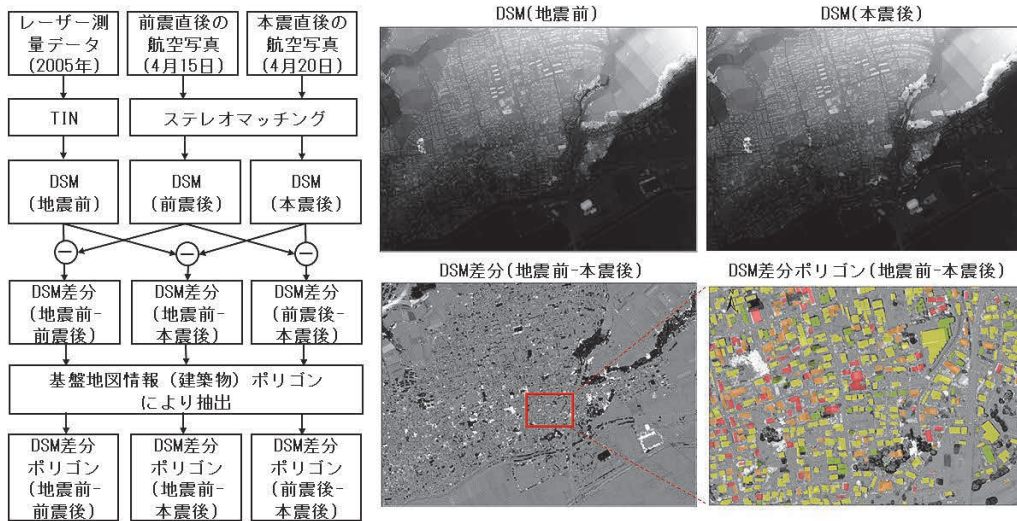


図5 DSM差分データの作成手順

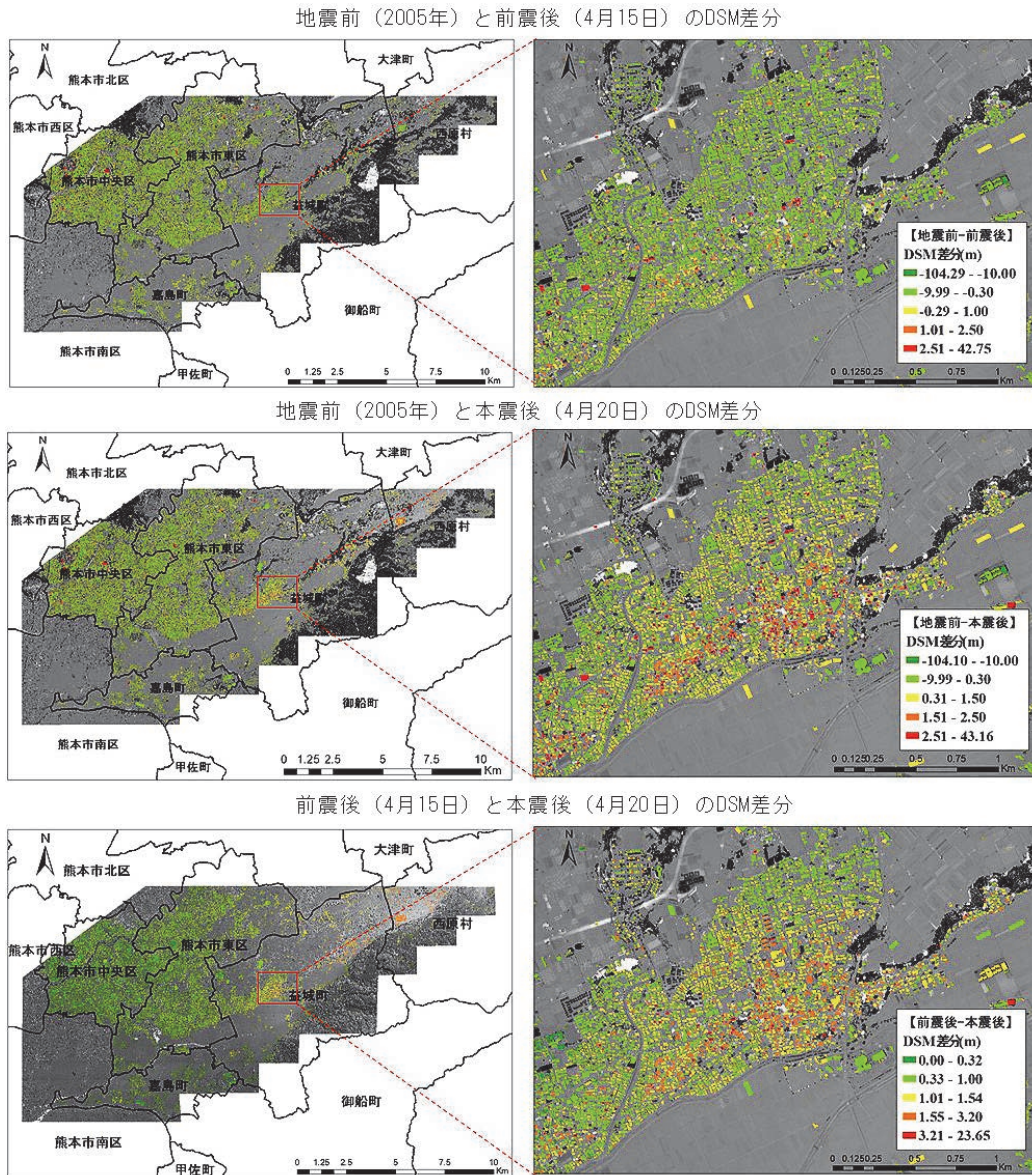


図6 DSM差分ポリゴンデータの作成範囲(左)および宮園地区付近の拡大図(右)

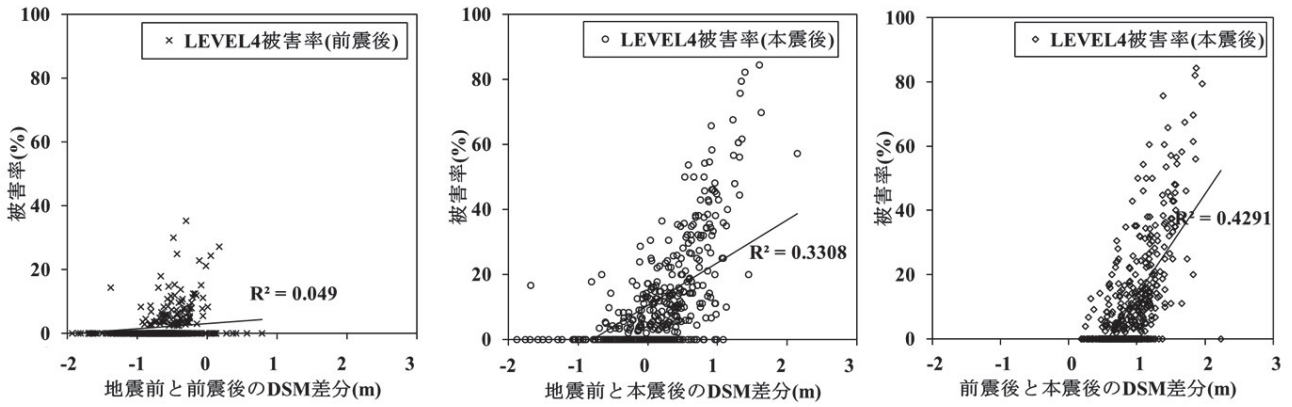


図-7 100mメッシュ毎に平均した地震前後のDSM差分, およびメッシュ内全建物に占めるLEVEL4被害建物の割合との関係 (実線は最小二乗法による線形近似曲線, 数字は決定係数をそれぞれ表す)

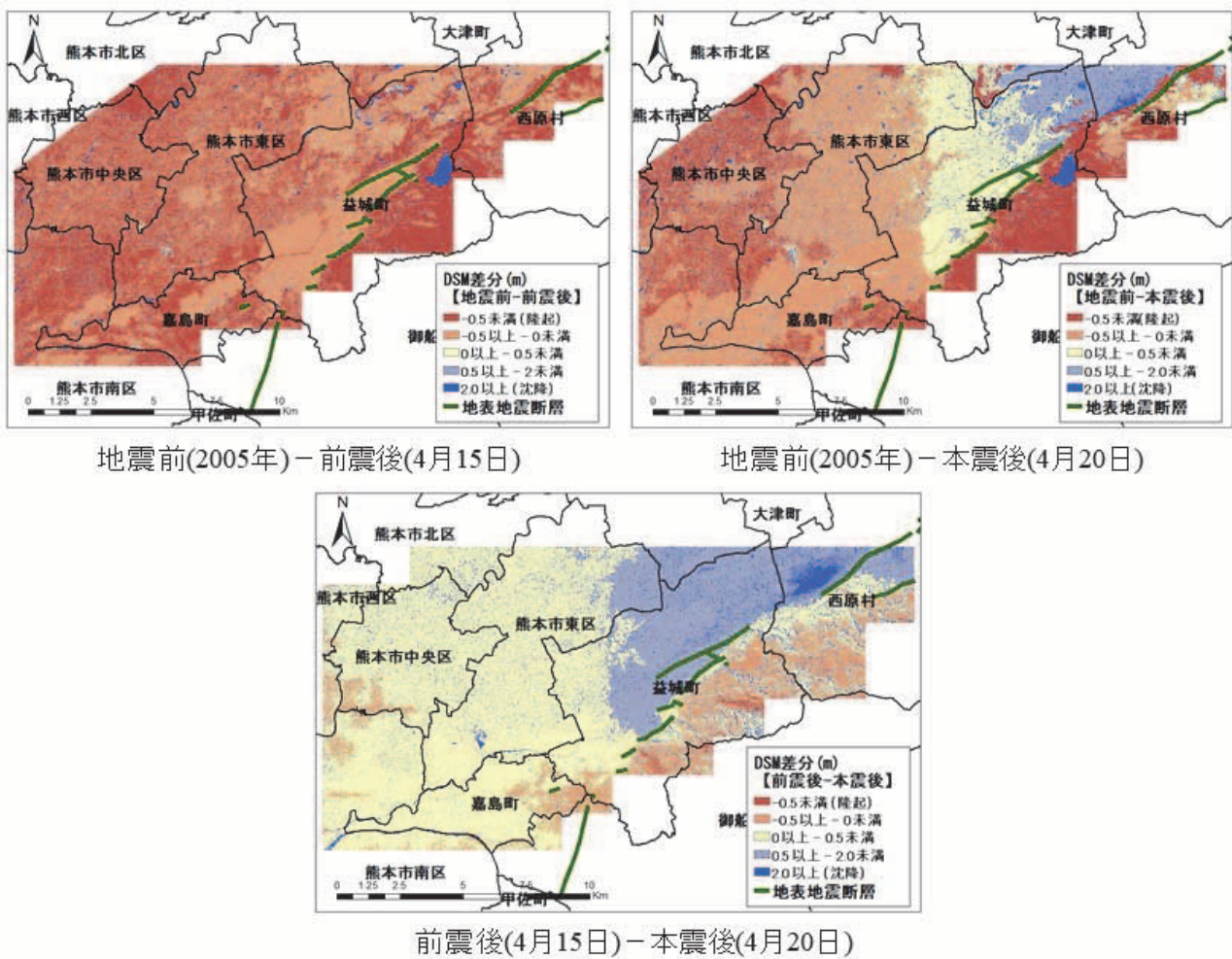


図-8 各地震前後におけるDSM差分データを用いて建物高さを除去, 平滑化した地表面高さ変化量 (青が沈降を表す)

そこで, 本研究では建物被害による高さ変化と, 地表面の上下変動を区別する為, DSM差分データから建物ポリゴンに重なる部分の高さデータを除去後, ArcGIS™を用いてサーフェス平滑化を行い, これを地表面の高さ変化量とみなした。

各地震前後における地表面の高さ変化量を図-8に示す。これを見ると, 益城町や西原村において確認された地表地震断層¹³⁾の北側において, 本震後に大きく沈降している領域を確認することができ, これらはSAR干渉解析結果¹⁴⁾, および航空レーザー測定の解析結果¹⁵⁾等の

既往研究と整合的な結果となった。なお、地震前と各地震後の比較において、益城町の断層の南東側に大きく高さが低下している箇所が見られるが、新旧の航空写真の比較から、人為的に地形が改変された場所と重なることを確認している。

次に、建物ポリゴン内の DSM 差分平均値から、地表面の高さ変化量を差し引いて補正した値を、ポリゴン毎に計算した。このように補正された DSM 差分値は、地殻変動による上下動の影響をキャンセルし、地震動による破壊のみを抽出していると考えられる。

続いて、補正した DSM 差分データを用いて、被害区分別に建物棟数を集計したヒストグラムを作成した(表-4, 図-9)。なお、ヒストグラムに用いたデータは地震前と前震後の差分のみ合計数が少ない。これは図-2 に示したように前震直後と本震直後で目視判読データの取得範囲が異なることによる。

各ヒストグラムおよび累積相対頻度を見ると、被害区分が LEVEL1 から LEVEL3 の場合においては DSM 差分

が 1m 以下の範囲に各区分の約 90%以上の建物が含まれるが、LEVEL4 の場合には DSM 差分が 1m を超える(高さ低下)の割合が約 50%以上になる。また、前震後よりも本震後において 1m 以上の高さ低下が確認できる LEVEL4 建物の比率が増加しており、これらの建物は主に本震により損傷を受け高さが低下した、あるいは前震により損傷を受けた後、本震によりさらに高さが低下したと推察される。

なお、全体の割合の中では少数であるが地震前と前震後あるいは本震後の DSM 差分がマイナス(高さ上昇)の場合になることがある。これは地震前と地震後のデータ取得時期が 10 年以上離れているため、この間に発生した建築物の新築、改築、宅地造成、樹木の生長等の影響による。また、無被害にも関わらず DSM 差分がプラスになっている場合は、建物の解体や敷地内の樹木伐採等の影響による。これらの外れ値が生じた要因は新旧 2 時期の写真の比較により確認することができる(図-10)。

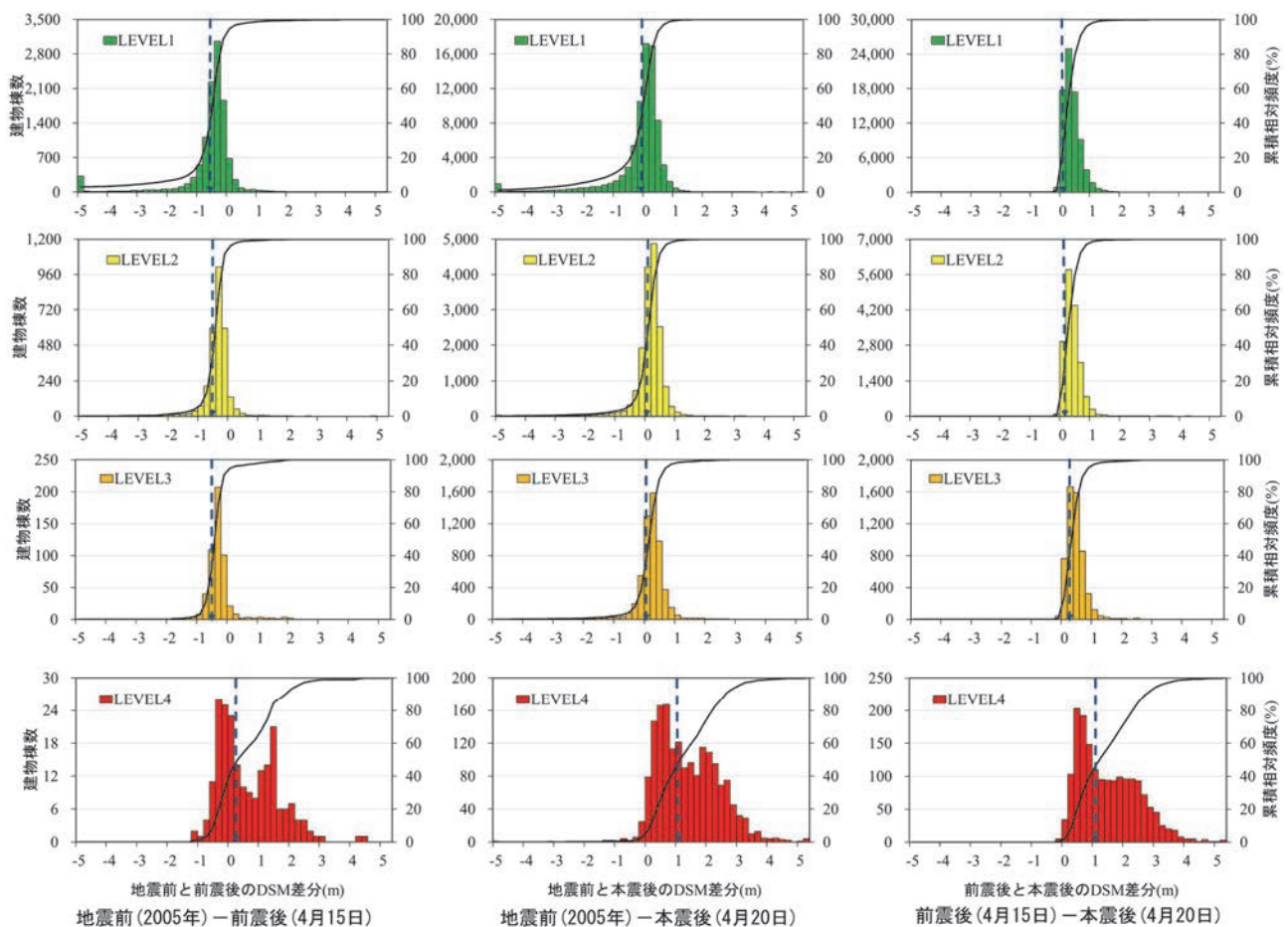


図-9 被害区分別に集計した各地震前後における DSM 差分のヒストグラム、累積相対頻度(実線)および中央値(破線)
(左軸:建物棟数, 右軸:累積相対頻度(%))

表4 ヒストグラム作成に使用した DSM 差分データ

項目	被害区分	データ数	最小値(m)	最大値(m)	平均値(m)	中央値(m)	標準偏差	標準誤差
地震前と前震後の差分	LEVEL1	11,500	-17.13	8.44	-0.81	-0.57	1.26	0.012
	LEVEL2	2,818	-6.42	4.77	-0.55	-0.51	0.45	0.009
	LEVEL3	522	-1.91	1.96	-0.47	-0.50	0.41	0.018
	LEVEL4	214	-1.37	4.30	0.48	0.22	0.98	0.067
地震前と本震後の差分	LEVEL1	77,100	-103.68	11.21	-0.37	-0.08	1.38	0.005
	LEVEL2	16,586	-11.33	3.16	-0.04	0.02	0.55	0.004
	LEVEL3	5,508	-6.56	3.34	0.04	0.06	0.51	0.007
	LEVEL4	1,722	-5.51	6.83	1.21	1.05	1.03	0.025
前震後と本震後の差分	LEVEL1	77,100	-0.94	14.30	0.21	0.16	0.32	0.001
	LEVEL2	16,586	-0.48	4.04	0.22	0.18	0.27	0.002
	LEVEL3	5,508	-0.89	4.05	0.28	0.23	0.34	0.005
	LEVEL4	1,722	-0.33	7.40	1.32	1.11	0.99	0.024



図-10 建物の新築・撤去により DSM 差分が大きく変化する例

4. テクスチャ解析

地震により損傷を受けた建物では倒壊や屋根瓦の落下によりテクスチャ（肌理）が粗く変化する．このように、地震後の画像を用いてテクスチャ解析により建物の倒壊を検出する研究は各種なされている．例えば三富ら¹⁶⁾は色彩情報とエッジ情報を元に設定した閾値を組み合わせたマルチレベルスライス法を用いて、ヘリコプターによって取得された画像から倒壊建物を抽出する手法を提案している．また、三浦ら¹⁷⁾は高分解能衛星画像を用いて同時生起行列を用いたテクスチャ解析を行い、建物の倒壊形式の違いに応じた検出率の比較を行っている．

本研究では熊本地震前震直後および本震直後に株式会社パスコにより撮影された航空写真画像を用いて、RGBの3バンド画像をグレイスケールの1バンド画像に変換後（式(1)）、以下に説明する同時生起行列(Gray Level Co-occurrence Matrix)を用いたテクスチャ解析を行い、目視判読にもとづく被害判別結果との比較を行った．

$$I(x, y) = R \times 0.30 + G \times 0.59 + B \times 0.11 \quad (1)$$

なお、本研究におけるデータ作成範囲は、前震直後、本震直後共に同一であり、益城町全域および隣接する市町村の一部が含まれるように撮影された航空写真の範囲内である（図-11）．

ここで、画像内の隣接画素間の関係性を行列で表したものを同時生起行列という．この同時生起行列を用いて画像から明瞭なテクスチャ特徴を抽出する様々な指標が開発されている¹⁸⁾．

本研究では5×5のウィンドウ単位で1画素幅ずつ画像全域を走査し、ウィンドウ内の隣接画素値を0度、45度、90度、135度の4方向についてカウントし、全カウント数で正規化した同時生起行列を作成する．次に、同時生起行列からGLCM特徴量を算出し、4方向の特徴量の平均値をウィンドウの中心に代入する．同様の手順を画像全域において繰り返す（図-12）．

GLCM特徴量としてよく使用される指標としては異質性（dissimilarity）、角二次モーメント（ASM）、均質性（homogeneity）等がある．

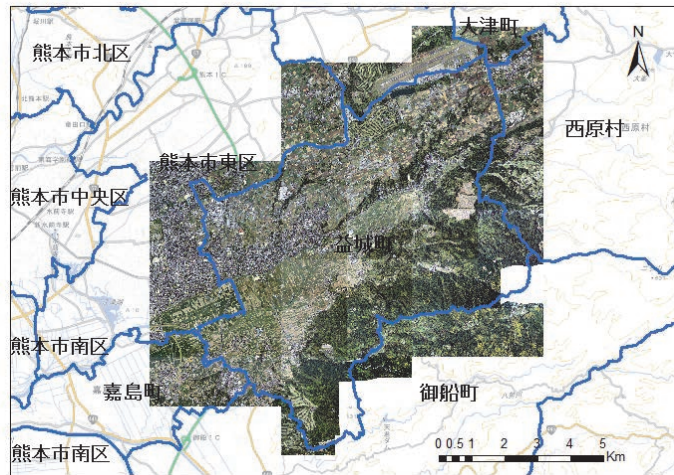


図-11 テクスチャ解析のデータ範囲 (前震直後の航空写真)

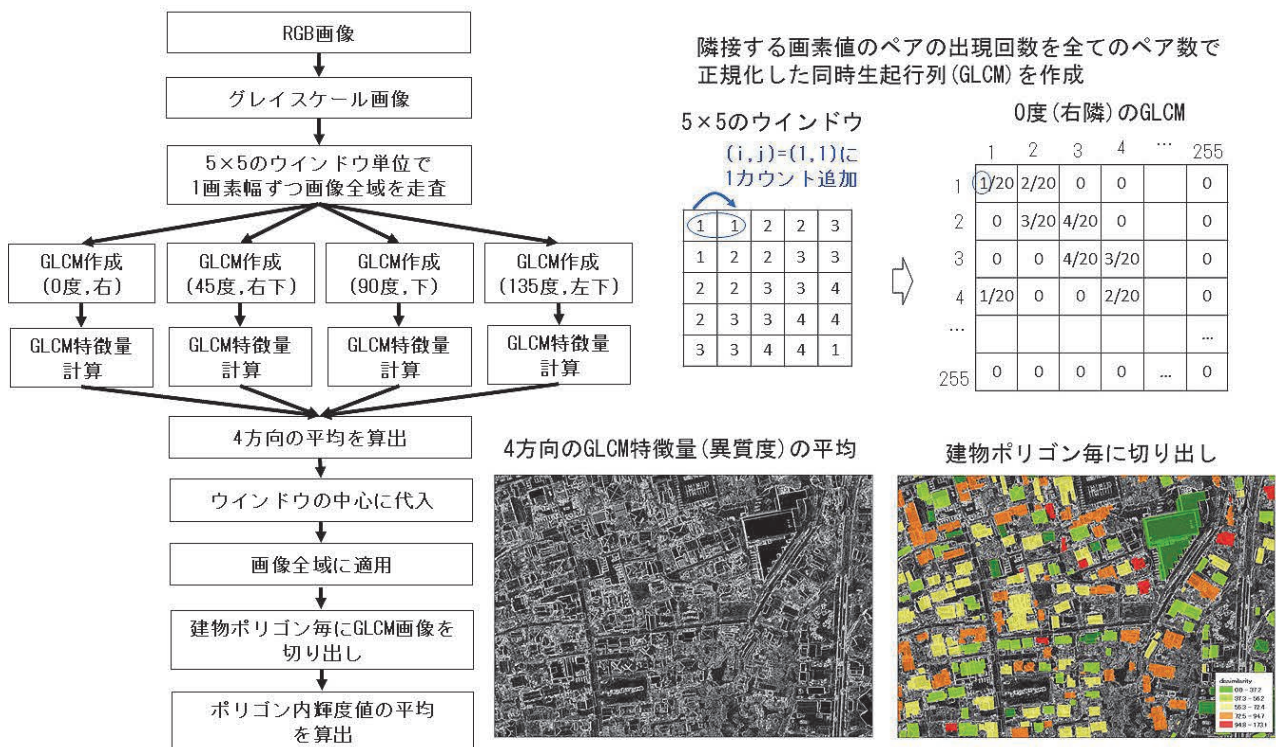


図-12 GLCMを用いたテクスチャ特徴量の算出手順

本研究では隣接する画素間のコントラストが大きいほど大きな値になり¹⁹⁾、倒壊建物の検出に優れた性能を示すことが確認されている異質度^{17,20)}を被害抽出指標として活用した(図-13)。なお、異質度の算出にあたってはオープンソースの画像解析ライブラリであるOpenCVを使用した。

益城町宮園地区周辺において前震直後、本震直後に取得された航空写真をそれぞれ用いて、GLCMを用いたテクスチャ解析を実施した画像、および各建物ポリゴン毎に抽出した異質度の平均値を図-14に示す。

次に、テクスチャ解析結果を用いた建物被害領域の検出を目的に、図-4に示した100mメッシュ毎に建物ポリゴン内異質度の平均値を計算し、前震、本震それぞれの影響によるLEVEL3+4(全壊相当)、LEVEL4(倒壊相当)建物被害率と異質度との関係を図-15にプロットした。結果、いずれにおいても正の相関がみられ、テクスチャ解析が被害領域抽出に有効な指標であることが確認できた。

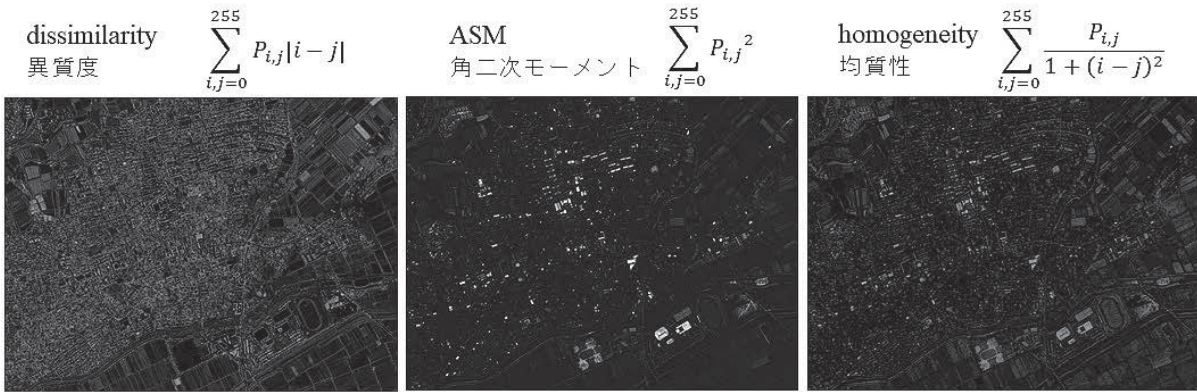


図-13 GLCMを用いたテクスチャ特徴量の比較

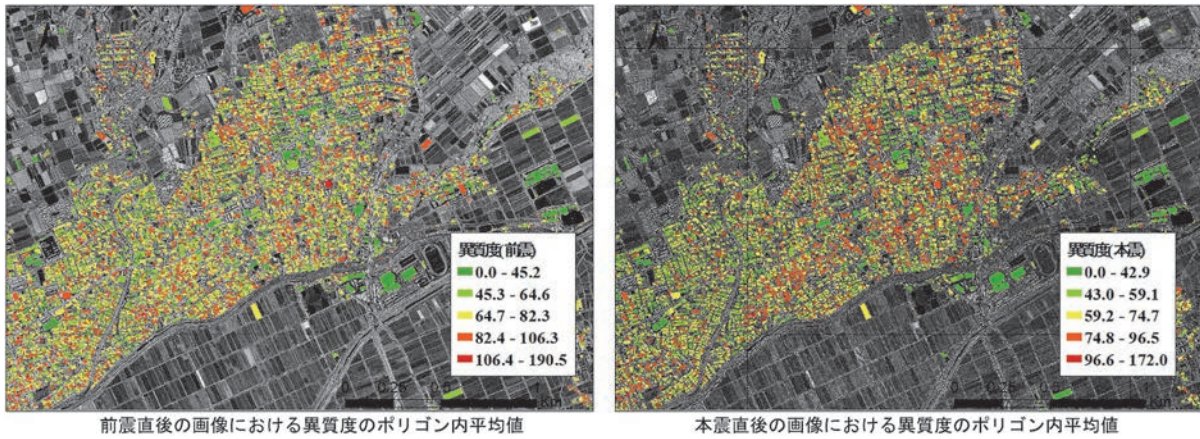


図-14 益城町宮園地区付近における前震直後、本震直後の画像から抽出した建物毎の異質度の平均値

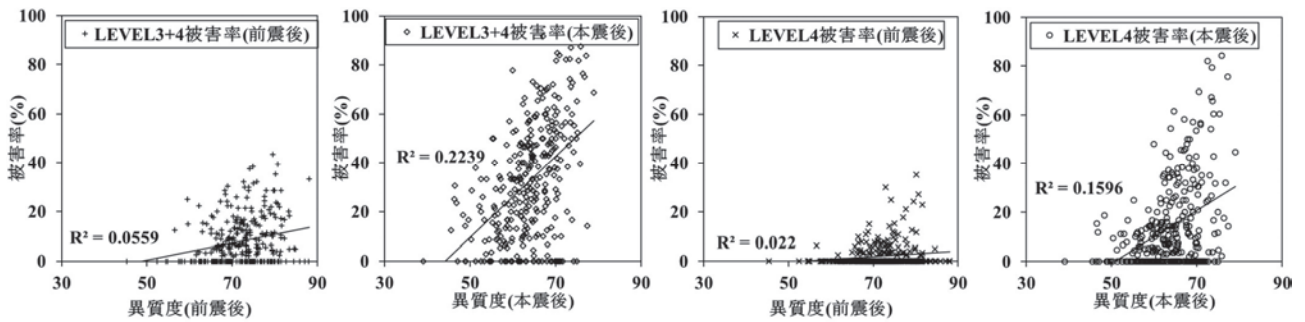


図-15 100mメッシュ毎に平均した建物ポリゴン内異質度の平均値、および同メッシュ内建物被害率との関係 (実線は最小二乗法による線形近似曲線、数字は決定係数をそれぞれ表す)

さらに、建物ポリゴン毎に算出した異質度を目視による被害区分ごとに集計し(表-5)、ヒストグラムを作成した(図-16)。なお、前震直後と本震直後のヒストグラム作成に用いたデータの合計数は異なるが、これは図-2に示したように前震直後と本震直後で目視判読データの取得範囲が異なることによる。

また、被害レベル毎の異質度の平均値、標準偏差の関係は図-17のようになり、被害レベルと異質度には相関

が確認できる。さらに、各群の母集団を正規分布と仮定し、一元配置分散分析²⁰⁾を実施したところ、それぞれの群(被害レベル)間変動に対する群内変動の分散比(F値)はF分布表(上側確率5%)から得られる境界値よりも大きく、各群における平均値に有意差があることが確認できた(表-6)。次にTukey-Kramer法を用いた多重比較検定²⁰⁾を行い、被害レベル毎の各群の平均値の差についてスチューデント化された範囲のq値を算出した

(表-7) . 結果, q 分布表 (上側確率 5%) から得られる限界値 2.57 よりも各群の q 値が大きく, 各群間における平均値の差についても統計的な有意差を確認することができた. ただし, 前震直後の画像における LEVEL3 と LEVEL4 の平均値の差についてのみ有意差が確認できなかったが, これは対象とした範囲における LEVEL4 被害建物のデータ数が少ないことが影響していると考えられる.

ところで, 無被害の建物であっても屋根上にソーラーパネルやアンテナ等の機材が広範囲に設置されている場合は, 各テクスチャ解析指標が高い値を示す. また, 倒

壊している建物であっても屋根の形状を保っている場合においては各指標が低い値を示す (図-18) . また, 建物ポリゴンの位置と実際の建物の位置がずれていることがあり, ずれが大きい場合にポリゴン内における異質度の平均値と被害レベルが合わなくなることが考えられる.

以上のことから, 被害集中領域の分布や被害程度の概要を把握する指標としてテクスチャ解析は有効であるが, 1 棟毎の被害を同定するためには, 他の指標と組み合わせる, あるいは目視判読結果と照合させることが必要不可欠である.

表-5 ヒストグラム作成に使用したテクスチャ指標 (異質度) データ

項目	被害区分	データ数	最小値	最大値	平均値	中央値	標準偏差	標準誤差
前震直後	LEVEL1	11,694	0.00	178.46	67.46	66.52	20.71	0.191
	LEVEL2	2,841	19.34	138.90	76.92	77.11	14.30	0.268
	LEVEL3	523	21.48	125.98	87.73	87.78	13.74	0.601
	LEVEL4	214	46.35	141.76	88.56	87.32	18.17	1.245
本震直後	LEVEL1	10,002	4.07	155.38	54.90	54.45	15.58	0.156
	LEVEL2	6,072	19.51	128.70	64.97	64.92	12.46	0.160
	LEVEL3	2,667	20.69	142.60	72.33	72.34	12.51	0.242
	LEVEL4	1,557	24.02	145.80	78.63	78.85	15.56	0.394

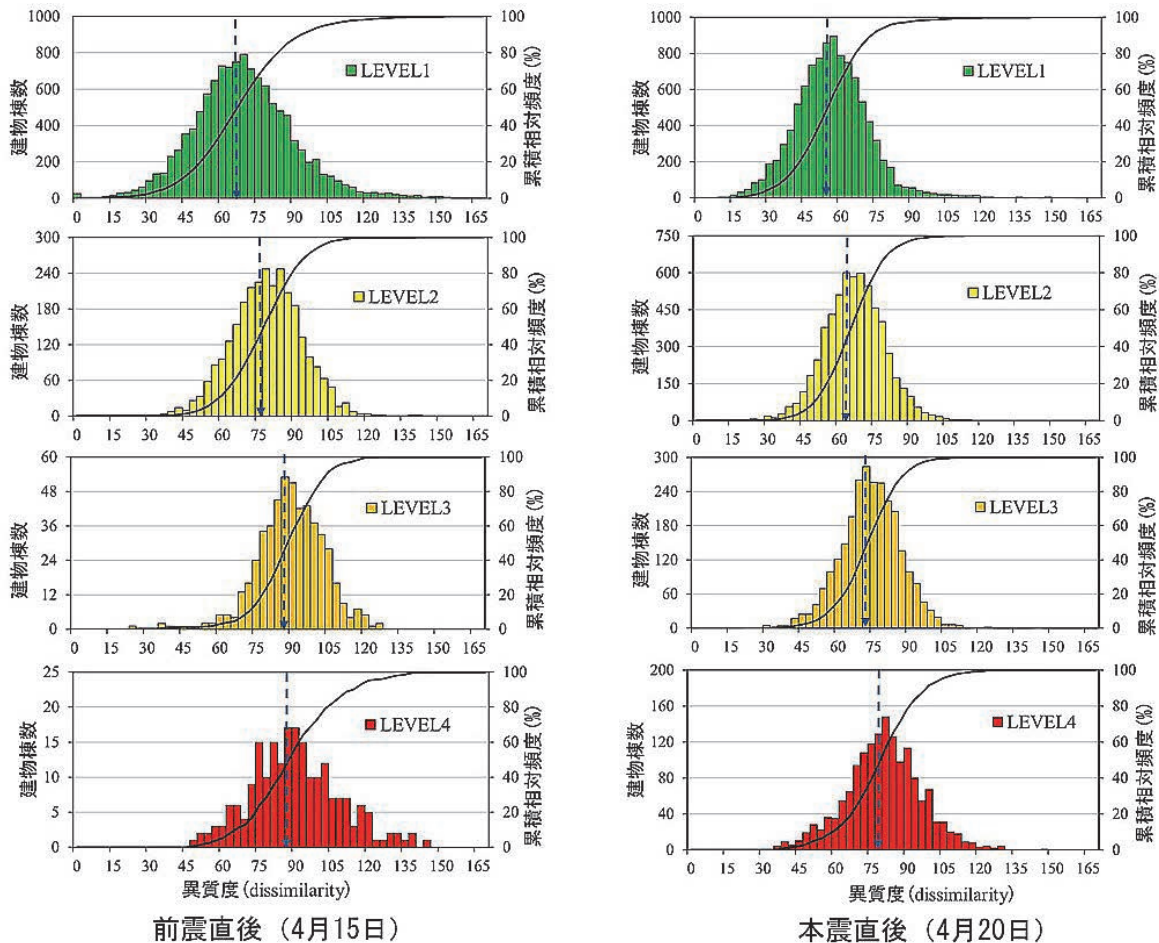


図-16 テクスチャ指標(異質度)のヒストグラム, 累積相対頻度 (実線) 及び中央値 (破線)

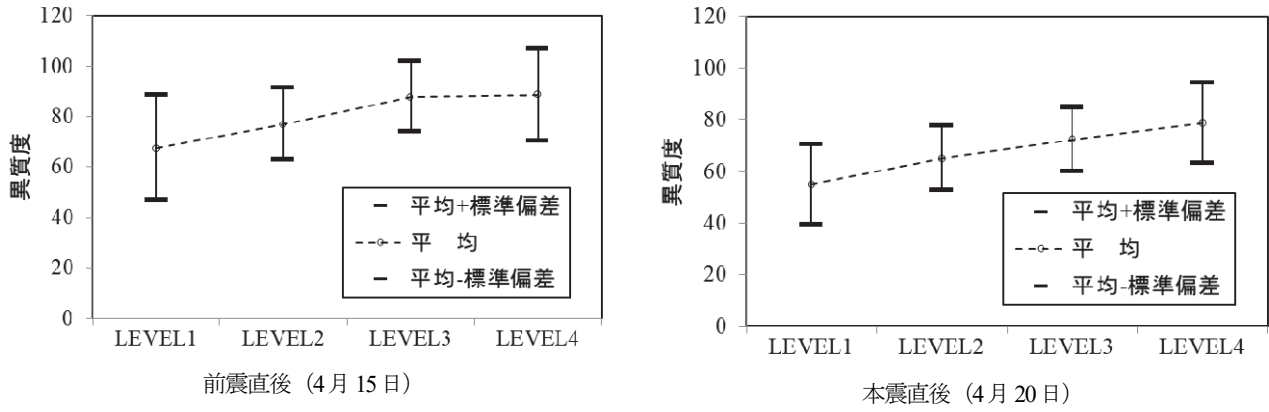


図-17 テクスチャ指標(異質度)の被害レベル毎の平均値および標準偏差

表-6 分散分析表

項目	変動要因	平方和	自由度	分散	分散比	境界値	P値
前震直後	群間変動	448,747	3	149,582	396	2.605	P<0.001
	群内変動	5,763,801	15,268	377.5	-	-	-
	総変動	6,212,548	15,271	-	-	-	-
本震直後	群間変動	1,272,632	3	424,211	2,067	2.605	P<0.001
	群内変動	4,165,458	20,294	205.3	-	-	-
	総変動	5,438,090	20,297	-	-	-	-

表-7 Tukey-Kramer法による多重比較検定

項目	水準1	水準2	平均値の差分	標準誤差	q値	P値
前震直後	LEVEL1	LEVEL2	9.46	0.41	23.27	P<0.001
	LEVEL1	LEVEL3	20.27	0.87	23.34	P<0.001
	LEVEL1	LEVEL4	21.10	1.34	15.74	P<0.001
	LEVEL2	LEVEL3	10.81	0.92	11.70	P<0.001
	LEVEL2	LEVEL4	11.65	1.38	8.46	P<0.001
	LEVEL3	LEVEL4	0.83	1.58	0.53	0.9523
本震直後	LEVEL1	LEVEL2	10.07	0.23	43.19	P<0.001
	LEVEL1	LEVEL3	17.43	0.31	55.81	P<0.001
	LEVEL1	LEVEL4	23.73	0.39	60.80	P<0.001
	LEVEL2	LEVEL3	7.36	0.33	22.11	P<0.001
	LEVEL2	LEVEL4	13.66	0.41	33.57	P<0.001
	LEVEL3	LEVEL4	6.30	0.46	13.79	P<0.001

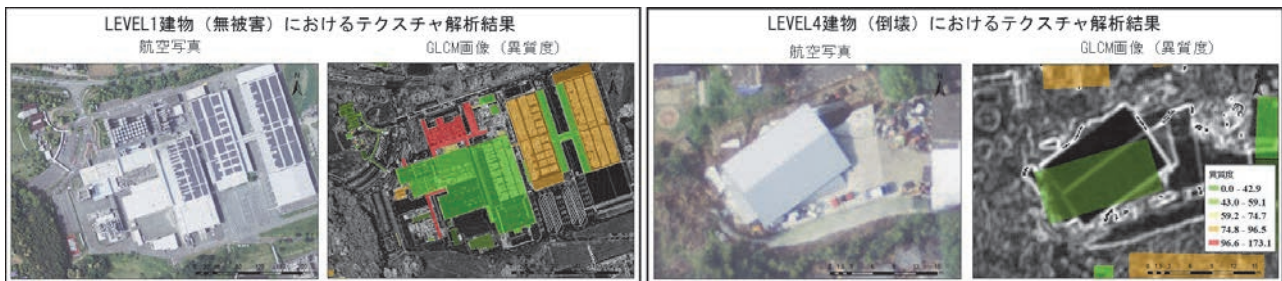


図-18 テクスチャ解析における外れ値の例

5. ブルーシート抽出

航空写真または高解像度衛星画像等を利用することにより屋根瓦の被害程度を判読可能である。この屋根瓦の被害は内閣府の住家被害認定基準の一つになっているほか、地震動強さ分布の推定²⁾、地形・地質と被害との関係³⁾、および被害進行状況の把握²⁾に活用される等、被害状況把握の上で重要な情報である。しかし、広域にわたり大きな地震動が発生した場合、屋根瓦被害の棟数は膨大になるため、目視判読には多くの労力を要する。

一方、屋根瓦が損傷を受けると、雨漏り等を防止するための応急措置として屋根にブルーシートがかけられることが多い。このブルーシートは視覚的に明確な特徴をもつことから、画像解析により自動抽出が可能である。

本研究ではマルチスケール領域分割手法²⁵⁾²⁶⁾を用いて色および形状を元に画像を小領域に分割後、HSV色空間における閾値を設定することによりブルーシートに覆われている領域を抽出する手法²⁷⁾を用いて、熊本地震前震直後の4月15日および本震直後の4月20日に取得された航空写真からブルーシート領域の自動抽出を行った(図-19)。抽出したブルーシート領域の範囲は図-20に示すように広域にわたる。

なお、自動抽出に際して設定した閾値は使用する写真の明るさ等により変化するため、画像に合わせた調整が必要である。本研究では4月20日の画像からサンプリングした50箇所のブルーシート領域を用いてHSVの閾値を式(2)~式(5)に示すように設定した。なお、式中のHは色相、Sは彩度、Vは明度を表す。

$$209 \leq H \leq 246 \tag{2}$$

$$33 \leq S \leq 173 \tag{3}$$

$$140 \leq V \leq 236 \tag{4}$$

$$V > -0.122S + 212.42 \tag{5}$$

次に、抽出したブルーシート領域を図-2に示す範囲の国土地理院の基盤地図情報(建築物)ポリゴンと重ね、各建物ポリゴン内に含まれるブルーシート領域の面積を計算した。

これらのデータを用いて、前震直後および本震直後のブルーシート面積の総和をそれぞれ250mメッシュ毎に計算し、地図上にプロットすると図-21のようになり、前震直後に比べ本震直後に熊本市、嘉島町、益城町等でブルーシート面積の総和が増加していることが分かる。

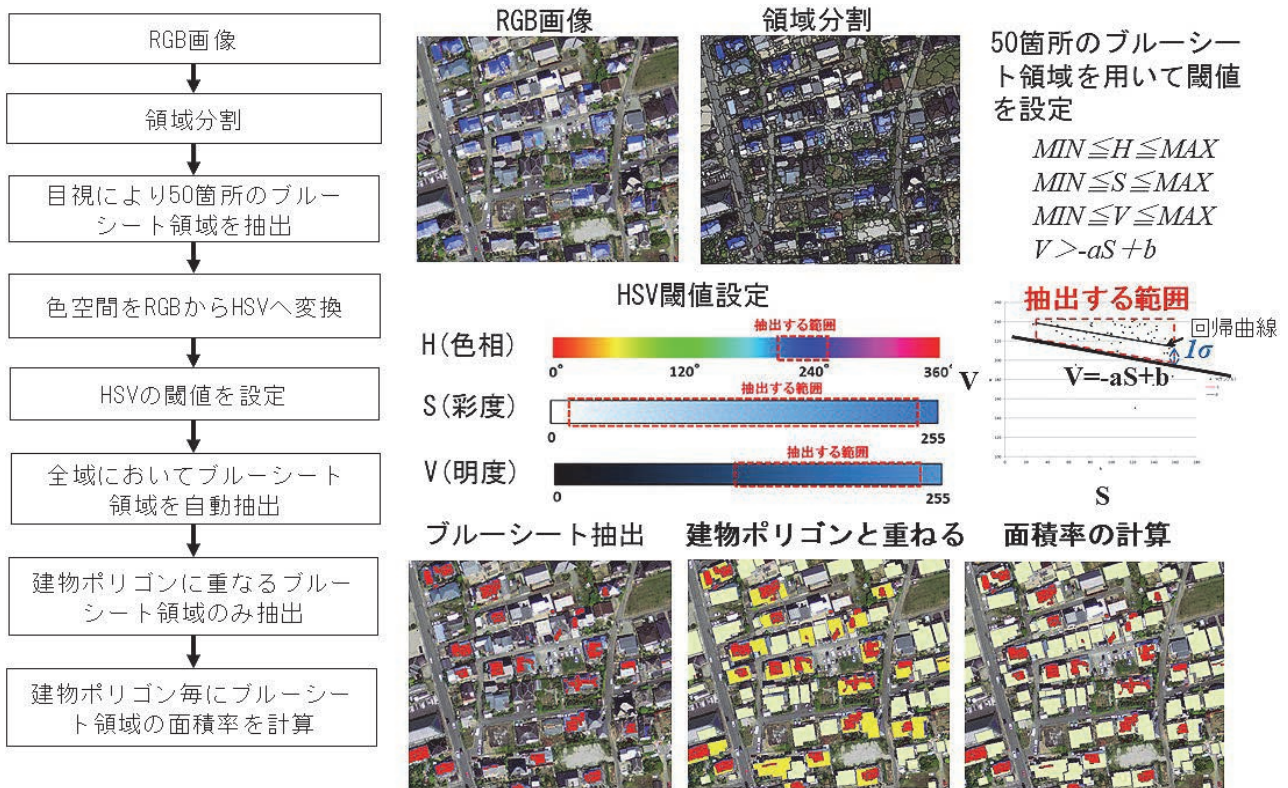


図-19 ブルーシート自動抽出手法の概要

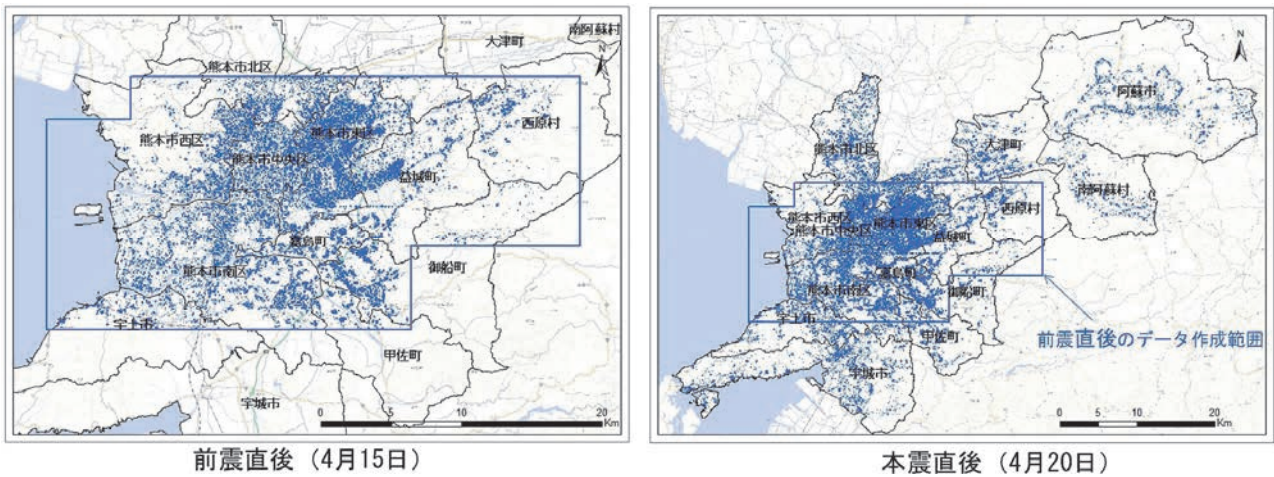


図-20 前震直後および本震直後におけるブルーシート領域データの作成範囲 (青色の点)

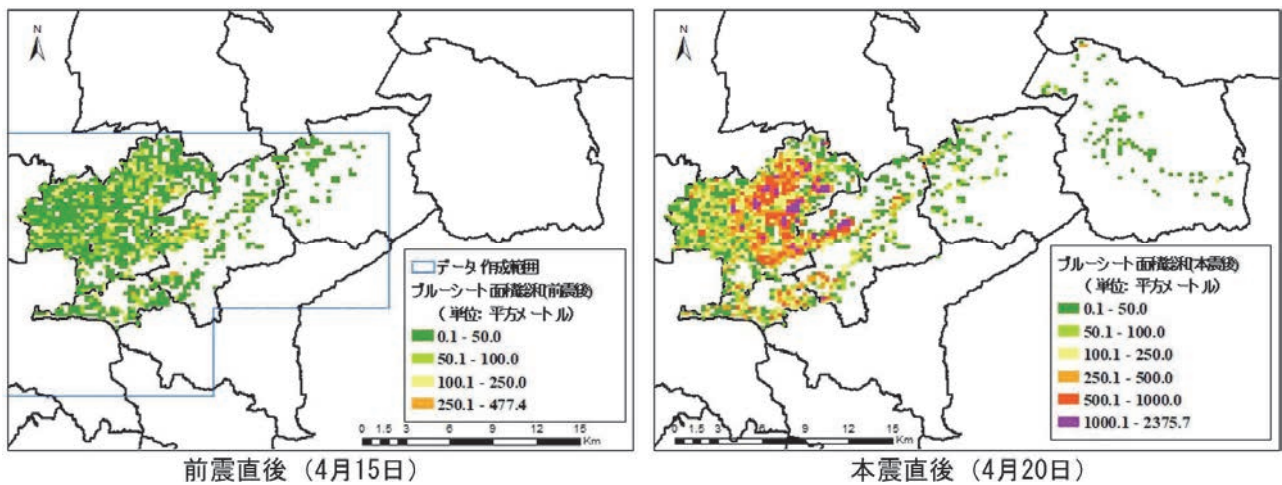


図-21 前震直後、本震直後におけるブルーシート領域面積の250mメッシュ内総和

また、図-21 に示した前震直後、本震直後の 250m メッシュから、メッシュ内に建物が 30 棟以上存在するメッシュをそれぞれ取り出し、各メッシュに含まれる建物内ブルーシート領域面積の合計値がメッシュ内に存在する全建物面積に占める比率(%)を計算した。これらの面積比率、および前震直後、本震直後それぞれメッシュ毎に推定した計測震度との関係をプロットすると図-22 のようになり、計測震度 5.5 程度以上の地域においてブルーシート面積比率が増加することが確認できる。このことから、ブルーシート面積比率は一定以上の地震動強さが発生したことを示す指標の一つとして活用できる可能性がある。

なお、図-22 における計測震度の推定方法については記録された観測点の計測震度を地表最大速度に変換²⁸⁾後、250m メッシュ地盤増幅率²⁹⁾³⁰⁾を用いて工学的基盤最大速度を求め、IDW 法により空間補間した後、地盤増幅

率を乗じた地表最大速度から変換式²⁸⁾を用いて計測震度を算出する手法³¹⁾を用いた。

一方、地震後に自治体等から各世帯に対しブルーシートが配布され、屋根がブルーシートに被覆されるまでの日数は地域毎に異なることが予想される。熊本地震の本震後については、撮影翌日の 4 月 21 日に益城町において 1 時間雨量最大 24mm の大雨の記録があり³²⁾、降雨に備えてブルーシートをかける世帯が増加したものと想像される。しかし、他の地震を対象とした場合、このような短期間でブルーシート被覆率が増加するとは限らない。従って、ブルーシート被覆率については、発災直後だけでなく数週間程度、あるいはさらに長期間にわたり継続的に推移を観測することにより、被害および復旧に関する状況をより詳細に把握することが可能になると考えられる^{例え 33)}ため、今後はより長期間を対象としてデータを取得し、推移について検証することが必要である。

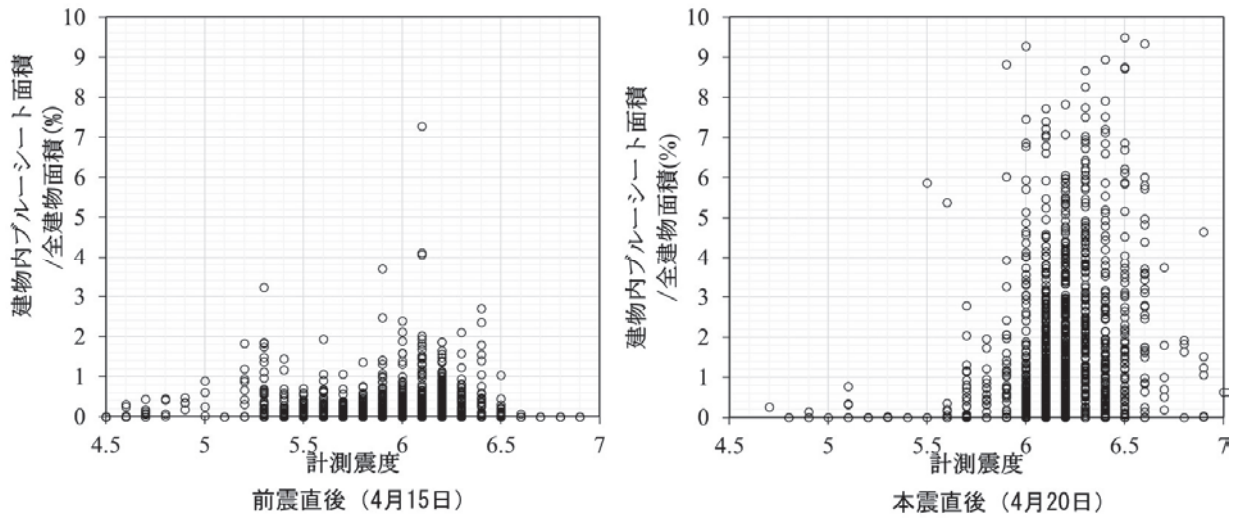


図-22 建物内ブルーシート面積比率のメッシュ毎の平均値と計測震度との関係

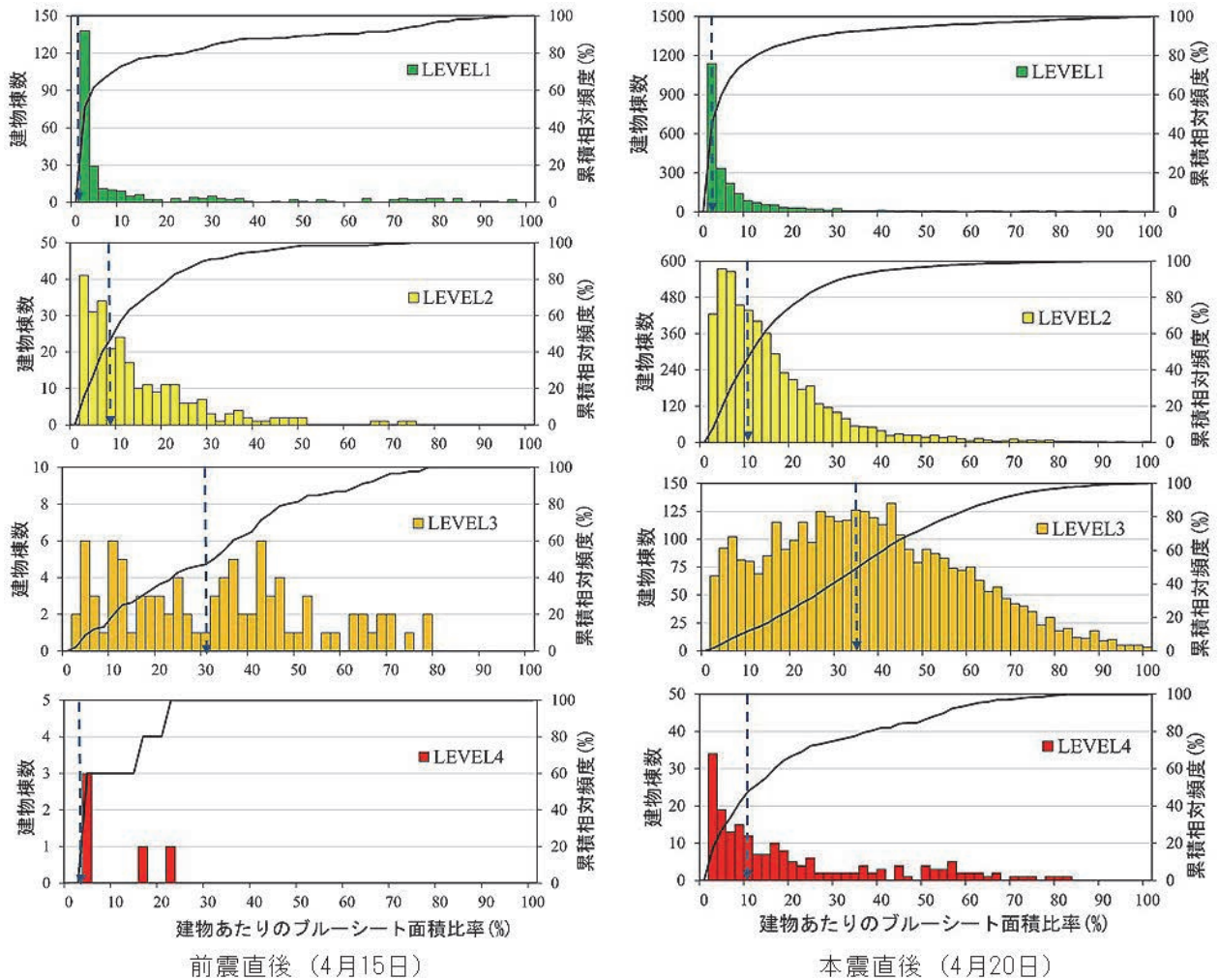


図-23 被害区分毎に集計した建物内ブルーシート面積比率のヒストグラム、累積相対頻度（実線）及び中央値（破線）

さらに、建物内ブルーシート面積比率を被害区分毎に集計したヒストグラムを作成した(図-23)。なお、建物

ポリゴン内にブルーシート領域が含まれないデータについてはヒストグラム作成に使用していない。

結果, LEVEL3 までは被害レベルが高くなるにつれてポリゴン内のブルーシート領域面積比率の中央値が増加するが, LEVEL4 になると減少することが分かった(表-8). このことは, 倒壊や層破壊に相当する損傷を受けた場合, 建物内に居住を続けることは危険であるため, 雨漏り防止目的のブルーシートをかけなくなることが原因であると推察される. なお, 無被害に分類される建物の中に僅かながらブルーシート面積比率が 100%に近いデータがあることが確認されたが, これは建物の屋根が青色であるため, ブルーシートと誤抽出されたデータによ

るものである(図-24).

以上をまとめると, ブルーシート領域面積は LEVEL2 ~LEVEL3 程度の中間レベルの被害を抽出する一つの手法として有効であるが, 画像の取得タイミングや地域的, 社会的な要因の影響があり, さらに損傷箇所により被覆方法が変わるため, これらの被害レベルの建物全てを抽出することはできない. 一方, 地震動強さの推定や, 復旧状況等の把握においてこれらの指標を活用できる可能性があることが分かった.

表-8 ヒストグラム作成に使用したブルーシート面積比率データ

項目	被害区分	データ数	最小値(%)	最大値(%)	平均値(%)	中央値(%)	標準偏差	標準誤差
前震直後	LEVEL1	270	0.0	94.62	13.50	1.70	23.63	1.44
	LEVEL2	266	0.0	73.21	12.66	8.29	12.99	0.80
	LEVEL3	91	1.24	77.62	31.11	31.65	20.58	2.16
	LEVEL4	5	3.30	20.04	9.40	3.86	7.14	3.19
本震直後	LEVEL1	2,478	0.0	100	9.28	2.51	17.23	0.35
	LEVEL2	5,201	0.0	100	14.49	10.68	13.64	0.19
	LEVEL3	3,448	0.0	99.99	36.09	34.45	21.27	0.36
	LEVEL4	194	0.0	80.03	19.25	10.94	20.44	1.47

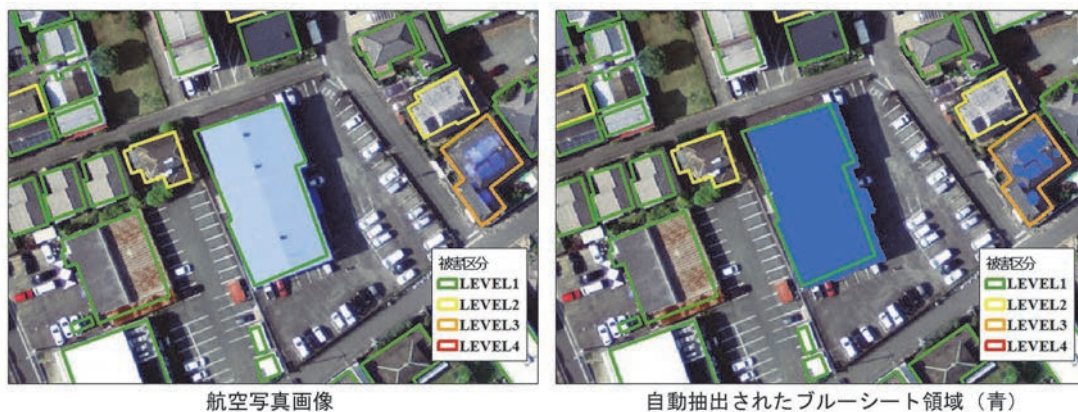


図-24 無被害の建物をブルーシート被覆と誤抽出した例 (中心の建物)

6. 画像解析手法を用いた被害レベル自動識別

これまで述べてきたように, 航空写真を用いた画像解析により建物被害集中領域を抽出可能である. また, 画像解析により抽出された各指標は目視判読にもとづく被害区分と一定の相関があることが確認された. 以降, それぞれの画像解析手法について, 目視判読結果を正解とみなした場合における被害レベル識別精度を検証する. なお, 検証にはデータの判断基準を変化させた場合における識別性能評価手法として用いられる受信者動作特性曲線 (ROC 曲線)³⁴⁾を用いた.

まず, 地震前後における地表面の高さ変化量を補正した, 建物被害に伴う DSM 差分を用いた場合の各被害区分に対する識別性能について述べる. 図-25 は地震前 (2005年) と本震後 (4月20日) の DSM 差分を使用した場合に, 各被害区分の建物が正しく判定される割合 (真陽性率) と誤判定される割合 (偽陽性率) との関係プロットした ROC 曲線である. これを見ると, DSM 差分は LEVEL1+2+3 と LEVEL4 の識別について, 他の識別に比べ曲線の下側面積 (AUC) が大きい. 従って, LEVEL4 (倒壊, 層破壊) 建物の識別性能が高いことが分かる. この図において, (0,1) と (1,0) を結んだ直

線と LEVEL4 識別における ROC 曲線が交わる点 (カットオフ点) を読み取り, この読み取り値を閾値とみなした場合の DSM 差分による判別マトリクスを作成した. 結果, 倒壊建物の識別精度に関して, 真陽性率は約 76.8%, 偽陽性率は約 16.9%となった (表-9).

続いて, 本震後画像のテキストチャ解析により算出された異質度を用いて被害区分毎に ROC 曲線を作成すると, LEVEL1+2+3 と LEVEL4 の識別において最も AUC が大きくなった (図-26). つまり, この指標においても LEVEL4 (倒壊, 層破壊) の建物の識別性能が高いことが分かる. 次に, この図において, LEVEL4 識別におけるカットオフ点を読み取り, これらを閾値とみなした場合において, 異質度による判別マトリクスを作成した. 結果, 真陽性率約 63.8%, 偽陽性率約 17.5%となった (表-10).

さらに, DSM 差分およびテキストチャ解析を組み合わせた LEVEL4 建物検出を試行した. 具体的には, DSM 差分または異質度が閾値 (カットオフ点の読み取り値) 以上になったときに LEVEL4 と識別した. このときの真陽性率は約 90.3%, 偽陽性率は約 31.8%となり, LEVEL4

の抽出精度が向上することを確認することができた (表-11). ただしこの場合, 偽陽性率も高くなり, 被害を過大評価することになるため, 目的に応じて適切な識別条件を設定することが必要である.

続いて, 本震後画像における建物ポリゴン内のブルーシート面積比率を用いて被害区分毎に ROC 曲線を作成した. すると, LEVEL1 と LEVEL2+3+4 および LEVEL1+2 と LEVEL3+4 の識別において AUC が同程度となり, これらの中間レベル (LEVEL2, 3) の被害識別に有効な指標であることが確認された (図-27). ただし, 既に述べたように, 抽出されたブルーシート面積比率は中間レベルの被害全てを網羅できているわけではないため, 本研究においては被害レベル自動識別には使用しない.

以上をまとめると, DSM 差分およびテキストチャ解析を組み合わせて用いることにより無被害建物や倒壊建物の判別を比較的高い精度で抽出可能であるが, 中間の被害レベルの識別には一層の精度向上が求められることが分かった.

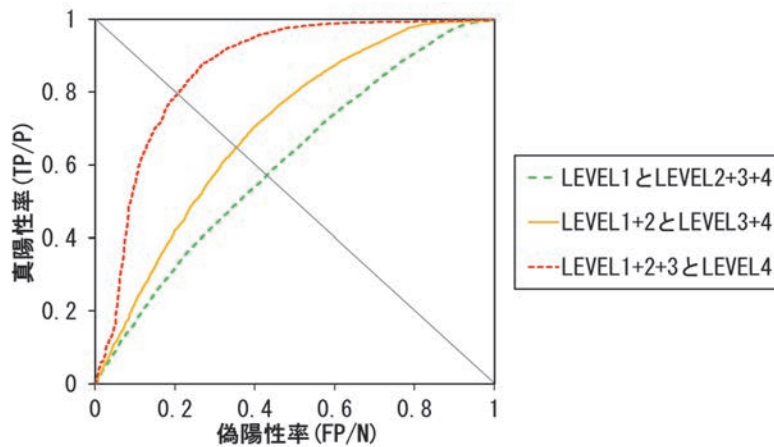


図-25 DSM 差分を用いた被害識別における ROC 曲線

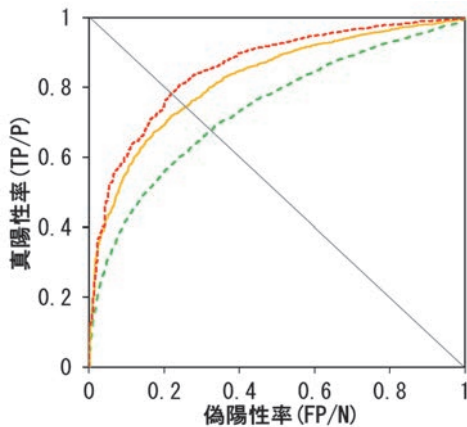


図-26 テキスチャ指標を用いた被害識別における ROC 曲線

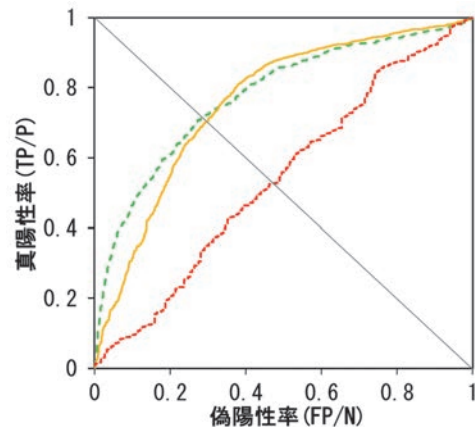


図-27 ブルーシート面積比率を用いた被害識別における ROC 曲線

表-9 DSM差分によるLEVEL4建物推定の判別マトリクス

		推定 (DSM 差分)		合計	真陽性率(%)	偽陽性率(%)
		LEVEL4 (陽)	LEVEL1+2+3 (陰)			
目視判読	LEVEL4 (真)	1,126 真陽性 (TP)	340 偽陰性 (FN)	1,466 (P=TP+FN)	76.8 (TP/P)	16.9 (FP/N)
	LEVEL1+2+3 (偽)	4,781 偽陽性 (FP)	23,508 真陰性 (TN)	28,289 (N=FP+TN)		

表-10 テクスチャ解析によるLEVEL4建物推定の判別マトリクス

		推定 (テクスチャ解析)		合計	真陽性率(%)	偽陽性率(%)
		LEVEL4 (陽)	LEVEL1+2+3 (陰)			
目視判読	LEVEL4 (真)	935 真陽性 (TP)	531 偽陰性 (FN)	1,466 (P=TP+FN)	63.8 (TP/P)	17.5 (FP/N)
	LEVEL1+2+3 (偽)	4,964 偽陽性 (FP)	23,325 真陰性 (TN)	28,289 (N=FP+TN)		

表-11 DSM差分とテクスチャ解析指標を組み合わせたLEVEL4建物推定の判別マトリクス

		推定 (DSM差分+異質度)		合計	真陽性率(%)	偽陽性率(%)
		LEVEL4 (陽)	LEVEL1+2+3 (陰)			
目視判読	LEVEL4 (真)	1,291 真陽性 (TP)	138 偽陰性 (FN)	1,466 (P=TP+FN)	90.3 (TP/P)	31.8 (FP/N)
	LEVEL1+2+3 (偽)	8,733 偽陽性 (FP)	18,721 真陰性 (TN)	28,289 (N=FP+TN)		

7. まとめ及び今後の課題

熊本地震において前震直後および本震直後に取得された航空写真を用いて DSM 差分, テクスチャ解析, ブルーシート抽出の3つの画像解析手法を用いた建物被害抽出を行った。また, 各手法において航空写真目視判読にもとづく4つの被害区分を正解とした場合の被害抽出精度について検証を行った。

その結果, 各手法を用いて建物被害集中域の分布を把握可能であること, また, 手法により抽出可能な被害区分や識別精度に差があることが分かった。

さらに, これらの画像解析手法を組み合わせることで使用することにより, 特に被害が大きい建物を高精度に抽出することが可能であることがわかった。しかし目視判読と同程度の4区分の識別は困難であり, 中間の被害レベルについては, ブルーシート被覆率により一部を自動抽出することは可能であるものの全体ではなく, これらの識別に関しては課題があることもわかった。

なお, 筆者ら³⁵⁾³⁶⁾は多数の航空写真画像から作成した教師データを用いて, 深層学習等の機械学習を用いた手法を用いることにより被害レベル4区分の識別が比較的

高精度で可能になることを確認している。

今後はより高精度な被害抽出が可能な画像解析手法について検討するとともに, 機械学習等, 複数の手法を組み合わせることで, 迅速かつ高精度に建物被害判別可能な手法の開発に取り組んでいきたい。

さらに, 本研究における開発手法を地震動にもとづく被害推定システムと連携し, 被害推定を高精度化し, 即時的な状況把握を実現可能なシステムを開発することにより, 情報の利活用を通じて災害対応の迅速・効率化を目指していきたい。

謝辞: 本研究は総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人: JST)によって実施された。地震前のDSM作成にあたっては国土地理院から提供された航空レーザー測量データを使用した。図の背景地図には国土地理院から公開されている淡色地図を利用した。また, データ解析には ArcGIS™, OpenCV+Python, MATLAB™を使用した。

以上, 記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 内閣府：平成 14 年度版防災白書，2002. <http://www.bou-sai.go.jp/kaigirep/hakusho/h14/bousai2002/html/honmon/hml20406.htm> (平成 30 年 7 月 11 日閲覧)
- 2) 中村洋光，功刀卓，高橋郁夫，藤原広行，青井真，青柳京一，橋本光史，日下彰宏，本間芳則：リアルタイム被害推定・状況把握システムの開発状況，日本地震工学会・大会—2015 梗概集，2015.
- 3) 能島暢呂，杉戸真太，金澤伸浩：被害情報の逐次処理による地震時緊急対応の意思決定モデル，土木学会論文集，No. 682/I-56, pp. 129-142, 2001.
- 4) 内藤昌平，門馬直一，中村洋光，藤原広行，下村博之，山田哲也：航空写真目視判読にもとづく 2016 年熊本地震による建物被害調査，土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 4, 2018.
- 5) 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, pp. 808-821, 2006.
- 6) 日下彰宏，中村洋光，藤原広行，神田克久，門馬直一：平成 28 年熊本地震における震災後の空中写真を利用した住宅被害分布の推定シミュレーション，日本地震工学会・大会—2017 梗概集，2017.
- 7) 総務省統計局：地域メッシュ統計について，2019. http://www.stat.go.jp/data/mesh/m_tuite.html (平成 31 年 1 月 22 日閲覧)
- 8) 山崎文雄：熊本地震における航空・衛星リモートセンシングの利用，光技術コンタクト，Vol. 54, No. 12, 2016.
- 9) 佐川由季，Luis Moya，劉ウエン，山崎文雄：2016 年熊本地震における 2 時期の航空レーザーデータの比較による地殻変動と地盤変状の抽出，第 7 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集，pp. 19-24, 2016.
- 10) 田代啓，丸山喜久，山崎文雄：デジタル空中写真測量に基づく新潟県中越沖地震における建物倒壊の把握，地域安全学会論文集，No. 13, pp. 379-386, 2010.
- 11) 大滝修，井上武久，植田勲，山下達也，山口和典，白井宏樹，鈴木啓，三木原香乃：熊本地震に伴う基準点成果の改定，国土地理院時報，No. 128, 2016.
- 12) 文部科学省研究開発局，国立大学法人九州大学：平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査 平成 28 年度成果報告書，2018.
- 13) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D. and Miyakawa, A.: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth Planets and Space*, Vol. 68:191, 2016.
- 14) 上芝晴香，三浦優司，宮原伐折羅，仲井博之，本田昌樹，攪上泰亮，山下達也：だいち 2 号 SAR 干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出，国土地理院時報 128 集，pp. 139-145, 2016.
- 15) Moya, L., Yamazaki, F., Liu, W. and Chiba, T.: Calculation of coseismic displacement from lidar data in the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, pp. 143-156, 2017.
- 16) 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手法に関する考察，土木学会論文集，No. 710/I-60, 2002.
- 17) 三浦弘之，翠川三郎，Soh Hui Chen：2010 年ハイチ地震における被害地域検出のための高分解能衛星画像のテクスチャ解析，日本地震工学会論文集，Vol. 12, No. 6, 2012.
- 18) Hararic, R. M., Shanmugam, K. and Dinstein, I.: Textural features for image classification, *IEEE Transactions of Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No. 6, pp. 610-621, 1973.
- 19) Hall-Beyer, M.: GLCM texture: a tutorial v3.0, *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License*, March 2017.
- 20) 後藤智博，三浦弘之：ヒストグラム平坦化とテクスチャ解析による光学センサ画像からの倒壊建物の検出—2016 年熊本地震における航空写真を用いた検出—，日本建築学会学術講演梗概集(中国)，pp. 419-420, 2017.
- 21) 栗原伸一：入門統計学，オーム社，2011.
- 22) 境有紀，新井健介，赤松勝之：2009 年駿河湾の地震における御前崎市付近を対象とした瓦屋根被害による地震動強さ分布の推定，日本地震工学会論文集，Vol. 11, No. 1, pp. 48-71, 2017.
- 23) 岡田真介，小松原琢，中澤努，中村洋介，坂田健太郎，納谷友規：Google Earth を用いたつくば市および土浦市周辺における 2011 年東北地方太平洋沖地震による瓦屋根被害の分布調査，地震，第 2 輯，Vol. 64, pp. 257-264, 2012.
- 24) 小島由記子，内田至，池田隆明，対島宏洋：航空写真を用いた 2016 年熊本地震による益城町の建物被害進行状況の分布，土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 4, pp. I_949-958, 2017.
- 25) Baatz, M. and Schape, A.: Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation, *Angewandte Geographische Informations Verarbeitung XII*, pp. 12-23, 2000.
- 26) 坂元光輝，本田禎人，近藤 歩：マルチスケール領域分割手法における形状評価基準の拡張，日本写真測量学会平成 27 年度秋季講演会発表論文集，pp. 95-96, 2015.
- 27) 本田禎人，望月貫一郎，下村博之，門馬直一：平成 28 年熊本地震での被災建物判読を目的としたブルーシート被覆建物の自動抽出，日本地震工学会・大会—2016 梗概集，2016.
- 28) 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, pp. 241-246, 2005.
- 29) 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，2008.
- 30) 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 波速度との関係，日本地震工学会論文集，Vol. 6, pp. 11-22, 2006.
- 31) 藤原広行，中村洋光，高橋郁夫：2016 年熊本地震におけるリアルタイム被害推定，日本地震工学会・大会—2016 梗概集，2016.
- 32) 気象庁：過去の気象データ検索，2019. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (平成 31 年 1 月 25 日閲覧)

- 33) 吉田裕輔, 佐藤大介, 市古太郎, 澤田雅浩, 中林一樹: 新潟県中越地震発生後半年間の災害対応と市街地空間利用について—新潟県川口町を事例として—, 地域安全学会論文集, 7巻, pp. 179-188, 2005.
- 34) 平井有三: 初めてのパターン認識, 森北出版, 2012.
- 35) 内藤昌平, 友澤弘充, 森悠史, 永田毅, 三橋喜一, 山田哲也, 下村博之, 門馬直一, 中村洋光, 藤原広行: 熊本地震における航空写真画像を用いた機械学習による建物被害判別手法の開発, 日本地球惑星科学連合大会, 2018.
- 36) 内藤昌平, 中村洋光, 藤原広行, 友澤弘充, 森悠史, 永田毅, 山田哲也, 下村博之, 門馬直一, 庄司学: 航空写真を用いた機械学習に基づく地震動による建物被害自動判別手法の開発, 第15回日本地震工学シンポジウム論文集, GO07-01-09, 2018.
- (2018.11.1 受付, 2018.2.7 修正, 2019.3.6 受理)

BUILDING DAMAGE DETECTION OF THE KUMAMOTO EARTHQUAKE UTILIZING IMAGE ANALYZING METHODS WITH AERIAL PHOTOGRAPHS

Shohei NAITO, Naokazu MONMA, Tetsuya YAMADA, Hiroyuki SHIMOMURA, Kanichiro MOCHIZUKI, Yoshihito HONDA, Hiromitsu NAKAMURA, Hiroyuki FUJIWARA and Gaku SHOJI

It is important to detect damages immediately after the earthquake in terms of efficient disaster responses. In this point, we developed image analyzing methods by utilizing aerial photos of the foreshock and the aftershock of the 2016 Kumamoto earthquake. The image analyzing method consists of the differential analysis with digital surface models (DSM), the texture analysis, and the extraction method of blue tarps based on the region segmentation. With these methods, we extracted more than 15,000 damages of buildings caused by the Kumamoto earthquake, and compared with the visual photographic interpretation result which classified buildings with 4 damage levels. Then, we clarified that the DSM and the texture analysis are superior to detect destroyed buildings, and the extraction method of blue tarps is effective on the partially extraction of intermediate damages.