

高分解能衛星画像のオブジェクトベース解析による津波被災地 マップの作成と建物被害評価

Mapping Tsunami Impact using Object-Based Satellite Image Analysis

萱場真太郎¹・越村俊一²

Shintaro KAYABA and Shunichi KOSHIMURA

The authors developed a method of object-based satellite image analysis using high-resolution post-tsunami satellite image to detect and map tsunami impact. The method is applied to QuickBird 4 band pan-sharpened composite image acquired in Banda Aceh, Indonesia, and the ground objects are classified into six ; vegetation, water, soil, building, road and debris, for mapping the impact of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake tsunami.

1. はじめに

津波などの広域で発生する巨大災害の直後は被災情報の迅速な入手・把握がきわめて重要であり、その手段として人工衛星による緊急観測が有効である。特に、近年打ち上げられた高分解能（空間分解能1m以下）衛星画像の利用によって、外部から入手できる被災情報の量や正確性は格段に向上している。画像の解析は、従来のピクセルベースの解析手法では精度の限界が指摘されているのに対し（大西ら，2005），同一の地物を表す複数ピクセルを一つの解析要素とするオブジェクトベースの画像解析手法が注目されている。この技術を津波被災地の高分解能衛星画像処理に用いる事により、迅速かつ正確な津波被害の把握が期待できる。

萱場・越村（2009）は、地表物ごとのオブジェクトが持つ分光反射特性の違いに着目し、マルチレベルスライス法による画像分類手法を提案し、従来手法と比較して特に瓦礫域の抽出などで良好な結果を得ている。マルチレベルスライス法は主に特定の地表物のみを抽出するのに適した方法であるが、広域観測を前提とした衛星画像の分類を行うためには、地表物の特徴量および分類のための閾値を個別に決定する必要があり、時間的な制約からも災害発生時の利用に適しているとは言いがたい。また、その分類精度は定性的な評価にとどまっているという問題も挙げられる。

本研究では、津波被災地の高分解能衛星画像を用いた、津波災害直後の簡便かつ高精度な被害情報の把握手法の確立を目的に、市街地における津波被災地の地表分類図（被災地マップ）の自動作成手法を提案する。具体的に

は、最尤法による教師付き画像分類にオブジェクト画像解析手法を導入し、さらに地表物の特性を考慮して再分類を行うことで精度向上を図る新しい画像解析アルゴリズムである。解析領域のGround Truth Data（GTD）との比較による分類精度の定量的評価を行い、被災地マップを利用した被災情報の把握方法に関して検討を行う。なお、解析には独Definiens社のオブジェクトベース画像解析ソフトウェアDefiniens Professional 5.0を使用した。

2. 被害概要と解析対象の設定

本研究の対象は、萱場・越村（2009）と同様にSumatra島北端のBanda Aceh市街地（2004年インド洋大津波災害の被災地）とした。Banda Acehにおけるインド洋大津波の遡上高は、市街地が面する北岸で10m超と報告されており（Koshimuraら，2009），この津波により北部海岸線から2kmまでの家屋は鉄筋コンクリート造りも含めてほぼ流失、また津波遡上域は内陸5km地点まで及び、市街地内には多数の瓦礫が存在している。

解析には、津波被災2日後（2004年12月28日）のBanda Acehを撮影したQuickBirdパンシャープン合成画像を用いる。QuickBird衛星は2001年に打ち上げられた、0.60mの最大解像度を持つ商用観測衛星である。4つのバンドをカバーするセンサで可視域（Blue, Green, Red）および近赤外域（NIR）の地表反射強度をそれぞれ観測し、11bitデータに量子化した画素値をピクセルごとに格納している。

本研究では、津波被災前後の観測画像が取得されており、さらにJICA（2005）による被害データが利用可能な、図-1に示す津波浸水域を解析領域とした。建造物被害の調査結果を図中に併せて示す。さらにこの領域中、分類精度を評価する目的でエリアI～Vの小領域（約300m四方）を設けている。

1 正会員 修(工) 株式会社宮城テレビ放送
2 正会員 博(工) 東北大学准教授 大学院工学研究科

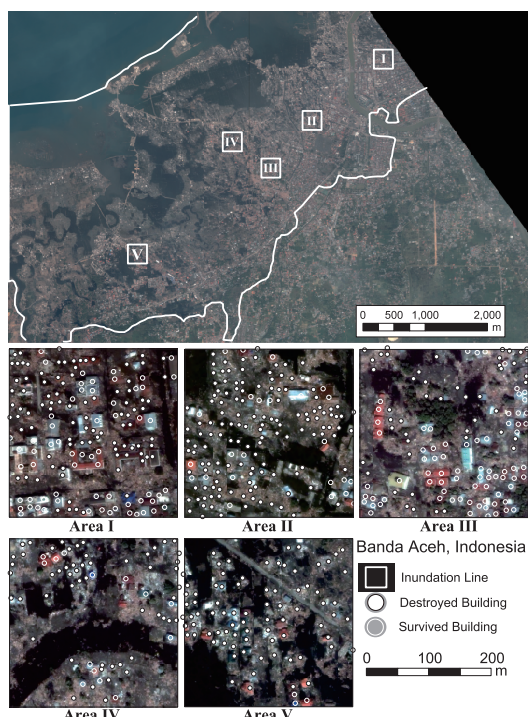


図-1 Banda Acehの津波被害画像と解析領域の設定

3. 衛星画像の解析手法

(1) 代表的な地表物と分類クラスの決定

まず、画像分類に使用する分類クラスを決定する。市街地全体を解析対象とした津波被災マップ作成のため、萱場・越村（2009）で実施した5クラスの分類項目に道路のクラスを追加し、表-1に示す6種類の地表物を分類クラスとして設定した。これらはいずれも津波被災後の画像において特徴的かつ優占度が高い代表的な地表物であり、特に本事例における津波被害の有無を規定する地表物として浸水域、土砂域、瓦礫域の広がりが見られる。また、都市被災域におけるアクセシビリティの把握に不可欠な情報として、道路の分類クラスを新たに設定した。

(2) オブジェクトの作成

オブジェクトベース画像解析の最初のステップである画像のオブジェクト分割を行う。Definiens Professional 5.0において設定すべき分割パラメータとして [Scale, Shape (Color), Smooth, Compact] があり、オブジェクトのサイズ（面積）や色情報と形状情報の重み付けなど、隣接するピクセル同士の均質性を定義することでオブジェクト形状を決定する分割アルゴリズムの閾値となる。そのため、利用する画像の解像度や解析対象となる地表物のスケール等に応じて適切に設定することが求められる。

表-1 津波被災地における地表物の分類クラス

分類クラス	判断基準
浸水域	津波により浸水した領域
土砂域	土砂の顕著な堆積
瓦礫域	破壊された家屋等の瓦礫の広がり
植生域	被害を免れた植生（樹木、芝など）
道路	舗装された道路
建造物	屋根の破壊を免れた家屋

る。本研究では建造物被害の抽出を考慮し、2003年 Iraq・Bam地震の家屋被害を QuickBird衛星画像から抽出したGusellaら（2005）を参考に、[Scale, Shape, Smooth, Compact]=[30, 0.5, 1.0, 0.0] を適用した。

この分割パラメータで元画像を分割したオブジェクトの例を図-2に示す。建造物の屋根面ごとにオブジェクトが対応しているなど、地表物との対応は良好である。

(3) Ground Truth Dataの作成と地表物毎の特徴量抽出

ここで、解析エリアI～Vにおいて、表-1の基準および現地調査データに従い、生成された一つ一つのオブジェクトを目視判読によって分類した画像分類図（Ground Truth Data, 以下GTD）を作成した（図-2(c)）。本研究では、このGTDを土地被覆状況の真値とし、分類精度の検証に用いると共に、各地表物のオブジェクトが持つ特徴量を抽出する為のサンプルとして活用する。各地表物を表すオブジェクトが持つ特徴量として、本研究では以下の3点に着目した。

- i) 分光反射特性 地表物の物性に起因する、太陽光の入射光束に対する波長毎の反射率特性を指す。本研究では萱場・越村（2009）を参考に、各オブジェクトから植生指標NDVI及び浸水指標NDII（植生／水の分光反射特性を利用した正規化バンド演算値）をそれぞれ抽出した。
- ii) テクスチャ特徴量 単一オブジェクト内に含まれるピクセルの画素値のばらつきを表し、均一な物質で構成される地表物ほど小さく、また雑多な物質を含む地表物ほど大きな値を取る特徴量として、各バンド*i* (*i*=1～4)における画素値の標準偏差 σ_i を抽出した。
- iii) 幾何学的特徴量 オブジェクトが持つ空間的特性を分類に反映させる目的で、オブジェクトの面積 ($A[m^2]$) 及び長軸-短軸比 (L/W) をそれぞれ抽出した。

(4) 教師付き画像分類と精度評価

a) 最尤法による教師付き分類

まずベースとなる最尤法による教師付き分類をエリアI～Vの元画像（ピクセル画像）とオブジェクト画像のそれぞれに対して同一の教師データを用いて実行し、オブジェクトベース解析の有効性の検証と分類精度の定量的

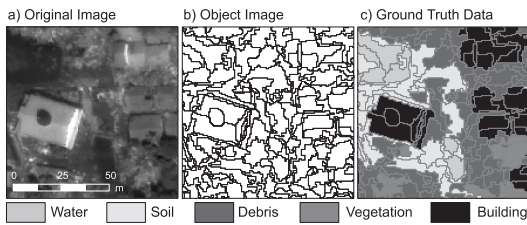


図-2 オブジェクト画像の作成例 (Area III)。(a)元画像、(b)分割結果、(c)目視による分類図 (GTD)

評価を行う。教師データは、それぞれの領域内で各地表物のオブジェクトから5箇所ずつ（建造物は屋根の色ごとに）取得した。

b) 分類結果と精度評価

それぞれの手法による分類結果の例を図-3に示す。また、エリアI～Vを総合した分類効率表（高木・下田，2004）を作成し、分類精度を面積ベースで評価した結果を表-2に示す。表中において、ユーザ精度は自動分類結果の的中率を、プロデューサ精度はGTDに対する網羅率を表す。プロデューサ精度が低い場合は他クラスへの誤分類による過小評価，逆にユーザ精度が低い場合は他クラスからの誤分類による過大評価が多く発生していることを表している。また総合精度は画像全体の分類精度を示す。

結果を比較すると、オブジェクトベース解析では全体的にノイズの発生が抑えられることで、目視による解釈に近い結果が得られていることが分かる。また分類精度においても総合精度が70.6%となり、従来のピクセルベース解析と比較して画像全体の分類精度が約5%程度向上することが示された。地表物毎に見ると、特に瓦礫や植生において分類精度が向上しており、これは画素値のばらつきが大きく微小領域の発生しやすいクラスにおいて、オブジェクトベース解析によるノイズの除去が有効に機能したためと考えられる。しかし総合精度は70%程度と、一般的な分類結果の採用基準とされる80%には及ばない。この分類効率表の作成により、精度低下の原因として道路の全体的な過大評価や、特定クラス間相互の誤分類（建造物と瓦礫域、瓦礫域と土砂、道路と建造物など）が考えられ、色情報の類似した地表物を識別困難である教師付き分類では限界があることが分かった。

4. 画像再分類による精度の向上

前章で述べた全ての誤分類を解消するのは極めて困難である。限られた時間内で最大限の分類効率を達成するため、相互の誤分類が最も多く発生するクラス間に対し、2つのクラスを効果的に区別する特徴量を検討して再分類を実施する。再分類の流れを図-4に示す。また再分類

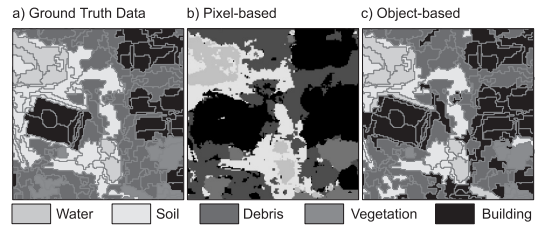


図-3 GTDと教師付き分類結果の比較。(a)GTD、(b)ピクセルベース解析、(c)オブジェクトベース解析

表-2 分類効率表による分類精度の評価。(a)ピクセルベース教師付き分類、(b)オブジェクトベース教師付き分類

(a)		分類結果						Total [m ²]	プロデューサ精度 [%]
		水没域	土砂域	瓦礫域	植生域	道路	建造物		
Ground Truth Data	水没域	29,592	5,868	824	0	0	1,743	38,026	72.3
	土砂域	2,893	48,939	8,835	49	0	11,111	71,826	57.8
	瓦礫域	1,308	9,432	130,514	707	109	16,151	158,221	60.4
	植生域	1,000	1,671	2,770	26,161	0	2,720	34,321	81.0
	道路	0	0	0	0	639	0	639	92.7
	建造物	3,694	4,349	21,656	84	368	91,280	121,431	69.3
Total [m ²]		38,487	70,258	164,598	27,001	1,116	123,005	424,465	
ユーザ精度 [%]		77.0	65.0	67.9	55.0	4.54	70.7	総合精度 [%]=65.5	
(b)		分類結果						Total [m ²]	プロデューサ精度 [%]
		水没域	土砂域	瓦礫域	植生域	道路	建造物		
Ground Truth Data	水没域	32,310	7,305	1,946	0	2	1,681	41,717	77.7
	土砂域	2,968	54,204	5,986	53	49	12,052	75,588	72.0
	瓦礫域	1,257	18,002	112,686	772	1,240	34,669	169,246	66.8
	植生域	1,091	3,176	1,673	27,895	0	3,513	37,485	74.7
	道路	2	4	4	4	698	13	727	96.3
	建造物	3,489	7,537	22,959	85	4,643	94,860	134,065	71.0
Total [m ²]		41,118	90,227	145,255	28,809	6,630	146,789	458,827	
ユーザ精度 [%]		78.6	60.1	77.6	96.8	10.5	65.4	総合精度 [%]=70.6	

に用いた特徴量および閾値は図-5に例示する。ここで使用した再分類に用いる特徴量とその閾値については Kouchi・Yamazaki (2007) など既往研究を参考にして決定した。

植生域 NDVIの値が $NDVI>0.3$ を満たす全てのオブジェクトを植生域として再分類する (図-5(a))。

水域 萱場・越村 (2009) の提案した水域指標NDIIに着目し、 $NDII>0.25$ を閾値として全てのオブジェクトを再分類する (図-5(b))。

道路・建造物 オブジェクトの面積 A と長軸短軸比 L/W に着目し、 $A>40m^2$ かつ $L/W>3.0$ を閾値として再分類する (図-5(c))。

建造物と瓦礫 近赤外に着目し、各オブジェクト内のバンド4の統計量 (標準偏差) $\sigma_4<55.0$ の瓦礫オブジェクトを建造物として、 $\sigma_4>55.0$ の建造物を瓦礫としてそれぞれ再分類 (図-5(d)) する。

瓦礫と土砂 瓦礫と土砂の区別には、津波来襲後の土壌水分量が増加していることに着目し、 $NDII>0.05$ の瓦礫域を土砂に、 $NDII<0.05$ の土砂を瓦礫域としてそれぞれ再分類する (図-5(e))。

以上の流れから最終的な分類図を作成し、被災地の地

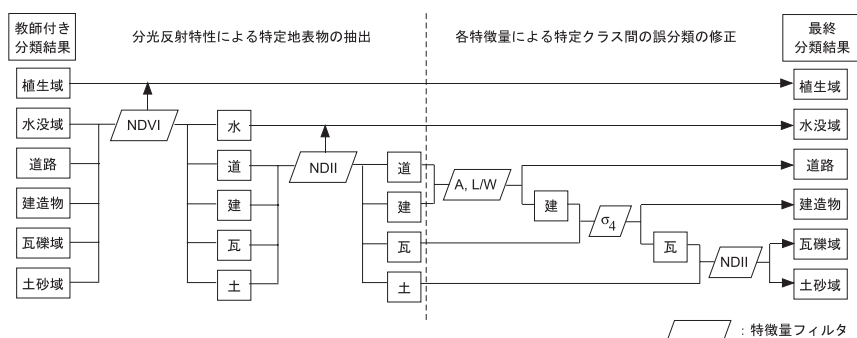


図-4 各クラス再分類の流れ

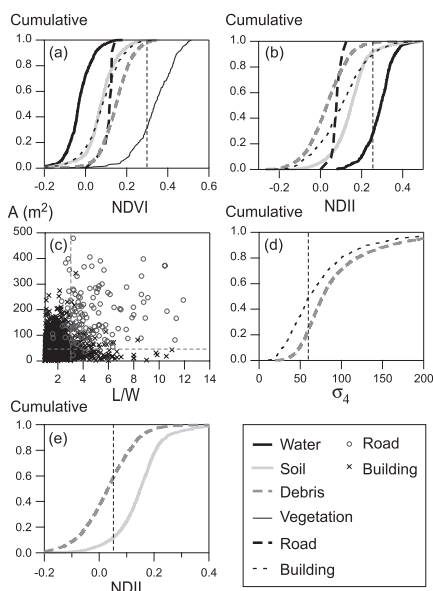


図-5 再分類に用いた地表物毎の特微量および閾値の表示

表-3 改良フローに基づいた分類精度の評価

	分類結果						Total [m²]	プロデューサ精度 [%]
	水没域	土砂域	瓦礫域	植生域	道路	建造物		
Ground Truth Data	水没域	31,987	6,343	890	0	1,884	41,104	77.8
	土砂域	3,128	52,900	9,550	53	0	12,010	68.1
	瓦礫域	1,414	10,195	141,079	764	118	171,029	82.5
	植生域	1,080	1,806	2,994	28,278	0	37,099	76.2
	道路	0	0	0	0	691	691	100
	建造物	3,993	4,701	23,409	91	398	98,669	75.2
Total [m²]	41,603	75,945	177,923	29,186	1,207	132,963	458,827	
ユーザ精度 [%]	76.9	69.7	79.3	96.9	57.3	74.2	総合精度 [%]=77.1	

ずとも、より効率的かつ迅速な被害把握を行うことができる。

6. 結論

高分解能衛星画像のオブジェクトベース解析に基づき、津波被災地マップを作成する画像解析手法を開発した。得られた知見を以下に列挙する。

津波被災地の画像分類における代表的な地表物を、浸水域、土砂域、瓦礫域、植生域、道路、建造物の6クラスに分類し、各クラスのオブジェクトが持つ光学・テクスチャ・幾何学的特徴をそれぞれ明らかにした。

最尤法による教師付き分類を行うときに生じるクラス間の誤分類を定量的に評価し、上記のオブジェクト特性を再分類パラメータに取り入れた画像再分類手法を構築した。これに従って簡便かつ高精度に津波被災地画像の地表分類図を作成し、津波被災地マップとして活用する手法を提案した。

被災地マップから得られた水域・土砂域・瓦礫域の面積と家屋被害率には正の相関が見られた。画像分類結果から建造物被害棟数を推定するための関係を明らかにすることができれば、家屋一棟毎の被害判読に頼らずとも、より効率的かつ迅速な被害把握を行うことができる。津波被災地マップの活用により、被災地の土地被覆状況や被害の面的な情報、家屋被害量など、災害救援に必要な情報を迅速かつ効率的に入手可能であることが分かった。今後は、本手法を他の事例に適用する際のパラメ

表状態を表した津波被災地マップとして提示する(図-6)。また、分類効率表による精度評価の結果を表-3に示す。

5. 被災地マップの活用手法の検討

ここでは、被災地マップの活用例として、被災地を500m四方の検査領域に区切り、画像分類結果と建造物被害の調査データ(約49,000棟分)を関連づけることで、被災地マップから家屋被害の量的推定を行う手法を検討する。

図-6に500m四方の検査領域を設定し、それぞれに含まれる地表物の面積と建造物被害情報(たとえば図-1, Destroyed or Survived)の関連づけを行う。ここでは、津波の被害を反映した「水域・土砂域・瓦礫域」に着目し、検査領域内での面積比率と建造物被害率との関係を図-7に示す。両者には正の相関が見られたことから、画像分類結果から建造物被害棟数を推定するための関係を明らかにすることができれば、家屋一棟毎の被害判読に頼ら

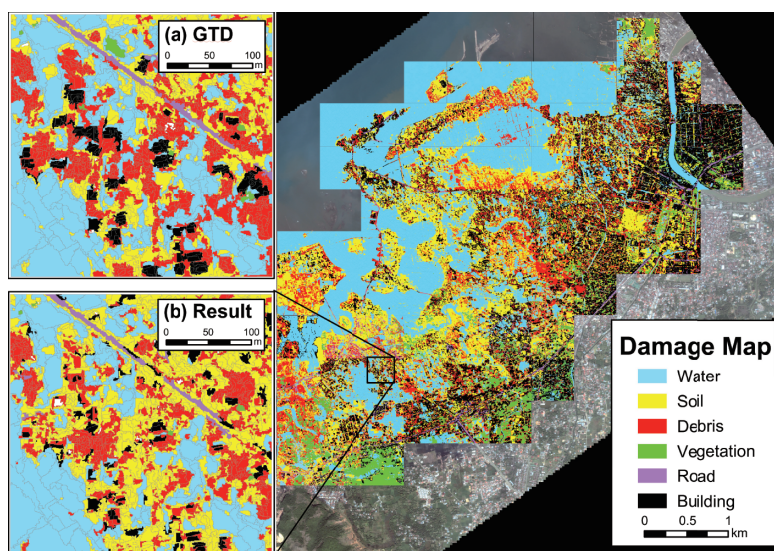


図-6 津波被災地の地表分類図出力結果(津波被災地マップの作成例)。(a)Ground Truth, (b)本研究による分類図

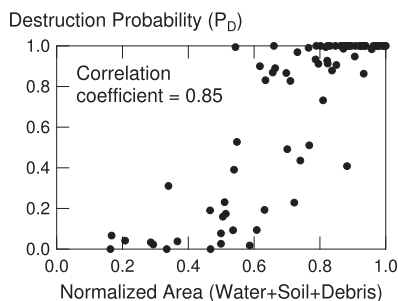


図-7 被災地マップから得られた浸水域・土砂域・瓦礫域の基準化面積と建物破壊率の関係

ータの検討や、異なる分解能・観測バンドを持つ衛星画像に適用することを通じ、本手法の汎用性を高めていくことが課題である。

謝辞：本研究の一部は平成20年度産業技術研究助成事業（代表：越村俊一，プロジェクトID：08E52010a），および科学研究費補助金（代表：越村俊一，課題番号：22681025）の補助を受けて実施された。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 大西紀子・村上拓彦・溝上展也・吉田茂二郎（2005）：オブジェクトベース画像分類による林相区分，九州森林研究，No.58，pp.131-134.
- 萱場真太郎・越村俊一（2009）：地表物の分光反射特性を考慮した都市域津波被災地の衛星画像解析，海岸工学論文集，第56巻，pp.1421-1425.
- 高木幹雄・下田陽久（編）（2004）：新編画像解析ハンドブック，東京大学出版会，1991p.
- Gusella, L., B. J. Adams, G. Bitelli, C. K. Huyck (2005) : Object-Oriented Image Understanding and Post-Earthquake Damage Assessment for the 2003 Bam, Iran Earthquake, Earthquake Spectra, Vol. 21, No.s1, pp.S225-S238.
- Japan International cooperation Agency (JICA) (2005) : The study on the urgent rehabilitation and reconstruction support program for Aceh province and affected areas in north Sumatra, *Final Report* (1), Vol.~IV : Data book.
- Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura(2009) : Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, JSCE, Vol.51, No.3, pp.243-273.
- Kouchi, K. and F. Yamazaki (2007) : Characteristics of Tsunami-Affected Areas in Moderate-Resolution Satellite Imagery, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.45, No.6, pp.1650-1657.