

リモートセンシング技術を用いた津波被害の把握

越村 俊一*, 萱場 真太郎*

1. 序論

災害発生直後の被災地を探索し、その被害をできるだけ早く把握するための技術として、近年リモートセンシング、地理情報システム（GIS）を統合した新しい被害把握技術が提案されている。特に、衛星画像などのリモートセンシング技術を活用することで、能動的に被災地の情報を入手することが可能になるため、救命・救急活動や復旧活動の迅速な意思決定に役立てられると期待されている。近年では解像度が 1m 以下の高分解能商用観測衛星（QuickBird, IKONOS など）が打ち上げられ、民間でも高解像度の画像が利用可能となった。これにより、従来の衛星（LANDSAT や SPOT など）では困難だった建造物一棟一棟の明瞭な区別が可能となり、災害による建物被害の程度も目視により大まかに判別ができることとなった。

災害研究におけるリモートセンシング技術の応用は、地震による被災地や建物被害、地形変化や地盤変動の抽出を中心として研究が進められてきたが、2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ島沖地震津波を契機として、津波災害研究においても衛星画像をはじめとするリモートセンシング技術を活用されることとなったことは記憶に新しい。

地震や津波災害といった巨大災害の発生直後は、激甚な被害を受けた地域からの情報が断片的となり、被害全容の把握がきわめて困難になるとともに、被災地の救援活動や復旧活動も難航する。従来の津波研究のアプローチでは、津波発生から 2 週間を目途に、被災地周辺沿岸部の津波来襲状況や被害の把握を

目的として国際的な現地調査チームを結成し、現地に派遣してきた。しかし、被災地が広大である場合、激甚な被災地がどこにあるかを把握することが困難であると同時に、現地調査期間や人的資源の制約により被害全容を把握するには自ずと限界があった。

本稿では、近年その技術的発展が著しい高解像度衛星画像や地理情報システム（GIS）を活用することにより、高分解能衛星画像の目視判読による津波被害把握とその活用、津波被災地の状況を把握するための画像解析手法について検討する。

2. 津波被害把握における高解像度衛星画像の利用

リモートセンシング衛星に搭載されたセンサは、対象とする物体に相互作用した、または対象物体から放射された電磁波を検出するものである。その電磁波を受動的に検出するものを受動システム、衛星から電磁波を放出し対象物に反射・散乱して戻ってくる波を検出するものを能動システムとして位置づけている¹⁾。受動システムは、主に太陽光からの紫外・可視・近赤外の帯域の電波を受信したり、物体が放出する熱放射（熱赤外）を検出する。我々が日常的に活用している Google Maps や Google Earth のコンテンツは、可視の帯域の電磁波を検出した光学画像を利用している。近年に打ち上げられた人工衛星に搭載された光学センサは、家屋一棟毎を判読できる高分解能のものがある。その代表的なものが IKONOS（1999 年に米スペースイメージング社が打ち上げ、2000 年にサービスを開始）と QuickBird（2001 年に米 Digital Globe 社が打ち上げ）であり、それぞれ 1m, 60cm という高い空間分解能をもつ。従来の

*東北大学大学院工学研究科、災害制御研究センター

光学画像の空間分解能は高くとも数メートルであり、家屋一棟毎の被害有無の判読は不可能であったが、IKONOS や QuickBird の画像を利用すれば津波被災地における家屋被害等の詳細な判読を行うことができる。

図-1 に示すのは、2004 年スマトラ島沖地震津波で壊滅的な被害を受けたスマトラ島北部 Banda Aceh の IKONOS 画像（被災前と後のもの）とその被害判読結果（大破、流失）である²⁾。ここでは、被災前後の画像を屋根の有無に着目して比較し、目視により家屋被害の判読を行った。衛星画像を利用する最も大きな意義は、現地調査では不可能である、被害の全容に関する面的な情報を得ることができることにある。

3. 津波数値解析との統合による津波フラジリティの構築

津波被害の量的な推計には、対象とする地域の推定津波高や津波浸水深（外力）を数値解析により求め、それら外力との関連で被害を推計するのが一般的である。例えば、首藤

(1992) の津波強度指標（表 1）は、既往の津波被害実績から津波高および浸水深と被害程度の関係を丹念に調べたものであり³⁾、津波浸水による家屋被害の推計に最も多く利用されてきた。中央防災会議では、首藤の津波強度指標を採用し、数値解析により得られた津波浸水深分布に応じて表 1 に示す建物被害率（または全壊・半壊）を乗じて被害棟数を算出している。

一方、近年の津波数値解析技術は、その空間的・時間的分解能が劇的に向上し、場合によつては数 m の空間分解能で浸水計算を実施することが可能になった。衛星画像から判読された建物被害情報と津波の外力情報を統合し、津波外力の大きさと建物被害の大きさを関連づけることができれば、首藤の津波強度指標よりも詳細な津波被害推定指標が得られる。ここでは、新しい津波被害想定指標としての津波フラジリティを構築する。津波フラジリティとは、建物被害率を、津波外力の大きさ（津波遡上高、浸水深、流速、流圧）の関数として表したもので、地震工学の分野

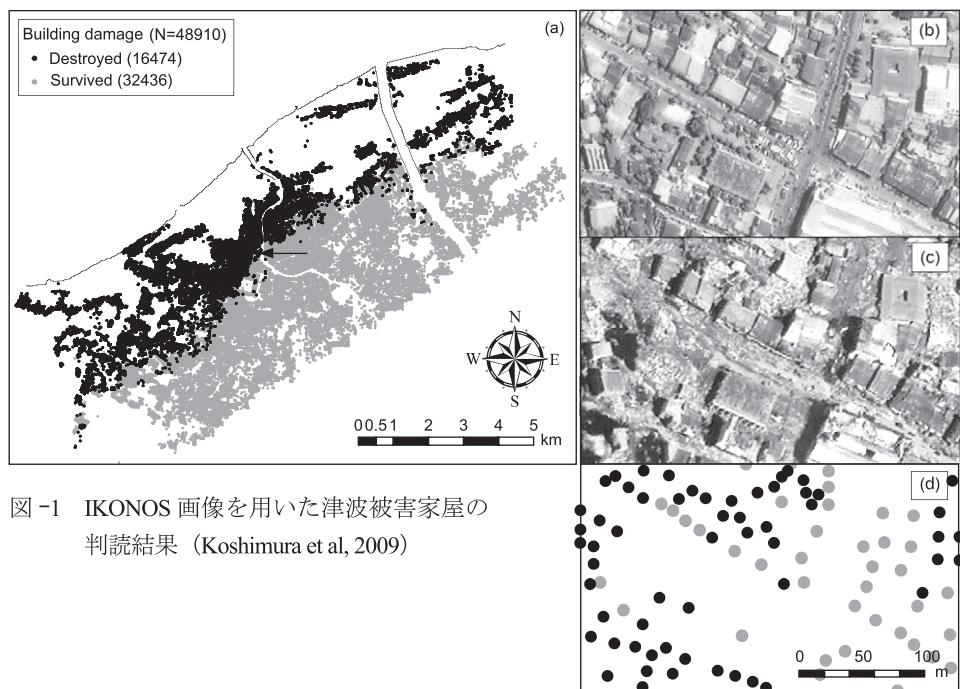


図-1 IKONOS 画像を用いた津波被害家屋の
判読結果 (Koshimura et al, 2009)

表-1 首藤（1992）の津波強度指標と被害の関係（オリジナルの表から構造物被害・漁船被害の部分を抜粋）

津波強度	0	1	2	3	4	5
津波波高(m)	1	2	4	8	16	32
木造家屋	部分的破壊	全面破壊				
石造家屋		持ちこたえる		全面破壊		
鉄・コン・ビル		持ちこたえる				全面破壊
漁船		被害発生	被害率50%	被害率100%		
打上高(m)	1	2	4	8	16	32

において建物被害関数（フラジリティ関数）として研究が進められてきた4)。

上記の被害把握結果と、津波数値解析結果を融合することにより、建物被害関数（津波フラジリティ）を構築する。津波フラジリティの構築は、以下の手順で行う。

- (1) 被害情報を取得する。ここでは2004年インド洋大津波災害前後のIKONOS画像を利用したスマトラ島Banda Acehの家屋被害判読結果（図-1）を採用する。
- (2) 津波外力を推定する。対象地域の津波氾濫解析を実施し、最大浸水深および最大流速分布を得る（図-2）。計算結果は、現地調査結果等との比較を通じてその精度を検証しておく。
- (3) 家屋被害率Pを求める。建物被害率の母数は、浸水深（または流速）の範囲に対して同数となるように設定する。ここでは母数を1000棟程度となるよう浸水深の範囲を決定してヒストグラムを作成する（図-3）。
- (4) 外力と被害率の関係から、被害推定式を求める。外力xに対する家屋被害率Pは、村尾・山崎（2000）に倣い、標準正規分布の累積確率分布関数を用いて、正規分布または対数正規分布で

表せると仮定し、(1)式のように表現する。ここで λ (μ)、 ζ (σ) は x または $\ln x$ の平均値および標準偏差である。これらのパラメータは、確率紙を用いた最小二乗法により求める。

$$P=\Phi[(\ln x - \lambda)/\zeta] \text{ or } P=\Phi[(x - \mu)/\sigma] \quad (1)$$

図4に、得られた津波フラジリティ（浸水深に対する建物被害率）を示す。浸水深が2mを越えると家屋被害率は急激に増加し、4mではほとんどの建物が全半壊となることが分かる。ただし、ここで示した津波フラジリティは、津波外力と被害の関係において建物構造や土地利用、津波氾濫流の状況など

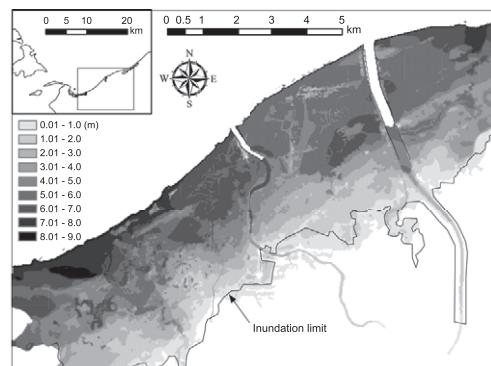


図-2 スマトラ島 Banda Aceh の津波浸水計算結果

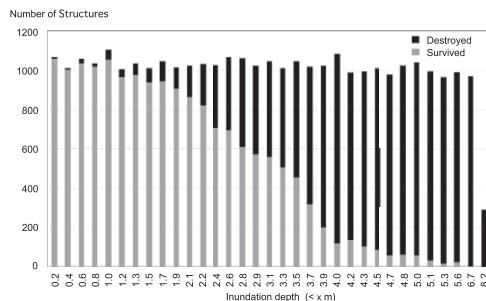


図-3 被害家屋棟数と浸水レベルのヒストグラム

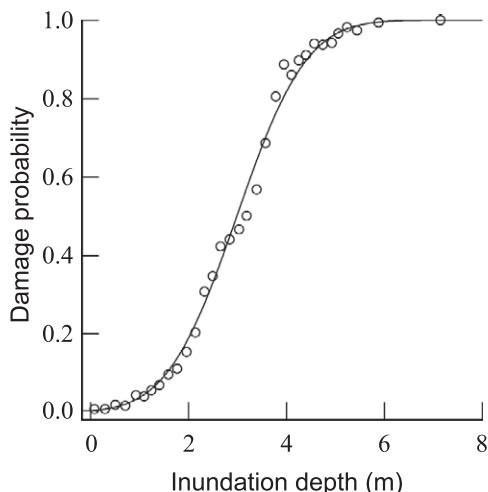


図-4 2004 年スマトラ島沖地震津波の事例から得られた津波フラジリティ（浸水深と建物被害率の関係）

(サイトコンディション) により異なることに注意が必要である。また、津波外力を推定する際の解析精度にも依存するため、利用にあたっては注意が必要である。

4. 高解像度衛星画像を利用した建物被害判読

次に、高解像度衛星画像を利用した建物被害判読手法について述べる。図-5 は、2007 年 4 月 1 日 (UTC) に発生したソロモン諸島沖地震津波の被災地となった Ghizo 島の QuickBird 衛星画像である。QuickBird 衛星画像は、パンクロマティック（白黒）画像

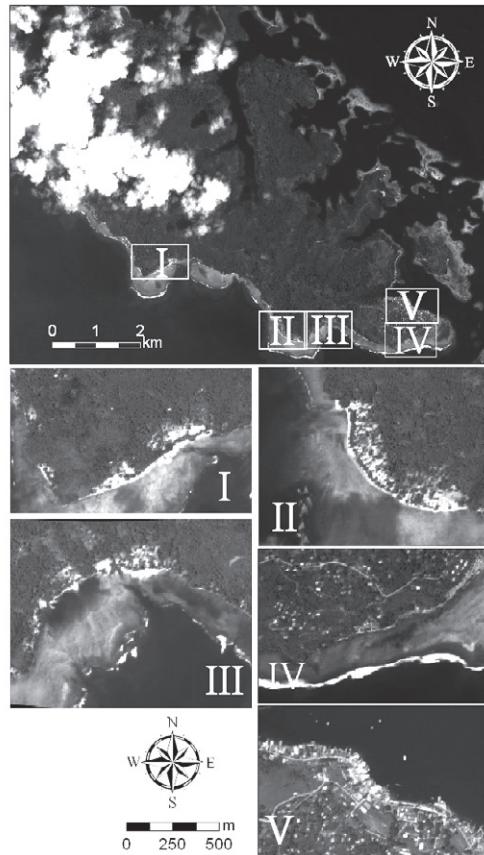


図-5 Ghizo 島の QuickBird 衛星画像 (2007 年 4 月 5 日撮影)

(分解能 0.6m) と可視 3 バンドと近赤外域 1 バンドのマルチスペクトル画像 (分解能 2.4m)，があり，両者を合成して高分解能のパンシャープン画像 (分解能 0.6m) が得られることが特徴である。

図-5 に示した領域 I から V のそれぞれにおいて、被災前後の画像を目視で比較して建物被害を評価する。評価基準は Miura et al. (2005) を参考に、図-6 および表-2 に示す 5 段階で設定した。判読結果を GIS 上で表示し、建物被害の空間分布を明らかにする。図-7 に、領域 IV 及び V での判読結果を例示する。領域 IV と V は半島の南北に隣り合って位置しているが、領域 V ではほとんどの



図-6 津波による建物被害の目視判読例

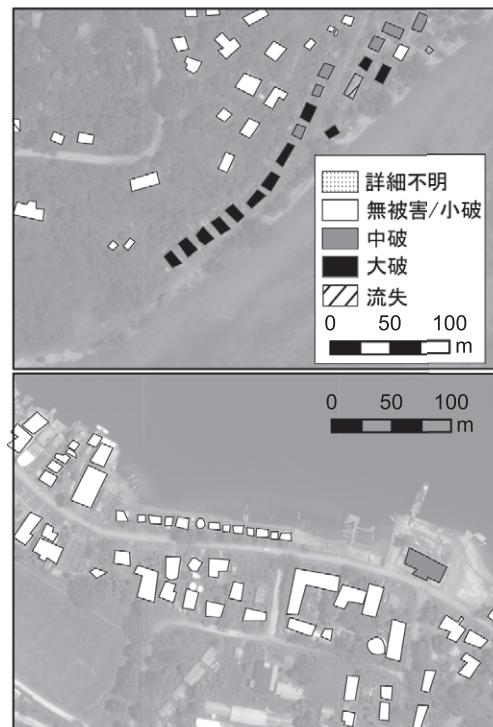


図-7 QuickBird 画像を用いた建物被害判読結果の例

表-2 建物被害の目視判読基準

評価	判読基準
不明	新しく建設されたと考えられる
無被害 / 小破	画像から確認できる明確な変化なし
中破	建物形状に変化が見られるが屋根は残存する
大破	屋根は無くなっているが、建材は残存する
流失	建材も含めて津波により流失している

建物が無被害であったのに対し、領域IVでは大きな建物被害が発生していたことが分かる。また領域I-IIIにおいては、大破もしくは流失の被害を受けた建物が非常に多いことが分かった。現地調査の結果では、領域I-IVにおける最大津波高はそれぞれ4mを超えていたのに対し、領域Vでは2m未満であったこと、また領域Vには港湾施設が集中しており、領域I-IVに多い伝統的高床式住居に比べ頑強な構造物が多かったことが確認さ

れており、被害判読結果はこの津波の特徴を反映していると言える。

次に、津波の浸水域を推定する。図-8に示すのは、津波遡上域のQuickBird画像の津波来襲前後の比較である。この画像を注意深く観察すると、被災前後で植生が著しく変化した範囲とその境界線（津波遡上線）が明瞭に確認できる。津波遡上が確認された場所は、もともとそこにあった植生が津波氾濫により破壊される、塩水遡上により枯死する

などの状況が確認されることがある。すなわち、植生の活性度に着目すれば、津波の浸水域を推定することが可能である。この境界線上にある 100 地点の NDVI 値を教師データとし、その平均値以下の NDVI 値を持つピクセルを浸水域として分類する。ここで、NDVI はピクセル毎に次式で算出される。

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad (2)$$

IR, R はそれぞれ近赤外域バンド、可視域赤バンドの反射率に対応し、QuickBird 画像においてはそれぞれバンド 4, バンド 3 が相当する。結果、津波遡上線上の NDVI 値は 0.340 を平均として上下に 0.05 ほどのばらつきが見られた(図-9)。この値を閾値として、それ以下の NDVI 値を持つピクセルを浸水域として抽出する。図-10 に、領域 I での抽出結果と現地調査時の遡上高調査点を重ねて示す。この図より、浸水域の抽出結果は実際の津波遡上の様子を良好に再現していることが分かる。

5. 現地調査結果との融合による津波フラジリティの構築

3 章では、衛星画像を用いた津波被害判読結果と津波数値解析との統合について述べた。対象領域の詳細な津波氾濫解析を実施できる場合には、詳細な外力情報が得られるので津波フラジリティの構築も可能である。しかし、詳細な津波氾濫計算を実施するには、対象領域の高い精度・分解能をもつ海底地形・陸上地形の情報(メッシュデータ)を必要とする。ここでは、詳細な数値解析が実施できない場合に、現地調査結果を利用した津波フラジリティの構築について述べる。

まず、前章で得られた建物被害状況と浸水域から、各領域における浸水域内の建物被害率を求める。ここでは、特に大破以上の被害を受けた建物を被害建物と定義する。浸水域内にある建物棟数、うち大破以上の被害を受けた建物数を数え、各領域の建物被害率を求

める。

次に、現地調査結果から得られた各領域での津波高と建物被害率の関係を示す津波フラジリティを構築する。ここでは、大破以上の被害を受けた建物について、津波フラジリティを被害率 P および測定された津波高の関連で求める。津波フラジリティの構築手法自体は、上述したものと変わらない。現地で測定された津波高の空間分布を作成し、領域毎に最大測定値、平均値、下限値を求め、衛星画像から判読した家屋の大破率との関係をプロットする。次に、上記関数を確率紙を用いた最小二乗法によりパラメータ μ および σ を決定する。図-11 に結果の一例を示す。これは各領域で計測された最大津波高に対する建物大破率を示したものである。津波高 3m を超えると被害率は急激に増加し、5m ではほぼすべての建物が大破・流失していたことが分かる。

6. 臨海都市域の画像解析による被災状況の把握

4 章に示したように、沿岸が都市化していない場合には植生指標を用いた津波浸水域の把握が可能である。しかし、都市域の津波被災地では、破壊された家屋・構造物の瓦礫、土壌浸食、市街地内に滞留する濁水等が存在し、広範囲にわたる津波被害の程度を効率良く判読して集計するのはきわめて難しい。ここでは前述の対象物の分光反射特性に着目して、津波の被災状況を自動判読するための画像処理手法を検討する。

解析対象領域は 2004 年インド洋大津波の被災地である Sumatra 島バッダ・アチェ市街地中心部とする(図-12)。解析に用いるのは QuickBird の 4 バンド Pansharpen 合成画像である。分解能が 0.6m と非常に高いため、目視でも津波の浸水、瓦礫、破壊を免れた家屋漂流・座礁した船舶、植生などが混在していることが判断できる。また、図には各バンドの輝度値(DN)の分布も示してある。対象物により、バンド毎に得られる反射光の強

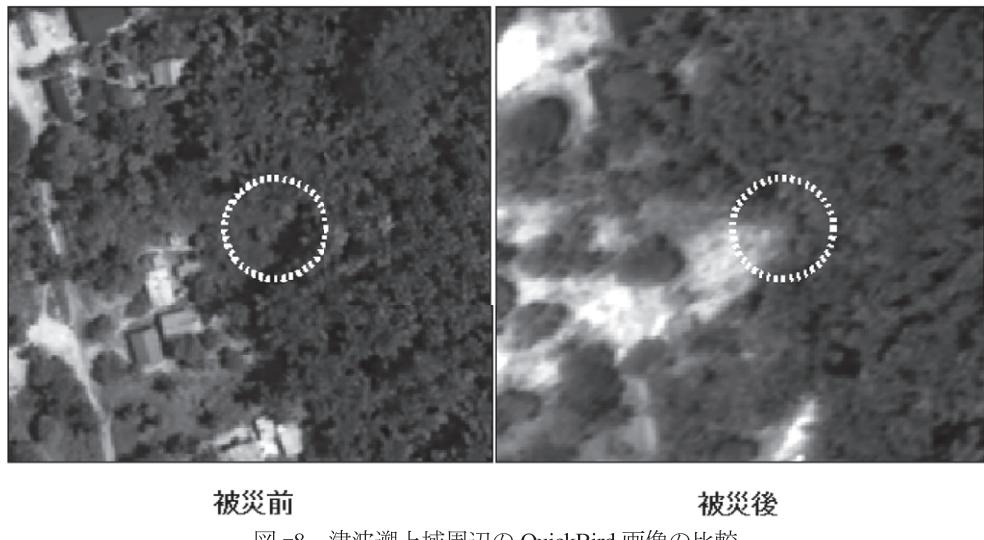


図-8 津波遡上域周辺のQuickBird画像の比較

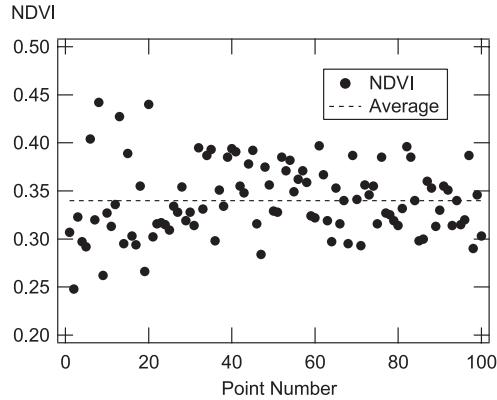


図-9 津波遡上域周辺のNDVI（植生指標）の分布較

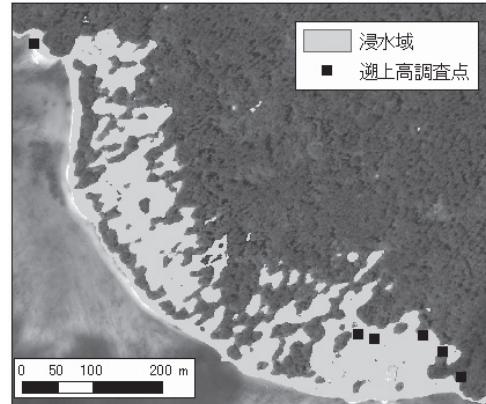


図-10 NDVI から推定した津波浸水域

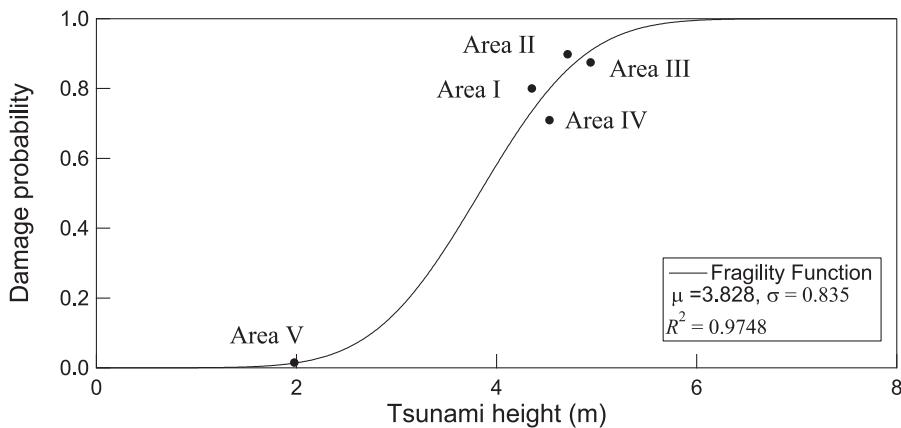


図-11 2007年ソロモン諸島沖地震津波で得られた津波フラジリティ（各領域で測定された最大津波高に対する建物大破率）

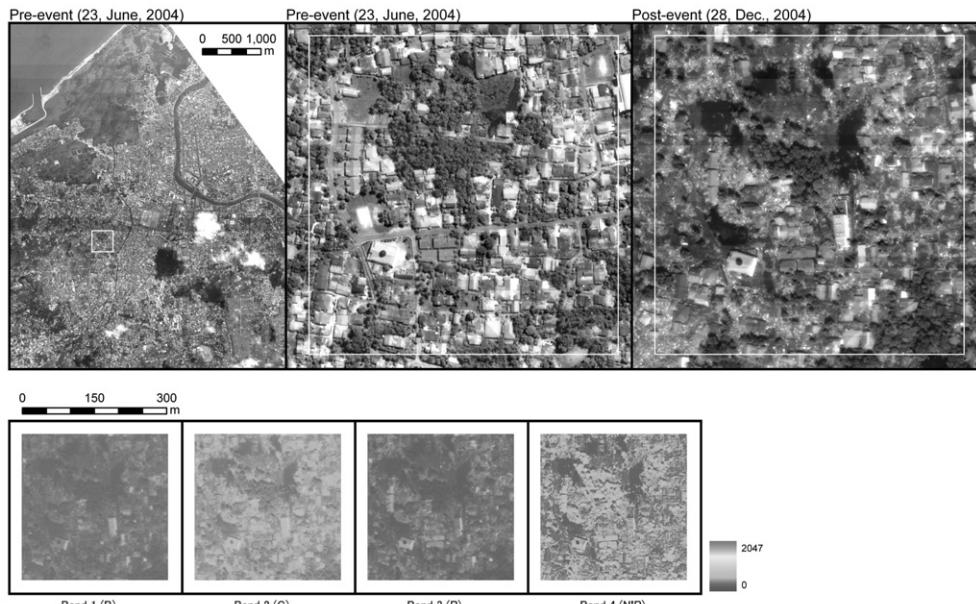


図-12 解析対象領域 (Sumatra 島バンダ・アチェ)

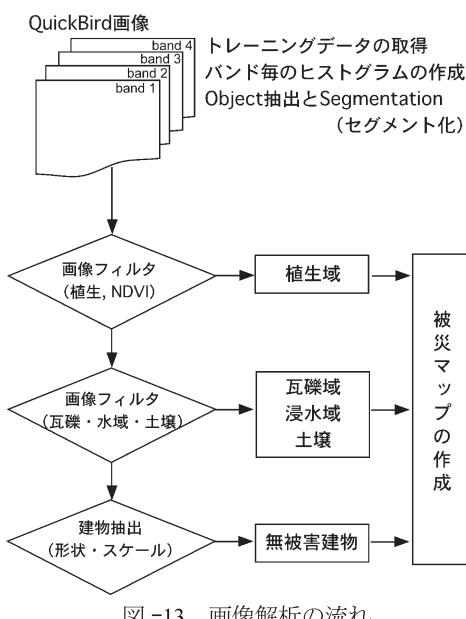


図-13 画像解析の流れ

度が異なることがわかる。

解析の流れを図-13 に示す。衛星データは、太陽光が地表物に反射した結果として、人工衛星の工学センサにとらえられた電磁波の強度を、周波数帯毎のディジタルナンバ (DN) で表現してある (QuickBird 画像は 11bit で

0-2047 の DN を各バンド毎の画像がもつ)。本研究では、地表の対象物に反射した太陽光の周波数依存性 (分光反射特性) を利用し、地表物の種類に応じた画像フィルタを階層的かつ選択的に利用して各種被害の抽出を行う。具体的には以下の手順である。

- 似通った特性 (バンド毎の DN) をもつピクセルの集合をオブジェクトとして分割し、各オブジェクトがもつ DN の統計的な性質 (分散) と幾何学的な性質 (形状と大きさ) を特徴化する。
 - 被害を免れた植生は NDVI を変数とするフィルタで処理し、植生域を抽出する。
 - 瓦礫域、浸水域および土壤域は、画像の目視判読と現地調査で確認した領域をトレーニングエリア (図-14) として、図-15 に示すバンド毎の DN のヒストグラムを作成し、DN の分散を考慮した数値フィルタを作成する。
 - 破壊を免れた構造物 (人工物) は、その形状とスケールにより分類し、対応するオブジェクトを抽出する。
- 分光放射計による観測を通じて、各トレ

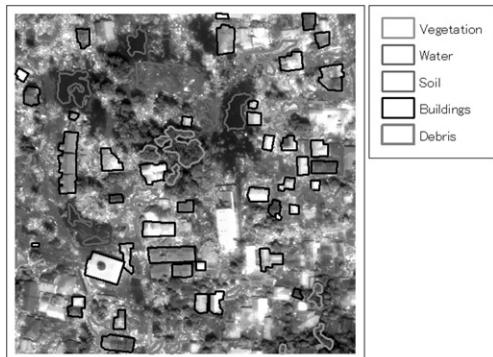


図-14 地表物毎のトレーニングデータ

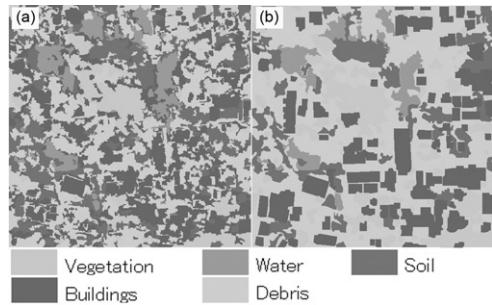


図-16 トレーニングエリア（図-14）から抽出した地表物毎のDNのヒストグラム

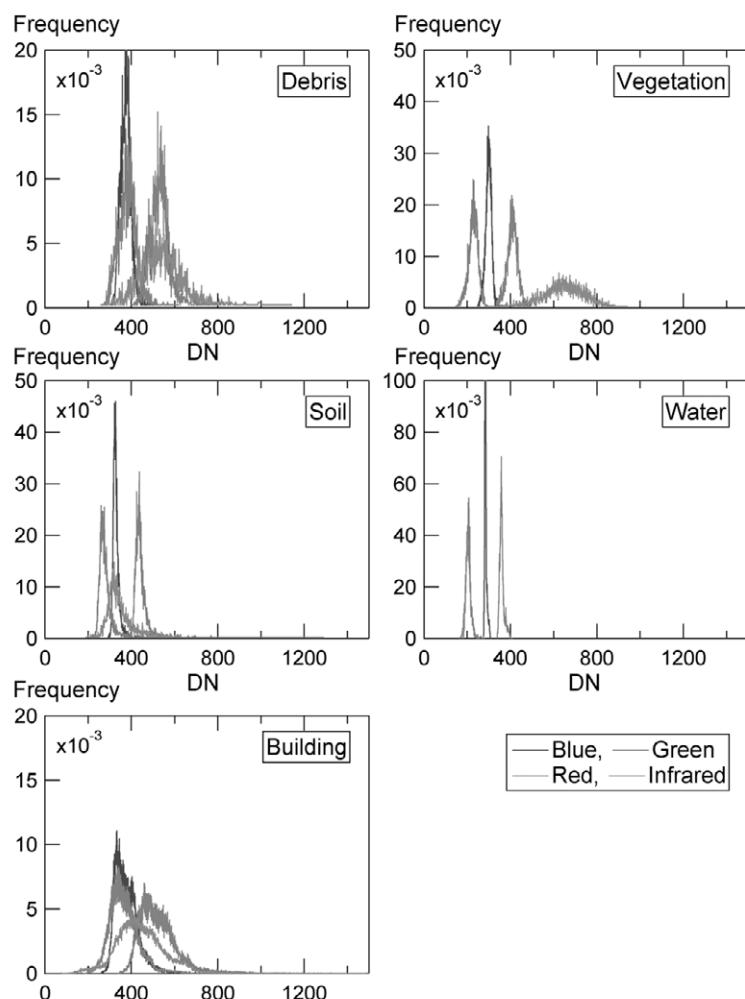


図-15 得られた被災マップ（左：解析結果、右：現地調査と目視判読から得られた分類結果）

ニングエリアにおける地表物の分光反射特性を詳細に調べた結果、その種類に応じて、センサにとらえられた電磁波の輝度が特徴的に現れていることが分かった。上記手法によって得られた結果（津波被災マップ）を図-16に示す。解析手法の妥当性の検証のため、目視判読による分類結果も合わせて示してある。地表物の分光反射特性を考慮することにより、目視に近い精度での画像分類が可能であることが分かる。

7. おわりに

津波被害の早期把握を目的としたリモートセンシング技術の応用について、筆者らがこれまで実施してきた研究を中心として述べた。従来、現地調査からしか得られなかった津波被害の情報が面的に得られるという点で、リモートセンシング技術は津波被災地および被害の早期把握に貢献できる。現時点では建物一棟毎の目視による判読は可能であると言えるが、より迅速な被害把握のためには、得られた画像から被害を自動で抽出するための高度な画像処理技術を開発する必要がある。本研究では、津波被災地の自動抽出を目指した画像解析手法について検討した。本手法を応用することにより、広域にわたる津波被災地の状況を衛星画像から効率良く抽出することが可能であることが示された。今後は、異なる分解能・観測波長帯をもつ人工衛星のセンサによる判読結果の検証や他の被災地における適用を通じて、本手法の汎用性を高めていくことが課題である。

謝辞

2007 年ソロモン諸島沖地震津波の現地調査チームの測定結果を防衛大学校 藤間功司教授より提供頂いた。本研究の遂行にあたり、独立行政法人 原子力安全基盤機構（代表：今村文彦）、科学研究費補助金（代表：

越村俊一、課題番号：19681019），産業技術研究助成金（代表：越村俊一、プロジェクト ID：08E52010a）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

- 1) W. G. Ress, リモートセンシングの基礎（第2版），久世宏明，飯倉義和，竹内章司，吉森久（共訳），森北出版，320 p., 2005.
- 2) Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura, Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, JSCE, in press, 2009.
- 3) 首藤伸夫, 津波強度と被害, 東北大津波工学研究報告, 第9号, pp101-136, 1992
- 4) 村尾修, 山崎文雄:自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害閾数, 日本建築学会構造系論文集, 第527号, pp.189-196, 2000.
- 5) Vu, T. T. , M. Matsuoka and F. Yamazaki, Dual-scale approach for detection of tsunami affected areas using optical satellite images, International Journal of Remote Sensing, Vol. 28, Nos. 13-14, pp. 2995-3011, 2007.
- 6) Vu, T. T. , F. Yamazaki and M. Matsuoka, Context-based Detection of Post-disaster Damaged Buildings in Urban Areas from Satellite Images, Urban 2007 (4th IEEE GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas) , Urban Remote Sensing Joint Event 2007, ID: DIS6, 5p., 2007.
- 7) 松岡昌志, 山崎文雄, 人工衛星 SAR 強度画像を用いた被害地域検出手法の最近の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, No.558, pp.139-147, 2002.