



## リモートセンシングによる2011年東北地方太平洋沖地震津波の広域被害把握

越村俊一<sup>1)</sup>, 郷右近英臣<sup>2)</sup>, 福岡巧巳<sup>3)</sup>, 林 里美<sup>4)</sup>

1) 正会員 東北大学災害科学国際研究所, 教授 博(工)

e-mail : koshimura@irides.tohoku.ac.jp

2) 東北大学大学院工学研究科, 博士課程後期 修士(工)

e-mail : gokon@geoinfo.civil.tohoku.ac.jp

3) 東北大学大学院工学研究科, 博士課程前期, 学士(工)

e-mail : fukuoka@geoinfo.civil.tohoku.ac.jp

4) 東北大学大学院工学研究科, 博士課程前期, 学士(工)

e-mail : s\_hayashi@geoinfo.civil.tohoku.ac.jp

### 要 約

本稿は, 巨大地震災害発生直後の広域被害把握のための技術体系の構築を目的とする. 広域被害把握までの流れは, 衛星画像解析による津波浸水流況の把握, 浸水域内建物棟数の推計, 航空写真の判読による建物被害の把握, 航空写真・衛星画像による瓦礫量の把握という, 4つの技術で構成し, 2011年東北地方太平洋沖地震津波災害におけるインプリメンテーションを通じて, その有効性と課題を明らかにした.

キーワード : 2011年東北地方太平洋沖地震津波, リモートセンシング, GIS, 広域被害把握

### 1. はじめに

2011年3月11日, 東北地方太平洋沖地震による大津波が発生した. 地震・津波は, 12都道県で死者・行方不明者18,943人, 全壊建物129,431棟(警察庁, 2012年3月28日)という被害をもたらした. 我が国史上最大規模の超巨大地震津波災害となった. 特に岩手県から福島県にかけての津波被害は甚大であり, 仙台平野では, 海岸線から5km以上内陸まで津波が浸水し, 一般家屋だけでなく, 仙台空港などの重要なインフラ設備にも甚大な被害をもたらした.

巨大災害後の災害対応や救援活動において最も重要なことの一つは, 被害の全容把握である. 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. 2011年東北地方太平洋沖地震津波の被災地は広大であり, 発災直後には, 激甚な被災地がどこにあるかを把握するさえ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リモートセンシングと地理情報システム(GIS)を活用することにより, 上記問題のブレークスルーを図るための技術的アプローチを提案し, 2011年東北地方太平洋沖地震津波災害において著者らが実践した結果を報告する. なおここでの広域被害把握とは, 主に津波浸水域と建物被害の空間的分布およびその規模の把握を意味し, 本稿では津波の来襲状況の把握と浸水域内建物棟数の推計, 建物被害およびその空間分布の把握についての手法と課題を論ずる.

## 2. 広域被害把握の手法

2011年東北地方太平洋沖地震津波（以後、2011年津波）の広域被害把握の手法と流れを述べる（図1）。すなわち、(1)衛星画像解析による津波浸水域と映像解析による浸水流況の把握、(2)浸水域の把握と建物データの空間情報処理による浸水域内建物棟数の推計、(3)航空写真の判読による建物被害の把握、(4)航空写真・衛星画像による瓦礫域の抽出という、4つの技術で構成される。得られた情報は、GISを用いてマッピングするとともに、被害建物棟数といった定量的な被害情報を取得することが目的である。

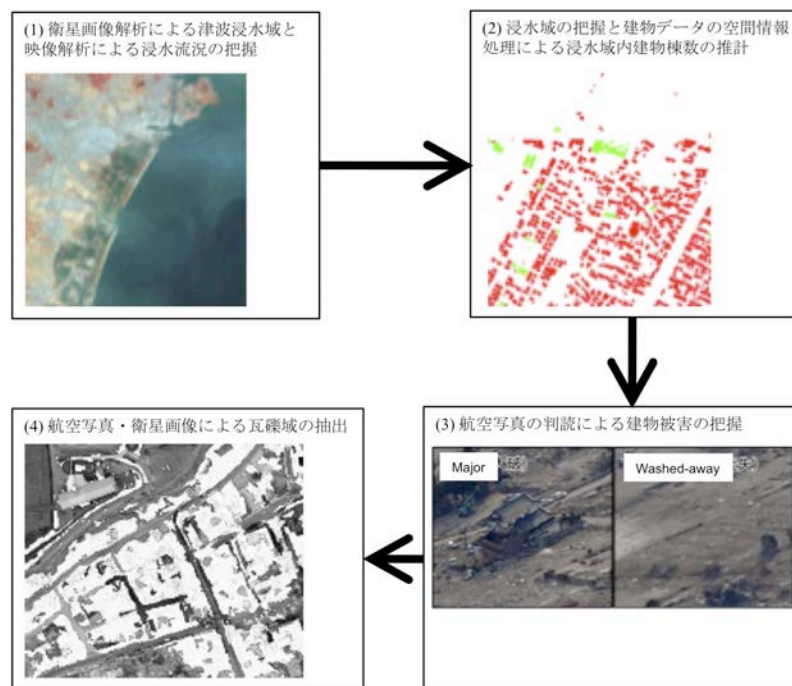


図1 広域被害把握のプロセス

## 3. 映像解析による津波来襲状況の把握

地震・津波の観測網が発達した現在では、津波の観測情報はほぼリアルタイムで入手できるという。特にGPS波浪計等の沖合観測網の整備により、沿岸への到達前に津波の発生・来襲を覚知することが可能である。一方、海岸に到達した津波がどのように陸上を遡上し、沿岸地域にどれほどの被害を与えうるかをモニタリングする施設は存在しない。

津波の来襲状況が映像で記録される機会が増えつつある。2011年津波においても、マスコミ各社のヘリコプター・航空機による空撮映像、国土交通省や自衛隊によるヘリテレ映像には、陸上を遡上する津波が克明に記録されていた。これらが、津波の広域被害把握の過程において最も早く得られる観測映像であろう。リアルタイムで得られる空撮映像から分かることは、単に津波の陸上遡上の有無だけではない。陸上における津波の流速情報は、建物に作用する流体力の定量的評価や津波数値計算の再現性の検証に有用であるが、遡上流速の測定が困難であるため、従来は浸水深の水位差から近似的に推定する手法が用いられてきた。多数の津波目撃映像が残されるようになった近年では、それらの解析から実流速が算出されるようになったが、このような測定例は未だ少なく解析手法も確立していない。ここでは、東北地方太平洋沖地震津波の来襲時の捉えられた映像の画像処理と解析を通じて、津波流況の把握を行

う．なお，2011年津波の来襲状況を捉えた映像解析については，たとえば神谷ら（2011）の先行研究があるが，ここではより詳細な津波の流況把握を行った事例を報告する．

津波の陸上遡上過程において，津波遡上先端部の移動速度（遡上速度），および津波の氾濫流速に着目した．解析に利用したのは2011年3月11日15:52（発災後約1時間）から撮影されたタイムスタンプ付きの空撮映像（NHK）で，仙台市若林区藤塚・名取市閑上・名取市小塚原が解析対象地域である（図2）．この映像には仙台平野を遡上する津波第1波が克明に記録されている（図3）．解析手順は以下の通りである．



図2 NHKの空撮映像の解析対象地域（仙台市若林区藤塚・名取市閑上・名取市小塚原）

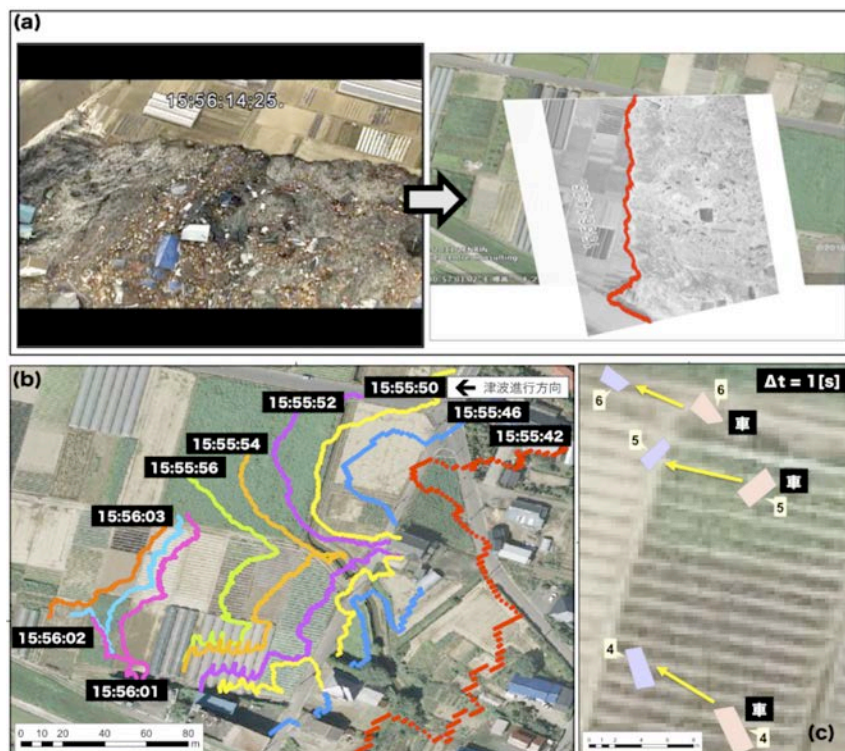


図3 (a)左:NHK空撮映像の静止画像，右:2次元射影変換により被災前地図に重ね合わせた結果，(b)津波フロント線の時系列変化，(c)漂流物移動の時系列変化

[1]解析に用いる画像の選定：本映像を1秒間隔でキャプチャして，津波先端部が判別可能で地上基準点が4点以上残存している画像を選定し，津波フロント線を描画する．また，津波先端部通過後2-45秒間



における漂流物を選定してマークを付ける。

[2]画像のマッピング：Google Earthから取得した被災前衛星画像上に，[1]でキャプチャした画像をGIS上に表示(マッピング)し(図3(a))，津波フロント線と漂流物位置の時系列を地図上にプロットする(図3(b)(c))。マッピングの際は，元画像に2次元射影変換を施して幾何補正し，空撮映像の画面に生じている射影歪みを除去する。2次元射影変換式は(1)式で表される。

$$(i, j) = \left( \frac{a_1 x + a_2 y + a_3}{a_7 x + a_8 y + 1}, \frac{a_4 x + a_5 y + a_6}{a_7 x + a_8 y + 1} \right) \quad (1)$$

ここで $(i, j)$ はGround Control Point (GCP)の画像座標， $(x, y)$ はGround Control Point (GCP)の実空間座標， $a_k$  ( $k=1, 2, \dots, 8$ )は未知のパラメータである。

[3]遡上速度・流速の測定：[2]で得た図から，津波フロント線の単位時間あたり移動距離を測定することで遡上速度を算出する。同様に，漂流物の単位時間あたり移動距離を計測することで流速を算定する。

映像解析の結果を図4に示す。これは海岸線からの距離と津波の遡上速度，流速の関係について示したものであり，(a)，(b)はそれぞれ名取川左岸(仙台市)と同右岸(名取市)の遡上速度，(c)は流速である。また，映像解析の結果と数値解析の検証の一例として，東北大モデル(Ver.1.1)の陸側断層に関して修正(断層深さ25km，傾斜角20.5°，滑り量一部増減)を加えた波源モデルを初期条件として実施した数値シミュレーション結果との比較も示してある(今村ら，2011；林・越村，2012)。ここで断層破壊は宮城県沖から開始し，岩手県沖では断層破壊開始の時間差を9-14分と設定した。遡上計算は10mの格子を用い，Manningの粗度係数は一律0.025とした。

映像解析から，遡上速度に関しては海岸線から約1kmの地点で6m/s以上であったことが確認されたほか，道路・水路・微地形の影響による局地的な減衰や加速が生じていたことが明らかになった(図4(a)(b))。また，家屋が密集する場所では，障害物が無い農地に比べ，遡上速度が1-3割程度減勢することが分かった。また，実測値と数値解析結果の比較から，遡上速度の計算値は海岸線付近で3割・内陸部で2-3倍程度の過大評価になっていることを確認した。瓦礫漂流物による抵抗も含めた津波先端部の境界条件を改良する必要がある。氾濫流速に関しては，計算値は実測値と概ね整合しており，漂流物の影響が少ない津波先端部背後の流れ場の再現性は良好であることを確認した。

近年，数値シミュレーション技術の進歩を背景に，津波発生直後からリアルタイムでシミュレーションを実施し，浸水予測が可能となる技術体系が構築されつつある(越村ら，2010)。津波来襲時の映像解析は，沿岸部の津波到達だけでなく，遡上速度や流速といった流体力学的諸量を用いた検証も可能にしつつある。

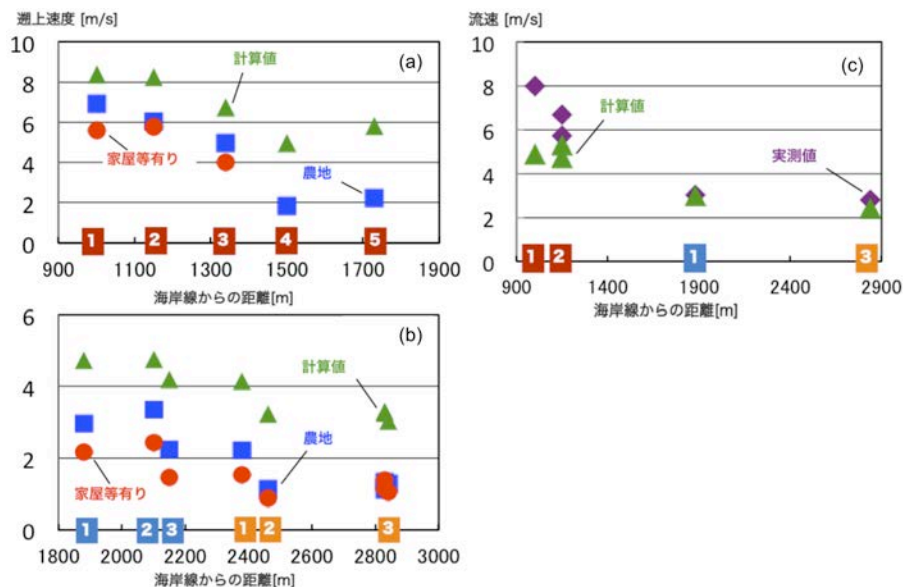


図4 (a)名取川河口に來襲した津波の遡上速度の実測値・計算値比較(名取川左岸)(b)同(名取川右

岸) , (c)流速の実測値・計算値比較

#### 4. 光学衛星画像による津波浸水域の把握

広域被害把握という観点では、津波浸水域をどのようにして把握するかが最初の課題である。地震発生直後から、複数の機関による緊急観測が実施された。ここでは、広大な津波浸水域の空間分布を把握するために、JAXA陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)の光学センサ(AVNIR-2)による画像を利用した。ALOSは、標高などの地表の地形状況を把握するパンクロマチック立体視センサ(PRISM)、土地被覆や土地利用状況の把握のための可視近赤外放射計2型(AVNIR-2)、および昼夜を問わず陸域観測が可能なLバンド合成開口レーダ(PALSAR)の3つの地球観測センサを搭載している。AVNIR-2センサは、RGBの可視光の3バンドに加え、近赤外のセンサももち、地上分解能は直下視で10mである。

解析に利用したのは、2011年3月14日に撮影されたALOS AVNIR-2画像である。これまで、様々な機関が衛星画像解析による2011年津波の浸水域の把握に取り組んできたが(たとえばJAXA, 2011)、ここでは津波の浸水域の抽出に水の分光特性に着目した指標を用いる。水の反射率は、水中に含まれる懸濁物質の種類と量によって複雑に変化するが、分光特性としては青の波長域にピークを持ち、波長が長くなると急速に反射率が低くなる傾向がある。ここでは、正規化植生指標(NDVI=Normalized Difference Vegetation Index)の計算法からの類推で、正規化水指標を次式の通り定義する。一般的に、正規化水指標は赤波長(R)と中間赤外波長(SWIR)を用いて求められるが(Takeuchi and Yasuoka, 2004)、ここではNDWIを(2)式で定義する(Wolf, 2010)。

$$NDWI = \frac{NB - NIR}{NB + NIR} \quad (2)$$

ここで、NIRは近赤外域の輝度、NBは可視光のBlue bandの輝度である。NDVIと同様に、NDWIの値は-1から1までであり、NDWIの値が高いほど浸水の可能性が高い(従って、河道内や水域・海域におけるNDWIは常に高い値になる)。

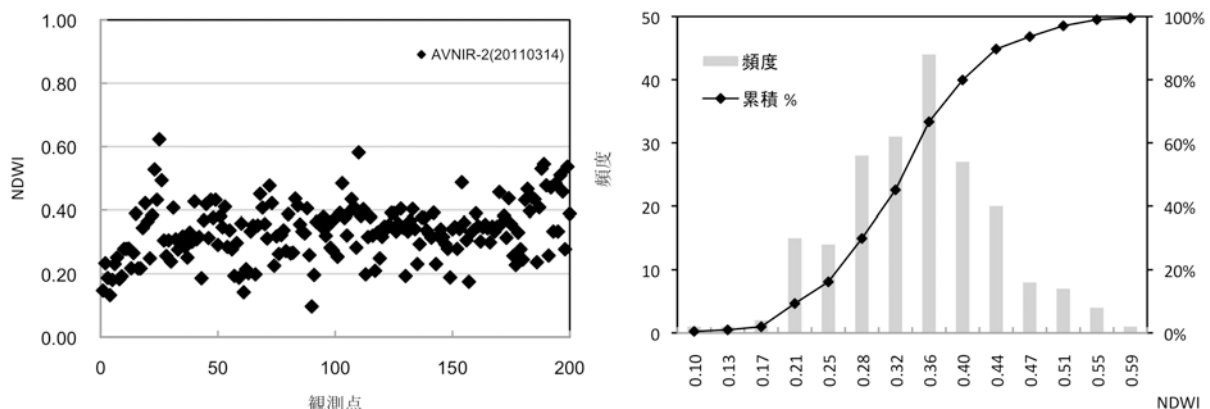


図5 仙台平野の津波遡上限界測定点におけるNDWIの分布

一方、本研究では津波発生前の画像は用いないので津波前後の変化抽出による浸水域の抽出は行わない。代わりに、浸水限界に関する現地調査結果に基づき、NDWIの閾値を決定して浸水域の抽出を行う。現地調査では、津波被災地において漂流物の漂着地点を把握、または現地における聞き取り調査により、津波の浸水限界点の緯度・経度・標高値の高精度GPS測位を実施した。使用したのは、3月26日から7月初旬までに宮城県(石巻市から山元町にかけて)において得られた計205地点の浸水限界点の測定結果である(東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループのウェブページを参照)。ここでGPS測位は、まず調査地域内に私設基準点を設置し、スタティック測位(測位方法の一つ)後に遠方の電子基準点を用いて基線解析を実施し、私設基準点の正確な座標を得た。その後調査者が移動局を持って浸水限界点のスタティック測位を行い、私設基準点のデータを利用して解析・補正した。

図5に、宮城県南部の津波遡上限界点におけるNDWIの分布を示す。AVNIR-2画像の取得日は2012年3月14日（GMT）であり、ここから得られるNDWIの分布は津波来襲から4日後のものであることに注意が必要である。例えば、現地調査では、漂流物の漂着や浸水痕跡といった物証があった地点を津波遡上限界として測定しており、その信頼度は高い。NDWIは、値が高くなるほど浸水の可能性が高いことを示しているが、もともと遡上限界点では完全に湛水していない、津波来襲から3日経過しているということを考慮しながら、現地調査による津波浸水限界と整合するよう、累積分布で80%にあたるNDWI=0.4を閾値として浸水範囲の特定を試みた。図6に示すのは、NDWI>0.4の地域と現地調査による遡上限界点をプロットした地図である。本結果は、現地調査の測定結果を校正データとしてNDWIの閾値を求めたが、このような知見を用いながらNDWIという指標を用いて津波浸水域を抽出することで、広域津波浸水域の推定が可能であることを示すことができた。

しかしこの方法は、津波後に取得された画像のみを利用しているので、現地調査によるサンプリングが必要であることと、画像の取得日によってNDWIの値（閾値）が異なってくるであろうという点で課題がある。今後、複数のセンサ、撮影日や異なる地域での検証を行う必要がある。

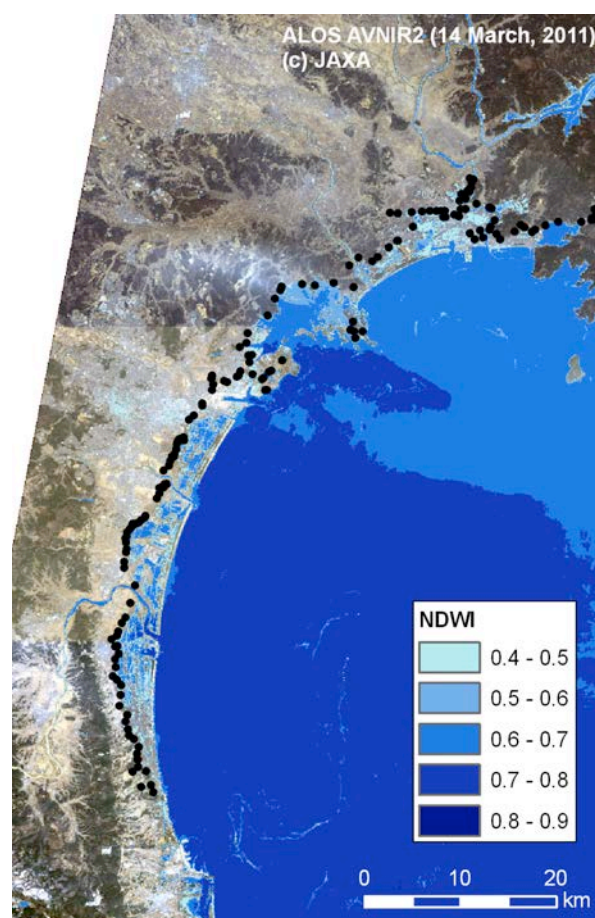


図6 NDWI=0.4を閾値として推定した津波浸水域。黒点は現地調査による遡上限界点。

## 5. 航空写真の判読による建物被害の把握

浸水域を把握した後は、その中に何棟の建物があるかを数えることで津波曝露建物の棟数を推計する (Gokon and Koshimura, 2012)。ここでは、ゼンリンのデジタル住宅地図 (Zmap-TOWNII) を利用した。GIS上に推定津波浸水域 (図6) と建物データを重ねて浸水域内の建物データだけ抽出し、行政区毎に集計することで簡単に推計することができる。



抽出された浸水域内建物の被害は、航空写真の目視判読により把握する。国土地理院は、地震発生の翌日から航空写真による緊急撮影を実施し、被災前後の撮影画像を迅速に公開した。著者らは、これらのうち直下視航空写真のオルソ画像を利用した。国土地理院のサイトから個別画像をダウンロードし、モザイク画像を作成し、建物データと共にGISに表示した。建物被害は、被災前後の画像を目視で比較することで評価する。津波による建物被害の評価基準は、例えばEMS-98を参考にしたMiura et al.(2005)の手法など、複数段階に分類するものがあるが、一棟毎の目視判読と詳細な被害分類には時間がかかる。ここでは、流失の有無だけに着目して建物被害を分類することにした。建物流失の有無を評価する場合には、直下視航空写真の屋根の存在のみに注意して写真の判読を行えば良いので時間を大幅に短縮することができる。ただし、屋根が残存していても建物の壁面等に甚大な被害が生じている場合もあり、「残存」と判断した建物であっても全壊レベルの被害を受けている可能性があることに留意が必要である(Gokon and Koshimura, 2012)。

建物被害判読結果（流失・残存）は、ゼンリンの建物GISデータへの属性情報として記録し、それをマッピングする（図7）。さらに、宮城県石巻市以南の浸水域内建物棟数の結果を表1に示す。浸水域内建物棟数、流失建物棟数、そして流失率が分かることにより、津波の被害をより定量的に把握できる。津波による建物被害の把握については、数多くの機関が実施し、重要な成果を挙げている。例えば、日本地理学会災害対応本部津波被災マップ作成チーム（2011）は、空中写真の実体視判読によって被災状況を視認し、2.5万分の1地形図に示した。小荒井ら（2011）は、土地利用データや地震後の航空レーザー測量、空中写真判読、Mobile Mapping Systemによる現地調査等の結果を総合的に評価して、津波浸水域および被害の地理的特徴について論じている。ただし、これらの先行研究には、建物個別の被害判読結果は示されていない。彼らの調査では、建物データを用いた被害の把握および結果の集計を行っていない。

津波浸水域内の建物一棟毎の被害を把握しつつ、地域の流失状況を俯瞰して見ることは極めて重要である。そのためには、建物一棟毎の被害状況をマッピングし、防波堤・防潮堤等の海岸施設の被害状況と関連づけることで、海岸施設がどの程度被害軽減に寄与したかなど、これまでの津波防災対策の検証を行う必要がある。

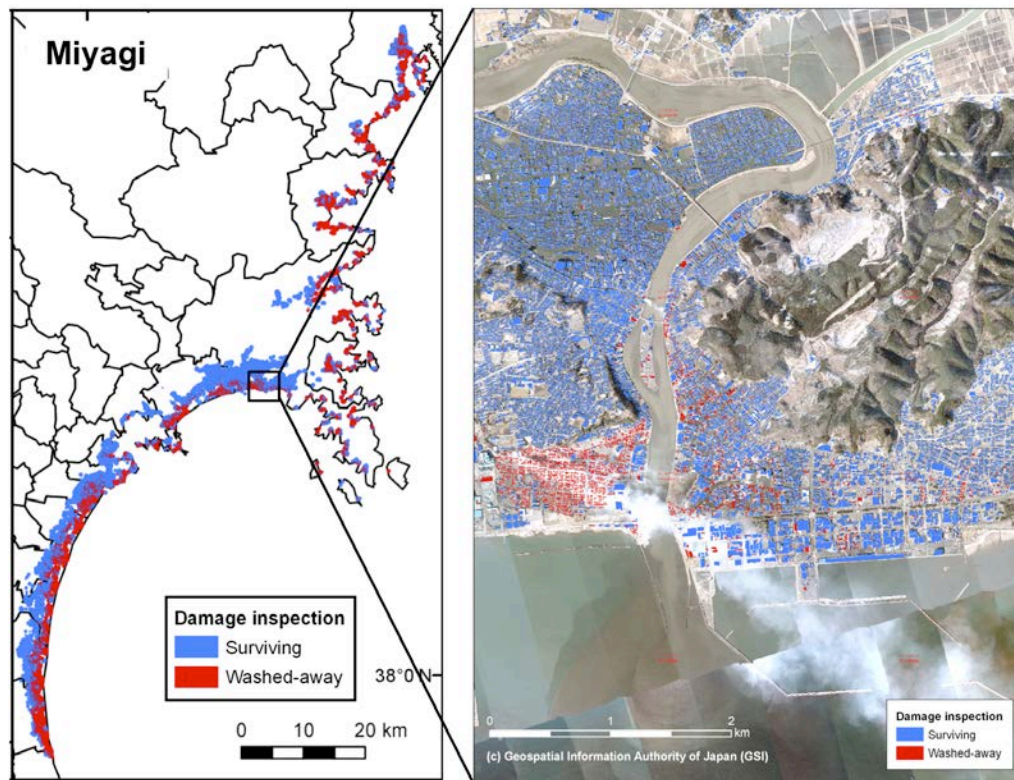


図7 宮城県の建物被害の空間分布（左：宮城県全体，右：石巻市における建物被害マッピング例）

表1 宮城県南部における浸水域内建物被害判読の結果

市町名	浸水域内建物	流失建物	流失率 (%)	全壊建物棟数※ (括弧内数字は非住家被害)
石巻市	62,440	12,521	20.1	22,357 (7,301)
東松島市	16,860	3,171	18.8	5,491 (990)
塩竈市	8,995	373	4.1	757 (1,115)
松島町	695	14	2.0	220 (97)
七ヶ浜町	3,253	1,120	34.4	683 (824)
多賀城市	6,310	226	3.6	1,730
仙台市	13,721	4,329	31.6	29,469
名取市	5,530	2,810	50.8	2,801 (2,805)
岩沼市	5,285	1,298	24.6	688 (3,126)
亘理町	8,143	2,059	25.3	2,298 (468)
山元町	5,373	2,802	52.1	2,333 (339)

※全壊建物棟数および非住家被害棟数は宮城県が公表したデータを引用（2012年3月28日）

## 6. 瓦礫域の推定

現状では、広域被災地の建物被害棟数等の被害の量的推計には、航空写真や衛星画像の目視による判読に頼らざるを得ない。被災地の緊急観測は可能になったが、最も必要とされる定量的な被害情報の把握に時間を要している。ここでは、津波被災地の建物被害の尺度として「瓦礫」に着目し、津波災害後に得られる航空写真・衛星画像から瓦礫量を推計する方法を検討する。

研究の対象領域は、2011年東北地方太平洋沖地震津波により壊滅的な被害が報告された宮城県女川町である（図8）。女川町はリアス式海岸によって形成された入り江の奥にあり、死者595人、行方不明者327人、建物被害2,923棟という激甚な被害（宮城県、2012年3月28日）であった。津波は内陸約2kmまで遡上、遡上高15mを記録して、町は完全に水没した。

本研究では2種類の被災後画像、デジタル航空写真（2011年3月19日撮影、RGB3バンド、分解能0.25m）と衛星画像（WorldView-2、同年6月8日撮影、8バンド、パンシャープン、分解能0.5m）を用いる。

まず、女川町被災地内において（図のStudy Area 1）現地調査を実施し、代表的地表物（瓦礫域、裸地、道路、植生域）を特定した。調査は、各画像の撮影日の前後数日間に行い、現地調査によるGround Truthデータの収集と地表物のマッピングを行った（図9）。

画像の解析には、著者らが開発したオブジェクト分類による画像処理手法を適用した（萱場・越村、2010）。画像中の隣接するピクセル(画素)をグループ化し(オブジェクト生成)、生成されたオブジェクトとGround Truthデータを対応させて、オブジェクト内の地表物毎の画素の統計情報を抽出する。詳細な処理手法については参考文献を参照されたい。

オブジェクトベース解析では、目的の地表物を決定するような分光特性と画素値の統計量に着目した。例えば、瓦礫域であれば津波によって破壊された様々な物体が集積しているから、画素値のばらつきは高いはずである。すなわち、航空写真ではRGB各バンドのDN（輝度）の値と標準偏差に関連して地表物の分光特性を検討した。その結果の例を図10に示す。図中の点線は分類に適用した閾値である。これは各オブジェクト内におけるデジタル航空写真のRed Bandの輝度値の頻度と標準偏差を地表物毎にまとめたものである。各バンドに着目して地表物を分類できる閾値を検討し、分類を行った。

一方、衛星画像では、NDVI(正規化植生指標)・NDSI(正規化土壌指標)をまとめ、瓦礫域に対応した教師データとして定義する。NDVIとNDSIの定義式を以下に示す。



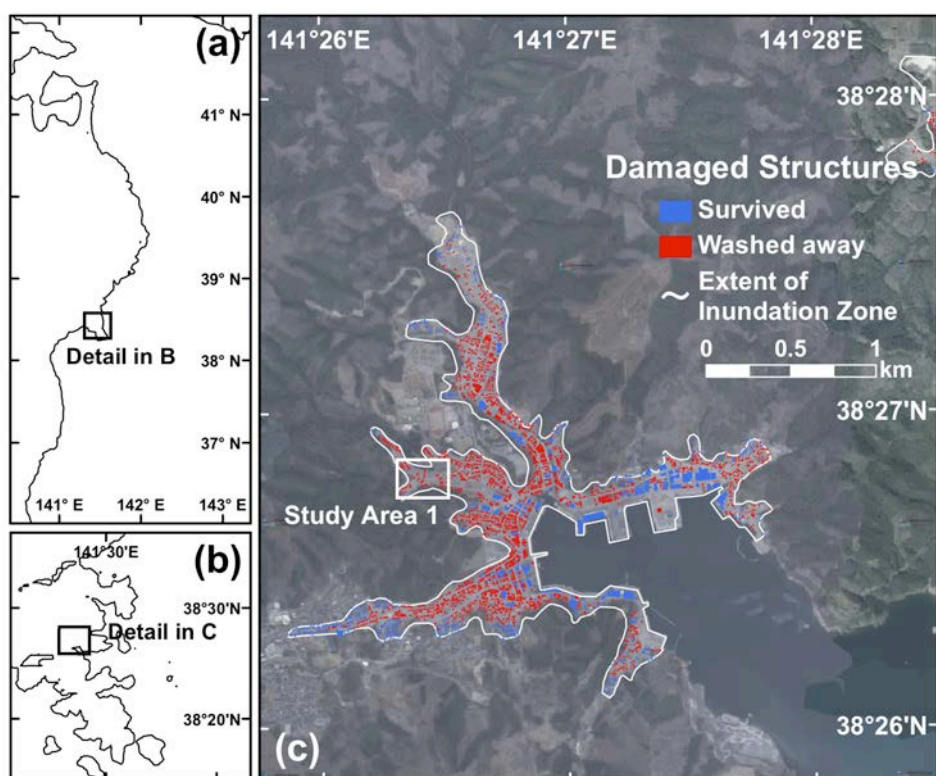


図8 女川町の津波浸水域と被害建物の分布

$$NDVI' = \frac{RE - NR}{RE + NR} \quad (3)$$

$$NDSI' = \frac{NG - NY}{NG + NY} \quad (4)$$

ここで $NR$ ,  $NG$ ,  $NY$ は可視光のRed, Green, Yellow bandの輝度,  $RE$ はRedEdgeの輝度である. RedEdgeは, Worldview-2独自の赤から近赤外域の間にある波長帯 (705-745 nm) であり, 植生域の抽出に優れている (たとえば小川・山崎, 2011). 衛星画像では, 各バンド ( $NR$ ,  $NG$ ,  $NY$ ,  $RE$ ) の標準偏差の和と積も考慮に入れ, 瓦礫域の分光特性を詳細に検討した. その結果を図11に示す. 図中の点線は分類に適用した閾値である.

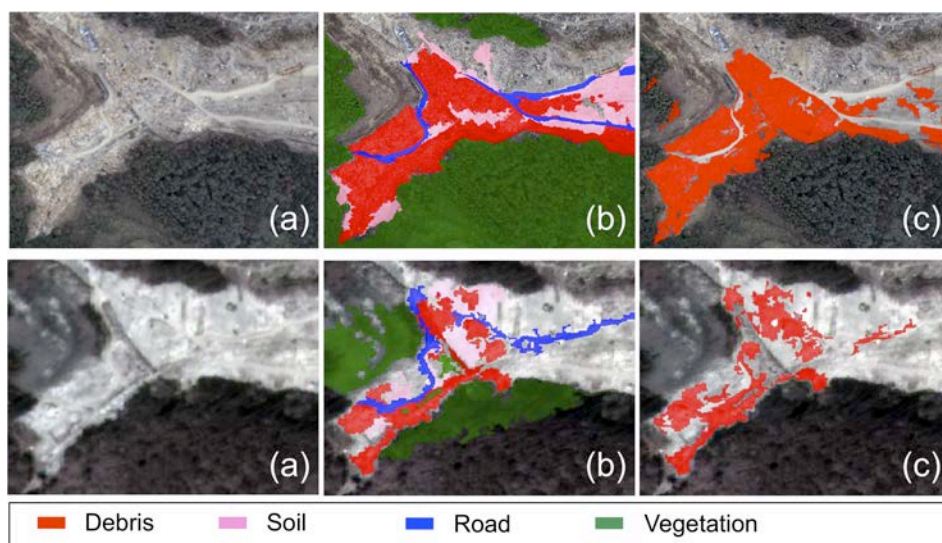


図9 調査領域における航空写真 (上段) と衛星画像 (下段) の解析: (a) 元画像, (b) Ground Truth (現地調査によって把握した瓦礫域), (c) 画像から抽出した瓦礫域

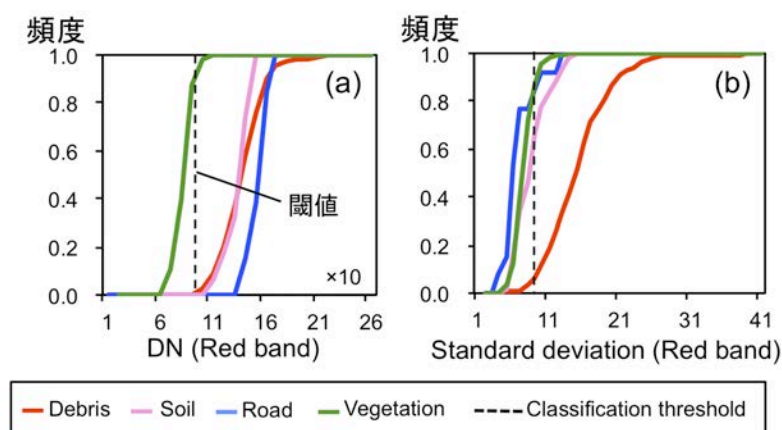


図10 航空写真解析における地表物の分光特性と分類閾値の一例（RGBのうちRed bandの結果）

(a) 植生域, (b) 瓦礫域

現地調査から得られた地表物に関する教師データを用いて画像の教師付き分類を行い、瓦礫量を推計する。画像の分類には段階を設け、1段階目で植生域を排除、2段階目で瓦礫域の抽出を行った。抽出精度は、テスト領域においてProducer's Accuracy（網羅率）とUser's Accuracy（的中率）の2方向から評価した、評価領域においては、デジタル航空写真（2011年3月19日撮影）では、[P.A., U.A.]=[88.5%, 92.1%]という高い精度が得られた。また、衛星画像解析においても、各バンドの標準偏差の和と積も考慮に入れ、瓦礫域の分光特性を詳細に検討することで[P.A., U.A.]=[81.0%, 69.8%]という抽出精度が確認できた。したがって、分解能の高いデジタル航空写真またはマルチスペクトル衛星画像を用いることで、70～90%程度の精度で瓦礫域の抽出が可能であることが分かった。

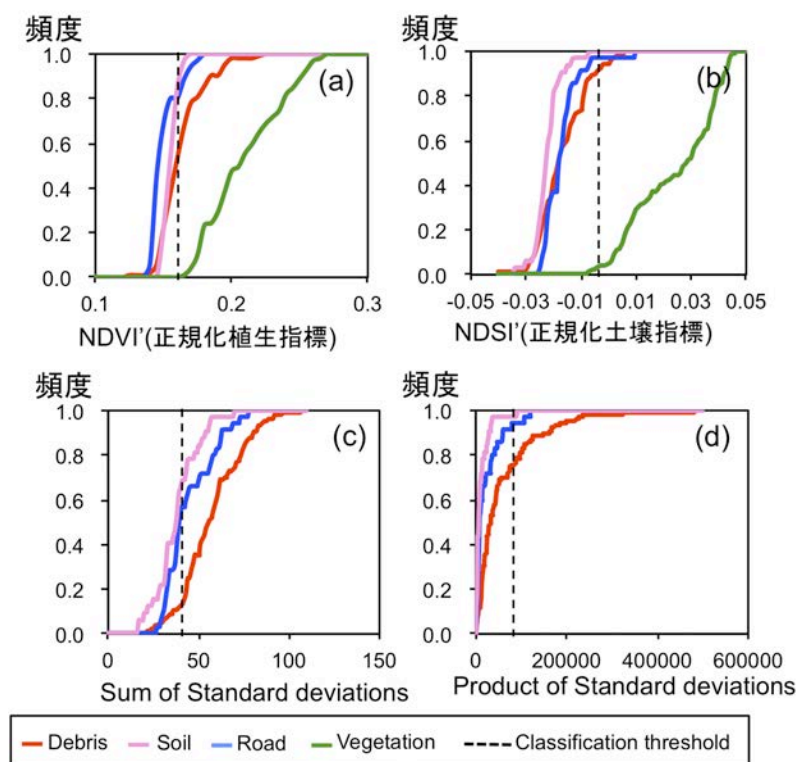


図11 衛星画像解析における地表物の分光特性と分類閾値

(a) NDVI', (b) NDSI', (c)オブジェクト内輝度値の標準偏差の和, (d)標準偏差の積



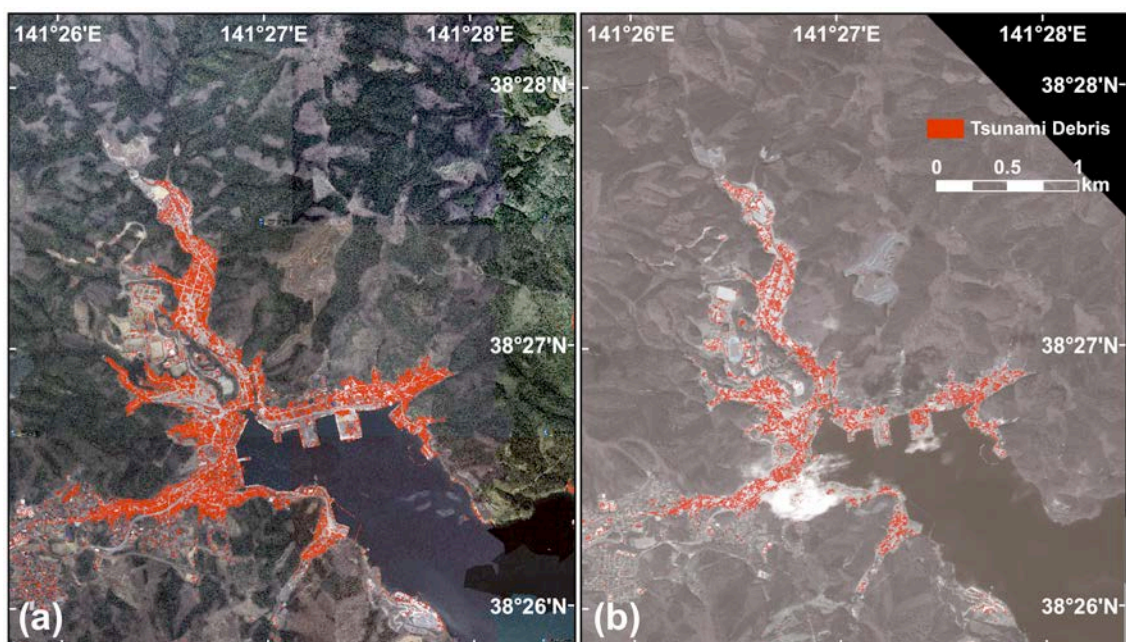


図12 女川町全域の瓦礫分布: (a) 航空写真(2011年3月19日)より抽出, (b) 衛星画像(2011年6月8日)より抽出

上記手法により, 女川町の津波浸水域全体で瓦礫域の抽出を行った. その結果を図12に示す. 得られた瓦礫面積は約0.9km<sup>2</sup> (航空写真; 3月19日) と約0.5 km<sup>2</sup> (衛星画像; 6月8日) であった. 3月19日の0.9km<sup>2</sup>の瓦礫域は, 同町の流失建物4,359棟 (著者ら調べ, 図8) との関連があると考えられる. 今後の課題は, 瓦礫域の抽出面積から流失建物棟数を換算するための経験式を構築できれば, 半自動的な解析で建物被害棟数を推計することが可能となる. また, 瓦礫の抽出精度に起因する誤差を考慮しても, 3月19日から6月8日までの約80日間で, 約0.4 km<sup>2</sup>の面積差があり, この期間の瓦礫撤去作業が進んでいたことも確認できる. すなわち, 被災地のモニタリング手法としても有効であることを確認できた.

## 7. おわりに

巨大地震津波災害による広域被災地を探索して迅速な被害把握を実現するために, リモートセンシングと地理情報システム(GIS)を融合した技術的アプローチを提案し, 2011年東北地方太平洋沖地震津波災害においてその有効性を検証した. 広域被害把握には, 衛星画像や空撮映像等の解析による津波来襲状況・浸水域の把握, 浸水域内建物の推計と流失建物棟数の把握, 瓦礫域の把握のそれぞれの手法を総合して実現できることが分かった.

まず光学衛星画像解析により, 津波浸水域を把握できることを確認した. 特に可視光のBlue bandと近赤外域を考慮した指標を用いることで, 半自動的な浸水域の抽出が可能である. ただし, 本方法においては災害後の画像のみを用いるため, 現地調査や航空写真等から津波浸水域を分類するための教師データが必要である. 現状では衛星による緊急観測の実施とデータの処理に時間を要するので, リアルタイムで得られる空撮映像等を利用して浸水域を確認しておけば, 効率的な対応が可能であろう. さらに, リアルタイムコンピューティングの発展を背景に, 津波の即時浸水予測も可能になりつつある. そのため, 空撮映像のリアルタイムマッピング手法の構築も重要な課題である.

津波浸水域が把握できれば, 航空写真の判読により流失建物の分布および量的な把握に移行できる. 本稿では, 直下視の写真 (津波前後のセット) において屋根の有無に着目した簡易法により, 流失建物のみを抽出したが, 斜め視画像を用いれば, より詳細な被害程度や建物構造種別の分類も可能である (たとえば郷右近・越村, 2012) .

瓦礫域の空間的把握には, 高解像度のデジタル航空写真や高分解能衛星画像 (マルチバンド) を利用



すれば、70%以上の精度での抽出が可能である。この手法は教師データを取得できれば半自動での解析が可能であり、瓦礫域面積から建物被害棟数に換算する経験式を整備することで定量的把握に結びつけることができる。

発災直後の広域被害把握を迅速に実現するためには、解析技術の発展に加えて、観測態勢のさらなる充実も重要な課題である。たとえば、世界中のどこで災害が発生しても、かならず1日以内に光学センサーや合成開口レーダーを搭載した人工衛星が緊急観測できるという条件を、人工衛星の軌道決定の要件として検討し、一元化した緊急観測の中でその結果を国際社会で共有する仕組みも必要であろう。

## 謝 辞

本研究は、科学研究費補助金、東北大学運営交付金（東北太平洋沿岸における緊急津波実態調査）および東北大学災害科学国際研究所特定プロジェクト研究補助費（A-3）の補助を受けて実施した。また、建物被害の判読には国土地理院撮影の航空写真を利用させて頂いた。住宅地図は、東京大学・空間情報科学研究センターとの共同研究（プロジェクト番号：328）の一環で、株式会社ゼンリンから提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 警察庁：東日本大震災について（オンライン），2012年，<[www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index.htm](http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index.htm)>
- 2) 神谷泉，乙井康成，岡谷隆基，小荒井衛：海上を進行中の津波の波頭等の計測。東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会予稿集，pp.99-103，2011。
- 3) 今村文彦，越村俊一，村嶋陽一，秋田善弘，新谷勇樹：東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施，東北大学モデル(version1.1)，2011，オンライン  
<[www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku\\_2011/model/dcrc\\_ver1.1\\_111107.pdf](http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.1_111107.pdf)>
- 4) 林 里美，越村俊一：映像解析による2011年東北地方太平洋沖地震津波の流速測定，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 68, No.2, I\_366-I-370，2012。
- 5) 越村俊一，香月恒介，茂渡悠介：GPUコンピューティングによる津波解析の高速化とリアルタイム浸水予測，土木学会論文集B2(海岸工学論文集，第57巻)，Vol. 66, No.1, pp.191-195，2010。
- 6) 宇宙航空研究開発機構（JAXA）：東日本大震災対応報告書～地球観測衛星及び通信衛星による対応の記録～，104p.，2011。
- 7) Takeuchi, W. and Y. Yasuoka : Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data. 25th Asian Conference of Remote Sensing (ACRS): Changmai, Thailand, 2004
- 8) Wolf, A. : Using WorldView 2 Vis-NIR MSI Imagery to Support Land Mapping and Feature Extraction Using Normalized Difference Index Ratios, オンライン，2010  
<[www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/8\\_bands\\_Antonio\\_Wolf.pdf](http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/8_bands_Antonio_Wolf.pdf)>.
- 9) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：現地調査結果，オンライン <<http://www.coastal.jp/ttjt/>>
- 10) Gokon, H. and S. Koshimura, Mapping of Building Damage of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami in Miyagi Prefecture, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No. 1, 2012, DOI: 10.1142/S0578563412500064
- 11) 国土地理院：平成23年（2011年）東日本大震災に関する情報提供（オンライン），2011，  
<[www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23\\_tohoku.html](http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html)>
- 12) European Seismological Commission: European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), 101p, 1998.
- 13) Miura, H., Wijeyewickrema, A. C. and Inoue, S.: Evaluation of Tsunami Damage in the Eastern Part of Sri Lanka Due to the 2004 Sumatra Earthquake Using Remote Sensing Technique, Proceedings of 100th Anniversary Earthquake Conference, Paper No.8, NCEE-856, 2006.
- 14) 日本地理学会災害対応本部津波被災マップ作成チーム，2011年3月11日東北地方太平洋沖地震に伴う津波被災マップ（オンライン），2011，<<http://danso.env.nagoya-u.ac.jp/20110311/>>
- 15) 小荒井 衛・岡谷隆基・中埜貴元・神谷 泉，東日本大震災における津波浸水域の地理的特徴，国土地理院時報，No. 122, pp.97-111，2011，オンライン<<http://www.gsi.go.jp/common/000064460.pdf>>
- 16) 萱場真太郎，越村俊一，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, 土木学会論文集B2, Vol. 66, No.1, pp.1421-1425, 2010.
- 17) 小川芳樹, 山崎文雄: 光学衛星センサのマルチスペクトルバンド数増加による識別効果の検討, 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, 第50巻, pp.143-144, 2011.
- 18) 郷右近英臣, 越村俊一: 2011年東北地方太平洋沖地震津波の被災地における斜め視空中写真判読による建物被害のマッピング, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, I\_1421-II425, 2012.  
(受理: 2012年4月2日)  
(掲載決定: 2012年10月1日)

## **Remote Sensing and GIS-based Approach to Identify the Impact of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Disaster**

KOSHIMURA Shunichi <sup>1)</sup>, GOKON Hideomi <sup>2)</sup>, FUKUOKA Takumi <sup>3)</sup> and  
HAYASHI Satomi <sup>4)</sup>

1) Member, Professor, International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, Ph.D.

2) Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tohoku University, M.Eng

3) Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tohoku University, B.Eng

4) Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tohoku University, B.Eng

### **ABSTRACT**

The authors propose a research framework in developing a method to search and detect the impact of catastrophic tsunami disaster by integrating remote sensing and GIS technologies, which consist of four damage mapping efforts, 1) Inundation mapping by satellite remote sensing, 2) Structural damage mapping by aerial photo interpretation, 3) Estimation of structural damage, 4) Mapping tsunami debris by post-event image analysis as an indicator of impact. The method is implemented to the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster to identify the regional impact of this event.

*Key Words: The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Disaster, Remote Sensing, GIS, Damage Mapping*