高分解能衛星画像解析による陸前高田市の 津波被災復興状況の時系列評価

Time Series assessment for the Reconstruction of post-Tsunami Disaster in the Rikuzentakata City by using high Resolution Satellite Image Analysis

羽柴秀樹¹・杉村俊郎²

Hideki HASHIBA and Toshiro SUGIMURA

In 2011, the tsunami in the Tohoku region of Japan was investigated through numerous satellite observations. When a tsunami occurs, many requests are made for an immediate investigation of the damage. Although it has been several years since the 2011 tsunami, it is still necessary to continuously monitor the recovery process. In this study, high resolution satellite images in a time series were used to assess the recovery process in Rikuzentakata City. The recovery process was investigated through classification of the land cover and use of image filtering to analyze surface shape. The amount of bare ground increased in the time series. The tendency for recovery of the regularity of the shape of the land surface was investigated. From these results, the recovery processes were assessed using the characteristics of the land cover and surface shape.

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震による津波災害では、数多くの衛星観測や空中写真撮影による遠隔災害調査がなされ、多様な被害状況が報告された (Gangら, 2011; 羽柴ら, 2011; Hashibaら, 2011; Richmondら, 2012; Hashiba, 2012等)。これらにより、津波による沿岸域の被災状況が、土地被覆状況把握と変化調査の観点から詳細に報告されている。発災からその直後は、現状把握が早急に求められるが、被災から数年が経過する段階では、復興状況を継続的かつ定量的にモニタリングする必要がある。しかしながら、その多くは衛星画像や空中写真の判読調査にとどまる傾向があり、復興過程を定量的に解析し評価するものは少ない。また、衛星画像による画像分類処理から土地被覆を定量的に調査する手法は、時系列調査をする場合に季節的な影響を受けやすい傾向がある。加えて、津波により地表面の規則性が大きく崩れた状態からの社会基盤の再整備にみられる土地表面の形状的な変化特性を、評価結果に十分に反映出来ていない傾向がある。遠隔探査技術を用いてこのような沿岸域被災地の復元過程を地表面の形状特性から評価する手法は、まだ十分に検討されていない。これまでに著者らは、岩手県陸前高田市を対象に、複数の時系列高分解能衛星画像を利用した種々の被災調査を行っている。特に、地表面の形状変化の過程を画素間フィルタリングによって評価するための手法を検討し、津波被災域の局所的な箇所での効果が、これまでに検討されている (Hashiba, 2013)。

ここでは、陸前高田市の被災領域のほぼ全域を対象として、高分解能衛星によって時系列的に観測された画像情報から、被災後の復興・復旧過程を従来の土地被覆分類処理による調査と、画素間フィルタリングによる指標値から評価した。

2. 研究方法

(1) 調査対象エリア

ここでは、津波による被害が甚大であった陸前高田市を対象地域とした (図-1)。図に示されるように、2011年の津波被災によって平野部の殆どが、甚大な被害を受けた。2012年から2013年にかけては、裸地面の増加と、街区および街路と判読できる線的な構造の識別が、徐々に明瞭になり、海岸線域では、防波堤の復旧箇所がやや増

図-1 陸前高田市の被災領域の時系列高分解能衛星画像 (フォルスカラー合成表示、図中白線域が被災領域、黒線矩形域は被災領域外の評価指標値の検証エリア)

1 正会員 博(工) 日本大学准教授 理工学部土木工学科
2 正会員 工博 (財)リモート・センシング技術センター
研究部 主任研究員

加するなど、徐々に社会基盤が復旧してきている傾向が確認できる。2011年の被災直後の画像データの判読から特定された津波被害領域（図-1中白線内）の領域を今回の復興過程の解析・評価の対象領域とした。なお、海岸付近の松林の樹林帯は、今回の津波でほぼ消失していることから、ここでは評価対象外とした。

(2) 使用衛星画像データ

Worldview-2衛星によって、被災前の2010年2月23日、地震発生直後の2011年3月20日、および地震から約1年後の2012年6月28日に、また、GeoEye-1衛星によって、発災から2年後の2013年4月14日にそれぞれ観測されたマルチスペクトルセンサおよびパンクロマティックセンサによる画像データを使用した。地上分解能は、Worldview-2衛星、GeoEye-1衛星共にマルチスペクトル画像の場合が2.0m×2.0m、パンクロマティック画像の場合0.5m×0.5mである。

(3) 地表面反射率への変換処理

使用する画像に対して、元のDN値から衛星観測諸元をもとに大気補正処理を行い、地表面反射率に変換を行った。補正・変換はRichterら（2006）によって検討されDLR-German Aerospace Centerにて処理プログラムが提案されているATCORアルゴリズム（Richter, 2010）を使用した。

(4) 画像の厳密幾何補正とデータセット化

画像判読から取得された複数のGCP座標を基準とした多項式によって、座標間の関連付けを行い、画像の再配列によって各画像間の厳密な位置合わせを施した後、各画像をレイヤー化した時系列データセットを作成した。

(5) 土地被覆分類による被災後の復旧過程の評価

被災後の土地被覆の変化傾向を把握するために、被災1年後および2年後の画像データをクラスタリング処理した。ここでは、地表面反射率に変換後のマルチスペクトル画像データに対して、ISO-data法によるクラスタリング処理を行った。16種類を初期設定クラス数とし、処理収束までの反復回数を標準的な20回とした。処理の結果、最終的に2012年では11種類に、2013年では15種類のクラスにまとめ上げられた。処理後に、分類結果と高分解能衛星画像の詳細な判読特性の比較検討から、各クラス領域内の画像判読上の色彩特性が整理され、各クラスと土地被覆種との関連性が考察された。これらの結果から、各分類クラスを大項目にまとめることで水域、植生域、裸地域、構造物の増減が把握できるように整理した。なお、観測条件をできるだけ揃えるために、2013年に観測されたGeoEye-1衛星のB,G,R,IRの4つのバンドに合わせて、2012年に観測されたWorldview-2衛星による8つのマルチスペクトルバンドの内、B,G,R,IR-1の4つのバンドデータのみを用いてクラスタリング処理を行った。また、分類結果の精度を検証するために高分解能衛星画像の詳細な判読調査を元に、小規模な検証領域（200m×

200m）で土地被覆基準マップを作成し、これと比較検討することで分類精度を評価した。

(6) フィルタリングによる被覆形状の評価

地表面反射率に変換後のパンクロマティック画像に対して、11×11画素サイズのウィンドウ内の演算によるフィルタリング処理を行った。ウィンドウ内の各画素の地表面反射率の平均値と各画素の地表面反射率の差の絶対値を平均化し表示することで、ここでの評価指標値とした。指標値と土地被覆の関連性を画像判読から確認した結果、高指標値の場合、近傍画素間で地表面反射率の差が大きく、異なる性質の土地被覆が不連続に接している傾向を示していることが認められた。また、低指標値の場合、近傍画素間での地表面反射率の差が小さく、比較的均質な土地被覆が連続的に分布している傾向を示していることが認められた。地表面反射率は32ビットスケールで計算・記録されており、評価指標値の算出結果を分かり易く可視化し分析するために、計算結果を20倍し8ビットスケールの整数値として記録し評価を行った。また、土地表面の形状と評価指標値の関連性をより考察するため、地表面反射率に変換する前の元のDN値の場合についても同様の指標値を算出し、特徴を地表面反射率の場合と比較した。なお、11ビットスケールで記録された元のDN値の場合は、評価指標値の計算結果をそのまま8ビットスケールで記録し可視化・分析しても十分に特徴把握することが出来た。加えて、この評価指標値に対する時系列的な観測条件の違いによる影響の程度を検証するために、経年的に殆ど土地被覆状況が変化していない箇所において、指標値の同一性を確認した。

3. 研究結果と考察

(1) 土地被覆特性の時系列的变化から見た復興過程

a) 被災後の土地被覆変化

今回の分類結果と各分類クラスの土地被覆状況の判読

表-1 クラスタリング結果と各クラスの判読特性、土地被覆

Marge Class	画像判読から考察した各クラス分類項目	2012年6月28日観測 (Worldview-2マルチスペクトル画像)			2013年4月14日観測 (GeoEye-1マルチスペクトル画像)			各クラスクラスタリング領域でのフォルスカラー表示による画像の平均的な色彩傾向	高分解能衛星画像の詳細判読による各クラスの土地被覆の内容の考察
		Marge 分類比率 (%)	クラス数	分類比率 (%)	Marge 分類比率 (%)	クラス数	分類比率 (%)		
水域	water surface	8.6	1	8.6	9.1	1	9.1	黒色	浅い灌水面、水路
植生域	vegetation	11.0	1	11.0	18.5	1	18.5	明赤色	草の密生域
裸地域	bare ground 1		1	14.5		1	14.7	暗茶色	暗い茶色系の土、まばらな草、灌水の混合
	bare ground 2		1	20.4		1	24.2	暗灰色	暗い茶色系の土、瓦礫、アスファルトの混合
	bare ground 3	77.2	1	17.0	69.6	1	18.5	灰色	灰色系の土、瓦礫、砂利、アスファルトの混合
	bare ground 4		1	15.2		1	5.9	明灰色	明るい灰色系の土、砂利、アスファルトの混合
	bare ground 5		1	10.0		1	6.3	明灰+淡青色	砂、砂利の混合
建物群	structure	3.3	4	3.3	2.8	8	2.8	白～淡青色	残存ビル、仮設建物屋根、盛土法面コンクリート等

図-2 ISO-data法によるクラスタリング処理による土地被覆分類図

表-2 2012年画像の分類精度評価

単位: 画素数

分類クラス	各クラスの基準領域での分類結果		
	水域	植生域	裸地域
水域	1054	0	3
植生域	0	540	137
裸地域	65	88	7875
合計	1119	628	8015
各クラスの分類精度(%)	94.2	86.0	98.3

(建物群は分類画素数が極端に少ないため評価外とする)

図-4(a) 評価領域内の基準図(2013年)

図-4(b) 評価領域内の分類図(2013年)

図-3(a) 評価領域内の基準図(2012年)

図-3(b) 評価領域内の分類図(2012年)

表-3 2013年画像の分類精度評価

単位: 画素数

分類クラス	各クラスの基準領域での分類結果		
	水域	植生域	裸地域
水域	971	2	13
植生域	0	1501	456
裸地域	209	261	6283
合計	1180	1764	6752
各クラスの分類精度(%)	82.3	85.1	93.1

(建物群は分類画素数が極端に少ないため評価外とする)

では、被災領域内の裸地面上に、草類と考えられる植生の密生繁茂が多く、箇所で分類されている。このように被災からの復興過程の長期化に伴い、多くの裸地面が現状維持の状況であることが認められた。各クラス分類項目別にみると、画像判読上比較的明るい灰色系統の色で判読できている砂、砂利等の裸地面が経年的に減少傾向にあり、画像上で暗い茶色・灰色系統に識別される土、砂類がやや増加傾向にある。また、これらの中には密生ではないが草類が点在し含まれている傾向が画像判読からも考察され、密生した草類の領域の増加だけでなく、点在し増加する形態で草類が増加傾向にあることが考察された。

b) 分類クラスの整理と精度検証

2012年および2013年の各土地被覆基準マップ(図-3(a)および図-4(a))を元に、それぞれの分類結果の精度を検討した(表-2および表-3)。ここでは、評価領域内の各クラス基準領域内の分類結果で評価した。今回の分類精度は、水域、植生域、裸地面域、共に約80%~95%を示していることが確認された。また、建物群については分類される画素の数が非常に少ないことから、ここでの精度評価からは除いた。

(2) フィルタリング処理による土地形状変化の評価

a) 評価指標値の時系列変化特性

フィルタリングによって得られた、評価指標値の空間的な分布を可視化したものを図-5(a)~図-5(d)に示す。また、評価指標の時系列的な変化傾向を図-6、図-7に示す。

特性を表-1に整理し、その分類図を図-2に示す。津波被災から約1年後(図-2(a))では、瓦礫の撤去の進行に伴い、土、砂、砂利等で覆われた裸地面が広く分布する傾向が示された。今回のクラスタリングでは、アスファルト等の区画道路を単独で抽出することが困難であったため、分類クラスのいくつかは道路面を含める形での表示となっている。被災から約2年経過した時点(図-2(b))

図-5 フィルタリング処理による土地被覆形状の評価指標値の分布状況

被災前の土地被覆状況を基準と考えた場合、被災前の市街地に直線的で規則的な形状の多くの小規模建物が分布していることから、その建物個々の境界面で反射率の差が大きくなる傾向を示し、この結果、高指標値の分布量が多くなる傾向が示された。また、被災直後は津波によって市内の多くの小規模建物が崩壊し、土、砂、水等と入り混じった状態で土地表面に広がったことから、多数の小規模建物を示す高指標値の分布量が減少し、低指標値の範囲で、幅をもって無秩序に分布が広がる傾向が示された。また、津波による広い範囲での灌水面の発生により、さらに低指標値の分布量も同時に増加している傾向も示されている。加えて、被災から時間が経過するにつれ、低指標値の範囲に分布量が集約する傾向が示され、同時に高指標値の範囲での分布傾向が被災前の分布傾向に僅かに復元してきている傾向が認められた。これは、瓦礫の撤去が進むことから、土地表面が均質な裸地面が増加するためであり、また、区画形状の復元と道路の復元が進捗することによって、市街地の規則性が徐々に復元し高指標値の領域も同時に微増したものと考察さ

れる。以上のように、被災前から被災直後および復興過程における土地表面の規則性の変化等の形状特性が、時系列的に評価することができ、復興のプロセスについて効果的に考察することができた。

b) 地表面反射率と元のDN値の場合の比較

図-7は、画像の元DN値による評価指標値である。地表面反射率の場合と比較した結果、被災前から被災後の復興プロセスの進捗に際して、ほぼ同様の分布傾向を示すことが求められた。しかしながら、被災直後のみ分布形状が地表面反射率の場合とやや異なる傾向が示された。元のDN値による場合と地表面反射率の場合を比較すると、津波によって広く発生した灌水面上での元のDN値と地表面反射率とで、ばらつきの違いがやや顕著であることが認められた。これは、津波によって灌水した浅水域で、瓦礫や土砂が過度に混在している箇所では、元のDN値では、比較的、暗い色彩にて同一のDN値で示されていても、地表面反射率の場合では、反射率の微妙な違いによって、より複雑に幅を持って評価指標値が分布する傾向を示すことが考察された。

図-6 地表面反射率の場合での評価指標値の時系列変化

図-7 元DN値の場合での評価指標値の時系列変化

図-8 土地被覆の時系列変化が無い領域での評価指標値の比較

c) 観測諸元の違いによる指標値への影響

津波による被害が無く、時系列的に土地被覆変化が殆どない被災領域外の検証エリア（450m×450mの矩形エリア：被災領域からやや離れた北部の丘陵上の住宅地）における指標値の時系列的な比較を示す（図-8）。図に示されるように、観測季節、観測諸元および観測センサの違いによる差は、多少存在するものの、土地被覆に変化がない場合は、ほぼ同一の分布形状を示すことが確認された。これにより、今回の使用データにおいて観測時期や観測諸元の違いによる評価指標値へ影響は、殆どないものと判断できた。

4. おわりに

ここでは、津波によって甚大な被害が発生し、その後の復興が進捗中の陸前高田市を対象に、時系列高分解能衛星画像解析による復興過程の評価を行った。クラスタリング処理による土地被覆分類から、被災後約1年、お

よび2年経過した対象地域の土地被覆状況の変化の特徴が示された。ここから、瓦礫撤去の進行による裸地面の空間分布と、裸地面上の植生の増加傾向が評価された。また、土地被覆の規則性を反映する画素間フィルタリングによる評価指標値によって、土地被覆形状の観点から復興プロセスを評価することができた。ここから、被災によって土地表面の規則性が大きく変化し、時系列的な復興の進捗にともなう、土地被覆面の規則性が復元してきている傾向が評価された。

今後は、今回検討した復興過程の評価手法のより拡張を進め、長期的なモニタリングを継続することによって、さらに多様で効果的な復興支援のための空間情報支援を行えると考えられる。

5. 付記

GeoEye-1 Data is owned by GeoEye, Inc.. All rights are reserved by GeoEye, Inc.. The Worldview-2 images include copyrighted material of Digital Globe, Inc., All Rights Reserved.

参考文献

- 羽柴秀樹・久保田 進 (2011) : 衛星画像による東北地方太平洋沖地震津波による災害の初動調査, 土木学会論文誌B2 (海岸工学) Vol.67, 2, pp.1311-1315.
- Gang R. and Aiming L. (2011) : Distribution of inundation by the great Tsunami of the 2011 Mw 9.0 earthquake off the Pacific coast of Tohoku (Japan), as revealed by ALOS imagery data, International Journal of Remote Sensing, Vol.32, 22, pp.7073-7086.
- Hashiba H. (2012) : Evaluation of Tsunami disaster by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake in Japan by using time series satellite images with multi resolution, Proceedings of the American Society of Remote Sensing and Photogrammetry (ASPRS) 2012 Annual Conference, pp.1-11, CD-ROM.
- Hashiba H. (2013) : Continuous assessing for the recovery and reconstruction of post-Tsunami disaster of Rikuzentakata City in ria coast by using time series high resolution satellite images, Proceedings of the American Society of Remote Sensing and Photogrammetry (ASPRS) 2012 Annual Conference, pp.1-11, CD-ROM.
- Hashiba H. and Sugimura T. (2011) : Analysis of Tsunami disaster in east Japan by using ALOS satellite images, Proceedings of the Remote Sensing and Photogrammetry Society Conference 2011, pp.1-4, CD-ROM.
- Richmond B., Szczuciński W., Chagué-Goff C., Goto K., Sugawara D., Witter R., Tappin D.R., Jaffe B., Fujino S., Nishimura Y. and Goff J. (2012) : Erosion, deposition and landscape change on the Sendai coastal plain, Japan, resulting from the March 11, 2011 Tohoku-oki tsunami, Sedimentary Geology, 282, pp. 27-39.
- Richter R. (2010) : Atmospheric, / topographic correction for satellite imagery - ATCOR2/3 User Guide, DLR - German Aerospace Center, pp.1-165.
- Richter R., Schläpfer D and Müller A (2006) : An automatic atmospheric correction algorithm for visible/NIR imagery, International Journal of Remote Sensing, Vol.27, 10, pp.2077-2085.