

衛星分光画像を用いた東北地方太平洋沖地震による津波被害の検証

青山 隆司* ・ 藤巻 翔平**

Evaluation of Tsunami Disaster by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake using Multi-Spectral Satellite Images

Takashi Aoyama and Shohei Fujimaki

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake ($M_w = 9$) was one of the most devastating earthquakes in Japanese History. Mainly because of the extremely large and widespread tsunami, it accounted for nearly 19,000 people, missing or dead. This paper is, therefore, focused on the tsunami damage. As a First step to evaluate the tsunami damage, the recovery process of the flooded area has been monitored quantitatively using satellite remote sensing techniques.

The preliminary results indicate that the flooded area (wet land) becomes small gradually, compared with just after the huge tsunami, however, the recovery is not monotonous, fluctuating by rain, snow and the rise of a tide level.

Keywords: 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, tsunami, flood area, satellite remote sensing

1. はじめに

2011年3月11日14時46分18秒（日本時間）、宮城県牡鹿半島の東南東沖130km（北緯38度6分12秒、東経142度51分36秒）の海底を震源として発生した東北地方太平洋沖地震は、日本における観測史上最大の規模、マグニチュード（ M_w ）9.0を記録し、震源域は岩手県沖から茨城県沖までの南北約500km、東西約200kmの広範囲に及んだ。この地震により、場所によっては波高10m以上、最大遡上高40.5mにも上る大津波が発生し、東北地方と関東地方の太平洋沿岸部に壊滅的な被害をもたらした。

また、大津波以外にも、地震の揺れや液状化現象、地盤沈下、ダムの決壊などによって、東北と関東の広大な範囲で被害が発生し、各種ライフラインも寸断された。震災による死者・行方不明者は約1万9千人、建築物の全壊・半壊は合わせて35万戸以上、ピーク時の避難者は40万人以上、停電世帯は800万戸以上、断水世帯は180万戸以上に上った。地震と津波による被害を受けた東京電力福島第一原子力発電所では、全電源を喪失して原子炉を冷却できなくなり、大量の放射性物質の漏洩を伴う重大な原子力事故に発展した（福島第一原子力発電所事故）。これにより、原発のある浜通り地域を中心に、周辺一帯の福島県住民は長期の避難を強いられている。

* 電気電子情報工学科

** 宇宙通信工学科 学生

本論文では、上記震災被害の中で衛星リモートセンシングを用いて解析可能な対象として津波による冠水被害を取り上げる。東日本大震災直後を中心に、津波による冠水域の衛星観測は多く行われてきたが、その解析は定性的なものに限られていた。我々はこの冠水域の広さを定量化し、その回復状況を浸水面積の変化としてとらえ、震災後約6ヶ月間の衛星データを解析した結果について報告する。

2. 津波の概要と解析に使用する衛星データ

今回の震災によって発生した津波による被害は甚大である。その津波の高さの計測結果を図1に示す。

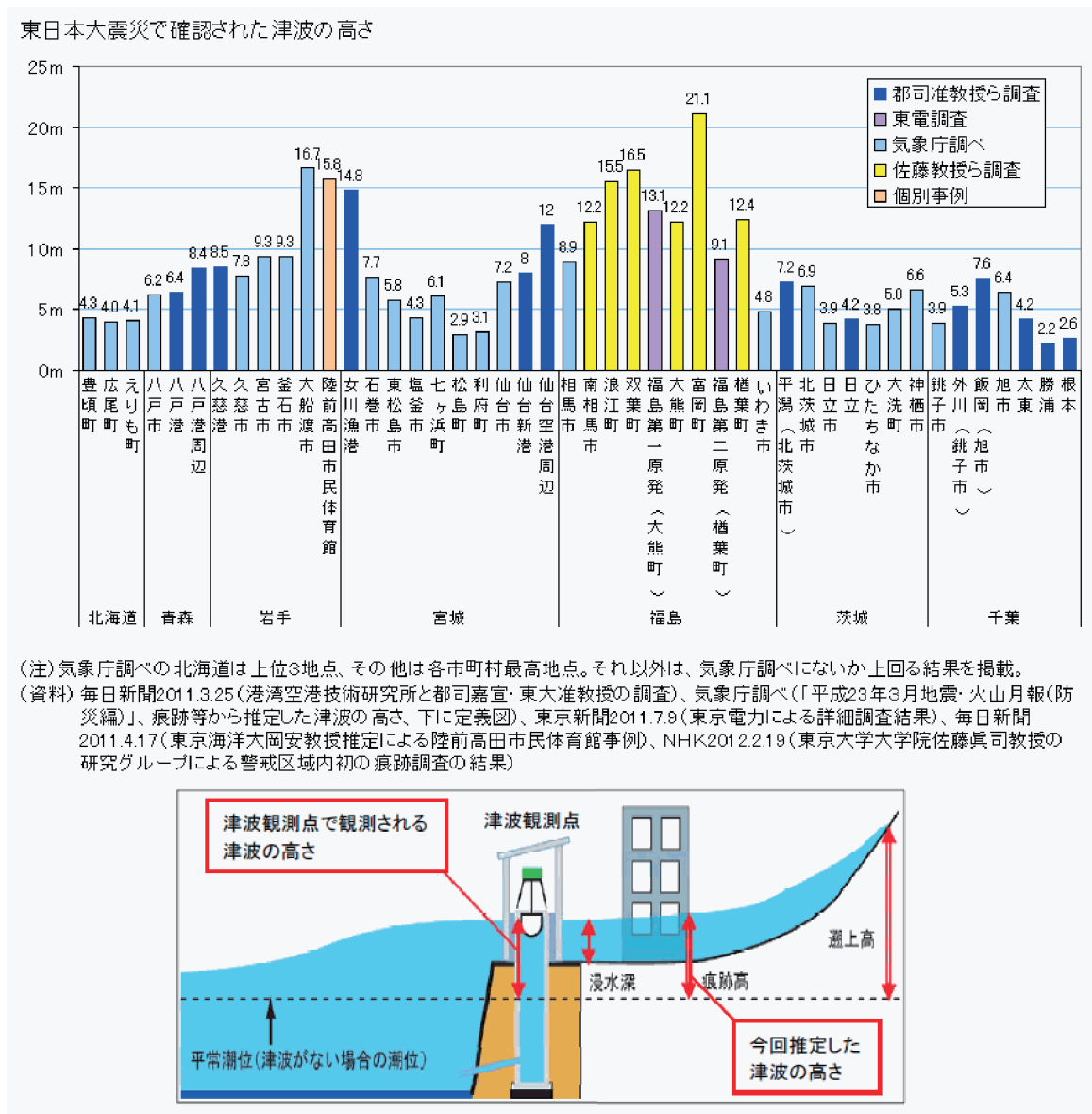


図1 津波の高さ(社会実情データ図録より)

図1から解るように、岩手、宮城、福島の沿岸域には波高10mを超える大津波が襲来し、沿岸域は広範囲にわたり海水を被った。地震による地盤沈下の影響もあり、冠水状況は長期間に及び、

現在でも完全には回復していない。そこで、この冠水域の回復状況を、衛星分光画像データを用いてモニターすることを試みた。

使用した衛星画像は、あわらキャンパスで受信した NASA の地球観測衛星 Terra、Aqua に搭載された MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer:中分解能撮像分光放射計) センサの画像データである。MODIS センサは、36 band の波長帯で画像データを取得するが、本研究ではその中で最も解像度が高い(空間分解能 250m) band1 (赤: 620nm~670nm)、band2 (近赤外: 841nm~876nm) を使用する。近赤外バンドの光は水に強く吸収されるため、津波による冠水域あるいは水分量の検出に適している。

あわらキャンパスには、平成 15 年に設置された 10m パラボラアンテナによる衛星データ受信システムが稼働しており、現在まで順調に MODIS データを受信してきた。さらに、2011 年 10 月に打ち上げられた NASA の地球観測衛星 NPP (NPOESS Preparatory Project)、その後打ち上げが予定されている NPOESS 衛星 (JPSS 衛星に名称変更) の受信のため、新たに 2.4m のパラボラアンテナを用いた受信システム (図 2 参照) が 2011 年 3 月に導入され、観測を開始している。この新しい受信システムは、NPP、NPOESS のみならず Terra、Aqua/MODIS のデータ受信も可能である。本研究で用いた MODIS データはこの新システムを利用して受信したものである。

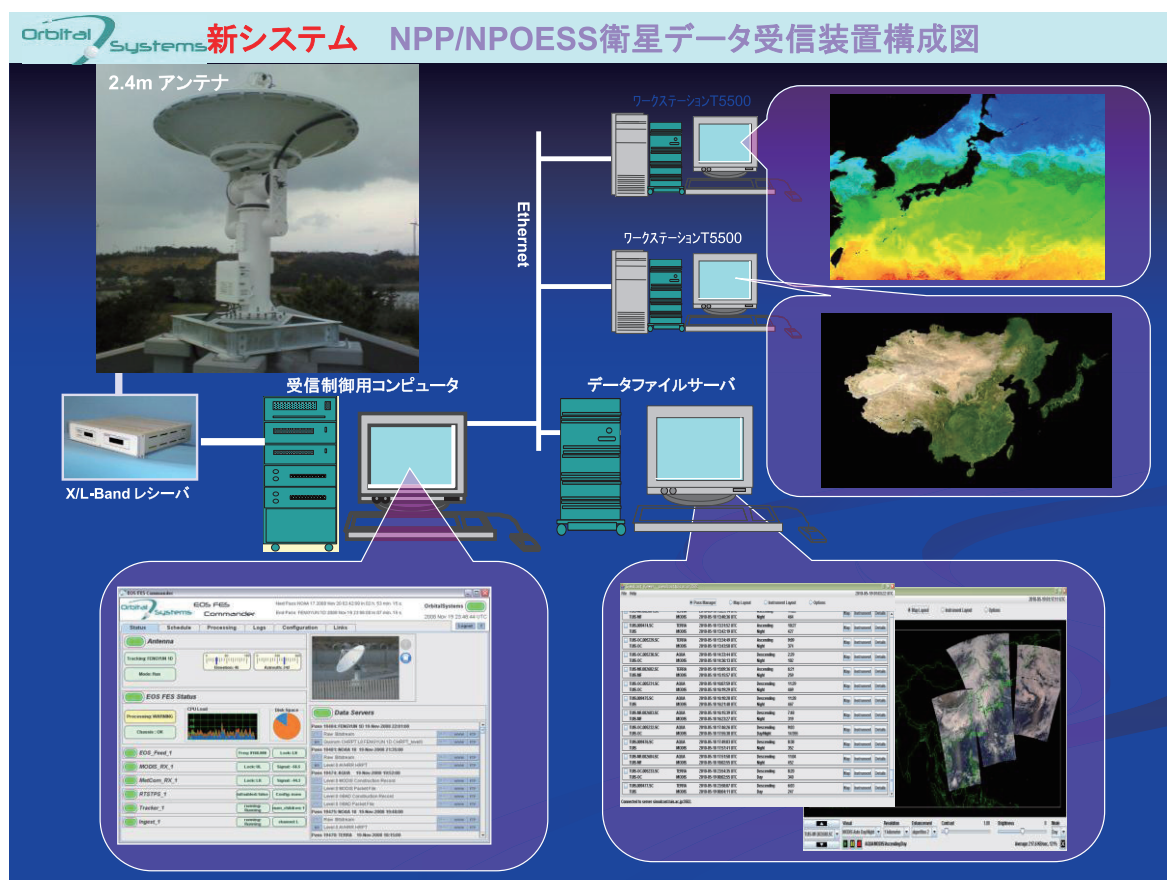


図 2 直径 2.4m パラボラアンテナを用いた衛星データ受信システムの構成図

3. 津波による冠水域の回復状況

3. 1 疑似カラー表示画像による冠水域の抽出

芦原キャンパスで受信された NASA の地球観測衛星 Terra、Aqua に搭載された MODIS センサの画像データを用いて、津波による冠水域の回復状況について解析を行った。図 3 は宮城県および福島県沿岸域の冠水状況を示している。この図で、R,G,B はそれぞれ MODIS センサの Band1、Band2、Band3 に対応しており、Band1 は可視光の赤色、Band2 は近赤外光、Band3 は青色の光の強度を表している。Band2 の近赤外線が水によく吸収されることから、Band2 の反射強度が低い部分には水があることが予想される。したがってこの図で緑色の部分は陸地、黒い部分は水域(海、湖および冠水域)と考えてよい。またその中間の色は、植生（近赤外帯を強く反射する）の少ない都市部あるいは部分的な浸水域に対応しており、白色は雲を表している。図 3 左図は震災前の 2 月 26 日、中央の図は震災後 3 月 13 日、右図は 3 月 19 日の画像データである。震災前の海岸線と比較すると、震災後の中央および右図では沿岸域が大きくえぐられたように冠水していることがわかる。また、3 月 13 日（中央）に比べて 3 月 19 日（右）では海岸線が少し見えてきており、冠水状況に若干であるが回復傾向が見られる。紙面の都合で図は省略するが、その後の 4 月、5 月の衛星データからも降雨などの影響を受けつつ冠水域が徐々に回復していく様子が見て取れる。



図 3 宮城県および福島県沿岸域の冠水状況の変化（2 月 26 日（左）、3 月 13 日（中央）、3 月 19 日（右））

3. 2 冠水域の定量的解析

前節では冠水域の回復状況を定性的に見てきたが、ここでは冠水域の回復状況を定量的に把握するため新たに解析を行った。解析対象の地域は、特に冠水被害が顕著な宮城県亶理町 ($38^{\circ}1'16.50''\text{N}$)、福島県南相馬市鹿島町 ($37^{\circ}41'6.18''\text{N}$) および南相馬市小高町 ($37^{\circ}31'30.18''\text{N}$) の3ヶ所を選定した (図4参照)。

研究の最終目標としては、津波による冠水域の面積を評価し、その時間変化 (回復過程) をモニターすることである。ここでは、図4で示した各緯度線上のピクセル (1次元) の Band2 (MODIS) の反射強度を用いて冠水状況を定量的に評価する。

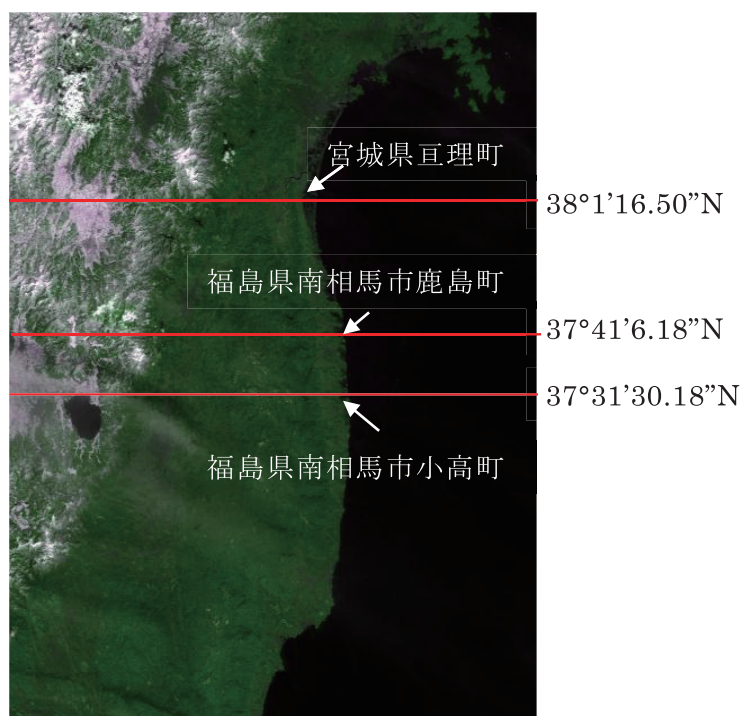


図4 解析を行った場所

最初に、図4の宮城県亶理町 ($38^{\circ}1'16.50''\text{N}$) の緯度線に沿った Band2 の反射強度を2月26日から9月7日までの間の13日間に対し図5に示す。横軸は経度方向のピクセル数を示しており1番目のピクセルは東経 $139^{\circ}50'2.40''$ 、392番目のピクセルは東経 $141^{\circ}23'38.40''$ に対応している。この図で、一番下のグラフが2月26日の反射強度であり、一番上のグラフが9月7日の結果である。また、グラフが重ならないように下から順に反射強度 (DN値) に100ずつ足した値を示している。

ピクセル数275以上は海域に対応しており、低い値を示している。一方、ピクセル数275以下の部分は陸域で、陸地の状況 (裸地、都市部、山林等) および雲の有無により大きく変動している。沿岸域を詳しく見るため、図6に2月26日と3月14日の亶理町付近の沿岸域の Band2 の反射強度分布を示す (図5の一部を拡大)。図5、6では、ある緯度線上 (1次元) のピクセルに対しての水分量の変化を見ているが、この変化を冠水域面積変化と考えても0次近似としては問題ない。図から明らかなように、2月26日のA2部分に比べ3月14日のA2部分が低くなっているのがわかる。この部分が津波による冠水域に相当している。つまりA1(230~260)が陸域、A2(261~275)が冠水域、A3(276~290)が海域と考えられる。

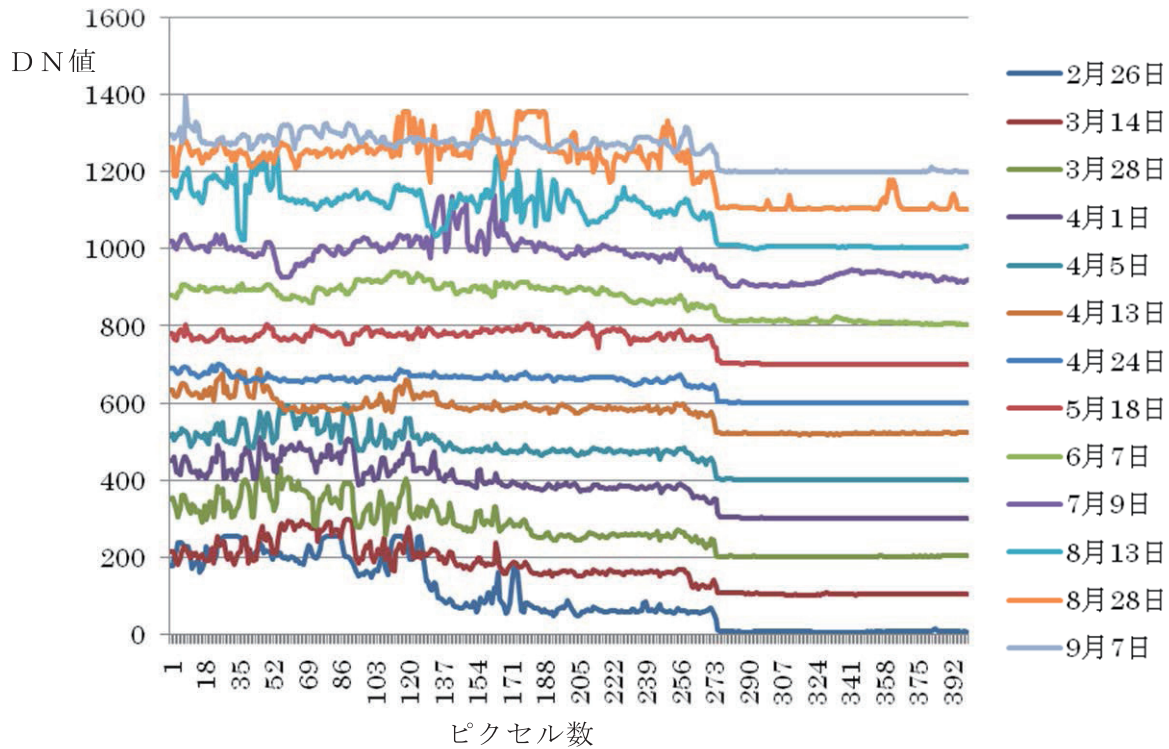


図5 38°1'16.50"Nの緯度線に沿った Band2 の反射強度

この A2 部分の反射強度の低下を定量的に評価するため、各領域の反射強度を平均し、海域である A3 の平均値を簡易的な大気補正のため減算した後、両者の比 R をとる。

$$R = \frac{\overline{A2} - \overline{A3}}{\overline{A1} - \overline{A3}}$$

この値 R が 1 に近いほど冠水域の面積あるいは水分量は少なく、0 に近いほど冠水域の面積が大きいことを示している。

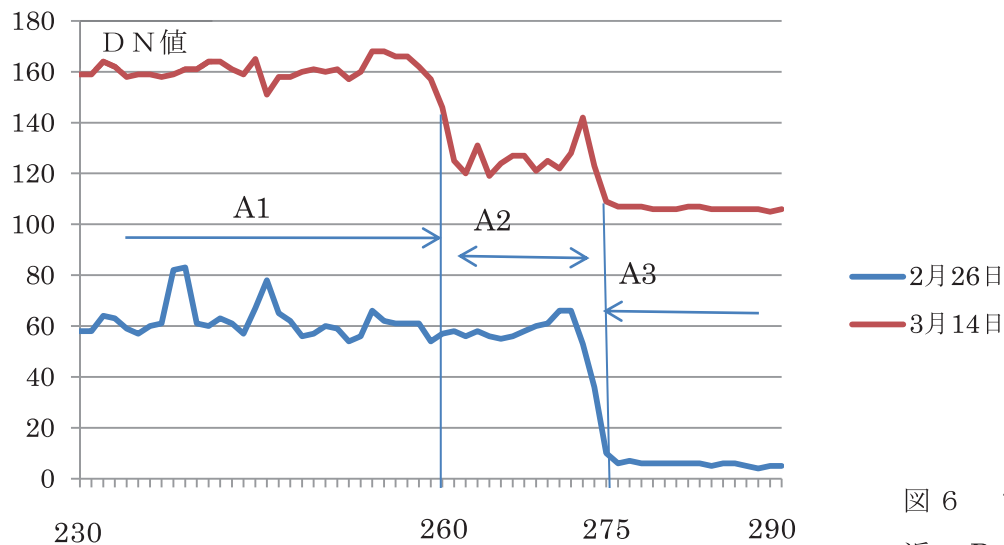


図6 宮城県亘理町付近の Band2 の強度分布

このようにして計算した陸域に対する冠水域の比 R (陸域は 215~260、冠水域は 261~275、海域は 276~400 の範囲における反射強度を採用) を、2 月 26 日から 9 月 7 日までの間の 13 日間のデータについて図 7 にプロットした(横軸は day of year (1 月 1 日を 1 として数えた日数))。この図から、震災直後に大きく落ち込んだ R 値は変動を繰り返しつつ上昇していることが解る。つまり冠水域の面積あるいは冠水量が減少する傾向が表れている。しかし、図 5 からわかるように、グラフには、雲による強い反射の効果が含まれており、正確な地表面の情報が得られてはいないと考えられる。

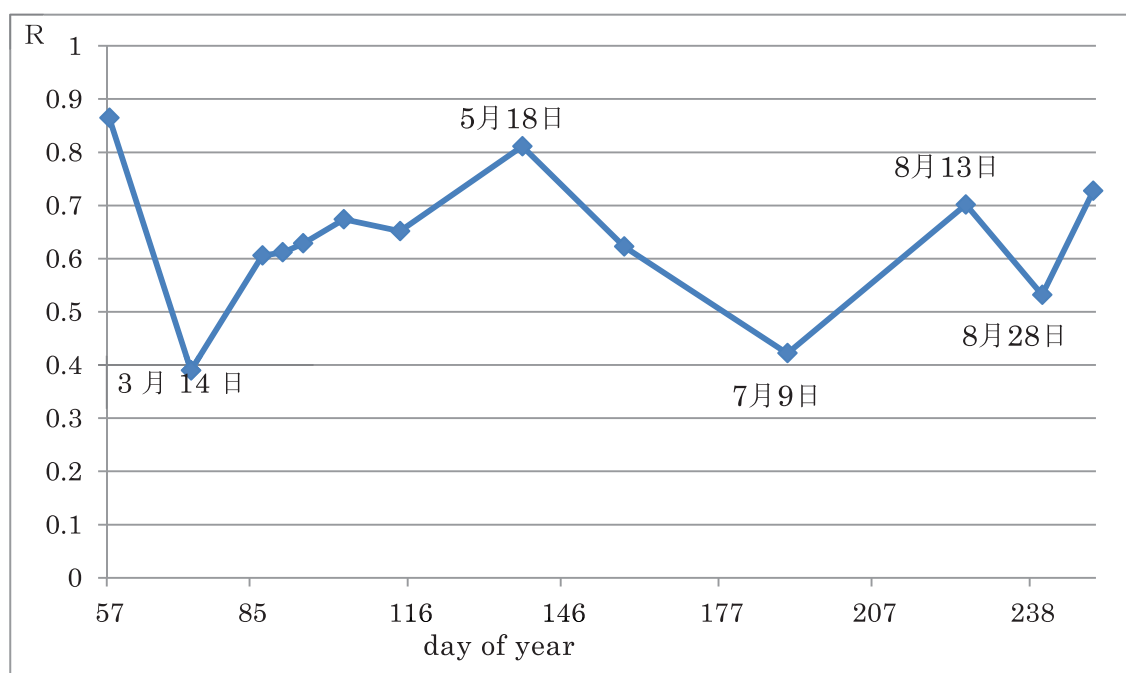


図 7 宮城県亘理町付近の冠水域の回復状況。横軸は day of year、縦軸は R 値。

衛星で受ける光の強度は大気の状態、特に雲の存在により大きな影響を受ける。今回使用している Band2 の近赤外帯の光の強度も同様で、実際に地表で反射された光の強度は雲のない所でのみ正しい値を与える。そこで対象地域に雲が多い日のデータは使用しないこととし、部分的に雲が存在する場合は、雲のない地域のみを抽出しその平均値を A1~A3 の平均値として採用した。このようにして、信頼性の高いデータのみを使用して再計算した結果を図 9 に示す。雲の存在により解析の対象から外したデータは day of year 190 日 (7 月 9 日) と 225 日 (8 月 13 日) であり、雲の無い部分のみのデータを使って解析した日は 158 日 (6 月 7 日) と 240 日 (8 月 28 日) である。一例として、190 日 (7 月 9 日) の疑似カラー画像を図 8 に示す。この例では冠水域付近が薄い雲に覆われているため、この日のデータは使用していない。

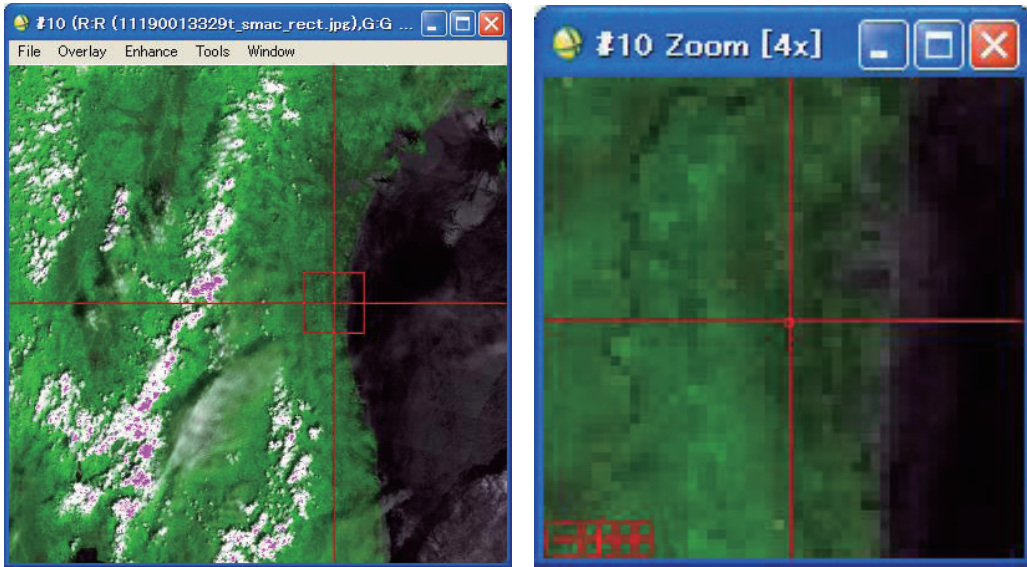


図8 薄い雲の存在のため採用しなかったデータ例(7月9日)。右図は左図の資格部分の拡大図。

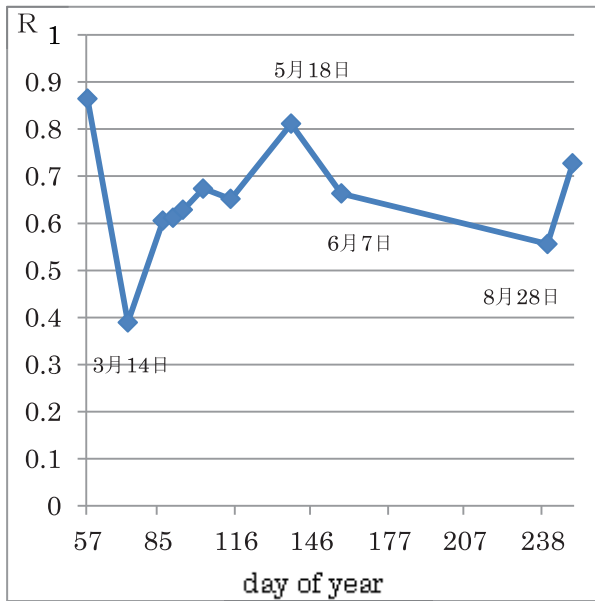


図9 修正後の冠水域の回復状況

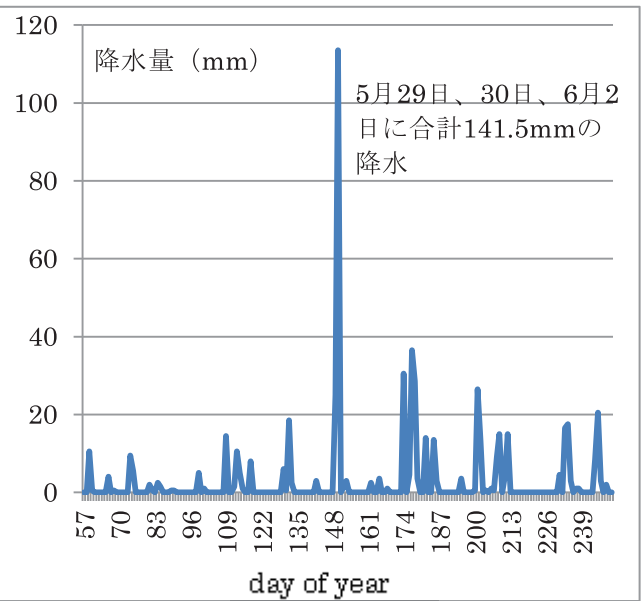


図10 宮城県亘理町の day of year 57 日 (2月26日) から 250 日 (9月7日) までの1日の降水量。(気象庁)

図9からわかるように震災直後に大きく落ち込んだ後、徐々に回復している様子が見てとれる。さらに詳細に見れば、5月18日(横軸 day of year 138)までに一旦回復した冠水状況(R)は、6月7日(横軸 158)には再び大きく落ち込んでいる。この理由として、5月29日、30日、6月2日に合わせて141.5mmの降雨があったことが原因であると考えられる(図10の1日降水量参照)。

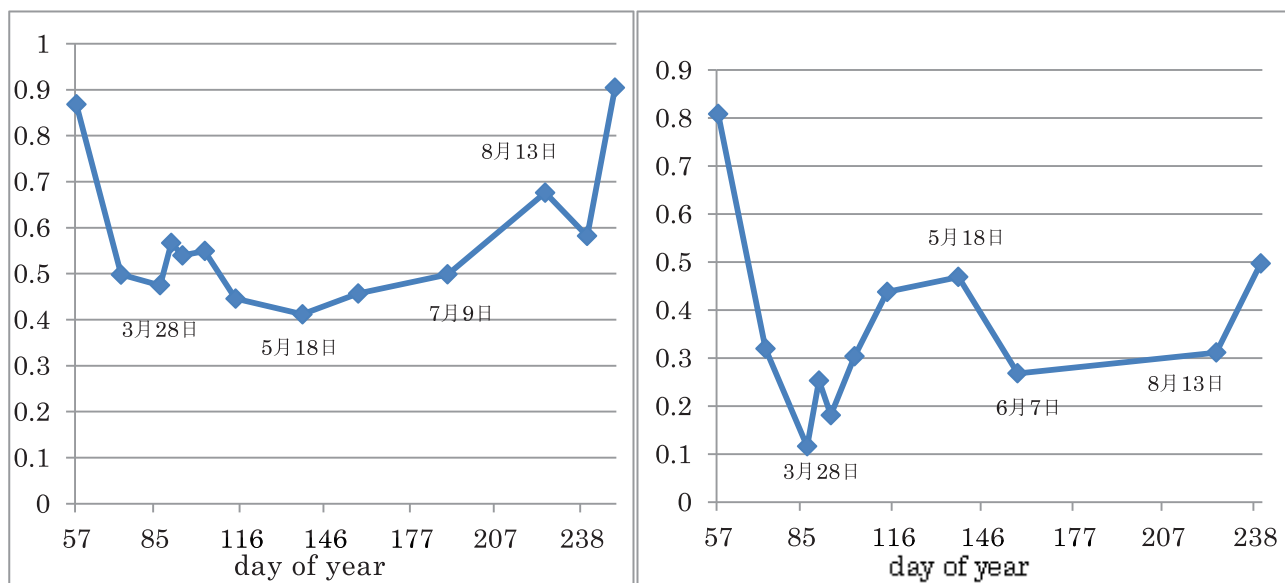


図 1 1 修正後の冠水域の回復状況。(左図) 福島県南相馬市鹿島区 (37°41'6.18" N)、(右図) 南相馬市小高区 (37°31'30.18"N)

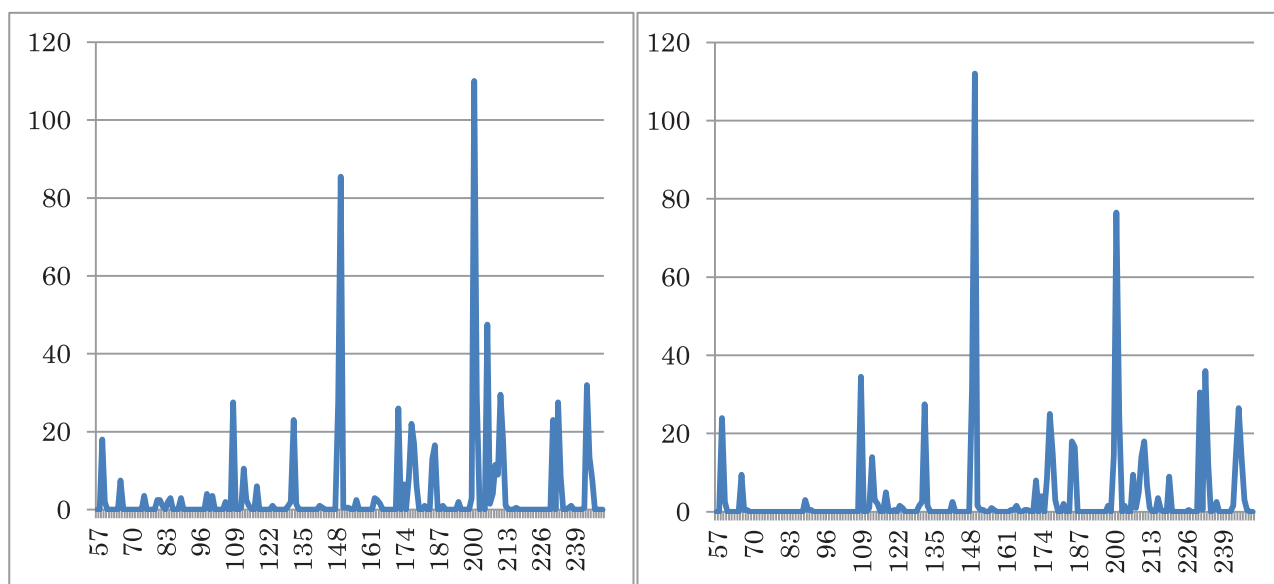


図 1 2 57 日 (2 月 26 日) から 250 日 (9 月 7 日) までの 1 日の降水量。(気象庁)
(左図) 福島県原町市、(右図) 福島県浪江町

同様な解析を図 4 に示した他の 2 つの場所 (福島県南相馬市鹿島町 (37° 41' 6.18" N)、南相馬市小高区 (37° 31' 30.18" N)) についても行った結果を図 1 1 に示す。また、図 1 2 は最寄りの気象観測所での 1 日降水量である。結果は図 9 と同じく、一旦落ち込んだ R 値 (冠水域の拡大) は、降雨により変動しつつも徐々に回復 (冠水域の減少 : R 値の増加) していくことが解る。降雨のほかに、潮位の変動も冠水域の広がりに影響を与えられとされるが、この点を加味したデータ解析については今後の課題である。

5. 結論

本研究はリモートセンシング技術を利用し、東日本大震災の被害検証として、主に東北地方太平洋側沿岸の冠水域の回復状況を把握することを目指したものである。本学芦原キャンパスに設置された Terra, Aqua/MODIS 受信システムで受信した MODIS (中分解能撮像分光放射計) データを利用し、特に津波被害のひどい3つの地域の陸地から海までの近赤外線反射強度について、震災前の2月26日から震災後の9月7日までの観測時に雲が比較的少ないデータを抽出し解析を行った。解析手法としては、陸域、冠水域、海域の各領域での近赤外線反射強度の平均をとり、陸域と冠水域の反射強度の平均値から海域の反射強度の平均値を簡易大気補正のため引いた後、両者の比をとる。この値が1に近いほど冠水面積あるいは水分量は少なく、0に近いほど冠水面積が大きいことを示していることを利用し、時系列に並べることで各地域での冠水域の回復状況を解析した。

解析の結果、3つの地域で震災後急激に広がった冠水域は時間をかけゆっくりと回復していることが解った。震災直後の大規模な冠水域は5月頃一旦回復するが、再び冠水域が広がっている。その理由としては5月末に発生した大量の降雨が関係していることが明らかになった。冠水域の回復の状況はその地域の地形、地質、地震による地盤沈下の状況、さらには潮位変動も関係していると思われるが、これらの点については今後の課題である。

謝辞

本研究は文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「北陸地域の環境の計測と保全に関わる研究拠点形成」（平成23年度～27年度）の援助を受けて実施された。ここにその援助に対し深く感謝する。

参考文献

(1) 気象庁（過去の降水量データ）

<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

(2) 社会実情データ図録（地域別被害状況）

<http://www2.ttcn.ne.jp/honkawa/4362a.html>

（平成24年3月31日受理）