福井工業大学研究紀要　第43号　2013

東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波により太平洋へ流出した海洋漂流瓦礫の監視

青山　隆司*

Monitoring of debris flow in the Pacific Ocean generated by large tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

Takashi Aoyama*

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake was one of the most devastating earthquakes in Japanese history. The extremely large and widespread tsunami it generated caused a large amount of debris to flow into the Pacific Ocean. It is important to understand debris flow in the ocean for both environmental research and international relations. In this study, tsunami debris was monitored by satellite remote sensing. As a first step, we propose a method for identifying debris floating on turbid sea areas through thin clouds using two-dimensional scatter diagrams for MODIS spectral bands. Characteristic regions in the images are effectively separated by using the scatter diagram. Moreover, a method for discrimination of floating tsunami debris from turbid sea areas using SST (Sea Surface Temperature) images is proposed. We also report initial results of monitoring debris floating in the Pacific Ocean.

Keywords: 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, tsunami, debris, satellite remote sensing, Terra/Aqua-MODIS

1.　はじめに

2011年3月11日14時46分18秒、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（Ｍｗ）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。この津波により海に引き出された大量のがれきは、その後海流に乗り太平洋を東方に移動している。

環境省の試算によれば、岩手、宮城、福島の各県からの流出瓦礫の総量は500万ｔに上る。この流出瓦礫のおよそ70%（350万ｔ）は津波発生直後に東日本沿岸域の海底に沈み、残りの30%（150万ｔ）が漂流瓦礫として太平洋を漂っている。これらの漂流ガレキは、船舶の航行に影響

＊　電気電子情報工学科

を与えるのみならず、瓦礫漂着が予想される国々の沿岸漁業にも大きな被害を与えると考えられる。これらの予想される危機に対し、法的な責任はないとはいえ、この瓦礫の漂流状況を的確に把握し、その情報を関係各国に伝えることは日本の責任であると考える。このような観点から、多くの漂流シミュレーションが日本のみならず世界各国で行われており、漂流物の状況により 1 年から 3 年でアメリカ西海岸へ接近、漂着することが予測されている[1]。事実最近の報道によれば、ミッドウェイ沖での震災瓦礫の発見、カナダ西岸へのコンテナや、漁船の漂着等が既に報じられており、今後国際問題に発展する可能性も指摘されている。

このような漂流シミュレーションに加え、実際の漂流瓦礫の位置を視覚的に捉え、確認することが重要である。そこで我々は、この流出瓦礫の漂流状況を衛星リモートセンシングにより監視する研究を行っている。本論文では、漂流瓦礫を薄い雲や、懸濁物質等による変色海域から分離抽出する手法について提案するとともに、瓦礫監視の初期成果について報告する。

2. 衛星画像を用いた津波瓦礫の確認

2.1 高解像度衛星画像による津波瓦礫の確認

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の直後から、世界中の多くの地球観測衛星が地震被害の把握のため東北地方沿岸域の観測を実施した。特に、全天候型のレーダー衛星、高解像度可視画像センサーを搭載した衛星が多くの観測データを提供し、被災状況の把握に貢献した。ここでは、日本の陸域観測衛星ALOSと、アメリカのGeoEye-1衛星の光学センサーによる漂流瓦礫の観測例について紹介する。

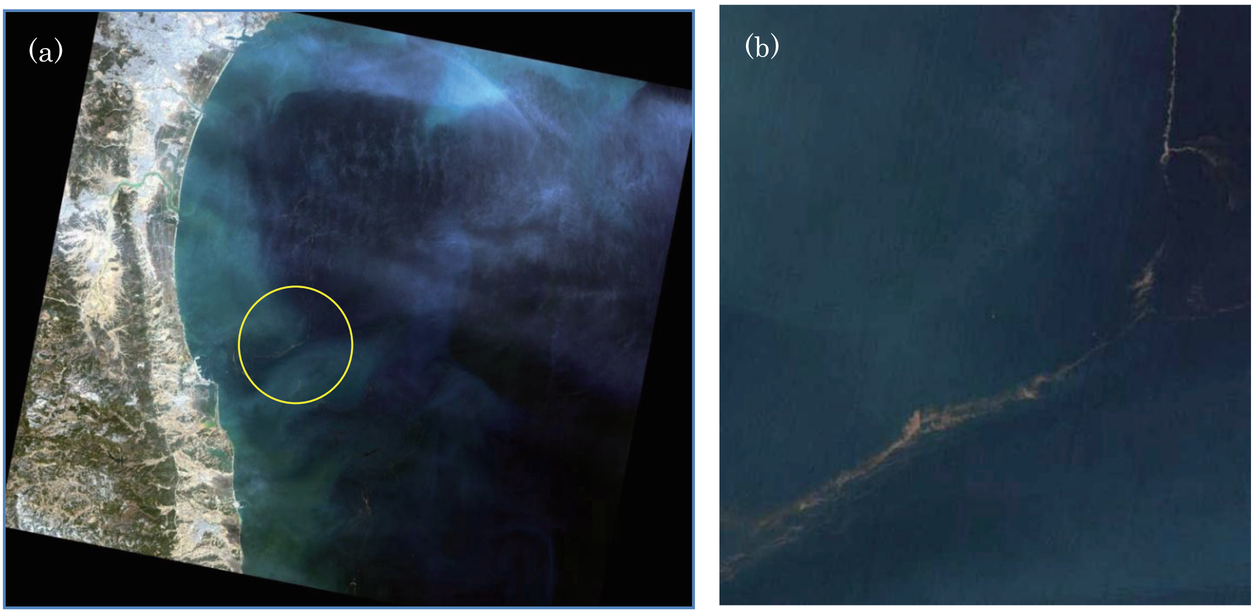


Fig. 1. (a) ALOS true-color image (2011/03/14, 01:12UT; spatial resolution: 10 m) and (b) enlarged image of region indicated by yellow circle in (a).

Fig.1 および 2 に漂流瓦礫の観測例を示す。Fig.1 (a)は 2011 年 3 月 14 日の 1 時 12 分 UT に日本の陸域観測衛星 ALOS に搭載された光学センサーAVNIR-2（空間解像度 10m）により得られた津波瓦礫の True Color 画像であり、図中の黄色の円部分を拡大表示したものが Fig.1 (b)である。この図で、沿岸域の津波瓦礫は黄色い紐のように見える。

Fig.2 (a)は同日、1 時 56 分 UT に GeoEye-1 衛星（空間解像度 2m）により観測された同一の瓦礫群であり、(b)は(a)の右上の黄色い楕円部分の拡大図である。Fig.1 (b)と Fig.2 (a)はほぼ同じサイズと考えて良い。GeoEye-1 の画像は、ALOS AVNIR-2 と比べ、空間解像度が 2m と高いため、Fig.2 (b)から分かるように、細かい瓦礫の漂流状態を確認することができる。

太平洋を漂流する津波瓦礫は、時間が経過するにつれてその密度が低下し、より小さな集団に分離していくことが予想されるため、空間分解能が高い衛星画像を用いることは、津波瓦礫の監視のために非常に有効であると考えられる。しかし、高解像度衛星の観測頻度は、陸地、島などの沿岸域を除けば極めて低い。つまり、陸地や島から離れた太平洋上での観測はほとんど行われていないのが現状である。従って津波瓦礫の監視を行うためには、地球の全表面の観測を行う Terra,Aqua/MODIS のような低空間解像度の衛星センサー（空間分解能は観測波長により 250m、500m、1000m）のデータを用いざるを得ないが、小規模（低密度）の津波瓦礫を、低解像度衛星画像を用いて監視することは一般的に困難である。しかし、太平洋という広い領域で津波瓦礫を監視するほとんど唯一の方法が衛星を用いたリモートセンシングであることを考えれば、低解像度衛星画像を用いて小規模（低密度）な津波瓦礫を抽出する手法を新たに開発することが不可欠である。

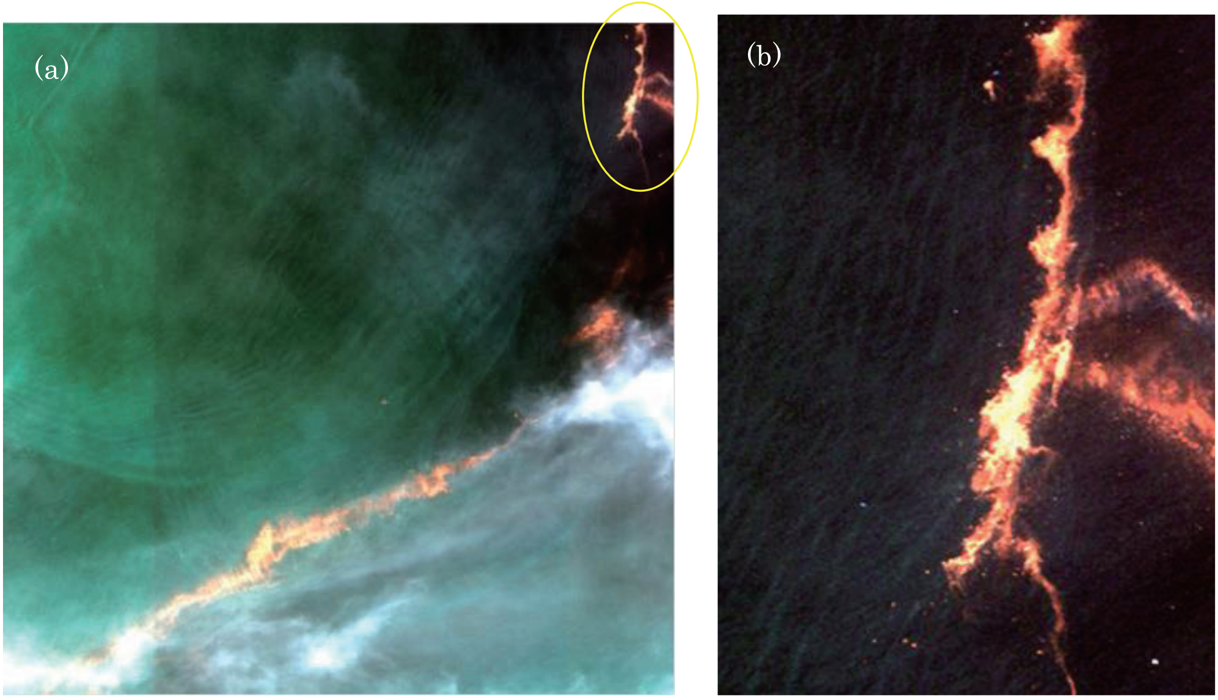


Fig. 2. (a) GeoEye-1 true-color image (2011/03/14, 01:56UT; spatial resolution: 2 m) and (b) enlarged image of region indicated by yellow ellipse in (a).

2.2　低解像度衛星画像を用いた津波瓦礫の抽出

すでに前節で述べたように、津波による瓦礫は細い紐状の集団として漂流している。従って、晴天時の画像を用いたとしても MODIS のような低解像度衛星画像では確認は困難であることが予想される。地球表面の衛星観測を行う場合、雲[2]が全く無い海域はほとんど存在せず、通常は雲の切れ間や薄い雲を通して海上を観測することになるため、瓦礫の確認はさらに難しくなる。

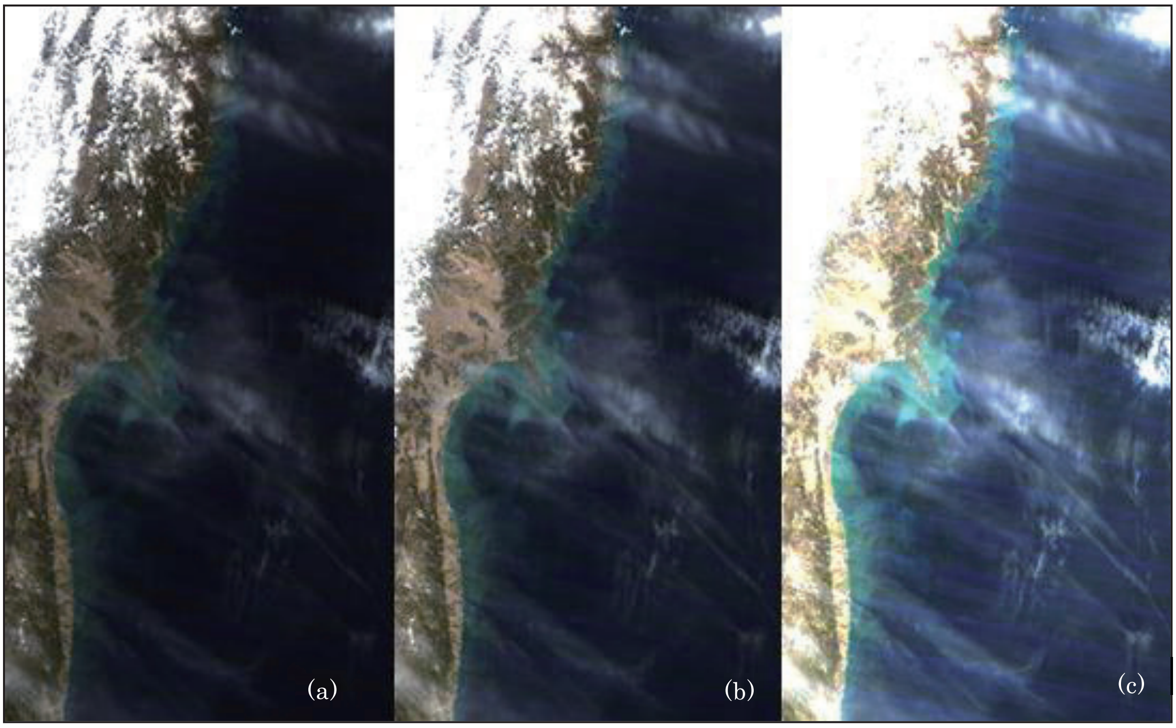


Fig. 3 MODIS true-color images (2011/03/14, Terra, R:G:B = band 1:band 4:band 3; spatial resolution: 500 m) for different radiance levels.

Fig.3 (a) - (c) に MODIS の True-Color 画像(R:G:B = band 1（赤：620nm～670nm）:band 4（緑：545nm～565nm）:band 3（青：459nm～479nm）；空間解像度: 500 m)を、輝度を 3 段階に変化させて示している。これらの画像は、Fig.1 および 2 の高解像度画像と同日のほぼ同時刻に撮影されたものであるが、瓦礫の確認は困難である。

一方、Fig.4 に MODIS の最も解像度の高い（250m）band 1（赤：620nm～670nm）、band2（近赤外：841nm～876nm）

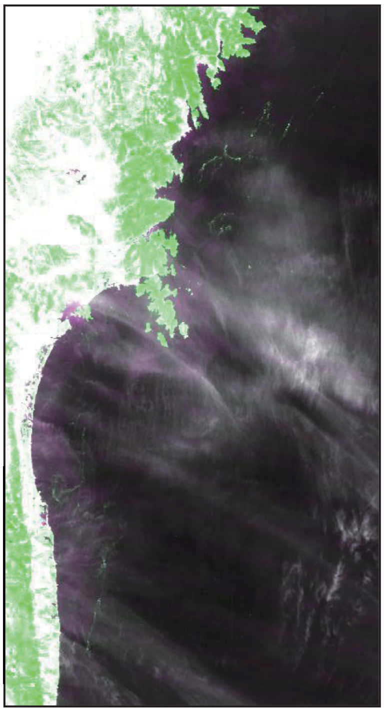


Fig. 4. Pseudo-color image of MODIS obtained on March 14, 2011. (R:G:B = band 1:band 2:band 1; spatial resolution: 250 m)

を用いた疑似カラー画像を示す。この図では、近赤外での反射が強い瓦礫の性質および赤色の反射が強い泥水の性質を考慮し、R、G、B チャンネルにそれぞれ band 1、band 2、band 1 を対応させている。その結果、図中の海域において、細い紐状の瓦礫が緑色で明確に確認でき、陸地からの土砂の流出による汚れた海域が赤紫色で表示されている。このように、Fig.3 では確認できなかった津波による漂流瓦礫は、Fig.4 では明確に確認できる。これは、解像度の差異（Fig.3：500m、Fig.4：250m）よりも、近赤外バンドを使用した効果である。

3. MODIS 画像を用いた津波瓦礫の確認法

前節で示したように、近赤外バンド（Band2）と赤色バンド（Band1）を用いた疑似カラー画像は瓦礫と泥水域の抽出に有効である。この理由を明確にするために、Fig.4（Fig.5(C)と同じ）の画像に対する 2 次元散布図[3], [4]（横軸：Band1、縦軸：Band2）を Fig.5 (A)に示す。この散布図を用いて画像の特徴領域を 5 つの領域に分離可能で、その対応は、(a):陸域、(b):沿岸域、(c):瓦礫、(d):雲および清浄な海、(e):変色海域である。その結果を画像に反映させたものが Fig.5(B)であり、瓦礫領域が赤色、変色海域が黄色、陸域が緑色、沿岸域がピンク色、雲と正常な海は原図（Fig.5(C)）のまま着色されずに表されている。特に、Band2 の反射強度が弱い領域（縦軸の数値<6：水域及び薄い雲領域に対応）

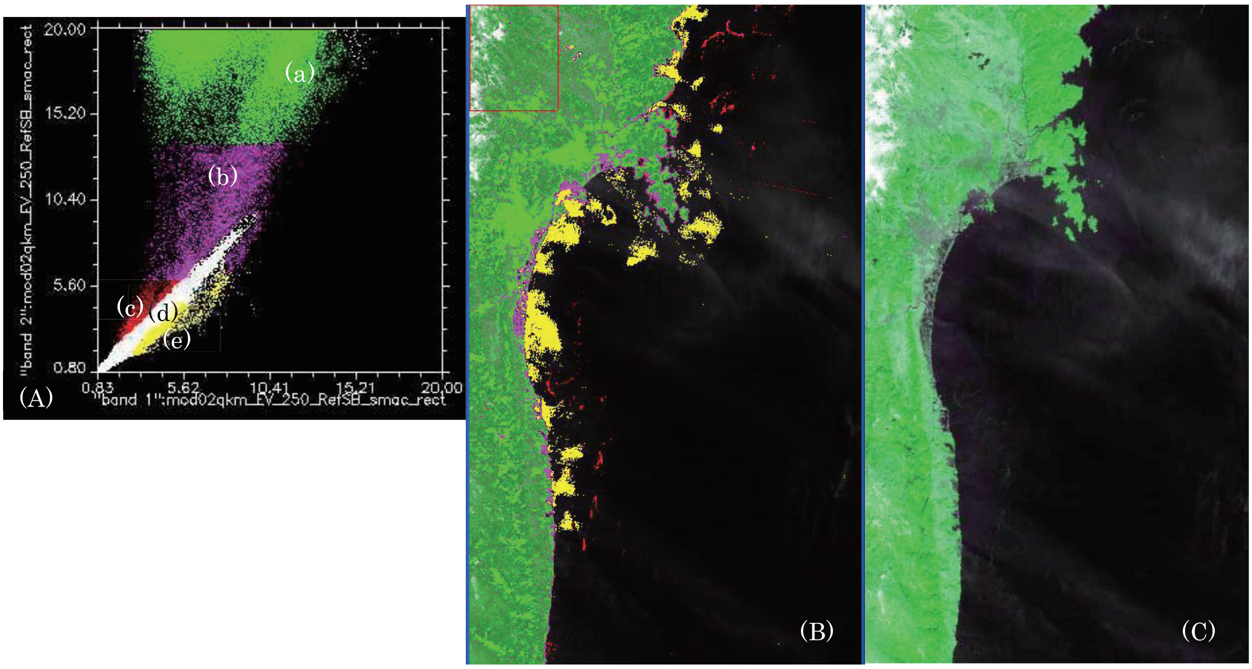


Fig. 5. (A) Scatter plot for band 1 (horizontal axis) and band 2 (vertical axis) and corresponding image (B). Characteristic regions are separated into five regions: (a) land; (b) coastal area; (c) debris; (d) cloud and clear sea; and (e) turbid sea). (C) Original pseudo-color image (R:G:B = band 1:band 2: band 1; spatial resolution: 250 m).

に着目すると、Band1 と Band2 の反射強度がほぼ等しい領域(d)を挟んで、Band2 の反射が強い瓦礫部分(c)と Band1 の反射が強い泥水域(e)がきれいに分離されていることが解る。このように、Band1 と Band2 を用いた画像処理手法は瓦礫抽出に有効であることが確認された。

4. 沿岸域から遠く離れた漂流瓦礫の観測例

漂流瓦礫の監視に使用する MODIS データは、あわらキャンパスに設置されている MODIS 受信システム（2.4m パラボラアンテナを用いた新しい衛星データ受信システム）を用いて、地震翌日の 2011 年 3 月 12 日から今日まで継続して受信されている。この MODIS データを解析した結果、津波瓦礫は複雑な海流にのり、その形を変えつつ太平洋上を東方へ漂流していることが明らかになってきた。

Fig. 6 に千葉県沖およそ 600km で観測された漂流瓦礫の観測例を示す。2011 年 3 月 14 日のデータ例（Fig. 3, 4）を用いて既に述べたように、Fig. 6(a)の True-Color 画像(R:G:B = band 1:band 4:band 3; 空間解像度: 500 m)では瓦礫はほとんど確認できないが、近赤外バンド（band 2）を用いることにより Fig. 6(b)の擬似カラー画像(R:G:B = band 1:band 2:band 1; 空間解像度: 250 m)においては、緑色の細い紐状物体として明確に確認できている（図中の黄色の楕円内を参照）。Fig. 6 の画像は、2011 年 3 月 29 日（地震から 18 日後）の Aqua/MODIS で観測されたものであり、千葉県沖およそ 600km の位置に瓦礫が確認できる。つまり瓦礫は渦流を伴う複雑な黒潮海流に乗って、平均的にはおよそ 1.4km/h の速度で東方に移動したことが解る。

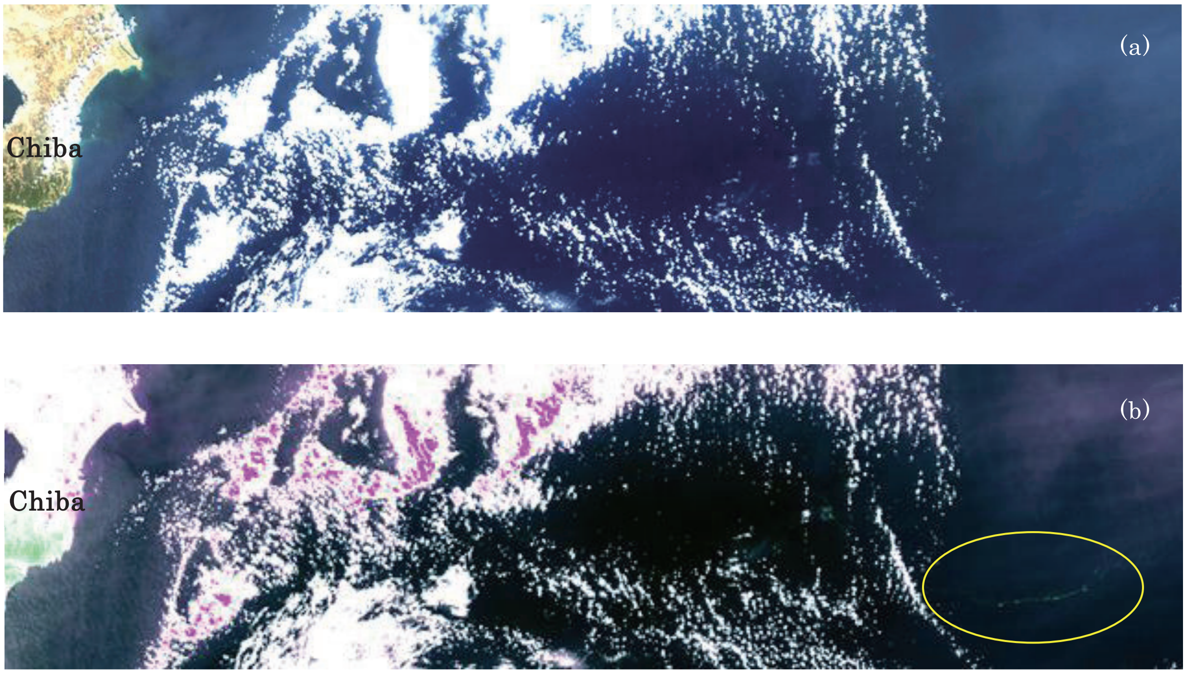
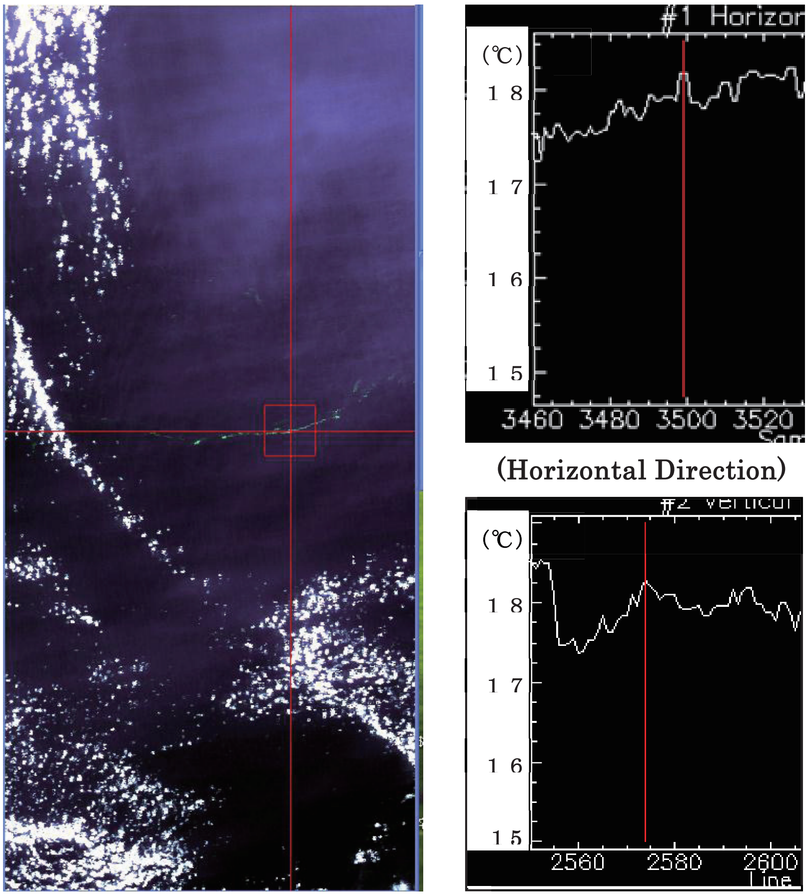


Fig. 6. (a) True-color image (R:G:B = band 1:band 4:band 3; spatial resolution: 500 m) and (b) pseudo-color image (R:G:B = band 1:band 2:band 1; spatial resolution: 250 m) of Aqua/MODIS obtained on 2011/03/29. Debris floating on the Pacific Ocean is visible only in the yellow ellipse in (b).

5. 熱画像を利用した瓦礫の確認

前章までに述べてきたように、漂流瓦礫の確認のために近赤外バンドを使用することは有効である。しかし、薄い雲や、海面に汚れなどが存在する場合、必ずしも近赤外バンドを用いる手法のみで瓦礫の確認ができるわけではない。そこで、ここでは熱バンド（SST: Sea Surface Temperature 画像）の利用による瓦礫の確認法を提案する。Fig. 7 左図は近赤外バンドを用いて瓦礫を抽出した例（Fig. 6 と同一）であるが、この瓦礫の中心部分（赤い十字型の線の交点部分）の温度プロファイルを右図（上図：水平方向、下図：垂直方向）に示す。右図の赤の縦線が瓦礫位置での温度を表している。この日のデータには所どころに薄い雲がかかっているため、正確な表面海水温を表しているわけではないが、明らかに瓦礫の存在している地点で温度のピークが見られている。この理由は太陽光を受け、瓦礫の温度が海面水温より上昇することによると考えられる。この性質を利用し、海面の汚れ（例えば油膜）と瓦礫を差別化して抽出することが可能であると考えている。



(Horizontal Direction)

(Vertical Direction)

Fig. 7. Left panel shows a part of Fig.6 (b). Right two panels indicate the SST (Sea Surface Temperature) profiles in horizontal and vertical directions along red lines in the left panel.

衛星搭載の光学センサーを用いる場合、全く快晴の日の画像は極めて稀で、一般的には薄い雲に覆われている画像が多い。薄い雲が存在するときの海面の観測、特に赤外線バンドを用いた観測は雲を通過する際の強度減少のため不確定要素が加わり、瓦礫の分離抽出が困難になる場合が多い。そのため、可能性がある複数の瓦礫検出手法を開発し併用することが望ましい。

6. 結論

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により、大量の瓦礫が太平洋に流出した。この内、太平洋上を漂流している瓦礫は 150 万 t にも及ぶと見積もられている。本論文では、衛星リモートセンシングを用いた漂流瓦礫の監視を目指し、低解像度ではあるが太平洋上を限なく観測する MODIS 画像を用いた新たな瓦礫抽出手法を提案した。この手法は、近赤外線の反射が強い瓦礫の性質と赤色の反射が強い泥水の性質を利用し、汚れた海域を漂流する津波瓦礫を薄い雲がかかっている低解像度の衛星画像からでも抽出可能にするものである。さらに、表面海水温画像を利用し、油膜等による海表面の汚れと漂流瓦礫を識別する方法についても提案した。

漂流瓦礫のサイズは時間の経過とともに小さくなるため、低解像度の光学センサーである MODIS を使った瓦礫の監視は困難になると予想される。そこで今後は、高解像度衛星の観測対象である沿岸域、諸島近海域を中心に、高解像度衛星画像を用いた瓦礫監視を進めるとともに、近年問題となっている日本海の不法投棄ゴミの監視手法の開発を進めていく予定である。

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。また、画像処理の一部を手伝ってくれた電気電子情報工学科 4 年の寺嶋恵君に感謝する。

参考文献

[1] http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/hyouryuu/souryou/Trajectory_03.pdf

[2] Aoyama T., and M. Nagano, “Test of MODIS-type Cloud Mask Algorithm in Comparison with Collocated Observations by infrared-thermograph on Ground” , Journal of The Remote Sensing Society of Japan, Vol. 31, No. 3, pp. 323-333, (2011).

[3] Aoyama T., and H. Oya, “Condition of red tide appearance in Wakasa Bay based on Terra, Aqua/MODIS images”, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Proceedings, Vol. 6412, 64120V-1 - 64120V-8, Goa India, (2006).

[4] Aoyama T. “Monitoring of debris flow in the ocean generated by huge tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake”, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Proceedings, Vol. 8525, 852513-1 - 852513-7, Kyoto Japan, (2012).

（平成 25 年 3 月 31 日受理）