

衛星搭載合成開口レーダによる海洋監視技術の進化と深化

Evolution of ocean surveillance technology using spaceborne Synthetic Aperture Radar

有井 基文* 小岩 雅和* 青木 佳史* 河谷 嘉文*

Motofumi Arii, Masakazu Koiwa, Yoshifumi Aoki, Yoshifumi Kawatani

本稿では、衛星搭載型の合成開口レーダ（SAR）の歴史や原理について分かり易く説明すると共に、当社が保有する独自のソリューション技術について解説し、「安全な社会」、「豊かな社会」、および「安心な社会」を実現するための貢献という3つの観点から、それらをどのように我々の暮らしに役立てて行くかという事に対して展望を述べる。

This paper discusses how remote sensing technology using space-based synthetic aperture radar (SAR) particularly for ocean surveillance can be utilized to contribute to our daily life. The approaches are comprehensively described in terms of safe, wealthy, and secure societies, based on principles and histories of related technologies.

1. まえがき

地球観測のみならず、深宇宙探査や有人飛行まで実現させるほどに目覚ましい発展を遂げてきた宇宙開発も、いよいよ真価の問われる実利用の段階に移った。今後は、宇宙利用が我々の生活にどう貢献するのかに答えて行くことが当社のような宇宙開発に携わる企業の至上命題と考える。

宇宙から地球を観測する技術、「リモートセンシング」を事業の柱に掲げる当社は、リモートセンシングデータからどのような物理量を抽出し、それをどのように暮らしに役立てるか、いわゆる「リモートセンシングデータの利用」という点にスポットライトを当てて活動している。特に、合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar：SAR）と呼ばれる高分解能アクティブセンサで取得された画像の解析に長年携わっており、様々な物理量の抽出に実績を積んできた。

我々は、リモートセンシング事業のビジョンとして次の3つの社会貢献掲げる。すなわち、「安全な社会」、「豊かな社会」、そして「安心な社会」への貢献である。本稿では、これら社会の実現に向けた当社取り組みについて、独自のソリューションを交えつつ紹介することを目的とする。特に、我が国が海に囲まれた島国であることを鑑み、衛星搭載SARによる海洋監視技術に軸足をおいて議論を展開する。

まず、SARの歴史についてその原理や特性に基づいて述べることで、安全保障に密接に関連して発達してきた

たことを2章に示す。続いて、そのような軍事技術をどのように豊かな暮らしに応用しようとしているかといった取り組みを3章に示し、最後に、2011年3月11日に発生した東日本大震災からの復興に向けて当社がどのように海洋監視技術を活用したかを示すことで、安心な社会への貢献を模索する。

2. 衛星搭載SARの歴史 ～安全な社会への貢献～

本章では、合成開口原理、および衛星搭載SARの特徴について簡単に述べた後、マクスウェル方程式の完成から衛星搭載SARの実現に至るまでにSAR技術が、いかに安全保障と密接に発展を遂げてきたかについて述べる。

2.1 SARの原理と特徴

合成開口原理を理解するためには、レンズを思い浮かべるとよい。我々は、既にレンズの口径が大きいものほど対象をはっきりと映し出すことができることを知っている。SARは、センサ自体を移動させることで仮想的に大きなレンズ（大開口）を実現したものであり、合成開口原理とは、細かい部分を鮮明化する（すなわち高分解能化）ための技術である。図1の（A）に航空機や衛星のような移動プラットフォームに搭載した実開口レーダの例を示す。実開口レーダとは、1回のパルス照射による短い観測で対象を撮影するもので、小さいレンズ（小開口）で対象を見ようとするのと等価である。続いて、（B）に観測対象を連続的な複数のパルスで撮影し

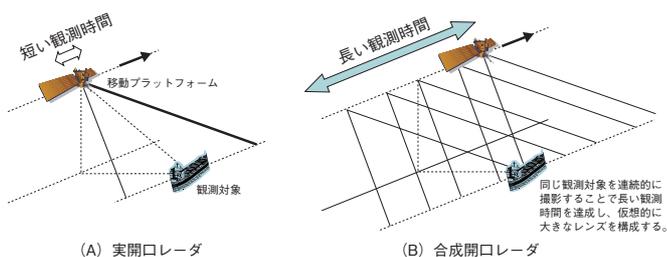


図1 合成開口原理による高分解能化

た例を示す。このような観測を実施することにより、進行方向に仮想的に大規模なレンズ（衛星だと数10km）を構成することができ、従って（A）の実開口レーダに比べて格段に分解能を向上することが可能となる。分解能の影響を示すために、図2に、停泊中の船舶を観測した異なる2つのSAR画像を示す。PALSAR（Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar）は、人工衛星ALOS（Advanced Land Observing Satellite）に搭載されたLバンドSARであり、分解能は10mである。一方、PI-SAR-L（Polarimetric and Interferometric Airborne SAR）は、航空機搭載のLバンドSARであり、分解能は3mである。どちらも宇宙航空研究開発機構（JAXA）により開発されたセンサである。光学画像をベースにこれら2つの画像を比較すると、分解能が高い方が明確に個々の船舶を分離できていることがわかる。なお、両SAR画像の入射角が異なるため、船舶からの散乱及び海面からの散乱に対する強弱はここで議論できないことに留意する⁽¹⁾。

ここで、光学画像の方がSAR画像より視認性が優れていると考える読者もいるだろう。しかし、衛星搭載SARとして通常使用される3cm（Xバンド）～24cm（Lバンド）という波長は水蒸気の影響を受けにくいことがわかっており、即ち天候に左右されないという大きなメリットがある。更に、アクティブセンサの特性として、昼夜問わず観測可能であるため、対象の定期的なモニタリングが必要とされるミッションには最適なセンサといえる。

2.2 SAR発展の歴史

ここでは、前項に示したような特性を持つSARについて、その発展をうまくまとめた防衛大の大内教授執筆の文献⁽²⁾を参照し、マクスウェル方程式から衛星搭載SAR実現までの歴史を振り返る。

- 1864年 J.C.Maxwellによるマクスウェル方程式の完成
- 1903年 C.Hülsmeierが船舶を検知する初のレーダ実験を実施

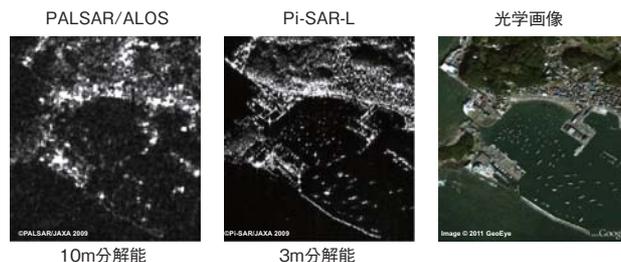


図2 分解能の違いによる船舶の見え方の違い

- 1952年 C.Wileyにより、移動する単一アンテナによる合成開口技術が開発される。この年代にSLAR（Side Looking Airborne Radar）が開発されたが、ほとんどは軍事利用目的で機密に用いられ、公開されることはなかった。
- 1961年 軍の機密として発達してきたSAR技術の民間への公開がなされ、初のSAR画像が発表される。
- 1964年 民間の航空機搭載SARとしては初のERIM（Environmental Research Institute of Michigan）XバンドSARが開発される。
- 1972年 衛星搭載としては初のCSAR（Coherent SAR）がアポロ17号に搭載される。
- 1978年 地球観測目的として初の人工衛星搭載SAR（海洋観測衛星SEASAT）がジェット推進研究所/NASAにより打ち上げられる。

以上から一見して初期のレーダ開発が安全保障を司る軍事技術の発展と密接に関連していることがわかる。とりわけSARについては、1950年代に基礎研究が進められ、1960年代に軍事技術として水面下で発達した。それが1970年代になって衛星搭載SARとして実現されたことでようやく地球観測への活用の扉が開かれたといえよう。なお、先に述べた通り衛星搭載SARの最大の利点は、昼夜天候を問わず広い観測幅と国境線を越えた観測が可能になる点にあり、2011年現在、数100kmまで一度に観測することが可能である。今後は、更に高観測幅／高解像度化が進むことが予想される。

3. 豊かな社会に向けて

各国の安全保障を担う軍事技術として発展を遂げたSARであるが、近年欧米を中心に、一度に広い領域を観測できる衛星搭載SARを積極的に海洋権益の確保のために活用しようという動きがある⁽³⁾。我が国の海に囲まれた地理的状况を考慮すると海産物の安定供給、海洋資源の安定供給、更には安定した海上物資輸送等が確保されることによる国益は計り知れない。

例えば複数の商用の衛星搭載SARを活用することで、図3のような海洋監視システムが考えられる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。ここでは、船舶が海洋に広く分布しており、事前に登録された船と未登録の船（いわゆる不審船や違法操業漁船、および海賊船等）が混在すると仮定する。この特定の海域を定期的に衛星搭載SARにより撮影し、データを地上にダウンリンク後、まずSAR画像再生処理を実施する。その後データ解析において、SAR画像から船舶情報や位置を抽出し、関係機関（ここでは、例として沿岸警備隊）に情報を提供する。情報を受けた機関は、状況に応じて直接取り締まりを実施するか、もしくは、緊急事態であることをブロードキャストする等の対策を講じることが可能となる。

本システムでは、既存の商用宇宙インフラをベースとしていることがポイントであり、そのパフォーマンスを決定付けるのは、データ解析においてどのような物理情報をどのぐらいの精度、および効率で抽出できるかにある。このデータ解析部は、更に3つのプロセスにブレイクダウンされ、それぞれ、船舶探知（Ship Detection）、識別（Classification）、および認識（Recognition）となる。各キープロセスにつき、当社独自のソリューションを次に示す。

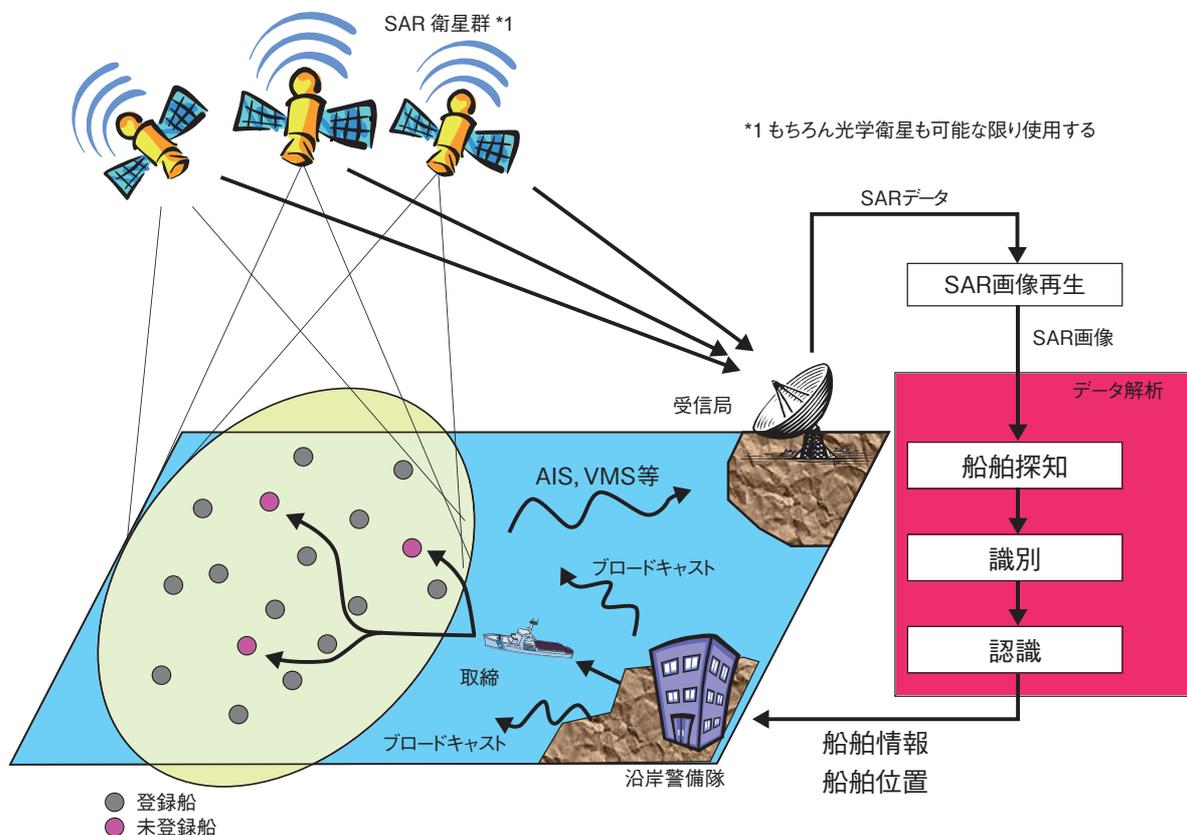


図3 衛星搭載SAR群による海洋監視システム

3.1 船舶探知 (Ship Detection)

有井の研究⁽⁶⁾⁽⁷⁾により、SAR画像上の船舶は、標準偏差という統計量に非常に感度が高いことが明らかになった。当社では、この物理的性質を応用して船舶探知に特化した標準偏差フィルターを開発し、従来用いられてきた船舶と海面の散乱強度比をベースとしたCFAR (Constant False Alarm Rate) 処理と比べて格段に精度、および効率を向上させることに成功した。図4にその結果を示す。SAR画像には、海洋が広く撮影されており、船舶が広く点在しているのがわかる。それに対し、標準偏差フィルター処理結果では、海面の影響が抑

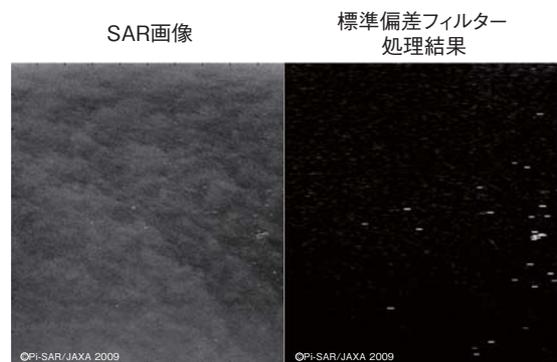


図4 標準偏差フィルターによる船舶探知

圧され、船舶のみが明確に抽出されていることがわかる。なお、本フィルターに関しては、他の研究機関でも検証がなされ、その有効性が示されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

3.2 識別 (Classification)

本プロセスでは、SAR画像から探知された登録／未登録の両方を含む船舶情報を、AIS (Automatic Identification System) やVMS (Vessel Monitoring System) といった船舶自身が発信する情報と相関をとることで識別することを目的とする⁽¹¹⁾⁽¹⁰⁾。なお、本システムでは、違法性の高い未登録船は自ら情報を発信しないことを前提としている。

高い相関精度を達成するためには、光学画像では発生しないSAR画像特有の現象、“ドップラーシフト”を考慮しなければならない。図5にドップラーシフトの実例を示す。点線で示されたものが航行中船舶の航跡であり白丸の位置に船舶があることが期待されるが、実際のSAR画像上では、図のようにずれた位置に船舶が写る。この現象は、船舶の速度によるものであり、真の位置に相当するAISやVMS情報から得られる位置との相関が劣化することを意味する。例えば、PALSAR／ALOSを用いて、直下視から40度傾けた角度（オフナディア角40度）で、時速30kmで衛星進行方向と直交する方向（レンジ方向）に移動する船舶を観測することを仮定すると、SAR画像上で1 km程度の未知のずれが生じ、特に複数の船舶が存在する場合、相関精度は著しく劣化する。このような位置ずれを補正するには、SAR画像上の航行中船舶の速度を正確に計測しなければならない。この問題を解決するために、当社は、複数のソリューションを持つが本稿では、特にリフォーカス逆合成開口レーダ (Inverse SAR : ISAR) による速度推定手法について述べる。

本手法は、SAR画像再生原理に立脚したものであり、通常、観測対象が静止していると仮定して合成開口処理

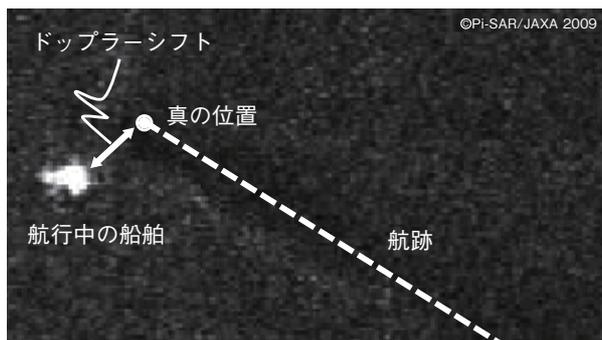


図5 ドップラーシフトに伴う画像上の位置ずれ

(アジマス圧縮とも呼ばれる) を実施するが、その時移動している物体は、ドップラーシフトにより結像点がずれるだけでなく、ぼけを生じる。これは、高速で移動する電車内から遠くの山に焦点を合わせるときに、目の前を通り過ぎる電信柱がぼやけることと等価である。この場合、電信柱に焦点を合わせるためには、どちらの方向にどのスピードで電信柱が通り過ぎるかが既知であることを利用し、その方向に首を振る等するであろう。もちろんそれにより、遠くの山々は、ぼけることとなる。実際のSAR画像取得時には、船舶の速度は未知であるため、仮定する船舶速度を次々と変化させながらアジマス圧縮を繰り返し、ぼけが最小になる、すなわち信号強度が最大になるときの速度を船舶速度と推定する⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。本手法は、従来高精度であることは知られていたが、どのような速度刻みにすればよいか等、効率に関する重大な課題があった。例えば、変化させる速度刻みが小さすぎると速度推定に時間がかかり、大きすぎると、速度を見落としてしまう可能性がある。近年、有井による研究⁽¹⁵⁾で、効率に関する課題が解消され、ようやく実用に供するものとなった。図6にリフォーカスISARによる速度推定後の識別結果を示す。図中赤丸がAISからの情報であるのに対し、実線の緑丸は航行中船舶のSAR画像上での探知位置である。この2つはそのままでは離れた位置にあるが、リフォーカスISARによる速度推定後、ドップラーシフトを考慮して破線による緑丸の位置に探知位置が補正される。赤丸と破線の緑丸を比較した場合、格段に識別精度が向上したことがわかる。なお、本データは全て実観測によるものであり、当該AISの位置情報が画像中の船舶のものであることは、既知である。

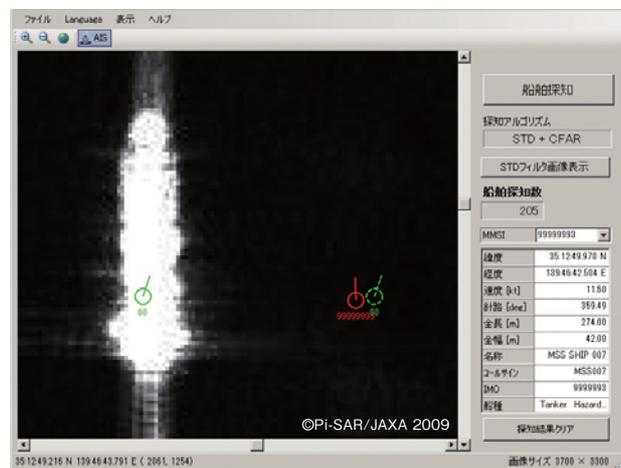


図6 リフォーカスISARによる速度推定による識別精度向上 (画面は、当社開発中の製品HuygensWorks®で実行)

3.3 認識 (Recognition)

識別プロセスにおいて、未登録の不審船と判別された場合、その目的を把握するために、可能な限り船舶の情報（進行方向、サイズ、形式等）を抽出することが求められる。本プロセスのために新たに高分解能なSAR画像や光学画像を撮影することも考えられるが、周回衛星の軌道特性を鑑みると技術的課題が多い。そこで、当社は、既に存在する船舶探知に用いた1枚のSAR画像から情報を抽出する技術開発にこだわり、その結果ポラリメトリックリフォーカスISAR技術の開発に成功した。

本手法のベースは、前項に述べたリフォーカスISARであり、その違いは、推定された速度を用いて画像の鮮明化を行う点にある。更に、当社で培ってきたポラリメトリックSAR画像に関する技術⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾を組み合わせたものが、ポラリメトリックリフォーカスISARである。図7に、本手法を適用した処理結果を示す。ここで、SAR撮影方式の一つに、電磁波の特性を考慮したポラリメトリックSARと呼ばれる技術があり、それにより、1度の観測で偏波特性の異なる複数の画像を生成することができることに留意する。左のSAR画像は、図6の船舶をカラー表示したものであり、ぼけが生じているのがわかる。それに対し、ポラリメトリックリフォーカスISAR処理後の画像は、船舶の外形や内部構造等がシャープに画像化されていることがわかる。図では、垂直（V）偏波と水平（H）偏波を組み合わせることで、HH、HV、およびVVの3つの偏波画像とそれらを平均した画像の計4枚が示されており、画像の映り方が

一つ一つ異なっている。これは、偏波ごとに主体となる散乱メカニズムが異なるためであり、この差異は、船舶の材質や構造等によって生じるものである。すなわち、1回の撮影で鮮明化されたSAR画像だけでなく、識別に必要な多様な情報が得られることを示している。

本章では、海洋監視システムのパフォーマンスを決定付けるデータ解析部について、3つのキープロセスを定義し、それに従って独自のソリューションを紹介した。これらの技術は、開発中の製品HuygensWorks[®]にて実現される。本製品は、リモートセンシングデータから様々な物理情報を抽出するためのライブラリであり、多様な販売形態に対応することを可能にする。例として、デスクトップアプリケーション、およびウェブアプリケーションへの適用例を図8に示す。

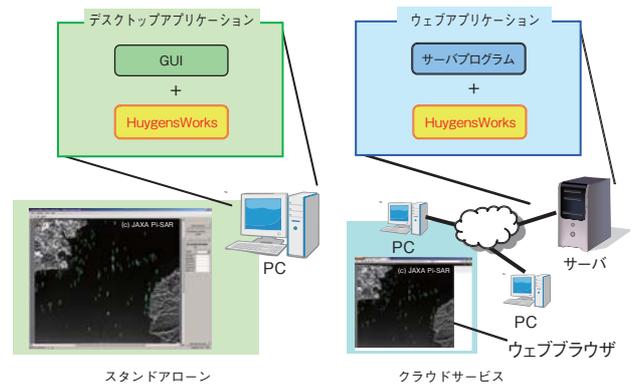


図8 HuygensWorks[®]の適用形態例

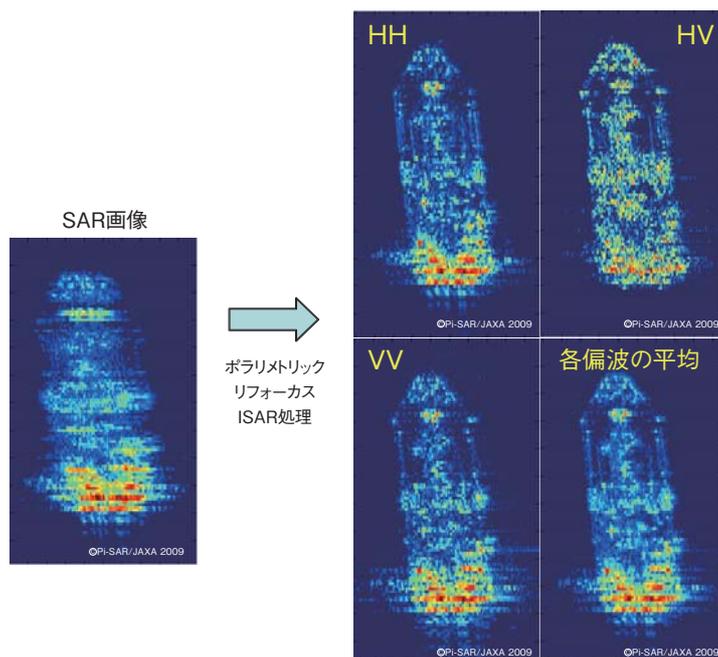


図7 ポラリメトリックリフォーカスISAR処理結果

4. むすび～安心できる社会の実現に向けた取り組み～

当社は、衛星搭載SARをベースとした海洋監視技術を地震や津波、洪水等天災からの復旧、復興にも積極的に活用することにより、予期せぬ事象に対して安心できる社会への貢献を目指している。

2011年3月11日の東日本大震災発生後、当社の海洋監視技術を駆使し、JAXAを通じて日本政府に対し、人命救助、海運物資の輸送、および漂流物の監視に供する情報を積極的に提供してきた。一例として、当社が実施した2011年3月13日の東北地方太平洋沖のPALSAR/ALOS画像からの漂流物解析結果が、JAXA 地球観測研究センター（EORC）ウェブサイトにて2011年3月23日付けで掲載された。（図9参照。）

また、2011年末にタイに甚大な被害を与えた洪水災害が記憶に新しいが、当社は、特に経済的損失の大きかった工業団地の冠水／非冠水エリアの解析について、技術支援を実施した。本詳細についても上記ウェブサイトにて2011年12月8日付けで掲載されている。（図10参照。）なお、本解析では、航空機搭載 SARであるPI-SAR-Lで取得されたHV画像から情報抽出を実施した。

当社は、今後も衛星搭載SARによる海洋監視に限らず、リモートセンシングに関して幅広く取り組むことで、そのポテンシャルを存分に引き出し、社会に貢献できる“宇宙利用”を進めて行きたい。

なお、本稿で使用した全てのSAR画像は、JAXAより提供頂いたものであり、その御好意に厚く御礼申し上げます。

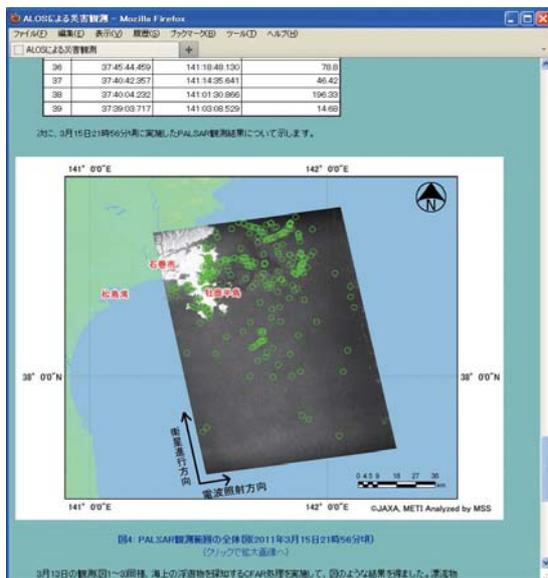


図9 当社漂流物解析結果
（提供：宇宙航空研究開発機構（JAXA））



図10 タイ洪水解析結果
（提供：宇宙航空研究開発機構（JAXA））

参考文献

- (1) 有井 基文、「ALOSシリーズによる海上サーベイランス」、ALOS-2ワークショップ、Mar. 2010
- (2) 大内 和夫、「合成開口レーダの基礎」、東京電機大学出版局、東京、2004年。
- (3) Technical Exchange on AIS via Satellite (TEXAS) や Collaboration in Space for International Global Maritime Awareness (C-SIGMA) といった欧米中心のフレームワーク
- (4) M.Arii, “Contribution of SAR observation systems for ocean security”, Indonesia-Japan Workshop on Earth Observation Satellites, Jakarta, Indonesia, May, 2011.
- (5) M.Arii, “Conceptual design for spaceborne ocean surveillance system based on radar scattering theory”, Collaboration in Space for International Global Maritime Awareness (C-SIGMA), Frascati, Italy, Jun., 2011.
- (6) M. Arii, “An analysis of scattering from a floating object on the sea using three-component backscatter model for polarimetric radar”, Asia Pacific-Radio Science (AP-RASC) 2010, Toyama, Japan, Sep. 2010.
- (7) M. Arii, “Improvement of ship-sea clutter ratio of SAR imagery using standard deviation filter”, IGARSS 2011, Vancouver, Canada, Jul. 2011.
- (8) K. Ouchi, “Ship detection by ALOS-PALSAR: An

- overview” , The Asia Pacific Conference on SAR (APSAR) 2011, Seoul, Korea, Sep. 2011.
- (9) E-S. Won, and K. Ouchi, “Comparison of ship detection algorithms using ALOS-PALSAR, ground based maritime radar and AIS” , The Asia Pacific Conference on SAR (APSAR) 2011, Seoul, Korea, Sep. 2011.
- (10) M. Arii, “The result of ALOS collaborative investigation” , 18th Asia-Pacific Regional Space Agency Forum (APRSAR-18) , Singapore, Dec. 2011.
- (11) 有井 基文、「速度測定装置、速度測定方法および速度測定プログラム」、特許登録番号4791136
- (12) 有井 基文、「位置特定装置、画像再生装置、位置特定方法および位置特定プログラム」、特許登録番号4791137
- (13) 有井 基文、「レーダ画像処理装置、レーダ画像識別方法およびレーダ画像識別プログラム」、特許登録番号4651499
- (14) 有井 基文、「目標物速度測定装置、目標物速度測定プログラム及び目標物速度測定方法」、特許登録番号4791239
- (15) M. Arii, “Velocity correlation functions of a moving target in SAR imagery” , International Polarimetric SAR Workshop in Niigata 2010, Niigata, Japan, Sep. 2010.
- (16) M. Arii, J. van Zyl, and Y. Kim, “Retrieval of soil moisture under vegetation using polarimetric scattering cubes” , IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2010, Hawaii, USA, Jul. 2010.
- (17) M. Arii, J. van Zyl, and Y. Kim, “Measuring orientation and randomness of vegetation using polarimetric SAR data” , IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011, Vancouver, Canada, Jul. 2011.
- (18) M. Arii, J. J. van Zyl and Y. Kim, “A general characterization for polarimetric scattering from vegetation canopies,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 48, no. 9, pp. 3349-3357, Sep. 2010.
- (19) M. Arii, J. J. van Zyl and Y. Kim, “Adaptive model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 49, no. 3, pp. 1104-1113, Mar. 2011.
- (20) J. J. van Zyl, M. Arii, and Y. Kim, “Model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices constrained for non-negative eigenvalues,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 49, no. 9, pp. 3452-3459, Sep. 2011.