

リモートセンシング技術の最近の動向

伊東 永徳

1. はじめに

リモートセンシングとは、現象・対象物を遠隔的に計測する技術である。この技術は飛行機、LANDSATやSPOTといった人工衛星に計測装置（センサ）を搭載して、写真撮影やレーザー測量による広範囲に及ぶ情報の一括収集が可能である。その結果の解析では、収集した情報に対する位置情報と空間分解能（解像度）が非常に重要である。位置情報は地図化・地形化するうえで必要不可欠であり、解像度は対象物が何を示しているかを把握するうえで重要である。この2つの精度は2000年前後に大きな進歩を遂げた。

位置情報は一般的にナビゲーション技術によるGPS (Global Positioning System) を利用している。GPSは軍事利用の目的で米国が運用している衛星測位システムで、かつては有事の際に自国の優位性を保持するために測位精度を意図的に落とす措置（誤差100m）がなされていた。しかし2000年5月にこの措置が解除され、誤差が10mまで向上した。解像度はこれまで数十mが一般的であったが、米国の規制緩和により軍事偵察衛星技術が民間に転用され、4mの解像度を可能と

するIKONOSの運用が開始された。

以下に現在のリモートセンシング技術の動向を技術資料として示す。

2. センサの種類

リモートセンシングで主に利用されるセンサは光学と電波（マイクロ波）の2種類である（図1）。

光学センサは太陽光の反射（可視・近赤外）や放射（中間・熱赤外）を計測する（図2）。しかし、太陽光が当たらない夜間の可視域観測は不可能である。また雲域は太陽光の放射を遮るので観測できない。

マイクロ波センサは光学センサよりも長波長域を観測する。また、昼夜天候に左右されずに観測できる。その理由は、マイクロ波の波長帯が1mm～1mで、この範囲の大気透過率が高いためである。図3は同時刻・地域を観測した光学センサとマイクロ波センサ（合成開口レーダー；Synthetic Aperture Radar；SAR）の結果である。光学センサでは雲域が観測されているが、SARは地表を鮮明に観測している。

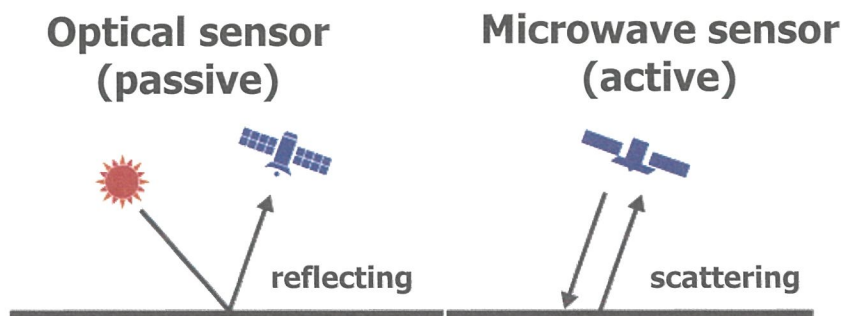


図1 光学とマイクロ波での観測方法の違い。光学センサ（左図）は太陽放射の反射を測定する。マイクロ波センサ（右図）は自らマイクロ波を放射（scatter）して観測する。

3. 人工衛星からのリモートセンシング

3. 1 光学センサ

光学センサの中で、デジタルカメラと同等の可視域を観測するセンサの開発が進んでいる。代表的な衛星として米国SkyBox Imaging社（2014年7月にGoogle社が買収）のSkySatが挙げられる。SkySatは重量が100kg超の小型衛星で、解像度は衛星直下で1.1mである（販売時は米国の輸出規制により2m）。この衛星は動画（90秒）の観測も可能である。

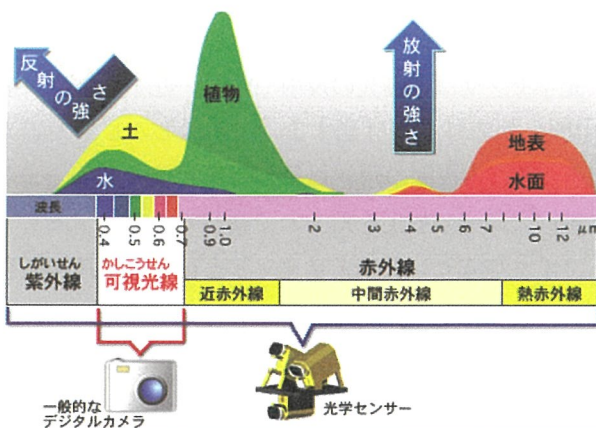
また、米国Digital Globe社は解像度31cmと商用で世界最高の解像度を持つ光学地球観測衛星WorldView-3の打ち上げに成功している。米国では50cm以下の物体が撮影されている画像を企業が一般に公開することを禁じていたが、米国政府は2014年6

月にDigital Globe社に対してこの制限を解除した（日本では解像度40cmが入手可能）。またWorldView-3には大気の影響を除去するために中解像度（30m）のCAVISセンサ（12バンド）が搭載され、より正確な情報の取得が期待されている。Google社はDigital Globe社の画像を使用していることから、そのサービスを利用した、より詳細な画像がGoogle Map等で提供されると思われる。

我が国における高解像度観測衛星は「陸域観測技術衛星2号（だいち2号；ALOS-2）」で、解像度は3mである。文部科学省は2014年9月16日に開催された第17回宇宙開発利用部会において、約1mの大きさを識別できる先進光学衛星（2019年打上げ目標）を開発する方針を固め、平成27（2015）年度予算案に約51億円を要求している。

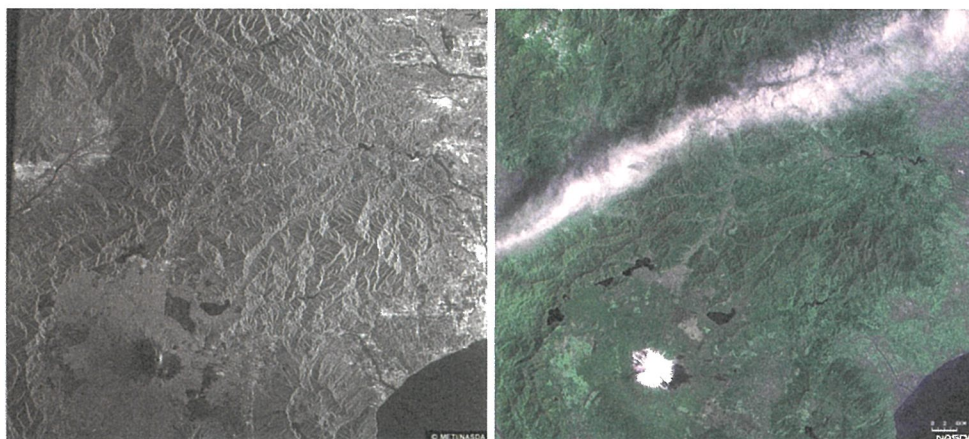
このように日本でもSkySatのような高解像度観測衛星の開発に重点が置かれているが、一方では経済産業省主導による高波長分解能（ハイパースペクトル）センサの開発も重点的に進められている。

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構は2017年以降に打上げられる衛星に搭載することを想定して、ハイパースペクトル&マルチスペクトルセンサ「HISUI；Hyper-spectral Imager Suite」を開発している。HISUIは地球観測衛星「Terra」に搭載されているASTERの後継機である。観測波長帯（バンド数）は13倍（14→185）で（図4）、鉱物種の特異能力はASTERの3倍程度（ASTERの10種類程度に対し、約



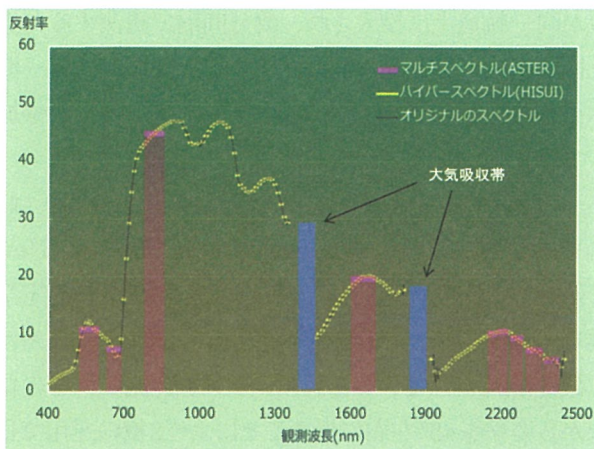
<http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/experience/dataproc/p02.html>

図2 光学センサの観測波長帯 ((C)JAXA)



http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/etc/images/use/fuji_around_j.html

図3 同時観測した光学センサ画像（右図、カラー、(C)JAXA）とSAR画像（左図、グレー、(C)METI/JAXA）の比較。光学センサ画像では雲（画面上半分に斜めに走る白い帯）の下の地形は判別できない



http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/etc/images/use/fuji_around_j.html
 http://www.jspacesystems.or.jp/library_event/wp-content/uploads/sites/13/2014/07/05_HISUI%E3%82%BB%E3%83%B3%E3%82%B5%E9%96%8B%E7%99%BA%E6%A6%82%E8%A6%81.pdf

図4 ASTERとHISUIの観測波長帯(谷井, 2013; J-spacesystems提供)

30種類の分類)を想定している(経済産業省, 2009)。

同機構はハイパースペクトルセンサで観測されたデータ(ハイパーデータ)がどのような鉱物・鉱床に適用可能かを検証している。また、それらの解析には対象物を特定するためのリファレンスデータ(スペクトルのライブラリ)が重要である。

米国地質調査所は約200種の鉱物に対するスペクトルライブラリ(スペクトル分解能は約10nm)を公開しており、このライブラリが世界標準である。しかし、このライブラリには、

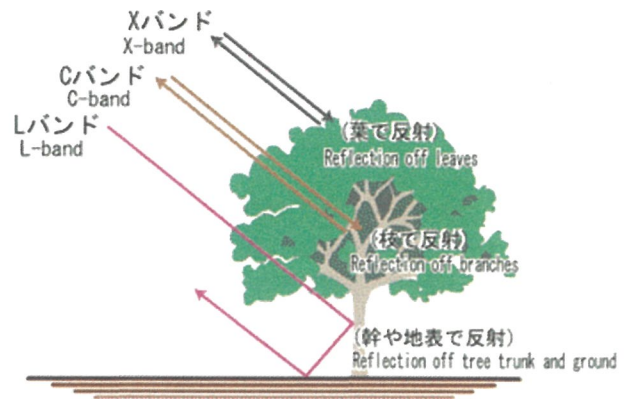
- ・ 他鉱物の混入が疑われるデータが存在
- ・ 判断に迷うデータが存在
- ・ 2400nm以降は波長分解能が悪い

という問題点がある(立川・三箇, 2014)。これらの問題点を踏まえ、同機構はHISUIに適したスペクトルライブラリも作成している。

なお、ドイツは同等レベルのハイパースペクトルセンサを搭載した衛星(EnMAP)を日本と同時期に打ち上げる予定があるため、日本は早期の打ち上げ・運用が必要と考えている。

3.2 マイクロ波センサ

マイクロ波センサには散乱計、高度計、降雨レーダーおよび映像レーダー(SAR)があり、特にSARを利用



http://www.jspacesystems.or.jp/library_event/wp-content/uploads/sites/13/2014/07/05_HISUI%E3%82%BB%E3%83%B3%E3%82%B5%E9%96%8B%E7%99%BA%E6%A6%82%E8%A6%81.pdf

図5 SARにおける各バンドの反射特性の違い((C) JAXA)

した観測が注目されている。

SARの観測波長帯は主にXバンド(2.4~3.75cm)・Cバンド(3.75~7.5cm)・Lバンド(15~30cm)である。X・Cバンドは細かい構造の観測に適しており、さざ波や森林の枝葉を捉えることができる。Lバンドは細かい構造の一部を透過して観測できる(図5)。2014年5月に打上げられたALOS-2に搭載されているSARは、国土の70%が植生で覆われている日本で地表面をとらえるのに有効と考えられるLバンドを採用している。ちなみにLバンドSARは日本独自の技術である(他国はX・Cバンドが多い)。観測対象は陸域であれば地形、地殻変動等であり、海域であれば海上風、波浪、海流等がある。

3.3 衛星コンステレーション

人工衛星によるリモートセンシングは単独ゆえに同一地点の再観測までに数日を要していたが、衛星重量の小型・軽量化の研究開発が進み、複数衛星を複数の軌道で運用するコンステレーション化(例;GPS衛星、図6)により時間解像度の高度化が各国の政府・民間企業で活発に進められている。

各国は単独または他国と提携して衛星コンステレーション化を実施している。各国単独の状況は以下のとおりである(内閣府宇宙政策委員会, 2013)。

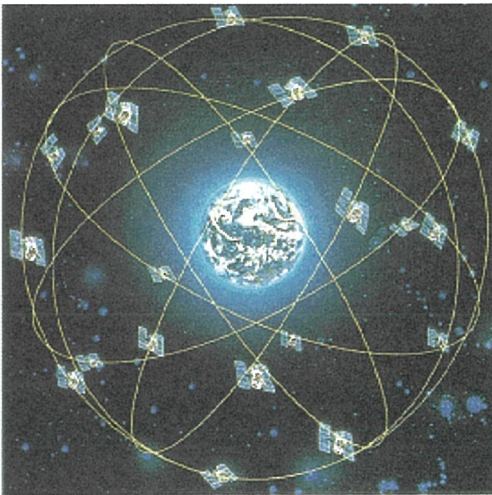
- ・ 光学衛星
- ・ 米国: IKONOS、WorldViewシリーズ等で運用

- ・ ドイツ：小型光学衛星 (RapidEye) 5機を同一軌道に均等に配置
- ・ フランス：SPOTシリーズ等で運用
- ・ SAR衛星
- ・ ドイツ：Xバンドの同一仕様衛星2機を運用
- ・ イタリア：Xバンドの同一仕様衛星4機を同一軌道上で運用

他国と提携してコンステレーション化している例として、A-train (Afternoon-train) が挙げられる。A-trainは地球の大気の観測を主目的とし、それぞれの衛

星が同一軌道上に投入され、数分間隔で観測する。提携国は米国、フランスおよび日本で、日本は「第一期水循環変動観測衛星 (GCOM-W1; しずく)」が参加している。

一般財団法人機械システム振興協会 (2010) は、先進的宇宙システム (Advanced Satellite with New system ARchitecture for Observation) の最初の光学地球観測衛星ASNARO級を想定した日本上空における観測域についてシミュレーションを実施し、その結果から姿勢を45°左右に振ることにより3機の運用で日本周辺を網羅できると報告している (図7)。



http://www.geod.jpn.org/web-text/part2/2-4/2-4_figures/Fig1.jpg
http://www.geod.jpn.org/web-text/part2/2-4/2-4_figures/Fig1.jpg

図6 GPS衛星の配置 (一部編集) (測地学テキスト (日本測地学会) から引用)

4. 航空機からのリモートセンシング

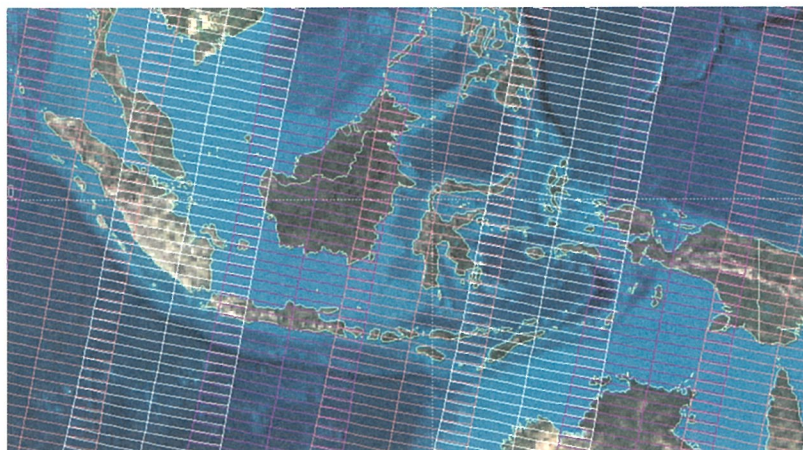
4. 1 航空LiDAR (ライダー)

LiDAR (Light Detection And Ranging) は短波長帯 (可視域・近赤外域) のLaser (レーザー) を使用し、大気・気象の観測・研究に利用されてきたが、近年では人工衛星や航空機に搭載し、地表等の観測に利用されている。人工衛星では、小惑星探査機「はやぶさ (MUSES-C)」に搭載して小惑星イトカワの観測を行った実績等がある。

LiDARを航空機に搭載した観測は1980年代から始まっているが、2000年代に入って急速に普及しはじめた。その理由として以下の3点があげられる。

①LiDARシステムの向上

地形の形状の観測での利用が主であったが、ハー



<http://www.jspacesystems.or.jp/library/archives/usef/gijyustu/pdf/21-R-5.pdf>

図7 インドネシア周辺での観測区域と衛星数の関係のシミュレーション結果。ここでは観測衛星を3機 (オフナディア角45度以下) と仮定した場合が図示されており、3色の線が各衛星の観測可能範囲を示している (一般財団法人機械システム振興協会, 2010; J-spacesystems 提供)

ドウェア・システムの向上により建物や樹木といった実際の地上の構造物の把握が可能となった。

②データ形式の標準化

従来のデータ形式はASCIIであったが、2003年にバイナリ形式 (LAS) を採用することによって、より大容量のデータ取得が可能となった。

③ソフトウェアの対応

CADやGISといったソフトウェアがLiDARデータの入出力、基本的な解析をサポートするようになった。

このような背景のもと、近年の樹木・森林に係る調査・研究では航空機搭載型LiDARを使用した報告が多くなっている (例えば、伊藤ら, 2008; 加藤ら, 2013; Hayashi et al., 2013)。

4. 2 無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle ; UAV)

これまでに気球やラジコンによる空撮が数多く実施されてきたが、操縦が簡単であり、安価 (約6万円〜) で抜群の安定感を誇るDJI社の小型マルチコプター (クアドコプター; DJI Phantom; 図8) が登場したことにより、UAVによる空撮が注目されている。DJI Phantomは軽量でパーツの脱着も容易で初心者でも扱いやすい。また事前に飛行ルート (経緯度) を設定した自動飛行や自動帰還・着陸等の機能も備えている。

このようなUAVで空撮した複数の画像から3次元モデルの構築を可能にする技術としてStructure from Motion (SfM) 手法がある。SfMは視点の違う複数枚の画像 (動画) から各特徴点の動きをトラッキングして、被写体の3次元形状とカメラの位置を同時に算出して復元する技術 (手法) である (図9)。

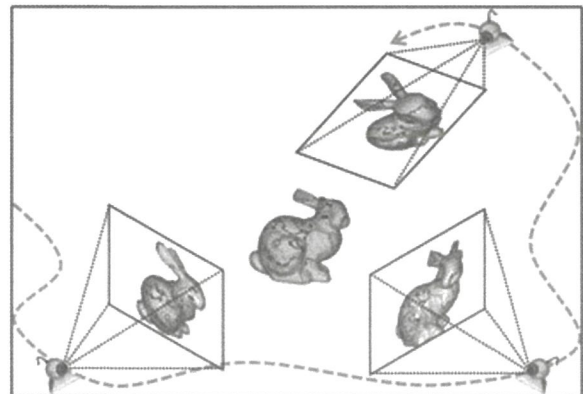
SfMによる結果は、特徴点をマッピングした疎な点群なので、より密なモデルを構築するためにMulti-View Stereoといった復元方法を利用する。これらの技術はプログラムコードが無償公開されている。またこれらを組込んだソフトウェア (Agisoft PhotoScan; 43.2万円) が販売されている。

このようなデバイス (小型UAV、デジタルカメラ; Ricoh GR; 10万円未満) と技術 (SfM、Multi-View Stereo; PhotoScan) を併用した解析事例として、2013



http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_report/PDF/81/81-5inoue.pdf

図8 DJI社製クアドコプターPhantomと専用送信機 (プロポ) (右) (井上ら, 2014)



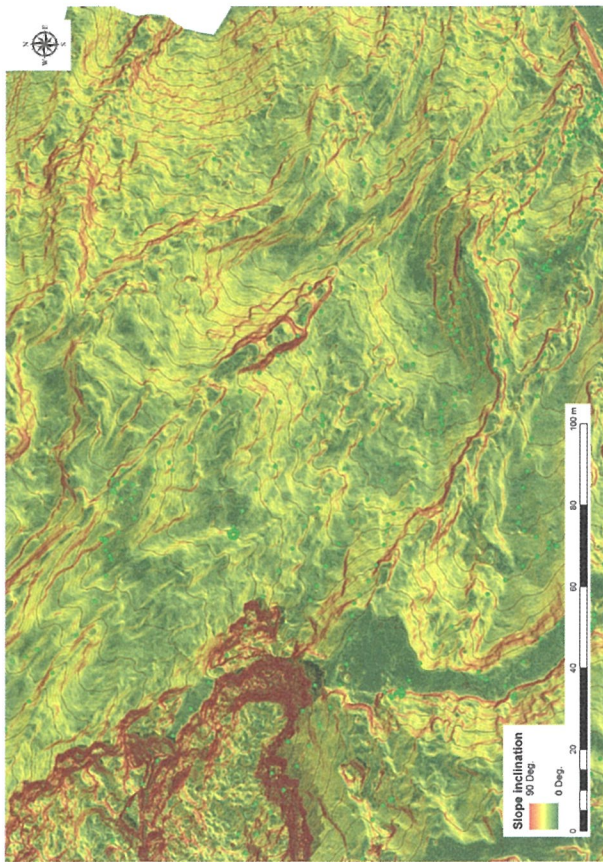
http://www.ite.or.jp/data/journal/passed_issues/tool1104/

図9 Structure from Motion (SfM) の原理を示した概念図。移動体 (衛星や飛行機など) に搭載されたカメラによって撮影された動画もしくは視点の異なる複数枚の画像から、被写体の3次元構造を復元する (満上, 2011)

年に伊豆大島で発生した地すべり現場を撮影した結果を図10に示す。これは傾斜角図に等高線を被せた図面であり、傾斜角図は空撮の画像から3次元モデル化した表層モデル (Digital Surface Model; DSM) より算出した結果である。以上のことから、空撮時・コンピュータ処理時において様々な注意点はあがあるが、安価 (総額60万円前後) で簡易的な処理 (コーディングの必要なし) でDSMを作成できることがわかる。

5. 海域への適用

本稿で述べた人工衛星に係るトピックを総括した海域への適用事例として流出油の検出・監視が挙げら



http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_report/PDF/81/81-4uchiyama.pdf

図10 2013年に伊豆大島で発生した地すべり現場の地形図。空撮による画像を元にSfMによって得られた傾斜角図に、陰影図と0.5m間隔の等高線を重ね合わせる（オーバーレイ）ことによって作成されたもの（内山ら, 2014）

れる。

海面上に油膜が存在すると風浪の発生が抑制され、衛星からの信号の散乱が減少してセンサが受信できなくなるため、SARでは海面の油膜域が暗い領域として映るという特徴があり（図11）、これにより流出油の検知が可能である（図12）。また、海底から自然に漏れる原油（natural oil seeps）の周辺海域をモニタリングし、画像を重ね合わせることにより漏出場所を特定する探査にも利用されている。

SARを搭載した衛星コンステレーションにより空間・時間の高解像度観測が可能になることから流出油の監視、natural oil seepsの検出、またSARは船舶の形状認識が可能なので自動船舶識別装置（Automatic Identification System ; AIS）と併用した不審船等の監視といった利用が考えられる。

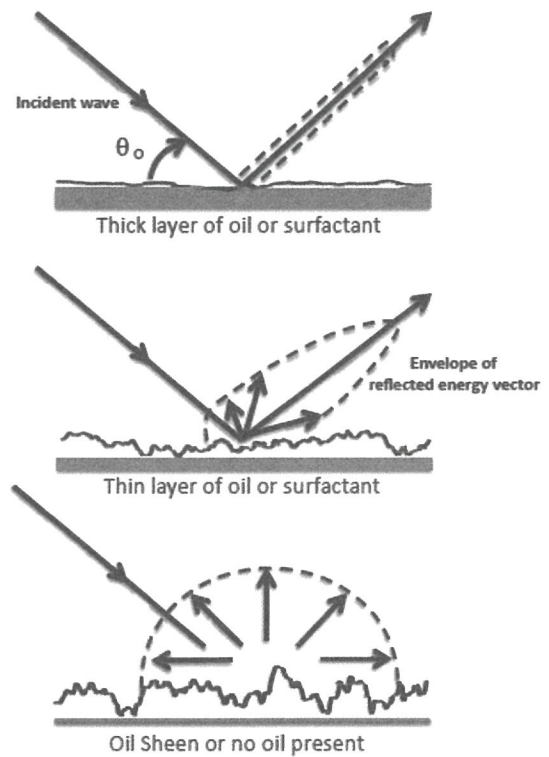


図11 油膜（および界面活性剤）によるマイクロ波の散乱の変化を示した模式図。SARが放射したマイクロ波の軌跡を矢印、その反射エネルギーの及ぶ範囲を破線、海面上の油の層をグレーの帯、海表面の波の状態を曲線で示す。油膜の層が厚いと海面の波立ちが抑えられ、マイクロ波の大部分がSARとは反対方向へ反射してしまう（上図）が、油の層が薄くなるほど海面の波立ちが激しくなってマイクロ波の後方散乱が増加し、SARの方向へ向かうエネルギーも増加する（中、下図）（Caruso et al., 2013）

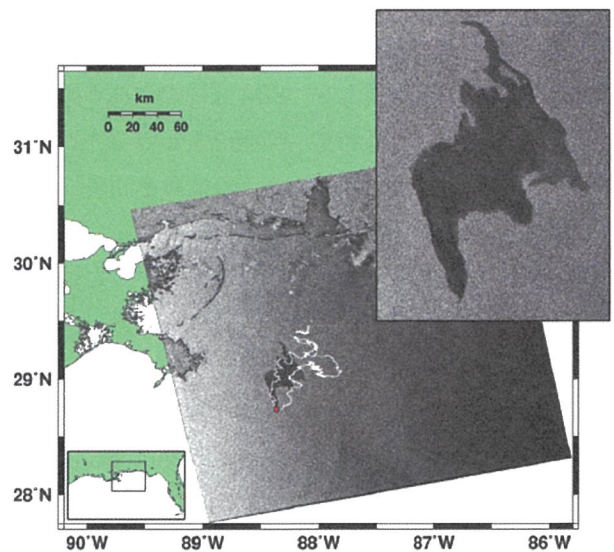
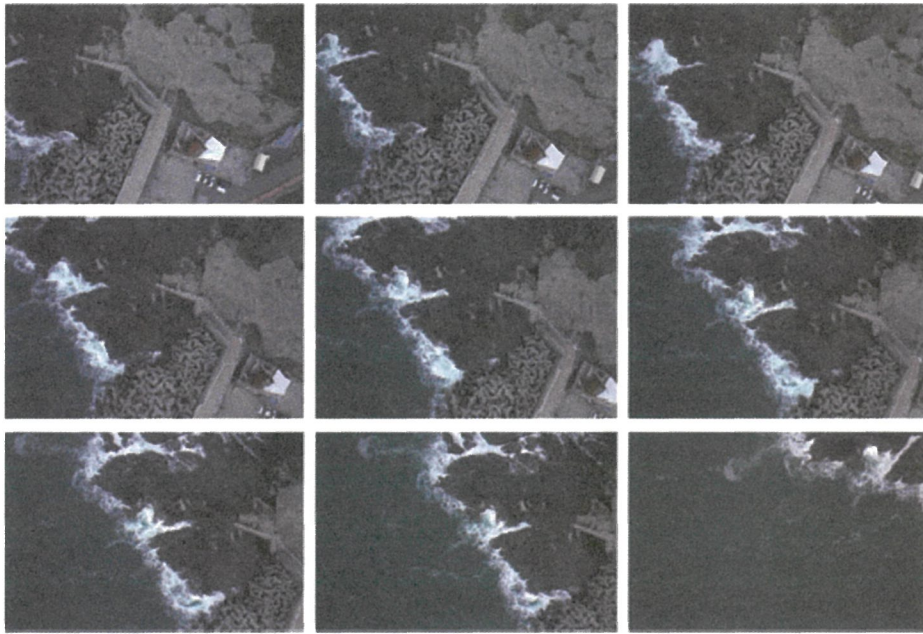


図12 メキシコ湾流出事故の現場。SARによって事故後に初めて撮影された画像（2010年4月23日）（白枠は4月25日の分布）（Caruso et al., 2013）



http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_report/PDF/81/81-5inoue.pdf

図13 江の島の海岸段丘を高度60mからマルチコプターで撮影した連続画像の一部(井上ら, 2014)

石油連盟は、高い確率で油濁域や拡散移動状況を自動的に推定する「人工衛星による海上流出油自動認識システム (<http://osr-ars.com>)」を運営している。このシステムを利用すればソフトウェア等を用意せずにユーザが所有するSARデータから油濁推定域の自動検出が可能になると思われる。

航空機による海域へのリモートセンシングの適用方法としては、小型UAVによる海岸周辺のモニタリングが期待できる。

図13は、江の島(神奈川県藤沢市片瀬)の海岸の隆起量を明らかにするための詳細地形図の作成を目的とした小型UAVによる調査結果である。このように詳細な画像が取得できるので、海岸侵食の経過観察や撮影高度・時間を考慮すれば藻場の分布の把握にも適用可能と考えられる。

6. おわりに

2000年から十数年経過した現在、時空間解像度の高度化が図られ、より詳細な観測・計測が可能になった。人工衛星による光学・マイクロ波(SAR)、航空LiDAR・小型UAVの技術動向については上記のとおりである。

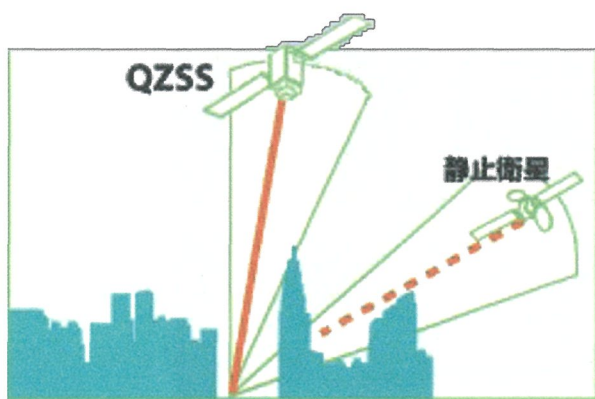
ハイパースペクトルセンサの適用例としては陸域の鉱物資源探査について述べた。海域では、沿岸域を対

象に国立環境研究所がサンゴの分布や白化後のサンゴの回復状況等をサンゴおよび藻類の分光特徴を用いて監視する技術開発を重点的に進めている(松永, 2014)。また植物プランクトン群集に係るスペクトルライブラリを蓄積することにより植物プランクトンの組成・密度等の把握が可能と考えられる。

位置情報の精度向上もリモートセンシングデータを解析するうえでの貢献度としては大きい。しかし、GPSを使った位置測量では10m程度の誤差がある。

欧米、ロシアおよび中国は自国でナビゲーション衛星を運用している。日本は費用面等を勘案して衛星測位システム(Global Navigation Satellite System; GNSS)を運用せず、GPS等のデータを補正する準天頂衛星システム(Quasi-Zenith Satellite System; QZSS)を構築中である。日本における位置情報は高層ビル・山間地といった谷間での精度が落ちる傾向がある。その理由は、GPS・静止衛星が低仰角で飛行している時にそれらが障害物となるためである。この問題を解消するために、衛星が常に日本上空を飛行するようなシステム(QZSS)を構築している(図14)。

2010年に準天頂衛星(Quasi Zenith Satellite)の初号機「みちびき」(QZS-1)が打上げられ、2017~2019年までには3機を打上げて運用する計画である。このシ



http://www.jaxa.jp/countdown/f18/overview/orbit_j.html

図 14 QZSSと静止衛星の位置関係。静止衛星では低仰角での飛行時に高層ビル等が障害物となるが、QZSSではそれが解消される ((C)JAXA)

システムが構築されることにより位置精度は約1m（静止、あるいは非常に低速な移動の場合は数cm程度）となる。

水（海）域でのリモートセンシングとして遠隔操作無人探査機（ROV）、自律型水中ロボット（AUV）が利用されている。これらはUSBL（Ultra Short Base Line）方式測位装置により位置が把握できるので、QZSSによって精度の高い位置情報が得られることになる。これはカーナビゲーションでも同様であり、LiDARは自動運転車の開発に利用されている。また、高解像度画像等による高精度な地図データが整備されれば自立型自動運転自動車の実用が現実となる。このように、リモートセンシング技術の高度化は、よりミクロな世界へ進んでいくと考えられる。

7. 略語

AIS Automatic Identification System；自動船舶識別装置

ALOS Advanced Land Observing Satellite；陸域観測技術衛星「だいち」

ASCII American Standard Code for Information Interchange；文字コード

ASNARO Advanced Satellite with New system ARchitecture for Observation；光学地球観測衛星

ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer；地球観測衛星「テラ」に搭載されている光学センサ

AUV Autonomous Underwater Vehicle；自律型無人潜水機

CAVIS Cloud, Aerosol, Water Vapor, Ice & Snow；校正・補正用センサ

DSM Digital Surface Model；表層モデル

GNSS Global Navigation Satellite System；衛星測位システム

GPS Global Positioning System；全地球測位網。米国により運用される衛星測位システム

HISUI Hyper-spectral Imager Suite；衛星搭載型ハイパースペクトル&マルチスペクトルセンサ

JAXA Japan Aerospace eXploration Agency；独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

JSS Japan Space Systems；一般財団法人 宇宙システム開発利用推進機構

LAS Log ASCII Standard；ファイル形式（バイナリ）

LiDAR Light Detection And Ranging；レーザー光を用いるレーダー。反射光から対象の距離や方向などを測定する、光を用いたリモートセンシング技術の一つ。

QZSS Quasi-Zenith Satellite System；準天頂衛星システム

ROV Remotely Operated Vehicle；遠隔操作無人探査機

SAR Synthetic Aperture Radar；合成開口レーダー

SfM Structure from Motion；複数の画像から3次元モデルの構築を可能にする技術

UAV Unmanned Aerial Vehicle；無人航空機

USBL Ultra Short Base Line；水中方向/距離探知装置

参考文献

Caruso, M. J., Migliaccio, M., Hargrove, J. T., Garcia-Pineda, O. and Graber, H. C. 2013. Oil spills and slicks imaged by Synthetic Aperture Radar. *Oceanography*, 26 (2) : 112-123.

Hayashi, M., Yamagata, Y., Borjigin, H., Bagan, H., Suzuki, R. and Saigusa, N. 2013. 航空機搭載ライダーを利用した横浜市の森林資源地図の作成. *写真測量とリモートセンシング*, 52 (6) : 306-315.

井上公・内山庄一郎・鈴木比奈子. 2014. 自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術. *防災科学技術研究所 研究報告*, 81: 61-98.

一般財団法人機械システム振興協会. 2010. 複数衛星連携システムに関する調査研究 報告書-要旨-. 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構, 35-37.

伊藤拓弥・松英恵吾・内藤健司. 2008. 航空機LiDARによる森林資源量推定: スギ・ヒノキの樹高・樹冠量による立木幹材積推定式の

- 検討. 写真測量とリモートセンシング, 47 (1) : 26-35.
- 加藤顕・戸倉千明・小林達明・野田佳慶・有村恒夫・福田聖一. 2013. 高速道路法面におけるレーザーを用いた葉面積指数の推定. 日本緑化工学会誌, 39 (1) : 194-197.
- 経済産業省. 2009. 経済産業省における地球観測に関する取組. http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/giji/_icsFiles/afieldfile/2009/07/31/1282029_6.pdf
- 松永恒雄. 2014. ハイパースペクトルカメラの利用について. 国立環境研究所ニュース, 33 (1) : 10-11.
- 満上育久. 2011. 私の研究開発ツール Bundler: Structure from Motion for Unordered Image Collections. 映像情報メディア学会誌, 53: 479-482.
- 内閣府宇宙政策委員会. 2013. 資料4 社会インフラとしてのリモートセンシング衛星の整備について (案) 宇宙政策委員会 宇宙産業部会 第3回会合 議事次第 (平成25年5月17日). <http://www8.cao.go.jp/space/comittee/sangyou-dai3/siryou4.pdf>
- 立川哲史・三箇智二. 2014. ハイパースペクトルデータによる鉱床探査と鉱物・反射スペクトルデータ整備. 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構 平成25年度成果報告会.
- 谷井純. 2013. センサの開発状況. 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構 平成24年度成果報告会.
- 内山庄一郎・井上公・鈴木比奈子. 2014. SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所 研究報告, 81: 37-60.