

[1] プログラム別研究活動

1.1. プログラム 1：先端的リモートセンシングプログラム

[概要]

リモートセンシング技術による地球環境研究の進展とともに、既存の観測方法の限界がしばしば問題となっている。本プログラムでは、これまで十分な観測が困難であったターゲットについて、新たなリモートセンシングセンサとアルゴリズムを開発することによって新局面を積極的に切り拓いていく。特に、可視光からマイクロ波に至る広い波長域でのリモートセンシング情報の統合と活用、次世代小型衛星センサによる大気情報と植生情報を含むグローバルな環境情報の取得などの活用を通じて、先端的リモートセンシングの創生と新たな環境情報の創出をめざす。

先端的リモートセンシングプログラムの中期計画期間（平成 22 – 27 年度）の達成目標は以下の通りである。

[中期計画期間の達成目標]

- ・円偏波合成開口レーダデータの環境応用／合成開口レーダ搭載無人航空機・航空機・小型衛星の基本設計
- ・電離層観測用小型衛星（GAIA-I）の開発
- ・衛星データによる温室効果ガス濃度導出アルゴリズム開発と検証
- ・革新的なデータ取得を可能とする新しいリモートセンシング装置の開発と実証
- ・衛星データと地上取得データをリンクした広域大気情報の解析と活用
- ・次期地球観測衛星 GCOM-C に向けて：可視近赤外データの検証手法の確立と標準プロダクトのためのバイオマス、水ストレス傾向指数、カゲ指数等のアルゴリズム開発
（可視光からマイクロ波に至る広い波長域でのリモートセンシング情報の統合と活用を図り、先端的リモートセンシングセンサおよび解析技術を社会的に活用していく道筋を確立する。）
- ・マイクロ波 RS の展開に向けた無人航空機・航空機・小型衛星の開発と地球観測への活用
- ・静止衛星からの大気汚染物質等の気体濃度導出可能性の検討
- ・次世代衛星センサおよび革新的地上測器による高精度環境情報、とくに大気情報と植生情報の取得
- ・次期地球観測衛星 GCOM-C の検証実施とデータの活用

Program 1 : Innovation in remote sensing technology and algorithm

The limitation of existing approaches has often been recognized in the course of the Earth environment studies using remote sensing. In this program, novel sensors and algorithms are explored in order to establish remote sensing methodologies that enable more in-depth and comprehensive analyses of various targets including vegetation and atmosphere. In this way this program aims at the innovation of remote sensing through such activities as construction and operation of next-generation satellite sensors, and the integration of wide spectral-range observations using optical and microwave remote sensors.

<Reserach targets during 2011-2016>

- ・ Environmental applications of circularly polarized synthetic aperture radar (SAR) data/preliminary design of SAR onboard unmanned aerial vehicles, airplanes, and small satellites.
- ・ Development of microsatellite GAIA-I for ionospheric monitoring.
- ・ Development and validation of algorithm for retrieving greenhouse gases from satellite-borne sensors.

- Development and practical application of novel remote sensing devices that enable innovative data acquisition.
- Atmospheric sounding by combining satellite and ground-observation data.
- Activities for next-generation Earth observing satellite GCOM-C: Establishment of validation methods for the visible and near-infrared data/algorithm development for the GCOM-C standard products including biomass index, water stress index, shadow index, and vegetation roughness index.

The goals of this program are the integration of wide spectral-range observations using optical and microwave remote sensors, and practical applications of innovative remote sensing to global and regional problems.

- Development of unmanned aerial vehicle and small satellite for microwave remote sensing and their application to Earth observation.
- Feasibility study of air pollutant and other atmospheric minor gas retrieval from geostationary satellites.
- Information retrieval of environmental information by means of next-generation satellite-based and ground-based sensors, especially aimed at the atmospheric and vegetation monitoring.
- Implementation of validation and various data applications of the next-generation Earth observing satellite GCOM-C.

[研究内容と平成 26 年度の成果]

◆ 1.1. マイクロ波リモートセンシング

◆ 1.1.1. 合成開口レーダ (SAR) の開発 (ヨサファット研究室)

合成開口レーダ (SAR) は多目的センサで、全天候型、昼夜でも観測できるものである。従来の SAR センサは直線偏波 (HH、VV、HV、VH) で、特に低周波である L バンドが電離層におけるファラデー回転の現象で大きく影響されている。図 1.1.1.-1 のように、本研究では、グローバル地殻変動をはじめ、小惑星、惑星の探査等のために、円偏波合成開口レーダ (CP-SAR) 搭載小型衛星を開発している。この CP-SAR センサの地上実証実験のために、本研究室は独自に大型無人航空機 JX-1 を開発した (図 1.1.1.-2)。

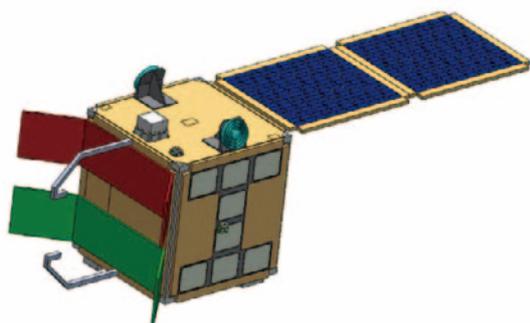


図 1.1.1.-1 円偏波合成開口レーダ搭載小型衛星



図 1.1.1.-2 合成開口レーダ搭載無人航空機 (JX-1)

図 1.1.1.-3 のように、CP-SAR センサが楕円偏波 (左旋または右旋) を送信して、左旋と右旋偏波を同時に受信する。この両データを受信することによって、軸比画像、楕円率、チルト角など、様々な新画像を抽出することができる。CP-SAR センサはアクティブセンサであり、L バンドのチャープパルスで、PRF が 1,800 ~ 2,000Hz である。本研究では、CP-SAR センサが安価、軽量、コンパクトに設計され

ている。この新型センサがプラットフォームの姿勢と電離層におけるファラデー回転による影響を軽減でき、またこのセンサによって、高精度と低ノイズの画像を得ることができると期待する。この小型衛星に CP-SAR センサを搭載する前に、本研究室ではセンサの地上実証実験用の CP-SAR 搭載無人航空機（CP-SAR UAV、図 1.1.1-2 を参照）も開発した。図 1.1.1-4 のように、本研究室の大型無人航空機は様々なミッションのために、様々なセンサを搭載することができる。また、無人航空機の性能を向上させるために、カーボンコンポジットによる軽量化と強化を図り、JX-2 を完成させた（図 1.1.1-5）。今後、環境観測、震災監視などのために、長距離と長時間のミッションができるように、様々な性能を強化する予定である。

(1) CP-SAR ミッション

この CP-SAR ミッションの主な目的は楕円偏波の散乱による基礎研究とその応用の開発である。基礎研究では、地球表面による楕円偏波（円偏波と直線偏波を含む）による様々な電磁波の散乱問題の解析、楕円偏波による干渉合成開口レーダ（InSAR）、軸比画像の生成方法、楕円率、チルト角などの様々な画像を生成し解析する予定である。ここで、植生、雪氷、様々な土壌種類などによる楕円偏波の散乱実験と解析をする予定である。また、この楕円偏波より取得する結果を従来の直線偏波の解析結果と比較検討し、この手法を楕円偏波による樹幹の高さ、標高データ（DEM）など抽出に应用する予定である。

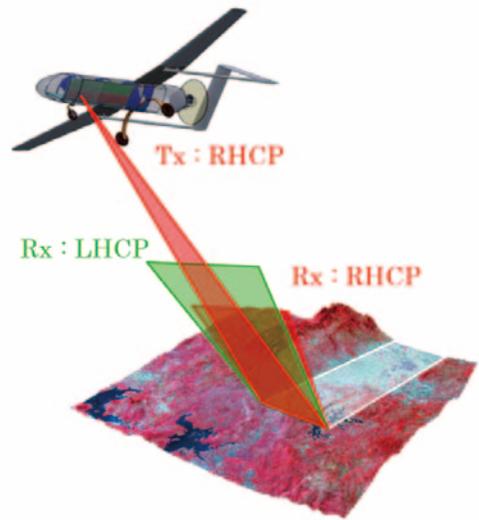


図 1.1.1-3 CP-SAR UAV の概念

CP-SAR UAV の運用概念を図 1.1.1-3 に示す。この図からわかるように、CP-SAR センサが RHCP または LHCP から一つの偏波のみを送信して、地面に散乱され、両偏波の応答（RHCP と LHCP）を同時に受信する。この両信号より、軸比、楕円率、チルト角など、様々な情報を抽出でき、地表層との関係を調査する予定である。

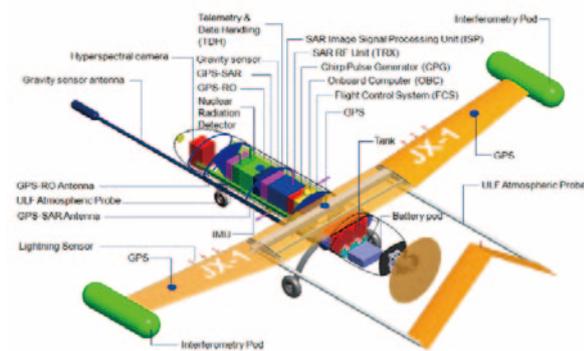


図 1.1.1-4 CP-SAR UAV のサブシステム



図 1.1.1-5 CP-SAR 搭載用 UAV JX-2

CP-SAR センサの応用開発では、将来このセンサを土地被覆、災害監視、雪氷域と海洋域のモニタリングなどに应用する予定である。たとえば、土地被覆のマッピングでは、円偏波による森林と非森林域の分類、樹高、マングローブ、極地における雪氷の環境変化などのモニタリングに应用し、災害監視では、このセンサをグローバル地殻変動、火山活動などの観測に活用する予定である。

(2) CP-SAR システム

図 1.1.1.-6 は CP-SAR UAV のシステムを示す。このシステムは飛行制御システム、オンボードコンピュータ、テレメトリ・コマンドデータハンドリング、姿勢制御、センサなどから構成されており、飛行制御システムは手動と自律飛行モジュールから構成されている。オンボードコンピュータは CP-SAR UAV の全サブシステムの制御に使用する。テレメトリ・コマンドデータハンドリングは S または X バンドで地上と通信する。姿勢制御は慣性航法装置 (IMU) と GPS を使用する。主センサとして、CP-SAR を使用するが、このミッションではハイパースペクトルカメラ、GPS-SAR など搭載する予定である。CP-SAR センサはチャープパルス発生器、送受信モジュール、画像信号処理モジュールから構成されている。

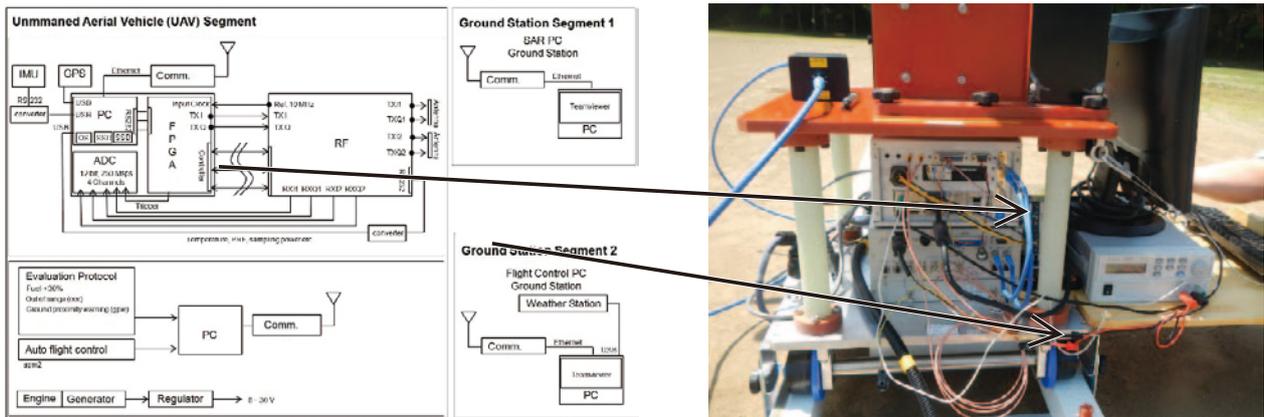


図 1.1.1.-6 CP-SAR UAV のシステム図



図 1.1.1.-7 マレーシア・マラッカ市内に実施した SAR センサのポイントターゲット (コーナリフレクター) による地上移動実証実験の様子

図 1.1.1.-6 は CP-SAR UAV のブロック図を示し、UAV セグメント、2つの地上局セグメントから構成されている。UAV セグメントが CP-SAR、飛行制御システム、エンジン制御装置から構成されている。CP-SAR センサが RF システム、チャープパルス発生器、画像信号処理システムから構成されている。2つの地上局セグメントを CP-SAR センサのモニタリングと画像信号処理用、飛行制御・気象モニタリングのために使用する。図 1.1.1.-6 右に実際のシステムを示す。

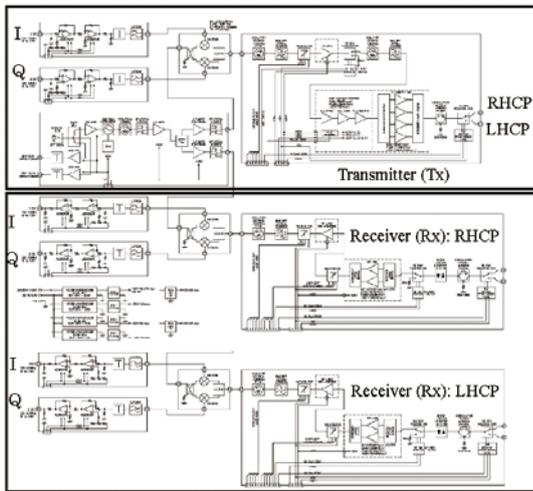


図 1.1.1.8 CP-SAR システムの回路図

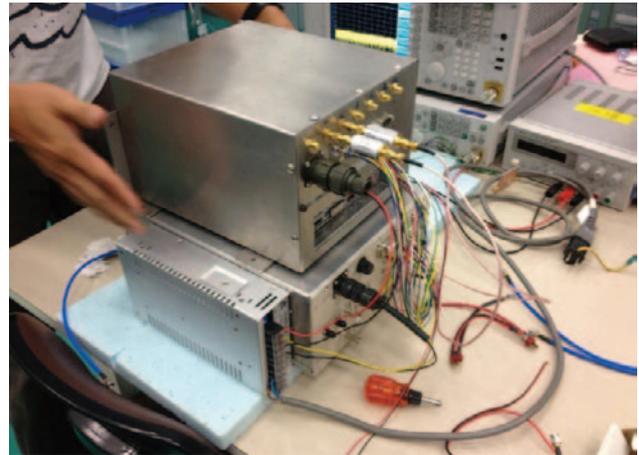


図 1.1.1.9 SAR のチャープパルス発生器と画像信号処理のモジュール

図 1.1.1.8 は CP-SAR センサの RF システムまたは送受信モジュールを示す。基本的に、このシステムは送信と受信のサブモジュールから構成されている。送信サブモジュールの入力端子に、ベースバンド DC ~ 150MHz をもつチャープパルス発生器の In-phase (I) と Quadrature (Q) の信号を接続する。チャープパルスを周波数 1,270MHz に変調させ、この送受信システムの周波数の動作幅は $1270\text{MHz} \pm 150\text{MHz}$ である。送信システムの利得チューニング機能は 1、2、3、8、16 または 0 ~ -31dB に設定することができる。受信機の利得チューニング機能は 1、2、3、8、16 \times 2 または 0 ~ -62dB である。電力増幅器 (PA) はパルス送信電力 50W (最大)、送信期間 $10\mu\text{s}$ (最大)、duty circle 2% (最大) を出力する。送受信機のスイッチング速度 (RHCP と LHCP) は基本的に $1\mu\text{s}$ で最大 $2\mu\text{s}$ である。また、アンテナ部分はフル円偏波を実現するために、LHCP と RHCP 用の円偏波マイクロストリップアレーアンテナから構成されている。(図 1.1.1.11 参照)

図 1.1.1.9 は CP-SAR システムのチャープ発生器と画像信号処理のモジュールを示す。本研究では、UAV の飛行高度、姿勢などに自動的に調整できるように、この CP-SAR のチャープパルス長とバンド幅を制御する予定である。また、観測データを保存するために、ここで SSD メモリを使用する。CP-SAR センサの観測モードとして、災害監視の時に、緊急モードと生データの保存もできるように設計された。図 1.1.1.10 が無人航空機に搭載した CP-SAR システムである。



図1.1.1.10 無人航空機に搭載したCP-SAR

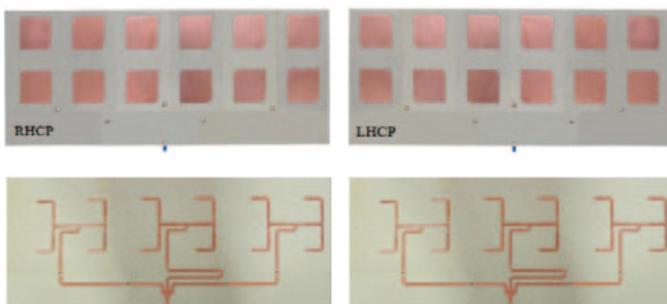


図 1.1.1.11 CP-SAR の送受信用のマイクロストリップアンテナと測定用の電波無響室



(3) CP-SAR 搭載無人航空機 (CP-SAR UAV) システム

本研究の UAV SAR システムはペイロード 25 kg で CP-SAR、GPS-SAR、掩蔽 GPS または GPS-Radio Occultation、光学センサであるハイパースペクトルカメラなどの各種センサを搭載する予定である。この UAV の飛行可能な高度は 1,000 m ~ 4,000 m である。中心周波数 1,270 MHz、解像度 1 m ~ 3 m、パルスの時間幅 4.5 ~ 48 μ s、パルスのバンド幅 ~ 150 MHz、オフナディア角 20° ~ 60°、観測幅 1 km、アンテナサイズ 1.5 m x 0.4 m (4 パネル)、アンテナ放射効率 > 80%、PRF 1,000 Hz、ピーク電力 8.65 W (高度 1 km) ~ 95 W (高度 4 km) である。本研究では、高度 2 km 以下の飛行実験をする予定で、最大電力は 50 W である。送受信アンテナは LHCP と RHCP のアンテナから構成されている。この LHCP と RHCP アンテナで受信されたパルスより、直線偏波と円偏波を含む楕円偏波の散乱特性を調査する予定である。

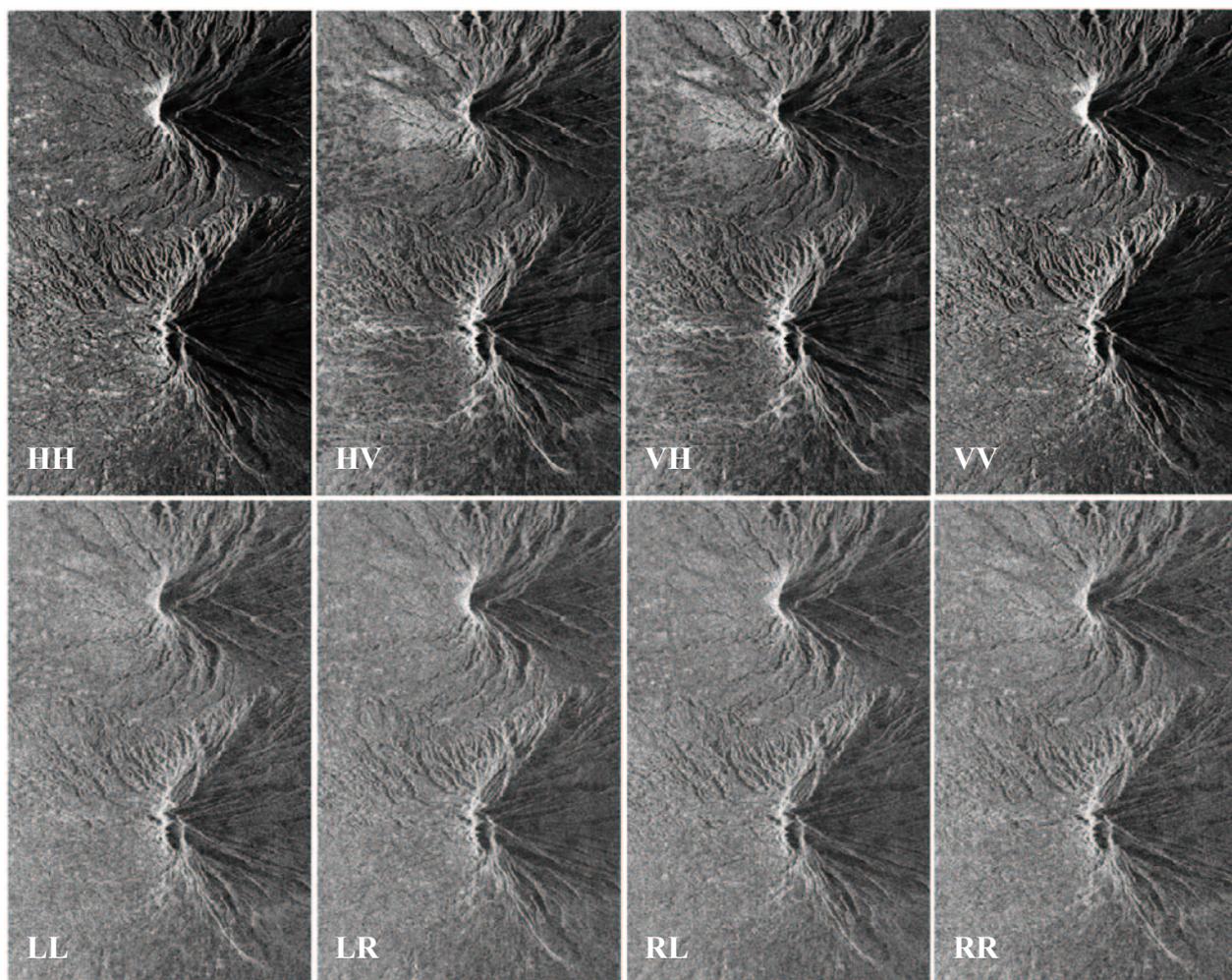


図 1.1.1-12 直線と円偏波の画像

図 1.1.1-12 のように、本研究で直線偏波の ALOS PALSAR 画像で円偏波 (LL、LR、RL、RR) の画像をシミュレートした。L と R はそれぞれ左旋円偏波と右旋円偏波を示す。そして、LR が LHCP の送信で、RHCP の受信である。この図からわかるように、円偏波の画像が直線偏波の画像と比較して、画像の鮮明性と散乱状態などの違いを示す。これから円偏波の画像の調査を継続し、様々な応用も検討する予定である。また、将来、CP-SAR UAV の実験の他に、CP-SAR 搭載の小型衛星の開発も行う予定である。

◆ 1.1.2. PS-InSAR による地盤沈下と土砂崩れの観測

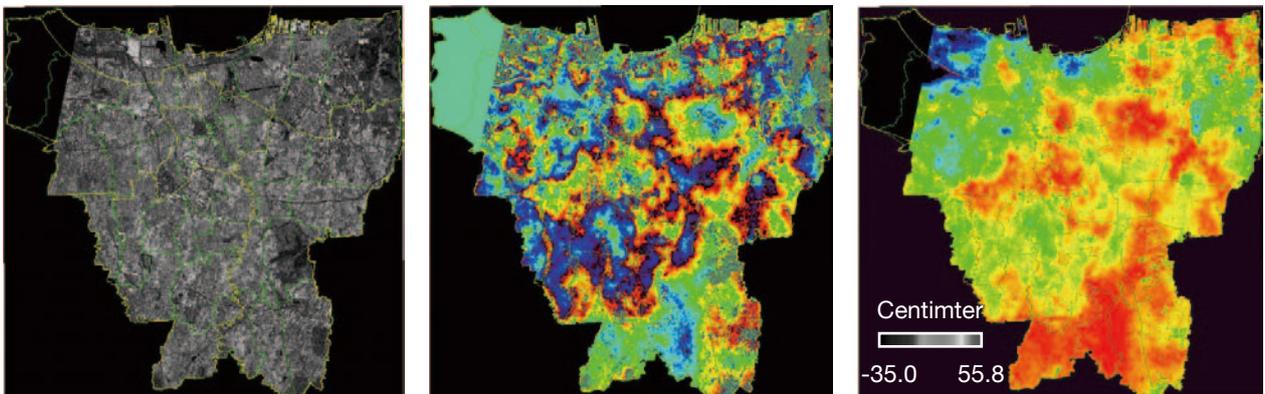
近年、都市域をはじめ、高速道路、高圧送電線、海岸線沿などにおける地盤沈下、土砂崩れなど、様々な問題が発生した。図 1.1.2.-1 はジャカルタ市内における地盤沈下による被害の様子を示す。この地盤沈下の原因として、都市開発、地下水の大量使用などである。この現象が長期間にわたって微少変化しているため、本研究では長期間継続的な差分干渉合成開口レーダ (Differential Interferometric SAR - DInSAR) 手法と永続散乱体合成開口レーダ干渉法 (Persistent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar - PS-InSAR) を使用して、主に東京都とジャカルタ市における地盤沈下、マレー半島の東西高速道路と高圧送電線沿いにおける土砂崩れの広域観測を高精度に行った。

今まで、当研究室では TerraSAR-X、Envisat ASAR、ERS-1/2 SAR、JERS-1 SAR (解像度約 12.5 m)、ALOS PALSAR データ (解像度約 10 m) を使用して、東南アジアと東アジア地域における大都会における地殻変動の観測を行っており、特に、ここで大都会における地盤沈下に注目をした。例として、図 1.1.2.-2 に DInSAR で TerraSAR-X データを解析して、インドネシア・ジャカルタ市内における地盤沈下の解析結果を示す。本研究では、解析結果の解像度が約 1 m になるため、現地における詳細な解析結果 (解像度約 1 m) を得ることができた。その結果、ジャカルタ市内における 2010 年 8 月 9 日から 2011 年 6 月 13 日までの微少変化の抽出ができた。また、東京駅周辺における地表面変化の観測も行った (図 1.1.2.-3)。これによって、現地における住宅レベルまでの被害地図を把握し、地盤沈下による体積変化の抽出もできた。この短期間観測による微少変化の抽出結果をもとにして、本研究では DInSAR と PS-InSAR 手法で長期間地表面微少変化と体積変化の抽出を実施した。



(a) Kapuk Dalam通りの大洪水 (b) Mangga dua地域に地盤沈下 (c) Ancol 市に崩落した高速道路

図 1.1.2.-1 現地調査写真



(a) 強度画像 (b) インタフェログラム (c) Unwrapping画像

図 1.1.2.-2 TerraSAR-X 画像の解析結果 (ジャカルタ市、m20100809、s20110613)

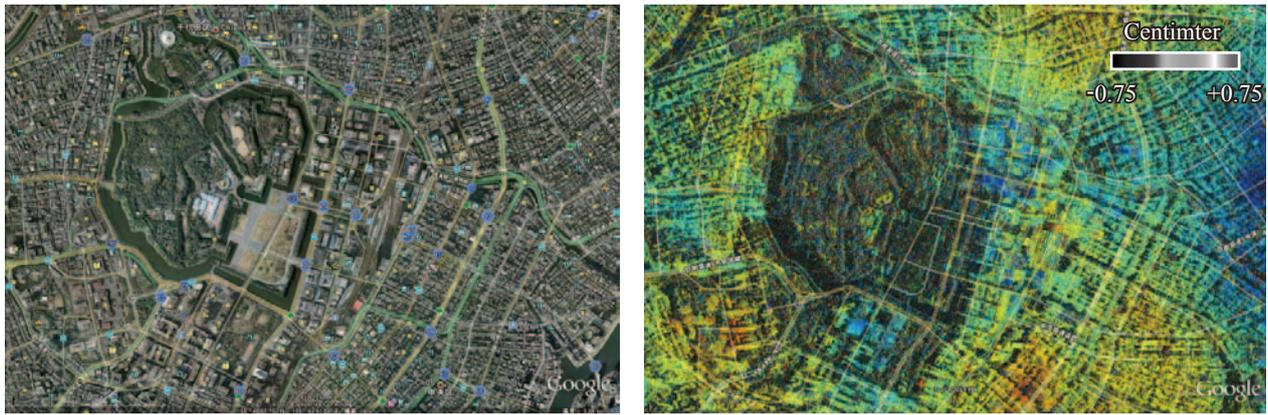


図 1.1.2-3 左：光学センサ（東京）、右：TerraSAR-X 画像の解析結果（東京都、m20100621、s20100815）

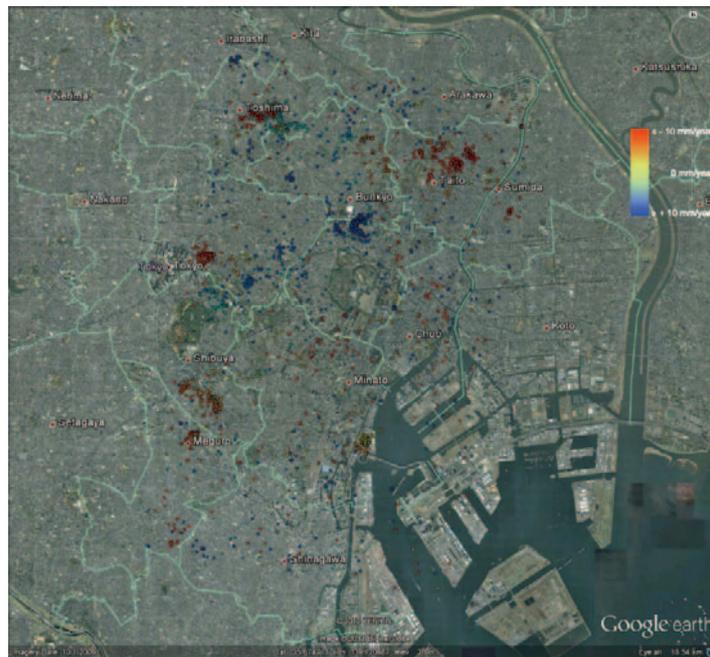


図 1.1.2-4 TerraSAR-X による東京都内における地盤沈下の観測
(TerraSAR-X の生データが PASCO 社の提供)

本研究の目的として、TerraSAR-X 衛星群のデータを使用して、東京都とジャカルタ市における詳細な地盤沈下または地表層変化を把握することである。研究方法として、まず過去の地盤沈下の過程を把握するために、1993年～1998年（6年間）と2007年～2011年の地盤沈下の現象を解析する必要がある。ここで、Lバンドの合成開口レーダである JERS-1 SAR と ALOS PALSAR で解析をする。そして、この両都市の微小変動量の把握をするために、2007年～現在の TerraSAR-X 衛星群のデータを使用する。ここで、現地の微小変動量を把握するために、高精度 GPS データ、統計データ、地質情報、現地調査データなどと比較検討をする。また、解析精度向上させるために、データの確保状況によるが、必要に応じて PS-InSAR でも解析した。研究成果として、図 1.1.2-4 のように東京都内における地殻変動（地盤沈下と隆起）の速度（mm/year）を示す。この研究成果が都市計画、震災対策などに活用できるものと期待する。

この研究では ALOS PALSAR データを使用して、マレー半島的高速道路沿いの土砂崩れとバンドン市内の地盤沈下を課題にし、12.5 m の解像度で行った。この結果が図 1.1.2-5 ～ 図 1.1.2-6 に示す。この研究成果より都市政策、高速道路沿いの土砂崩れ防止などに貢献できるものと期待する。

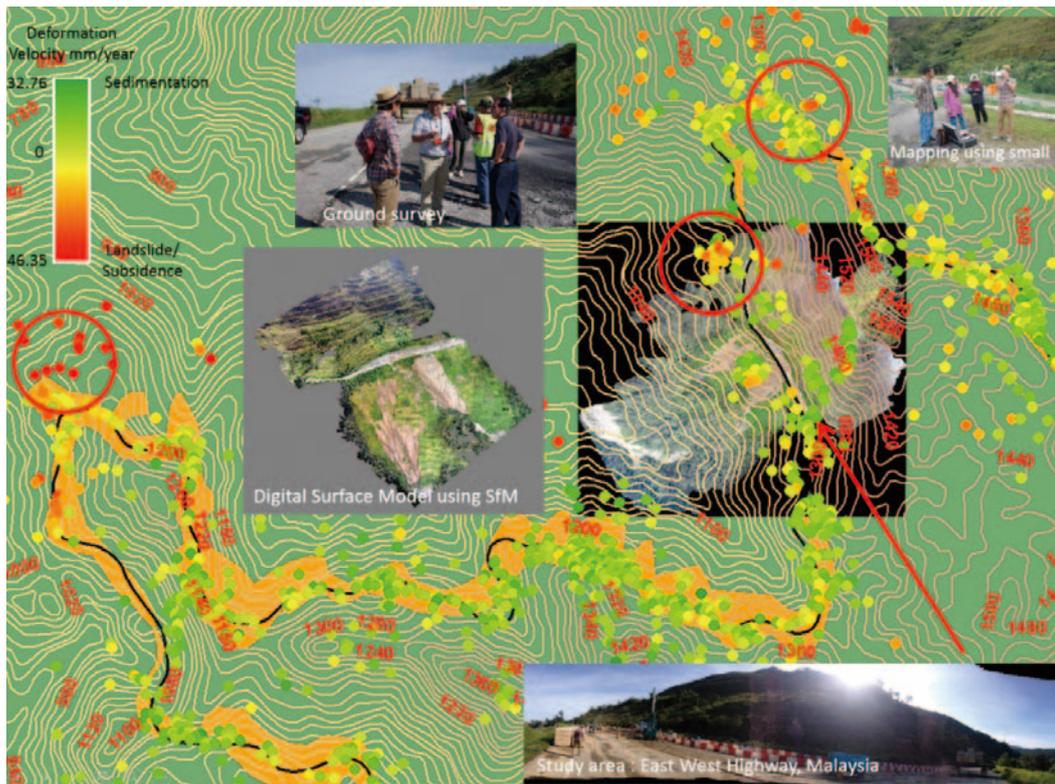


図 1.1.2-5 PS-InSAR によるマレーシア・カメロン高原高速道路周辺における土砂崩れの観測 (JICA JST SATREPS 事業)

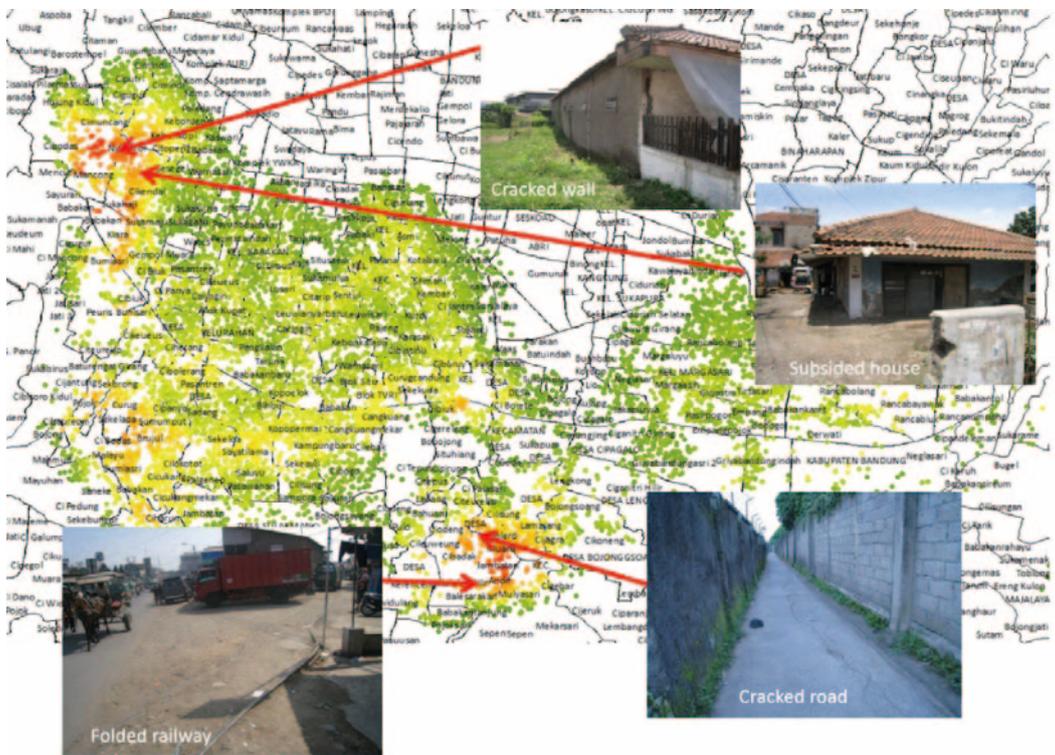


図 1.1.2-6 ALOS PALSAR PS-InSAR によるインドネシア・バンドン市内の地盤沈下の観測

◆ 1.1.3. 電離層観測用小型衛星 GAIA-I の開発

(1) GAIA-I について

2013 年度より、本研究室は GPS 掩蔽 (GPS-RO) センサと電子密度・温度プローブによる、電離層と大気における様々な現象を観測するために、小型衛星 GAIA-I を開発している (図 1.1.3-1)。図 1.1.3-2 のように、この小型衛星はオンボードコンピュータまたはミッション系 (Payload)、コマンドデータハンドリング (CDS)、通信系 (CMS)、電力系 (EPS)、姿勢制御系 (ACS) から構成されている。今年度、小型衛星搭載用の CDS 用のオンボードコンピュータ (OBC)、電子密度・電子温度プローブ (EDTP) が完成し (図 1.1.3-3)、実証実験をした。来年度にも地上実証実験をする予定である。

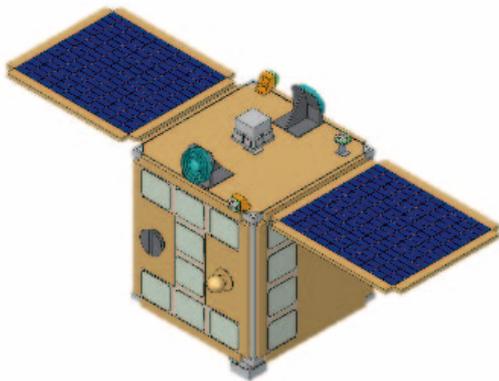


図 1.1.3-1 電離層観測用小型衛星 GAIA-I

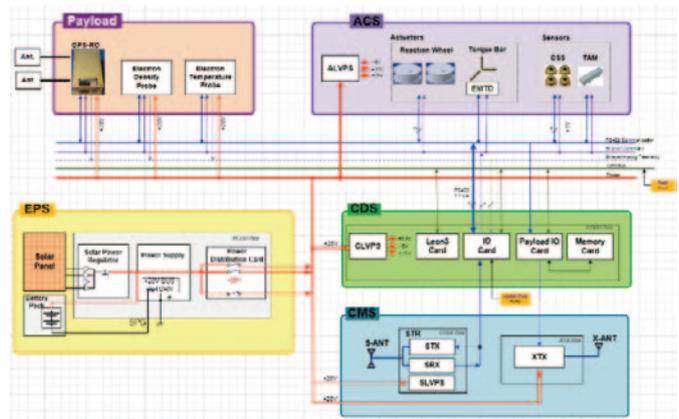


図 1.1.3-2 GAIA-I のブロックダイアグラム



図 1.1.3-3 FPGA による GAIA-I 用のオンボードコンピュータ (OBC)、通信システム (CMS)、電子密度・電子温度プローブ (EDTP)

(2) 人工衛星管制用地上局

当センターが運用する人工衛星管制用地上局（コマンド・テレメトリ用Sバンドとミッションデータダウンリング用Xバンド）として、直径3.6mのアンテナと主衛星管制室が工学総合棟9階と8階に、副衛星管制室が環境リモートセンシング研究センター研究棟2階に2014年12月21日に設置された（図1.1.3.-4）。以下はその仕様である。

〈アンテナ部：工学系総合研究棟屋上（9階）〉

- ・アンテナ：パラボラアンテナ
- ・アンテナ直径：3.6m
- ・偏波切換：右旋円偏波（RHCP）と左旋円偏波（LHCP）に切換可能
- ・耐風：60m/秒
- ・耐震：震度6
- ・アンテナのビーム幅：Sバンド コマンド用 2.4°（ピークから-3dBになる範囲）
Sバンド テレメトリ用 2.3°（ピークから-3dBになる範囲）
Xバンド データダウンリング用 0.6°（ピークから-3dBになる範囲）
- ・利得及びサイドローブ：サイドローブ -18 ~ -20 dB
Sバンド 35 ~ 36 dBic
Xバンド 47 ~ 48 dBic

〈アンテナ駆動系〉

駆動架台：

	可動範囲	駆動速度	駆動方式
AZ	± 260°	15° /sec	AC サーボモータ駆動
EL	- 2 ~ 92°	15° /sec	AC サーボモータ駆動

〈アンテナ制御系〉

アンテナ制御系は専用コントローラ（FPGA、マイコン等）を使用し、下記の機能を持つ。

- ・駆動指令は AZ、EL 共にパルス列出力
- ・AZ、EL のリミットスイッチ状態等のステータス情報を管制用 PC へ送付可能

〈コマンド系（Sバンド）〉

コマンド系（Sバンド）は下記のモジュールと機能・仕様を持つ。

- ・モジュール
 - コマンド発生器・変調機
 - 送信機
 - UP コンバータ
 - パワーアンプ
- ・機能・仕様
 - 送信電力：最大 100W
 - 周波数：2,025 ~ 2,120 MHz
 - 偏波：左旋円偏波（LHCP）
 - 変調方式：PCM, BPSK, PM, FSK
 - ビットレート：1,000 bps、2,000 bps、4,000 bps @ PCM/BPSK/PM
128 kbps、512 kbps、1,024 kbps @BPSK
9.6 kbps @FSK

〈テレメトリ系 (Sバンド)〉

テレメトリ系 (Sバンド) は下記のモジュールと機能・仕様を持つ。

・モジュール

LNA

DWN コンバータ

受信機

復調機

・機能・仕様

周波数：2,200 ~ 2,300MHz

偏波：左旋円偏波 (LHCP)

変調方式：PCM, BPSK, PM, FSK

ビットレート：2.048 kbps、4.096 kbps、128 kbps @PCM/BPSK/PM

2.4 Mbps @BPSK

38.4 kbps @FSK

〈データ受信系 (Xバンド)〉

データ受信系 (Xバンド) は下記のモジュールと機能・仕様を持つ。

・モジュール

LNA

DWN コンバータ

受信機

復調機

・機能・仕様

周波数：8,025 ~ 8,400MHz

偏波：左旋円偏波 (LHCP)

変調方式：QPSK

ビットレート：20Mbps

〈管制用 PC〉

管制用 PC は下記の構成と機能・仕様を持つ。

・構成：主管制室 メイン PC 工学総合研究棟 8 階

副管制室 リモート PC

環境リモートセンシング研究センター 研究棟 2 階 ヨサファット研究室

・機能・仕様

主管制室用 PC 及び管制ソフトウェア

主管制室用 PC：下記の仕様の FA-PC (24 時間連続運転対応 PC)

・ OS：Windows 7 (64 ビット) または Windows 8 (64 ビット)

・ CPU：インテル Core i7 プロセッサ 4 コア

・ メモリ：8 GB 程度

・ HDD：500GB 程度

・ モニタ：19 インチワイドモニタ または 19 インチモニタ (2 台)

・ソフトウェア：下記の機能をもつ

TLE 自動更新機能：

・ 設定された時刻に自動で、Norad などの Web サイトから TLE 情報をダウンロード可能

無人運用スケジューラー機能：

- ・指定期間（1日～7日程度）のスケジュールを作成可能。
- ・作成したスケジュールの手動変更可能。
- ・スケジュールの時刻になると自動で観測動作開始。

衛星パス予報メール送信機能：

- ・該当するパスの時刻（準備開始の時刻でも可能）になると登録アドレスにメール送信可能。

アラートメール送信機能：

- ・アンテナ駆動系、通信機器異常などの異常が発生した場合、登録アドレスにアラートメールを送信。

複数衛星管制（5衛星まで管理可）：

- ・スケジューラーと同様に複数登録した衛星のパスを全て調べ、スケジュールを生成可能。
- ・必要に応じパスの重なりやその時の優先度を手動変更し、無人運用スケジューラー可能。

停電対策：管制用 PC とディスプレイ用の UPS を設置。

VisibleTime の 100 分率（%）表示機能。

時刻表示：UT 優先と JT 優先表示切り替え機能を持つ。

AOS & LOS 及び MAX EL の AZ 角のグラフィック表示機能を持つ。

※ AOS (Acquisition of Signal)、LOS (Loss of Signal)

任意日時のパスシミュレート機能を持つ。

- ・サブ PC および副管制室用リモート PC
OS：Windows 7（64ビット）または
Windows 7（64ビット）
CPU：インテル Core i3 プロセッサー
メモリ：4GB 程度
モニタ：19 インチ（1台）

〈アンテナ監視機〉

- ・ネットワークカメラ
- ・夜間照明（LED 投光器）

〈GPS 受信機〉

- ・GPS 受信機
- ・タイムコード生成機能
- ・1pps 生成機能



図 1.1.3.-4 本センターの人工衛星管制局

◆ 1.1.4. スーパーサイエンスハイスクール（SSH）プログラムにて先端リモートセンシング技術の紹介

2014年10月25日と11月8日、ヨサファット研究室にて Super Science High School (SSH) に指定されている東京学芸大学附属高等学校の学生にリモートセンシングの基礎技術から最先端な技術である円偏波合成開口レーダ、無人航空機 (UAV)、小型衛星などを紹介した。また、リモートセンシングにおけるデータの運営を紹介するために、当センターの設備である受信アンテナとその設備とデータベースシステムも紹介した。この見学・講習会は SSH プログラムの一環として実施されたもので、この2回の講習会では、先端的な技術のみならず、研究に関する姿勢、態度、考え方、環境に対する思考、実験失敗からの立ち上がり方などを紹介し、将来の国際的な科学技術関係人材の育成に貢献できるものと期待する。



写 1.1.4. CEReSニュースレター 11月号 (No.108)
“先端リモートセンシング技術を紹介”の記事より

◆ 1.2. 工業用 CMOS カメラによる天空光計測装置の開発

(岩撫宏明、齊藤隼人、眞子直弘、入江仁士、久世宏明)

太陽直達光の放射照度や天空光の放射輝度は、光合成などの植物生産過程のほか、地表に到達する太陽光エネルギーを計測する上からも大気リモートセンシングにおいて基本的な物理量である。各方向から地上観測者に到達する放射強度とその角度依存性はまた、大気中に浮遊する粒子である雲やエアロゾルの粒子についての科学的な把握にも基礎的な情報を提供する。従来、直達光と天空光を観測し、放射伝達計算によってエアロゾルの特性評価を行う目的にはスカイラジオメータやサンフォトメータが使用されているが、これらの測器では精密な太陽追尾が欠かせないために装置が大型となり、また高価であるという問題点があった。本研究では、工業用の CMOS カメラに基づいて天空光撮像装置（イメージングスカイラジオメータ）を製作し、その特性評価を行った。既存の測器が基本的には 1 次元計測であるのに対して、2 次元画像の場合、太陽位置は画像そのものから直ちに判読が可能となることが最大の特徴である。

本研究では、白黒 CMOS カメラ (IDS, UI-3480 CP-M) を利用した。画角はおよそ 20° (H) \times 27° (V)、ピクセル数は $2,560 \times 1,920$ 、諧調は 12 ビットである。迷光を防ぐために先端に画角程度に広がったバッフルを使用した。バンドパスフィルタと光学系をつけたカメラを回転台 (シグマ光機、SGSP-160YAW) に乗せ、1 軸ステージコントローラによりステッピングモータで駆動することにより、全天を撮影した。回転台のテーブルサイズは 160 mm ϕ 、繰り返し位置決め精度は 0.02° である。分光には図 1.2-1 に示したような透過率特性をもつバンドパスフィルタを用いた。このような狭帯域のバンドパスフィルタで広角の撮像を行うと、フィルター面に光が斜め方向から入射することによって透過波長が短波長側にずれる、いわゆるブルーシフトの問題が生じる。この問題を解決するために、直径 1 mm のピンホールとアクロマティックな非球面レンズを 3 枚組み合わせると入射光がコリメートされた部分を作り、その部分にフィルターを挿入する方式のコリメート光学系を設計・製作した。その結果、図 1.2-2 に示すように、波長シフトをほぼ消去することができた。

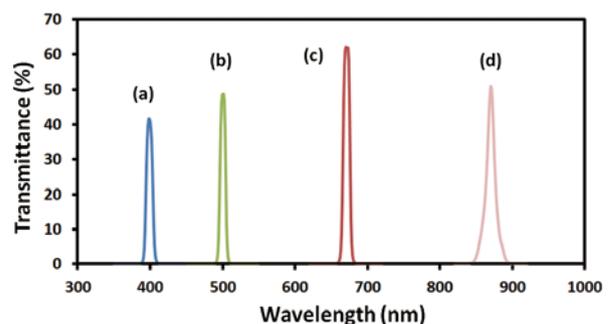


図 1.2-1 天空光計測に使用した狭帯域光学フィルタの透過率特性

画像のデジタル値を放射量に変換するために、分光放射計（英弘精機 MS-720）を用いて天空光を同時計測し、また、太陽直達光については、ND フィルターを併用して太陽画像を撮像し、サンフォトメータ（プリード PSF-100）との同時計測による校正を行った。図 1.2-3 に示すように、いずれの場合にも CMOS カメラの結果は比較対象の測器の結果とよく一致しており、観測視野角、画像のフラット補正、および素子の温度特性などに注意を払えば、精度よく放射照度・輝度値を測定可能であることが明らかになった。

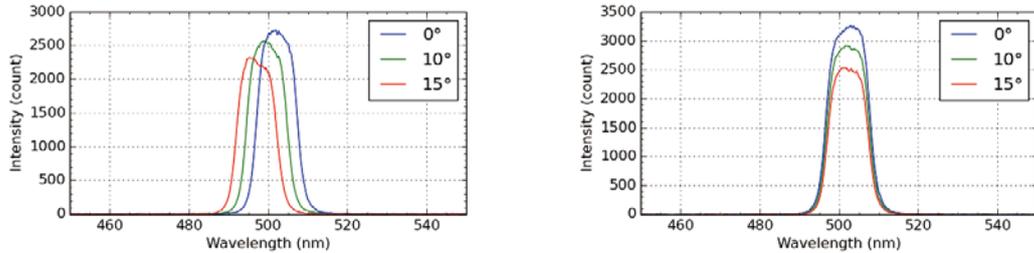


図 1.2-2 狭帯域光学フィルターのブルーシフト（左）と、コリメート光学系導入によるその解決（右）

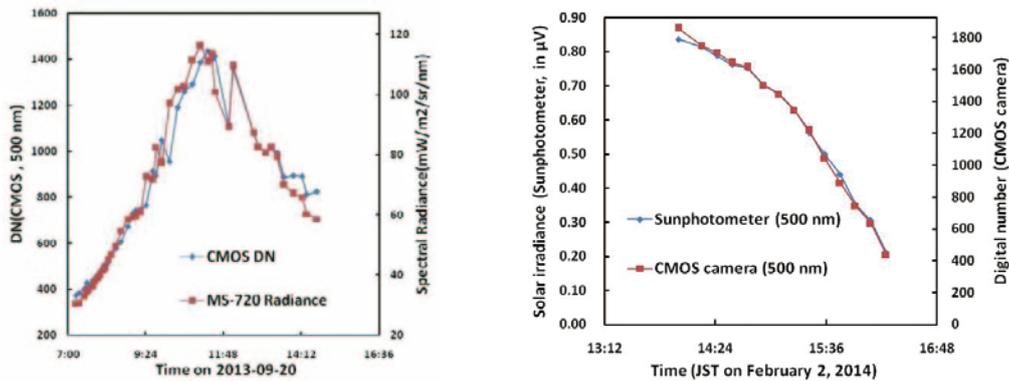


図 1.2-3 分光放射計 (MS-720) (左) および、サンフォトメータ (PSF-100) との同時計測

◆ 1.3. GOSAT 熱赤外スペクトルからの一酸化二窒素 (N_2O) 濃度の導出と初期検証解析について (齋藤尚子)

2009 年 1 月に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) に搭載されている TANSO (Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation) -FTS の熱赤外波長領域 (TIR バンド: $5.5\text{-}14.3\mu\text{m}$) からは、二酸化炭素およびメタンの濃度鉛直プロファイルを導出することができる。二酸化炭素、メタンの鉛直プロファイルの導出には、ベイズ理論に基づいた線形写像付き非線形最大事後確率推定法を採用している [Saitoh et al., JGR, 2009]。メタンのリトリバルでは一酸化二窒素 (N_2O) の弱吸収帯を含む $1,140\text{-}1,370\text{cm}^{-1}$ を用いているため、メタンの導出時に「副産物」プロダクトとして N_2O の濃度を導出することが可能である。GOSAT の TIR バンドのメタン濃度データについては Saitoh et al. [SOLA, 2012] でデータ質の検証解析がなされており、科学的な解析研究にも利用されている [Ricaud et al., ACP, 2014] (ただし、V00.01 プロダクト)。メタンと同時に算出される N_2O は、海洋からの放出や土壌中の微生物活動 (自然起源) および化石燃料燃焼、バイオマス燃焼、窒素肥料、農耕牧畜、汚水 (人為起源) などがソースであり、化学的に安定な物質で対流圏内に消失源を持たないため、大気中での寿命は長く (およそ 114 年 [IPCC, 2007])、強力な温室効果気体として知られている。このため、全球で N_2O の濃度分布を明らかにすることは非常に重要であるが、対

流圏大気中では濃度変動が小さいために衛星による対流圏 N₂O 濃度の高精度観測は非常に難しい。さらに、GOSAT の TIR バンドのメタンの濃度導出に利用している波長帯は SN 比が悪いため、メタン濃度と N₂O 濃度の同時算出は挑戦的な研究であると言える。

今年度は、メタン (V01.00 プロダクト) と同時算出されている N₂O データを、HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO) プロジェクト [Wofsy et al., Phil. Trans. R. Soc. A., 2011] の航空機観測 N₂O 高度分布データと比較し、データ質の初期検証解析を行った。図 1.3. に、300hPa 面で、領域 (緯度約 10 度、経度 30 度) ごと、10 日ごとに TIR バンドの N₂O データおよび HIPPO-5 の N₂O データを平均し、濃度の緯度分布を比較した結果を示す。

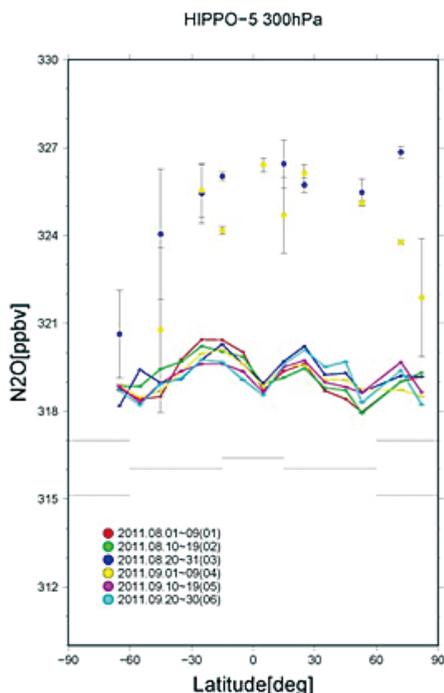


図 1.3. 2011年夏の300hPa面における、TIRバンド (色付き実線)、先験値 (灰実線)、HIPPO-5 (丸) の N₂O 濃度の緯度分布の比較。○が平均値、縦線が1シグマを示している。

高緯度については成層圏の N₂O の観測データが含まれていることから N₂O 濃度が低く、濃度のバラつきも大きくなっているが、TIR バンドの N₂O 濃度の緯度分布と HIPPO の N₂O 濃度の緯度分布がほぼ平行になっており、TIR バンドの N₂O 濃度に ~ 6ppbv 加えると、HIPPO の濃度緯度分布と概ねよい一致を示すものと思われる。先の述べた通り、観測に含まれる N₂O 濃度の情報量が乏しいため、先験値に強く拘束された結果、TIR バンドの N₂O データにはどの緯度帯においても低濃度バイアスが生じていると考えられる。本研究の結果、低緯度ではさらに大きな低濃度バイアスが生じていることがわかっており、現在、その原因について調査中である。(* なお、本研究は工学部情報画像学科の岡本裕暉君の卒業研究成果の一部である)

◆ 1.4. 簡易型レーザー計測システムを用いた地上および近接空中計測による森林構造取得 (本多嘉明、梶原康司)

(1) はじめに

衛星光学センサによる陸域植生の地上バイオマス推定において、多角観測データを用いた推定アルゴリズム開発を行ってきた。この推定手法ではこれまでに報告したとおり森林構造に依存する BRDF をシミュ

レートする必要がある。小型自立無人ヘリコプターに簡易型レーザースキャナを搭載して上空から樹冠表面の形状を取得し、同様に無人ヘリを用いた BRDF 計測データを用いて樹冠表面形状と BRDF の関係をモデル化することが可能となる。一方、昨年度の報告でも触れたように開放樹冠をもつ森林における林床植生の分布状況の把握も必要である。加えてバイオマス推定アルゴリズムの検証データとして胸高直径、樹高、立木密度の計測も不可欠であり、そのために地上レーザ計測と小型無人ヘリに搭載したレーザースキャナによる近接空中計測を併用する必要がある。

本報告では、昨年までに構築してきた簡易型地上レーザ計測システムについて進展した部分について述べる。また、本年度も北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの協力で同大学雨龍研究林（本年度は泥川保存林サイト）におけるアカエゾマツの観測を実施することができ、その計測結果を用いた BRDF シミュレーションと MODIS プロダクトの比較についても述べる。

(2) 地上レーザ計測

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター雨龍研究林内の泥川保存林はアカエゾマツの疎林であり、林床にクマザサの密生する開放樹冠の林である。



図 1.4-1 泥川保存林の様子

昨年度までの報告にあるように、簡易レーザ計測システムは、制御・計測・解析すべてが自前のシステムであるため、これまで複数地点からの計測データを自動合成して広範囲の点群データを自動生成する段階には至っていなかった。本年度は合成のためのタイポイント自動抽出を除き、複数ポイントからのデータ合成を自動化するソフトウェアの開発を行い、それらを完成させた。その結果これらのソフトウェア群を用いれば5、6点からの計測データの合成に要する時間は6時間程度まで短縮することができた。今後開発を予定しているタイポイントの自動抽出が可能になれば最終的には2時間程度で合成処理を全自動で行うことが可能となる。

開発したシステムによって泥川保存林で計測した地上計測データ（6点の異なる点から観測を行った）を合成した結果を図（1.4-2）に示す。図の点群の色の違いは観測点の違いを示している。

(3) 近接空中レーザ計測

前節（1）の地上計測を行った領域に対し、小型無人ヘリを用いた近接空中レーザ計測を行った。空中からの計測データは地上計測に比較すると点群の密度が低くなるが、それでも林床付近において約一千点の点群取得が可能である。開放樹冠における林床植生の細かな形状まで取得することはできないが、今回の観測でクマザサのような非常に葉面積の大きな植生が被覆する林床においても地盤面をとらえた点が少なからず存在することが分かった。林床植生と地盤面の分離ができれば、林床植生の LAI やバイオマス推定手法の開発に対して大きく寄与することができる。

また、地盤面を抽出することが可能になれば、近接空中レーザ計測による樹高推定精度が向上を期待

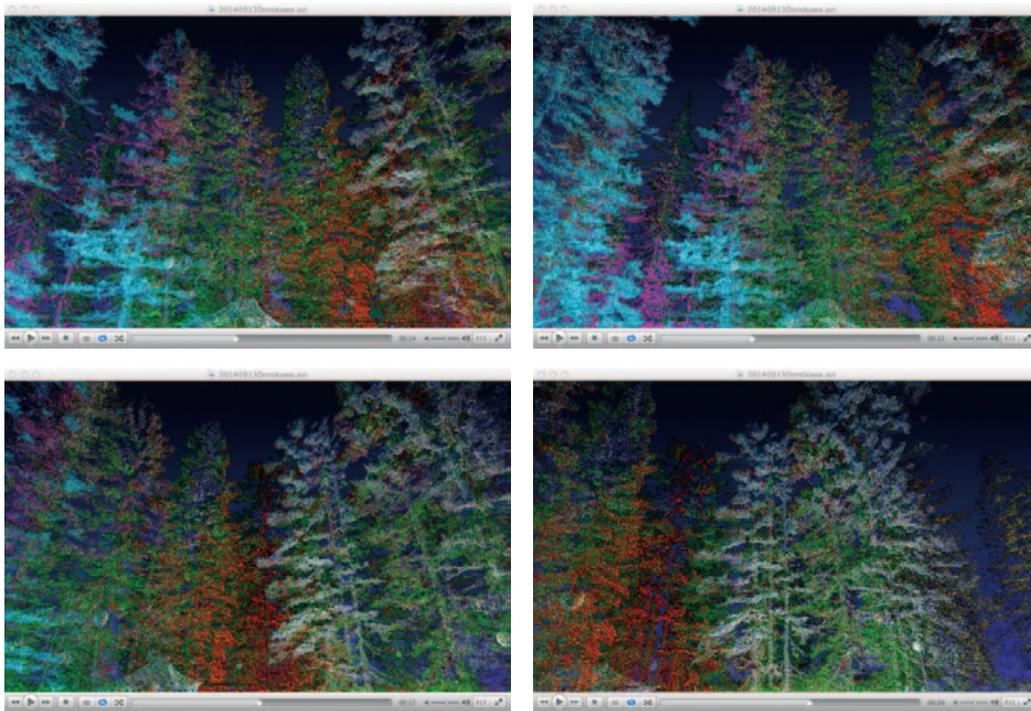


図 1.4-2 泥川保存林における地上レーザー計測結果。6 地点からの計測データを合成したもの。

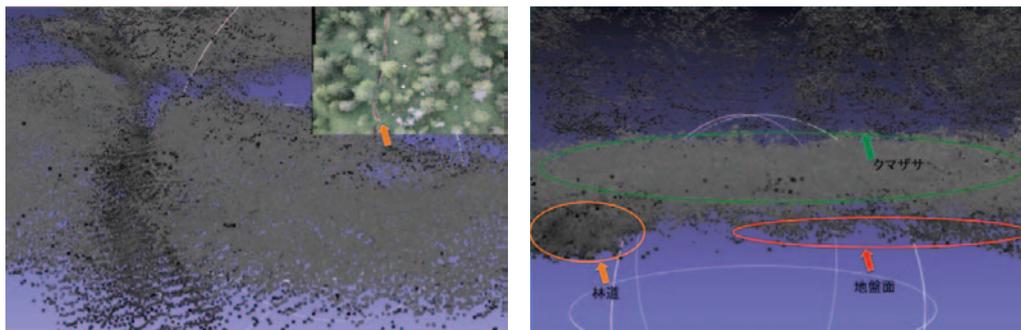


図 1.4-3 林床の点群データ。地盤面とクマザサの両者を捉えていることがわかる。

できる。地盤形状の取得はより高精細なデータを取得できる地上レーザー計測においてもその重要性は変わらない。両者を併用することによって効率的で正確な森林構造計測が可能となる。そこで本年度から点群データを用いた地盤面取得手法の開発に着手した。現時点において、地上データに限れば初期段階の試行結果として図 1.4-4 に示すような結果が得られている。

(4) レーザー計測結果の二方向反射シミュレーションへの適用

小型無人ヘリ搭載レーザーによる近接計測結果から観測対象エリアの 3 次元構造を取得し、その情報をもとに以前報告した樹冠モデルによる仮想森林を構築して二方向反射シミュレーションを行い、実際の衛星データ (TERRA/AQUA MODIS) の観測データとの比較を行った。小型無人ヘリによる近接レーザー計測から得られた点群データを図 1.4-5 に示す。このデータから樹木配置、樹冠径、樹高を手動で読みとり、それらと合致する樹冠モデルを構築した (図 1.4-6)。

ヘリ観測によって取得した点群データはオルソ投影することによって樹冠径を計測することが可能となる。同時に点群データは樹高値も保持しているため、樹高、樹冠径、立木位置を読み取ることが可能である。これらを用いて現実に存在する森林の形状パラメータを樹木モデルに与えることで、樹木モデル版の BiRS を駆動することができる。図 1.4-7 に樹冠モデルを用いて構築した仮想群落 (立木位置等の森林構

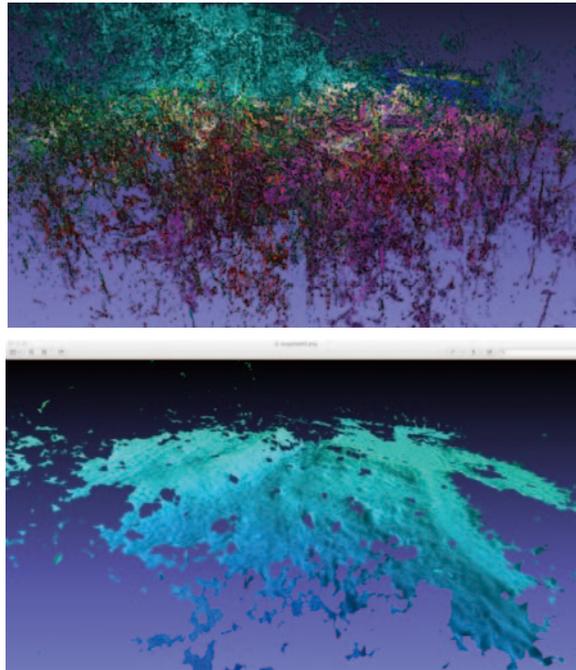


図 1.4-4 点群（上図）から地盤以外の点を取り除き地盤のみを抽出した結果（下図）
 （ただし泥川保存林ではなく千葉県東金のテストサイトにおける計測結果に適用したもの）。

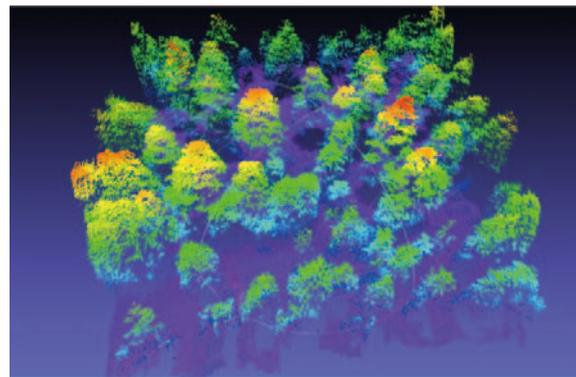


図 1.4-5 ヘリ搭載レーザーで取得したアカエゾマツ群落における点群データ

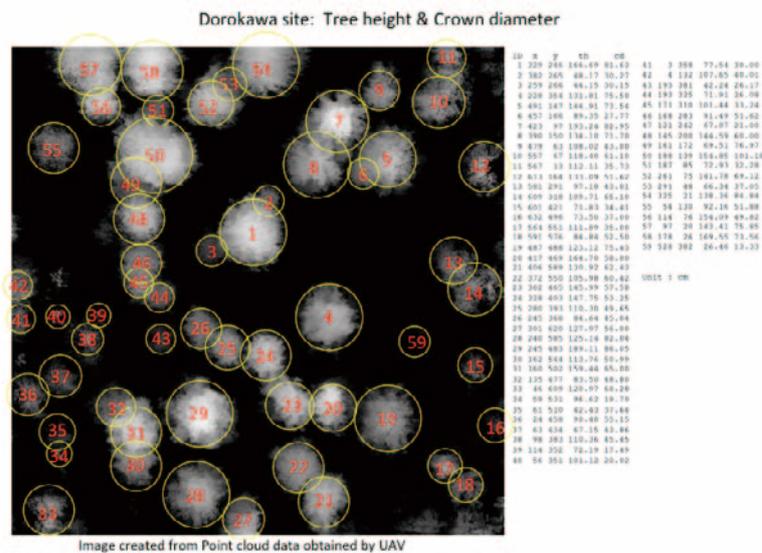


図 1.4-6 ヘリ搭載レーザーで取得された点群データから対象群落の樹木パラメータ（樹高、樹冠径、立木位置）を抽出。

Canopy model for BRDF simulation

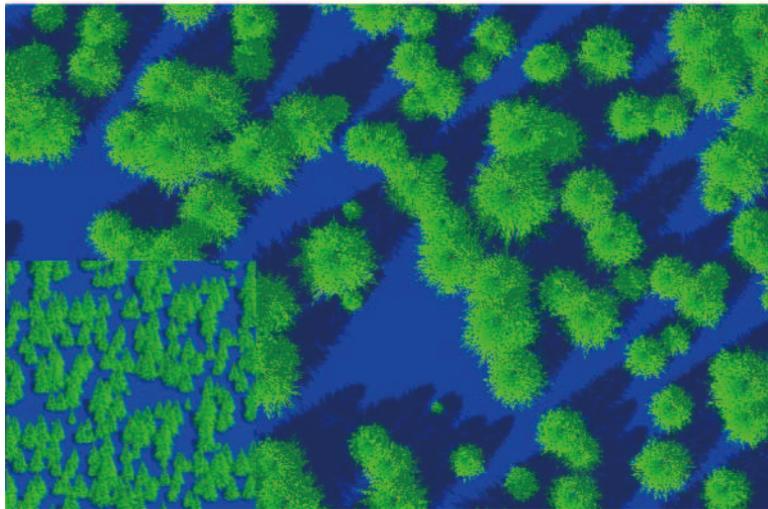


図 1.4-7 樹木モデルを用いて再現した3Dモデル。

Output Category images of BiRS (canopy model version).

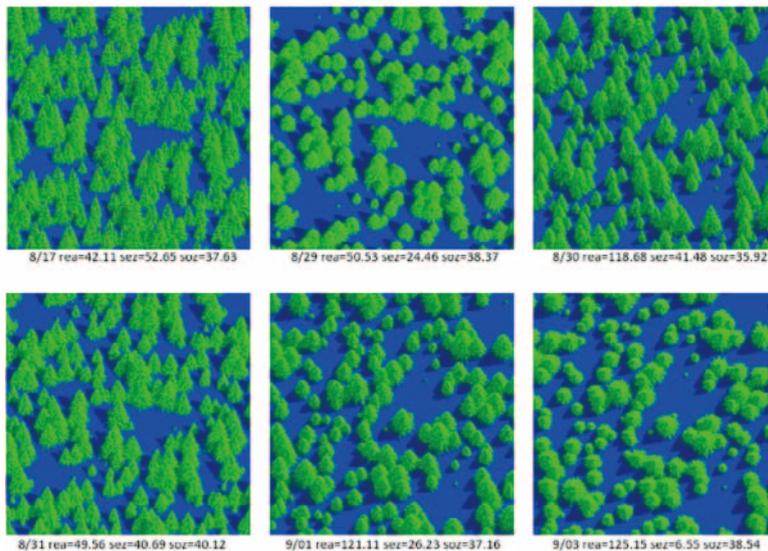


図 1.4-8 樹冠モデルを用いた樹冠等の被覆率シミュレーション結果。

造はレーザー計測データを用いている)と衛星観測ジオメトリを反映させたときの見かけ変化を示す。

こうして得られた日向樹冠、日陰樹冠、日向林床、日陰林床の見かけの面積比(カテゴリー被覆率)からセンサ計測反射率をシミュレートした結果を図 1.4-9 に示す。今回のシミュレーションに利用したレーザー計測による点群データは 50m 四方の領域であったが、泥川保存林が均一な立木分布であることを反映して非常に良好な結果が得られた。実際地上観測を行った次期に近い8月後半から9月初旬にかけて、TERRA/MODISの観測ジオメトリの変化による観測反射率の変化をシミュレーション結果は矛盾なく追隨していることがわかる。MOD09GA プロダクトによる反射率が必ずしも正確であるとは言い切れないため、絶対値に関する比較はここではそれほど重要ではない。しかし、センサ天頂角や相対方位角の変化によって生じる見かけのカテゴリー被覆率の変化に起因する反射率の大きな変動は完全に追隨しており、現地観測で得られた森林構造をもとに構築した仮想森林を用いて衛星観測反射率のシミュレーションを行う手法は有効であることを示している。

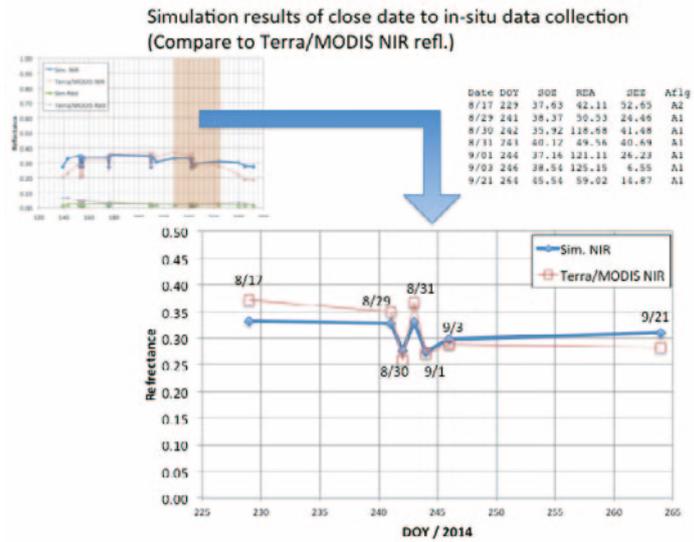


図 1.4-9 地上観測期間に近い次期における TERRA/MODIS 観測反射率 (MOD09GA) とシミュレーションの比較 (近赤外チャネル)。観測ジオメトリの変化による反射率の変動をシミュレーションがよく追隨していることを示している。