

[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短期および中期の達成目標は以下の通りである。

[短期および中期の達成目標]

《短期目標》（2－3年）

- ・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大気情報の取得
- ・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

《中期目標》（6年）

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・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.

<Short term targets> (2-3 years)

- ・ 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.

<Middle term targets> (6 years)

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 24 年度の成果]

1.1.1. 円偏波合成開口レーダ搭載大型無人航空機の開発（ヨサファット研究室）

[概要]

合成開口レーダ（SAR）は多目的センサで、全天候型、昼夜でも観測可能である。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 バンドは電離層におけるファラデー回転の現象で大きく影響を受けている。図 1.1.1-1. のように、本研究では、グローバル地殻変動を観測するために、円偏波合成開口レーダ（CP-SAR）搭載小型衛星（CP-SAR μ SAT）を開発している。表 1.1.1-1. がこの小型衛星の仕様を示す。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. 参照）。

図 1.1.1-3. のように、CP-SAR センサは楕円偏波（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 1,800~2,000 である。本研究では、CP-SAR センサは安価、軽量、コンパクトに設計されている。この新型センサは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 UAV JX-1（CP-SAR UAV、図 1.1.1-2. を参照）も開発し、2013 年 8 月 29 日に静岡県富士川滑空場にて実

験飛行した (図 1.1.1.-2.)。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ます。また、無人航空機の性能を強化するために、カーボンコンポジットによる軽量化と強化をして、JX-2 が完成した (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、様々な性能向上をする予定である。

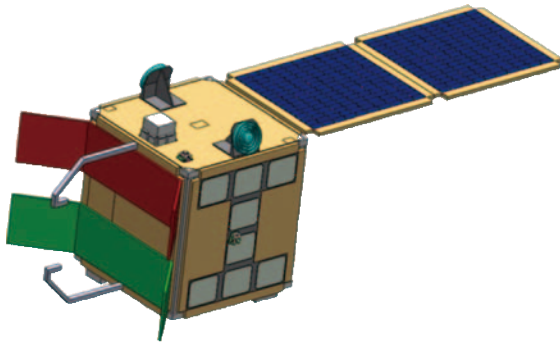


図 1.1.1.-1. Illustration of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar onboard microsatellite (CP-SAR μ SAT)

表 1.1.1.-1. SPECIFICATION OF CP-SAR ONBOARD MICROSATELLITE

Altitude	500~700 km
Inclination angle	97.6 degrees
Frequency / wavelength	1.27 GHz (L Band) / 24 cm
Polarization	TX : RHCP + LHCP RX : RHCP + LHCP Isolation TX-RX : > 30 dB
Gain / Axial ratio	> 30 dBic / < 3 dB (main beam)
Off-nadir angle	29 degrees (center)
Swath width	50 km
Spatial resolution	30 m
Peak power	90~300 W (PRF 2,000~2,500 Hz, Duty 6% : average 5.6 W)
Bandwidth	Chirp pulse : 10 MHz
Platform size	約 1 m x 1 m x 1 m
Antenna size	Elevation 1.0 m x Azimuth 4.0 m x 2 panels for RHCP and LHCP

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、地球表層による楕円偏波 (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の生成と解析をする予定である。ここでは、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した結果を、従来の直線偏波の解析結果と比較検討する予定である。この手法を楕円偏波による樹幹の高さ、標高データ (DEM) などの抽出に応用する予定である。

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.-2. CP-SAR ground test of Josaphat Laboratory Unmanned Aerial Vehicle (JX-1) at Fujikawa Airport on 29 August 2013.

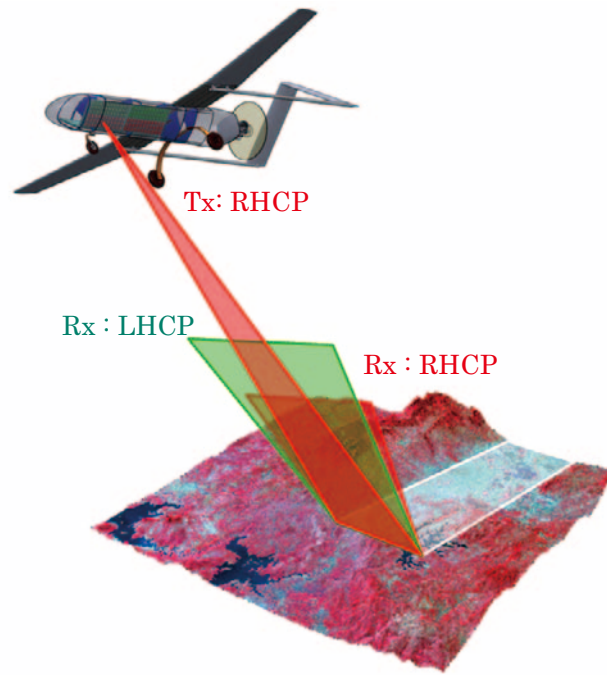


図 1.1.1.-3. Principle of CP-SAR sensor onboard UAV

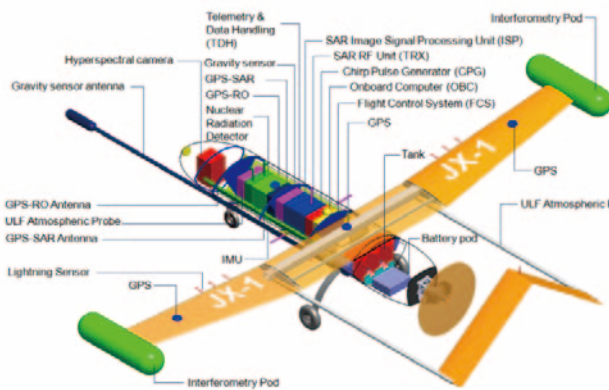


図 1.1.1.-4. CP-SAR UAV Sub-system and assembling of JX-1



図 1.1.1.-5. CP-SAR 搭載用 UAV JX-2

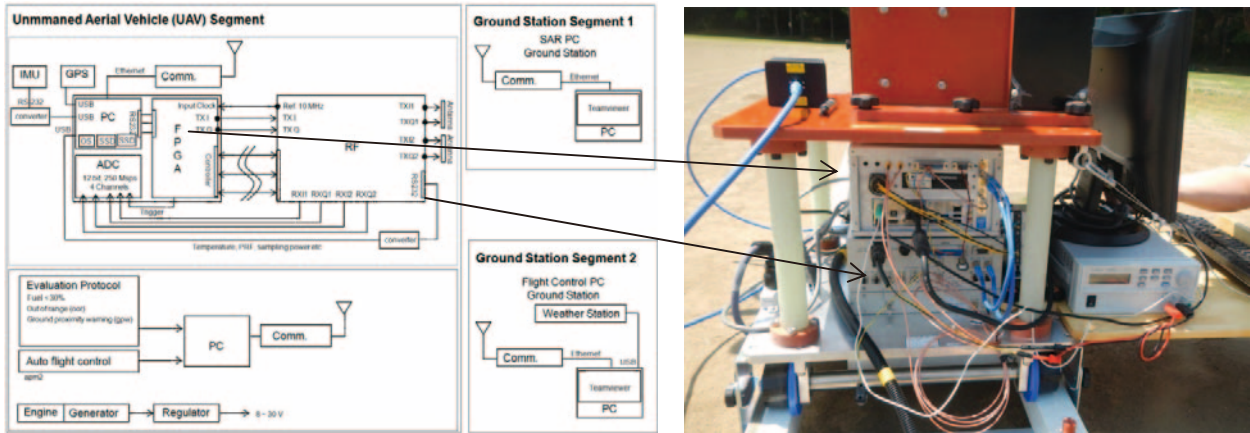


図 1.1.1-6. Block diagram of CP-SAR UAV system

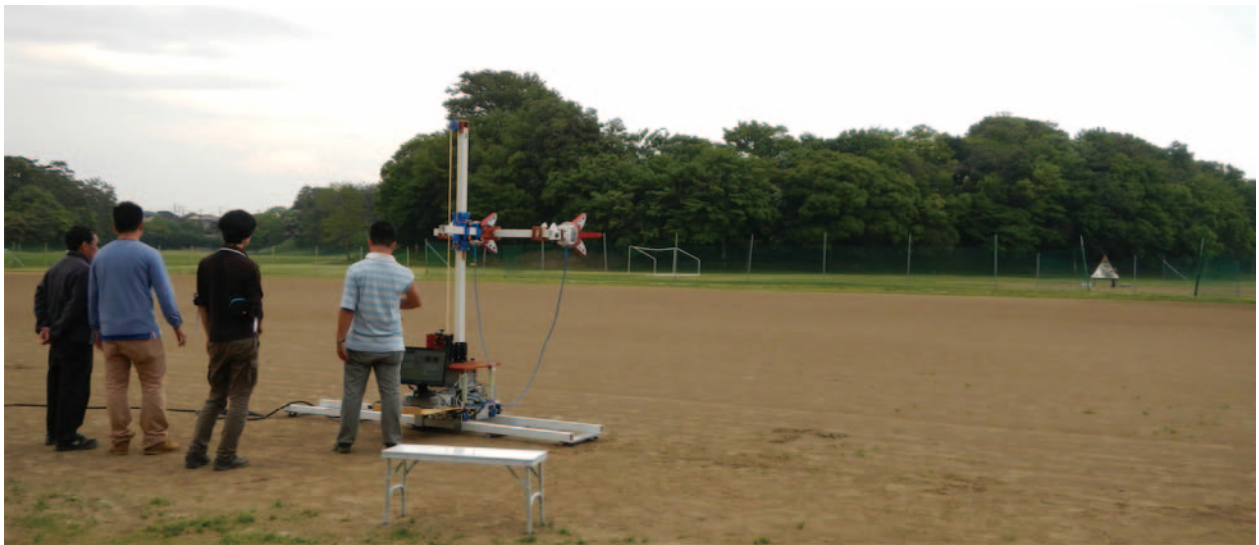


図 1.1.1-7. 本研究室の CP-SAR センサのポイントターゲット（コーナリフレクター）による地上実証実験の様子

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応用する予定である。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応用する予定である。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。

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いる。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 なども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。

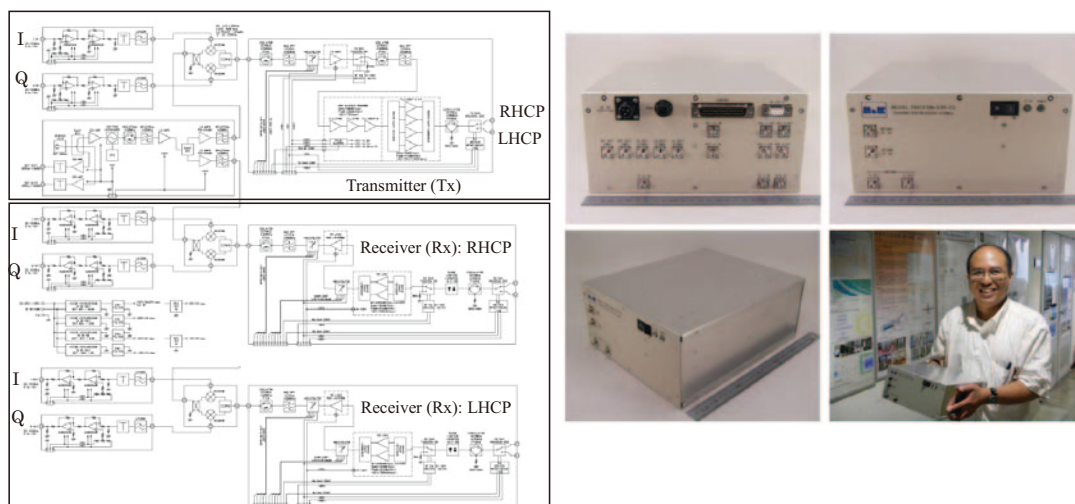


図 1.1.1-8. Block diagram of CP-SAR system and real size of RF system



図 1.1.1-9. Chirp Pulse Generator and Image Processing module

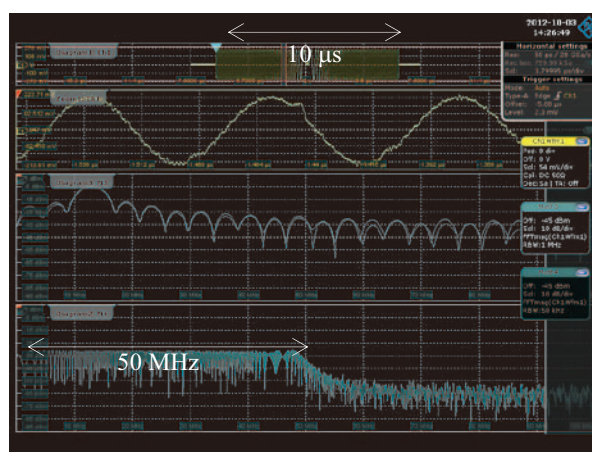


図 1.1.1-10. Chirp pulse output of our system for bandwidth 50 MHz.

図 1.1.1-6. は CP-SAR UAV のブロック図を示し、UAV セグメントと 2 つの地上局セグメントから構成されている。UAV セグメントは 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 センサは 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は 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。同図に実際のシステムを示す。

図 1.1.1-8. が表 1.1.1-2. に示す仕様のように、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、このシステムが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~150 MHz 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。チャープパルスが周波数 1,270 MHz に変調させ、この送受信システムの周波数の動作幅が 1,270 MHz \pm 150 MHz である。送信システムの利得チューニング機能が 1、2、3、8、16 または 0 ~ -31 dB に設定することができる。受信器の利得チューニング機能が 1、2、3、8、16 \times 2 または 0 ~ -62 dB である。電力増幅器 (PA) がパルス送信電力 50 W (最大)、送信期間 10 μ 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) が基本的に 1 μ s で最大 2 μ s である。アンテナ部分が図 1.1.1-10. のように、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

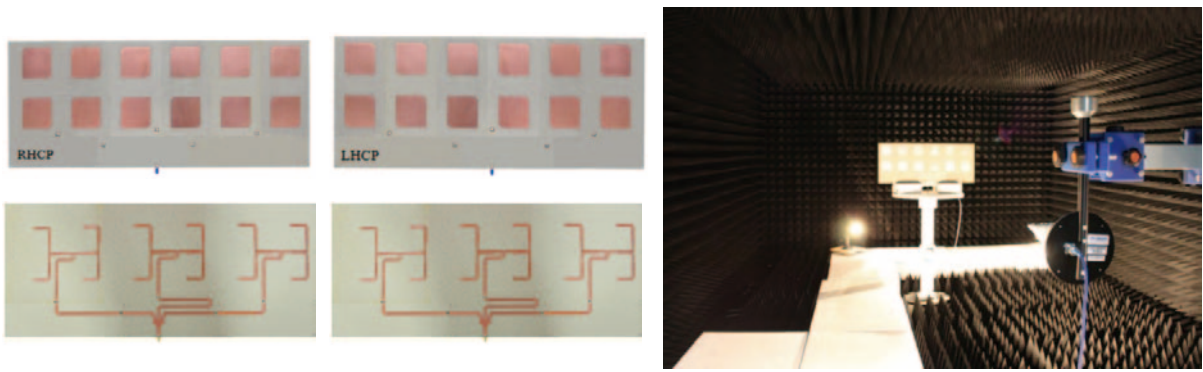


図 1.1.1.-11. Microstrip antenna for Tx and Rx of CP-SAR and measurement in our Anechoic Chamber

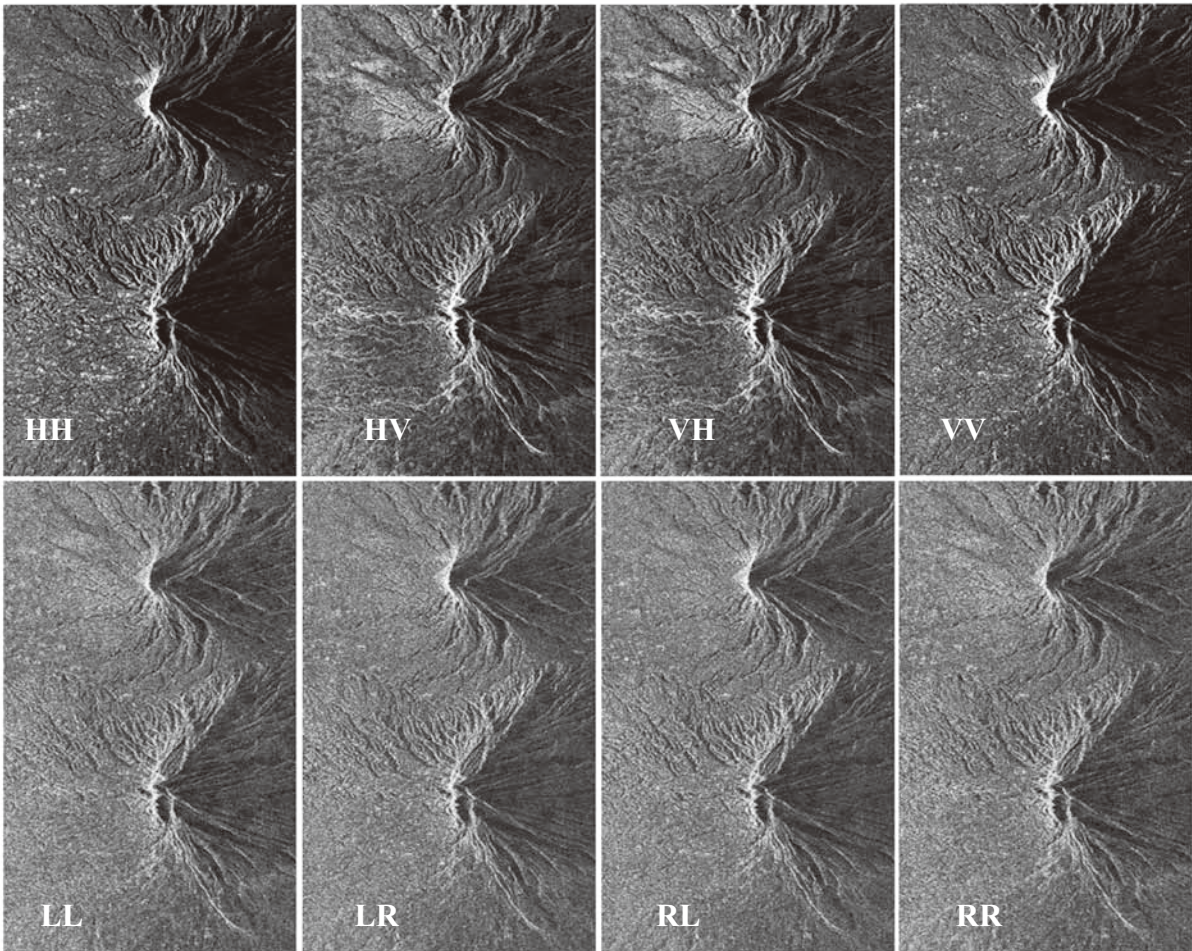


図 1.1.1.-12. Images of linear and circular polarization

1.1.1.-9. に示すように、送受信システムまたは RF システムのサイズが W250 mm、H100 mm、D300 mm から構成されている。

表 1.1.1.-2. CP-SAR UAV SPECIFICATION

Parameter	Value
Altitude	1 to 4 km
Frequency range	1,270 MHz \pm (25 MHz) (Max 150 MHz)
Baseband range	DC to 150 MHz
Pulse transmission output power	50 W, Pulse width 10 μ s (max), Duty circle 2 % (max)
Polarization	TX & RX : RHCP + LHCP
Transmission system gain	+ 47 dB (min)
Receiver system gain	+ 60 dB (min)
Gain flatness	\pm 1.5 dB (max)
Receiver noise ratio	3.5 dB (max) @ + 25oC
Modulator	(RX and TX) QPSK
Output higher harmonic wave	-30 dBc (max)
Output spurious	-60 dBc (max)
Transmission system gain tuning function	1/2/3/8/16 (0 to - 31 dB)
Receiver system gain tuning function	1/2/3/8/16 x 2 (0 to - 62 dB)
Impedance	50 Ω
Transmission system output VSWR	1.5 : 1 (typ.)
Receiver system input VSWR	1.5 : 1 (typ.)
Transmission system antenna switching speed	1 μ s (typ.) / 2 μ s (max)
Receiver system antenna switching speed	1 μ s (typ.) / 2 μ s (max)
Transmission system On/Off speed	100 ns (max)
Receiver system On/Off speed	100 ns (max)
Power voltage	DC + 28 V (DC + 25 to + 35 V switchable)
Current consumption	5A (max)
Temperature	+ 0°C to 45°C
Saving temperature	-20°C to 80°C
RF connector	SMA-Female
Power connector	N/MS3102A10SL-3P
Control connector	D-Sub-37P
Weight	10 kg (max)
Size	W250 mm x H100 mm x D300 mm
Pulse Length	4.33 up to 47.63 μ s
Off Nadir	20° to 60°
Resolution	1m to 3 m
Swath Width	1 km
Antenna Size	0.75 x 0.2 m (4 panels)
Axial Ratio	\leq 3 dB
Antenna Gain	14.32 dBic

図 1.1.1.-9. が 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. がバンド幅 50 MHz で、中心周波数 1.27 GHz のチャープパルス発生器の出力パルスを示す。

CP-SAR 搭載無人航空機 (CP-SAR UAV) システム

本研究の UAV SAR システムがペーロード 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 の飛行可能な高度が 1,000 m~4,000 m である。表 1.1.1.-2. の CP-SAR 搭載 UAV の仕様を示すように、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あるので、最大電力が 50 W である。送受信アンテナが 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. 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。ただし、L と R が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。

1.1.3.1. 長期間継続的な DInSAR による東京都・ジャカルタ市における地表層変化のモニタリング (ヨサファット研究室)

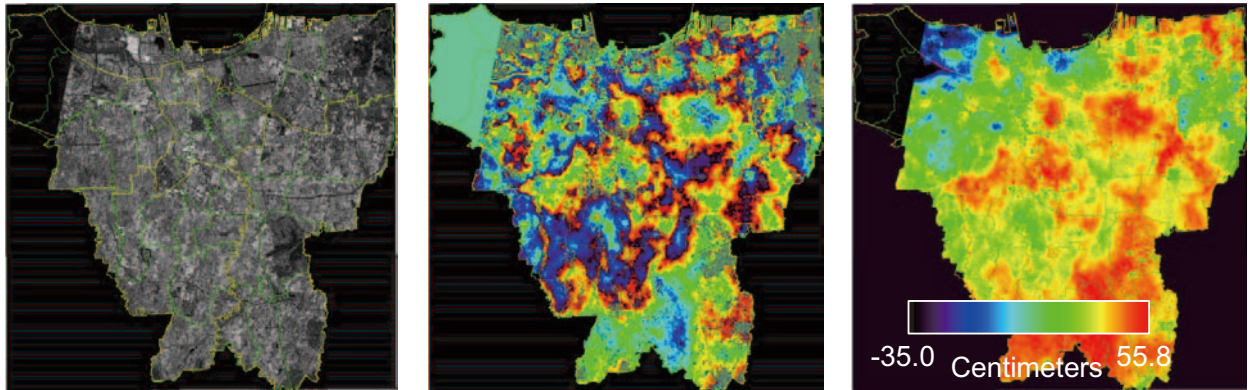
近年、東京都をはじめ、ジャカルタ市、クアラランプール市などにおける地表面の沈下、地下水面の深化など、様々な都市問題が発生した。図 1.1.2.-1. はジャカルタ市内における地盤沈下による被害の様子を示す。この地盤沈下の原因として、都市開発、地下水の大量使用などである。この現象が長期間にわたって微少変化しているので、本研究では長期間継続的な差分干渉合成開口レーダ (Differential Interferometric SAR-DInSAR) 手法と永続散乱体合成開口レーダ干渉法 (Persistent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture 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の把握を高精度かつ広域観測を行った。

今まで、本研究室では 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 になるので、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)

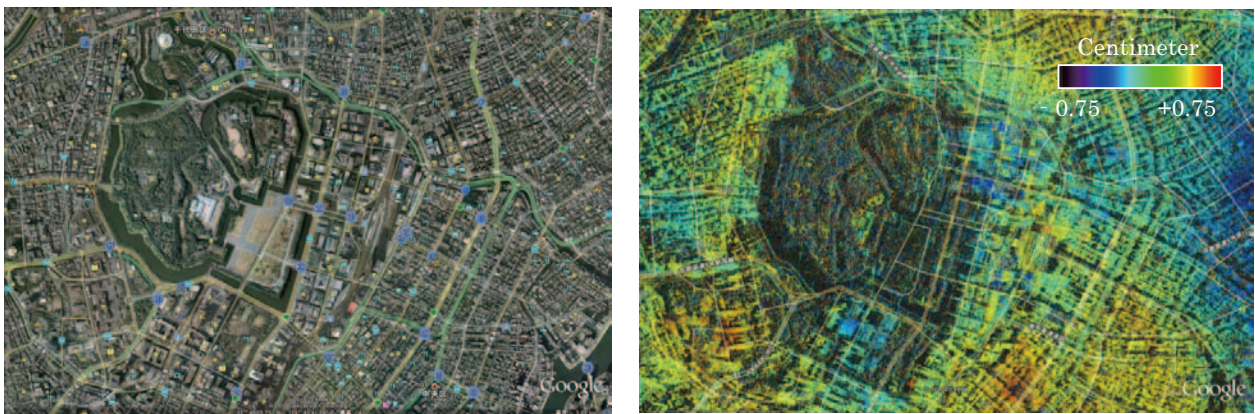


図 1.1.2.-3. 左：光学センサ (東京)。右：TerraSAR-X 画像の解析結果 (東京都、m20100621、s20100815)

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と期待する。

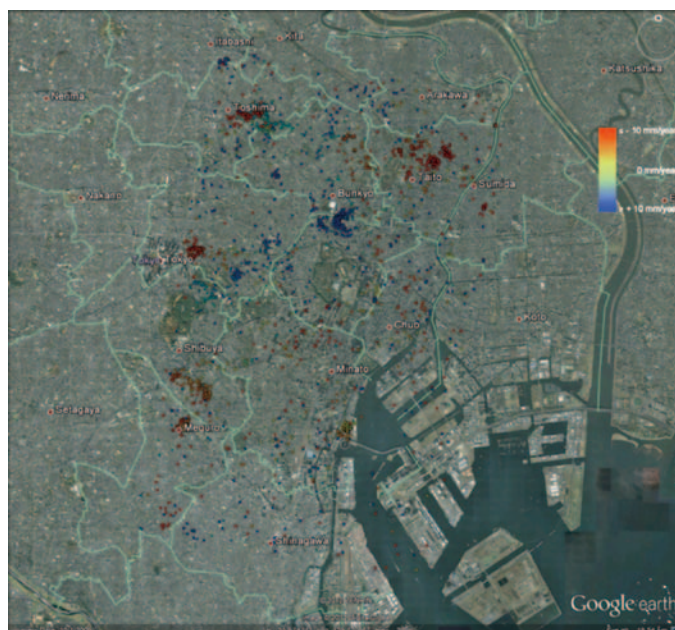


図 1.1.2.-4. TerraSAR-X による東京都内における地盤沈下の観測
(TerraSAR-X の生データが PASCO 社の提供)

この研究では JERS-1 SAR と ALOS PALSAR データを使用して、東京都内、ジャカルタ市内、バン
ドン市内における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.-8.
のような住宅分布、交通網、河川網、土地所有図などと一緒に解析することによって詳細な被害図を抽出
することができる。図 1.1.2.-9. が ALOS-PALSAR データ (2007 年～2011 年) を活用して、
PS-InSAR 手法で解析したジャカルタ市内の地殻変動 (地盤沈下と隆起) を観測した。この研究成果より
ジャカルタ市内における大洪水などの都市政策に活用できると期待する。

地盤沈下の原因を把握するために、対象地域における地質情報、統計情報、GPS 情報等の他に、本研
究では当研究室の旧版型地図または外邦図 (1900 年代測量、1940 年代発行) を使用して、環境変化を
把握する予定である。これにより、初の試みとして、対象地域における 100 年間の環境変化を把握し、
将来同様な手法をアジアの様々な大都会の環境変化の観測に応用した。



図 1.1.2.-5. ジャカルタ市内の住宅分布図



図 1.1.2.-6. ジャカルタ市内の交通網



図 1.1.2.-7. ジャカルタ市内の河川網

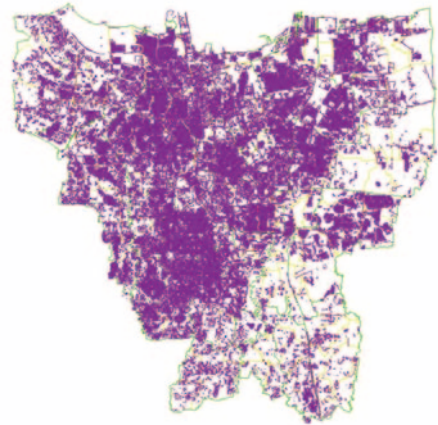


図 1.1.2.-8. ジャカルタ市内の土地所有図

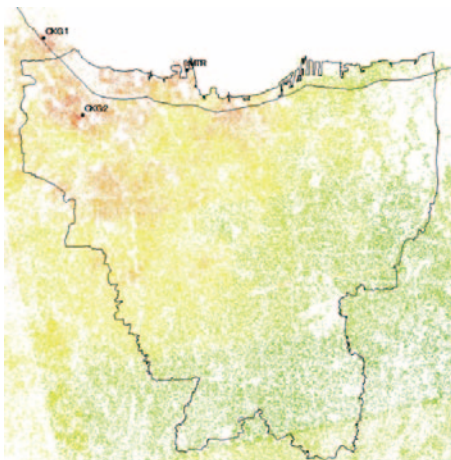


図 1.1.2.-9. ALOS-PALSAR の PS-InSAR による
ジャカルタ市内の地盤沈下

本研究を行うことに当たって、下記の効果または波及効果を期待する。

- ① 本研究の成果は DInSAR と PS-InSAR で ALOS-PALSAR と TerraSAR-X 衛星群のデータを処理することにより、近い将来詳細かつ高精度の被害地図を提供することができる。この研究結果は、防災対策、環境政策、都市計画などに応用でき、より安心で安全な都市づくりに貢献できると期待する。
- ② TerraSAR-X 衛星群が従来の合成開口レーダ衛星と比較して、高周波を使用しているため電離層のファラデー回転の影響が少ない。また、PSInSAR 手法によって、地上の現象をより正確に観測できるので、地表層変化である地盤沈下をはじめ、土砂崩れなどの地殻変動を正確に把握できると期待する。
- ③ TerraSAR-X 衛星群が ALOS PALSAR などのデータと一緒に解析することによって、より時間分解能を向上できるので、より正確な長期間継続的 DInSAR と PSInSAR を実現することができる。また、今度打ち上げる ALOS-2 PALSAR-2 にも活用できると期待する。
- ④ 本研究では、DInSAR と PSInSAR によって対象地域における体積変化を把握することにより、地盤沈下のより詳細な被害情報を抽出できると期待する。

1.1.3. 電離層観測用小型衛星 GAIA-I (ヨサファット研究室)

2013年度より、本研究室が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、この小型衛星が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。今年度にCDS用のオンボードコンピュータ(OBC)が完成して、来年度に地上実証実験をする予定である。現在、本研究室の小型衛星(GAIAシリーズ)を管制するために、Sバンドのコマンド・テレメトリとXバンドのデータダウンリング用の地上局も設置する予定である(図1.1.3.-3.)。

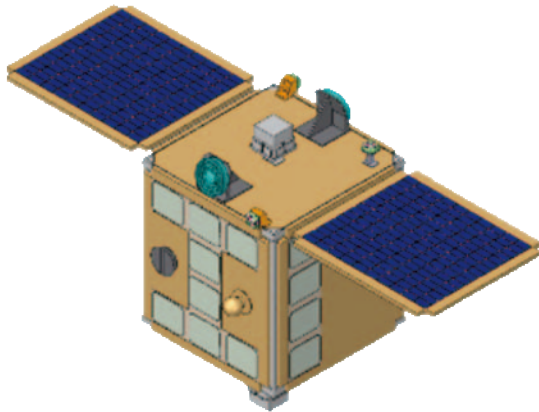


図 1.1.3.-1. 電離層観測用小型衛星 GAIA-I

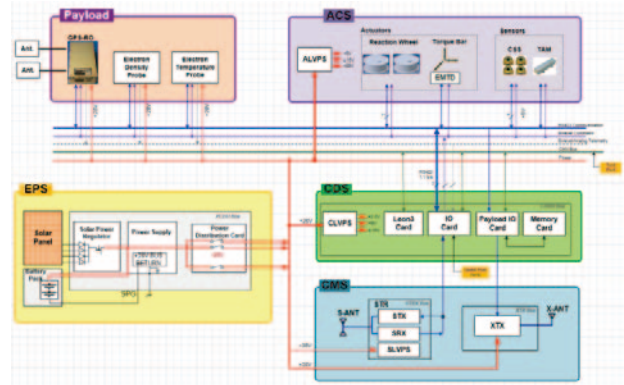


図 1.1.3.-2. GAIA-I のブロックダイアグラム

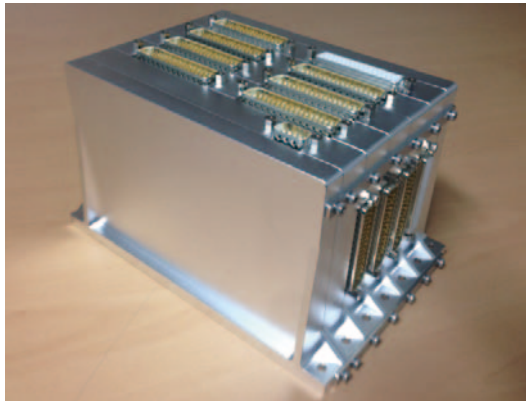


図 1.1.3.-3. FPGA による GAIA-I 用のオンボードコンピュータ (OBC)

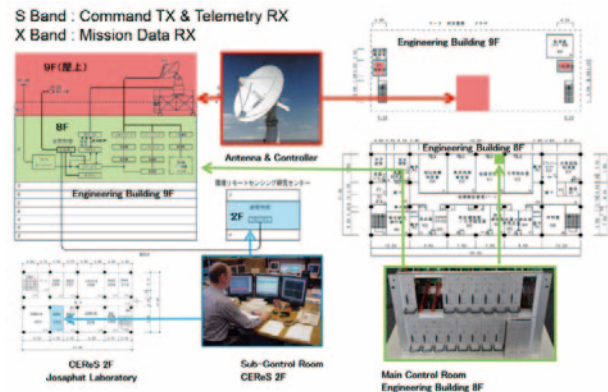


図 1.1.3.-4. 本センターの地上局(2014年度に完成予定)

1.1.4. 簡易型地上レーザー計測による森林構造計測 (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扫描仪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。これまで、カラマツ林を中心とする針葉樹林における樹冠構造とBRDFについては非常によい結果が得られているが、針広混交林および広葉樹林におけるモデル化にはデータが不足しており、これらのデータを積極的に収集していく必要がある。一方、閉鎖樹冠の森林であっても比較的林床の明るい樹林や立木密度がそれほど高くない開放樹冠をもつ樹林については、BRDFに与える林

床植生の影響が無視できない。このような樹林における BRDF モデルの構築およびモデル検証に不可欠な林床植生を含めた森林構造の実測データ収集には、上空からのレーザー計測に加えて地上からの計測も実施する必要がある。本年度は、これらの目的に合致する樹林のレーザー計測手法を試みた。

(2) ミズナラ林における樹冠形状計測

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においてミズナラ林における樹冠形状計測を行った。

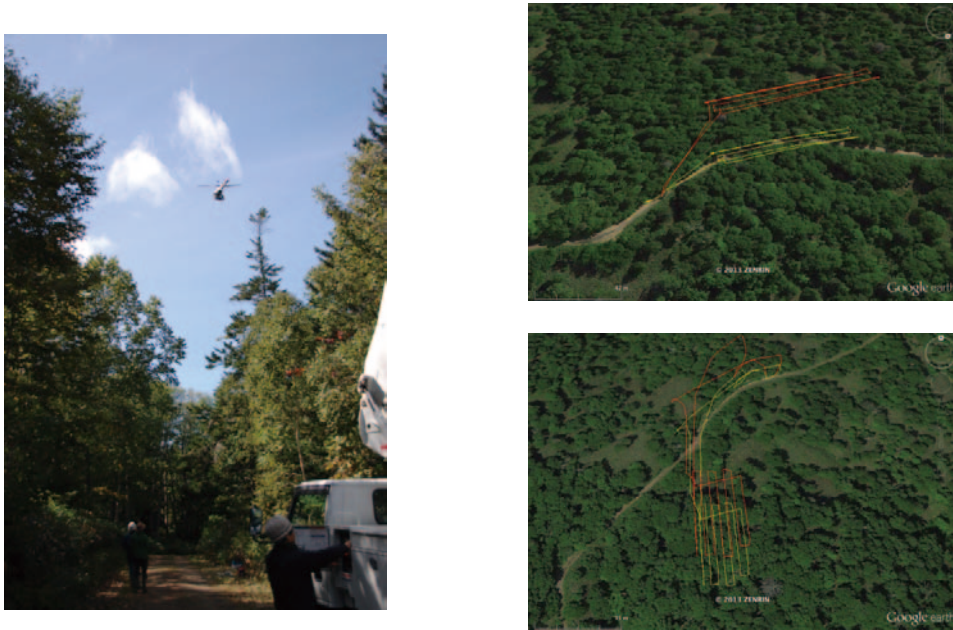


図 1.1.4-1. 観測風景（左）と観測サイトの概観およびヘリ飛行軌跡

ミズナラの優先する林班は3箇所あり、そのうちの2箇所計測を行うことができた。図 1.1.4-1. (左) は観測風景、右は観測エリアと無人ヘリの飛行経路である。図 1.1.4-1. 右下段の観測サイトにおける計測結果のうち、点群データおよびその点群データより作成した DSM の陰影図を図 1.1.4-2. に示す。

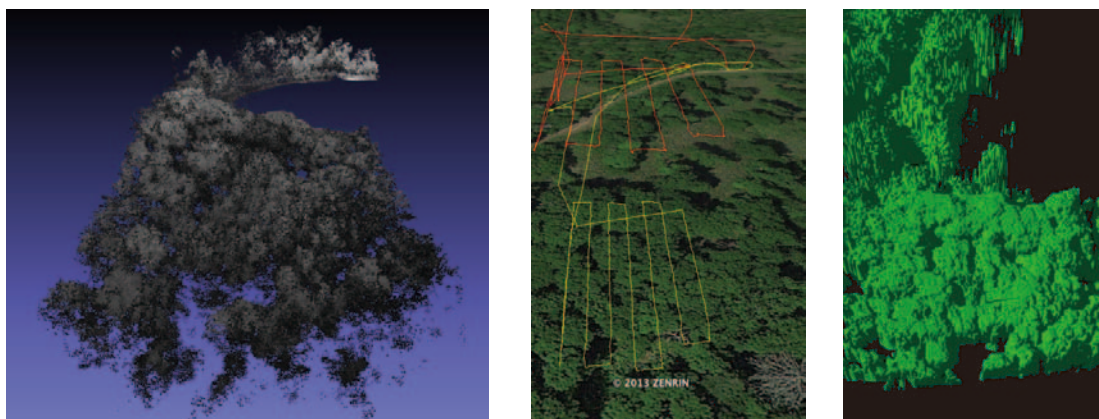


図 1.1.4-2. レーザー計測結果。(左) 点群データ (中) 飛行軌跡 (右) DSM 陰影図

図 1.1.4-3. に示したのは図 1.1.4-2. で示した計測データのプロフィールである。樹冠密度の小さな箇所では林床までレーザーが到達しているが、全体としては林内の構造を詳細に取得できるほど林内に透過しているわけではないことが分かる。ただし、上方からのスキャンでどの程度レーザーが樹冠内に浸透す

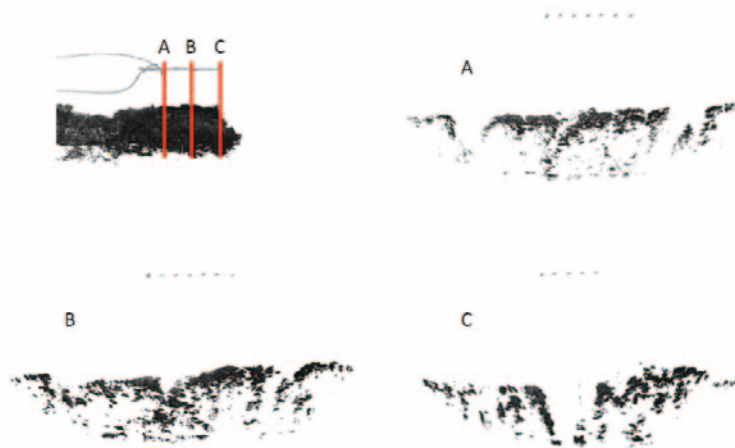


図 1.1.4-3. レーザー計測データ（点群データ）のプロファイル

るかについての情報を有しているため、将来の衛星 LIDAR 信号処理アルゴリズム開発および検証には有益な情報といえる。

(3) 落葉期の計測による針広分離

これまで開発してきた BRDF モデルの針広混交林における適用可能性については、混交林における BRDF の実測はもとより、針葉樹及び広葉樹の混交樹冠モデルの構築が必要となる。その基礎データとなる無人ヘリによる樹冠形状計測において、取得された点群データからの針葉樹および広葉樹の単木レベルでの分離を可能とするアルゴリズム開発が必要となる。カラマツなどの単一樹種（針葉樹）の森林の計測データでは比較的容易に単木分離が可能であるが、樹冠境界が不明瞭な広葉樹林での分離を点群データのみを用いて行うことはきわめて難しい。しかし、常緑針葉樹と落葉広葉樹の混交林における分離のみに注目すると、落葉期の計測によってそれが容易に可能である。図 1.1.4-4. に示したのは千葉県東金市の混交林において、落葉期に上空から取得した点群データである。点群の濃淡はスキャナが取得した反射強度を示している。ここで濃い色で示された点群は落葉した落葉広葉樹の枝を示している。これは上空から同時に撮影した写真と比較すれば容易に確認できる。したがって、同一対象に対して着葉期と落葉期にける観測を実施すれば針葉樹と広葉樹を分離した樹冠モデルを作成するための基礎情報を収集することが可能である。

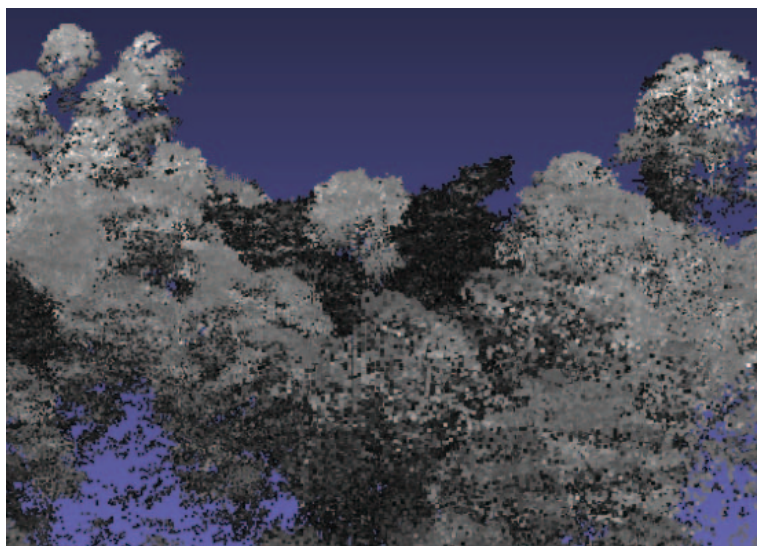


図 1.1.4-4. 混交林におけるレーザー計測データ（黒い部分が落葉広葉樹）

(4) 林床からのレーザー計測

(2) においても述べたように、上空からのレーザー計測では林内および林床の詳細な樹木および林床植生の形状を把握するのは困難である。このことは閉鎖樹冠ではもとより、開放樹冠であっても樹冠に覆われた部分とそうでない部分の点群では、林床植生に関して取得点群密度に大きな隔たりがあることから当然といえる。そこで、林床からのレーザー計測データと上空からのデータの両者を用いることが必要となる。地上レーザー計測による詳細な点群データ取得は、昨今盛んに行われるようになってきたが、それらに使用される機材が極めて高価であること、地上レーザースキャナ自体がもともと森林計測を目的として開発されたものではないことなどから、システムの運用も含めて森林における広域の構造データ取得手法はまだ確立されているとは言えない。

そこで、小型自立無人ヘリコプターに搭載できるような簡易型のスキャナを用いた地上レーザー計測手法を確立することには意義がある。低コスト・可搬型のシステムでユーザー数を増やし、その結果として地上計測データの数を増やすことが期待できるためである。

安価である簡易型スキャナは高性能のものにくらべて精度・計測可能距離や角度分解能等においていくつかの制限があるが、反面、センサを除くすべてを森林計測用として開発するための自由度がある。本年度までのシステム開発で、スキャナ制御および計測距離データの3次元点群変換、広範囲のデータ取得に不可欠な多点計測データの簡易合成手法の基礎的な部分が完成した。これらの部分は既存の地上計測システムでは導入時に手に入れることができるものであるが、内部の変換処理等がブラックボックスであることや、ユーザーが手にできるのが点群位置データと反射強度および色情報のみである場合が多く、膨大な量の点群データから特定の領域を取り出す処理だけでも多大な時間を要する場合がある。それとは反対に、スキャナの制御からすべて自前で作り上げたシステムでは、雲台の角度情報、スキャン角の情報など、すべて利用することが出来るため、隣接する点や、ある領域内の点群を抽出するなどの処理は容易に実現できるメリットがある。

計測例として、開発中のシステムによって取得した林床からの点群データを図 1.1.4.-5. に示す。



図 1.1.4.-5. 開発した地上レーザーシステムによるデータ取得例（4 点の計測位置からの点群を合成。色の違いは計測位置の違いを示す）

1.1.5. 小型自立無人ヘリコプターによる空間線量計測（本多嘉明、梶原康司）

(1) はじめに

東京電力（福島）第一原子力発電所事故に伴う放射性沈降物による汚染状況は、事故から3年を経過しているにもかかわらず、いまだ森林と隣接する農耕地や宅地等における森林からの放射線量の影響は把握できているとは言いがたい状況にある。

そこで本研究では、短時間で広範囲の空間線量計測手法を開発すべく、小型自律無人ヘリコプターを用いた計測システムの構築を行った。

開発したシステムを用いて福島県伊達郡川俣町の山木屋地区において、夏（8月26日から8月31日）と冬（11月16日から11月20日）の2回に分けて放射線空中計測を行った。

(2) 計測システム

小型自律無人ヘリコプターへの機材搭載の概観図を以下に示す。放射線計測および記録システムはSWR株式会社が開発したものを使用した。

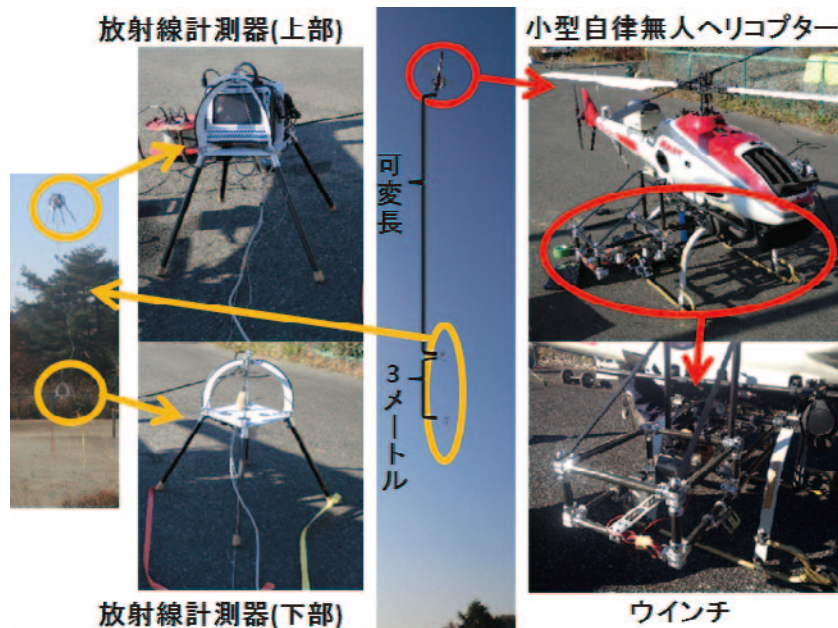


図 1.1.5.-1. 小型自律無人ヘリコプターへの機材搭載の概観図

小型自律無人ヘリコプターにウインチを取り付け、ウインチからワイヤーで放射線計測器を2個吊るして計測を行った。小型自律無人ヘリコプターと上部の放射線計測器までの距離は、プロポーションシステム（ウインチの操作に必要な送信機、受信機、サーボの総称）を用いて距離を変える事が可能であるので、離着陸時は安全のため5～8mの長さに調節し、計測時は対象と放射線計測器の距離をワイヤーで調節し計測を行った。

(3) 山木屋小学校校庭の計測

平坦な土壌における空間線量率の面的な分布および高度変化の確認を行うため、山木屋小学校において、除染済の校庭、校庭隅におかれた除染残土（防水シートで覆われている）上の面的計測および除染残土、校庭中央、校庭隅（雑草の繁茂する土手の近辺）における高度別計測を行った。図 1.1.5.-2. は山木屋小学校グラウンドの景観（左）と高度別計測を行ったときのヘリ軌跡（右）である。除染済みグラウンドの面的計測結果を図 1.1.5.-3. およびに示す。放射線計測器の地上からの高さは約1mである。図中の点は計測ポイントを示しており、色付けされた空間分布は各計測点からの距離による重み付き内挿を行った結果である。上段が夏の計測、下段が冬の計測結果を示している。凡例の数値は $\mu\text{Sv/h}$ である。空間分布図の右上の線量が高い部分は除染残土を積み上げた土嚢に近い場所であり、残土からの放射線が水平方向にも広がっていることを示している。その付近を除けば、除染されたグラウンドの線量は概ね低い値であり、季節的な変化も大きくないことがわかる。



図 1.1.5.-2. 山木屋小学校校庭の概観と高度別線量計測時の無人ヘリ軌跡

図 1.1.5.-4. に高度別空間線量率の計測結果を示す。計測点の位置は前述のように図 1.1.5.-2. (右) に示した。計測高度 30 m 近辺からは、それぞれの地点における空間線量率の高度変化はほぼ同じになるが、低高度においては異なった変動を示していることがわかる。除染残土上では当然ながら低高度の線量が高く、計測高度が上がるにつれて急激に線量が下がっている。しかしながら、除染済みグラウンドでは地上付近での低い値は高度 10 m 手前から一旦上昇していることが見て取れる。また、雑草の繁茂する校庭端の地点ではグラウンド中央よりも線量が高いことがわかる。除染済みグラウンドの線量が一旦上昇するのは、校庭周囲の植生からの放射線が計測器に検知されたためと考えられ、除染が行われても周囲に雑草や林があり、それらが高い線量率を持っている場合はその影響を考慮しなければならないことがわかる。

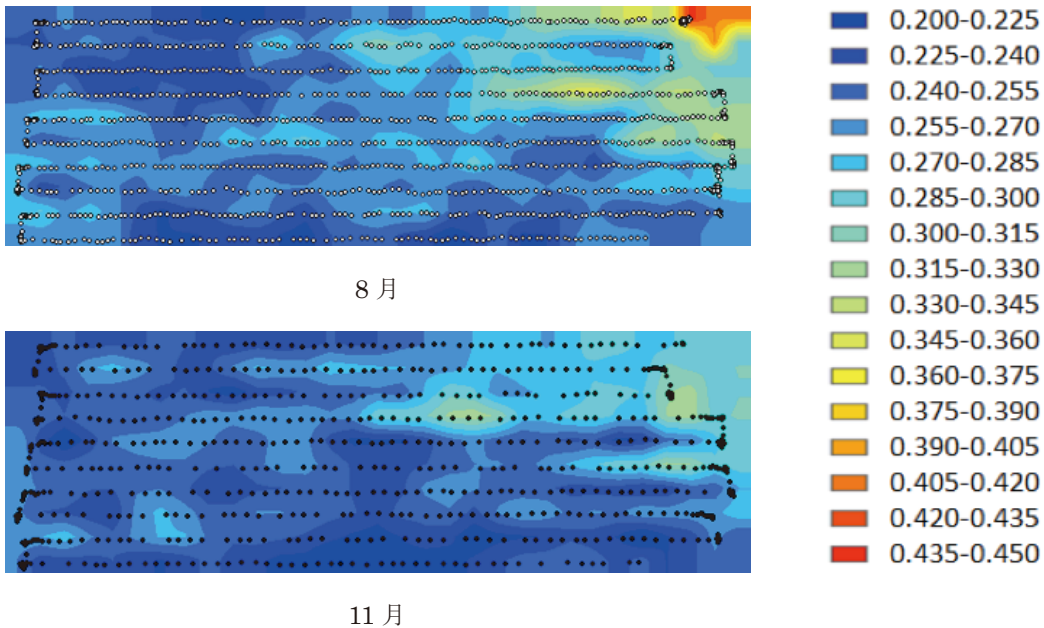


図 1.1.5.-3. 山木屋小学校校庭における計測結果 (単位: $\mu\text{Sv/h}$)

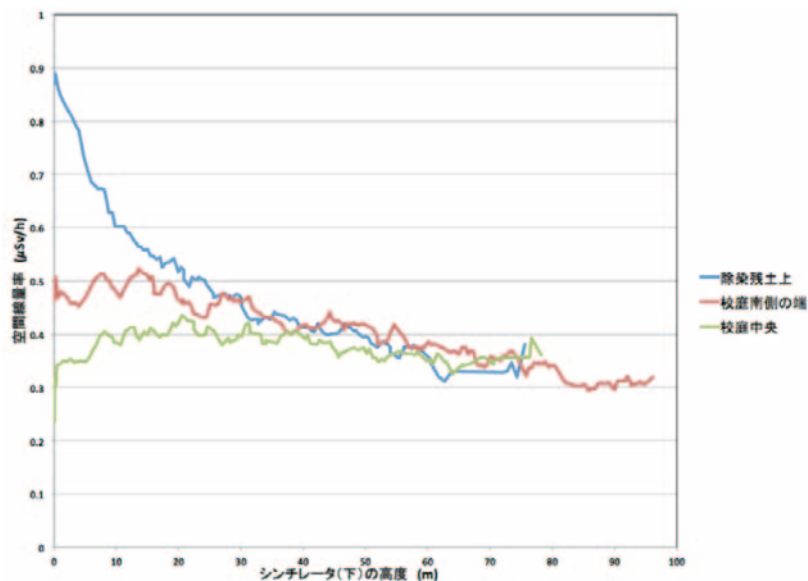


図 1.1.5.-4. 高度別線量計測結果（山木屋小学校校庭）

(4) 雑草繁茂地における高度別計測

(3) において雑草の繁茂する場所における高い線量が除染済み地域にも影響していることが示唆された。ここでは除染されていない草地における線量計測の結果について示す。計測場所は山木屋小学校北西に隣接する放棄耕作地で雑草が繁茂する地点である。

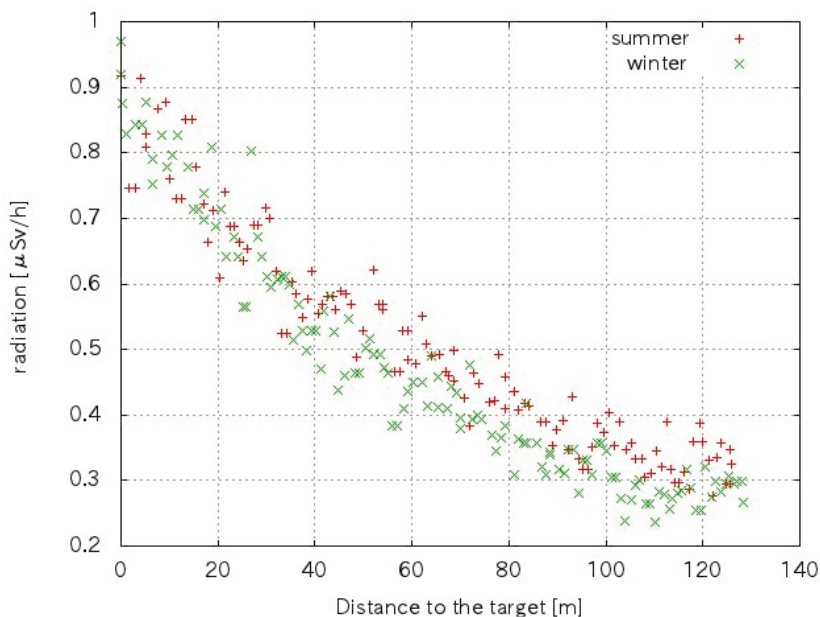


図 1.1.5.-5. 雑草繁茂地における高度別線量計測結果

図 1.1.5.-5. はこの地点における高度別空間線量率計測結果である。赤の+が夏の計測、緑の×が冬の計測の結果を示す。上空にいくにしたがって冬場の線量が夏場に比べて若干低下しているが、地表付近における線量は両者ともに高く、山木屋小学校グラウンドの除染残土に匹敵する線量を示している。

(5) 森林における面的計測

雑草繁茂地では除染残土に匹敵する空間線量率が計測されたが、これまで近接計測のデータがほとんど存在しない樹冠上の線量を確認するために、山木屋小学校に隣接する林において面的計測を行った。

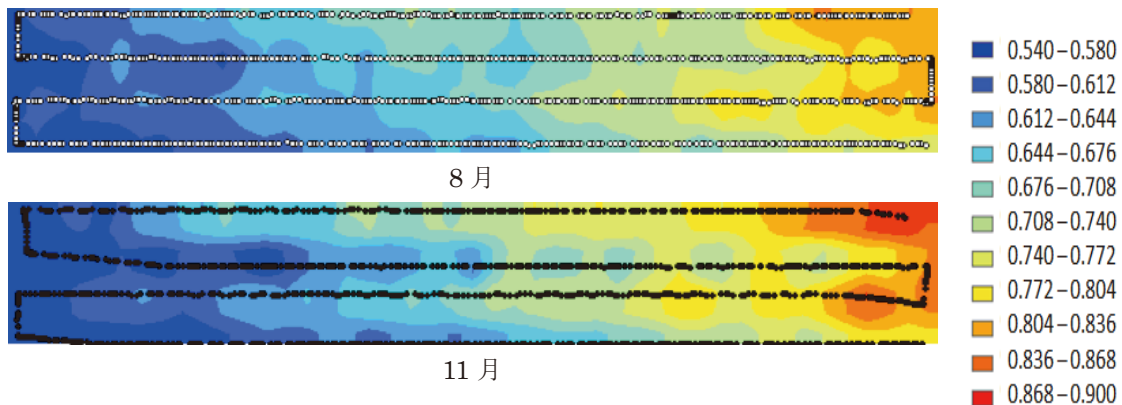


図 1.1.5-6. 校庭に隣接する林上空の線量計測結果 (単位: $\mu\text{Sv/h}$)

図 1.1.5-6. に夏と冬の計測結果を示す。空間分布図の左側に向かって線量が低下しているが、これは、この方向に向かって標高が低くなっており、そのため線量計と樹冠との距離が離れていくために見かけ上線量が低下しているように見えているため、図の右側の線量の高い部分が樹冠 3 m まで近接して計測した結果である。ここでも除染残土に匹敵する線量が計測された。観測した林は落葉樹が卓越した混交林であり、落葉樹については少なくともこれまでに 2 回の落葉を経て原発事故直後の放射性降下物の多くは地上に落下していると考えられる。それにもかかわらず樹冠に近接した計測では除染残土に匹敵する線量が計測されたことの意味は深く考察すべきである。

(6) まとめ

小型自律無人ヘリコプターの導入により、短時間で広範囲の計測が可能になっただけでなく、人が容易に立ち入れない場所（高線量率場、耕作地等）やこれまで計測の困難であった樹冠の計測も可能になった。小型自律無人ヘリコプターは飛行プログラムにより飛行経路の再現が可能であるため、今回開発した計測システムは汚染地域における空間線量の時間・空間変動の評価に有効と考えられる。

今回の計測によって、居住地域の除染が行われたとしても、周囲に除染されたいない草地や林が存在する場合、それらは相変わらず高い線量をもっており、そのような場所からの距離によっては比較的低い高度（10 m 程度）で除染地への影響を残していることが分かった。

1.1.6. 光学的リモートセンシングによる大気および地表面情報の取得と解析

1.1.6.1. 大気データ取得ライダー装置によるエアロゾルと雲情報の取得

(馬淵佑作、神谷義一、齊藤隼人、眞子直弘、入江仁士、久世宏明)

エアロゾルは地球の放射収支において重要な役割を果たす。エアロゾルの放出源としては、海塩、土壌、植生などの自然起源や人間活動にともなう燃焼由来など様々なものがある。CEReS の大気データ収集ライダー (Atmospheric Data Collection Lidar, ADCL) は、対流圏エアロゾルと雲の計測を目的とした多波長ライダーシステムで、付随する地上測定器群によって地上付近におけるエアロゾルデータを連続的に取得できる点に特色がある。本システムの特徴を示す観測例として、ここでは 2013 年に観測された高濃度の煙霧現象および多軸差分吸収分光法 (Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy, MAX-DOAS) との同時測定について紹介する。

2013年3月10日に、関東一帯を覆う高濃度の塵煙霧現象が発生した。このときに CEReS で観測されたエアロゾル光学的特性を Fig. 1.1.6.1-1. に示す。千葉付近における 14 時頃の異常な大気状態が ADCL を構成するライダーおよび地上測器それぞれにおいて特徴的な挙動として現れている。ライダーデータの解析には通常の Fernald 法を使用し、境界値としては地上測器で得られた散乱係数および吸収係数を適用した。ライダー比の値は、一峰性の対数正規粒径分布を仮定した Mie 散乱シミュレーションと地上測器から得られるデータとを比較し、仮定した粒径分布の中心半径・幅・複素屈折率をフィッティングすることによって推定した。ただし、14:00 から 17:00 までの時間帯では後述のように粒径が異常に大きな粒子が存在しており、地上測器では前置フィルターを透過できずに全容が捉えきれない可能性が高い。Fig. 1.1.6.1-1c. は、CEReS 研究棟屋上で撮影された塵煙霧現象の画像である。3月10日の午後は、関東平野の広い範囲で寒冷前線によって風速 15 m/s を超える強風が吹き、北部では土壌の風蝕を引き起こした。千葉県では、正午前後の数時間で南風が吹いており、海塩由来の粗大エアロゾルが卓越していた。したがって、午前中から視程は悪いが、サンフォトメーターや衛星のデータは上空に雲はほとんど存在しないことを示している。一方、塵煙霧の到達後は、散乱係数の波長依存性が少なくなっており、沈降した粉塵の顕微鏡写真が示すとおり、超大型粒子が卓越しているということと一致している。また、地上設置のエーサロメーターのデータからも、吸収性エアロゾルが増加していることを理解できる。一方で、パーティクルカウンターでは粒子濃度の増加は見られておらず、原因として、超大型粒子は検出可能な最大粒径 $0.5 \mu\text{m}$ を超えているためカウントされなかったと考えられる。14 時付近のスラントパス（斜め方向観測）ライダーデータをスロープ法で解析したところ、エアロゾル消散係数は地上付近で 0.7 km^{-1} のオーダーであった。

MAX-DOAS 装置は、 3° から 90° の 6 つの仰角における太陽散乱光（波長 300-550 nm）を各仰角における測定を 5 分ごとに行い、30 分で 1 セットの観測を行う。1 セットの観測スペクトルから、 NO_2 とエアロゾルの高度分布・鉛直積算量が導出される。その際、波長 476 nm における O_4 （酸素二分子の衝突錯体）の吸収バンド強度から光の到達経路の情報を取得して、エアロゾルの消散係数を導出している。

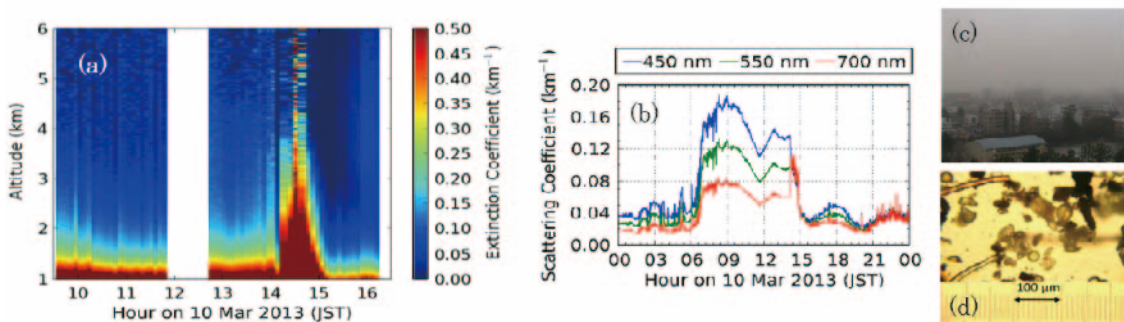


Fig. 1.1.6.1-1. ADCL data observed on 10 Mar. 2013: (a) slant-path lidar data (532 nm), (b) scattering coefficient observed with a three-wavelength nephelometer, (c) picture of dust haze scenery taken from the CEReS observatory, and (d) a microscope image of dust particles.

Fig. 1.1.6.1-2. に、2013 年 8 月における MAX-DOAS から得られたエアロゾル消散係数と地上測定装置で得られた地上エアロゾル消散係数の相関図を示す。MAX-DOAS の値は波長 476 nm におけるエアロゾル消散係数の高度 500 m での値であり、地上測定装置の値は波長 550 nm のものである。8 月は高湿度であるため、消散係数の値は比較的大きくなっている。MAX-DOAS は雲が存在すると消散係数の値が大きくなってしまう傾向があることを考慮し、Fig. 1.1.6.1-2a. では雲スクリーニングによって曇天時のデータを取り除いてある。Fig. 1.1.6.1-2b. は MAX-DOAS で得られた高度 0.5 km のエアロゾル消散係数とスラントパスライダーによって得られた高度 0.5 km の消散係数、および地上測定装置から得られた消散

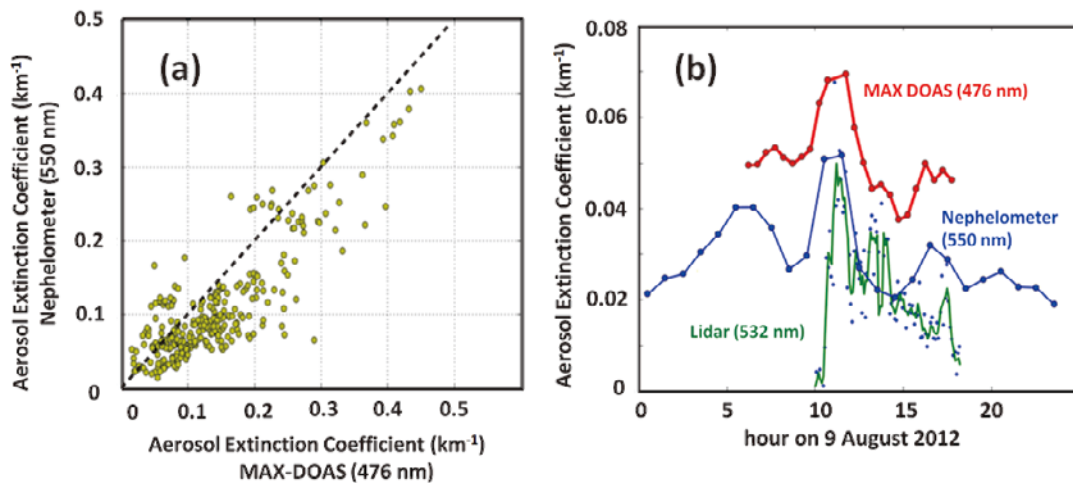


Fig. 1.1.6.1-2. Comparison of aerosol extinction coefficient observed with a ground-based nephelometer, MAX-DOAS, and a slant-path lidar instrument. (a) Scatter plot between the MAX-DOAS data (476 nm at 500 m altitude) and integrating nephelometer data (550 nm), after cloud screening of MAX-DOAS data during August 2013. (b) Comparison of the three different methods on 9 August 2012.

係数を比較したものである。ライダーと MAX-DOAS では類似した時間変動が見られているが、消散係数の値は MAX-DOAS が少し大きくなっている。この原因として、ライダー解析におけるバックグラウンドの差し引きや重なり関数の影響や、低高度の MAX-DOAS データ解析での誤差が関係していることが考えられ、今後、検討を行っていくことが必要である。

1.1.6.2. 地上測定局データを利用した千葉市における大気汚染状況の 2 次元マッピング

(遅雨蟬、Ilham Alimuddin、眞子直弘、久世宏明)

窒素酸化物や二酸化硫黄、浮遊粒子状物質 (suspended particulate matter, SPM) などは、都市大気汚染の原因となるほか、気候変動にも大きな影響を及ぼす。この研究では、千葉市域における約 20 点の常時観測地点 (一般局および自動車排ガス局) の 1 年間の大容量データと気象データを解析し、各種汚染物質の季節変化、週間変化、24 時間変動などとともに平均的分布を 2 次元マップ化した。代表的な汚染物質である NO₂ と SPM についての結果を Fig. 1.1.6.2-1. および Fig. 1.1.6.2-2. に示す。NO₂ の場合 (Fig. 1.1.6.2-3.)、自動車排気局のデータは、一般局のデータよりも高い傾向がある。分布を見ると、東京湾岸沿い、とりわけ稲毛区の濃度が最も高く、南東部に位置する緑区の濃度は最も低くなっている。NO₂ の多くが自動車由来であることから、交通量の大きな場所において濃度が高くなることと符合している。いずれの観測地点においても、全体に夏に濃度が低く、冬は濃度が高い傾向が見られており、地上測定局においては冬季の接地境界層内での高濃度汚染の影響が大きいことが推察される。SPM の場合 (Fig. 1.1.6.2-4.)、地域的な差は NO₂ の場合ほど大きくはない。季節変動としては 2 月、5 月、8 月、11 月にやや高濃度が現れているが、その他の時期と大きな違いは見られていない。風向との相関については、排出源が多く存在する西方向から風が吹き込むと汚染濃度が高くなることがわかった。長光路光学差分吸収法 (DOAS 法) で光学的に測定した平均濃度と比較すると、二酸化窒素の分布が上空に向かって減少するために DOAS 測定の値はやや低めになるが、時間的変化の傾向はよく一致する。本研究で示した手法は、今後、国内外の都市域において大気汚染による被害の軽減を目指した都市計画などに活用できるものと期待される。

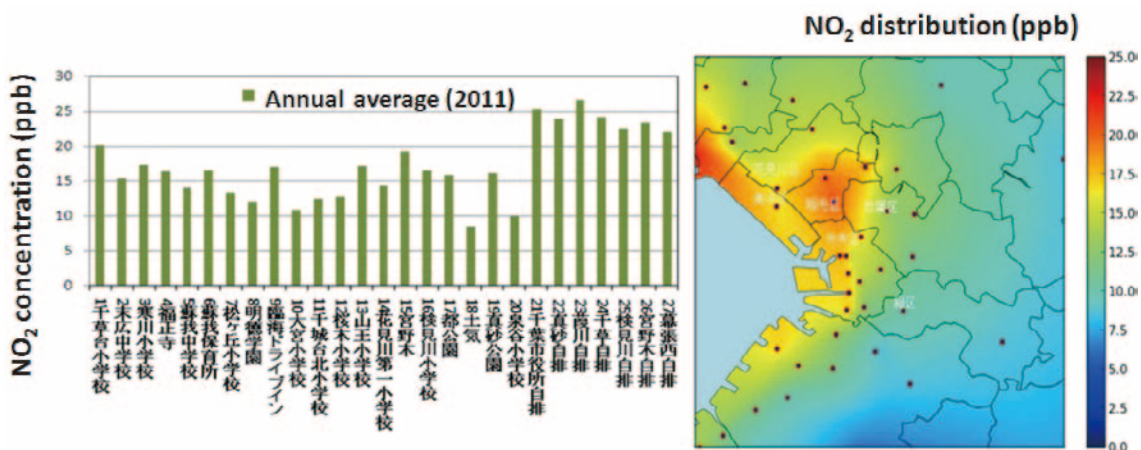


Fig. 1.1.6.2-3. Annual average of NO₂ concentration in Chiba City in 2011. (a) Comparison of the values observed at 20 general stations and 7 roadside stations. (b) Two-dimensional distribution of NO₂ concentration. Higher pollution appears along the seashore of Tokyo Bay, indicating the significant contribution of vehicle exhaust.

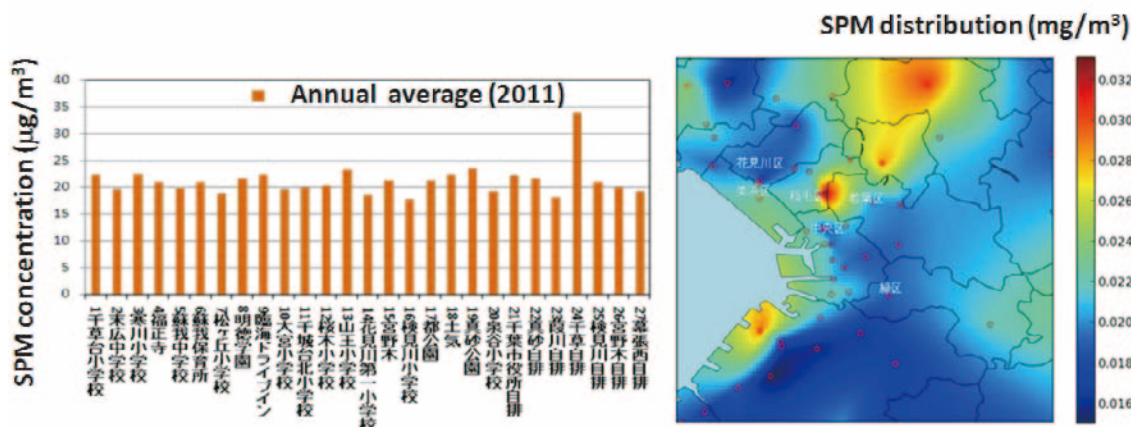


Fig. 1.1.6.2-4. Annual average of SPM concentration in Chiba City in 2011. (a) Comparison of the values observed at 20 general stations and 7 roadside stations. (b) Two-dimensional distribution of SPM concentration. Spatial distribution is rather homogenous as compared with the case of NO₂ distribution shown in Fig. 1.1.6.2-3.

1.1.7. GOSAT 熱赤外スペクトルからの二酸化炭素プロファイルの高精度導出手法の開発と初期検証解析について (齋藤尚子)

GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite; 和名いぶき) は、全球で長期間継続的に温室効果ガスを観測することを目的として開発された衛星であり、温室効果ガスの濃度を測るフーリエ分光計 TANSO-FTS (Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observations) を搭載している。TANSO-FTS は、短波長赤外波長領域 (バンド 1-3, SWIR: 0.76、1.6、2.0 µm) と熱赤外波長領域 (バンド 4, TIR: 5.5-14.3 µm) の 4 バンドから構成されている。GOSAT の TIR バンドから二酸化炭素の濃度プロファイルのリトリバル (導出) するアルゴリズムには、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 [Rodgers, 2000] を用いている [Saitoh et al., 2009]。二酸化炭素のリトリバルには主に 15 µm の二酸化炭素の吸収帯を用いており、下層の濃度の導出のために補助的に 10 µm の二酸化炭素の吸収帯も利用している。GOSAT の TIR バンドはスペクトル校正がまだ不十分であり、

他衛星や地上設置分光計のデータとの比較から、TIRの放射輝度スペクトルには $15\mu\text{m}$ 付近に特に大きなバイアスがあることがわかっている [Kataoka et al., 2013]。本研究では、TIRの放射輝度スペクトルに含まれるバイアス自体をリトリバル対象にして、バイアスを補正しながら二酸化炭素の濃度を導出するアルゴリズムを開発した。

開発したリトリバルアルゴリズムで処理されたTIRの二酸化炭素データを、GOSAT観測点近傍で得られた航空機観測の二酸化炭素データ (CONTRAIL CO₂ データ) [Matsueda et al., 2008] と比較した。まず、成田空港で離発着時に得られたデータを「二酸化炭素プロファイル」と見做し、TIRの二酸化炭素プロファイルと比較した結果を図 1.1.7.-1. に示す。両者の差は概ね1%程度に収まっていることがわかる。

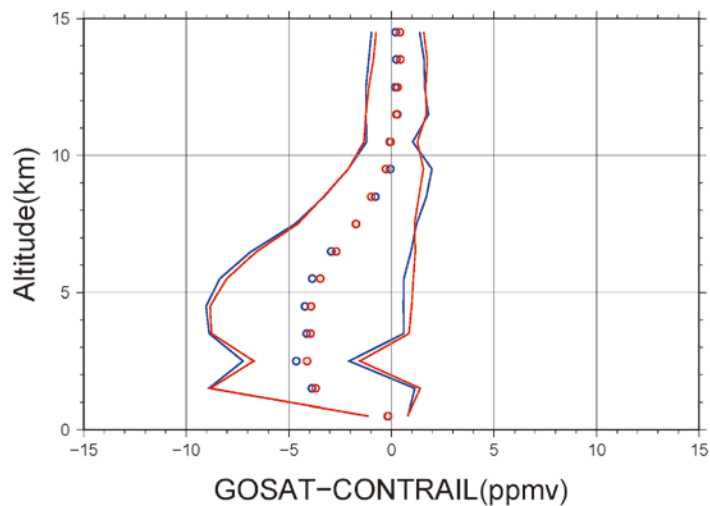


図 1.1.7.-1. 2010 年の成田空港における TIR CO₂ プロファイルと CONTRAIL CO₂ プロファイルの比較結果。CONTRAIL CO₂ データに TIR CO₂ リトリバル時のアベレージングカーネルを施してから比較を実施している。青は V141.141 スペクトル、赤は V160.160 スペクトルを使用した場合の結果。

次に、成田ーシドニー間の水平飛行時に取得された上空の二酸化炭素データを、近傍のTIRの上部対流圏の二酸化炭素データと比較した結果を図 2 に示す。熱帯付近でTIRの上空CO₂データがCONTRAILの上空CO₂データより高い値を示しているが、両半球の中緯度では両者がよい一致 (両者の差は0.5%未満) を示している。さらに、TIRの上空CO₂データの方が、赤丸で示されているリトリバルに使用した先験情報の上空CO₂データ (NIES 輸送モデルの出力値) より、現実的な二酸化炭素の濃度緯度勾配を示していることがわかった。

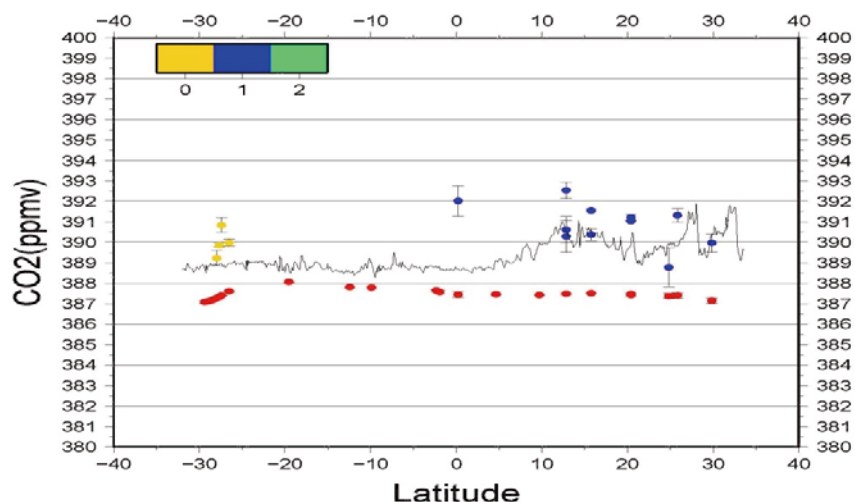


図 1.1.7-2. 2010 年の成田ーシドニー間の水平飛行時に取得された CONTRAIL の上空 CO₂ データ（黒実線）と TIR の上空 CO₂ データ（黄丸および青丸）との比較結果。赤丸はリトリーバルに使用した先験情報である。

以上の検証結果から、本研究で開発した二酸化炭素のリトリーバルアルゴリズムは十分に機能していることを確認することができた。（*なお、本研究は工学部情報画像学科の木本周平君、杉村亮君の卒業研究成果の一部である）

謝辞：CONTRAIL の二酸化炭素データは、気象研究所の松枝氏、澤氏、国立環境研究所の町田氏より提供を受けたものです。CONTRAIL プロジェクトは日本航空・日航財団・JAMCO の多大な協力のもとに実施されています。