

第6章

特色ある研究成果



世界最先端のリモートセンシング技術による 地球大気環境変動研究の推進

Advancing Research on Global Atmospheric Environmental Changes
Using State-of-the-Art Remote Sensing Technology

入江 仁士 教授
Irie Hitoshi, Professor

特色ある研究の概要

CEReSの大気リモートセンシング分野を牽引してこられた竹内名誉教授、高村名誉教授、久世名誉教授によって築き上げられたSKYNET（スカイネット）プロジェクトを、現在、入江が引き継ぎ主導している。そのうえで、令和3年度にA-SKY（エースカイ）という新たな国際観測網を立ち上げた。A-SKYは世界最大のメガシティに含まれる千葉大学大気環境観測スーパーサイトなどを有す。スカイラジオメーターと多軸差分吸収分光法（MAX-DOAS）の2種類の世界最先端の国産のリモートセンシング技術を組み合わせ、重要な多くの大気成分の濃度を導出し、そのデータを蓄積、衛星リモートセンシングも組み合わせ、ローカルだけでなくグローバルにも顕在化している様々な予測困難な現象に特に焦点を当て研究を進めている。得られた観測データは国際研究コミュニティに提供・公開しており、関連の知見も交えた議論を通じて、各種関連衛星観測プロジェクトに貢献している。こういった活動を通じて、地球大気環境変動研究を推進している。

The SKYNET project, established by CEReS professors emeriti Takeuchi, Takamura, and Kuze, who have led the field of atmospheric remote sensing, is now being inherited and spearheaded by Irie. Additionally, a new international observation network called A-SKY was launched in fiscal year 2021. This network includes the Chiba-U Atmospheric Environmental Observation Super Site, located in one of the world's largest megacities. Combining two cutting-edge remote sensing technologies – sky radiometers and Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy (MAX-DOAS) – the A-SKY project derives concentrations of key atmospheric components. The accumulated data, integrated with satellite remote sensing, focus on addressing various unpredictable phenomena emerging not only locally but also globally. The observation data collected are shared and made available to the international research community, contributing to discussions enriched with related findings and supporting various satellite observation projects. Through these activities, the project advances research into global atmospheric environmental changes.

1 はじめに

IPCC第6次評価報告書が公表されて気候変動の原因は人間活動にあることが断言されたうえで、2023年7月に国連のアントニオ・グテーレス事務総長がこれまでの地球温暖化のレベルを超え、地球が「沸騰」している状況に突入していることを「地球沸騰化」と表現したことは記憶に新しい。地球沸騰化時代においては予測困難な現象（例えば、極端気象現象）がさらに多発することが懸念される。このような状況において、リモートセンシングの役割は一層重要となっている。

2 研究のねらい・上位目標

本研究では、気候危機への緩和および適応に向けた対策に不可欠な人間の行動変容をもたらす科学的知見（予測など）をアウトプットするために、以下3つに大別した位置づけにおいて、関連の地球大気環境変動研究に取り組んでいる。

- 1) 世界最先端レベルの質・量の地球大気環境観測データの取得、QA/QC、および高度解析
- 2) 地球科学プロセス（特に大気環境変動）の解明（真理の追求）
- 3) 最適なデータサイエンス技術の提案

地球大気環境変動研究において、リモートセンシング技術は地球規模で長期にわたって均質なデータをもたらす唯一の方法であり特に重要である。本研究では、独自の世界最先端のリモートセンシング技術・データなどを基盤に、国際観測網を主導して広く国内外の研究機関と国際共同研究を進めている。衛星リモートセンシングも組み合わせ、ローカルだけでなくグローバルにも顕在化している様々な予測困難な現象（例えば、人間活動に伴う大気汚染・大気環境変動、線状降水帯などの極端気象現象、森林火災、雷活動、火山活動、ティッピングエレメントの変動）に特に焦点を当て、地球大気環境変動研究を推進している。

3 研究の実施方法

SKYNET（スカイネット）（図1）は、気候変動予測に最大の不確実性をもたらすエアロゾルや雲を観測するスカイラジオメーター、および、そのユーザーの国際観測網である。高精度な紫外域光吸収エアロゾルの観測とオンサイトキャリブレーションによる連続観測に大きな特徴を有する。このプロジェクトを入江が引き継ぎ主導している。そのうえで、令和3年度に、GOSAT衛星シリーズに関わる環境研究総合推進費プロジェクトにおいて、A-SKY（エースカイ）（図1）という新たな国際地上リモートセンシング観測網を立ち上げた。

A-SKYは世界最大のメガシティに含まれる千葉大学大気環境観測スーパーサイト（図2）、越境汚染の最前線であり線状降水帯の上流域にも位置する福江島サイト、強いバイオマスバーニングの影響を受けるタイのピマイサイト、世界最大の汚染域であるインドのハルドワニサイトを有す点に特徴がある。地上設置型の2種類の国産のリモートセンシング技術（スカイラジオメーターとMAX-DOAS）を組み合わせ、両技術ともオンサイトキャリブレーション手法を確立させた。MAX-DOAS法については、世界に先駆けて8成分（エアロゾル消散係数（357 nm、476 nm）、

NO₂、HCHO、CHOCHO、H₂O、SO₂、O₃の濃度)の高度分布を同時に導出する新しいアルゴリズム(JM2)を開発し、衛星データやモデルの多成分検証のために役立つことを明確に示した。これらの開発の結果、短寿命気候強制因子として重要なブラックカーボンや二酸化窒素、対流圏オゾンなど、多くの大気成分を導出し、そのデータを蓄積、国際研究グループに公開している。国内の気候変動観測衛星しきさい(GCOM-C)のエアロゾル・雲データの検証データをJAXAなどの研究コミュニティに提供するだけでなく、欧米の大気化学衛星(OMI/Aura、GOME-2/MetOp-A&B&C、TROPOMI/S5P等)プロジェクトにおいて先導的な役割を果たしているベルギーの王立宇宙航空研究所(BIRA-IASB)やオランダのオランダ王立気象研究所(KNMI)にも国際観測網データを準リアルタイムで提供しており、関連の知見も交えた議論を通じて、国内外の各種関連衛星観測プロジェクトに貢献している。こういった実績を踏まえ、これまでよりも一層、地球表層環境変動に関わる社会的課題の解決に役立つ研究への発展を図っている。そのために、独自の国際観測網(SKYNET、A-SKY)に関連する人のネットワークやCEReSが共同利用・共同研究拠点であることを活用して、観測(地上観測だけでなく衛星観測も含む)とモデルを相補的に利用する枠組みを構築し、1)観測によるモデル内のプロセスの検証、2)観測によるモデルで計算した結果のオーバーオールな検証、3)データ同化といったアプローチの重点化を図っている。



図1 SKYNET および A-SKY 国際観測網の概要

Fig. 1 Overview of SKYNET and A-SKY observation networks.

千葉大学大気環境観測スーパーサイト



図2 千葉大学大気環境観測スーパーサイトの概要

Fig. 2 verview of Chiba-U Atmospheric Environment Observation Supersite.

4 研究成果

A-SKY 観測網サイトにおいて、大気境界層内のエアロゾル消散係数、 NO_2 、 HCHO 、 CHOCHO 、 H_2O 、 SO_2 、 O_3 の濃度の長期連続データセット（千葉、つくば、春日サイトでは10年超）を構築した。迅速な短寿命気候強制因子（SLCFs）に関わるエミッション評価の観点でデータを解析したところ、2013年以降、オゾンの生成領域が NO_x -sensitive領域にシフトする傾向が見出された^[1]。また、機械学習等を組み合わせてCOVID-19の影響や地球沸騰化とオゾン感度レジーム解析の関連も議論した^[2]。これらの独自の地上分光計測をベースに得られた結果は、より一層の国内の大気汚染対策が必要であることを示した^[1]。そして、そういった対策の結果として都市域でもオゾン濃度の減少が見込まれ、特に NO_x の排出規制の強化に取り組む努力の継続を奨励した。

千葉大学大気環境観測スーパーサイトにおいては、南西風が卓越しているときに SO_2 が高濃度になる明瞭な傾向があり、サイト南西方向にある火力発電所や東京湾上の船舶の影響が強く示唆された（図3）。濃度変動要因をより詳細に調べるために機械学習を用いて2015年から2019年までのデータを用いて2020年以降の予測を行い、観測値との比較を行った。2020年以降は観測値が予測値を約2 ppbv下回ったことが分かり、東京湾岸の SO_2 濃度変動は2020年に開始された国際海事機関（IMO）による国際船舶燃料の硫黄含有量に関する新規制（IMO2020）を強く反映していることが分かった。

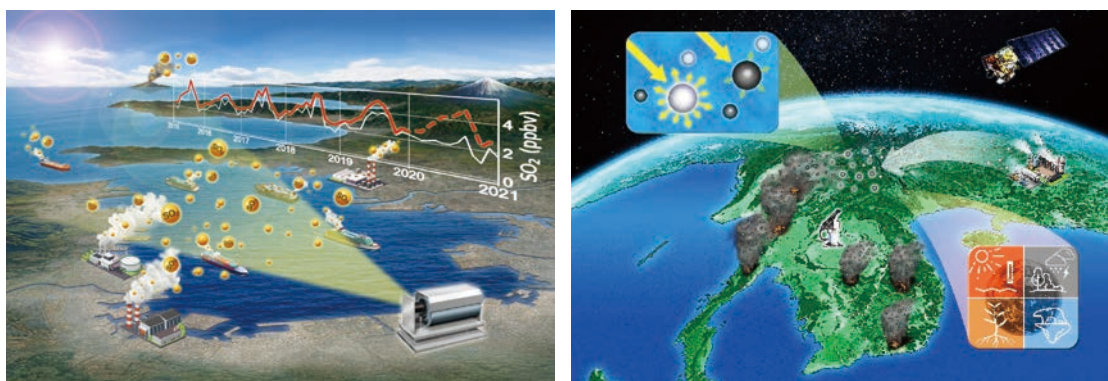


図3 千葉大学大気環境観測スーパーサイトおよびタイ・ピマイサイトにおける光吸収性エアロゾルやエアロゾル前駆気体の観測から得られた成果のイメージ。

Fig. 3 Illustrations of results obtained from observations of aerosols and their precursors at Chiba, Japan, and Phimai, Thailand.

地上観測からはまた、 CO_2 とともにBCや NO_2 を同時に観測することで、観測機器のドリフトの影響を最小に抑え、正確に CO_2 の濃度増大を見積もれることが分かった。この方法を用いることで、大都市での高精度な CO_2 濃度モニタリング、ひいては、大都市からの排出対策に貢献することを期待している。他、インドシナ半島に位置するタイ・ピマイサイトの観測からは、中国南部からの硫酸塩エアロゾルの輸送の環境影響が顕著であること、AODは減少トレンドを示しており、中国南部の二酸化硫黄エミッションの減少が起因していることが分かった（図3）^[3]。

気候変動に伴う越境大気汚染経路の長期変化を捉えるために、人為起源エアロゾルをトレーサーとみなす斬新な視点で長期のエアロゾル衛星観測データを解析した。中国からのエミッションの影響を相殺するためにAODデータを中国沿岸域のAODで規格化した新しいメトリクスを導出したところ、中国沿岸域から真東に運ばれる越境大気汚染経路の距離が短くなる長期傾向を見出した^[4]。これは気候変動の進行に伴い、越境大気汚染経路が北にわずかにシフトしたことで説明される（図4）。気候変動に伴う越境大気汚染経路の変動の検出可能性を高めるために、さらなる継続的な長期のエアロゾル衛星観測の重要性を喚起した。また、地上と衛星リモートセンシングを複合利用した雷起源窒素酸化物の検出方法を新たに開発し、今後の気候変動に伴う雷活動の活発化を物質の視点から監視する方法を提案した（図4）。さらには、大気環境に関わる気候変動観測衛星しきさい等のGCOMシリーズ、および、ひまわり8/9号の衛星プロダクト検証のための地上データ等を研究コミュニティへ提供した。また、公開前の最新のTROPOMI/Sentinel-5P、GOME-2A/MetOp-A、GOME-2B/MetOp-B、GOME-2C/MetOp-C、GEMS/GEO-KOMPSAT-2Bなどの海外の大気環境衛星データの検証のために、A-SKYおよびSKYNET国際観測網のサイト数の増加とともに、観測を継続し、データを関連の国際プロジェクトに提供した。

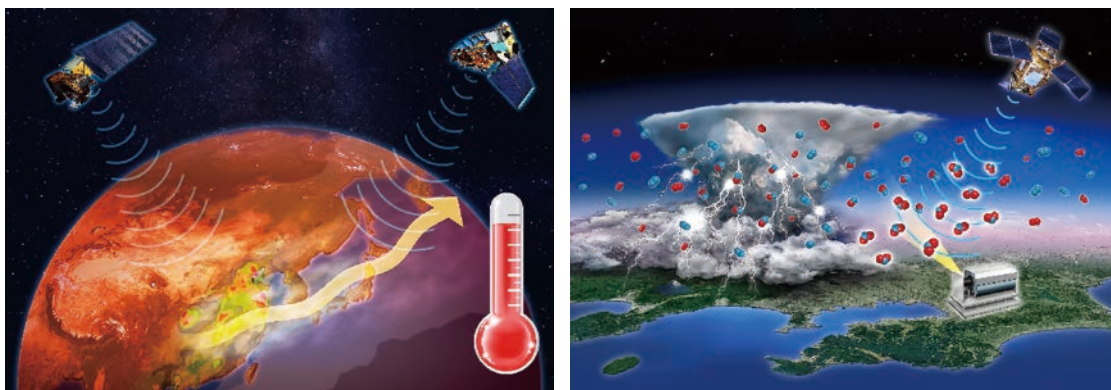


図4 (左) 気候変動に伴い越境大気汚染経路が北にわずかにシフトしたことを示すイメージ。(右) 地上と衛星リモートセンシングを複合利用した雷起源窒素酸化物の検出方法のイメージ。

Fig. 4 (Left) An illustration showing a slight northward shift in transboundary air pollution pathways due to climate change. (Right) An illustration of a detection method for lightning-generated nitrogen oxides using a combination of ground-based and satellite remote sensing.

5 研究プレゼンスの向上

MAX-DOAS法から導出された大気下層の水蒸気濃度の長期データを、大気的不安定性と水蒸気の水平不均一性の関係の観点で調査したところ、大気的不安定時に水蒸気の不均一性が増大し、日本上空に停滞前線がある場合に特に顕著であることを示唆する結果が得られている^[5]。このように、MAX-DOAS法は、従来の観測とは異なる重要な情報を提供し、データ同化技術の開発や早期警戒システムへの応用が期待される。また、世界最大のメガシティである東京メガシティの主要都市であり、東京首都圏の風下に位置する千葉大学大気環境観測スーパーサイトでは高精

度観測機器（例えば、4方向MAX-DOAS、ブラックカーボンモニターCOSMOS、LI-CORトレースガスアナライザー、PICARROガスアナライザー）が充実しており、水蒸気だけでなく他の大気中の化学物質（ NO_x 、 SO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC、 CO_2 など）の観測も行っている。これらの様々な化学物質のデータが示す濃度変動と気象場との関わりを日々注視し、それらのあいだの関係の理解が線状降水帯予測の精度向上に役立つのではないかと考えている。化学物質の濃度変動は気象場と密接に関係するので、化学物質の濃度変動を手掛かりにデータ同化の精緻化を図れるのではないかと考えるに至っている。こういった大気化学からの斬新な視点（図5）から科学的知見を獲得して成果を上げ、線状降水帯をはじめとした多くの人命に関わる極端降水現象の予測技術の大幅な向上をもたらすなど、広範にわたった学術、科学技術あるいは社会などへの波及効果が期待される。

また、令和5年度には気象庁との共同研究を開始した。気象庁は線状降水帯の予測精度向上に取り組み、文部科学省・理化学研究所の協力を得て、スーパーコンピュータ「富岳」を活用した開発を進めている。その中で、観測データの活用も重要視し、大学や研究機関との連携を強化している。今年度は、気象衛星ひまわりの晴天放射輝度データについて、高解像度化の効果や地表面の影響等をJAXA地球観測衛星や千葉大学国際地上リモートセンシング観測網等の観測データを用いた研究を行っている。令和6年度にはEarthCAREが打ち上げられ、令和7年度にはGOSAT-GW衛星の打ち上げが予定されている。こういった衛星群のプロジェクトと国際観測網を両輪として、研究成果を相乗的に獲得し、研究プレゼンスを向上させていけたらと考えている。



図5 大気化学という新しい切り口から線状降水帯予測精度向上へ新展開をもたらすイメージ。

Fig. 5 An illustration bringing a new perspective on improving the prediction of extreme weather phenomena, such as linear precipitation zones, through the novel perspective of atmospheric chemistry.

6 引用文献

- [1] Irie, H., D. Yonekawa, A. Damiani, H. M. S. Hoque, K. Sudo, and S. Itahashi, Continuous multi-component MAX-DOAS observations for the planetary boundary layer ozone variation analysis at Chiba and Tsukuba, Japan from 2013 to 2019, *Progress in Earth and Planetary Science*, **8**, 31, <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00424-9>, 2021.
- [2] Damiani, A., H. Irie, D. A. Belikov, S. Kaizuka, H. M. S. Hoque, and R. R. Cordero, Peculiar COVID-19 effects in the Greater Tokyo Area revealed by spatiotemporal variabilities of tropospheric gases and light-absorbing aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, 12705-12726, <https://doi.org/10.5194/acp-22-12705-2022>, 2022.
- [3] Ohno T., H. Irie, M. Momoi, and A. M. da Silva, Quantitative evaluation of mixed biomass burning and anthropogenic

-
- aerosols over the Indochina peninsula using MERRA-2 reanalysis products validated by sky radiometer and MAX-DOAS observations, *Progress in Earth and Planetary*, **9**, 61, <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00520-4>, 2022.
- [4] Cai, Y., H. Irie, A. Damiani, S. Itahashi, T. Takemura, and P. Khatri, Detectability of the potential climate change effect on transboundary air pollution pathways in the downwind area of China, *Science of The Total Environment*, **939**, 173490, doi:10.1016/j.scitotenv.2024.173490, 2024.
- [5] Mizobuchi, S., H. Irie, and S. Shimizu, Long-Term Continuous Observations of Horizontal Inhomogeneity in Water Vapor Concentration in the Lower Atmosphere Using A-SKY/MAX-DOAS, *Progress in Earth and Planetary Science*, submitted, 2024.



マイクロ波リモートセンシングとその社会的な活用

— 地域と人にねざした AI 減災サスティナブル学学際ハブ拠点形成 —

Microwave RS and Its Social Applications

— Establishment of an Interdisciplinary Hub for AI Disaster Mitigation and Sustainability —

ヨサファット テトオコ スリ スマンティヨ 教授

Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Professor

特色ある研究の概要

リモートセンシング技術による災害と地球環境の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。本研究では、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。とくに、マイクロ波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をはじめ、成層圏プラットフォームシステムと航空機と無人航空機の搭載センサによる地殻変動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動を通じて、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。

As the study of disasters and the global environment progresses using remote sensing technology, the limitations of existing observation methods are often an issue. In this research project, we will proactively break new ground by developing new remote sensors and algorithms for targets that have been difficult to observe adequately. In particular, we aim to create cutting-edge remote sensing and generate new environmental information through activities such as integrating and utilizing microwave remote sensing information, acquiring global environmental information including crustal movement and vegetation information using next-generation small satellite sensors, as well as sensors mounted on stratospheric platform systems, aircraft, and unmanned aerial vehicles.

1 はじめに

合成開口レーダ（SAR）は多目的センサで、全天候型であり、昼夜を通じた観測を可能とする。従来のSARセンサは直線偏波（HH、VV、HV、VH）で、とくに低周波であるLバンドは電離層におけるファラデー回転の現象に大きく影響されている。本研究ではグローバル環境・地

殻変動の観測のために、図1に示す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。この小型衛星は質量150 kgで、全円偏波のCP-SARセンサを搭載し、左旋円偏波（LHCP）と右旋円偏波（RHCP）の送受信を行うことができる。図2に示すように、RHCPを送信して、RHCPとLHCPを同時に受信でき、また、LHCPを送信して、RHCPとLHCPを同時に受信できる。これら両方の組合せによって、全円偏波のCP-SARセンサを実現する。

2 研究のねらい・上位目標

図2に示したように、本研究では、安価、軽量、コンパクトな無人航空機^[1, 2]、航空機^[3-5]、成層圏プラットフォームシステム、小型衛星^[6, 7]搭載用のCP-SARセンサの実現を目標とする。このセンサは、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る。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できる。このセンサによって、高精度かつ低ノイズの画像を得ることが期待される。

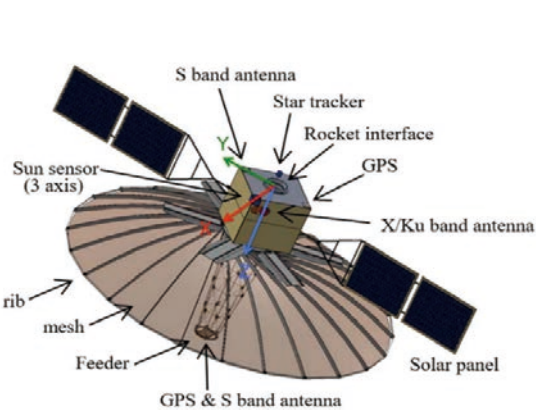


図1 CP-SAR搭載小型衛星

Fig. 1 CP-SAR onboard microsatellite.

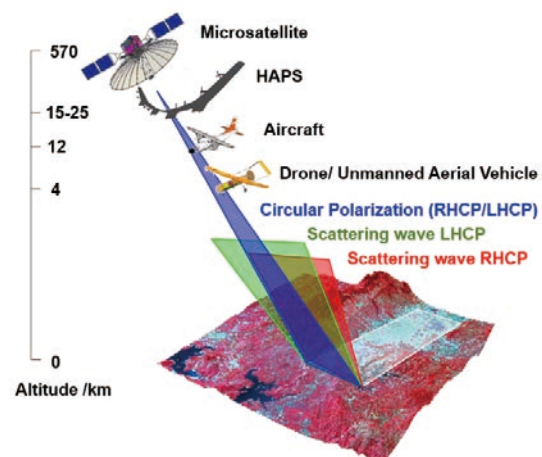


図2 CP-SARの動作メカニズム

Fig. 2 Mechanism of the CP-SAR.

さらに、本研究では、リモートセンシング、データ科学、防災学、気象学、地球物理学、災害医療学、社会科学の諸分野、現場である災害対策活動等の多分野横断連携を通じて、SAR衛星をはじめ、光学衛星等の衛星ビックデータと空間AIを中核とした、AI減災サステナブル学領域の開拓を目指す。この取組を通じて、災害予測・防災機能の強化やAI減災サステナブル学学際ハブの拠点構築を図る。本研究によって、科学的な災害予測、災害診断技術と社会科学的意思決定手法が融合し、従来にない有益で効果的な災害危機対応策や災害危機管理技術が体系的な学問として確立し、発災前の災害予測情報、災害進行時の実時間災害観測情報、発災後24時間以内の現況把握、発災後の復興支援情報を提供するプラットフォームの実現と災害救急医療への社会実証、デジタルツイン災害対応科学の創生による災害レジリエントな都市、街づくりの実現が期待される。

3 研究の実施方法

図3に無人航空機と航空機搭載用のCP-SARのシステムを示す。このシステムは飛行制御システム、計算機、姿勢制御（IMUとGPS）、送受信モジュール、DA・AD変換モジュール、電力・制御ユニットなどから構成されている。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4は円偏波のアンテナから構成されたCP-SARセンサのポイントターゲットの実験の様子である。図5に独自に開発したSAR用のアンテナと、これをCN235航空機に搭載した様子を示す。

2018年3月2日～18日にインドネシア・マカサル市内にて、CN235航空機に搭載した、CバンドCP-SARのフル偏波の飛行実証実験を行った。図6にCバンドCP-SARのフル偏波画像を示す。この飛行実験によって、当センターで開発したCP-SARが設計通りに運用できることが確認できた。

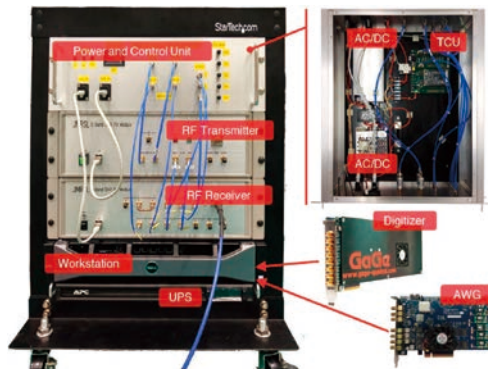


図3 CバンドCP-SARのシステム
Fig. 3 C band CP-SAR system.



図4 CP-SARセンサのポイントターゲットテスト
Fig. 4 Point target test of CP-SAR sensor.

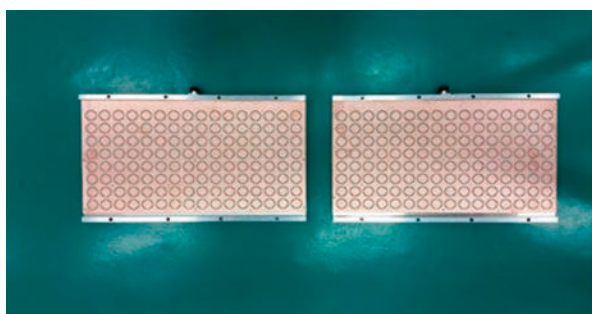


図5 CP-SARの送受信用のマイクロストリップアンテナとCN235航空機への搭載
Fig. 5 Microstrip array antenna for TX-RX of CP-SAR and installation on CN235 aircraft.

4 研究の成果

平成30年3月にCN235航空機に搭載したCバンド円偏波合成開口レーダ（CP-SAR）の飛行実証実験が成功し、生データを解析して、世界初のCP-SAR画像がフル偏波（LL、RL、LR、RR）で生成でき、その成果が文献^[3-5]に掲載された。2019年度に、このフル偏波による軸比をはじめ、楕円率などの新たな画像の生成にも成功し、土地被覆変化の観測に活用できた。

小型衛星搭載CP-SARセンサの金メッキメッシュアンテナの電波特性の性能評価を京都大学の電波無響室にて行い、CバンドとLバンドの周波数帯の放射パターン（利得）と軸比を確認して、シミュレーション通りの性能が達成されていることを示した^[6, 7]。また、無人航空機・航空機・小型衛星搭載用の新たなL、C、XバンドSARセンサ用の広帯域の円偏波ホーンアンテナの開発に成功した。合成開口レーダ（SAR）の画像解析と応用開発に関しては、DInSARとPS-InSARの手法による横浜市内の地盤沈下をはじめ、インドネシアの中部ボルネオ島とスマトラ島の泥炭地の観測に成功した^[8-10]。

5 共同研究・社会実証

国内研究ネットワークに関して、新潟大学と偏波合成開口レーダの理論・画像評価、京都大学および帝京大学と小型衛星搭載用のメッシュパラボラアンテナの性能評価、JAXAおよび一般財団法人リモート・センシング技術センター（RESTEC）とSAR画像の解析・応用開発とマイクロ波リモートセンシングの教育、国内民間会社と共同してSARシステム、レドーム用の新素材であるポリマテリアルの性能評価と成層圏プラットフォーム搭載検討・実証実験を行った。また、電子情報通信学会（IEICE）と連携して、マイクロ波リモートセンシング研究会を2019年11月に立ちあげ、第1回をバリ島で2019年11月に、第2回は2020年2月に千葉大学で開催した。今後、この研究会を毎年開催し、国内のマイクロ波リモートセンシングの研究活動の強化に貢献していく。



図6 CバンドCP-SARのフル偏波の画像（LL、RR、RL、LRモード）

Fig. 6 Full polarized images of C band CP-SAR (LL, RR, RL, and LR modes).

国際的な研究ネットワークに関して、英国・ケント大学およびインドネシア宇宙航空局（LAPAN）と連携して、円偏波アンテナの開発を行った。米国・パデュー大学とDInSAR・PS-InSARによる災害監視、インドネシア・インドネシア大学と飛行実証実験で取得した円偏波画像の解析と検証を行った。インドネシア・イスラムリアウ大学およびスマトラ島リアウ県と連携して、ALOS-2 PALSAR-2の画像による泥炭地の観測を行った。こうしたネットワークを強化するために、毎年電子情報通信学会（IEICE）SANE研と共催して、マイクロ波リモートセンシング研究会（SeMIREs）の国際会議を行い、研究成果の発表を行っている。2020年2月に宇宙科学研究所（ISAS JAXA）と共同して、インドネシア・ガジャマダ大学とウダヤナ大学で「冬の学校」を行い、地理学部と理学部の学生・大学院生（約400人）に宇宙分野と合成開口レーダのワークショップを1週間にわたって行った。また、当センターは国際会議IEEE APSAR 2021とAPSAR 2023をインドネシア・バリ島において主催し、また、IEICE ICSANE 2023をインドネシア・ソロにおいて開催した。IEICE ICSANE 2025は韓国・水原市で開催の予定である。

6 地域と人にねざしたAI減災サステナブル学学際ハブ拠点形成

令和元年房総半島台風（台風15号）は、関東地方に観測史上最大級の強度で上陸し、千葉県を中心に甚大な被害をもたらした。また、令和6年能登半島地震（M7.6）では、地震動や地形変化による建物や道路港湾等への被害も甚大であった。両ケースとも発災後の現地の状況の情報不足が災害医療活動や迅速な災害応急対策活動を阻害した。今後、同様な巨大台風や東南海地震、首都圏直下型地震等の襲来が懸念されている。図7と図8に示すように、当センターは令和6年度から学内部局、国内外の参画機関および協力機関と密接に連携して、AI減災サステナ



図7 本プログラムの構想

Fig. 7 Concept of the program.

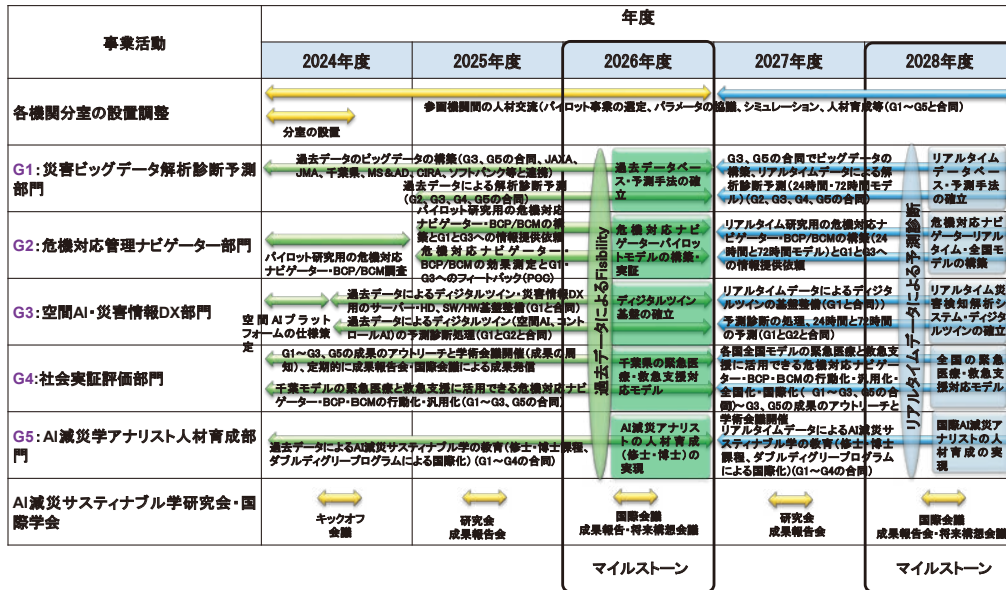


図8 本プログラムの活動内容とマイルストーン

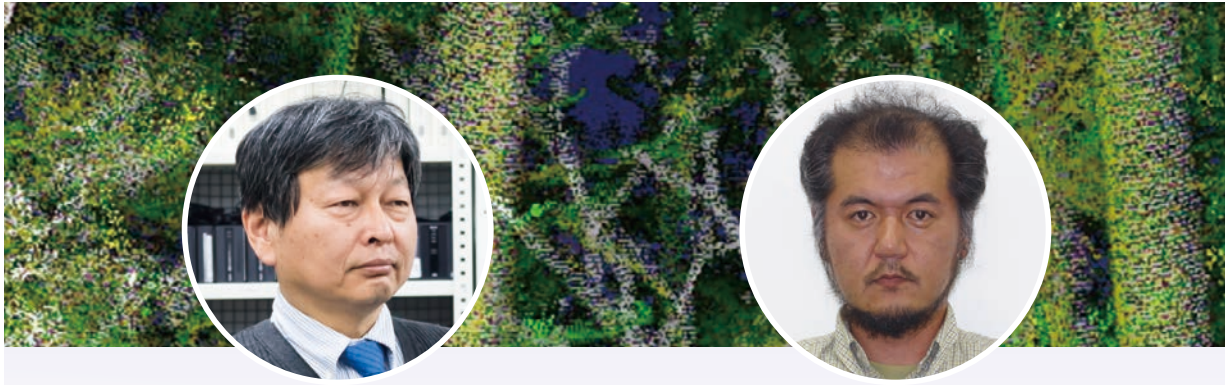
Fig. 8 Program activities and milestones.

ブル学学際ハブ拠点の構築を推進している。具体的には、千葉大学災害医療学研究所・DMAT、医学部附属病院、大学院理学研究院、大学院融合理工学府の参画機関と連携する。そして、分室を設置し、客員教員、客員研究員等の制度を用いて、名古屋工業大学高度防災工学センター、千葉県防災危機管理部、あいおいニッセイ同和損保、JAXA、気象庁（JMA）、オリエンタルコンサルタンツグローバル（OCG）、イタリア宇宙局（CIRA）、ソフトバンク等の協力機関と有機的な連携を進める。さらに、木更津工業高等専門学校、台湾・國立臺北大學、インドネシア・気象短期大学（STMKG）等の協力機関を一体化する形でAI減災サステイナブル学教育研究を実施し、高度人材育成を推進する。このプログラムは、CEReSのリモートセンシング研究と国内外の共同利用機能を最大限に活用し、減災分野に新機軸を拓くものとして位置づけられる。

7 引用文献

- [1] Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Koo Voon Chet, Lim Tien Sze, Takafumi Kawai, Takuji Ebinuma, Yuta Izumi, Mohd Zafri Baharuddin, Steven Gao and Koichi Ito, "Development of circularly polarized synthetic aperture radar onboard UAV JX-1," International Journal of Remote Sensing, Special Issue Papers on Drones, UAVs, RPASs for Environmental Research, **38**, No.8-10, pp.2745-2756, 19 May 2017, DOI:10.1080/01431161.2016.1275057.
- [2] Kenzo Nonami, Muljowidodo Kartidjo, Kwang Joon Yoon, and Agus Budiyo Editors, Autonomous Control Systems and Vehicles: Intelligent Unmanned System UAV Books, Chapter 12. Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar onboard Unmanned Aerial Vehicle, Series: Intelligent Systems, Control, and Automation: Science and Engineering, **65**, 2013, ISBN 978-4-431-54275-9.
- [3] Chua Ming Yam, Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Cahya Edi Santosa, Good Fried Panggabean, Franciscus D. Sri Sumantyo, Tomoro Watanabe, Ya Qi Ji, Peberlin Parulian Sitompul, Mohammad Nasucha, Farohaji Kurniawan, Babag Purbantoro, Asif Awaludin, Karna Sasmita, Eko Tjipto Rahardjo, Gunawan Wibisono, Retnadi H. Jatmiko, Sudaryatno, Taufik H. Purwanto, Barandi S. Widartono, and Muhammad Kamal, "The Maiden Flight of Hinotori-C: The First C Band Full Polarimetric Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar in the World," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, **34**, No.2, pp.24-35, February 2019.

- [4] Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Chua Ming Yam, Cahya Edi Santosa, Good Fried Panggabean, Tomoro Watanabe, Bambang Setiadi, Franciscus Dwi Sri Sumantyo, Kengo Tsushima, Karna Sasmita, Agus Mardiyanto, Edi Supartono, Eko Tjipto Rahardjo, Gunawan Wibisono, Muhammad Aris Marfai, Retnadi Heru Jatmiko, Sudaryatno, Taufik Hery Purwanto, Barandi Sapta Widartono, Muhammad Kamal, Daniel Perissin, Steven Gao, and Koichi Ito, "Airborne Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar," *IEEE Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)*, **14**, pp.1676-1692, January 2021, DOI:10.1109/JSTARS.2020.3045032.
- [5] Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Ming Yam Chua, Cahya Edi Santosa, and Yuta Izumi, *Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar*, CRC Publisher, 25 April 2023. ISBN 9781032250038.
- [6] Katia Nagamine Urata, Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Cahya Edi Santosa, and Tor Viscor, "Development of an L-Band SAR Microsatellite Antenna for Earth Observation," *MDPI Aerospace*, **5**, No.4, 128, 17 December 2018, DOI:10.3390/aerospace5040128.
- [7] Katia Nagamine Urata, Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Cahya Edi Santosa, and Tor Viscor, "A Compact C-band SAR Microsatellite Antenna for Earth Observation," *Acta Astronautica*, **159**, pp.517-526, June 2019 (Elsevier), DOI:10.1016/j.actaastro.2019.01.030.
- [8] Katsunoshin Nishi, Masaaki Kawai, Bowo Eko Cahyono, Mirza Muhammad Waqar, Kaori Nishi, and Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, "Consecutive DInSAR and well based on the law of material conservation between land surface pressure and groundwater to observe land subsidence," *Geocarto International*, **38**, No.1, pp.1-20, 28 December 2022. DOI: 10.1080/10106049.2022.2159069.
- [9] Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Daniele Perissin, Joko Widodo, Heri Andreas, Ketut Wikantika, Mohammad Rohmaneo Darminto, Akbar Kurniawan, Mokhamad Nur Cahyadi, and Teguh Hariyanto, "Estimation of Spouted Hot Mudflow Current using Continuity Equation and DInSAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGRS)*, **60**, DOI:10.1109/TGRS.2021.3122812 Accepted: 20 October 2021.
- [10] Josaphat Tetuko Sri Sumantyo, Masanobu Shimada, Pierre Peter Mathieu, and Hasanuddin Zainal Abidin, "Long-term Consecutive DInSAR for Volume Change Estimation of Land Deformation," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **50**, No.1, pp.259-270, January 2012 (New Jersey: IEEE) ISSN 0196-2892, DOI:10.1109/TGRS.2011.2160455.



GCOM 衛星の検証と植生リモートセンシングの展開

Validation of GCOM Satellites and the Development of Vegetation Remote Sensing

本多 嘉明 准教授

Honda Yoshiaki, Associate Professor

梶原 康司 講師

Kajiwarara Koji, Lecturer

特色ある研究の概要

本研究の目的は炭素循環の解明の一助になる全球地上部バイオマス（AGB）の年変動を把握することになる。そのために高精度に全球AGB推定を可能にする二つの宇宙ミッション（GCOM-CとMOLI：宇宙ライダー）にその計画立案時から深く関わってきた。ミッション立ち上げの根拠やプロダクト推定アルゴリズム開発のため群落スケールの二方向性反射率や高密度点群を取得できる自律飛行大型ラジコンヘリを用いた観測機材も世界初めて開発した。GCOM-C運用開始4年以内に標準プロダクトの水準を満たす全球AGB推定に成功し、そのプロダクトが生産され続けている。今後、2027年にMOLIが軌道上に挙げられ、本研究で培われた高精度全球AGBデータが品質を確保しつつ長期間蓄積される予定である。このデータは地球統合モデルの発展に寄与することも期待されている。

The purpose of this research is to understand the annual variation of global aboveground biomass (AGB), which will help to elucidate the carbon cycle. To achieve this, we have been deeply involved in two space missions (GCOM-C and space lidar MOLI) that enable high-precision estimation of the global AGB since their planning stages. We also developed the world's first observation equipment using an autonomous large radio-controlled helicopter that can acquire vegetation colony scale bidirectional reflectance and high density point clouds to justify the launch of the mission and develop product estimation algorithms. Within four years of the start of GCOM-C operations, we succeeded in estimating the global AGB to meet the standard product standards, and the product is still being produced. In the future, MOLI will be launched into orbit in 2027, and the high-precision global AGB data cultivated in this research will be accumulated for a long period of time while ensuring quality. This data is also expected to contribute to the development of an integrated Earth model.

1 はじめに

炭素循環を理解する上で、陸域植生による炭素蓄積量をグローバルかつ時系列的に把握することは必要不可欠な要素である。1990年代後半から2000年代初頭において、衛星リモートセンシングによって取得できる植生指標を用いた陸域植生の量的把握は試みられていたが、全球を対象

とした場合に必然的に利用することになる中程度解像度衛星観測データの地上解像度スケールでの検証データを取得する方法は確立されていなかった。また、植物の3次元構造まで考慮した推定は世界的に例がなかった。

本研究では、まず、衛星センサ地上解像度に見合う大面積のTruth Dataの取得方法を確立し、取得データの代表性を確保しつつ地上バイオマス推定手法を行う手法を開発した。この過程で、地上バイオマス推定においては植生の3次元構造を考慮すればより高精度な推定が可能であり、そのためには植生の3次元構造に起因する二方向性反射特性を把握する必要があることを示した。とくに森林における地上バイオマス推定では二方向性反射特性を把握することは必須であり、地上バイオマスと二方向性反射特性の関連を調査するため、それまで例のない植物群落スケールで二方向性反射特性を計測する機材の開発からはじめ、多方向観測データを用いた森林のバイオマス推定手法を開発した。本研究によって得られた知見はGCOM-C/SGLIの開発に活かされ、かつ地上バイオマス(AGB: Above Ground Biomass)標準プロダクトとして結実している(図1)。また、全球のAGBプロダクトのさらなる精度向上を目指す上で障害となっている、地上検証データの偏在とリアルタイム性の欠如を克服するため、宇宙LiDARによるAGB計測データを活用する手法の開発も継続している。

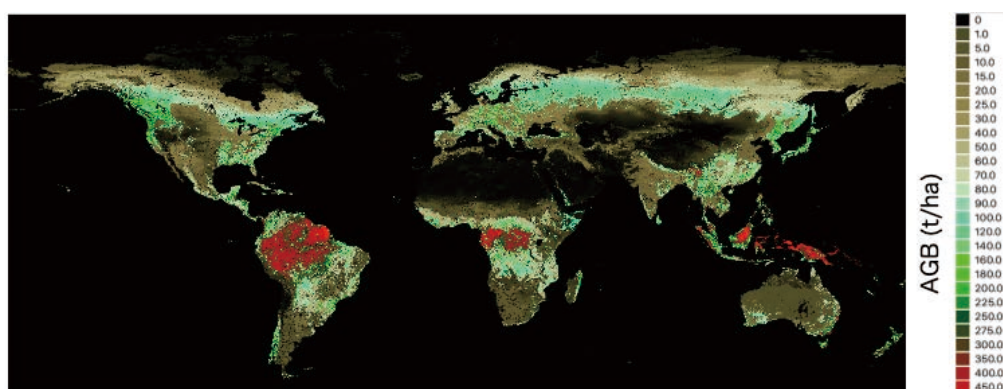


図1 GCOM-C SGLI 全球地上部バイオマスプロダクト (2019年)

Fig. 1 Global above-ground biomass (AGB) product derived from GCOM-C SGLI (2019).

2 研究のねらい・上位目標

GCOM-C衛星による高精度かつ長期時系列のグローバルな地上バイオマスデータを蓄積し、炭素循環解明へ寄与することが本研究のねらいである。

そのために、1) 地上バイオマス推定のための、地球観測衛星の地上解像度に見合う大面積代表性をもったGround Truth Dataの取得方法の開発、2) 植物の3次元構造に起因する二方向反射特性を利用した地上バイオマス推定アルゴリズムを構築し、地球観測衛星プロジェクトに反映した。さらに、3) 宇宙LiDAR観測データを併用したグローバルな地上バイオマス推定アルゴリズムの高精度化を目指した研究を継続中である。本研究で培われた高精度全球AGBデータは品質を確保しつつ長期間蓄積される予定である。このデータは地球統合モデルの発展に寄与することも期待されている。

3 研究の実施方法

3.1 大面積の Ground Truth Data 取得手法の開発

1997年から実施した戦略的基礎研究推進事業研究領域「地球変動のメカニズム」(CREST)における研究課題「衛星観測による植物生産量推定手法の開発」において、草地における大面積の Truth Data 取得方法を確立した^[1, 2]。

NOAA/AVHRR センサの地上解像度を十分にカバーする2 km × 2 kmの表面分光反射率を短時間に取得するシステムの開発(図2)、地表面反射率と植生被覆率を同時計測するシステムの開発(図3)、草本の3次元構造を計測するシステムの開発など、多数の計測システムを開発し、地表面分光反射率と植生被覆率および草本の地上バイオマスの関係を、大面積を対象として明らかにし、モンゴル全土の草原バイオマスを高精度に推定するアルゴリズムを開発した^[3]。図4にその結果の一部を示す。

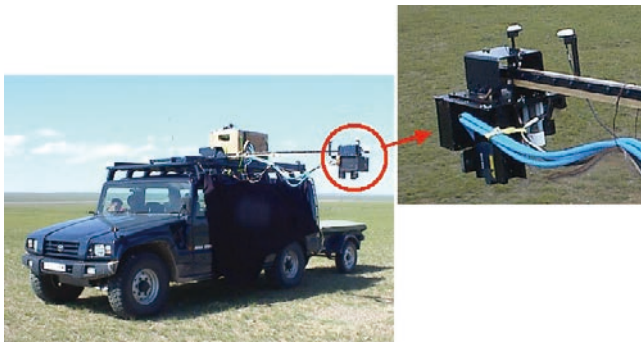


図2 移動式地表面分光反射率計測システム

Fig. 2 Mobile ground-based spectral reflectance measurement system.



図3 植生被覆率・地表面分光反射率同時計測システム

Fig. 3 Simultaneous measurement system for vegetation coverage and ground surface spectral reflectance.

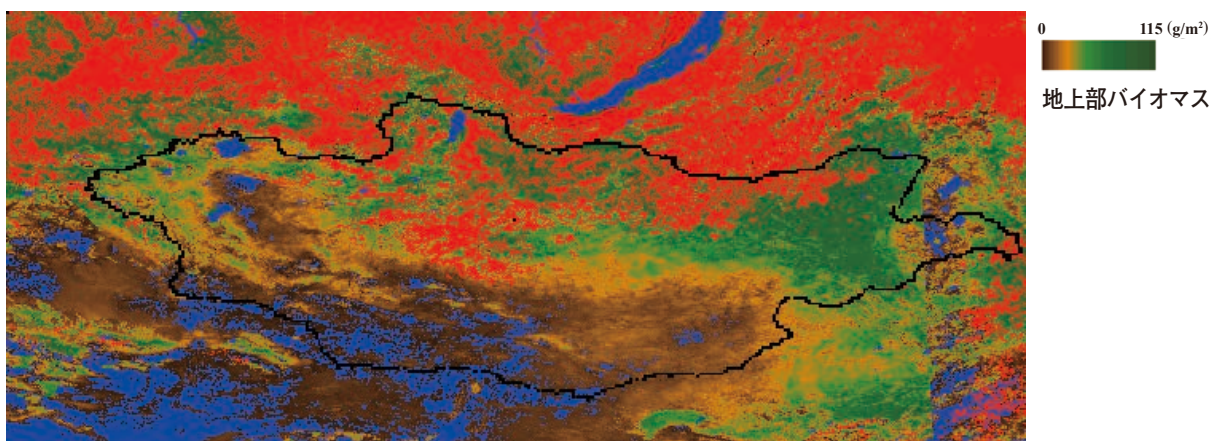


図4 1998年夏季のAVHRR LAC 8日間コンポジットデータから推定したモンゴル全土の草原バイオマス(青色は雲の影響が残る画素または水域、赤は森林域を示し、アルゴリズムの対象外)

Fig. 4 Grassland biomass across Mongolia estimated from the 8-day AVHRR LAC composite data in summer 1998 (blue indicates pixels or water bodies that remain affected by clouds, red indicates forest areas, not subject to the algorithm).

3.2 バイオマス推定アルゴリズムの構築：草原から森林へ

「衛星観測による植物生産量推定手法の開発」およびそれに引き続いて2002年より実施した戦略的創造研究推進事業研究領域「発展・継続研究」(SORST)における研究課題「全球高精度植生バイオマス推定の実用化—衛星による多方向観測を利用した高精度バイオマス推定の実用化—」およびJAXAのGCOMサイエンスチームにおける研究を通して、植物の3次元構造に起因する二方向反射特性を利用した地上バイオマス推定アルゴリズムの構築を行った。ここでは、前述の草原バイオマスから対象を森林に広げ、分光放射計、レーザースキャナ等を搭載可能な大型のラジオコントロールヘリコプターを用いて(図5)、空中から多方向のスペクトル計測および樹冠形状計測を様々な植生樹冠を対象に行い(図6)、典型的な樹種タイプごとに二方向性反射特性から地上バイオマスを推定可能であることを示した^[4-9]。その結果はGCOM-C/SGLIセンサ開発およびSGLIのAGBプロダクト生成に反映され(図7)、図1で示したような全球バイオマスプロダクトが現在も継続的に蓄積している^[10-12]。



図5 分光放射計、レーザースキャナ等の機材を同時搭載可能なラジオコントロールヘリコプターと基地局

Fig. 5 A radio-controlled helicopter and the base station. The helicopter can simultaneously carry equipment such as a spectroradiometer and laser scanner.

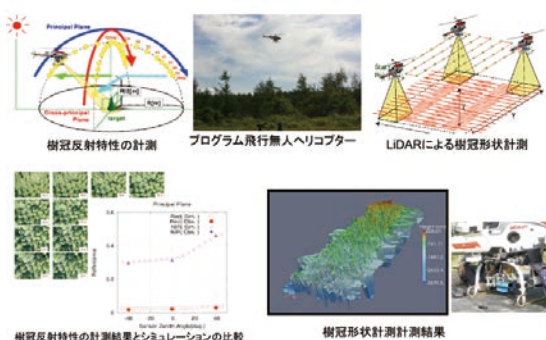


図6 ラジオコントロールヘリコプターを用いた観測の例

Fig. 6 Example of observation using a radio-controlled helicopter.

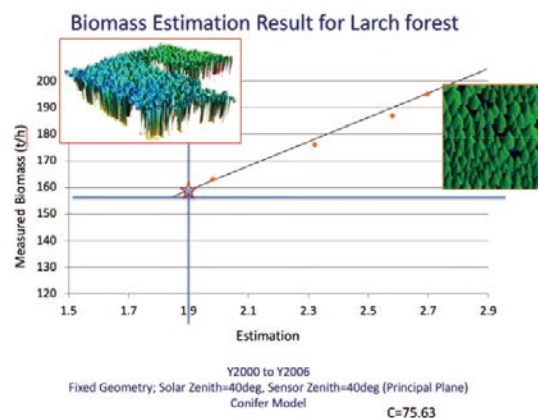


図7 樹冠の3次元構造を利用した森林地上バイオマス推定が可能であることを地上観測データによって示した例(カラマツ林)

Fig. 7 An example of using ground observation data to demonstrate the feasibility of estimating forest aboveground biomass using the three-dimensional structure of tree canopies (larch forest).

全球のAGBプロダクトのさらなる精度向上を目指す上で障害となっている、地上検証データの偏在とリアルタイム性の欠如を克服するため、宇宙LiDARによるAGB計測データを活用する手法の開発も継続している。現在のところ、NASAが運用したGEDIの観測データをもとに、宇宙LiDARデータから取得される観測スポットのAGB推定値を併用してSGLIによるAGBプロダクトの高精度化研究を継続的に実施している。ここで得られる手法はJAXAが計画している宇宙LiDAR MOLIの観測データを用いたAGB推定手法の開発に受け継がれる予定である。

4 研究の成果

本研究はその初期段階からGCOM-Cミッションへと繋がる、中程度解像度センサによる地上バイオマス推定を行ってきた。本研究で得られた知見は、GCOM-Cミッションの立ち上げに寄与し、開発されたアルゴリズムはGCOM-C/SGLIのAGB標準プロダクトに反映された。GCOM-C運用開始4年以内に標準プロダクトの水準を満たす全球AGB推定に成功した（図8）。

また、本研究で開発した、空中および地上からの樹冠の3次元情報の取得手法は、JAXAの宇宙LiDAR MOLIミッションの立ち上げに寄与し、宇宙LiDARとGCOM-C SGLIを併用したさらなる高精度AGBプロダクト生成アルゴリズム研究の根幹を支えるものとなっている。

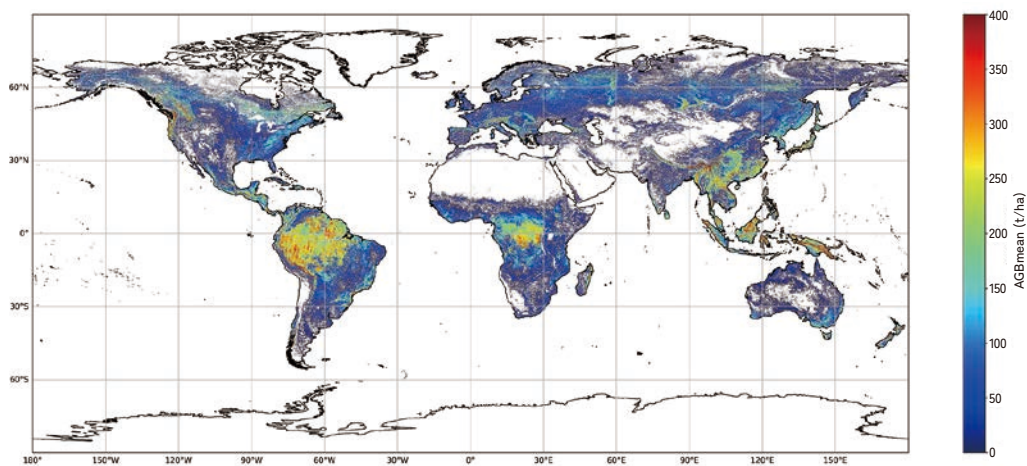


図8 宇宙LiDAR（GEDI）データを併用し、SGLIデータから推定した2020年のAGB。将来的にはJAXAのMOLIが観測したデータを用いたAGBプロダクトを生成する。

Fig. 8 AGB in 2020 estimated from SGLI data in conjunction with space LiDAR (GEDI) data. In the future, we will generate AGB products using data observed by JAXA's MOLI.

5 研究プレゼンスの向上

本研究における草原バイオマスに係る観測サイト展開では、モンゴル国立リモートセンシングセンターの協力を得て実施した。また、この観測サイトはNASAの衛星地球観測プロジェクト（EOS）の公式検証サイトとして登録された。

森林バイオマス観測・アルゴリズム構築への展開時には、GCOM-CプロジェクトにおけるサイエンスチームとしてJAXAとの共同研究を推進するとともに、JAXAの宇宙LiDARであるMOLIのミッションの立ち上げ時から、本研究で得られたデータ、知見を提供している。

6 引用文献

- [1] 山本浩万, 本多嘉明, 梶原康司, 岡野千春, 黄少博, 松岡真如, 衛星による草原バイオマス計測のための移動多点現地観測データ解析に関する研究, 写真測量とリモートセンシング, **36**, No.4, 1997, pp.38-49.
- [2] 本多嘉明, 梶原康司, 山本浩万, 岡野千春, 黄少博, 松岡真如, モンゴル草原における広域観測領域を代表する最小面積に関する研究, 真測量とリモートセンシング, **36**, No.5, 1997, pp.20-26.
- [3] 近田朝子, 山本浩万, 梶原康司, 本多嘉明, 衛星データを対象としたBRFモデルを用いた草地植生の草丈算出に関する研究, 写真測量とリモートセンシング, **406**, 2002.1.8.
- [4] 本多嘉明, 産業用無人ヘリコプターを用いた空中観測システム, 月刊『測量』8月号, 2002.8.10.
- [5] Asako KONDA, Koji KAJIWARA, Yoshiaki HONDA, A study on the algorithm of vegetation surface roughness index for global monitoring, ISPRS Commission VII WG International Workshop on Monitoring/Modeling Global Environmental Chang, CD-ROM G5, pp.1-4, 2003.10.21-23.
- [6] Junichi Susaki, Keitarou Hara, Koji Kajiwara and Yoshiaki Honda, Robust Estimation of BRDF Model Parameters, Remote Sensing of Environment, **89**, pp.63-71, 2004.
- [7] Yoshiaki Honda, Hirokazu YAMAMOTO, Masahiro HORI, Hiroshi MURAKAMI, Nobuyuki KIKUCHI, Global environment change monitoring using the next generation satellite sensor, SGLI/GCOM-C, International Symposium on Remote Sensing 2005, International Convention Center Jeju, pp.11-13, 2005.10.12-2005.10.14.
- [8] Kazuyuki Honma, Koji Kajiwara, Yoshiaki Honda, Development of 3D Structure Measurement System using Laser Scanning data and Radio-Controlled Helicopter, The 26th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2005), Melia Hanoi Hotel, CD-ROM DTP1-4, 2005.11.7-2005.11.11.
- [9] Yusaku. Ono, Yoshiaki. Honda, Koji. Kajiwara, A study on 3D structure detection for forest trees using reflected spectrum information, ISRS2007, Pamada Plaza Jeju Hotel, pp.345-348, 2007.10.31-2007.11.2.
- [10] Kouiti HASEGAWA, Takeki IZUMI, Hiroshi MATSUYAMA, Koji KAJIWARA, Yoshiaki HONDA, Seasonal change of bidirectional reflectance distribution function in mature Japanese larch forests and their phenology at the foot of Mt. Yatsugatake, central Japan, Remote Sensing of Environment, 209, pp.524-539, 2018.5.
- [11] HONDA Yoshiaki, KAJIWARA Koji, STUDY ON ABOVE GROUND BIOMASS PRODUCTS FROM GCOM-C / SGLI, IGARSS2018, Feria Valencia Convention & Exhibition Centre, Valencia, Spain, July 22-27, 2018, TH4. R13.3.
- [12] Yoshiaki HONDA, Koji KAJIWARA, Ryota ISHIBASHI, Primary result on above ground biomass products from GCOM-C / SGLI, IGARSS2019, Pacifico Yokohama, Japan, July 28-August 2, 2019. TU1.R13.5.



地上観測・衛星観測・モデリングを統合した 陸域温室効果ガス収支のモニタリング

Monitoring Terrestrial Greenhouse Gas Budget
by Synthesizing Ground Observation, Remote Sensing and Modeling

市井 和仁 教授
Ichii Kazuhito, Professor

特色ある研究の概要

人為的な温室効果ガス排出に起因する地球温暖化問題は、様々な地球環境問題の中でも、最も重要な問題の一つである。陸域には様々な植生・土壌が分布し、温室効果ガスの吸収・排出源として、その吸収・排出量とその変動のメカニズムを知ることが重要である。我々のグループでは、国・大陸・グローバルなどの広い地域を対象にして、地上観測ネットワーク・衛星観測データ・数値モデリングなどの多種多様な手法をバランスよく用いることで、「統合的に」温室効果ガス吸収・排出のメカニズムについて解明しようとしている。特に地上観測ネットワークと衛星観測を用いた広域推定、衛星観測データと数値モデルを統合したモデル構築、ひまわり8/9号など静止気象衛星による陸域環境モニタリングに取り組んでいる。

Climate change caused by anthropogenic greenhouse gas emissions is one of the most important issues in global environmental studies. It is essential to understand the mechanisms of absorption and emission of greenhouse gases and their fluctuations, as land areas are distributed with various vegetation and soil, and they are sources of absorption and emission of greenhouse gases. Our group is trying to elucidate the mechanisms of greenhouse gas absorption and emission in an “integrated” manner by balancing a wide range of methods including ground observation networks, satellite observations, and numerical modeling. Our target areas are countries, continents, and the globe. In particular, we are working on upscaling using ground observation networks and satellite observations, model development that integrates satellite observation data and numerical models, and terrestrial environmental monitoring using geostationary meteorological satellites such as Himawari 8/9.

1 はじめに

気候変動や生物多様性の保全は、現代の地球環境問題における最重要課題の一つである。気候変動対策としては「パリ協定」、生物多様性保全の指針として「昆明・モントリオール目標」が

策定され、これらを基盤に全世界で取り組みが進められている。このような背景のもと、気候変動や生物多様性に関する人々の関心も高まりつつある。

植生や土壌を中心とする陸域環境は、気候変動や人為的な改変の影響を受けやすい一方で、地球環境の保全において重要な役割を担っている。陸域は、人為的なCO₂排出量の約30%を吸収するとされ、温室効果ガスの削減に大きく貢献できる可能性がある。しかし、森林伐採や森林火災のような事象によってCO₂の放出源ともなり得るため、その適切な管理が求められている。また、陸域環境は、熱帯から寒帯、湿潤から乾燥といった多様な表層環境を持つため、地域ごとに異なる特性を有する。加えて、将来の気候変動予測や異常気象の頻発といった変動要因も地域によって大きく異なることから、温室効果ガスの吸収・排出量の空間的な変動を正確に把握し、予測することは極めて困難である。このため、陸域環境の理解を深めることは、地球環境問題の解決に向けて不可欠である。

2 研究のねらい・上位目標

本研究では、陸域における温室効果ガス（主にCO₂）や水を中心とした物質循環・水循環の解明を通じて、気候変動や人為的環境改変を軽減するための基礎的研究資料を世界の研究者コミュニティに提供することを目指している。この成果は、大気－陸域間の温室効果ガス収支や植生変動のマッピングなど、気候変動対策や生物多様性の保全に貢献するための基盤データとして活用される。

従来、大気－陸域および大気－海洋間での温室効果ガスの吸収・排出量の推定においては、観測データの不足が大きな障壁となっていた（図1(a)）。しかし、近年の技術進展により地上観測や衛星観測が充実しつつあり、観測データを活用した温室効果ガス収支の精密な推定が可能となりつつある（図1(b)）。これにより、従来よりも高い空間解像度・時間解像度で、速報性を有する推定が期待されている。さまざまな観測データを駆使することで、データ駆動型の新しい推定手法を開拓し、観測データを最大限に活用した持続可能な地球環境の実現に貢献することを目指している。

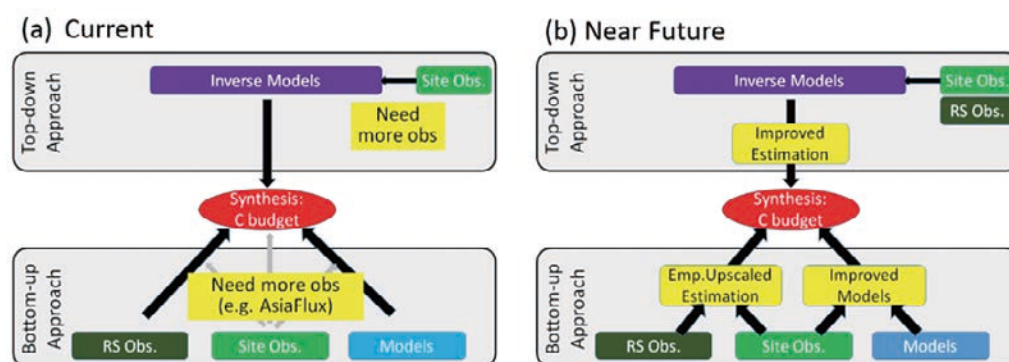


図1 研究全体フロー。陸域CO₂収支の把握研究を例とし、大気濃度からのアプローチ（Top-down approach）と陸面からのアプローチ（Bottom-up approach）における（a）現代の課題と（b）将来動向を示した^[1]。

Fig. 1 Overall research flow. Using the study of understanding the terrestrial CO₂ budget as an example, (a) contemporary issues and (b) future trends in the approaches by atmospheric concentration (Top-down approach) and by the land surface (Bottom-up approach) are shown^[1].

本研究の主なねらいは以下の通りである：

- (1) 観測データリッチ時代における陸域温室効果ガス吸収・排出量推定手法の開拓
充実した観測データを基盤に、新たなデータ駆動型推定手法を開発し、従来の推定方法を高度化する。
- (2) 高時間・高空間解像度の陸域モニタリングデータセットの構築
陸域環境の動態を詳細に把握するため、高解像度かつ長期的なモニタリングデータセットを整備する。
- (3) 陸域における環境変動ホットスポットの早期検出
環境変動が顕著な地域を特定することで、効果的な対策の迅速な立案を支援する。

3 研究の実施方法

陸域における温室効果ガスや熱・水の収支を推定するために、本研究室では、「使えるものは有効に利用」するアプローチをとっている（図1）。現状では、トップダウンアプローチ（大気濃度から大気－陸域収支を推定）、ボトムアップアプローチ（地点やプロセスなど個々を積み重ねることで収支を推定）を併用することが多い。ボトムアップアプローチとしては、地上観測・衛星観測・モデリングといった種々の手法を統合し、様々な手法間で一貫した推定を行うことができる。

本研究室での独自手法として、地上観測・衛星観測に機械学習を適用した広域大気－陸域CO₂交換量の推定がある（図2）^[2]。また、本センターでアーカイブを進めている静止気象衛星データの新たな活用として陸面モニタリングを推進している。静止気象衛星の特徴を活かした高い時間分解能の地表面データセットの構築（地表面反射率など）を国際共同研究で進めている（図3）。これらの新たなデータセットの活用により、従来よりも高い精度での現状把握・予測ができると期待している。

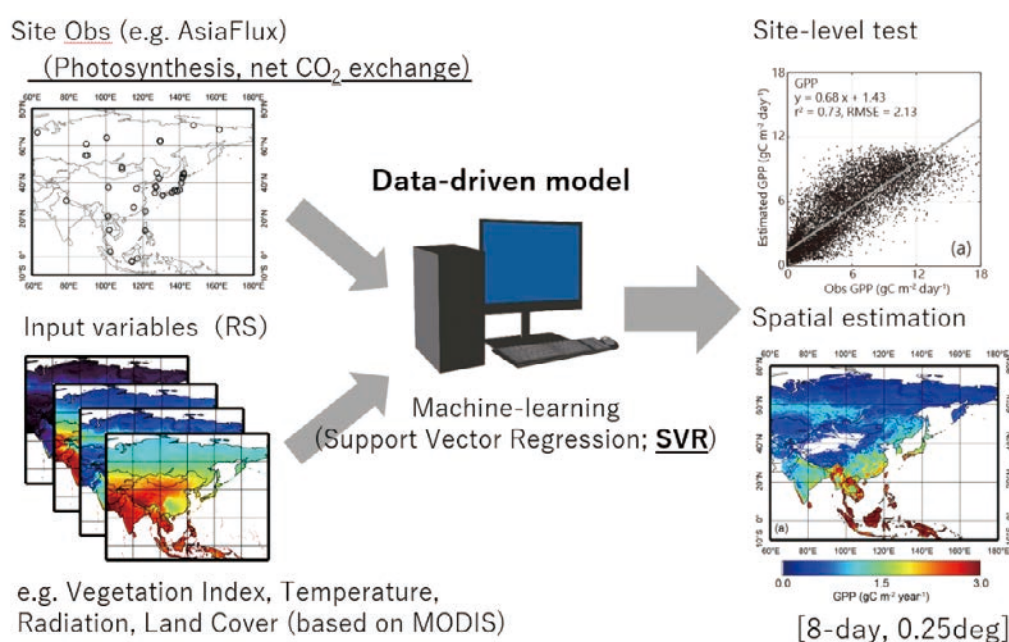


図2 地上観測・衛星観測・機械学習を利用した陸域CO₂吸収・排出量推定手法の概念図

Fig. 2 Conceptual diagram of a method for estimating terrestrial CO₂ absorption and emissions using ground-based observations, satellite observations, and machine learning.



図3 静止気象衛星による国際陸域観測研究ネットワーク概念図。プロジェクト Web: <https://ceres.chiba-u.jp/geoland/>

Fig. 3 Conceptual Diagram of International Land Observation Network by Geostationary Satellites. Project Web: <https://ceres.chiba-u.jp/geoland/>

4 研究成果

大気－陸域観測ネットワーク AsiaFluxなどの地上観測データと Terra衛星搭載MODIS センサの陸面プロダクトを利用し、機械学習の一つの手法であるサポートベクタ回帰を用いて、アジア域のCO₂フラックス（光合成量と純生態系生産量）の推定を行った。現在のところ 1 km～0.25°までの様々なスケールでの計算を行ってきており、一部のプロダクトは本グループのホームページ（<http://ichiilab.weebly.com>）より公開している。

複数の数値モデルの出力結果と大気インバースモデルの結果を統合利用し、1960-1999年と2000-2009年のCO₂収支を比較したところ、2000年代は1960-1999年の期間に比較して、グローバルスケールでは多くの地域でCO₂吸収となっていた（図4）^[3]。CO₂吸収となった地域の多くは人為的な土地利用変化からの回復過程にあり、植林など人為的な活動の影響が大きいことが分かった。

静止気象衛星による陸面モニタリングに関しては、まずは、大気上端反射率の観測データに対して、6Sコードをもとにした大気補正を行った^[4]。静止衛星データより推定した反射率の検証に際してはTerra衛星MISRセンサデータを用いた相互比較手法の構築を行った^[5]。これらの構築したデータは当研究室より外部公開しており、誰でも利用できるかたちになっている。

炭素収支量 注：炭素収支 = CO₂施肥効果 + 気候変動効果 + 土地利用変化によるCO₂排出 + 植生再成長

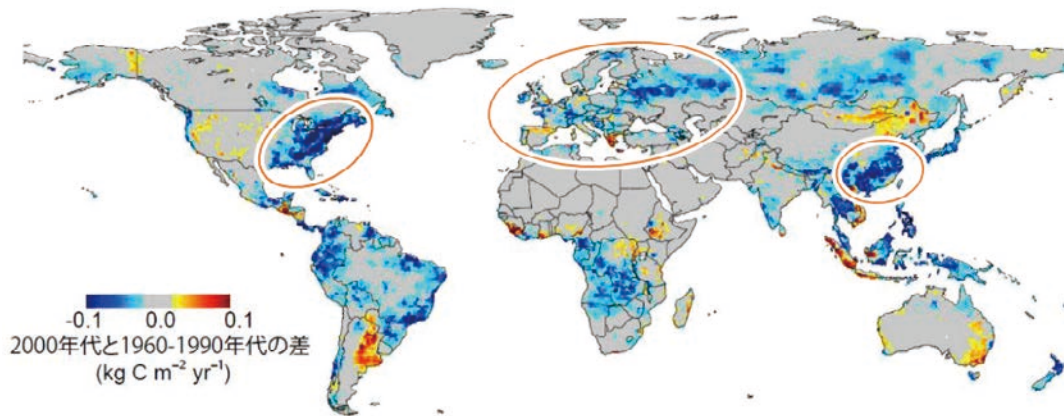


図4 2000年代と1960年代-1990年代における炭素収支の差の空間分布。負の値（青）は2000年代が1960年代-1990年代よりも強いCO₂吸収傾向であることを示す。結果は陸域生態系モデルによる推定。

Fig. 4 Spatial distribution of the difference in the carbon budget between the 2000s and the 1960s-1990s. Negative values (blue) indicate a stronger CO₂ sequestration trend in the 2000s than in the 1960s-1990s. Results are estimated from a terrestrial ecosystem model.

5 研究プレゼンスの向上

我々は、様々な国際共同研究・プロジェクトを通して、研究プレゼンスの向上を目指している。まず、地上観測データ、衛星観測データを活用した陸域炭素循環研究については、市井がJapanFlux観測ネットワークの委員長を2018-2024年にわたり務め、AsiaFlux観測ネットワークの委員長を2021-2027年の任期で務めている（任期は2027年3月に満了予定）。その中で、JapanFlux研究集会（2021年）や、AsiaFlux Online Conference 2021を開催するなど、コミュニティの育成に貢献している。AsiaFluxやJapanFluxの活動において、観測データの統合研究を推進し、機械学習によるアジア域陸域生態系によるCO₂吸収・排出量マッピングなどの研究を実施した。また、Future EarthやGlobal Carbon Projectに対しての貢献、IPBES（生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム）評価報告書の統括執筆者としての参画などを通して、成果の発信に努めている。

静止気象衛星による陸面モニタリングに関しては、日本学術振興会研究拠点形成事業（a. 先端拠点形成型）「静止気象衛星観測網による超高時間分解能陸域環境変動モニタリング国際研究拠点」（2022-2026年度）の採択を契機に、米国・韓国・中国・オーストラリア・シンガポールなどの国々の研究者との国際共同研究体制を構築し、発展を続けているところである。また、本研究事業を通じた国際ワークショップの開催、国際学会における共同セッションの開催なども行っている（図5）。2024年度には複数の研究者・大学院生を海外拠点に1か月程度派遣するなど人的交流にも発展し、国際共同研究を加速させている。

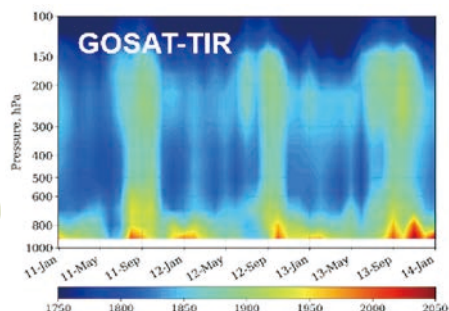
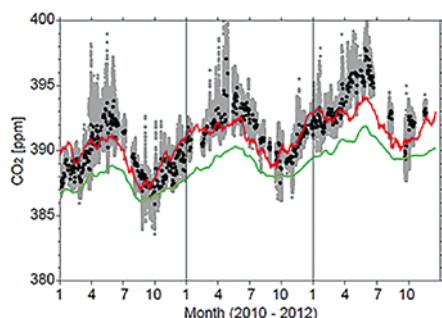


図5 静止気象衛星による陸域モニタリングに関する国際ワークショップをハワイ大学と共同で開催（2023年8月7-9日@ハワイ大学マノア校にて）。（左）案内チラシ（小菅生技術補佐員作成）、（右）集合写真。

Fig. 5 International Workshop on Land Monitoring by Geostationary Meteorological Satellite, held in collaboration with the University of Hawaii (August 7-9, 2023 at the University of Hawaii at Manoa). (Left) Information flyer (prepared by Technical Assistant Kosugo), (Right) Group photo.

6 引用文献

- [1] Ichii K., W. Ju, Cheng K.S., G. Zhou, S. Niu, Y.H. Lee, D.Y.F. Lai (2015) Synthesis and Assessments of Carbon and Water Budget: Current and Future Aspects. *AsiaFlux Newsletter*, **38**, 26-28.
- [2] Ichii K., M. Ueyama, M. Kondo et al. (2017) New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, **122**, 767-795, doi:10.1002/2016JG003640.
- [3] Kondo M., K. Ichii, P.K. Patra, B. Poulter, L. Calle, C. Koven, T.A.M. Pugh, E. Kato, A. Harper, S. Zaehle, A. Wiltshire (2018) Plant regrowth as a driver of recent enhancement of terrestrial CO₂ uptake. *Geophysical Research Letters*, **45**, <https://doi.org/10.1029/2018GL077633>.
- [4] Li W, K. Ichii, B. Zhang, Y. Yamamoto, W. Yang, T. Miura, H. Yoshioka, M. Matsuoka, K. Obata, R.C. Sharma, H. Yamamoto, H. Irie, P. Khatri, B. Liley, I. Morino, H. Takenaka, A. Higuchi (2025) Estimating land surface reflectance from a next-generation geostationary meteorological satellite, Himawari 8/9 AHI. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **103**, 87-109, <http://doi.org/10.2151/jmsj.2025-005>.
- [5] Zhang B., K. Ichii, W. Li, Y. Yamamoto, W. Yang, R.C. Sharma, H. Yoshioka, K. Obata, M. Matsuoka, T. Miura (2025) Evaluation of Himawari-8 AHI land surface reflectance at mid-latitudes using LEO sensors with off-nadir observation. *Remote Sensing of Environment*, **316**, 114491, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114491>.



GOSAT データによる温室効果ガスの全球プロファイル解析

Global Analysis of Greenhouse Gases Profiles from GOSAT Satellite

齋藤 尚子 准教授

Saitoh Naoko, Associate Professor

特色ある研究の概要

温室効果ガス（GHG）をはじめ、地球大気中の微量気体は、熱赤外波長域に固有の吸収線を持っている分子が多く、分子の吸収特性を利用して様々な大気微量気体の濃度を導出することができる。本研究では、温室効果ガス観測技術衛星GOSAT（Greenhouse gases Observing SATellite）およびその後継機GOSAT-2に搭載されているフーリエ分光計TANSO-FTS（Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation-Fourie Transport Spectrometer）およびTANSO-FTS-2の熱赤外（TIR）バンドの観測スペクトルから、二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）の鉛直濃度分布（プロファイル）を導出するアルゴリズムを開発し、導出したGHG濃度を航空機等のデータと比較することで検証したうえで、GOSAT/GOSAT-2のGHGプロファイルデータを用いて、全球でGHGの発生源と大気輸送の特徴を解析した。

A lot of minor gases in the Earth's atmosphere, including greenhouse gases (GHG), have their own specific absorption lines in the thermal infrared wavelength region, and therefore, we can retrieve concentrations of these gases by utilizing their absorption characteristics. This study has developed an algorithm to retrieve vertical profiles of concentrations of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) from the thermal infrared (TIR) bands of TANSO-FTS (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation-Fourie Transport Spectrometer) and TANSO-FTS-2 on board GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) and its successor, GOSAT-2. We have validated GHG concentrations retrieved by the developed algorithm by comparing them with aircraft observations, and then analyzed GOSAT and GOSAT-2 GHG profiles to reveal characteristics of GHG sources and atmospheric transport processes globally.

1 はじめに

人為起源の温室効果ガス（GHG）の増加による地球温暖化は進行しており、地球温暖化に伴う極端気候・気象の現象も頻発している^[1]。地球温暖化の原因である主要な温室効果ガスは、二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）であり、このうち大気中のCO₂とN₂Oの濃度につ

いてはほぼ単調に増加し続けている。一方、大気中の CH_4 は複雑な濃度の年増加率を示している^[2]。 CH_4 および N_2O は、 CO_2 に比べると大気中の濃度は低いですが、GWP（Global Warming Potential）が高く、その大気中の濃度や挙動を明らかにすることは重要である。GHG濃度の観測には高い精度が求められるため、地上のフラスコサンプリング等による観測が主であったが、全球・多地点でGHG濃度を把握する必要性の高まりを受けて、2009年に日本が世界に先駆けてGHGの観測を主目的とした人工衛星であるGOSATを打ち上げて以来^[3]、各国がGHG観測専用衛星の打ち上げを行っている。

2 研究のねらい・上位目標

パリ協定においては、合意した温暖化緩和目標を達成するために、各国には CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等の長寿命GHGの排出インベントリの報告が義務付けられている。各国はグローバルストックテイク（GST）などの仕組みにより、温室効果ガス排出インベントリの報告をもとに温室効果ガス排出量と削減目標に向けた進捗状況の評価を受けることになる（GSTは5年ごと、初回は2023年末）。そのため、全球で主要なGHGである CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排出量の正確な把握が不可欠である。GHG排出量の推定には、観測データを大気化学輸送モデルに与えて計算する「トップダウン推定法」があり、トップダウン推定ではGHGの排出源・排出量の時空間変動を全球で明らかにすることが可能である。トップダウン法によるGHGの収支推定には、全球で高精度なGHG濃度の観測データが必要となる。このため、近年では衛星観測によるGHG濃度のカラム量データがGHGの収支推定研究に大いに活用されている。しかしながら、特に CH_4 や N_2O は大気中の化学反応による消失プロセスがあり、大気中を長距離輸送される過程で濃度が大きく変動するため、緯度・経度・高度の3次元でGHG濃度の特徴を把握する必要がある。本研究により、全球で高精度にGHG濃度プロファイルを導出し、衛星データにもとづく全球3次元GHG濃度分布情報をフルに活用したトップダウン推定を行うことによって、GHGの収支推定のさらなる精緻化を図ることが目標である。

3 研究の実施方法

GOSAT/TANSO-FTSおよびGOSAT-2/TANSO-FTS-2のTIRバンドからGHG濃度のプロファイルを導出するアルゴリズムとして、ベイズ理論に基づく最大事後確率推定法^[4]を採用した。大気中の放射伝達を精密に計算するための大気層である「フルグリッド」と濃度導出を実施する大気層である「リトリーバルグリッド」を設定し、フルグリッドとリトリーバルグリッド間を線形写像で結合して濃度導出を行うことで、濃度導出の精度と高速化を実現した。開発したアルゴリズムでは、10 μm および15 μm の CO_2 の吸収帯を利用して、気温と CO_2 、水蒸気（ H_2O ）、オゾン（ O_3 ）の濃度を、7 μm および8 μm の CH_4 の吸収帯を利用して気温と CH_4 、 H_2O 、 N_2O の濃度を同時推定している^[5]。

導出されたGHG濃度プロファイルは、精度の高い航空機観測等の直接観測データとの比較を通して検証した。このうち、 CO_2 プロファイルの検証については、CONTRAIL（Comprehensive Observation Network for TRace gases by AIrLiner）プロジェクトのCME（Continuous CO_2 Measuring Equipment）^[6]により、全球の各地の空港上空で航空機の上昇・下降時に観測された CO_2 プロファイルと比較を行った^[5, 7]。

4 研究成果

図1に、GOSAT/TANSO-FTSのTIRバンドから導出したCO₂プロファイルの上部対流圏の濃度（赤線）とCONTRAIL/CMEで観測されたCO₂濃度（黒線および灰線）を比較した結果を示す。航空機観測データに見られるCO₂濃度の緯度勾配が、モデルの計算結果（緑線）では十分に再現されていないが、TIRバンドのCO₂濃度は航空機観測データの濃度勾配とよい一致を示している。同様に、TIRバンドのCO₂プロファイルを緯度別、高度別に航空機観測データと比較した結果、上部対流圏では1 ppmv程度、下部・中部対流圏では1-1.5%程度の精度でCO₂濃度を導出できていることが確認できた^[5,7]。GOSAT/TANSO-FTSのTIRバンドのCH₄プロファイルについても、他衛星および地上FTS観測データと比較・検証した結果、概ね1%以内の導出精度であり、科学利用に十分なデータ質を有していることがわかった^[8,9,10]。図2に、羽田空港上空のGOSAT-2/TANSO-FTS-2のCO₂プロファイルとCMEで観測されたCO₂プロファイルを比較した結果を示す。各地の空港で比較・検証を行った結果、中高緯度では概ね0.5-1%程度の精度でCO₂濃度を導出できていることがわかった。

本研究ではさらに、リトリバルアルゴリズムの改良を重ねて、2009年打ち上げのGOSATから2018年打ち上げのGOSAT-2をシームレスにつなげて濃度の導出処理ができるようにし、日本の衛星シリーズによる高精度な全球GHGプロファイルの長期観測データを提供できることを目指している。

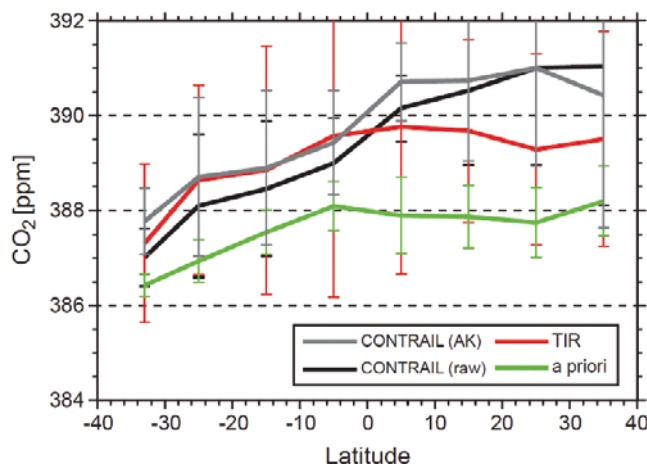


図1 TANSO-FTSとCMEの上部対流圏CO₂濃度の比較

Fig. 1 Comparison of CO₂ concentration in the upper troposphere between TANSO-FTS and CME. [Fig. 5, Saitoh et al., AMT, 2016]

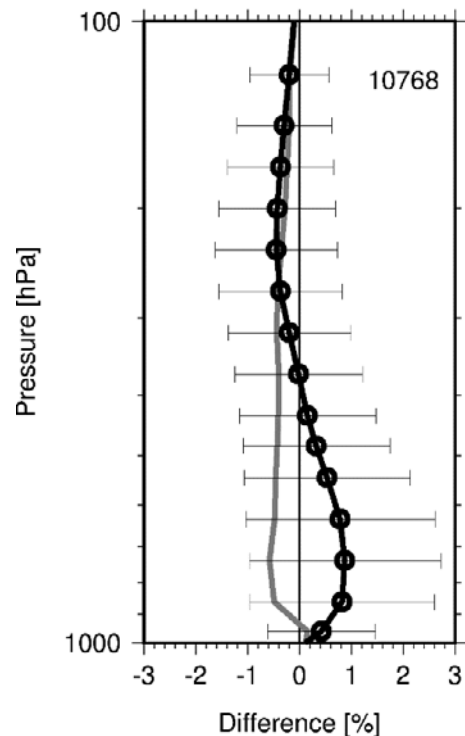


図2 TANSO-FTS-2とCMEのCO₂プロファイルの比較

Fig. 2 Comparison of CO₂ profile between TANSO-FTS-2 and CME.

5 研究プレゼンスの向上

GOSAT/TANSO-FTSのTIRバンドから導出したCH₄濃度データおよび大気輸送モデルのCH₄濃度データを用いて、大気中の物質の半球輸送のプロセスを解析した。図3に示すように、物質の半球輸送は350-150 hPaの上部対流圏で最も活発であること、熱帯南アメリカ、熱帯アフリカ、東南アジアでは北半球から南半球への半球輸送が一年を通して活発である一方、熱帯インド洋では南アジアの夏モンスーンにより半球輸送に大きな季節性があること、ならびに夏モンスーンにより、チベット高原ーインド上空の上部対流圏に輸送された高濃度CH₄の空気塊が熱帯アフリカ東部を通して南半球に輸送されていることを明らかにした^[11]。本研究により、大気中のCH₄が主要な発生源であるアジア域から広域かつ南半球へ輸送される詳細なプロセスが明らかになり、CH₄の大気中の動態の解析および発生源・消失源の推定において重要な知見がもたらされた。本成果については、2022年9月30日付で千葉大学・海洋研究開発機構が連名でプレスリリースを行っており、同年10月13日付の日刊工業新聞にて取り上げられた。

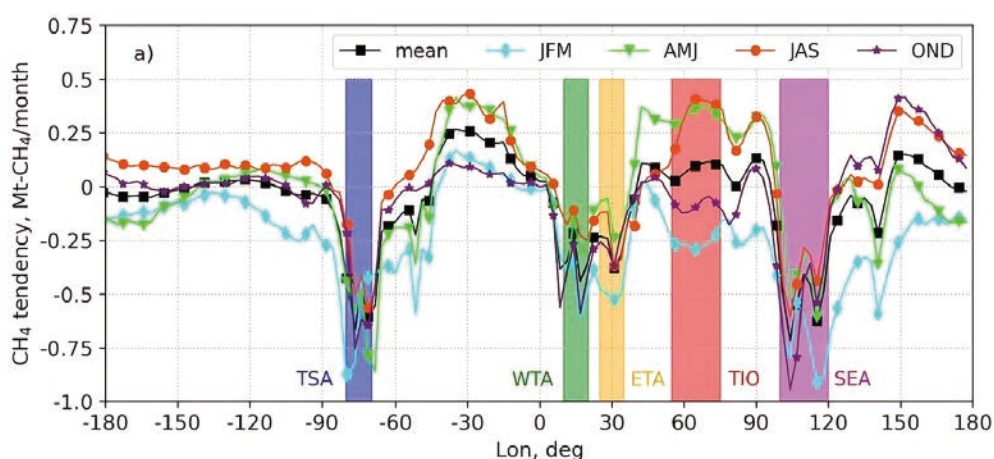


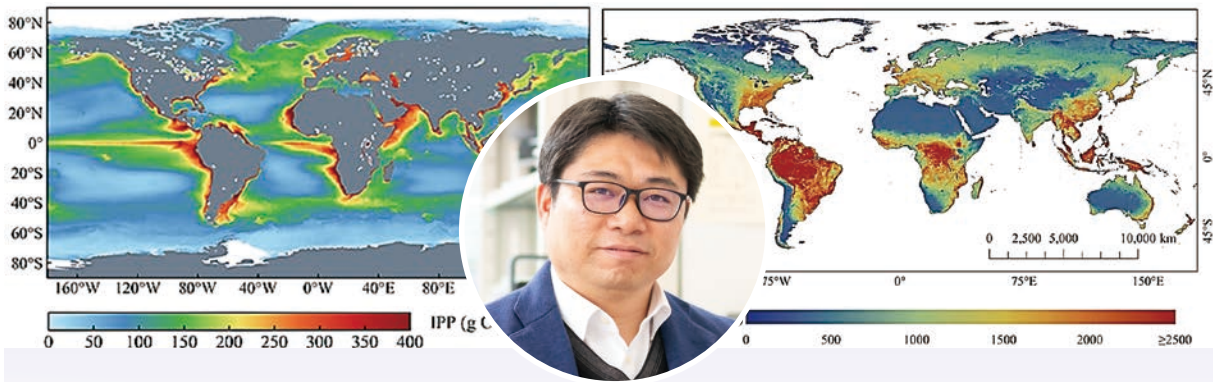
図3 季節毎に計算した熱帯 (10° S-10° N) の上部対流圏における移流傾向 (百万トン・メタン/月)。正、負はそれぞれ北半球向き、南半球向きの輸送を表す。黒線は年平均値。

Fig. 3 Seasonal advection of CH₄ (in Million-ton CH₄/month) calculated for the upper troposphere of the tropical region (10° S-10° N). Positive and negative values indicate the flow toward the north and south hemisphere, respectively. Black line shows the annual average. [Fig. 3a, Belikov et al., 2022]

また、GOSAT/TANSO-FTSのTIRバンドから導出したN₂O濃度データの解析から、おもに窒素肥料の施肥により南アジアで放出された高濃度N₂Oが、アジアモンスーンの高気圧性循環により、夏季に地中海の東岸に輸送されることが明らかになった^[12]。GOSAT/TANSO-FTSおよびGOSAT-2/TANSO-FTS-2によるN₂Oプロファイル観測の成果を踏まえて、国際研究グループと共同で新規衛星プロジェクトの提案を行っている^[13]。

6 参考文献

- [1] IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2021.
- [2] WMO: WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN, No. 19, 2023.
- [3] Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., and Maksyutov, S.: Global Concentrations of CO₂ and CH₄ Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results, SOLA, **5**, 160-163, 2009.
- [4] Rodgers, C. D.: Inverse method for atmospheric sounding, World Scientific Publishing, 2000.
- [5] Saitoh, N., Kimoto, S., Sugimura, R., Imasu, R., Kawakami, S., Shiomi, K., Kuze, A., Machida, T., Sawa, Y., and Matsueda, H.: Algorithm update of GOSAT/TANSO-FTS TIR CO₂ product (Version 1) and validation of the UTLS CO₂ data using CONTRAIL measurements, Atmos. Meas. Tech., **9**, 2119-2134, doi:10.5194/amt-9-2119-2016, 2016.
- [6] Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirokani, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, T., Ishikawa, K., and Ogawa, T.: Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines, J. Atmos. Ocean Tech., **25**, 1744-1754, 2008.
- [7] Saitoh, N., Kimoto, S., Sugimura, R., Imasu, R., Shiomi, K., Kuze, A., Niwa, Y., Machida, T., Sawa, Y., and Matsueda, H.: Bias assessment of lower and middle tropospheric CO₂ concentrations of GOSAT/TANSO-FTS TIR Version 1 product, Atmos. Meas. Tech., **10**, 3877-3892, doi:10.5194/amt-10-3877-2017, 2017.
- [8] Holl, G., Walker, K. A., Conway, S., Saitoh, N., Boone, C. D., Strong, K., and Drummond, J. R.: Methane cross-validation between three Fourier transform spectrometers: SCISAT ACE-FTS, GOSAT TANSO-FTS, and ground-based FTS measurements in the Canadian high Arctic, Atmos. Meas. Tech., **9**, 1961-1980, doi:10.5194/amt-9-1961-2016, 2016.
- [9] Zou, M., Xiong, X., Saitoh, N., Warner, J., Zhang, Y., Chen, L., Weng, F. and Fan, M.: Satellite observation of atmospheric methane: intercomparison between AIRS and GOSAT TANSO-FTS retrievals, Atmos. Meas. Tech., **9**, 3567-3576, doi:10.5194/amt-9-3567-2016, 2016.
- [10] Olsen, K. S., Strong, K., Walker, K. A., Boone, C. D., Raspollini, P., Plieninger, J., Bader, W., Grutter, M., Hannigan, J. W., Hase, F., Jones, N., Mazière, M., Notholt, J., Schneider, M., Smale, D., Sussmann, R. and Saitoh, N.: Comparison of the GOSAT TANSO-FTS TIR CH₄ volume mixing ratio vertical profiles with those measured by ACE-FTS, ESA MIPAS, IMK-IAA MIPAS, and 16 NDACC stations, Atmos. Meas. Tech., **10**, 3697-3718, doi:10.5194/amt-10-3697-2017, 2017.
- [11] Belikov, D., Saitoh, N. and Patra, P. K.: An analysis of inter-hemispheric transport pathways based on 3-dimensional methane data by GOSAT observations and model simulations, J. Geophys. Res., **127**, 14, <https://doi.org/10.1029/2021JD035688>, 2022.
- [12] Kangah, Y., Ricaud, P., Attié, J-L., Saitoh, N., Hauglustaine, D., Wang, R., Amraoui, L. E., Zbinden, R. and Delon, C.: Summertime upper tropospheric nitrous oxide over the Mediterranean as a footprint of Asian emissions, J. Geophys. Res., **122**, 8, 4746-4759, 10.1002/2016JD026119, 2017.
- [13] Ricaud, P., Attie, J-L., Chahinell, R., Pasternak, F., Leonard, J., Pison, I., Pattey, E., Thompson, R. L., Zelinger, Z., Lelieveld, J., Sciare, J., Saitoh, N., Warner, J., Fortems-Cheiney, A., Reynal, H., Vidot, J., Booker, L., Berdeu, L., Saint-Pe, O., Patra, P. K., Dostal, M., Suchanek, J., Nevrlý, V. and Zwaftink, C. G.: The monitoring nitrous oxide sources (MIN₂OS) satellite project, Remote Sens. Env., **266**, 112688, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112688>, 2021.



陸域と水域を統合した衛星生態学の展開

Development of Satellite Ecology Integrating Terrestrial and Aquatic Ecosystems

楊 偉 助教

Yang Wei, Assistant Professor

特色ある研究の概要

本研究では、地球生物圏における水域と陸域に焦点を当て、それらの生態系機能情報を現地観測と衛星リモートセンシングで計測し、地球規模での様々な自然現象のメカニズムを解明し、モデル化する「衛星生態学」に取り組んでいる。具体的には、光合成が行われる植生域・水域を研究対象とし、衛星リモートセンシングによる様々な生物・物理パラメータの推定精度を向上させる新たなアルゴリズムを開発し、広域かつ長期的な衛星プロダクトを構築する。そして、構築した衛星プロダクトに基づき、光合成、炭素循環、生物多様性など生態系現象における時空間変動の特徴を解明したうえ、気候変動や人間活動のドライバーを因果関係統計解析によって求め、地球規模の生態系モデリングを実施する。このような研究によって、地球上の光合成量や炭素収支をより正確に把握できることが期待される。

We are dedicated to the research field of “satellite ecology”, focusing on integrating and comparisons analysis for terrestrial and aquatic ecosystems within the global biosphere. Our research employs field observations and satellite remote sensing to collect ecological function information for global ecosystems, with the objective of elucidating and modeling the mechanisms of a variety of natural phenomena on a global scale. To be more precise, our research focuses on vegetation and water regions where photosynthesis occurs, and new algorithms are developed to enhance the estimation accuracies of a variety of biogeophysical parameters through satellite remote sensing. Accordingly, we generate long-term global satellite products using the developed state-of-the-art algorithms and elucidate the characteristics of spatiotemporal variability in ecosystem phenomena, including photosynthesis, carbon cycling, and biodiversity. Subsequently, we will conduct global ecosystem modeling by identifying the drivers of climate change and human activity through methods such as causal statistical analysis. It is expected that this type of research will facilitate a more precise comprehension of photosynthesis and carbon budget on Earth.

1 はじめに

森林、草原、海洋などの生態系は、光合成により温室効果ガスであるCO₂を大気から吸収しており、グローバルな光合成量を正確に把握することは、地球規模の炭素循環と気候変化の理解・予測に不可欠である。リモートセンシングは、ローカルからグローバルスケールまで光合成の理解を進める上で極めて重要な役割を担ってきたが、依然としてかなりの不確実性が存在する。これらの不確実性は、生態系による推定モデルのメカニズムとパラメータに起因する部分もあり、複数のリモートセンシングプロダクト間の大きな不一致にも影響される。例えば、光合成量については、陸域生態系では総一次生産量（Gross Primary Production, GPP）、水域生態系では純一次生産量（Net Primary Production, NPP）の推定がそれぞれ独立して行われており、統合的な解析は容易ではない。その一方、多数の生物・物理パラメータの衛星プロダクトが作成されているが、それらの間で大きな不一致も指摘されている。さらに、一次生産量の既存衛星プロダクトは、全球の観測をシームレスに行うことが不可能であるため、湖沼や都市緑地などプロダクトに含まれていない要因が多く存在する。そこで、地球上の光合成量や炭素収支をより正確に把握するため、陸域・水域連環に基づく推定手法や生態系モデルの開発が必要になっている。

2 研究のねらい・上位目標

本研究室は、現地観測、衛星観測、生態系モデル、数理データサイエンスなどを活用し、地球規模での生態系生態学における理論・応用研究から社会実装まで取り組むことで、「衛星生態学」という学問をより一層発展させることを目指している。

特に最近では、超小型衛星群や静止気象衛星観測網など最先端の衛星観測技術に対するリモートセンシングの新しい理論・アルゴリズムを構築し、より高い計測精度で陸域・水域生態系機能情報を抽出することに力を入れている。そして、新たに得られた生態系機能情報、生態系モデル、数理データサイエンスなどを併用し、陸域・水域生態系における全球光合成、温室効果ガス排出、生物多様性など自然現象のメカニズムを解明し、モデル化することに取り組んでいる。

3 研究の実施方法

本研究の実施方法は、図1に示すように「衛星生態学」の3本柱で表される。まず、様々な現地調査、生態系観測ネットワーク、近接リモートセンシングなどを通じて、推定モデルの開発にグラウンドトゥルースを収集する（フィールド計測）。そして、3次元放射伝達モデル、線形・非線形最適化、機械学習／深層学習などの数理的手法を活用し、衛星リモートセンシングデータから様々な生物・物理パラメータの推定アルゴリズムを開発し、広域的かつ長期的な衛星プロダクトを構築する（衛星プロダクト作成）。最後に、陸域・水域における光合成、炭素循環、生物多様性など生態系現象における空間的・時間的変動と、気候変動や人間活動のドライバーを因果関係統計解析によって求め、地球規模の生態系モデリングを実施する（環境動態解析）。



図1 楊研究室で実施している「衛星生態学」の3本柱

Fig. 1 Three regimes of “satellite ecology”: field observations, creation of satellite products, and analysis of environmental changes.

4 研究成果

本研究室では、地球生物圏における水域と植生域に焦点を当て、現地観測と衛星観測を統合的・相互参照的に活用し、水域・植生域の生態系機能情報の計測方法の開発から生態モデリングに至るまでの研究成果を創出している（図2）。例えば、陸域生態系機能については、キャノピー放射伝達モデルにより葉面積指数^[1]、植生フェノロジー^[2]、林床植生指数^[3]、樹冠高^[4]、林分構

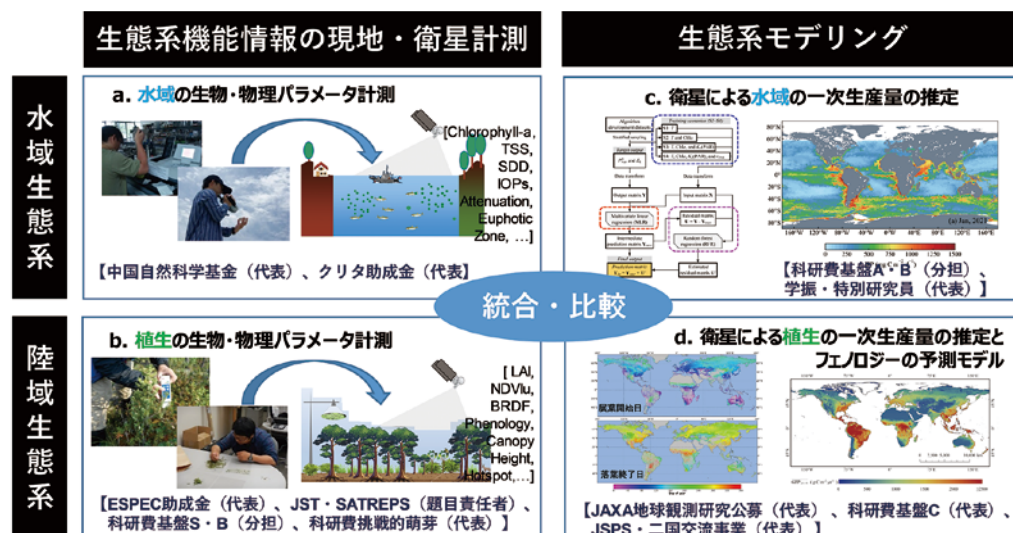


図2 これまでの研究の全体像：(a) 水域生態系と (b) 陸域生態系における生態系機能情報の現地・衛星計測および、(c) 水域生態系と (d) 陸域生態系における生態系モデリング

Fig. 2 Total framework of recent research: (a) measurement of biogeophysical parameters over water regions, (b) the same over vegetation regions, (c) satellite-based estimation of primary production over water regions, and (d) the same over vegetation regions with the phenology prediction model.

造^[5]に関する既存研究の推定精度を高めることに成功した。これらの研究成果はJAXAに採用され、新しい衛星プログラムであるGCOM-Cの葉面積指数プロダクトと全球植生フェロノジープロダクトとして構築・公開されている。加えて、全球規模での光合成モデルに重要な入力データが提供でき、GCOM-Cの全球植生一次生産量プロダクトの開発も進めている。

その一方、水域生態系においては、生物光学モデルに基づく衛星リモートセンシングによる水域の生物・物理パラメータである透明度^[6]、真光層（Euphotic Zone）^[7]、クロロフィル-a濃度^[8]、消散係数^[9,10]、固有光学特性^[11]の推定アルゴリズムを開発することができた。さらに、機械学習アルゴリズムに基づいてこれらの生物物理パラメータを統合し、藻類光合成量を推定する新しい光生理学モデルを開発できた^[12]。このモデルを用いて、1998年から2021年までの全球海洋一次生産量衛星プロダクトを構築した。このプロダクトによって、海洋生産量の経年変化の特徴を分析し、エルニーニョなど気候現象とその変化のメカニズムとの関連性を明らかにした。

上記のような研究成果に基づき、水域生態系と陸域生態系における光合成活動の統合的な解析が可能になったことで、既存研究と比較して、真にシームレスな地球規模の光合成モデルを実現することができた。その結果、地球全体の光合成量に占める陸域生態系の割合は1990年の約54%から2010年代には60%に増加したこと、海洋生態系の割合は46%から40%に減少したことを明らかにした（Yang et al., in preparation）。

最新の研究成果として、超小型衛星群画像PlanetScopeのグラフ最適化に基づく新しい整合アルゴリズムを紹介したい。このアルゴリズムは、Planet社で使用されている既存のアルゴリズム

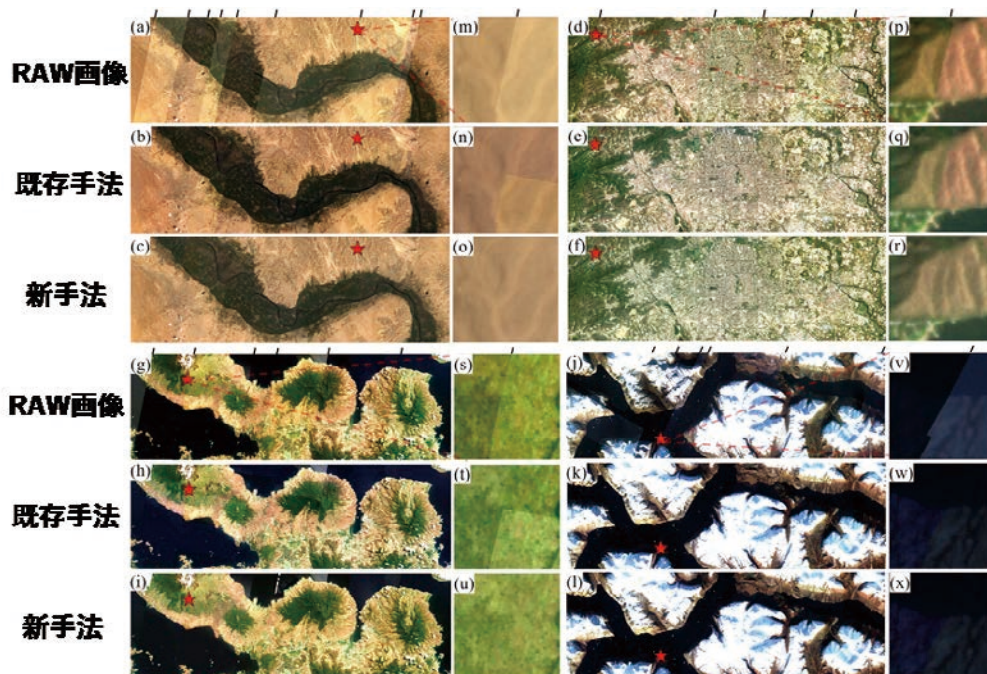


図3 PlanetScopeデータの整合化手法：（上）RAW画像、（中）既存手法、および（下）新手法で得られた画像の比較。新手法はグラフ最適化を活用して空間的变化がより滑らかなモザイク画像が作成できる。

Fig. 3 Comparison of the proposed and conventional methods for calibrating PlanetScope data. Raw images (top) and calibrated images with the conventional (middle) and proposed methods are compared.

より優れた画像整合 (Image Harmonization) 結果が示されており (図3)、今後、PlanetScope データの Ready-for-Analysis プロダクトの構築への活用が期待されている。

5 研究プレゼンスの向上

上述のように、これまでの研究成果はJAXAの最新の地球観測衛星であるGCOM-Cのデータ解析アルゴリズムや、世界的に活用が進んでいるPlanetScope画像の解析精度向上に貢献してきた。今後さらに研究プレゼンスを向上するためには、まず、最先端の高時空間分解能衛星観測 (例えば、静止気象衛星観測網、超小型衛星群) に基づいた陸域・水域生態系研究における既存のグローバルネットワークをさらに強化する。加えて、千葉大学のJ-PEAKS拠点および共同利用・共同研究拠点である環境リモートセンシング研究センターの研究枠組みをベースとした国際的研究活動を積極的に推進し、研究拠点としてのインパクトを国内外に拡大していきたい。特に、環境リモートセンシングの基礎理論に基づく国内外の優れた研究者を集めてWin-Winで活動する研究グループを形成し、衛星観測ビッグデータ研究分野における国際的・先導的な研究成果を継続的に創出していく。社会還元については、環境に関わる各学会や地域活動に積極的に参画し、研究者間での交流を活発に行うとともに、行政関係者や一般市民を含む様々なステークホルダーと具体的な環境問題についての意見交換を行う。同時に、Future EarthやSustainable Development Goals (SDGs) など超学際的な研究に対する関心を持ち、自分の専門知識で貢献できるように取り組む。

6 引用文献

- [1] Toshiyuki Kobayashi, Hideki Kobayashi, Wei Yang, Hiroshi Murakami, Yoshiaki Honda, Kenlo Nishida Nasahara, “The development of a global LAI and FAPAR product using GCOM-C/SGLI data”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **202**, 479-498, 2023 (The U.V. Helava Award Best Paper 2023 of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing [ISPRS]).
- [2] Wei Yang, Hideki Kobayashi, Cong Wang, Miaogen Shen, Jin Chen, Bunkei Matsushita, Yanhong Tang, Yongwon Kim, M. Sydonia Bret-Harte, Donatella Zona, Walter Oechel, Akihiko Kondoh, “A semi-analytical snow-free vegetation index for improving estimation of plant phenology in tundra and grassland ecosystems”, *Remote Sensing of Environment*, **228**, 31-44, 2019.
- [3] Wei Yang, Hideki Kobayashi, Rikie Suzuki, Kenlo Nishida Nasahara, “A simple method for retrieving understory NDVI in sparse needleleaf forests in Alaska using MODIS BRDF data”, *Remote Sensing*, **6**, 11936-11955, 2014.
- [4] Wei Yang, Akihiko Kondoh, “Evaluation of the Simard et al. 2011 Global Canopy Height Map in Boreal Forests”, *Remote Sensing*, **12**, 1114, 2020.
- [5] Wei Yang, Hideki Kobayashi, Xuehong Chen, Kenlo Nishida Nasahara, Rikie Suzuki, Akihiko Kondoh, “Modeling three-dimensional forest structures to drive canopy radiative transfer simulations of bidirectional reflectance factor”, *International Journal of Digital Earth*, **11**(10), 981-1000, 2018.
- [6] Takehiko Fukushima, Bunkei Matsushita, Yoichi Oyama, Kazuya Yoshimura, Wei Yang, Meylin Terrel, Shimako Kawamura, Akito Takegahara, “Semi-analytical prediction of Secchi depth using remote sensing reflectance for lakes with a wide range of turbidity”, *Hydrobiologia*, **780**, 5-20, 2016.
- [7] Wei Yang, Bunkei Matsushita, Kazuya Yoshimura, Jin Chen, Takehiko Fukushima, “A modified semianalytical algorithm for remotely estimating euphotic zone depth in turbid inland waters”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **8**, 1545-1554, 2015.
- [8] Wei Yang, Bunkei Matsushita, Jin Chen, Takehiko Fukushima, “Estimating constituent concentrations in case II waters

-
- from MERIS satellite data by semi-analytical model optimizing and look-up tables”, *Remote Sensing of Environment*, **115**, 1247-1259, 2011.
- [9] Wei Yang, Bunkei Matsushita, Jin Chen, Takehiko Fukushima, “A relaxed matrix inversion method for retrieving water constituent concentrations in case II waters: the case of Lake Kasumigaura, Japan”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **49**, 3381-3392, 2011.
- [10] Wei Yang, Bunkei Matsushita, Jin Chen, Kazuya Yoshimura, Takehiko Fukushima, “Application of a semianalytical algorithm to remotely estimate diffuse attenuation coefficient in turbid inland waters”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **11**, 1046-1050, 2014.
- [11] Wei Yang, Bunkei Matsushita, Jin Chen, Kazuya Yoshimura, Takehiko Fukushima, “Retrieval of inherent optical properties for turbid inland waters from remote-sensing reflectance”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **51**, 3761-3773, 2013.
- [12] Zhaoxin Li, Wei Yang, Buneki Matsushita, Akihiko Kondoh, “Remote estimation of phytoplankton primary production in clear to turbid waters by integrating a semi-analytical model with a machine learning algorithm”, *Remote Sensing of Environment*, **275**, 113027, 2022.



静止軌道衛星を活用した都市・植生の熱環境解析

Thermal Environmental Analysis in Urban and Vegetation Using Geostationary Satellite Data

山本 雄平 助教

Yamamoto Yuhei, Assistant Professor

特色ある研究の概要

静止軌道衛星の観測データから地表面温度、蒸発散量、光合成量などの陸面物理量を推定する方法を開発し、これらを用いて、都市および植生環境の課題解決に取り組んでいる。現在運用されている第三世代の静止軌道衛星は10分という高い時間分解能をもつ。この強みを陸面モニタリングに最大限活かすため、陸面物理量の推定においては、より短い時間スケールでも利用できるよう不確かさが小さい推定アルゴリズムの考案や、プロダクトの信頼性を高めるための多様な環境での検証活動を実施している。応用研究においては、従来の陸域リモートセンシングではアクセスが困難であった数時間から数日の環境変動に着目し、都市土地利用と温度上昇率との関係や、植物が局所的な高温乾燥環境で受けるストレスの検出、また熱波や寒波によるそれらへの影響などを明らかにする研究を実施している。

We develop estimation methods of terrestrial physical quantities such as land surface temperature, evapotranspiration, and gross primary production from geostationary satellite data, addressing challenges in urban and vegetation environments. The currently operational third-generation geostationary satellites, like Himawari-8/9, offer a high temporal resolution of 10 minutes. To fully utilize this advantage for terrestrial monitoring, we propose low-uncertainty estimation algorithms that can be applied to shorter time scales and conduct validation activities across diverse environmental conditions to enhance product reliability. In application studies, we focus on thermal environmental variations over timescales of a few hours to several days, which have been difficult to capture with conventional land remote sensing. Our work investigates the relationship between urban land use and temperature rise, detects plant stress under hot/arid conditions, and examines the impacts of heatwaves and cold spells.

1 はじめに

近年、気候変動に伴い、熱波や寒波などの異常気象が頻発化・激甚化しており、都市と植生環境は、熱中症被害の増加や農作物の高温・低温障害、森林火災、干ばつなど多岐にわたる課題に

直面している。これらに相まって、都市化の急速な拡大や植生の生育環境もめまぐるしく変動しており、陸域の熱・水・炭素循環はさらに複雑化している。このような現状をより正確に把握してモデリングし、将来予測へと繋げるためには、高時空間分解能で現象を捉える衛星リモートセンシングの役割がますます重要となっている。特に、静止軌道衛星の高頻度観測は、日変化や季節変動を含む動的な熱環境の理解に有効であり、都市と植生の熱環境評価における有力なツールとなり得る。

2 研究のねらい・上位目標

本研究では、都市と植生の熱環境をより詳細な時空間スケールで理解することを目的とし、これによって持続可能な都市環境の形成や極端高温リスクの軽減策、および異常気象イベントに対する植生の応答メカニズムの解明に貢献することを目指す。具体的には、以下の目標に取り組んでいる：

- A) 高精度な陸面物理量プロダクトの開発：第三世代の静止軌道衛星ひまわりのデータを活用し、従来よりも高精度な地表面温度や光合成量、蒸発散量などの推定手法を開発する。
- B) 熱環境変動の新たな検出手法の考案：開発した陸面物理量データを用いて、都市および植生域における熱環境の異常をより短い時間スケールで捉える新たな検出手法を構築する。
- C) 都市環境への応用：建物の高さや密度、緑地の配置などの街区構造が熱環境に与える影響を解析し、持続可能な都市環境設計および極端高温への緩和策に向けた知見を提供する。
- D) 植生環境への応用：異常気象イベント（熱波、干ばつ、寒波）に対する植生の応答特性を解析し、持続可能な植生管理や農業の気候適応策への貢献を目指す。

3 研究の実施方法

地表面温度の算出では（図1）、前処理として地表面放射率決定が必要となる。地表面は多様な要素で構成されており、その中には積雪域の変化、植生の季節変化、水田の湛水など、自然および人為的要因によって変動するものがある。本研究では、ひまわり8号で新たに追加された可視・近赤外バンドを活用することで、植生の検出（NDVI）、水域の検出（NDWI）、雪氷面の検出（NDSII）を可能とする点に着目した。これらの情報を用いて、植生の季節変化や水田の湛水、積雪による放射率の変化を考慮する手法を新たに考案し、従来手法に組み込んだ。さらに、植生キャノピー内の cavity effect を推定するモデルを都市用に拡張し、都市キャノピー内の cavity effect が地表面放射率に与える影響を評価した^[1]。また、ひまわり8号の赤外センサーは、熱赤外窓領域に3バンドの観測波長帯を有しており、従来型のセンサーよりも1バンド多い。この特徴を活かし、非線形3バンドアルゴリズムを考案して精度評価を行い、従来のアルゴリズムと比較して精度および入力データのエラーに対する堅牢性を検証した^[2]。その後、従来のアルゴリズムおよび非線形3バンドアルゴリズムを実観測に適用し、アジア・オセアニアの地上フラックス観測ネットワーク（AsiaFlux・OzFlux）のデータ、および国際宇宙ステーション（ISS）の地表面温度推定データを用いて精度評価を行った^[3]。

さらに、陸域観測の基礎情報として、ひまわり8号の観測位置情報の精度検証も実施した^[4]。

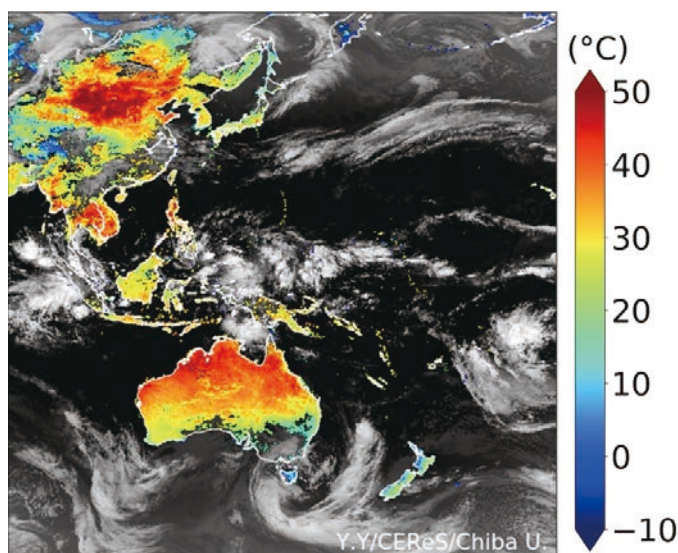


図1 ひまわりから推定された地表面温度

Fig. 1 Land surface temperature estimated from Himawari-8 image data.

加えて、本研究センターではひまわりの日射量データも提供されており、これと地表面温度データを組み合わせることで、光合成量や蒸発散量の推定を試みている。推定手法の構築にあたっては課題も多い。例えば、従来の衛星による植生の光合成量推定は、約1週間から1か月単位の時間スケールで行われており、光合成量推定モデルも短時間スケールにおける植生の環境応答は考慮されていなかった。そこで本研究では、日内スケールの光合成活動も表現可能な推定モデルを考案し、ひまわり8号から推定された地表面温度と日射量を入力変数として、光合成量の日内変動を推定する手法を開発した。

ひまわり8・9号の大きな特長は観測頻度の高さ（10分ごと）であり、晴天日には地表面温度の日変化の波形を詳細に捉えることができる。地表面温度の日変化波形は、都市域では土地利

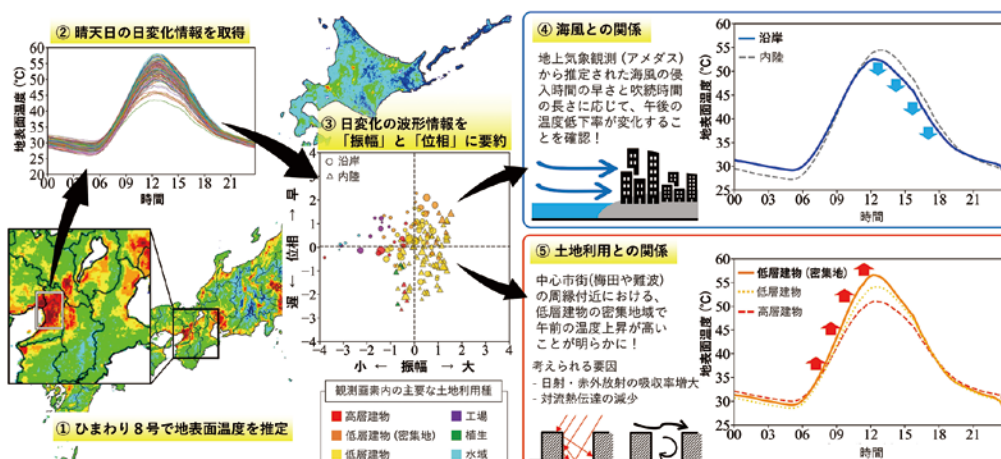


図2 地表面温度の日変化情報の抽出：都市環境への応用例

Fig. 2 Extraction of diurnal changes in land surface temperature: Application to urban environments considering the effects of sea breeze and land coverage.

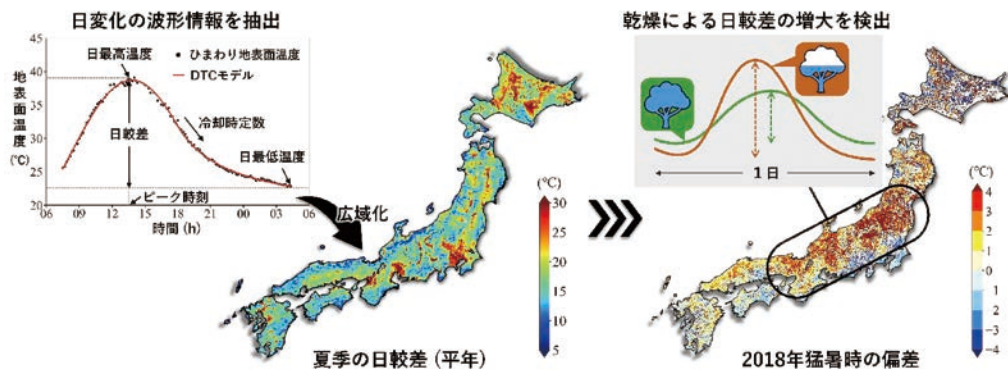


図3 地表面温度の日変化情報の抽出：植生環境への応用例

Fig. 3 Extraction of diurnal change information of land surface temperature: Application to vegetation environments, including examples where extreme heat affects vegetation drying.

用の熱特性を反映して変化し、植生域では水分量の変動に応じて変化すると考えられる。本研究では、これらの関係が実際の都市環境や植生環境の解析に応用可能であることを検討した。波形の抽出方法として、多変量解析を用いたモードの抽出 (図2)^[5] や、DTC (日周温度サイクル) モデルという半経験モデルを適用することで、日最高温度・日較差・ピーク時刻・冷却時定数などの日変化情報を表すパラメータを抽出するアプローチを試みた (図3)^[6]。

4 研究成果

地表面放射率の推定において、本研究は都市キャノピー内の cavity effect が植生キャノピー内のものと同等、あるいはそれ以上であることを明らかにし、都市域における cavity effect の推定手法を新たに組み込んだ^[1]。さらに、雲のかかった画素を除外するための雲域検出法を作成し、ひまわり 8・9号の視野内の地表面温度を実時間で算出する処理体系を完成させた^[2]。地表面温度の推定アルゴリズムについては、本研究で考案された非線形3バンドアルゴリズムが、推定誤差の大きさや温度依存性・湿度依存性・衛星天頂角依存性のいずれにおいても従来手法より優れていることを示した。また、入力データの誤差に対しても最も高い安定性を有することが確認された。実観測による検証では、観測角度が高いケースや高温湿潤な大気の場合など、推定精度が低下しやすい環境下においても、非線形3バンドアルゴリズムが最も高い精度を示した。例えば、中国内陸域や東南アジアの熱帯域、オーストラリア大陸の乾燥域において、日中の地表面温度を推定したところ、提案アルゴリズム (YAM) は他のアルゴリズムと比較して誤差を1.0℃以上低減できることが確認された (図4)。

真夏の晴天日における大阪の都市域を対象に、ひまわり 8号データから地表面温度を高頻度に推定し、得られた日変化の波形を解析した。その結果、海風の到達時間や吹続時間、および建物の密集度が、日変化の波形の主要要素 (振幅と位相) に影響を与えることを明らかにした。特に、低層建物が密集するエリアでは、中・高層建物の密集地や低層建物の非密集地とは異なり、午前中の温度上昇率が顕著に高いことを観測データから初めて明らかにした (図2)^[5]。

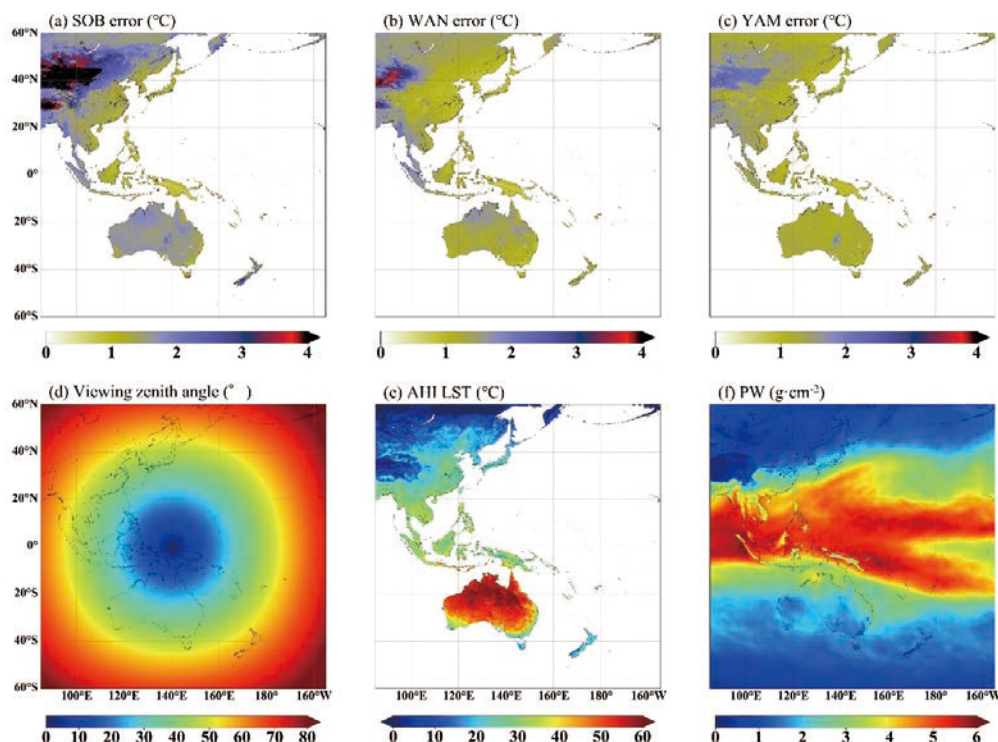


図4 2018年10月の日中における、3種のアプローチ (a: SOB、b: WAN、c: YAM) で推定された地表面温度の誤差分布と、d) 観測天頂角、e) 地表面温度、f) 可降水量分布。

Fig. 4 Error distribution of land surface temperature estimated by three algorithms (a: SOB, b: WAN, c: YAM) during the daytime in October 2018, d) observation zenith angle, e) land surface temperature, and f) precipitable water distribution.

2018年の夏に日本周辺で発生した猛暑を対象に、DTCモデルで抽出した日最高温度・日較差・ピーク時刻・冷却時定数などのパラメータのうち、どれが乾燥状態の検出に有用であるかを調査した。調査では、土壌水分量・潜熱量・光合成量・分光植生指標との関係に着目した。その結果、日最高温度や日最低温度、および日較差は安定的に推定できる一方で、ピーク時刻や冷却時定数は地形の斜面向きや観測角度の影響を受けやすく、複雑地形の多い日本での適用には困難があることが明らかになった。さらに、猛暑による日較差の増大は、土壌水分量や潜熱量の低下と対応し、分光植生指数が低下した地域では日最高温度の上昇が観測された。この結果から、日較差と日最高温度を活用することで、分光植生指数では判別が困難なレベルの乾燥シグナル、すなわち「大規模な枯渇や変色には至っていないが、乾燥化が進行している状態」を検出できることを示した (図3)^[6]。

5 研究プレゼンスの向上

本研究は、静止軌道衛星データの高度利用を通じて、都市と植生の熱環境を新しい視点から解析するものであり、その成果は科学研究、政策立案、社会実装の各領域において広範な波及効果をもたらす可能性がある。

科学的な側面では、都市域や植生域の熱環境を高時空間分解能で解析する手法の確立により、従来の衛星リモートセンシングでは見過ごされてきた現象やメカニズムの解明が期待される。例

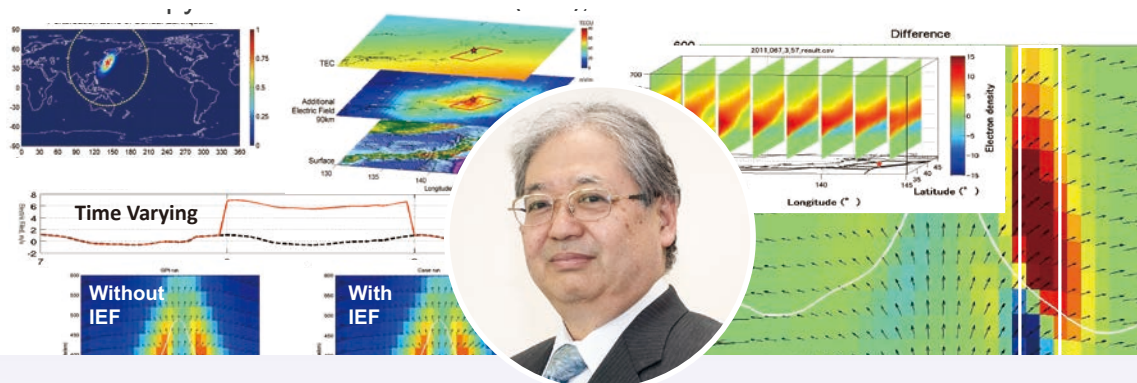
えば、都市部ではヒートアイランド現象の微細構造や建物配置の影響、植生域では乾燥ストレスの早期検出といった具体的な課題に対して、より正確で実用的な知見を提供できる。これにより、都市気候学や植生動態学の分野において、既存のモデルや理論を精緻化し、新たな研究フロンティアを切り拓くことが可能になる。

応用面では、得られたデータと手法を都市計画や環境モニタリング、農業管理に組み込むことで、実社会への貢献が期待される。都市部では、局地的な熱環境の把握を基に、エネルギー効率の良い都市デザインや極端高温リスクの軽減策を実現し、持続可能な都市環境の形成に寄与する。一方、農業分野では、光合成量や蒸発散量の高精度推定により、作物の収量予測や水資源管理の最適化が可能となる。また、乾燥ストレスを早期に検出する技術は、森林や草地の劣化予測や生態系保全への応用も期待される。

国際的には、東南アジアなどの過剰都市化が進む地域や、気候変動の影響が顕著な地域に対して、本研究で開発した技術や知見を移転・展開することで、地球規模の環境リスク評価や適応策の策定に貢献できる。さらに、国際的な学術コミュニティや政策プラットフォームにおける共同研究の機会を創出し、日本のリモートセンシング技術の先進性を示すことで、国際的な研究プレゼンスの向上が期待される。

6 引用文献

- [1] Yamamoto, Y., and H. Ishikawa, 2018: Thermal Land Surface Emissivity for Retrieving Land Surface Temperature from Himawari-8, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **96B**, 43–58. DOI: 10.2151/jmsj.2018-004.
- [2] Yamamoto, Y., H. Ishikawa, Y. Oku, and Z. Hu, 2018: An Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval Using Three Thermal Infrared Bands of Himawari-8, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **96B**, 59–76. DOI: 10.2151/jmsj.2018-005.
- [3] Yamamoto, Y., K. Ichii, Y. Ryu, M. Kang, and S. Murayama, 2022: Uncertainty quantification in land surface temperature retrieved from Himawari-8/AHI data by operational algorithms, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **191**, 171–187. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.07.008.
- [4] Yamamoto, Y., K. Ichii, A. Higuchi, and H. Takenaka, 2020: Geolocation Accuracy Assessment of Himawari-8/AHI Imagery for Application to Terrestrial Monitoring, *Remote Sensing*, **12**(9), 1372. DOI: 10.3390/rs12091372.
- [5] Yamamoto, Y., and H. Ishikawa, 2020: Influence of urban spatial configuration and sea breeze on land surface temperature on summer clear-sky days, *Urban Climate*, **31**, 100578. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100578.
- [6] Yamamoto, Y., K. Ichii, Y. Ryu, M. Kang, S. Murayama, S.-J. Kim, and J. R. Cleverly, 2023: Detection of vegetation drying signals using diurnal variation of land surface temperature: Application to the 2018 East Asia heatwave, *Remote Sensing of Environment*, **291**, 113572. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113572.



衛星・地上 SensorWEB による巨大地震・津波の監視と予測 — 新世代地震情報システムの構築とそれを利用したレジリエントな社会の創成 —

Monitoring and Forecast of Large Earthquakes and Tsunamis
by Satellite- and Ground-Based SensorWEB
— Creation of a Next-Generation Early Warning Information System
for Effective Earthquake and Tsunami Crisis Response Navigators —

服部 克巳 教授

Hattori Katsumi, Professor

特色ある研究の概要

地震災害に強靱な社会システムを構築するために、衛星・地上リモートセンシングデータを駆使して、タイムリーかつ必要な品質・精度で地震・津波に関連する情報を受益者に提供する新世代地震情報システムを開発している。具体的には、①衛星・地上観測ビッグデータ（SensorWEB）による地震前兆情報の抽出と物理機構の解明、②地震前兆現象を用いた地震予測確率数理モデルの開発と応用、③電離圏変動を利用した緊急津波速報の開発を国際共同研究で実現し、受益者のニーズにあった地震・津波に関する事前情報を抽出する研究を行っている。究極的には、地震災害にレジリエントな社会創成に資する事前情報の表現や手段は、受益者（意思決定者）と協働して考える必要がある。

To build a social system resilient to earthquake disasters, we will develop a next-generation early warning information system for effective earthquake and tsunami crisis navigators in a timely manner and with the necessary quality and accuracy by making full use of satellite and ground remote sensing data (SensorWEB). Specifically, through international joint research, we will 1) extract information on earthquake precursors and elucidate their physical mechanisms using satellite and ground-based big data, 2) develop and apply a stochastic probability model of earthquake occurrence using earthquake precursor phenomena, and 3) develop an emergency tsunami warning system using ionospheric electron density variations. We are studying how to extract earthquake/tsunami related advance information that meets the needs of beneficiaries. And how to express and provide such information to beneficiaries (decision makers) in a way that encourages specific and appropriate actions and realizes a resilient society that ensures safety against disasters.

1 はじめに

本研究は衛星・地上観測データを用いた地震短期予測や地震活動監視についての研究であり、地震・津波による人的・経済的被害を軽減するためのイノベーション創出と社会実装（減災サステナブル学の創成）を目指している。従来のリモートセンシング技術と地球電磁気学、固体地球科学、電波物理学、超高層物理学、統計学、情報工学等を融合させ、さまざまな前兆現象を精度よく検出する手法を開発し、データ駆動型の地震短期予測・津波の実時間監視を国際共同研究にて推進している。

2008年四川地震（M8.0）、2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）、2016年熊本地震（M7.3）、2024年能登半島地震（M7.6）など毎年のように国内外で被害地震が発生しているが、長年の努力にもかかわらず、地震の予測は達成できていない。1995年の兵庫県南部地震（M7.3）以降、地震予測は不可能で建物の堅牢化が最重要課題であるという風潮になっている。地震による甚大な災害は、何千人もの命を奪い、大きな経済的損失を引き起こす。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では地震動、津波、原発事故等の複合災害として、インフラ・公衆衛生問題、株式市場の一時的な混乱等などの広範な問題を引き起こした。このことは地震災害の軽減には多様な学際的な取り組みが必要であることを示しており、なかでも、その予測（早期発見）が必要不可欠である。実際に国民が近い将来に実現してほしい科学技術の中で、地震予知は常に上位に挙げられている。予測・速報情報の精度が高く、かつ迅速であれば、想定される人的・物的被害は軽減される。例えば、2007年に実用化された緊急地震速報では、精度・リードタイムが十分であれば、半導体工場での想定被害数百億円が回避できることが実証されている。したがって、緊急地震速報に加えて、精度のよい地震予測情報や津波情報が活用できれば、経済的損失はさらに軽

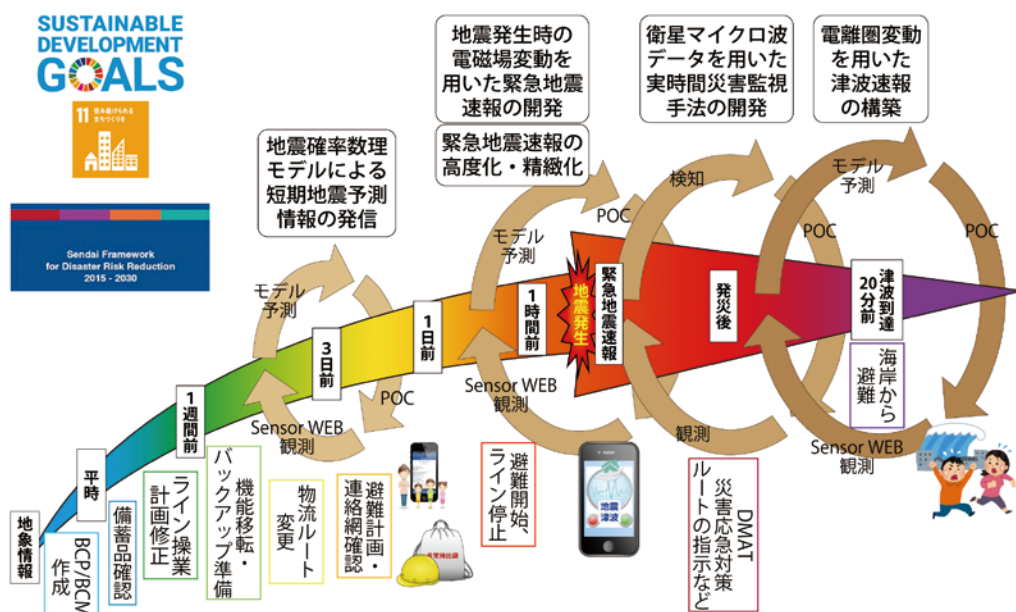


図1 新世代地震情報システムの概念図

Fig. 1 Conceptual diagram of the Next-Generation Early Warning Information System for Effective Earthquake and Tsunami Crisis Navigators.

減できると期待される。図1に新世代地震情報システムの概念図を示す。首都圏直下型地震や東南海地震（津波）では、数万人の犠牲者が想定されているが、信頼度の高い情報（緊急地震速報では数秒程度、予測情報では数日前からの早期警報）による避難、防災行動が期待される。また、データや情報を社会インフラシステムへと組込むことによって、原子力発電所や石油コンビナートの防災システム、自動運転（道路）制御システム、港湾・物流システム、工事管理システム等の高機能化・高度化を図り、生命や経済的損失を軽減することも期待される。さらには、対象者毎に必要な情報を抽出し、適切なBCP／事前BCP立案等のコンサルティングやアドバイスをを行うことにより、人命・資産・製造工場などの安全確保、復旧時間の短縮が全国規模で図られ、ひとりひとりに届く危機対応ナビゲータとなることが期待される。

2 研究のねらい・上位目標

地震津波に関する情報は、現状では、数十年単位の長期予測を除くと、緊急地震速報を含め地震発生後の情報しか存在しない。2024年8月の南海トラフ地震臨時情報は南海トラフ巨大地震想定震源域内のプレート境界にてM7クラスの地震が発生し、過去の経験から南海トラフ巨大地震が発生する確率が通常より高まったというもので、長期予測の手法と類似している。また、緊急地震速報は地震波のP波とS波の速度差を利用して、大きな揺れの到達時間を知らせるものなので、ある程度離れた場所で発生した大地震に対しては効力があるが、直下型地震ではP波とS波の到達時間差がほとんどなく、効果がない。一方、気象災害では、降雨量、風速等の情報は不確実性を伴いながらも事前に公開され、社会にその対応を促し、社会の側も予測の不確実性を考慮しつつ事前対応策が構築されている。そこで私たちは、衛星と地上で観測された様々なパラメータのビッグデータを解析することによって、地震の準備過程に発生する現象（前兆現象）を精確に捉えて理解し、究極的なゴールとして、前兆現象を用いた大地震の短期予測技術の開発と短期予測の実用化を目指す研究を行っている。台風や豪雨等の気象災害に対するレーダー情報や進路予想のように、巨大地震イベントに関する情報を事前に把握できれば、それに対応する準備や心構えも可能になる。つまり、マグニチュード7以上の巨大地震

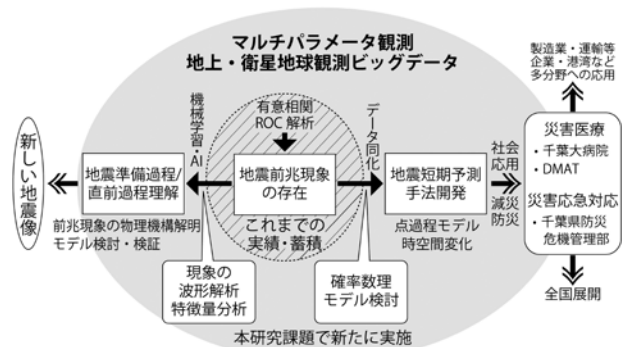


図2 衛星・地上 SensorWEB による巨大地震・津波の監視と予測の概要

Fig. 2 Overview of monitoring and forecasting of mega-earthquakes and tsunamis by satellite and ground-based SensorWEB.

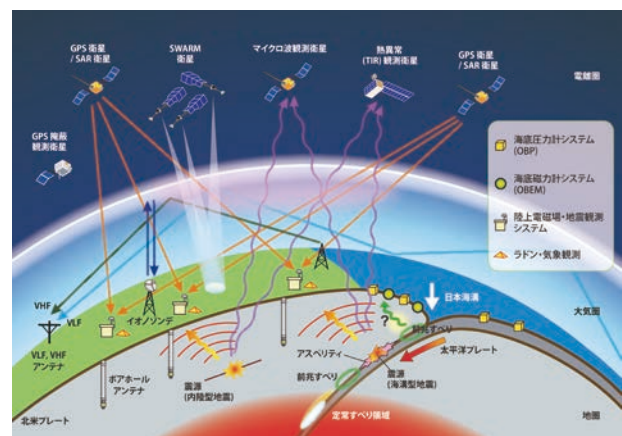


図3 衛星・地上観測ビッグデータ（SensorWEB）

Fig. 3 Satellite and ground-based big data observation (SensorWEB).

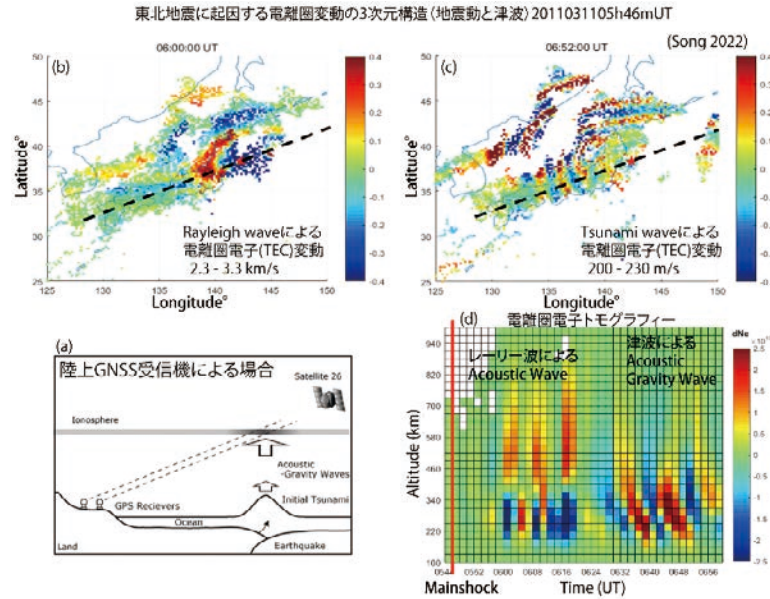


図5 GNSSによる津波検知の概念図。(a) 2011年東北地震時に検知された電離圏電子変動、(b) 地震表面波によって励起されたTEC変動、(c) 津波励起TEC変動、(d) 電離圏電子密度の3次元時間変動。

Fig. 5 Conceptual diagram of tsunami detection by GNSS. (a) Ionospheric electron density fluctuation detected during the 2011 Tohoku earthquake, (b) TEC fluctuation excited by earthquake surface waves, (c) Tsunami excited TEC fluctuation, (d) 3-D time variation of ionospheric electron density.

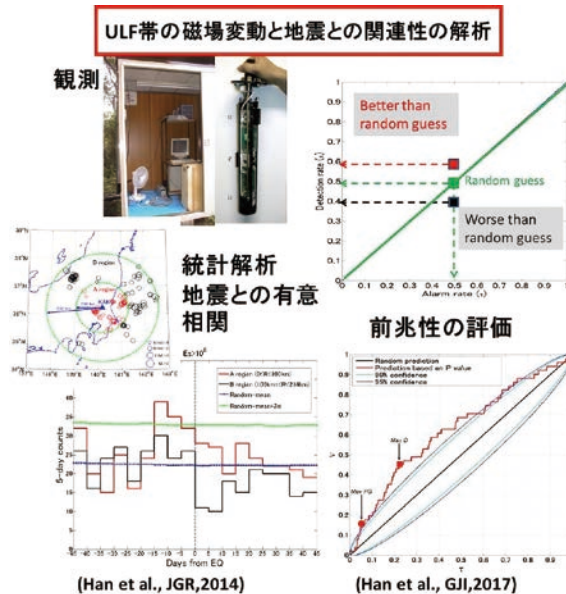


図6 ULF磁場の異常変動と地震との関係。(a) 磁場観測の例。(b) (c) 気象庁柿岡観測所 (KAK) の磁場変動と2000-2010年までの地震との相関を調査したところ、ある規模以上の地震の5-15日前に磁場異常が有意に出現し、地震の規模や震源距離依存性があることもわかった。(d) (e) 前兆性を調査したところ、有意な前兆性が確認された。

Fig. 6 Relationship between ULF magnetic anomaly variations and earthquakes. (a) An example of magnetic observation. (b)(c) The correlation between magnetic field variations at the Kakioka Observatory (KAK) of the JMA and earthquakes from 2000-2010 showed that magnetic anomalies significantly appeared 5-15 days before earthquakes above a certain magnitude and were also found to be dependent on earthquake magnitude and hypocenter distance. (d)(e) The investigation of precursor characteristics also confirmed significant precursor characteristics by ROC analysis.

学的なパラメータに加えて、地殻活動を予測するパラメータとして有効である可能性が極めて高い^[1]。房部グループでは2000年より南関東を中心に、地震前兆電磁気現象を利用した地震の短期予測手法の検討をULF帯（ここでは周波数1 Hz以下）の電磁気観測を中心に実施している^[2-8]。房総、伊豆、茨城柿岡地域について、2000～2010年の深夜のULF帯の磁場強度変動と地震発生との関係を統計解析したところ、観測点から100 km以内で発生したある程度大きな地震活動とULF帯磁場の鉛直成分の活動度に有意な相関があり、その相関の強さは地震活動の規模や距離に依存する傾向があることが分かった^[9-11]。また、Receivers Operating Characteristics (ROC) 的解析であるMolchan Error Diagram (MED) 解析から磁場異常は地震前兆的に発生する傾向を示した^[9, 12, 13]。つまり、地震前兆現象の存在が科学的に確認され（図6は柿岡の例）、前兆現象検知による確率的な地震短期予測の可能性が示された。一方でその発生機構は未解明であるが、2002年10月および2007年8月の房総slowslip等に関連して、図7に示す矩形電磁場変動が深夜に観測され、その波形の振幅や極性から地下に線電流源を仮定すると現象を理論的に説明でき、地下流体の流動による電流励起による電磁現象の発生を示唆している^[14]。電離層電子密度に関しても同様な結果を得ている（図8）^[16-19]。また、電離圏電子変動には地震発生時の地表面変動や津波に関連する変動も出現し、津波の早期検知が期待されている^[20, 21]。本プロジェクトの核心的な問いは、地震活動と前兆的電磁場変動に関して、「有意相関が成立するのか？」「相関がある場合、前兆的変動なのか？」「それを用いた地震短期予測が可能か？」「地震準備過程時に何が起きているのか？」である。これまでは個別の観測パラメータに対して上記の調査がなされてきた。本プロジェクトでは、図9のように統計的有意性やROC解析による前兆性の実証された複数の地震前兆パラメータを用いた、データ駆動型の確率数理モデルを構築し、短期地震予測の可能性を検証している。

地震発生過程（予測）に関して、現在世界で最も優れた確率数理モデルはETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) モデル^[24]である。ETASモデルは点過程モデルで、図4の式の左半分のように地震カタログを分析して、地震の背景レートと地震の自己励起による発生予測情報から地震（余震）発生確率の時間変化を予測する。本プロジェクトでは、ETASの点過程モデ

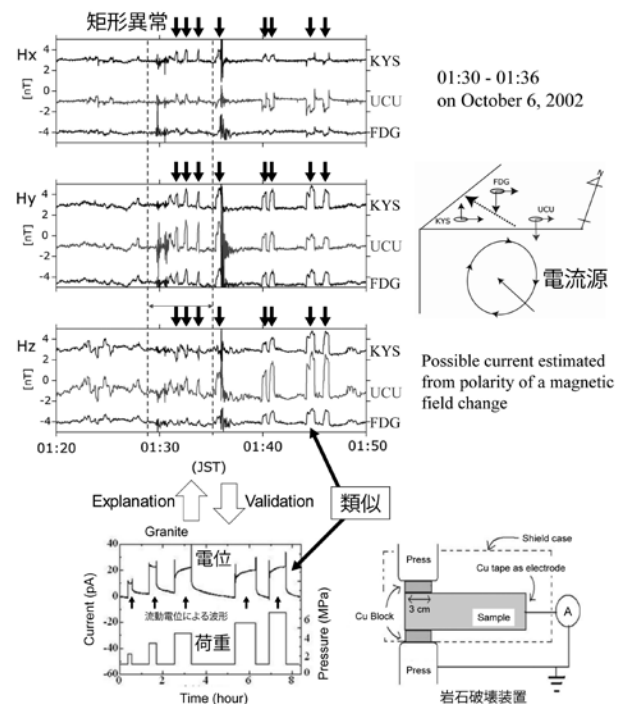


図7 南房総3観測点で観測された矩形磁場変動の例とその極性から推測される地下電流源 (Takahashi et al., 2007)^[14]と岩石破壊実験で観測された波形の比較検討。

Fig. 7 Examples of rectangular magnetic field variations observed at three stations in Minami-Boso and their polarity inferred from subsurface current sources (Takahashi et al., 2007)^[14] and waveforms observed in rock fracturing experiments^[15].

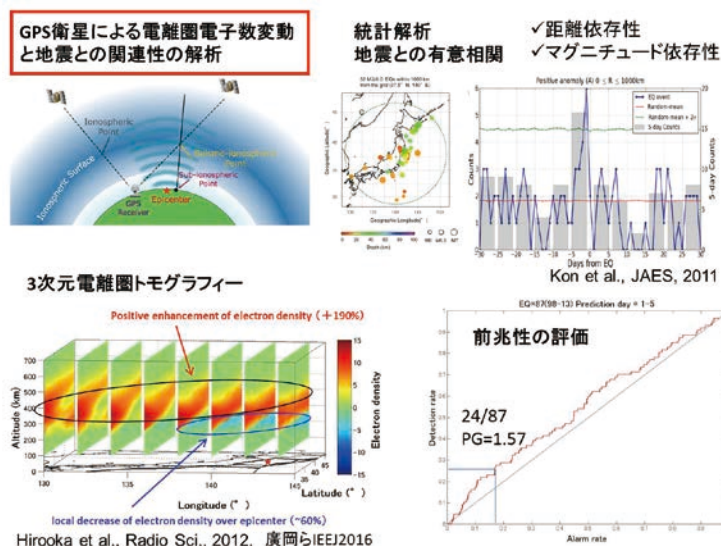


図8 電離圏電子数の異常変動と地震との関係。(a) GPS衛星による電離圏電子数観測の概念図。(b) (c) 本州上空の電離圏電子数の変動と2000-2010年までの地震との相関を調査したところ、M6以上の地震の1-5日前に10時間以上電子数が 2σ 以上増加する異常が有意に出現し、地震の規模や震源距離依存性があることもわかった。(d) 前兆性を調査したところ、有意な前兆性が確認された。(e) 2011年の東北地震 (M9) についても同様な変動が確認され、その3次元電子密度分布を調査したところ、震央上空約2-300 kmの電子密度が減少し、その周囲や上空では増加していることがわかった^[20, 21]。これらの変動は、水平東向きの電場が付加的にかかることで説明可能である。

Fig. 8 Relationship between anomalous fluctuations in ionospheric electron counts and earthquakes. (a) Conceptual diagram of ionospheric electron count observation by GPS satellites. (b)(c) We investigated the correlation between the variation of ionospheric electron counts over Honshu and earthquakes from 2000 to 2010, and found that anomalies in which the electron counts increased by more than 2σ for more than 10 hours significantly appeared 1-5 days before earthquakes of M6 or greater, and that they were dependent on the magnitude and hypocentral distance of the earthquake. (d) We investigated the precursor nature of the earthquake and found precursor nature by ROC. (e) Similar variations were observed for the 2011 Tohoku earthquake (M9), and investigation of its 3D electron density distribution revealed a decrease in electron density at about 2-300 km above the epicenter and an increase around and above the epicenter^[20, 21]. These variations can be explained by an additional horizontal, eastward electric field.

ルの条件付き強度の加法性を利用して、地上または衛星観測された前兆異常による予測情報を外部励起部分として追加した包括的な地震予測モデルを構築する。各種前兆現象のカーネル関数は前兆現象の特徴に応じて個別に開発する。前兆現象として、地上観測データ (ULF電磁場、ELF/VLF/LF電磁場、GNSS電離圏電子数変動、イオノゾンデ電離圏電子変動、GNSS地表変位、地震活動度、ラドン濃度等)^[1-14, 16-19, 21-23, 25-27]、衛星観測データ (衛星熱赤外変動 (HimawariやMODIS等)^[29, 30]、衛星電磁場^[31]、衛星高度電子数変動^[32]) 等を利用する。前兆パラメータは固定せず、研究の進展に応じて、追加や削除が可能なopenシステムであることが特徴で、地震活動との統計的有意性およびROC的解析による前兆性が追加の条件となる (図4、図9)。まずは、統計的有意性や前兆性が担保されているULF磁場変動、GNSS電離圏電子数変動、衛星熱赤外変動について高精度時変モデルを開発し、時空間へ拡張していく。ETASは、地震データが入力の地震発生予測数理モデルで、地震の大きさの分布は発生時間や発生場所から独立であるとされるGutenberg-Richter則 (地震の発生頻度と規模の関係を表す法則) に従い、実際には完全ランダム性の分布である。本プロジェクトでは、1) 地震時間と空間予測の精度向上と2) 地

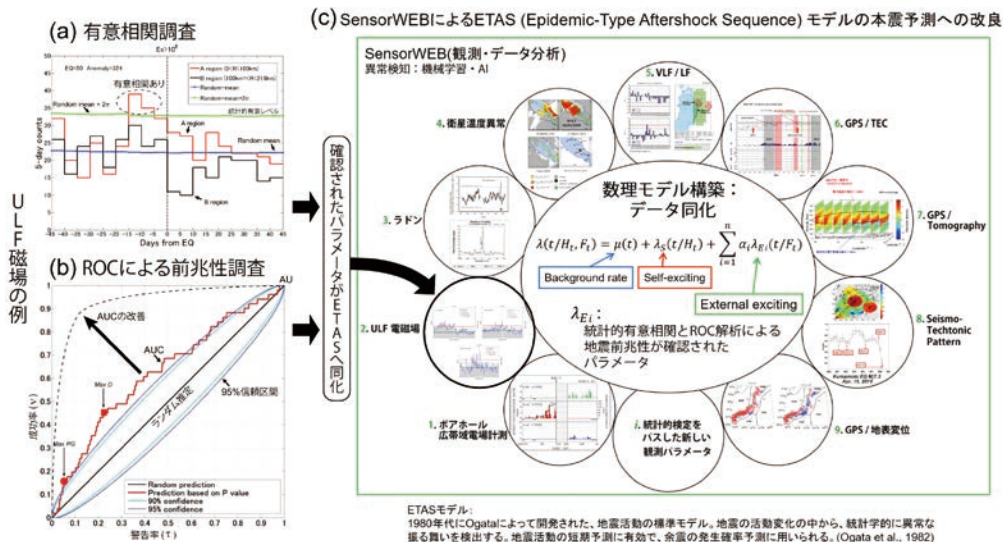


図9 巨大地震・津波の監視予測システムの構成例

Fig. 9 Example of a monitoring and forecasting system for a mega-earthquake and tsunami.

震の大きさの予測可能性（本震の予測）に挑戦している。この予測モデルには、時々刻々と得られる観測の取込み、モデルパラメータ、特に地震の大きさの確率分布のパラメータを更新していく機能が必要となる。そこで、多様な前兆現象をETASモデルに取込む際に、最先端のデータ同化技術^[33, 34]（アンサンブルカルマンフィルタなど、現業天気予報で成功を収めている高度なデータ同化手法）を地震予測に応用し、実時間のモデル更新・モデル高度化を実施^[33]し、Only One研究の開拓とそのプロダクトである予測結果を世界に先駆けて活用する。モデルに前兆現象を追加することで、従来のETASと比べて背景活動に対する予測確率の利得が向上し、地震の大きさの予測の改善と本震の予測可能性が期待される（図4）。構築した地震予測モデルのパラメータはAIC等で評価する。また、複数パラメータを用いた図4のAUCが左上方向を通過する曲線に改善する方法も実施（従来は個別のパラメータについて検討）している。予測情報の利用者によって、必要とされる地震予測の精度（例えば精度60%以上など）、求められる予測情報の発出のタイミング（1週間前、数日前、数時間前など）、また情報を受けたタイミングにより利用者の対応が異なること等がこれまでの聞き取り調査からわかっている。

4 研究の成果

服部は1997年に理化学研究所地震国際フロンティア研究に参加して以降、地震電磁気研究を展開している。南房総・伊豆を中心に地上観測網を構築、20年にわたってデータを蓄積、地震準備過程を電磁気学的に精確に把握、地震短期予測に資する研究を実施している。特に、観測データと地震活動の関係の事例・統計解析から、有意相関やROC的解析に基づく前兆性を示してきた^[2-13]。有意相関については、地震との距離依存性やマグニチュード依存性の存在や、データをシャッフルすると無相関となることなどから、観測点近傍の地震との因果関係を示唆する結果を得ている。また電離圏電子数変動や衛星温度異常と地震の関係の調査も実施し、同様に統計的有意性や前兆性を示す結果を得ており、世界をリードしている^[1, 18, 19, 31]。さらに、統計地

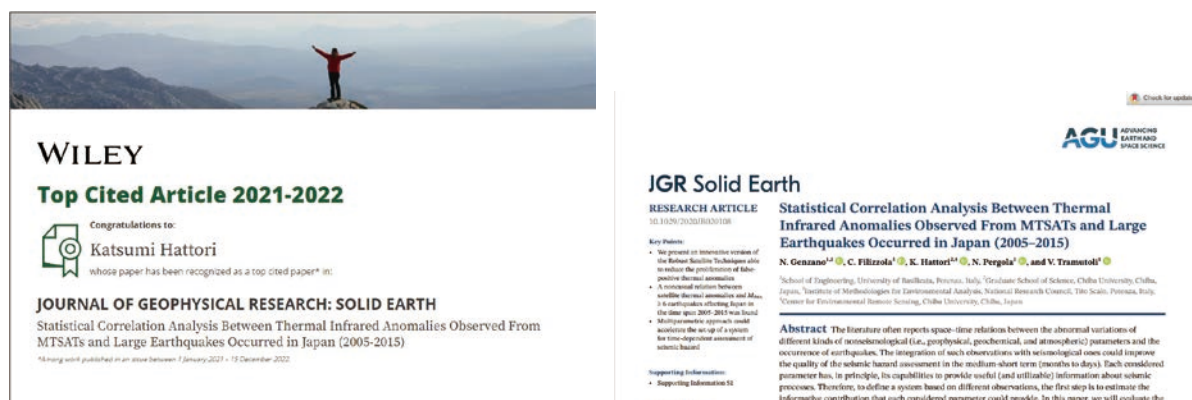


図10 2021-2022年のTop Cited Articleに選ばれたHimawari 6-7号データを用いたJGR論文

Fig. 10 JGR paper using Himawari 6-7 data selected as Top Cited Article for 2021-2022

震学的なデータ解析^[25, 26]や歪データの解析^[35]、地中からのラドン散逸量の解析^[28]などの地殻応力変動に関連する解析や、電離圏電子の3次元分布の可視化手法の開発^[36]など、前兆現象のメカニズム解明に向けた解析も実施している。また、2014年からコロナ期間を除き毎年国際ワークショップIWEP (International Workshop on Earthquake Preparation Process) を主催し、2024年度までに8回開催した。米国地球物理連合(世界最大の地球物理系学会)等の国際会議でも地震前兆・地震準備過程関連のセッションを企画運営し、世界を牽

引してきた。現在、文科省・地震火山噴火協議会の「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第3次)」の電磁気学手法による短期予測研究の代表も務めている。ULF磁場変動と電離圏電子数変動、衛星熱赤外変動と地震との関係においては、服部グループは、現在までに個別前兆現象のROC解析による最適予測シナリオ(地震の規模、発生場所、先行時間、警告期間等のパラメータ)を決定し、retrospectiveに予測精度を調査し、シナリオ選択の妥当性(予測の成功率や確率利得)を評価しつつあり、世界をリードする成果をあげている。現在では複数の前兆現象を用いた確率数理モデルを構築し、国内はもとより台湾、イタリア、米国、中国などと協力して本分野をさらに高度化・深化させることに挑戦している(台湾、イタリア、米国とは当センターの公募型国際共同研究にも採択)。これらの成果は2024年12月現在、WoSのToP10%論文11編で報告を行ってきた。そのうちのHimawari-6/7号のデータの統計解析により日本付近の規模の大きな地震とTIR異常の有意相関とROC的關係を報告したイタリアのグループとの共著のJournal of Geophysical Research論文(公募型国際共同研究でもある)は、2021-2022年のTop Cited Articleに選ばれた(図10)。また、私たちの研究成果は2018年7月にWileyより出版され

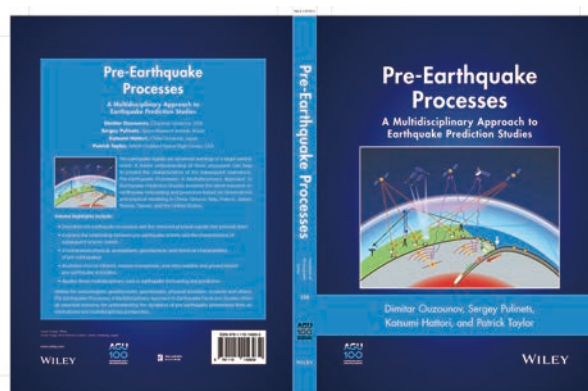


図11 American Geophysical Union monograph seriesとして2018年7月にWileyより出版された本。服部は著者・編者の1人。

Fig. 11 Book published by Wiley in July 2018 as part of the American Geophysical Union monograph series. Hattori is one of the authors and editors.

た米国地球物理連合の Geophysical Monograph Series 234として “*Pre-Earthquake Processes–A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*” に書籍としてまとめられている (図 11)。以上のように本研究は、衛星リモートセンシングデータの地震災害軽減への応用研究であり、衛星データ利用の新展開といえる。また、本センターの共同研究 (国際共同研究) によるリモセン関連コミュニティの拡大の好例になっており、リモセンデータを中核とした多分野融合とイノベーション創出の取り組みの一例である。

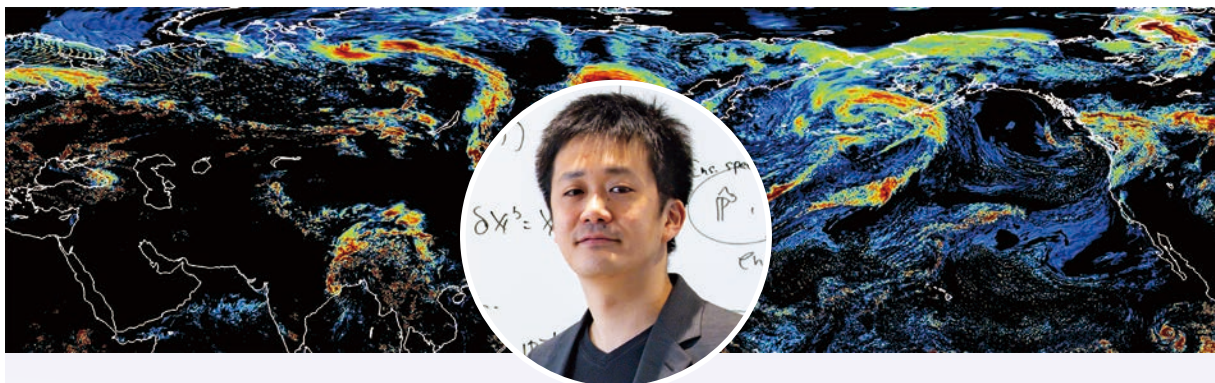
5 共同研究と今後の展開

衛星・地上観測ビッグデータの解析は国内外の共同研究で実施している。当センターの国際公募研究として、台湾・国立中央大学の劉正彦教授グループと電離圏電子数変動について、イタリア・バシリカータ大学の Tramutoli 教授・Genzano 博士グループと大気圏温度変動 (Himawari 衛星データの活用) について、米国・チャップマン大学の Ouzounov 教授グループと地圏－大気圏－電離圏結合について研究を実施している。ほかにも中国・北京大学の黄清華教授、南方科技大学の韓鵬副教授、中国国家地震局の張学民博士などと確率数理モデルや衛星データ解析など連携して研究を実施している。国内では、統計数理研究所や理化学研究所と確率数理地震発生モデル構築の研究に着手している。予測の社会実装 (危機管理ナビゲータの構築) に関しては、名古屋工業大学の高度防災工学センターとの連携を図っている。本プロジェクトの成果の一部はヨサファット教授の「地域と人にねざした AI 減災サステイナブル学学際ハブ拠点形成」プロジェクトにも利用される予定である。

6 引用文献

- [1] Ouzounov, D., Pulnits, S., Hattori, K., Taylor, P., *Pre-Earthquake Processes*, pp. 414, Wiley, July 2018.
- [2] Hattori, K. et al., *Phys. Chem. Earth.*, **29**, 481-494, 2004.
- [3] Harada, M., Hattori, K., Isezaki, N., *Phys. Chem. Earth*, **29**, 409-417, 2004.
- [4] Hattori, K., *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **15**, 329-360, 2004.
- [5] Hattori, K., Serita, A., Yoshino, C., Hayakawa, M., Isezaki, N., *Phys. Chem. Earth*, **31**, 281-291, 2006.
- [6] Ismaguilov, V.S., Kopytenko, Y. A., Hattori, K., Hayakawa, M., *Geomagnetism and Aeronomy*, **46**, 403-410, 2006.
- [7] Telesca, L., Lapenna, V., Macchiato, M., and Hattori, K., *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **268**, 219-224, 2008.
- [8] Saito, S., Kaida, D., Hattori, K., Febriani, F., Yoshino, C., *Natural Hazard and Earth System Sciences*, **11**, 1863-1874, 2011.
- [9] Hattori, K., and Han, P., *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, edited by Ouzounov et al., 229-240, Wiley, 2018.
- [10] Hattori, K., Han, P., Yoshino, C., Febriani, F., Yamaguchi, H., Chen, C.-H., *Surveys in Geophysics*, **34**, 293-316, 2013.
- [11] Han, P., Hattori, K., Hirokawa, M., Zhuang, J., Chen, C.-H., Febriani, F., Yamaguchi, H., Yoshino, C., Liu, J.-Y., Yoshida, S., *J. Geophys. Res., SPA*, **119**, 4998-5011, 2014.
- [12] Han, P., Hattori, K., Zhuang, J., Chen, C.-H., Liu, J.-Y., and Yoshida, S., *Geophysical Journal International*, **208**(1), 482-490, 2017.
- [13] Han, P., Zhuang, J., Hattori, K., Chen, C.-H., Febriani, F., Chen, H., Yoshino, C., Yoshida, S., *Entropy*, **22**, 859, 2020.
- [14] Takahashi, I., Hattori, K., Harada, M., Yoshino, C., Isezaki, N., *Annals Geophysics*, **50**, 123-135, 2007.
- [15] C. Yamanaka, H. Matsumoto, H. Asahara, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **A136**, 310-314, 2016.

- [16] Liu, J. Y., Chen, Y. I., C. H. Chen, Liu, C. Y., Chen, C. Y., Nishihashi, M., Li, J. Z., Xia, Y. Q., Oyama, K. I., Hattori, K., and Lin, C. H., *J. Geophys. Res., Space Phys.* **114**, 2009.
- [17] Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chen, C. H., and Hattori, K., *J. Geophysical Research A: Space Physics*, **115**(9), art. no. A09312, 2010.
- [18] Kon, S., Nishihashi, M., Hattori, K., *J. Asian Earth Sciences*, **41**, 410-420, 2011.
- [19] Liu, J-Y., Hattori, K., Chen, Y-I., *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, edited by Ouzounov et al., 305-317, Wiley, 2018.
- [20] Liu, J-Y., Lin, C-Y., Tsai, Y-L., Liu, T-C., Hattori, K., Sun, Y-Y., Wu, T-R., *J. Earthquake and Tsunami*, **13**, 1941007, 2019.
- [21] Song, R, 千葉大学大学院融合理工学府博士論文, 2022.
- [22] Hirooka et al., *Radio Sciences*, 46, RS0F05, 2011, doi:10.1029/2011RS004760.
- [23] 廣岡伸治ら, 電気気学会論文誌基礎・材料・共通部門誌, 136, 265-271, 2016, doi:10.1541/ieeefms.136.265.
- [24] 尾形良, 地震, 50, 115-127, 1998.
- [25] Zhuang, J. et al., *Eur. Phys. J. Special Topics*, **230**, 409-424, 2021, doi:10.1140/epjst/e2020-000272-7.
- [26] Xie, W., Han, P., Hattori, K., *Entropy*, 21, **249**, 2019, doi:10.3390/e21030249.
- [27] Xie, W., Hattori, K., et al., *Entropy*, 24, **494**, 2022, doi:10.3390/e21030249.
- [28] 小島春奈ら, *J. Atmospheric Electricity*, **39**, 46-51, 2020, doi:10.154/jae39.46.
- [29] Genzano, N., et al., *J Geophys. Res. SE*, **126**, 2021, doi:10.1029/2020JB020108.
- [30] Ouzounov, D., et al., *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, edited by Ouzounov et al., 339-359, Wiley, 2018.
- [31] Hayakawa, M., Iutsu J., Schekotov, A., Yang, S-S., Solovieva, M, Budilova, E., *Geoscience*, **11**, 481, 2021.
- [32] Song, R., Hattori, K., Zhang, X., Saito, S., *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **205**, 2020. doi:10.1016/j.jastp.2020.105291.
- [33] Kotsuki et al., *J. Geophys. Res.*, **123**, 7375-7392, 2018, doi:10.1029/2017JD028092.
- [34] Kotsuki S. et al., *Wea. and Forecasting*, **34**, 701-714, 2019, doi:10.1175/WAF-D-18-0164.
- [35] Yu Z., et al., *Remote Sensing*, **13**, 515, 2021, doi:10.3390/rs13030515.
- [36] Song, R., et al., *Geophys. Res. SP*, **126**(6), e2020JA028561, 2021, doi:10.1029/2020JA028561.



気象制御への挑戦

Quest for the Weather-Controlled Society

小槻 峻司 教授

Kotsuki Shunji, Professor

特色ある研究の概要

地球温暖化の進行等により、台風や豪雨などによる極端風水害が激甚化・増加している。気象災害へのこれまでの取組は、構造物等による被害抑止や、災害発生前の準備や発生時の早期警報発出等による被害軽減等が主であった。しかし今後も激甚化・増加が想定される台風や豪雨に対して限界があり、これらに加え災害につながる気象現象自体の回避や軽減を可能とする制御技術の研究開発が必須である。このような背景のもと、内閣府ではムーンショット目標の1つに気象制御を掲げており、我々もその中で、「海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来」という課題名でコア研究プロジェクトを推進している。プロジェクトでは、陸域の集中豪雨被害を緩和するために、上流の海上で事前に豪雨を起こして大気中の水蒸気量を大幅に減らす気象介入技術を開発している。大気を直接改変できる力には限界があるが、介入効果を最大化して豪雨を生成するための数理に基づく気象制御手法の確立を目指している。開発する技術の社会実装に向け、法制度や環境リスク評価などの社会科学研究も推進し、2050年までに社会が受容可能な気象制御技術の確立を目標に研究開発を進めている。ここでは、従来型の「気象予報」を超え、「気象制御」の実現に向けた挑戦的研究を紹介する。

In response to the increasing extreme-weather-induced disasters, the Japanese government has set a Moonshot goal to develop technologies to mitigate weather-induced disasters by artificial interventions. Our project aims to develop a weather control technology that mitigates heavy-rainfall-induced economic damages by artificially generating heavy rain over the upstream ocean. Given the limitations of directly altering the atmosphere, we explore a weather control method for intentional generation of heavy rains with optimization of manipulations. We will also promote social science research on legal issues and environmental risk assessments in order to accelerate the practical application of our results. By 2050, we aim to establish a weather control technology that society can accept. This section introduces research that goes beyond conventional “weather forecasting” and aims toward achieving “weather-controlled society”.

1 はじめに

地球温暖化の進行等により、台風や豪雨などによる極端風水害が激甚化・増加している。我が国では近年、海上からの水蒸気流入に起因する陸域の集中豪雨災害が多発し、線状降水帯などの激甚災害では、時に1兆円を超える被害が出ている。気象災害へのこれまでの取組は、構造物等による被害抑止や、災害発生前の準備や発生時の早期警報発出等による被害軽減等が主であった。しかし今後も激甚化・増加が想定される台風や豪雨に対して限界があり、これらに加え災害につながる気象現象自体の回避や軽減を可能とする制御技術の研究開発が必須である。この様な背景のもと、内閣府ではムーンショット目標の1つに気象制御を掲げ、「2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現」することを目標に研究開発が進められている。我々もその中で、「海上豪雨生成で実現する集中豪雨被害から解放される未来」という課題名でコア研究プロジェクトを推進している。

我々のプロジェクトでは、陸域の集中豪雨を緩和するため、上流の海上で積乱雲群による豪雨を形成し、大気中の水蒸気量を陸域流入前に大幅に減らす技術の開発を目指している（図1）。豪雨を対象とした制御の困難さは、気象を直接改変できる力（介入力）に限界があることと、介入により降水量を低減できるか分からない不確実性にある。しかし限りある介入力でも、積乱雲を生起し、積乱雲が次の積乱雲を生む連鎖反応（組織化）を誘発できれば、豪雨を形成できる。また極めてシンプルな戦略であり、上流側の降水量を増やす程、下流側の降水量は高い確率で低減できる。

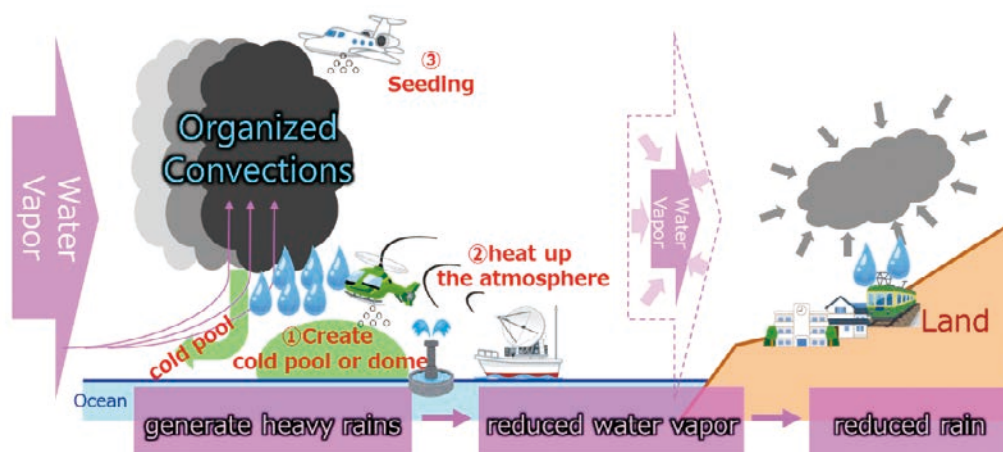


図1 海上豪雨生成による陸域豪雨緩和戦略の概念図

Fig. 1 A conceptual image of the strategy to mitigate heavy-rain-induced disasters.

2 研究のねらい・上位目標

気象制御では、現象の時空間スケールに対して、実現可能な介入力が小さいことが課題となる。そのため、何らかの大気の性質を利用して、直接実現可能な介入の効果を増幅させる必要がある。この点については、我々は気象現象の中に埋め込まれている「条件付き不安定」という仕組みを利用しようと考えている。条件付き不安定の大気では、空気が上昇して水蒸気が凝結し始めると、

潜熱が放出されて上昇が促進され不安定になる。集中豪雨をもたらす大気は、大気の下層に膨大な水蒸気を含んでおり、幸か不幸か条件付き不安定の性質が満たされている。そのため、人為的な介入により下層大気を持ち上げる事で、上流の海上において積乱雲を作り出すことも可能ではないかと考えている。また、積乱雲は周りの大気環境場に変化をもたらすため、積乱雲を介して介入よりも空間スケールの大きなシグナルを得ることが出来る。つまり、気象を直接改変する力には限界があるが、この「条件付き不安定」という性質を上手く活用できれば、介入効果を増幅させることが出来る。

以上は気象学的な観点からの戦略であるが、気象制御の実現には、さまざまなボトルネックを解消する必要がある。例えば、介入を最適化する数理・情報科学、集中豪雨の予測可能性・制御可能性を調査する気象学、気象介入を実現する工学、法的課題を解消する法学、責任ある研究開発を主導し社会合意形成を図る社会科学など、関連する問題の全てを解決する必要がある。プロジェクトでは、2024年11月現在、この5つの課題に対して10の研究開発項目を立て、25名の課題推進者を率いて研究開発を進めている（図2）。2050年の目標実現からバックキャストした目標として、現在は2027年までに下記の目標実現に向けて研究開発を進めている。

- ・介入効果を最大化する数理手法を開発して介入の位置等を最適化し、陸域の集中豪雨が緩和可能であることを計算機上で実証する。
- ・実現可能な介入手段候補を1つ以上確定し、付随する倫理的・法的・社会的課題が解決可能である見通しを示す。
- ・日本全国の水害被害推定モデルの開発を完了する。

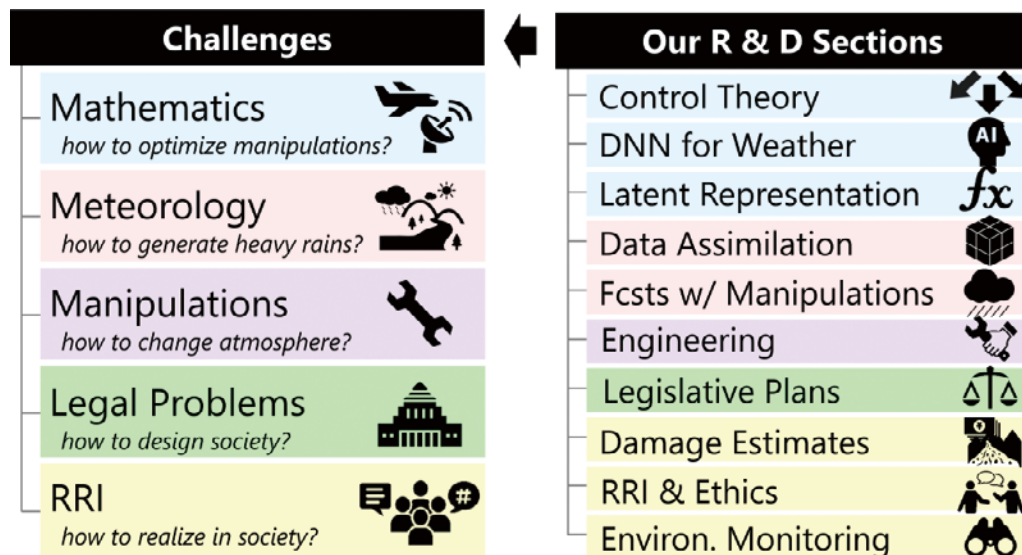


図2 ムーンショットプロジェクトにおける研究開発課題

Fig. 2 Research and development sections of our Moonshot project.

3 研究の実施方法

これまでの紹介はプロジェクトの全容であったが、以降はプロジェクトの中で、千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・環境予測科学研究所が担っている「気象制御計算の計算量削減」の研究について紹介する。これまで天気予報では、データ同化に関する研究が進められ、過去の時刻からの数値予報モデルの予測値と観測を最適に結合し、より良い天気予報の実現が図られてきた。一方で気象制御では、「より良い未来に導くために、いまどのような介入をすべきか」という逆問題を解く必要がある。これまでの研究から、この逆問題はデータ同化と非常に親和性が高いことが分かっており^[1]、データ同化の発展として、非線形制御で最も一般的な手法であるモデル予測制御が実現できることも理解されてきた。

計算負荷の低い制御入力の実算手法の開発と、制御入力計算の高速化技術の開発は、共に本プロジェクトが実現を目指す、「海域での豪雨生成・陸域での降雨量低減による豪雨被害低減」を計算機上で実証し、また社会実装するために不可欠の技術となる。非線形力学系制御は、モデル予測制御が数理的・工学的に確立されているが、制御探索次元が高次元であるため、繰返し計算量の膨大さがボトルネックとなりうる。有効な制御探索次元の削減手法と、計算速度の高速化技術の開発は同時進行が求められる。気象制御の難しさは、「ある介入が望ましい変化をもたらすと想定できる接線系近似の範囲内」では、大きな気象変化を起こせない事にある。そこで、より長時間のアンサンブル予測を実施して望ましい気象場とそこに至るトラジェクトリを発見（予見）し、そのトラジェクトリに対してモデル予測制御をかける手法を考案している。低次元力学系モデルを用いた概念実証において、この手法が有効に働くことは示されており、現在は下記の研究について研究を進めている。

- ・望ましいトラジェクトリを発見するアンサンブル生成
- ・望ましいトラジェクトリを判断する手法の開発
- ・データ同化計算の高度化・高速化

4 研究成果

これまでに得られたプロジェクト成果の中で、インパクトの高い研究成果についていくつか紹介する。「望ましいトラジェクトリを発見するアンサンブル生成」では、近年急速に発達の進む、AI天気予報モデルを用いた大アンサンブル生成を進めている。2022年12月にGoogle DeepMind社がAI天気予報モデルGraphCastを発表して以来、2024年までの間に多くのAI天気予報モデルが発表されてきた。その一方で、AI天気予報モデルとデータ同化を組み合わせる研究は限定的である。我々はAI天気予報モデルを用いたデータ同化システムの開発に着手しており、具体的には、Microsoft社のClimaXをAI天気予報モデルとして活用し、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ・LETKFを同化フィルタとして実装した^[2]。これはAI天気予報モデルとデータ同化を組み合わせた研究としても世界で5例目、アンサンブルデータ同化に限っては世界初となる画期的な研究成果である（図3）^[2]。

また、「望ましいトラジェクトリを判断する手法の開発」としては、応用数理手法であるクラスタリングやランドスケープ解析を気象予報データに適用する研究を進めている^[3]。ランドス

ケープ解析は1957年、C. H. Waddingtonにより生物学分野で開発された手法であり、細胞が分化する過程を、標高の高いところから低いところへ転がり落ちるボール（potential flow）に例えて potential flow によって表現するものである。ランドスケープ解析におけるボールを熱帯低気圧とみなし、その進路を変更させるというエネルギー効率の高い制御入力地点を、ランドスケープの鞍点として求めることにより、気象学分野への応用が可能だと考えてその手法を開発した。気象庁のメソアンサンブル予報モデル熱帯低気圧の軌道予報データを使用し、potential flow の獲得に成功している（図4）。これから、北上と東進の2つの主要な経路（あるいはアトラクタ）が発見され、この2つのアトラクタの間に分水嶺（赤い点線；Separatrix）の存在が確認され、分水嶺の始点に鞍点（ピンクの星）が発見された。この点は、気象制御入力を与えるのに適する地点である可能性を示すものである。

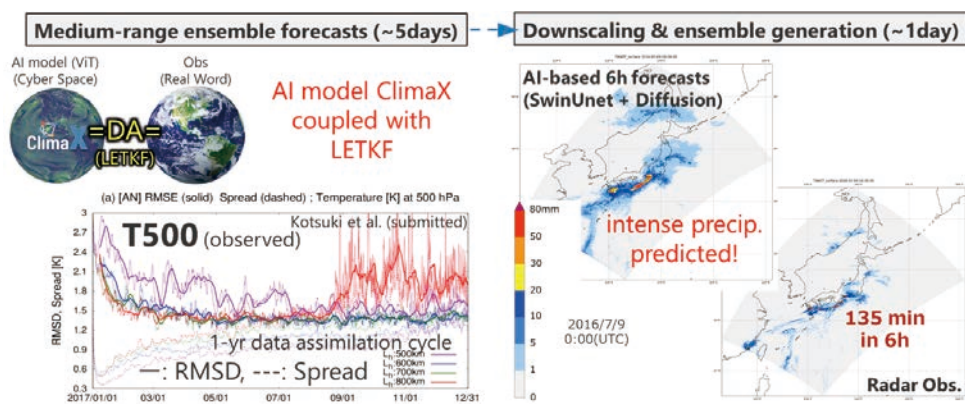


図3 深層学習に基づくAI天気予報モデルを用いた大アンサンブル生成

Fig. 3 Generations of large-ensemble weather predictions based on AI-based weather prediction models.

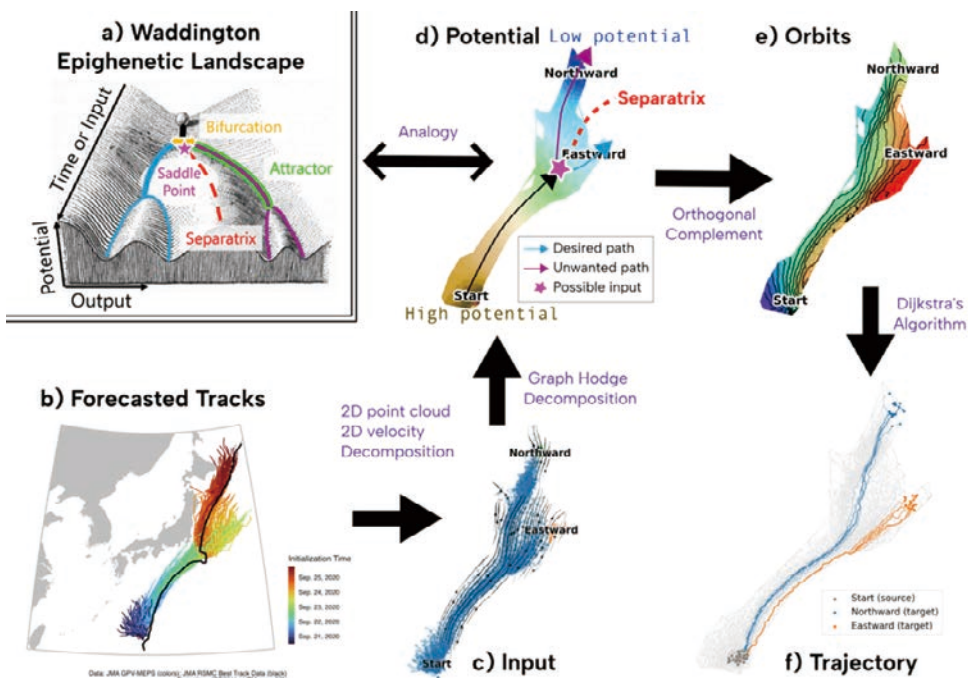


図4 2020年台風12号のアンサンブル予報データに対して実施したランドスケープ解析

Fig. 4 A landscape analysis based on ensemble prediction path data for Typhoon Dolphin in 2020.

5 研究プレゼンスの向上

歴史を振り返ると、データ同化は、アポロ計画におけるロケットの軌道制御に用いられた Kalman Filter に端を発する。このロケットの軌道制御では、(1) ロケットの位置の推定（データ同化）と、(2) 最適な操作の特定（制御）、の両方の問題を解こうとしていたが、時代と共に数値天気予報ではデータ同化が深く進展した。時代を経て天気予報で発展したデータ同化を基盤に、再度 (2) を実現しようと試みている。気象制御の実現は、現実世界と計算世界を双方向に繋ぐ、地球デジタルツインとしてみなすこともできる（図5）。従来の地球デジタルツインでは、観測世界を計算世界に入力して一般化同期させる一方向のみを扱っていたが、気象制御により地球科学における新たなパラダイムを切り開こうとしている。

我が国の気象災害は激化の一途をたどっており、その様な Big Issue に駆動されて、気象制御研究は進んでいる。この問題の解決は、地球科学者のみによる解決は不可能であり、気象学・防災学・計算科学・情報科学・数学・工学・法学・倫理学・社会学に跨る研究開発を、産・官・学の垣根を超えて推進している。社会的な関心も強く、新聞・テレビ・出版社などからも多くの報道をして頂いている。気象制御の実現を図り、科学的・社会的にインパクトある成果を挙げることで、その中心にある千葉大学・環境リモートセンシング研究センターの研究プレゼンスの向上に貢献していきたいと考えている。

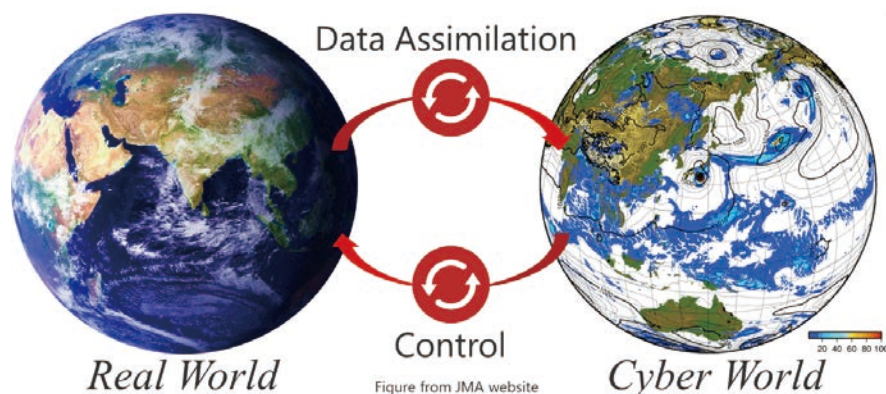
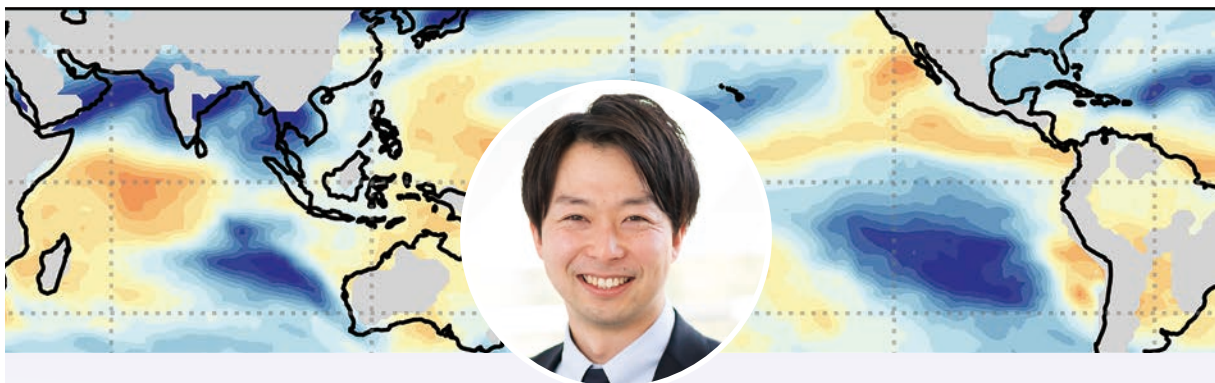


図5 現実世界と計算世界を双方向に繋ぐ地球デジタルツイン

Fig. 5 Weather control as the Earth digital twin.

6 引用文献

- [1] Kawasaki, F. and Kotsuki, S. (2024): Leading the Lorenz-63 system toward the prescribed regime by model predictive control coupled with data assimilation. *Nonlin. Processes Geophys.*, **31**, 319-333.
- [2] Kotsuki, S., Shiraishi, K. and Okazaki, A. (2024): Integrating Ensemble Kalman Filter with AI-based Weather Prediction Model ClimaX. *arXiv*.
- [3] Oettli, P. and Kotsuki, S. (2024): An Objective Detection of Separation Scenario in Tropical Cyclone Trajectories Based on Ensemble Weather Forecast Data. *J. Geophys. Res.*, **129**, e2024JD040830. doi: 10.1029/2024JD040830



水同位体によるシームレス気象・気候予測の発展

Revolutionize Seamless Weather-to-Climate Prediction with Stable Water Isotopes

岡崎 淳史 准教授

Okazaki Atsushi, Associate Professor

特色ある研究の概要

我々の研究室では日々の天気予報や気候予測の精度向上を目指した研究を行っている。この実現には、気象観測技術の高度化はもちろんのこと、正確な数値モデル、観測とシミュレーションを最適に融合するアルゴリズム、両者を比較可能にする観測シミュレータなど、多岐に渡る研究技術開発が必要となる。また優れた数値モデルを開発するには、対象とする現象を支配する素過程の理解が欠かせない。当研究室ではこれら全ての要素に対して、気象学・気候学や統計学、計算科学の知識と技術を駆使して取り組んでいる。

Our laboratory is researching to improve daily weather forecasts and climate prediction. In achieving this, it is essential to advance a diverse range of research and technological developments, such as precise numerical models, algorithms that optimally combine observations and simulation, and observation simulators that enable direct comparison, as well as advanced observation techniques. Additionally, developing excellent models necessitates understanding the fundamental processes governing the phenomena. We are tackling all the topics with the knowledge and techniques from meteorology, climatology, statistics, and computational science.

1 はじめに

地球温暖化の進行により各地の気温や海水面積の記録は更新され続けており、地球が“未知の領域”に突入したと専門家らは警鐘を鳴らす。これとともに台風や豪雨などによる風水害が頻発・激甚化しており、ソフト・ハード両面から対策を進めることが喫緊の課題となっている。極端風水害による被害軽減には、短い時間スケールでは天気予報の精度向上などのソフト対策が必須である。しかし、どれほど天気予報の予測精度が向上したところで社会が許容できるレベルを超えたハザードに見舞われれば被害は発生する。災害に対する脆弱性を小さくするには、ダム洪水調節容量の増設や堤防のかさ上げなどのハード対策が必要であるが、適切な対策を行うには信頼性の高い温暖化予測情報が求められる。その実現には気候システム及びそれを構成するサブシ

システムの理解を深める必要がある。

気候システムには、エルニーニョ・南方振動現象のように数年周期で変化するものもあれば、氷期－間氷期サイクルのように数万年という長い時間をかけて変化するものもある。このようにとても長い周期をも含む気候システムを理解するには、我々人類が有する測器観測だけでは到底足りず、地質学的知見をもとに紐解く必要がある。以上のように、極端風水害の被害軽減は理工学分野に関連するものだけでも非常に多くの分野に跨る課題である。

2 研究の狙い・上位目標

我々の研究室では、極端風水害のうち特に水害による被害軽減を目指して、以下のような研究を行っている。

- ・日々の天気予報などの短い時間スケールの予測精度向上
- ・温暖化予測などの長い時間スケールの予測精度向上及び影響評価
- ・気候システム及びそれを構成するサブシステム（主に大気・陸面）の理解深化

加えて、多くの水害が河川を通じて発生することから、近年では氾濫を含めた予測・影響評価にも取り組んでいる。また、災害につながる気象現象自体の回避や軽減を可能とする制御技術の研究開発にも取り組み始めたところである。以上のような多角的アプローチと多分野融合により、大雨や旱魃などによる気象災害ゼロの世界、水をめぐる争いから解放された世界の実現を目指している。

3 研究の実施方法

予測精度向上には、気象観測技術の高度化はもちろんのこと、正確な数値モデル、観測とシミュレーションを最適に融合するアルゴリズム、両者を比較可能にする観測シミュレータなど、多岐に渡る研究技術開発が必要である。当研究室ではこれら全ての要素に対して、気象学・気候学や数理科学、計算科学の知識と技術を駆使して取り組んでいる。

気候システム及びそのサブシステムにおける素過程の理解深化については、水同位体を利用した研究も行っている。水同位体は自然界に微量かつ安定的に存在する少しだけ重い水（e.g., HDO, H_2^{18}O ）である。重い水は普通の水（i.e., H_2^{16}O ）に比べて蒸発しにくく、凝結しやすいという特性を持つ。このため、水蒸気塊が相変化を起こすと両者の割合には偏りが生じる。この偏りの程度は、気温など周囲の環境に応じて変化する。このため、雨の中に含まれる重い同位体の割合を調べれば、どのような環境で相変化を経てきたのかが明らかにできる。この特徴を利用して、水同位体を用いた水循環や降水過程のメカニズム解明にも取り組んでいる。

4 研究成果

4.1 モデル開発と衛星観測との比較

温暖化予測における不確実性の大きな原因のひとつが雲・降水過程である。中でも下層雲は複雑な物理過程の微妙なバランスで形成・維持されており、気候モデルによる再現や予測が難しいため、温暖化予測の不確実性の主要因となっている。下層雲の形成には、浅い滞留が大きな役割

を果たすが、大気がどれほど鉛直方向にかき混ぜられたかを直接的に観測することは難しい。これに対して、我々は水同位体の振る舞いを導入した二つのモデル (MIROC5-iso^[1], MIROC6-iso^[2]) と衛星観測の比較から、水蒸気中の同位体情報を用いて大気のかき混ぜ効果が定量可能であることを見出した (図1)。このことは、水同位体情報によるモデルパラメタの拘束が可能であることを意味し、水蒸気同位体観測によって今後の予測高度化が一段と進むことが期待される。

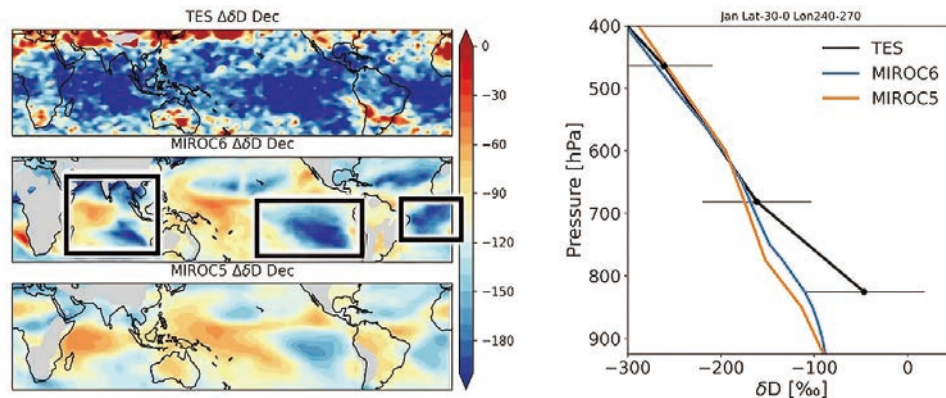


図1 水蒸気中の重水素同位体比 (‰) の二高度差の (左段上) 観測と (左段中・下) モデルの比較。黒枠で囲まれた領域では、(左段中) 鉛直かき混ぜ効果を考慮した場合が、(左段下) していない場合に比べて、より観測に近い様子が見てとれる。(右) は黒枠領域平均の水蒸気同位体比の鉛直分布。Averaging Kernel を適用していないためモデル・衛星のずれが大きいことに注意。

Fig. 1 Difference between 2-level HDO isotope ratio (‰) observed by (left upper) TES, (left middle) simulated by MIROC6-iso, and (left bottom) MIROC5-iso. Right panel shows the vertical profile of HDO.

4.2 古気候

測器観測がカバーする年代を超えて過去の気候がどのようなものであったかを明らかにする古気候復元は、気候システムを理解する上で欠かすことができない。しかし、これまでの古気候復元研究は、我々が手にし得る情報を十分に活用しているとは言い難く、過去の気候変動の全容は未だ描き切れていない。我々の研究室では、天気予報分野において高度に発展するデータ同化のエッセンスを応用することで、これまでにない精度で過去千年の気候変動を復元することを目指した研究を行っている。

以下に動的復元により復元精度が向上した例を示す^[3]。これまでの気候復元は、気温などの気象要素と、過去の気候を記録する地質学的手法である気候プロキシの間に静的な関係を仮定していた。一方、この関係性は定常ではないことが過去の研究からも明らかになっている。しかし、気候プロキシのみから関係性の变化を全地点で得ることは困難であった。本研究では両者の関係性を気候モデルシミュレーションから取得し、これをデータ同化に用いることで気候復元精度が向上する可能性を示した (図2)。気候の予測可能性との関係性を調査したところ、予測可能性の長さが、気候プロキシが代表する時間より長い場合、動的手法の方が優れていることがわかった。また、予測可能時間が長ければ長いほど、動的手法の復元精度がより良くなることもわかった。これは動的手法が、気候の初期値依存性 (いわゆるメモリ) を利用しているためであ

る。動的手法の実現には計算コストの課題や複数サブシステムが複雑に結合するシステムへの応用という技術的困難を伴うが、今後の気候復元研究の道筋を示すことに成功し、価値のある研究であると自負している。

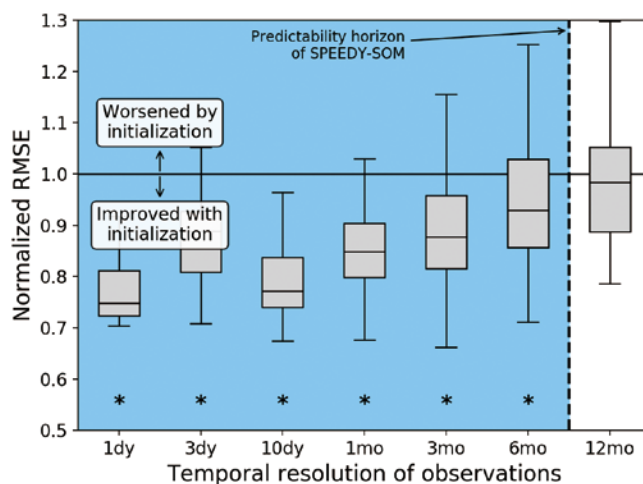


図2 簡易気候モデルSPEEDY-SOMを用いた同化する観測の時間解像度ごとの地表気温復元精度の比較。縦軸の値が1より小さければ静的手法より優れていることを示す。*は静的手法と動的手法の差が有意 ($p < 0.01$) であることを示す。

Fig. 2 Global mean RMSE of forecasts with assimilation of time-averaged data normalized by that of forecasts without DA. Normalized RMSE less than 1 indicates the skill of forecasts with DA is better than that without DA and vice versa. Asterisks (*) show that the RMSE of the forecast with DA is significantly different from that without DA at the significance level of 0.01.

4.3 衛星シミュレータ開発とインパクト・仕様・評価

日々の天気予報において衛星による気象観測は重要な働きをする。一般に衛星の打ち上げはコストが高いため、計画時からその衛星によってどのような観測が得られるのか、どのような影響がもたらされるのかを明らかにすることが重要である。我々の研究室では、衛星観測シミュレーションと、観測システムを模擬した観測システムシミュレーション実験 (OSSE) により、天気予報に貢献することを目指している。JAXAではTRMMやGPM主衛星後継機として、観測頻度が高い静止軌道降水観測 (GPR) が検討されているが、例としてこれについて行った研究を下に示す。

衛星シミュレーションからは、現実的な水平解像度である20 km解像度では、クラッターの影響を強く受けるため、大気下層3 kmの観測は困難であることが示された^[4]。一方で、台風を対象に行ったOSSEからは、GPR同化により台風の強度や台風に伴う降水量の予測精度が向上することが示された (図3)^[5]。特に、細かくビームを打ち込むオーバーサンプリング (青線) の有効性が示された。

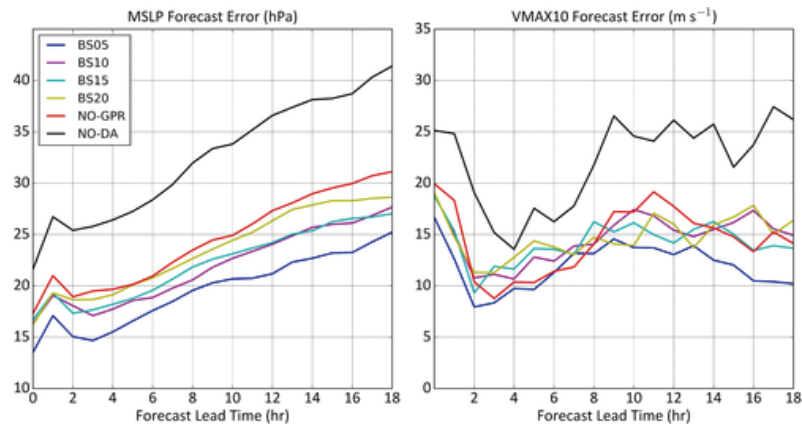


図3 (左) 台風中心気圧(hPa)、(右) 10 m最大風速 (m) の予測誤差。黒先はGPR同化なし、その他の線はGPR同化ありの場合を示す。色の違いはGPR水平解像度及びサンプリング幅を表す。

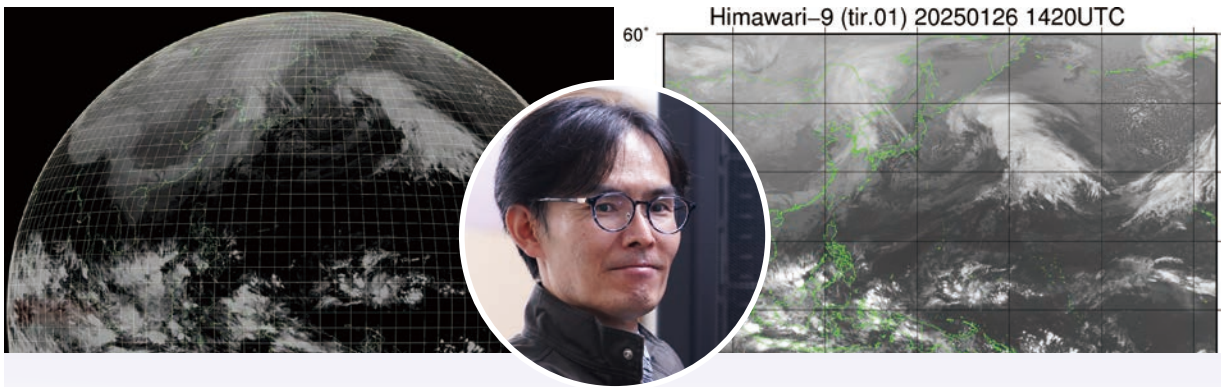
Fig. 3 Forecast errors at each lead time for minimum sea-level pressure (hPa) and maximum 10-m wind speed (m/s).

5 研究プレゼンスの向上

上述のように我々の研究は多岐に渡るが、その根幹をなすのは水同位体モデリングである。前者については、2024年に「第一回水同位体GCM研究会」を主催し、国内の研究を牽引している。また、国際的な同位体気候モデル相互比較プロジェクトである Stable Water Isotope Inter-comparison Group, Phase 3 (SWING3) をリードする立場にあり、国内・国際的に水同位体モデリング研究の発展に貢献している。近年の衛星観測による水蒸気同位体観測における進展を鑑み、今後は衛星観測と同位体気象・気候モデルの融合により同位体モデリング研究を一段上のステージに引き上げ、日々の天気予報から温暖化予測まで長短の予測精度向上に貢献するとともに、水同位体研究拠点形成による研究プレゼンス向上に努めたい。

6 引用文献

- [1] Okazaki, A., and Yoshimura, K. (2019). Global evaluation of proxy system models for stable water isotopes with realistic atmospheric forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **124**, 8972–8993.
- [2] Li, Y., Cauquoin, A., Okazaki, A., and Yoshimura, K. (2024). Development of the isotope version of the fully coupled climate model MIROC6-iso, *Journal of JSCE*, **12** (2).
- [3] Okazaki, A., Miyoshi, T., Yoshimura, K., Greybush, S. J., and Zhang, F. (2021). Revisiting online and offline data assimilation comparison for paleoclimate reconstruction: An idealized OSSE study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **126**, e2020JD034214.
- [4] Okazaki, A., Honda, T., Kotsuki, S., Yamaji, M., Kubota, T., Oki, R., Iguchi, T., and Miyoshi, T. (2019). Simulating precipitation radar observations from a geostationary satellite, *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 3985–3996.
- [5] Taylor, J., Okazaki, A., Honda, T., Kotsuki, S., Yamaji, M., Kubota, T., et al. (2021). Oversampling reflectivity observations from a geostationary precipitation radar satellite: Impact on typhoon forecasts within a perfect model OSSE framework. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **13**, e2020MS002332.



ひまわり 8/9 号を代表とした第3世代静止気象衛星の 利活用に関する研究

Research on the Use of Third-generation Geostationary Meteorological Satellites,
Specifically Himawari 8/9 Satellites

樋口 篤志 教授

Higuchi Atsushi, Professor

特色ある研究の概要

時間変化の激しい現象をモニタリングするには静止気象衛星が最適である。2015年に正式運用を開始したひまわり 8号は大幅な機能強化を果たし、第3世代静止気象衛星と呼ばれる。気象庁から提供されるひまわり8/9号を適切にアーカイブ、処理を行った上で研究コミュニティにデータ（幾何補正済 gridded data）を安定的に供給する。ひまわり8/9号データを用いた環境研究を推進した。リアルタイム性が高いため、可視化インパクトは高いことからリアルタイム処理・可視化に関わる研究・アウトリーチも展開した。

Geostationary meteorological satellites are particularly well-suited for monitoring rapidly changing phenomena. Himawari 8, which began operations in 2015, is a third-generation geostationary meteorological satellite with significantly enhanced capabilities. It provides a stable supply of geometrically corrected gridded data to the research community, thanks to the proper archiving and processing of data from the Himawari 8/9 satellites managed by the JMA. This gridded data has been instrumental in promoting environmental research. Our efforts in research and outreach related to real-time processing and visualization have also evolved due to the impactful nature of visualizing this high-frequency data.

1 はじめに

激しく変化する大気現象をタイムリーに監視するためには、常に同じ場所から観測するように見える静止軌道からの観測（静止気象衛星）が最適である。静止気象衛星に搭載された可視・赤外イメージャの観測範囲は地球表面の約1/3であり、全球をくまなく監視するためには少なくとも4基から5基の静止気象衛星による常時観測が必要となる（図1、およびVLコラムを参照）^[1]。

2015年7月に正式運用を開始したひまわり 8号は、これまでのひまわり 7号（MTSAT-2）と

比べ大幅な機能強化を果たし^[2]、第3世代静止気象衛星と呼ばれる^[3]。第3世代の静止気象衛星の登場は大気分野のみならず、地球環境モニタリングに関わる幅広い分野にブレークスルーをもたらす。一方、大量の観測データが常時供給されることから、ビックデータ処理の観点からも同じくブレークスルーが必要とされる。

2 研究のねらい・上位目標

そのため、第3世代静止気象衛星データの適切なハンドリング、利活用は重要である。VLでの実績を踏まえ、CEReSはその一翼を担うことが求められる。ここでは；

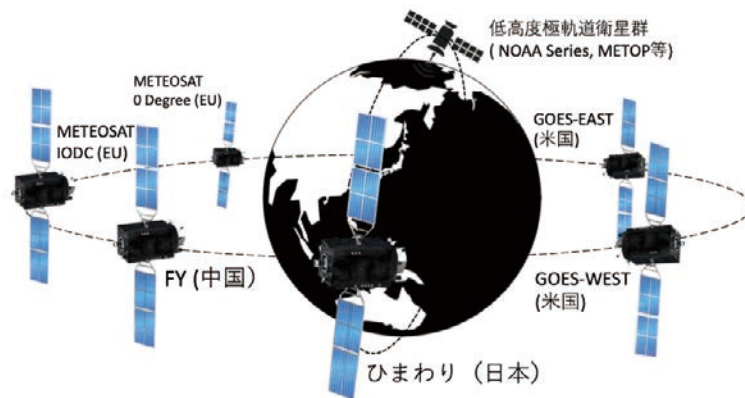


図1 世界の気象観測衛星群の模式図^[1]

Fig. 1 Illustration of meteorological satellites in the world^[1].

- ・気象庁から提供されるひまわり8/9号を適切にアーカイブ、処理を行った上で研究コミュニティにデータを安定的に供給する。
- ・ひまわり8/9号データを用いた環境研究を推進・牽引する。リアルタイム性が高いため、可視化インパクトは高いことからリアルタイム処理・可視化に関わる研究・アウトリーチも展開する。

3 研究の実施方法

実施にあたりデータ量の飛躍的な増加に対応する必要があるため、インフラ整備が必須となる。そのため、ひまわり8号正式運用前にサーバ室再構築を行なった(データベースのコラムを参照)。ストレージ・サーバ共に未経験の容量とアクセスのため、安定運用に向けた試行錯誤が2015年度に半年ほど続いた。その結果、気象庁が提供するデータのアーカイブおよびコミュニティへの提供が安定して行えるようになった。

4 研究成果

4.1 基盤データの提供

まず緯度経度直交座標系に変換したデータ (gridded data) の準リアルタイムでの処理・提供(図2)から始めた。MTSATと異なり、短期間で多くのデータが提供されることから高速処理、

特に並列処理は必須である。ここでは当時JAXA 特任研究員であった竹中博士が放射プロダクト用に開発した高速幾何補正プログラム^[4]を移植することで対応した。初期バージョンでは1シーンの処理計算が約40秒で終了し、10分に一度送られる全球データ (FD) に対し時間的余裕が十分に得られた。幾何補正精度検証も行い、プロダクトの精度担保の役割を担っている^[5]。同様の幾何補正アルゴリズムはNASA Ames 研究センターでの幾何補正済データセット生成でも採用され^[6]、汎用性が高い。

4.2 高時間分解能を活かした解析

高頻度観測を活かした解析を実施した。防衛大学校の小林文明教授を中心に観測に基づく千葉・房総地域での雲・降水に関する総合解析を実施している。ひまわり8/9号の高い観測頻度により、雲の生成・発達等ライフステージの一部始終を観測できることから、日本域観測[JP]から得られた2.5分毎の雲の光学特性^[7]と降水セルの3次元観測が30秒で可能なフェーズドアレイ気象レーダ^[8]による同一対象の連続モニタリングが可能となった(図3)^[3]。X帯レーダで検出される(1stエコー、図3下の0分)前の段階から、ひまわりが雲の発達過程を捉えている。

機械学習の一つであるランダムフォレスト法を用いてひまわり8号赤外データにGPM/DPR降水データを学習させることにより、背の低い雨の推定に成功した(図4)^[9]。ひまわり8/9号で新たに追加された水蒸気バンドが乾燥空気の貫入に伴う特徴的な水蒸気の鉛直プロファイルを副次的に反映した可能性を示した。

第3世代静止気象衛星群は搭載センサの差異はあるものの、バンド数増加でMODIS等中解像度極軌道衛星で出来た地球環境モニタリングが可能となった。環境モニタリングを災害モニタリ

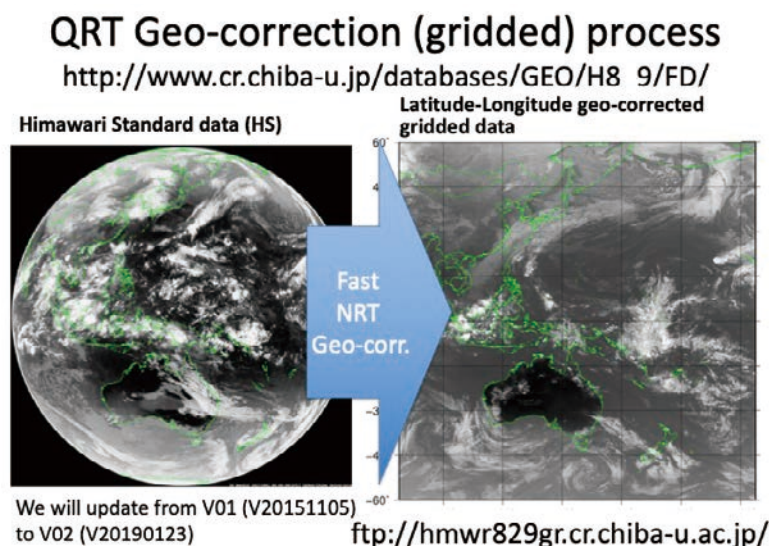


図2 全球観測データ(ひまわりスタンダード、HS)から準リアルタイムで緯度経度直交座標系に幾何補正するプログラムを開発^[4]・運用、および精度検証^[5]を行った。

Fig. 2 We developed a program that performs geometric correction from global observation data (Himawari Standard, HS) to a latitude/longitude orthogonal coordinate system in near real time^[4], operated it, and verified its accuracy^[5].

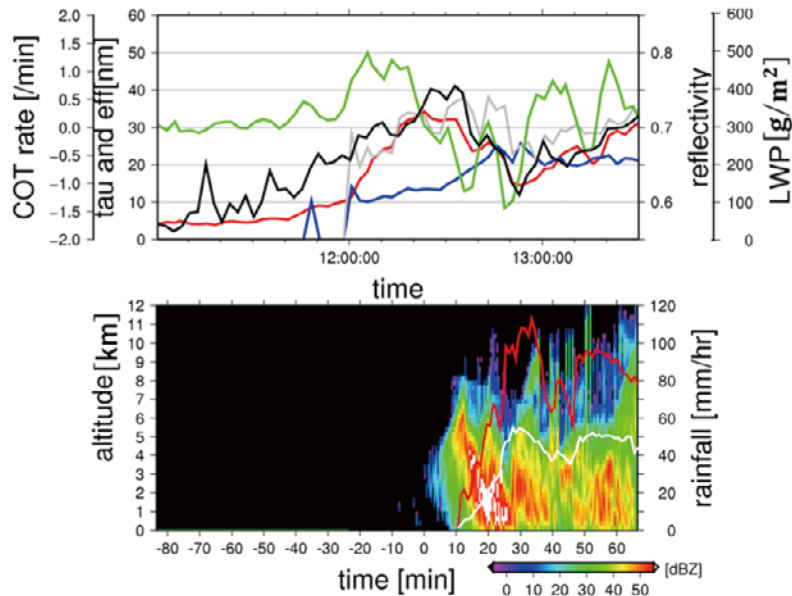


図3 2016年8月4日房総半島に発生した積雲～積乱雲を対象とした、上：ひまわり8号より観測・推定された雲の各種光学特性（可視反射率（黒）、光学的厚さ（赤）とその時間変化（緑）、雲粒の有効半径（青））。および下：PAWRのレーダ反射因子（カラー）、XRAIN地上最大降水強度（赤）、および平均降水強度（白）。
 Fig. 3 Time series of Himawari-8 captured cloud optical properties from 11:03 to 13:33 Japan Standard Time (JST), 4 August 2016, at 34.4° N and 140.00° E, Boso Area, Japan (top panel). Himawari-8 AH band 3 (red) reflectivity (black line), effective radii of clouds (eff, unit nm, blue line), liquid water path (LWP, unit g m^{-2} , gray line), the optical depth of cloud (tau, unit dimensionless, red line) and its time evaluation (cloud optical thickness, same as the optical depth of cloud (COT) rate, unit min^{-1} , light green line) analyzed by the cloud microphysical properties algorithm (CAPCOM). Time-height section of Phased Array Weather Radar (PAWR) radar reflectivity (colored, in dBZ), area maximum rain rate (mm h^{-1} , red line), and area aggregated rain rate (mm h^{-1} , white line) observed by the eXtended RADar Information Network (XRAIN) (bottom panel). Plotted variable times are synchronized, and the X-axis in the bottom panel is normalized at the first echo detection by PAWR (12:34:49 JST).

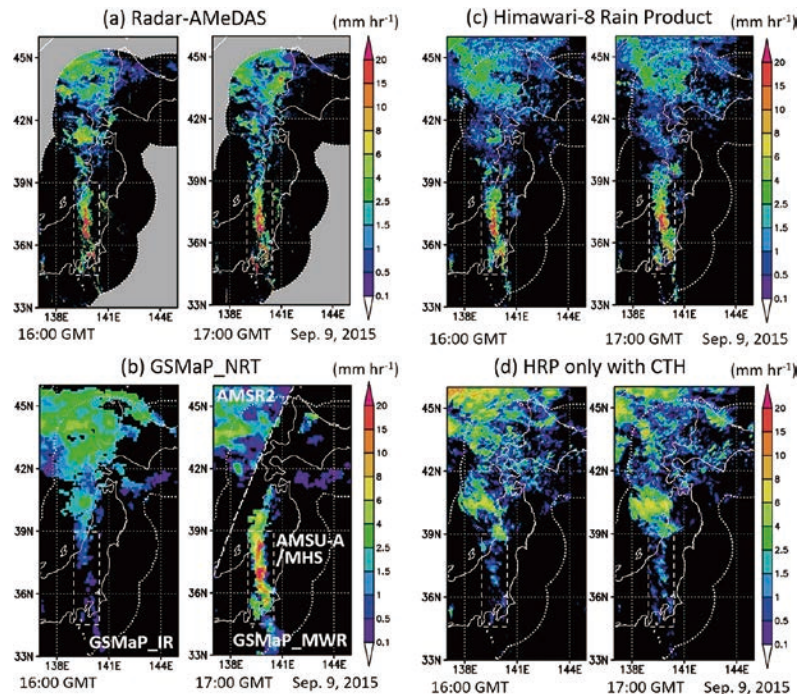


図4 2015年9月15日に発生した線状降水帯の例。(a) Radar-AMeDAS、(b) GSMapによる推定。左は静止気象衛星IRデータのみによる推定で、線状降水帯が再現されていない。(c) ひまわり8号データマルチバンドデータを機械学習させ推定した降水強度。線状降水帯が再現されている。(d) ひまわり8号10 μm 輝度温度のみで推定したもの。(b) 左と同様の結果となった^[9]。
 Fig. 4 An example of a linear precipitation belt that occurred on September 15, 2015. Estimation by (a) Radar-AMeDAS and (b) GSMap. The image on the left is an estimate based only on geostationary meteorological satellite IR data, and linear precipitation bands are not reproduced. (c) Precipitation intensity estimated by machine learning from Himawari-8 multiband data. A linear precipitation belt is reproduced. (d) Estimated using Himawari-8 10 μm brightness temperature only. (b) Same result as left^[9].

ングと絡めたレビューをまとめた^[3]。例として、図5に国内で多くの浸水被害を出した2019年台風19号上陸前後のNatural Color RGBを示す。上陸後の画像では1.6 μm 水バンドの変化から冠水域で青みが強く見えており、災害モニタリングのポテンシャルを示している^[10]。さらに、雲で覆われる頻度の高いアマゾン熱帯雨林でのNDVIの明確な季節変化の抽出に成功する^[11]等、陸域モニタリングの成果が出つつある。詳しくは市井教授による記載を参照して頂きたい。

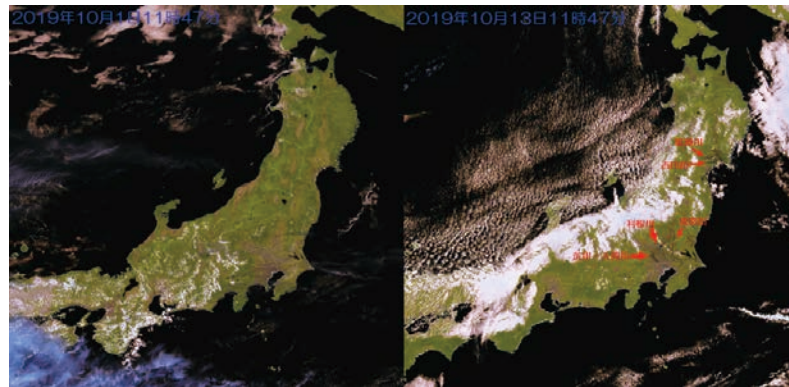


図5 (左) 2019年台風19号上陸前 (10/1) ひまわり8号 Natural Color RGB合成図、(右) 上陸後 (10/3) の合成図。左と比較して冠水域で青みが強く見える^[10]。

Fig. 5 (Left) Himawari-8 natural color RGB composite image before 2019 Typhoon No. 19 landfall (October 1), (Right) composite image after landfall (October 3). Compared to the left, the flooded area looks bluer^[10].

5 研究プレゼンスの向上

ひまわり8/9号のすごさを体感してもらうには、高い解像度かつ動画で見せることができる装置を人が多く集まる場所に設置し常時稼働させることが有効である。そのため、学長裁量経費により4Kディスプレイ6枚で8k x 6kの動画が再生できるPCを導入し、図書館オープンスペースに設置することで来訪者全てが体感できるようになった^[12]。スマートフォンで誰でもひまわり画像をインタラクティブに閲覧できるエコシステムの構築は情報通信技術 (ICT) の視点から重要である。情報通信機構 (NICT) は高速で可視化可能なシステムである「ひまわりリアルタイム Web」を構築し^[13, 14]、初期段階から CEReS は開発・運用に貢献している。

豊嶋特任研究員 (執筆時現在立正大学助教) の尽力により、ひまわり8号正式運用前からひまわりが捉えた特徴的な現象を YouTube 動画に上げており、この活動もひまわりと CEReS のさらなる認知に貢献した。その結果、多くのひまわり動画が NHK を中心としたテレビ放送で利用された。さらに2015年10月から翌年9月末までの1年間、毎日新聞全国版で毎週連載された「ひまわり EYE」の企画・監修を務めた^[15]。

次期ひまわり (ひまわり10号) は気象庁が仕様を策定・導入を行うが、導入前に有志による検討がなされ、参考意見という形にはなるが研究コミュニティが望むひまわりイメージの仕様について取りまとめ^[16]、一部は実際の仕様に反映された。ひまわり8/9号での協働を通じ、現業機関と研究コミュニティの距離は近くなったと実感している。

6 引用文献

- [1] 樋口篤志 (2022): 10-26 世界の気象衛星観測網, pp.548-549, 「リモートセンシング事典」日本リモートセンシング学会編, 752p, ISBN 978-4-621-30776-2.
- [2] Bessho, K., et al. (2016): An introduction to Himawari-8/9 – Japan’s new-generation geostationary meteorological satellites. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 151-183.
- [3] Higuchi, A. (2021): Toward more integrated utilizations of geostationary satellite data for disaster management and risk mitigation, *Remote Sens.*, **13**, 1553.
- [4] Takenaka, H., et al. (2020): Development of geolocation correction for geostationary satellite observation by phase only correlation method using visible channel, *Remote Sens.*, **12**, 2472.
- [5] Yamamoto, Y., et al. (2020): Geolocation accuracy assessment of Himawari-8/AHI imagery for application to terrestrial monitoring, *Remote Sens.*, **12**, 1372.
- [6] Wang, W., et al. (2020): An Introduction to the Geostationary-NASA Earth Exchange (GeoNEX) Products: 1. Top-of-Atmosphere reflectance and brightness temperature, *Remote Sens.*, **12**, 1267.
- [7] <https://amaterass.org/>
- [8] Morotomi, K., et al. (2020): Evolution of a tornado and debris ball associated with super Typhoon Hagibis 2019 observed by X-band Phased Array Weather Radar in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL091061.
- [9] Hirose, H., et al. (2019): High temporal rainfall estimations from Himawari-8 multiband observations using the random-forest machine-learning method, *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 689-710.
- [10] 樋口篤志 (2025): 2-3-8 人工衛星観測による台風通過後の被害の把握, 「台風の事典」(印刷中).
- [11] Hashimoto, H., et al. (2021): New generation geostationary satellite observations support seasonality in greenness of the Amazon evergreen forests, *Nature Comm.*, **12**, 684.
- [12] マイナビニュース：ひまわり8号に関する千葉大CEReSの仕事, 4k×6ディスプレイ構築に関する情報(ユニットコム[パソコン工房]事例) <http://news.mynavi.jp/kikaku/2015/08/26/002/>
- [13] Murata, K.T., et al. (2018): A web-based real-time and full-resolution data visualization for Himawari-8 satellite sensed images, *Earth Sci. Inform.*, **11**, 217-237.
- [14] Pavarangkoon, P., et al. (2020): Development of international mirroring system for real-time web of meteorological satellite data, *Earth Sci. Inform.*, **13**, 1461-1476.
- [15] 樋口篤志 ほか (2018): 第1章 ひまわり8号が観測した地球の姿, pp. 1-9, 気象研究ノート 第238号「静止気象衛星ひまわり8号・9号とその利用」岡本幸三・別所康太郎・吉崎徳人・村田英彦編, 187p.
- [16] 樋口篤志 ほか (2021): 次期静止ミッション検討分科会における次期ひまわり搭載イメージャに関する検討, 日本リモートセンシング学会誌, **41**, 461-468.



先駆的な農業リモートセンシング技術で社会課題を解決に導く — 気候変動適応策としての農業保険の強化と持続的食料生産の実現 —

Pioneering Agricultural Remote Sensing Technology to Solve Social Problems
– Strengthening the Agricultural Insurance As a Climate Change Adaptation and Achieving Sustainable Food Production –

本郷 千春 准教授

Hongo Chiharu, Associate Professor

特色ある研究の概要

環境と食料を軸足として、地球環境・気候変動に関わる課題や社会ニーズに対してリモートセンシング技術と環境診断情報等を駆使したソリューションの創出を行い、その成果をステークホルダーに社会実装するまでを一連の過程として行うことにより、グローバルな食料安全保障と持続的社会インフラの構築に取り組んでいる。ここでは、農業保険の損害評価をより効率的に行う手法の構築と社会実装をインドネシアで実施した国際協力プロジェクトについて紹介する。

気候変動の適応策として期待される農業保険は食料安全保障のための重要な社会インフラとして運用されているが、運用後間もないインドネシアでは多くの課題があった。最大の課題は、農業保険の中核である損害評価の迅速化と評価結果の客観性にあった。プロジェクトでは水稻を対象とし、保険の対象である干ばつ害、病虫害、水害について、迅速で客観性の高い損害評価手法の構築と社会実装を行った。従来の損害評価は評価員が目視で行っていたが、プロジェクトではUAVや衛星データ等の空間情報を駆使した評価プロセスを創った。検証の結果、評価時間の短縮、労力削減、客観性が確認されて農業保険における損害評価手法としての有効性が示され、インドネシア農業省作物保護局から高い評価を得ることができた。

The basic standing of research is on creating solutions to address issues related to the global environment and climate change as well as the needs of society with a focus on the environment and food production, using remote sensing technology and environmental diagnostic information in the agro-ecosystems. The author has conducted a wide range of research and social implementation of the results to stakeholders, aiming at contributing to the realization of global food security, as the overall goal. To illustrate the above, the author introduces an international cooperative project in Indonesia to develop a more efficient damage assessment method for agricultural insurance and its social implementation.

Agricultural insurance, which is expected to be an adaptation to climate change, has been operated as an important social infrastructure for food security. However, there were many challenges in Indonesia shortly after its operation. The biggest challenges were speeding up damage assessment, the core of agricultural insurance, and the objectivity of the assessment results. The project targeted paddy rice and developed and socially implemented a rapid and highly objective damage assessment method for pest and disease, drought, and flood damage covered by insurance.

Conventional damage assessment was executed visually by pest observers as assessors. The project developed an assessment process that uses UAVs, satellite data, and other spatial information. As a result of the verification, the method was effective as a damage assessment method for agricultural insurance, reducing assessment time, labor, and objectivity, and was highly evaluated by the Crop Protection Agency of the Indonesian Ministry of Agriculture.

1 はじめに

地球規模の気候変動や自然災害は、世界の食料生産に大きな影響を及ぼすことが予想されている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が発表した第6次評価報告書には、その主要なリスクのひとつに食料安全保障の脅威が挙げられている。報告書では、作物収量に対する気候変動の負の影響は確信度が高く、主に食料安全保障のうちの生産面に影響すること、気温上昇と降雨の変化による作物収量の損失、食料不足、食料価格の上昇を通して貧困層の生活に影響をもたらすと報告している。この食料安全保障の脆弱化と気候変動の影響は、経済成長を減速させ、経済社会上の不利益をもたらす。このような背景に対する国際的な動向として、農業保険制度の導入と普及があげられる。農業保険は、社会経済プロセスにおいて害を和らげ有益な機会を活かそうとするものであること、気候変動によって受ける収穫のダメージを軽減し農家が継続・持続的に農業生産をできるよう支援すること、食料安全保障の担保と気候変動やその影響に対する調整を促進する機能があることから、適応策として注目されている。

一方、ASEAN諸国は、人口の増加、耕作地の減少、気候変動の影響など、さまざまな問題に直面しており、インドネシアも例外ではない。コメが主食であるインドネシアの水稻生産量は世界第4位であるが、異常気象による作物被害・減収が続いている。この食料需給の逼迫した状況から、国家レベルでの農業保険の早期導入と普及の必要性の声が上がった。そして2013年に農民の保護とエンパワーメントに関する法律が制定され、2016年に農業保険制度が正式に運用開始された。しかし、運用後日が浅いインドネシアでは、農業保険の中核である損害評価の迅速化と評価結果の客観性に課題があり農業保険の普及を妨げる一因となっていた。

そこで、JST/JICA地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）「食料安全保障を目指した気候変動適応策としての農業保険における損害評価手法の構築と社会実装」プロジェクト^[1, 2]では水稻を対象とし、保険支払いの対象である干ばつ害、病虫害、水害について、迅速で客観性の高い損害評価手法の構築と社会実装を西ジャワ州で行うことを目指した。成果のうちここでは、病虫害の損害評価手法について述べる。

2 研究のねらい・上位目標

農業保険制度は複数のステップから構成される金融システムであるが、その中で損害評価は支払い保証額の算出に直結する重要なステップであり、より精密に評価し、可能な限り迅速であることが求められる。現在インドネシアで行われている損害評価方法は、約100～300水田圃場が含まれる末端の灌漑エリアから3圃場だけを選択し、その対角線上にある10株の稲の被害状況をペストオブザーバーと呼ばれる評価者が目視で評価する（図1）。合計30株の稲の評価結果をもとに、灌漑エリア全体の平均損害率を算出するため、保険加入者が納得できるような客観的な評価方法が求められている。

そこで、気候変動の適応策である農業保険のインドネシアにおける普及を通して国際的な規模での食料安全保障に貢献することを上位目標に設定し、UAVや衛星データ等の空間情報を駆使した効果的・効率的に遂行可能な評価プロセスを創り（図2）、現場のニーズを直接的に取込みつつ、損害評価員・関係者らと共同で現行手法を統合した新たな損害評価手法を構築し社会実装することを研究のねらいとした。

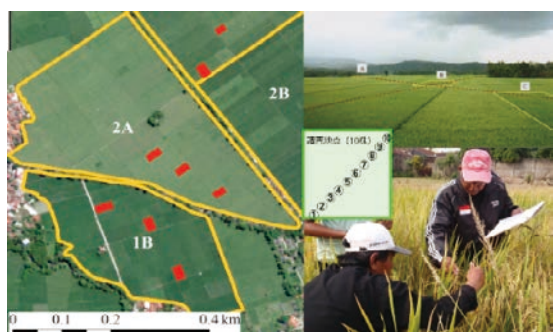


図1 現行評価手法の概略

Fig. 1 Outline of current assessment methodology method.



図2 新たな損害評価手法のコンセプト

Fig. 2 Concept of new damage assessment.

3 研究の実施方法

実証試験地をインドネシア・西ジャワ州チアンジュール県チヘア北東部のチヘア灌漑地区とし、ボゴール農科大学を相手国研究代表機関とし、社会実装のステークホルダーとして西ジャワ州政府農政局、比較対象として社会条件が異なるバリ州に立地するウダヤナ大学及び、バドゥン県農政事務所が参画して実施した。また、日本側は代表研究機関の千葉大学と、東京大学、東北大学、日本大学が共同研究機関として参画した。

対象地のチヘア灌漑地区は赤道直下に位置し、年間を通じて熱帯性気候で、4月から10月が乾季、11月から3月が雨季である。約8,000 haの広大な灌漑地域である対象地では、ある場所で発生したイネ白葉枯（BLB）病菌が灌漑水によって下流に運ばれ、地域全体に広がるため、毎年広い地域で大きな被害が発生している。また、圃場の形や大きさは一様ではなく、灌漑地域

ごとに作付け時期が異なるため、生育ステージの異なる圃場が混在しているのが特徴である。

対象地において、損害評価手法の構築・運用のための情報基盤の整備（病虫害に係る衛星、UAV、GIS、疫病実測調査データ等）、新たな損害評価手法の構築、現行手法と新たな損害評価手法の統合及び改良、評価手法の開発および運用に関するキャパシティ・ディベロップメント、新たな損害評価手法の社会実装に取組んだ。この社会実装活動を確実なものにするために、最初のステップとして損害評価の実務を行う州のレベルで新手法の有効性・有用性を実際の運用トライアルを通して州の関係者に認知してもらった。次のステップとして国レベルの中央政府に対して州主導でアプローチをし、国の認知と賛同を得るために新しい手法のテクニカルガイドライン作成後に実務に関する現場の考えと意向を伝え、上位目標達成に向けたプロジェクトの活動を推進した。

4 研究成果

従来の損害評価は評価員が目視で行っていたが、プロジェクトではUAVや衛星データ等の空間情報を駆使した評価プロセスを創り、現場のニーズを直接的に取込みつつ、損害評価員・関係者らと共同で現行手法を統合した新たな損害評価手法を構築した。

対象地では水稻の移植期間に幅があることや農業保険の開始が移植期からであることから、最初にSentinel-1マイクロ波データからスケジューラーを利用した移植日推定の自動化処理を適用した水稻の移植日を推定するアルゴリズムを構築した^[3]。このプロダクトから同時期の生育ステージの水田を対象として、BLB病の特徴である葉色や植生量の変化を利用して（図3）、衛星データやUAVデータからBLB被害率を算出する新たな損害評価手法を構築した^[4-8]（図4、図5）。

UAVによる空撮や疫病実測調査データの取得はステークホルダーと共に活動を行い、両者のニーズを調整し、相互に納得しながら進めつつ、最終的に損害評価の実務者である州政府ペストオブザーバーが自ら統合化手法を用いて評価が行えるように多くの実践的な実装トライアルを行った。これらの実装トライアルで得た結果を踏まえ、新たな手法についてテクニカルガイドラインの作成を行い、新手法を用いることで評価時間が平均60%以上短縮され、労力削減と客観性



図3 左：個葉のBLB病徴
右：圃場でのBLB発生の様子

Fig. 3 Left: BLB disease symptoms on individual leaves
Right: BLB outbreak in a field.

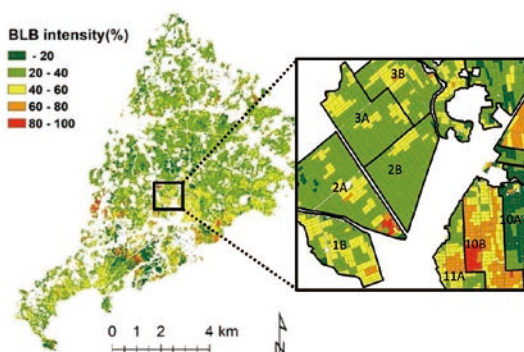


図4 衛星データを用いたBLB損害評価結果の事例

Fig. 4 BLB damage assessment results using satellite data.

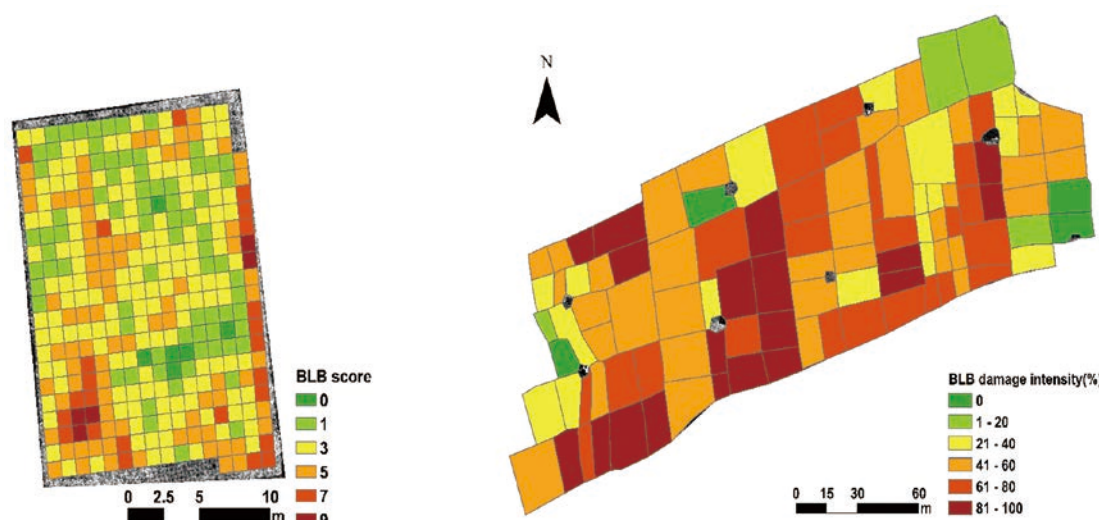


図5 UAVデータを用いたBLB損害評価結果の事例（左：10 mグリッドで評価したBLBスコア、右：BLBスコアから算出した圃場単位のBLB被害率）

Fig. 5 BLB damage assessment results using UAV data (Left: BLB score evaluated on a 10-meter grid, Right: BLB damage intensity of field calculated from BLB score).



図6 マスター・オブ・トレーナー育成の様子（左：プロジェクト開始当初UAV操作の指導を受ける評価員、中央：評価員だけでUAV空撮を実施、右：データ解析からBLB評価結果を導出する評価員）

Fig. 6 Master of Trainer Training (Left: Assessor receiving instruction on UAV operation at the beginning of the project; Center: Assessor conducting UAV shooting; Right: Assessor deriving BLB evaluation results from data analysis).

を確保した農業保険の新たな被害評価プロセスとして損害評価科学委員会全体会議の場で承認を得た。

また、プロジェクトでは技術移転を行う方法として、最初に将来新技術を広く教える立場に立つ人（トレーナー）に対してトレーニングを行い、マスター・オブ・トレーナーを育成した（図6）。その後は、このトレーナーが広く関係者に対してトレーニングを行っていくという方法であるが、SATREPSプロジェクト終了後も農業省主催の新評価手法の普及研修においてインドネシア国内の11州の損害評価員に対して技術移転を行うなど現在も現場で活躍しており、人的資源開発を伴った社会実装が実現した。以上のことから、プロジェクトにおいて農業保険という金融システムへの科学技術の導入を実現し、両国の活動を通して得られた成果は気候変動に対する新たな適応策に貢献するものである。インドネシアへの技術移転が将来的にASEAN 諸国の食料安全保障の強化につながるなどから、地球規模課題解決に資する重要性が高く、上位目標を達成出来た。

5 研究プレゼンスの向上

インドネシアの農業保険制度は国が制度の維持・改善を管掌し、州政府は損害に係る実務を管掌している。そのため、評価手法に関しては農業省作物保護局の認知と承認を得る必要がある。そこで構築した評価手法のテクニカルガイドラインを取り纏め、新たな評価手法の実際の運用に向けて中央省庁に働きかけた結果、農業省作物保護局長からプロジェクトで構築した手法の使用を支持する旨の書簡が西ジャワ州農政局長へ出状され、高い評価を得ることができた。さらに、フランス、スペイン、インドの農業保険会社・農業省などへのアウトリーチ活動を行うとともに、2022年9月には日本、インドネシア、フランスの3ヶ国ワークショップを開催し、当該州以外への活発な情報発信と国際的な認知を推進した。

6 グローバルな食料安全保障の実現を目指した更なる拡大

図7に示したように、リモートセンシング技術は農業生態系の過去、現在、未来の状況を把握・予測するための強力な技術であり、食料生産の場面だけでなく環境保全、農業災害、マーケティング、生産管理・社会インフラなどあらゆる場面での活用が可能である。そして、食料生産分野には多岐にわたる評価や査定を必要としている応用分野がある。評価や査定のためには様々な種類のデータが必要だが、応用する分野は違っていてもその評価・査定手法を構築・運用するために使用するデータの多くは重複している。そこで、圃場筆ポリゴンをデジタル農業のエンジンとし、食料生産に係る各種データを一元化して検証データ付きの食料生産情報データベースとすることで、各種データやツールを効率的、効果的に活用して手法の構築と運用が可能である。例えば干ばつ害を回避するためには灌漑水配水計画の策定が必須であるが、蓄積した空間情報をマルチユースすることで、策定に使用される水稻の栽培必要水量を5日間間隔で衛星データから算出

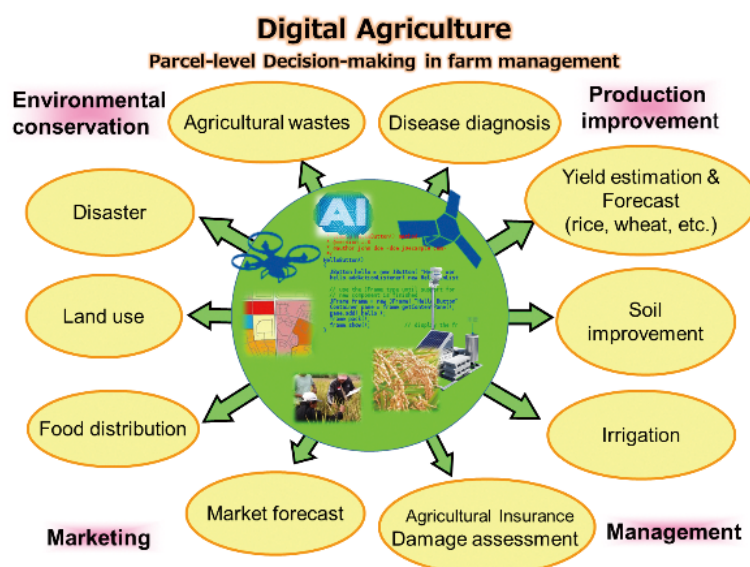


図7 食料安全保障分野でのリモートセンシングの多面的活用

Fig. 7 Multifaceted use of remote sensing in the field of food security.



図8 実証試験地の水稻栽培必要水量の算出結果

Fig. 8 Calculation results of the amount of water required for rice cultivation at the research site.

することが出来る（図8）。早期に必要な栽培水量の空間分布を把握することは干ばつに対する対策となり、作物の減収を回避するための管理につながる。対策を取ったにも関わらず被害を受けてしまった場合には、損害評価結果に基づいて保険を支払うことで農家を守ることが出来る。生産管理から社会インフラである農業保険までを包括して取り組むことが、持続的な食料生産を担保するために求められることである。

7 引用文献

- [1] https://www.jst.go.jp/global/hyouka/pdf/h2804_indonesia_terminal-evaluation-report.pdf.
- [2] https://www.jst.go.jp/global/public/pdf/jstnews_202205.pdf.
- [3] Naohiro Manago, Chiharu Hongo, Yuki Sofue, Gunardi Sigit, Budi Utoyo, Transplanting Date Estimation Using Sentinel-1 Satellite Data for Paddy Rice Damage Assessment in Indonesia, *Agriculture* **10**(12) 625, 2020, 10.3390/agriculture1012062.
- [4] Chiharu Hongo, Shun Isono, Gunardi Sigit, Eisaku Tamura, Efficient Damage Assessment of Rice Bacterial Leaf Blight Disease in Agricultural Insurance Using UAV Data, *Agronomy* **14**(6) 1328, 2024, 10.3390/agronomy14061328.
- [5] Chiharu Hongo, Yusuke Takahashi, Gunardi Sigit, Budi Utoyo, Eisaku Tamura, Advanced Damage Assessment Method for Bacterial Leaf Blight Disease in Rice by Integrating Remote Sensing Data for Agricultural Insurance, *Journal of Agricultural Science* **14**(4) 1, 2022, 10.5539/jas.v14n4p1.
- [6] Arif K. Wijayanto, Lilik B. Prasetyo, Sahid A. Hudjimartsu, Gunardi Sigit, Chiharu Hongo, Textural features for BLB disease damage assessment in paddy fields using drone data and machine learning: Enhancing disease detection accuracy, *Smart Agricultural Technology*, **8** 100498, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100498>.
- [7] Gusti Ngurah Alit, Susanta Wirya, Made Satya, Andrayuga, I Putu Sudiarta, Masahiro Shishido, Chiharu Hongo, The Existing Method to Assess the Disease Incidence of Bacteria Leaf Blight and Its Effect to Rice Yield to Support the Indonesian Agriculture Insurance, *Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian*, **15**(3) 641-655, 2021.
- [8] Rani Yudarwati, Chiharu Hongo, Gunardi Sigit, Baba Barus, Budi Utoyo, Bacterial Leaf Blight Detection in Rice Crops Using Ground-Based Spectroradiometer Data and Multi-temporal Satellites Images, *Journal of Agricultural Science*, **12**(2) 38, 2020, 10.5539/jas.v12n2p38.