

第 532 回 生 存 圏 シ ン ポ ジ ウ ム

第 18 回
MUレーダー・赤道大気レーダー
シンポジウム

2024年9月26日・27日

京都大学生存圏研究所

は じ め に

滋賀県甲賀市信楽町に位置する MU レーダーは、完成当初の 1984 年から全国共同利用に供され、広範な学問分野に渡る多くの成果を上げ続けている。2004 年に導入された「MU レーダー観測強化システム」では、レーダーイメージング観測が可能になるなど、常に世界で最も高機能な大型大気レーダーの一つとして活躍を続けている。MU レーダーは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) より IEEE マイルストーンに認定され、また電子情報通信学会マイルストーンと電気学会「でんきの礎」にも選定された。2017 年には学内予算により「MU レーダー高感度観測システム」が整備され、送受信制御ユニットなどの一部を更新、受信感度が向上しており、益々その活躍が期待されている。今年は MU レーダーの完成から 40 周年に当たり、記念の式典・国際シンポジウムが 11 月 18 日～21 日に開催される。

一方、インドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に位置する赤道大気レーダー (EAR) は、2000 年度末に完成した大型大気観測用レーダーで、京都大学生存圏研究所 (RISH) とインドネシア国立研究革新庁 (BRIN) (旧 航空宇宙庁 (LAPAN)) との協同運用により長期連続観測が続けられている。2001～2006 年度に実施された科研費・特定領域研究「赤道大気上下結合 (CPEA)」において、その中核設備として利用され、2005 年度から EAR 及びその関連設備の共同利用を開始した。当初から国際共同利用にも供しており、海外の研究者による共同利用が全課題数の約 3 割を占めている。また、京都大学では、赤道大気レーダーを MU レーダー並に高性能・高機能化するべく赤道 MU レーダー (EMU) を要求している。日本学術会議の学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン「学術大型研究計画」(マスタープラン 2014・2017・2020) の重点大型研究計画ならびに「未来の学術振興構想 (2023 年版)」に EMU を主要設備の一つとする「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」が選定された。

本年 9 月 26 日・27 日に、第 18 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウムをオンライン開催した。共同利用により得られた研究成果のほか、大気科学・レーダー工学に関連する研究成果、計画について 16 件の研究発表が行われた。

2024 年 9 月

京都大学生存圏研究所
MU レーダー/赤道大気レーダー共同利用・共同研究専門委員会
委員長 橋口 浩之

目 次

MU レーダー・赤道大気レーダー共同利用の現状	1
橋口浩之(京大 RISH)	
信楽イオノゾンデ観測の自動読み取りシステムと foF2 の長期統計解析	4
横山竜宏・劉鵬・采山裕紀・寺内充(京大 RISH)	
機械学習を用いた電離圏擾乱現象自動検出モデルの作成	7
春名健太郎・劉鵬・采山裕紀・横山竜宏(京大 RISH)	
2023 年 11 月 5 日の磁気嵐に伴う電離圏変動の 3 次元構造	11
斎藤享(電子航法研)・野崎太成・山本衛(京大 RISH)	
Lifetime and Zonal migration of Equatorial Plasma Bubbles observed using the Indonesian ROTI map	14
Prayitno Abadi (BRIN, Indonesia)・Yuichi Otsuka (ISEE, Nagoya Univ.)	
High-resolution 3-D imaging of electron density perturbations using ultra-dense GNSS observation networks in Japan	16
Weizheng Fu・Yuichi Otsuka (ISEE, Nagoya Univ.)・Nicholas Ssessanga (Univ. Oslo)	
機械学習に基づく電離層の全電子数の時空間予測	19
劉鵬・横山竜宏・惣宇利卓弥・山本衛(京大 RISH)	
鉛直上向き気象レーダーと大気レーダーを用いたブライトバンド近傍における層状性降水成長過程の観測	23
重尚一・中村聡恵・戸田望(京大理)・後藤悠介・篠田太郎(名大 ISEE)・橋口浩之(京大 RISH)	
2024 年梅雨時期におけるライダーとレーダーによる雲・降水観測の初期解析結果	27
柴田泰邦(都立大)・重尚一(京大理)・矢吹正教・橋口浩之(京大 RISH)	
MU レーダーと MRR によるブライトバンドの同時観測	30
佐伯悠太郎・下舞豊志 (島根大自然科学)	
Using MU radar data (1987-2022) to re-examine the seasonal dependence of atmospheric parameters	31
Hubert Luce・Hiroyuki Hashiguchi・Toshitaka Tsuda (RISH, Kyoto Univ.)	
MU レーダー観測に基づいた台風のメソスケール風速場の特徴について	34
柴垣佳明(大阪電通大)・橋口浩之・Hubert Luce(京大 RISH)・山本真之(NICT)・山中大 学(地球研)	
赤道大気レーダーと境界層レーダーを用いた降水雲内の大気鉛直流の推定-2	37
戸田望・重尚一(京大理)・Christopher R. Williams (Univ. of Colorado Boulder, USA)・西 憲敬(福岡大理)・橋口浩之(京大 RISH)	
Ka 帯衛星回線の降雨減衰比と周波数スケールリング法の検討	41
前川泰之(大阪電通大)	
車載ライダーによる山岳・寒冷地の大気エアロゾル立体観測	47
矢吹正教(京大 RISH)・三浦和彦(東京理科大、富士山環境研究センター)・平沢尚彦 (極地研)	
1.3GHz 帯大気レーダーを用いた MIMO レーダーの開発	50
橋口浩之・石井佑奈・西村耕司(京大 RISH)	

MU レーダー・赤道大気レーダー共同利用の現状

橋口浩之
(京都大学生存圏研究所)

1. はじめに

MU レーダーは 1984 年の完成当初から、また赤道大気レーダー(EAR)も 2005 年から全国(国際)共同利用に供し、多くの研究成果を生み出してきた。当初は異なる共同利用委員会を組織し、課題の審査やレーダー運用等の議論を行ってきたが、2012 年 6 月に両委員会を統合して MU レーダー/赤道大気レーダー全国国際共同利用専門委員会(現 MU レーダー/赤道大気レーダー共同利用・共同研究専門委員会)を組織し、2012 年 12 月公募分から共同利用を統一した。本報告では、共同利用の現状について報告する。

2. MU レーダー

MU レーダーは滋賀県甲賀市信楽町に位置する中層・超高層及び下層大気観測用 VHF 帯大型レーダーであり、高度 1~25 km の対流圏・下部成層圏、高度 60~90 km の中間圏及び高度 100~500 km の電離圏領域の観測が可能である。MU レーダーの最大の特徴は、アンテナ素子毎に取り付けた小型半導体送受信機(合計 475 個)を個別制御することにより、1 秒間に 2500 回という高速でレーダービーム方向を変えることが可能であり、また、25 個のサブアレイアンテナに分割して使用することも可能である点である。こうした柔軟なシステム設計のため、開発後約 40 年を経た今も世界で最も高機能な大型大気レーダーの一つとして活躍を続けている。2003 年度には「MU レーダー観測強化システム」が導入され、レーダーイメージング観測などの機能向上が図られた。2016 年度末には全学経費(設備整備経費)により「MU レーダー高感度観測システム」が導入された。送受信制御ユニット、アンテナ素子、およびアンテナ同軸ケーブルの一部が更新され、受信感度が向上(回復)した。2017 年 7 月 17 日に信楽 MU 観測所に落雷があり、MU レーダーも被害を受けた。1 ヶ月ほどで仮復旧したが、完全復旧のため国大協保険により 2018 度末に合成分配器及び分配合成制御器の一部を更新した。2021 年 8 月 23 日に再び落雷があり、MU レーダー超多チャンネルデジタル受信システムが被害を受けた。すぐに仮復旧し、完全復旧のため文部科学省から災害復旧予算が認められ、2023 年度末に納入された。

信楽 MU 観測所は、MU レーダーと協同観測するさまざまな大気観測機器の開発フィールドとしても活用されており、例えば、MU レーダーが観測できない高度 2km 以下の風速を測定するために開発された下部対流圏レーダー(LTR)やレンズアンテナウィンドプロファイラ(LQ-7)は、気象庁の全国 33 カ所の現業用ウィンドプロファイラとして採用されている。MU レーダーの標準的な観測モードのデータはホームページ上で逐次公開されている。(MU レーダーホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/>)。

MU レーダーは「世界初のアクティブ・フェーズド・アレイ方式の大気レーダー」として、2014 年 11 月に IEEE マイルストーンに認定された。これは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である IEEE が、IEEE の分野における歴史的偉業に対して認定する賞で、認定されるためには 25 年以上に渡って世の中で高く評価を受けてきたという実績が必要である。最近では、国内で発明された QR コードが認定されている。また、MU レーダーは、電子情報通信学会が創立 100 周年を記念して新たに創設した、電子情報通信学会マイルストーンにも選定された。さらに、2018 年に電気学会から「でんきの礎」が授与された。2024 年は MU レーダー完成から 40 周年に当たることから、International Symposium on the 40th Anniversary of the MU Radar (MU レーダー 40 周年記念国際シンポジウム)が 11 月 18~21 日に宇治キャンパスならびにオンラインで開催される。

3. 赤道大気レーダー

赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)は、周波数 47MHz、3 素子八木アンテナ 560 本から構成される直径約 110 m の略円形アンテナアレイを備えた、インドネシア共和国のスマトラ島中西部に位置する西スマトラ州コタバンに 2000 年度末に完成した大型の大気観測用レーダーである。本装置は、小型の送受信モジュールが全ての八木アンテナの直下に備えられたアクティブ・フェーズド・アレイ構成をとっており、総送信出力が 100 kW、アンテナビーム方向を天頂角 30 度以内の範囲で自由に設定し、送信パルス毎に変えることができ、赤道域に設置されている大気レーダーの中で世界最高性能を誇っている。EAR はインドネシア国立研究革新庁(BRIN) (旧 航空宇宙庁(LAPAN))との密接な連携のもとで運営されており、2001 年 7 月からまで長期連続観測を続けてきた。従来 LAPAN と結んでいた協定書を更新し、2024 年 8 月 2 日に BRIN・RISH 間の Technical Agreement が締結された。EAR 観測データの 10 分平均値はホームページ上で逐次公開されている。(EAR ホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/>)。2019 年 9 月 29 日に赤道大気観測所近傍に落雷があり、赤道大気レーダーも被害を受けた。11 月初めに仮復旧したが、完全復旧のため文部科学省に災害復旧予算を申請し、認められた。落雷の影響と思われるが、2020 年 4 月中旬から電波を送信できなくなり観測を中断していたが、2024 年 9 月に変復調装置が更新され、連続観測が再開された。

EAR は MU レーダーに比べて送信出力が 1/10 であり、中間圏や電離圏の IS 観測を行うには感度が不足している。また、受信チャンネルは 1 個のみであるため、空間領域のイメージング観測ができないなど、機能面でも MU レーダーに劣っている。下層大気で発生した大気波動が上方へ伝搬し、上層大気の運動を変化させる様子など、大気の構造・運動の解明をより一層進めるため、MU レーダーと同等の感度・機能を有する「赤道 MU レーダー(EMU)」の新設を要求している。この EMU を主要設備の一つとする大型研究計画「太陽地球系結合過程の研究基盤構築」は日本学術会議のマスタープラン 2014・2017・2020 の重点大型研究計画の一つとして採択された(2014・2017 代表: 津田敏隆, 2020 代表: 山極壽一京大総長)。また、「未来の学術振興構想」の 2023 年版にも掲載された。

4. 共同利用の概要と現在までの推移

MU レーダーは、アジア域最大規模の大気観測用大型レーダーであり、高度 2 km の対流圏から、高度 400 km の超高層大気(熱圏・電離圏)にいたる大気の運動、大気循環を観測する。1984 年の完成以来、全国共同利用に供され、超高層物理学、気象学、天文学、電気、電子工学、宇宙物理学など広範な分野に渡って多くの成果を上げている。図 1 にこれまでの

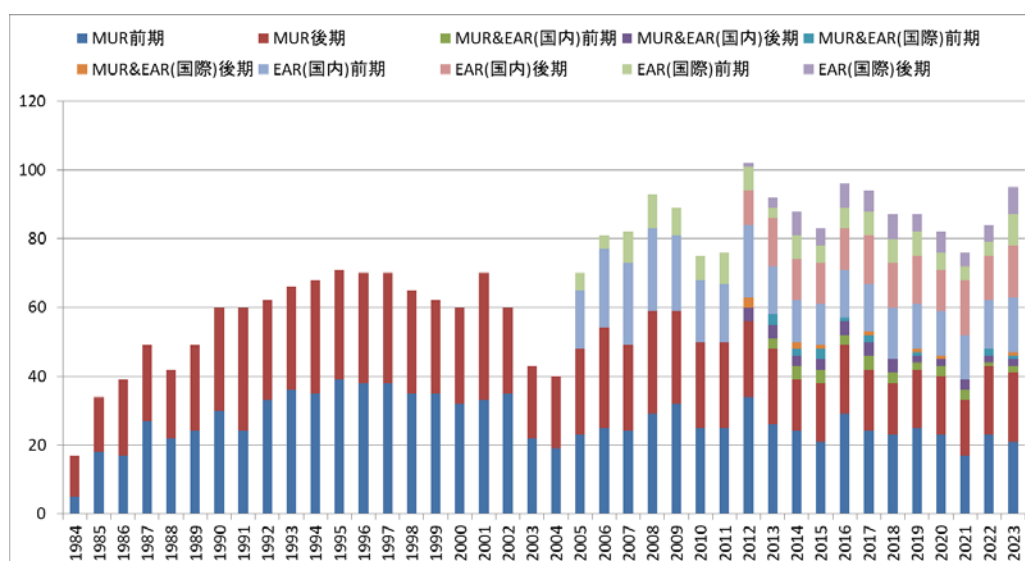


図 1. MU レーダー・赤道大気レーダー共同利用の課題件数の年次推移

共同利用課題数の推移を赤道大気レーダー共同利用の課題数とともに示す。また、図 2 に MU レーダーの観測時間の推移を示す。2023 年度には、キャンペーン(長期間)観測課題として、前期に重尚一准教授代表の「層状性降水域における固体降水粒子の観測」が実施された。観測データのうち標準観測については観測後直ちに、その他の観測については 1 年を経過したデータを「生存圏データベース共同利用」の一環として共同利用に供している。

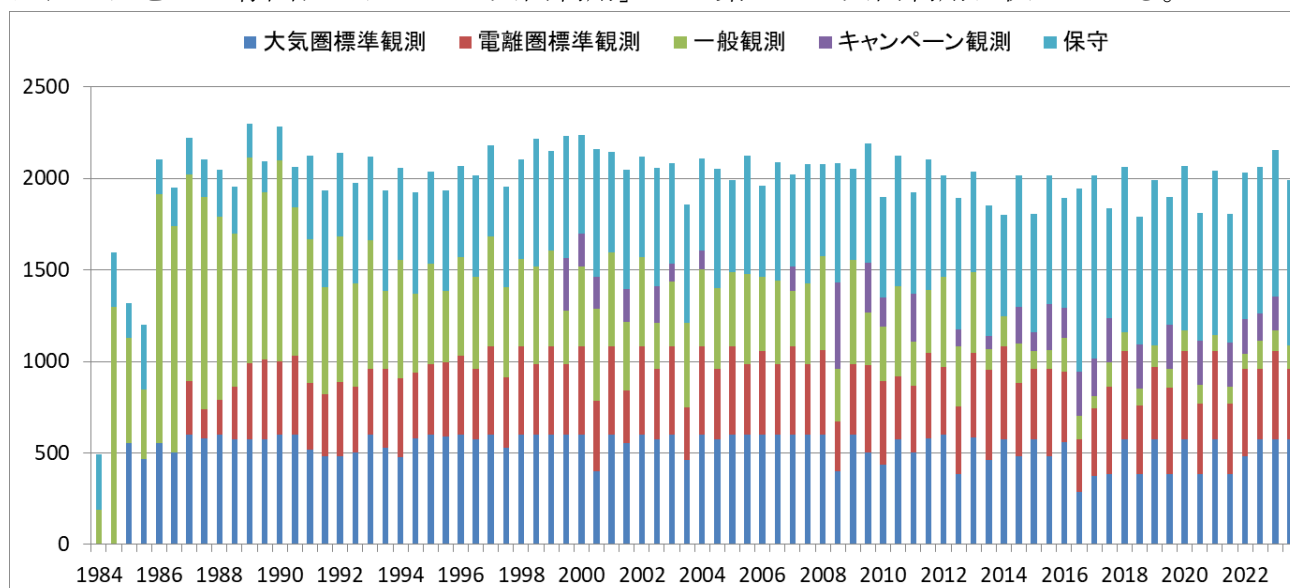


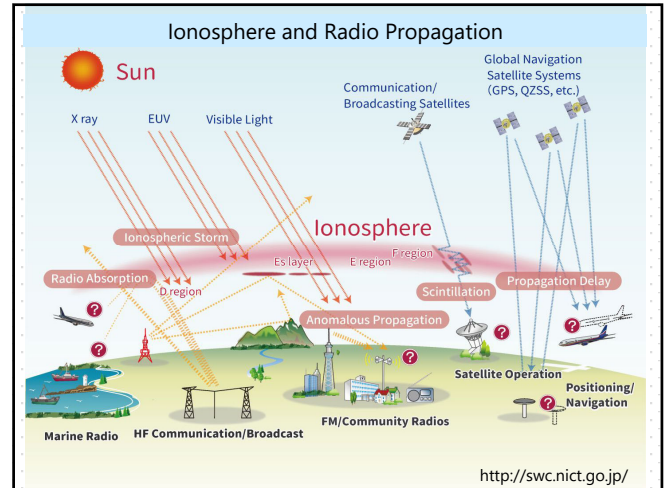
図 2. MU レーダー共同利用の観測時間の半年毎の推移。

一方、EAR は、本研究所の重要な海外拠点として、国内外の研究者との共同研究によって生存圏の科学を推進するという大きな役割を担っている。同時にインドネシアおよび周辺諸国における研究啓発の拠点として、教育・セミナーのための利用も想定される。EAR は 2005 年度から全国国際共同利用を開始した。EAR の共同利用については、開始当初の議論から以下のような性格付けが行われてきた。(1) EAR の共同利用は、施設が外国に位置することから必然的に「全国」「国際」型が重なった形態をとること、(2) 「国際」対応について、当初 2 年間は、利用者を原則として日本及びインドネシアからに限定して開始し、2007 年度から本格的な全国国際共同利用施設として運営すること、(3) 共同利用は学術目的とし、海外からの利用者の資格は個別に判断すること等である。また、EAR 共同利用には、EAR を直接利用するものの他、EAR サイトへの機器の持込み観測、すなわち観測場所としての利用も含まれる。実際の観測実施については、EAR の特性を考慮し、課題をいくつかのグループに分けてスケジュールする方式を取っている。また予算の許す範囲において、EAR までの旅費(日本人研究者については日本から、インドネシア人研究者についてはインドネシア国内旅費)を支給している。

MU レーダー及び赤道大気レーダーによって得られたデータは、IUGONET プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」(<http://www.iugonet.org/>)によって、メタデータ・データベースが整備され、また解析ソフトウェア SPEDAS/UDAS/M-UDAS により簡単に図をプロットできる環境も構築されている。MU レーダー・赤道大気レーダーのデータベースの重要性が認められ、生存圏研究所は 2016 年 3 月に ISC(国際学術会議)の WDS(世界科学データシステム)の Regular Member に認定され、2023 年 4 月に更新された。MU レーダー及び赤道大気レーダーの全国国際共同利用はこれまで順調に推移してきており、今後は MU レーダー・赤道大気レーダーを含む国際レーダーネットワークによる研究が一層進むものと期待される。



1



2

Background

- In Shigaraki MU Observatory, an ionosonde has been operated since the beginning of the MU radar operation in 1984. Digital images after 2001 are available in the database of RISH, Kyoto University.
- The scaled parameters of the Shigaraki ionograms have not been available in the database, so that users have to scale the ionograms by their own
- In order to utilize the Shigaraki ionosonde easily, we have been developing an auto-scaling system of ionograms.

3

Location

- Kokubunji ionosonde is located at about 350 km east of Shigaraki MU Observatory. Hourly parameters have been manually scaled.

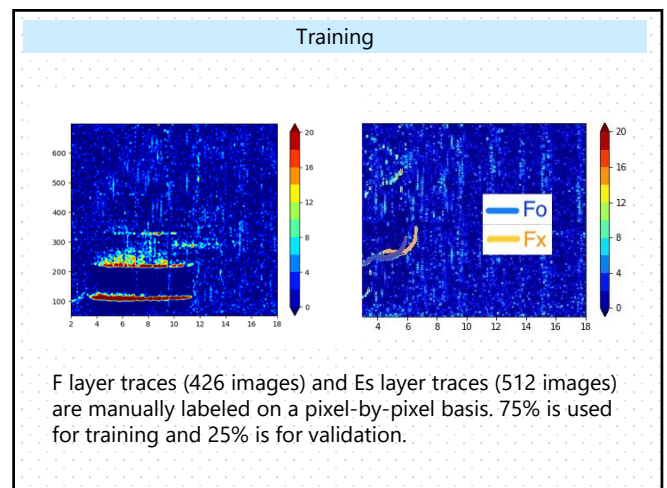
4

Mask R-CNN (Mask Regional Convolutional Neural Network)

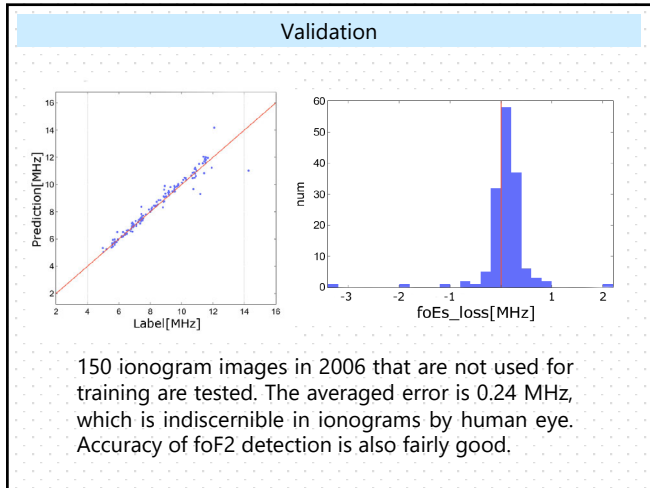
<https://www.slideshare.net/windmdk/mask-rcnn>

Mask R-CNN has been developed based on various CNN network. It is popularly used for object detection and segmentation. ResNet50 is used as Backbone in this study.

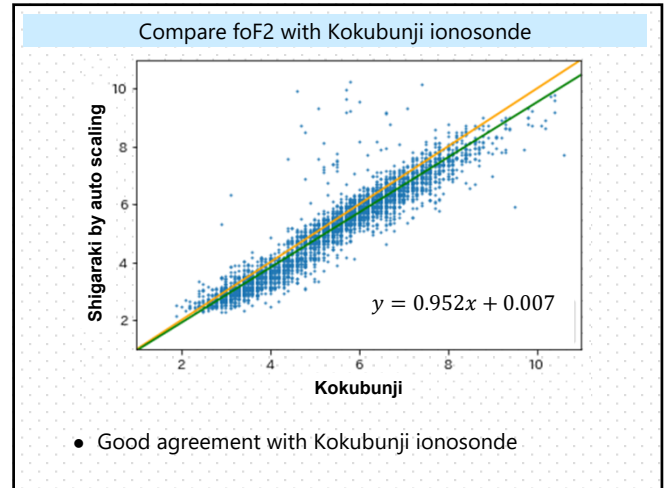
5



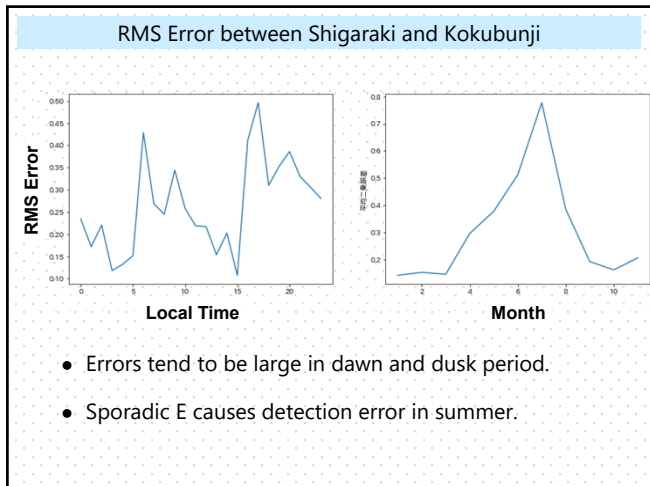
6



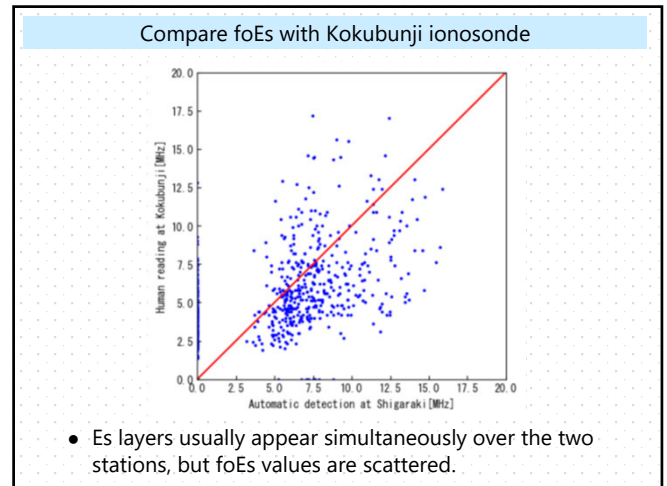
7



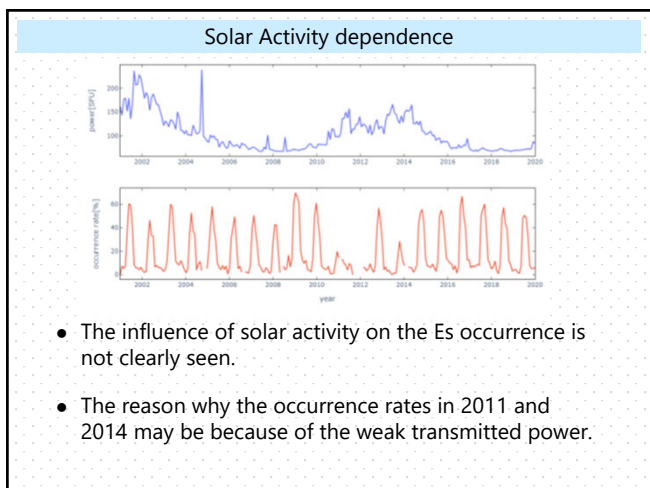
8



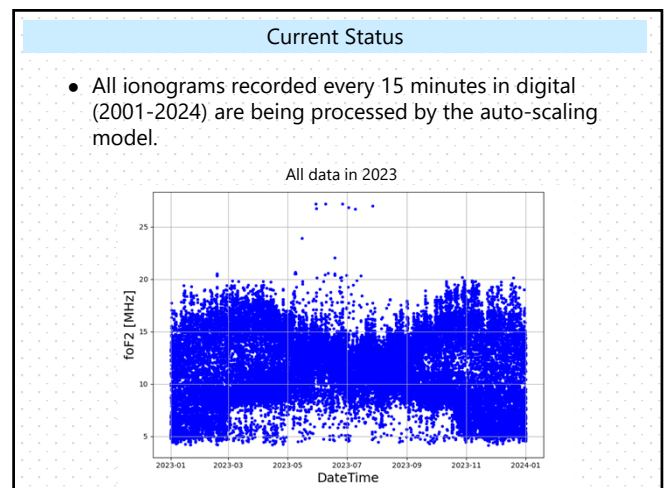
9



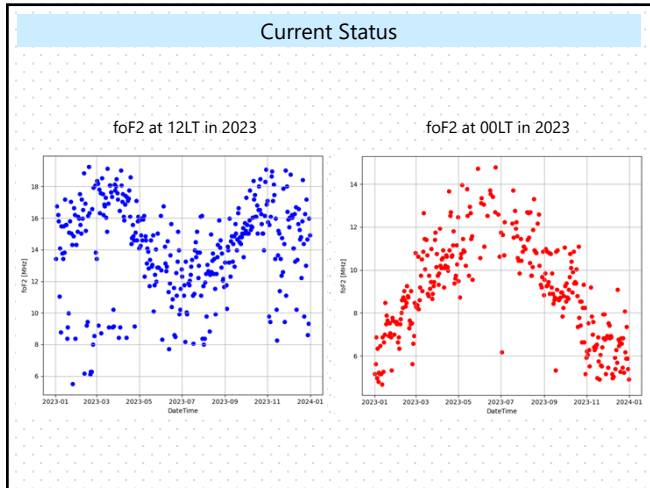
10



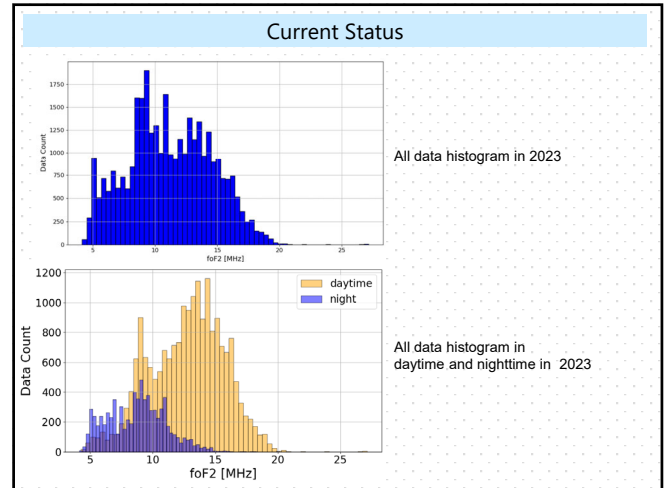
11



12



13



14

Future Study

- Shigaraki ionograms before 2000 were not digitally recorded. Printed ionograms will be scanned to be used for machine learning model.

15

Summary

- Machine learning model that can automatically estimate foF2 and foEs has been developed. Ionosonde observations at Shigaraki MU observatory from 2001 to 2024 are being processed. The results are consistent with our previous knowledge and Kokubunji ionosonde observation.
- The obtained values are validated by comparing with Kokubunji data, which proves that the auto-scaling system works correctly. It is expected that the auto-scaling system developed in this research can be applied to other ionosonde systems.
- Other parameters such as h'F2 and fmin may also be estimated automatically. More training data should be prepared.

16

機械学習を用いた電離圏擾乱現象自動検出モデルの作成

京都大学生存圏研究所
春名健太郎・劉鵬・栗山裕紀・横山竜宏

1

概要

背景

➢ MUレーダーで観測した長期間のイオノゾンデが存在
➢ 大量のデータと専門知識の必要性から、イオノゾンデの読み取りが行われていない
➢ 電離圏擾乱現象が発生していない場合に、 f_oF_2 を自動読み取り可能なモデルは存在

目的

MUレーダーの観測データを整備することで、MUレーダーで観測したデータを国際的な経験モデルに組み込める状態にする

実施内容

電離圏F層で発生する電離圏擾乱現象(=スプレッドF)をイオノグラム画像から自動検出する機械学習モデルの作成

課題

信楽でのスプレッドF発生時のイオノグラム画像収集方法

課題解決

国分寺のスプレッドF観測時刻と同時刻の信楽のデータを利用

実施内容

Mask-RCNNを利用し機械学習モデルを作成

結果

信楽イオノグラムで90%以上の検知率

2

目次

- 概要
- 目次
- 背景
- 先行研究
- 関連研究
- データの準備方法
- 学習と学習時の評価
- 結果
- 考察
- 概要(再掲)
- まとめ

3

背景

背景

➢ MUレーダーで観測した長期間のイオノゾンデが存在
➢ 大量のデータと専門知識の必要性から、イオノゾンデの読み取りが行われていない
➢ 電離圏擾乱現象が発生していない場合に、 f_oF_2 を自動読み取り可能なモデルは存在

現状の問題点

スプレッドF発生時にも誤って値を読み取ってしまう
・スプレッドF発生時は f_oF_2 の読み取りは不可能であり、手動読み取りでは値が記録されない
→本来は読みとれない値を勝手に自動読み取りする

問題解決のアプローチ

モデルの適用前にスプレッドFが発生している画像を除外

実施内容

電離圏F層で発生する電離圏擾乱現象(=スプレッドF)をイオノグラム画像から自動検出する機械学習モデルの作成

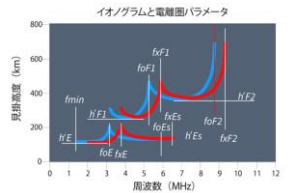
4

背景：イオノグラム画像

イオノグラムとは？

- 電離圏の電子密度分布を示す画像
- 縦軸：高度
- 横軸：周波数

用いたデータ
信楽：2014~2023



5

背景：F層で読み取れる現象

通常時： f_oF_2
F2層の臨界周波数
 f_oF_2 値の値が判読可能

スプレッドF (電離圏擾乱現象)

ノイズのように見える広がり
電離圏の不均一性による現象で、 f_oF_2 の正確な測定が困難になる

6

先行研究

機械学習モデルを利用した電離圏擾乱現象の自動読み取り

Automatic Detection and Classification of Spread-F From Ionosonde at Hainan With Image-Based Deep Learning Method

- 中国海南省の福克基地の観測データを利用
- スプレッドFの種類の分類も行なっている
- ResNet、EfficientNet、ViTを用いて学習を行い、ResNet50で最高92.5%の検知精度を達成

Automatic Spread-F Detection Using Deep Learning

- NOAAのデータリポジトリから学習用データを取得
- ResNet50 + Adam で精度95%

7

関連研究 : Mask-RCNN

- 物体検出やセグメンテーションを実現する手法
- 畳み込みニューラルネットワーク (CNN) をバックボーンとして使用し、画像から特徴量を抽出

ResNet50とSGDを利用

入力
イオノグラム画像
・プロット領域のみ

出力
Mask : 物体セグメンテーション
Box : 検出物体の位置とサイズ
Class : 検出物体のクラスラベル

8

Mask-RCNN : 各層の機能

Backbone :

画像から特徴量を抽出するためのネットワーク部分

RPN :

物体候補領域 (RoI) を生成するネットワーク部分

RoI Align :

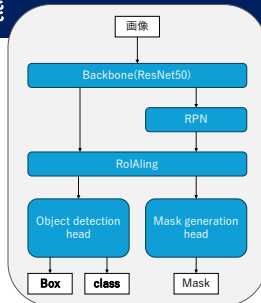
RoIを固定サイズの特徴マップに変換する

Object Detection Head :

各RoIに対して物体のクラスと位置を予測

Mask Generation Head :

各RoIに対して物体のマスクを予測



9

Mask-RCNN : 特徴

バックボーン

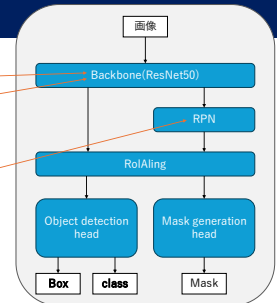
- ResNet50

特徴抽出層

- ResNet50の最後の分類層を除去し、畳み込み層を特徴抽出器として使用

Anchor Generator

- 異なるサイズとアスペクト比を持つアンカーを生成することで、様々なサイズの物体の検出に対応

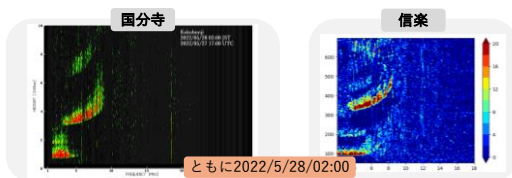


10

課題 : スプレッドF発生時のデータ収集

方法 国分寺(手動読み取り)でスプレッドFが観測されている時刻の信楽データを利用

→国分寺でスプレッドFが観測されている場合には同時刻で信楽にもスプレッドFが観測されている可能性が高い

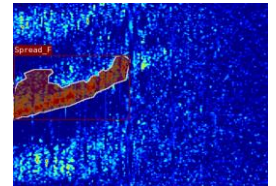


11

スプレッドF発生時のデータ準備

収集手順

- 国分寺のデータからスプレッドF発生時刻を特定
- 同時刻の信楽の観測データ(テキスト)を取得
- テキストデータを画像に変換
- 不要部分、ノイズを除去しプロット部分のみにする
- Labelmeを利用して画像にラベル付け

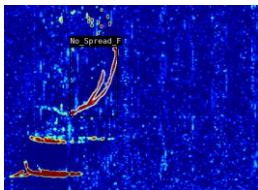


12

スプレッドF非発生時のデータ準備

収集手順

1. 国分寺のデータからスプレッドF発生時刻を特定
2. 1の時刻以外信楽の観測データ(テキスト)を取得
3. テキストデータを画像に変換
4. 不要部分、ノイズを除去しプロット部分のみにする
5. Labelmeを利用して画像にラベル付け



13

学習方法と学習時の評価

学習方法

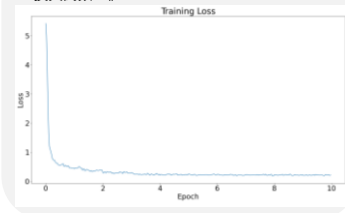
- 開始時の学習率: 0.001
- 徐々に小さくする
- 最適化手法: SGD
- 出力層: 4
- エポック数: 10
- バッチサイズ: 10

学習用データセット

- スプレッドF発生時: 250
- 非発生時: 250
- 信楽2014~2023の画像
- ランダムに選択

評価方法

損失関数の値



14

結果

検証用データ(n = 500)に対する検出精度

SF: スプレッドF
 f_oF_2 : スプレッドFなし(f_oF_2 値を読み取り可能)
 NM: 検出物体なし

P_M : モデルの出力結果が正しかった確率
 P_O : モデルが現象を検出できた確率

検出精度: 0.92

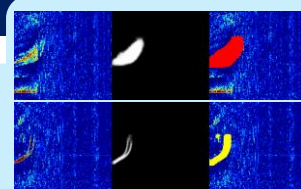
		視認結果			
		SF	f_oF_2	NM	P_M
モデルの出力	SF	300	15	0	0.95
	f_oF_2	5	114	0	0.96
	NM	12	9	45	0.68
	P_O	0.95	0.83	1.0	0.92

15

考察

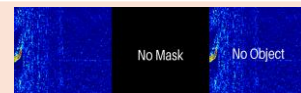
検出成功率が高い画像

- 画像中のF層に大きな反射波
- 反射波の周波数が低すぎない



検出成功率が低い画像

- 画像中のF層の反射波が小さい
- 反射波の周波数が低い=夜間

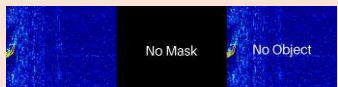


16

考察:検知に失敗するパターンとその原因

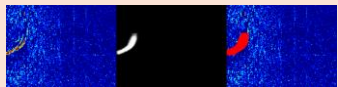
マスクの生成失敗

- マスクが生成できず、物体の検知に失敗
- 検知対象の物体が小さい
- 周波数が低い



誤検知

- スプレッドFが発生していないにも関わらず、スプレッドFと推論してしまう
- 検知対象が小さい



17

概要(再掲)

背景

- MUレーダーで観測した長期間のイオノグラムが存在
- 大量のデータと専門知識の必要性から、イオノグラムの読み取りが行われていない
- 電離圏擾乱現象が発生していない場合に、foF2を自動読み取り可能なモデルは存在

目的

MUレーダーの観測データを整備することで、MUレーダーで観測したデータを国際的な経験モデルに組み込むことが可能

実施内容

電離圏F層で発生する電離圏擾乱現象をイオノグラム画像から自動検出する機械学習モデルの作成

課題

信楽でのスプレッドF発生時のイオノグラム画像収集方法

課題解決策

国分寺でスプレッドF観測時刻と同時刻の信楽のデータを利用

実施内容

Mask-RCNNを利用し機械学習モデルを作成

結果

信楽イオノグラムで90%以上の検知率

18

まとめ、今後の課題

まとめ

- Mask R-CNN(ResNet50 + SGD)を利用して、スプレッドFを検出するモデルを作成

先行研究との比較

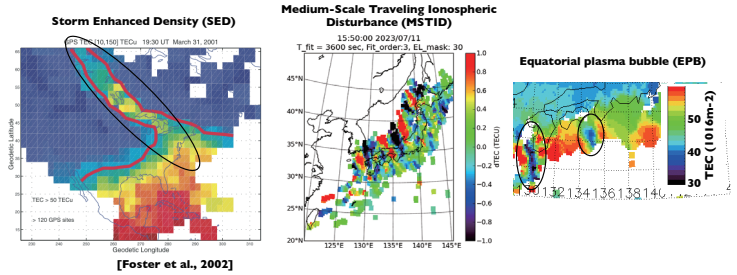
- 信楽のカラー画像に対応したモデルを作成
1/10程度のデータ数で近い精度

今後の課題

- マスクが生成されない場合への対応
- 反射波が小さい場合の対応
- 先行研究と比較してデータセットのサイズが不足している

2023年11月5日の磁気嵐に伴う電離圏変動の3次元

構造

*¹斎藤 享、²野崎 太成、²山本 衛¹海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所²京都大学生存圏研究所

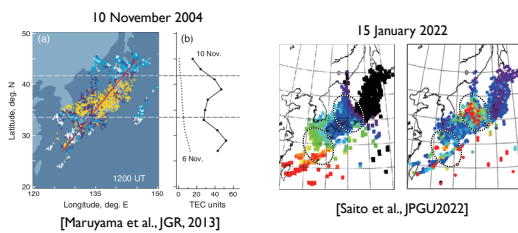
- Strong ionospheric disturbances affects performances of GNSS-based systems.

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

Extreme ionospheric disturbances in the mid-latitudes

Ionospheric disturbances on 5 November 2023



- Extreme ionospheric disturbances in the mid-latitude region are rare.
 - Physical mechanisms have not been well understood.

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

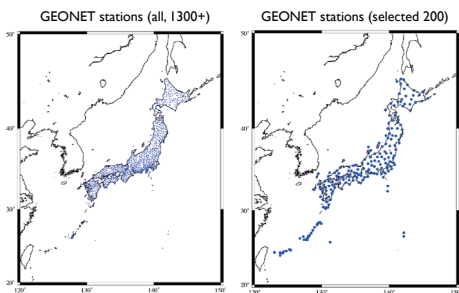


- Associated with a geomagnetic storm commenced on 4 November 2023 (Dst=-172nT at 20 UT on 5 November 2023)
- Strong ionospheric disturbances were observed over Japan in the night on 5 November 2023.
 - Unusually strong ionospheric disturbances reached as high as 45°N (~41°N Mag.Lat.).
 - Normally equatorial plasma bubbles do not reach higher than 30°N(~25°N Mag.Lat.).
- 2-D/3-D ionospheric observations by using a dense GNSS network would give useful information to understand the mechanisms of the ionospheric disturbances.

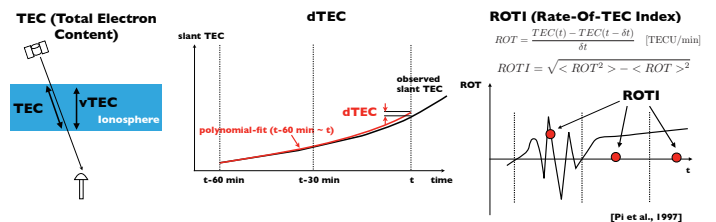
MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

Data

Ionospheric parameters derives from GNSS measurements



- GNSS observation data from GEONET (GNSS Earth Observation Network) operated by the Geospatial Authority of Japan.
- ENRI collects real-time data from 200 selected GEONET stations.
 - Sampling rate: 1 Hz
 - Constellations: GPS, GLONASS, Galileo, QZSS

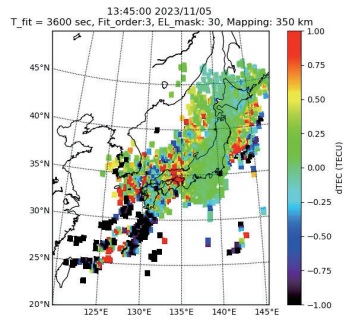


- TEC: Total number of electrons per unit area (integrated electron density along a certain line)
- dTEC: High-pass filtered TEC
- ROTI: Small-scale irregularities (~a few kilometers scale)

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

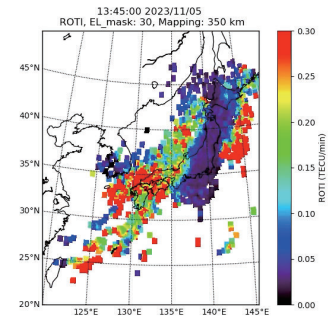
TEC perturbation (dTEC)



7

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

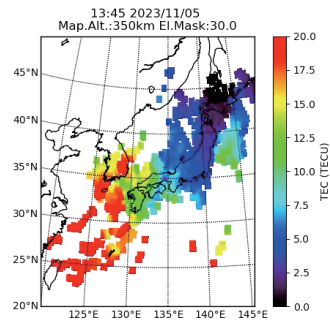
Ionospheric irregularities (ROTI)



8

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

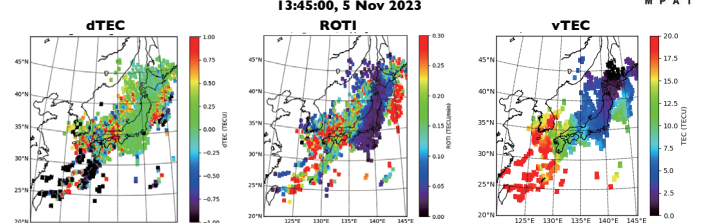
Vertical absolute TEC (vTEC)



9

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

Spatial relationship

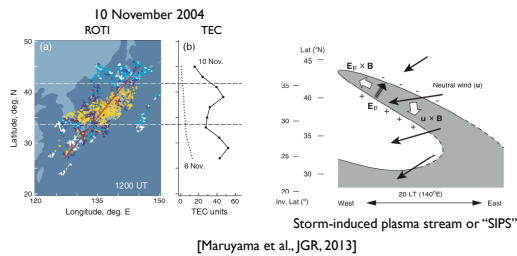


- * Ionospheric irregularities are confined in the region with ionospheric TEC enhancement.
 - Low TEC region around 140°E is not an EPB.
- * Smaller-scale variations are found in the high TEC region.

10

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

Similar event (10 November 2004)

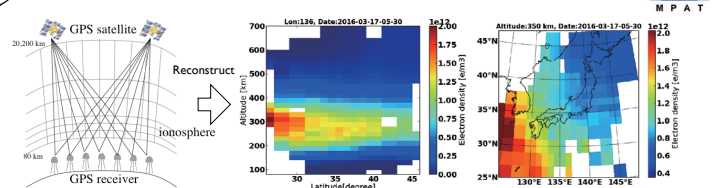


- * NW-SE elongated TEC enhancement and irregularities embedded in it.
 - Storm-Induced Plasma Stream (SIPS)

11

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

Ionospheric Tomography based on GNSS measurements



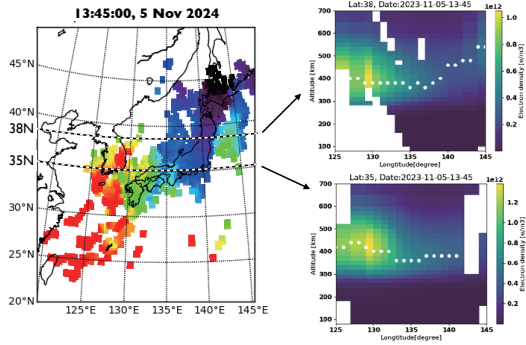
- * Reconstruct 3-D ionospheric density profiles from many observations of the total electron content (TEC) along different line of sight between GNSS satellites and ground-based GNSS receivers. [Saito et al., 2017]
- * Assimilate ionosonde data to improve reconstructed ionospheric altitude. [Sessanga et al., 2021]

12

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

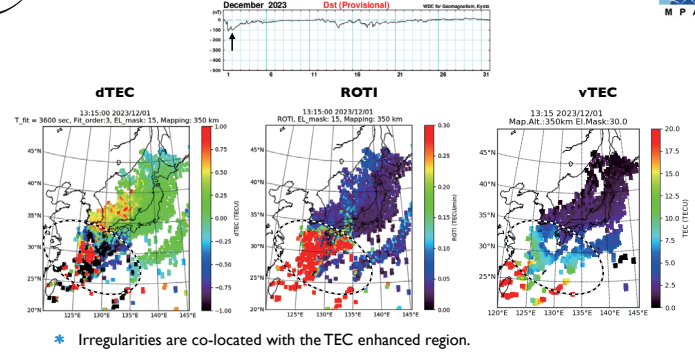
Ionospheric 3-D structure

Similar event (1 December 2023)



MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

13



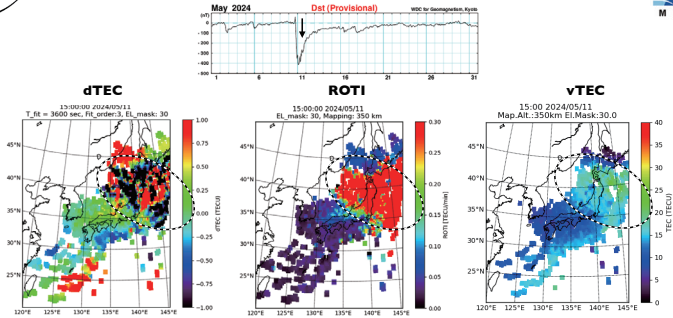
* Irregularities are co-located with the TEC enhanced region.

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

14

Similar event (11 May 2024)

Summary



* Irregularities are co-located with the TEC enhanced region.

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

15

- * Dense GNSS network is a powerful tool to investigate ionospheric density structures and their generation mechanisms.
- * High sampling rate (1 Hz) GEONET data are utilized to investigate ionospheric behavior on 5 November 2023 associated with a major magnetic storm.
 - Ionospheric disturbed region reached as high as 45°N (~41°N Mag.Lat.).
 - Ionospheric irregularities are confined in the region with ionospheric TEC enhancement.
 - Smaller-scale variations are found in the high TEC region.
 - Low TEC region around are not disturbed.
- * 3-D tomography based on the GEONET data are applied.
 - High density regions are locally elevated than low density regions.
 - Consistent with the model proposed by Maruyama et al. [2013]
- * Analysis for other strong ionospheric disturbances associated with severe magnetic storms (e.g. 1 December 2023, 11 May 2024) are ongoing.

MUR/EAR Symposium, 25-26 September 2024

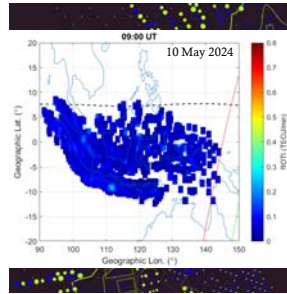
16

Lifetime and Zonal migration of Equatorial Plasma Bubbles observed using the Indonesian ROTI map

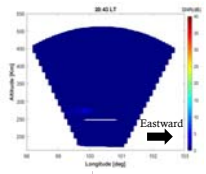
Prayitno Abadi¹, Yuichi Otsuka²

¹Research Center for Climate and Atmosphere (PRIMA) – BRIN, Bandung, Indonesia

² Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University, Nagoya, Japan

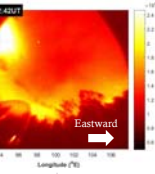


Observation of EPB using Equatorial Atmosphere Radar (EAR)



Narrow field-of-view

Observation of EPB using all-sky imager



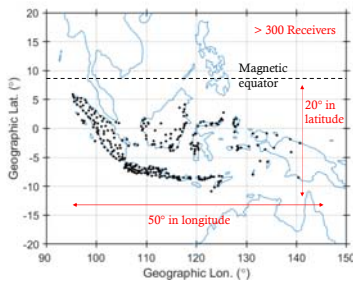
Field-of-view → 15° in long. Depending weather condition

We need to use the observation tool to capture the entire EPB lifetime, from its generation to its disappearance.

Migrating Equatorial Plasma Bubble (EPB)

What factors influence the migration of Equatorial Plasma Bubbles (EPBs)? Is it solely driven by background wind patterns, or are there additional factors that can contribute to the EPB's ability to migrate over longer distances?

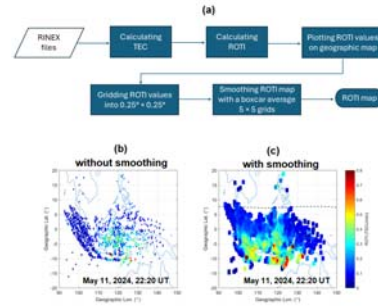
2



A Network of GNSS Receiver in Indonesia

- Belonging to Indonesian Geospatial Information Agency (BIG)
- Part of Indonesia Continuously Operating Reference Station (Ina-CORS)
- Potential to study EPB from the generation to disappearance

3



Making the ROTI map from Ina-CORS

- TEC calculation from the open software developed by Seemala (2023)
- $ROTI = \sqrt{ROT^2 - (ROT)^2}$
 $ROT = (TEC_{t+1} - TEC_t) / \Delta t$
 ROT = rate of TEC (temporal variation of TEC)
Pi et al. (1997)

4



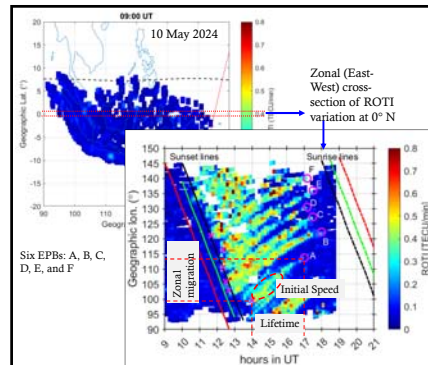
ROTI map database

"The ROTI maps are stored in the public repository Zenodo and are publicly accessible."

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13731760>

We'll continually update the ROTI maps.
The ROTI maps could be a resource for the researchers to investigate the EPB occurrence in Southeast Asia.

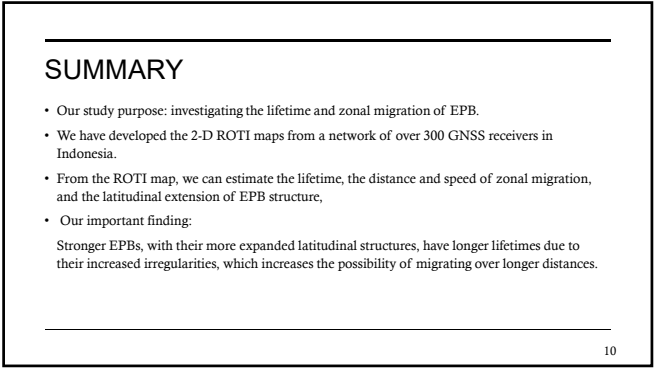
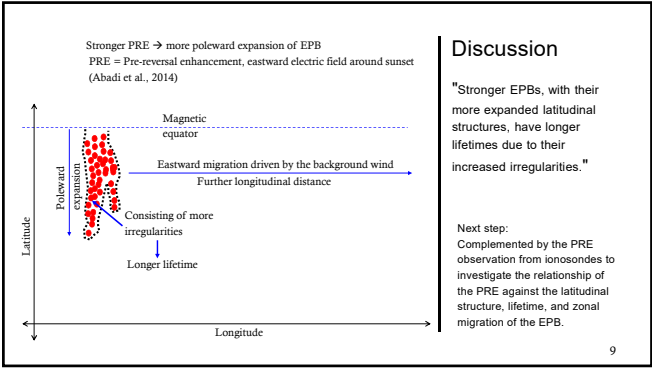
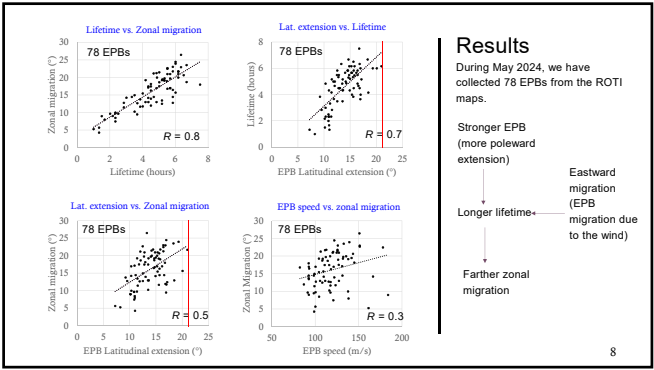
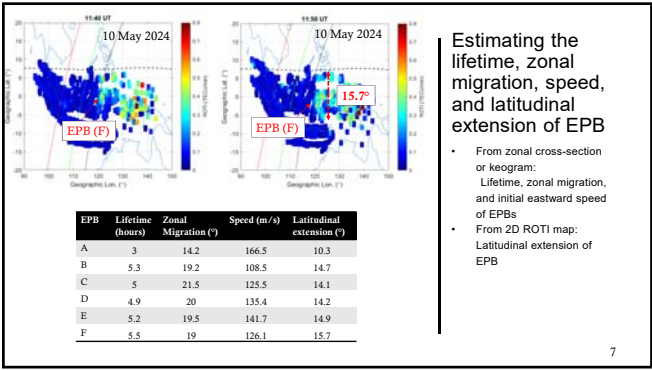
5



Estimating the lifetime, zonal migration, speed, and latitudinal extension of EPB

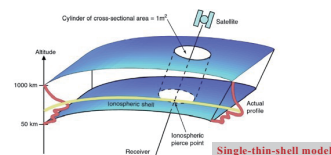
- From zonal cross-section or keogram:
Lifetime, zonal migration, and initial eastward speed of EPBs
- From 2D ROTI map:
Latitudinal extension of EPB

6



¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan
²4DSpace, Department of Physics, University of Oslo, Oslo, Norway.
 E-mail: fu.weizheng@isee.nagoya-u.ac.jp

The cost-effectiveness and rapid development of the **GNSS** (Global Navigation Satellite System) infrastructure, has effectively **broadened the spatial and temporal scales** over which ionosphere dynamics are probed.



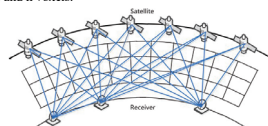
TEC (total electron content) represents the total number of electrons in a column with cross section of 1m^2 ($1\text{TECU} = 10^{16}\text{ electrons/m}^2$) along the line of sight from receiver to satellite.

Langley. (2002, February). In Viewgraphs of invited presentation to the Canadian Association of Physicists Division of Atmospheric and Space Physics Workshop, Fredericton, NB.

Albeit inferences from **2-D** analyses using TEC measurements are encouraging, the **missing height dimension** poses limitations on the information that can be inferred.

The **computerized ionospheric tomography (CIT)** approach in our analysis follows the **voxel-based model**. Given m measurements and n voxels:

Projections
(STEC)



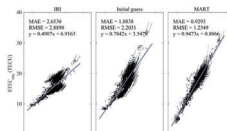
- The problem becomes one of inverting **A** to solve for the unknown electron concentration (**X**)
- Since (i) orientations of the satellite-to-receiver ray paths are biased in a vertical sense with no ray paths running horizontally through the ionosphere and (ii) some voxels are traversed by no ray, the ionosphere inverse problem is **ill-posed** and **ill-conditioned**.

In the voxel-based model for tomography, **multiplicative algebraic reconstruction technique (MART)** is used to solve ill-posed and ill-conditioned problems, due to the characteristics of **converging rapidly** and **nonnegative solutions**:

$$x_j^{k+1} = x_j^k \left(\frac{y_i}{\langle a_{ij}, x^k \rangle} \right)^{\lambda_i a_{ij} / \|a_{ij}\|}, j=1,2,3,\dots,N$$

$||a_{ij}||$ is the maximum path-pixel intersection length in the grid.
 x_j^k is estimated electron density in the j th voxel at k th iteration.
 $< \tilde{a}_i, \tilde{x}^k >$ is simulated STEC at k th iteration.
 λ_k ($0 < \lambda_k < 1$) is the relaxation parameter and controls the convergence of the algorithm.

The computational procedure in MART requires an **initial guess** ($\vec{X}_0$), which highly influences the fidelity and the rate of convergence.

STC_{obs} (TECU)

Question:

1. how to **minimum the effects of initial guess**? (The difference between TEC in observation and empirical model is usually large)
2. how to reconstruct the ionospheric disturbances of **small amplitudes and scales**? (The amplitude of MSTIDs is usually 1-3% of background ionosphere)

GNSS TEC:
GEONET (~1308; GPS, GLONASS, Galileo)
SoftBank (~1002; GPS, GLONASS, BeiDou)

High spatial and temporal resolution:
 0.25° in latitude and longitude, 10 km in altitude
 30 seconds in time.

The inclusion of **multi-GNSS** improves the spatial distribution of signals, being able to provide more information on the ionosphere.

Solvability = N/N_0
 N : voxels with signals penetrated through
 N_0 : total voxel numbers
 More than 30% of the voxels are solvable.

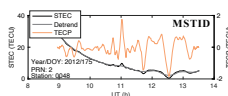
Trend method of TEC perturbations (TECp's): deducting a 30-min data running average (centered on the epoch of the LOS) from each LOS (line of sight) TEC.

Figure 1f shows the time series of the TECp derived from the multi-GNSS signals, showing a clear diurnal cycle. The left y-axis is labeled 'TEC (TEC)' and the right y-axis is labeled 'TECp (TEC)'. The x-axis is labeled 'UT (h)' and ranges from 9 to 14. The legend indicates 'STEC' (blue line) and 'Detrended TECp' (orange line). The text 'MSTD' is present in the plot area. The text 'Year/DOY: 2012/175' and 'Start/End: 0048' is also present.

The inclusion of **multi-GNSS** improves the spatial distribution of signals, being able to provide more information on the ionosphere.

Solvability = N/N_0
 N: voxels with signals penetrated through
 N_0 : total voxel numbers
 More than 50% of the voxels are solvable

Detrend method of TEC perturbations (TECPs): deducting a 30-min data running average (centered on the epoch of the LOS) from each LOS (line of sight) TEC.



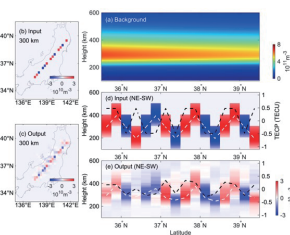
Algorithm procedure:

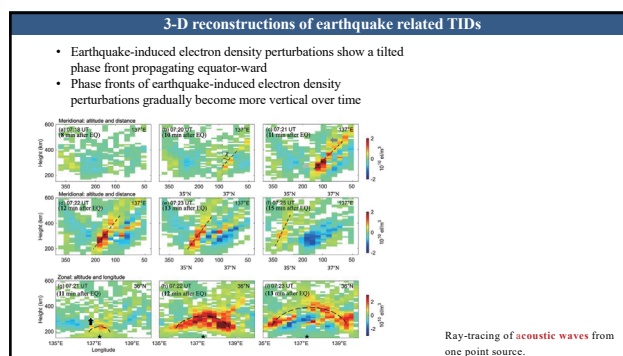
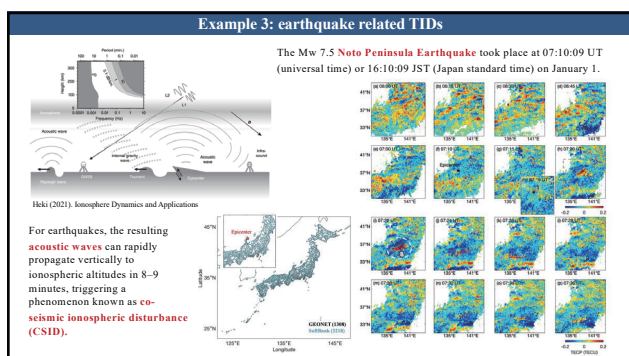
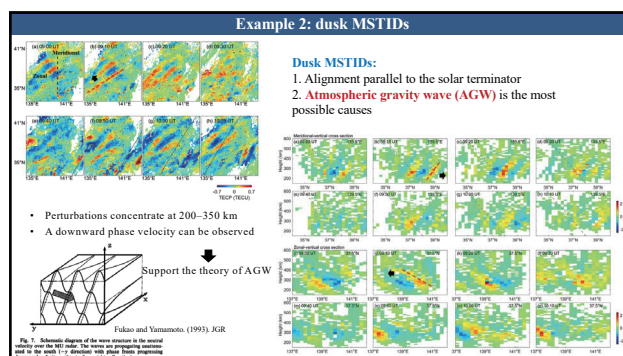
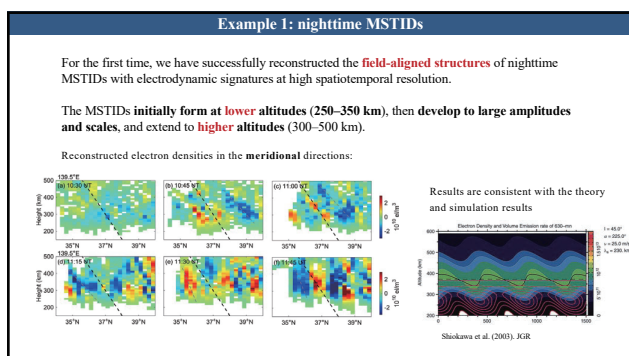
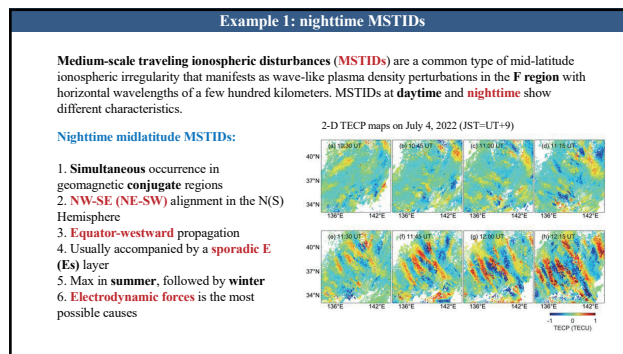
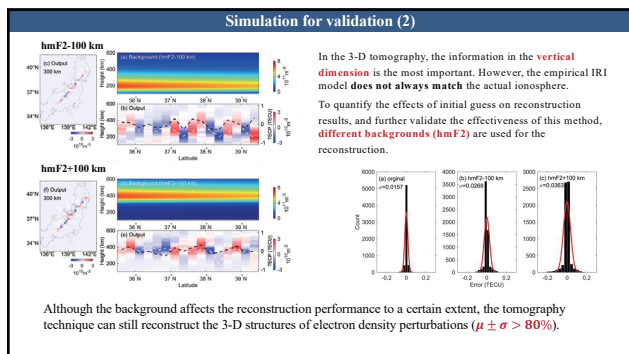
1. Generate background using IRI model
2. STEC for tomography = background STEC + TEC perturbations
3. Reconstruction using MART
4. Subtract background

- Minimum the dependence of initial guess
- Enable faster convergence
- Easy representation of electron density perturbations

(b) and (d) Simulated disturbances are added from (39.5°N, 141.5°E) to (35.5°N, 137.5°E).
(c) and (e) Reconstruction results
Amplitude: ± 0.5 TECU ($\sim 3\%$ of background)

A correlation of more than 80% is observed between the peak heights of disturbances as simulated and reconstructed.





Conclusion

1. A 3-D tomography algorithm with **high spatiotemporal resolution** is developed by using the **ultra-dense GNSS measurements** over Japan.

2. For the first time, the 3-D structure of **traveling ionospheric disturbances** caused by different sources are **successfully reconstructed**.

3. This technique is expected to contribute to a compressive understanding of the underlying mechanisms of ionospheric inhomogeneities.

Details in example 1:

Fu, W., Otsuka, Y., & Ssessanga, N. (2024). High-resolution 3-D imaging of electron density perturbations using ultra-dense GNSS observation networks in Japan: an example of medium-scale traveling ionospheric disturbances. *Earth, Planets and Space*, 76(1), 102.

Details in examples 2 and 3 are under preparation.

Acknowledgement:

The SoftBank's GNSS observation data used in this study are provided by SoftBank Corp. and ALES Corp. through the framework of the "Consortium to utilize the SoftBank original reference sites for Earth and Space Science".

Thank you for listening!

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

SPATIOTEMPORAL PREDICTION OF IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT BASED ON MACHINE LEARNING

機械学習に基づく電離層の全電子数の時空間予測

劉鵬(リュウホウ)
横山竜宏
惣宇利卓弥
山本衛
京都大学 生存圏研究所

2024/09/26

1

1

データセット

2

IGS受信機ネットワーク

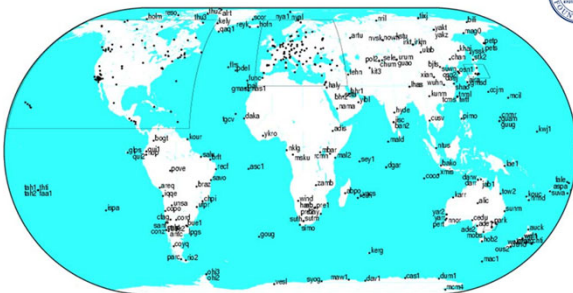


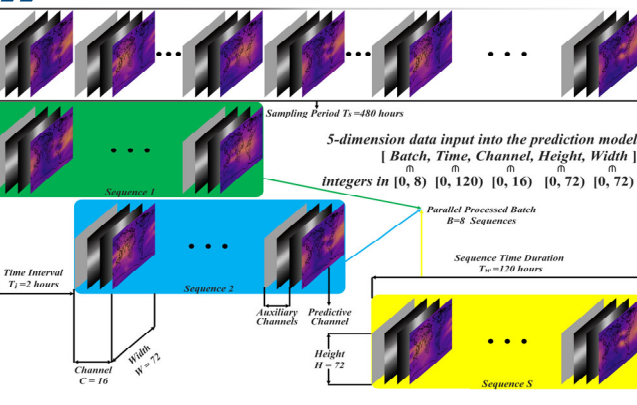
Fig. 1 Global distribution of stations of the IGS network

1995年以降、欧州軌道探索センター（CODE）は150個（1995）～522個（2024）のGNSS地上受信機のデータに基づいて141360枚の電離圏TECマップを作りました。太陽と地磁気活動データはNASAのomni データセットという形でまとめた。

2024/09/26

3

機械学習のためデータの前処理



Sampling Period $T_s = 480$ hours

5-dimension data input into the prediction model
[Batch, Time, Channel, Height, Width]
integers in [0, 8] [0, 120] [0, 16] [0, 72] [0, 72]

Time Interval $T_i = 2$ hours

Channel $C = 16$

Width $W = 72$

Height $H = 72$

Sequence Time Duration $T_w = 170$ hours

Parallel Processed Batch $B = 8$ Sequences

系列の数: $S = \frac{N}{T_s} (T_s - T_w + T_i) = 106,609$

2024/09/26

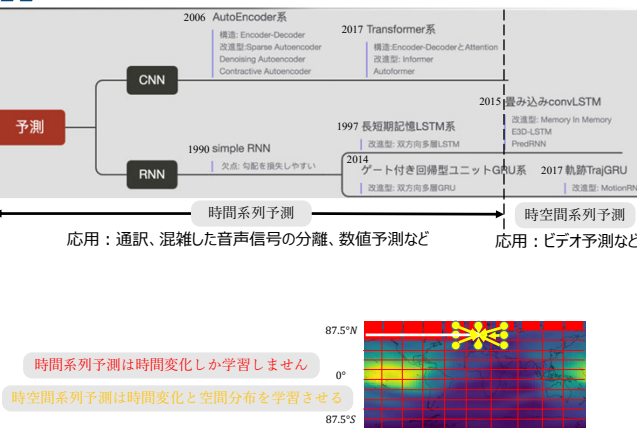
4

2

既存の時空間系列予測モデル

5

時間系列予測と時空間系列予測



2006 AutoEncoder系

2017 Transformer系

2015 畳み込みconvLSTM

1990 simple RNN

1997 長短期記憶LSTM系

2014 ゲート付き回帰型ユニットGRU系

2017 軌跡TrajGRU

予測

時間系列予測

時空間系列予測

応用：通話、混雑した音声信号の分離、数値予測など

応用：ビデオ予測など

時間系列予測は時間変化しか学習しません

時空間系列予測は時間変化と空間分布を学習させる

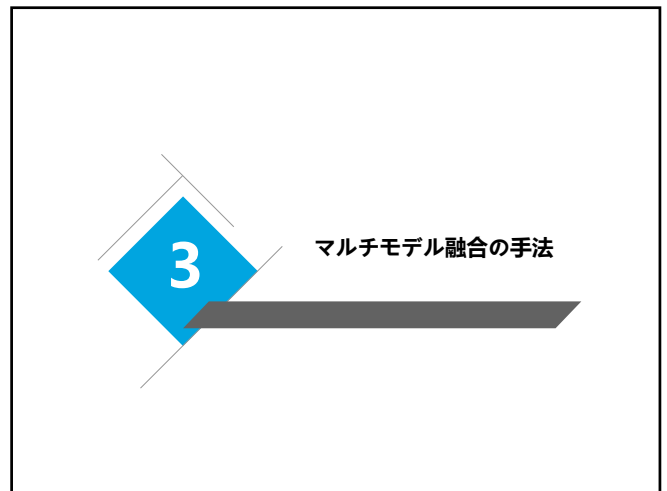
2024/09/26

6

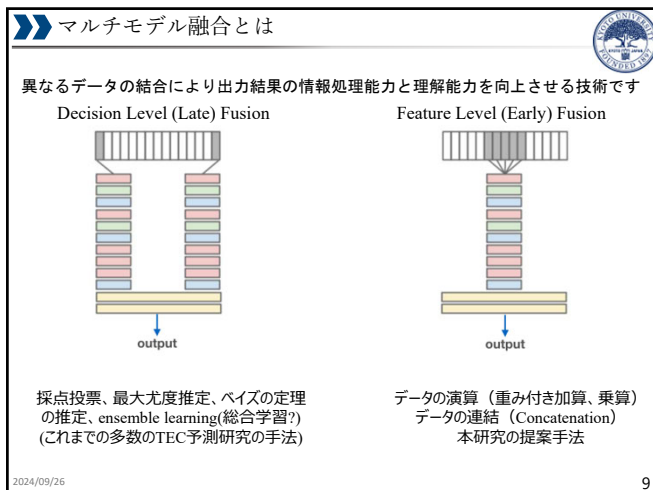
データのチャンネルとモデルの基盤

No.	Channel	Dependence	Model	Category	Structure
1	TEC Map	-	temporal prediction:		
2	Longitude	Spatial	LSTM	RNN	Fully connected LSTM cell
3	Latitude	Spatial	GRU	RNN	Fully connected GRU cell
4	Year	Seasonal	Transformer	Transformer	Attention
5	Day	Seasonal			
6	Month	Seasonal			
7	Hour	Diurnal			
8	F10.7	Solar	prediction:		
9	Sunspot	Solar	ConvLSTM	RNN	Convolutional LSTM cell
10	Kp	Geomagnetic	MAU	RNN+Transformer	Recurrent+Attention
11	Ap	Geomagnetic	PredRNN	RNN	Spatiotemporal ConvLSTM cell
12	Dst	Geomagnetic	PredRNN++	RNN	Deeper PredRNN+Highway
13	AE	Geomagnetic	PredRNNv2	RNN	PredRNN+Decoupled memory
14	ΣB	Geomagnetic	MIM	RNN	Differential PredRNN
15	Average B	Geomagnetic	SimVP	CNN	Encoder+Inception+Decoder
16	PlasmaSpeed	Geomagnetic	TAU	CNN+Transformer	Encoder+Attention+Decoder

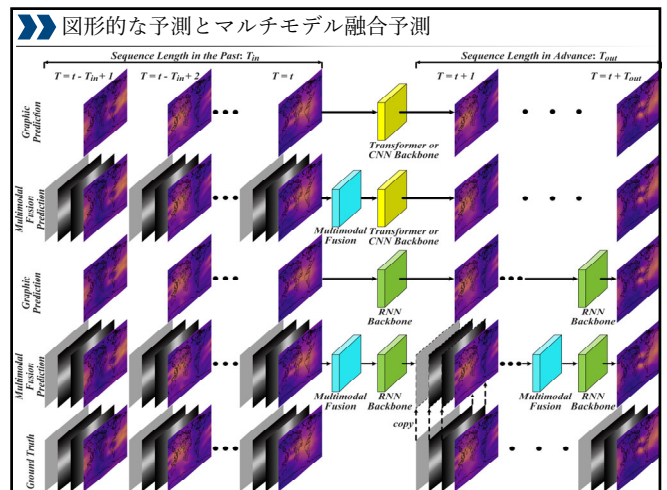
7



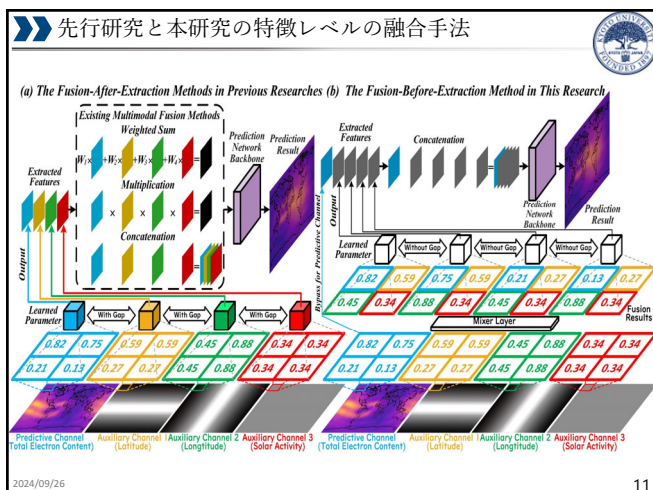
8



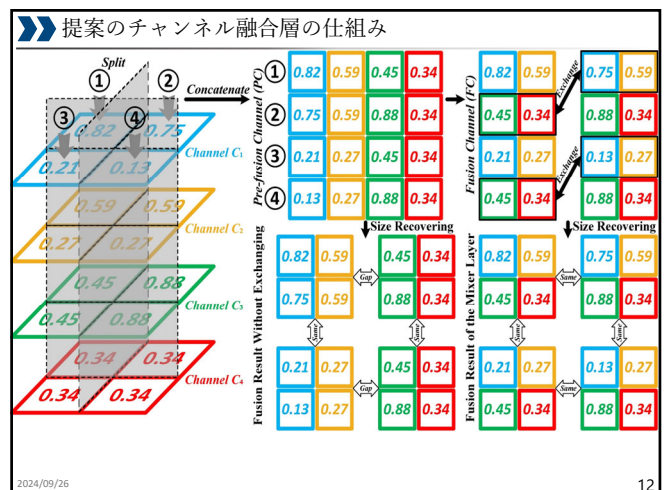
9



10



11



12

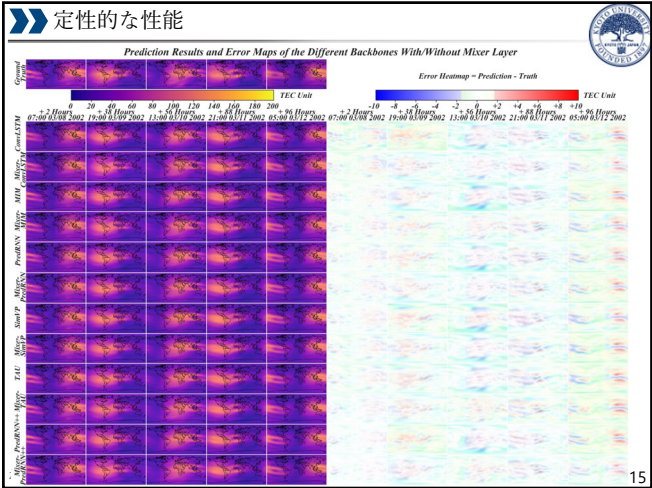
4 性能の評価

13

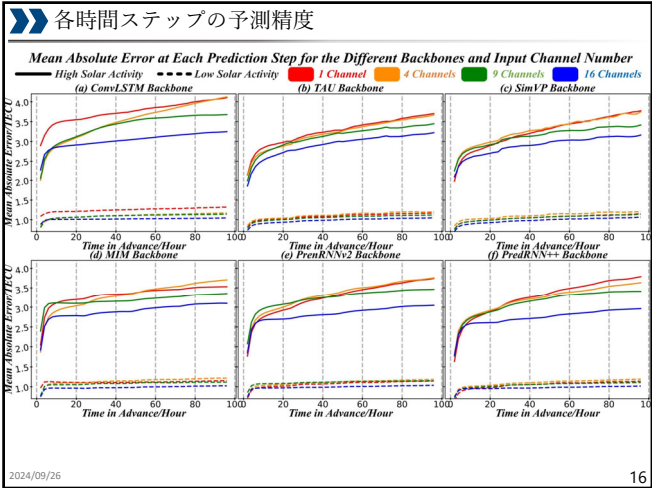
定量的な性能

Fusion- (Backbone)	C_m	Param.	Flops	Speed /M /G /fps	MSE (Gain)	MAE/TECU LSA HSA	Fusion- (Backbone)	C_m	Param.	Flops	Speed /M /G /fps	MSE (Gain)	MAE/TECU LSA HSA
(LSTM)	1	283.6	5035	5	374.11	2.16 5.18	(ConvLSTM)	1	15.08	223	136	194.81 (0)	1.25 3.73
(GRU)	1	212.7	3786	7	361.36	1.97 5.06	concatenate-	4	15.70	235	132	199.78(-2.5%)	1.28 3.79
(E3D-LSTM)	1	53.15	301	22	173.51	1.11 3.54	mixer-	4	15.90	239	130	174.78(+10.2%)	1.10 3.51
(MAU)	1	4.72	67.13	242	153.97 (0)	1.10 3.28	concatenate-	9	16.72	255	121	166.25(+14.6%)	1.12 3.37
concatenate-	4	4.72	67.19	235	152.55(+0.9%)	1.12 3.27	mixer-	9	16.93	258	118	165.87(+14.9%)	1.09 3.38
concatenate-	9	4.72	67.28	215	139.80(+9.1%)	1.08 3.11	concatenate-	16	18.16	282	105	147.21(+24.4%)	1.08 3.29
concatenate-	16	4.72	67.42	188	120.78(+21.4%)	1.05 2.86	mixer-	16	18.36	286	101	135.12(+30.6%)	1.02 3.03
(PredRNN)	1	23.84	456	65	152.59 (0)	1.10 3.26	(PredRNNv2)	1	23.86	458	63	152.01 (0)	1.07 3.25
action-	4	24.16	461	64	198.29(-29.9%)	1.25 3.82	action-	4	24.18	463	62	167.69(-10.3%)	1.15 3.34
concatenate-	4	24.92	470	62	172.22(-12.9%)	1.21 3.49	concatenate-	4	24.93	479	60	156.50(-3.0%)	1.10 3.35
mixer-	4	25.27	483	61	160.18(-4.9%)	1.15 3.35	mixer-	4	25.29	486	59	153.11(-0.7%)	1.11 3.31
action-	9	24.51	468	64	277.31(-81.7%)	1.47 4.17	action-	9	24.53	470	61	237.44(-56.2%)	1.36 3.92
concatenate-	9	26.71	511	58	157.43(-3.1%)	1.16 3.37	concatenate-	9	26.72	513	56	151.19(+0.5%)	1.12 3.25
mixer-	9	27.06	518	57	155.98(-2.2%)	1.16 3.32	mixer-	9	27.08	520	54	150.28(+1.1%)	1.10 3.23
action-	16	25.96	482	61	403.47(-164.4%)	2.06 5.51	action-	16	25.98	485	59	315.57(-109.6%)	1.67 4.46
concatenate-	16	29.22	558	53	138.65(+9.1%)	1.11 3.10	concatenate-	16	29.23	561	51	122.86(+19.1%)	1.01 2.88
mixer-	16	29.57	565	52	133.43(+12.5%)	1.05 2.98	mixer-	16	29.59	568	51	118.83(+21.8%)	0.99 2.83
(TAU)	1	48.24	22.54	341	151.06 (0)	1.09 3.26	(MIM)	1	38.20	711	43	158.97 (0)	1.12 3.32
concatenate-	4	48.24	22.61	331	150.04(+0.6%)	1.12 3.23	concatenate-	4	39.28	731	42	158.27(+0.4%)	1.11 3.32
mixer-	4	48.24	22.61	326	148.83(+1.4%)	1.11 3.20	mixer-	4	39.63	738	41	158.76(+0.1%)	1.14 3.30
concatenate-	9	48.24	22.83	302	142.98(+5.3%)	1.04 3.18	concatenate-	9	41.07	766	38	148.57(+6.5%)	1.09 3.19
mixer-	9	48.24	22.83	296	139.03(+7.9%)	1.05 3.11	mixer-	9	41.42	773	37	145.33(+8.5%)	1.08 3.18
concatenate-	16	48.25	23.08	264	126.33(+16.3%)	1.02 2.96	concatenate-	16	43.58	814	34	126.37(+20.5%)	1.01 2.93
mixer-	16	48.25	23.11	254	121.54(+19.5%)	0.99 2.89	mixer-	16	43.93	821	32	118.72(+25.3%)	0.98 2.90
(SinVP)	1	50.53	23.32	335	140.51 (0)	1.05 3.24	(PredRNN++)	1	38.58	675	46	153.12 (0)	1.05 3.26
concatenate-	4	50.53	23.43	327	153.37(-2.6%)	1.12 3.29	concatenate-	4	39.66	695	44	150.21(+1.9%)	1.05 3.24
mixer-	4	50.53	23.46	322	152.96(-2.3%)	1.11 3.28	mixer-	4	40.01	702	43	148.83(+2.8%)	1.10 3.21
concatenate-	9	50.53	23.61	298	145.15(+2.9%)	1.08 3.19	concatenate-	9	41.45	730	41	144.20(+5.8%)	1.11 3.16
mixer-	9	50.53	23.64	291	141.52(+8.3%)	1.05 3.14	mixer-	9	41.81	737	40	141.22(+7.7%)	1.05 3.12
concatenate-	16	50.54	23.86	253	125.16(+16.2%)	1.00 2.94	concatenate-	16	43.96	778	35	118.45(+22.6%)	0.97 2.74
mixer-	16	50.54	23.90	241	120.74(+19.2%)	0.98 2.90	mixer-	16	44.32	785	34	111.68(+27.1%)	0.96 2.73

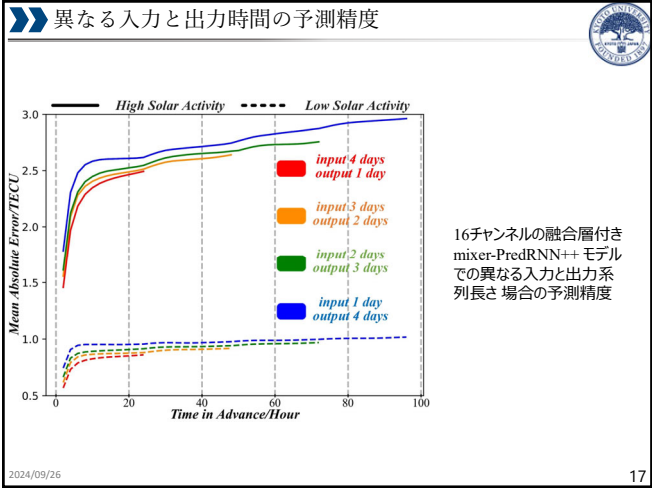
14



15



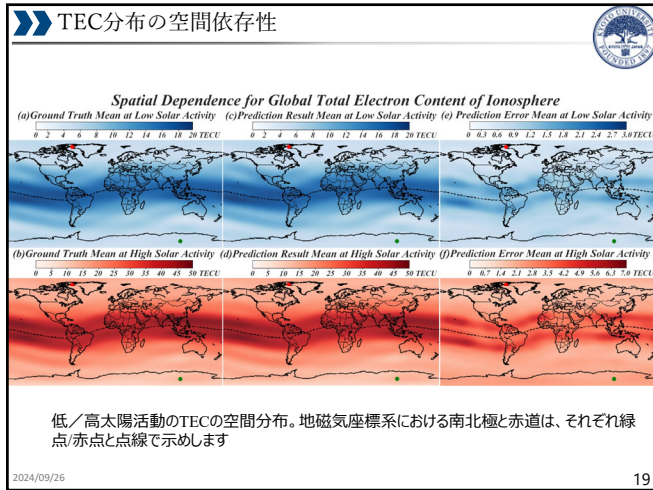
16



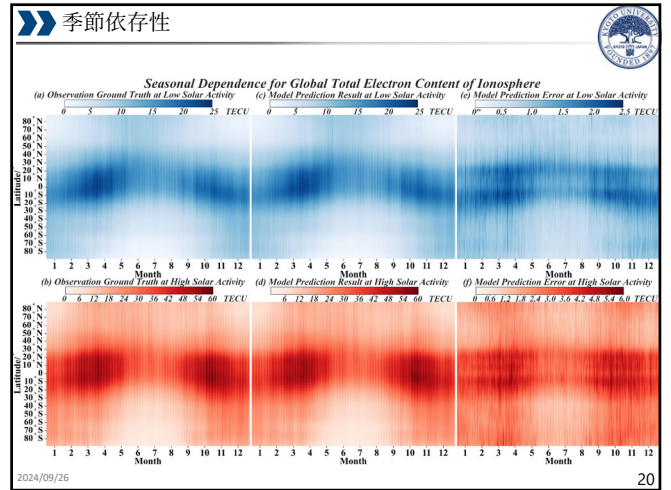
17

5 外部依存性

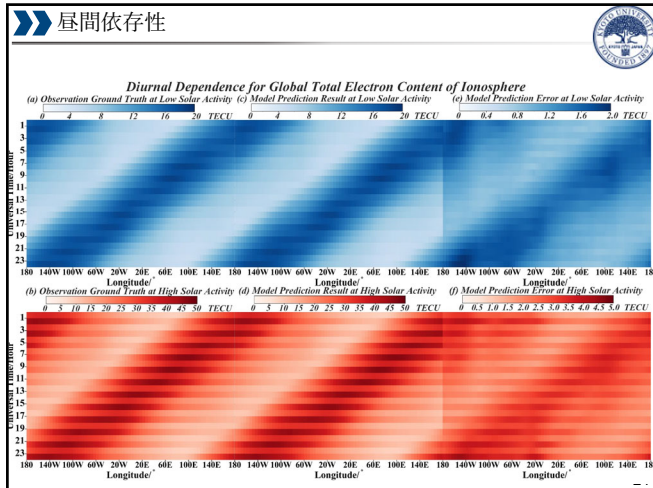
18



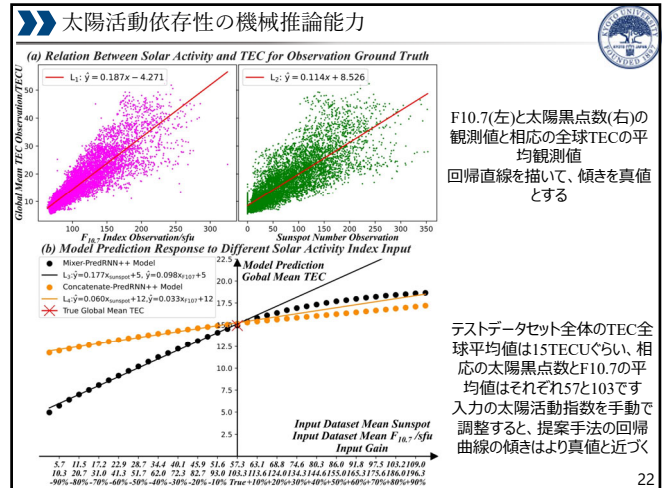
19



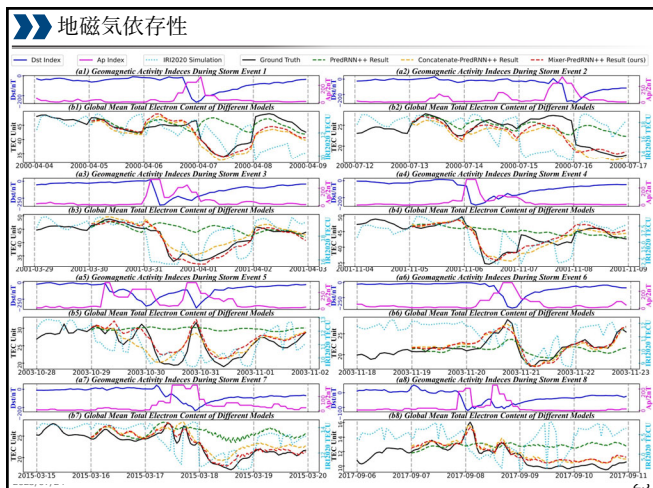
20



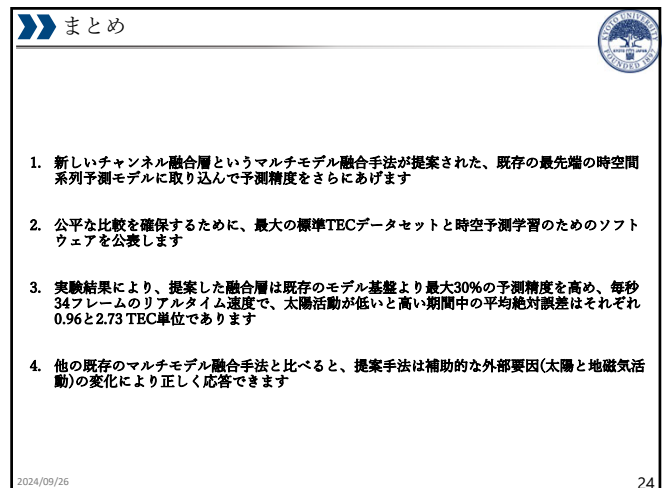
21



22



23



24

鉛直上向き気象レーダーと大気レーダーを用いたブライトバンド近傍における層状性降水成長過程の観測

重尚一・中村聡恵・戸田望(京都大学)・
後藤悠介・篠田太郎(名古屋大)・橋口浩之(京都大)

(研究種目) 基礎研究 (A)
(研究期間) 2022年度-2024年度
(研究課題名) レーダリモートセンシングを駆使した層状性降水過程の解明
(研究代表者) 重尚一
(研究分担者) 高数緑さん, 高橋暢宏さん, 橋口浩之さん, 篠田太郎さん, 岩波越さん, 鈴木賢士さん, 濱田篤さん, 柴田泰邦さん, 村田文絵さん

1

気象レーダーと大気レーダーの鉛直方向ドップラー速度観測 (2023年1月~)



なぜ層状性降水か? 近年多発している“層状性豪雨”

- ① 2018年7月西日本豪雨 (Yokoyama et al. 2020; Tsuji et al. 2020)
- ② ミコロラド州洪水 (2013年) (Gochis et al. 2015)
- ③ パキスタン洪水 (2010年) (Houze et al. 2011, BAMS)

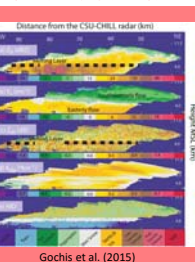
・「弱い降水強度＝層状性降水」という固定観念が支配的だが、これらの層状性降水は、対流性降水に比べれば弱い、必ずしも弱くはない。

対流性降水 > “層状性豪雨” > 一般の層状性降水
ダッシュ(2分50秒/km) > マラソン(4分50秒/km) > ジョギング(5分35秒/km)
とても速い & 短時間 そこそこ速い & 長時間 遅い & 長時間

パキスタン洪水
(2010年)



米コロラド州洪水 (2013年)



層状性降水過程(=弱い上昇流の下での固体降水粒子の成長) 観測の困難さ

- ・ 弱い上昇流 (~1-10 cm s⁻¹)
➢ 多くの先行研究で無視

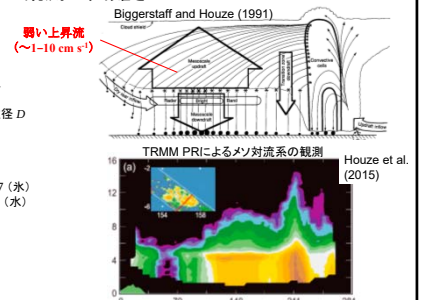
- ・ 固体降水粒子の弱い散乱シグナル

$$\sigma(D) = \frac{\pi^2}{6} |K|^2 D^6$$

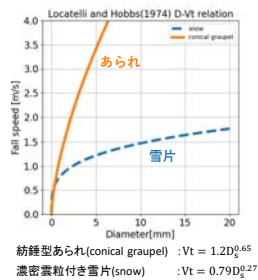
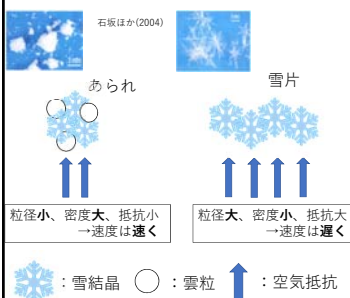
$$|K|^2 = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}$$

$$m = \begin{cases} 0.197 & (\text{氷}) \\ 0.93 & (\text{水}) \end{cases}$$

- ・ 固体降水粒子の多様性
➢ 雪
➢ あられ

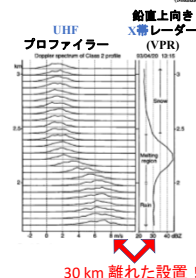


あられと雪片の終端落下速度の違い



Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation

Fabry and Zawadzki (1995)



ered by the VPR. With its much longer wavelength and its capability of recording full Doppler spectrum, the profiler compensates for the main weaknesses of the VPR: measurements of the full Doppler spectrum of echoes through a vertical column allow us to measure the fall speed of hydrometeors (and hence help in determining their type). Sometimes, clear air echoes may be strong enough to be detected in precipitation, and hence updraft or downdraft velocities can be measured. Finally, its much larger wavelength makes it insensitive to attenuation and effects of departures from Rayleigh scattering. Unfortunately, the profiler has a poorer space-time resolution than the VPR, and the two radars are 30 km apart. However, similar signatures are often seen on the two radars a few minutes apart, thus providing complementary information on the phenomena observed. Unfortunately, the profiler has a poorer space-time resolution than the VPR, and the two radars are 30 km apart. However, similar signatures are often seen on the two radars a few minutes apart, thus providing complementary information on the phenomena observed. Unfortunately, the profiler has a poorer space-time resolution than the VPR, and the two radars are 30 km apart. However, similar signatures are often seen on the two radars a few minutes apart, thus providing complementary information on the phenomena observed.

気象レーダーと大気レーダーの鉛直方向ドップラー速度観測
(2023年1月～)

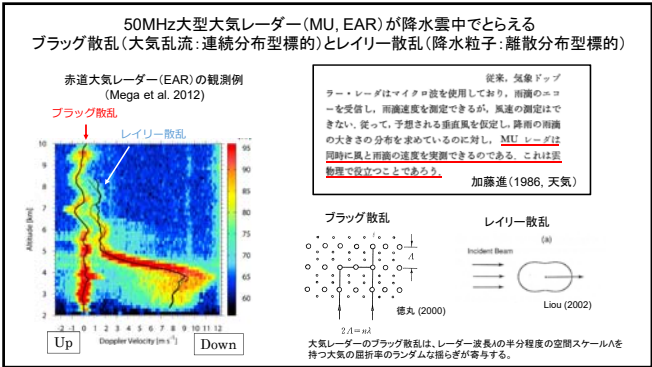
MU radar (周波数46.5 MHz, 波長6.45m) VHF

名大 Doppler radar (X)

ソナデ観測

LQ7 (周波数1.3 GHz, 波長22cm) UHF

重松(2023シンポ)大気と気象レーダーの鉛直方向ドップラー速度観測を組み合わせた降水過程の解析: GPM主衛星の地雨階層画像観測事例



50MHz大型大気レーダー(MU, EAR)が降水雲中でとらえる
ブラッグ散乱(大気乱流・連続分布型標的)とレイリー散乱(降水粒子:離散分布型標的)

赤道大気レーダー(EAR)の観測例
(Mega et al. 2012)

二周波アルゴリズム
赤道大気レーダーと下都対流圏レーダーを組み合わせた降水雲内の大気鉛直流の推定-2 (戸田他 シンポジウム)

UHF帯小型プロファイラーは、降水時にレイリー散乱部分のみを観測

レイリー散乱 (a)

Incident Beam

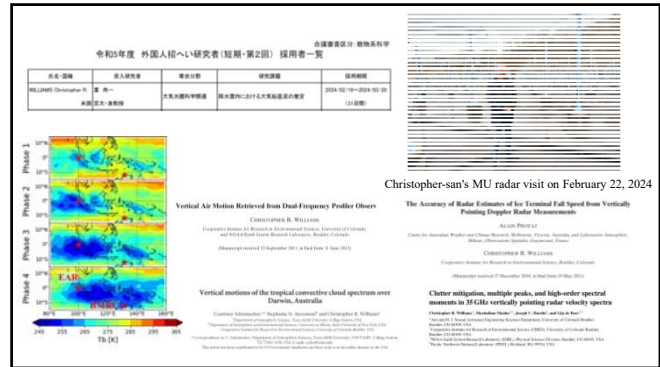
Liou (2002)

ブラッグ散乱

標的 (2000)

2. $\lambda \ll \alpha z$

大気レーダーのブラッグ散乱は、レーダー波長の半分以上程度の空間スケールへを持つ大気の変化するランダムな揺らぎが原因とする。



教科書で描かれている**ブライトバンド近傍における層状性降水過程**

Austin and Dennis (1950)
[Battan (1973)で引用]

Battan (1973)のFig. 10.13
(原典: Lhermitte and Atlas 1963)

Fig. 3. Schematic diagram of the effect of three factors contributing to the bright band.

図4 プライトバンドの形成における各要因の役割 (P. M. Austin and A. C. Dennis, 1950, J. Appl. Meteor. 22, 149-150; Austin and Dennis, 1950, J. Appl. Meteor. 22, 149-150; Austin and Dennis, 1950, J. Appl. Meteor. 22, 149-150)

武田・上田・安田・磨吉 (1992)

Houze (2014)

図2.1 プライトバンドの形成における各要因の役割 (P. M. Austin and A. C. Dennis, 1950, J. Appl. Meteor. 22, 149-150; Austin and Dennis, 1950, J. Appl. Meteor. 22, 149-150; Austin and Dennis, 1950, J. Appl. Meteor. 22, 149-150)

武田・上田・安田・磨吉 (1992)

Houze (2014)

教科書で描かれているブライトバンド近傍における層状性降水過程

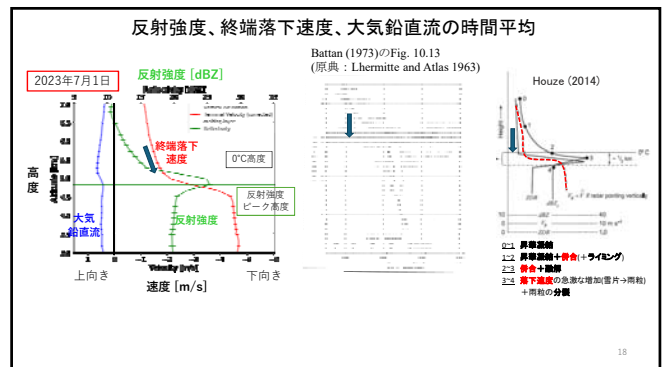
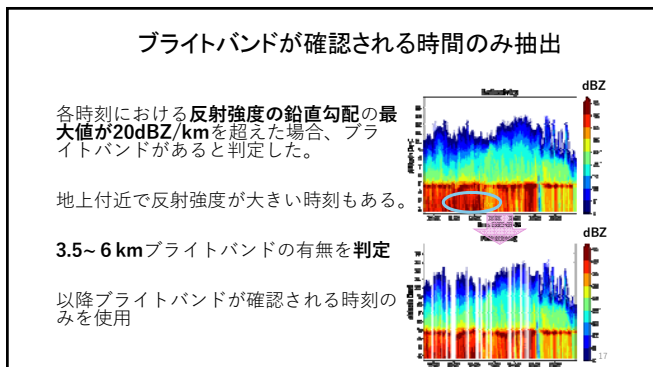
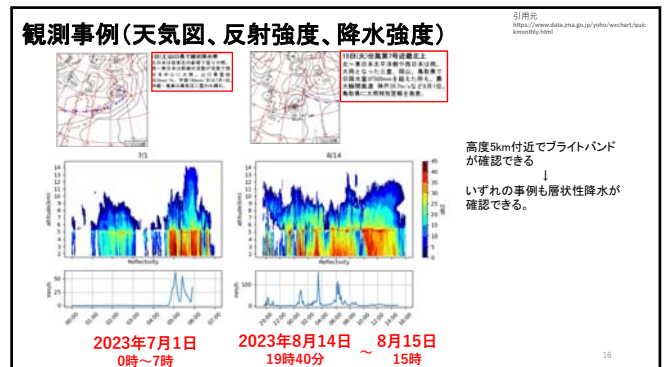
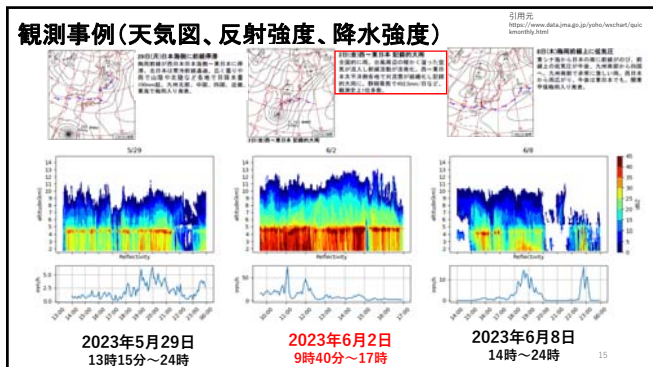
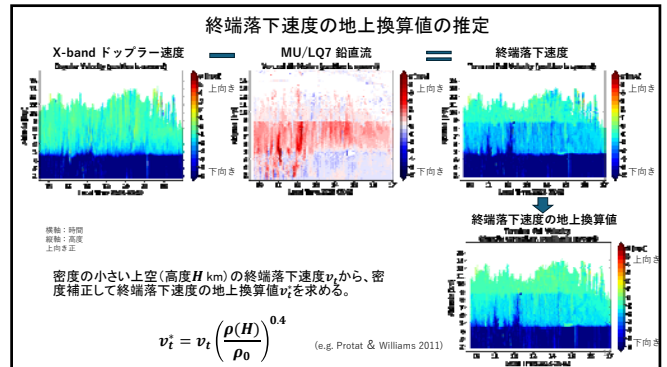
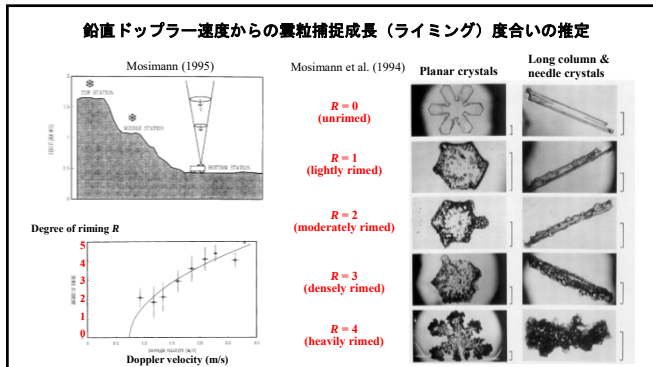
Battan (1973)のFig. 10.13
 (原典：Lhermitte and Atlas 1963)

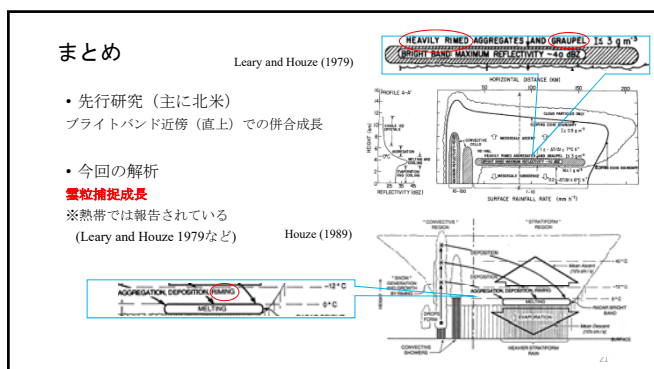
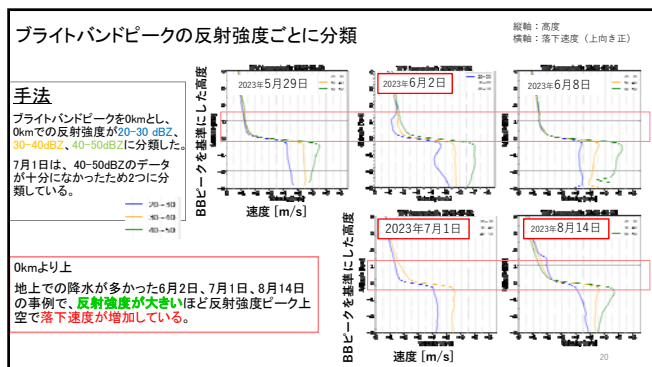
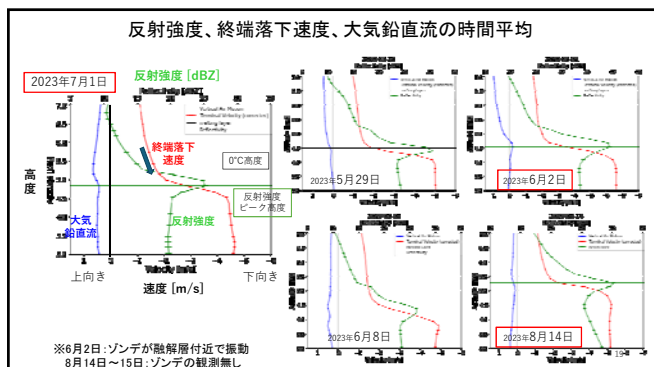
雪結晶の併合成長の観測例
 (Magono et al. 1953)

Houze (2014)

- (1) 昇降運動
- (2) 氷雲 + 雨雲 (+ ラインゾーン)
- (3) 氷雲 + 雨雲
- (4) 雨下流直下の急な増加(雪片+雨粒) + 雨粒の分凝

Houze (2014)





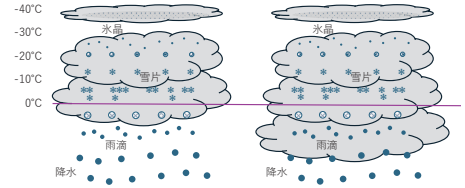
2024年梅雨時期におけるライダーとレーダーによる 雲・降水観測の初期解析結果

柴田泰邦(都立大)、重 尚一 (京大理)
矢吹正教、橋口浩之 (京大RISH)

はじめに

- 基盤研究(A)「レーダリモートセンシングを駆使した層状性降水過程の解明」

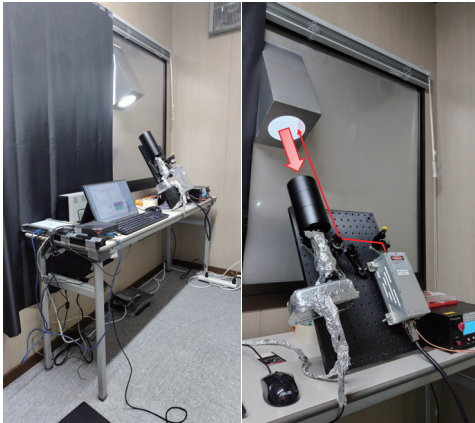
- レーダー観測
融解層高度
降水強度
鉛直流



- 融解層高度と雲底高度の関係？
⇒ ライダーで雲底高度を計測【分担課題】
課題：降水粒子が障害となり、雲までレーザ光が届きにくい

降水時の雲底高度を計測するミールライダーをMU観測所に設置（2024年6月）

TMU 小型ライダー
(MU観測所)



大気ライダー方程式

距離 r [m] からの散乱光強度 $P(r)$

$$P(r) = P_0 q \frac{A}{r^2} \Delta r \beta(\lambda, r) O(r) T^2(\lambda, r)$$

P_0 : レーザ出力

q : 光学系の全効率
(ミラー、レンズ、光検出器など)

A : 望遠鏡の受光面積 [m²]

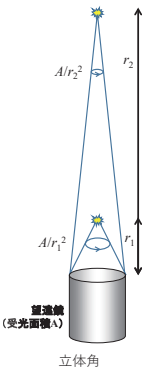
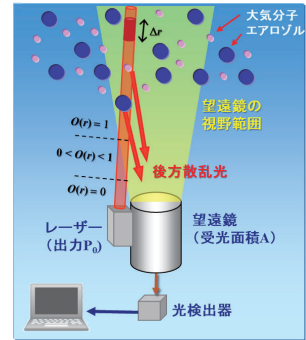
A/r^2 : 立体角 [sr]
(錐体の頂点から見た広がりを表す量)

Δr : 距離分解能 [m]
($= c \tau / 2$, c : 光速, τ : パルス時間幅)

$\beta(\lambda, r)$: 大気の後方散乱係数 [m⁻¹・sr⁻¹]

$O(r)$: 重なり関数
(レーザ光と受信視野の重なり程度を表す)

$T(r)$: 大気透過率



雲からのライダー信号

距離 r [m] からの散乱光強度 $P(r)$

$$P(r) = P_0 q \frac{A}{r^2} \Delta r \beta(\lambda, r) O(r) T^2(\lambda, r)$$

後方散乱係数

$$\beta(\lambda, r) = \beta_{mol}(\lambda, r) + \beta_{aero}(\lambda, r)$$

大気分子成分 雲・エアロゾル成分

大気透過率

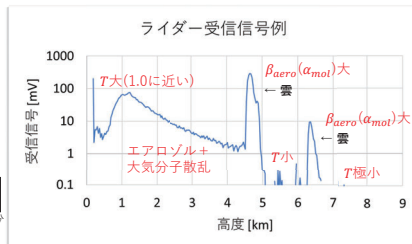
$$T(\lambda, r) = \exp \left[- \int_0^r \{ \alpha_{mol}(\lambda, R) + \alpha_{aero}(\lambda, R) \} dR \right]$$

大気分子成分 雲・エアロゾル成分

消散係数

$$\alpha_{mol}(\lambda, R) = \frac{8\pi}{3} \beta_{mol}(\lambda, r)$$

$$\alpha_{aero}(\lambda, R) = s \beta_{aero}(\lambda, R) \quad s \text{は粒子によって異なる}$$



雲からのライダー信号

距離 r [m] からの散乱光強度 $P(r)$

$$P(r) = P_0 q \frac{A}{r^2} \Delta r \beta(\lambda, r) O(r) T^2(\lambda, r)$$

後方散乱係数

$$\beta(\lambda, r) = \beta_{mol}(\lambda, r) + \beta_{aero}(\lambda, r)$$

大気分子成分 雲・エアロゾル成分

大気透過率

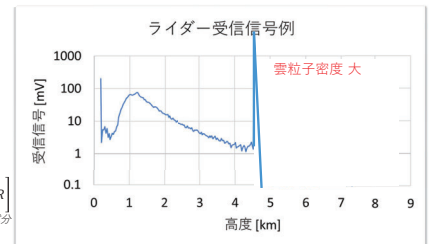
$$T(\lambda, r) = \exp \left[- \int_0^r \{ \alpha_{mol}(\lambda, R) + \alpha_{aero}(\lambda, R) \} dR \right]$$

大気分子成分 雲・エアロゾル成分

消散係数

$$\alpha_{mol}(\lambda, R) = \frac{8\pi}{3} \beta_{mol}(\lambda, r)$$

$$\alpha_{aero}(\lambda, R) = s \beta_{aero}(\lambda, R) \quad s \text{は粒子によって異なる}$$



雲からのライダー信号

距離 r [m] からの散乱光強度 $P(r)$

$$P(r) = P_0 q \frac{A}{r^2} 4\pi \beta(\lambda, r) O(r) T^2(\lambda, r)$$

後方散乱係数
 $\beta(\lambda, r) = \beta_{mol}(\lambda, r) + \beta_{aero}(\lambda, r)$
大気分子成分 雲・エアロゾル成分

大気透過率
$$T(\lambda, r) = \exp \left[- \int_0^r \{ \alpha_{mol}(\lambda, R) + \alpha_{aero}(\lambda, R) \} dR \right]$$

大気分子成分 雲・エアロゾル成分

消散係数
$$\alpha_{mol}(\lambda, R) = \frac{8\pi}{3} \beta_{mol}(\lambda, R)$$

$$\alpha_{aero}(\lambda, R) = s \beta_{aero}(\lambda, R)$$
 s は粒子によって異なる

ライダー受信信号例

受信信号 [mV]

高度 [km]

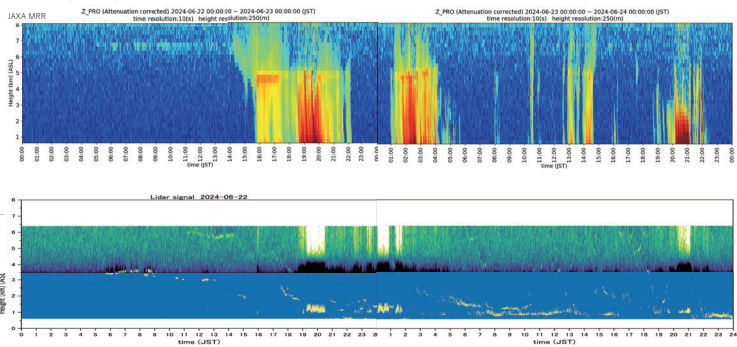
降水粒子エコー

雲エコー (ノイズに埋もれやすい)

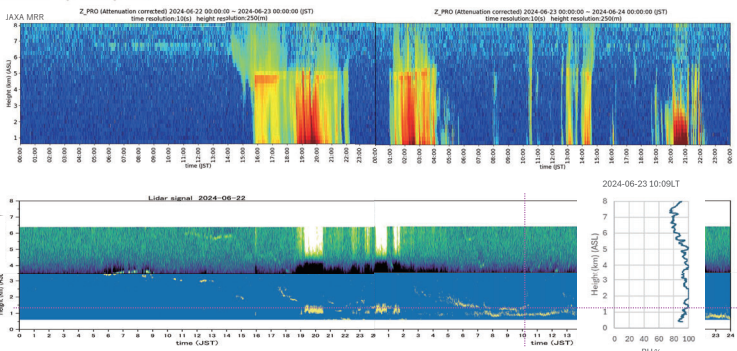
SNの良い高度3.5km未満：エッジ検出による雲判別

SNの悪い高度3.5km以上：画像処理によるノイズ除去

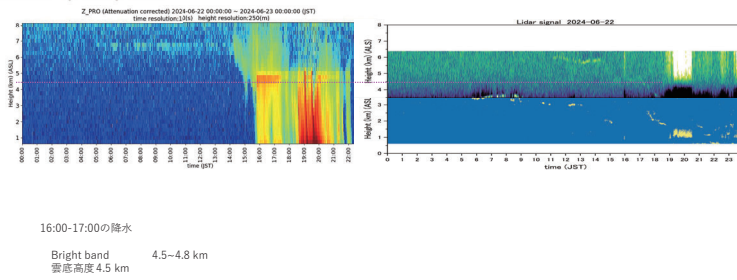
2024/06/22-23



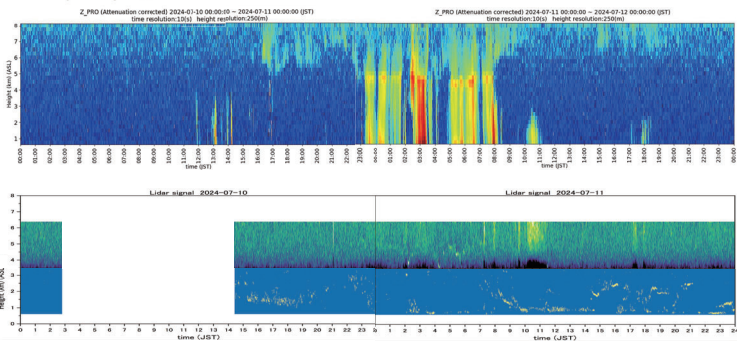
2024/06/22-23



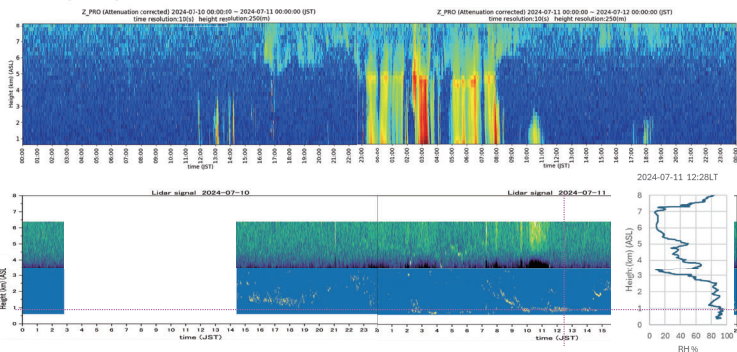
2024/06/22



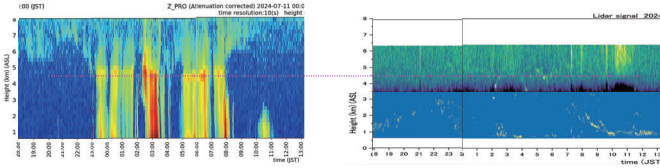
2024/07/10-11



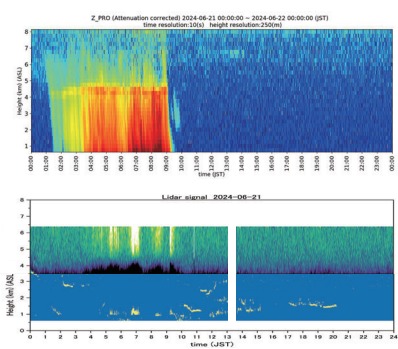
2024/07/10-11



2024/07/10-11



2024/06/21



23:10-01:40の降水
Bright band 4.5~4.8 km
雲底高度 4.7 km

05:00-07:00の降水
Bright band 4.1~4.7 km
雲底高度 4.3 → 4.6 km

07:00-08:00の降水
Bright band 4.5~4.8 km
雲底高度 5.0 km (4.6 km?)

まとめ

- 2024年6月、降水時の雲底高度を計測するためのミーライダーをMU観測所に設置した
- MRRとライダーで降水強度と雲の鉛直プロファイルを同時計測した
- 2024-06-22/23, 2024-07-10/11
ブライドバンドと同じ(4.5 km前後)、または数百m高い高度に雲底が見られた
- 2024-06-21
ブライドバンド(4.5 km前後)より低い3km付近に雲底が見られた
- データ解析を進め、ブライトバンドと異なる高度での雲出現を探す

MU レーダーと MRR によるブライトバンドの同時観測

佐伯悠太郎・下舞豊志

島根大自然科学

Using MU radar data (1987-2022) to re-examine the seasonal dependence of atmospheric parameters

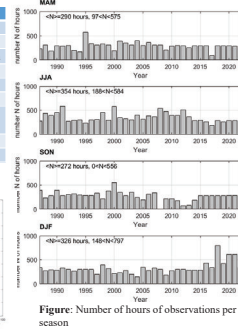
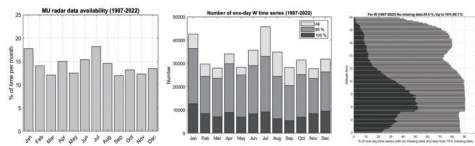
Hubert Luce¹, Hiroyuki Hashiguchi¹, T. Tsuda¹
Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Japan



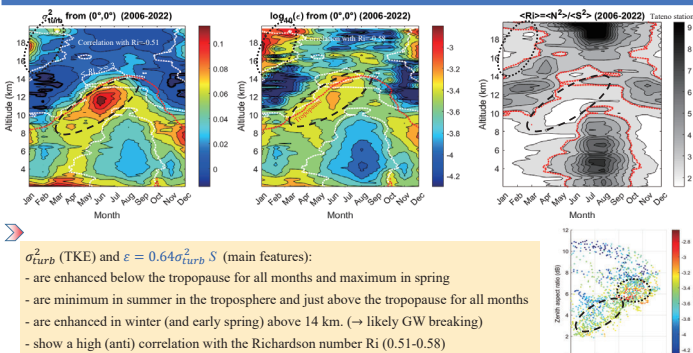
MU radar data for ST mode (1987-2022)

Parameter	Value (Before August 2005)	Value (Before September 2005)
Sub-pulse length	1 μsec	1 μsec
Inter-Pulse Period	400 μsec	400 μsec
Beam directions	V, North, East, South, West 10° off zenith	V, North, East, South, West 10° off zenith
Number of coherent integrations	38	32
Number of incoherent integrations	5 (TR Mode) / 6 (ST Mode)	7
Number of FFT data	128	128
Pulse compression	1 bit (TR Mode) / 16 bit complementary code (ST Mode)	16 bit optimal code
Time resolution	10 min	10 min
Range resolution	150 m	150 m

Table 1: MU radar Observation Parameters. TR-Troposphere, ST-Stratosphere.

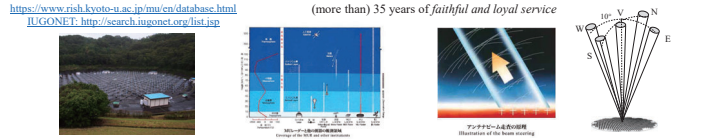


Seasonal variability of σ_{turb}^2 and ϵ

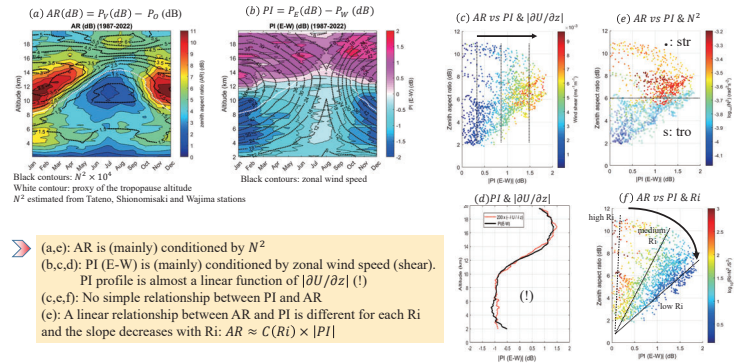


Objectives and outline

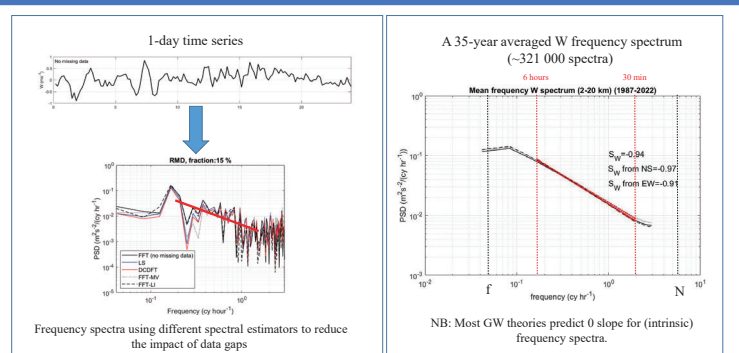
Estimation of the mean properties ("climatological values") of atmospheric parameters associated with mesoscale motions and turbulence based on data collected by the VHF Middle and Upper atmosphere (MU) radar from 2.025 to 19.875 km altitude during several days per month over 35 years (1987-2022).



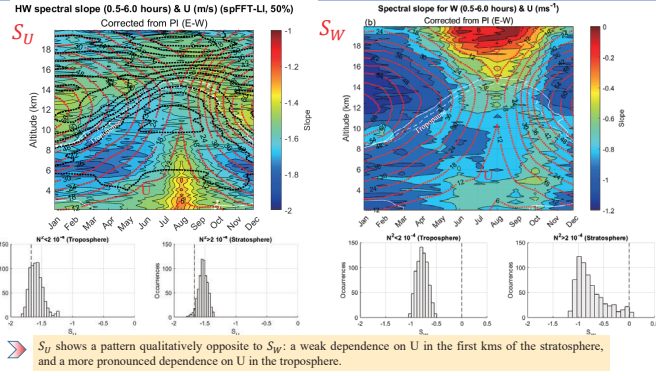
As an appetizer: seasonal variability of aspect ratio and power imbalance (E-W)



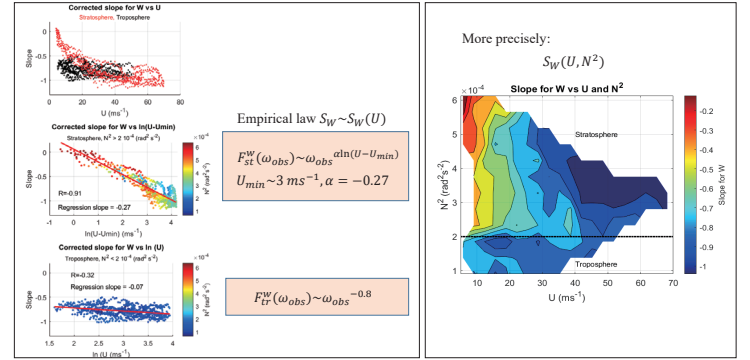
Seasonal variability of spectral slopes S_W & S_U of W and U frequency spectra (0.5-6.0 hours)



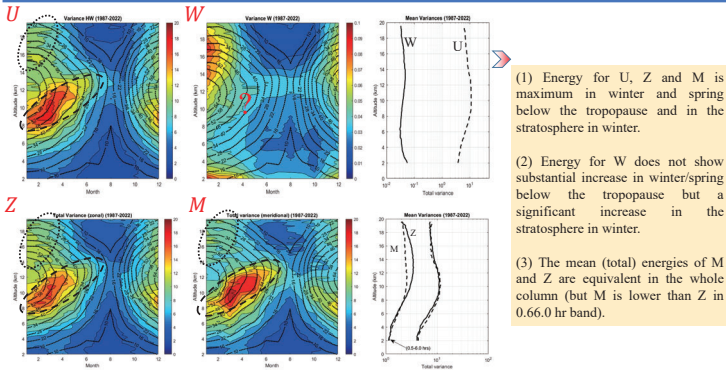
Seasonal variability of S_W & S_U



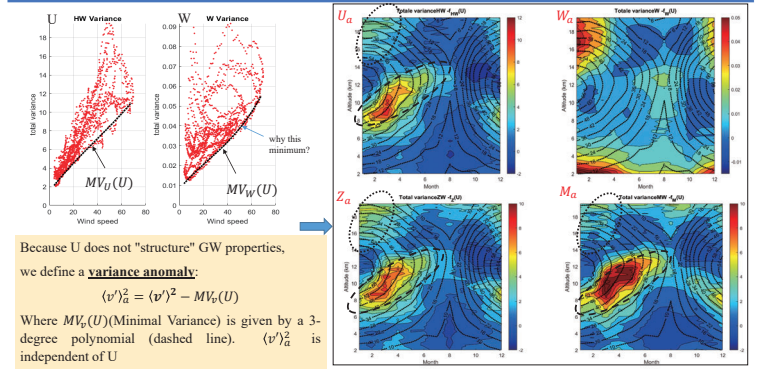
Dependence of S_W on U and N^2



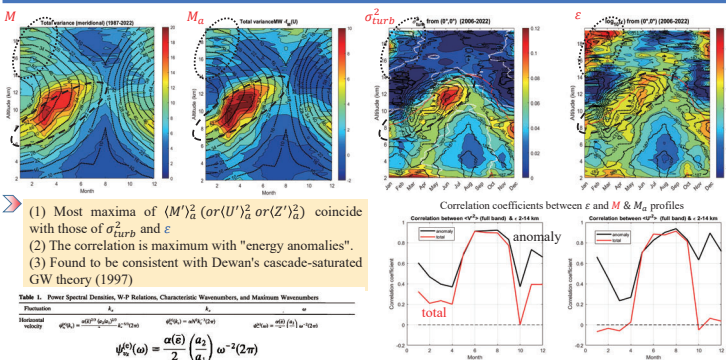
Seasonal variability of energies (U, W, zonal and meridional) (20 min- 24 hrs)



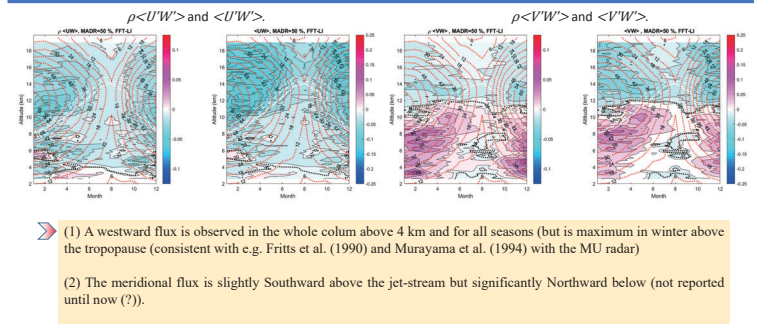
Seasonal variability of energies: definition of anomaly



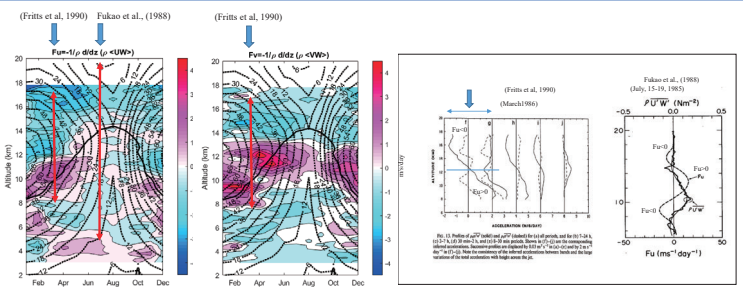
Comparisons of (mesoscale) energies and (small-scale) turbulence parameters



Seasonal variability of momentum fluxes



Seasonal variability of body force (acceleration) $\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho(UW))$ $\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho(VW))$



- (1) A Eastward acceleration is observed below the jet-stream (confirmation) but mainly from Nov to Jun (seasonal assymetry)
- (2) A strong Northward acceleration is also observed around the jet-stream altitude (not reported until now (?)).

Summary and conclusions

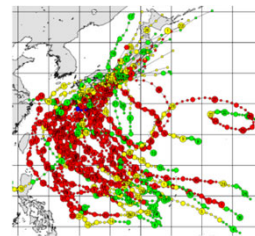
- (1) The climatological values (35 years, 1987-2022) of atmospheric parameters from MU radar revealed/confirmed enhanced mesoscale activities below the tropopause and jet-stream in winter/spring and above the jet-stream in winter (but they may differ in nature). A tropospheric Northward momentum flux appears to be responsible for a Northward acceleration around the jet-stream of the same order as the well-known eastward acceleration below the jet-stream.
- (2) These motions are closely associated with enhanced small-scale turbulence estimated from the Doppler spectral width (likely due to enhanced convective/shear instabilities generated by meso-scale motions. This observation is also qualitatively consistent with some GW theories (e.g. saturated-cascade similtude theory of Dewan (1997)).
- (3) These analyses do not consider the *intermittency* of the turbulence and meso-scale motions, which is very important for the interpretation of the relationship between the climatological values (more to come...).
- (4) The analysis of annual trends between 1987 and 2022 is made difficult by the intermittent sampling (~5 days/month) of the radar (not shown), but it is still one major objective of the present studies.

MUレーダー観測に基づいた 台風のメソスケール風速場の 特徴について

柴垣佳明(大阪電通大)、橋口浩之・Luce(京大RISH)、
山本真之(NICT)、山中大学(地球研)

1

過去にMUレーダー付近を通過した台風について

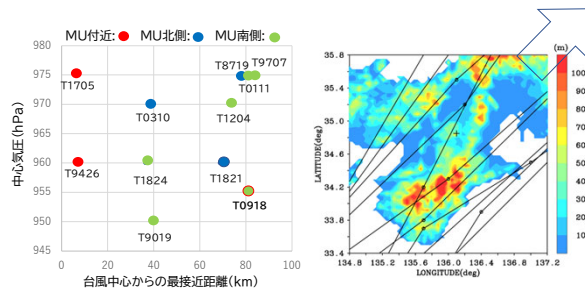


デジタル台風サイトより

	日本列島 上陸	MU100km以内 通過	980 hPa 未測(MU観測)
84~93年	29	8	2
94~03年	23	7	3
04~13年	29	8	2
14~23年	38	14	3
計	119	37	11

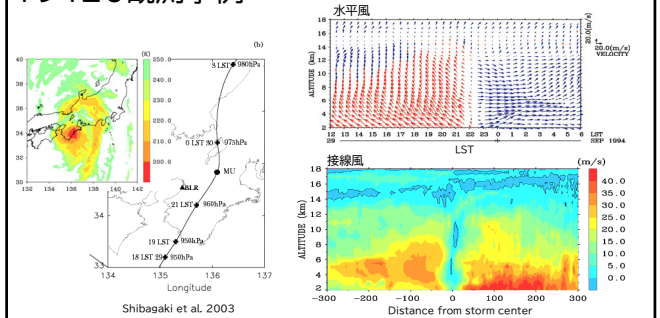
2

台風観測事例



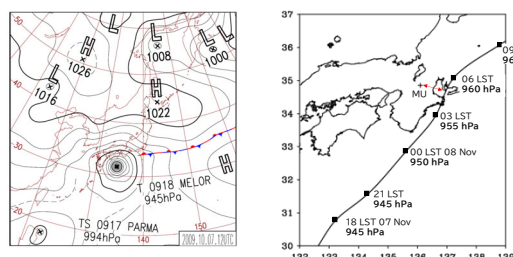
3

T9426観測事例



4

T0918経路と地上気圧分布

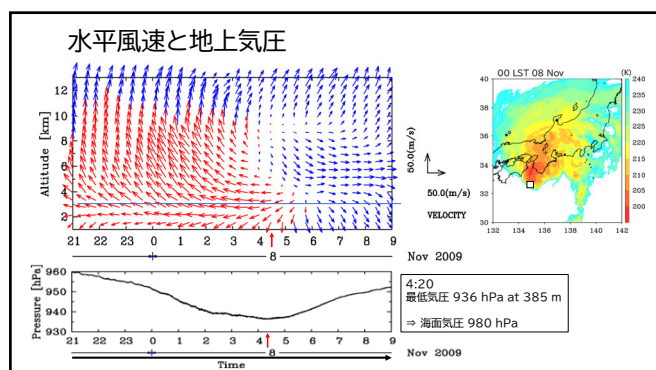


5

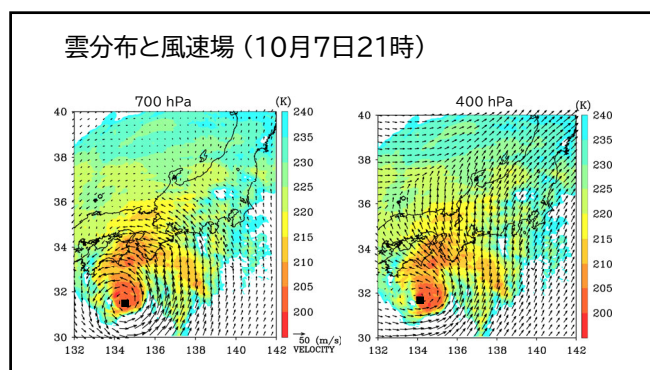
解析データ

- MUレーダー風速データ(w, u, v)
観測期間: 2009年10月7日15:57~8日12:30 ※FDI特別観測
時間分解能 8秒 → 5分平均データを使用。
高度分解能 150 m
- 気象庁大阪レーダーCAPPIデータ
- 気象庁全国合成レーダーデータ
- 気象衛星IRデータ
- 気象庁メソ数値予報モデルデータ

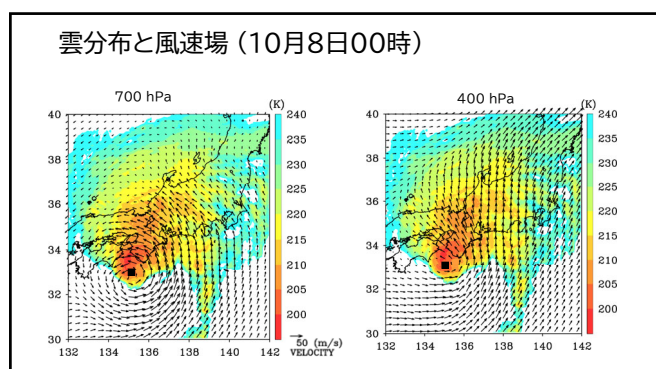
6



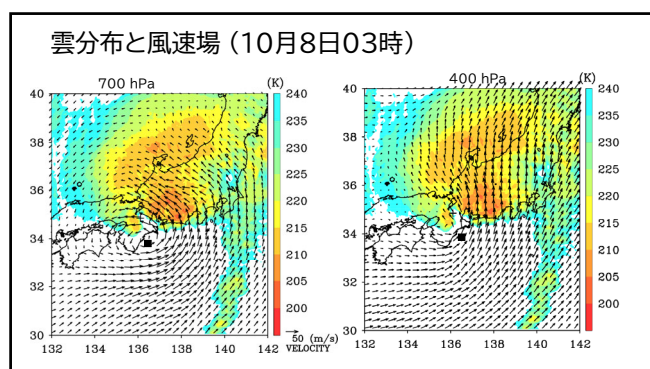
7



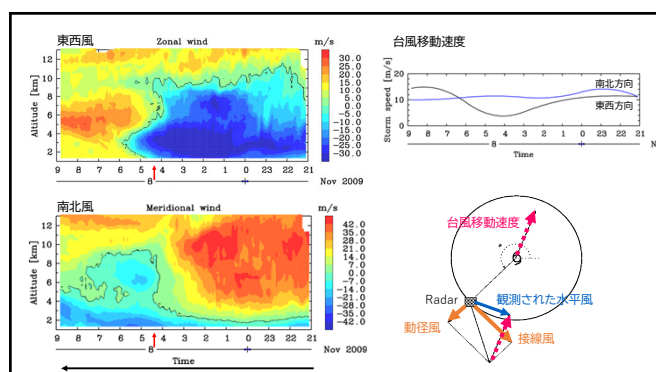
8



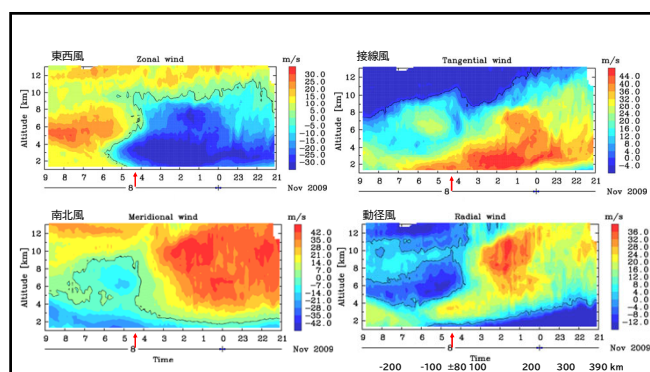
9



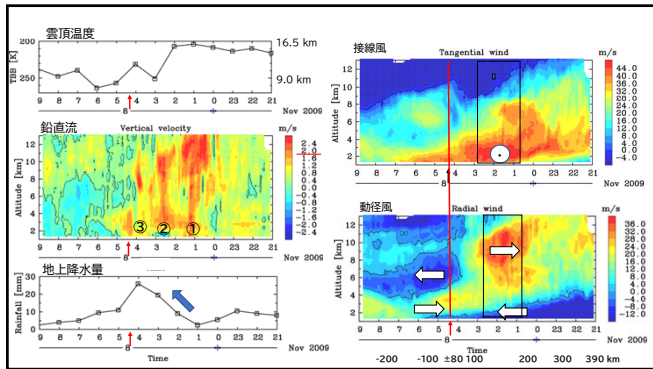
10



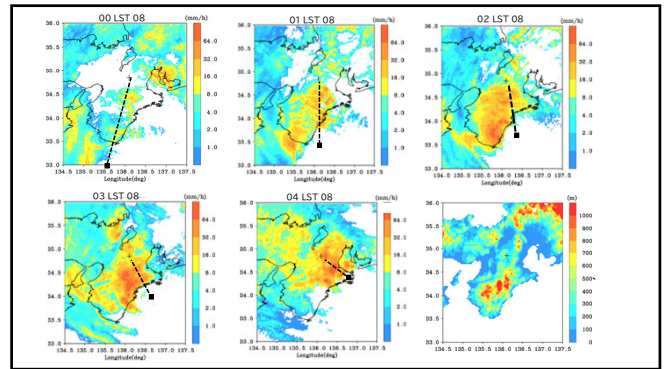
11



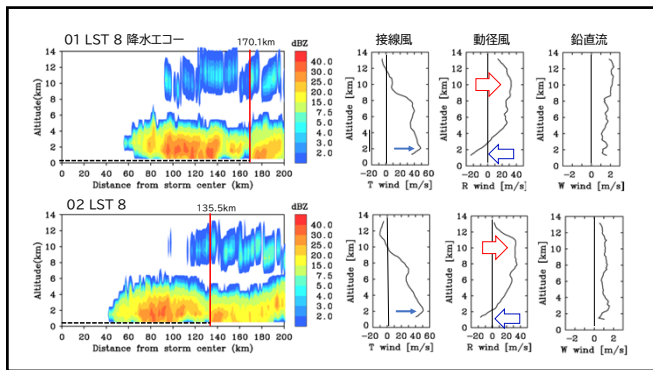
12



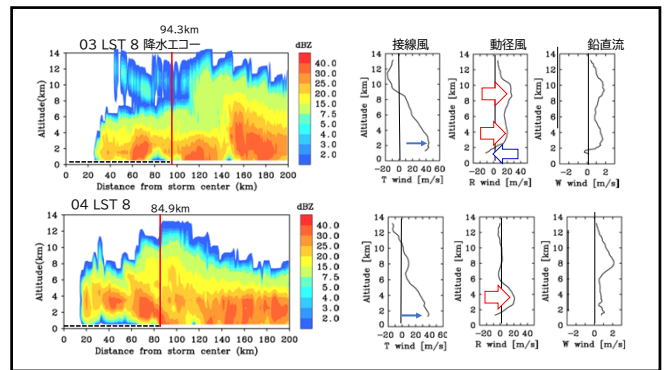
13



14



15



16

まとめ

- これまでの台風観測の中で最も強い風速を持つ台風0918号の内部構造を解析した。
- 台風前面では、上層の雲に対応する強い上昇流域が観測された。
- 紀伊山地への台風中心の接近に伴い、下層の降水帯が発達し、eyewallが形成された。
- Eyewall形成時には、下層での動径風収束と接線風の強化により、下層から上層にかけて顕著な上昇流域が卓越していた。
- また、上層降水域と下層降水域が存在し、上層降水域の存在により、下層降水域の発達に寄与していたと考えられた。
- この研究により、eyewallの形成・発達に係わる降水の鉛直断面と風速場を示すことができた。

17

第18回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
September 27th, 2024 (Fri)

物理気候学研究室
Climate Physics Laboratory

赤道大気レーダーと境界層レーダーを用いた 降水雲内の大気鉛直流の推定 -2

Estimation of Vertical Air Motion within Precipitating Clouds
Using the Equatorial Atmosphere Radar in Combination
with a Boundary Layer Radar -2

戸田望¹・重尚一¹・Christopher R. Williams²・西憲敬³・橋口浩之⁴

1: 京都大学大学院理学研究科, 2: University of Colorado Boulder,
3: 福岡大学理学部, 4: 京都大学生存圏研究所

1

研究の背景

大気鉛直流

- 降水雲の熱力学的な性質に関わる基本的なパラメータ
- 時間、高度方向に高分解能なデータを得ることが容易でなく、降水雲に関する解析事例は少ない
- 50-MHz帯の大気レーダーを用いた解析で推定が可能

Biggerstaff and House (1991)

EAR の位置と外観
生存圏研究所HPより

2

研究目的

50-MHz帯レーダー

- 大気乱流：Bragg散乱の観測による推定
ガウス分布のフィッティング (single-frequency method)
- 降水時はRayleigh散乱も同時に観測

先行研究 Nishi et al (2007), Mega et al. (2012)

- EARで推定した大気鉛直流のデータを使用
- 鉛直流は目視・手動で推定
→ 長期間の解析には向かない

本研究の目的
降水時の鉛直流を機械的に推定する手法の開発

3

大気レーダーを用いた鉛直流推定の課題 -1

降水粒子が存在する場合

- ピークが2つある
- 鉛直流の推定値が下降流側にずれる

4

大気レーダーを用いた鉛直流推定の課題 -2

- 鉛直流の推定値が下降流側にずれる
(融解層付近で顕著)

平均ドップラー速度 (Gaussフィッティングによる推定値)

5

大気レーダーを用いた鉛直流推定の課題 -3

2ピークのフィッティング (Web公開データ)

- 全体の形はよく表せるが、各パラメータの精度が良いわけではない

情報量規準の問題設定は、予測のために「良い」モデルを求めることであって、「真の」モデルかどうかは問題ではないのである。有限個のデータからパラメータを推定する場合には、推定された「真の次数」のモデルが最も高い予測能力を持つとは限らない。
赤池 (ほか) (2021)

- パラメータが多く、フィッティングが安定しない

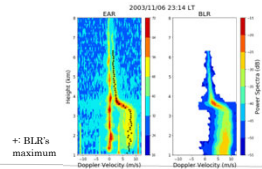
6

境界層レーダー

高周波のレーダーを併用する (dual-frequency method)

Boundary Layer Radar

- EARの近隣に設置
- 降水粒子が存在すればRayleigh散乱のみ観測する
- 降水粒子が存在しなければBragg散乱を観測する傾向にある (ピークがない場合も多い)



Specifications of the BLR	
Location	EAR neighborhood
Frequency	1357.5 MHz
Output Power	2 kW
Observation range	100m ~ 6 km (~ Dec. 2003) 100m ~ 9 km (Dec. 2003 ~)
Distance resolution	100m
Time resolution	1min.
Doppler velocity resolution	0.27 m/s

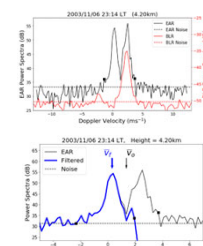
7

先行研究 -1

- Williams (2012): (W12)
- Darwinのレーダーに関する研究

- dual-frequency method
e.g.) 50 MHz & 920 MHz / EAR & BLR
- 50-MHz帯レーダーのスペクトルにフィルタをかけ、Rayleigh散乱を乗り除く

→ 推定が上手くいかない事例がみられた

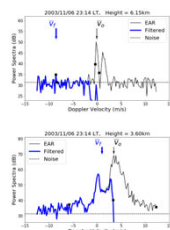
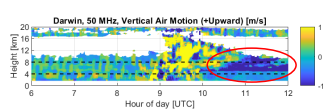


8

先行研究 -2

推定に失敗した事例

- 2つのピークが近接 (右上図)
- Rayleigh散乱のピークが比較的大きい (右下図)



9

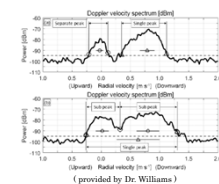
先行研究 -3

- Williams et al. (2018): (W18)
- 35 GHzのプロファイラ用に使われた方法
- 50-MHz帯レーダーへ適用(e.g., EAR)

➢ 閾値を定めて "peak" と "valley" を検出する

- 前項の問題は改善できる
- "valley"が曖昧なときは上手く推定できない
- W12を使えばよい

2つの手法 (W12とW18) の組み合わせ
によって推定精度の向上が期待できる



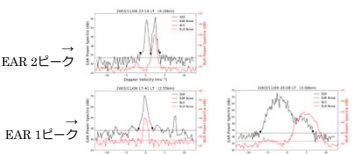
10

本研究で提案する手法

手法の概要

以下を考慮して場合分け

- BLRのピークの有無
- EARのピークの数・幅
- 高度方向の連続性

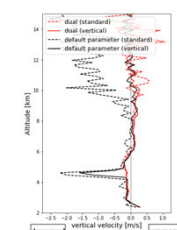
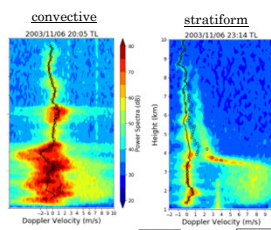


11

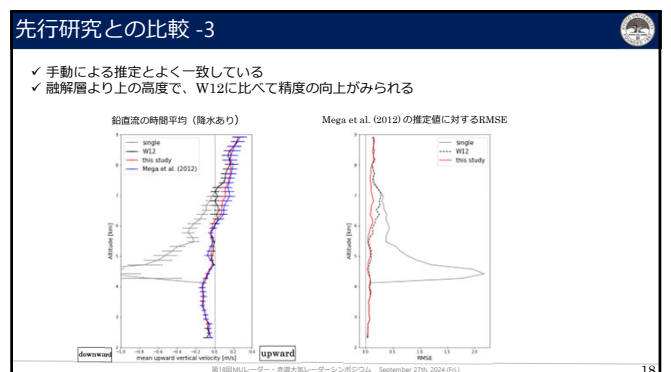
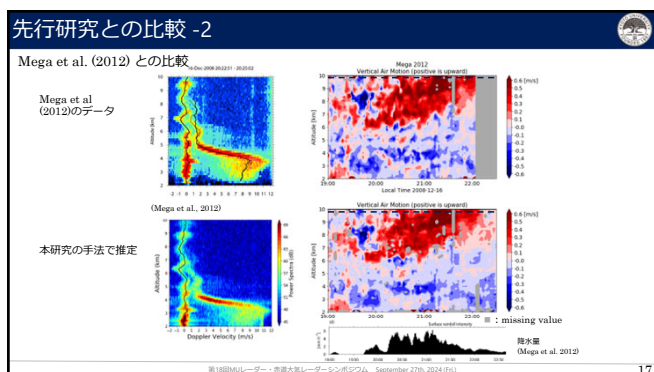
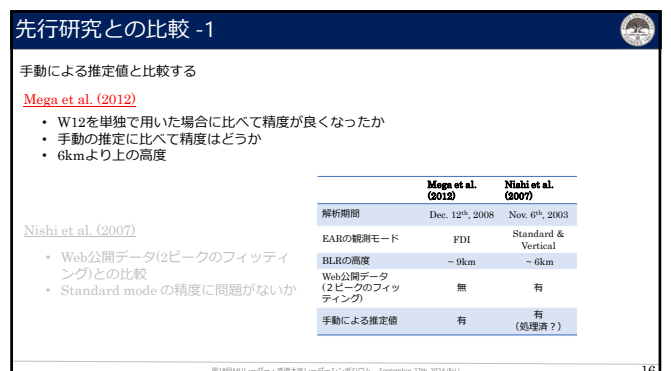
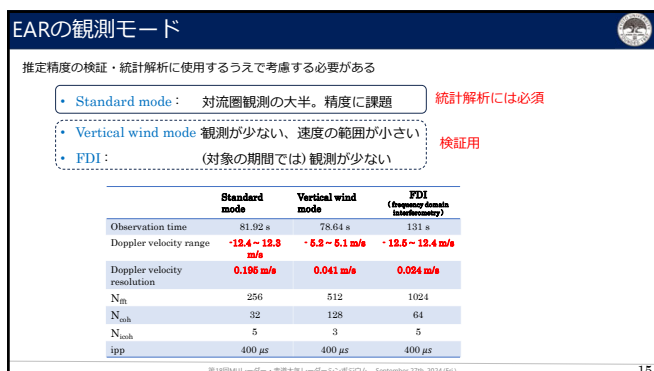
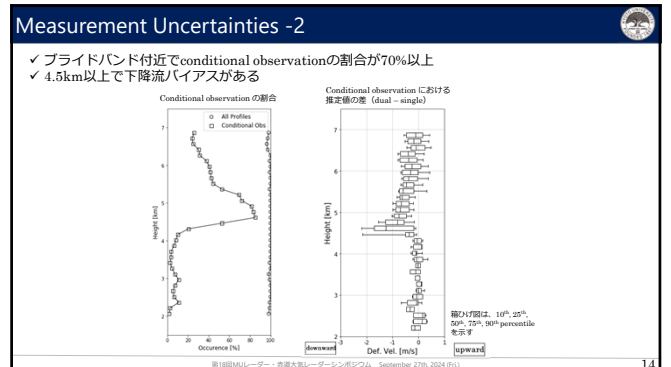
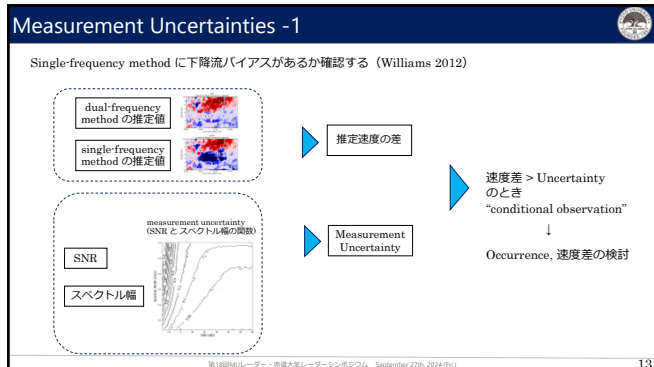
推定結果

2003/11/06 (Nishi et al. 2007)

✓ Rayleigh散乱の影響を取り除いて推定できている



12



先行研究との比較 -1 (再掲)

手動による推定値と比較する

- W12を単独で用いた場合に比べて精度が良くなったか
- 手動の推定に比べて精度はどうか
- 6kmより上の高度

Nishi et al. (2007)

- Web公開データ(2ピークのフィッティング)との比較
- Standard mode の精度に問題がないか

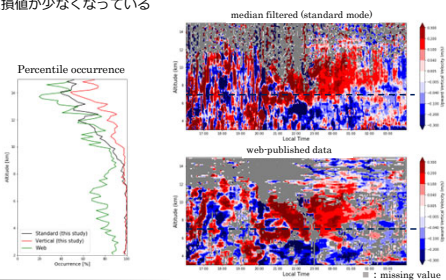
	Mega et al. (2012)	Nishi et al. (2007)
解析期間	Dec. 12 th , 2008	Nov. 6 th , 2003
EARの観測モード	FDI	Standard & Vertical
BLRの高度	~ 9km	~ 6km
Web公開データ (2 ピークのフィッティング)	無	有
手動による推定値	有	有 (処理済 ?)

第18回MUリーダー・赤道大気リーダーシンポジウム September 27th, 2024 (Fri)



先行研究との比較 -4

- ✓ Webデータ（2ピークのフィッティング）に比べて、欠損値が少なくなっている



第18回MLリーダー・杏瀬大気リーダーシンポジウム September 27th, 2024 (Fri)

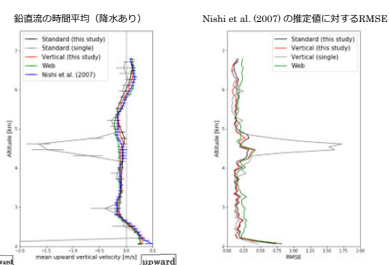
20

19

20

先行研究との比較 -5

- ✓ 2ピークのフィッティングと同程度の誤差
- ✓ Vertical wind mode と Standard mode は同程度の誤差

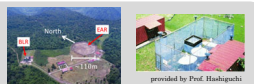


第18回MLBリーダー・東道大気リーダーシンポジウム September 27th, 2024 (Ed)



二周波解析

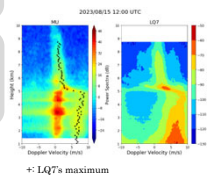
Kototabang
: EAR (47 MHz)
BLR (1.3 GHz)



信楽
: MULEーダー (46.5 MHz)
LQ7 (1.3 GHz)



Darwin
: 50 MHz Profiler
920 MHz Profiler



第18回MLリーダー・書道大会リーダーシンポジウム September 27th, 2024 (Fri)

29

21

22

Summary

大気鉛直流を機械的に推定する手法の開発

- W12とW18の欠点を補うため、両者を組み合わせて実装
- 大気鉛直流の推定精度が改善することを確認した
- 推定した大気鉛直流の値は、手動による推定値に近いものであり、Web公開データより欠損の少ないものであった
- Standard modeによる推定値でも十分な精度があり、長期間の解析への応用が期待できる

Future prospects

- 論文投稿
- 降水システムに関する統計解析

第18回MHLリーダー・志道大気リーダーシンポジウム September 27th, 2024 (Fri)



23

Ka 帯衛星回線の降雨減衰比と周波数スケーリング法の検討

前川泰之(大阪電気通信大学)

1. はじめに

今後, 5G/6G 移動通信システムでは, 地球規模, 宇宙規模でのネットワークシステムの発展が予想される. これらのシステムでは, 静止衛星(GEO), 低軌道衛星(LEO), および高高度プラットフォーム局(HAPS)から構成される非地上系ネットワーク(NTN)が重要な役割を果たすと考えられる[1]. この様な非地上系ネットワークは Gbps 以上の地上ネットワークに対峙する必要がある, 使用する電波の周波数は Ku 帯(14/12GHz)から Ka 帯(30/20GHz)以上である必要がある. 従って, 今後 5G/6G の通信ネットワークでは, Ka 帯(30/20GHz)からより周波数の高い Q 帯や V 帯の利用拡大が見込まれる. この意味で, 10 GHz 以上の周波数で発生する降雨減衰 [2] がますます深刻な問題になる.

本報告では, 大阪電気通信大学(寝屋川市)で 1988 年から 2023 年にかけて測定された Ku 帯 BS 放送電波(11.84 GHz, 円偏波, 仰角41.3°)と1986年から2006年にかけてKa帯CSビーコン波(19.45 GHz, 円偏波, 仰角49.5°)の降雨減衰統計を用いて, さらに周波数の高い 30 GHz や 40 GHz で発生する降雨減衰量について検討を加えたので報告する.

1. 2. 周波数スケーリング法

ある衛星回線の降雨減衰から同一あるいは他の衛星回線の異なる周波数の降雨減衰の推定は周波数スケーリング法により行われる. 周波数 f_1 から他の周波数 f_2 に対する降雨減衰の周波数スケーリングとしては ITU-R 勧告[3]により次式が推奨されている.

$$A_2 = A_1(\varphi_2/\varphi_1)^{1-H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)} \quad (1)$$

$$\varphi(f) = \frac{f^2}{1+10^{-4}f^2} \quad (2)$$

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1.12 \times 10^{-3}(\varphi_2/\varphi_1)^{0.5}(\varphi_1 A_1)^{0.55} \quad (3)$$

ここで, A_1, A_2 はそれぞれ周波数 f_1, f_2 [GHz] に対する降雨減衰の累積時間率分布の等確率値で, φ_1 と φ_2 はそれぞれ周波数 f_1 と f_2 に対して式(2)で与えられる. 即ち, $f_1 = 11.84$, $f_2 = 19.45$ とすれば, Ku 帯 BS 電波降雨減衰 A_1 から同伝搬路の Ka 帯降雨減衰 A_2 の累積時間率分布が計算可能となり, Ka 帯 CS 電波の降雨減衰は仰角のさらに補正を行い, $A_2' = A_2 \sin 41.3^\circ / \sin 49.5^\circ$ で与えられる.

一方, 扁平雨滴モデルによる降雨減衰の減衰係数[4]は, 降雨減衰 R [mm/h] に対し次式で与えられる.

$$\alpha = aR^b \quad \text{dB/km} \quad (4)$$

即ち, 降雨強度が R [mm/h] の時の Ku 帯と Ka 帯の降雨減衰を, 同様に A_1, A_2 とすると

$$A_1 = a_1 R^{b_1} L_1 \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

$$A_2 = a_2 R^{b_2} L_2 \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

で表される. ここで (a_1, b_1) と (a_2, b_2) は, それぞれ Ku 帯と Ka 帯の減衰係数に対する定数であり, 3 種類の代表的な雨滴粒径分布である Jd 型 (Joss-drizzle: 霧雨型), MP 型 (Marshall-Palmer: 標準型), および Jt 型 (Joss-thunderstorm: 霧雨型) に対して表 1 で示す数値で与えられる. また, Ku 帯 BS の雨域通路長 L_1 は 5 km 程度であり, Ka 帯 CS の雨域通路長は $L_2 = L_1 \sin 41.3^\circ / \sin 49.5^\circ$ で与えられる. 従って, Ka 帯減衰量 A_2 は Ku 帯減衰量 A_1 より, 両伝搬路において同一の降雨強度を仮定して式(5)と(6)で R を消去すると次式で計算される.

$$A_2 = a_2 \left(\frac{A_1}{a_1 L_1} \right)^{b_2/b_1} L_2 \quad (7)$$

ここで, ITU-R 勧告による周波数スケールリング法の(1)式では, 比較的長期統計における降雨減衰の累積時間率分布値が与えられるのに対し, 偏平雨滴モデルによる理論計算値では, 例えば 1 分間隔の測定値の瞬時値において, 3 種類の雨滴粒径分布モデルに対して周波数スケールリング値が与えられるのに注意を要する.

表 1. Ku 帯 Ka 帯降雨減衰の各雨滴粒径分布(DSD)の定数.

衛星(偏波)	周波数	DSD	a	b
BS (円偏波) 仰角 41.3°	Ku 帯 11.84 GHz (a_1, b_1)	Jd:	0.01086	1.187
		MP:	0.01766	1.216
		Jt:	0.02027	1.150
CS (円偏波) 仰角 49.5	Ka 帯 19.45 GHz (a_2, b_2)	Jd:	0.04218	1.143
		MP:	0.07032	1.105
		Jt:	0.06957	1.033

図 1 は, 1988 年から 2006 年までに測定された Ka 帯 CS と Ku 帯 BS の降雨減衰の年間累積時間率を使用して求めた等確率時間値同士の関係を示す. 図中の細線は, 霧雨型 (Joss-drizzle: Jd), 標準型 (Marshall-Palmer: MP), および雷雨型 (Joss-thunderstorm) の代表的な 3 種類の雨滴粒径分布 (DSD) に基づく降雨減衰の当確率値の理論値である [4]. また, 点線は ITU-R 勧告の周波数スケールリングによる予測値である [3].

図 1 より, 両周波数帯域の降雨減衰比は年々大きく変動しており, その変動幅は MP 型にほぼ相当する平均値の $\pm 10\%$ 以上に達していることが分る. ただし, これらの比率は, 概ね上記の 3 種類の雨滴サイズ分布 (DSD) に基づく理論値の範囲内にあることが分る. 図 1 をさらに詳しく見ると, Ka 帯で 10~15dB 以上など, ある程度減衰量が大きくなると年毎の周波数比の違いが顕著になり, 年により特徴的な傾向が見られる. たとえば, 1992 年(a, 青)と 2003 年(d, 紺色)では周波数比が大きくなり, Jd 型に近づくのに対し. 1988 年(a, 紺), 2004 年(d, 赤)では逆に小さくなり, むしろ Jt 型に近づくことが示される.

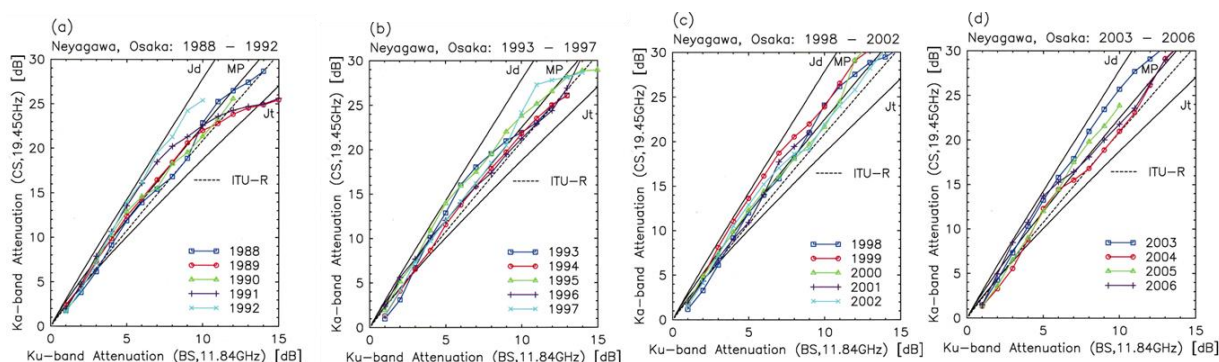


図 1 1988 年から 2006 年までに得られた Ka 帯 CS と Ku 帯 BS の降雨減衰の年間等確率時間値

3. 30 GHz および 40 GHz 帯の降雨減衰推定

本章では、より高い周波数帯である Ka 帯アップリンクの 30GHz 帯と Q 帯ダウンリンクの 40 GHz 帯の降雨減衰を推定するために、これらの周波数帯の減衰係数を用いて、同様に周波数スケーリングによる降雨減衰発生予測値の計算を試みた。周波数は 30 GHz と 40 GHz とし、伝搬路とは CS と同じ仰角 49.5° とし、偏波面は右旋円偏波とした。表 2 にこれらの周波数スケーリングに用いた減衰係数の定数 (a_3, b_3) と (a_4, b_4) を DSD 別に示す。

表2. Ka 帯と Q 帯降雨減衰の各雨滴粒径分布(DSD)の定数.

衛星(偏波)	周波数	DSD	a	b
CS* (円偏波) 仰角 49.5°	Ka 帯 30 GHz (a_3, b_3)	Jd:	0.11918	1.0910
		MP:	0.18838	1.0308
		Jt:	0.16852	0.9441
CS* (円偏波) 仰角 49.5°	Q 帯 40 GHz (a_4, b_4)	Jd:	0.23598	1.0512
		MP:	0.36232	0.9673
		Jt:	0.30317	0.8714

ここではまず 1988 年から 2006 年に 1 分間隔で測定された Ku 帯 BS (11.84 GHz、仰角 41.3°)の降雨減衰に対し、降雨事象毎の雨定期粒径分布と Jd 型、MP 型、および Jt 型の 3 種類からそれぞれ選んで 30 GHz と 40 GHz の CS 伝搬路(仰角 49.5°)における降雨減衰に変換した。図 2 と図 3 はそれぞれ 30 GHz と 40 GHz の場合における各年の BS 降雨減衰との等時間率値同士の関係を示したものである。図 2 と図 3 より、Ku 帯 11.84 GHz と Ka 帯 19.45 GHz の場合の各年の等時間率値と同様に、年毎にかなり大きな変動を示すが、いずれも 3 種類の DSD の理論値が示す範囲に分布することが分る。またこれらの値は各年に多く見られる DSD の影響を受け、各 DSD が発生する降雨タイプや降雨時期(梅雨や秋雨等)の発生割合により決まることが示されている。

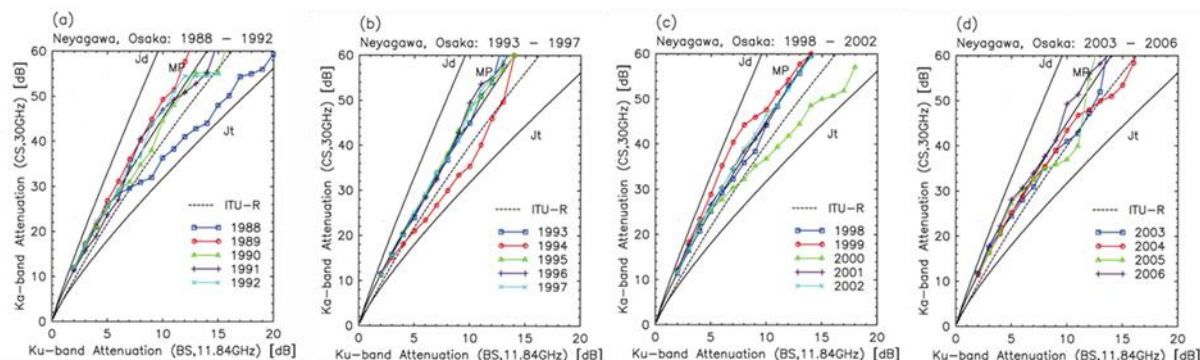


図 2 1988 年から 2006 年に得られた BS の降雨減衰と 30GHz の推定値の年間等時間率値

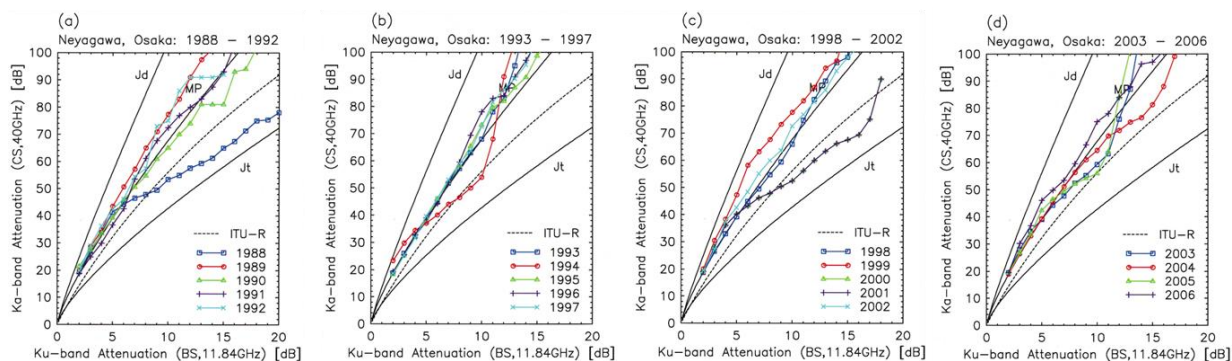


図 3 1988 年から 2006 年に得られた BS の降雨減衰と 40GHz の推定値の年間等時間率値

次に、図 4 に図 2 と図 3 で得られた各年の (a) 30 GHz と (b) 40 GHz における Ku 帯 BS 降雨減衰からの周波数スケーリングによる推定値の平均値とその周りの変動幅を各 BS 減衰値に対して示す。また図 5 は同様に Ka 帯 CS (19.45 GHz) の降雨減衰から周波数スケーリングによって推定された各年の (a) 30 GHz と (b) 40 GHz における推定値の平均値とその周りの変動幅を示す。さらに図 4.73(a) は BS 11.45 GHz と CS 19.45GHz の測定値間の等時間率値、図 4.73(b) BS の測定値と CS の周波数スケーリングによる推定値の等時間率値におけるそれらの関係を同様に示す。

図 4 と図 5 から、周波数が 30 GHz から 40 GHz まで増大するにつれて降雨減衰推定量のまわりの変動幅が増大し、また降雨減衰推定値が大きいほど変動幅も大きくなるが示される。また平均値はどの事例も標準型の MP 型の DSD による周波数スケーリング値の近傍にあり、変動幅は降雨事象毎の場合の様に 3 種類の DSD の全範囲に及ぶことはないと言える。

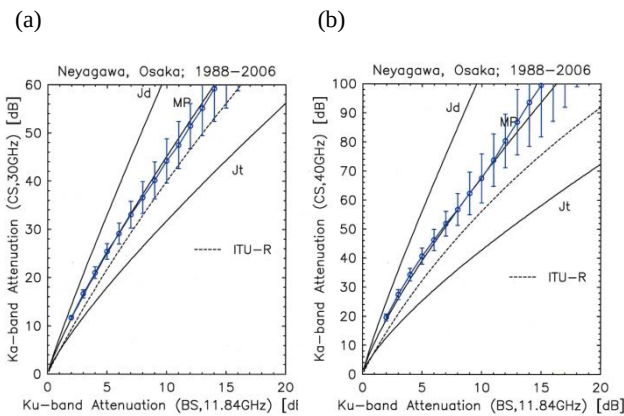


図 4 (a) 30 GHz と (b) 40 GHz における BS (11.84 GHz) 降雨減衰からの推定値。

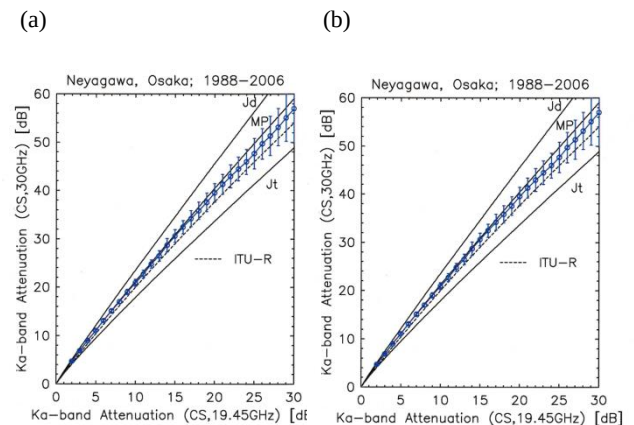


図 5 (a) 30 GHz と (b) 40 GHz における CS (19.45 GHz) 降雨減衰からの推定値

図 6 (a) に 1988～2006 年に本学で測定された BS 電波と CS 電波降雨減衰の累積時間率分布と BS 電波による 30GHz と 40GHz の降雨減衰累積時間率分布の推定値をまとめて示す。雨滴粒径分布は MP 型に統一している。また図 6 (b) は、0.01～1.0% の累積時間率値に対するこれらの周波数の降雨減衰等確率値を示す。図より降雨減衰の等時間率値はこれらの周波数の間でほぼ直線的に増加することが分る。従って、20～40GHz の仰角 49.5° で円偏波の降雨減衰のこれらの時間率値に関しては、図 6 (b) に示した値をほぼ直線的に内挿することにより近似的に得られることが示される。

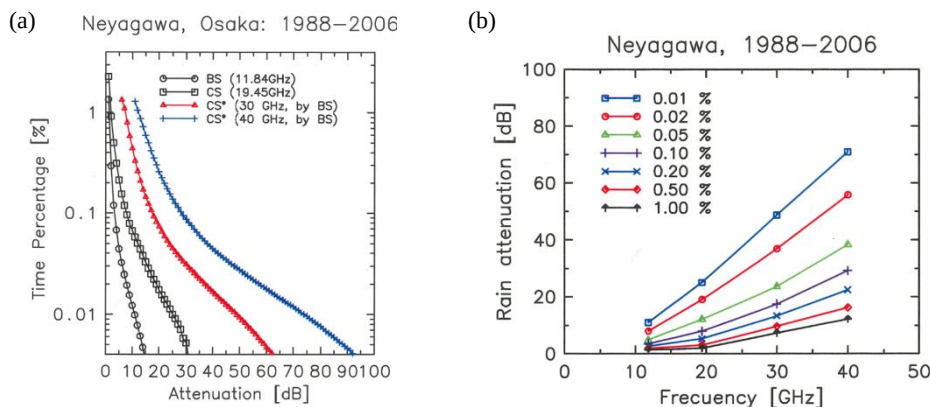


図 6 (a) 1988 年から 2006 年に測定された BS と CS 降雨減衰累積時間率分布と 30GHz と 40GHz の降雨減衰累積時間率分布の推定値、および (b) 0.01～1.0% の時間率にたいする降雨減衰等時間率値。

4. 2007 年以後の高周波帯の降雨減衰推定

前章の長期統計において、BS (11.84 GHz) と CS (19.45 GHz) 降雨減衰による MP 法を用いた 30 GHz および 40 GHz の降雨減衰の推定値は、ほぼ一致することが示された。従って、本学では 2007 年以降には CS 降雨減衰は測定されていないものの、BS 降雨減衰は現在 (2024 年 9 月) に至るまで降雨強度とともに絶やさず測定されており、30 GHz や 40 GHz の降雨減衰推定を引き続き精度よく行うことが可能であると言える。特に 2007 年以降 BS 降雨減衰の年間時間率は温暖化等に伴い増加傾向にあるので、30 GHz や 40 GHz 等のより高い周波数での降雨減衰時間率の増加傾向を明らかにすることが急務と言える。

図 7 に 2007 年から 2023 年までに測定した BS の降雨減衰と降雨強度の累積時間率分布、および雨滴粒径分布を MP 型と一律に仮定した周波数スケーリングを用いて BS 減衰量から推定した (a) 19.45 GHz、(b) 30 GHz、および (c) 40 GHz の減衰量を示す。これらの Ka 帯および Q 帯の衛星電波の仰角は前節と同じく 49.5°、偏波面は円偏波と仮定している。また、点線は、ITU-R 勧告 [3] により BS 降雨減衰から推定された周波数スケーリング (青) と、この期間の降雨強度 0.01% 値 (63.52 mm/h) から ITU-R 勧告により推定された降雨減衰 (紫) を示す。さらに図 8 (a) にこれらの Ka 帯および Q 帯の降雨減衰推定値の累積時間率分布をまとめて示す。また図 8 (b) に、0.01~1.0% の累積時間率に対するこれらの降雨減衰等確率値を示す。

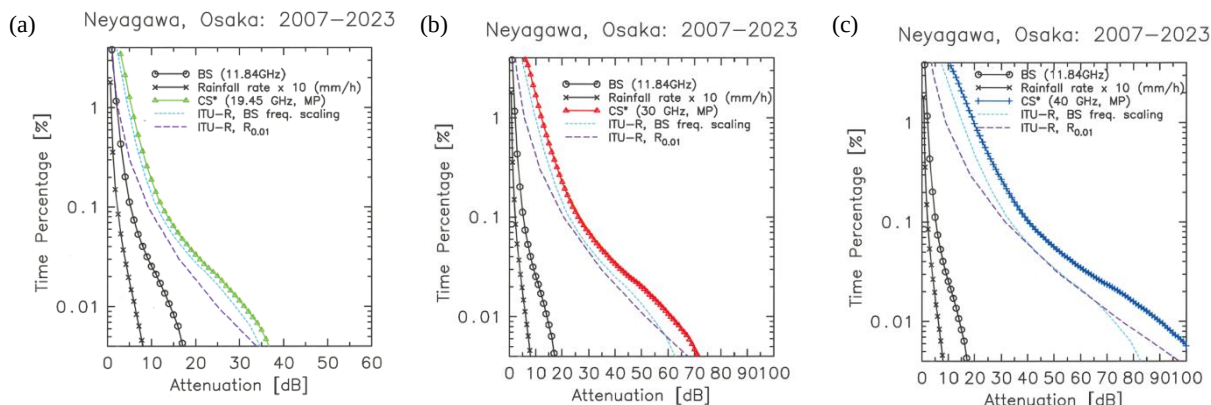


図 7 2007 年から 2023 年までに測定された BS の降雨減衰と降雨強度、および BS 減衰量から MP 法による周波数スケーリングで推定した (a) 19.45 GHz、(b) 30 GHz、および (c) 40 GHz の減衰量。

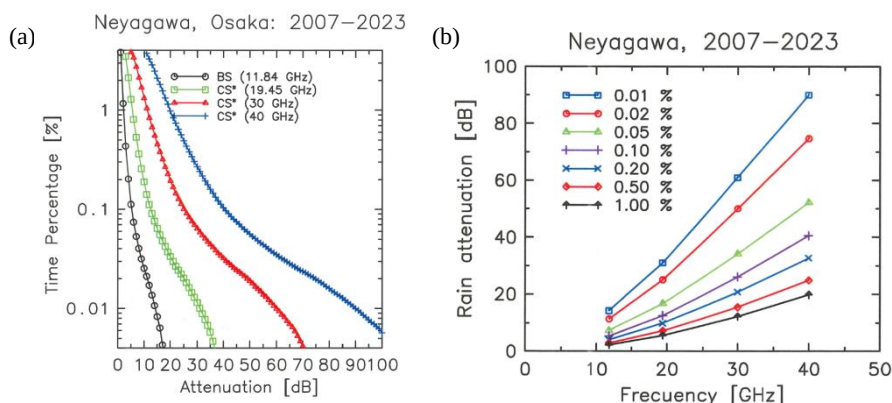


図 8 (a) 2007 年から 2023 年までに測定された BS の降雨減衰と Ka 帯および Q 帯の推定値と、(b) 0.01~1.0% の時間率にたいする降雨減衰等時間率値。

図 7 より、Ka 帯および Q 帯いずれの周波数においても降雨減衰の推定値の長期統計は ITU-R 勧告による BS 降雨減衰からの周波数スケーリング (青色の点線) より少し大きいことが分る。一方、Ka 帯および Q 帯の降

雨減衰推定値は、いずれも降雨強度を用いた ITU-R 勧告による推定値(紫色の点線)よりもかなり大きいことが示される。これは、2007 年以降温暖化等の影響により BS の降雨減衰値は ITU-R 勧告による予測値よりも 1.5 倍程度まで増加していることに関係すると言える [5]。

さらに図 9 (a) は、時間率 0.01%、0.05%、および 0.2% について、各周波数帯の降雨減衰等時間率値を 2007 年以後(実線)と 2006 年以前(点線)で比較したものであり、(b) はその各周波数帯の比率を時間率 0.01~0.2%の間で平均した結果である。時間率 0.5%以上では、Ku 帯 (11.84GHz) などの減衰が小さい周波数帯で降雨減衰以外の要因が混入するので、平均から除去してある。

図 9 より降雨減衰値は 2007 年以降度の周波数帯でも一律に増加しており、その比率はほぼ 1.5 倍に近いことが分る。また、30 GHz や 40 GHz ではやや比率が 1.4 程度まで減少するが、周波数スケールリングで用いている MP 型の粒径分布に対する減衰係数 α の降雨強度 R に対する特性に関係があると考えられる。即ち、表 1 と表 2 に示されるように $\alpha = \alpha R^b$ の b の項が周波数の増加に従って減少し 40 GHz では 1.0 以下になる。このため図 9 (b) において降雨減衰増加の比率が周波数とともにわずかに減少する原因になっていると考えられる。また、図 9 (a) でも時間率の減少とともに同様の傾向が見られる。

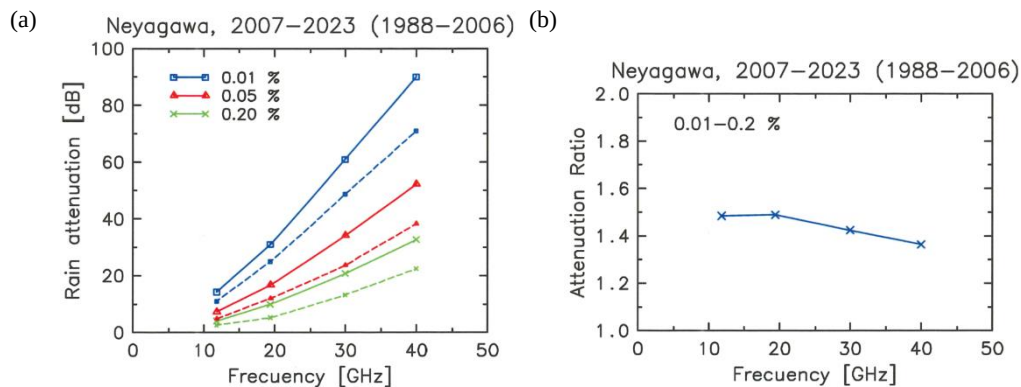


図 9 (a) 時間率 0.01%、0.05%に対する降雨減衰等時間率値の 2007 年以後(実線)と 2006 年以前(点線)での比率を (b) 時間率 0.01~0.2%の間で平均した結果。

4. おわりに

大阪電気通信大学(寝屋川市)で 1986 年から長年にわたって測定された Ku 帯 BS 放送電波 (11.84 GHz) と CS ビーコン波 (19.45 GHz) 用いて、さらに周波数の高い 30 GHz や 40 GHz で発生する降雨減衰量にの推定法について検討した。最近の温暖化に伴い、40 GHz では時間率 0.01%に対して 100 dBに近い減衰量が予測されるが、将来の NTN では静止衛星のみならず、低軌道衛星や HAPS 等の地上回線の基地局に準じた 10 km から数 100 km 程度の伝搬路での使用も予想され、十分実用化に向けて考慮すべきであると言える。

参考文献

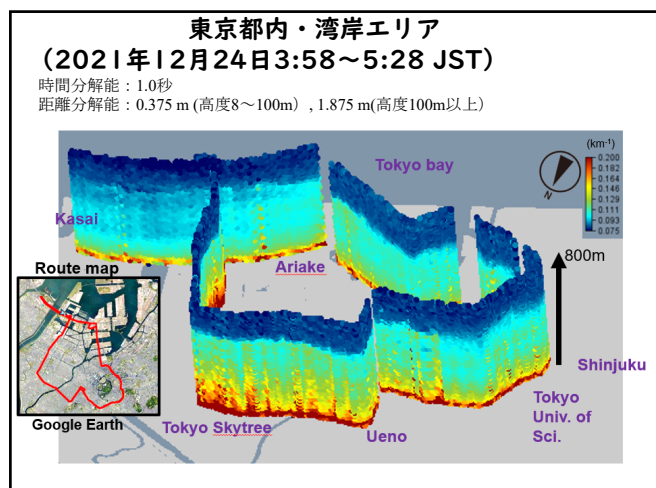
- [1] 山下史洋, “IOWN 宇宙センシング/宇宙 RAN の研究開発”, 信学技報, SAT2021-29, 2021
- [2] Y. Karasawa and Y. Maekawa, “Ka-band earth-space propagation research in Japan,” Proc. IEEE, vol.85, no.6, pp.821-841, June 1997.
- [3] “Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems,” Geneva, ITU-R Recommendation P618-8, 2005.
- [4] 飯田尚志, “衛星通信,” オーム社, 1997.
- [5] 前川泰之、柴垣佳明, “衛星回線における近年の降雨減衰時間率の増加について”, 第 16 回 MU レーダー・赤道レーダーシンポジウム、京都大学生存圏研究所、2021 年 9 月。



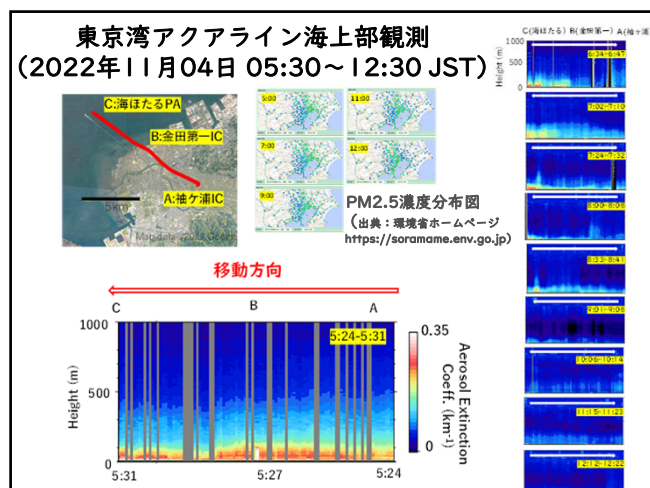
1



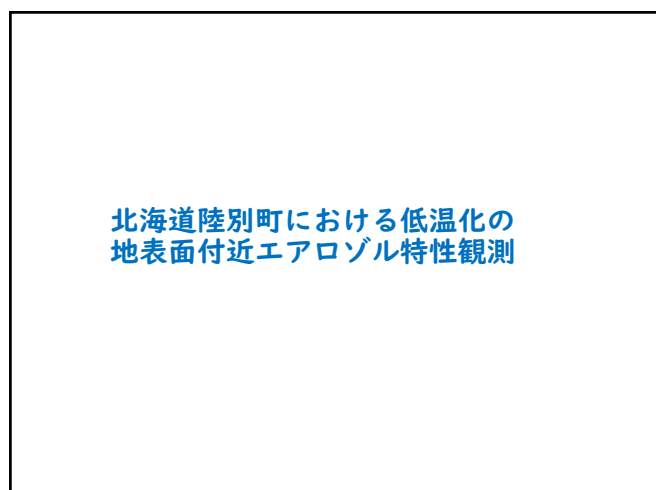
2



3



4



5

北海道陸別町における気象観測

降雪量観測の精度向上と
極域の水循環の観測への応用

Rikubetsu snow experiment site

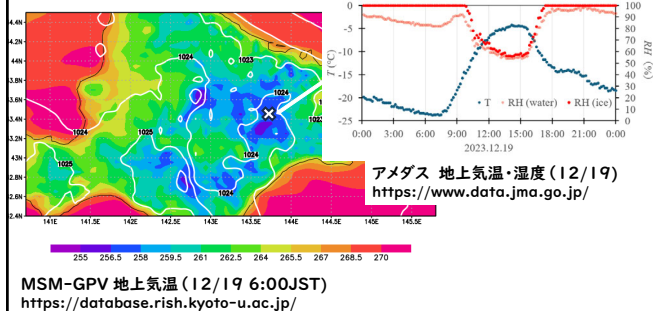
北海道・陸別町における雪の観測実験
極域の水循環の観測手法の構築
WMO/SPICEに参加
気象庁、防災科学研究所との共同研究
WMO/SPICE Final Report (2018)
Hirasawa et al. (2018), SPICE site report: Rikubetsu, Japan.

極域における降雪観測の取り組み
南極の水循環の研究
Ceilometerの適用 (左の図)
Disdrometerの適用
降水レーダーの適用
<http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/spice/>

北海道陸別町では、国立極地研究所を中心とした
グループが降雪観測サイトを展開

6

北海道陸別町の気温分布 (車載ライダー観測日 2023年12月19日)



7

北海道陸別町の接地逆転層観測 (佐々木ら, 2012)

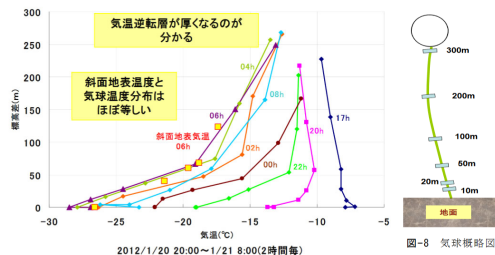


図-9 高度と気温の関係(気球観測)

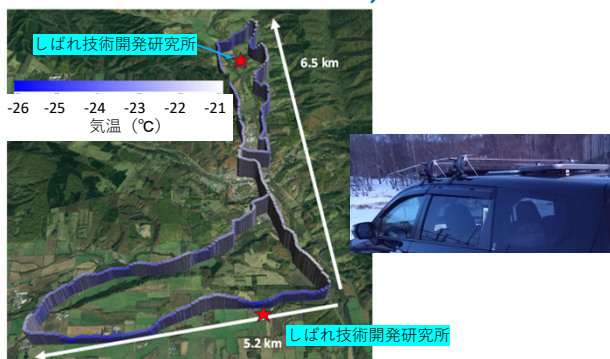
佐々木孝, 高橋修平, 白川龍生, Nuerasimuguli ALIMASI, 日下稜, 平沢尚彦, 北海道の雪氷, 31, 25-28, 2012.

本研究:ダイヤモンドダスト形成等に影響する寒冷地の接地逆転層内のエアロゾル分布を車載ライダーで計測した

陸別地域は逆転層の厚さが300m以上ある

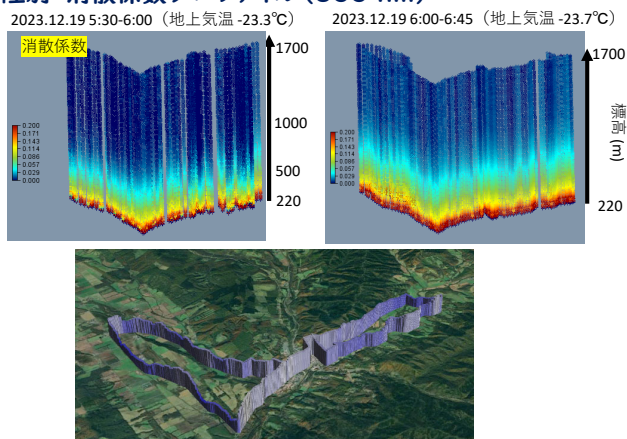
8

車載ライダーのルーフキャリア (地上高1.6m) に取付けた気温計の移動観測 (2024.12.19 6:14-6:44)



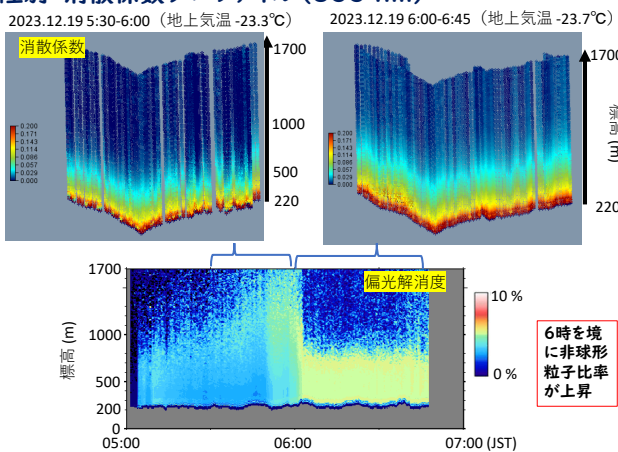
9

陸別-消散係数プロファイル (355 nm)



10

陸別-消散係数プロファイル (355 nm)



11

まとめ①

2023年12月19日早朝に実施した車載ライダー観測から示唆された北海道陸別町の接地境界層付近のエアロゾル特性

地表面気温が低下するほど接地境界層内のエアロゾル消散係数偏光解消度が増加した。
低温・高湿度下の吸湿や相変化の影響が考えられる。

謝辞

北海道陸別町における観測では、陸別町しばれ技術開発研究所 (佐藤秀昭所長)、およびハマダ旅館の皆様にご支援いただきました

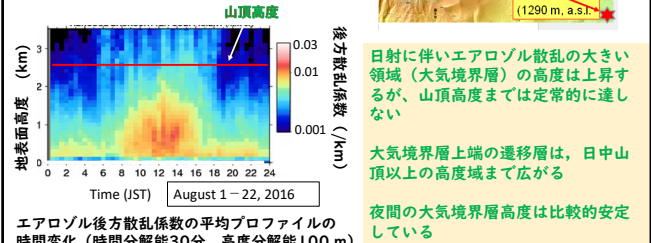
12

富士山における車載ライダー周回観測

13

太郎坊基地におけるエアロゾル鉛直分布の日変化

直接観測が行われてきた山頂（標高3776 m）と太郎坊（1290 m）間のエアロゾル高度分布の把握を目的として、2013～2019年の夏季に太郎坊にてライダー観測を行った

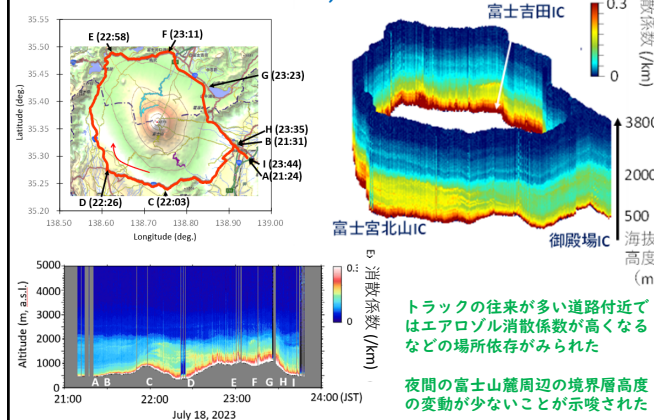


エアロゾル後方散乱係数の平均プロファイルの時間変化（時間分解能30分、高度分解能100 m）

富士山の存在が境界層高度に影響する水平距離の範囲を車載ライダーによる移動観測から調べた

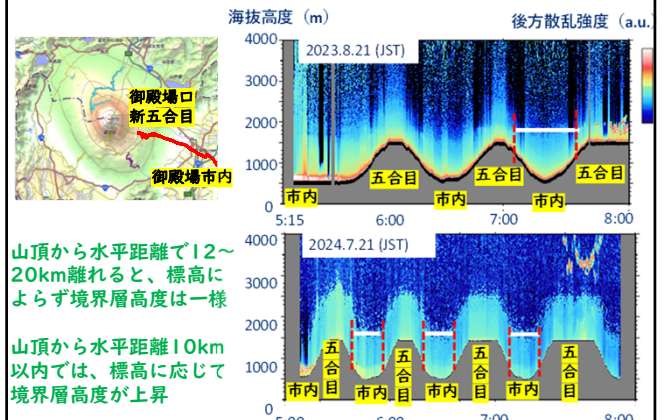
14

富士山周回 エアロゾル鉛直分布観測 (2023.7.18 21:30-23:30)



15

太郎坊～御殿場往復 エアロゾル鉛直分布観測



16

まとめ①

2023年7月18日、8月21日および2024年7月20-21日に実施した車載ライダー観測から示唆された富士山麓周辺の大気境界層高度の特徴

- 富士山頂から水平距離で12～20 km以上離れると境界層高度は海拔高度に対して一様
- 富士山頂から水平距離で10km以内では、境界層高度が上昇

謝辞

富士山太郎坊での観測は 認定NPO法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行われました。本研究の一部は、JSPS科研費26709042, 19H04238, 20K21844, 22H03732および京大生生存圏研究所ミッション研究5-1の助成を受けました。

17

1.3GHz帯大気レーダーを用いたMIMO(Multiple-Input Multiple-Output)レーダーの開発

橋口 浩之・石井 佑奈・西村 耕司

京都大学 生存圏研究所

第18回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 2024年9月27日

0

背景と目的

- 大気レーダーではMULレーダーなどフェーズドアレイアンテナによるシステムが一般的
- 気象レーダーでのフェーズドアレイを用いたシステムは未だ研究段階
- MIMOレーダー技術により少ない素子数で仮想的に大開口が得られる

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) レーダー

アレイアンテナを用いて、直交性のある信号を異なる送信アンテナから同時送信し、受信信号処理により角度分解能を向上する技術

リニアアレイのSIMO運用

MIMO仮想アレイ

1

背景と目的

1.3GHz帯大気レーダーLQ-7は、MU レーダーのような大型大気レーダーでは観測できない下層大気(大気境界層)を観測可能

MULレーダー
大型のフェーズドアレイ大気レーダー (46.5MHz)
中層・超高層大気構造の観測

LQ-7
7つの誘電体レンズアンテナ (1.3GHz)
大気境界層を含む下層大気の観測

T. Matsuda and H. Hashiguchi, DDMA-MIMO observations with the MU radar: Validation by measuring a beam broadening effect, IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens., 16, 3083-3091, 2023.

目的: LQ-7レーダーを用いたMIMO技術による分解能の向上の検証

2

手法

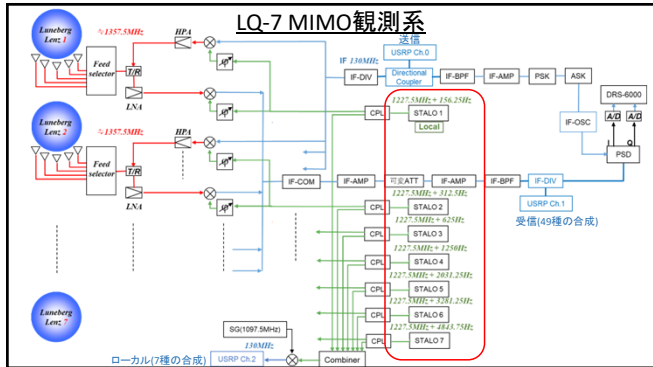
- DDMA(Doppler Division Multiple Access)-MIMO方式を使った信号処理
 - ✓ 複数アンテナから(ローカル)周波数をずらして送信
 - ✓ 受信時にドップラー周波数領域で分離し、位相を揃えて合成

MIMO処理のイメージ

- ソフトウェア無線機(USRP)を用いた多チャンネルデジタル受信システムの構築

ソフトウェア無線機 (USRP X300)

3



4

ローカル周波数設定

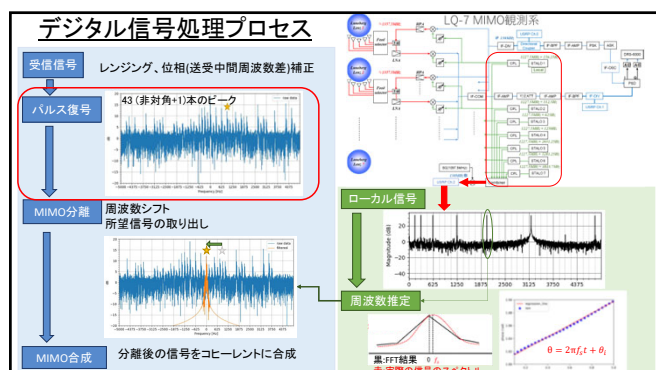
- 7つのローカル周波数を[1 2 4 8 13 21 31] Δf だけずらす。
→それぞれの送受周波数差は

	RX1 (1)	RX2 (2)	RX3 (4)	RX4 (8)	RX5 (13)	RX6 (21)	RX7 (31)
TX1 (1)	0	1	3	7	12	20	30
TX2 (2)	-1	0	2	6	11	19	29
TX3 (4)	-3	-2	0	4	9	17	27
TX4 (8)	-7	-6	-4	0	5	13	23
TX5 (13)	-12	-11	-9	-5	0	8	18
TX6 (21)	-20	-19	-17	-13	-8	0	10
TX7 (31)	-30	-29	-27	-23	-18	-10	0

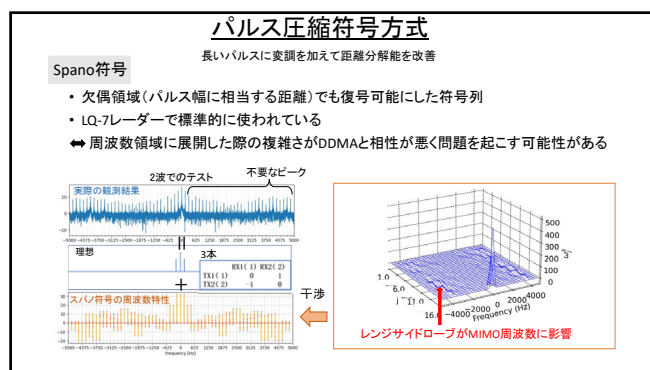
対角項以外のすべての周波数差(43種)がユニークとなり、1ch受信で信号分離可能

- 最大周波数はナイquist周波数 (IPP=100 usの場合 $\pm 5\text{kHz}$) を超えないように Δf を設定
- 間隔が狭すぎると隣の信号と干渉し、信号分離が困難に

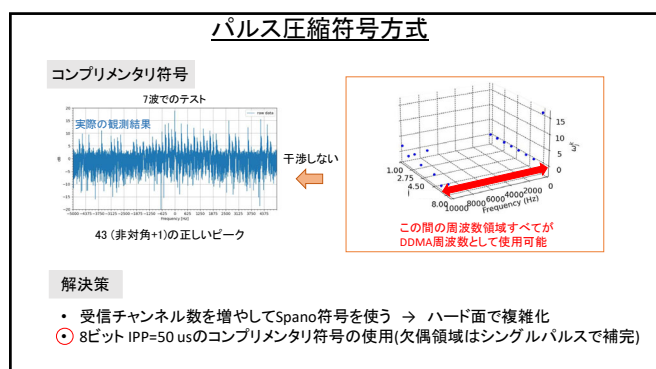
5



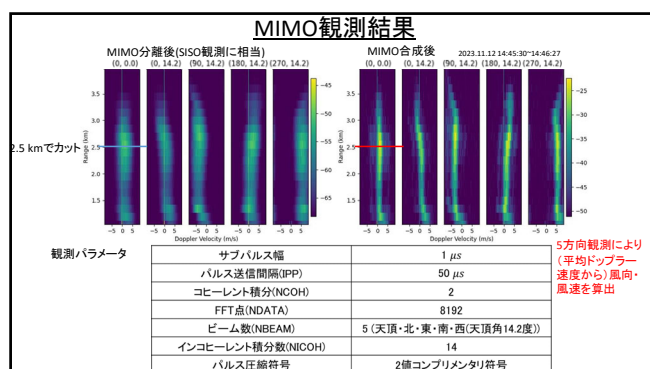
6



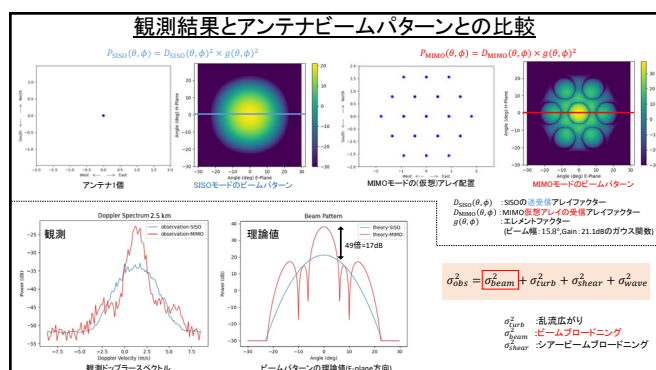
7



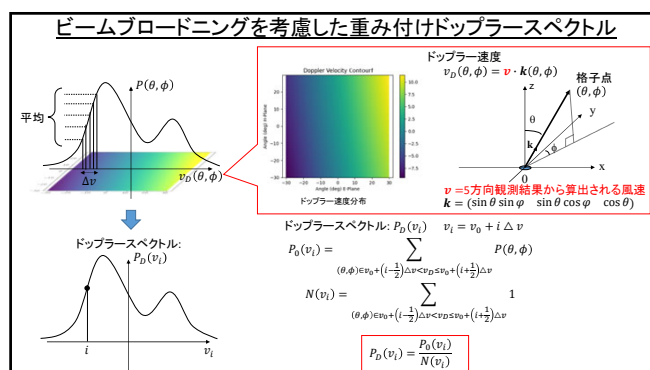
8



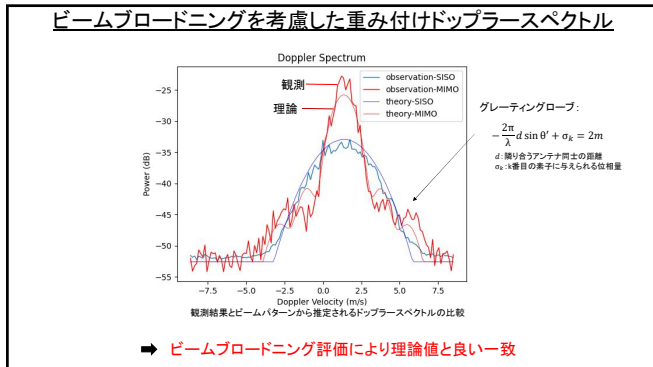
9



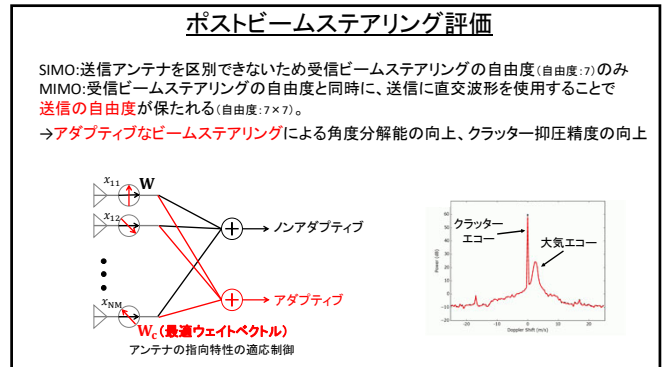
10



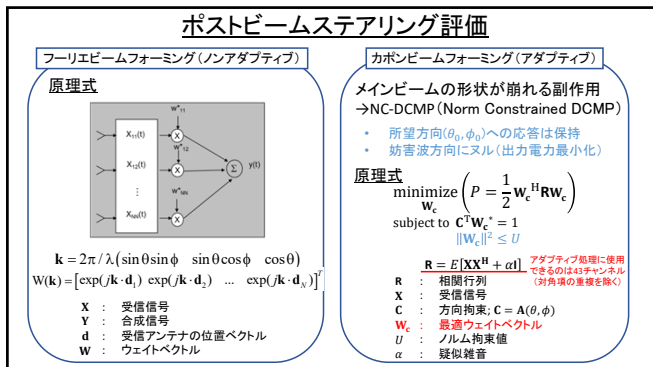
11



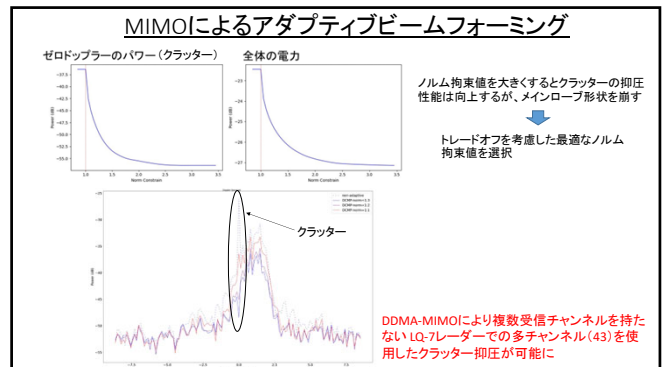
12



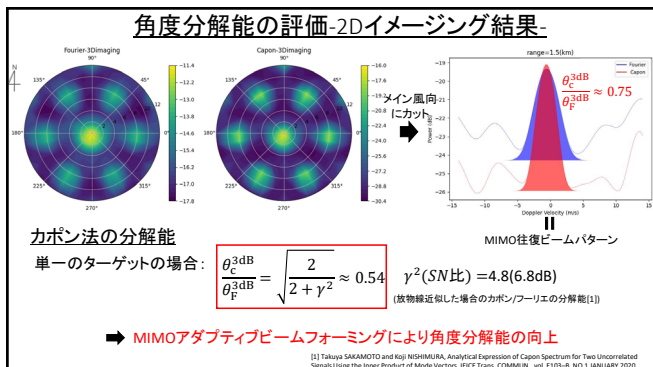
13



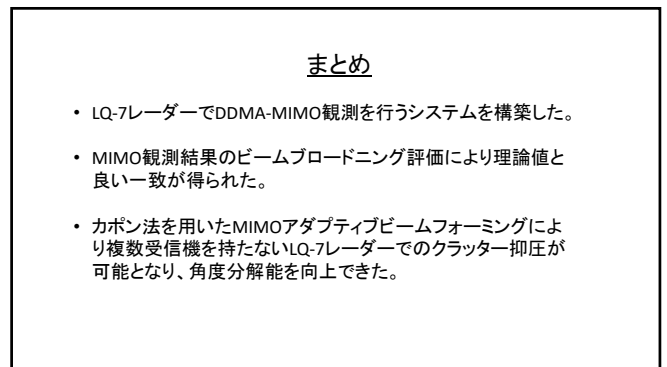
14



15



16



17