

第 551 回 生 存 圏 シ ン ポ ジ ウ ム

第 19 回
MUレーダー・赤道大気レーダー
シンポジウム

2025年9月8日・9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。昨年は 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 日におうばくプラザと Zoom によりハイブリッド開催された。国際シンポジウムには 11 カ国から計 120 名（国外 60 名、国内 60 名）の参加があり、61 件の口頭発表と 10 件のポスター発表が行われた。

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 8 日・9 日に、第 19 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 21 件の研究発表が行われた。

2025 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)	
Ku 帯衛星回線における最近の降雨減衰の増加傾向について	5
前川泰之・柴垣佳明(大阪電通大)	
MU レーダーを用いた降水観測実験:これまでの成果と今後の計画	10
重尚一(京大理)	
MU レーダー観測による急発達積雲対流の内部構造とその環境場の特徴	12
柴垣佳明(大阪電通大)・橋口浩之・Hubert Luce(京大 RISH)・山中大学(地球研)	
DDMA/CDMA-MIMO 方式を用いた MU レーダーによる観測実験	15
松田知也(三菱電機)・西村耕司・橋口浩之(京大 RISH)	
ラジオゾンデによる乱流エネルギー散逸率推定手法の検証	20
高麗正史・佐藤薫(東大院理)・堤雅基(極地研・総研大)・西村耕司(京大 RISH)	
商用航空交通管制のための二次監視レーダ技術を応用した気象観測システム(atc2met)の開発と、MU レーダーとの比較による精度評価	23
橋本大志(国立極地研)・森修一(JAMSTEC)・虫明一彦(いろはプロジェクト)	
赤道対流圏・成層圏のミーライダー長期観測	25
柴田泰邦・阿保真・長澤親生(都立大)	
EAR とラジオゾンデのデータを使つての仮想の成層圏タワー形状を通過する大気の各高度での運動エネルギーの計算	29
島崎丈太(日大理工)	
STARLINK 衛星の公開軌道情報を使った熱圏大気密度推定	32
山本衛・惣宇利卓弥・古川颯太(京大 RISH)	
Shear-induced Turbulence in the Tropical Tropopause Layer: Coordinated Observations Using the Equatorial Atmosphere Radar, balloon-borne turbulence and cloud particle instruments at Kototabang, Indonesia	33
Listi R Triani (PRIMA, BRIN)・Hubert Luce (RISH, Kyoto Univ.)・Noersomadi (PRIMA, BRIN)・Abhiram Doddi・Dale Lawrence (Univ. Colorado)・Masatomo Fujiwara (Hokkaido Univ.)・Tiin Sinatra・Asif Awaludin・Moch Syarif Romadhon (PRIMA, BRIN)・Hiroyuki Hashiguchi (RISH, Kyoto Univ.)・Ridho Pratama・Fahmi Rahmatia (BRIN)	
Coordinated observation of turbulence echo in the tropical troposphere with hourly radiosondes and the equatorial atmosphere radar (EAR)	36
Tiin Sinatra・Noersomadi・Asif Awaludin・Halimurrahman・Nani Cholianawati・Anis Purwaningsih (PRIMA, BRIN)・Hubert Luce・Hiroyuki Hashiguchi (RISH, Kyoto Univ.)・Toshitaka Tsuda (Kyoto Univ.)	

Analysis of the MJO impact on the aspect sensitivity in the UTLS observed by Equatorial Atmosphere Radar	39
Noersomadi (PRIMA, BRIN)・Hubert Luce (RISH, Kyoto Univ.)・Tiin Sinatra (PRIMA, BRIN)・Hiroyuki Hashiguchi (RISH, Kyoto Univ.)・Nurjanna Joko Trilaksono (ITB)	
Humidity Profiling by Wind Profiler with Radio Acoustic Sounding System using Machine Learning	42
Asif Awaludin・Noersomadi (PRIMA, BRIN)・Toshitaka Tsuda・Hiroyuki Hashiguchi (RISH, Kyoto Univ.)・Nani Cholianawati・Halimurrahman・Tiin Sinatra・Anis Purwaningsih (PRIMA, BRIN)	
Equatorial Plasma Bubble Detected By L-Band Synthetic Aperture Radar And GPS-TEC Observations In Indonesian Region	44
Ihsan Naufal Muafiry (BRIN)	
機械学習を利用したスプレッド F の検出とその応用	47
春名健太郎・劉鵬・横山竜宏(京大 RISH)	
改良電離圏トモグラフィーを用いた磁気嵐時の電離圏擾乱の 3 次元構造の研究	50
斎藤享(電子航法研)・野崎太成・山本衛(京大 RISH)	
Post-sunrise ionospheric irregularities in Southeast Asia during the geomagnetic storm on April 19-20, 2024	52
Prayitno Abadi・Ihsan N. Muafiry・Teguh N. Pratama・Angga Y. Putra・Agri Faturahman・Noersomadi・Edy Maryadi (PRIMA, BRIN)・Febrylian F. Chabibi (GIA)・Umar A. Ahmad (Telkom Univ.)・Guozhu Li・Wenjie Sun・Haiyong Xie (IGG)・Yuichi Otsuka (ISEE, Nagoya Univ.)・Septi Perwitasari (NICT)・Punyawati Jamjareegulagran (KMITL)	
Three-Dimensional Ionospheric Response over Japan to the May 2024 Super Geomagnetic Storm	55
Weizheng Fu・Yuichi Otsuka (ISEE, Nagoya Univ.)・Nicholas Ssessanga (Univ. of Oslo)・Tatsuhiko Yokoyama・Mamoru Yamamoto (RISH, Kyoto Univ.)	
機械学習モデルを用いた信楽イオノゾンド観測の長期統計解析	58
寺内充・劉鵬・横山竜宏(京大 RISH)	
電離圏短波エコーの飛行時間とその変化率との信楽アイオノゾンド電波を用いた計測経過	62
岩本貴司・小西麻央・佐藤杏輔(三菱電機 先端総研)	

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た。本シンポジウムでは、61 件の口頭発

表及び10件のポスター発表が行われた。参加者は11ヵ国から計120名(国外60名、国内60名)であり、参加機関は計40(国外25、国内15)であった。宇治おうばくプラザとZoomによるハイブリッド開催としたが、現地参加者数は半数以上の68名(国内41名、国外27名)であった。11月18日に開催された記念式典には100名以上の列席の下、時任宣博京都大学副学長、塩川和夫太陽地球系物理学・科学委員会(SCOSTEP)会長・地球電磁気・地球惑星圏学会長、中川勝広情報通信研究機構電磁波研究所長、堤雅基国立極地研究所副所長から祝辞が述べられた。またMUレーダーの運用に尽力された三菱電機株式会社と滋賀県甲賀市に感謝状が贈呈された。



MUレーダー40周年記念国際シンポジウム参加者による集合写真

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110m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100kW、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。当初、南北ビーム方向の設定に問題があり、電離圏FAIエコーが取得できていなかったが、2025年4月21日に問題が解決し、それ以降は対流圏・下部成層圏モードと電離圏FAIモードによる切替観測が継続されている。

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。2024 年度には、キャンペーン(長期間)観測課題として、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。

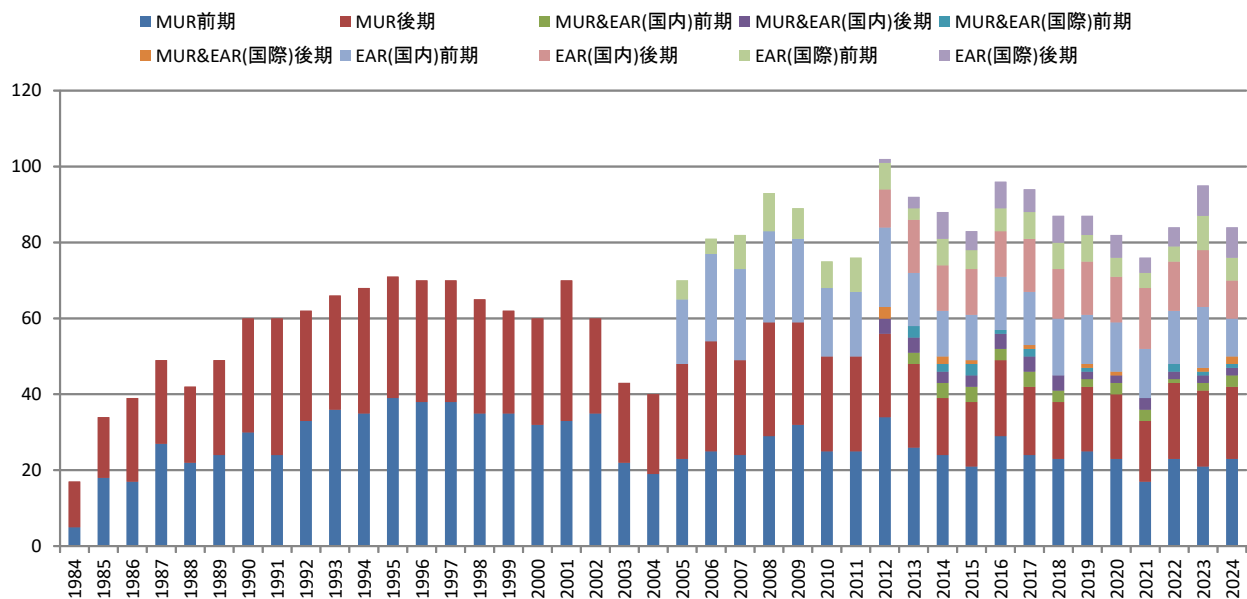


図 1. MU レーダー・赤道大気レーダー共同利用の課題件数の年次推移

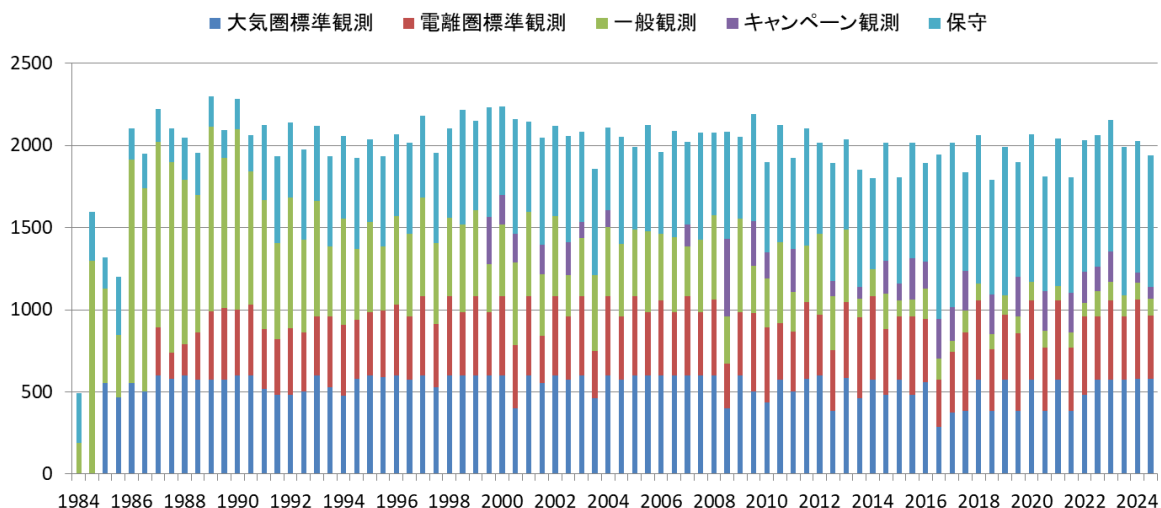


図 2. MU レーダー共同利用の観測時間の半年毎の推移。

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。

Ku 帯衛星回線における最近の降雨減衰の増加傾向について

前川泰之・柴垣佳明（大阪電気通信大学）

1. はじめに

近年衛星通信や衛星放送に対して、Ku 帯(14/12GHz)や Ka 帯(30/20GHz)等の高い周波数の利用が進んでおり、そのためにはこれらの周波数帯で大きくなる降雨減衰の発生時間率を正しく評価する必要がある[1]、[2]。降雨減衰予測に対しては、降雨強度累積時間率 0.01%値から求める方法が ITU-R 勧告等で通常用いられるが[3]、衛星回線では地上の降雨強度に加えて、上空の降雨高度の変化に伴う雨域等価通路長の変動に注意する必要がある。

大阪電気通信大学では、1986 年から 2006 年にかけて Ka 帯通信衛星電波(19.45 GHz、右旋偏波、仰角 49.5°:以下 CS と称す)の観測を行い、さらに 1988 年から現在に至るまで Ku 帯放送衛星電波(11.84 GHz、右旋偏波、仰角 41.3°:以下 BS と称す)の観測を行っている。Ku 帯 BS 電波に関しては、降雨減衰を過去 36 年間(1988－2023)にわたって 1 分降雨強度とともに連続的に長期間測定を行った。そして、これらのデータに長期にわたって見られる雨域等価通路長の統計的な変動について研究を行ってきた[4]。前回の報告では、2006 年以後に顕著に見られる雨域等価通路長の増加について着目し、降雨減衰の年間時間率の変動を引き起こす気象学的要因について考察を行った[5]。今回、年間時間率の変動について近年問題にされている梅雨期の降水量の増加に関連してさらに詳しく検討を行ったので報告する。

2. 2006 年前後の降雨減衰特性

衛星電波の降雨減衰特性を測定した 1986 年以降、2006 年までの約 20 年間にわたる長期統計については、Ka 帯 CS 電波(19.45GHz)と Ku 帯 BS 電波(11.84GHz)のいずれも ITU-R 勧告による時間率 0.01%の降雨強度を用いた予測値によく一致することが示されている[6]。また降雨減衰統計の年変動については、いずれの周波数帯も雨域等価通路長の年平均値は、降雨時の地上気温と相関を示すが、地上気温から予測される降雨高度よりも大きな変動があり、むしろ各年の台風や夕立等の熱帯性対流性降雨の発生率により決定されることが示されている[6]。またこの発生率は日本近海の海面温度とも関連性があり、太平洋熱帯域のエルニーニョ・ラニーニャ現象等の地球規模の気候変動とも関連していることが示唆されている。

一方、2006 年以後は図 1 に示すように(a)年間降水量が少し増加傾向にあり、(b)降雨強度の年間発生時間率 0.1、0.03、および 0.01%の値も増加傾向にあることが分かる。さらに(c)降雨減衰の同じ年間時間率の値も同様に増加傾向にあり、特に値の大きい 0.01%値ではその傾向が著しいことが分かる。この降雨強度と降雨減衰の 0.01%に対する増加率の差異は、これらの 0.01%を基準にして計算される ITU-R 予測値に大きな影響を及ぼすと言える。

図 2 は BS 電波の降雨減衰長期統計を 2006 年の前後で ITU-R 予測値と比較したものであり、(a)1988－2006 年と(b)2007－2019 年に分けて示してある。図 2 より、2006 年以前では測定値は降雨強度(×印)による ITU-R 予測値(細い点線)と良い一致を示すが、2006 年以後では両者は大きな差異を示すことが分かり、等価通路長を約 1.5 倍とした場合の ITU-R 予測値は測定値とよく一致することが示されている。また 2006 年以降にこれらの係数が増加することは、降雨事象毎の等価通路長と降雨減衰継時間がその分平均として増加することから証明されている[7]。また、2006 年以後の等価通路長の 1.5 倍程度の増加に関しては、近隣の RISH(宇治市)および MU レーダー(甲賀市)、または守口市と四條畷市における 2002 年ないし 2005 年以降の BS 電波測定においても確かめられている。

図 3 は 1988 年から 2019 年に 32 年間にわたって大阪電気通信大学(寝屋川市)測定された各年の(a)BS

電波降雨減衰の等価通路長、(b)降雨時地上気温(5~10月)、(c)台風・夕立等の熱帯性対流性降雨の発生率、および(d)日本近海の海面温度の偏差(実線)とインド洋ダイポールモード指数(点線)を比較したものである[8]、[9]。図3(a)と(b)より、等価通路長と地上気温は2006年以降に段階的な顕著な増加を示すことが分かり、この年を境に周囲の気象状況等が大きく変化したことが示唆される。また、前述の様に2006年までは(a)等価通路長は(b)地上気温、(c)対流性降雨発生率、および(d)日本近海の海面温度と良い相関を示し、エルニーニョ・ラニーニャ現象とも対応が見られるが、2006年以降はこれらの間の関係性があまり明白でなくなり、これらの他になんらかの要因が新たに等価通路長の年変動に加わっていると思われる。その一つの可能性として、図3(d)に点線で示したように、インド洋西部の海面温度上昇にともなうインド洋ダイポールモード指数の増加による正のモードの出現が、2006年以降極めて頻繁に発生するようになったことが挙げられる。詳しいメカニズムはまだ不明な点が多いが、前述の2006年までの太平洋赤道域のエルニーニョ・ラニーニャ現象とともに、2006年以降は日本の気候変動への影響が増加している可能性がある。その結果、最近の衛星電波降雨減衰の等価通路長の増加による年間時間率増大等にも関係していると十分考えられる。

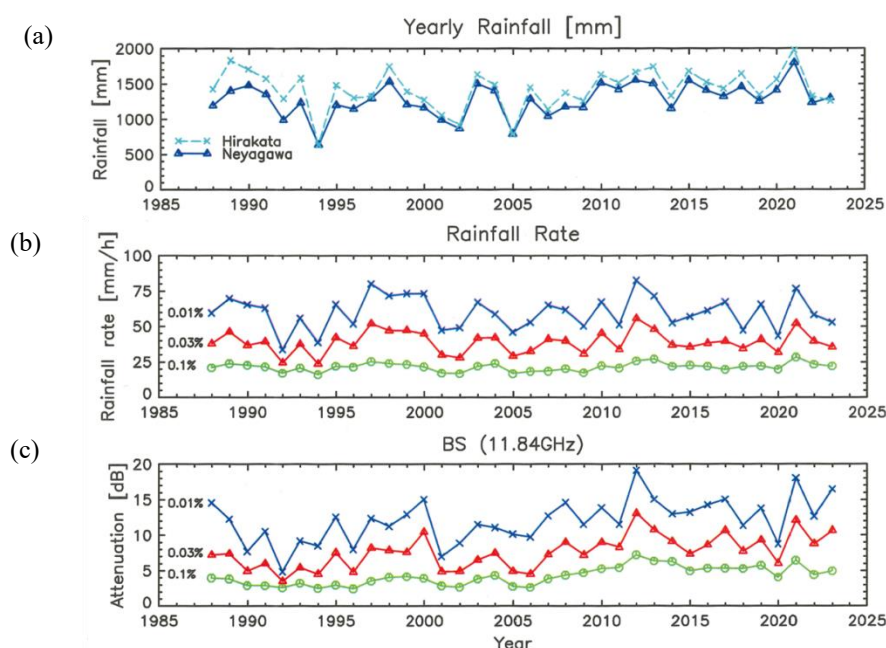


図1. 1988年から2019年の間に大阪電気通信大学(寝屋川市)で測定された(a)年間降水量、(b)降雨強度の年間時間率0.1, 0.03, および0.01%値、および(c)BS電波の降雨減衰の同時間率値。

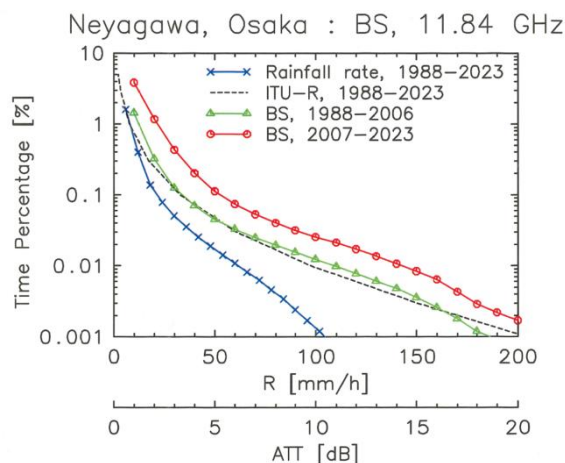


図2. 2006年前後の降雨減衰およびBS電波降雨減衰時間率の長期統計とITU-R予測値との比較

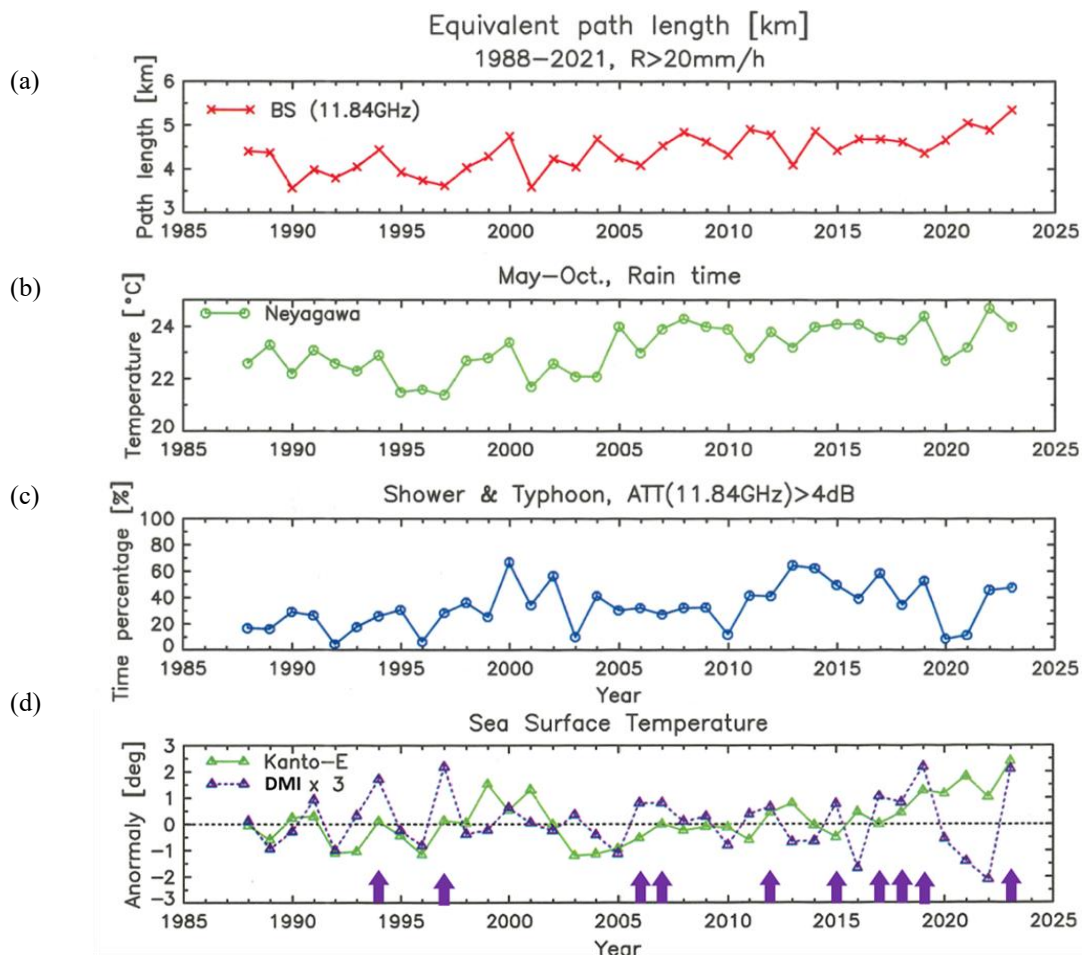


図3. 1988~2019年における (a)BS 電波降雨減衰の等価通路長、(b)降雨時地上気温(5~10月)、(c)対流性降雨発生率、および(d)日本近海の海面温度の偏差(実線)とインド洋ダイポールモード指数(点線)。矢印は正のダイポールモードが発生した年を示す。

3. 梅雨期の降水量と降雨減衰特性の増加

図4は気象庁発表による (a) 近畿地方の梅雨期降水量の平年比[10]と、(b) 枚方アメダスにより測定された6月と7月の降水量[11]を1986年から2023年にかけて示す。図4より、近年よく言われている様に梅雨期の降水量は、1995年にも多い年があるが、2007以降増加傾向にあることが確かめられる。

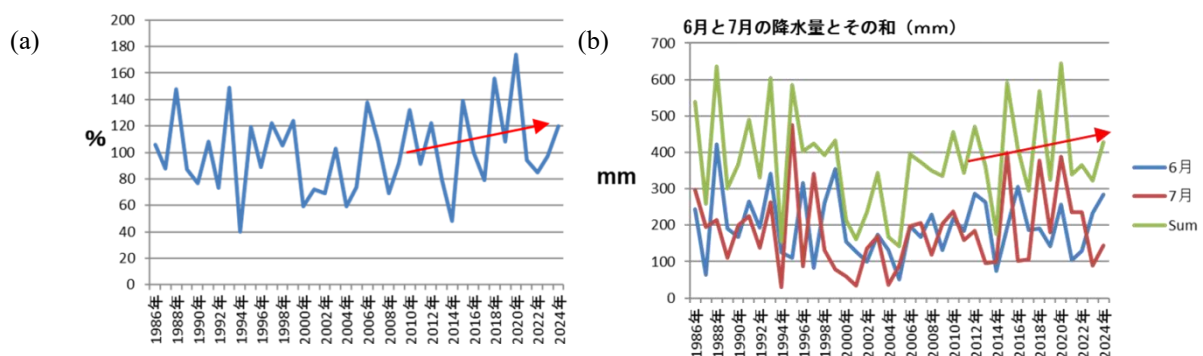


図4. 気象庁発表による (a) 近畿地方の梅雨期降水量の平年比[10]と、(b) 枚方アメダスにより測定された6月と7月の降水量[11].

一方、図5は本学で測定された BS 電波の降雨減衰の月間累積時間率分布について (a) 6 月から 7 月と (b) 8 月から 9 月について、1988-2006 年と 2007-2023 年の間でそれぞれ比較したものである。いずれの月間についても 2007 年以降に累積時間率分布の増加が見られるが、その増加量は梅雨期を含めた 6-7 月の方が著しく大きいことが分る。

また、図6は同様に本学で測定された BS 電波の降雨減衰の月間累積時間率分布について (a) 1988-2006 年と (b) 2007-2023 年について、6-7 月と 8-9 月の間でそれぞれ比較を行った場合である。図6より 2006 年以前は梅雨期を含む 6-7 月と夏季や秋雨期の 8-9 月では明らかな差があり、梅雨期の方が衛星電波に対する降雨の影響が小さいことが明確であるが、2007 年以降は両者の差が明確でなく、近年梅雨期の降水量が増加して台風等を伴う夏季や秋雨期の降雨と同等の影響を衛星伝搬路に与えていることが如実に示されていると言える。

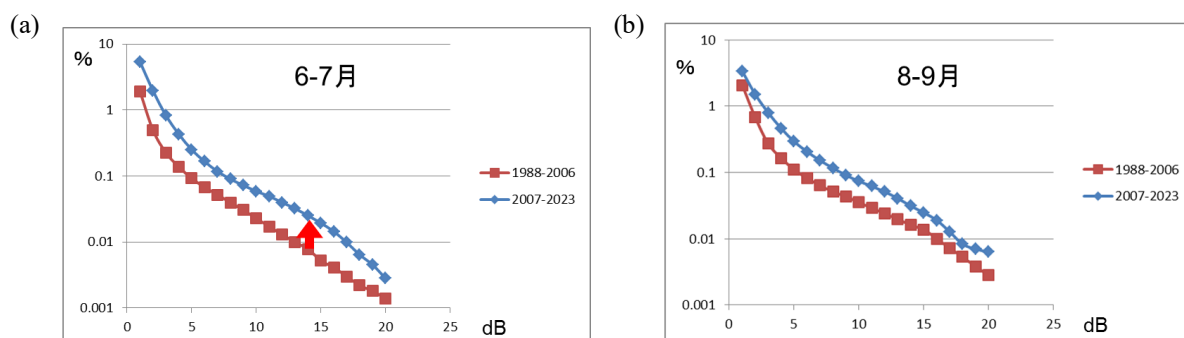


図5. (a) 6 月から 7 月と (b) 8 月から 9 月について、1988-2006 年と 2007-2023 年の間でそれぞれ測定された BS 電波の降雨減衰の月間累積時間率分布

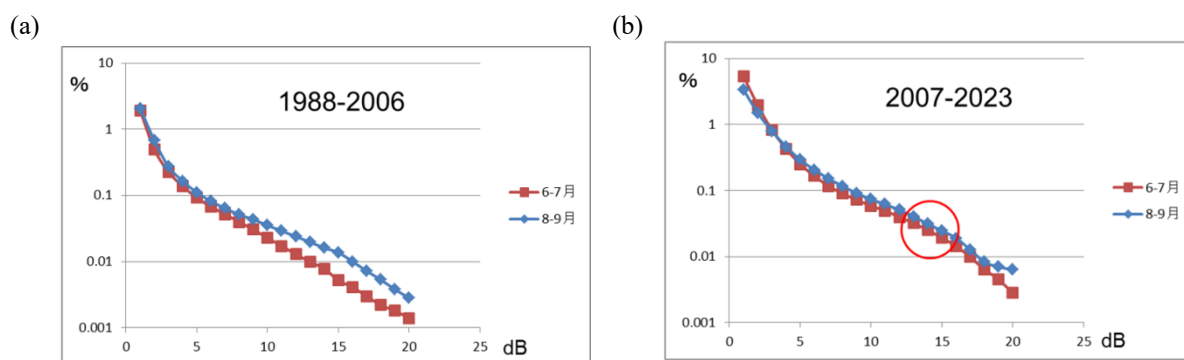
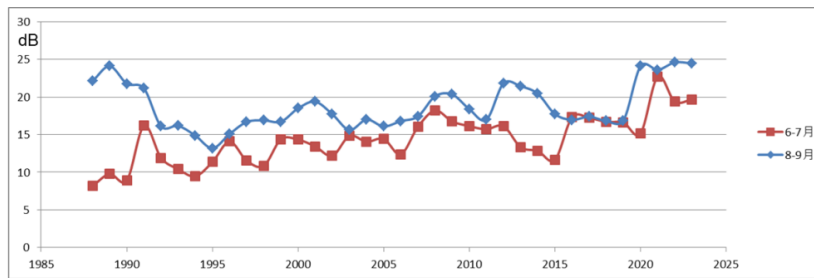


図6. (a) 1988-2006 年と (b) 2007-2023 年についてで、6-7 月と 8-9 月の間でそれぞれ測定された BS 電波の降雨減衰の月間累積時間率分布

ここで、図7は年間累積時間率 (a) 0.01%と (b) 0.03%の降雨減衰値を、それぞれ 6-7 月と 8-9 月の場合に、1986 年から 2023 年の間について示したものである。図7より、2006 年以前は 6-7 月と 8-9 月の間では年間累積時間率 0.01%と 0.03% のいずれの場合も降雨減衰値には明らかに差異があり、6-7 月では 8-9 月よりも値が小さいが、2007 年以降は両者とも増加が進み、一時 2012-2015 年辺りは少し差があるものの、最近の 2016 年からは両者の差がほとんどなくなることが示される。従って、梅雨期は 2,006 年以前とは異なり、特に 2016 年以降は 8-9 月と同様に大きな影響を降雨減衰統計に示す様になり、これが延いては ITU-R 予測値とも大きく異なることの一因になっている可能性がある。

(a)



(b)

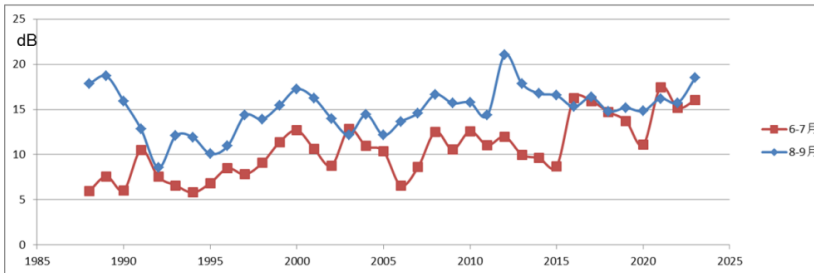


図7. 年間累積時間率 (a) 0.01%と (b) 0.03%のBS電波の降雨減衰値を、それぞれ6-7月と8-9月の場合に、1986年から2023年で示す

4. おわりに

1988年から2019年にかけて大阪電気通信大学(大阪府寝屋川市)において30年間以上にわたって測定されたKu帯放送衛星(BS)電波等の降雨減衰データを用いて、最近の降雨減衰統計の増加と雨域等価通路長の著しい増大等の要因についてその発生状況について述べた。その原因として、2006年までの太平洋赤道域のエルニーニョ・ラニーニャ現象とともに、インド洋インド洋ダイポールモード現象が関与している可能性を述べた。またこれに関連して、最近梅雨期の降水量が特に増大していることを示し、2007年以降の降雨減衰特性についても影響を及ぼしていることを本学における実測データに基づき議論した。

参考文献

- [1] Y. Karasawa and Y. Maekawa, "Ka-band earth-space propagation research in Japan," Proc. IEEE, vol.85, no.6, pp.821-841, June 1997.
- [2] S. Nakazawa, S. Tanaka, and K. Shogen, "A method to transform rainfall rate to rain attenuation and its application to 21 GHz band satellite," IEICE Trans. on Commun., vol.E91-B, no.6, pp.1806-1811, 2008.
- [3] "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," Geneva, ITU-R Recommendation P618-8, 2005.
- [4] Y. Maekawa, A study on long-term rain attenuation characteristics in Ka and Ku band satellite communications, Proc. of The 29th AIAA ICSSC-2011, ICSSC-17-1, Nara, Nov.-Dec. 2011.
- [5] 前川泰之、柴垣佳明, "星回線における降雨減衰量と雨域移動速度の関係", 第15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。
- [6] 前川泰之、招待論文:30年間の長期観測に基づく衛星通信伝搬路における降雨減衰特性の研究、電子情報通信学会論文誌 B、Vol.J103-B、No.11、pp.481-490、2020。
- [7] 前川泰之、Ku帯衛星通信回線における降雨減衰年間累積時間率分布と雨域等価通路長の関係、電子情報通信学会衛星通信研究会、SAT2021-17、オンライン開催、5月21日、2021年
- [8] https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/climate/glb_warm/ind_trend.html
- [9] https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/climate/iod/iod_data.html
- [10] https://www.data.jma.go.jp/cpd/baiu/kako_baiu07.html
- [11] <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>

MUレーダーを用いた降水観測実験： これまでの成果と今後の計画

重 尚一
京都大学大学院理学研究科

第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
第551回生存圏シンポジウム
2025年9月8日(月)～9日(火)

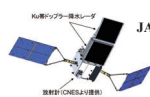
2025年度 基盤研究(A)(一般)

研究課題名：大型大気レーダーによる大気鉛直流観測を用いた対流性降水過程の解明
研究期間：令和7(2025)年度～令和11(2029)年度 【5年間】

年度	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029

2018年型豪雨も
ターゲット

Christopher-san's MU radar
visit on February 22, 2024



JAXA降水ドップラーレーダー
(2029年度～)

MUレーダーを用いた降水観測実験 (2023年1月～)

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウムでの発表

2022年度

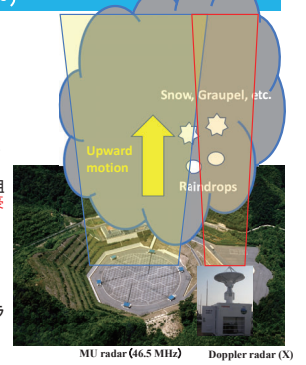
- 層状性降水雲中の固体降水粒子観測計画

2023年度

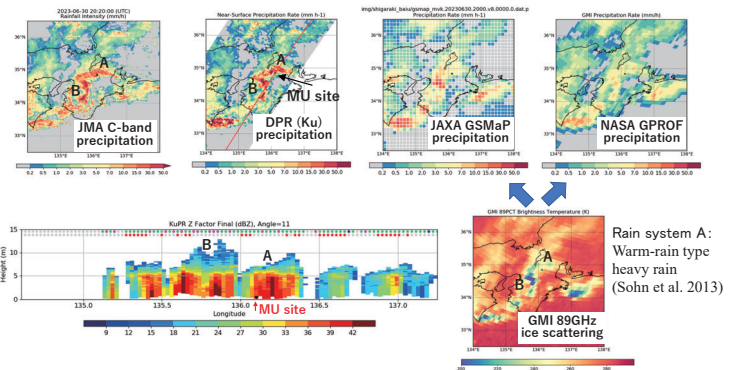
- 赤道大気レーダー / MUレーダーと下部対流圏レーダーを組み合わせた降水雲内の大気鉛直流の推定
- 大気と気象レーダーの鉛直方向ドップラー速度観測を組み合わせた降水過程の解析: GPM主衛星の梅雨期豪雨観測事例
- 信楽MU観測所で観測した2023年冬季降雪事例の解析

2024年度

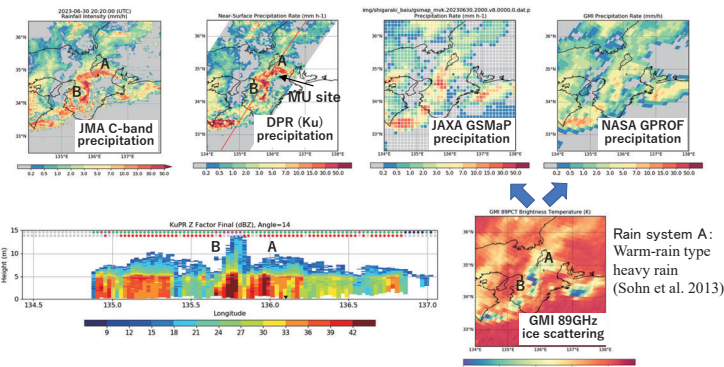
- 鉛直上向き気象レーダーと大気レーダーを用いたブライトバンド近傍における層状性降水成長過程の観測



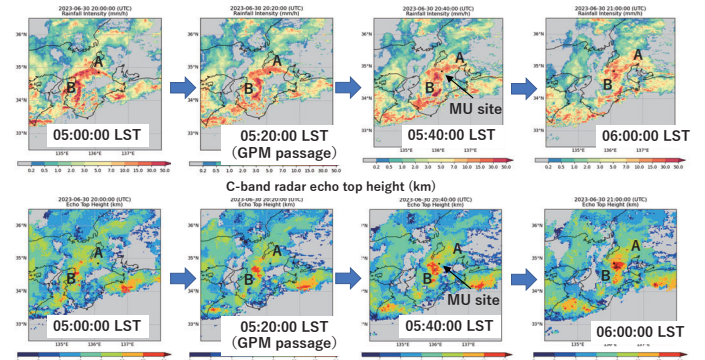
GPM/DPR observation on June 30 2023 at 201952 UTC 2023年7月1日(土) 午前5時20分JST



GPM/DPR observation on June 30 2023 at 201952 UTC 2023年7月1日(土) 午前5時20分JST



気象庁 C-band レーダー：降水強度 (mm/h) とエコー頂 (km) 【生存圏データベース】

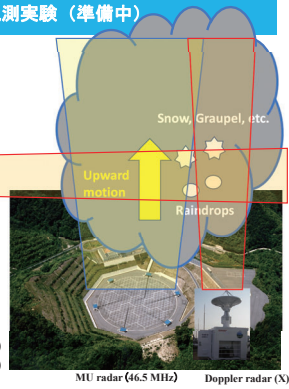


MUレーダーを用いた降水観測実験（準備中）

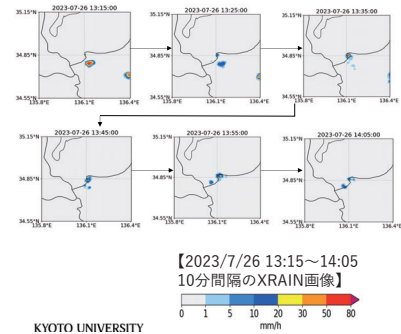


甲賀市役所屋上
11月後半頃に設置

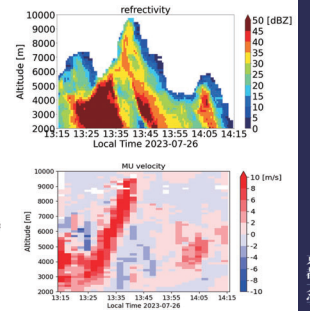
- ・ 偏波情報利用(固体降水粒子判別)
- ・ XRAINとの統合解析(3次元気流場)



孤立積乱雲事例（2023/7/26）



北方君卒論



MUレーダーを用いた降水観測実験 (2023年1月~)

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウムでの発表

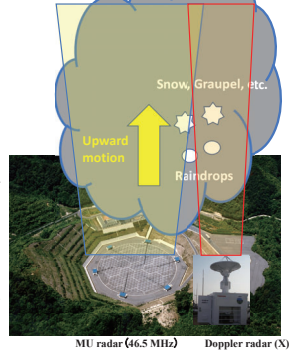
- 2022年度
- ・ 層状性降水雲中の固体降水粒子観測計画

2023年度

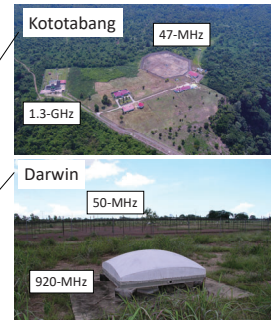
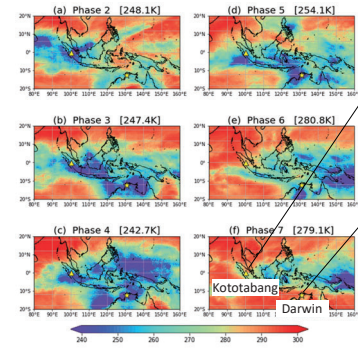
- ・ 赤道大気レーダー / MUレーダーと下部対流圏レーダーを組み合わせた降水雲内の大気鉛直流の推定
- ・ 大気と気象レーダーの鉛直方向ドップラー速度観測を組み合わせた降水過程の解析: GPM主衛星の梅雨期豪雨観測事例
- ・ 信楽MU観測所で観測した2023年冬季降雪事例の解析

2024年度

- ・ 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



Vertical air motions associated with the MJO observed at Kototabang & Darwin



まとめ

- 対流性豪雨(例: 2023/7/1 GPM同期事例)
 - 高知大レーダー: 2025年度設置場所検討・免許取得→2026年度観測開始(→2025年度中予定)
 - 凍結過程のモデリング(2.b)にも関連)
 - 電場計データの解析
 - LQ7やWINDASの過去データ解析
 - 孤立積乱雲(例: 2023/7/26)
 - タイムラプスカメラ観測(高橋さん@名大): MU観測所付近での複数地点観測
 - Δt 観測からの鉛直流推定 (INCUS: 質量フラックス)
 - MUのrange-imaging modelによる乱流観測
 - 層状性降雨
 - ライダーによる雲底観測(柴田さん@都立大)
 - Quasi-Vertical Profiles (QVP): 降水微物理過程解明のための偏波レーダーデータ解析手法
 - 2018年西日本豪雨型豪雨の観測
- ◆ 降水雲中の大気鉛直流推定
- ・ コトタバ(EAR)とダーウィンでのMJO鉛直流推定
 - ・ MU鉛直流推定の向上(大畑さん@京大)
 - ・ ドップラースペクトル観測可能な光電製作所のX帯レーダーの設置(→ 2025/08/20設置完了)
- ◆ JAXA Ku帯ドップラー降水レーダーへの貢献

MUレーダー観測による急発達積雲対流の 内部構造とその環境場の特徴

柴垣佳明(大阪電通大)、橋口浩之・H. Luce(京大RISH)、
山中大学(地球研)

研究背景·目的

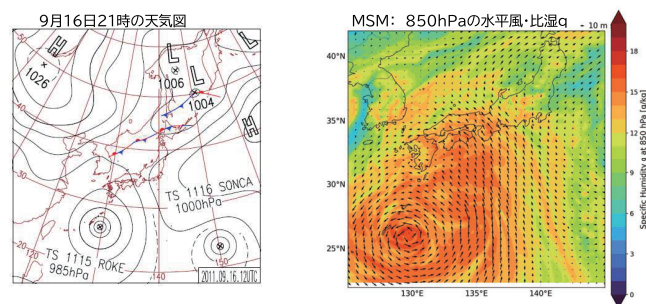
- ・積雲対流は大気中の熱・水蒸気・運動量輸送の主要な担い手であり、組織化した対流システムは大気大循環にも大きな影響を及ぼす。
- ・その起点となる孤立した積雲対流は寿命が短く規模も小さいため、発達過程や内部構造の理解は十分に進んでいない。
- ・本研究では、**信楽上空で急発達した**孤立積雲対流を対象に、**MUレーダーの高時間分解能観測**から得られた**鉛直流と降雨粒子の振る舞い**、さらに両者の相互関係を明らかにすることを目的とする。

データ

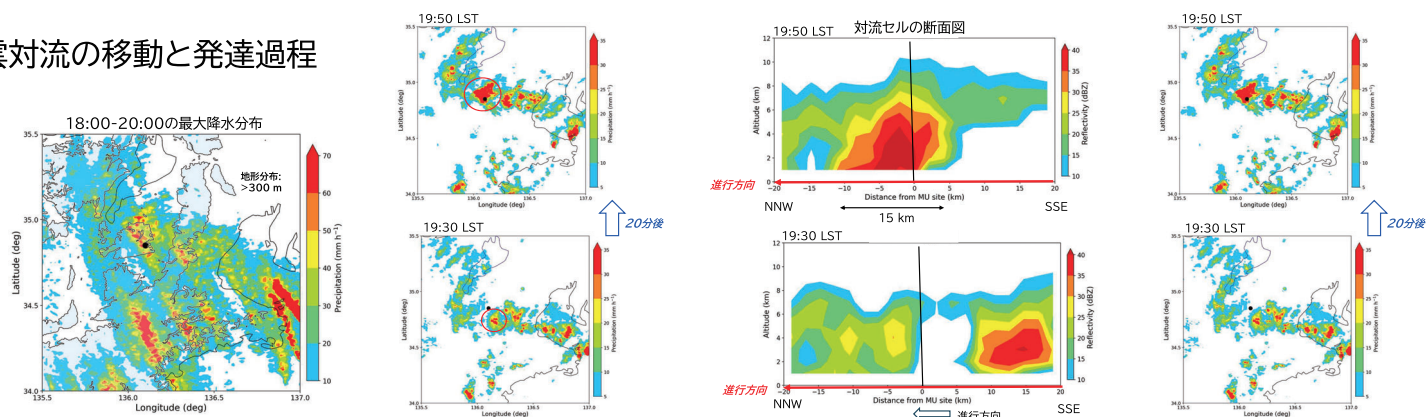
解析期間: 2011年9月16日18:00~21:00

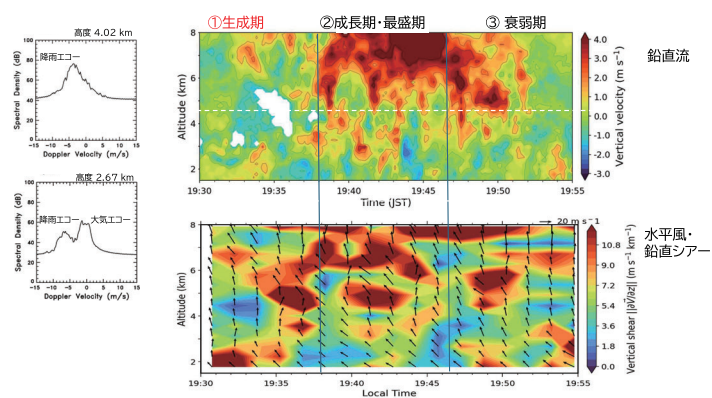
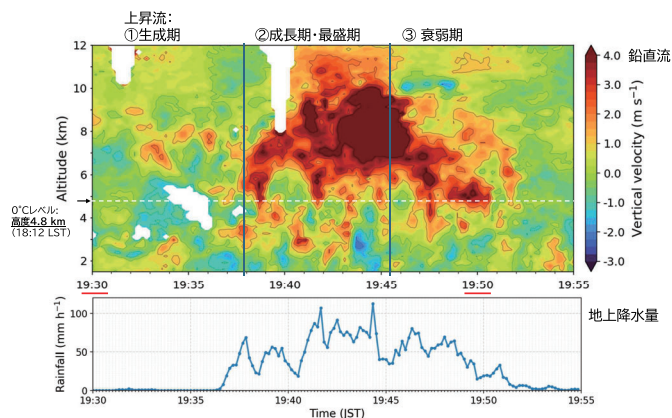
- ・ 総観解析:
 - メソ数値予報モデル(MSM) 水平風・比湿 (気圧面)
 - 時間間隔 3時間、空間間隔10km(x)×10km(y)
- ・ メソスケール解析:
 - レーダーアダプス 時間間隔 5分、空間間隔1km(x)×1km(y)
 - 大阪レーダー 3次元降水エコー
 - 時間間隔 10分、空間間隔 1km(x)×1km(y)×1km(z)
- ・ 局地観測解析 (高時間分解能の特別観測データ)
 - MUレーダー 風速3成分(u, v, w)、降雨粒形分布パラメータ
 - 解析高度 1.5~12km (8km×降水データ)
 - 時間間隔 **12秒**、高度間隔 150 m

台風1115号に伴う総観場



積雲対流の移動と発達過程





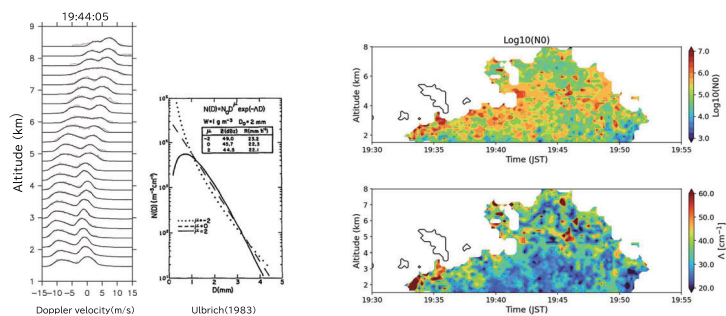
モデル関数 (Sato et al. 1990)

$$S(v) = [S_r(v) + S_p(v) * S_0(v) + P_s] * W(v)$$

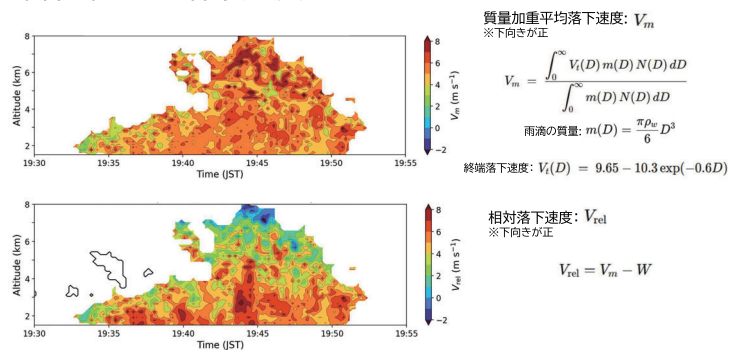
大気エコー 降雨エコー ノイズ 窓関数

雨滴粒形分布

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-AD)$$



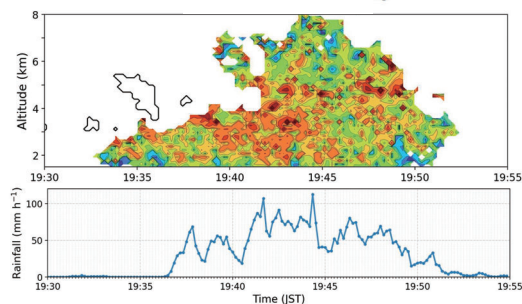
降雨粒子の落下速度



雨水含有量(Rain Water Content)

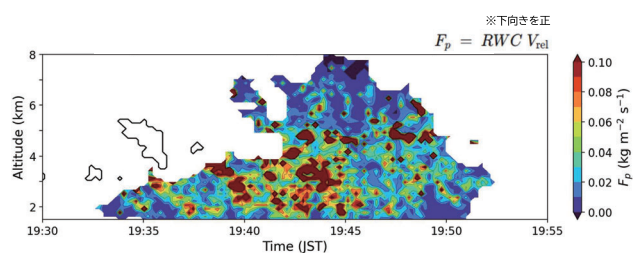
$$RWC = \int_0^\infty m(D) N(D) dD$$

雨滴の質量: $m(D) = \frac{\pi \rho_w}{6} D^3$

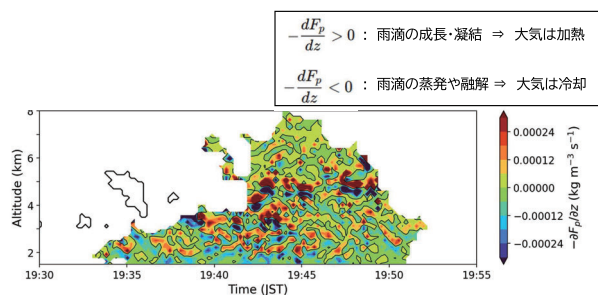


降水質量フラックス

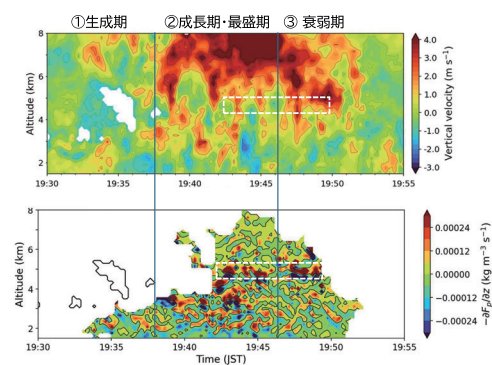
降水粒子が下向きにどれだけ水の質量を運んでいるかを表す物理量



降水質量フラックスの鉛直勾配



潜熱加熱と上昇流の関係



まとめ

- MUIレーダー上空付近で短時間に急発達した積雲対流について、鉛直流と降水粒子の振る舞いを解析した。
- 積雲対流の先端付近では、鉛直シアーに対応した上昇流域の発生が確認され、その上昇流を成長させる要因として、融解層高度の下側に高降水エコーが観測された。
- 積雲対流内部では、高度5km以上において上昇流の著しい発達が見られ、雨滴粒形分布の観測データから求めた降水質量フラックスの鉛直勾配より、高度5 km付近に潜熱加熱の層が存在することが示された。
- この潜熱加熱が、その上昇流の成長に寄与したと考えられた。

DDMA/CDMA-MIMO方式を用いた MULレーダーによる観測実験

松田 知也
(三菱電機株式会社)
西村 耕司、橋口 浩之
(京都大学 生圏研究所)

1

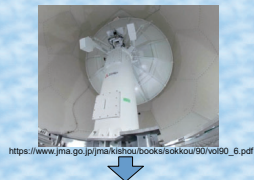
目次

1. 研究の背景
2. MIMO レーダーの原理
3. ビームパターンによるMIMOレーダー検証(DDMA/CDMA)
4. 対流圏観測によるMIMO-DBF(DDMA)
5. 今後の展望

2

1. 研究の背景

昨今の局地的大雨や竜巻等突風の被害の甚大化→急速に発生・発達する大気現象を極めて高い時空間分解能で観測する技術がさらに重要となってきた



気象レーダーのフェーズドアレイ化により、パラボラアンテナでは実現できなかった、最短で10秒という短い時間で全天をスキャンすることが可能→極めて高い時空間分解能データの提供が高度な防災気象情報につながる



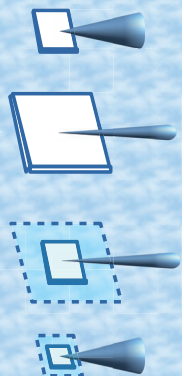
3

1. 研究の背景

・フェーズドアレイレーダーはアンテナ素子数 (= 送受信機数) が多く、一般的な普及にはコスト削減が必要
・コスト削減のために素子数を削減すると、必要な角度分解能が低下し、空間情報が劣化してしまう



・通信分野で用いられているMIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 技術をレーダーに応用すると、実開口面から拡大することが可能 = MIMOレーダーによる仮想開口化
・レーダーに必要な角度分解能を実開口を縮小しても実現することが可能
→MIMO方式採用により、角度分解能を維持したままレーダーのコスト削減に寄与



4

2. MIMO レーダーの原理

・単一/複数送受信機の組合せにより、SISO/SIMO/MIMOレーダーの3種に分類される。
・MULレーダーはSIMOの分類だが、レーダーシステムとしての先進性(融和性/多様性)が非常に高い
→一般的なシステムと異なり、(手動)カスタマイズによりMIMOレーダーとして動作が可能 = MIMOレーダーのフューチャリティスタディとして非常に効果的に機能するため、本研究で用いている。

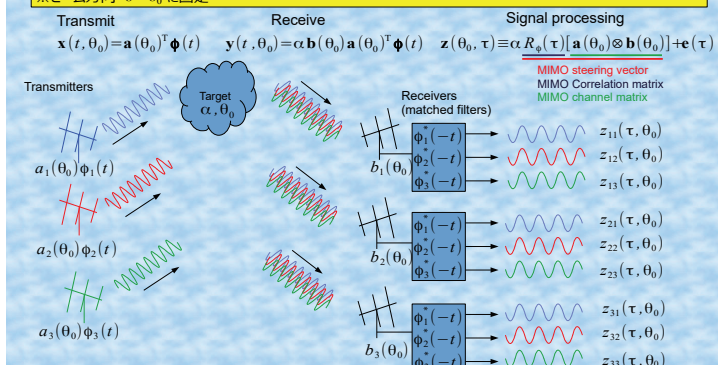
Type	SISO (Single-Input Single-Output)	SIMO (Single-Input Multiple-Output)	MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)
Configuration	-Single Antenna -Single receiver/Antenna	-Single Antenna (radiation) -Multiple receivers/ Antennas	-Multiple transmitters/ Antennas (radiations) -Multiple receivers/ Antennas
Ex.	-Weather radar (with a parabolic antenna) -Wind profiler radar	-Phased array weather radar -MU radar(*)	-MU radar (*)
Image			

*MU radar can be easily customized to a MIMO radar.

5

2. MIMO レーダーの原理

【送信機 = 3、受信機 = 3に拡張。送信・受信にステアリングベクトルをつける】
送信位置ベクトルと受信位置ベクトルの積 (× MIMO相関行列) が、MIMOステアリングベクトル
※ビーム方向 $\theta = \theta_0$ に固定



6

2. MIMO レーダーの原理

MIMOレーダー構成例1
(transmit=M=3, receive=N=3, identical T/R antenna, Linear 1-dimension array, weight=none)

Steering vector

$$\mathbf{a}(\theta) = \mathbf{b}(\theta) = \begin{bmatrix} \exp(-jk d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 2 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 3 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix}$$

MIMO channel matrix

$$\mathbf{b}(\theta) \mathbf{a}(\theta)^T = \begin{bmatrix} \exp(-jk 2 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 3 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 3 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 5 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 5 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 6 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix}$$

Dasu, M. S. MIMO radar in Marohn, W. L., and Schmitt, J. A. (Eds.) Principles of Modern Radar: Advanced Techniques. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2012, pp. 119-145.

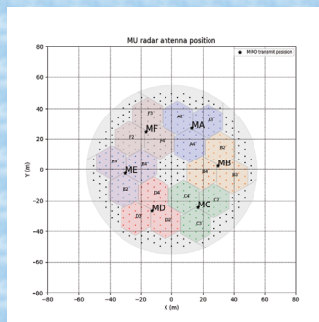
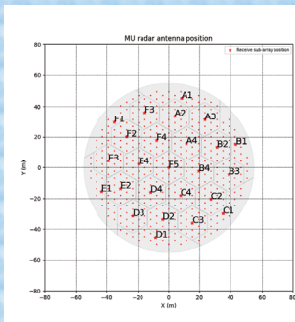
MIMO virtual array

2. MIMO レーダーの原理

ナイキスト速度が確保しやすいVHF帯はDDMAが適している
周波数が高い場合はCDMAも視野に入る

方式	Time division multiple access (TDMA)	Frequency division multiple access (FDMA) =Fast-time MIMO	Doppler division multiple access (DDMA) =Slow-time MIMO	Code Division multiple access (CDMA)
長所	・高い直交性を確保 ・ハードウェア構築が容易	・高い直交性を確保	・高い直交性を確保 ・ハードウェア構築が容易	・適度な直交性 (パルス波形 / 送信信号の線形性に依存)
受入条件	・タイムロス ・相関時間の低下	・高いレンジサイドロープ ・ターゲットの周波数特性の考慮	・広いアンビギュイティレンジ (unambiguity range)	・システム構造が複雑 ・高いレンジサイドロープ (※完全コンプリメンタリ符号 (CCC) に依存)
構成イメージと回路構成				

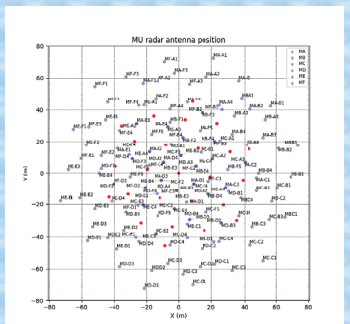
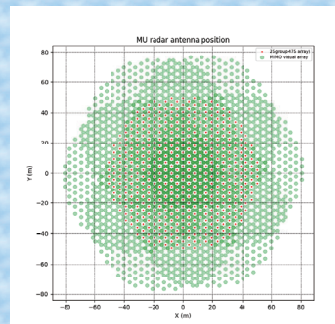
2. MIMO レーダーの原理 ※送信アンテナ配置



MUレーダーのアンテナ配置
※475本のアンテナが25群×19本のクロスハブアンテナで構成される

MIMO送信アンテナ分布：3群（57本）単位で6つのサブアレーを構成。それぞれから直交する信号を送信（A/C/E群と、B/D/F群のアンテナは同一配列）

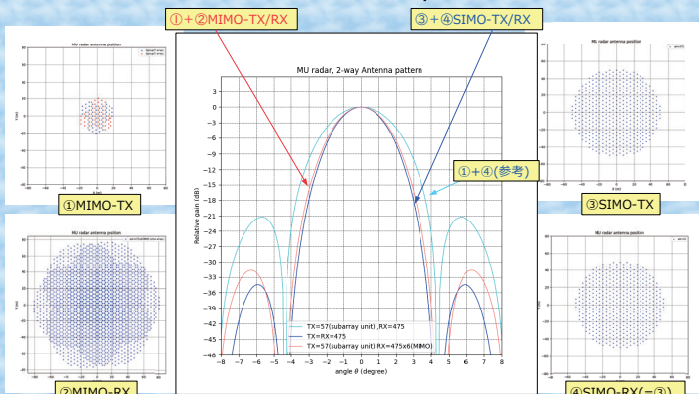
2. MIMO レーダーの原理 ※受信アンテナ配置



受信アンテナ配置：直交した送信信号を同一とみなすことで、475×6=2,850本の仮想アレーが生成される（緑）。赤は物理位置。

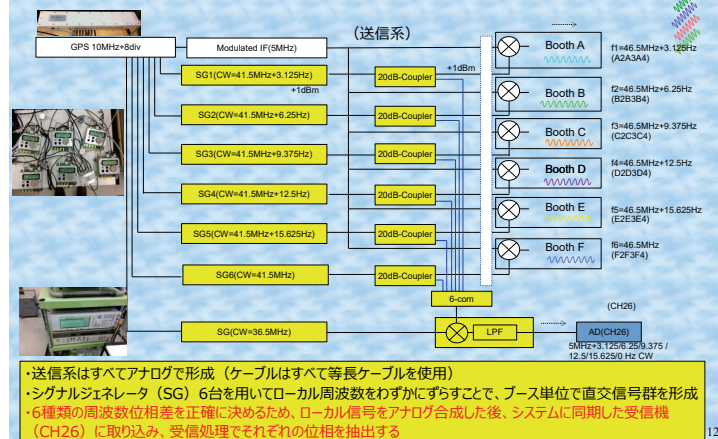
受信アンテナ配置（サブアレー=デジタル受信機単位：25×6=150チャンネルの仮想重心）
※赤は物理位置のサブアレー重心。

2. MIMO レーダーの原理 ※2-wayアンテナパターン



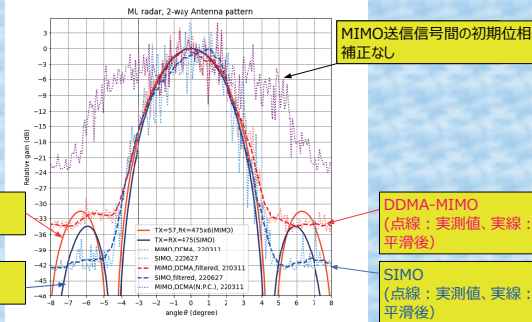
MUレーダーでMIMO実装する場合のアンテナパターンはほぼ同じ。ただし、受信信号の自由度が格段に向上→DBF/クワック抑圧などに優位性あり。ブロードビーム送信するレーダーシステムにも優位性あり。

2. MIMO レーダーの原理 ※DDMA-MIMO



3. ビームパターンによるMIMOレーダー検証(DDMA/CDMA)

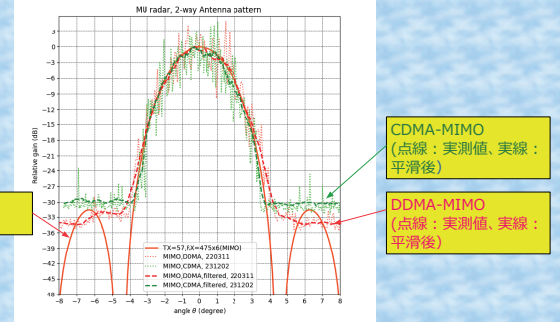
- ・メインローブについて、SIMO/MIMOともに理論パターンと一致
- ・MIMO送信号間の初期位相補正を行わない場合はパターンと全く一致せず
→送信号間の初期位相補正はMIMO信号処理において極めて重要



19

3. ビームパターンによるMIMOレーダー検証(DDMA/CDMA)

- ・メインローブについて、DDMA/CDMAともに理論パターンと一致
- ・ノイズレベルに差がある→観測条件（繰り返し周期、サブパルス幅、パルス圧縮符号）が異なるためと考えられる（定性的な理論傾向と一致）



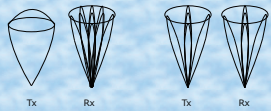
20

4. 対流圏観測によるMIMO-DBF(DDMA)

対流圏観測でMIMO適用
MIMOレーダはSIMOと比較してS/NがMIMO数 (M) 下がる
→ビームを天頂のみ+FFT点数を5倍 (=コヒーレント積分数を増加) させて
想定SNがほぼ同じとなる観測パラメータとした。(トータル観測時間は同じ)

【観測パラメータ】

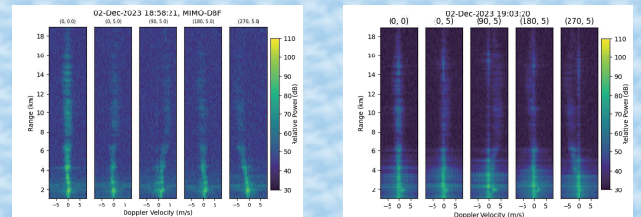
	DDMA-MIMO	SIMO
Item	Experiment A TX=57, RX=475(MIMO)	Experiment B TX=RX=475(SIMO)
Observation time(1)	1800-1900 JST 23 Dec 2023	1900-2000 JST 22 Dec 2023
Observation time(2)	0930-1000 JST 13 Apr 2024	0900-0930 JST 13 Apr 2024
Transmit antenna	57 (19 x 3ch) x 6	475 (19 x 25 ch)
Receive antenna	475 (19 x 25ch) x 6	475 (19 x 25 ch)
Inter-pulse period	400 μs	400 μs
Transmit beam direction (AZ/EZ)	(0°, 0°)	(0°, 0°), (0/90/180/270°, 5°)
Sub-pulse width	1 μs	1 μs
Pulse comp.	16-bit Spano	16-bit Spano
Coherent integration	16	16
FFT points	10,240	2,048
Nyquist velocity	251.84 m/s	50.37 m/s
Observation time	65.5 s	65.5 s
Beam control	DBF	DBS



21

4. 対流圏観測によるMIMO-DBF(DDMA)

MIMO(ブロードビーム送信/DBF) とSIMO (特定ビーム方向に送受信/DBS) を比較
観測時刻は異なるものの、パフォーマンスは類似。(2023/12/2 18:58 VS 19:03)



DDMA-MIMO observation (1-beam/DBF)
(Observed at 18:58 on Dec 2, 2023)

SIMO observation (5-beam DBS)
(Observed at 19:03 on Dec 2, 2023)

DBF: Digital Beam Forming

DBS: Doppler Beam Swinging

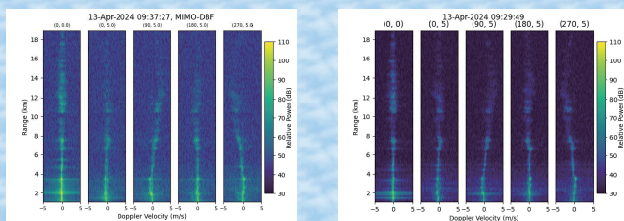
IPP=400us/PW=1usx16bits(Spano)
Nbeam=1 / Ncoh=16 / Nfft=10240
Vnyq=251.84m/s / Tobs=65.5s

IPP=400us/PW=1usx16bits(Spano)
Nbeam=5 / Ncoh=16 / Nfft=2048
Vnyq=50.37m/s / Tobs=65.5s

22

4. 対流圏観測によるMIMO-DBF(DDMA)

MIMO(ブロードビーム送信/DBF) とSIMO (特定ビーム方向に送受信/DBS) を比較
観測時刻は異なるものの、パフォーマンスは類似。(2024/4/13 09:37 VS 09:29)



DDMA-MIMO observation (1-beam/DBF)
(Observed at 09:37 on Apr 13, 2024)

SIMO observation (5-beam DBS)
(Observed at 09:29 on Apr 13, 2024)

DBF: Digital Beam Forming

DBS: Doppler Beam Swinging

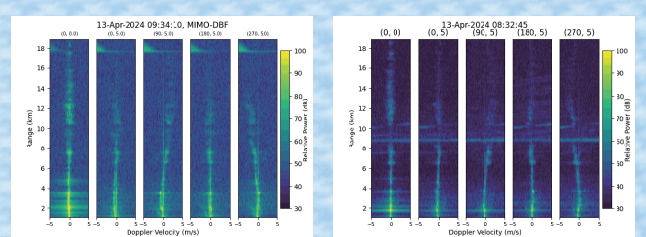
IPP=400us/PW=1usx16bits(Spano)
Nbeam=1 / Ncoh=16 / Nfft=10240
Vnyq=251.84m/s / Tobs=65.5s

IPP=400us/PW=1usx16bits(Spano)
Nbeam=5 / Ncoh=16 / Nfft=2048
Vnyq=50.37m/s / Tobs=65.5s

23

4. 対流圏観測によるMIMO-DBF(DDMA)

MIMO(ブロードビーム送信/DBF) とSIMO (特定ビーム方向に送受信) を比較
パフォーマンスは類似。



1ビームMIMO-DBF (天頂角5°)
(2024/4/13 0930-1000JST)

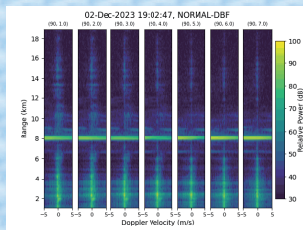
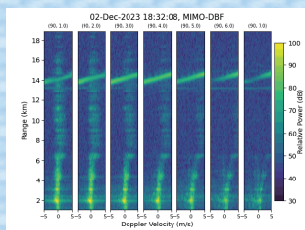
5ビームSISO-DBS(天頂角5°)
(2024/4/13 0830-0930JST)

24

4. 対流圏観測によるMIMO-DBF(DDMA)

走査角度を上げて（SN比はさがるもの）
グレーティングローブの影響は小さい

送信ビームが狭いため、DBFによる走査角
度が大きくなるとSNが急激に劣化



5ビームMIMO-DBF（東ビーム $1^{\circ} \sim 7^{\circ}$ ）
(2023/12/2 1800-1900JST)

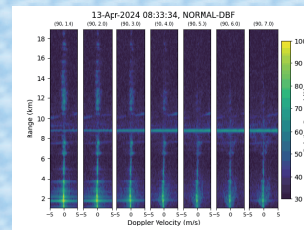
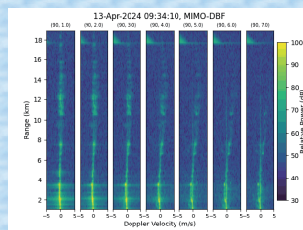
5ビームSIMO-DBF（東ビーム $1^{\circ} \sim 7^{\circ}$ ）
(2023/12/2 1900-2000JST)

25

4. 対流圏観測によるMIMO-DBF(DDMA)

走査角度を上げて（SN比はさがるもの）
グレーティングローブの影響は小さい

送信ビームが狭いため、DBFによる走査角
度が大きくなるとSNが急激に劣化



5ビームMIMO-DBF（東ビーム $1^{\circ} \sim 7^{\circ}$ ）
(2024/4/13 0930-1000JST)

5ビームSIMO-DBF（東ビーム $1^{\circ} \sim 7^{\circ}$ ）
(2024/4/13 0830-0930JST)

26

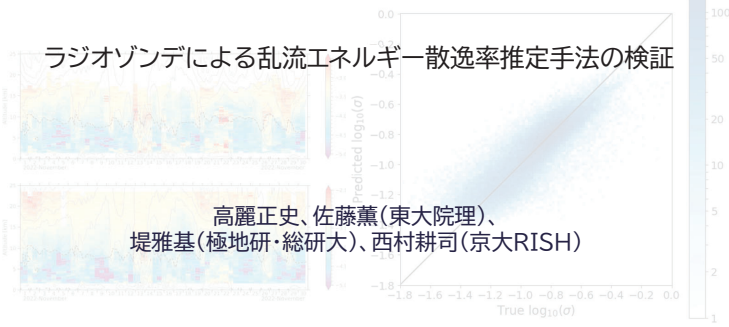
5. 今後の展望

- (1)MULレーダーをMIMOレーダーとして運用することによる観測の自由度が向上
→クラッター抑制の精度が向上するだけでなく、より広範囲の観測を短時間で実施可能
→より詳細な空間イメージング観測への応用へ
- (2)MIMOレーダー化により、高価なフェーズドアレイレーダーにおいて、少ないハードウェア構成で高解像度の観測を実現
→最先端のフェーズアレイ技術をより低コストで展開
- (3)航空交通管理において、優れた解像度とクラッター抑制能力を、特に複雑な空域や高密度な航空路で活躍
→安全性と運用効率の向上
- (4)CDMA/DDMA-MIMO技術の既存PARへの適用・次世代PARへのMIMO方式実装
→他分野への応用可能性

27

ご清聴ありがとうございました。

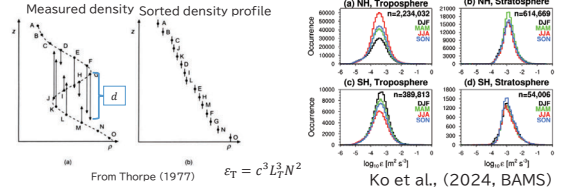
ラジオゾンデによる乱流エネルギー散逸率推定手法の検証



This study is supported by JST FOREST program

Introduction

- 自由大気中での乱流エネルギー散逸率 (ϵ) の推定手法
 - VHF/UHF radar (e.g., Sato & Woodman, 1982; Hocking, 1983)
 - Spectral width method / Power method
 - Radiosondes (e.g., Clayson & Kantha, 2008; Wilson et al., 2011)
 - Thorpe method
 - Aircraft/UAV (e.g., Sharman et al., 2014; Luce et al., 2018; 2023)
 - Rocket (e.g., Luebken, 1997; Luebken et al., 2002) etc. (e.g., Schneider et al., 2015)



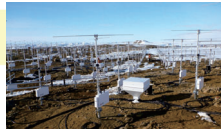
The program of Antarctic Syowa radar (PANSY radar; Sato et al., 2014)
Mesosphere-Stratosphere-Troposphere/Incoherent Scatter radar at Syowa Station (69S, 40E) in the Antarctic region

System	Pulse Doppler radar, Active phased array system
Center freq.	47MHz
Antenna	Array consisting of 1045 crossed Yagi antennas equivalent to the circular area with a diameter of 160m (18000m ²), light and tough (12.6kg/antenna)
Transmitter	1045 solid-state TR modules Peak Power : 520kW
Receiver	55 channel digital receiving systems Ability of imaging and interferometry obs
Power consumption	66kW (E-class amplifier)
Peripheral	24 antennas for E-layer FAI observation

PANSYレーダーを用いた先行研究

- 対流圏-成層圏重力波:
Sato et al. (2014), Minamihara et al. (2018; 2020)
Tokimori et al. (2024)
- 中間圏重力波:
Sato et al. (2017), Shibuya et al. (2017),
Shibuya & Sato (2019)
- エネルギー散逸率:
Kohma et al. (2019; 2020; 2021),
Minamihara et al. (2023)

Observation of 3-d wind vectors in height regions of 1.5-20km and 60-90 km,
and plasma parameters in 100-500 km with fine resolution and high accuracy
Direct estimation of vertical flux of horizontal momentum associated with gravity waves



PANSYレーダーの観測例 (2021年6月)

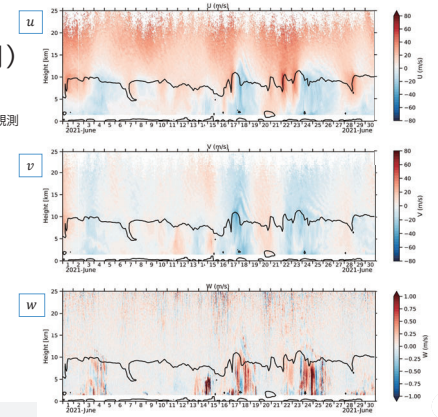
2015年10月から全アンテナ群による連続観測

風速3成分 (u, v, w) を推定可能

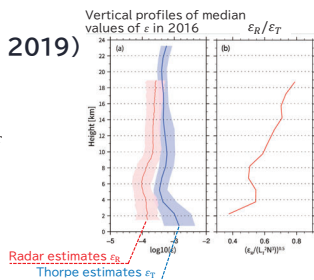
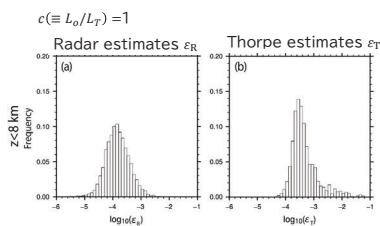
時間間隔: 200 s

高度分解能: 150 m

鉛直風の推定精度: 0.1 m/s



レーダーのスペクトル幅法とThorpe法の比較 (Kohma, et al., 2019)



The ratio of radar-based ϵ to Thorpe-based ϵ is small in $z=1.5-9$ km compared to over 11 km.

There are more recent studies including discussion on ϵ estimation based on Thorpe method.
(e.g., Wang et al., 2019; Luce et al., 2023)

機械学習のアプローチによるラジオゾンデ観測からの乱流エネルギー散逸率の推定手法の開発

Motivation

VHFレーダー観測に基づく推定:

伝統的に行われている高い時間分解能

Limitation: レーダーサイトの数が限られ、全球的な ε の推定は困難

ラジオゾンデ観測に基づく推定:

広範なラジオゾンデの観測網

Limitation: 小さくない推定の不確実性

南極昭和基地

VHFレーダーとラジオゾンデの同時観測が2015年から現在まで継続されている

本研究の目的:

次のような関数 $f(x_{\text{sonde}})$ を推定

$$f(u_{\text{sonde}}, v_{\text{sonde}}, \theta_{\text{sonde}}) = \varepsilon_{\text{radar}}$$

- 機械学習 (ML) 的なアプローチ
- 昭和基地でのVHFレーダーとラジオゾンデ観測の膨大な同時観測データを用いて学習

本発表で示す内容

- MLに基づく ε の推定の初期結果
- MULレーダーに基づく検証

7

Data: Radiosondes

昭和基地でのラジオゾンデ観測データ (2015~2022年)

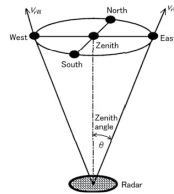
- Meisei RS-06G/RS-11G, twice a day (00UT, 12UT)
- Processed data (Raw データでない)
- $u, v, \& \theta$
 - 本発表では相対湿度 RH を用いていない
- Oct. 2015 ~ Dec. 2022
- Interpolated at a constant vertical interval of 20 m from data with $\Delta t = 1$ sec.
- Restricted observations where horizontal distance between the radar and radiosondes < 25 km

8

Data: PANSY radar

時間間隔: ~200 s
レンジ分解能: 150 m

4 oblique beams with a zenith angle of 10° are used to avoid the effect of specular reflection.



エネルギー散逸率 ε の推定

- $\sigma_{\text{obs}}^2 = \sigma_T^2 + \sigma_B^2 + \sigma_S^2 + \sigma_W^2$ (σ_T^2 : Turbulence; σ_B^2 : Beam broadening; σ_S^2 : Shear broadening; σ_W^2 : Time broadening)
- ビームブロードニング成分 σ_B^2 は Nishimura et al. (2020) の手法で差し引いた
- $\varepsilon = 0.46 N w_{\text{std}}^2$ ($w_{\text{std}}^2 = \frac{\sigma_T^2}{2 \ln 2}$) (Sato & Woodman 1982; Hocking, 1983)

以下に示す ML に基づく推定においては、 w_{std} (乱流に伴う風速擾乱の標準偏差) を用いた

Training dataset: $\{\widehat{w_{\text{std}}}(z_i)\}, \{[\hat{u}(z), \hat{v}(z), \theta'(z)]_{z_i-1\text{km}}^{z_i+1\text{km}}\}$

Radar: $w_{\text{std}}(z_i)$

- ラジオゾンデの放球時刻から1時間後までを平均
 - Yeo-Johnson transformation
- $$w_{\text{std}} \rightarrow \begin{cases} ((w_{\text{std}} + 1)^2 - 1)/2 & \text{if } w_{\text{std}} \geq 0 \\ -((w_{\text{std}} + 1)^2 - 1)/(2 - 2w_{\text{std}}) & \text{if } w_{\text{std}} < 0 \end{cases}$$
- For making the w_{std} distribution approximate normal distribution

Radiosondes: u, v, θ ($z = [z_i - 1.5\text{km}, z_i + 1.5\text{km}]$)

- 入力データのサイズ: 3 km $[150 \times (u, v, \theta)]$
 - $\theta' = \theta - \bar{\theta}$ ($\bar{\theta}$: Smoothed vertical profile)
 - $(\hat{u}, \hat{v})^T = \mathbf{R}(u, v)^T$
- $$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (0 < \varphi < 2\pi)$$
- Rotation angle φ is given randomly for each profile
- ✓ Data augmentation technique for improving the ML model's generalization ability

Training data: October 2015 - December 2021

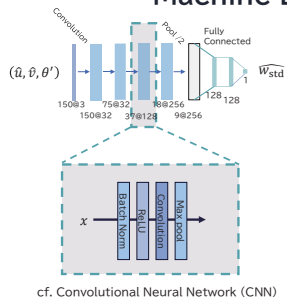
Validation data: January - December 2022

Validation data is NOT used during the training process but is utilized for the validation purposes.

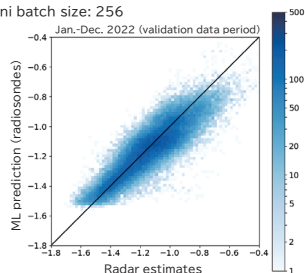
9

10

Machine Learning (ML) model



- Number of parameters: ~440,000
- Loss function: L1 Loss function
- Optimization: Adaptive Moment Estimation (learning rate: 0.001)
- Mini batch size: 256



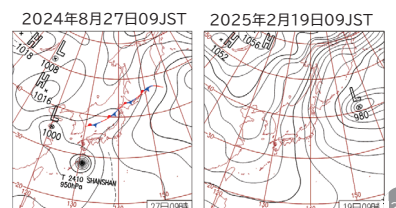
11

Validation of ML model

Q: 昭和基地での観測に基づいて構築したMLモデルが他地点でのエネルギー散逸率推定に使えるのか?

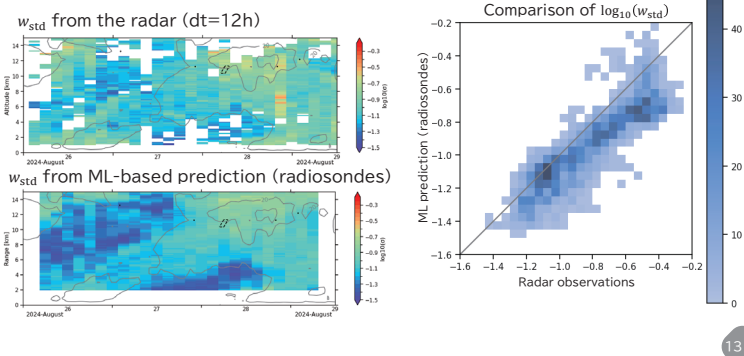
MU レーダーとラジオゾンデの同時観測 (34.9N, 136.1E)

- 期間1: August 26-29, 2024、期間2: February 17-20, 2025
- 基本的に3時間おき
- ラジオゾンデ: Vaisala RS41-SGP



12

6月の推定結果の比較



13

まとめ

1. 自由大気中の乱流エネルギー散逸率 (ε) の推定手法の比較 :
 - 既存のラジオゾンデによる推定手法(Thorpe法)は不確実性が大きい
2. ラジオゾンデ観測から ε を推定する機械学習 (ML) によるアプローチ
 - 南極昭和基地のPANSYレーダーとラジオゾンデの同時観測データを活用
 - 昭和基地上空では、推定精度は良好
 - ⇒ 昭和基地の観測で学習したMLモデルは他の観測点にも適用可能？
 - 信楽MU観測所でMUレーダーとラジオゾンデの同時観測
 - 大きな ε で過小評価傾向はあるものの、MLモデルによる推定値は、レーダー推定値と概ね整合

今後の予定:

- 湿度の効果を含める(例えば Wilson et al. 2013)
- 他地点のラジオゾンデ観測への適用・航空機観測との比較

14

The 2nd International Symposium on the Whole Atmosphere (ISWA2)

- Date & Time:
6-9 June 2027
- Venue:
The University of Tokyo
(Ito International Research
Center), Tokyo, Japan



Group photo from 1st ISWA 2016

Further details will be shared in the near future, and we hope to welcome many of you there.

15

商用航空交通管制のための二次監視レーダ技術を応用した気象観測システム(atc2met)の開発と、MUレーダーとの比較による精度評価

橋本 大志¹⁾, 森 修一²⁾, 虫明 一彦³⁾

¹⁾ 情報・システム研究機構 国立極地研究所 (NIPR)

²⁾ 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

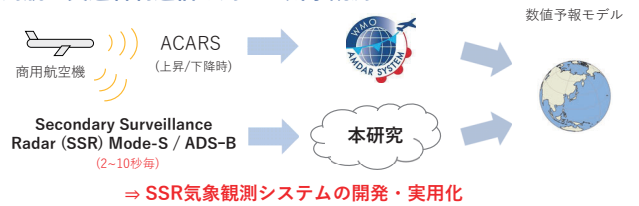
³⁾ 株式会社 いろはプロジェクト

本研究の背景と目的

極端気象現象被害の低減を目指して

- ✓ 広範囲・高時間分解能な気象現況の観測および気象予測が不可欠
- ✓ 低環境負荷・低コストな計測手法が求められる (⇒インドネシアにおける展開を想定)

商用航空交通管制通信を用いた気象観測システム



2025/09/08

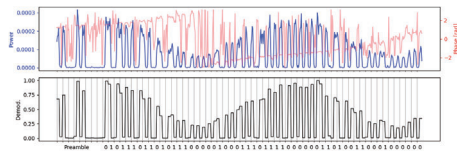
第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

2

SSR モードS/ADS-B

航空交通管制のための比較的新しい無線通信規格 (2007~)

- Secondary Surveillance Radar (SSR): 二次監視レーダー
- Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B): 放送型自動従属監視
- 1090 MHz, パルス位置変調, 1 Mbps ボーレート
- 航空機の航法に関するさまざまな情報が他局へ放送される



SSR Mode-S 信号の例 (DF=11, All-Call Reply)

2025/09/08

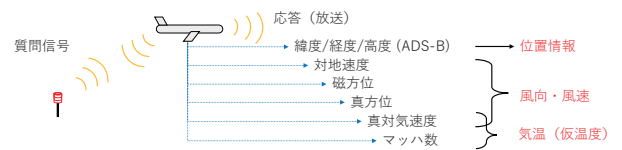
第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

3

SSR モードS/ADS-B

気象観測への利用方法

- 気象観測データが直接送信されるわけではない (※)
⇒ 地上からの問い合わせに対し、航法に必要な形式に加工したものが放送される
- 適切な逆変換を施すことで、気象情報を復元可能



※実際には規格としては存在するが、現在のところ実装している機体は非常に少ない

2025/09/08

第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

4

SSR気象観測手法の詳細 (va, 2018)

風向・風速

$$\mathbf{W} = \mathbf{V}_{GS} - \mathbf{V}_{TAS}$$

$$\theta_t \text{ 真方位}$$

$$\theta_m \text{ 磁方位}$$

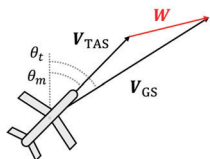


TABLE III INTERNATIONAL STANDARD ATMOSPHERE LAYERS					
	h [m]	T [K]	λ [K/km]	p [Pa]	ρ [kg/m ³]
Troposphere	0 - 288.15	-6.5	6.5	101325	1.225
Stratosphere	11,000 - 20,000	216.65 - 288.15	0.0 - 1.0	22,632 - 5,475	0.364 - 0.088

TABLE IV INTERNATIONAL STANDARD ATMOSPHERE CONSTANTS			
Symbol	Description	Value	Unit
a_0	Sea level speed of sound	340.3	m/s
g	Gravitational acceleration	9.81	m/s ²
p_0	Sea level air pressure	101325	Pa
R	Specific gas constant	287.05	J/(kg·K)
T_0	Sea level temperature	288.15	K
ρ_0	Sea level air density	1.225	kg/m ³

気温 (仮温度)

$$T = \begin{cases} \frac{V_{TAS}^2}{V_{IAS}^2} \frac{p}{\rho R} & M < 0.3 \\ \frac{V_{TAS}^2}{M^2 a_0^2} & M \geq 0.3 \end{cases}$$

$$p = \begin{cases} p_0 \left[1 + \frac{\lambda(h - h_b)}{T_b} \right]^{\frac{\gamma}{\lambda R}} & \lambda \neq 0 \\ p_0 \exp \left[-\frac{g(h - h_b)}{RT_b} \right] & \lambda = 0 \end{cases}$$

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

2025/09/08

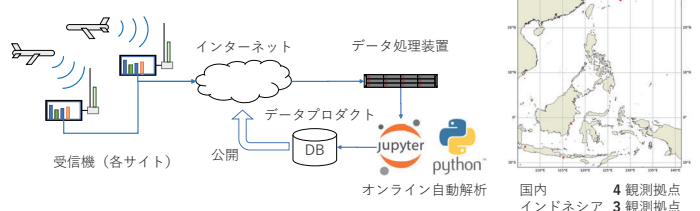
第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

5

atc2met: Air Traffic Control to METeorological data

本研究が開発する SSR 気象観測システム

- データ取得・伝送 ✓、自動オンライン解析 ✓、データ公開 ✓
- RTL-SDR, HackRF, USRPなどのSDRを利用可能

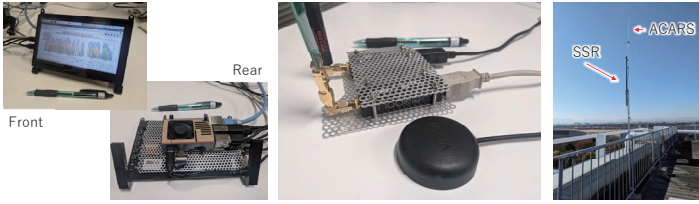


2025/09/08

第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

6

受信機の実装例



データ処理部

- 小型かつ安価なSBCを利用 (Raspberry Pi 4)
- 電源とインターネットへの接続
- リモート制御

受信部

- 安価なRTL-SDR ドングルを用いた SSR Mode-S 受信機 (～数千円)
- GNSS/ACARS も構成可能
- おおよそ見通し300km程度の視野

空中線部

- SSR (1090MHz)
- (ACARS (~130MHz))
- (GNSS)

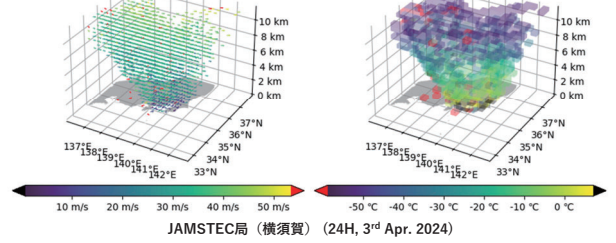
2025/09/08

第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

受信データの例

風と気温の3次元連続観測

- 多数の航空機から得た情報をもとに、3次元の気象データを再構築

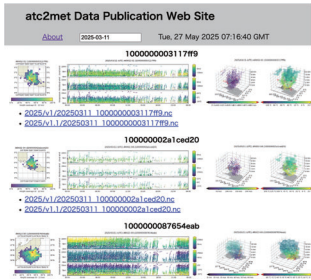


2025/09/08

第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

3

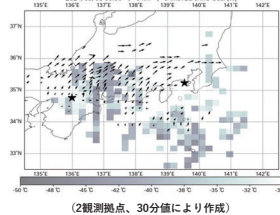
データプロダクト



<http://atc2met.nipr.ac.jp>

2025/09/08

Resolution	Ver. 1.0	Ver. 1.1
Time	3 min	10 min
Horizontal	N/A	20 km
Vertical	0.25 km	0.25 km

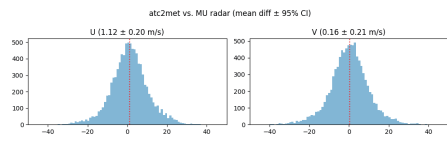


(2観測拠点、30分値により作成)

9

MUレーダーを用いた精度検証

- ・ 滋賀県にあるMUレーダーの標準観測データを利用
- ・ 観測棟の屋上のatc2met（信楽局）のv1.1データを使用
- ・ 2023年9月～2025年5月、観測点の近傍半径5kmのデータを使用（9181サンプル）
- ・ 差の平均値は、**東西風 1.12 m/s, 南北風 0.16 m/s**
 - ✓ 系統的な誤差の差（東西 vs. 南北）は手法または実装に起因する可能性があるため大規模調査中



2025/09/08

第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

9

商用航空管制通信 SSRモードSを応用した、新たな気象観測システム
(atc2met)を開発

- ・ 小型かつ安価な装置を用いて、広範囲の風および気温を高い時間分解能で連続観測
- ・ 即時データ公開を実施：<https://atc2met.nipr.ac.jp>
- ・ MUレーダーと比較し、実用的な精度を持つことを確認

今後の計画

- ・ ENRI・JAMSTECと協力し、国内およびインドネシアの観測点を拡充
- ・ 高精度位相計測によるSSRモードSを用いた水蒸気量の直接計測
- ・ 深層学習を用いた水蒸気量の推定（インドネシアではラジオゾンデ観測拠点は空港）

謝辭

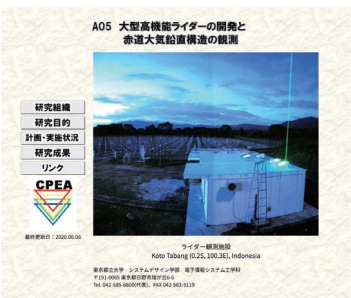
- ✓ 本研究は、情報・システム研究機構「戦略的研究プロジェクト」、住友財団 環境研究助成、および JST FOREST JPMJFR2231 の支援を受けています。
- ✓ MUレーダーのデータは京大大学生存圏研究所 MUレーダー・赤道大気レーダー共同利用研究により提供を受けています。

第19回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

赤道対流圏・成層圏のミーライダー長期観測

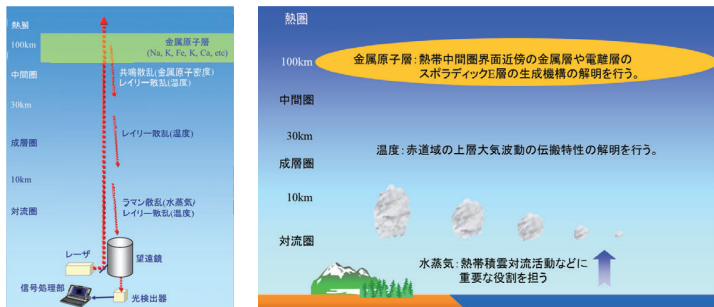
東京都立大学
柴田泰邦、阿保 真、長澤親生

2001年 特定領域研究 赤道大気上下結合 CPEA
A05大型高機能ライダーの開発と赤道大気鉛直構造の観測



2001年 特定領域研究 赤道大気上下結合 CPEA
A05大型高機能ライダーの開発と赤道大気鉛直構造の観測

計画当時は雲・エアロゾルにはほとんど言及していなかった



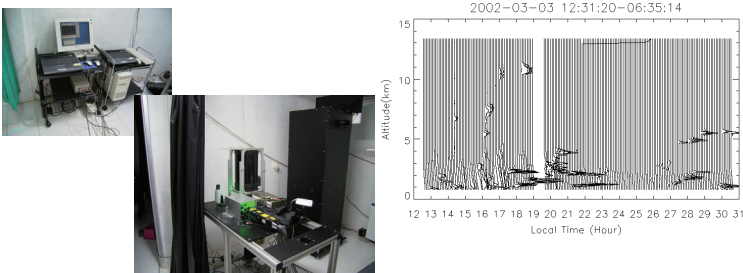
2001年 特定領域研究 赤道大気上下結合 CPEA
A05大型高機能ライダーの開発と赤道大気鉛直構造の観測

2002年 ミーライダーによる対流圏雲・エアロゾル観測開始



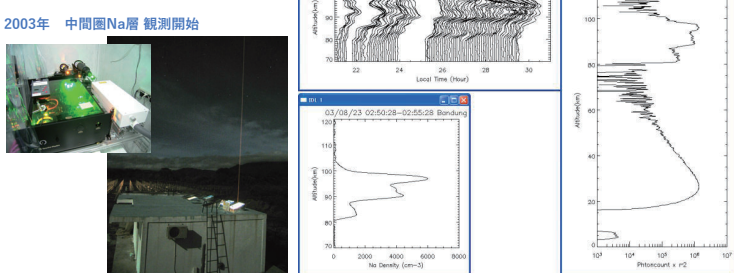
2001年 特定領域研究 赤道大気上下結合 CPEA
A05大型高性能ライダーの開発と赤道大気鉛直構造の観測

2002年 ミーライダーによる対流圏雲・エアロゾル観測開始



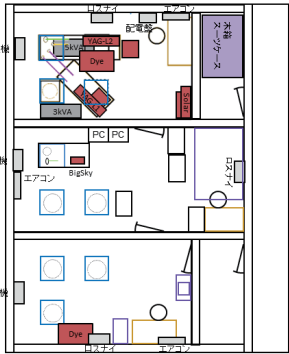
2001年 特定領域研究 赤道大気上下結合 CPEA
A05大型高性能ライダーの開発と赤道

2002年 ミーライダーによる対流圏雲・エア



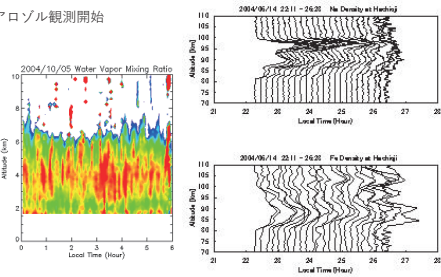
赤道ライダーの観測状況

- 2001年 特定領域研究 赤道大気上下結合 CPEA
A05大型高機能ライダーの開発と赤道大気鉛直構造の観測
- 2002年 ミーライダーによる対流圏 雲・エアロゾル観測開始
- 2003年 中間圏Na層 観測開始
- 2004年 本格運用開始
対流圏 雲・エアロゾル
成層圏 エアロゾル
対流圏 水蒸気
中間圏 金属原子層 (Na, Fe)



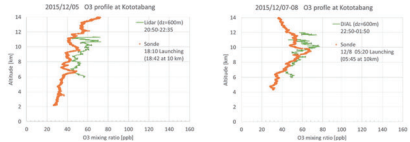
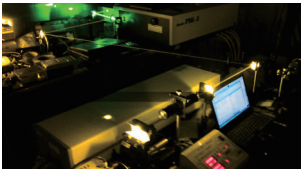
赤道ライダーの観測状況

- 2001年 特定領域研究 赤道大気上下結合 CPEA
A05大型高機能ライダーの開発と赤道大気鉛直構造の観測
- 2002年 ミーライダーによる対流圏 雲・エアロゾル観測開始
- 2003年 中間圏Na層 観測開始
- 2004年 本格運用開始
対流圏 雲・エアロゾル
成層圏 エアロゾル
対流圏 水蒸気
中間圏 金属原子層 (Na, Fe)



赤道ライダーの観測状況

- 2001年 特定領域研究 赤道大気上下結合 CPEA
A05大型高機能ライダーの開発と赤道大気鉛直構造の観測
- 2002年 ミーライダーによる対流圏 雲・エアロゾル観測開始
- 2003年 中間圏Na層 観測開始
- 2004年 本格運用開始
対流圏 雲・エアロゾル
成層圏 エアロゾル
対流圏 水蒸気
中間圏 金属原子層 (Na, Fe)
- 2013年以降
対流圏 雲・エアロゾル (～現在)
成層圏 エアロゾル (～現在)
対流圏界面 オゾン (2017まで)



雨漏り



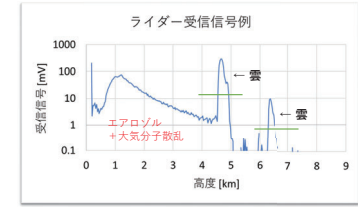
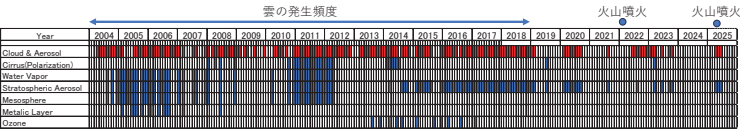
新・ライダー観測棟建設 (2012年8月)



旧棟・屋根設置 (2012年11月)

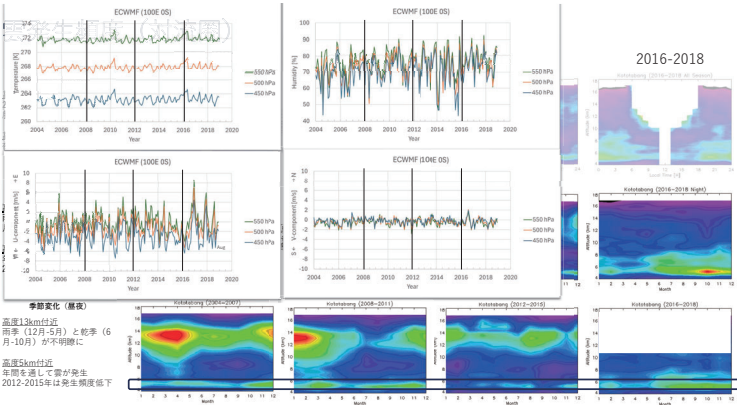
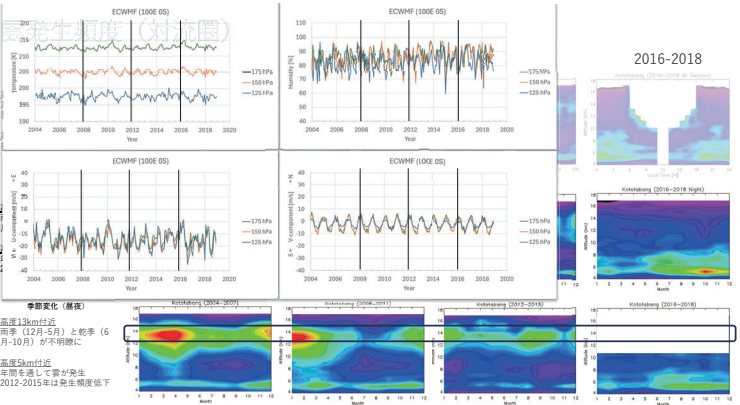
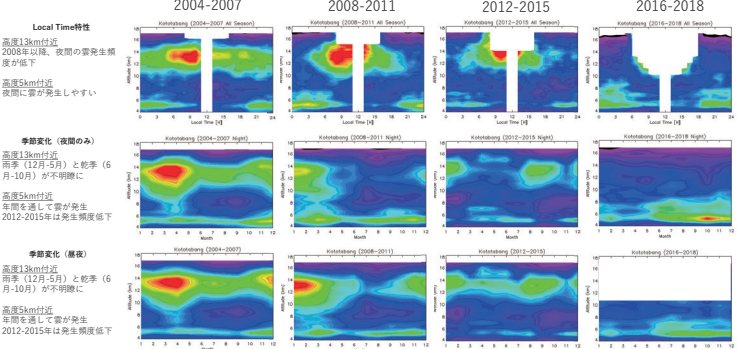


赤道ライダーの観測状況



2014/8 ~			
	対流圏 雲エアロゾル	成層圏エアロゾル	成層圏エアロゾル (イベント時)
モード	アナログ	PC	PC偏光
観測時間	00:00 - 24:00 (11:00 - 13:00除く)	18:30 - 05:30	03:00 - 05:00
時間分解能	5分		1分
高度分解能	30 m		
望遠鏡口径	35 cm		45 cm

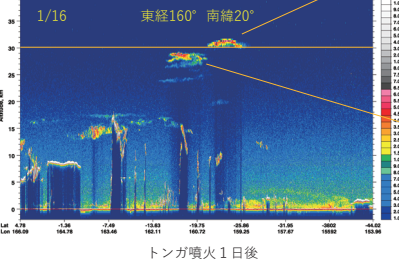
雲発生頻度（対流圏）



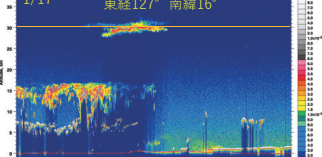
成層圏エアロゾル（火山起源）
フンガ・トンガ火山（175.4E, 20.5S），2022年1月22日噴火

CALIPSO衛星 ライダーデータ（後方散乱係数）

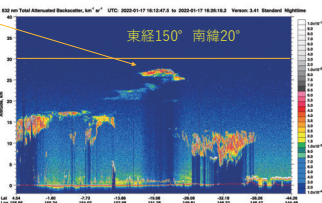
532 nm Total Altimeter Backscatter, km⁻¹ sr⁻¹ UTC: 2022-01-16 15:35:06.8 to 2022-01-16 15:48:35.5 Version: 3.41 Standard Nighttime



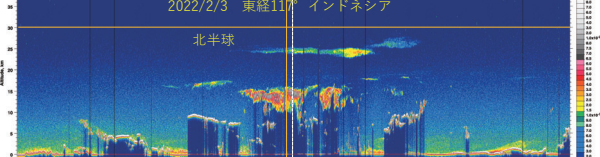
532 nm Total Altimeter Backscatter, km⁻¹ sr⁻¹ UTC: 2022-01-17 15:51:16.8 to 2022-01-17 16:04:47.3 Version: 3.41 Standard Nighttime



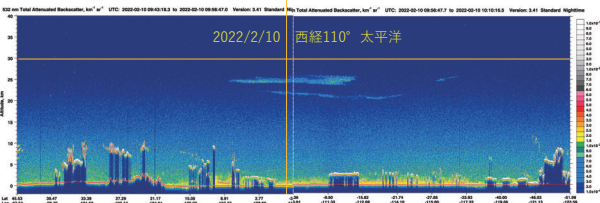
532 nm Total Altimeter Backscatter, km⁻¹ sr⁻¹ UTC: 2022-01-17 16:13:47.8 to 2022-01-17 16:26:18.2 Version: 3.41 Standard Nighttime



532 nm Total Altimeter Backscatter, km⁻¹ sr⁻¹ UTC: 2022-02-03 16:37:31.4 to 2022-02-03 16:41:06.1 Version: 3.41 Standard Night Total Altimeter Backscatter, km⁻¹ sr⁻¹ UTC: 2022-02-03 16:41:06.8 to 2022-02-03 16:54:35.8 Version: 3.41 Standard Nighttime

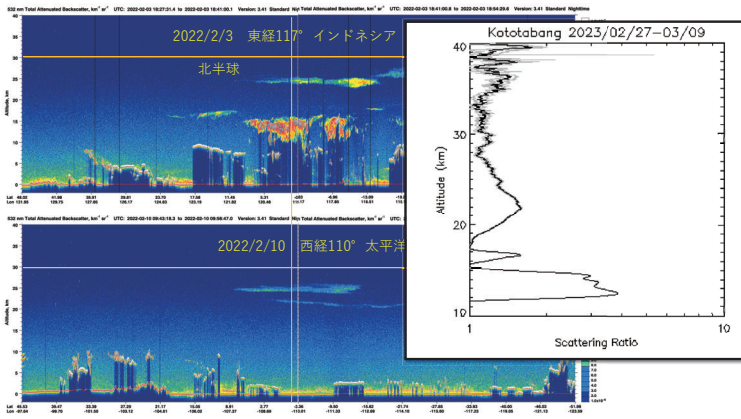


532 nm Total Altimeter Backscatter, km⁻¹ sr⁻¹ UTC: 2022-02-10 09:56:17.3 to 2022-02-10 09:59:47.7 Version: 3.41 Standard Night Total Altimeter Backscatter, km⁻¹ sr⁻¹ UTC: 2022-02-10 09:59:47.7 to 2022-02-10 10:12:16.8 Version: 3.41 Standard Nighttime



1 周回目超
経度方向
約-20° /day

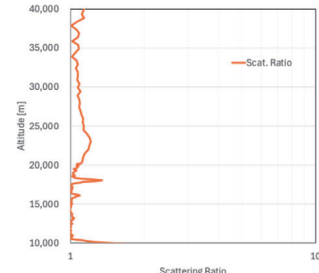
経度方向
約-15° /day



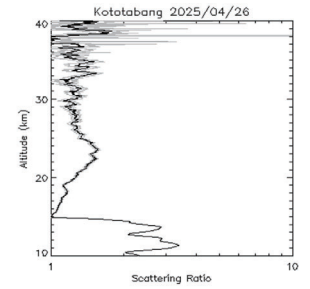
成層圏エアロゾル（火山起源） インドネシア・レウオトビ火山（122.8E, 8.6S），2025年3月21日噴火

EarthCARE搭載ATLIDライダーデータ（後方散乱係数）

ATLID 2025/04/26 -2.5~+2.5deg Latitude Average



102.8E~103.8E/2.5S~2.5Nの範囲で
2025年4月26日に取得された散乱比



同日のKototabngライダーによる散乱比

2023年8月 Calipso運用停止
2024年5月 EarthCARE衛星打上

まとめ

- 特定領域研究「赤道大気上下結合（CPEA）」（2001～2006）
2004年からインドネシアでのライダー観測を本格的に開始
- 新棟建設（2012年）
旧棟の雨漏りがひどくなったため、新棟を設置し、ライダーを移設
ミールライダーの運用に集約
- 雲の発生頻度
高度14 km付近：雨季と乾季が不明瞭に
高度 5 km付近：2012-2015年に発生頻度が低下
- 火山噴火に伴う成層圏エアロゾル
2023年：高度22 km付近で散乱比 1.3 程度と過去の定常状態（1.1 程度）より大きい
→ 2022年1月のトンガ・ファンガ火山による噴煙の名残か？

2025年：高度23 km付近および高度30 km付近にエアロゾル
ATLIDも高度23 kmにエアロゾルを計測
→ 2025年3月のレウオトビ火山による噴煙
- 定常観測を続け、赤道域での火山噴火などのイベントのモニタリングを行う

EARとラジオゾンデのデータを使って の仮想の成層圏タワー形状を通過する 大気の各高度での運動エネルギー計算

「成層圏高度に到達する安定利用可能プラットフォーム」の構築の為に
必要とされる耐風強度算定の基礎となる風速と大気の運動エネルギーを
算定する手法の研究



2025/09/08
日本大学 理工学部 客員研究員 島崎丈太
shimazaki.jota24@nihon-u.ac.jp

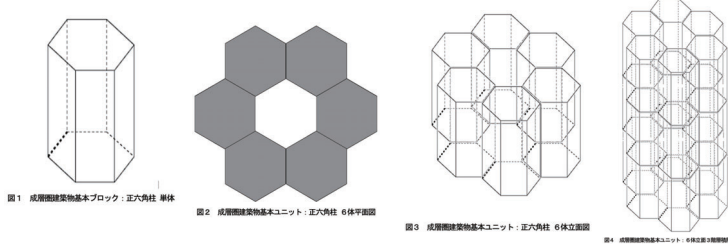


はじめに：発表の概要

- 成層圏タワー研究とは何か
 - 今までの研究
 - 今回の想定
- 赤道直下地域でのデータ種類と制限
 - EARとラジオゾンデのデータの違い
 - 制限による分析の限界
- 計算結果について
 - ラジオゾンデデータでの大気質量の国際標準大気との差異
 - ラジオゾンデデータを採用した場合の風の質量と働く力
 - EARデータをラジオゾンデデータに流し込んだ場合の質量と働く力
- 今後の研究・分析の方策
 - ラジオゾンデデータのデータベース化による赤道直下大気のモデル化
 - モデル化された大気をEAR観測に当てはめたデータによる計算
 - その他、研究方法についての方針

今までの研究： 成層圏タワー研究の目的と意義（１）

- 本研究は、現状の構想としては、正六角柱型の膜構造ブロック内に温度と比重を調整した気体を充填し、組合せて積み重ねることで、従来工法より安価に成層圏に到達する高高度まで構造体構築する構想である。
- 今回は、その構想の実現可能性調査の一環として、成層圏タワーに吹きつける風の質量と運動エネルギーの概算を、既存のデータを使って行った。



成層圏タワー研究の目的と意義（２）

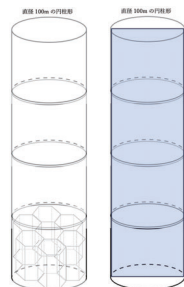
- 地上から成層圏下部に至る、連続した構造体であることにより、長期に安定し、重量にも耐えうる足場を、各種の研究や作業に提供することが出来る。
- 成層圏タワーの用途としては、成層圏高度の希薄な大気濃度を利用した、

- 大気・天体の観測
- 発電量が計算可能で安定した太陽光発電
- 地上と高空の温度差を利用したエネルギーの取出し
- レールガン・カタパルトを利用した宇宙への物資搬送

等が考えられる。

今回の想定： 想定した成層圏タワーの形状

- 高さ約20,000m、直径100mの円柱形を想定している。
- 内部に、正六角形を底面とした、六角柱が6本=前回、
- =膜構造ジャーナルに投稿した論文の仮想の形状が、今回の円柱の中にとりこめられていると想定
- 膜材等は、前回の論文の膜材と同じ材質と想定する
- 内部の充填気体の比重を調整し、大気と同比重に浮力調整するので、質量は大きいが、重量はゼロ。
- 計算上の質量は、膜と内包気体で約69,000トンとなる。（2012/12/14のラジオゾンデ観測（観測データA）に基づく）
- 但し、通過する風量の計算は、右図の青い長方形のように円柱の中心を通る長方形を南北と東西に想定し、そこを通過する風量という形で単純化した。



赤道直下地域の風況調査と計算の必要性

- 現状の成層圏タワーは、膜構造ブロックを積み、内部気体の比重を調整することで構造的負担を大幅に低減する構想であるが、巨大な構造物で相応の質量はあるが、大気の浮力を利用して重量はゼロに近い為、表面積の大きさから、周囲の風に影響を受け易い。
- 赤道直下地域は、コリオリ力が働かないことと、気圧傾度が低いことで、地球上で最も水平方向への風の弱い地域であるとされており、成層圏タワーの建設場所は、赤道無風帯が最有力候補となる。
- 建設が進むと高度に従い気圧は下がり、風速が速くても運動エネルギーは減る為、地上から成層圏まで高度別の分割計算が必要である。今回の研究では、仮想的に直径100mの円柱型を想定し、高度を、20,000m程度まで、と想定する。想定した形状を通過する大気の質量と風速から、運動エネルギーを計算する。（今回は流体力学計算は行わない）
- どの高度でどれ程の風が吹き、どの程度の運動エネルギーを受け止める必要があるかを調査し、タワーの構造設計に反映させる必要がある。それにより、必要な構造的強度を見積もることが、実現コスト見積への重要な情報となる。今回はその第一歩となる。

EARとラジオゾンデのデータの違い

- EARデータはドップラーレーダーの性質上、時間・高度・風速・風向が得られるが、気圧・気温・湿度は得られない。
- ラジオゾンデは、時間・高度・風速・風向の他に、気圧・気温・湿度も得られる。
- しかし気球で観測機器が上昇する形なので、地上の固定した地点の垂直上空のデータは得られない。
- 国際標準大気と実際の赤道直下の大気の気圧・気温・湿度には大きな差異がある為、ラジオゾンデのデータを活用して大気の単位容積あたりの質量を予測する必要がある。
- 今回は、ラジオゾンデで計測した風速データによる計算と、EARで計測した風速データと、両方のデータで時間軸を共通させて通過大気質量と力を計算した。

国際標準大気とラジオゾンデ計測データの差異と計測方法によるデータの制限

- 2024年の日本膜構造協会の機関誌、膜構造ジャーナルに島崎が発表した「膜構造ブロック積層による成層圏建築物の実現可能性について」では、大気データとして、国際標準大気を使用した。
<http://www.makukouzou.or.jp/article/pdf/2024/2024-04-Shimazaki.pdf>
- しかし、今回、生存圏研究所の赤道直下Kotatabangから放球されたラジオゾンデの気圧・気温・湿度のデータと比較すると、高度により、差異が存在することが判明した。9,432m辺りを境に軽重が逆転した。
- 気圧・気温・湿度を考慮した計算によれば、2012年12月14日7時に放球されたラジオゾンデ（計測A）で計測されたデータでは、国際標準大気と比較して、1立方メートルの質量が、比率として低い場合では93.55%（865m）、高い場合では111.05%（15,398m）に達していた。
- ラジオゾンデは放球されると同時に風に従って水平方向の移動が起きるので、EARのような同じ地点の垂直軸上のデータとは言えない。計測Aでは、20kmの高度に達する間に、西に約19.9km、北に約7.4kmほど移動している。
- Kotatabangの垂直上空の気圧・気温・湿度データは他に存在しないので、本研究では、参考としてEARのデータを線形補完し、ラジオゾンデの高度変遷に合わせたものを作成し、計算に利用した。

使用するラジオゾンデ・データの情報

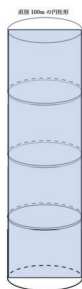
- ラジオゾンデは、放球されると、大気内での浮力に従って上昇し、一定の時間ごとに気圧、気温、湿度、高度、風速などを記録する。
- 風速はGPS信号のドップラー効果を利用して移動速度を割り出してそこから計算されている。
- 放球は、インドネシアのバンドン、コタババン、ボンティアナック、セルボンの4箇所から行われたが、今回は、EAR観測地点がある、コタババンからのデータを主として使用した。
- コタババンでの放球は、1998年に開始され2012年まで、合計1520回行われているが、今回は最も直近の1回である、2012年12月14日07:03放球のデータ（計測データA）をサンプルとして取り上げた。

ラジオゾンデの水平位置の計算

- 今回サンプルとして使用した（計測データA）の場合、高度20,005mに到達した4042秒後の08:10:22には、風速から割り出した計算では、西に19.9km、北に7.4km風で流されていた。
- 成層圏タワーの横風への必要強度を予測する為には、風速だけでなく、建設地点直上の各高度での単位容積当たりの大気質量が必要となる。
- 現状では、ラジオゾンデ以外に、高高度の気圧、気温、湿度の計測を行える方策が手の内に存在しないので、高度による気圧・気温・湿度の変化は、ラジオゾンデ計測データと同じである、と仮定して計算を進める試行を行うこととした。

今回の使用データの取得元と加工手順

- データは、計測データAと、その同じ日の同時間帯のKotatabangの固定レーダーでの観測データを使用した。
- （1）まずは、ラジオゾンデのデータで、風速と単位容積当たりの質量を使い、直径100mの円筒形の仮想の成層圏タワーの各高度を通過する大気の質量と力を計算した。
- 実際には、東西の風は南北に引いた円筒の中心線に沿った幅100mの平面を想定しており、南北の風は、東西に引いた円筒の中心線に沿った幅100m、高度約20000mの平面を想定している。
- （2）次に、ラジオゾンデのデータの風速部分だけを、固定レーダーデータの時刻と高度からラジオゾンデ側の時刻と高度に最も近いデータを取り出して、入れ替えを行ったデータで、各高度を通過する大気の質量と力を計算した。



EARの風速データにラジオゾンデの気温と気圧と湿度のデータを被せる

- EARのデータは、データが取得出来ず「nan」と記載される部分が存在するので、それらを、線形補完で埋めた。
- 同じ高度での近接の計測時間との補完を優先し、それで補完出来ないデータについては、近接の高度との補完を行なった。
- 今回は、ラジオゾンデのデータ側に、最も近い高度と時間で比較して選択したEAR計測データの中で最も近い風速データのみを当て嵌め、ゾンデの水平移動を無視してコタババン固定レーダーのデータとして風量（大気）と力の試算を行なった。

計算結果：風の質量・風の力について

- 成層圏タワー全体質量試算（標高865m～20,005m）
 - 皮膜と内包気体その他を含め**68,975トン**
- ラジオゾンデ（2012/12/14 07:03～）毎秒（標高865m～20,005m）
 - 東風 質量 3,834トン（タワー質量の5.6%）**、風の力 20,738kN
 - 北風 質量 1,769トン（タワー質量の2.6%）、風の力 4,737kN
- EARデータのラジオゾンデ換算 毎秒（標高1040m～20,005m）
 - 東風 質量 4,358トン（タワー質量の6.3%）**、風の力 30,873kN
 - 北風 質量 2,067トン（タワー質量の3.0%）、風の力 8,723kN

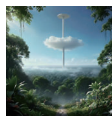
計算結果の評価

- ラジオゾンデとEARのデータでの試算では最も大きい東風成分の風の質量は、1秒間に**成層圏タワー質量の5.6%と6.3%**であった。
- 今回の計算は**地上から20,000mまでの総計**であり、部分的には逆に西風が吹く高度もあったので、成層圏タワーの構造体として必要な個々の箇所の強度の問題は、先の研究の課題として考慮しなくてはならない。
- 東風と比べ、南風は2.6%、3.0%と、小さかったが、これが赤道無風帯として通常の風況であるかどうかは、まだ分析不足である。
- Kototabangが南緯0.20度であることが理由であるのか、地形が理由であるのかを、今回は手が回らなかったが、南緯0.00度のPontianakや、南緯6.89度のBandung、南緯6.36度のSerpongのデータも比較して、**建設適地の策定条件**を探るヒントを得たい。

今後の研究・分析の方策

- ラジオゾンデのデータは、Kototabang放球だけでも1520回と多数存在するので、これらを**一括してデータ処理出来るよう、手法を開拓し**、赤道直下地域の成層圏タワー建設予定地の気圧・気温、湿度について推定が可能なようにしたい。又、EARのデータは、時間と高度が定まった形式で膨大に集積されているので、ラジオゾンデのデータを**安全率を見込んで援用**することで、成層圏タワー建設の際の強度設定に使えるよう、更に有用な手法の開拓を行いたい。
- 今回は、成層圏タワーを想定した空間全体を通過する大気について合計値だけの比較しか出来ていないが、実際には高度別の数値も得られているので、それによる、**流体力学的分析**の手法の応用を調査することと並行して、**成層圏タワー全体の挙動シミュレーション**も試行したい。
- 今回、データ分析に主に手作業でExcelを使っていたが、データ量が多く複雑化し、時間を要したので、**R言語**を使えるように学習し、数値処理を迅速化・高精度化したい。
- EAR-RASSとGNSS電波掩蔽との**組み合わせ**など、今回の研究の途上で存在を知った高度な手法が存在するようなので、その利用についても情報を収集したい。
- まだ、全く勉強不足ではあるが、Liderのような技術を、成層圏タワーそのものに組み込み、高高度から横方向にレーザー等を発射することで、常時周囲の空域の風況を観測し、塔体に強風が当たるとを事前予測出来るとしたら、適切な位置の膜構造ブロックの内包気体を放いたり、逆に増やしたりすることで、風による外力に対応する**能動的風圧打消し機構（Active Air Pressure Cancellation Mechanism）**の開発の可能性があり、これによって成層圏タワーを巨大化・強靱化するコストより遥かに安価に、安定したタワーの運用を可能にすることが出来るかも知れない。こちらについても情報収集し、可能性があるようなら、今後のプロジェクトに組み込んで行きたい。

ご清聴ありがとうございました



- 日本大学 理工学部 客員研究員
- 島崎文太
- shimazaki.jota24@nihon-u.ac.jp



STARLINK 衛星の公開軌道情報を使った熱圏大気密度推定
山本衛・惣宇利卓弥・古川颯太(京大 RISH)

Shear-induced Turbulence in the Tropical Tropopause Layer: Coordinated Observations Using the Equatorial Atmosphere Radar, balloon-borne turbulence and cloud particle instruments at Kototabang, Indonesia

Listi Restu Triani¹, Hubert Luce², Noersomadi¹, Abhiram Doddi³, Dale Lawrence³, Masatomo Fujiwara⁴, Tiin Sinatra^{1,5}, Asif Awaludin¹, Moch Syarif Romadhon¹, Hiroyuki Hashiguchi², Ridho Pratama¹, Fahmi Rahmatia¹

¹National Research and Innovation Agency (BRIN), Indonesia
²Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Japan
³University of Colorado, Boulder, USA
⁴Hokkaido University, Japan
⁵Faculty of Earth Science and Technology, ITB, Indonesia

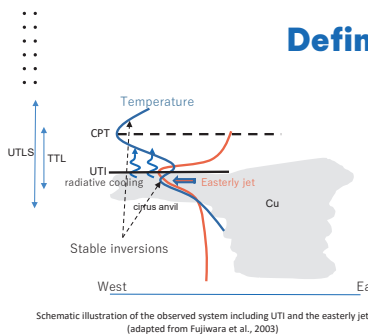
September 9, 2025



Outline

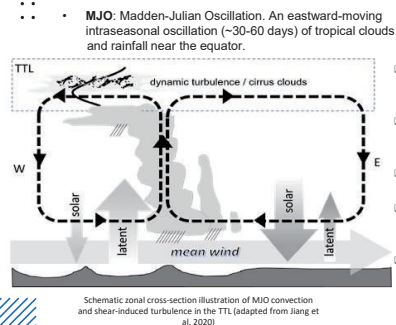
- 1 Background and Objective
- 2 Observation Setup
- 3 Observation Results
 - 3.1 Madden Julian Oscillation (MJO) and Horizontal Winds
 - 3.2 Tropical Tropopause Layer (TTL) Stratification and Stability
 - 3.3 Turbulence Measurements
 - 3.4 Cirrus Clouds below an Upper Tropospheric Inversion (UTI)
 - 3.5 Persistence of UTI
- 4 Summary and Perspective

Definitions



- **UTLS:** Upper Troposphere–Lower Stratosphere, 10–30 km above sea level.
- **TTL:** Tropical Tropopause Layer or Tropopause Transition Layer, 14–19 km, gateway for air exchange within UTLS.
- **CPT:** Cold Point Tropopause, ~16–18 km, coldest point of temperature, effective boundary to stratosphere.
- **Stable Inversion:** Layer where temperature increases with height, creating strong stability and suppressing mixing.
- **UTI:** Upper Tropospheric Inversion, a Stable Inversion in the upper troposphere, defined by Fujiwara et al. (2003), that forms above cirrus cloud anvils resulting from deep cumulus convection

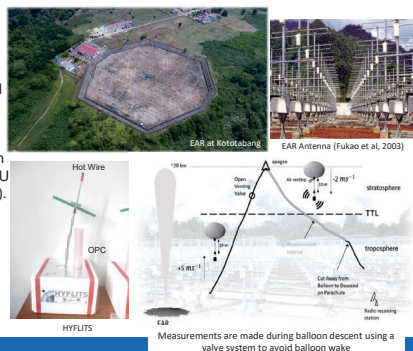
1. Background and Objective



- The TTL controls water vapor, aerosols, and energy exchange between troposphere and stratosphere (STE).
- Turbulence in the TTL originates from convection overshoot, Kelvin wave breaking, and horizontal wind shear
- Characteristics of "TTL turbulence" remain poorly documented due to limited observations. Its study is important because it may affect cirrus formation, dehydration processes, and even MJO variability.
- Objectives of this study: Investigating shear-driven turbulence in the TTL and its impacts on clouds, MJO, and wave activity using in situ and remote sensing measurements

Observation Setup

- **Location:** Kototabang, Agam/Bukittinggi, West Sumatra, Indonesia (0.20°S, 100.32°E)
- **Period:** January 7–16, 2025
- **Instruments & measurements:**
 1. **Equatorial Atmosphere Radar (EAR)** Wind profiles up to 20 km, 59 s temporal / 150 m range resolution and turbulence/stability parameters
 2. **HYFLITS* Balloon System** TKE dissipation rate (ϵ) from Hot Wire sensors, 1-second PTU and wind profiles (Colorado University, USA).
 3. **Optical Particle Counter (OPC)** Cloud particle (0.3–36 μm) concentration profiles. (Part of HYFLITS)



: HYFLITS Balloon System
[https://www.colorado.edu/irt/hypersonic-vehicles/about/Turbulent-Kinetic-Energy-\(TKE\)](https://www.colorado.edu/irt/hypersonic-vehicles/about/Turbulent-Kinetic-Energy-(TKE))

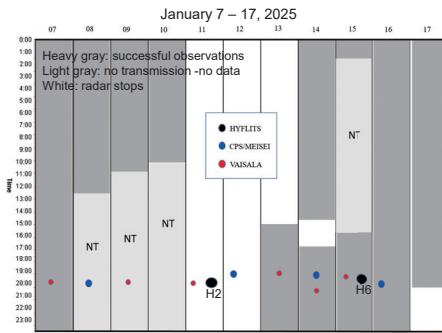
Observation Setup

- **Instruments:**
 4. **Radiosondes** Vaisala RS41-SG/SGP and Meisei RS11-G, 1-second PTU and wind profiles
 5. **Cloud Particle Sensor (CPS)** n Meisei RS11-G. Cloud particles (>2 μm) concentration profiles
 6. **Satellite Data** COSMIC-2 for tropo-stratospheric temperature profiles through GNSS radio occultation, Himawari IR/V data for high-level cloud detection



COSMIC-2: Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate – Mission #2
 GNSS: Global Navigation Satellite System

Observation Timeline

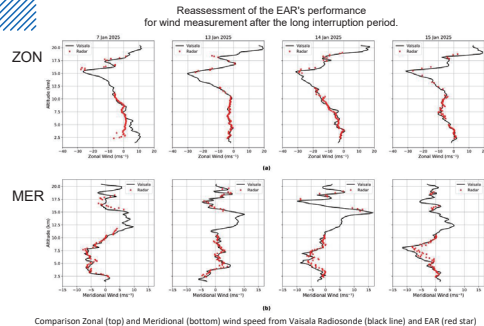


* The EAR was operated in a standard mode for continuous tropo-stratosphere observations

* Balloon flights performed during night (~20:00 LT) to avoid solar insolation and heavy rains

* Two HYFLITS sondes H2 on January 11 & H6 on January 15 (among 7) provided useable data in the TTL

Horizontal Winds



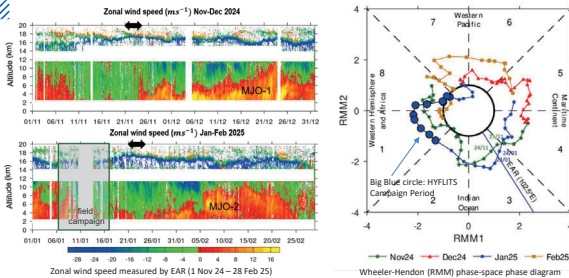
Zonal (top) and meridional (bottom) wind profiles measured by 4 radiosondes and the EAR (1-hour spectrum average) on 07, 13, 14, and 15 January 2025.

* The EAR wind data are sparse above 12 km due to lower sensitivity and outliers (clutter-like and external interferences).

* However, EAR data are available in the sheared regions of the easterly jet and show good agreement with radiosonde data. Very little variation in the zonal wind profiles from one day to the next.

→ EAR-derived winds can be used for the characterization of the dynamics of the TTL and its evolution.

MJO and Horizontal Winds

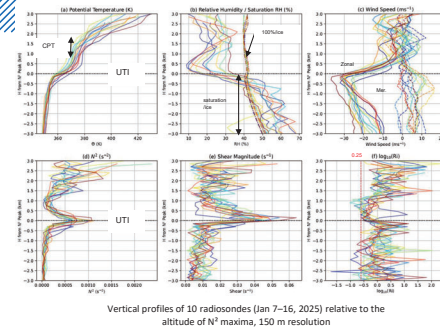


MJO Active is defined when the amplitude RMM1 and RMM2 ≥ 1 or the graphic is located outside the circle.

- MJO-1 on Nov 24-25, 2024
- MJO-2 on Jan 23-24, 2025

- Two active MJO phases (MJO-1 and MJO-2) occurred before and after the campaign period.
- The EAR **consistently** detected an easterly jet maximum near 16 km, with a maximum of vertical shear above it.
- Its detection was made possible by stronger and **persistent** radar echoes resulting from shear-induced turbulence.

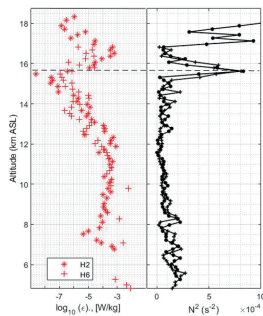
TTL Stratification and Stability



- A stable inversion (~20 K/km) is **persistently** observed ~2 km below CPT with little temporal variation in both depth and stability.
- This stable inversion may be a UTI, as it caps an ice-saturated layer (b). The air is dry above UTI.
- The maximum of the easterly jet tends to align with the bottom of the UTI, while the maximum wind shear and minimum Richardson number (~0.25) tend to be observed at the top of the UTI (typically a few hundred meters above).

→ Turbulence is likely to be observed above the UTI, not in the core of the UTI.

HYFLITS Turbulence Measurements



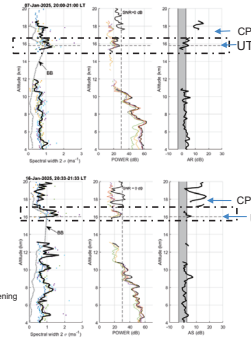
- The two HYFLITS profiles provided direct evidence of enhanced turbulence (TKE dissipation rates $\epsilon \sim 0.1-1$ mW/kg) above the UTI, 5 days apart (and weaker turbulence below). This represents the first direct measurement of turbulence in the TTL.

- Although the information is limited, it is consistent with a **persistent** turbulent mixing lasting for at least several days without erosion of the UTI.

→ Turbulence above the UTI is expected to contribute to the formation or maintenance of the stable inversion, rather than its breakdown.

TKE dissipation rate and N^2 profiles from HYFLITS02 (Jan 11) and HYFLITS06 (Jan 16)

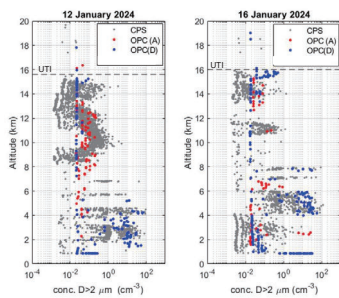
EAR Turbulence Measurements



- The EAR Doppler spectral width is enhanced above the UTI, associated with isotropic radar echoes (AR~0 dB), confirming its turbulent nature.
- In contrast, echoes above the CPT are aspect-sensitive (AR>10 dB), suggesting that specular reflection dominates.
- This pattern was consistently observed with EAR (not shown) during all balloon flights.

BB: Beam Broadening

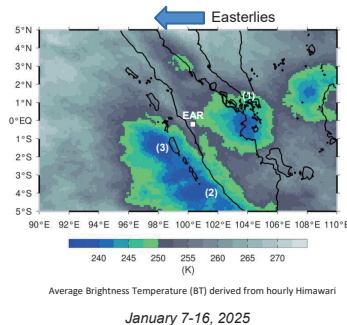
Cirrus Clouds below UTI



- Cloud particles with very low concentration are also *consistently* detected from OPC and CPS *below* the UTI, consistent with RH measurements showing saturation/ice.
- The presence of (subvisible) cirrus clouds suggests that radiative cooling at cirrus tops can generate or contribute to the maintenance of the UTI (Fujiwara et al. 2003).

The absence (or sporadic presence) of cloud particles above the UTI suggests that the UTI prevents vertical mixing and particulate exchanges. Shear-driven turbulence above UTI should not directly affect the cloud formation or evolution below UTI

Cirrus Clouds below UTI

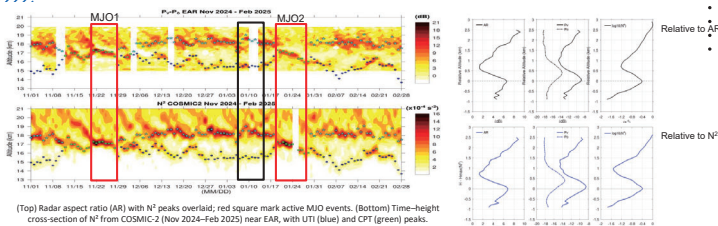


From Himawari satellite data:

- Mean BT ≤ 250 K indicates deep convective clouds, observed near Singapore (1), offshore western Bengkulu (2), and around Siberut Island (3).
- Mean BT of 250–260 K near the EAR station suggests predominantly non-cumuliform or stratiform clouds.

The cirrus clouds can result from the outflow of these convective systems.

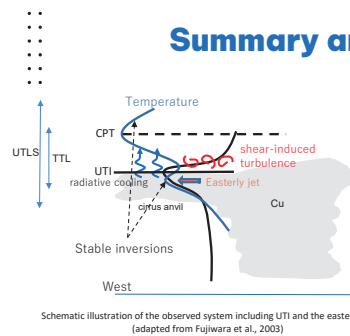
Persistence of UTI



(Top) Radar aspect ratio (AR) with N^1 peaks overlaid; red square mark active MJO events. (Bottom) Time–height cross-section of N^1 from COSMIC-2 (Nov 2024–Feb 2025) near EAR, with UTI (blue) and CPT (green) peaks.

- COSMIC-2 shows that the UTI was very persistent (15–17 km) for at least 4 months without MJO impacts.
- During active MJO, UTI merges with the second inversion above CPT due to convective upward motion and downward CPT motions due to wave activity.
- AR peaks align very well with N^1 (UTI) peaks confirming the dynamically stable feature of the UTI.
- AR is minimum and oblique echo power is maximum above UTI confirming persistent turbulence above UTI.
- Turbulence above UTI continuously generate temperature irregularities through entrainment and does not breakdown the UTI for several consecutive months.

Summary and Perspective



Schematic illustration of the observed system including UTI and the easterly jet (adapted from Fujiwara et al., 2003)

Summary

- Persistent turbulence above a stable inversion (15–16 km) in the TTL was captured by HYFLITS and EAR measurements. Turbulence was linked to the easterly wind shear.
- The stable inversion is likely a UTI as defined by Fujiwara et al. (2003). Persistent cirrus maintained by convective outflow and an easterly advection was confirmed by cloud particle sensors and satellite data.
- Turbulence likely reinforces rather than erodes UTI and should complement the mechanism of UTI formation described by Fujiwara et al (2003).

Perspective

- A second field campaign in 2026 will focus on acquiring additional HYFLITS measurements during active MJO conditions to better quantify TTL turbulence and its role in stable inversion dynamics.

THANK YOU!

BRIN The 19th Symposium on MU Radar and Equatorial Atmosphere Radar

Coordinated observation of turbulence echo in the tropical troposphere with hourly radiosondes and the equatorial atmosphere radar (EAR)

Tiin Sinatra, Noersomadi, Asif Awaludin, Halimurrahman, Nani Cholianawati, Anis Purwaningsih, Hubert Luce, Hiroyuki Hashiguchi and Toshitaka Tsuda

Research Center for Climate and Atmosphere, National Research and Innovation Agency (BRIN), Indonesia
Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Japan
Doctoral Program in Earth Science, Faculty of Earth Sciences and Technology, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

September 9, 2025

INTRODUCTION

- + This study is concerned with time-height variations of the turbulence echo at 3-9 km altitude observed with EAR located at 100.3°E, 0.2°S, Kototabang, West Sumatera, Indonesia.
- + Atmospheric parameters were observed 25 times every hour by simultaneously launched radiosondes from 06 UT on 15 December 2005.
- + We especially focus on the relation

$$\eta \propto M^2 / (N^2 F) \epsilon^{2/3}$$

η = the radar reflectivity
 M = refractive index gradient (dn/dz)
 N^2 = Brunt Vaisala frequency squared
 ϵ = turbulence energy dissipation rate
 F = is the filling factor of turbulence in the radar range volume

INTRODUCTION

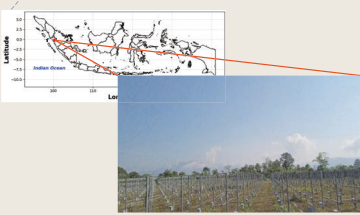
- + Definition of M by Ottersten, 1969

$$M = -77.6 \times 10^{-6} \frac{p}{T} \left(\frac{N^2}{g} + 15600 \frac{q}{T} \frac{N^2}{g} - \frac{7800}{T} \frac{dq}{dT} \right)$$
, pressure (p), temperature (T), specific humidity (q).
- + For a humid atmosphere: $N^2 = \frac{g}{T_v} \left(\frac{dT_v}{dz} + \frac{g}{c_p} \right)$
- + $\epsilon \approx 0.5 \sigma^2 N$, σ = The turbulent contribution to half spectral width obtained by removing the beam-broadening effects.
- + Propose method for calculating F

$$F = \% Ri, \text{ for } Ri < 0 \text{ and } 0 < Ri < 0.25$$
 - + Richardson Number (Ri) calculated at 30 m vertical resolution, $\% Ri$ was derived over 150 m intervals to represent the radar's effective range resolution.
$$Ri = \frac{N^2}{(du/dz)^2 + (dv/dz)^2}$$
- + For saturated moist atmosphere, we used the model of N_m^2 given by Duran and Klemp (1982).

EAR

- + Location: 100.3°E, 0.2°S
- + Temporal resolution of archived data: 10 minutes
- + Range sample interval: 150 m



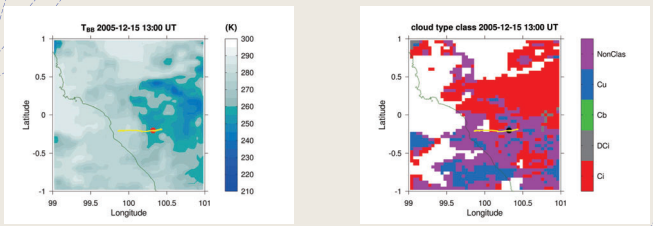
Radiosonde

- + Hourly data collection: 25 radiosondes were launched every one hour, beginning at 06 UT on December 15, 2005
- + Temperature, relative humidity (RH), pressure (P), and wind velocity (u , v) profiles were sampled every 2 seconds (~10 m)



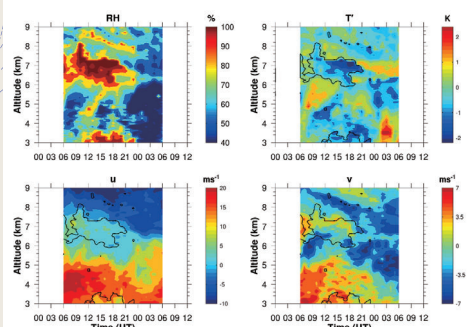
Vaisala RS41-SG radiosonde

Background Condition on 15 – 16 December 2005: Convective Clouds



Satellite images of the infrared temperature (blackbody temperature; T_{BB}) and cloud type classification according to Hamada et.al. (2004) at 13-19 UT on 15 December 2005. Ci is cirrus, DCi is dense cirrus, Cb is cumulonimbus, Cu is cumulus. The circle is the EAR2 site, the yellow line indicates radiosonde trajectory.

Background Condition on 15 – 16 December 2005: Relative Humidity, Temperature, Horizontal Winds



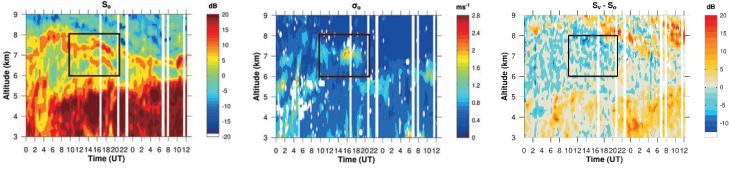
- + Time-height contour plots of relative humidity (RH) with respect to ice (%), temperature anomaly (T'), zonal wind velocity (u) and meridional wind velocity (v) at a height resolution of 10 m. The overlaid black lines indicate the $RH = 90\%$.
- + Cloud convection passed over the EAR site during 9 and 23 UTC on 15 December. Radiosonde data indicated increase of the relative humidity (RH) below about 8 km.

Turbulence Echo

Signal to noise ratio for oblique beams:
 $S_o = \frac{P_o}{P_N} \left(\frac{r}{10} \right)^2$, $\Delta t = 10$ min.; $\Delta r = 150$ m.

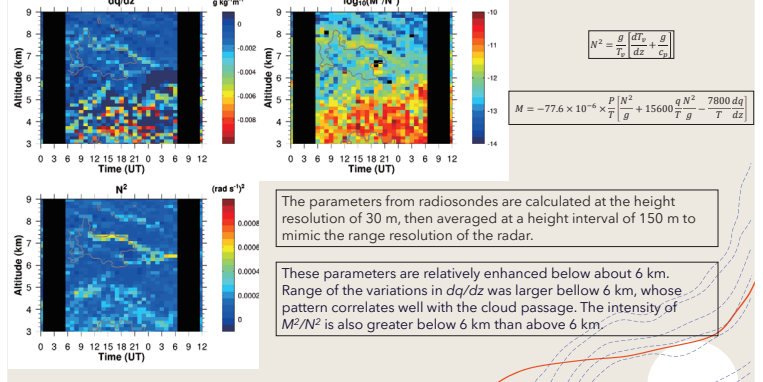
S_o (< 6 km) is larger than S_o (> 6 km), but the echo intensity at 3-6 km was weaker at 2-6 UTC.

The spectral width of oblique beams (σ_o) is analyzed by removing the beam broadening effects.
 An enhanced hot spot of σ_o appeared during 14-18 UT centered at 7 km, which was associated with an interesting variation of S_o , suggesting a turbulence billow structure.

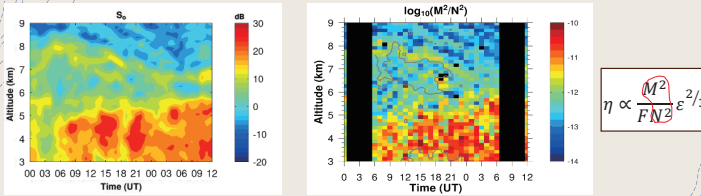


Time-height contour plots of S_o (dB), σ_o (ms^{-1}) and $S_o - S_o$ (dB), with a time resolution of 10 minutes and a range resolution of 150 m, over 37 hours from 00:00 UT on 15 December 2005. (b) and (e) panels show the mean values derived from three oblique beams (north, east and south)

N^2 and M from Radiosonde

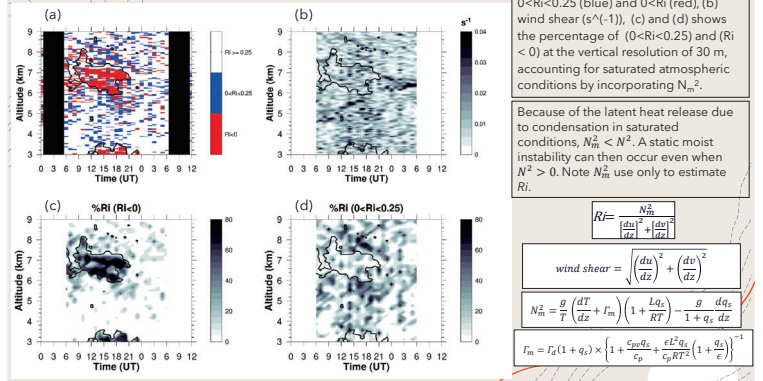


Relationship between $\log_{10}(M^2/N^2)$ and S_o

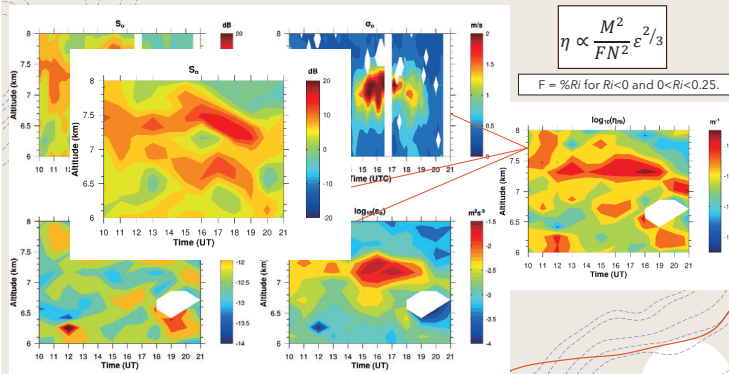


The two-dimensional cross-correlation function (CCF) are calculated between $\log_{10}(M^2/N^2)$ and S_o as a function of altitude lag and time delay in the two height regions above and below 6 km.
 Max CCF = 0.61 (3-5.5 km) & 0.62 (6-9 km) → Moderate agreement

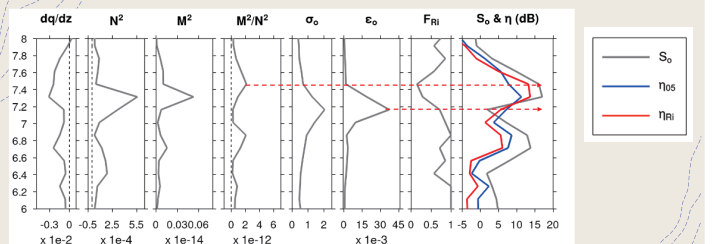
Richardson Number



Notable Turbulence Echo Event

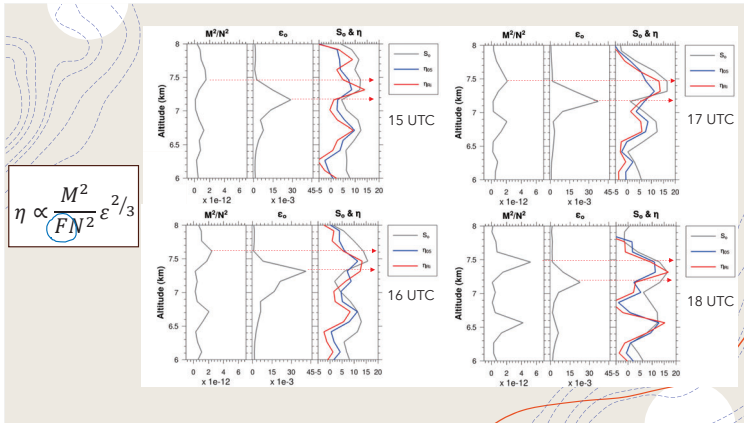


The profiles of dq/dz , N^2 , M^2 , M^2/N^2 , σ_o , ϵ_o , S_o , $\eta_{0.5}$ and η_{Ri} at 17 UT



We defined F as
 1. Constant $\rightarrow F = 0.5$
 2. $F = \% Ri$

$$\eta \propto \frac{M^2}{FN^2} \epsilon^{2/3}$$



$$\eta \propto \frac{M^2}{FN^2} \epsilon^{2/3}$$

Summary

- + We study the characteristics of turbulence scattering echo in the equatorial troposphere referring to the fundamental relation; $\eta \propto M^2/(N^2 F) \epsilon^{2/3}$ on December 15, 2005. The unprecedented hourly radiosonde data enabled us to analyze the time continuous variations of the atmospheric parameters, which are indispensable to investigate the behavior of M , Ri , ϵ and F .
- + The relationship between S_0 and $\log_{10}(M^2/N^2)$, finding a moderate agreement, it does not seem to fully describe the characteristics of S_0 .
- + Convective clouds (09-23 UT) induced strong turbulence, leading to enhanced echoes (S_0) and the wide spectral width (σ_0).
- + Individual hourly profiles during 15:00-18:00 UT at 6-8 km indicate that the local maximum of S_0 does not coincide with the peaks of either M^2/N^2 or ϵ_0 , but it locates between the two peaks. Therefore, M^2/N^2 does not fully explain the distribution of S_0 , but ϵ_0 must be taken into account.
- + The peak altitude agrees better between η_{Ri} and S_0 than with $\eta_{0.5}$, indicating that η_{Ri} reproduces the height distribution of S_0 well.

THANK YOU!

Analysis of the MJO impact on the aspect sensitivity in the UTLS by Equatorial Atmosphere Radar

Noersomadi¹⁾, Hubert Luce²⁾, Tiin Sinatra³⁾, Hiroyuki Hashiguchi²⁾, Nurjanna Joko Trilaksono³⁾

¹⁾ Research Center for Climate and Atmosphere, BRIN

²⁾ RISH, Kyoto University

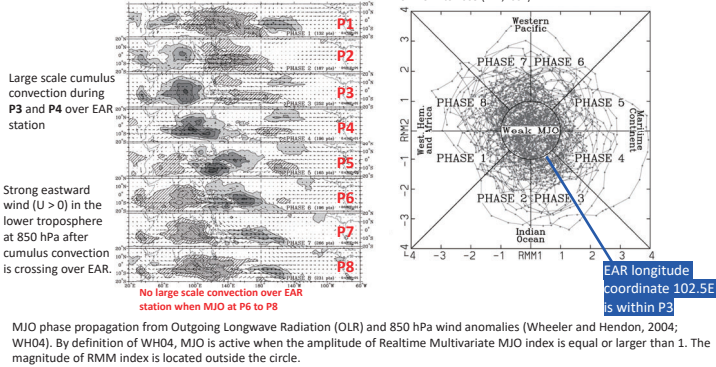
³⁾ Faculty of Earth Science and Technology, ITB



Outline

- Introduction
- Case study MJO Nov 2024 to Feb 2025
- Statistical analysis for the MJO cases from Jan 2016 to Dec 2019
- Observed variation of aspect ratio for the MJO cases from Jan 2001 to Dec 2019
- Comparisons Echo Power, N^2 peak and altitude of the N^2 peak
- Summary

Introduction



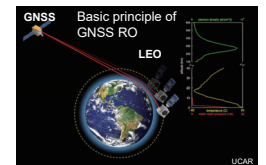
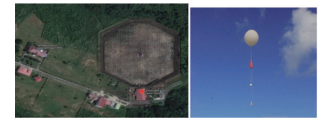
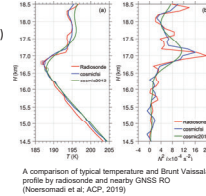
Data

- Echo power and wind from EAR observation (102.5E, 0.25 865 m).
- Temperature profiles observed by COSMIC2 GNSS Radio Occultation with location of occultation within 3° radius from EAR station for the case study Nov 2024 – Feb 2025.
- The date with no COSMIC2 profile within 3° radius is defined as no observation data (missing value).
- The average distance for all COSMIC2 profiles from EAR station throughout Nov 2024 – Feb 2025 is $1.120.63^\circ$.
- Temperature profiles obtained with radiosonde RS-41 at Singapore station (103.888E, 1.34041N altitude 21 m = 2.07° from EAR site) for the case study 2016 – 2019. (www.gwuan.org)

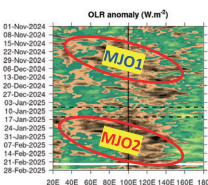
Brunt Vaissala frequency squared (N^2) is calculated using observed temperature profiles

$$N^2 = g/T (dT/dz + g/c_p)$$

z : altitude
 g : gravity acceleration
 c_p : heat capacity at constant pressure

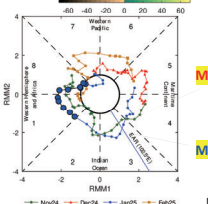


GNSS RO is a technique where a Low Earth Orbit (LEO) satellite measures the bending of Global Navigation Satellite System (GNSS) signals as they pass through the Earth's atmosphere to retrieve electron density, temperature, pressure, and water vapor.

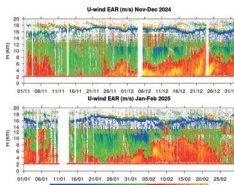


Case study MJO events Nov 2024 to Feb 2025

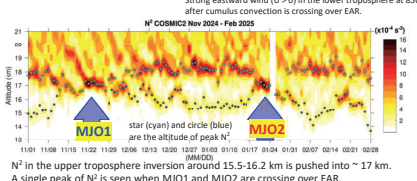
MJO1 and MJO2 are passing through the EAR station on Nov 24-25, 2024 and on Jan 23-24, 2025, respectively.



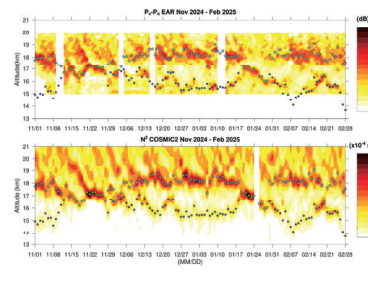
results from Triani et al., 2025



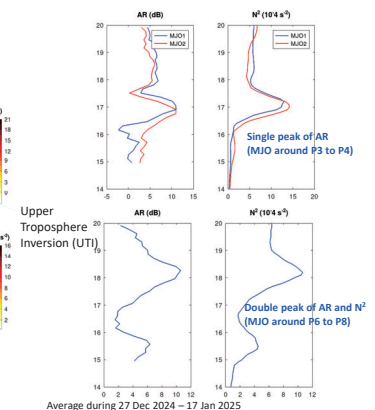
Strong eastward wind ($U > 0$) in the lower troposphere at 850 hPa after cumulus convection is crossing over EAR.



Pv: echo power at vertical beam
 Po: average echo power at oblique beam
 Aspect Ratio (AR) is defined as
 $AR = P_v - P_o$



results from Triani et al., 2025

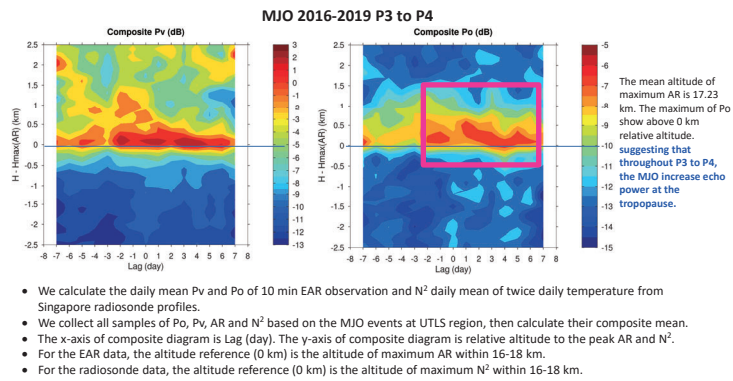
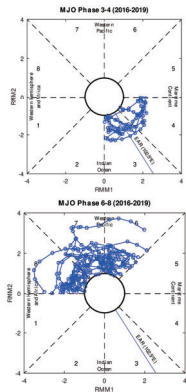


Case study MJO events 2016 – 2019

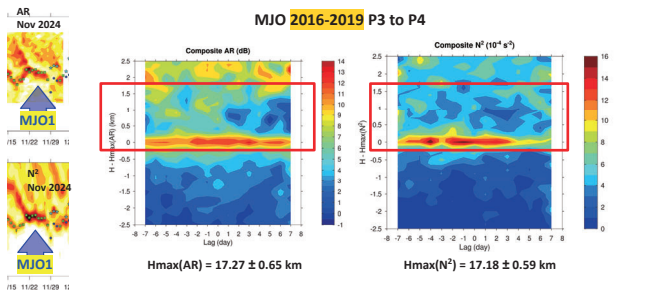
Supporting data :
Realtime Multi variate MJO (RMM) index from BoM Australia.

Method :
Search the MJO events when passing through within Phase 3 (P3) and Phase 4 (P4) regions with amplitude >= 1 based on the RMM index.
Then, select the cases when the time duration within P3 and P4 equal or more than 10 days.
Define the middle date as the 0 lag day by assuming it is the day when MJO passed over the EAR site or nearly across the border line between P3 and P4 in the RMM diagram.
For example, if the time duration within P3 and P4 is 16 or 17 days, then the 9th day is defined as the 0 lag day.

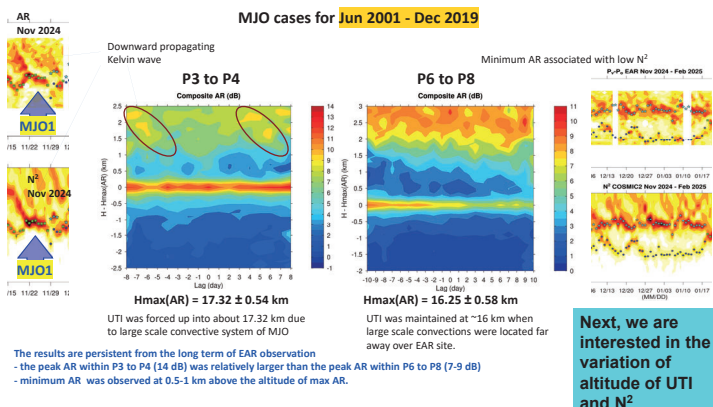
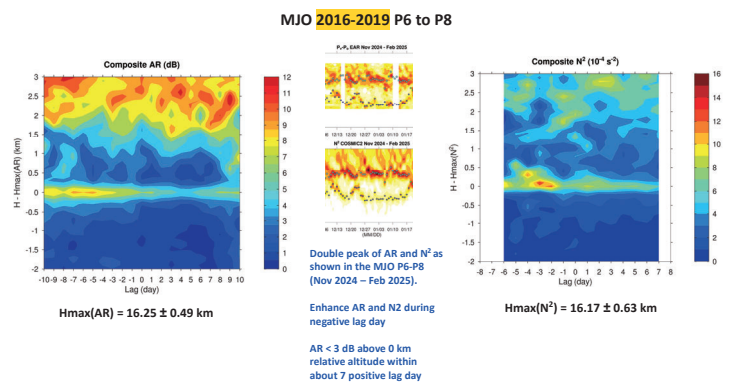
The same procedure was also applied for the cases when MJO at P6 to P8.



- We calculate the daily mean Pv and Po of 10 min EAR observation and N² daily mean of twice daily temperature from Singapore radiosonde profiles.
- We collect all samples of Po, Pv, AR and N² based on the MJO events at UTLS region, then calculate their composite mean.
- The x-axis of composite diagram is Lag (day). The y-axis of composite diagram is relative altitude to the peak AR and N².
- For the EAR data, the altitude reference (0 km) is the altitude of maximum AR within 16-18 km.
- For the radiosonde data, the altitude reference (0 km) is the altitude of maximum N² within 16-18 km.



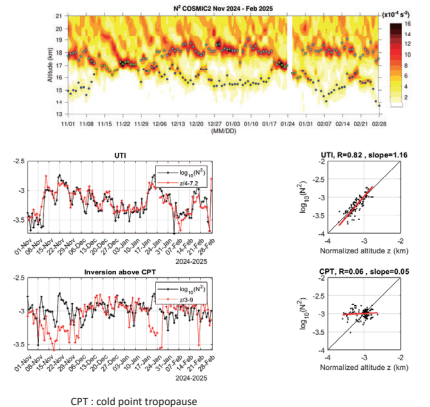
The mean altitude of maximum AR by EAR and maximum N2 by radiosonde is 17.23 km and 17.24, respectively.
An interesting feature shows over lag positive days where AR indicate minimum at about 0.5-1 km altitude above the tropopause coincide with the low values of N², suggesting MJO enhance the isotropic turbulence at above the peak AR.

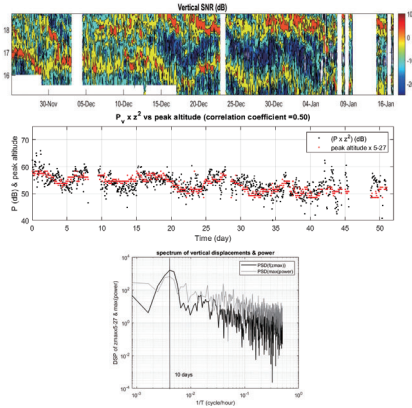


Comparisons Echo Power, N² peak and altitude of the N² peak

Top panel:
Black: Time series of the UTI peak of log10(N²)
Red: Time series of its normalized altitude z_{norm}. The normalization is: z_{norm}=z/3-8.5 (km) to fit the level of log10(N²).
The correlation (0.82) between the two is spectacular. There is linear relationship between log10(N²) (or log10(N²)) and z_{norm}.
The static stability of the UTI linearly increases (decreases) when its altitude increases (decreases).
The right panel is the corresponding scatter plot: The regression is close to 1 (0.82, equal to correlation, by chance).

Bottom panel
The same analysis for the inversion above tropopause about 17 km. The correlation is very poor (0.06) and the regression is also close to 0, so that there is no relationship between the two.
The relationship between altitude and amplitude of N² is specific to UTI.

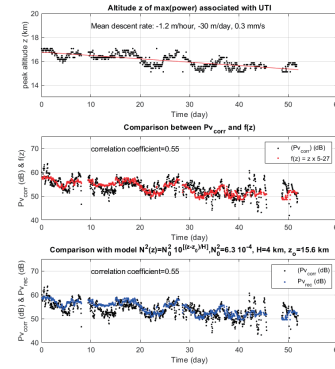




(Top)
Hourly-averaged Signal to Noise Ratio (SNR) from vertical beam between 14 and 19 km from Nov 26 to Jan 16. Here, we focused on the first peak of echo power associated with the Upper Tropospheric Inversion (UTI).

(Middle)
Black dots: Time series of echo power associated with UTI, corrected from range attenuation effects (i.e. $P_v \times z^2$, in dB), z =altitude.
Red dots: Time series of normalized altitude z_{norm} of the echo power peak.
The normalization is: $z_{norm} = z \times 5 - 27$. The coefficients have been applied to fit the levels of $P_v \times z^2 = P_{vcor}$
There is a clear correlation between the two (corrcoef=0.5). When the altitude **increases** (decreases), then P_{vcor} **increases** (decreases) linearly (at least in the first order).

(Bottom)
There is a dominant oscillation at 10 days for both parameters (the frequency spectra of P_{vcor} and z_{norm}).
A modulation by a Kelvin wave ?



Proposed model

$$\begin{aligned} & \log_{10} \left(\frac{N^2}{N_0^2} \right) \\ \text{then} &= \frac{z - z_0}{H} (1) \\ &= H \log_{10} \left(\frac{N^2}{N_0^2} \right) \\ &+ z_0 (2) \\ &= (P_v \times z^2)_{dB} \\ &= 5z \\ &= 5z \end{aligned}$$

all the results are consistent with:
- a time variation of N^2 (UTI) with altitude z only
- A variation in echo power over time caused solely by changes in N^2 , which are themselves due to altitude variations.

→ A remarkable relationship.

Summary

- The MJO increases echo power at the tropopause, forcing the peak AR into about 17.2 km.
- The MJO enhance the isotropic turbulence at above the peak AR associated with low N^2 values.
- Double peak of AR and N^2 as shown in the MJO P6-P8 (large scale convections were located far away over EAR site) are persistent.
- AR < 3 dB above 0 km relative altitude within about 7 positive lag day.
- We demonstrated that time variation of N^2 (UTI) with altitude z only.
- We found a variation in echo power over time caused by variations in N^2 , which are themselves due to altitude variations.

Humidity Profiling by Wind Profiler with Radio Acoustic Sounding System using Machine Learning

Asif Awaludin¹, Noersomadi¹, Toshitaka Tsuda², Hiroyuki Hashiguchi², Nani Cholianawati¹, Halimurrahman¹, Tiin Sinatra¹, Anis Purwaningsih¹,

¹Research Center for Climate and Atmosphere, National Research and Innovation Agency (BRIN), Bandung, Indonesia

²Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Japan



Introduction

- Specific humidity is related to the observed M (M^*), which is described as

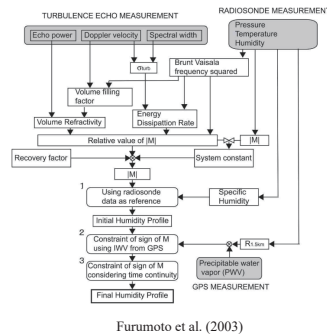
$$M^* \propto \eta^{1/2} F^{1/2} N e^{-1/3}$$

- The retrieved M^* is in an absolute value, and the Filling Factor (F) of turbulence is estimated through (NOAA) Aeronomy Laboratory C_n^2 model
- The volume reflectivity depends on the radar power echo and radar set.
- Calculating q using EAR data is highly dependent on M , which faces challenges since its negative or positive sign is not provided by the radar.

Introduction

Several methods have been proposed to estimate q using WPR.

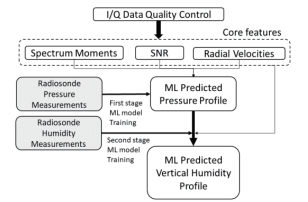
- One approach links q with various turbulence-related parameters measured by WPR-RASS (Tsuda et al., 2001).
- Another study enhanced this work by utilizing WPR to identify transition levels, such as the top of the boundary layer. This technique helps align humidity profiles by adjusting calibration coefficients, thereby reducing error (Said et al., 2018).
- Furumoto et al. (2003) focuses on determining q using turbulence-derived values obtained from EAR. This method establishes an upper boundary by incorporating total water vapor data from radiosondes or GPS, which allows for the generation of continuous q profiles in the tropical troposphere
- However, these methods have not proven fully effective.



Furumoto et al. (2003)

Introduction

- Amairch et al. (2023) proposed a method, where the moment data from the raw spectrum is used to predict the relative humidity in two-cascaded steps.
- In the first step, the moment data is used as input features to predict the pressure.
- In the second step, the predicted pressure and moment data are combined to predict the relative humidity (RH) without using temperature.
- The best model presented R^2 of 0.778 and MSE of 93.83



Amairch et al. (2023)

$$q(z) = \theta^2 \int_{z_0}^z (1.67 \times 10^{-6} \frac{MT^2}{P} + \frac{1}{7750} \frac{d\theta}{dz}) \theta^{-2} dz + q_0 \quad (1)$$

$$C_n^2 = \alpha^2 \epsilon^{2/3} M^2 \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 \quad (2)$$

Introduction

The primary objective of this study is to develop an accurate and interpretable ML method to estimate vertical profiles of q .

This study proposes integrated measurements from the EAR-RASS, with a particular focus on utilizing T as the main novelty

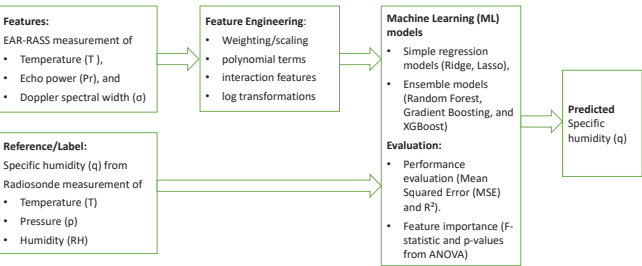
Datasets

EAR-RASS and Vaisala RS-41SG radiosondes collected during an observation campaign in Kototabang from August 31 to September 2, 2016.

- The datasets consist of six profiles, each containing a total of 37 data points (from 2.065 km to 7.465 km) recorded at 150-meter intervals.
- To estimate specific humidity, features such as T , P , and σ from the EAR-RASS measurements were used for training (80%) and testing (20%) the machine learning (ML) models.
- q , which serve as reference/label, are estimated from radiosonde data.



The proposed method



Results

Performance of Models With Different Feature Engineering and Hyperparameters

Model	Feature Engineering	Hyperparameters	MSE	R ²
Ridge	Weighted Features	{alpha:1.0, random_state:42}	0.955	0.885
Lasso	Weighted Features	{alpha:1.0}	1.113	0.863
Ridge	None (Standard)	{alpha:1.0, random_state:42}	1.161	0.860
Ridge	Selected Features (Poly + Interaction + Transformed)	{alpha:1.0, random_state:42}	1.177	0.858
Ridge	Polynomial + Interaction + Transformed Features	{alpha:1.0, random_state:42}	1.322	0.840

Summary

Ridge models, enhanced through feature engineering, significantly outperformed other models, achieving an MSE of 0.955 and an R^2 of 0.885. The effectiveness of Ridge and Lasso models demonstrates that the selected features made these models simple, efficient, and robust.

A robust model fit was confirmed as a diverse suite of algorithms, including regularized linear models and complex ensembles, all demonstrated strong predictive power with R^2 exceeding 0.82 and MSE values below 1.44.

These models outperformed those that did not incorporate T and only depend on moment data of WPR, such as wind speed, SNR, and Doppler spectral width from WPR.

This highlights the crucial role of T in the analysis. Despite the challenges posed by limited data, the research produced valuable findings.

References

• T. Tsuda, M. Miyamoto, and J. Furumoto, "Estimation of a Humidity Profile Using Turbulence Echo Characteristics," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 18, pp. 1214–1222, 2001. doi: 10.1175/1520-0426(2001)018<1214:EOAHPU>2.0.CO;2.

• F. Sa'id, B. Campistron, and P. Di Girolamo, "High-resolution humidity profiles retrieved from wind profiler radar measurements," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 11, pp. 1669–1688, 2018, doi: 10.5194/amt-11-1669-2018.

• J. Furumoto, T. Tsuda, S. Iwai, and T. Kozu, "Continuous Humidity Monitoring in a Tropical Region with the Equatorial Atmosphere Radar," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 23, pp. 538–551, 2006. doi: 10.1175/JTECH1868.1.

• A. Amairah, Y. Zhang, and P. W. Chan, "Atmospheric Humidity Estimation From Wind Profiler Radar Using a Cascaded Machine Learning Approach," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observations Remote Sensing*, vol. 16, pp. 6352–6371, 2023. doi: 10.1109/ISTARS.2023.3292351.

Equatorial Plasma Bubble detected by L-Band Synthetic Aperture Radar and GPS-TEC Observations in Indonesian Regions

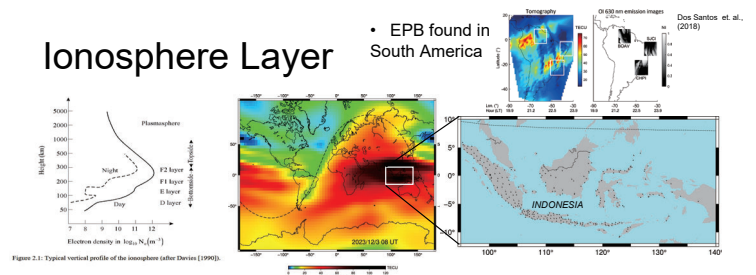


Ihsan Naufal Muafiry

The 19th Symposium on MU Radar and Equatorial Atmosphere Radar

Ionosphere Layer

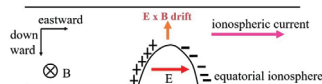
- EPB found in South America



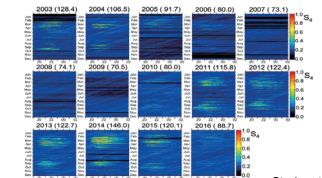
- The ionosphere is a charged atmospheric layer, varying with altitude and time due to solar activity, day-night cycles, and seasons.
- Equatorial ionization anomalies (EIA) feature two electron density peaks near the magnetic equator.
- Indonesia, situated along the equatorial region, experiences strong ionospheric dynamics, including Equatorial Plasma Bubbles (EPB).

#1 Equatorial Plasma Bubble (EPB)

Rayleigh-Taylor instabilities (RTI) causes plasma bubble

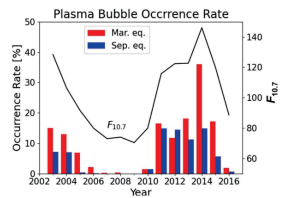


EAR conference (2023)

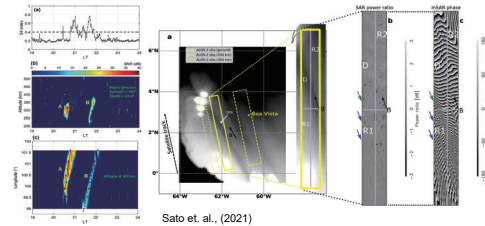


Otsuka et al., (2023)

- Plasma bubble is significant reduced electron density
- The eastward electric field at sunset time induces upward plasma drifts at the equator
- EPB occurrences peak during equinoctial months (March and September) due to high solar activities



#2 Equatorial Plasma Bubble (EPB)



Abadi et al., (2024)

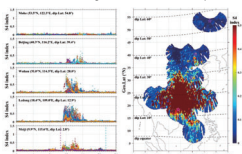
In Indonesia, EPB has been measured through GNSS scintillation and Very High Frequency (VHF) radar.

This provides opportunity to detect EPB with ALOS-2/PALSAR-2 images over Indonesian Regions

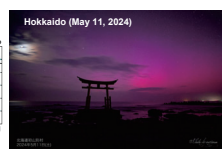
- Sato et al. (2021) reported two-dimensional images of plasma bubble over northern Brazil using ALOS-2/PALSAR-2 images
- Stripe-like patterns are observed overlapped with airglow image associated with the structure of equatorial plasma bubble (EPB)

May 2024 Geomagnetic Storms

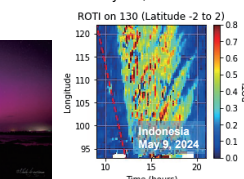
EPB after Geomagnetic Storms in 2023 (Sun et al., 2024)



- In May 2024, a powerful geomagnetic storm occurred, peaking on May 11 with a Dst index of -412 nT, marking one of the most intense geomagnetic disturbances (weathernews.jp)
- In Japan, low-latitude aurora was observed
- During geomagnetic storm, unseasonal EPB can occur due to growth of R-T instability through storm-time electric field
- In Indonesia, clusters of EPB found on May 9th, 2024



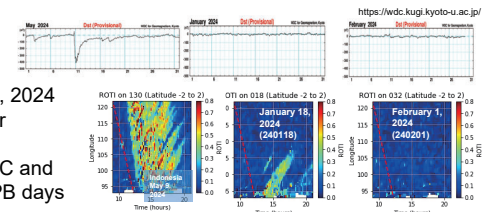
<https://weathernews.jp/>



<https://gatokaca.brin.go.id/petaionosfer/ionosphericmap/>

Our goal:

1. Detect EPB on May 9th, 2024 using SAR images over Kalimantan and Bali
2. Validate with GNSS-TEC and SAR images on non-EPB days



<https://gatokaca.brin.go.id/petaionosfer/ionosphericmap/>

The entire Indonesian region covered by high values of TEC irregularities associated with EPB on 240509

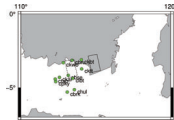
Details on the ROTI map generation is included in Abadi et al (2025)

Datasets:

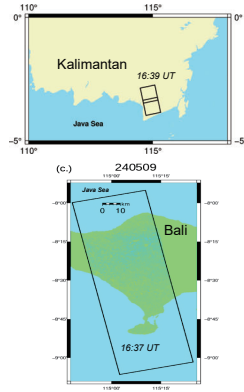
1. ALOS-2/PALSAR-2

Area	Dates (yyymmdd)	Path Frames	Acquisition time
Kalimantan	240118	130 (7110, 7120)	16:39 UT (23:39 LT)
	240201	130 (7110, 7120)	16:39 UT (23:39 LT)
	240509	130 (7110, 7120)	16:39 UT (23:39 LT)

2. GNSS Data (in Indonesia)



- Some GNSS stations are used to validate the TEC changes from SAR based estimation



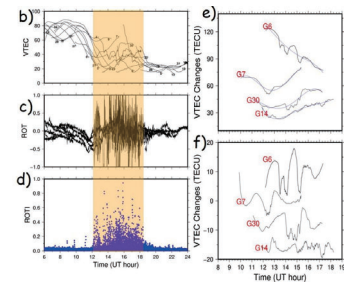
GNSS-TEC

GNSS-TEC is method for measuring total electron content using phase differences of two GNSS signals (L1 and L2). The Rate of TEC (ROT) is calculated as the difference in TEC between consecutive observations, commonly at 30-second intervals. The Rate of TEC Index (ROTI) represents ionospheric irregularities and is computed as the standard deviation of ROT values within a specific time window, such as 5 minutes. The depletion of TEC made by plasma bubble are isolated using 60 minutes running average

$$STEC = \left(\frac{1}{40.208} \right) f_1^2 f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \Delta L_4$$

$$ROT = \frac{TEC(t) - TEC(t - \delta t)}{\delta t}$$

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}$$



SAR Azimuth Offset (Δx)

Yamashita et al., (2022) describes SAR azimuth offset for ionosphere changes (TEC) in a single image as follows:

$$\Delta x = 2K \frac{v_{ion}}{c^2} \frac{v_{sat}}{D_R} \frac{\partial TEC}{\partial x}$$

$$\text{where } \frac{2 v_{sat}^2}{c R_0} = \frac{D_R}{f_0}$$

$$\Delta x = \frac{K v_{ion}}{f^2 v_{sat}} \frac{\partial TEC}{\partial x} \cdot R_0$$

$$\text{where } v_{ion} = \frac{h_{iono}}{h_{sat}} v_{sat}$$

$$\Delta x = \frac{K h_{iono}}{f^2 h_{sat}} \frac{\partial TEC}{\partial x} \cdot R_0$$

$$K = 40.28 \text{ m}^3/\text{s}^2$$

v_{ion} = the velocity of the ionospheric piercing point (100 m/s)

v_{sat} = the velocity of the satellite

c = speed of light (3×10^8 m/s)

f = the center frequency (1270 MHz)

R_0 = zero doppler range (782 km)

h_{sat} = the altitude of SAR satellites (630 km)

h_{ion} = the effective height of ionosphere (300 km)

TEC gradient along azimuth track

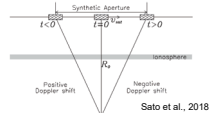
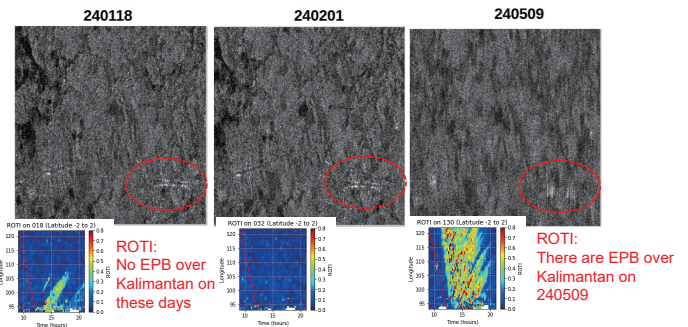


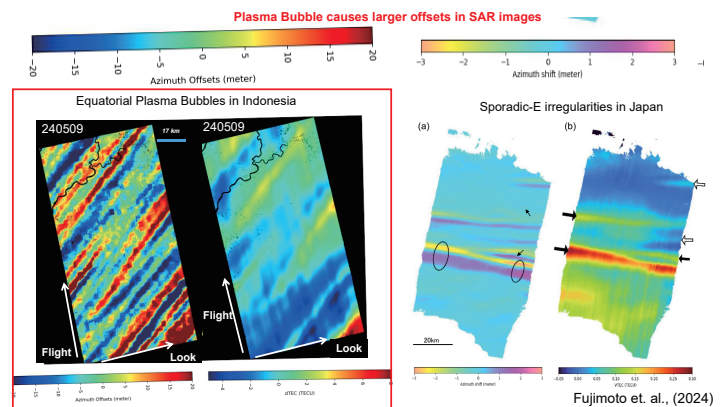
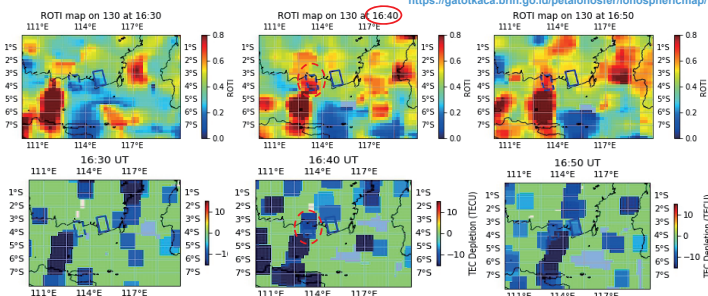
Fig. 1 Geometric configuration of azimuth-direction SAR imaging through the ionosphere. The progression of the antenna over the synthetic aperture period corresponding change in direction and Doppler shifts are shown.

SAR image

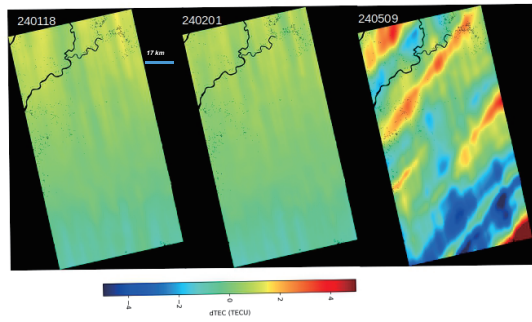
On EPB day, SAR image is already unfocused compared to non-EPB days.



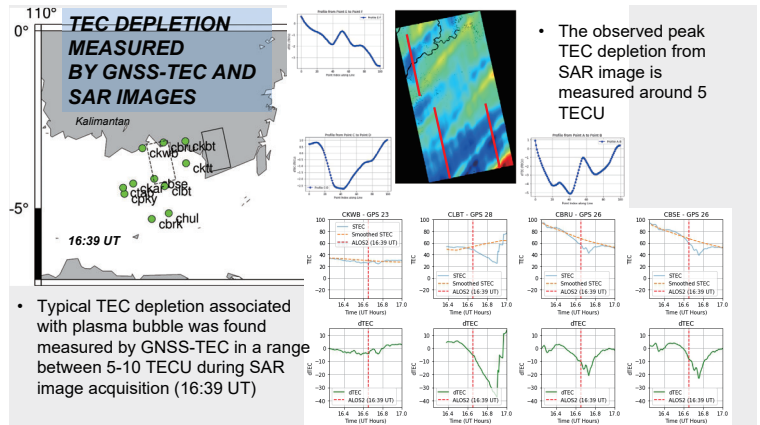
ROTI and TEC Depletion: Kalimantan (May 9th 2024)



TEC changes on non-EPB and EPB days

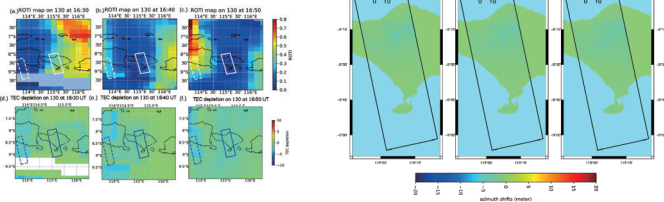


- TEC changes on January 18th and February 1st are smaller than during EPB on May 9th.



SAR Image over Bali

- SAR frames are covering both land and ocean regions, and the ocean region is masked out
- High ROTI is not overlapped with SAR image during Bali acquisition (16:37 UT)
- SAR image is azimuthally well-focused and shows weak azimuth shifts similar to those during non-EPB days



Conclusions

- Azimuth offset of ALOS-2/PALSAR-2 SAR images has been used to detect ionospheric irregularities in equatorial region during intense May 2024 Equatorial Plasma Bubble occurrences
- Large azimuth offset of SAR images was found on May 9th, 2024 in Kalimantan, Indonesia, beyond 20 meters
- The TEC depletion observed by GNSS-TEC technique confirms the occurrence of Equatorial Plasma Bubble around the frames of SAR images
- The peak of TEC changes for plasma bubble calculated by azimuth offset is much larger than that of Sporadic-E (Es) in Japan
- Such a large azimuth offset is not detected in SAR images over Bali and during acquisitions under low geomagnetic conditions

The space weather data are obtained from World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University (wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp). The ALOS-2/PALSAR-2 level 1.1 data in this study are shared among PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium) to Study our Evolving Land Surface under a cooperative research contract with the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. The ownership of ALOS-2/PALSAR-2 data belongs to JAXA. The authors thank the Indonesian Geospatial Information Agency (BIG) for GNSS data (www.argi.go.id). ROTI map is accessible via <https://geomksc.kyoto-u.ac.jp/peterson/for/ionosphericmap/>.

Thank you for your attention

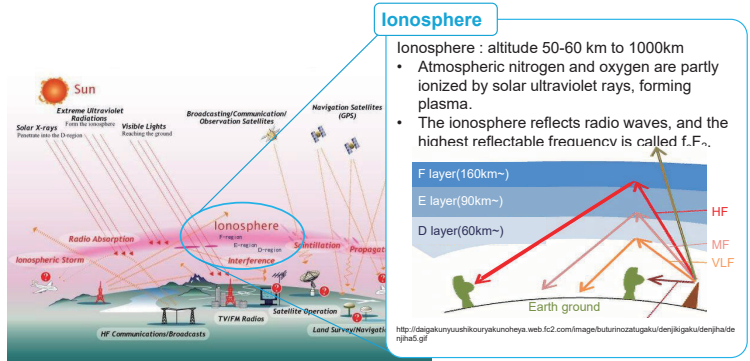
Email: ihsan.naufal.muafiry@brin.go.id

機械学習を利用した スプレッドFの検出とその応用

京大大学生存圏研究所
春名健太郎・劉鵬・横山竜宏

1

Background : Ionosphere

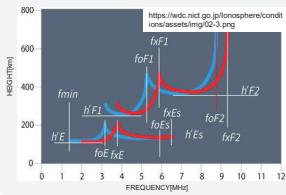


Background : Ionogram and spread F

Ionogram

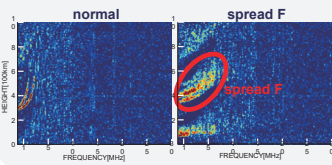
- Graphical image of ionospheric electron density, showing how reflection altitude relates to radio wave frequency.

Vertical Axis : Virtual Height
Horizontal Axis : Frequency



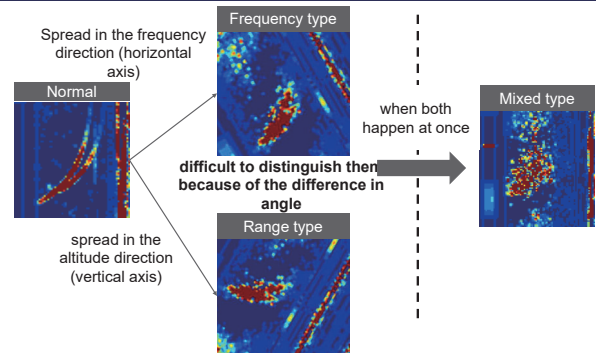
spread F

- In the F layer, radio wave reflections appear blurred on the ionogram.
- This shows disturbed ionospheric electron density.
- Such disturbances impair satellite communication and GPS.



3

Background : Classification of spread F



4

Background : Previous studies

Previous Studies on Automatic Detection of spread F Using Machine Learning Model

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

M. Yacoub et al., J. Atmos. Solar-Terr. Phys., vol. 270, 2025.

- Using observation data from Fuke Station in Hainan Province, China
- Classification of spread F types is also performed.
- Training was performed using ResNet, EfficientNet, and ViT, and a detection accuracy of up to 92.5% was achieved with ResNet50.

Automatic Spread-F Detection Using Deep Learning²

C. Luwanga et al., vol. 57, no. 5, pp. 1–16, 2022, doi:10.1029/2021RS007419

- Obtained training data from NOAA data repository
- 95% accuracy with ResNet50 + Adam

5

Detection of ionosonde at Shigaraki MU Observatory

Automatic detection at Shigaraki

Last year, we used Mask R-CNN machine learning model to detect spread F from ionograms observed at Shigaraki MU Observatory with high accuracy.

accuracy : $\frac{300+114+45}{500} = 0.92$

Problem

Existing research (Shigaraki) indicates effectiveness, but remains unverified in other regions, seasons, and under varying solar activity.

Research objective

- Evaluation of a method to detect spread F using Mask R-CNN by attempting to detect spread F using the same method used for the ionosonde at Shigaraki MU Observatory on SEALION data installed in Southeast Asia
- Validation of the model using long-term ionogram data to evaluate its applicability to different seasons and changes in solar activity.

6

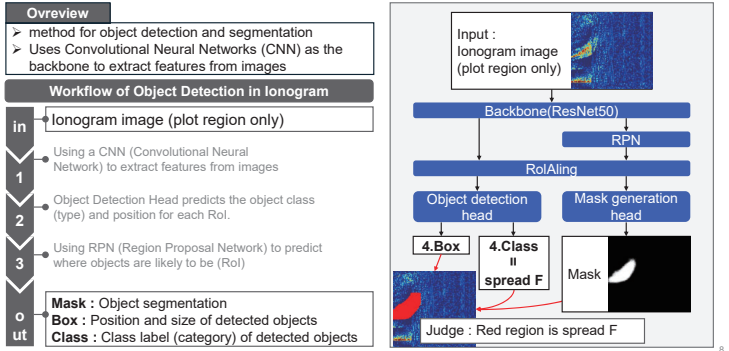
Background : SEALION

- The Ionospheric Anomaly Observation Network for Southeast Asia operated by NICT
- Monitors the impact of ionospheric phenomena such as plasma bubbles on satellite communications and GPS
- It sets observation sites in Southeast Asia and both hemispheres to study equatorial ionospheric disturbances.



7

Background : Mask R-CNN

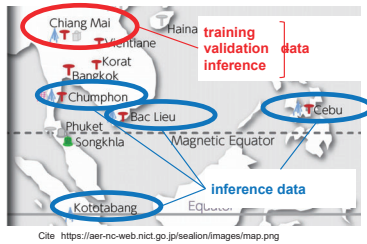


8

Training : settings and Data Utilization by Observation Site

Training settings	
Model	Mask R-CNN (ResNet-50)
Library	PyTorch(Python)
Frame work	detection2
Training data	500 ionograms observed in Chiang Mai
classes	Es2, No_SF(2013), SF, AMB, SF_diagonal(2009)
Out put	6 (5 types of classes + when no detected object exists)
Optimization Methods	SGD
Training rate	Start at 0.01 and gradually decrease

Data Utilization by Observation Site

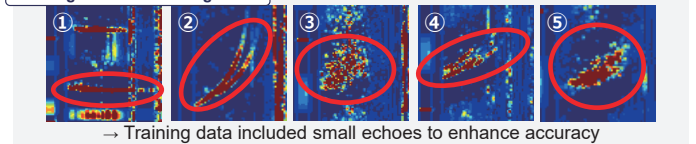


9

Training : Class Definitions

No.	Class name	Explanation
①	Es2	E-layer echo
②	No_SF	A bifurcated object capable of accurately reading values such as $f_o f_2$ from an ionogram
③	SF	spread F
④	AMB	Unable to determine whether spread F is occurring (cannot judge)
⑤	SF_diagonal	③ Among these, specifically those that are not mixed-type spread F

Enlarged view of training data

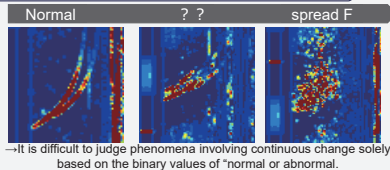


10

AMB : Handling Ambiguity in Mask R-CNN

At what stage can the phenomenon be classified as spread F?

- Mask R-CNN is a model designed for clear-cut class classification
- In actual ionograms, intermediate states exist between normal and spread F
 - Even to the human eye, it is difficult to determine which category they belong to.



problem

- Training using ambiguous ionograms caused mislearning and overlearning.
- When intermediate states were excluded from the training data, large differences between classes led to unstable learning.
- In both cases, numerous false detections of intermediate states occurred during inference.

Add AMB

- Avoid forcing ambiguous data into categories; allow it to fall into intermediate classes

11

Detection accuracy in SEALION data

Detection accuracy on validation data (n = 500)

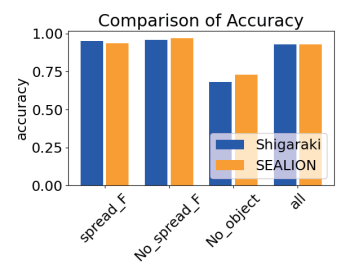
Verification using data from Chiang Mai

Blue : Correct

Red : Miss

		Human visibility			
		SF (①, ③)	AMB (④)	No_SF (②)	P
Model output	SF	91	0	6	
	AMB	15	135	3	
	No_SF	5	3	242	
	P				0.93

$$\text{accuracy} = \frac{91+135+242}{500} = 0.93$$



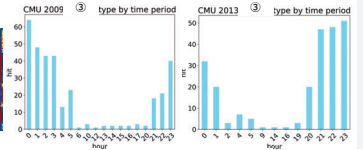
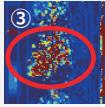
12

Trends in spread F Observed at SEALION

The type of spread F frequently observed varies by season and time of day.

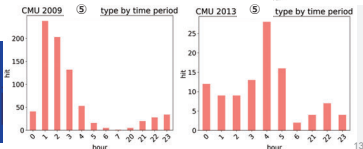
Mixed type

Most frequently observed between 8 PM and midnight during the spring and autumn equinoxes



Frequency and range type

Late summer nights (after midnight)



Trends in Years of High Solar Activity (2013)

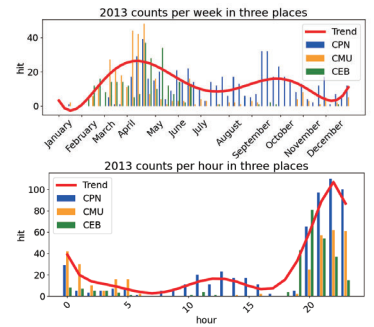
The two graphs shows the number of spread F detections at three observation points counted weekly in 2013

Seasonal trends(upper)

- spread F is frequently observed during the vernal and autumnal equinoxes.

Time trends(lower)

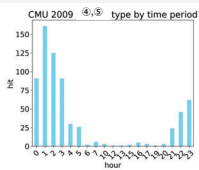
- spread F is mainly observed from 20:00 to 23:00(local time).



Trends in Years with Low Solar Activity (2009)

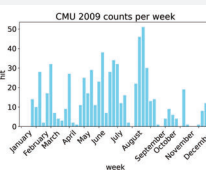
- Observations were frequent during late night hours in summer (primarily August)
- The occurrence of spread F on the spring and autumn equinoxes was milder than in years with high solar activity

Number of observations by time



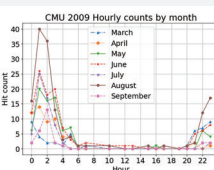
- Most observations occur after midnight

Number of observations by week



- The number of observations is higher in summer than in spring or autumn.

Number of observations by month

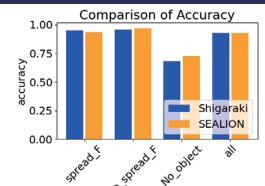


- June through August see a high number of late-night observations.

Summary

Result

- Using the same method as Shigaraki MU Observatory, SEALION ionograms detected spread F with 93% accuracy.
 - High accuracy is achieved at training locations (e.g., Chiang Mai)
 - Accuracy drops at other sites due to differences in noise characteristics.
- We also confirmed the trend observed in previous studies that the occurrence tendency of spread F differs depending on solar activity.



Issues

- In the SEALION data, a high proportion of ionograms classified as AMB was confirmed. Therefore, for automatic detection, it is considered preferable to introduce a quantitative evaluation method independent of thresholds rather than threshold-based determination.

改良電離圏トモグラフィを用いた磁嵐時の電離圏擾乱の3次元構造の研究

^{1,*}齋藤 享, ²野崎 太成, ²山本 衛

¹国立研究開発法人海上・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

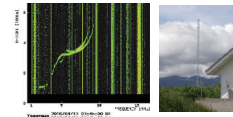
2025年度MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Ionospheric density profile measurements

- 3-D ionospheric density profiles are very useful for radio applications (such as communications or GNSS augmentation) as well as ionospheric sciences.
- But it is difficult to observe them regularly and continuously.

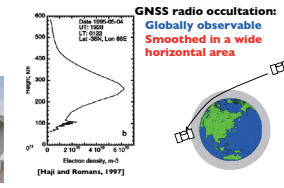
Ionosonde:

Classic simple device
Bottomside profiles only



GNSS radio occultation:

Globally observable
Smoothed in a wide horizontal area



Incoherent scatter radar:

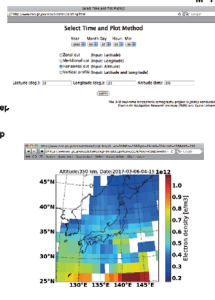
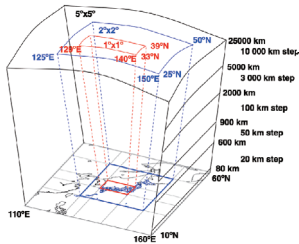
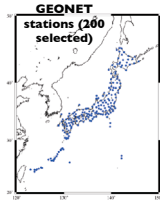
Very powerful, various parameters can be derived.
Extremely expensive



2025年度MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Real-time 3-D ionospheric tomography

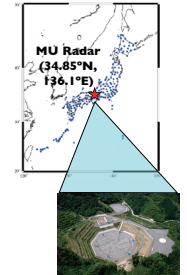
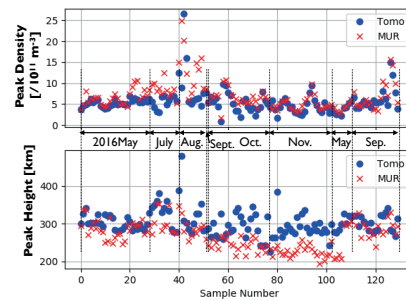
- Purely observation-based, with constrained least squares. Implemented as a real-time service
- Since March 2016, every 15 min with about 3 min latency



Saito, S., Suzuki, S., Yamamoto, M., Chen, C.-H., and Saito, A. (2017) Real-Time Ionosphere Monitoring by Three-Dimensional Tomography over Japan. *J Inst Navig*, 64: 495–504. doi: 10.1002/navi.213.

2025年度MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Comparison with Incoherent Scatter Observation

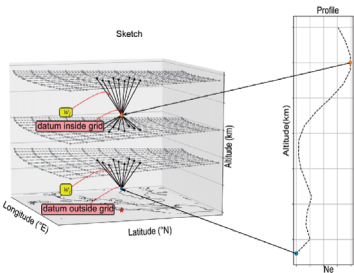


[Saito et al., APRASC, 2019]

- Peak densities are well reproduced.
- Peak heights are sometimes underestimated when the true height is low.

2025年度MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Improvement to the GNSS tomography



- Ssessanga et al. [2021]
 - Introduce ionosonde measurements to add constraints to tomography solution.
 - Modify original (TEC-only) tomography results by using ionosonde data in the assimilative approach (3-D VAR)
 - Introduce log-normal distribution assumption for solutions to constrain the solution so that they are always positive.
- This study further improves this method.

Ssessanga, N., Yamamoto, M., Saito, S. et al. Complementing regional ground GNSS-TEC computerized ionospheric tomography (CIT) with ionosonde data assimilation. *GPS Solut.*, 25, 93 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01133-y>

2025年度MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Improvement to the GNSS tomography

Observations

$$\vec{Y} = \begin{bmatrix} Y_{TEC} \\ Y_{iono} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A_{TEC} \\ A_{iono} \end{pmatrix} \vec{x} + \vec{\epsilon} = A \vec{x} + \vec{\epsilon}$$

Unknowns

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}$$

Cost function

$$J(\vec{x}) = \left(\frac{1}{\beta_{TEC}} + \frac{1}{\beta_{iono}} \right) [\vec{Y} - A(\vec{x})]^T R^{-1} [\vec{Y} - A(\vec{x})] + \kappa \frac{|\vec{B}|^2}{n} [\vec{x} - \vec{x}_b]^T B^{-1} [\vec{x} - \vec{x}_b]$$

Minimize cost function

$$\nabla J(\vec{x}) = [\vec{x} - \vec{x}_b]^T B^{-1} - [\vec{Y} - A(\vec{x})]^T R^{-1} \frac{\partial A(\vec{x})}{\partial \vec{x}} = 0; \vec{x} = \vec{x}_a$$

Use iteration

$$A(\vec{x}_a) = A(\vec{x}_a^{j-1}) + \hat{A}_{j-1} [\vec{x}_a^j - \vec{x}_a^{j-1}]$$

Ensure convergence

$$\hat{A}_{j-1} \equiv \left[\frac{\partial A(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \right]_{\vec{x}_a^{j-1}}$$

Background density taken from tomography results

Non-diagonal matrix - spread ionosonde effects

Solution

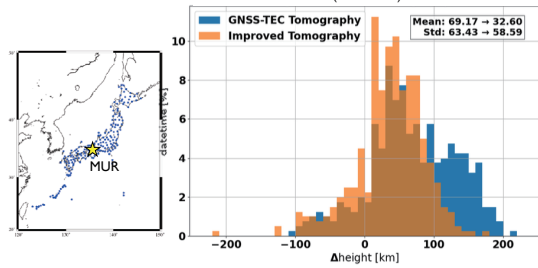
[Sessanga et al., GPS Solut., 2021]

[Nozaki, Master Thesis, 2025]

2025年度MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Improvement in the height estimation

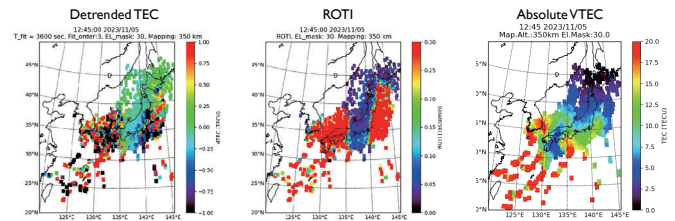
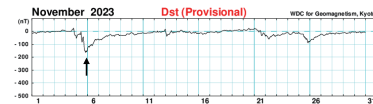
Peak height comparison: Tomography - Incoherent scatter (2022-2023)



- * Peak heights are estimated by the improved tomography much better than the original (TEC-only) tomography.

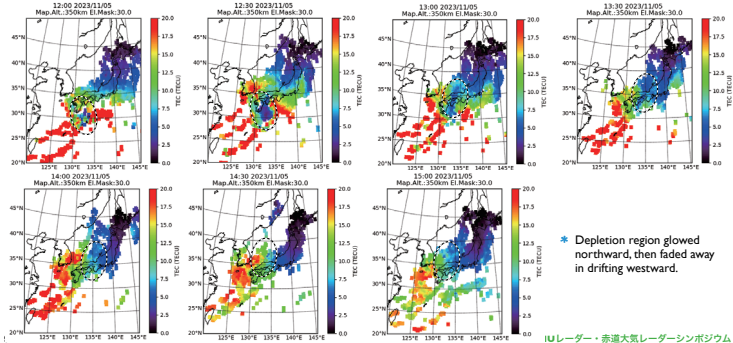
2025年度MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

5 November 2023



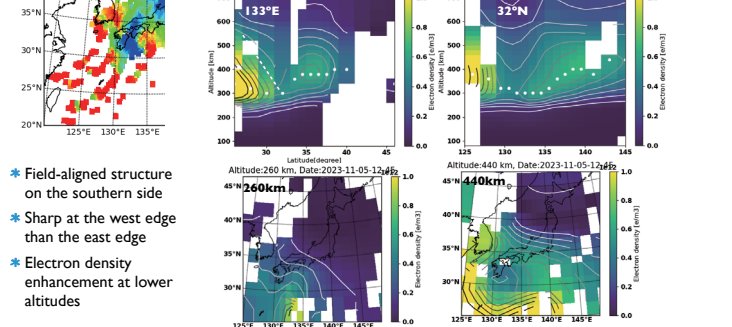
2025年度MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

TEC variation (5 Nov 2023)



IUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

3-D structure: 12:45 GPST (21:45 LT)



2025年度MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

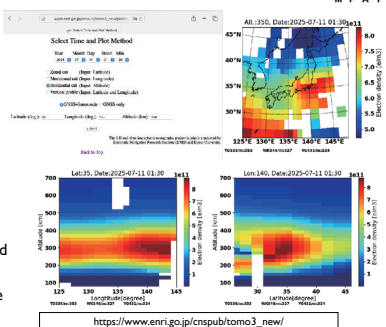
10

Realtime analysis

Computational environment

CPU	Intel Core i7-14700 (8/12 Performance/Efficient cores) (8 cores are used for tomography)
RAM	64 GB
OS	AlmaLinux 9.2
Python	Python 3.12.2, numpy 2.2.5, scipy 1.15.2

- * Real-time analysis is running flawlessly.
 - Processing time is about 2-2.5 min.
 - Additional wait time (~a few minutes) for ionosonde data to be ready is needed.
- ➡ Improved tomography results can be obtained with latency of about 5 minutes
- ✓ GNSS-only tomography can be obtained before the ionosonde data are ready.



2025年度MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Summary

- * Ionospheric 3-D tomography over Japan has been improved.
 - Ionosonde data are assimilated.
 - Geometry matrix, covariance matrix, and cost function are modified.
 - Ionospheric layer height are better represented.
- * 3-D structures of ionospheric disturbances during the geomagnetic storm on 5 November 2023 has been investigated.
 - Equatorial plasma bubble-like structures embedded in electron density enhancement are found.
 - Field-aligned electron density depletion as well as electron density enhancement at lower altitudes are found.
 - Consistent with upwelling of ionospheric plasma associated with the Rayleigh-Taylor instability
- * Real-time analysis system of the improved tomography has been developed.
 - Every 15 min, latency of about 5 min

2025年度MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Post-sunrise ionospheric irregularities in Southeast Asia during the Geomagnetic Storm on 19 -20 April 2024

Prayitno Abadi¹, Ihsan N. Muafiry¹, Teguh N. Pratama¹, Angga Y. Putra¹, Agri Faturahman¹, Noersomadi¹, Edy Maryadi¹, Febrylian F. Chabibi², Umar A. Ahmad³, Guozhu Li⁴, Wenjie Sun⁴, Haiyong Xie⁴, Yuichi Otsuka⁵, Septi Perwitasari⁶, and Punyawi Jamjareeagran⁷

1) National Research and Innovation Agency, Republic of Indonesia (BRIN), Bandung, Indonesia

2) Geospatial Information Agency, Republic of Indonesia, Jakarta, Indonesia

3) School of Electrical Engineering, Telkom University, Bandung, Indonesia

4) Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

5) ISEE, Nagoya University, Nagoya, Japan

6) NICT, Tokyo, Japan

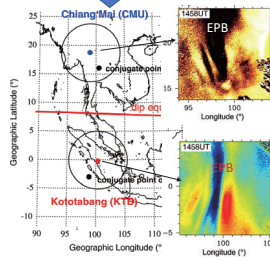
7) KMITL, Chumphon, Thailand



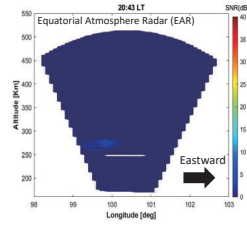
第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Equatorial Plasma Bubble (EPB)

Observations by all-sky airglow imager on 5 April 2011

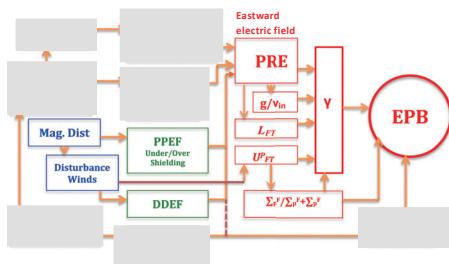


taken from Fukushima et al. (2019)



- EPB refers to plasma depletion in nighttime, and it contains irregularities on various spatial scales
- North-south structures
- Eastward migrating EPB driven by thermospheric wind
- The mechanism generation via Rayleigh-Taylor instability (RTI)
- The generation needs seeding and an eastward electric field

Equatorial Plasma Bubble (EPB) during geomagnetic storm



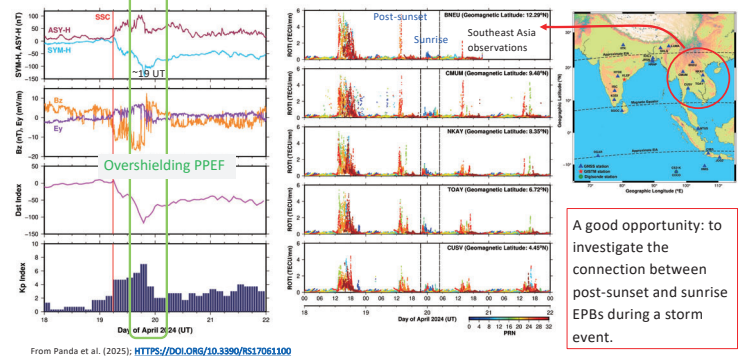
From Abdu (2019); <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0258-1>

Post-sunset hours:
PRE + undershielding PPEF → super "EPB"
Overshielding PPEF and DDEF → suppressing EPB generation

Post-midnight and around sunrise hours:
Overshielding PPEF and DDEF → enhances EPB generation

During the storm, does sunrise EPB connect to post-sunset EPB?

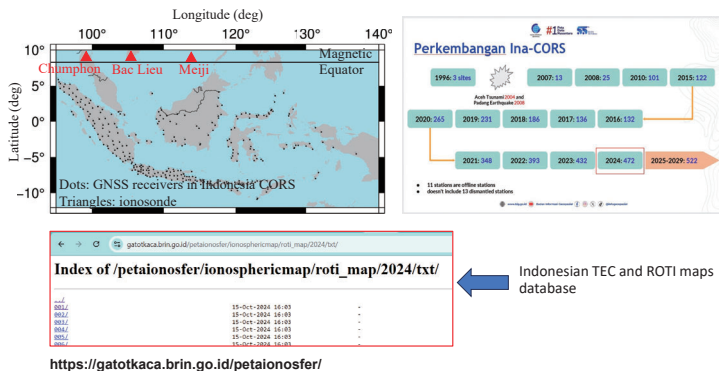
The Geomagnetic Storm on 19 – 20 April 2024



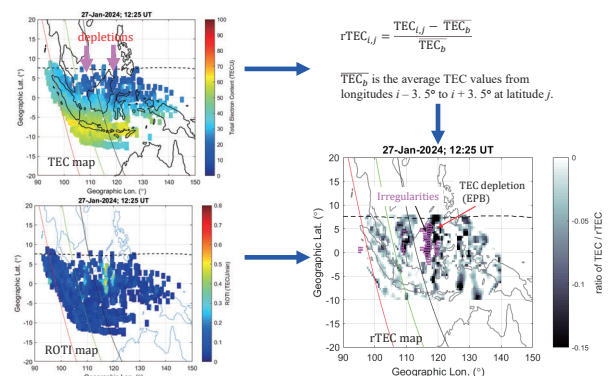
From Panda et al. (2025); <https://doi.org/10.3390/rs17061100>

A good opportunity: to investigate the connection between post-sunset and sunrise EPBs during a storm event.

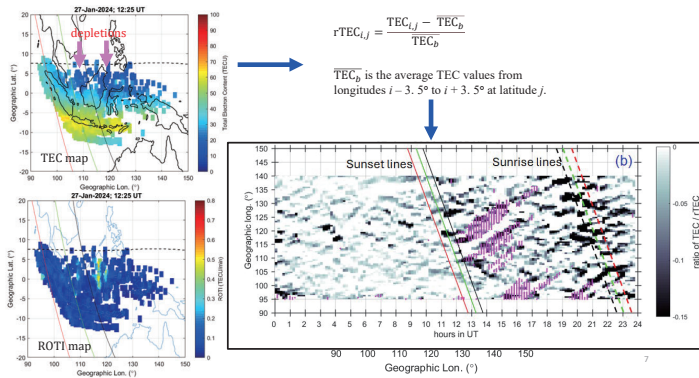
Methods and Observation



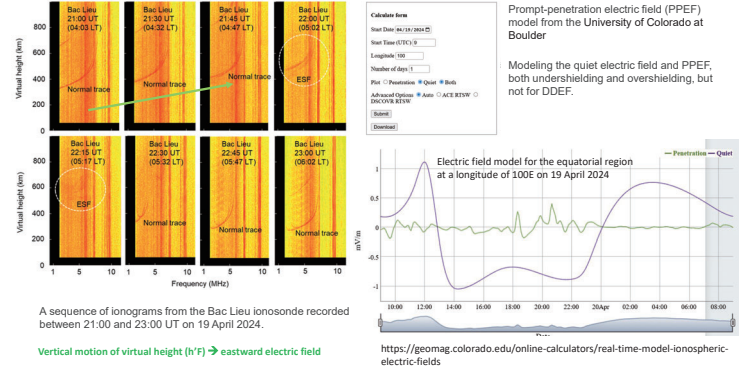
Methods: Observing depletion and irregularities



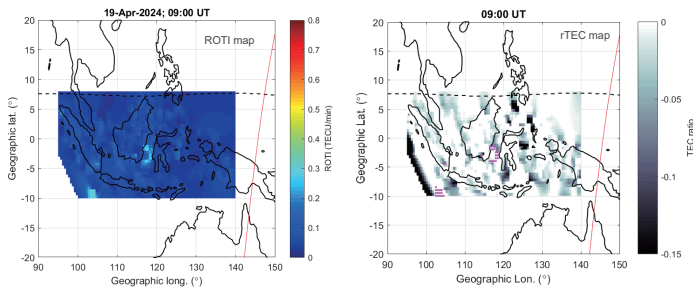
Methods: Observing depletion and irregularities



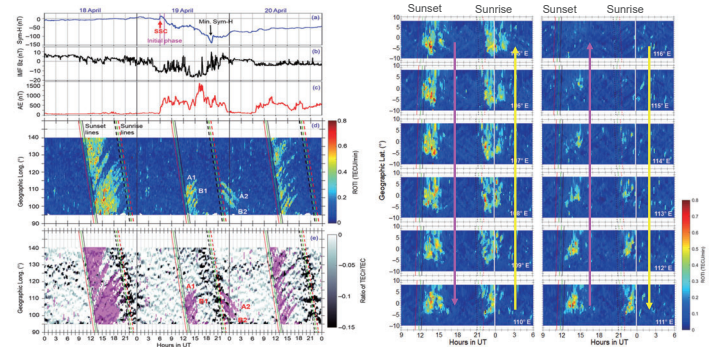
Methods: Electric field observations



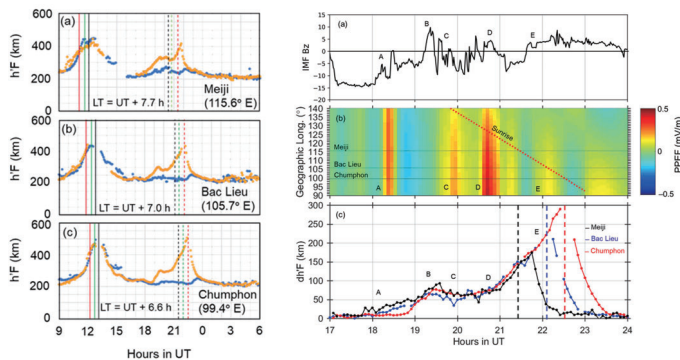
Results: Observations of ROTI and TEC depletions



Results: Observations of ROTI and TEC depletion

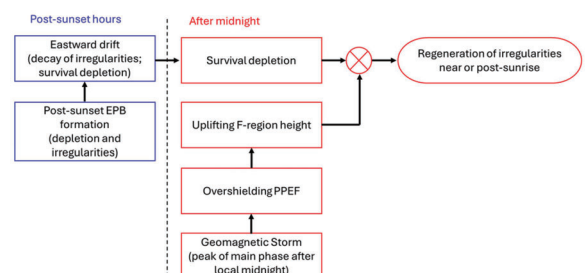


Results: Ionosonde observation



Discussion

Possible mechanism for sunrise equatorial ionospheric irregularities during a storm event



Summary

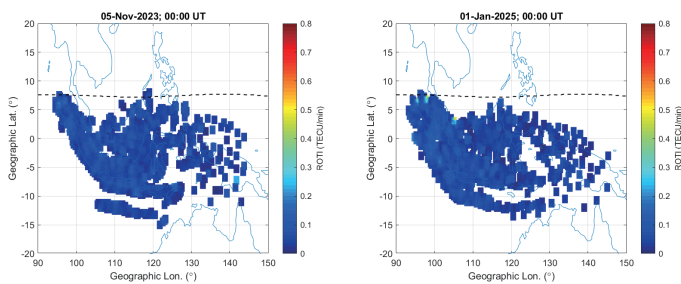
- First study to connect post-sunset and post-sunrise ionospheric irregularities during a geomagnetic storm, focusing on the storm of 19–20 April 2024.
- Post-sunset EPBs formed in western Southeast Asia due to PRE, drifted eastward, and left plasma depletion structures that later moved westward.
- Storm-driven electric fields raised the F-region height at sunrise, reactivating irregularities within these residual depletion zones.
- These locations of remnants likely acted as seed points for sunrise EPBs, emphasizing the influence of storm-time electric fields and pre-existing perturbations on EPB/irregularities generation during the storm.

For detailed content of this study, please find it at:

<https://www.mdpi.com/3457814>

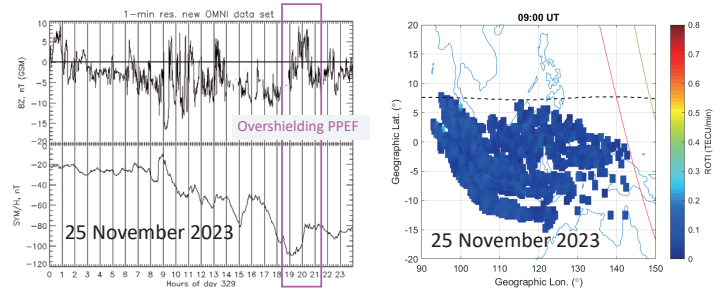
Abadi, P., Muafiry, I. N., Pratama, T. N., Putra, A. Y., Faturahman, A., Noersomadi, Maryadi, E., Chabibi, F. F., Ahmad, U. A., Li, G., Sun, W., Xie, H., Otsuka, Y., Perwitasari, S., & Jamjareegulgran, P. (2025). Post-Sunrise Ionospheric Irregularities in Southeast Asia During the Geomagnetic Storm on 19–20 April 2024. *Remote Sensing*, 17(16), 2906. <https://doi.org/10.3390/rs17162906>

See for other cases



Next research

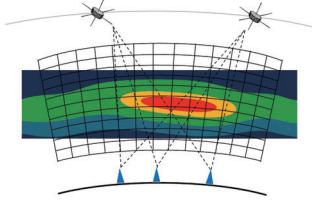
Future research should explore “initial perturbations” for the newly formed sunrise EPBs in scenarios where post-sunset EPBs do not occur.



Thank you!

Prayitno Abadi
Research Center for Climate and Atmosphere, BRIN
E-mail: pray001@brin.go.id

Three-Dimensional Ionospheric Response over Japan to the May 2024 Super Geomagnetic Storm



Weizheng Fu¹, Yuichi Otsuka¹, Nicholas Ssanga², Tatsuhiko Yokoyama³, Mamoru Yamamoto³
¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan
²4DSpace, Department of Physics, University of Oslo, Oslo, Norway
³Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Kyoto, Japan
 E-mail: fu.weizheng@isee.nagoya-u.ac.jp

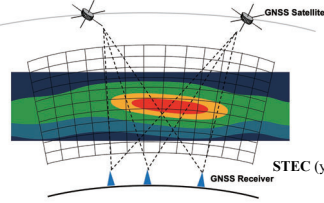


Computerized ionospheric tomography

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) from satellite to receiver is one of the most important parameters in the ionospheric study. A **single-layer model** is generally used to represent the ionosphere.

Problem: The **missing height dimension** poses limitations on the information that can be inferred.



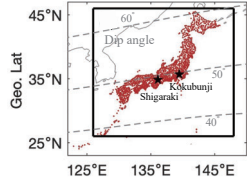
The **computerized ionospheric tomography (CIT)** approach in our analysis follows the **voxel-based model**.

Given m measurements and n voxels:

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + e_i,$$

$$\text{STEC}(y) = \sum \text{length}(a) \times \text{Electron density}(x) + \text{error}(e)$$

Data

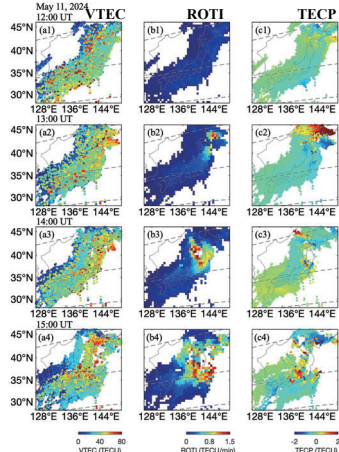


GEONET (1308 receivers)
 Ionosondes: Shigaraki and Kokubunji

$$\text{ROT} = \frac{\text{STEC}_k^i - \text{STEC}_{k-1}^i}{t_k - t_{k-1}},$$

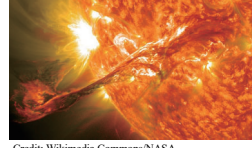
$$\text{ROTI} = \sqrt{\langle \text{ROT}^2 \rangle} - \langle \text{ROT} \rangle^2$$

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



Introduction

May 2024 geomagnetic storm was one of the strongest since 2002.

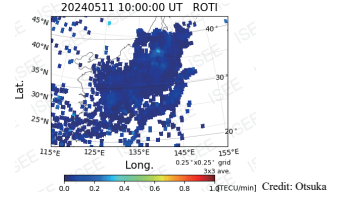
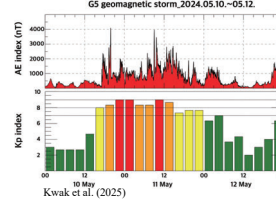


Credit: Wikimedia Commons/NASA

A **coronal mass ejection (CME)**, or a large explosion of plasma from the Sun, hit Earth's high atmosphere between **May 10-13, 2024**. The subsequent geomagnetic storm was one of the strongest observed in the last 22 years.

This led to **severe fluctuations in Earth's ionosphere**, causing various damages such as satellite communication disruptions and increased GPS errors.

During the storm, significant ionospheric disturbances are observed in **Japan**.



GNSS tomography algorithm

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**:

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

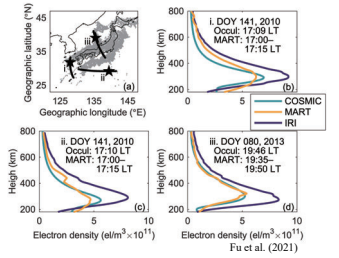
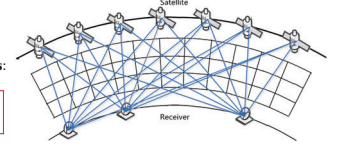
$\|a_{ij}\|$ is the maximum path-pixel intersection length in the grid. x_j^k is estimated electron density in the j th voxel at k th iteration. $\langle \hat{a}_{ij} \rangle^k$ is simulated STEC at k th iteration. λ_k ($0 < \lambda_k < 1$) is the relaxation parameter and controls the convergence of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

The computational procedure in MART requires **an initial guess** (x_0), which highly influences the fidelity and the rate of convergence.

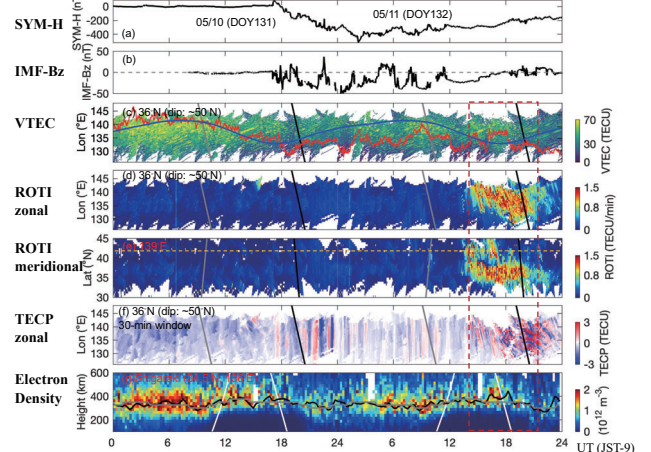
Calibrate IRI model with real observed TEC

The reconstructions from tomography were on **average ~30% more accurate** than IRI electron density estimation.

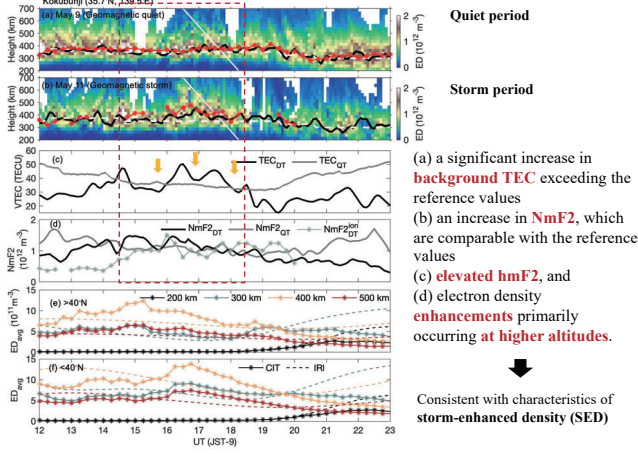
Tomography Resolution:
 0.5° in latitude/longitude,
 25 km in altitude (100–1000 km),
 1 min in time



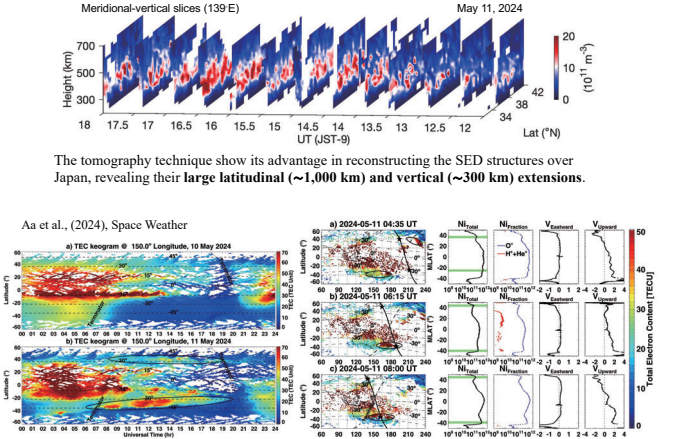
General observation results



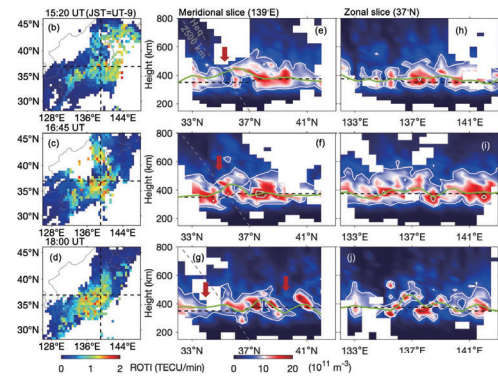
Electron density enhancement



SED structures

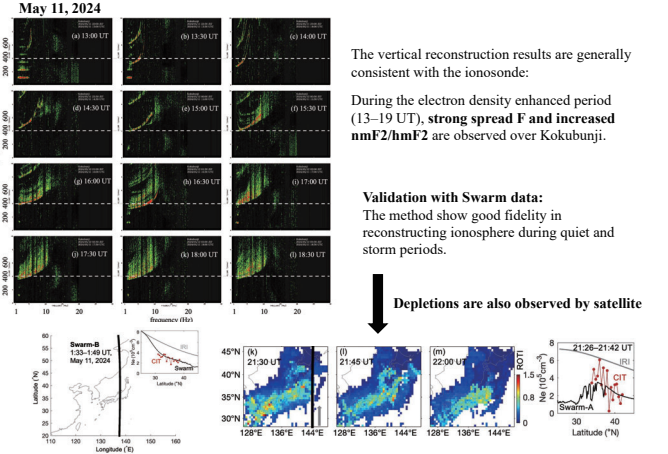


Embedded depletions

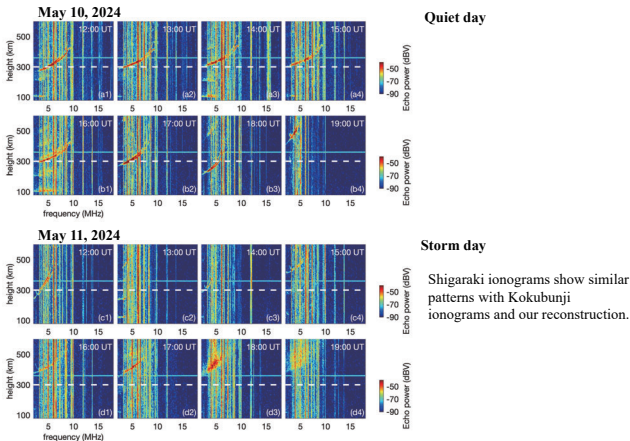


In the meridional vertical slices, the **electron density depletions** exhibit a structure **parallel to the geomagnetic field lines**, as indicated by the red arrows.

Kokubunji ionograms and Validation



Shigaraki ionograms

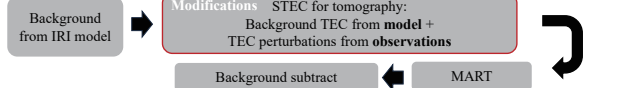


GNSS tomography for electron density perturbations

Modified from MART

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

Algorithm procedure:



Fu et al. (2024). *Earth, Planets and Space*. 10.1186/s40623-024-02051-2.

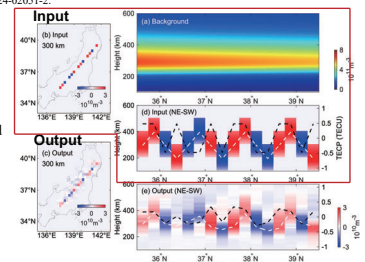
Advantages:

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

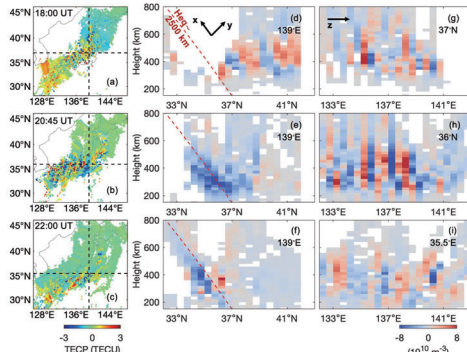
A **correlation of more than 80%** is observed between the peak heights of disturbances as simulated and reconstructed.

Tomography Resolution:

0.5° in latitude/longitude,
20 km in altitude (100-800 km),
1 min in time



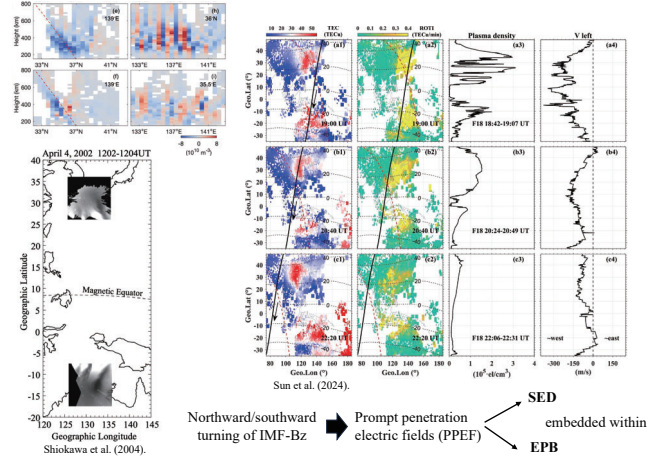
Depletion structures



The reconstructed depletion extends over 600 km in the direction parallel to the geomagnetic field lines (x-axis), 50–150 km in the radial direction (y-axis), and 50–100 km in the zonal direction (z-axis).

In the recovery phase of **super geomagnetic storm** occurred on **May 11, 2024**, **equatorial plasma bubbles** may occur over Japan.

Equatorial plasma bubbles



Northward/southward turning of IMF-Bz → Prompt penetration electric fields (PPEF) → SED embedded within EPB

Conclusions

1. By using the **dense GNSS measurements** over Japan, a **3-D** tomography algorithm with **high spatiotemporal resolution** is conducted to reveal the ionospheric response during the super geomagnetic storm in May 2024.
2. Reconstruction results are **indicative of SED occurrence**: a significant increase in background TEC exceeding reference values of geomagnetic quiet time; an increase in NmF2 but remaining comparable with reference values; elevated hmF2; and electron density enhancements primarily occurring at higher altitudes. Tomography reveals the **large latitudinal (~1,000 km) and vertical (~300 km) extensions** of SED structures.
3. **Field-aligned depletion structures** were observed **embedded within the SED**, extending over **600 km** parallel to geomagnetic field lines, with **radial and zonal dimensions of 50–150 km and 50–100 km**, respectively. These structures are likely caused by **equatorial plasma bubbles** extending to mid-latitudes from the equatorial region at altitudes of ~2,500 km along geomagnetic field lines.
4. **Electrodynamic forces** may play a key role in the formation and development of electron density enhancement and embedded depletions.

Details of this research can be found at Fu et al. (2025). *Geophysical Research Letters*. 10.1029/2025GL116567

機械学習モデルを用いた 信楽イオノゾンデ観測の長期統計解析

寺内 充, 劉鵬, 横山 竜宏

京都大学生存圏研究所

目次

- 研究背景
- 提案手法
 - 信楽イオノグラムの自動読み取り
- 検出結果
 - 手動読み取り値との比較
 - 国分寺の観測結果との比較
 - IRIモデルとの比較
- まとめと今後の課題

Copyright ©2023 Kyoto University. All Rights Reserved.

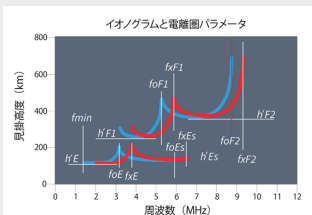
研究背景

信楽MU観測所

京都大学生存圏研究所

MUレーダーと合わせてイオノゾンデによる電離圏観測が定常的に実施されている

地上から電波の周波数を変化させながら
上方に向けて発射
⇒電離圏で反射される様子を記録
(イオノグラム)



イオノグラムから得られる電離圏パラメータは電離圏の状態の監視や他の観測との比較に用いられている

理想的なイオノグラム
National Institute of Information and Communications
Technology:イオノゾンデによる電離層観測
<https://wdc.nict.go.jp/wdc-top/index.html>

Copyright ©2023 Kyoto University. All Rights Reserved.

研究背景

電離圏パラメータ: f_oF_2

電離圏は電子密度の高度分布からD領域・E領域・F領域の3つの高度領域に区分される

通常電子密度が最大となる F2層での臨界周波数

⇒foF2
電子密度の解析に必要

信楽のイオノグラムのパラメータの読み取りは行われていない

イオノグラムからの電離圏パラメータの自動読み取りの必要性

Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

研究背景

IRIモデル

IRIモデル：地上および宇宙からの電離圏の観測から得られる長期にわたるデータ記録に基づいて、主要な電離層パラメータを表す経験的モデル

指定された場所、時間、日付について、高度60~2,000 kmの範囲における全球の電子密度、電子温度、イオン温度、イオン組成の月平均を提供する

IRIは、毎年開催されるIRI特別ワークショップで更新される。

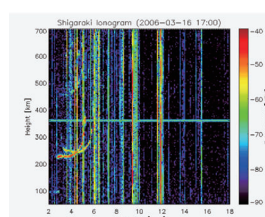
本研究では、IRI-2020モデルから得られた最大電子密度を用いてfoF2値を計算し、観測データとの比較を行うことで、信濃の長期統計の特性を評価した

Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

信楽イオノゾンドの自動読み取り

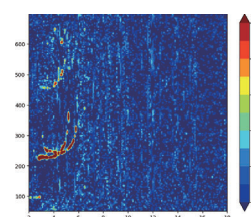
イオノグラムのノイズ除去

- ・ノイズ除去
- 縦方向のノイズ（干渉波の影響）：4 次元多項式によるフィッティング
- 横方向のノイズ（システムの影響）：前後の値での平均値への丸め込み



Frequency [MHz]

信楽で観測されたイオノグラムの例



ノイズ除去後のイオノグラム画像

Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

•

信楽イオノゾンの自動読み取り

機械学習の手法

モデル	Mask R-CNN (ResNet-101 + FPN)
フレームワーク	Detectron2
データセット	信楽MU観測所イオノグラム画像 (ノイズ除去後) 426 枚
クラス	Fo, Fx, F (スプレッドFによりfo と fx の区別がつかない場合)
訓練方法	5分割交差検証 (データを5分割して、各分割を1回ずつ検証用を使い、残りで学習を行う)

Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

7

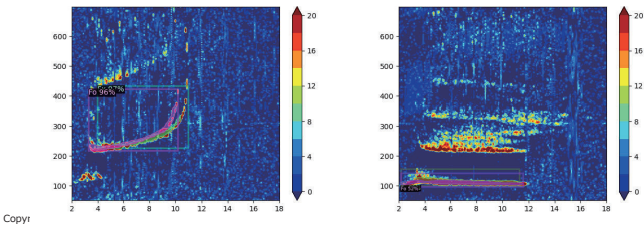
信楽イオノゾンの自動読み取り

機械学習の手法

Test
信楽MU観測所イオノグラムデータ
2002~2023年に対して適用
foF2 : Foのx座標の最大値の周波数

機械学習によって正しい検出がなされた例

誤った検出がなされた例



Copyr

信楽イオノゾンの自動読み取り

検証結果

	Average value	Standard deviation
$AP_{0.5}(box)$	89.79%	2.66%
$AP_{0.5}(mask)$	85.25%	3.52%

マスクで評価したIoUは、バウンディングボックスで評価したIoUより厳しいため、一般にマスク正答率は低い

$TP_{IoU=0.5}$ とは、予測と真値のピクセルの共通部分を和集合で割った値(IoU)が0.5以上のものの数

$$AP_{0.5} = \frac{1}{N} \sum_N \frac{TP_{IoU=0.5}}{TP_{IoU=0.5} + FP_{IoU=0.5}}$$

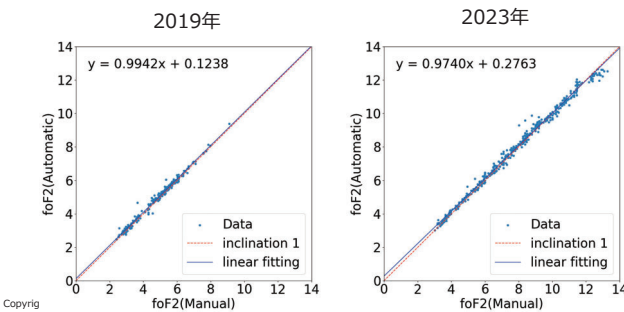
Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

9

機械学習の結果

信楽における手動・自動読み取りの比較

以下の年において、観測画像をランダムに500枚抽出・読み取り
2019年と2023年において誤差は1MHz以内に収まっている



Copyrig

10

機械学習の結果

信楽における手動・自動読み取りの比較

低太陽活動期には読み取り枚数が少ない傾向
手動と自動の結果の差は、スプレッドF発生時やエコーが弱い場合に出現

手動・自動読み取りにおいて読み取れた枚数

2019年 低太陽活動時		自動	
		TRUE	FALSE
手動	TRUE	267	8
	FALSE	98	127

2023年 高太陽活動時		自動	
		TRUE	FALSE
手動	TRUE	435	4
	FALSE	29	32

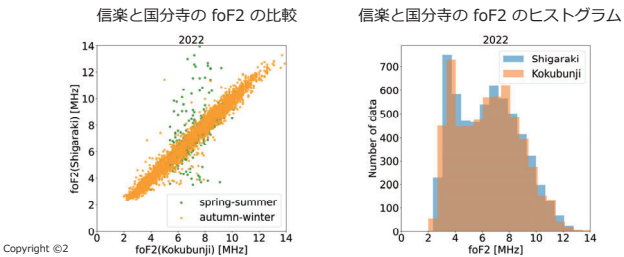
Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

11

機械学習の結果

国分寺との比較

高い相関が見られる
春から夏にかけて値がずれているデータがある (スボラディックEの影響)
foF2の分布には二峰性がある (昼と夜の時刻にfoF2の値が比較的安定するため、それぞれピークを持つ)



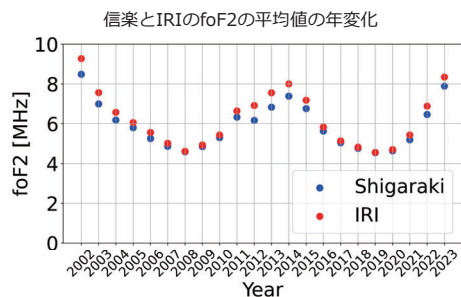
Copyright ©2

12

機械学習の結果

IRIとの比較

太陽活動との相関がみられる
すべての年において、IRIの平均値の値の方が高い



Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

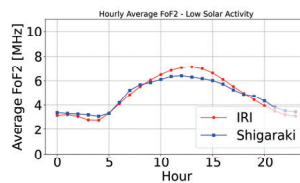
13

機械学習の結果

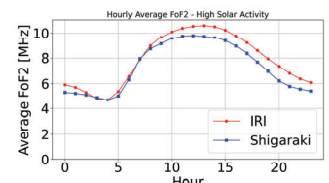
IRIとの比較

低太陽活動期の夜間、IRI の foF2 平均値は信楽を下回る
→年平均では、低太陽活動期に信楽と IRI の差が小さい

低太陽活動期のfoF2の時間変化



高太陽活動期のfoF2の時間変化



Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

14

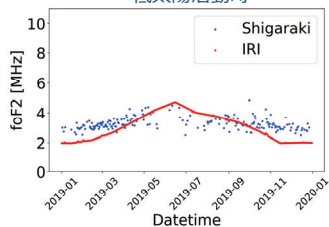
機械学習の結果

IRIとの比較

低太陽活動期の0時では IRI の変化が大きい
(国分寺でも同様の傾向)

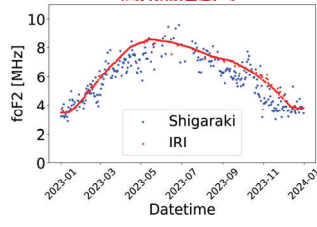
信楽イオノグラムは 2 MHz からの画像のため、2 MHz 付近の読み取り精度が低い

2019年の0時におけるfoF2の値
低太陽活動時



Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

2023年の0時におけるfoF2の値
高太陽活動時

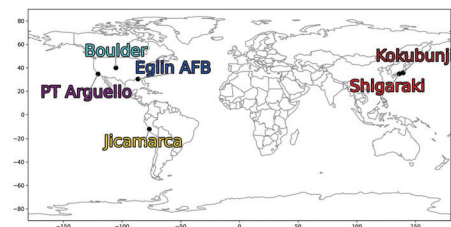


15

IRIモデル

他の観測地点との比較

以下の観測地点で観測値とIRIモデルの比較を実施
Boulder, Eglin AFB, PT Arguello, Jicamarcaの4地点はCS (Autoscaling Confidence Score) が70以上のものを使用
データベース : FastChar Digital Ionogram Data Base (DIDBase)
<https://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>



Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

16

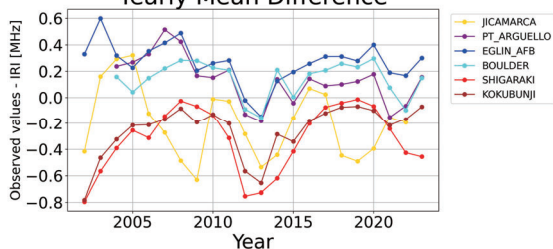
IRIモデル

他の観測地点との比較

年平均値の差の比較

- ・信楽・国分寺では IRI の値が観測値より高い傾向
- ・米国3地点では逆に観測値の方が高い傾向
- ・Jicamarca では年ごとの変動が大きく、プラスとマイナスを行き来

Yearly Mean Difference



Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

17

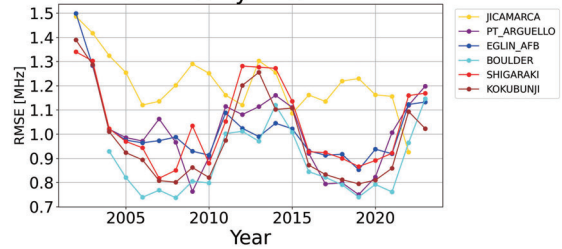
IRIモデル

他の観測地点との比較

RMSEの年平均値の比較

- ・RMSEの変動は太陽活動と相関がみられる
 - ・JICAMARCAでは他地点に比べて高い傾向を示す
- JICAMARCAは赤道直下に位置し、赤道異常や電離圏擾乱が顕著なため

Yearly RMSE



Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

18

まとめと今後の課題

まとめ

- ・提案手法により、信楽イオノグラム22年間の foF2 を自動読み取りを実施
- ・手動値・国分寺データとの比較から、モデルは高い精度でfoを検出していることが読み取れた
- ・信楽と IRI の比較で、太陽活動との相関を確認
- ・他地点との比較で、IRI 出力値に地点ごとのバイアスを確認

Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

19

まとめと今後の課題

今後の課題

- ・スプラディックEなどによる誤検出の対策
→機械学習の内容の見直し
外れ値の検出
- ・IRIモデルをより詳細に評価するため、追加の観測地点との比較を行う

Copyright ©2023 Kyoto University All Rights Reserved

20

電離圏短波エコーの飛行時間と変化率との 信楽アイオノゾンデ電波を用いた計測経過

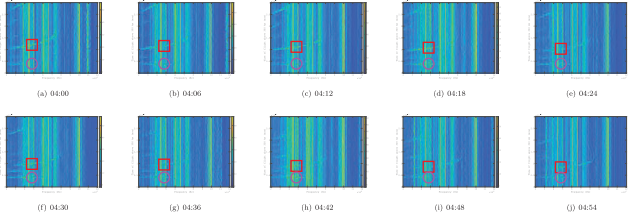
三菱電機 先端技術総合研究所
岩本 貴司 小西 麻緒 佐藤 杏輔

2025-09-09
第19回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
第551回生存圏シンポジウム
三菱電機株式会社

© Mitsubishi Electric Corporation

Preliminary analysis: Chung-Li ionosonde echoes²

The pulse trains from the Chung-Li ionosonde were sampled at the Okinawa Electromagnetic Technology Center of NICT from 4:00 to 4:54 on March 24, 2024 (JST) and cross-correlated with the model replicas. The two highest-intensity echoes (in the F and E regions) of each 4.8 MHz pulse train are identified and annotated on the maps.



²T. Iwamoto and M. Konishi, "Simultaneous observation of the time of flight and the Doppler frequency shift of each HF wave refracted in the ionosphere," JpGU, 2025.

3 / 12

Current status of our collaborative research program

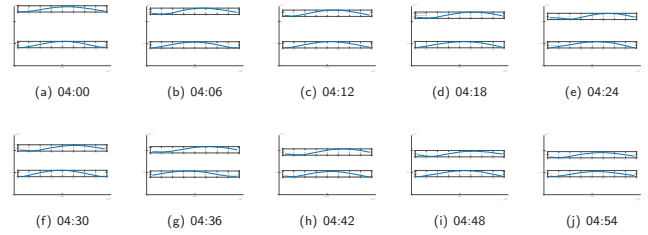
- Our collaborative research program:
 - Aim 1:** Simultaneous observation of time of flight (ToF) and Doppler frequency shift (DFS) of each echo of the Shigaraki ionosonde.
 - Aim 2:** Quantification of the growth rate of medium-scale traveling ionospheric disturbance (MSTID) instability if its echoes are sampled.
 - Method:** Construction and application of the maximum likelihood estimator (MLE) based on the transmitted waveform.
 - Feasibility:** Partial feasibility is shown in the preliminary analysis of echoes of the Chung-Li ionosonde¹.
- Current status:
 - Revision:** The controlling software of the Shigaraki ionosonde was revised to repeat specified pulses while keeping the risk of malfunction suppressed.
 - Test:** Revised software was tested without physical transmission.
 - Identification:** Currents in the two ionosonde antennas were measured and Tx and Rx antennas were identified.
 - Smpling:** Sampling of ionospheric echoes of pulses by the revised controlling software during maintenance periods of MU radar is under preparation.

¹K.-J. Ke et al., "New Chung-Li Ionosonde in Taiwan: System Description and Preliminary Results," Remote Sensing, vol. 14, 2022.

2 / 12

Estimated ToF and DFS of echoes in F and E regions

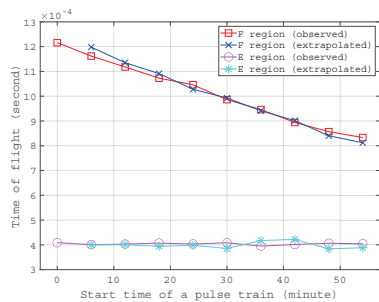
The cross-correlation intensity vs. the DFS is plotted in each subgraph, which is vertically aligned with its ToF.



4 / 12

Comparison of observation and extrapolation of DFS

The observed ToF is extrapolated with the estimated DFS during the next interval and compared to the next ToF. No significant difference is recognized between them.



5 / 12

Idealized model of received samples

Suppose that known wave form is sampled at time $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$ after ToF τ_0 with DFS F_0 with additional noises n

$$s(t_k) = e^{2\pi i F_0(t_k - \tau_0)} x(t_k - \tau_0) + n(t_k).$$

and that the noises obey independently identical Gaussian distribution of standard deviation σ

$$\begin{cases} E[n(t_k)] = 0 \\ E[n^*(t_{k_1})n(t_{k_2})] = \sigma^2 \delta_{t_{k_1}, t_{k_2}}, \end{cases}$$

where Kronecker delta is represented by $\delta_{t_{k_1}, t_{k_2}}$. With the following model

$$y_\theta(t) = e^{2\pi i F(t - \tau)} x(t - \tau),$$

MLE is constructed.

6 / 12

Maximum likelihood estimator

From the noise distribution, a log likelihood function is derived as

$$\begin{aligned}\ell(\theta) &= -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_k |y_\theta(t_k) - s(t_k)|^2 + (\text{indep. of } \theta) \\ &= \frac{1}{\sigma^2} \Re \left(\sum_k y_\theta^*(t_k) s(t_k) \right) + (\text{indep. of } \theta).\end{aligned}$$

and a MLE $\hat{\theta} = (\hat{\tau}, \hat{F})$ is defined by the argument that maximizes the likelihood function.

Cramér-Rao bound (CRE) of the DFS estimator³

The first and second partial derivatives of the log likelihood function with the DFS F are derived as follows

$$\begin{aligned}\frac{\partial \ell}{\partial F}(\theta) &= -\frac{i\pi}{\sigma^2} \sum_k (t_k - \tau) \left\{ e^{-2\pi i F(t_k - \tau)} x^*(t_k - \tau) s(t_k) - e^{2\pi i F(t_k - \tau)} x(t_k - \tau) s^*(t_k) \right\}, \\ \frac{\partial^2 \ell}{\partial F^2}(\theta) &= \frac{2\pi^2}{\sigma^2} \sum_k (t_k - \tau)^2 \left\{ e^{-2\pi i F(t_k - \tau)} x^*(t_k - \tau) s(t_k) + e^{2\pi i F(t_k - \tau)} x(t_k - \tau) s^*(t_k) \right\}.\end{aligned}$$

The CRE of the variance of the DFS estimator $\hat{F}$ is derived as follows,

$$\text{Var}(\hat{F}) \geq -\frac{1}{E \left[\frac{\partial^2 \ell}{\partial F^2}(\theta_0) \right]} = \frac{\sigma^2}{4\pi^2 \sum_k (t_k - \tau_0)^2 |x(t_k - \tau_0)|^2}.$$

The summation in the denominator is the second-order moment with respect to the sample distribution of photon arrival times, and increases with pulse repetition.

³T. Iwamoto and M. Konishi, "Analysis of wave propagation estimation," IEIEC Technical Report, SANE2025-31, 2025.

7 / 12

8 / 12

Repeating pulses in Shigaraki ionosonde transmission

At present, the Shigaraki ionosonde observation has time margin to repeat pulses, which improves the accuracy of the DFS estimator. The controlling software of the Shigaraki ionosonde was revised and tested in the following steps:

- Recompile:** The controlling software of the Shigaraki ionosonde was recompiled in a virtual PC with an outdated compiler running on an outdated OS.
- Revision:** The controlling software was revised to repeat specified pulses while keeping the risk of malfunction suppressed.
- Test:** The revised software was successfully tested without physical transmission.

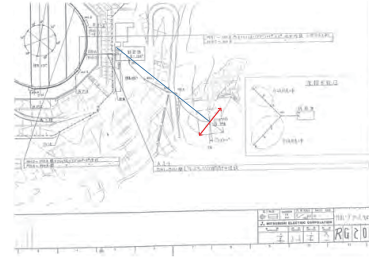
Transmission of physical pulses by the revised controlling software during maintenance periods of MU radar is under preparation.

9 / 12

Sampling

Identification: Currents in the two antennas of the ionosonde were measured, and Tx (marked with a red arrow) and Rx antennas were identified.

Antenna position: In the direction orthogonal to the Poynting vector of the Tx, the additional antenna position for sampling should be fixed.



10 / 12

Summary of current status and future work

- Revision:** The controlling software was revised to repeat specified pulses while keeping the risk of malfunction suppressed.
- Test:** Revised software was tested without physical transmission.
- Identification:** Currents in the two ionosonde antennas were measured and Tx and Rx antennas were identified.
- Antenna position:** In the direction orthogonal to the Poynting vector of the Tx, the additional antenna position for sampling should be fixed.
- Smpling:** Sampling of ionospheric echoes of pulses by the revised controlling software during maintenance periods of MU radar is under preparation.
- MLE:** The ToF and DFS of each Shigaraki ionosonde echo will be estimated simultaneously.
- Quatification:** The growth rate of MSTID instability will be quantified if its echoes are sampled.

11 / 12

Acknowledgments

We would like to thank Associate Prof. Yokoyama, Mr. Kuzue, and Mr. Mushiake of Research Institute for Sustainable Humanosphere for their support of our collaborative research program. We would also like to thank Dr. Nadai, Dr. Jin, Dr. Tao, Dr. Nishioka, and Dr. Tsugawa of NICT for their support of our observations at the Okinawa Electromagnetic Technology Center; Dr. Nozaki for his comments on the predictable growth of the ionosphere; Dr. Lee of the Central Weather Administration (at that time) for his agreement to use the Chung-Li ionosonde data; and Prof. Chu and Dr. Kuong of National Central University for information on operation modes and parameters; Mr. Fuller of Genesis Software for accurate parameter values; and Ms. Hsiao, Mr. Zheng, Mr. Tabata, Ms. Pan, and Mitsubishi Electric Taiwan colleagues for assisting with observations. The authors also thank Associate Prof. Saito of Kyoto University for his insightful comments.

12 / 12