

第 428 回 生存圏シンポジウム

第 14 回  
MULレーダー・赤道大気レーダー  
シンポジウム

2020年9月14日・15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。

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) を概算要求している。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」(2014・2017 は津田敏隆代表、2020 は山極壽一京大総長代表) が選定された。

本年 9 月 14 日・15 日に、第 14 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウムを開催した。今回は新型コロナウイルス (COVID-19) の感染拡大防止のためオンラインで開催した。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、計画について海外からも含め 29 件の研究発表があり、活発な議論が行われた。

2020 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・共同研究拠点専門委員会  
委員長 山本 衛

## 目 次

MU レーダー・赤道大気レーダー共同利用の現状……………	1
山本衛・橋口浩之(京大 RISH)	
YMC 集中観測期間(2015/2017)におけるスマトラ南西沿岸陸域の対流日変化と雷活動…	4
森修一(JAMSTEC)・濱田純一(都立大)・伍培明・米山邦夫(JAMSTEC)・Dodi Ardiansyah・Urip Haryoko・Noer Nurhayati (BMKG, Indonesia)・Reni Sulistyowati・Fadli Syamsudin (BPPT, Indonesia)	
スマトラ東部沿岸部における降雨日変化 -泥炭地域レーダー観測結果- ……	8
小川まり子(京大東南研)・山中大学(地球研)・Awaluddin・Arief Darmawan・Albertus Sulaiman (BPPT, Indonesia)・甲山治(地球研・京大東南研)	
スマトラ島で観測されたオゾン変動と力学場の関係について……………	11
鈴木順子・荻野慎也・木下武也・城岡竜一(JAMSTEC)・岩崎杉紀(防衛大)・米山邦夫(JAMSTEC)	
熱帯対流圏界層における乱流による混合の観測……………	13
橋野桃子・橋口浩之(京大 RISH)・Richard Wilson (LATMOS/IPSL)・荻野慎也・鈴木順子(JAMSTEC)	
YMC-BSM2018 で観測されたインドシナ半島におけるオゾン変動……………	16
荻野慎也・鈴木順子・木下武也・城岡竜一(JAMSTEC)	
IUGONET プロジェクトの活動報告とその成果について……………	18
新堀淳樹(名大 ISEE)・田中良昌(極地研)・梅村宜生(名大 ISEE)・阿部修司(九大 ICSWSE)・上野悟(京大天文台)	
観測ロケットに搭載するデュアルバンド・ビーコン送信機とアンテナの開発……………	21
黒川浩規・山本衛(京大 RISH)	
NICT activities on space weather research and operation in Asia ……	24
Kornyanat Hozumi・Mamoru Ishii・Takuya Tsugawa・Michi Nishioka (NICT)・Pornchai Supnithi (KMITL, Thailand)・Punyawi Jamjareegulgarn (KMITL PCC, Thailand)・Sittiporn Channumsin (GISTDA, Thailand)・Tharadol Komolmis (CMU, Thailand)・Donekeo Lakanchan (NUOL, Laos)・Win Zaw (YTU, Myanmar)・Mamoru Yamamoto (RISH, Kyoto Univ.)・Susumu Saito (ENRI)・Yuchi Otsuka (ISEE, Nagoya Univ.)	
MU レーダーによる電離圏観測の長期統計解析……………	26
横山竜宏・上野将典・山本衛(京大 RISH)	
GAIA モデルとの結合に向けた赤道プラズマバブルシミュレーションの改良 ……	28
古元泰地・横山竜宏(京大 RISH)	
Synthetic aperture radar and ground observation of ionospheric disturbances over Japan ……	31
Hiroatsu Sato・Jun Su Kim (DLR, Germany)・Yuichi Otsuka (ISEE, Nagoya Univ.)	
ライダーによる赤道域対流圏・成層圏のエアロゾル動態モニタリング……………	33
阿保真・柴田泰邦・長澤親生(都立大)	
YMC-BSM 期間中の西太平洋域に見られた南西方向に伝播する擾乱活動に関する研究…	37
木下武也・荻野慎也・鈴木順子・城岡竜一(JAMSTEC)	

バングラデシュにおける X 帯レーダー観測 .....	40
村田文絵(高知大理工)・寺尾徹(香川大教育)・上米良秀行(防災科研)・下舞豊志(島根大理工)・佐々浩司(高知大理工)・Sayeed Ahmed Choudhury・Shamsuddin Ahmed (バングラデシュ気象局)・Towhida Rashid (ダッカ大)	
ヴェトナム北部における時間雨量の GSMaP・地上降水計比較 .....	43
野津雅人(都立大)・松本淳(都立大・JAMSTEC)・L. Trinh-Tuan (ハノイ科技大)・T. Ngo-Duc・T. Truong-Duc (ヴェトナム資源環境省)	
北半球冬季中層大気における移動性プラネタリー波 .....	48
岩尾航希(熊本高専)・廣岡俊彦(九大院理)	
2019/2020 年北半球冬季における極渦発達の力学過程について .....	51
松山裕矢・廣岡俊彦(九大院理)・向川均(京大院理)	
衛星＝地上の電離圏全電子数観測手法の開発状況 .....	54
山本衛(京大 RISH)	
Study of the ionospheric scintillation and plasma bubble structure by using EAR and multi-constellation and multi-frequency (MC/MF) GNSS receiver .....	57
Acharaporn Bumrungrit・Susumu Saito (ENRI)・Pornchai Supnithi (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand)	
赤道大気レーダーによる 2019 年 12 月の金環日食時の電離圏観測 .....	60
高木理絵子・横山竜宏・山本衛(京大 RISH)・穂積 Kornyant (NICT)	
Equatorial plasma bubbles and midnight brightness wave interaction over a low latitude station .....	63
M. Sivakandan・Y. Otsuka (ISEE, Nagoya Univ.)・T.K. Ramkumar (NARL, India)・P. Ghosh (ISEE, Nagoya Univ.)・S. Sripathi (IIG, India)	
Occurrence feature of plasma bubbles during geomagnetic storms using long-term GNSS-TEC data .....	67
惣宇利卓弥・大塚雄一・新堀淳樹(名大 ISEE)・津川卓也・西岡未知(NICT)	
衛星回線における降雨減衰特性と地上風および上空の風速との関係 .....	70
前川泰之・佐々木駿一・山崎光資・柴垣佳明(大阪電通大)	
GNSS 稠密ネットワークおよびラマンライダーを用いた信楽上空の水蒸気時空間変動の観測 .....	76
矢吹正教・柿原逸人・津田敏隆(京大 RISH)・塚本誠・竹内栄治・長谷川壽一(英弘精機)	
スペクトル観測理論に基づくレーダーインバージョンアルゴリズムの開発 .....	79
田村亮祐(京大 RISH)・西村耕司(国立極地研)・橋口浩之(京大 RISH)	
MU レーダーを用いた DDMA-MIMO 観測結果 .....	83
松田知也・橋口浩之(京大 RISH)	
島根県におけるレーダー解析雨量と AMeDAS 観測値との比較 .....	86
下舞豊志・小林謙吾(島根大総合理工)	
複数の航空機監視装置で受信される高頻度気象情報の MU レーダー観測との比較検証 .....	89
吉原貴之・瀬之口敦・毛塚敦・齋藤享・古賀禎(ENRI)	



# MU レーダー・赤道大気レーダー共同利用の現状

山本衛・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(2020 年より MU レーダー/赤道大気レーダー共同利用・共同研究拠点専門委員会)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、大型大気レーダーとしての感度は世界 4-5 番目ではあるものの、開発後 30 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 年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。

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 カ所の現業用ウイ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。また、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。これは、社会や生活、産業、科学技術の発展に大きな影響を与えた研究開発の偉業を選定し、電子情報通信の研究開発の歴史と意義を振り返ると共に、次の 100 年に向けて更なる革新を起こす次代の研究者や技術者にその創出過程を伝えることを目的としている。さらに、2018 年 3 月 15 日に電気学会から「でんきの礎」が授与された。これは、電気学会が社会の発展に貢献し、歴史的に記念される「モノ・場所・こと・人」を顕彰するために創立 120 周年の 2008 年に創設したものである。

### 3. 赤道大気レーダー

赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)は、周波数 47MHz、3 素子八木アンテナ 560 本から構成される直径約 110 m の略円形アンテナアレイを備えた、インドネシア共和国のスマトラ島中西部に位置する西スマトラ州コトタバンに 2000 年度末に完成した大型の大気観測用レーダーである。本装置は、小型の送受信モジュールが全ての八木アンテナの直下に備えられたアクティブ・フェーズド・アレイ構成をとっており、総送信出力が 100 kW、アンテナビーム方向を天頂角 30 度以内の範囲で自由に設定し、送信パルス毎に変えることができ、赤道域に設置されている大気レーダーの中で世界最高性能を誇っている。EAR はインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)との密接な連携のもとで運営されており、2001 年 7 月から現在まで長期連続観測を続けてきた。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ている。また、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、観測を中断している。出張修理が必要であるが、渡航制限が続いているため、復旧に時間を要している。

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)」の新設を概算要求している。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」(代表：津田敏隆)は日本学術会議のマスタープラン 2014・2017 の重点大型研究計画の一つとして採択された。さらに、マスタープラン 2020 に、山極壽一京大総長を代表者として応募し、重点大型研究計画の一つとして採択された。

### 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わたる多くの成果を上げている。図 1 にこれまでの

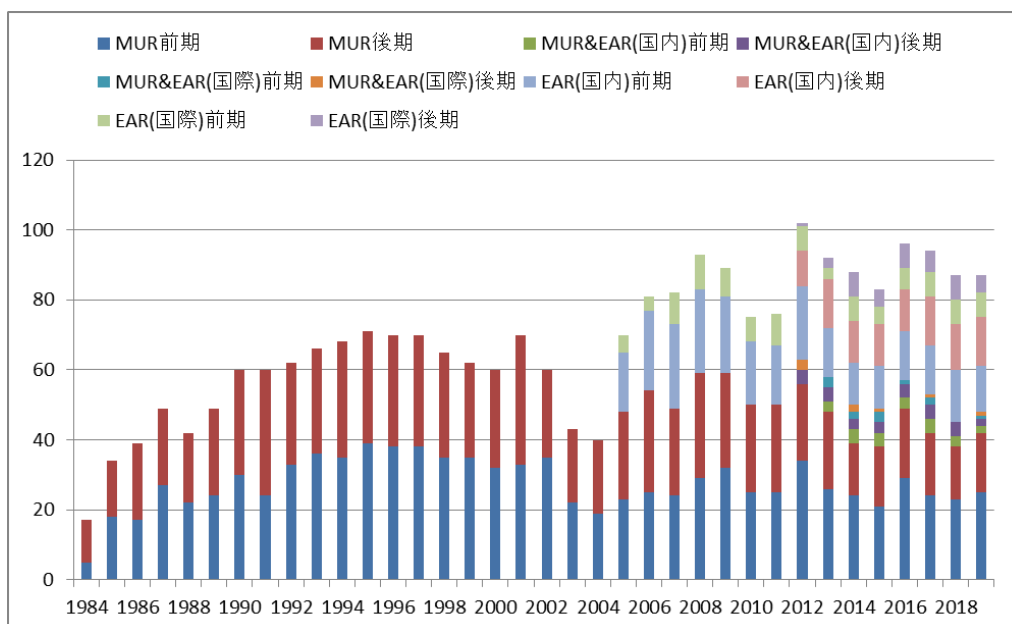


図 1. MU レーダー・赤道大気レーダー全国国際共同利用の課題件数の年次推移

共同利用課題数の推移を赤道大気レーダー共同利用の課題数とともに示す。また、図 2 に MU レーダーの観測時間の推移を示す。2017 年 2~4 月には MU レーダー高感度観測システムの整備のため、共同利用観測を休止した。2019 年度には、キャンペーン(長期間)観測課題として、後期に佐藤薫教授代表の「国際大型大気レーダーネットワーク同時観測」を実施した。観測データのうち標準観測については観測後直ちに、その他の観測については 1 年を経過したデータを「生存圏データベース共同利用」の一環として共同利用に供している。

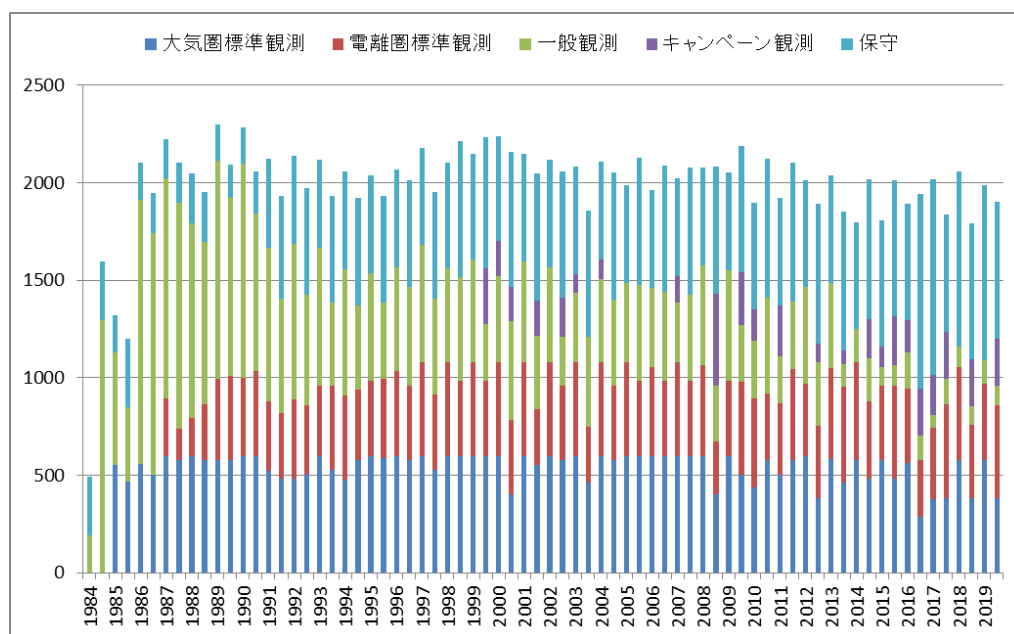


図 2. MU レーダー全国国際共同利用の観測時間の半年毎の推移。

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 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 ICSU(国会科学会議)の WDS(世界科学データシステム)の Regular Member に認定された。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。



# YMC集中観測期間(2015/2017)におけるスマトラ南西沿岸陸域の対流日変化と雷活動

森 修一<sup>1</sup>, 濱田純一<sup>2</sup>, 伍 培明<sup>3</sup>, 米山邦夫<sup>1</sup>, Dodi Ardiansyah<sup>3</sup>, Urip Haryoko<sup>3</sup>, Noer Nurhayati<sup>3</sup>, Reni Sulistyowati<sup>4</sup>, Fadli Syamsudin<sup>5</sup>  
 1 JAMSTEC 2 都立大 3 BMKG/Indonesia 4 BPPT/Indonesia

## 1. 背景

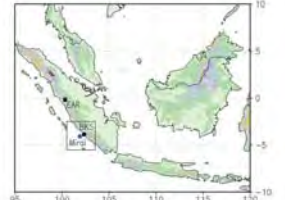
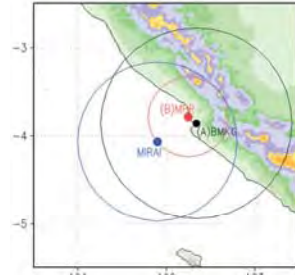
- Pre-YMC 2015およびYMC-Sumatra 2017の集中観測(以下, Y15とY17)において, 対流活動の特徴(日変化移動特性等)が大きく異なる(Yokoi et al. 2017, 2019; Geng et al. 2020).
- 特に沿岸「陸域」においては雷雨の発生(観測)が, Y15のMJOオンセット前だけに限られ(しかも毎日!), 西風強化後の後半には皆無。また, Y17ではMJO位置にかかわらず, ほぼ雷雨が発生しなかった(観測されなかった)。 ← ここまでは2018年シンポにて報告済

## 2. 目的

- まず, Y15における雷雨の発生環境について詳しく知りたい。
- 次に, 雷雨がY15(前半)に限定された理由, あるいはY17で雷雨が抑制された理由を明らかにしたい。

## 3. 研究対象域

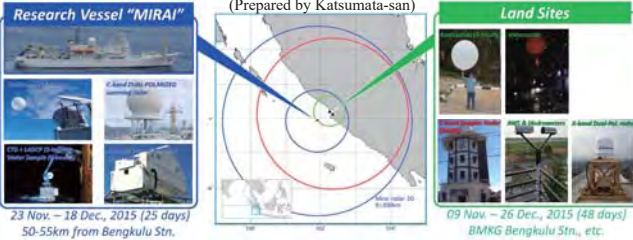
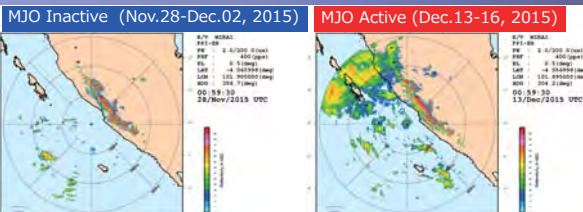
ベンクルBMKG観測所およびMess Penda レーダー(下記MPR)観測所から半径50kmの範囲内の「主として沿岸陸域」



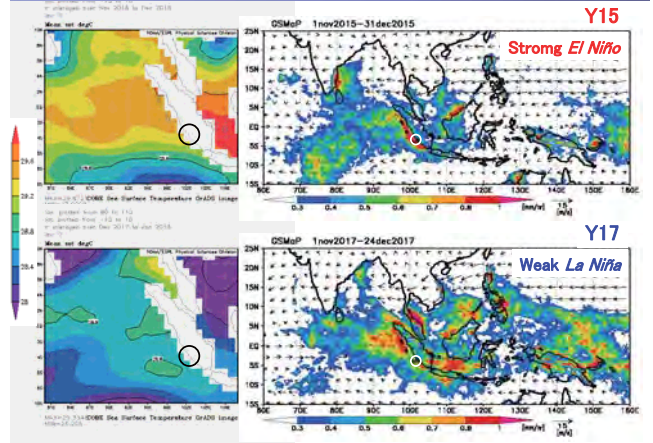
## 4. 研究対象期間

Y15: 2015年11月09日~12月25日(47日間)  
 Y17: 2017年11月16日~  
 2018年01月15日(61日間)

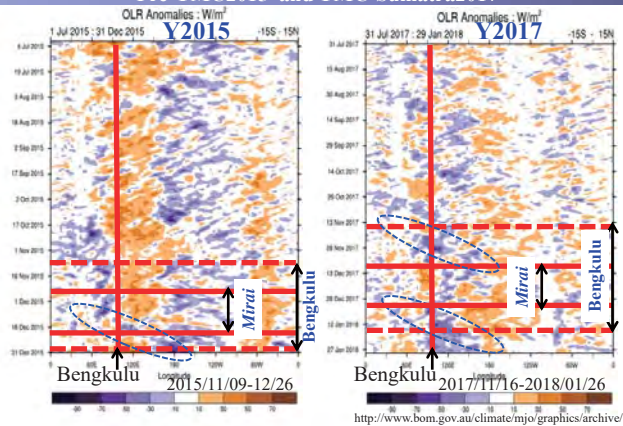
## Rainfall Characteristics between MJO Inactive and Active Phases



## Synoptic Condition (Satellite Observed Precipitation and SST)



## OLR Anomalies between Pre-YMC2015 and YMC-Sumatra2017



## 5. 現地観測データ

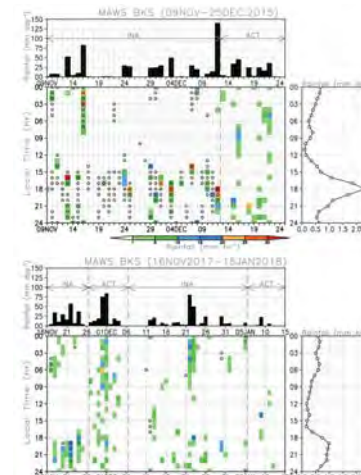
- 時間降水量  
JAM設置自動気象ステーション(AWS)による1分毎降水量を積算
- 雷(雷雨, 雷光, 雷鳴) ○印 BMKG現業観測(SYNOPの基となる1時間毎観測記録)より作成。ただし, 日本(JMA)とは異なり, 観測員の目視および聴覚による。

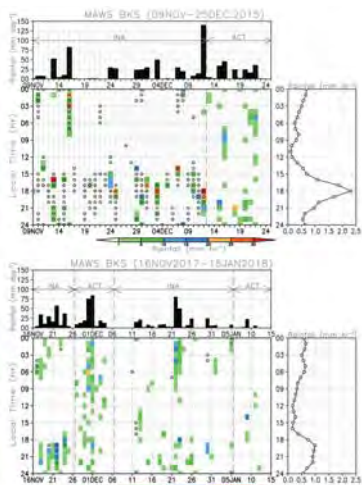
御参考

- LN(13): Lightning (雷光)
- T(17): Thunder (雷鳴)
- TS(95): Thunderstorm (雷雨)

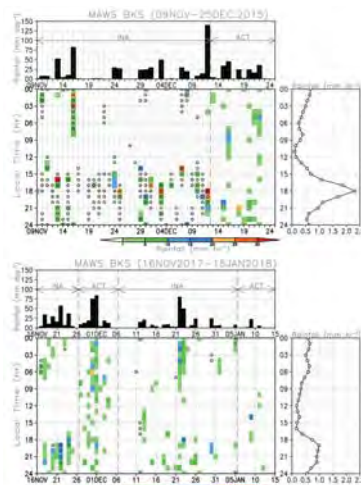
・SYNOP(地上気象観測指針) 一般的に20km以上の場合は聞こえない

・METAR(定時航空気象通報式) 飛行場(約8km)とその周辺(約16km)の範囲内の現象を報じる



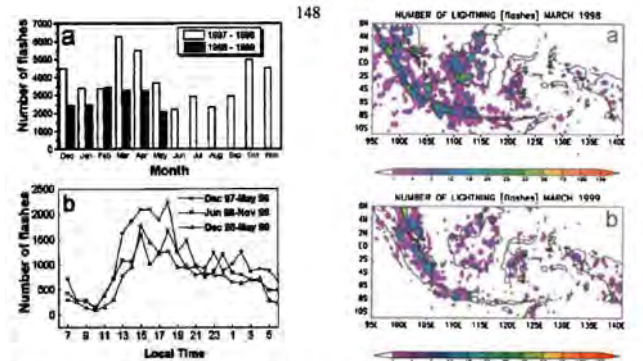


5. 現地観測データ  
 AWS降水量  
 Y15: 778.2mm/47日間 (16.6 mm/d) 降水日変化の夕方ピークが明瞭かつMJOオンセット前の日最大降水量が130mm超え。  
 Y17: 757.6mm/61日間 (12.4 mm/d) 降水日変化ピークは夕刻にあるものの緩やか、かつ日最大降水量が100mmを超えることはなかった。また、MJOオンセット期以外でも朝雨の日多し。ただし、Y17はY15に対して約75%で、それほど大きな差ではない。



5. 現地観測データ  
 SYNOP雷観測  
 Y15: MJOオンセット前には毎日夕刻を中心に3時間~12時間以上の発雷を観測したものの、MJOオンセット以降は降水あるものの発雷は皆無。  
 Y17: 最初のMJOオンセット前に数日発雷している以外、基本的にはMJO有無にかかわらず、発雷なし。

Impact of the 1997-98 El Nifio Event on Lightning Activity over Indonesia (Hamid et al. GRL2001)



(a) Monthly variation, and (b) diurnal activity over Indonesia. Figure 2. Lightning distribution, (a) March 1998, and (b) March 1999. The number of flashes is sampled every 0.5° grid into

Analysis of rainfall characteristics of the Madden-Julian oscillation using TRMM satellite data (Morita et al. 2006)

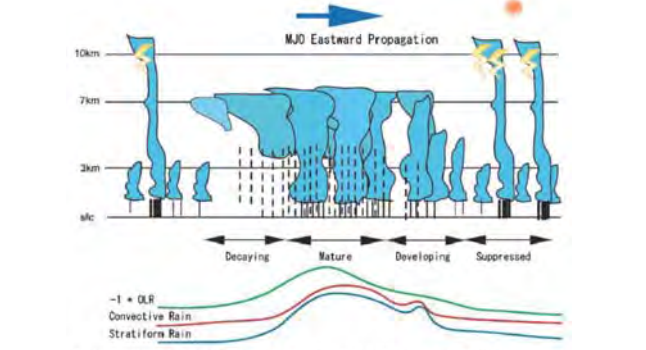
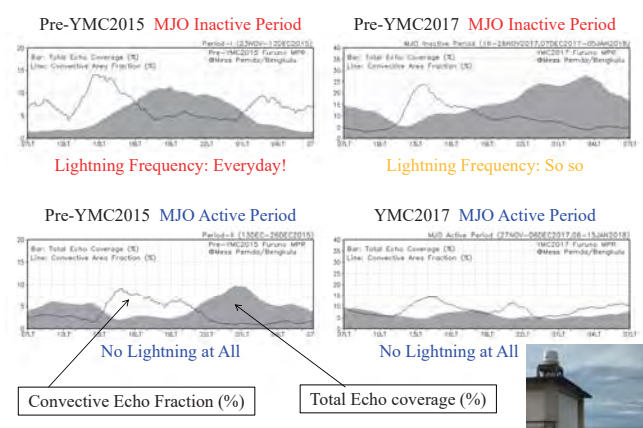
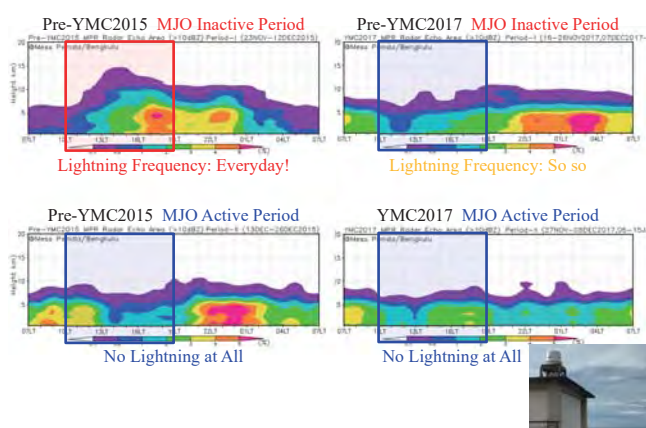


Fig. 14. Conceptual model of an MJO life cycle in terms of rain and rain-related variables. Vertical solid lines represent convective rainfall and vertical dashed lines represent stratiform rainfall. Since it is assumed that the system moves eastward without drastically changing the structure in this analysis area, the abscissa represents longitudes as well as time. And time proceeds from right to left. The three curves in the bottom schematically represent anomalies of the inverse of OLR, the convective rain amount, and the stratiform rain amount, from top to bottom.

Radar Echo Coverage (@2km) Observed with X-band DPR



Echo Coverage Profile (>10dBZ) Observed with X-band DPR

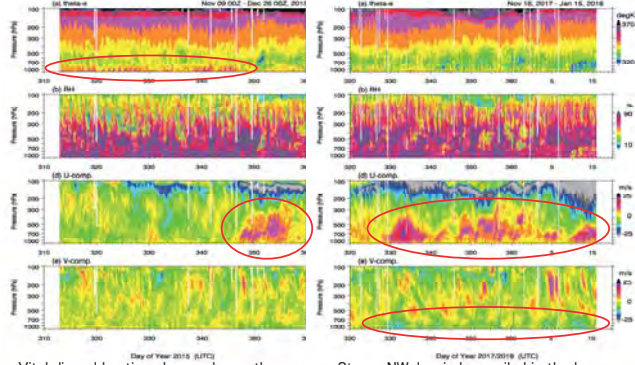




### Synoptic Condition (Intensive Soundings at Bengkulu)

Y15 (Nov.09-Dec.25, 47 days)

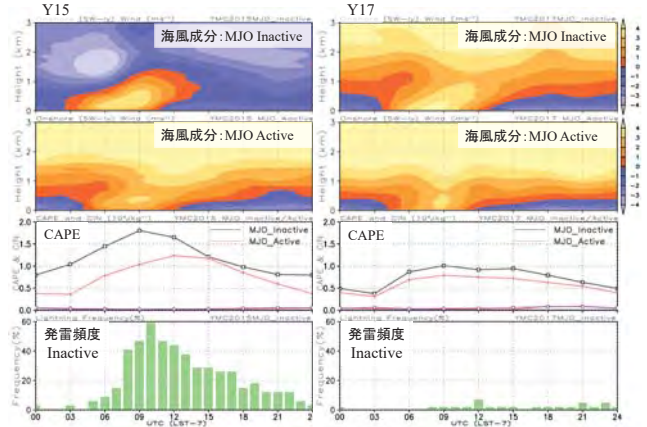
Y17 (Nov.16-Jan.15, 61 days)



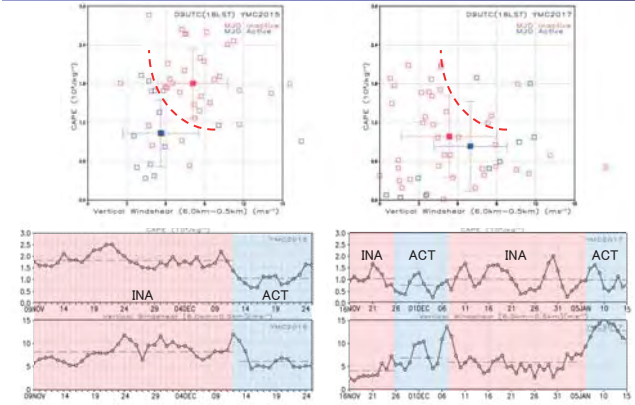
Vital diurnal heating observed near the surface. Apparent W-ly wind prevailed only after MJO onset.

Strong NW-ly wind prevailed in the lower troposphere continuously during the whole period.

### Y15 vs. Y17: 海風成分, 大気安定度, 発雷頻度

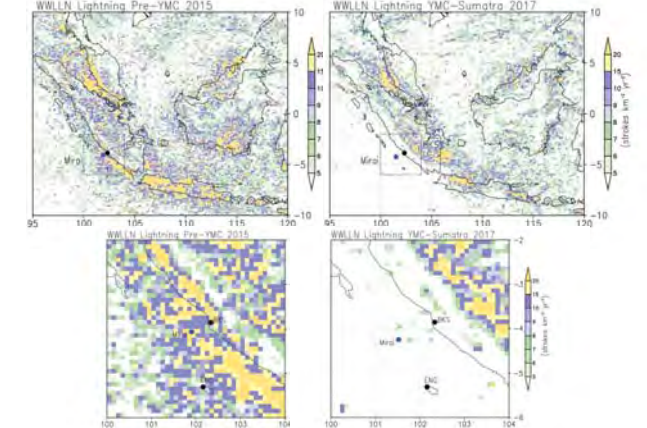


### CAPE and Vertical Wind Shear (6.0km-0.5km) @ 16LST



Bulk-Richardson数 (Rb) =  $CAPE / [1/2 (U_H - U_L)^2]$  (深い対流: H = 6 km, L = 0.5 km)

### WWLLN lightning strokes during Y15 and Y17



### Diurnal Lightning Variability over the Maritime Continent: Impact of Low-Level Winds, Cloudiness, and the MJO (Virts et al. JAS2013)

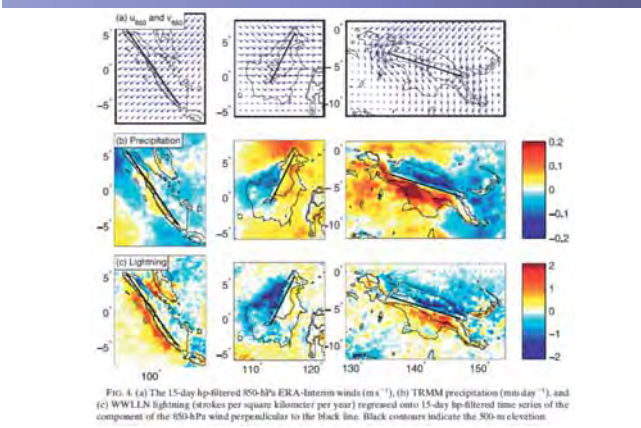
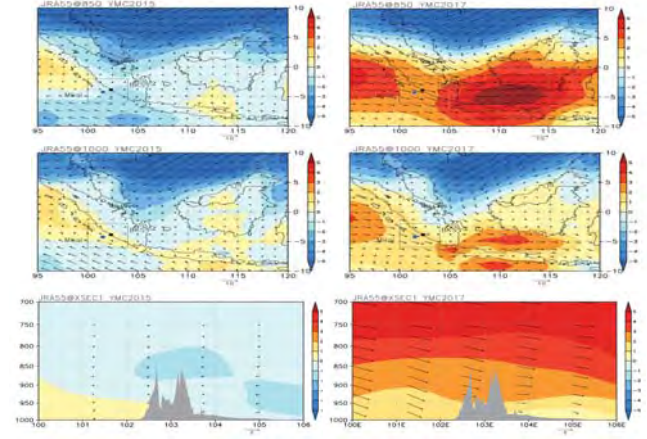


FIG. 4. (a) The 15-day hp-filtered 850-hPa ERA-Interim winds ( $m s^{-1}$ ), (b) TRMM precipitation ( $mm day^{-1}$ ), and (c) WWLLN lightning (strokes per square kilometer per year) regressed onto 15-day hp-filtered time series of the component of the 850-hPa wind perpendicular to the black line. Black contours indicate the 300-m elevation.

### 鉛直シアの向きを決めるENSOとCENS の影響 (JRA55)



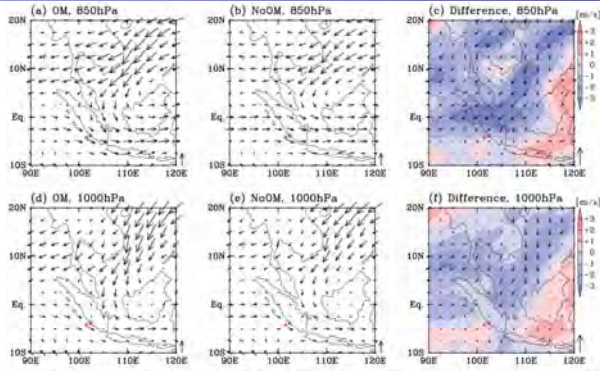


FIG. 11. (a)–(c) Composite horizontal wind at the 850-hPa level in (a) the OM days and (b) the NoOM days, and (c) the difference of the OM-day composite from the NoOM-day composite. Unit vector on the right of each panel represents  $10 \text{ m s}^{-1}$ . The red circle and square represent the positions of the RV *Mirai* and the Beangkulu site, respectively. In (c), color shadings indicate differences of  $q_2$  in the OM days from that in the NoOM days. (d)–(f) As in (a)–(c), but for the 1000-hPa level.

- 期間降水量(日平均)に大差ない(Y17はY15の約75%)ものの、降水日変化や発雷頻度は顕著に異なる特徴を持ち、MJO活発/非活発期に対する応答にも差異があった。
- レーダー観測から、特に発雷頻度が高かったY15 MJO不活発期には、日中帯に高度10-15kmに達するエコー領域が多い(逆に他期間では高い対流発達抑制された)。
- 全ての期間に日中帯の海風成分侵入が観られるものの、Y15 MJO不活発期のみ海風侵入高度( $\sim 1.5 \text{ km}$ )より上空が常に北東風であり、この強い沖向き鉛直シア環境が(対流不安定度やエアロゾルと共に)沿岸陸域対流の発達や雷雨へ組織化に寄与した可能性。
- 一方、Y17では沿岸陸域に雷雨はほぼ観測されていないが、脊梁山脈東側では数多く発生していた。これは、La Nina期の発雷特性でもあり、上空の北東風(CENS)が入りにくく、東向き鉛直シアが山脈東側の対流発達と雷雨への組織化に寄与しているのではないやろか...

## スマトラ東部沿岸部における降雨日変化 -泥炭地域レーダー観測結果-

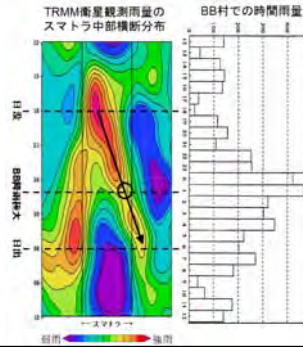
小川まり子(京大東南研)・山中学(地球研)・Awaluddin・Arief Darmawan・  
Albertus Sulaiman (BPPT, Indonesia)・甲山治(地球研)・京大東南研



1

## 背景・目的 日降雨変化

1998-2000  
(Mori et al., 2004)  
降雨極大となる雨域が  
スマトラ中部を横断するの  
が日没頃。



6 Nov 2009 - 23 Apr 2011  
(Kozan, 2012)  
降雨極大となる雨域が  
ブキットパトゥ村 (スマト  
ラ東側) を通過するのが深  
夜未明頃。  
スマトラ東側・ブンカリス  
島 (スマトラ島のさらに東  
側の島) に降雨ピークが到  
達する時間は風向風速など  
様々な要因によって異な  
る。  
=> 面的な観測かつ時間・空  
間がより高解像度である小  
型Xバンド気象レーダー  
(FURUNO) を用いて、スマ  
トラ東部沿岸での雨の空間  
・時間変動、日降雨変化  
を把握したい。

## 研究対象地域 プンカリス島



3

## 背景・目的 泥炭地域の乾燥化



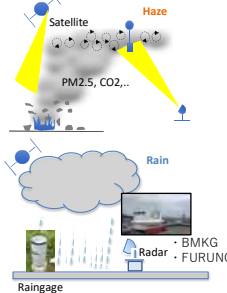
ブンカリス島周辺の泥炭海岸の侵食。  
海岸付近の水路作成により、海への地下  
水流出量が増加し、泥炭地が乾燥化。  
(山本ほか、2014)。

泥炭地火災の危険性を考える場合、雨量  
を把握し、土壌中の水分量を把握するこ  
とが重要。

=>ブンカリス島周辺、スマトラ東部沿  
岸における雨域移動、降雨日周期を把握  
することで、雨の降らない場所・時間帯  
を知ることにもつながる。

4

## 泥炭地域レーダー観測の目指すもの 概要



Satellite-based information

- Hot spot
- Rain data

https://hazebias.com/indonesia/2009/08/08/indonesia\_1.htm  
https://www.bmkg.go.id/hazebias/hazebias/5am-16-0-0

+ -Future information-

Radar-based localized information

- Radar data
- Location of fire and Haze

→ Understanding the water balance  
to grasp the fire risk in peatland

## FURUNO XバンドMPレーダー



STAIN Bengkalis  
(地元公立大学)

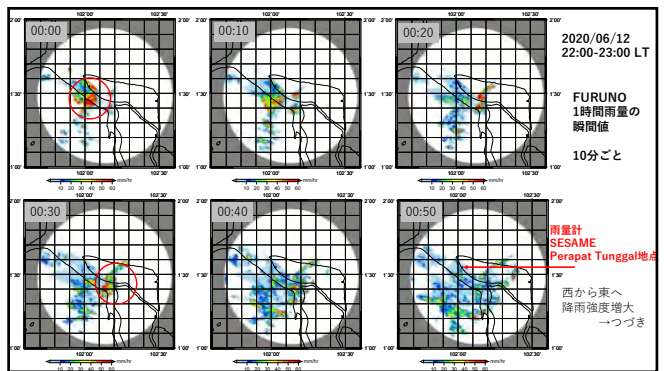
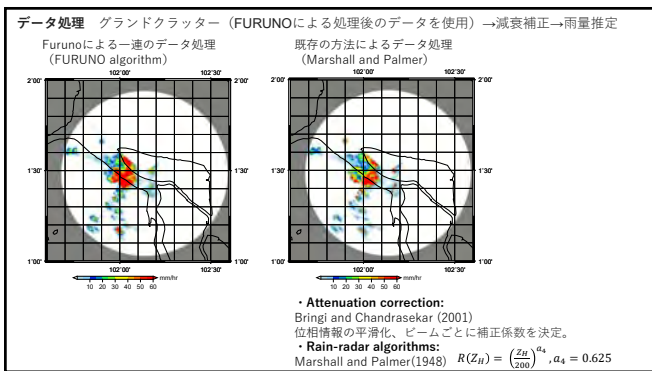
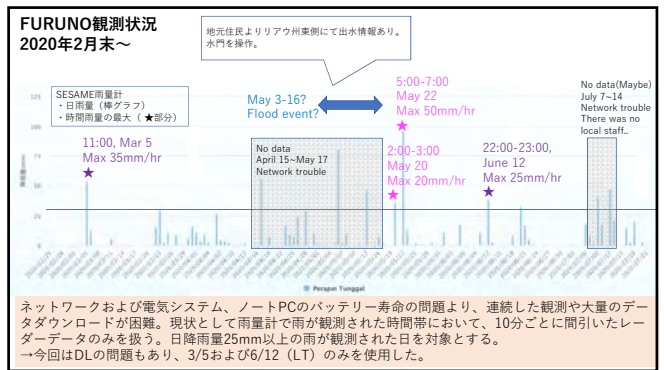
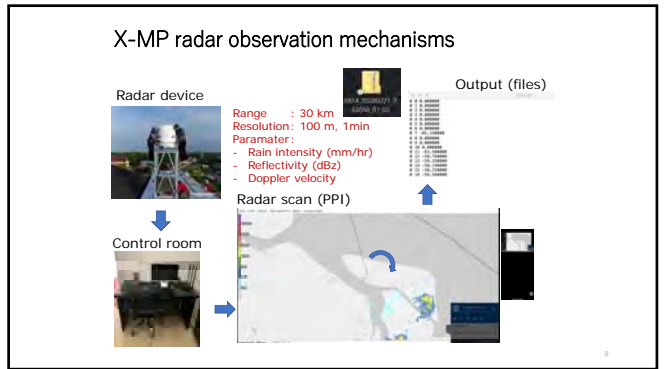
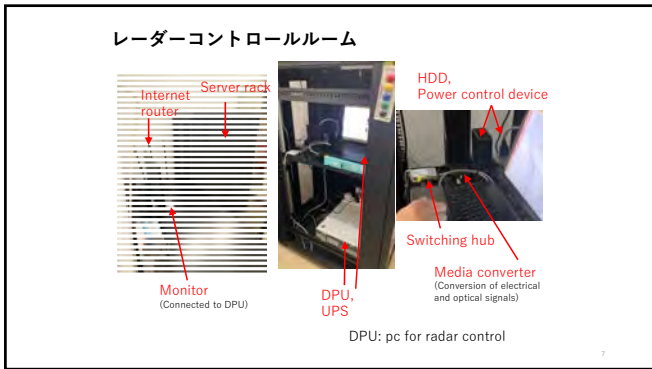
2020年2月末設置

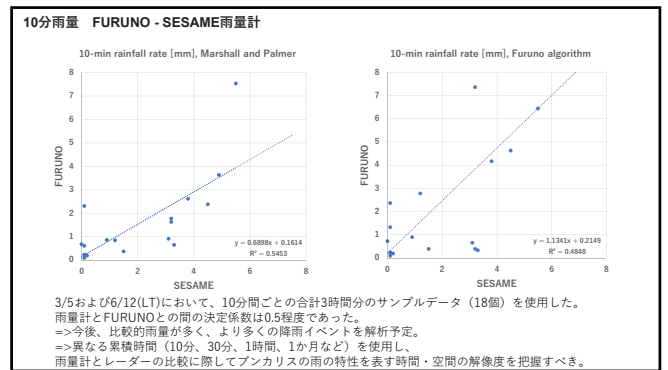
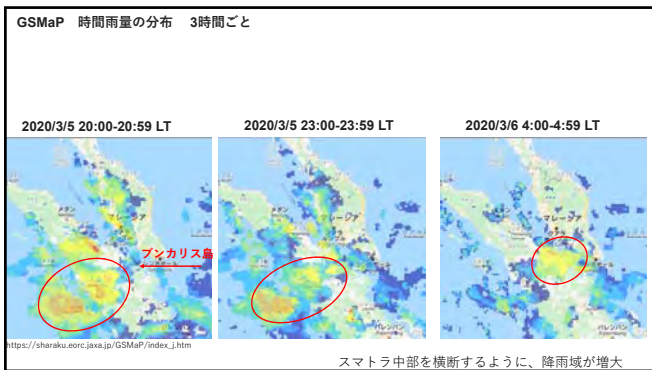
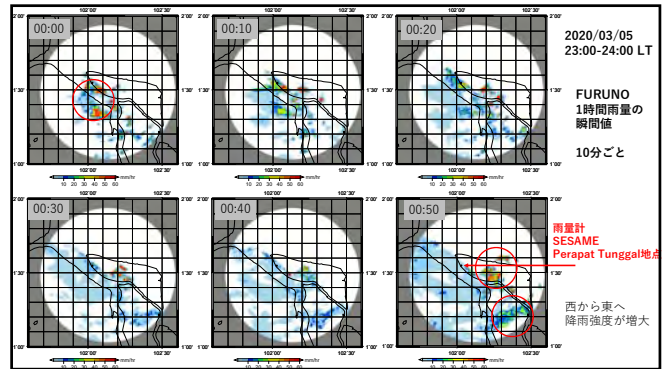
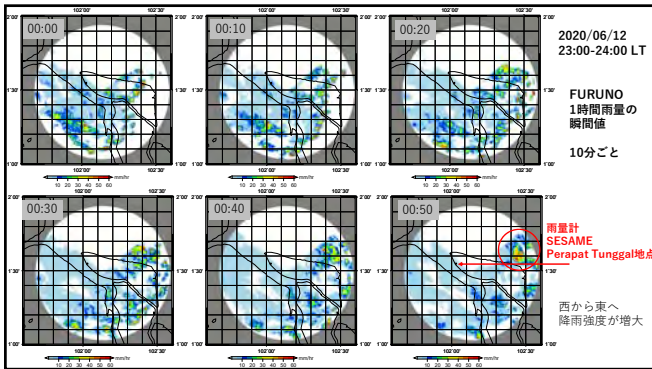


4階屋上

5







**まとめと今後**

- ・スマトラ東部沿岸での雨の空間・時間変動、日降雨変化を把握すべく、面的な観測かつ時間・空間がより高解像度である小型Xバンド気象レーダー (FURUNO) を用いた雨量推定を行った。
- ・FURUNOによるクラッター除去後、既存の方法によりデータ処理 (減衰補正) および雨量推定を行った後、雨量計との比較を行い、また雨域の移動を定性的に把握した。
- ・10分間ごと合計3時間分のサンプルデータ (18個) を使用した結果、雨量計とFURUNOとの間の決定係数は0.5程度であった。

今後：

- ・電気システムおよびネットワークの問題、ノートPCのバッテリー問題を解消し、比較的雨量が多く、より多くの降雨イベントを解析する。
- ・異なる累積時間 (10分、30分、1時間、1か月など) を使用し、雨量計とレーダーの比較に際して、ポンカリス島を含むスマトラ東部沿岸の雨の特性を表す時間・空間の解像度を把握する。

# スマトラ島で観測された オゾン変動と力学場の関係について

鈴木順子・荻野慎也・木下武也・城岡竜一(JAMSTEC)・岩崎杉紀(防衛大)  
・米山邦夫(JAMSTEC)

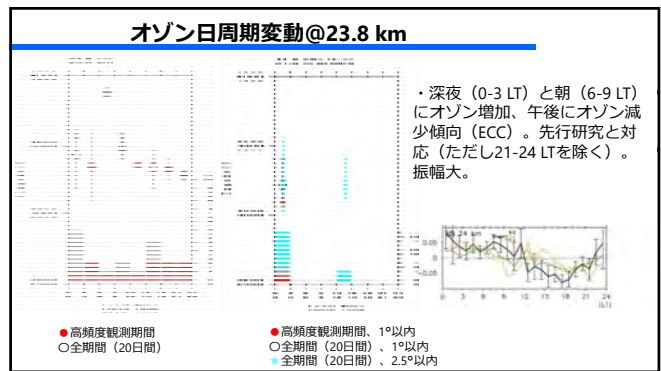
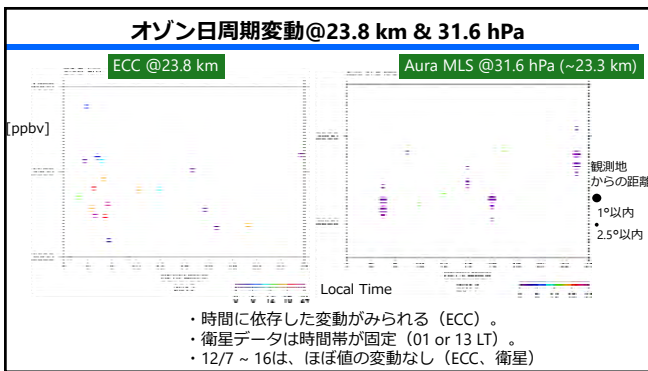
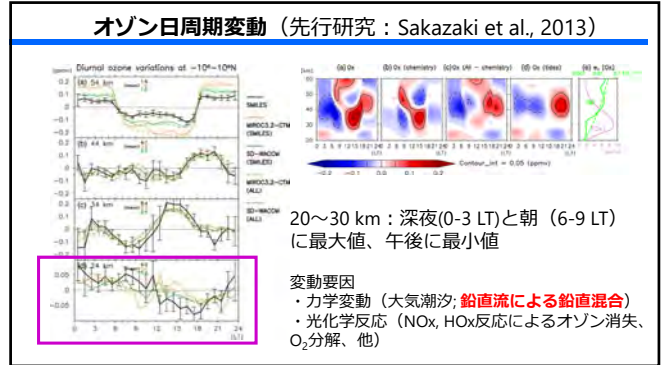
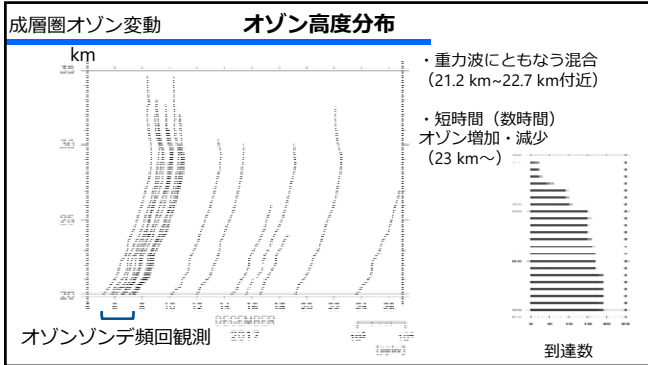
第14回MUリーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 2020年9月14日

## YMC-Sumatra 2017 特殊ゾンデ観測 (バンクル2017年12月)

- ・オゾンゾンデ (ECC) x25  
→成層圏オゾン日周期変動、(雷にとまなう変動)
- ・水蒸気ゾンデ (CFH) x11  
→対流圏界面～下部成層圏の脱水機構
- ・雲粒子ゾンデ (CPS) x4  
→雲内部 (とくに巻雲) の雲粒子分布

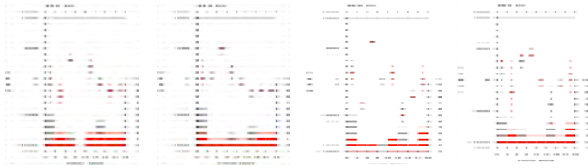


2018年7月コトバシ



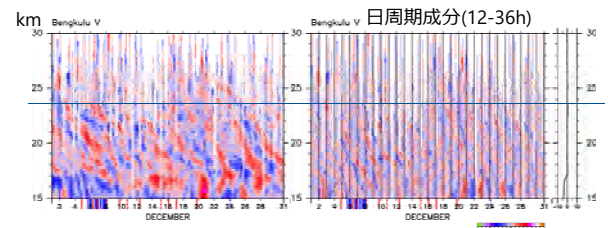
### 成層圏オゾン変動

### オゾン日周期変動



- ・ 深夜 (0-3 LT) と朝 (6-9 LT) にオゾン増加、午後にオゾン減少傾向 (ECC)
- 力学構造とオゾン変動の関係に注目

### 力学場 (南北風) の日周期変動



南北流 (東西風、温度場) では、日周期成分が卓越

- 今後、鉛直流の日周期成分を見積もる
- オゾン日周期成分への力学的作用の寄与率算出

### まとめと今後の課題

YMC-Sumatra 2017 特殊ゾンデ観測 (ベンクル 2017年12月)

#### 成層圏オゾン変動

- ・ 日周期変動がみられた
- 高度23 km より上層でオゾン日周期変動が見られる (先行研究と対応、ただし振幅大)
- ・ 今後、力学場 (鉛直流) の日周期変動を算出し、オゾン日周期への寄与率を高度ごとに見積もる (光化学過程 vs 力学過程)

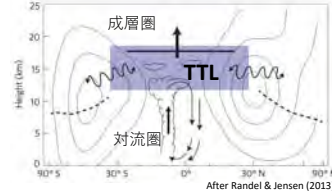
# 熱帯対流圏界層における乱流による混合の観測

2020.9.14

橋野桃子・橋口浩之(京大RISH)・  
Richard Wilson (LATMOS/IPSL)・  
荻野慎也・鈴木順子(JAMSTEC)

## 熱帯対流圏界層(TTL)研究の重要性

- 熱帯域特有の対流圏と成層圏の遷移領域。上空14 - 18.5 km [Fueglistaler, et al., 2009]
- 対流圏から成層圏への唯一の大規模な流入口
- TTL内のプロセス = 地球規模での成層圏の大気の化学組成に影響

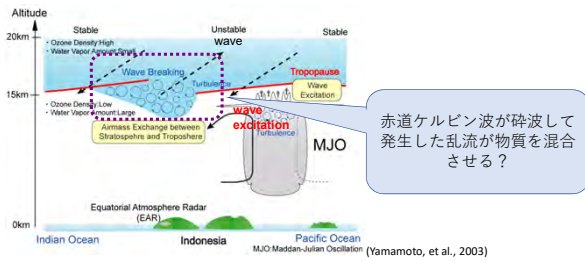


直接観測例が少ない

メソ～惑星規模の現象は研究多 ↔ 小規模な乱流の影響 = ?

## 重要な乱流の生成原因—赤道ケルビン波の砕波

- 赤道ケルビン波 = TTLで卓越する東進擾乱



赤道ケルビン波が砕波して発生した乱流が物質を混合させる？

## 赤道ケルビン波の砕波に関連する先行研究

- 赤道ケルビン波の砕波とオゾン混合比の増大 by オゾン・風・温度のゾンデ観測 [Fujiwara et al., 1998]
- 赤道ケルビン波の砕波と乱流の生成 by 赤道大気レーダー(EAR)観測 [Fujiwara et al., 2003]
- 別々の観測であり関連の詳細が明確ではない
- 赤道ケルビン波によるKH不安定と微量成分の輸送を数値シミュレーション [Fujiwara and Takahashi, 2001]
- 赤道ケルビン波に伴うKH不安定を再解析データから描写 → モデルは分解能が不十分 [e.g., Flannaghan and Fueglistaler, 2011]

→ 物質輸送と乱流の関係を直接示し、赤道ケルビン波の砕波が及ぼす影響を明らかにする必要がある

## 本研究の内容

解明したいこと：

赤道ケルビン波の砕波に伴う乱流がTTL内外の物質輸送にどのような役割を果たすか？



- ゾンデとEARの同時観測から物質輸送と乱流の関係を直接示す
- スーパープレッシャー気球によるその場観測からTTLの乱流の挙動を調査
- 広いスケールで乱流の影響を考察するために再解析データの解析方法を検討

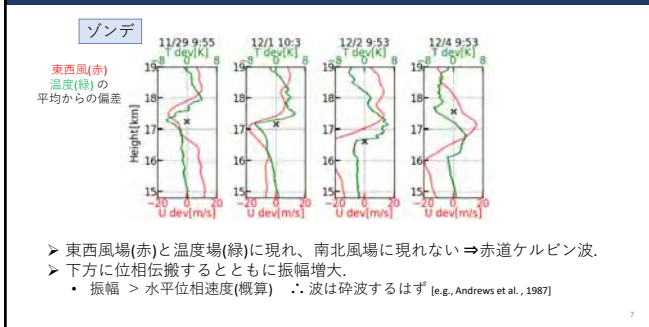
## データ

- 観測キャンペーン
  - 2019/11/22 - 2019/12/6
  - オゾン・風/温度/圧力ゾンデ (1~2回/day)、赤道大気レーダー(EAR)
  - インドネシア赤道大気観測所
- STRATEOLE-2\* プレ観測 (※ 国際的な TTL/下部成層圏 観測プロジェクト。2021年から本観測実施予定)
  - 2019/11/12 - 2020/2/28
  - スーパープレッシャー気球\* × 3 (※ 等圧面上を風に乗って移動しながらその場で観測を行う)
  - 70 hPa (~18.5 km), 熱帯域 (~20° S - 20° N, 0° - 360° W/E)
- ERA5再解析データ
  - 2019/11 - 2020/2
  - 赤道ケルビン波成分の抽出 [Suzuki and Shiotani, 2008]

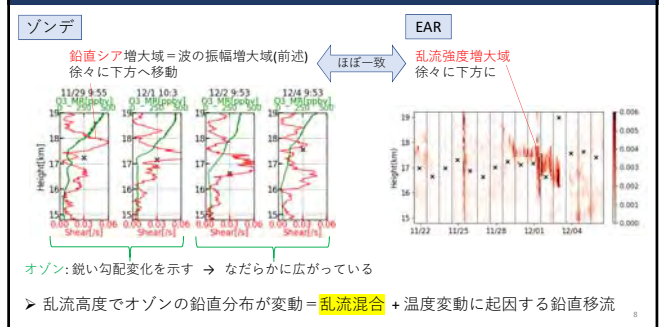




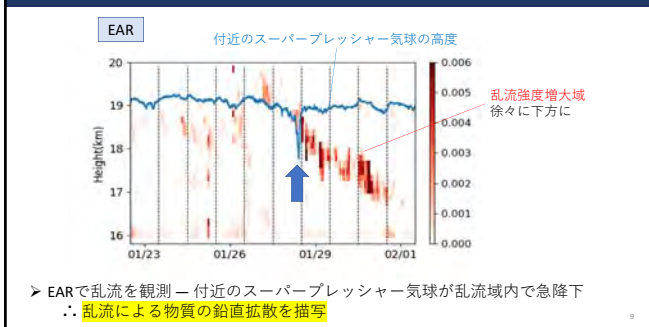
### Case study 1: 観測キャンペーン ～赤道ケルビン波の砕波



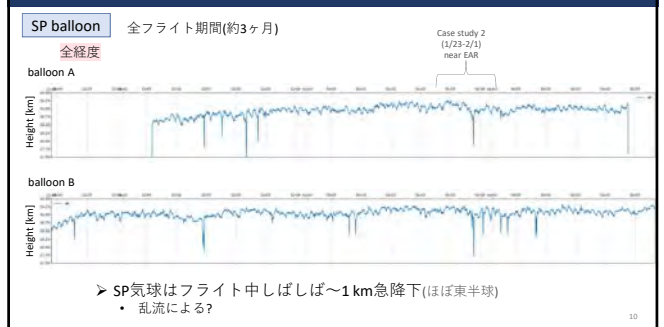
### Case study 1: 観測キャンペーン ～乱流とオゾン混合比の変動



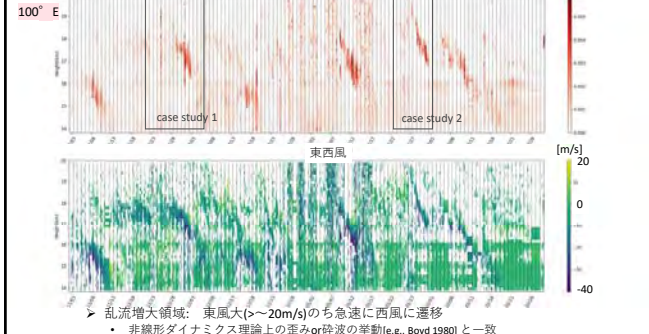
### Case study 2; STRATEOLE-2 観測 ～乱流に伴う下向き輸送



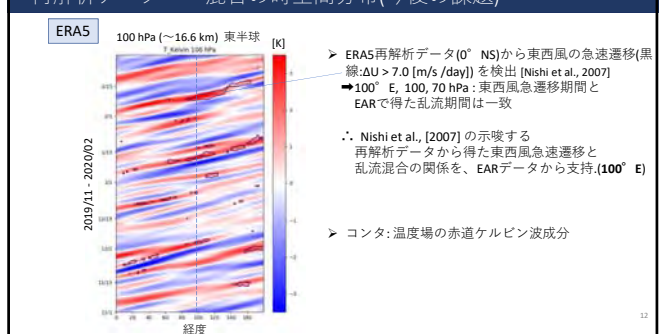
### STRATEOLE-2 観測 全期間 ～下向き輸送



### EAR 2019/11～2020/2 乱流エネルギー消散率



### 再解析データ ～混合の時空間分布(今後の課題)



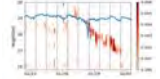
## まとめ

- TTL内でおきる赤道ケルビン波に関連すると考えられる乱流と物質混合の関係を直接観測から調べた。
    - 赤道ケルビン波に伴う乱流発生と同時にオゾンの分布が鉛直に拡散する様子を観測
    - スーパープレッシャー気球が乱流によって鉛直に輸送される様子を観測
  - 乱流によって大気や大気中の物質が輸送される様子を直接観測した。
  - 輸送のスピードや変化量など新たな知見を得ることができた。今後はこの結果を生かして乱流の影響の定量的な評価をしていく。
- 
- 再解析データから得られる東西風の急速遷移と乱流混合の関係が示唆された。
  - 乱流の影響を見積もるために、再解析データによる東西風急速遷移の分布検証が役立つ可能性が示唆された。

13

## 次検証したいこと

- 2019年のコトタパンのデータから、乱流がどうSTEに関わるか
  - 今はオゾン分布の鉛直勾配が緩やかになったことしか言えていないので、定量的な評価
- STRATEOLE-2のSP気球の高度降下が本当に乱流に起因するかどうか
  - (今は右図だけ見てそうだと思うが)
  - 乱流強度を評価する方法はないか
- SP気球データから、EAR経度以外の乱流の発生メカニズムが同じなのか

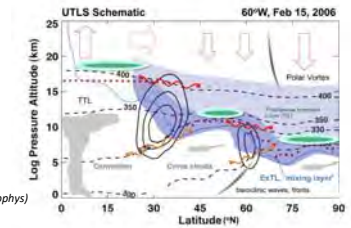


- 再解析データ等を利用してEAR経度以外で調べるには？
  - 再解析データで抽出した東西風遷移領域をSP気球が通過するのは1回 (Case study2) のみ

# YMC-BSM2018で観測された インドシナ半島における オゾン変動

荻野慎也・鈴木順子・木下武也・城岡竜一(JAMSTEC)

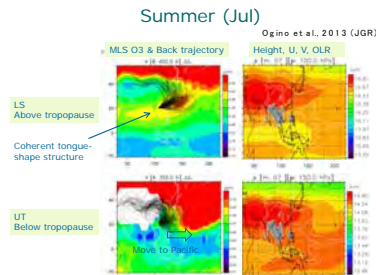
## 対流圏・成層圏交換



Gettelman, et al., 2011 (Rev. Geophys)

## 夏季アジアモンスーンの重要性

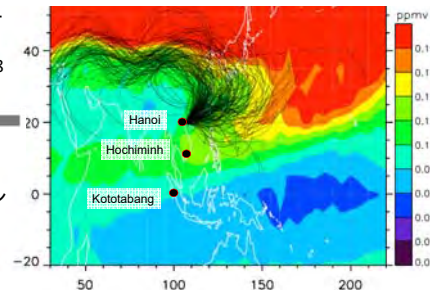
- Ogino et al., 2013
- 夏季アジアモンスーン循環(チベット高気圧)に伴う中緯度成層圏から低緯度対流圏へのオゾンの輸送
- 気候学的な平均場
- 実際の輸送・拡散過程はどのようなものか?



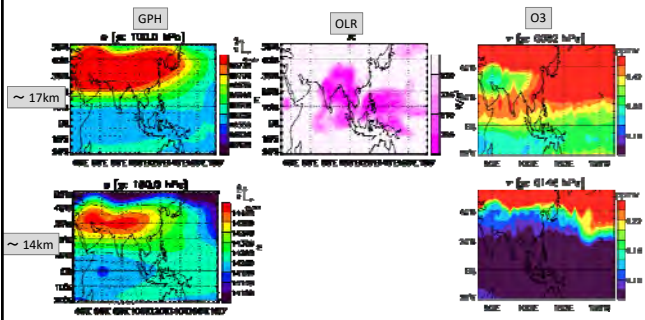
## 2018年 YMC-BSM in Vietnam

(Years of Maritime Continent – Boreal Summer Monsoon)

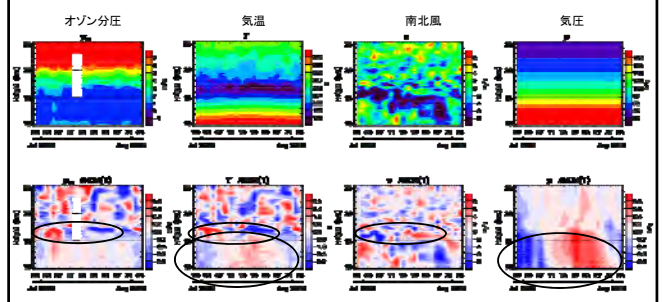
- 場所: ハノイ、ホーチミン、コタバング
- 期間: 2018年6月~8月(およそ40日)
- ハーチミンではオゾンゾンデ観測を19回



## 観測期間の背景場

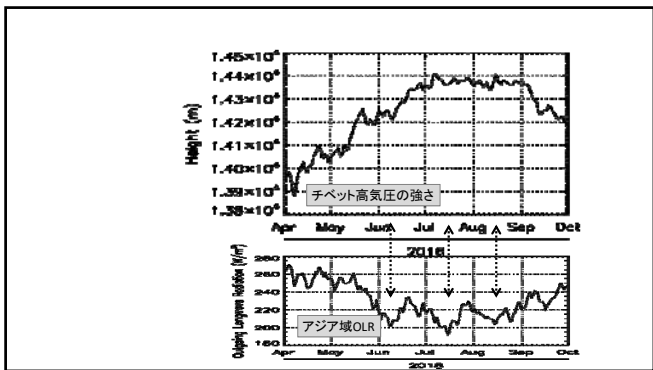
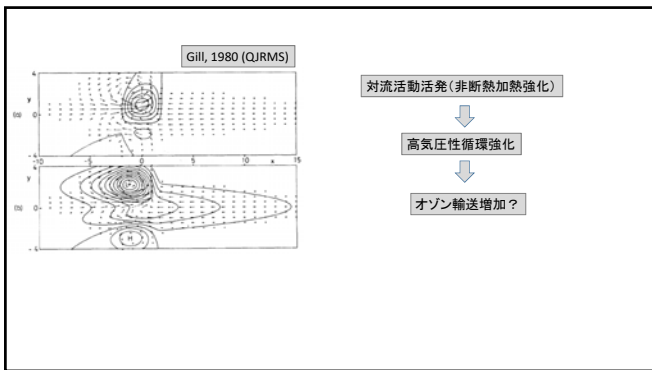
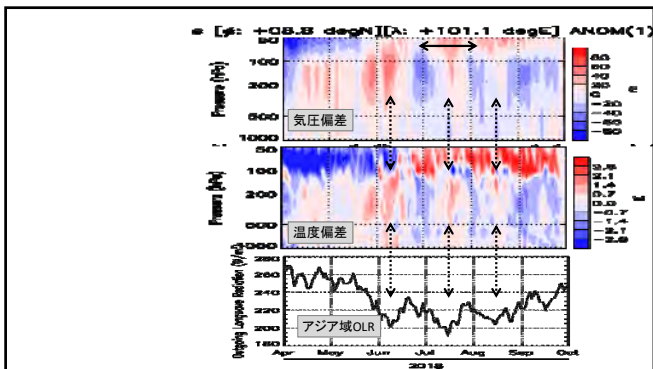
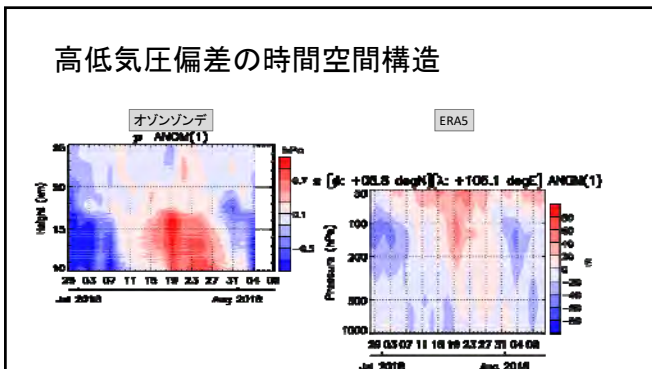


## ホーチミン・オゾンゾンデ観測

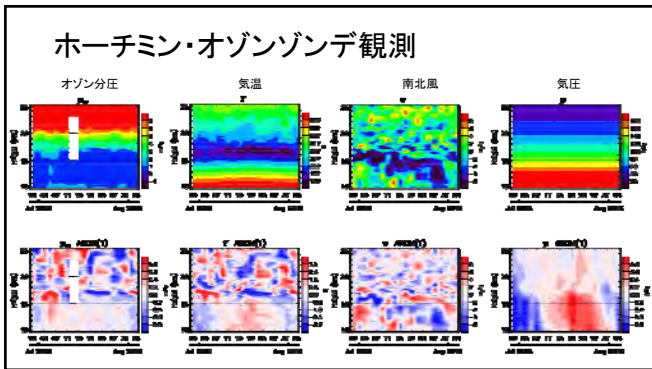




### 高低気圧偏差の時間空間構造



### ホーチミン・オゾンゾンデ観測



### まとめ

- 高低気圧に対応したオゾン変動
- アジア域対流の強弱に伴う、熱的応答の変化が原因?
- 今後
  - 高気圧性循環とオゾン変動との対応
  - 他の擾乱についての解析

IUGONET  
Metadata DB for Upper Atmosphere

第14回MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム  
第428回生存圏シンポジウム  
オンライン  
2020年9月14-15日

## IUGONETプロジェクトの活動報告とその成果について

○新堀淳樹<sup>1</sup>, 田中良昌<sup>2</sup>, 梅村宜生<sup>1</sup>, 阿部修司<sup>3</sup>, 上野裕<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>名古屋大学宇宙地球環境研究所  
<sup>2</sup>国立極地研究所  
<sup>3</sup>京都大学天文台  
<sup>4</sup>九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター

IUGONET 1. はじめに

### 1.1 IUGONETプロジェクトについて

超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究 (IUGONET)  
 各大学・研究機関に分散している様々な太陽・超高層大気観測データを効率的に収集・解析を行うインフラを開発  
 > IGY以降の約60年間に蓄積された地上観測データの共有  
 > 超高層大気長期変動メカニズムに関する分野横断型研究推進

IUGONET 1. はじめに

### 1.2 全球地上観測ネットワーク

IUGONET 1. はじめに

### 1.3 IUGONETプロジェクトの概要

地上観測データの利活用と太陽地球系結合過程の分野横断型研究推進のために、横断検索のための地上観測データに関する情報のデータベースの構築とそれらの観測データを解析するソフトの開発を行う

IUGONET 2. IUGONETデータ解析システム

### 2.1 IUGONETデータ解析サービス(IUGONET Type-A)

<http://search.iugonet.org>

IUGONET 2. IUGONETデータ解析システム

### 2.2 IUGONET Type-Aで何を学べるか？

○ 自分が知りたい観測データに関する基礎情報を得る  
 観測サイト、観測方法(測器)、観測期間、観測領域、データ形式、データ利用ポリシー、コンタクト先  
 → 科学論文執筆の際に必要な情報。

データの概要  
 データ利用ポリシー  
 コンタクト先  
 データベースの所在

## IUGONET 2. IUGONETデータ解析システム

### 2.2 IUGONET Type-Aで何を学べるか?

○ **QLプロットを通じて観測データの特性を知る**  
 → IUGONET Type-Aで表示されるプロットは**全て横軸が共通(1, 3, 7日間)**

SPEDAS解析ツールで作成できるもののみ  
 時間軸が同じなので、異なる観測データ(風速、地磁気など)を比較しやすく、異なる大気層における現象間の新しい関係を見出す可能性あり。

○ **SPEDASを用いたQLプロットの作成方法が学べる**  
 → **自分自身でいつ、どこでも観測データのプロット**

**基礎**

```

iug_load ***
tplot ***
quit

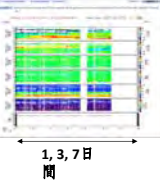
```

**応用**

```

iug_load ***
tplot ***
quit

```



1, 3, 7日間

赤道大気レーダーの下部成層圏・対流圏データのプロットコマンド

## IUGONET 2. IUGONETデータ解析システム

### 2.3 IUGONETデータ解析ソフト (UDAS/SPEDAS)

SPEDAS: 様々な地上・衛星観測データを解析、可視化  
 コマンド入力以外にもGUIを搭載

UDAS: SPEDAS (Space Physics Environment Data Analysis Software)のプラグインソフト(主にIUGONETデータをロード)

Data Servers on the Internet

IUGONET

SSI, Berkeley, IRI, MIS, CIRD

CDAWeb, OMNI, ACF, Wind, etc.

Automatic download

Data

Local PC

Diskspace for pre-downloaded data are created automatically.

HDD

Output result

1. Set a time period timespan, 'yyyy-mm-dd'

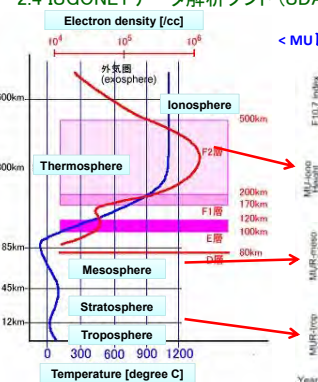
2. Load \*\*\* data iug\_load \*\*\*

3. Plot the loaded data tplot, +++

## IUGONET 2. IUGONETデータ解析システム

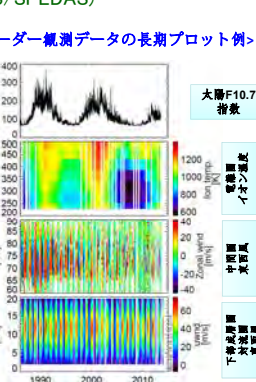
### 2.4 IUGONETデータ解析ソフト (UDAS/SPEDAS)

< MUレーダー観測データの長期プロット例 >



Electron density [1/cc]

Temperature [degree C]



F10.7 index

F2層

E層

MU radar echo

## IUGONET 3. アウトリーチ活動

### 3.1 IUGONETデータ解析講習会の開催(国内・国外)



Covenant Univ., Nigeria (2017)

PRIC, China (2019)

Japan (2010-2019)

LAPAN, Indonesia (2017-2019)

PRL, India (2018)

Universiti Teknologi MARA in Malaysia (2018)


若手研究者の育成と国際ネットワークの形成

## IUGONET 3. アウトリーチ活動

### 3.2 新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の拡大に伴うIUGONETとしての科学活動支援の取り組み

1. SPEDASテキスト・講習会映像の公開、IDL/SPEDAS講習会実施(オンライン)

<http://www.iugonet.org/support2020?lang=ja>



**IDL講習会(Harris)**  
5月26日(火曜)13時~15時、参加者:約80名

**SPEDAS講習会(IUGONET)**  
6月9日(火曜)13時~15時、参加者:約20名

2. IUGONET参画機関の大学院入試に関するご案内

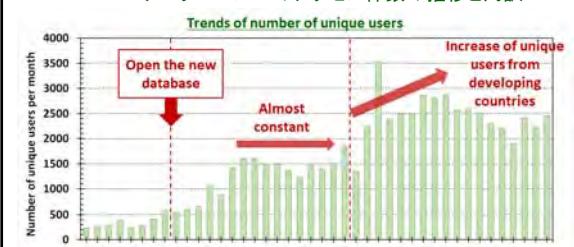
3. 今後の研究サポート(iugonet-workshop-loc [at] iugonet.org)  
 解析ツールや観測データに関する質問を随時受付  
 ...発展途上国からの質問が数件あり

4. UDASのMATLAB版ツールの開発(一部の国内・海外の研究者に機能確認を依頼中)

## IUGONET 4. 成果概要

### 4.1 IUGONETデータベースへのアクセス件数の推移と内訳

Trends of number of unique users



Open the new database (2016/10)

Almost constant (2016/10 - 2019/10)

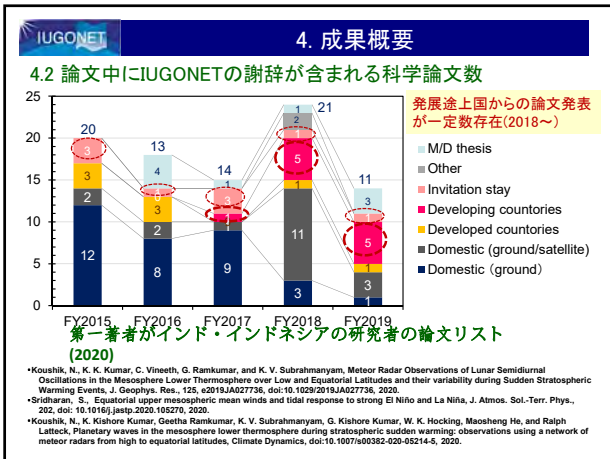
Increase of unique users from developing countries (2018/04 onwards)

Japan: 57.92%  
 Foreign: 42.08%

Ratio of access number from foreign countries (2016/10-2019/10)

	USA	Indonesia	China	Germany	Russia	Turkey	Coria	France	India	Brazil
Units (%)	35.5	9.8	9.0	5.3	4.7	4.5	3.8	2.9	2.1	1.6





### IUGONET 4. 成果概要

#### 4.3 サイェンス成果の事例紹介

ストロモス圏発するオーロラのナゾを解明  
 辰野 隆紀 (金沢大学理工学域)

オーロラは、宇宙空間の電離層から電子が、高度100km付近の中間層へ流入し衝突して発光する現象です。特にマゼラン海峡域から電子の衝突によって発光するオーロラは、極域中心と比べて大・中・小の異なる構造を有する特徴が知られています。今回、わが国の2台のストロモス圏発するオーロラの観測が行われました。このオーロラのストロモス圏発する電子オーロラは、極域中心域から約100kmの高度に発生し、高度100km付近の中間層へ流入し衝突して発光する現象です。

Comparison of three retrievals of COSMIC GPS radio occultation results in the tropical upper troposphere and lower stratosphere  
 Neersomed (京都大学生存圏研究所)

Combining geometrical optics (GO) and wave optics (WO), the COSMIC data analysis and archive center (CDA AC) retrieved two sets of dry atmosphere temperatures (T) from COSMIC GPS radio occultation (GPS-RO), which are called atmhrf2010 and atmhrf2013. In atmhrf2015, the sewing height between WO and G...

IUGONET解析ツールやデータベースを用いて得られた新しいサイェンス成果についてWeb上でその内容をわかりやすく解説。  
<http://www.iugonet.org/publication/result.jsp>

### IUGONET 4. 成果概要

#### 4.4 国、外国機関からのIUGONETプロジェクトの注目度

内閣府統合イノベーション戦略2020において、データマネジメントの優良事例として紹介された

<人材の育成及び研究データ活用の実態把握>

- 研究者向けに制作した研究データマネジメントの教材を2020年度内に公開する。【文】
- 研究データ活用国内外の動向の調査や優良事例等の取組等を継続的に行う。【数値、文】

<https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/index.html>  
 (59ページ目の脚注にIUGONETの事例が紹介されている)

その他、米国のNASAからIUGONETのメタデータを共有したいというオファーがあった

これまでの優良事例としては、以下のとおりである。

- 国際共同研究の推進: 国際共同研究の推進として、研究者間の共有データベース (Data Commons) の構築を進めている。国際共同研究の推進として、研究者間の共有データベース (Data Commons) の構築を進めている。
- 国際共同研究の推進: 国際共同研究の推進として、研究者間の共有データベース (Data Commons) の構築を進めている。
- 国際共同研究の推進: 国際共同研究の推進として、研究者間の共有データベース (Data Commons) の構築を進めている。

### IUGONET 5. IUGONETプロジェクトの計画案

#### 5.1 FY2021-2026のねらい

太陽地球系物理学(STP)のデータ公開とサイェンスの推進

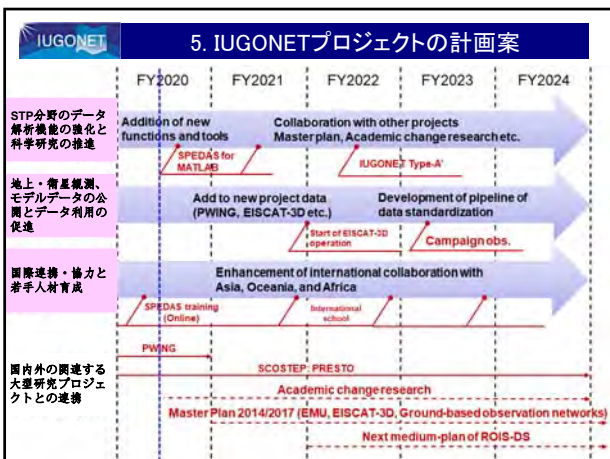
- 大型研究計画「太陽地球結合過程の研究基盤形成」をはじめとする国内外のSTP分野のプロジェクトで得られたデータの標準化・公開を支援する。
- 地上・衛星観測、シミュレーション、再解析データ等の多種多様なデータを複合的に扱えるように研究基盤を強化する。また、UDAS/MATLABツール等のユーザフレンドリーな解析ツールを新たに開発・公開する。
- STP分野に関連する共同研究を推進し、科学成果を創出する。

国際貢献・人材育成

- オンライン、オフラインの講習会やアウトリーチ活動を通じて、国内外のSTP分野の若手研究者の育成に貢献する。
- 講習会を通して東南アジア・アフリカ・南米 (Basic) 及び、欧州・オセアニア (Advanced) の研究者と人材ネットワークを構築し、国際共同研究を推進する。

データ科学分野等の異分野連携

- データ科学、情報学等の研究者との共同研究を通して、STPのデータにデータ科学の手法を応用した研究を推進する。



### IUGONET 6. まとめ

- IUGONETプロジェクト(<http://www.iugonet.org>)はweb service (IUGONET Type-A)とIUGONET データ解析ソフト(UDAS/SPEDAS)を開発してきた  
 これらのツールは以下のwebサイトにて利用可  
 IUGONET Type-A: <http://search.iugonet.org/>  
 Analysis software: <http://www.iugonet.org/en/software.html>
- 2018年度以降、発展途上国(インド、インドネシア)に属する第一著者によって書かれたサイェンス論文が一定数出版されている。  
 →これらの国でのアウトリーチ活動によってIUGONETデータベースやツールを用いた新しい科学成果が出ている
- 内閣府統合イノベーション戦略2020 (<https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/index.html>)において、データマネジメントの優良事例として紹介された
- 非IDL利用者向けに新しいデータ解析ソフト(例えば、MATLABベース)を開発中であり、基本部分は整いつつある
- 今後は、STP分野の新規データ公開促進と科学研究推進、国際連携と若手人材ネットワーク形成、データ科学分野との連携を中心に実施する
- 9月28-30日に行われる合同研究会では、データ解析講習会に加えて解析で困っている点等の解決に向けた議論会を予定している。

## 観測ロケットに搭載する デュアルバンド・ビーコン送信機とアンテナの開発

2020/9/14

黒川浩規・山本衛  
京都大学 生存圏研究所

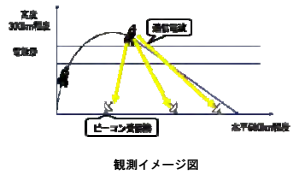
## 研究背景

・2022年にJAXAからS-520-32号機観測ロケットが打ち上げられる。

・この観測ロケットの科学目的は夏の夜間に中緯度地域で発生する中規模伝播性電離圏擾乱(MSTID)を研究することである。

・この実験を通して学生の宇宙機器エンジニアリングスキルを養成するプログラムが進行中である。京都大学はこれに参加し、TEC(全電子数)の観測を行う。

本研究では、このTEC観測のためにロケットに搭載する2周波ビーコン送信機およびアンテナの開発を行う。



## TEC観測

送信機から受信機までの距離Lを伝搬する電波の位相φが

$$\phi = \frac{2\pi f}{c} \left\{ L - \frac{e^2}{8\pi^2 f^2 \epsilon_0 m} \int_0^L N(x) dx \right\} + \eta$$

で表される。ここで、eは素電荷、cは光速、ε<sub>0</sub>は真空の屈折率、mは電子の静止質量、fは電波の周波数、∫<sub>0</sub><sup>L</sup> N(x) dxは経路上の総電子数、ηは人工衛星と受信機によって決まる積分定数である。

この式から、2つの周波数を用いて、受信機で各周波数の位相を求めることで

$$\frac{\phi_1}{f_1} - \frac{\phi_2}{f_2} = \frac{e^2}{4\pi c \epsilon_0 m} \left( \frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) \int_0^L N(x) dx + \eta'$$

の式を得られることができ、経路上の総電子数を求めることができる。

## 研究目的

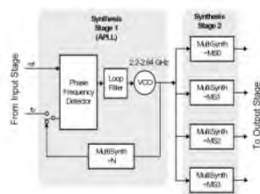
- 送信機 (ロケット内部)
  - ・150MHzと400MHzの正弦波の出力
  - ・出力が1W×2
- アンテナ (ロケット壁面)
  - ・150MHzと400MHzの電波を出力
  - ・熱や振動などの環境試験を通る耐久力
  - ・可能な限り小型化

## 送信機

### Si5338

2.2~2.84 GHzを生成できるPLL発振器を持つ位相同期回路 (Synthesis Stage 1) からの信号を目標周波数に合わせて分周すること (Synthesis Stage 2) で、出力信号を複数出力する。一つの信号を分周するため、周波数の比率の精度が高くなる。

波形が方形波のため、送信機全体としては、Si5338、BPF、LPF、PAによって構成される。



Si5338の周波数合成図

## アンテナ

- ・150MHzと400MHzの電波を放射出来るアンテナ。
- ・熱や振動などの環境試験を通る耐久力
- ・可能な限り小型にする。

→ 150MHzと400MHzを同時出力を可能にし、素子4つで構成することで壁面占有率を少なくする。(前観測ロケットは、素子6つで構成されていた。)

高誘電体をアンテナに導入し、波長短縮効果を用いて小型化する。

## アンテナ設計の目標基準

- Sパラメータ・・・ $S_{11} < -10dB$   
高周波電子回路や部品の特性を表す回路網パラメータである。端子から入力した信号がその端子や他の端子に反射や透過する利得を表す。今回は、1つの給電点なので反射の程度を表す $S_{11}$ を用いた。
- 150MHzと400MHzでの遠方界・・・ $-10dBi$ 以上であること  
アンテナから放射される電波利得
- 大きさ（幅×長さ×高さ）・・・長さ350mm以下、厚さは30mm以下
- 加工面、環境条件の面から見て実現可能なものか。
  - ・・・アンテナ先端において温度300度以上など

## CST STUDIO SUITE

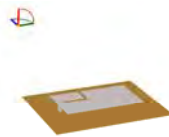
ダッソー社が販売する電磁場解析シミュレーションソフトCST STUDIO SUITEを用いて設計を行った。

他のアンテナ設計ソフトとの連携が可能で、大まかな設計をアンテナ設計ソフトで行い電磁界シミュレーターの物理モデルとする。大きさや誘電率の調整、形状の変化などをシミュレーター上で手動で変化させ、目標のアンテナを設計した。

## ANTENNA MAGUS

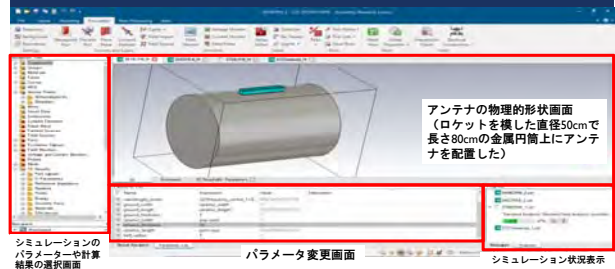
CST STUDIO SUITEと連携が可能なアンテナ設計ソフト。

様々な種類のアンテナのテンプレートがあり、出力周波数を決定するとアンテナ形状を自動で出力する。しかし、設計できる範囲の周波数が決められていて、今回扱う周波数が低いため、形状やシミュレーションにおける環境形成の参考のために使用した。



Antenna Magusから出力されるアンテナ図の例

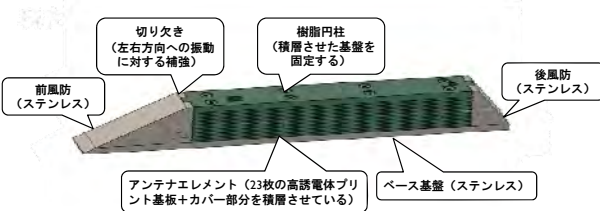
## CST STUDIO SUITE設計画面



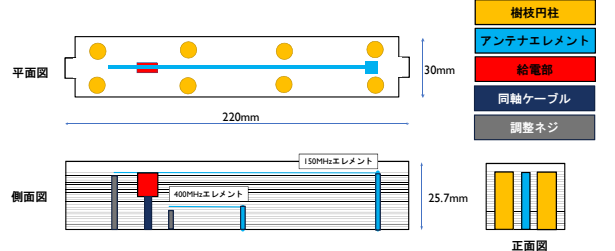
アンテナの物理的形狀画面  
(ロケットを模した直径50cmで長さ80cmの金属円筒上にアンテナを配置した)

シミュレーションのパラメーターや計算結果の選択画面      パラメーター変更画面      シミュレーション状況表示

## 現在のアンテナ設計案



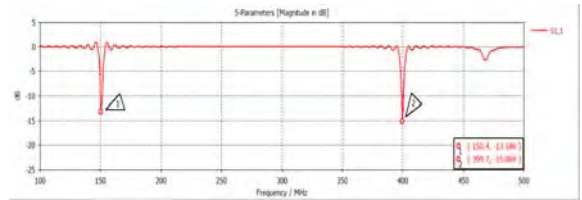
## アンテナエレメント



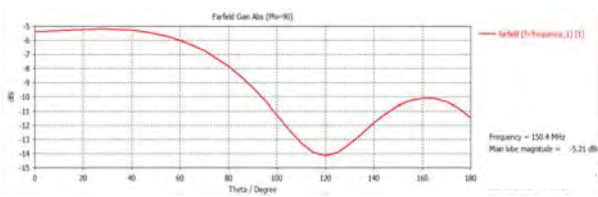
## アンテナエレメント

- アンテナエレメントは厚さ1.12mmの基板を23枚重ね合わせて構成する。一番上は、厚さ5mmの基板材料でカバーする。
- 150MHz用のエレメントは逆L型アンテナを使用する。
- 400MHz用のエレメントは、150MHz用のエレメントの寄生エレメントとして同調させる。
- 製作後の同調周波数は、調整ネジとエレメントの切断によって調整できる。
- 給電部は不平衡=平衡の変換トランスを設ける。

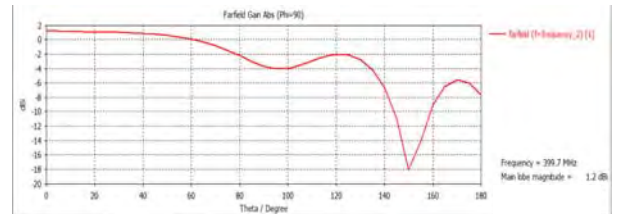
## Sパラメータ



## 150MHzの放射パターン



## 400MHzの放射パターン



## まとめ

- TEC観測のため、観測ロケットに搭載する送信機とアンテナの開発
- 送信機には、Si5338を選定した。  
150MHzと400MHzが出力可能である確認を行った
- シミュレーションによる性能評価をして、アンテナの構造を決定した。

## 今後の研究

- 送信機  
Si5338、BPF、LPF、PAを含めた電子回路の作製・検証
- アンテナ  
実際の材料によるアンテナの作製およびシミュレーションとの誤差・検証  
熱や振動などの環境試験
- 全体  
電波を放射するための免許の取得  
ロケットシステムへの適合性の確認

**NICT activities on space weather research and operation in Asia**

Because of the **COVID-19 pandemic**, we could not have a face-to-face meeting. "In this difficult moment, we should take advantage of ICT, continue communication, and **work together** to solve problems."

Kornyanat Hozumi • Mamoru Ishii • Takuya Tsugawa • Michi Nishioka (NICT)  
 Pornchai Supnithi (KMITL, Thailand) • Punyawee Jamjareegulgarn (KMITL PCC, Thailand)  
 Sittiporn Channumsin (GISTDA, Thailand) • Tharadol Komolmis (CMU, Thailand)  
 Donekeo Lakanchan (NUOL, Laos) • Win Zaw (YTU, Myanmar)  
 Mamoru Yamamoto (RISH, Kyoto Univ.) • Susumu Saito (ENRI) • Yuchi Otsuka (ISEE, Nagoya Univ.)

第14回Mレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生存圏シンポジウム - Title **1**

**Overview**

- Background
- SEALION in Reiwa.
- A new VHF radar (39.65 MHz) in Chumphon, Thailand.
- GISTDA (Thailand Space Agency) start-up activity on space weather research.
- ASEAN-IVO project on space weather
- NSTF (National Science and Technology Fair), Thailand
- AOSWA (Asia Oceania Space Weather Alliance)
- Summary

第14回Mレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生存圏シンポジウム - Overview **2**

**Background and Significant**

- **Sustainable** precise satellite positioning (e.g. **GNSS**) will be an indispensable technology in the world (e.g. **automatic operation** in transportation, agriculture and constructions).
- **Ionospheric influence on the systems needs to be removed.**
- **In coming ten years...**
  - ICAO (International Civil Aviation Organization): **Space Weather (SW)** will be mandatory information for aviation.
  - **SW business** will be established in many countries.
  - **Precise positioning (centimeter-level)** will be the top priority research theme to protect fragile ICT social infrastructure + support aging society.

第14回Mレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生存圏シンポジウム - Background **3**

**SEALION: Transition from Heisei to Reiwa**

SEALION (SouthEast Asia Low-latitude Ionospheric Network)

By NICT: Ionosonde, Magnetometer, VHF Radar, GPS (L-band), GPS (GSV-4004B), GNSS (Septentrio)

By NICT via ASEAN-IVO: GNSS (Novatek)

By SEALION Partner: All-sky Imager (Nagoya Univ.), New GPSR (Kyoto Univ.), EAR (Kyoto Univ.)

Expands the network from 4 countries to 6 countries in Southeast Asia.

第14回Mレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生存圏シンポジウム - SEALION **4**

**New VHF radar at Chumphon, Thailand**

18 Yagi antennas, 130m  
 9 beams ±60° (azimuth), zenith angle of ~0°  
 Primary antenna array along geomagnetic east-west direction.

Item	Description
Operating frequency	39.65 MHz (25 kHz BW)
Transmitter power	1.1 kW per module for 20 kW peak power
Range	1000 km (latitudinal coverage up to ~20°N)
Beam cycle	Capable of scanning in geomagnetic east-west direction within the range of zenith angle 0° to 28°

第14回Mレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生存圏シンポジウム - VHF radar **5**

**VHF radar: Press conference @Bangkok, Thailand on November 26, 2019**

1 TV news + ~20 published news in newspaper, magazine and online news.

第14回Mレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生存圏シンポジウム - VHF radar press conference **6**



**NICT VHF radar: Opening ceremony @Chumphon, Thailand on January 17, 2020**

**Event list**

- Jan 16, 2020: Press release from NICT, Japan
- Jan 17, 2020: Press release from KMITL, Thailand & VHF radar opening ceremony

**News list**

- NHK news was broadcast on the same day.
- In total, 75 news were published worldwide.

第14回MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生体シンポジウム - VHF radar opening ceremony **7**

**NICT GISTDA start-up activity on space weather research**

- GISTDA is space agency of Thailand.
- From its policy, it is necessary to immediately develop a space weather forecast service.
- GISTDA firstly approached NICT in June 2019.
- The collaboration was concluded and the MoU was signed in November, 2019.
- Now, it is during a budget securing process for FY 2021~.

第14回MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生体シンポジウム - GISTDA **8**

**NICT ASEAN-IVO\* project on space weather**

(ICT Virtual Organization of ASEAN Institutes and NICT) [https://www.nict.go.jp/en/asean\\_ivo/about\\_asean\\_ivo.html](https://www.nict.go.jp/en/asean_ivo/about_asean_ivo.html)

- Project: GNSS and Ionospheric Data Products for Disaster Prevention and Aviation in Magnetic Low Latitude Regions
- Members: 4 countries (Thailand, Japan, Myanmar and Laos)
- Project period: 2 year (FY 2019-2020)

**Installation of GPS-Javad at NUOL, Laos on 24 December 2019.**

**Installation of GNSS-Novatel at YTU, Myanmar On 12 August 2020.**

Figures are courtesy by Napat Tongkasem, KMITL.

第14回MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生体シンポジウム - ASEAN-IVO **9**

**NICT NSTF (National Science and Technology Fair), Thailand**

- Held in August every year by Ministry of Higher Education Science Research and Innovation, Thailand.
- 1 million people visit every year, and NICT has been exhibiting almost every year since 2007.
- Due to the influence of covid-19, the Ministry has considered holding the event on a smaller scale than usual during November 13-23, 2020.
- We are preparing to response to a request for the exhibition.

**Thai TV Channel**

**Dagik Earth**

NSTF, Thailand

第14回MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生体シンポジウム - NSTF **10**

**NICT AOSWA (Asia Oceania Space Weather Alliance)**

*"Established in 2010 for encouraging cooperation and sharing information among institutes in Asia-Oceania region concerned with and interested in space weather."*

- The 6th AOSWA Workshop 2020 was scheduled to be held in Bangi, Selangor, Malaysia 10-13, August 2020.
- Due to the COVID-19 pandemic, the workshop was postponed.
- Recently, the SOCs have been discussing to have an online workshop instead.
- The discussion themes will be slightly shifted from pure space weather research and activity to lesson learned from COVID-19, current solution and step for future of space weather research and operation.
- Details will be announced soon later.

第14回MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生体シンポジウム - AOSWA **11**

**NICT Summary**

- Asian countries are **seeking for advisory** and support on space weather (e.g. **GISTDA, Thailand**).
- NICT established + leads an advisory hub to **promote the space weather activities in Asia** (e.g. **ASEAN-IVO, SEALION, AOSWA**).
- NICT tries to communicate with people on the **easy-to-understand** basis via exhibition activity (e.g. **NSTF**).
- Even with COVID-19 pandemic, NICT keeps a close collaboration with its partners by employing ICT technology to enhance/ expand space weather activities.

第14回MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 第428回生体シンポジウム - Summary **12**

# MUレーダーによる電離圏観測の長期統計解析

Long-term statistical analysis of the ionospheric observation with the MU radar

横山 竜宏、上野 将典、山本 衛

京大生存圏研究所

## 1 研究背景と目的

電離圏は、大気分子などが太陽からの紫外線などで一部電離状態にある領域である。電離圏の状態は、電波の伝搬に強く影響し、電離圏の理解は、GPSなども含めた地球規模の電波通信において重要な役割をもつ。電離圏観測の手段として非干渉散乱 (Incoherent Scatter; IS) レーダーが存在し、信楽のMUレーダーもISレーダーとして1986年から定期的に電離圏観測を続けているが、得られたデータに関する詳細な解析は2000年の研究 [2] 以降行われていない。現在、観測開始から34年と4回目の太陽活動周期を迎えようとしており、本研究では、これらの長期的なデータの解析をすることで長期的な電離圏の特性と太陽活動等との相関を明らかにする。

## 2 原理

ISレーダーとは上層大気に電波を放射し、大気中の電子による微弱な散乱波の強度及びスペクトルに参与している電離圏の各種物理量を推定するレーダー観測装置である。散乱波は微弱であるため、大規模な送信出力とアンテナ開口面積を必要とする。散乱波のパワースペクトルの形状は電子密度、電子・イオン温度、プラズマドリフト速度、イオン組成、送信波長等の関数として理論的に計算が可能であり、観測結果から電離圏の各種パラメータを推定することができる。

MUレーダーでは電子・イオン温度、イオンドリフト速度及びエコーパワーを観測し、データベースに蓄積している。

## 3 方法

### 3.1 指標

電離圏を構成しているプラズマは中性粒子が太陽からの放射エネルギーによって電離されることで生成される。よって、電離圏の活動は、太陽活動と密接に関わっている。ここで太陽活動の指標としてF10.7指数という、波長が10.7cmの太陽放射の強度を用いた。

また電離した粒子は電場、磁場の影響を受けることから、地磁気活動の指標としてKpを用いた。Kp指

数は地磁気擾乱の振幅から求められ、大きいほど地磁気活動の変動が大きいことを示す。

### 3.2 電子・イオン温度

電子・イオン温度の日変化と太陽活動・季節・地磁気活動との関係を調べた。用いたデータは観測開始の1986年7月から2014年8月までであり、時間解像度は1時間で、6585点の観測データが存在する。高度方向には228.5kmから724.6kmまで等間隔に12点観測ポイントが存在する。ただし、パワースペクトルから温度を求められなかった場合があり、高度が高いほど無効値が多くなる。太陽活動に関しては観測時にF10.7が110以上を高太陽活動時、以下を低太陽活動時と定義した。季節は4月21日～8月22日を夏、10月23日～2月20日を冬と定義した [1]。地磁気活動依存性に関しては、Kp指数が3以上を地磁気活動擾乱日、3以下を静穏日とした

また、電子・イオン温度の長期推移を調べた。観測データを昼と夜、低高度と高高度ごとに分けて集計し、年平均を算出した。これをF10.7指数と比較する。

### 3.3 イオンドリフト速度の日変化

イオンドリフト速度の日変化と地磁気活動との関係を調べた。用いたデータは観測開始の1986年7月から2014年12月までであり、時間解像度は1時間で、14581点の観測データが存在する。また東向きドリフト速度について、観測日のKp指数が4以上のデータと3以下のデータを分けて集計し比較した。

## 4 結果と考察

### 4.1 電子・イオン温度の高度分布の日変化

電子・イオン温度の日変化と太陽活動の関係を図1、2に示す。電子・イオン温度ともに昼の温度が高く、夜は低い。また、高度が高いほど高い温度を示している電子温度に関しては、昼の450km以上の高高度は低太陽活動時のほうが温度が高いが、昼の450km以下の低高度と夜の温度は高太陽活動時のほうが高い。イオン温度に関しては、全体的に高太陽活動時のほうが温度が高い。

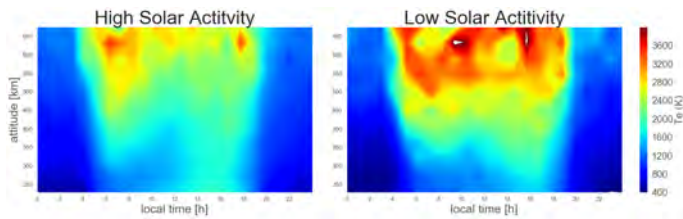


図 1: 電子温度の日変化 左:高太陽活動 右:低太陽活動

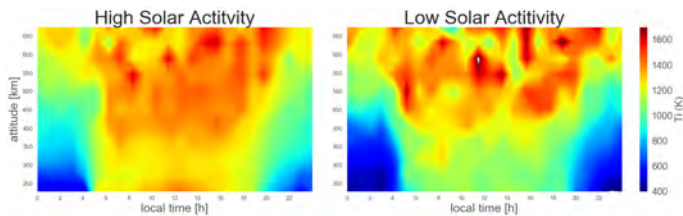


図 2: イオンの日変化 左:高太陽活動 右:低太陽活動

#### 4.2 電子・イオン温度の長期推移

電子・イオン温度と F10.7 指数の長期推移を図 3, 4 に示す。

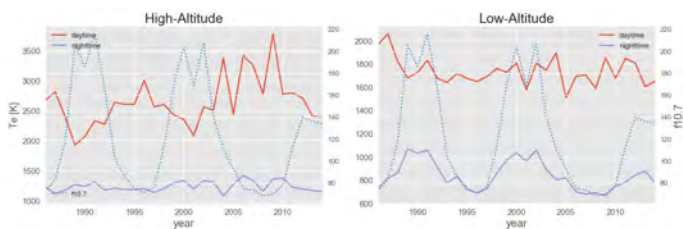


図 3: 電子温度と F10.7 指数の長期推移 左:高高度 右:低高度

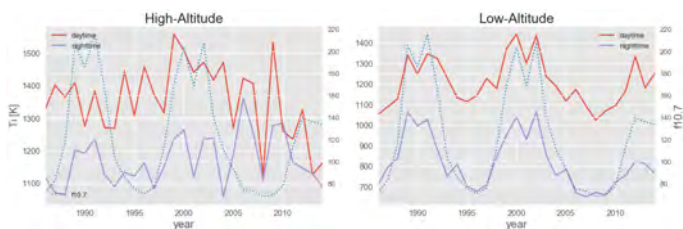


図 4: イオン温度と F10.7 指数の長期推移 左:高高度 右:低高度

電子温度に関して、夜は高度に関係なく太陽活動と正の相関をもっているといえる。また、昼の高高度の温度は負の相関がある。イオン温度に関しては、高高度の昼以外については太陽活動と強い正の相関を持つといえる。これらの相関関係は、太陽放射エネルギーの吸収と、中性大気、イオン、電子の間のエネルギー交換によるものであり、過去の統計解析結果とも一致している。

#### 4.3 イオンドリフト速度の日変化

ドリフト速度の日変化を図 5 左に示す。east が東向き、north が地磁気の磁力線に垂直で北向き、upward が磁力線と平行で上向きである。また、東向きドリフト速度を Kp 指数で分けて集計したものを図 5 右に示す。

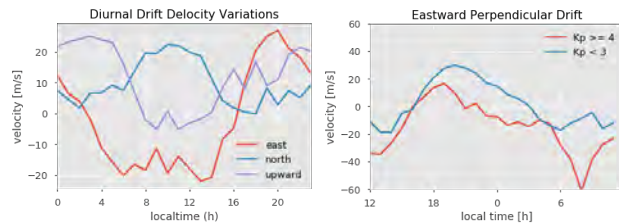


図 5: 左:3 方向のドリフト速度の日変化 右:ドリフト速度と地磁気活動

東向きドリフト速度は、昼と夜で向きが反転し、昼は西向きで夜は東向きである。また、Kp 指数が高い場合に比べ低い場合は全体的にドリフト速度が東向きに強く、またピーク時間が遅い。

#### 5 まとめと今後の課題

長期間にわたる MU レーダーによる電離圏観測の解析を行い、信楽上空における電子・イオン温度、イオンドリフト速度の長期的な変動の様子について明らかにした。今後は、得られた解析結果に対して、電離圏経験モデルである IRI (International Reference Ionosphere) モデルとの比較や、他地域の IS レーダーとの比較を行う予定である。また、エコー強度から得られる電子密度をイオノゾンデを用いて校正し、電子密度の長期変化について検討する。

#### 参考文献

[1] 川村 誠司, MU レーダー観測による F 領域プラズマ温度/イオン組成に関する研究, 京都大学工学部電子工学専攻卒業論文, 1997

[2] 川村 誠司, MU レーダー観測に基づく F 領域子午面中性大気風速の研究, 京都大学工学研究科修士論文, 2000

# GAIAモデルとの結合に向けた 赤道プラズマバブルシミュレーションの 改良

古元 泰地、横山 竜宏(京大RISH)

2020/9/14

第14回 MUリーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

1

## 目次

1. 研究背景・目的
2. 全球モデルと局所モデル
3. シミュレーションモデルの概要
4. モデルの改良内容
5. 結果
6. まとめと今後の課題

2020/9/14

第14回 MUリーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

2

## 研究背景

- 宇宙開発が進みGPSなどを利用した高精度、高信頼度の通信、測位、航法が実用化されつつある
- 電離圏は多くの人工衛星が周回する領域であり、衛星電波の誤差の主要因のひとつである
- 電離圏の物理過程の現状把握、理解、予測が求められているが、観測手段が限られている



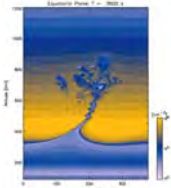
2020/9/14

第14回 MUリーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

3

## プラズマバブルとは

- 赤道域の電離圏下部で起こる現象。プラズマ密度に不安定が生じ、密度の低い領域が泡のように上昇することから名付けられた
- 泡の内部は非常に不安定で不規則な構造をもち、電波伝搬に影響を与える
- 日によって変化が激しく、発生の原因についてわかっていないことが多い



Yokoyama, T., Shinagawa, H., and Shi, H. (2014). Nonlinear growth, bifurcation and pinching of equatorial plasma bubbles simulated by three-dimensional high-resolution bubble model

2020/9/14

第14回 MUリーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

4

## 目的

- プラズマバブルの発生を自己無撞着に表現できる数値モデルの開発
- 局所電離圏モデルと全球電離圏モデルを結合させることで、様々な空間スケールの現象とプラズマバブルの関連性を明らかにする
- プラズマバブルの発生メカニズムの解明、予測

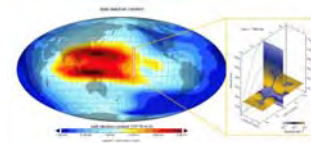
2020/9/14

第14回 MUリーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

5

## 全球モデルと局所モデル

	全球電離圏モデル	局所電離圏モデル
計算領域	電離圏上部まで地球全体	経度3度、緯度40度、高度1200km
グリッド間隔	数100km程度	1km以下
座標軸	極座標	磁力線座標
主な目的	大規模な現象	微細な構造を持つ現象



2020/9/14

第14回 MUリーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

6

## 支配方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{イオンの連続の式} \cdots \cdots \cdots \frac{\partial N_i}{\partial t} + \nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i) = N_i \quad ① \\ \text{イオンの運動方程式} \cdots \cdots \mathbf{E} + \mathbf{V}_i \times \mathbf{B} + M_{i, \text{eff}} \frac{\nabla (N_i \phi)}{N_i} + M_{i, \text{eff}} (\mathbf{V} - \mathbf{V}_i) = 0 \quad ② \\ \text{電子の運動方程式} \cdots \cdots -\mathbf{E} + \mathbf{V}_e \times \mathbf{B} + M_{e, \text{eff}} \frac{\nabla (N_e \phi)}{N_e} + M_{e, \text{eff}} (\mathbf{V} - \mathbf{V}_e) = 0 \quad ③ \\ \text{イオンの連続の式} \cdots \cdots \nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left[ \sum_i N_i \mathbf{V}_i - N_e \mathbf{V}_e \right] = 0 \quad ④ \end{array} \right.$$

定義:  $\mathbf{E} = -\nabla\phi$   
 仮定: 磁力線に沿って等ポテンシャル

●: 連続	■: プラズマ密度
●: 電場	■: 電流
●: 磁場	■: ボルツマン定数
●: 中性風	■: 中性風速度
●: 電圧	■: 衝突項係数
●: 重力加速度	■: 電荷質量

## シミュレーションの流れ

1. 初期値を取得
    - I. 静電ポテンシャル  $\phi$  に関する連立方程式を反復法で解く
    - II. 移流方程式をCIP法で解く
    - III. 得られた解で次刻での連立方程式を構成する
- I~IIIを繰り返す行う。  
 これがシミュレーションの概要である。
- 現段階では、移流方程式の改良までには至っていない。

## 静電ポテンシャルの導出

1. ②、③より、イオン・電子の速度を未知数  $\phi$  とそれ以外の定数  $C$  に整理する。
 
$$\mathbf{V}_i = f(\nabla\phi) + \mathbf{C}_i \quad (*)$$

$$\mathbf{V}_e = g(\nabla\phi) + \mathbf{C}_e$$
2. これを④に代入し、磁力線に沿って等ポテンシャルの仮定のもとで連立方程式を解く。

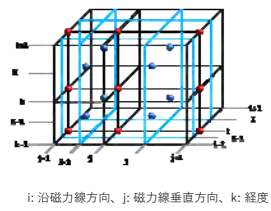
ここで、(\*)、④を見たとき、微分が2回現れている。そこで、本モデルでは次のような座標系を考える。

## 2つの座標系

**座標系1:** 小文字インデックス。赤点。ポテンシャルが定義される。  
**座標系2:** 大文字インデックス。座標系1の中心。青点。電流や速度が定義される。

右図が1つの構成単位。  
 中心の赤点の差分に周囲8点を使用し、それぞれの青点の差分に周囲4点を使用する。

今、i(前後)方向は磁力線に沿っているため、等ポテンシャルの仮定より値は同じ。ゆえに、次元を1つ落とすことができる。



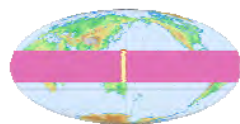
i: 沿磁力線方向、j: 磁力線垂直方向、k: 経度

## モデルの改良内容

1. 経度方向の計算領域を全経度に拡大
  2. 拡張した領域を含めて、パラメータ(プラズマ密度、中性風、温度)の初期値を NRLMSIS、IRIから取得
  3. 境界条件の変更
  4. 経度方向のグリッドを不等間隔に変更
- 局所モデルを元に改良を加える。

## モデルの改良内容

1. 経度方向の計算領域を全経度に拡大



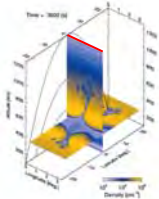
**従来**      **開発モデル**  
 計算領域: 黄色斜線部 ---> 赤色部分  
 グリッド間隔: 1km程度 ---> 100km程度

## モデルの改良内容

2. 拡張した領域を含めて、パラメータ(プラズマ密度、中性風、温度)の初期値を NRLMSIS、IRIから取得

### 3. 境界条件の変更

変更箇所は、磁力線に垂直な方向の上空側(右図赤線部)。それ以外の境界については、従来の局所モデルから変更なし。  
(a) 一定値(局所モデルと同じ)  
(b) 正弦値(電場の日変化を考慮)

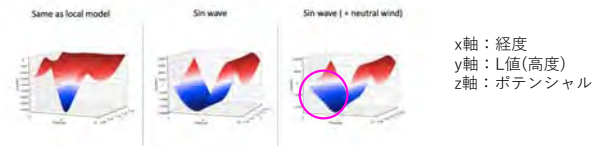


2020/9/14

第14回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

13

## 結果(ポテンシャル)



- 局所モデルのままだと、2箇所ピークが見られるなど不適当
- 正弦値を与えたとき、計算が収束
- パラメータに中性風を加えても収束し、分布に違いが見られた

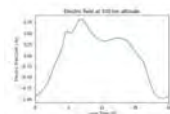
2020/9/14

第14回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

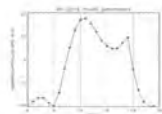
14

## 結果(東西電場)

前スライド最右グラフの  
高度300kmにおける東西電場



IRIモデルから計算された  
高度300km鉛直ドリフト速度



ピークの時間に若干の違いはあるが、  
正弦波という簡単な境界条件でありながら、  
比較的良く一致した結果

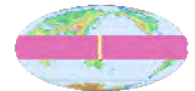
2020/9/14

第14回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

15

## 次の課題

### 4. 経度方向のグリッドを不等間隔に変更



緯度方向、高度方向はすでに不等間隔グリッド。  
しかし、経度方向は等間隔グリッドで実装していた。  
これを、日没経度(黄色斜線部)は1km間隔、  
それ以外を100km間隔にし、間を滑らかにつなげる。

これにより、計算の上で定数として扱っていた変数が、  
経度に依存した値に変わるため、プログラムの書き換えが必要。  
この変更は対応済み

2020/9/14

第14回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

16

## まとめと今後の課題

### • まとめ

- 局所モデルを全球化させたとき、静電ポテンシャルの計算が収束することが確認できた
- 境界条件を実際の境界に近づけることで、実際の電場分布に近い結果を得ることができた

### • 今後の課題

- 境界条件として、どのような形を与えるのが適当であるかの検討と、そのときのポテンシャルの反応性の確認
- 経度方向のグリッドの与え方として適切なものの検討
- 経度方向で一定として与えていたままであるパラメータの変更

2020/9/14

第14回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

17



# Synthetic aperture radar and ground observation of ionospheric disturbances over Japan

Hiroatsu Sato, Jun Su Kim (DLR, Germany), Yuichi Otsuka (ISEE, Nagoya Univ.)

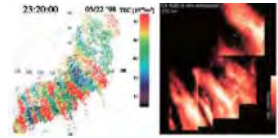
14th Symposium on MU Radar and Equatorial Atmosphere Radar  
2020-09-14/15



## Background : MSTID

Traveling Ionospheric Disturbances (TIDs) are wave-like plasma density perturbations.

The horizontal propagation of medium scale TIDs (MSTIDs) at mid-latitude are characterized by horizontal wavelength of several hundreds of kilometers, which have been observed through the Total Electron Content (TEC) mapping technique using dense ground GPS receiver network (GEONET) and air glow imagers.



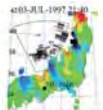
(Saito+2001)



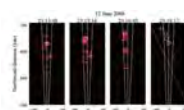
## Background : MSTID and FAI

### F region irregularity

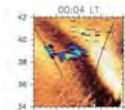
MSTID and the F-region 3-m scale field-aligned irregularities (FAI) were simultaneously observed with the MU radar and GEONET/ASI. FAI appeared as band-like structures often in the negative TEC phases. Fine scale structures with a spatial scale of 10 km or less is reported.



(Saito+2002)



(Saito+2008)



(Otsuka+2009)

### Observational gap:

Typical GPS TEC imaging resolution: > 100 km

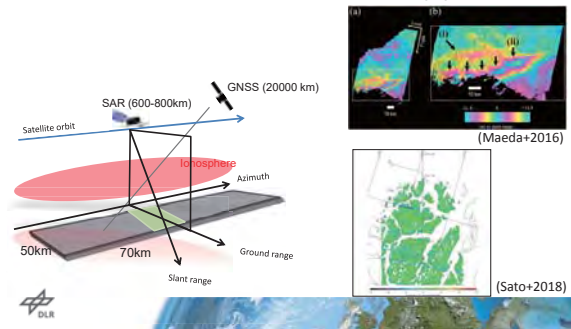
-> **substructures in MSTID <100 km scales?**

We use L-band SAR (~1.2 GHz) data to derive TEC imaging in finer spatial scale resolution



## Fine scale ionospheric irregularity mapping by SAR

Recent studies show L-band **Synthetic Aperture Radar (SAR)** can be used as TEC mapping tool with finer spatial resolution than GPS. Simultaneous observation of GPS network and SAR can enhance the spatial resolution of TEC imaging.



## TEC derived by SAR #1 : Faraday Rotation

The Faraday rotation angle can be estimated from quad-polarization SAR data [e.g., Pi, 2011]. The polarization plane of the radar signal, FR is proportional to the integrated electron volume densities (slant TEC) and to the inner product between the magnetic field and the propagation direction.

$$\Omega = \zeta \frac{e\mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{k}}}{cmf^2} TEC$$

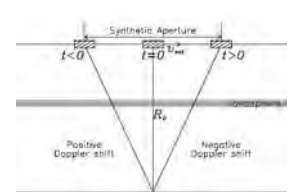
- Absolute slant TEC can be estimated.
- SAR data must be quad pol.
- Ground signature can introduce FR from non-ionospheric origin.



## TEC derived by SAR #2: SAR azimuth shift

The **gradient of TEC** in the azimuth direction modulates the ideal time-Doppler relationships of SAR signals, leading to a **shift in the focusing position**.

$$\Delta\alpha = \frac{\zeta r_0}{f_0^2 \cos \beta} \frac{h_{iono}}{h_{sat}} \frac{\partial TEC}{\partial x}$$

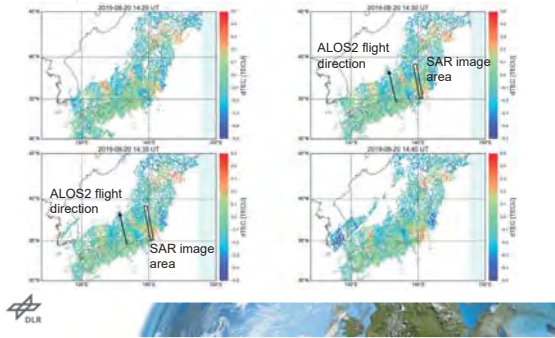


- $\frac{\partial TEC}{\partial x^2}$  can be estimated from subband image
- Sensitive to small scale TEC gradient TEC gradient mTECU/km-level.
- 10 mTECU/km of the TEC gradient corresponds to 1 meter azimuth shift in the ALOS-2 PALSAR-2



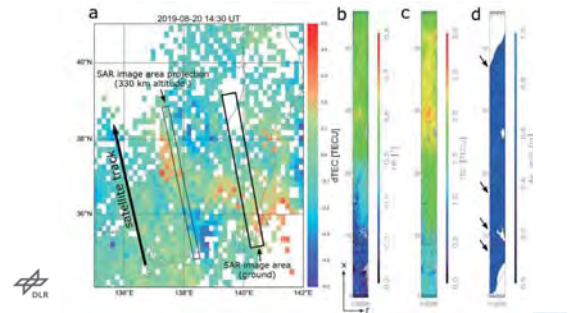
MSTID on 2019-08-20: GEONET observation

TEC perturbation ~ 0.4 TECU  
 ALOS2 image time : 14:30-14:32 UT



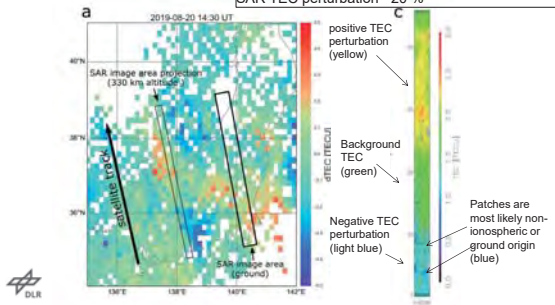
MSTID on 2019-08-20: SAR observation

- a) Geometry of SAR imaging and GEONET TEC: ALOS2 is right looking
- b) SAR derived Faraday rotation
- c) SAR derived slant TEC
- d) SAR subband azimuth shift



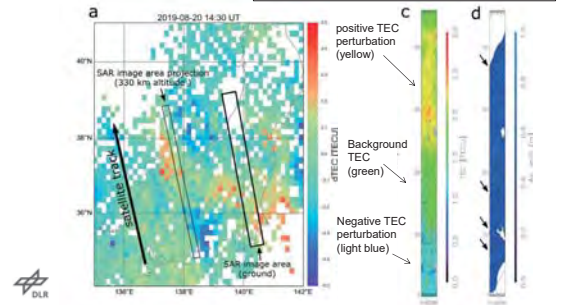
MSTID on 2019-08-20: SAR observation

- a) Geometry of SAR imaging and GEONET TEC
- b) SAR derived Faraday rotation
- c) SAR derived slant TEC : SAR TEC agree well with GEONET TEC when image area is mapped to F region altitudes. TEC amplitude ~0.5 TECU
- d) SAR subband azimuth shift



MSTID on 2019-08-20: SAR observation

- a) Geometry of SAR imaging and GEONET TEC
- b) SAR derived Faraday rotation
- c) SAR derived slant TEC : Subband Azimuth shift appeared as stripes almost parallel to TID phase plane. TEC gradient change frequently in negative TID phase.
- d) SAR subband azimuth shift



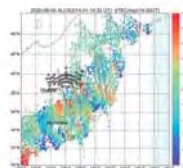
Summary and Outlook

Results

- ALOS2 and GEONET observation of MSTID on 2019-08-20 is presented.
- TEC perturbation observed by SAR and GEONET agree well when mapped to F region altitudes.
- Small scale TEC gradient variation (10 km scale or less) occurs in the negative TEC phase. Possible relation to FAI needs to be studied further.

Coordinated observation with MU radar

MU radar observation on 2020.06.09. is coordinated with ALOS2 imaging over north east Japan. MSTID is observed by GEONET. -> possible relation between FAI and SAR azimuth shifts will be studied.





Acknowledgement

Parts of this work is supported by ISEE International Collaborative Research Programs. We thank the MU radar and EAR collaboration research programm for radar allocation for 2019 and 2020.





## ライダーによる赤道域対流圏・成層圏の エアロゾル動態モニタリング

**阿保 真、柴田泰邦、長澤親生(東京都立大学)**

第14回MULライダー・赤道大気レーザーシンポジウム  
2020年9月14-15日

## はじめに

- 2004年からインドネシア・コタバン(0.2° S, 100.3° E)において、赤道領域の対流圏の雲・エアロゾル分布の連続観測を、小型ミールライダーを用いて現在まで継続
- 近年、火山活動の活発化、大規模な森林火災の発生
- エアロゾルは特に成層圏のトレーサとして有用
- 赤道域の地上ライダー観測は空白域
- 観測目的を対流圏・成層圏のエアロゾル観測モニタリングに絞って、観測を継続する

### 赤道ライダーの観測状況

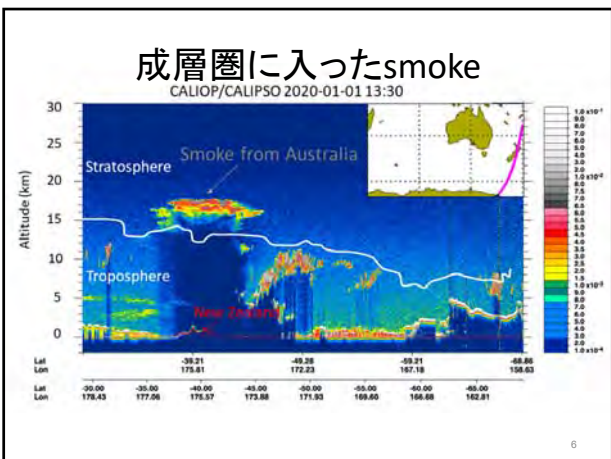
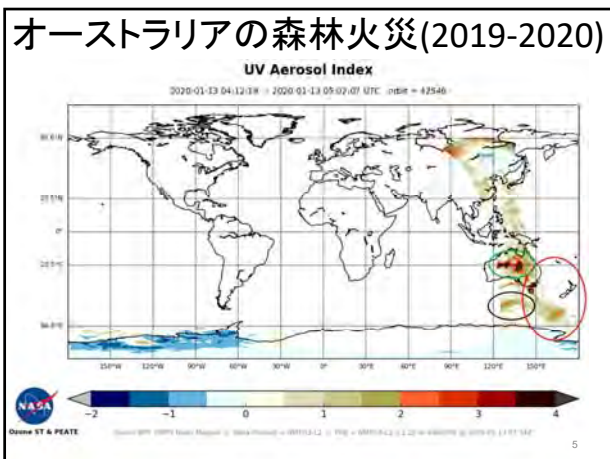
Kototabangライダー観測一覧

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013		
対流圏雲エアロゾル	[Red bars]											
シーラス偏光	[Blue bars]											
対流圏水蒸気	[Blue bars]											
成層圏エアロゾル	[Blue bars]											
中間圏	[Blue bars]											
金属原子層	[Blue bars]											
オゾン	[Blue bars]											
レーザー交換												
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020					
対流圏雲エアロゾル	[Red bars]							[Red bar]				
シーラス偏光	[Blue bars]							[Blue bar]				
成層圏エアロゾル	[Blue bars]							[Blue bar]				
オゾン	[Blue bars]							[Blue bar]				

大型  
小型

## 最近の成層圏エアロゾルイベント

- 大規模森林火災
  - 2019-2020 オーストラリア
  - 2017 カナダ・北米
- 火山噴火
  - Taal火山 (2020/1/13) フィリピン
  - Ulawun火山 (2019/6/26) パプアニューギニア



## 火災積乱雲による成層圏へのsmoke bubbleの注入

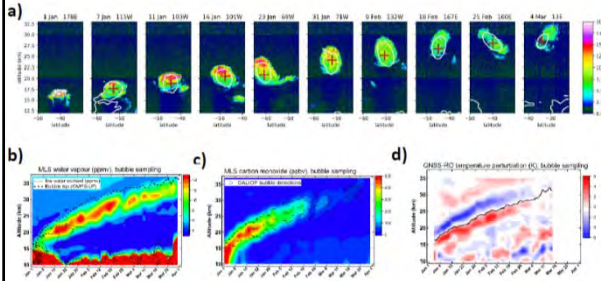
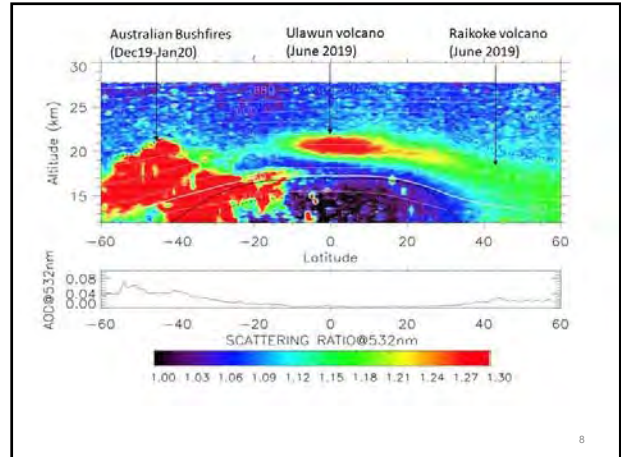


Figure 5: Vertical evolution of the smoke bubble, its chemical composition and thermal structure.

Khaykin et al. 2020

7



8

## カナダの森林火災(2017)

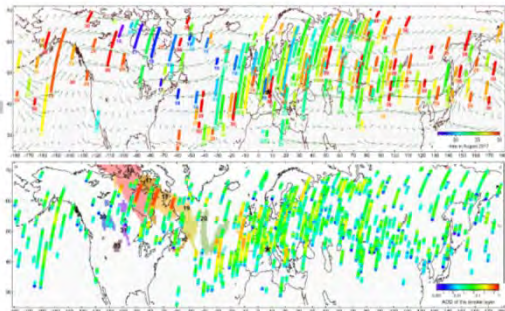
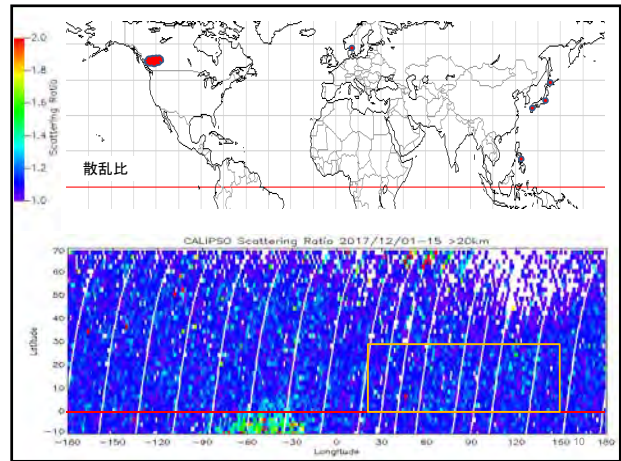
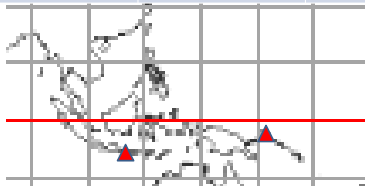


Figure 3. (a) Locations of smoke layer along CALIPSO night-time orbits during the period 14 – 30 August colored as a function of date since the first stratospheric detection of plume (16 August). The numbers below each colored track indicate the date in August. The superimposed ECMWF wind field represents a mean between 70–100 hPa over 16 August – 22 August period. Black asterisk mark OIEP location. (b) Same as (a) but including CALIOP data up until 3 September and color coded by the smoke layer's AOD. Color-filled areas indicate the occurrences of AI values above 7 with indication of the day in August and September.



## Ulawun火山噴火(2019/6/26)

Volcano	Ulawun	Kelut
Country	Papua New Guinea	Indonesia
Latitude	5.1 S	7.9 S
Longitude	151.3 E	112.3 E
Elevation	2334m	1731m
Eruption	2019/6/26 10:30(UT)	2014/2/13 16:15(UT)
Max.	19km?	26km
Most of the plume	18km	19-20km



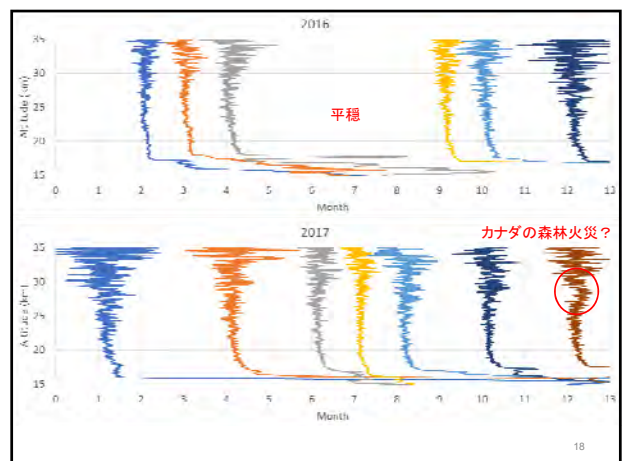
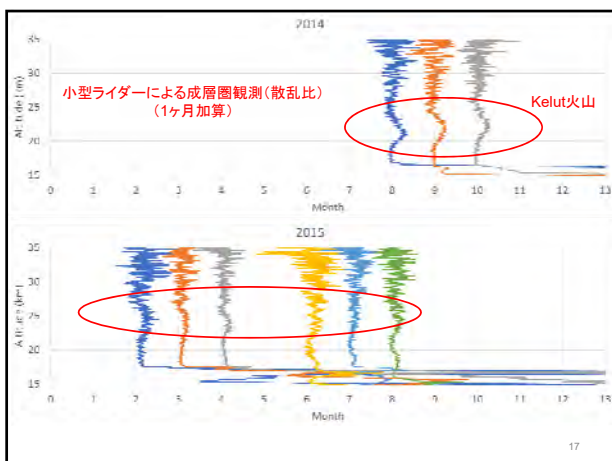
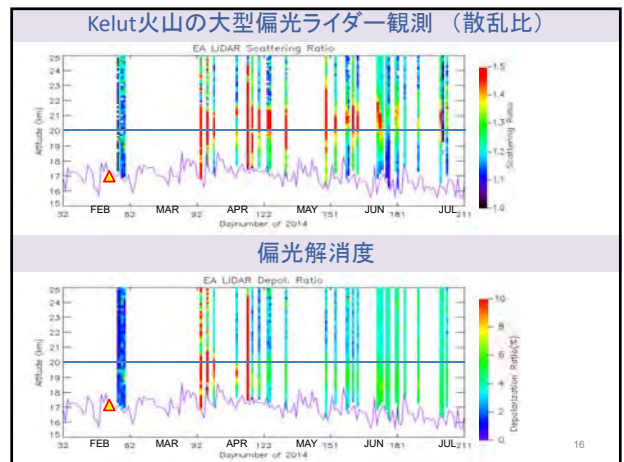
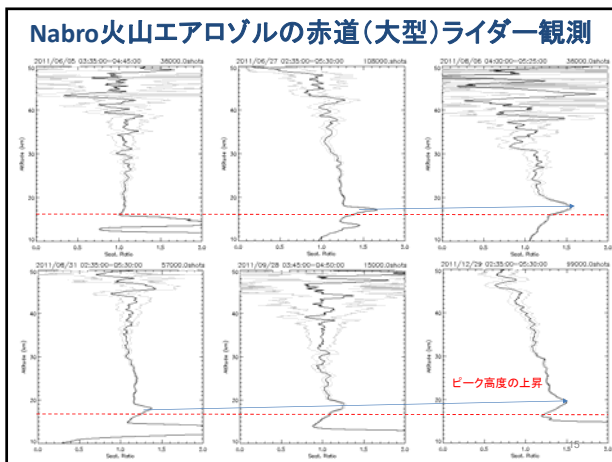
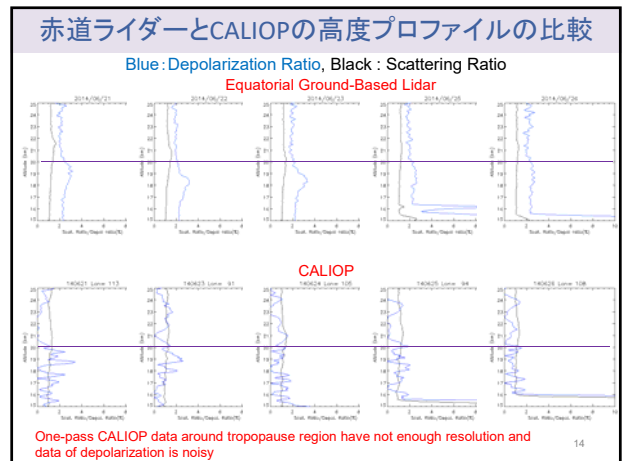
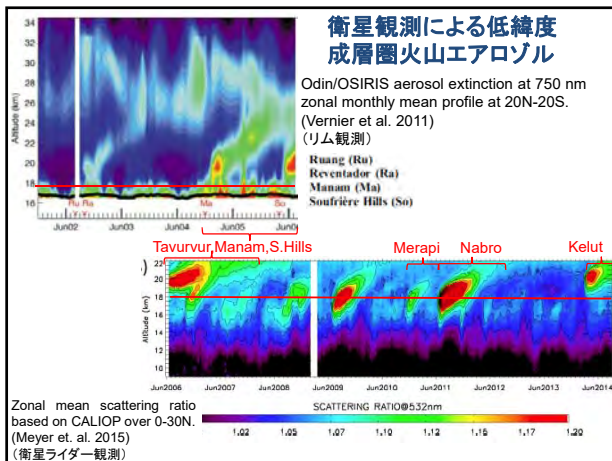
11

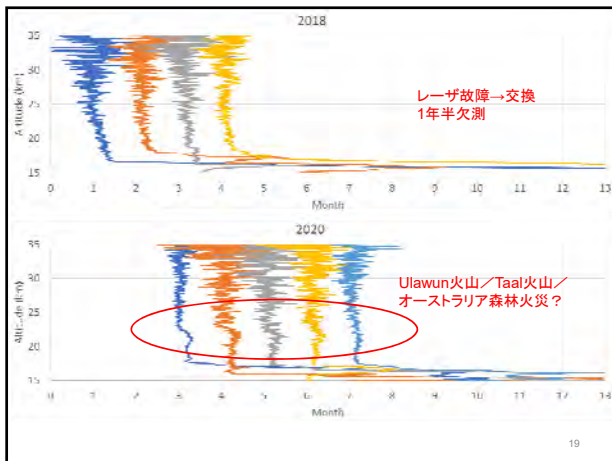
## 2014年以前の低緯度大規模火山噴火の一覧

赤道域(緯度10°以下)の噴火      成層圏に達した噴火

Volcano	Latitude	Longitude	Elevation	Eruption	VEI	Ash Alt.	SO2
Kelut	7.93S	112.31E	1731 m	2014/02/13	4	26km	200kt
Nabro	13.37N	41.70E	2218 m	2011/06/12	4	13.7km	103kt
Merapi	7.54S	110.44E	2968 m	2010/11/04	4	18km	227kt
Rabaul(Tavurvur)	4.27S	152.20E	688 m	2006/10/07	4	18km	
CALIPSO 2006/6~							
Soufriere Hills	16.72N	62.18W	915 m	2006/05/20	3	17km	
Manam	4.08S	145.04E	1807 m	2006/02/27		19km	54kt
Manam	4.08S	145.04E	1807 m	2005/01/28	4	24km	
Manam	4.08S	145.04E	1807 m	2004/10/24		18km	
Equatorial Lidar 2004/4~							
Pinatubo	15.13N	120.35E	1486 m	1991/06/15	6	40km	30Mt

12





## 今後の計画

- 大型ライダーの修理／観測再開(渡航可能になり次第対応)
- 過去のデータの見直し
- 衛星ライダー、赤道ライダー、赤道レーダを組み合わせることにより、火山エアロゾルをトレーサとした赤道域の成層圏-対流圏物質交換の解析
- 対流圏-TTL雲の解析
- 長期変動の解析



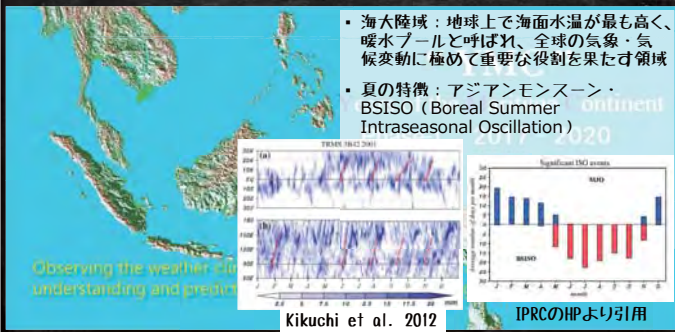
# YMC-BSM期間中の西太平洋域に見られた南西方向に伝播する擾乱活動に関する研究

木下 武也・萩野 慎也・鈴木 順子・城岡 竜一 (JAMSTEC)

## 発表内容

- 背景：
  - 海大陸域の夏の特徴
  - 波と平均場の理論
- 目的・目標
- 解析結果
- まとめと今後の課題

## 背景：海大陸域の夏の特徴

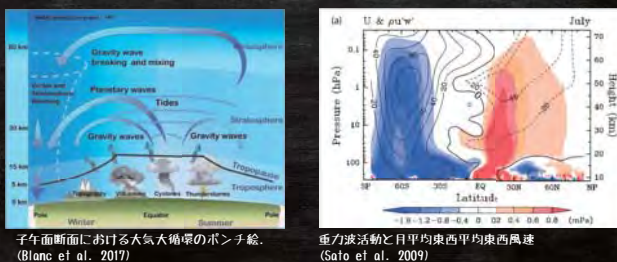


## 背景：Years of the Maritime Continent-Boreal Summer Monsoon (YMC-BSM) 2018において私たちはスマトラ島コトタバンで特殊ゾンデ観測を実施



## 背景：波と平均場 (大気大循環) の理論 Transformed-Eulerian Mean (TEM) 方程式系 (Andrews and McIntyre 1976, 1978)

- 活発な対流活動→波の発生→大気大循環の一部を駆動



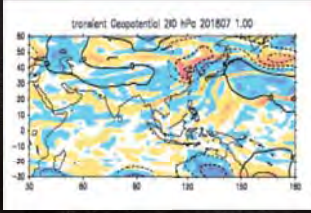
## 目的・目標

- 波と大気大循環の関係を局所的に (3次元的に) 診断する手法はまだ未完成 (理論はいくつもある: Plumb (1986), Takaya and Nakamura (1997, 2001), Miyahara (2006), Kinoshita et al. (2010), Kinoshita and Sato (2013, 2014)...) )
- 目標: YMC-BSM期間 (2018年6-8月) の擾乱活動と物質輸送の関係を明らかにするとともに3次元理論を用いた解析手法の確立を目指す
- 使用データ: ERA-Interim再解析データ
- 期間: 2018年6-8月

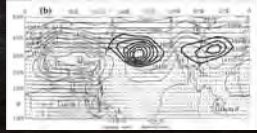


解析の流れ：上部対流圏の波活動のおおまかな構造を掴む

解析結果1  
2018年7月の200hPaにおけるジオポテンシャル擾乱と相対渦度



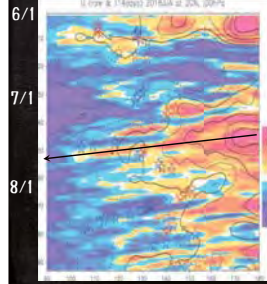
30-60N：アジアモンスーンの北側に沿って日本に伝播する総監視規模波  
20-30N：西向き、南西向きに伝播する波（Rossby Wave Breaking (RWB)が起こる領域で波がつぶれずに曲がる?）



RWBが生じる頻度の多い領域(太実線)。Postel and Hitchman (1999)

解析の流れ：上部対流圏の波活動のつる西向きに伝播する波の特性を調べる

解析結果2  
2018年6-8月の200hPa, 20N, 90E-180における東西風速



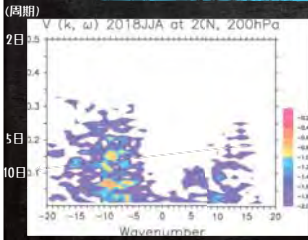
平均場  
・ 6月：10-30日にかけてこの領域全体で東風  
・ 7-8月：90E-125Eで東風（アジアモンスーン高気圧のへりに対応）、125E-180で西風

波  
・ 西向きに伝播する波が卓越  
・ およそ周期は5-10日  
・ 位相速度はおよそ14m/s  
・ 一部の波は台風と関係しあっている

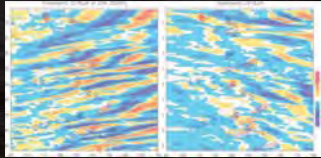
東西風速（カラー）、14日周期以上の東西風速（等値線）、☆は20N付近を通過する台風の中心位置（デジタル台風より引用）

解析の流れ：上部対流圏の波活動のつる西向きに伝播する波の特性を調べる

解析結果3  
2018年6-8月の200hPa, 20Nにおける南北風速擾乱のスペクトル



波  
・ スペクトルからも西向きに伝播する波が卓越  
・ 5-10日と20日周期付近、東西波数5-10（東西波長約3000-7000km）にピークが見られる



解析結果4 解析の流れ：3次元TEM系の波の伝播を診断するフラックスを紹介  
解析に使用した3次元波活動度フラックス

・ Kinoshita and Saito (2013) and Harada et al. (2019)

$$F = \rho_0 \left( \frac{\frac{1}{2} \left( \overline{u'^2} - \overline{v'^2} + \frac{\Phi_z'^2}{N^2} \right)}{\overline{u'w'} - f_0 \frac{\Phi_z' \Phi_x'}{N^2}} \right) + \rho_0 \left( \frac{\overline{u}}{\overline{v}} \right) A, \quad A \equiv \frac{E}{c} = \frac{\overline{u'_x \Phi'_z}}{N^2} - \frac{1}{2} \frac{q'^2}{f_y}$$

$$\hat{C}_{(g)} A + \bar{u} A = C_{(g)} A$$

従来の波活動度フラックスは固有群速度に比例。

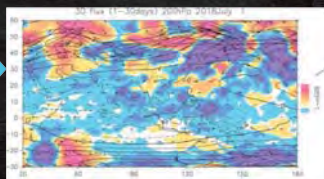
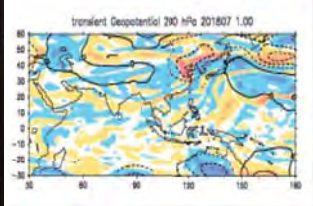
平均水平風速が大きい領域では対地群速度に比例する波活動度フラックスに修正する必要がある。

- $u'v'w'$ : 東西・南北・鉛直風速
- $\Phi'$ : ジオポテンシャル
- $f_0$ : コリオリパラメータ
- $N^2$ : 静的安定度
- $\rho_0(z)$ : 基準密度
- $E$ : 波のエネルギー
- $A$ : 波の質量動量
- $q$ : 渦位
- $\hat{C}$ : 渦位固有位相速度
- $\hat{C}_{(g)}$ : 固有群速度
- $C_{(g)}$ : 対地群速度

解析の流れ：3次元波活動フラックスがきちんと波の伝播を診断できているかを確認

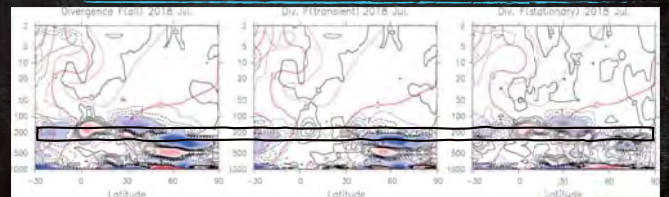
解析結果5  
3次元波活動度フラックス（矢印：水平成分、カラー：鉛直成分）

2018年7月の200hPaにおけるジオポテンシャル擾乱と相対渦度



解析の流れ：波活動フラックスの収束・発散 → 物質輸送の解析に踏み込む

解析結果6  
波活動度フラックスの収束(青)・発散(赤)



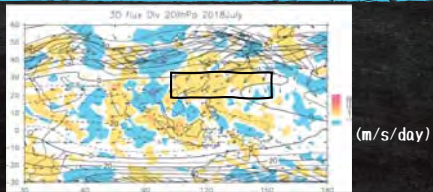
20-30N, 200hPa面では弱い発散。（停滞性擾乱も非定常擾乱どちらも）

$$[u]_t - f[v]^* = \nabla \cdot F$$

を考慮すると、波によって南向きの流れが生じている。

解析の流れ：波活動フラックスの収束・発散  
→物質輸送の解析に踏み込む

### 解析結果7 3波活動度フラックスの収束・発散



90E-150Eにおいて3次元波活動度フラックスは発散。

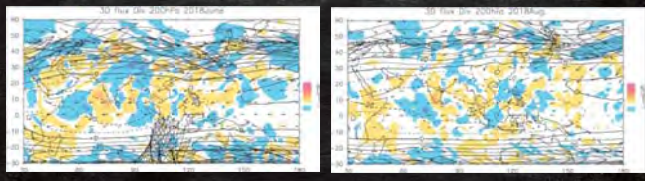
$$\bar{u}_t + \bar{u}\nabla\bar{u} - f\bar{v}^* + \bar{\Phi}_x = \nabla \cdot F$$

但し、残差南北流には地衡流(バランス流)が含まれていることに注意。

### まとめと今後の予定

- YMC-BSM期間中の西太平洋域の波活動を調べた結果
  - 南西方向に伝播する波(周期5-10日、東西波長約3000-7000km)が卓越
  - 波の収束・発散の結果から、南向きの流れを生じてることが示唆された
- 今後は、西向き伝播の波のみを抽出した形で波活動度フラックスの収束・発散場を解析
- 波に伴う物質輸送を詳細に評価
- YMC-BSMでの観測結果と比較

### 補足資料：6, 8月の波活動度フラックスの収束・発散



## バングラデシュにおける X帯レーダー観測

村田文絵 (高知大) ・ 寺尾徹 (香川大) ・ 上米良秀行 (防災科研) ・ 下舞豊志 (島根大) ・ 佐々浩司 (高知大) ・ Sayeed Ahmed Choudhury ・ Shamsuddin Ahmed (バングラデシュ気象局) ・ Towhida Rashid(ダッカ大)

## バングラデシュ

- ・ 面積：日本の39%
- ・ 人口：日本の1.3倍
- ・ 3大河川のデルタ
- ・ 流域に多雨地域

1998-2011年のTRMM2A25による  
モンスーン季(6-9月)雨量

## バングラデシュに影響を及ぼす主な気象現象

サイクロン (台風)

1991年4月29-30日にバングラデシュを襲ったサイクロンの衛星雲画像

流域の大雨

2004年7月30日の浸水図(FWFCによる)

シビアストーム

2013年3月22日に起こったフラフモンバリア竜巻

## 流域におけるモンスーン季の大雨の特性

インド・チェラプンジでの記録

木口・沖(2010)

降水記録  
12カ月雨量26,461mm (1860年8月-1861年7月)  
1カ月雨量9,360 mm (1861年7月)

## 雨滴粒度分布観測@メガラヤでみる降水システムの特徴

D<sub>0</sub>-N<sub>w</sub>パラメータ空間

頻度分布

降水強度で色付け

反射強度で色付け

Murata et al. (2020)

マウシンラム  
@Mawsynram border area college

チェラプンジ  
@インド気象局

シロン  
@North-Eastern Hill University

## 雨滴粒度分布観測@メガラヤでみる降水システムの特徴

D<sub>0</sub>-N<sub>w</sub>パラメータ空間

チェラプンジ

Murata et al. (2020)

頻度分布

降水強度で色付け

反射強度で色付け

Murata et al. (2020)

熱帯  
海洋性  
降水

Dolan et al. (2018)  
Thompson et al. (2015)

頻度分布

降水強度で色付け

反射強度で色付け



### ISROチェラプンジ気象レーダー

Radar reflectivity at 10:19UTC on 2<sup>nd</sup> June 2017 with in 60 km range on 10 elevation angles

GPM/DPR Near-surface-rain(right) and Storm-top-height(left) at the same time

### バングラデシュにおける気象レーダー観測

1961年にダッカにC帯レーダーが設置。写真は同型のカラチレーダー

1988年に設置されたケプハラ5帯レーダー

JICA報告書(2005年)から取得し加筆。

気象研究ノート第237号による。

### バングラデシュでX帯レーダー観測を計画

科研費基盤B「世界的豪雨地域(チェラプンジ)における特徴的降雨集中機構の解明(2020-2023年)でX帯レーダー観測を計画。

既存のレーダーと福島大X帯レーダーの比較

	コックスバザールレーダー	福島大X帯レーダー
周波数	2.84 GHz	9.74 GHz
距離分解能	1,250m (風観測時 630m)	60m, 120m
観測範囲	440 km (200 km)	60 km
ピーク送信電力	500 kW	25 kW
パルス幅	2.0μs (1.0μs)	0.2, 0.6, 1.2 μs
パルス繰り返し周波数	320Hz (504Hz & 720Hz)	1320, 1111, 1000, 833 μs
アンテナ径	Parabolic ~20 m <sup>2</sup> (D~5m)	Parabolic 1.13 m <sup>2</sup> (D~1.2m)
増幅管	クライストロン	マグネトロン
ビーム幅	<1.7°	2°

既存のバングラデシュレーダーに比べて非常に空間解像度が高い。高い空間解像度で降雨分布を得られる。1 km >> 200mがそれぞれ以下観測及びメンテナンスコストがかかる。年一回のマグネトロンの交換など。

### 科研費の目的: 世界最大の雨の原因を探る特徴的な日変化(夜雨)

950hPaの深夜0時と昼12時(1800-0600UTC)の風速差の分布ERA-Interimを用いている。(Fujinami et al. 2017)

ダッカにおけるラジオゾンデ集中観測の結果(左)ホドグラフ(右)下部対流圏におけるいくつかの高度での風速日変化(Terao et al. 2006)

### 科研費の目的: 高解像度の雨量情報を作成し、減災のための利用法を考える

#### バングラデシュ北東部の河川圏

マウシンラム チェラプンジ

North East Region Model  
River System & Hydrometric Station  
Space & Model Validation of Current & 40 Regional Models for Dhaka Hydrological Year 0-2000

LEGEND:  
 (N) Seasonal Rainfall  
 (S) Seasonal Rainfall  
 (A) Seasonal Rainfall  
 (M) Seasonal Rainfall  
 (W) Seasonal Rainfall  
 (L) Seasonal Rainfall  
 (H) Seasonal Rainfall  
 (D) Seasonal Rainfall  
 (E) Seasonal Rainfall  
 (F) Seasonal Rainfall  
 (G) Seasonal Rainfall  
 (I) Seasonal Rainfall  
 (J) Seasonal Rainfall  
 (K) Seasonal Rainfall  
 (M) Seasonal Rainfall  
 (N) Seasonal Rainfall  
 (P) Seasonal Rainfall  
 (R) Seasonal Rainfall  
 (S) Seasonal Rainfall  
 (T) Seasonal Rainfall  
 (V) Seasonal Rainfall  
 (X) Seasonal Rainfall  
 (Z) Seasonal Rainfall  
 (AA) Seasonal Rainfall  
 (AB) Seasonal Rainfall  
 (AC) Seasonal Rainfall  
 (AD) Seasonal Rainfall  
 (AE) Seasonal Rainfall  
 (AF) Seasonal Rainfall  
 (AG) Seasonal Rainfall  
 (AH) Seasonal Rainfall  
 (AI) Seasonal Rainfall  
 (AJ) Seasonal Rainfall  
 (AK) Seasonal Rainfall  
 (AL) Seasonal Rainfall  
 (AM) Seasonal Rainfall  
 (AN) Seasonal Rainfall  
 (AO) Seasonal Rainfall  
 (AP) Seasonal Rainfall  
 (AQ) Seasonal Rainfall  
 (AR) Seasonal Rainfall  
 (AS) Seasonal Rainfall  
 (AT) Seasonal Rainfall  
 (AU) Seasonal Rainfall  
 (AV) Seasonal Rainfall  
 (AW) Seasonal Rainfall  
 (AX) Seasonal Rainfall  
 (AY) Seasonal Rainfall  
 (AZ) Seasonal Rainfall  
 (BA) Seasonal Rainfall  
 (BB) Seasonal Rainfall  
 (BC) Seasonal Rainfall  
 (BD) Seasonal Rainfall  
 (BE) Seasonal Rainfall  
 (BF) Seasonal Rainfall  
 (BG) Seasonal Rainfall  
 (BH) Seasonal Rainfall  
 (BI) Seasonal Rainfall  
 (BJ) Seasonal Rainfall  
 (BK) Seasonal Rainfall  
 (BL) Seasonal Rainfall  
 (BM) Seasonal Rainfall  
 (BN) Seasonal Rainfall  
 (BO) Seasonal Rainfall  
 (BP) Seasonal Rainfall  
 (BQ) Seasonal Rainfall  
 (BR) Seasonal Rainfall  
 (BS) Seasonal Rainfall  
 (BT) Seasonal Rainfall  
 (BU) Seasonal Rainfall  
 (BV) Seasonal Rainfall  
 (BW) Seasonal Rainfall  
 (BX) Seasonal Rainfall  
 (BY) Seasonal Rainfall  
 (BZ) Seasonal Rainfall  
 (CA) Seasonal Rainfall  
 (CB) Seasonal Rainfall  
 (CC) Seasonal Rainfall  
 (CD) Seasonal Rainfall  
 (CE) Seasonal Rainfall  
 (CF) Seasonal Rainfall  
 (CG) Seasonal Rainfall  
 (CH) Seasonal Rainfall  
 (CI) Seasonal Rainfall  
 (CJ) Seasonal Rainfall  
 (CK) Seasonal Rainfall  
 (CL) Seasonal Rainfall  
 (CM) Seasonal Rainfall  
 (CN) Seasonal Rainfall  
 (CO) Seasonal Rainfall  
 (CP) Seasonal Rainfall  
 (CQ) Seasonal Rainfall  
 (CR) Seasonal Rainfall  
 (CS) Seasonal Rainfall  
 (CT) Seasonal Rainfall  
 (CU) Seasonal Rainfall  
 (CV) Seasonal Rainfall  
 (CW) Seasonal Rainfall  
 (CX) Seasonal Rainfall  
 (CY) Seasonal Rainfall  
 (CZ) Seasonal Rainfall  
 (DA) Seasonal Rainfall  
 (DB) Seasonal Rainfall  
 (DC) Seasonal Rainfall  
 (DD) Seasonal Rainfall  
 (DE) Seasonal Rainfall  
 (DF) Seasonal Rainfall  
 (DG) Seasonal Rainfall  
 (DH) Seasonal Rainfall  
 (DI) Seasonal Rainfall  
 (DJ) Seasonal Rainfall  
 (DK) Seasonal Rainfall  
 (DL) Seasonal Rainfall  
 (DM) Seasonal Rainfall  
 (DN) Seasonal Rainfall  
 (DO) Seasonal Rainfall  
 (DP) Seasonal Rainfall  
 (DQ) Seasonal Rainfall  
 (DR) Seasonal Rainfall  
 (DS) Seasonal Rainfall  
 (DT) Seasonal Rainfall  
 (DU) Seasonal Rainfall  
 (DV) Seasonal Rainfall  
 (DW) Seasonal Rainfall  
 (DX) Seasonal Rainfall  
 (DY) Seasonal Rainfall  
 (DZ) Seasonal Rainfall  
 (EA) Seasonal Rainfall  
 (EB) Seasonal Rainfall  
 (EC) Seasonal Rainfall  
 (ED) Seasonal Rainfall  
 (EE) Seasonal Rainfall  
 (EF) Seasonal Rainfall  
 (EG) Seasonal Rainfall  
 (EH) Seasonal Rainfall  
 (EI) Seasonal Rainfall  
 (EJ) Seasonal Rainfall  
 (EK) Seasonal Rainfall  
 (EL) Seasonal Rainfall  
 (EM) Seasonal Rainfall  
 (EN) Seasonal Rainfall  
 (EO) Seasonal Rainfall  
 (EP) Seasonal Rainfall  
 (EQ) Seasonal Rainfall  
 (ER) Seasonal Rainfall  
 (ES) Seasonal Rainfall  
 (ET) Seasonal Rainfall  
 (EU) Seasonal Rainfall  
 (EV) Seasonal Rainfall  
 (EW) Seasonal Rainfall  
 (EX) Seasonal Rainfall  
 (EY) Seasonal Rainfall  
 (EZ) Seasonal Rainfall  
 (FA) Seasonal Rainfall  
 (FB) Seasonal Rainfall  
 (FC) Seasonal Rainfall  
 (FD) Seasonal Rainfall  
 (FE) Seasonal Rainfall  
 (FF) Seasonal Rainfall  
 (FG) Seasonal Rainfall  
 (FH) Seasonal Rainfall  
 (FI) Seasonal Rainfall  
 (FJ) Seasonal Rainfall  
 (FK) Seasonal Rainfall  
 (FL) Seasonal Rainfall  
 (FM) Seasonal Rainfall  
 (FN) Seasonal Rainfall  
 (FO) Seasonal Rainfall  
 (FP) Seasonal Rainfall  
 (FQ) Seasonal Rainfall  
 (FR) Seasonal Rainfall  
 (FS) Seasonal Rainfall  
 (FT) Seasonal Rainfall  
 (FU) Seasonal Rainfall  
 (FV) Seasonal Rainfall  
 (FW) Seasonal Rainfall  
 (FX) Seasonal Rainfall  
 (FY) Seasonal Rainfall  
 (FZ) Seasonal Rainfall  
 (GA) Seasonal Rainfall  
 (GB) Seasonal Rainfall  
 (GC) Seasonal Rainfall  
 (GD) Seasonal Rainfall  
 (GE) Seasonal Rainfall  
 (GF) Seasonal Rainfall  
 (GG) Seasonal Rainfall  
 (GH) Seasonal Rainfall  
 (GI) Seasonal Rainfall  
 (GJ) Seasonal Rainfall  
 (GK) Seasonal Rainfall  
 (GL) Seasonal Rainfall  
 (GM) Seasonal Rainfall  
 (GN) Seasonal Rainfall  
 (GO) Seasonal Rainfall  
 (GP) Seasonal Rainfall  
 (GQ) Seasonal Rainfall  
 (GR) Seasonal Rainfall  
 (GS) Seasonal Rainfall  
 (GT) Seasonal Rainfall  
 (GU) Seasonal Rainfall  
 (GV) Seasonal Rainfall  
 (GW) Seasonal Rainfall  
 (GX) Seasonal Rainfall  
 (GY) Seasonal Rainfall  
 (GZ) Seasonal Rainfall  
 (HA) Seasonal Rainfall  
 (HB) Seasonal Rainfall  
 (HC) Seasonal Rainfall  
 (HD) Seasonal Rainfall  
 (HE) Seasonal Rainfall  
 (HF) Seasonal Rainfall  
 (HG) Seasonal Rainfall  
 (HH) Seasonal Rainfall  
 (HI) Seasonal Rainfall  
 (HJ) Seasonal Rainfall  
 (HK) Seasonal Rainfall  
 (HL) Seasonal Rainfall  
 (HM) Seasonal Rainfall  
 (HN) Seasonal Rainfall  
 (HO) Seasonal Rainfall  
 (HP) Seasonal Rainfall  
 (HQ) Seasonal Rainfall  
 (HR) Seasonal Rainfall  
 (HS) Seasonal Rainfall  
 (HT) Seasonal Rainfall  
 (HU) Seasonal Rainfall  
 (HV) Seasonal Rainfall  
 (HW) Seasonal Rainfall  
 (HX) Seasonal Rainfall  
 (HY) Seasonal Rainfall  
 (HZ) Seasonal Rainfall  
 (IA) Seasonal Rainfall  
 (IB) Seasonal Rainfall  
 (IC) Seasonal Rainfall  
 (ID) Seasonal Rainfall  
 (IE) Seasonal Rainfall  
 (IF) Seasonal Rainfall  
 (IG) Seasonal Rainfall  
 (IH) Seasonal Rainfall  
 (II) Seasonal Rainfall  
 (IJ) Seasonal Rainfall  
 (IK) Seasonal Rainfall  
 (IL) Seasonal Rainfall  
 (IM) Seasonal Rainfall  
 (IN) Seasonal Rainfall  
 (IO) Seasonal Rainfall  
 (IP) Seasonal Rainfall  
 (IQ) Seasonal Rainfall  
 (IR) Seasonal Rainfall  
 (IS) Seasonal Rainfall  
 (IT) Seasonal Rainfall  
 (IU) Seasonal Rainfall  
 (IV) Seasonal Rainfall  
 (IW) Seasonal Rainfall  
 (IX) Seasonal Rainfall  
 (IY) Seasonal Rainfall  
 (IZ) Seasonal Rainfall  
 (JA) Seasonal Rainfall  
 (JB) Seasonal Rainfall  
 (JC) Seasonal Rainfall  
 (JD) Seasonal Rainfall  
 (JE) Seasonal Rainfall  
 (JF) Seasonal Rainfall  
 (JG) Seasonal Rainfall  
 (JH) Seasonal Rainfall  
 (JI) Seasonal Rainfall  
 (JJ) Seasonal Rainfall  
 (JK) Seasonal Rainfall  
 (JL) Seasonal Rainfall  
 (JM) Seasonal Rainfall  
 (JN) Seasonal Rainfall  
 (JO) Seasonal Rainfall  
 (JP) Seasonal Rainfall  
 (JQ) Seasonal Rainfall  
 (JR) Seasonal Rainfall  
 (JS) Seasonal Rainfall  
 (JT) Seasonal Rainfall  
 (JU) Seasonal Rainfall  
 (JV) Seasonal Rainfall  
 (JW) Seasonal Rainfall  
 (JX) Seasonal Rainfall  
 (JY) Seasonal Rainfall  
 (JZ) Seasonal Rainfall  
 (KA) Seasonal Rainfall  
 (KB) Seasonal Rainfall  
 (KC) Seasonal Rainfall  
 (KD) Seasonal Rainfall  
 (KE) Seasonal Rainfall  
 (KF) Seasonal Rainfall  
 (KG) Seasonal Rainfall  
 (KH) Seasonal Rainfall  
 (KI) Seasonal Rainfall  
 (KJ) Seasonal Rainfall  
 (KK) Seasonal Rainfall  
 (KL) Seasonal Rainfall  
 (KM) Seasonal Rainfall  
 (KN) Seasonal Rainfall  
 (KO) Seasonal Rainfall  
 (KP) Seasonal Rainfall  
 (KQ) Seasonal Rainfall  
 (KR) Seasonal Rainfall  
 (KS) Seasonal Rainfall  
 (KT) Seasonal Rainfall  
 (KU) Seasonal Rainfall  
 (KV) Seasonal Rainfall  
 (KW) Seasonal Rainfall  
 (KX) Seasonal Rainfall  
 (KY) Seasonal Rainfall  
 (KZ) Seasonal Rainfall  
 (LA) Seasonal Rainfall  
 (LB) Seasonal Rainfall  
 (LC) Seasonal Rainfall  
 (LD) Seasonal Rainfall  
 (LE) Seasonal Rainfall  
 (LF) Seasonal Rainfall  
 (LG) Seasonal Rainfall  
 (LH) Seasonal Rainfall  
 (LI) Seasonal Rainfall  
 (LJ) Seasonal Rainfall  
 (LK) Seasonal Rainfall  
 (LL) Seasonal Rainfall  
 (LM) Seasonal Rainfall  
 (LN) Seasonal Rainfall  
 (LO) Seasonal Rainfall  
 (LP) Seasonal Rainfall  
 (LQ) Seasonal Rainfall  
 (LR) Seasonal Rainfall  
 (LS) Seasonal Rainfall  
 (LT) Seasonal Rainfall  
 (LU) Seasonal Rainfall  
 (LV) Seasonal Rainfall  
 (LW) Seasonal Rainfall  
 (LX) Seasonal Rainfall  
 (LY) Seasonal Rainfall  
 (LZ) Seasonal Rainfall  
 (MA) Seasonal Rainfall  
 (MB) Seasonal Rainfall  
 (MC) Seasonal Rainfall  
 (MD) Seasonal Rainfall  
 (ME) Seasonal Rainfall  
 (MF) Seasonal Rainfall  
 (MG) Seasonal Rainfall  
 (MH) Seasonal Rainfall  
 (MI) Seasonal Rainfall  
 (MJ) Seasonal Rainfall  
 (MK) Seasonal Rainfall  
 (ML) Seasonal Rainfall  
 (MM) Seasonal Rainfall  
 (MN) Seasonal Rainfall  
 (MO) Seasonal Rainfall  
 (MP) Seasonal Rainfall  
 (MQ) Seasonal Rainfall  
 (MR) Seasonal Rainfall  
 (MS) Seasonal Rainfall  
 (MT) Seasonal Rainfall  
 (MU) Seasonal Rainfall  
 (MV) Seasonal Rainfall  
 (MW) Seasonal Rainfall  
 (MX) Seasonal Rainfall  
 (MY) Seasonal Rainfall  
 (MZ) Seasonal Rainfall  
 (NA) Seasonal Rainfall  
 (NB) Seasonal Rainfall  
 (NC) Seasonal Rainfall  
 (ND) Seasonal Rainfall  
 (NE) Seasonal Rainfall  
 (NF) Seasonal Rainfall  
 (NG) Seasonal Rainfall  
 (NH) Seasonal Rainfall  
 (NI) Seasonal Rainfall  
 (NJ) Seasonal Rainfall  
 (NK) Seasonal Rainfall  
 (NL) Seasonal Rainfall  
 (NM) Seasonal Rainfall  
 (NN) Seasonal Rainfall  
 (NO) Seasonal Rainfall  
 (NP) Seasonal Rainfall  
 (NQ) Seasonal Rainfall  
 (NR) Seasonal Rainfall  
 (NS) Seasonal Rainfall  
 (NT) Seasonal Rainfall  
 (NU) Seasonal Rainfall  
 (NV) Seasonal Rainfall  
 (NW) Seasonal Rainfall  
 (NX) Seasonal Rainfall  
 (NY) Seasonal Rainfall  
 (NZ) Seasonal Rainfall  
 (OA) Seasonal Rainfall  
 (OB) Seasonal Rainfall  
 (OC) Seasonal Rainfall  
 (OD) Seasonal Rainfall  
 (OE) Seasonal Rainfall  
 (OF) Seasonal Rainfall  
 (OG) Seasonal Rainfall  
 (OH) Seasonal Rainfall  
 (OI) Seasonal Rainfall  
 (OJ) Seasonal Rainfall  
 (OK) Seasonal Rainfall  
 (OL) Seasonal Rainfall  
 (OM) Seasonal Rainfall  
 (ON) Seasonal Rainfall  
 (OO) Seasonal Rainfall  
 (OP) Seasonal Rainfall  
 (OQ) Seasonal Rainfall  
 (OR) Seasonal Rainfall  
 (OS) Seasonal Rainfall  
 (OT) Seasonal Rainfall  
 (OU) Seasonal Rainfall  
 (OV) Seasonal Rainfall  
 (OW) Seasonal Rainfall  
 (OX) Seasonal Rainfall  
 (OY) Seasonal Rainfall  
 (OZ) Seasonal Rainfall  
 (PA) Seasonal Rainfall  
 (PB) Seasonal Rainfall  
 (PC) Seasonal Rainfall  
 (PD) Seasonal Rainfall  
 (PE) Seasonal Rainfall  
 (PF) Seasonal Rainfall  
 (PG) Seasonal Rainfall  
 (PH) Seasonal Rainfall  
 (PI) Seasonal Rainfall  
 (PJ) Seasonal Rainfall  
 (PK) Seasonal Rainfall  
 (PL) Seasonal Rainfall  
 (PM) Seasonal Rainfall  
 (PN) Seasonal Rainfall  
 (PO) Seasonal Rainfall  
 (PP) Seasonal Rainfall  
 (PQ) Seasonal Rainfall  
 (PR) Seasonal Rainfall  
 (PS) Seasonal Rainfall  
 (PT) Seasonal Rainfall  
 (PU) Seasonal Rainfall  
 (PV) Seasonal Rainfall  
 (PW) Seasonal Rainfall  
 (PX) Seasonal Rainfall  
 (PY) Seasonal Rainfall  
 (PZ) Seasonal Rainfall  
 (QA) Seasonal Rainfall  
 (QB) Seasonal Rainfall  
 (QC) Seasonal Rainfall  
 (QD) Seasonal Rainfall  
 (QE) Seasonal Rainfall  
 (QF) Seasonal Rainfall  
 (QG) Seasonal Rainfall  
 (QH) Seasonal Rainfall  
 (QI) Seasonal Rainfall  
 (QJ) Seasonal Rainfall  
 (QK) Seasonal Rainfall  
 (QL) Seasonal Rainfall  
 (QM) Seasonal Rainfall  
 (QN) Seasonal Rainfall  
 (QO) Seasonal Rainfall  
 (QP) Seasonal Rainfall  
 (QQ) Seasonal Rainfall  
 (QR) Seasonal Rainfall  
 (QS) Seasonal Rainfall  
 (QT) Seasonal Rainfall  
 (QU) Seasonal Rainfall  
 (QV) Seasonal Rainfall  
 (QW) Seasonal Rainfall  
 (QX) Seasonal Rainfall  
 (QY) Seasonal Rainfall  
 (QZ) Seasonal Rainfall  
 (RA) Seasonal Rainfall  
 (RB) Seasonal Rainfall  
 (RC) Seasonal Rainfall  
 (RD) Seasonal Rainfall  
 (RE) Seasonal Rainfall  
 (RF) Seasonal Rainfall  
 (RG) Seasonal Rainfall  
 (RH) Seasonal Rainfall  
 (RI) Seasonal Rainfall  
 (RJ) Seasonal Rainfall  
 (RK) Seasonal Rainfall  
 (RL) Seasonal Rainfall  
 (RM) Seasonal Rainfall  
 (RN) Seasonal Rainfall  
 (RO) Seasonal Rainfall  
 (RP) Seasonal Rainfall  
 (RQ) Seasonal Rainfall  
 (RR) Seasonal Rainfall  
 (RS) Seasonal Rainfall  
 (RT) Seasonal Rainfall  
 (RU) Seasonal Rainfall  
 (RV) Seasonal Rainfall  
 (RW) Seasonal Rainfall  
 (RX) Seasonal Rainfall  
 (RY) Seasonal Rainfall  
 (RZ) Seasonal Rainfall  
 (SA) Seasonal Rainfall  
 (SB) Seasonal Rainfall  
 (SC) Seasonal Rainfall  
 (SD) Seasonal Rainfall  
 (SE) Seasonal Rainfall  
 (SF) Seasonal Rainfall  
 (SG) Seasonal Rainfall  
 (SH) Seasonal Rainfall  
 (SI) Seasonal Rainfall  
 (SJ) Seasonal Rainfall  
 (SK) Seasonal Rainfall  
 (SL) Seasonal Rainfall  
 (SM) Seasonal Rainfall  
 (SN) Seasonal Rainfall  
 (SO) Seasonal Rainfall  
 (SP) Seasonal Rainfall  
 (SQ) Seasonal Rainfall  
 (SR) Seasonal Rainfall  
 (SS) Seasonal Rainfall  
 (ST) Seasonal Rainfall  
 (SU) Seasonal Rainfall  
 (SV) Seasonal Rainfall  
 (SW) Seasonal Rainfall  
 (SX) Seasonal Rainfall  
 (SY) Seasonal Rainfall  
 (SZ) Seasonal Rainfall  
 (TA) Seasonal Rainfall  
 (TB) Seasonal Rainfall  
 (TC) Seasonal Rainfall  
 (TD) Seasonal Rainfall  
 (TE) Seasonal Rainfall  
 (TF) Seasonal Rainfall  
 (TG) Seasonal Rainfall  
 (TH) Seasonal Rainfall  
 (TI) Seasonal Rainfall  
 (TJ) Seasonal Rainfall  
 (TK) Seasonal Rainfall  
 (TL) Seasonal Rainfall  
 (TM) Seasonal Rainfall  
 (TN) Seasonal Rainfall  
 (TO) Seasonal Rainfall  
 (TP) Seasonal Rainfall  
 (TQ) Seasonal Rainfall  
 (TR) Seasonal Rainfall  
 (TS) Seasonal Rainfall  
 (TT) Seasonal Rainfall  
 (TU) Seasonal Rainfall  
 (TV) Seasonal Rainfall  
 (TW) Seasonal Rainfall  
 (TX) Seasonal Rainfall  
 (TY) Seasonal Rainfall  
 (TZ) Seasonal Rainfall  
 (UA) Seasonal Rainfall  
 (UB) Seasonal Rainfall  
 (UC) Seasonal Rainfall  
 (UD) Seasonal Rainfall  
 (UE) Seasonal Rainfall  
 (UF) Seasonal Rainfall  
 (UG) Seasonal Rainfall  
 (UH) Seasonal Rainfall  
 (UI) Seasonal Rainfall  
 (UJ) Seasonal Rainfall  
 (UK) Seasonal Rainfall  
 (UL) Seasonal Rainfall  
 (UM) Seasonal Rainfall  
 (UN) Seasonal Rainfall  
 (UO) Seasonal Rainfall  
 (UP) Seasonal Rainfall  
 (UQ) Seasonal Rainfall  
 (UR) Seasonal Rainfall  
 (US) Seasonal Rainfall  
 (UT) Seasonal Rainfall  
 (UU) Seasonal Rainfall  
 (UV) Seasonal Rainfall  
 (UW) Seasonal Rainfall  
 (UX) Seasonal Rainfall  
 (UY) Seasonal Rainfall  
 (UZ) Seasonal Rainfall  
 (VA) Seasonal Rainfall  
 (VB) Seasonal Rainfall  
 (VC) Seasonal Rainfall  
 (VD) Seasonal Rainfall  
 (VE) Seasonal Rainfall  
 (VF) Seasonal Rainfall  
 (VG) Seasonal Rainfall  
 (VH) Seasonal Rainfall  
 (VI) Seasonal Rainfall  
 (VJ) Seasonal Rainfall  
 (VK) Seasonal Rainfall  
 (VL) Seasonal Rainfall  
 (VM) Seasonal Rainfall  
 (VN) Seasonal Rainfall  
 (VO) Seasonal Rainfall  
 (VP) Seasonal Rainfall  
 (VQ) Seasonal Rainfall  
 (VR) Seasonal Rainfall  
 (VS) Seasonal Rainfall  
 (VT) Seasonal Rainfall  
 (VU) Seasonal Rainfall  
 (VV) Seasonal Rainfall  
 (VW) Seasonal Rainfall  
 (VX) Seasonal Rainfall  
 (VY) Seasonal Rainfall  
 (VZ) Seasonal Rainfall  
 (WA) Seasonal Rainfall  
 (WB) Seasonal Rainfall  
 (WC) Seasonal Rainfall  
 (WD) Seasonal Rainfall  
 (WE) Seasonal Rainfall  
 (WF) Seasonal Rainfall  
 (WG) Seasonal Rainfall  
 (WH) Seasonal Rainfall  
 (WI) Seasonal Rainfall  
 (WJ) Seasonal Rainfall  
 (WK) Seasonal Rainfall  
 (WL) Seasonal Rainfall  
 (WM) Seasonal Rainfall  
 (WN) Seasonal Rainfall  
 (WO) Seasonal Rainfall  
 (WP) Seasonal Rainfall  
 (WQ) Seasonal Rainfall  
 (WR) Seasonal Rainfall  
 (WS) Seasonal Rainfall  
 (WT) Seasonal Rainfall  
 (WU) Seasonal Rainfall  
 (WV) Seasonal Rainfall  
 (WW) Seasonal Rainfall  
 (WX) Seasonal Rainfall  
 (WY) Seasonal Rainfall  
 (WZ) Seasonal Rainfall  
 (XA) Seasonal Rainfall  
 (XB) Seasonal Rainfall  
 (XC) Seasonal Rainfall  
 (XD) Seasonal Rainfall  
 (XE) Seasonal Rainfall  
 (XF) Seasonal Rainfall  
 (XG) Seasonal Rainfall  
 (XH) Seasonal Rainfall  
 (XI) Seasonal Rainfall  
 (XJ) Seasonal Rainfall  
 (XK) Seasonal Rainfall  
 (XL) Seasonal Rainfall  
 (XM) Seasonal Rainfall  
 (XN) Seasonal Rainfall  
 (XO) Seasonal Rainfall  
 (XP) Seasonal Rainfall  
 (XQ) Seasonal Rainfall  
 (XR) Seasonal Rainfall  
 (XS) Seasonal Rainfall  
 (XT) Seasonal Rainfall  
 (XU) Seasonal Rainfall  
 (XV) Seasonal Rainfall  
 (XW) Seasonal Rainfall  
 (XX) Seasonal Rainfall  
 (XY) Seasonal Rainfall  
 (XZ) Seasonal Rainfall  
 (YA) Seasonal Rainfall  
 (YB) Seasonal Rainfall  
 (YC) Seasonal Rainfall  
 (YD) Seasonal Rainfall  
 (YE) Seasonal Rainfall  
 (YF) Seasonal Rainfall  
 (YG) Seasonal Rainfall  
 (YH) Seasonal Rainfall  
 (YI) Seasonal Rainfall  
 (YJ) Seasonal Rainfall  
 (YK) Seasonal Rainfall  
 (YL) Seasonal Rainfall  
 (YM) Seasonal Rainfall  
 (YN) Seasonal Rainfall  
 (YO) Seasonal Rainfall  
 (YP) Seasonal Rainfall  
 (YQ) Seasonal Rainfall  
 (YR) Seasonal Rainfall  
 (YS) Seasonal Rainfall  
 (YT) Seasonal Rainfall  
 (YU) Seasonal Rainfall  
 (YV) Seasonal Rainfall  
 (YW) Seasonal Rainfall  
 (YX) Seasonal Rainfall  
 (YY) Seasonal Rainfall  
 (YZ) Seasonal Rainfall  
 (ZA) Seasonal Rainfall  
 (ZB) Seasonal Rainfall  
 (ZC) Seasonal Rainfall  
 (ZD) Seasonal Rainfall  
 (ZE) Seasonal Rainfall  
 (ZF) Seasonal Rainfall  
 (ZG) Seasonal Rainfall  
 (ZH) Seasonal Rainfall  
 (ZI) Seasonal Rainfall  
 (ZJ) Seasonal Rainfall  
 (ZK) Seasonal Rainfall  
 (ZL) Seasonal Rainfall  
 (ZM) Seasonal Rainfall  
 (ZN) Seasonal Rainfall  
 (ZO) Seasonal Rainfall  
 (ZP) Seasonal Rainfall  
 (ZQ) Seasonal Rainfall  
 (ZR) Seasonal Rainfall  
 (ZS) Seasonal Rainfall  
 (ZT) Seasonal Rainfall  
 (ZU) Seasonal Rainfall  
 (ZV) Seasonal Rainfall  
 (ZW) Seasonal Rainfall  
 (ZX) Seasonal Rainfall  
 (ZY) Seasonal Rainfall  
 (ZZ) Seasonal Rainfall

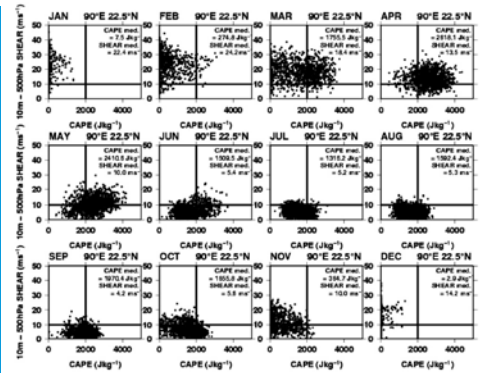
### X帯レーダーはダッカ大学に新設された気象学科に移譲を予定

Department of Meteorology

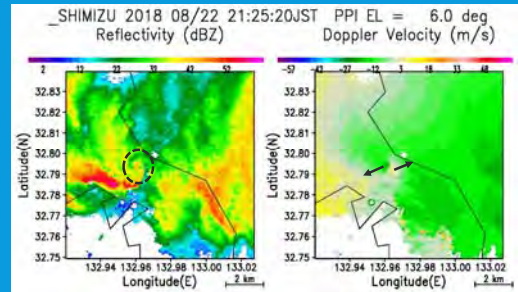
Faculty Members List (Department of Meteorology)

Picture	Name	Designation	Phone
	Dr. Toufique Karim	Professor & Chairman	+880 2 96216021
	Miss Shireen Akter	Lecturer	01 7911907
	Mr. Rubid Akter	Lecturer	01 7480227
	Sakun Dity Shaha	Lecturer	+88018452

バングラデシュ平野の大気安定度と風速シアの季節変化

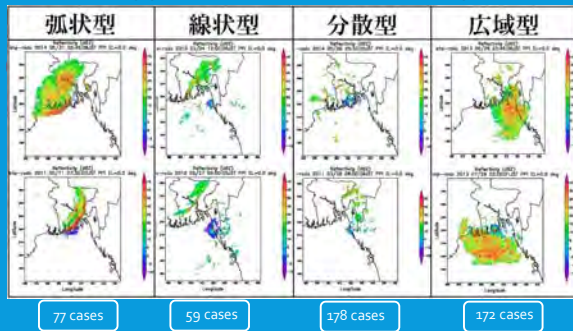


Yamane and Hayashi (2006)



Courtesy to Prof. Sassa, Kochi University

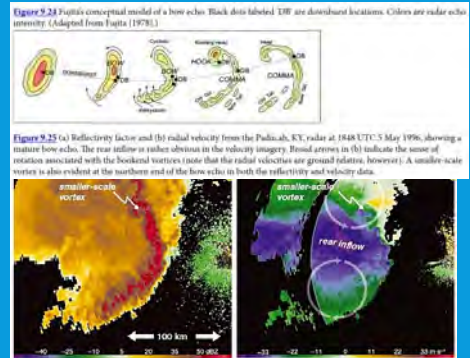
バングラデシュS帯レーダーの解析による降水システムの分類  
(2010-2014年の3-9月のデータを用いた結果 東(2019))



途中で別の型に変化した場合、双方の型としてカウントしている。

BOW ECHOに伴うメソ構造

(Markowski and Richardson 2010)



まとめ

- ・バングラデシュはサイクロン、大雨をもたらす降水システム、シビアストーム等で毎年気象災害が起る地域であり、X帯レーダーによる観測で新しい知見が期待できる地域である。
- ・科研費基盤B(2020-2023年)を用いてバングラデシュで福島大X帯レーダーを用いた観測の実施を検討している。
- ・X帯レーダー観測はまず世界的豪雨地域であるメガラヤ高原の南側で実施し、大雨のメカニズムの解明に用いる。
- ・その後もダッカ大学のレーダーとして気象災害をもたらす様々な降水システムの特徴の理解に用いることを期待している。



## ヴェトナム北部における 時間雨量のGSMaP・地上降水計比較

GSMaP NRT による 今朝 6:00 JST までの時間雨量

野津雅人\*1,

松本淳<sup>1,2</sup>, L. Trinh-Tuan<sup>3</sup>, T. Ngo-Duc<sup>3</sup>, T. Truong-Duc<sup>4</sup>

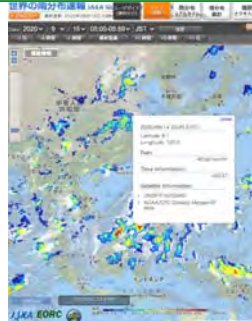
1: 都立大, 2: JAMSTEC, 3: ハノイ科技大,

4: ヴェトナム資源環境省

\*nodzum@triu.ac.jp



本研究は JAXA E02 の支援を受けています



### 発表のアウトライン

- ・ イントロダクション
- ・ 社会的背景と研究の目的
- ・ データと解析手法
- ・ 結果
- ・ 議論: 降水頂高度を変えた解析から
- ・ まとめ

### 発表のアウトライン

- ・ イントロダクション
- ・ 社会的背景と研究の目的
- ・ データと解析手法
- ・ 結果
- ・ 議論: 降水頂高度を変えた解析から
- ・ まとめ

### イントロダクション: 北部ヴェトナムでは大河川の上流で降水を捉えるのは難しい

WORLD NEWS JULY 24, 2018 7:53 PM / 10 MONTHS AGO  
Vietnam flood death toll rises to 27, more rain forecast

Ho Kieu Bridge, Lao Cai, from the blog of Pen-G  
<https://traveljournalist.blogspot.com/2018/07/1248841>

CHINA  
Hanoi  
Ninh Binh  
Song Hong (Red River) basin  
VIETNAM

By Dr. Khunser based on GTOPO30  
Wikipedia: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12063353>

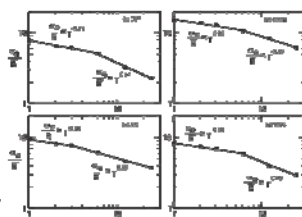
- ・ 山岳域内の河川上流で地上観測 (降水計・レーダ) のみで降水分布を捉えるのは困難
- ・ 洪水予報、治水計画に役立つように、地上降水計・レーダ・GPMをはじめとした衛星観測を組み合わせて作られた GSMaP を組み合わせて、降水分布をよりよく捉えたい

### 背景

- ・ Flash flood と呼ばれるタイプの洪水 (降水後 6 時間以内に発生する洪水, Hapuaracchi et al. 2011) は人命に関わる災害
- ・ 地上レーダーで山岳域の降水補足は困難 (Germann et al. 2006)
- ・ 発展途上国では地上レーダーは未整備: 衛星観測による降水推定が有用 (Kuligowski et al. 2013)

- ・ 衛星観測による降水推定は、降水積算時間が長いほど誤差が小さいことが知られている (Zeweldi & Gebremichael 2009)

- ・ 地上雨量計観測で弱雨時は過大評価, 強雨時で過小評価 (TRMM 3B42, Scheel et al. 2011)



CMORPH の降水積算時間別の RMSE (Zeweldi & Gebremichael 2009)

### 目的

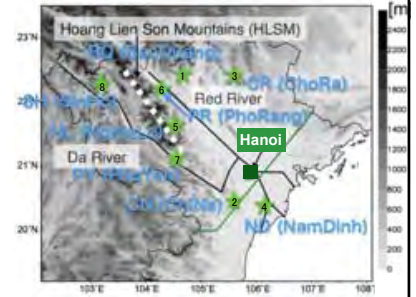
- ・ 衛星観測に基づく降水量データセットである GSMaP の日スケール以下でのパフォーマンスを調べる
- ・ 明らかにしたいこと:
  - ・ 雨量積算時間をどれくらい長くすれば使えるのか?
  - ・ 積算時間によって誤差やバイアスはどれくらいの値か?

## 発表のアウトライン

- ・ イントロダクション
- ・ 社会的背景と研究の目的
- ・ データと解析手法
- ・ 結果
- ・ 議論: 降水頂高度を変えた解析から
- ・ まとめ

## 解析対象とデータ

- ・ 解析対象
- ・ 2010と2014年
- ・ 4-10月(雨季)
- ・ 各年最大7地点
- ・ 時間降水観測データ(雨量計 by ヴェトナム水文気象局)
- ・ 衛星観測降水量データ GSMaP (e.g. Kubota et al. 2020)



- ・ 2010年: RNL version 6 (RNLv6), NRTv6
- ・ 2014年: MVKv7, MVKv6, NRTv6

MVK: 標準プロダクト [3日後], RNL: 再解析(準標準)プロダクト [事後]  
NRT: 準(Near)リアルタイム(Real-Time)プロダクト [3-4時間後]

## データと比較に用いる指標

- ・ 時間降水観測データ(雨量計 by ヴェトナム水文気象局)
- ・ 衛星観測降水量データ GSMaP (Kubota et al. 2020; Aonashi et al. 2009, Ushio et al. 2009)
  - ・ 2010年: RNL version 6 (RNLv6), NRTv6
  - ・ 2014年: MVKv7, MVKv6, NRTv6
  - ・ MVK: 標準プロダクト, RNL: 再解析(準標準)プロダクト, NRT: 準(Near)リアルタイム(Real-Time)プロダクト
- ・ TRMM 2A25 降水量鉛直分布データ(議論で)

### 用いる指標

降水の GSMaP/地上雨量計比 (RG)

$$RG = \frac{R_{GSMaP}}{R_{Gauge}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{GSMaP,i} - R_{Gauge,i})^2}$$

RMSE (RMSDifference): これも規格化する

		地上雨量計での		合計
		観測あり	観測なし	
GSMaP での	観測あり	的中 (FO)	空振り (FX)	FO+FX
	観測なし	見逃し (XO)	的中 (XX)	
合計		FO+XO		

POD (補足率) = FO / (FO+XO)  
FAR (空振り率) = FX / (FO+FX)

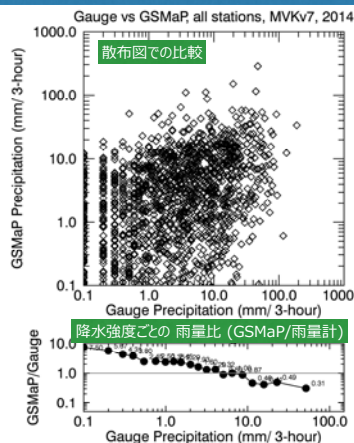
## 発表のアウトライン

- ・ イントロダクション
- ・ 社会的背景と研究の目的
- ・ データと解析手法
- ・ 結果
- ・ 議論: 降水頂高度を変えた解析から
- ・ まとめ

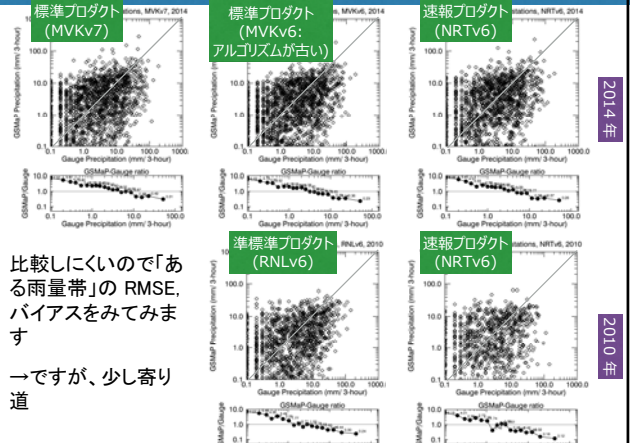
## 3時間降水量: GSMaP 標準プロダクト MVKv7 vs 雨量計観測

### GSMaP:

- ・ 強降水量領域では比較的よく再現
- ・ 弱降水量領域では再現性悪い: 過大例多数
- ・ 全体として
  - ・ 強降水量 → 過小見積
  - ・ 弱降水量 → 過大見積

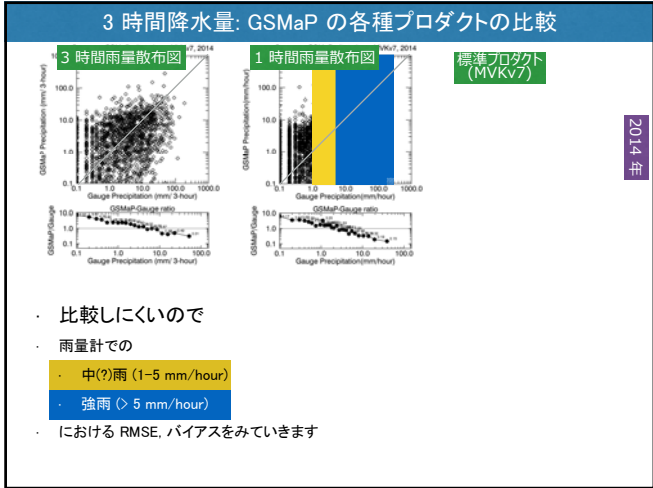
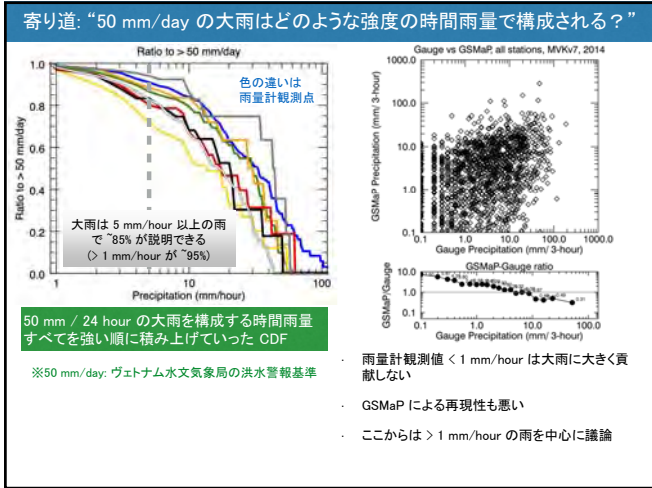


## 3時間降水量: GSMaP の各種プロダクトの比較

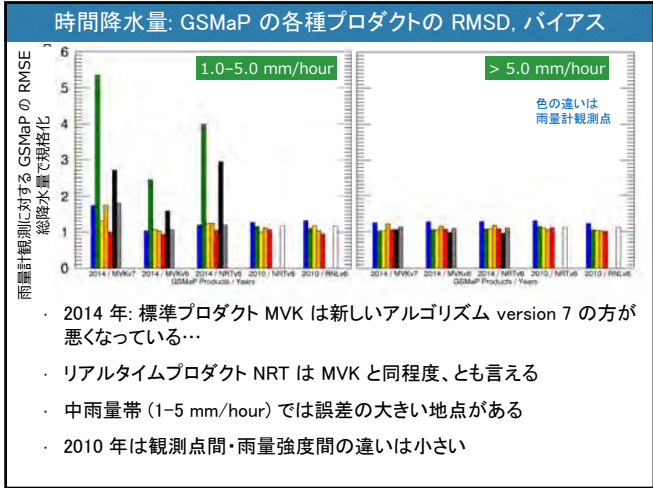
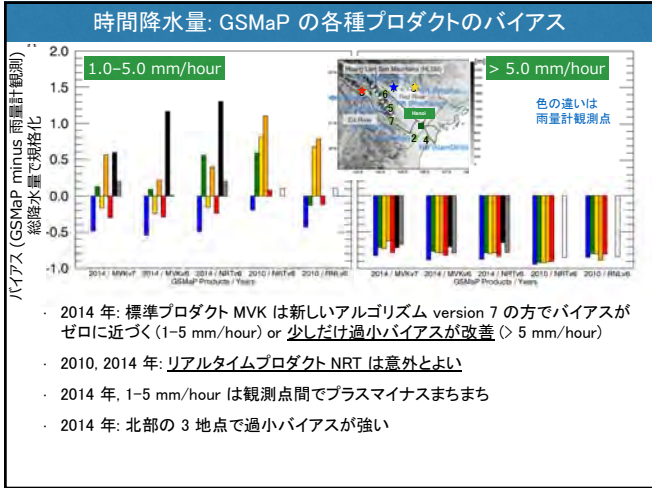


比較しにくいので「ある雨量帯」の RMSE, バイアスをみてみます

→ですが、少し寄り道



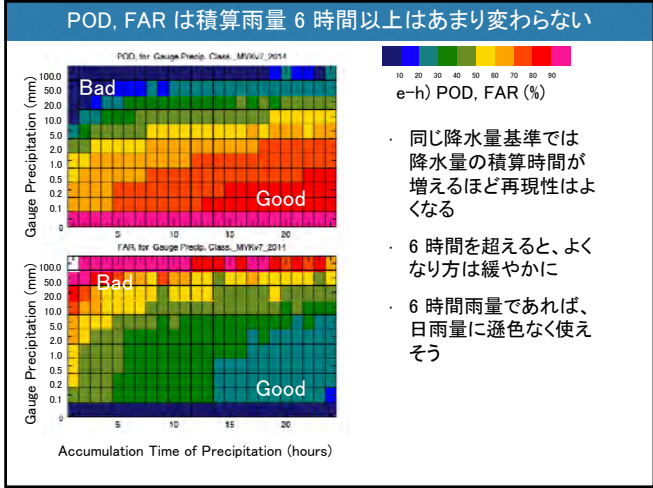
2014年



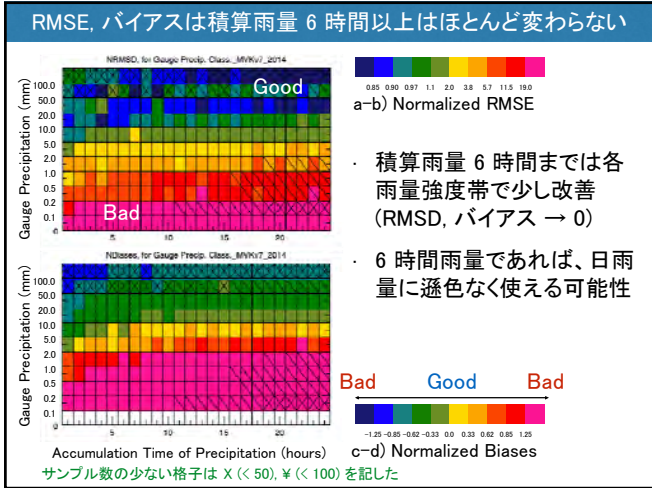
### GSMaP のパフォーマンスを

- 縦軸: 雨量強度
- 横軸: 雨量の積算時間

で見るとどうなるか？

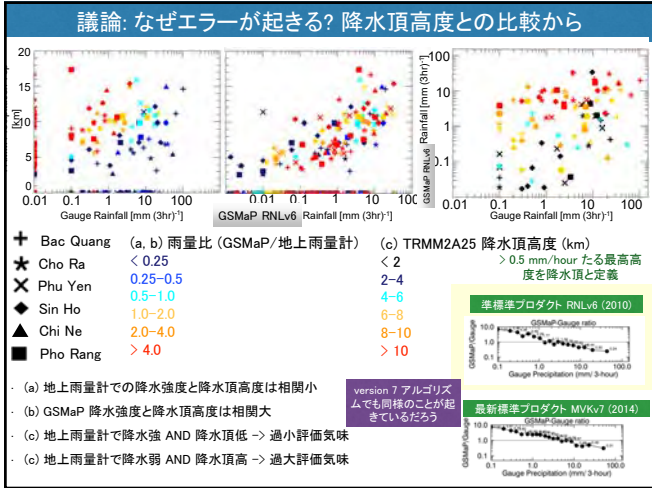






### 議論: なぜエラーが起きる? 降水頂高度との比較から

- 誤差をもたらすもの:
  - 降水頂の高さ、例えば warm rain (Shige et al. 2013)
  - 間接的には
    - 大気安定度による降水粒子の鉛直分布の違い (Shige & Kummerow 2016)
    - 風向 (Nodzu et al. 2019; Trinh-Tuan et al. 2019)



### 発表のアウトライン

- イントロダクション
- 社会的背景と研究の目的
- データと解析手法
- 結果
- 議論: 降水頂高度を交えた解析から
- まとめ

### まとめ

- 日スケール以下の降水量の比較を行った: 衛星観測をもとにした降水量データセット GSMaP vs 地上雨量計観測
- 強雨の過小バイアスが最新アルゴリズム (v7) で改善
  - ただし誤差が大きくなっている
- 準リアルタイムプロダクト (NRTv6) は標準プロダクト (MVKx) に近い再現性
- 6 時間以上積算した雨量: 日雨量と同程度のパフォーマンス
- 今後 (洪水予報に使うために):
  - 大気安定度・風向を考慮した修正メソッドの構築
  - 河川流域面積スケールでの再現性評価・誤差を調べる

### References

Germann, U., G. Galli, M. Bosacci, and M. Bolliger. 2006. Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 1669-1692.

Hapuarachchi, H. A. P., Q. J. Wang, and T. C. Pagano. 2011. A review of advances in flash flood forecasting. *Hydro. Processes*, **25**, 2771-2784. doi:https://doi.org/10.1002/hyp.8040.

Kubota, T., K. Aonashi, T. Ushio, S. Shige, Y. N. Takayabu, M. Kachi, Y. Arai, T. Tashima, T. Masaki, N. Kawamoto, T. Mega, M. K. Yamamoto, A. Hamada, M. Yamaji, G. Liu and R. Oki. 2020. Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Products in the GPM Era. In: Levizzani V., Kidd C., Kirschbaum D., Kummerow C., Nakamura K., Turk F. (eds) *Satellite Precipitation Measurement. Advances in Global Change Research*, vol **67**, Springer, Cham.

Kulligowski, R. J., Y. Li, and Y. Zhang. 2013. Impact of TRMM data on a low-latency, high-resolution precipitation algorithm for flash-flood forecasting. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 1379-1393. doi:https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0107.1.

Nodzu, M. I., J. Matsumoto, L. Trinh-Tuan, and T. Ngo-Duc. 2019. Precipitation estimation performance by Global Satellite Mapping and its dependence on wind over northern Vietnam. *Prog. Earth Planet Sci.* **6**, 58. doi:10.1186/s40645-019-0296-8.

Scheel, M. L. M., M. Rohrer, Ch. Huggel, D. Santos Villar, E. Silvestre, and G. J. Huffman. 2011. Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydro. Earth Syst. Sci.*, **15**, 2649-2663. doi:https://doi.org/10.5194/hess-15-2649-2011.

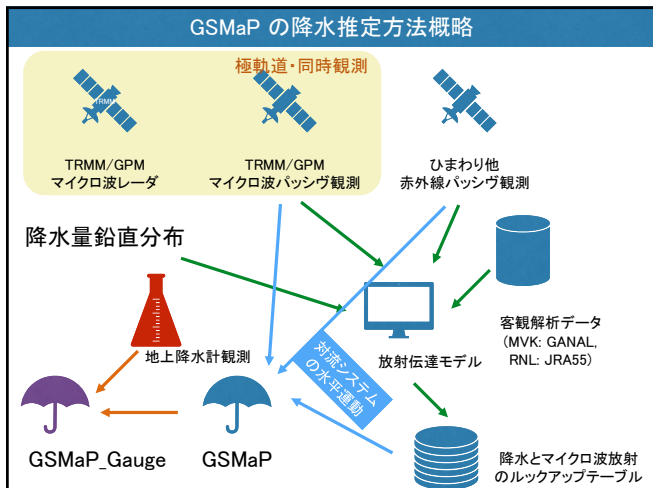
Shige, S., S. Kida, H. Ashiwake, T. Kubota, and K. Aonashi. 2013. Improvement of TMI rain retrievals in mountainous areas. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 242-254. doi:10.1175/jamc-d-12-074.1.

Shige, S., C. D. Kummerow. 2016. Precipitation-top heights of heavy orographic rainfall in the Asian monsoon region. *J. Atmos. Sci.* **73**, 3009-3024. doi.org/10.1175/JAS-D-15-0271.1.

Trinh-Tuan, L., J. Matsumoto, T. Ngo-Duc, M. I. Nodzu, and T. Inoue. 2019. Evaluation of satellite precipitation products over central Vietnam. *Prog. Earth Planet Sci.* **6**, 54. doi:10.1186/s40645-019-0297-7.

Yamamoto M. K., S. Shige, C.-K. Yu, and L.-W. Cheng. 2017. Further improvement of the heavy orographic rainfall retrievals in the GSMaP algorithm for microwave radiometers. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **56**, 2607-2619.

Zeweldi, D. A., and M. Gebremichael. 2009. Evaluation of CMORPH precipitation products at fine space-time scales. *J. Hydrometeorol.*, **10**, 300-307.



- ### GSMaP のプロダクトの種類 (抜粋)
- ・ NOW: リアルタイムプロダクト [latency ~ 30 min.]
  - ・ NRT: 準リアルタイムプロダクト [3-4 hours]
  - ・ MVK: 標準プロダクト [3 days]
  - ・ RNL: 準標準プロダクト: 新しいアルゴリズムで古いデータを再解析したもの
  - ・ \_Gauge: 地上雨量計観測による補正
  - ・ \_RIKEN: 理研三好グループのモデルとの統合プロダクト
  - ・ ほか色々

- ### GSMaP version 7 update
- ・ 降水物理モデルに用いた衛星レーダ
    - ・ TRMM/PR + GPM/ DPR
  - ・ 海水補助データ
    - ・ AMSR-E 気候値 -> NESDIS
  - ・ 地表積雪補助データの追加 (NESDIS)
  - ・ マイクロ波イメージャによる陸の判定
    - ・ Seto et al. (2008) -> Seto et al. (2016) に改訂
  - ・ マイクロ波イメージャ (MI) による海の判定
    - ・ Kida et al. (09', 10') + Aonashi et al. (16')
  - ・ 山岳性降水の判定
    - ・ Yamamoto & Shige (15') TMI (実行版はエラーあり) -> Yamamoto et al. (17') 全センサ
  - ・ GPMII (GMI)/SSMIS による降雪推定の追加
  - ・ (\_Gauge のみ) 雨量計観測点数による補正の追加

- ### まとめ
- ・ 日スケール以下の降水量の比較を行った: 衛星観測をもとにした降水量データセット GSMaP vs 地上雨量計観測
  - ・ 強雨の過小バイアスが最新アルゴリズム (v7) で改善
    - ・ ただし誤差が大きくなっている
  - ・ 準リアルタイムプロダクト (NRTv6) は標準プロダクト (MVKx) に近い再現性
  - ・ 6 時間以上積算した雨量: 日雨量と同程度のパフォーマンス
  - ・ GSMaP の過大・過小は降水頂の高低が影響 (RNLv6: 前世代アルゴリズムの準標準プロダクトで: 最新版でもなお影響残る可能性)

- ### 今後
- ・ GSMaP 降水量の降水頂高度への過度の依存性
  - ・ 「低く強い地形性の warm rain への対応」境界層の水蒸気フラックスと地形との関係からの修正メソッドは version 7 アルゴリズムで導入 (Yamamoto et al. 2017)
  - ・ 降水頂低・弱い雨の過大評価の修正はまだ
  - ・ 間接的には大気安定度 (Shige & Kummerow 2016)、風向 (Trinh-Tuan et al. 2019; Nodzu et al. 2019) による降水粒子の鉛直分布の違いにも GSMaP 再現性は関係
  - ・ 洪水予報に使うために:
    - ・ 大気安定度・風向を考慮した修正メソッドの構築
    - ・ 河川流域面積スケールでの再現性評価・誤差を調べる

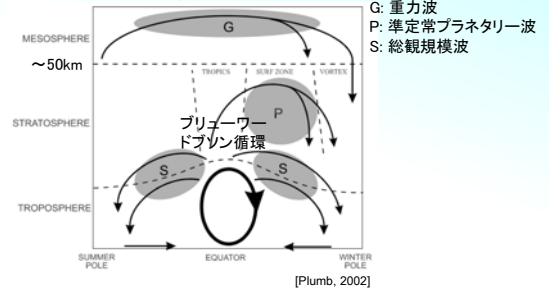


# 北半球冬季中層大気における 移動性プラネタリー波

岩尾航希 (熊本高専), 廣岡俊彦 (九大院理)

## 1. はじめに

### 中層大気の子午面循環



## 移動性プラネタリー波の最近の研究

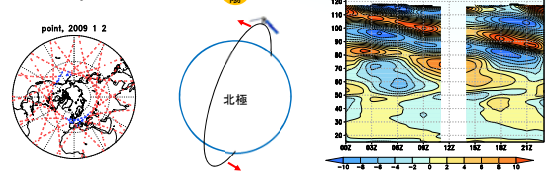
- 成層圏突然昇温 (SSW) 関連では…
- Tomikawa et. al. [2012] 高解像度GCMでSSWシミュレーション  
→SSW後の東風領域で**移動性のプラネタリー波が生成**  
→西風加速 (SSWの回復)
- Iida et. al. [2014] 2009年1月SSWの衛星データ解析  
→SSWが下部中間圏で**生成された移動性のプラネタリー波**  
により中間圏から始まった  
順圧/傾圧不安定により生成

目的:  
移動性プラネタリー波の平均的な特徴?  
平均場, 準定常プラネタリー波との関係?

## 2. データと解析手法

### TIMED/SABER (Version 2.0)

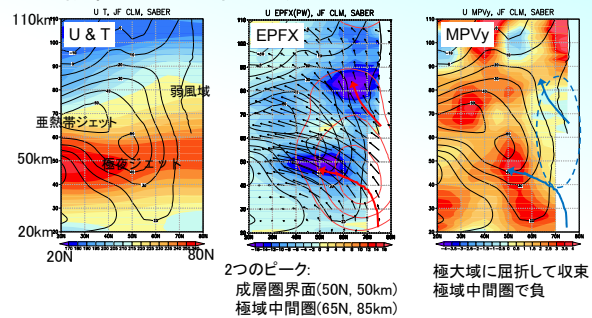
- Jan2002–Dec2018, **15–120km** ・60日で24時間をカバー
- 1日15軌道 →日々の変化に日変化が混在
- 温度とジオポテンシャルハイト →各格子点で平均的な日変化を作成  
→日平均のグリッドデータ →観測データから日変化成分を引く  
(x24°, y5°, z1km)

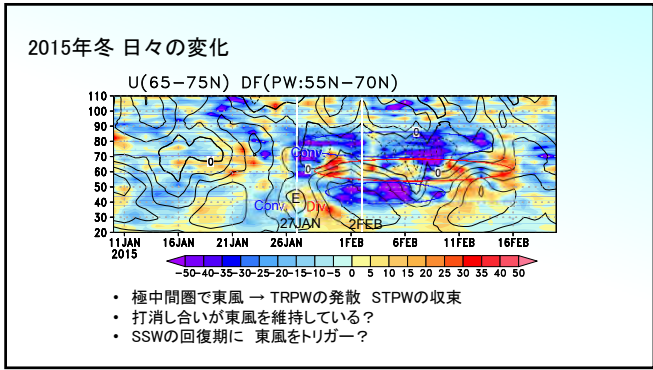
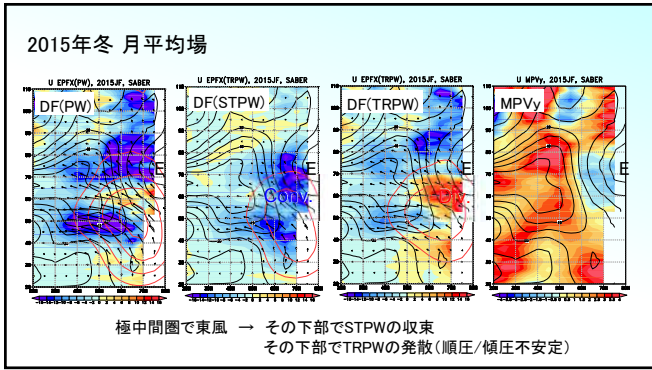
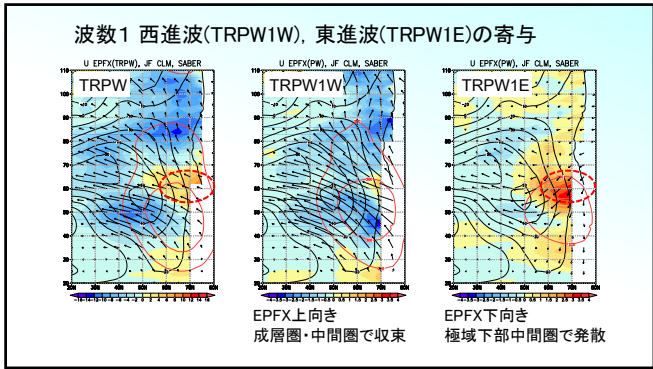
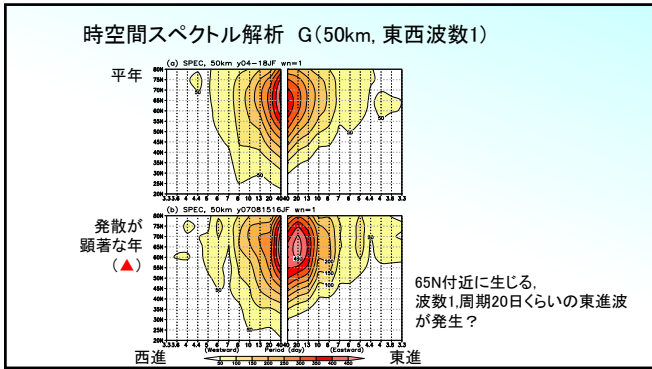
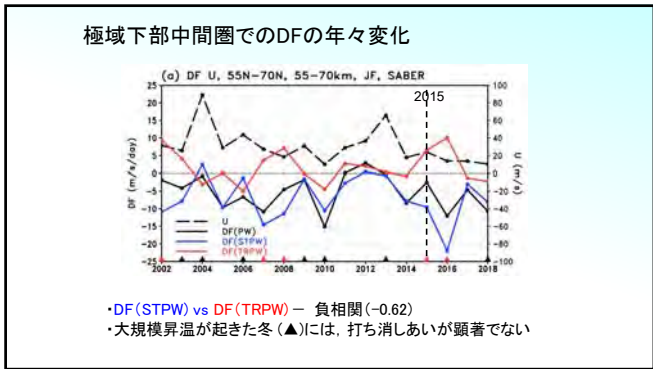
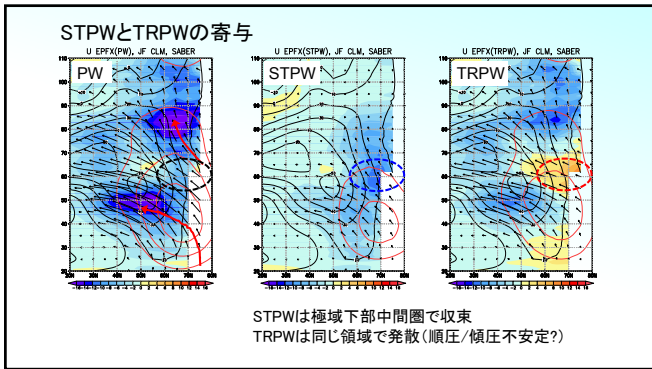


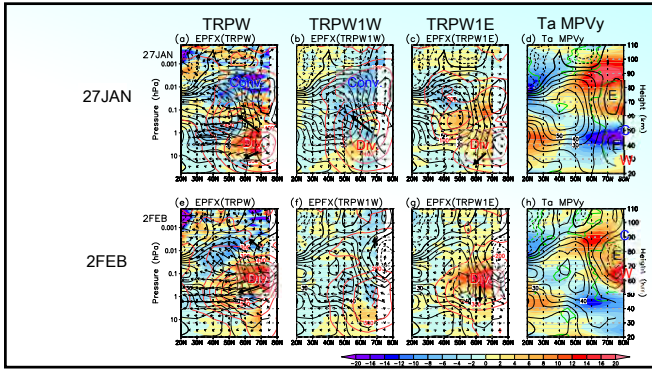
## 定義と方程式

- プラネタリー波 (PW): 東西波数  $s \leq 3$
- 定常的プラネタリー波 (STPW): 1か月平均 (Jan16 - Feb15)
- 移動性プラネタリー波 (TRPW): 定常波からの偏差
- 東西平均東西風:  $\bar{u} = -M + \sqrt{M^2 + 2M\bar{u}_g}$  ( $M = a\Omega \cos \phi$ )
- EP flux (EPFX):  $F = \rho_0 a \cos \phi \left( 0, -\bar{u}'v', f_0 \bar{v}'\theta' / \frac{\partial \theta_0}{\partial z} \right)$   
(図中では  $\rho_0^{-1} F$ )
- EP flux divergence (DF):  $\rho_0^{-1} \nabla \cdot F$  (正: 西風加速, 負: 東風加速)
- Modified potential vorticity  $MPV = -g(f + \zeta) \frac{\partial \theta}{\partial p} \times \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{-9/2}$
- d(MPV)/dy: 極大 → wave guide  
(MPVy) 負 → 順圧/傾圧不安定の必要条件

## 3. 結果 北半球冬季気候場 (16JAN–15FEB)







**まとめ**

衛星データ(SABER)を使って、冬季北半球の移動性プラネタリー波を調べた

- 極域下部中間圏で、STPWとTRPWのForcingが打ち消しあうメカニズムがある  
中間圏で東風 → 下層から伝播したSTPWが消失して東風加速  
順圧/傾圧不安定によりTRPWが発達し西風加速
- 2015年の解析から次のことが分かった

# 2019/2020年北半球冬季における 極渦発達の力学過程について

松山裕矢\*1, 廣岡俊彦\*1, 向川均\*2  
1:九大院理, 2:京大院理

## <目次>

はじめに  
解析手法

結果

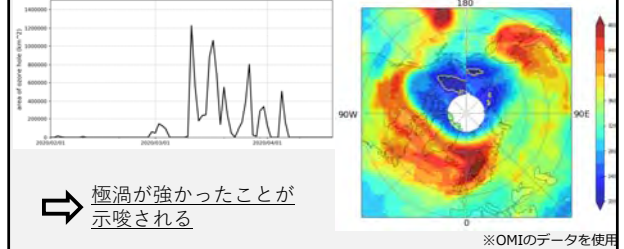
- 極渦の強度の統計評価
- 極渦強化 + 継続の力学過程の理由
  - ✓ 成層圏への波の進入
  - ✓ 成層圏内での波の発生

まとめ

## はじめに

2019/2020年冬季では...  
オゾンホール(オゾン全量220DU以下)が形成

2020年のオゾンホール面積の日変化 2020/03/12の北半球のオゾン全量



⇒ 極渦が強かったことが  
示唆される

※OMIのデータを使用

## 目的

- 極渦の強度の統計評価
- 極渦発達 + 継続の力学過程の理由

9/15 九州大学 松山裕矢

## 解析手法

使用データ：MERRA2再解析データ(日平均)

解析期間：1981年-2020年(統計解析に使用)

極渦の強度の評価の方法：

30hPa面において

- $\bar{U}$ の60N-80N平均
- $\sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2}$ の60N-80N平均
- $HGT(40N) - HGT(70N)$  ← 本発表で使用
- 北半球でのHGTの最小値

L. Smith and J. McDonald, 2013

$$M(x_0, y_0, t_0) = \int_{t_0}^{t_1} dt \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2}$$

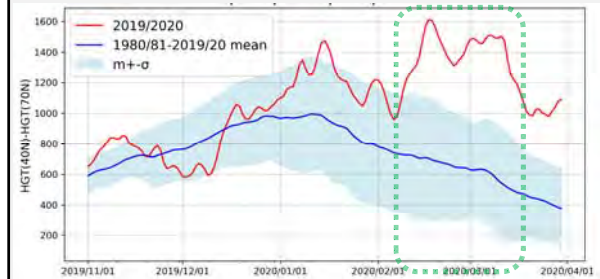
M. Wallace and F.-C. Chang, 1982

C1: the difference between the zonally averaged 30 mb geopotential height on the 40°N and 70°N latitude circles, and the minimum 30 mb height anywhere in the hemisphere, based upon the 10 day or monthly mean map for the period in question.

9/15 九州大学 松山裕矢

## 今年の極渦の強度の統計評価

極渦強度：HGT(40N) - HGT(70N)

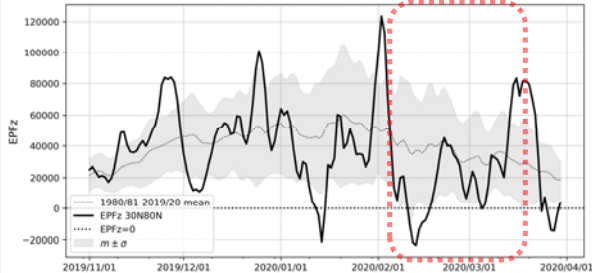


2~3月は例年より  
極渦が強い状態が継続している

9/15 九州大学 松山裕矢

## 極渦発達 + 継続の理由：成層圏への波の進入

EPFz 30N80N at 100hPa



波活動があまり活発ではない

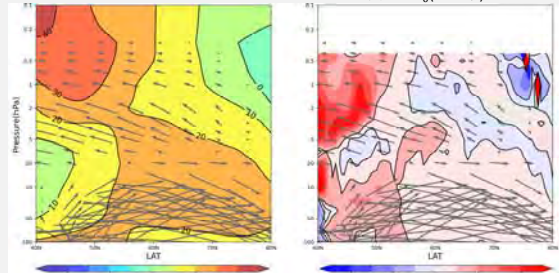
9/15 九州大学 松山裕矢

## 極渦発達 + 継続の理由：成層圏への波の進入

2020/02/06：極渦の強くなり始めのベクトル：EPF

陰影：U

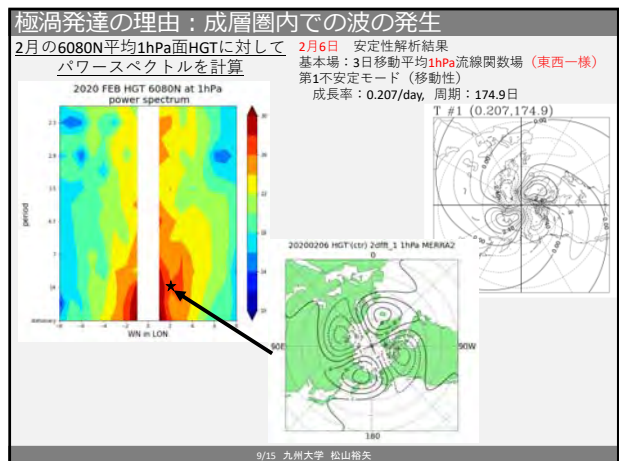
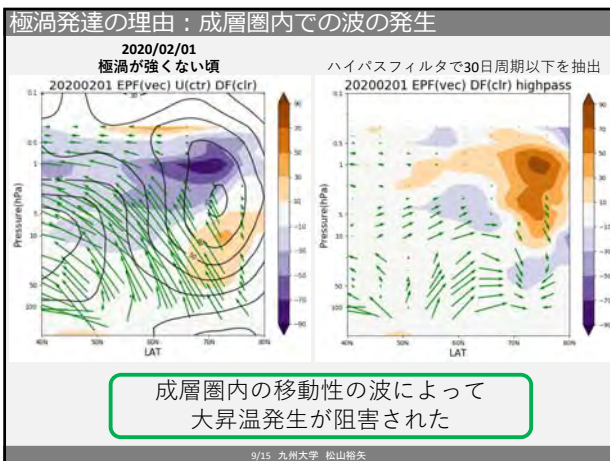
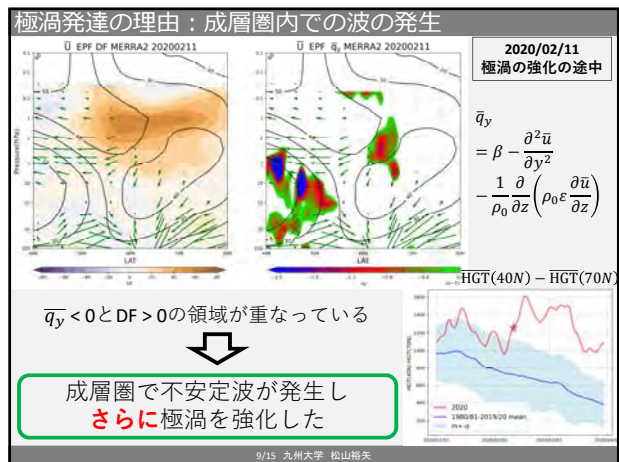
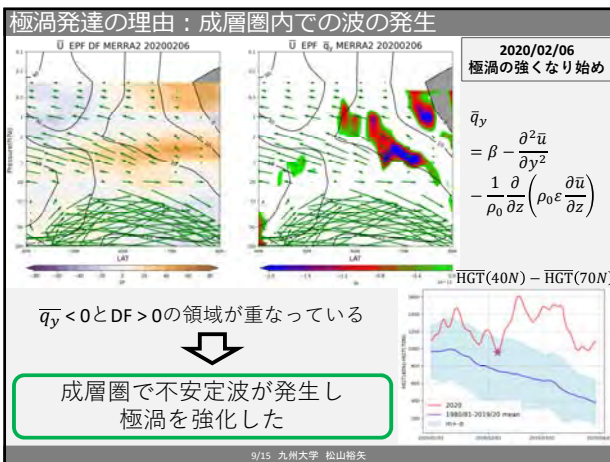
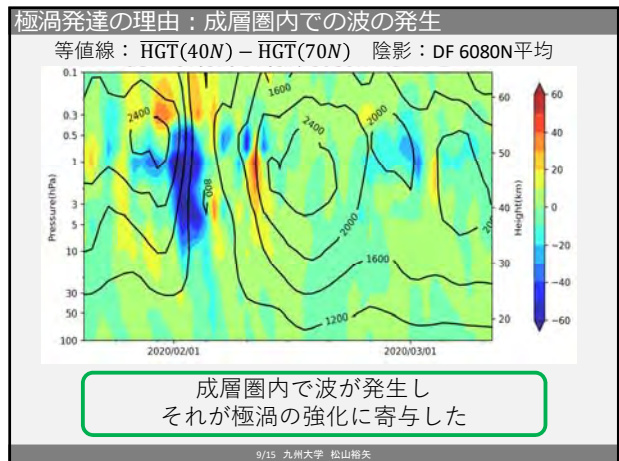
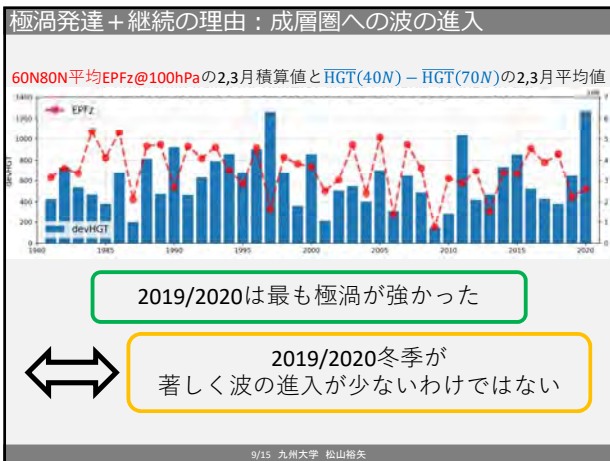
陰影： $n_0$ (屈折率)



下部・中部成層圏で波の伝播が屈折し  
成層圏へ波が進入しにくかった

9/15 九州大学 松山裕矢







## まとめ

極渦の強度の統計評価：2~3月では解析期間で最も強い

極渦発達 + 継続の力学過程の理由：

### <成層圏への波の進入>

本冬季のEPFz@100hPaは小さかった。

- ✓ 強い極渦が維持されたのは説明できる。
- ✓ 極渦が強化されたことは説明しきれない。

### <成層圏内での波の発生>

- 上部成層圏で不安定波が発生し、二段階で極渦を強化した。
- 極渦が強化される前に強い上方伝播が存在したが、**大昇温の発生を移動性の波が阻害した。**
- 順圧モデルによって算出された不安定モードと似ている波成分が、スペクトル解析を行った結果、再解析データの中にも存在した。

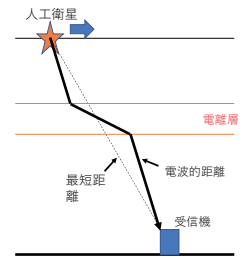
# 衛星 = 地上の電離圏全電子数 観測手法の開発状況

山本衛  
京大大学生存圏研究所

1. 衛星ビーコン観測について  
低軌道衛星、VHF-UHFの2周波ビーコン、無変調波、ソフトウェア無線
2. GNSS-TEC観測について  
GPS/Glonas等の測位衛星、GHz帯の2周波信号、変調波、IC化受信機

## TEC観測方法

- TEC(Total Electron Content) : 全電子数
- 電離層ではプラズマ密度に比例して電波が屈折・遅延
- 衛星からの異なる2周波数のビーコン波の位相のずれからTECを求める



## 観測原理

距離 $L$ を伝搬する周波数 $f$ の電波の位相 $\phi$ は  
( $c$ :光速,  $N$ :電子密度,  $A$ :定数)

$$\phi = \frac{2\pi f L}{c} - \frac{\pi A}{c f} \int_0^L N(x) dx$$

2周波数 $f_1, f_2$ を用いて $L$ を消去する

$$\frac{\phi_1}{f_1} - \frac{\phi_2}{f_2} = \frac{\pi A}{c} \left( \frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) \int_0^L N(x) dx$$

2つの電波の位相差からTECが求められる

※ただし観測されるTECは相対値であって、バイアスが含まれる。  
追加のデータ解析によってバイアス決定する必要がある

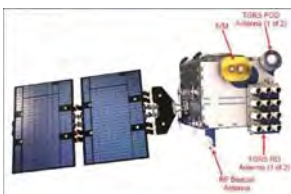
3

## New beacon signal from TBEx and COSMIC-2

Project Name	Units	Inclination	Beacon frequency	Note
FORMOSAT-7/ COSMIC-2 (USA, Taiwan)	6	24°	383 MHz 400 MHz 965 MHz 2200 MHz	383 MHz modulated Others are CW.
TBEx (USA)	2	28.5°	150 MHz 400 MHz 1067 MHz	Launch with COSMIC-2.

- Satellites for 150/400MHz beacon are getting old. C/NOFS stopped.
- COSMIC-2 and TBEx will be launched by the same rocket in 2019. They fly in the low-latitude region with triple-band beacon TXs.
- We develop GRBR2 system that covers 150/400/965/1067MHz signals for these satellites.

## COSMIC-2衛星



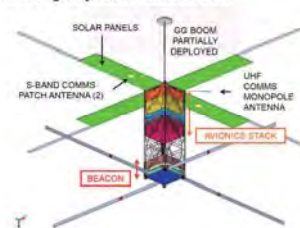
- 主な目的：GPS 掩蔽観測
- 機数：6機
- 軌道傾斜角：24°
- ビーコン周波数  
383MHz(変調波)  
401MHz  
965MHz  
2200MHz

2019年6月に打ち上げられた。2019年9月初旬から  
ビーコン波の送信開始→ほぼ1年間の観測を実施してきた。

5

## TBEx衛星

TBEx Flight Systems – External View

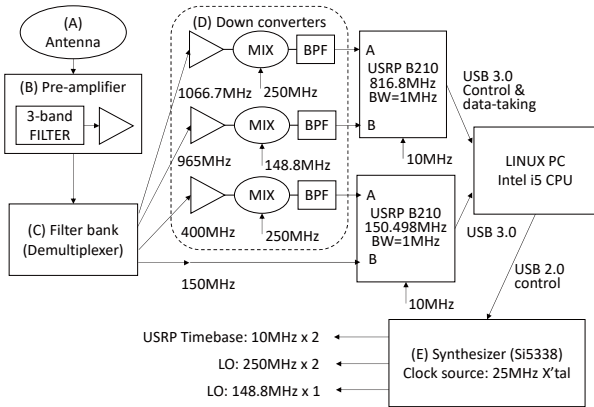


- 主な目的：電離圏観測
- 機数：2機
- 軌道傾斜角：28.5°
- ビーコン周波数  
150MHz  
400MHz  
1067MHz

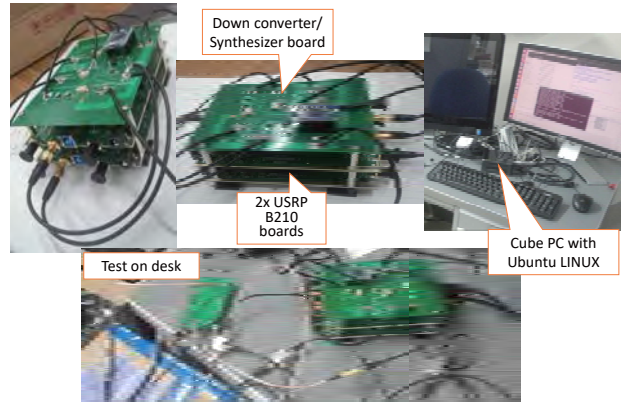
2019年6月に打ち上げ (COSMIC-2と同時)  
2020年5月に実験的なビーコン波の送信が行われた。  
→TEC値の測定に成功した。運用は限定的。

6

GRBR2 block diagram



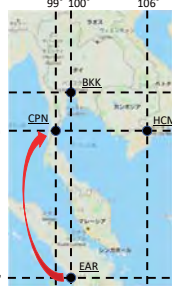
GRBR2 in house equipment



衛星と受信機の配備

人工衛星

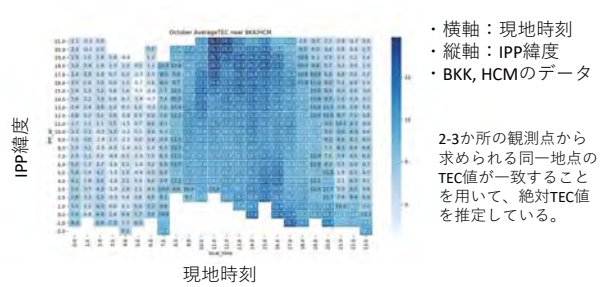
- 2019年6月25日06:30UT：ロケット打上げ（COSMIC-2/TBExが衛星軌道に配備）
- 9月6日：COSMIC-2ビーコン波送信開始（TBExは2020年5月から限定運用）



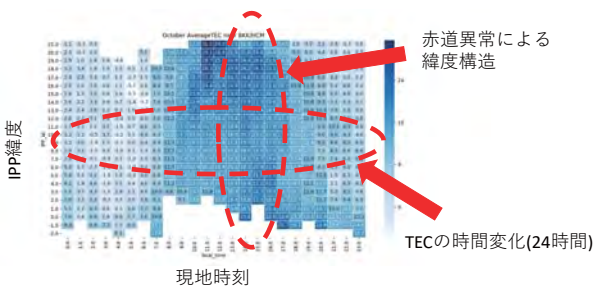
GRBR2受信機の配備

- ~11月：BKK（タイ・バンコク）  
HCM（ベトナム・ホーチミン）  
EAR（インドネシア・コタバン）
- 11月～：BKK  
HCM  
CPN（タイ・チュンボン）

10月平均TEC分布  
(データ量：全398衛星パス)

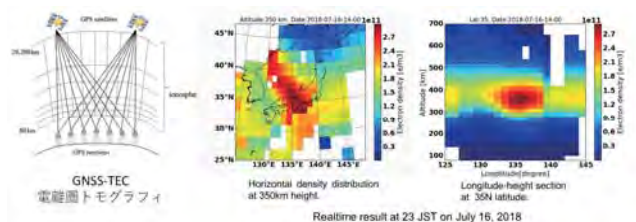


10月平均TEC分布  
(データ量：全398衛星パス)



新GNSS受信機による電離圏全電子数観測の開発  
(と電離圏トモグラフィへの応用)

- 全球航行衛星システム(Global Navigation Satellite System; GNSS)  
米国 = GPS、ロシア = GLONAS、EU諸国 = Galileo、中国 = BeiDouなど
- 周波数の違う2つの電波を利用して電離圏中の電波伝搬に伴う測位ずれを補正する機能を有している→TEC観測が可能。
- 非常に安価な2周波GNSS受信ボードが市販され始めた→新しいTEC観測システムを開発中であり、電離圏トモグラフィに利用していきたい。



## 2周波GNSS受信モジュール

### ZED-F9P

u-blox F9高精度GNSSモジュール

- 最新のセンサデータと高精度の補正データをリアルタイムで送信
- GPS, QZSS, GLONASS, Galileo, BeiDouの同時受信
- 高精度な位置情報と高精度な時刻情報 (10ナノ秒 RTK)
- 最新のアプリケーションに最適化されたソフトウェア
- 高精度な位置情報と高精度な時刻情報 (10ナノ秒) の同時送信
- RTK F9Pは心臓に搭載したことで高精度な位置情報も提供

TALLYSMAN®



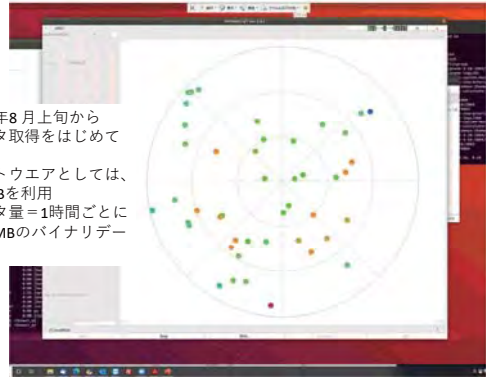
VP6335 VeraPhase® Triple Band GNSS Antenna

Model	VP6335
Frequency	1575.42 MHz
Power	100 mW
Dimensions	40 x 40 x 15 mm
Weight	1.5 g
Material	Aluminum
RoHS	Compliant

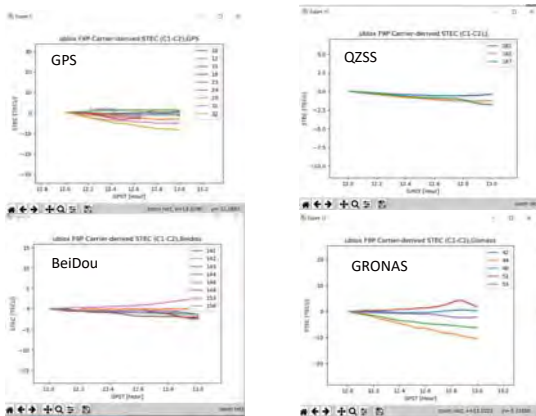


• 解説書が発売されている  
• 農家の利用が結構多い

## F9Pで観測されたGNSS衛星分布



## F9Pで観測された相対TEC値





## Study of the ionospheric scintillation and plasma bubble structure by using EAR and multi-constellation and multi-frequency (MC/MF) GNSS receiver

<sup>1,2</sup>Acharaporn Bumrungrit, <sup>1\*</sup>Susumu Saito, and <sup>2</sup>Pornchai Supnithi  
 Electronic Navigation Research Institute, National Institute of  
 Maritime, Port, and Aviation Technology, Japan  
<sup>2</sup>King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

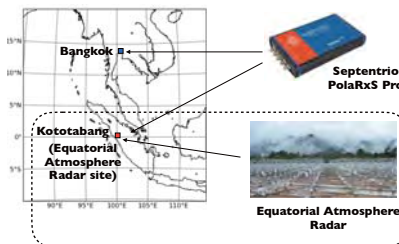
## Background

- \* GNSS is now widely used in many applications including air navigation
- \* Multi-constellation and multi-frequency (MC/MF) will be available for air navigation in the near future, in addition to GPS L1 and GLONASS L1 signals
  - Ionospheric delay effect (TEC effect) can be eliminated.
  - Satellite signal loss by scintillation still remains.
- \* Scintillation effect on GNSS has been studied mainly for the GPS L1 C/A signal, but not for "new" signals
- \* Probability of satellite signal loss by scintillation is important to evaluate MC/MF GNSS performance

## Objectives

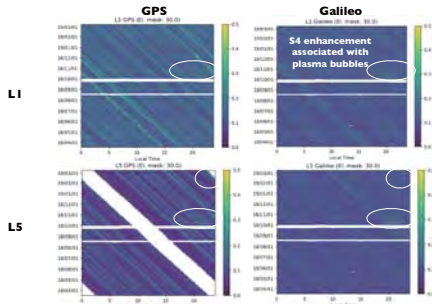
- \* Characteristics of scintillations for different constellations and different frequencies
  - Frequency dependence
  - Constellation/signal dependence
- \* Characteristics of scintillation occurrence
  - Number of satellites impacted at the same time
  - Relationship with plasma bubble structure

## Data: GNSS scintillation

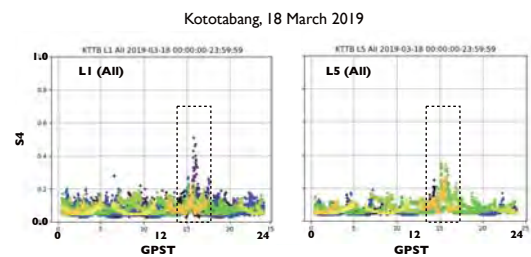


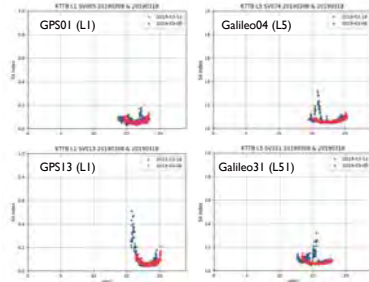
- \* Receiver
  - Septentrio PolaRxS Pro
- \* Antenna
  - NovAtel GPS-703GGG
- \* Tracked signals
  - GPS L1 C/A, L2, L5
  - GLONASS L1, L2, L3
  - Galileo E1, E5a, E5b,
  - SBAS L1, L5
  - QZSS L1, L2, L5
  - (Beidou: option not purchased)
- \* Outputs
  - Raw data (code pseudorange, carrier phase, carrier-to-noise ratio etc.)
  - Scintillation indices ( $S_4$ ,  $\sigma_\phi$ )

## General characteristics



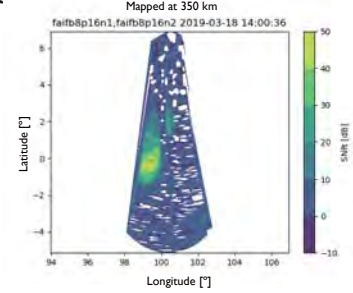
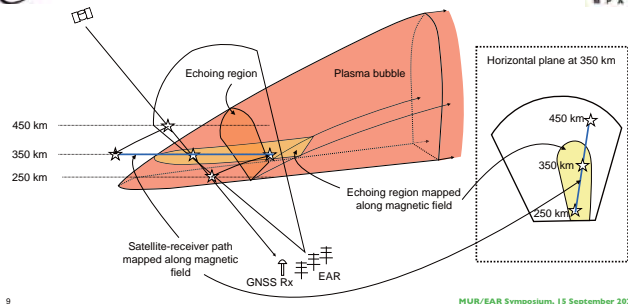
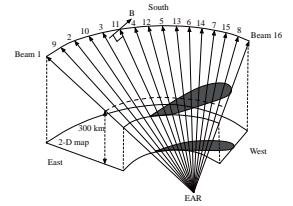
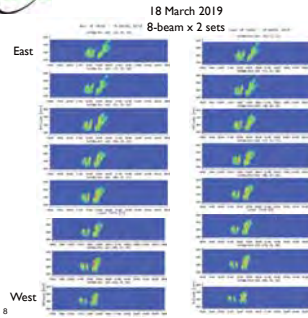
## Scintillation: example



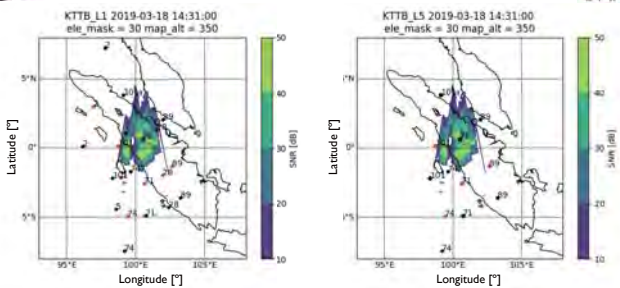


•18 March 2019  
 •08 March 2019 (quiet day)

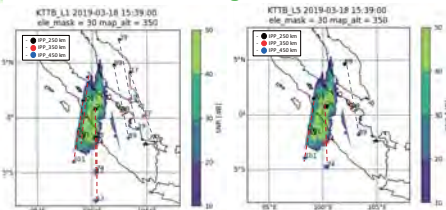
	GPS	Galileo
<b>LI</b>	2, 5, 6, 13, 19, 28	1, 4, 19, 31
<b>L5</b>	6	1, 4, 19, 31



- \* 3 clusters of echoes (plasma bubbles) propagate from west to east
- \* All echo clusters came into the FOV of EAR from western edge at
  - 1st: 13:45 UT
  - 2nd: 14:20 UT
  - 3rd: 15:00 UT

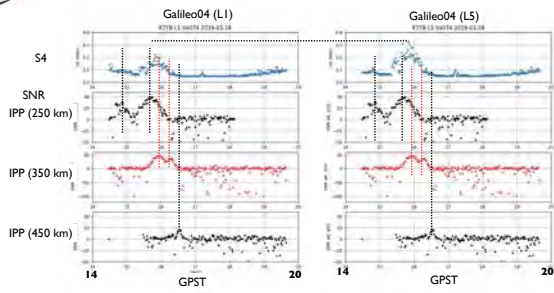


\*Galileo: SV number = SV number + 70



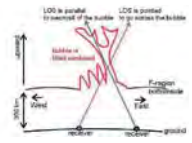
\*Galileo: SV number = SV number + 70

SV	L1									L5		
	G05	G13	G17	G19	E04	E19	E31	E04	E19	E31		
S4	0.09	0.25	0.13	0.11	0.2	0.12	0.11	0.31	0.18	0.17		
El.	70	30	33	39	53	50	53	53	50	53		
Az.	283	180	85	58	180	71	228	180	71	228		



13

- \* Results
  - Temporal variation of S4 is correlated best with EAR echoes at altitudes higher than 250 but lower than 350km.
  - L5 appears to be more susceptible to scintillation than L1.
  - S4 appears to be larger, when the satellite-receiver path parallel to the echo structure, or in other words, the longer the path length is.
- \* Next steps of analysis
  - More event analysis to validate the results
  - Analysis of path length in the echoing region (defined by a certain threshold of SNR) and alignment to the echo structure in relation to S4 values, and discuss the results with the hypothesis by Abadi et al. [2014].



[Abadi, Saito, and Srigutomo, 2014]

14

# 赤道大気レーダーによる2019年12月の金環日食時の電離圏観測

## Ionospheric observations by Equatorial Atmosphere Radar during annular eclipse in December 2019

高木理絵子・横山竜宏・山本衛 (京大 RISH)・穂積 Kornyanat (NICT)

### 1 序論

地球の大気の高さ約80 km以上の領域は電離圏と呼ばれ、分子や原子が一部電離した状態で存在している。電子密度は高度や時間、場所によって異なり、電離圏を通過する電波の遅延や屈折が発生し、衛星通信障害やGPS測位精度低下の原因となるため、電子密度分布を正確に把握し予測することが求められている。

150 km エコーとは、日中に赤道電離圏の150 km付近で観測されるVHFレーダー後方散乱エコーである。150 km エコーの発生原理はまだ明らかになっていないが、SNRが低くSNRに依存したドップラースペクトル幅を持つNEIS (naturally enhanced incoherent scattering) 過程によるものと、SNRが高くSNRに依存しないドップラースペクトル幅を持つ沿磁力線不規則構造 (FAI: field-aligned irregularities) の不安定な成長によるものの2種類が存在することが知られている [Chau and Kudeki, 2013]。

本研究では、2019年12月26日の東南アジア付近における金環日食時の赤道域の電離圏の変動を解析した。日食期間中は、日中に太陽の前を月が通過することで日照量が低下し、電子密度分布に影響を与えることが知られている。インドネシア共和国西スマトラ州の赤道上にある赤道大気レーダー (EAR: Equatorial Atmosphere Radar) でE地域の電離圏不規則構造を観測し、東南アジアのイオノゾンデネットワークで背景電離圏の状態を観測した。

### 2 観測概要

2019年12月26日に東南アジア付近では金環日食が観測された。EAR上空では現地時刻の10:18から14:08にかけて発生し、12:11に最大食を迎えた。

本研究で用いたデータは、インドネシア共和国西スマトラ州のコタババンにあるEAR (南緯0.2°, 東経100.32°) と東南アジア低緯度電離圏ネットワーク (SEALION: SouthEast Asia Low-latitude Ionospheric Network) のイオノゾンデで得られたものである。

EARでは、2019年12月25日から27日にかけて

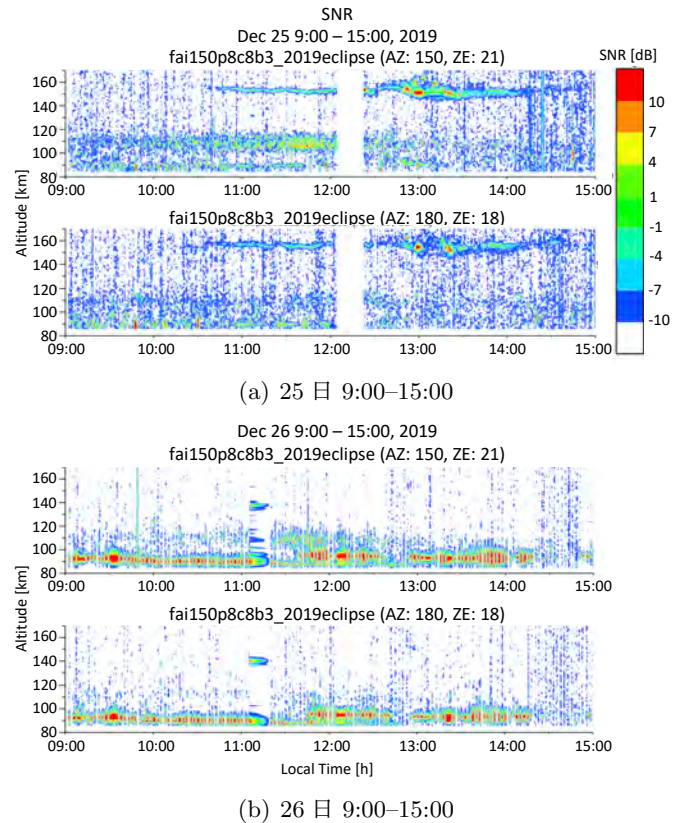


図1: 26日, 27日にEARで観測されたSNRの時間-高度分布図

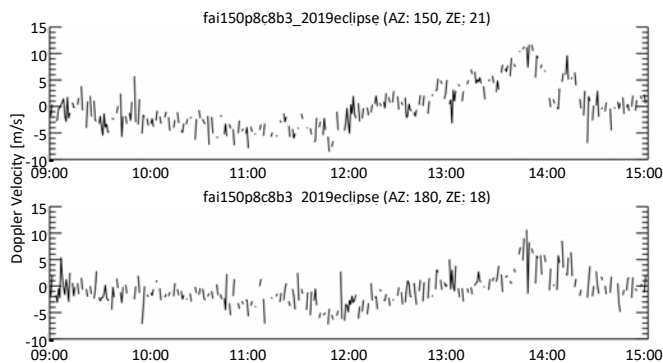
電離圏E領域に焦点を当てた高時間分解能の電離圏特別観測を実施した。観測は、方位角150.1°, 天頂角21.4°のビームと、方位角180.0°, 天頂角18.8°のビームの2方向で行った。また、2017年5月から2020年5月までに行われた電離圏観測結果を使用した。

SEALIONのイオノゾンデは、コタババン (南緯0.2°, 東経100.32°), チュンボン (北緯10.72°, 東経99.37°), バクリウ (北緯9.30°, 東経105.71°), セブ (北緯10.35°, 東経123.91°), チェンマイ (北緯18.76°, 東経98.93°) に設置されている。

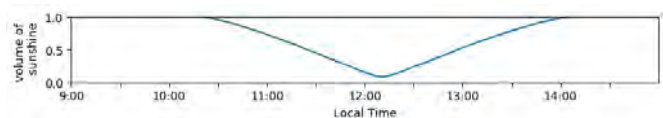
### 3 EAR 観測結果

25日と26日にEARで観測されたSNRの時間-高度分布図を図1に示す。26日は外部電波と干渉している時間があったため、異常なノイズレベルのデータは除去した。





(a) 26日のドップラー速度の時間変化



(b) 26日の日照量の時間変化

図 2: 26日のドップラー速度と日照量の関係

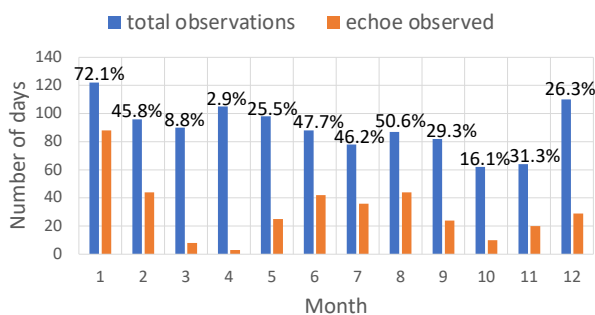


図 3: EARにおける2016年12月から2020年5月までの150 km エコーの出現頻度

150 km エコーは、図 1(a) のように 25 日には観測されたが、図 1(b) のように日食当日の 26 日には観測されなかった。27 日も 150 km エコーが観測されたため、日食が 150 km エコーの発生を妨げた可能性がある。また、図 1 のように E 領域のエコーは 2 日とも高度 100 km 付近で観測された。エコーは 90 km 付近で広範囲に観測され、110 km 付近でエコーが観測されることもあった。27 日も同様のエコーが観測された。

EAR における 2016 年 12 月から 2020 年 5 月までの月ごとの 150 km エコーの出現頻度を調べたところ、図 3 のようになった。夏 (6-8 月) と冬 (12-2 月) に出現頻度が高くなり、それ以外の時期は出現頻度が下がるという傾向がみられた。日食が起こった 2019 年 12 月に限れば出現頻度は 60% と比較的高かったが、日食が 150 km エコーの発生を妨げたとはいいい切れない。

26 日のドップラー速度と日照量の時間変化を図 2 に示す。図 2 より、ドップラー速度は日照量よりも約 1 時間早く変動していることがわかる。朝は 0 付近の値を取っていたドップラー速度は 9:30 から 11:30 にかけて減少し、11:30 から 13:30 にかけて増加し、13:30

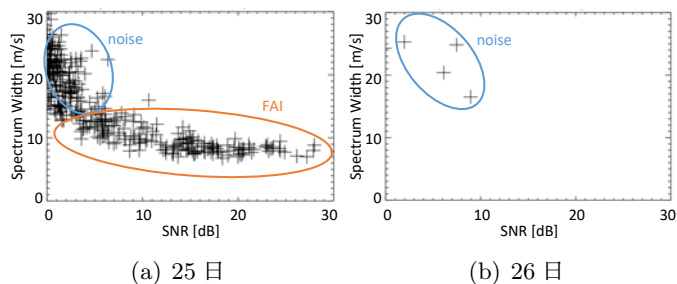


図 4: 25 日, 26 日の SNR とスペクトル幅の散布図

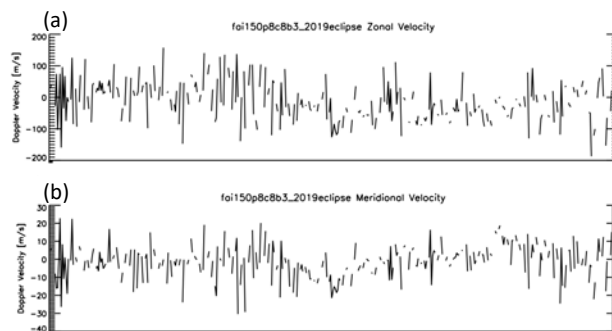


図 5: 26 日の高度 90 km におけるドップラー速度の時間変化の (a) 東向き成分 (b) 北向き成分

頃から再び減少して 0 付近の値を取った。最大食を迎えた 12 時過ぎのドップラー速度は 0 付近の値を取っていた。

また、26 日の観測で用いた 2 ビームを合成し、高度 90 km におけるドップラー速度の磁力線直交東向き・北向き成分の時間変化を計算したところ、図 5 のようになった。図 5 より、北向き成分よりも東向き成分のほうが激しく変化していたことがわかる。東向き成分が午前中に正の値を、午後に負の値を取るように変化していた。

150 km エコーについて、SNR とスペクトル幅の散布図を図 4 のように作成した。150 km エコーとして、高度 140 km から 160 km で 10 時から 14 時までのデータを使用した。スペクトル幅は、SNR が 0 dB 以上のデータを使用した。図 4(a) のように、スペクトル幅は SNR が大きい場合には SNR に依存しないため、EAR で観測された 150 km エコーは FAI によるものであると思われる。NEIS からのエコーは、EAR の感度が低いために検出できなかった。

#### 4 イオノゾンデ観測結果

コトタバンでのイオノゾンデ観測結果を図 6 に示す。コトタバンのイオノゾンデは 25 日は電波が出ていなかった。図 6 のように、コトタバンでは F 層の臨界周波数 (foF2) が日照量の変化から 1 時間程度遅れて変動していた。その他の地点でも同様の変化が見ら

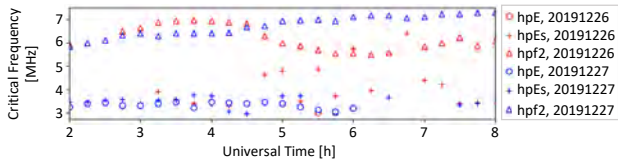


図 6: コトタバンのイオノゾンデ観測結果  
れた。

## 5 結論


GPS などの測位衛星の精度改善のため、電離圏の電子密度分布を正確に把握し予測することが求められている。また、赤道付近で見られるプラズマ不規則性の一つに 150 km エコーという現象があり、未だに生成原理が解明されていない。

本研究では、2019 年 12 月 26 日の金環日食時の電離圏の状態を、EAR とイオノゾンデで観測した。日食前後の日には明瞭な 150 km エコーが観測されたが、日食当日には観測されなかった。過去の EAR での 150 km エコーの発生頻度を考慮すると、日食が 150 km エコーの発生を妨げたとは言い切れない。一方、E 領域からのエコーには、日食の影響とみられるドップラー速度の変動が見られた。また、イオノゾンデの観測結果から、日食が F 層の臨界周波数に影響を与えたことがわかった。

今後は、より長期間の過去の EAR の観測結果を総合的に解析する。

## 参考文献

Chau, J., and E. Kudeki (2013), Discovery of two distinct types of equatorial 150 km radar echoes, *Geophys. Res. Lett.*, *40*(17), 4509–4514.



## Equatorial plasma bubbles and midnight brightness wave interaction over a low latitude station

M. Sivakandan<sup>1\*</sup>, Y. Otsuka<sup>1</sup>, T.K. Ramkumar<sup>2</sup>, P.Ghosh<sup>1</sup>, S.Sripathi<sup>3</sup>

1. Institute for Space Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University, Japan  
 2. National Atmospheric Research Laboratory, Gadanki, India  
 3. Indian Institute of Geomagnetism (IIG), Navi Mumbai, India.

14<sup>th</sup> MU/EAR Radar Symposium on 15 September 2020

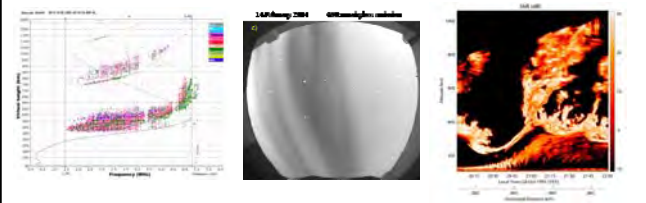
### Outline

- > Introduction
- > Data sets
- > Observation and results
- > Discussion
  - ✓ EPB interaction with poleward moving waves
  - ✓ EPB interaction with equatorward moving disturbances
  - ✓ EPB interaction with equatorward and poleward moving disturbances
- > Summary

### Introduction: Equatorial plasma bubble (EPB)

The plasma bubbles result from Rayleigh-Taylor instability in the nighttime ionosphere and are associated with electron density irregularities capable of scattering radio waves in a random manner thereby affecting radio communications and navigation systems (Kelley, 2009).

These plasma depleted regions are frequently referred to as equatorial plasma bubbles (EPBs).

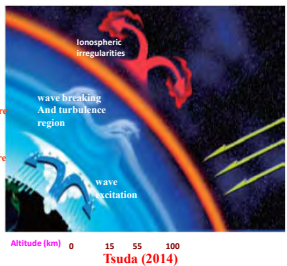


### Introduction: Atmospheric Gravity waves

Gravity waves are generated by the action of gravity and buoyancy in the stably stratified atmosphere. Mesosphere act as a surf zone for upward propagating waves

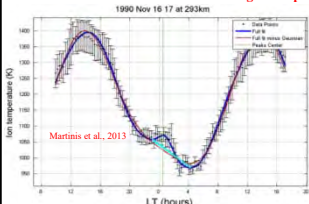
Source Mechanisms:

- Topographic generation
- Convective generation
  - o Latent heat release
  - o Moving mountain
  - o Mechanical oscillator
- Wind shear generation
- Wave-wave interaction



### Introduction: Midnight Brightness Wave (MBW)


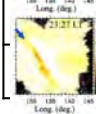
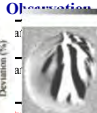
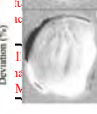
#### Midnight Temperature Maximum (MTM)



MTM is an enhancement of the neutral temperature ( $T_n$ ) of ~50–200 K in the nighttime equatorial thermosphere. It is thought to be created by the combination of in-situ thermal excitation, ion-neutral momentum coupling and lower atmosphere tidal waves penetrating into the thermosphere (Bruun et al., 2012).

MTM creates a pressure bulge in the thermosphere. This pressure bulge drives winds away from the MTM, and these thermospheric winds drag the ions with them. As the wind drags the plasma, the plasma moves down along magnetic field lines increasing the brightness in airglow observations. Observations of this brightness wave (BW), an optical signature of the MTM (Colerico et al., 1996).

### Earlier results

Sl. No	Observation	Time	UT
1		23:32 LT	030112 UT
2		23:27 LT	
3		05:14	20150918
4		06:19	

(communication)

**What is the effect of poleward and equatorward moving waves on the EPB? Is it disappear or brightened?**

## Data set

### Capabilities of All Sky Airglow Imager (ASAI)

Current FOV = 117°

Time integration = 110 sec. 557 & 630nm & 15 sec. OH

Time resolution = 240 sec/4 min

#### Wavelengths (ASAI):

O(¹S) (~ 97 km) - 557.7 nm

O(¹D) (~ 250 km) - 630 nm

OH wide band filter

Gadanki (13.5°N, 79.2°E geographic; 6.7°N dip latitude)  
Indian standard time (IST)=UT+5:30

All-sky imager

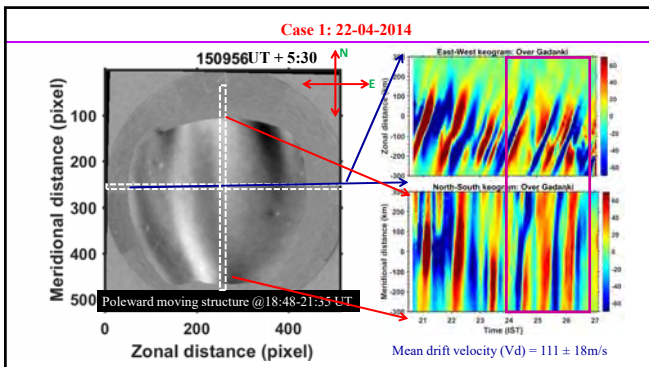


Ionosonde observation from Tirunelveli (8.7°N, 77.8°E geographic; 1.5°N dip latitude)  
International GNSS Service (IGS), Total electron content (TEC) over Bangalore and Hyderabad is also used.

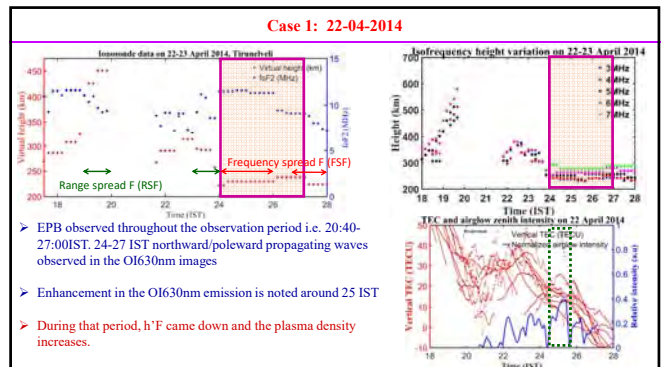
## Observation and results



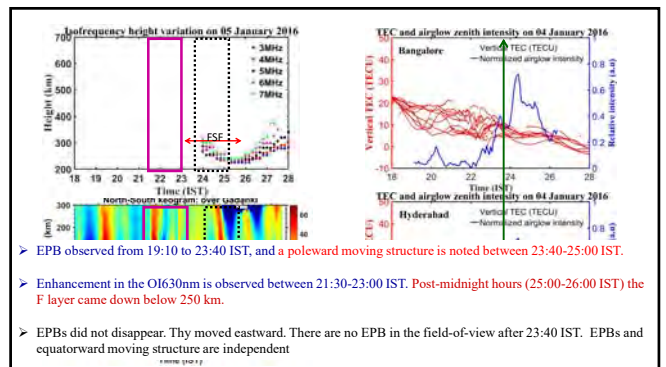
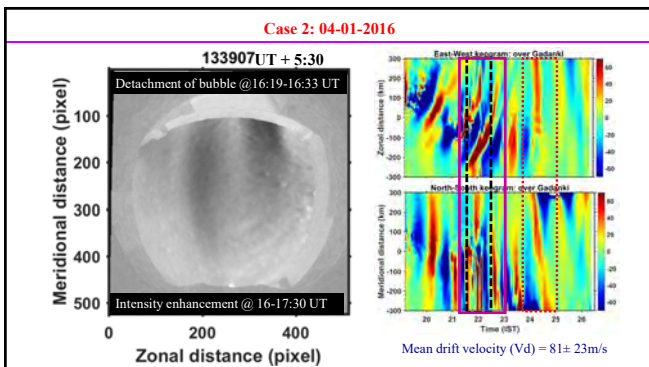
### Case 1: 22-04-2014



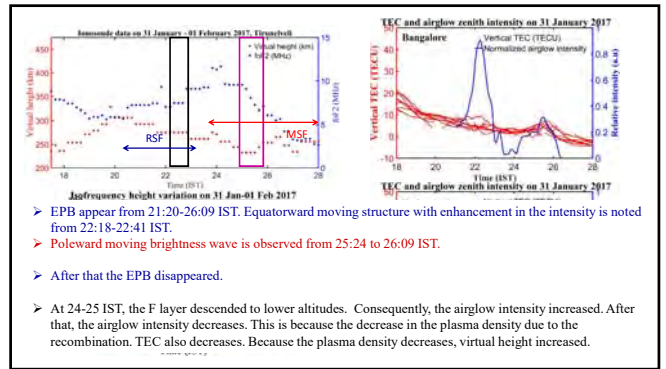
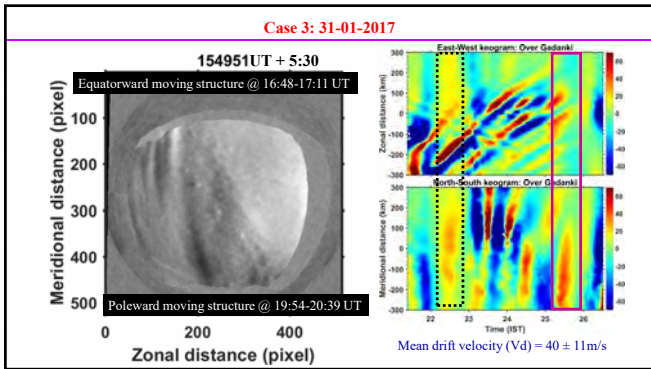
### Case 1: 22-04-2014



### Case 2: 04-01-2016

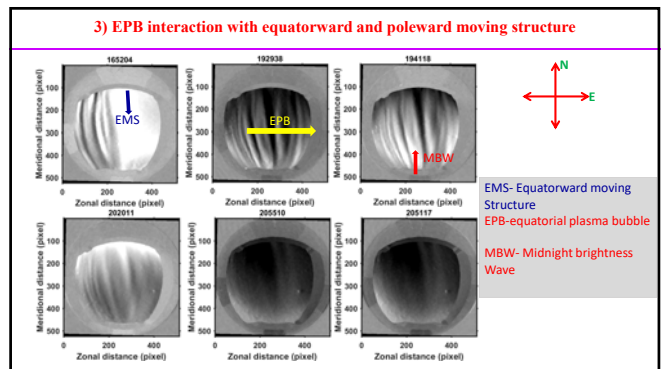
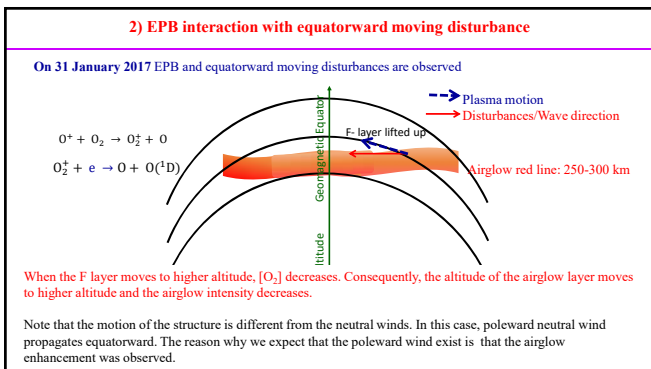
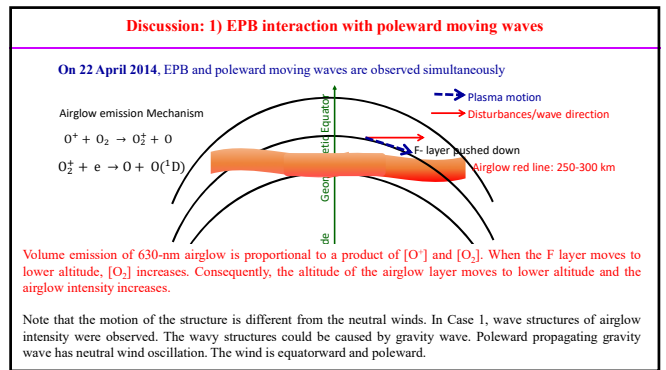






**Overall remarks on the results**

SLN O	Date	Observed events	Geomagnetic condition	Remarks
1	22-04-2014	EPB + poleward moving waves	Kp=4	EPB present
2	04-01-2016	EPB + Equatorward moving wave	Kp<=2	EPB disappeared
3	31-01-2017	EPB + Equatorward + poleward moving brightness structure	Kp=4	EPB disappeared



### Summary

- ✓ Case 1 shows that neutral wave interaction may not affect the EPB. This result is consistent with the recent speculation by Figueiredo et al (private communication)
- ✓ In case 2, the EPB in the airglow emission may disappear due to the descent of the F-layer.
- ✓ In case 3, after the passage of MBW/poleward moving structure, the EPB disappeared from the images. The causative mechanism may be similar to case 2. During the disappearance period the peak plasma density also drops abruptly.
- ✓ Please note that all these nights the ionosonde observation show range or frequency spread till 4 a.m.



Questions and comments!



Thank you for your kind attention!

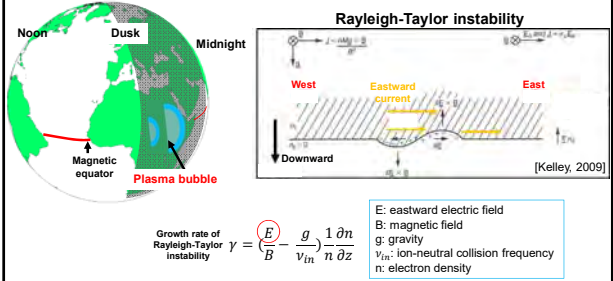
## Occurrence feature of plasma bubbles during geomagnetic storms using long-term GNSS-TEC data

Takuya Sori<sup>1</sup>, Yuichi Otsuka<sup>1</sup>, Atsuki Shinbori<sup>1</sup>, Takuya Tsugawa<sup>2</sup>, Michi Nishioka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan.  
<sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology, Koganei, Tokyo, Japan.

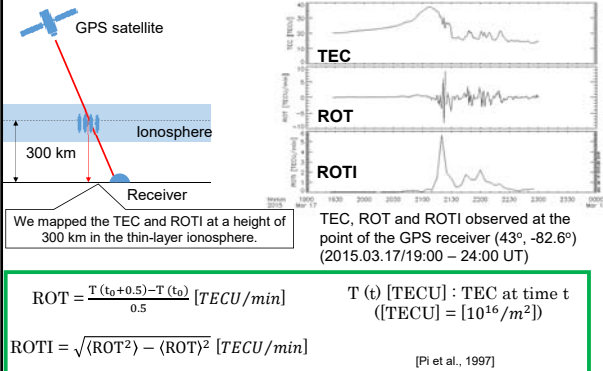
### Introduction Plasma bubbles

- Significantly sharp depletion of plasma density
- Plasma density irregularities within plasma bubbles
- Plasma bubbles are generated in the bottomside F region of the nighttime equatorial ionosphere after sunset by Rayleigh-Taylor instability mechanism [e.g., Farley et al., 1970; Kelley, 2009].



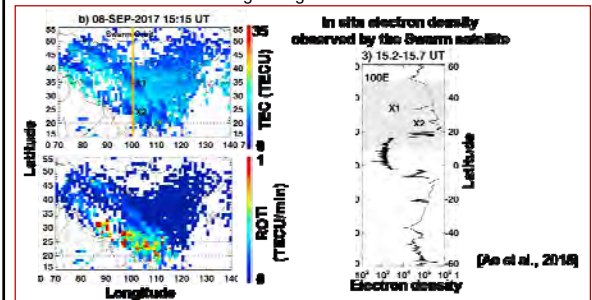
### Brief description of the Rate of TEC Index (ROTI)

Calculation method of ROTI with GNSS-TEC data



### Introduction

Plasma bubbles are observed during not only geomagnetically quiet conditions but geomagnetic storms.



### Previous studies

Storm-time plasma bubbles are generated in the dusk sector due to the prompt penetration of electric field under southward interplanetary magnetic field conditions [e.g., Ma and Maruyama, 2006; Cherniak and Zakharenkova, 2016].

### The purpose of this study

To clarify characteristics of plasma bubbles during geomagnetic storms using long-term global ROTI data

### Data sources

- Global GNSS-TEC data with high temporal and spatial resolutions are provided by National Institute of Information and Communications Technology (NICT).
- The GNSS-TEC data used in this study have spatial and temporal resolutions of  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  in longitude and latitude and 5 minutes, respectively.
- The SYM-H index is provided by WDC, Kyoto University.
- The solar wind data are provided by Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb), NASA (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index/>).

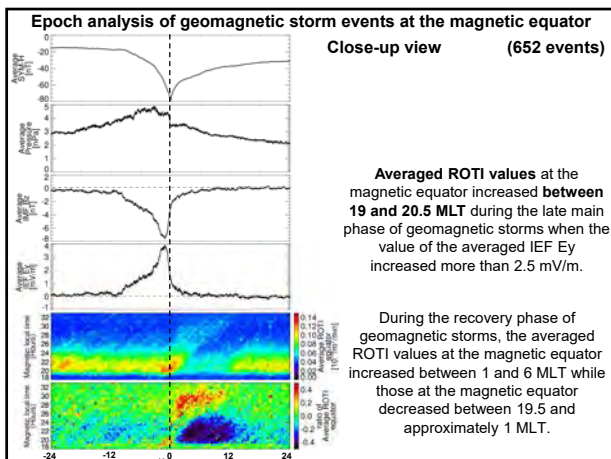
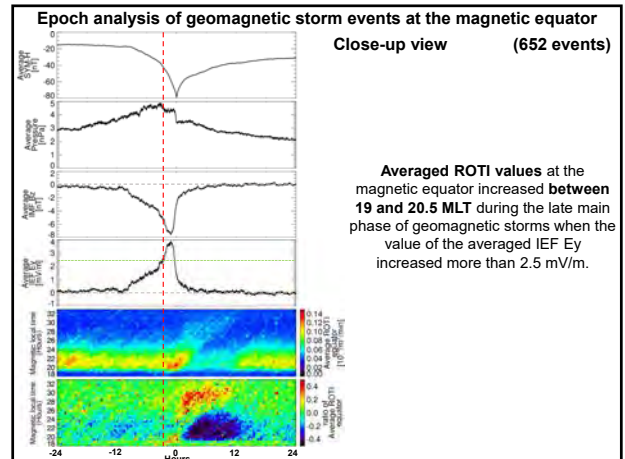
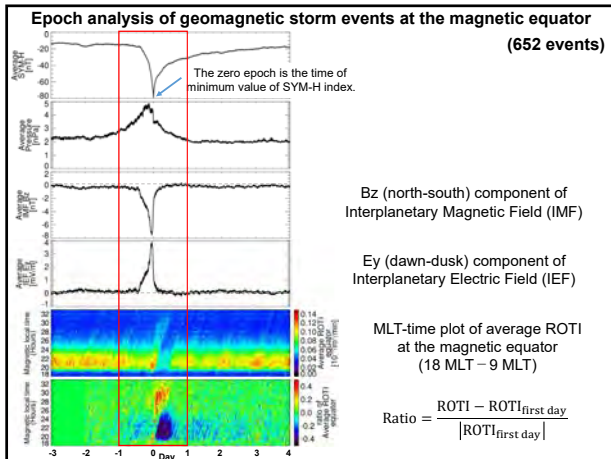
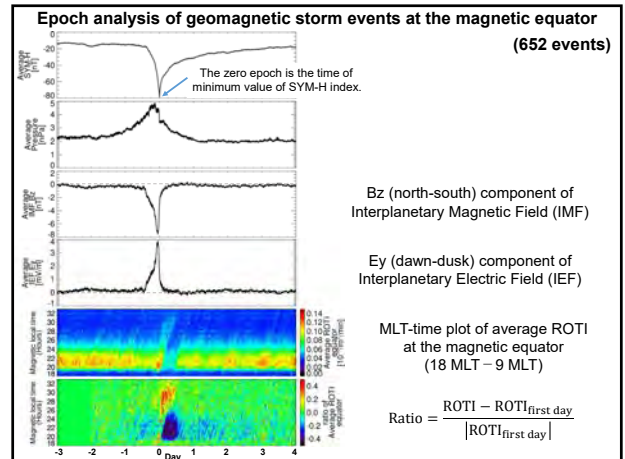
### In this study,

Analysis period: 1/1/2000~12/31/2018

Definition of geomagnetic storm events: the SYM-H variations with the minimum value of less than -40 nT

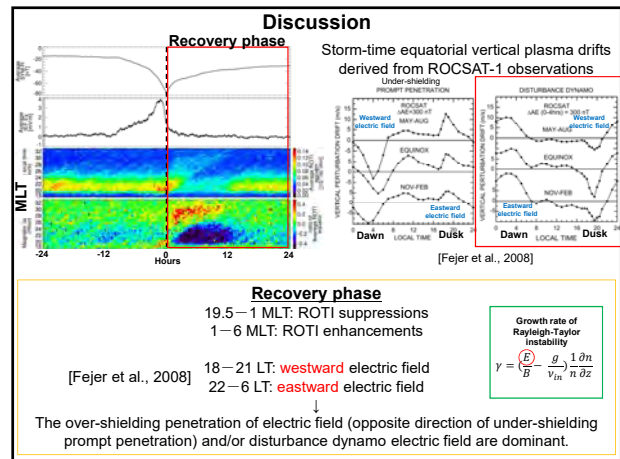
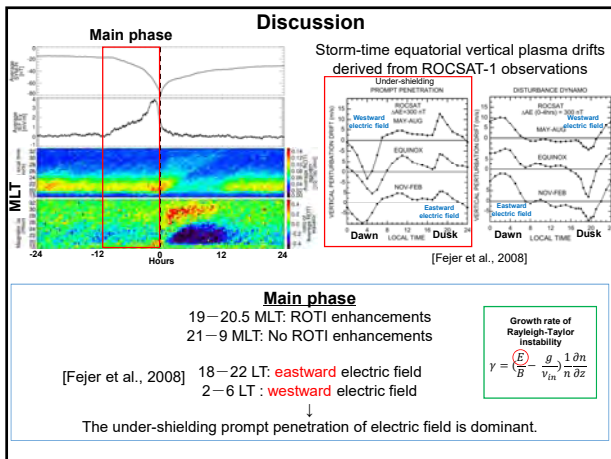
- The number of geomagnetic storm events : 652

# Results



# Discussion





**Summary**

We investigate global ROTI data during geomagnetic storms for 19 years.

- The number of geomagnetic storm events: 652 (minimum value of SYM-H < -40 nT)

---

- During the main phase of geomagnetic storms, enhanced ROTI regions do not appear between 21–9 MLT and develop between 19–20.5 MLT.
- During the recovery phase of geomagnetic storms, enhanced ROTI regions appear between 1–6 MLT and suppress between 19.5–1 MLT.

---

During the main phase of geomagnetic storms, plasma bubbles can be generated due to the **enhanced eastward electric field** (under-shielding penetration of electric field) in the dusk sector.

During the recovery phase of geomagnetic storms, plasma bubbles can be generated due to the **eastward electric field** (over-shielding penetration of electric field and/or disturbance dynamo electric field) in the dawn sector and suppressed due to the **westward electric field** in the dusk–midnight sectors.

# 衛星回線における降雨減衰特性と地上風および上空の風速との関係

前川泰之・佐々木駿一・山崎光資・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)やさらに高い Ka 帯(30/20GHz)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]-[3]。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[4]、降雨強度の年変化等に伴って生じる長期間の統計的な降雨減衰の変動を明確にする必要がある。このためには衛星回線ではとくに地上の降雨強度のみならず、上空の降雨高度の変化に伴う雨域等価通路長の変化に注意する必要がある。

大阪電気通信大学では、Ka 帯通信衛星電波(19.45GHz、右旋偏波、仰角 49.5°:以下 CS と称す)と Ku 帯放送衛星電波(11.84GHz、右旋偏波、仰角 41.3°:以下 BS と称す)の降雨減衰を過去34年間(1986-2019)本学の寝屋川実験局で 1 分降雨強度とともに連続的に測定したデータを用い、それらのデータに長期にわたって見られる統計的な変動について研究を行ってきた。各年の降雨強度と降雨減衰の累積時間率分布の間に差異が生じる原因として、まず平均雨域等価通路長の年変化を指摘し、各年の降雨時平均地上気温や各種降雨タイプが及ぼす影響について議論した[5]。本研究では特に台風等と熱帯性降雨が雨域等価通路長に及ぼす影響に着目し、台風接近時に特徴的に現れる降雨減衰特性の変化について、台風の通過方向に伴う向の変化の観点からさらに調査を進めたので報告する。また、アメダスによる地上風速に加えて上空の雨域移動に伴う上層風の効果を考慮することで、同様の特徴が台風以外の各種前線による降雨減衰特性にも存在することを示す。

## 2. 台風通過時の降雨減衰変動特性

最初に本章では、2017 年の 8 月と 9 月に台風が寝屋川局に接近したときの降雨強度と降雨減衰の時間変化の例を示す。図1は (a) 2017 年 8 月 7 日と (b) 9 月 17 日から 18 日に、それぞれ台風 5 号と 18 号が寝屋川局の近くを通過したときの降雨強度、Ku 帯降雨減衰、および局舎から台風の中心までの距離の 1 時間平均値をそれぞれ示す[6]

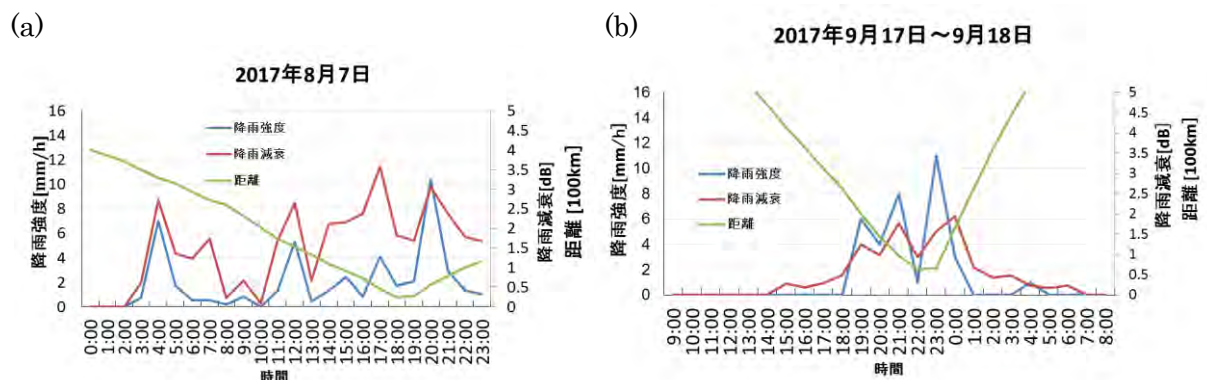


図1. 台風接近時の(a)降雨強度、Ku 帯降雨減衰、および局舎から台風の中心までの距離と、(b)台風の経路[6]。

両日とも台風が接近するとともに降雨強度や降雨減衰が増大することが分かるが、降雨強度に対する降雨減衰の比率は、図1(a)の8月7日の台風5号の場合の方が図1(b)の台風18号の場合より圧倒的に大きいことが示される。前回は報告したように[7]、8月の台風5号は寝屋川局の東側を通過したために、強い北東風(南西向の風)が吹き付けていたのに対し、9月の台風18号は屋川局の西側を通過したために、強い南西風(北東向の風)が吹き付けていたことが近隣の枚方アマダスにより示されている[8]。従って、降雨強度と降雨減衰の比率と、衛星伝搬路と台風通過に伴う強風の方向との間に密接な関係があることが示唆された。

### 3. 台風通過時の地上風速風向と雨域等価通路長の関係

図2は1988年から2019年の間に観測された61例の台風通過時について、枚方アマダスによって得られた(a)地上風速および(b)その風向と、BS電波の降雨減衰の雨域等価通路長の関係を、台風の通過方向別に示したものである。降雨強度と降雨減衰の1時間平均値は、降雨強度が8mm/h以上の値が得られた時間帯のものを選んだ。各台風通過時の降雨減衰の平均値 $A$  [dB]は、降雨強度の平均値 $R$  [mm/h]に対する減衰係数 $\alpha = aR^b$  [dB/km]で割ることによって雨域等価通路長 $L = A/\alpha$  [km]に変換した。なお、12GHz帯(BS、11.84GHz)では、 $a=0.02308$ 、 $b=1.1568$ である[5]。また台風の通過方向は寝屋川局の西側(△印)、ほぼ上空(○印)、および東側(×印)を通過した場合に分類してある。一方、地上風速と大きさと方向は風速が最も大きな値を示した時間のものを用いてある。また方向は北風(南方向)を $0^\circ$ で時計回りに示してある。

図2(a)より、地上風速の大きさが増大するほど雨域等価通路長はやや増加する傾向にあるが、その相関関係はそれほど風速の絶対値に関しては強く現れていない。また図2(b)の風向に関しては、前章で指摘したように北東風(南西方向)の場合が南西風(北東方向)の場合よりも総じて雨域等価通路長が長くなり、また北東風は台風が東側(×印)を通過するとき、南西風は西側(△印)を通過するときに概して多く現れることも分かる。また、図3(b)の点線はBS電波の伝搬路の方位角と逆方向( $40.1^\circ$ )、および同じ方向( $220.1^\circ$ )に相当する角度を示し、それらの方向に沿って北東風または南西風が来るときに、雨域等価通路長がばらつきは大きいものの、それぞれ最大と最少に近づく様子が示される。

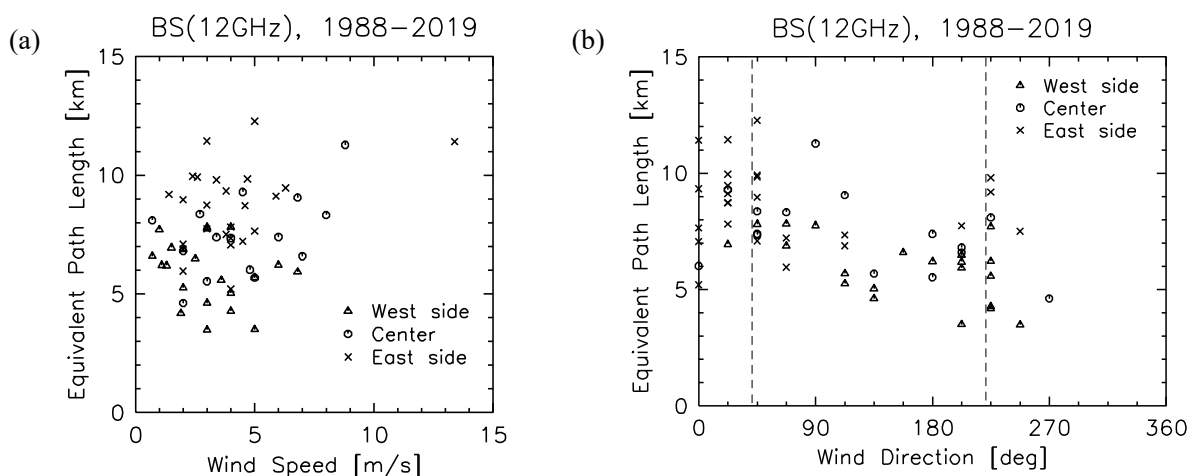


図2. 枚方アマダスによる台風通過時の地上風速の1時間平均値と雨域等価通路長の関係。(a)風速の大きさと(b)風向との相関図で、点線はBS電波の伝搬路に沿った方向を示す。

次に、図3は図2 (b)と同様に枚方アメダスで測定された地上風の風向と、(a) CS (19.45GHz、円偏波)、(b) スカパー (12.57GHz、垂直偏波)、および (c) スーパーバードC (12.66GHz、垂直偏波)を受信した場合の台風通過時の等価通路長の関係を、それぞれ示す。各衛星の電波の到来方向(方位角:Az)は、それぞれ、CSが $186.4^\circ$ 、スカパーが $199.9^\circ$ 、スーパーバードCが $165.5^\circ$ である。測定期間と測定例は、それぞれCSが1988～2005年で33例、スカパーが2004～2019年で36例、スーパーバードCが2004～2019年で33例である。各衛星とも到来角と逆方向から地上風が吹くときは等価通路長が増大し、到来角の方向から地上風が吹くときには等価通路長が減少する傾向が、いずれも観測されることが分かる。

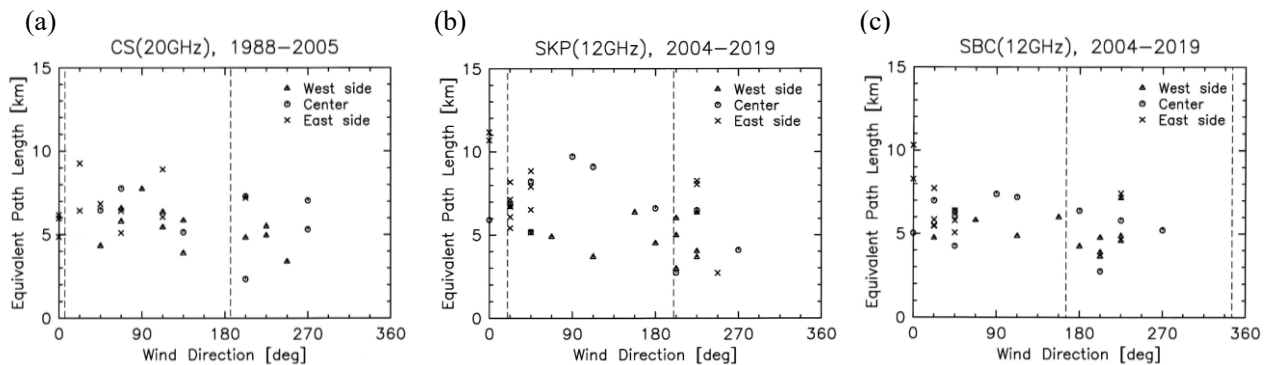


図2. 枚方アメダスによる台風通過時の地上風の風向との1時間平均値と雨域等価通路長の関係。(a) CS、(b) スカパー、および (c) スーパーバードの電波を受信した場合。点線は伝搬路に沿った方向。

#### 4. 電波伝搬路に対する風速との関係

前章の結果より、台風通過時の地上風速は雨域等価通路長に明らかに影響を及ぼしており、特に風向が顕著に作用していると考えられるので、本章では各衛星電波の伝搬路に沿った地上風速成分の大きさを抽出して雨域等価通路長との関係をさらに調べた。図3に伝搬路方向の風速の1時間平均値と雨域等価通路長の関係を示す。図3(a)はBS(方位角 $220.1^\circ$ )、(b)はCS(方位角 $186.4^\circ$ )、(c)はスカパー(方位角 $199.9^\circ$ )、および(d)はスーパーバードC(方位角 $165.5^\circ$ )である。

風速は伝搬路の逆方向から到来する成分を正の値、伝搬路の方向から到来する成分を負の値でそれぞれ示してある。BSの場合、図1(a)に比べて図3(a)で示した衛星電波伝搬路に沿った風速成分の方が、相関関係が格段に増大していることが分かる。また台風が西側を通過(△印)して衛星電波の到来方向から来る負の値の風速が強まると雨域等価通路長が5km前後まで顕著に減少するのに対し、逆に衛星電波の到来方向の逆から来る正の風速が強まると雨域等価通路長が10km前後まで増大する傾向が明らかである。

図2の各点線は、降雨高度を3～7kmとした場合の雨域等価通路長を、衛星仰角(BS: $41.3^\circ$ 、CS: $49.5^\circ$ 、スカパー: $47.4^\circ$ 、スーパーバードC: $48.6^\circ$ )による傾斜伝搬路の効果に、さらに伝搬路に沿った風速による雨滴の水平移流の効果を加えて計算し直した値である。簡単な三角法の計算により実測値とよく合う結果が得られており、台風通過時の風速風向の影響が実証されたといえる。なお、ここでは雨滴の落下速度は5m/s程度と仮定しており、降雨高度に対する鉛直調整係数は台風に対しては0.9(通常の降雨では0.7～0.8)としている。水平風速が-5km付近で雨域等価通路長が最少となるのは、衛星仰角の影響と水平移流の効果がちょうど相殺して伝搬路長が降雨高度に見かけ上等しくなるためと考えられる。



また、水平風速は上空の便宜上降雨高度まで地上と同じに設定しているが、実際にはさらに強まっている可能性があり、さらに雨域等価通路長が地上風速に対して増大していると思われる。従って、今後 MU レーダー等による上空の風速の測定値によりさらに補正を行う必要があると考えられる。降雨高度が 7km と通常の降雨の場合の 4~5km に対してかなり高い値となるのも、上空の風速がさらに増大していることが影響している可能性があると言える。

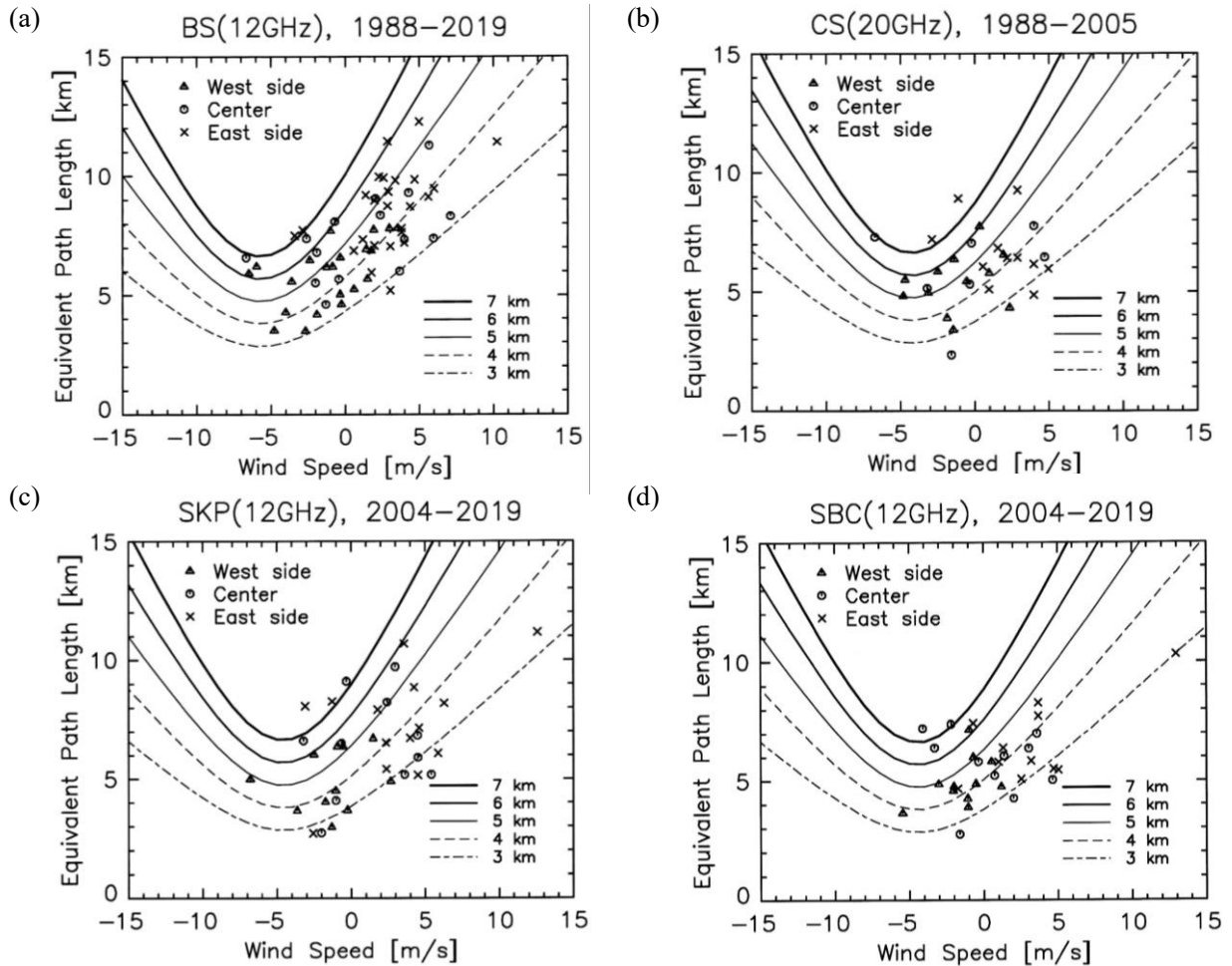


図3. 各衛星伝搬路に沿った方向の地上風速(北向きを正)と雨域等価通路長の関係。(a)はBS、(b)はCS、(c)はスカパー、および(d)はスーパーバードCの場合である。図中の各実線と点線は降雨高度3~7kmに対して雨滴の落下速度(5m/s)と伴に風速による水平移流を考慮した場合の計算値をしめす。

## 5. 台風以外の各種前線通過時の雨域等価通路長との関係

図4に台風以外の各種前線(温暖前線、寒冷前線、停滞前線等)通過時におけるBS電波降雨減衰の雨域等価通路長とアメダスによる地上風速との関係を、衛星伝搬路に沿った風速成分に対して同様に示す。各点線は同様に降雨高度を3~7kmとした場合の雨滴の落下と風速による水平移流を考慮した雨域等価通路長の計算値である。台風以外の各種前線では地上風速の1時間平均値は5m/sを超えることはほとんどなく、絶対値が5m/s以下のところにデータ点が集中するため、伝搬路に沿った地上風速との関係は明らかではない。

ここで、台風通過時とは異なり前線通過時には前線に垂直な雨域の移動方向や、停滞前線では前線上の低気圧の通過方向から上空の雨域移動に伴う風速を推定することが可能であり、それから得られる上層風の風速と風向を利用した[9]。図5はこの上層風とアメダス地上風速をベクトルの平均し、そのBS電波の伝搬路に沿った風速成分と等価通路長との関係を示したものである。各点線は同様に雨滴落下速度と水平移流を考慮した計算値である。図5より、等価通路長の測定値はこの計算値と良い一致を示す。また、上層風の効果により伝搬路の方向から到来する雨滴の速度が増大し、一旦-5m/s 辺りで最小となった後に再び増大する傾向が計算通りに表れていることが分かる。

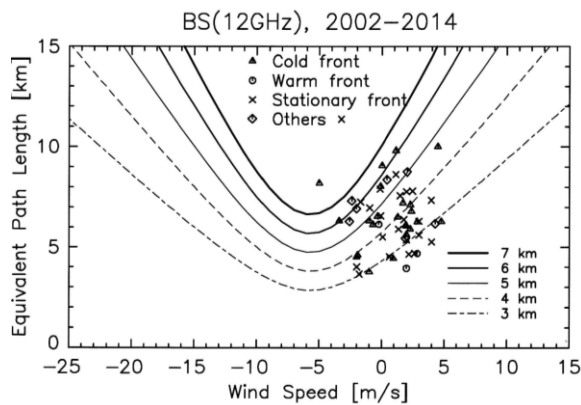


図4. 台風以外の各種前線通過時の等価通路長。伝搬路に沿った地上風速との関係。

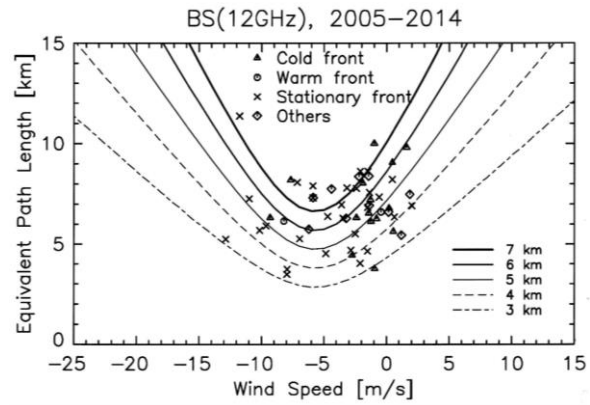


図5. 地上風速と上層風の平均値との関係。

## 6. 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)電波の降雨減衰データを用いて、その間に得られた61例の台風通過時の特徴について議論を行った。降雨事象毎に得られる降雨減衰の1時間平均値は降雨強度が同じであっても台風が通過する位置により著しい差異が生じ、減衰係数 $\alpha$  [dB/km]に対する雨域等価通路長は、寝屋川局の東側を通過する場合、西側を通過する場合に著しく増加することが示された。

このとき近隣の枚方アメダスで記録された地上風速の1時間平均値は北風から北東風に集中し、衛星電波の到来方向(ほぼ南西)に対して逆向きの風が強いときに、雨域等価通路長が増大して降雨強度の対する減衰量が相対的に増大することが測定値と計算値の両方により示された。本研究により、衛星通信や衛星放送のマイクロ波帯電波(12GHz帯)の降雨減衰量が地上風速の大きさと方向によって実際に影響を受けることが分かった。そして今回、BSの電波伝搬路の他に、CS(Ka帯、20GHz)や、スカパー、スーパーバートC等のKu帯の方位角が異なる他の通信衛星伝搬路での降雨減衰データに対しても、台風による地上風速の影響が確認された。また、台風以外の各種前線通過時においては、前線や低気圧の通過速度から推定される上昇風とアメダス地上風速の平均値を用いることにより、同様に衛星電波伝搬路に対する風速および風向の影響が初めて示された。

## 参考文献

- [1] H. Fukuchi, T. Kozu, K. Nakamura, J. Awaka, H. Inomata, and Y. Otsu, "Centimeter wave propagation experiments using the beacon signals of CS and BSE satellite," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-31, no.4, pp.603-613, July 1983.

- [2] Y. Karasawa and Y. Maekawa, "Ka-band earth-space propagation research in Japan," Proc. IEEE, vol.85, no.6, pp.821-841, June 1997.
- [3] 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.
- [4] "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," Geneva, ITU-R Recommendation P618-8, 2005.
- [5] Y.Maekawa, A study on long-term rain attenuation characteristics in Ka and Ku band satellite communications, Proc. of The 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2011), ICSSC-17-1, Nara, Nov.-Dec. 2011.
- [6] <http://www.jma.go.jp/jp/typh/>.
- [7] 前川泰之、佐々木駿一、柴垣佳明、"Ku 帯衛星通信回線の台風通過時における降雨減衰特性"、第 13 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、2019 年 9 月。
- [8] <http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>.
- [9] Y. Maekawa, T. Nakatani, Y. Shibagaki, and T Hatsuda, "A study on site diversity techniques related to rain area motion using Ku-band satellite signals, " IEICE Trans. on Commun., vol. B91-B, no. 6, pp.1812-1818, Jun. 2008.

## GNSS稠密ネットワークおよびラマンライダーを用いた信楽上空の水蒸気時空間変動の観測

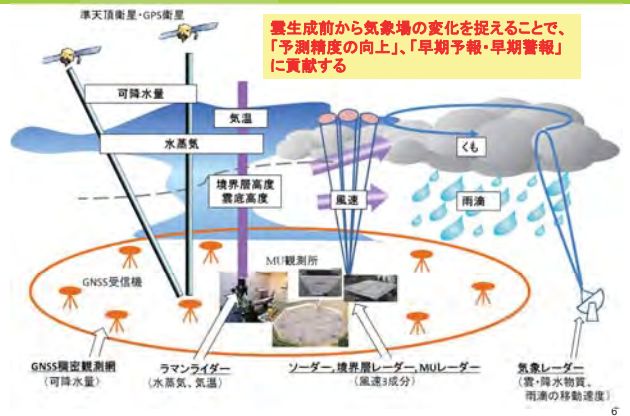
矢吹正教、柿原逸人、津田敏隆(京都大学生存圏研究所)  
塚本誠、竹内栄治、長谷川壽一(英弘精機株式会社)

### 用途別に要求される対流圏の水蒸気・気温計測の鉛直/時間分解能と精度

パラメータ	モニタリング	モデル検証・校正	データ同化
鉛直分解能 (m)			
接地層	10-30	10-30	10-30
混合層	100-300	100-300	100-300
移行層	10-100	10-100	100
下部自由対流圏	300-500	300-500	300-500
時間分解能 (分)	< 60	< 15	5-15
水蒸気混合比 ノイズ誤差 (%)	< 10	< 5	< 10
バイアス (%)	2-5	2-5	< 5
気温 ノイズ誤差 (K)	< 1	< 1	< 1
バイアス (K)	0.2-0.5	0.2-0.5	0.2-0.5
待ち受け時間			数分~1時間

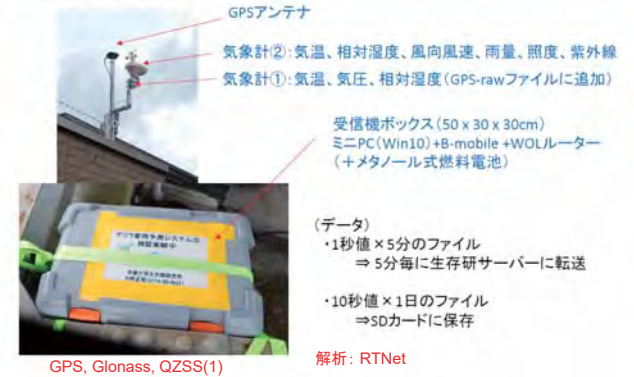
Weckwerth et al.(1999), Wulfmeyer et al.(2003), ESA(2001, 2004), WMO(2004, 2005)をまとめたWulfmeyer et al.(2015)のTable 1を引用

### 水蒸気の時空間分布計測のための光・電波複合観測システムの研究 (科研費基盤(B) 代表: 津田敏隆, 2015-2018)



### 信楽稠密GNSS観測網

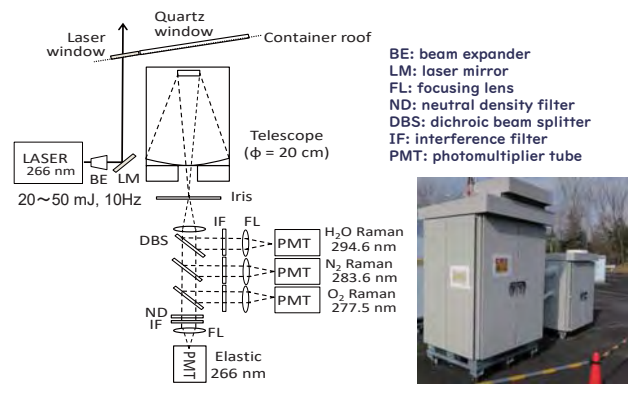
#### 信楽GNSS稠密ネットワーク



### 信楽稠密GNSS観測網

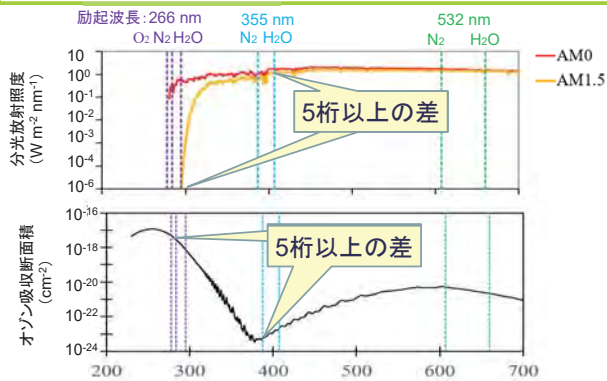


### 水蒸気ラマンライダーの構成

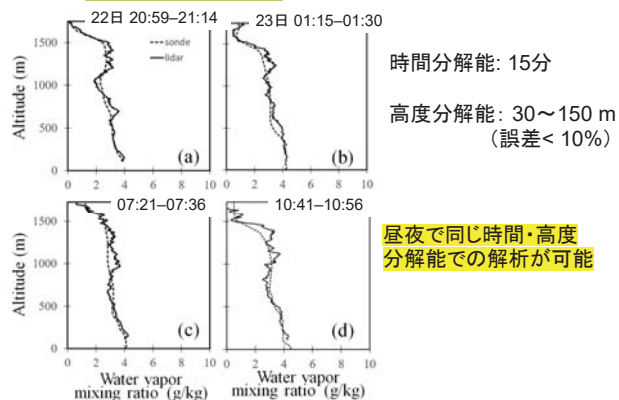




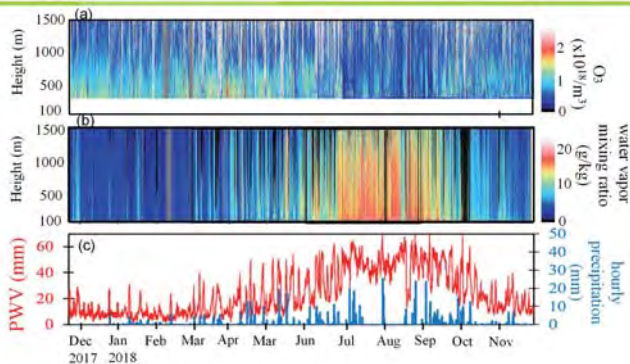
### 太陽光基準スペクトル vs オゾン吸収スペクトル



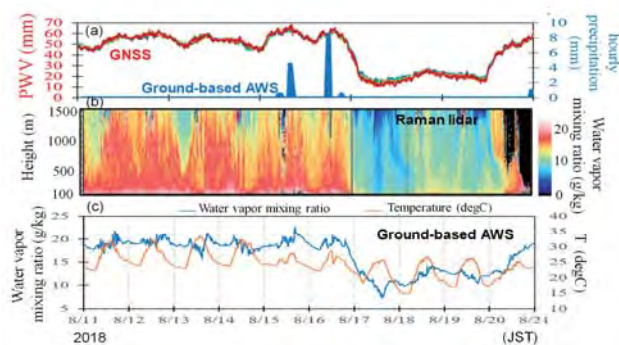
### 水蒸気ラマンライダー vs ラジオゾンデ (2017.12)



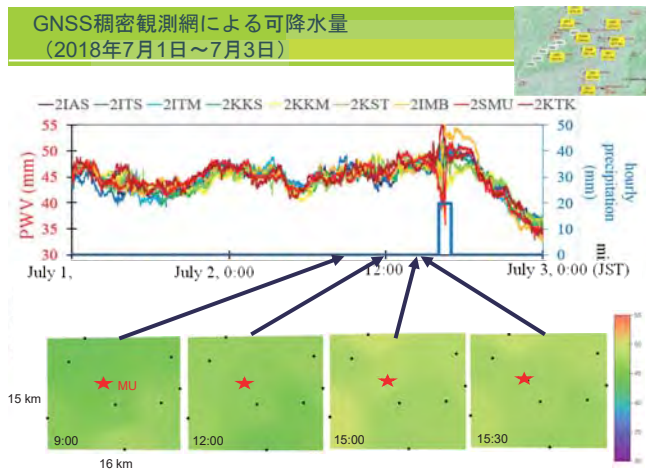
### オゾン濃度、水蒸気混合比、GNSS可降水量・1時間降水量 (2017年11月24日~2018年11月29日)



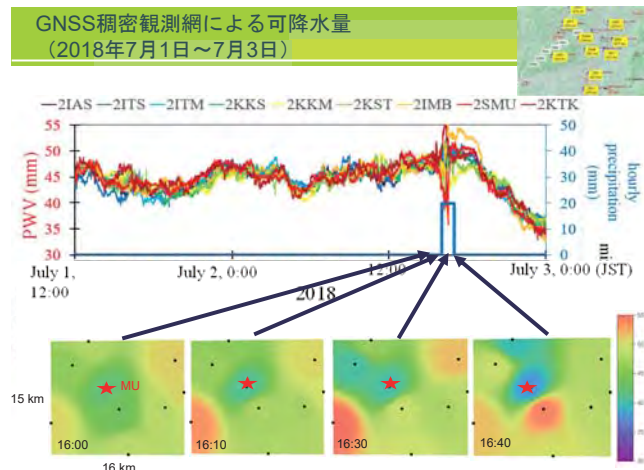
### GNSS可降水量・1時間降水量、水蒸気混合比、地上気温・水蒸気混合比 (2018年8月11日~2018年8月21日)



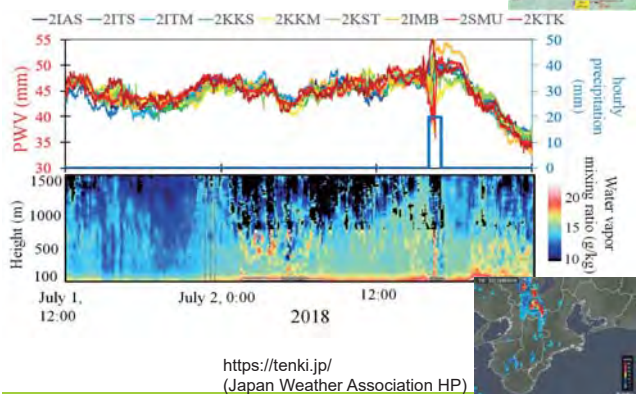
### GNSS稠密観測網による可降水量 (2018年7月1日~7月3日)



### GNSS稠密観測網による可降水量 (2018年7月1日~7月3日)



GNSS稠密観測網による可降水量・1時間降水量、  
水蒸気混合比（2018年7月1日～7月3日）



まとめ

- 信楽観測所周辺において、GNSS可降水量の水平分布とラマンライダーによる水蒸気鉛直分布の通年観測を実施した。

GNSS観測

- 標高差のある地域において、水平距離約20 km内の豪雨前後の可降水量変動を捉えることができた。

ラマンライダー観測

- 大気境界層内の水蒸気混合比を、時間分解能15分、高度分解能30～150 m、校正値の経時変化のバイアス年3.5%以下で通年計測できた。

# スペクトル観測理論に基づく レーダーインバージョン アルゴリズムの開発

田村亮祐(京大生存研、M1)  
西村耕司(国立極地研)  
橋口浩之(京大生存研)

## アウトライン

- 背景・目的
- スペクトル観測理論
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- 風速の推定
- まとめ

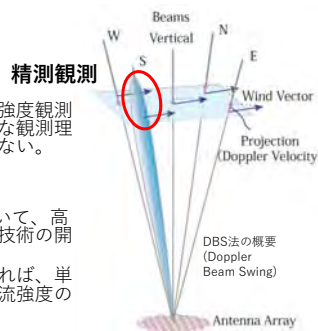
## 背景・目的

### □背景

- 大気レーダーによる風速・乱流強度観測において、既存の手法では厳密な観測理論に基づいた解析が行われていない。

### □目的

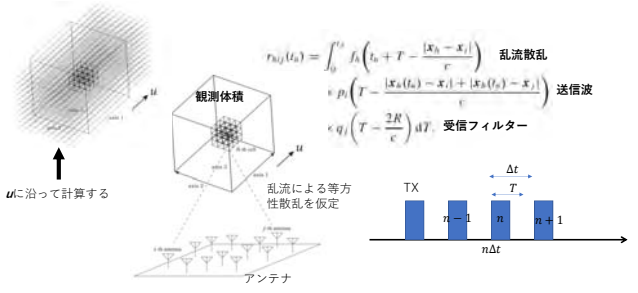
- スペクトル観測理論(後述)を用いて、高精度の観測が可能なデータ処理技術の開発を行う。
- 多チャンネルレーダーを利用すれば、単一のビームから三次元風速と乱流強度の推定も可能となる。



## アウトライン

- 背景・目的
- **スペクトル観測理論**
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- 風速の推定
- まとめ

## スペクトル観測理論(1) Nishimura et al., 2020



## スペクトル観測理論(2)

- 【仮定】**  
観測体積内の任意の二点において
- 乱流散乱関数( $f$ )は無相関
  - 乱流散乱関数( $f$ )のパワースペクトルが等しい

受信波の相関関数

$$R(\tau) = E \left\{ \sum_k f_{k_0}^*(t) g_{k_0}^*(t) w(t+\tau) \right\}$$

$$\times \left\{ \sum_k f_{k_0}(t+\tau) g_{k_0}(t+\tau) w(t) \right\} dt$$

$$= E \int \sum_k \sum_{k'} f_{k_0}^*(t) f_{k_0}(t+\tau)$$

$$\times g_{k_0}^*(t) g_{k_0}(t+\tau) w^*(t) w(t+\tau) dt$$

$$= \int \sum_k \sum_{k'} E [ f_{k_0}^*(t) f_{k_0}(t+\tau) ]$$

$$\times g_{k_0}^*(t) g_{k_0}(t+\tau) w^*(t) w(t+\tau) dt$$

Annotations: 矩形窓関数, 往復のビームパターン, 乱流散乱関数, ガウス関数と仮定

### スペクトル観測理論(3)

$$R(\tau) = F(\tau) G(\tau) W(\tau)$$

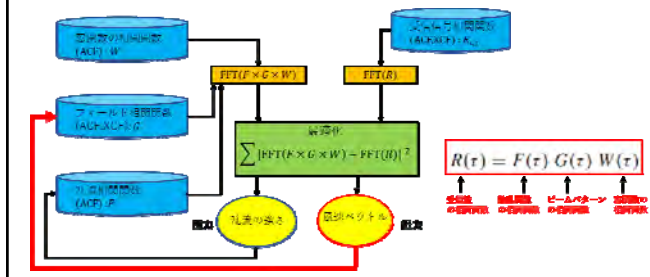
↑  
受信波の相関関数  
↑  
散乱関数の相関関数  
↑  
ビームパターン  
の相関関数  
↑  
窓関数の相関関数

- $F(\tau)$ : 乱流の強さを分散にもつ相関関数
  - $G(\tau)$ : ビームパターンと風速から導かれる相関関数
- 未知パラメータは逆問題を解くことで推定可能

### アウトライン

- 背景・目的
- スペクトル観測理論
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- 風速の推定
- まとめ

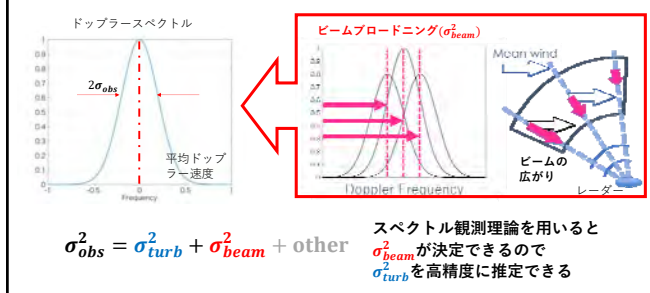
### レーダーインバージョン(RI)法



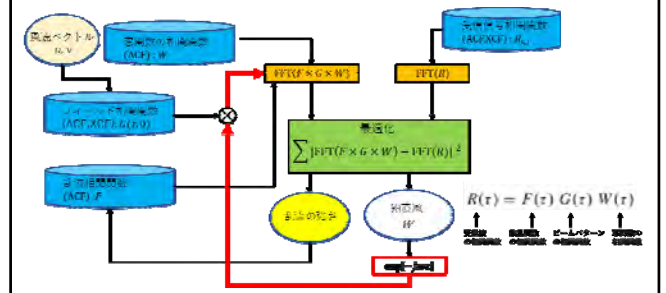
### アウトライン

- 背景・目的
- スペクトル観測理論
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- 風速の推定
- まとめ

### 乱流スペクトル幅の推定(デブロードニング)

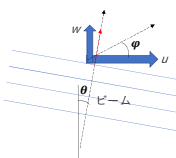


### デブロードニングのための高速化





### 相関関数の高速推定アルゴリズム(1)



$\omega = \frac{4\pi}{\lambda} w \cos \theta$  [rad/s]  
 $w = u \tan \varphi$  [m/s]

フィールド相関関数  $G(\tau, \varphi)$  は計算コストが大きい  
ため、鉛直成分を分離する近似を適用する。

$$G(\tau, \varphi) \sim G(\tau, 0) \exp[-j\omega\tau]$$

これにより  $G(\tau, \varphi)$  の再計算なしで繰り返し最適化が可能となる。

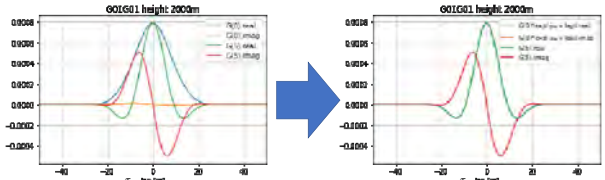
**[用語]**

- $\varphi$ : 伏角
- $\theta$ : ビームの傾き

### 相関関数の高速推定アルゴリズム(2)

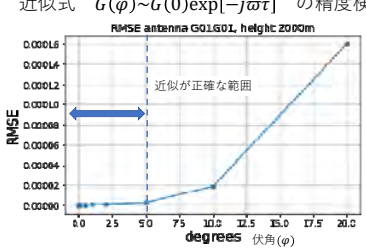
近似計算の妥当性の検証

$$\omega = \frac{4\pi}{\lambda} u \tan 5^\circ \cos \theta$$

$$G(\tau, 5^\circ) \sim G(\tau, 0^\circ) \exp[-j\omega\tau]$$


### 相関関数の高速推定アルゴリズム(3)

近似式  $G(\varphi) \sim G(0) \exp[-j\omega\tau]$  の精度検証



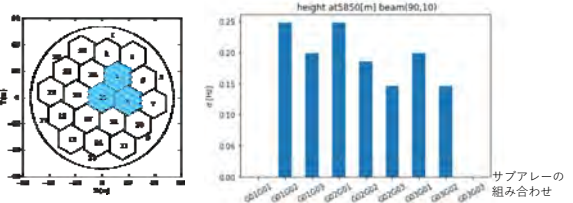
RMSE antenna G01G01, height 2000m

近似が正確な範囲

RMSEを計算

伏角 ( $\varphi$ ) が小さい場合は高い精度で成立する。

### RI法による乱流スペクトルの推定結果



height 45850(m) Beam(90.10)

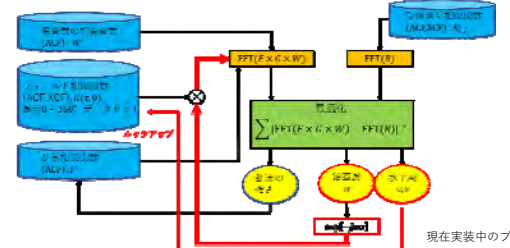
- 乱流スペクトルの推定プログラムは安定動作するようになった。
- 推定精度については検証中。

### アウトライン

- 背景・目的
- スペクトル観測理論
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- **風速の推定**
- まとめ

### 風速の推定アルゴリズム

3つ以上のチャンネルから得られる相互相関関数(XCF)を用いる



現在実装中のプログラム

## まとめ

- スペクトル観測理論に基づくインバージョン法(RI)
- RI法による乱流スペクトル幅の推定(デブロードニング)
  - 鉛直風の分離による高精度アルゴリズムの実装
- RI法による風速の推定
  - 高速計算アルゴリズムの開発・実装中

# MUレーダーを用いた DDMA-MIMO観測結果

Tomoya Matsuda, Hiroyuki Hashiguchi  
Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

- 研究の背景
- MIMOレーダーとは
- MIMOレーダーの原理
- MIMOとSISOの受信強度の違い
- MIMOレーダーの送信方法
- MUレーダーを用いたDDMA-MIMO
- 観測結果
- まとめ、今後の課題

## 研究の背景

### 【気象レーダーのフェーズドアレイ化】

昨今の局地的大雨や竜巻等突風の被害の基大化→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




### 【フェーズドアレイ気象レーダーの実用化に向けた課題】

・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  
・レーダーに必要なとされる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

## MIMOレーダーとは

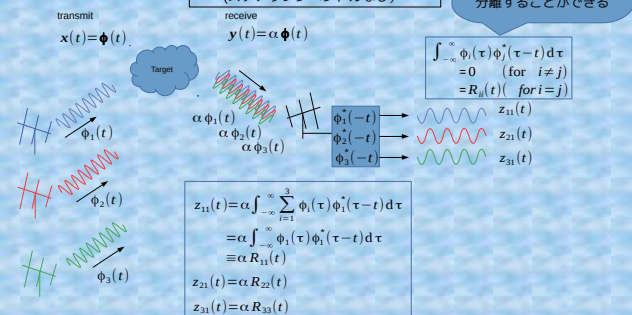
- 直交性(Orthogonality)のある複数の送信信号を同時に送信し、複数の受信機で受信
- 送信信号を同一と見なすことにより受信仮想開口を形成(Virtual array)
- 仮想開口は実際のアンテナサイズより大きい=物理開口よりも狭いビーム幅を形成できる
- 角度分解能を保ったまま物理開口を小さくすることも可能=コスト削減に寄与

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 (大気レーダーで唯一MIMO処理可能なシステム)
Image			

## MIMOレーダーの原理

送信アンテナ3、受信アンテナ1の場合  
(ステアリングベクトルなし)

送信信号が直交している = 送信信号間の相互相関はゼロ  
↓  
1つの受信機で送信信号を分離することができる



## MIMOレーダーの原理

送信アンテナ3、受信アンテナ3の場合  
(ステアリングベクトルあり)

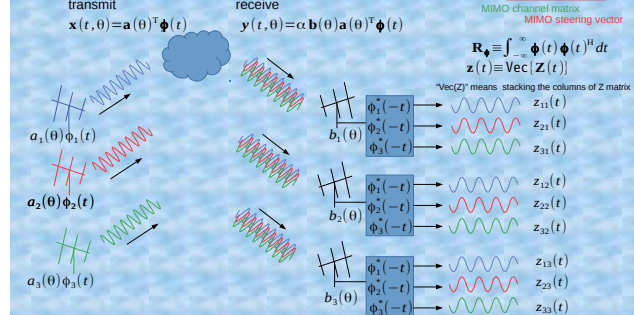
Signal processing  
 $Z(t) = \alpha \mathbf{b}(\theta) \mathbf{a}(\theta)^H \mathbf{R}_p(t)$

MIMO channel matrix  
MIMO steering vector

$$\mathbf{R}_p = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \phi(t)^H dt$$

$$\mathbf{z}(t) \equiv \text{Vec}\{Z(t)\}$$

\*"Vec(Z)" means stacking the columns of Z matrix



### MIMOレーダーの原理

例1 (送信=M=3,受信=N=3, 送受信同一アンテナ、一次元アレイ)

Steering vector (Ex.)

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

MIMO channel matrix

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

Diwak, M. S. MIMO radar, In: Mahan, W. L. and Schweg, J. A. (Eds.), Principles of Modern Radar, Advanced Techniques, Raleigh, NC, Sci-Tech Publishers, 2012, pp. 113-145.

MIMO virtual array

7

### MIMOレーダーの原理

例2 (送信=M=3,受信=N=3, 送信/受信アンテナ個別、一次元アレイ)

Steering vector (Ex.)

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} \exp(-jk d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 7 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix} \quad b(\theta) = \begin{bmatrix} \exp(-jk 3 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 5 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix}$$

MIMO channel matrix

$$b(\theta) a(\theta)^T = \begin{bmatrix} \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 7 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 10 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 5 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 8 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 11 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 6 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 9 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 12 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix}$$

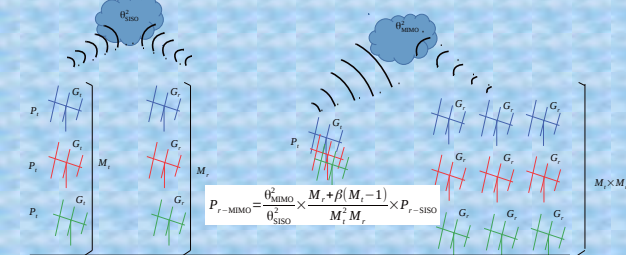
Diwak, M. S. MIMO radar, In: Mahan, W. L. and Schweg, J. A. (Eds.), Principles of Modern Radar, Advanced Techniques, Raleigh, NC, Sci-Tech Publishers, 2012, pp. 113-145.

MIMO virtual array

8

### MIMOとSISOの受信強度の違い

Item	SISO	MIMO
Power	$P_t \times M_t$	$P_t$
Tx Gain	$G_t \times M_t$ (Maximum)	$G_t$
Target Volume	$V \times \theta_{SISO}^2$	$V \times \theta_{MIMO}^2$ (Received beam)
Rx Gain	$G_r \times M_r$ (Maximum)	$G_r \times (N_r + \beta(M_r - 1))$ (Maximum) ( $1 < \beta < M_r$ )
Pf	$P_{r-SISO} \propto P_t G_t G_r M_t^2 M_r \theta_{SISO}^2$	$P_{r-MIMO} \propto P_t G_t G_r (M_t + \beta(M_t - 1)) \theta_{MIMO}^2$



単純比較ではMIMOレーダーは受信感度は悪化→プロドビーム送信、DBF受信のシステムの方が観測性が高い

9

### MIMOレーダーの送信方法

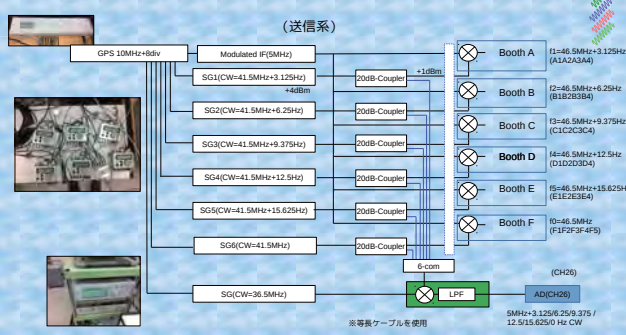
方式	Time division multiple access (TDMA)	Frequency division multiple access (FDMA)	Doppler division multiple access (DDMA) =Fast-time MIMO	Code Division multiple access (CDMA)
長所	・高い直交性を確保 ・ハードウェア構築が容易	・高い直交性を確保	・高い直交性を確保 ・ハードウェア構築が容易	・適度な直交性 (パルス波形/送信信号の線形性に依存)
受入条件	・タイムロス ・相関時間の低下	・高いレンジサイドロープ ・ターゲ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

ナイキスト速度が確保しやすいVHF帯はDDMAが適している。

DDMAはMIMOレーダーでもすくに実現可能 (他の方法はシステムの改造が必要)

10

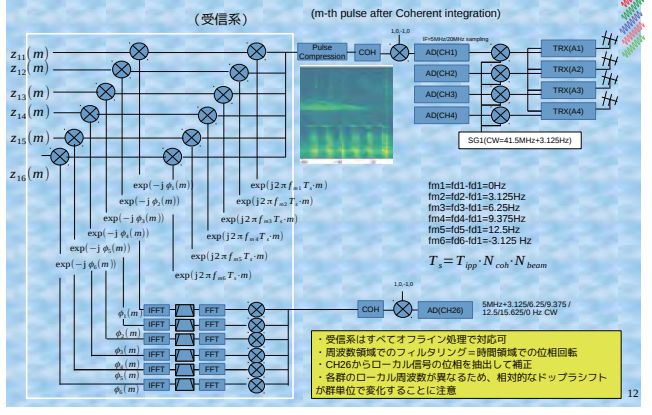
### MULレーダーを用いたDDMA-MIMO



送信系はすべてアナログで形成 (ケーブルはすべて等長ケーブルを使用)  
 ・シグナルジェネレータ (SG) 6台を用いてローカル周波数をわずかにずらすことで、パルス単位で直交信号群を形成  
 ・6種類の周波数位相差を正確に決めるため、ローカル信号をアナログ合成した後、システムに同期した受信機 (CH26) に取り込み、受信処理でそれぞれの位相を抽出する方式を考案した

11

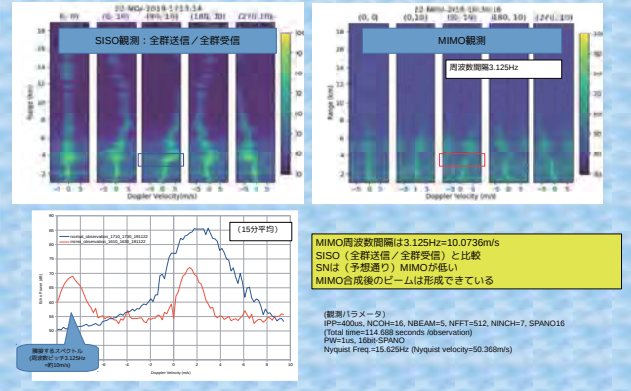
### MULレーダーを用いたDDMA-MIMO



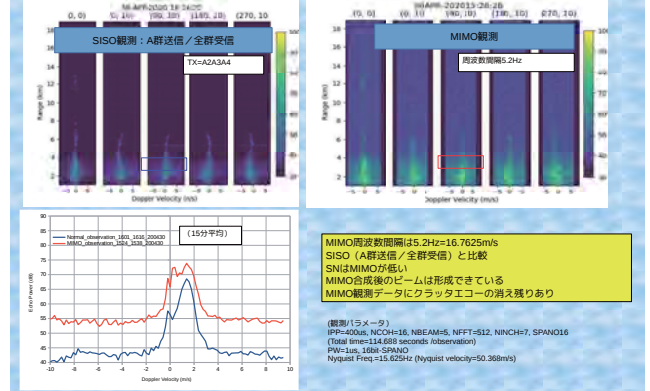
受信系はすべてオフライン処理で対応可  
 ・周波数領域でのフィルタリング=時間領域での位相回転  
 ・CH26からローカル周波数の位相を抽出して補正  
 ・各群のローカル周波数が異なるため、相対的なドップラシフトが群単位で変化することに注意

12

### 観測結果(2019/11/22)



### 観測結果(2020/4/30)



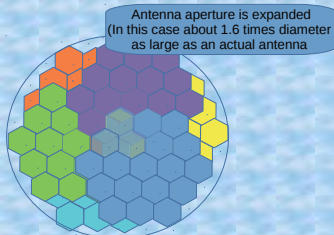
### Effect on MIMO radar

physical antenna aperture plane

MIMO virtual antenna aperture plane



TX's(6 transmit orthogonal waveforms)



RX's(6 x 19 received waveforms)

### まとめ

- ・ MIMOレーダーをMUレーダーに適用した。
- ・ 送信方法にDDMAを採用し、大気エコーに対しても適用可能であることを確認した。
- ・ 受信信号加算に重要となる、送信信号間の送信信号の位相差を補正するため、それぞれのローカル信号を同期した受信機で受信する方式を考案し、その効果を確認した。
- ・ SISO観測と定性比較を行った。

### 今後の予定/課題

- ・ 角度分解能向上に関する定量評価
- ・ SNに関する定量評価
- ・ クラッタエコーの多重受信等による劣化対応
- ・ 他方式の検討 (CDMA)
- ・ MIMO大気レーダー/気象レーダーへの適用理論まとめ



## 島根県におけるレーダー解析雨量と AMeDAS観測値との比較

下舞豊志・小林謙吾  
島根大学総合理工学部

2020年9月15日

1

### 研究の背景

#### 降水観測

鉛直方向の詳細観測

(GSMaP) 全地球的観測

GPM/DPR

+ 地上降雨レーダー

EAR MRR BLR

地上観測  
Rain Gauge, Disdrometer (ORG, LPM, Parsivel,...)

地上降雨レーダー観測精度について調べておきたい

2

### 背景と目的

解析雨量とAMeDASの年平均値比較  
全国的に解析雨量が過大評価  
(石崎、松山: 気象学会; 2017年春)

↓

島根県内で短時間比較してみたところ、  
**過大評価**と**過小評価**も多い?

↓

原因は??

3

### 使用データ

- 1kmメッシュ全国合成レーダーエコー強度GPV (レーダーで観測される換算降雨強度; 10分値)
- AMeDAS 降水量
- 2013 ~ 2017年

島根県内全観測地点の日降水量の  
平均値が10 mm 以上を対象

4

### 観測例

2017年7月9日 9時30分

2017年7月9日 9~10時

気象レーダー観測による  
降雨強度分布

AMeDAS観測による  
降水量分布

5

### 比較

降雨強度データの1時間平均を算出

↓

4個の格子点データから平均値を算出

↓

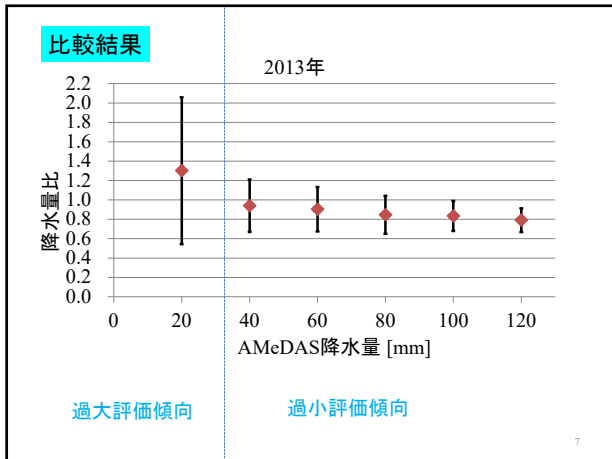
日積算降水量を算出

下記の比率を使用

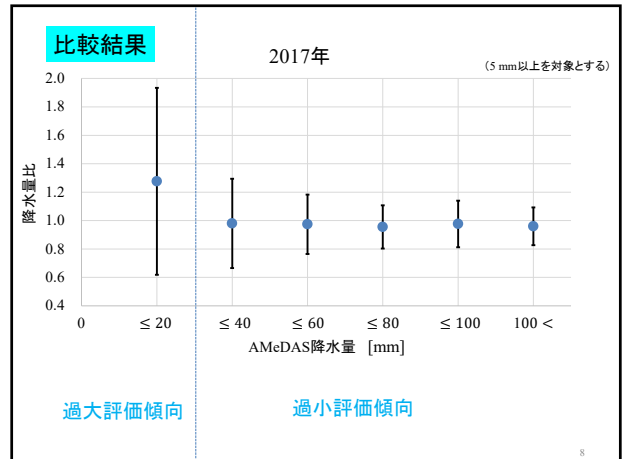
$$\text{降水量比} = \frac{\text{気象レーダ観測による日降水量}}{\text{AMeDAS観測による日降水量}}$$

● 降雨強度データ格子点  
● AMeDAS観測地点

6



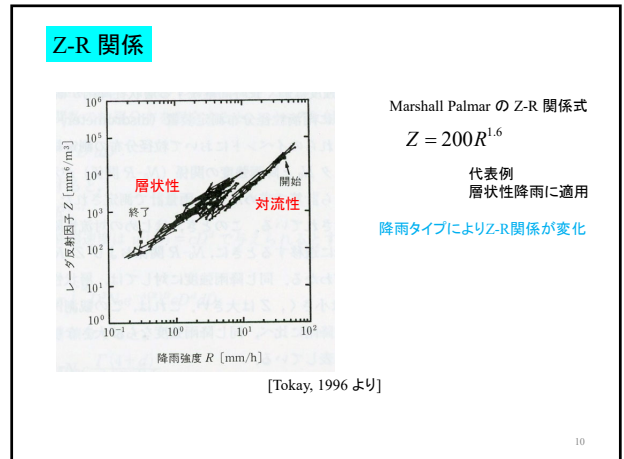
7



8

- ### 観測値の差の原因
- 物理的(空間的)な違い、時間的な違い  
 気象レーダー .. 散乱体積  
 AMeDAS .. 1地点、狭い領域  
 平均処理に注意
  - 地形(機器設置地点の局所的環境)の影響 ?
  - 想定DSD(Z-R関係)の違い

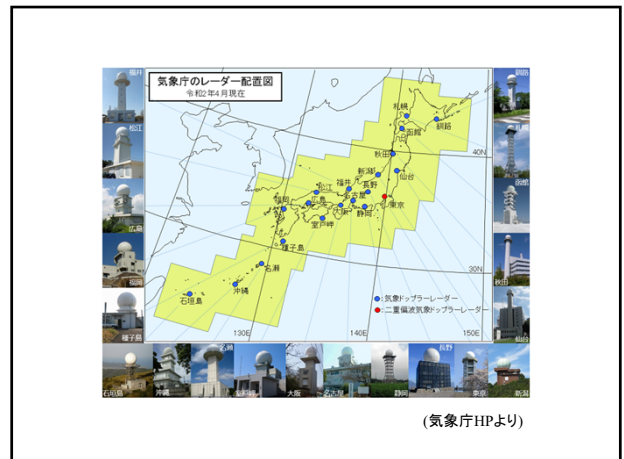
9



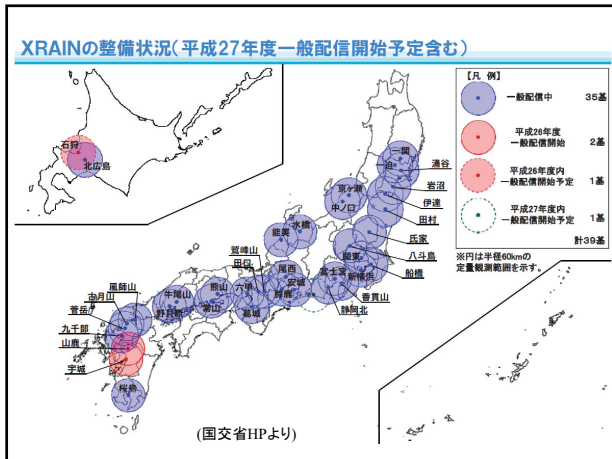
10

- ### 検討中の事項
- 気象レーダーネットワーク(気象庁)
- Cバンドドップラーレーダー(5.4 GHz)
  - 広範囲観測~約250 km レンジ
  - 全国をカバー
  - 単偏波のため Z-R 関係により降雨強度を推定
- 気象レーダーネットワーク(国交省)
- Xバンドドップラーレーダー(9.5 GHz)
  - 狭い範囲の観測~約60 kmレンジ
  - 都市域をカバー
  - マルチパラメーターレーダーのためR推定精度が高い
  - 強い雨の場合に降雨減衰に注意

11



12



13

**まとめ**

- レーダー解析雨量とAMeDAS観測結果の比較  
過大評価・過小評価
- 観測値の差の原因について検討中
- 今後、XRAIN 観測エリアを考慮した比較

**謝辞**

本研究は、京都大学21世紀COEプログラムの一環として収集された気象レーダーデータを使用して行いました。関係者に謝意を表します。

14

## 複数の航空機監視装置で受信される高頻度 気象情報のMURレーダー観測との比較検証

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 (ENRI)  
吉原貴之・瀬之口敦・毛塚敦・齋藤享・古賀禎

2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

1

## 内容

- 背景
  - 航空機の4次元航法と気象
- DAPs (Downlink Aircraft Parameters) データ
  - 航空機の動態情報: 大気温度、風向・風速の推定
- 複数の航空機監視装置
  - SSR (二次監視レーダー) モードS実験局
  - WAM (Wide Area Multilateration)
- 気象情報としての検証と活用
  - MURレーダー (MUR) データとの風速の比較検証
- まとめと今後の計画
  - 幾何学的高度の利用: 観測値としての気圧の利用
  - 長期データの解析と気象学的な活用に向けて

2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

2

## 背景: トrajekトリ管理に向けて 4次元航法に基づく航空機の運航と気象

時間を含めたGate-to-Gateの最適な飛行経路 (トrajekトリ) に基づく運航  
• GNSSの普及により航空機3次元位置、時間を正確に把握可能となった  
• 気象は到着予測時刻の正確性に影響

気象情報利用の2つの視点

- < ナウキャスト的利用 >  
航空機がもつ気象情報を短時間予測・検証して交通流制御等に利用
- < 数値モデルによる予測精度の向上 >  
観測の高度化  
→ 予測精度向上  
→ 高度化した気象予測情報をトrajekトリ予測に利用



2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

3

## DAPs (Downlink Aircraft Parameters) 航空機監視装置によるデータ通信機能

航空機毎への個別質問・応答、定型ショートメッセージ (地上側で種別指定可)

メッセージ種別 (255個, 56bit長)		義務化	
番号	内容	ELS	EHS
05	拡張スキット・位置		
10	データリンク能力通報	○	○
17	主要BDS能力通報	○	○
20	航空機便名	○	○
40	選択垂直方向意図 (MCP/FCU選択高度, 気圧設定値など)		○
44	気象通報・基本情報		
45	気象通報・ハザード情報		
50	経路および旋回通報 (ロール角, 真トラック角, 対地速度, 真トラック角変化率, 真対気速度)		○
60	機首方位および速度通報 (機首磁方位, 指示対気速度, マッハ数, 気圧高度変化率, 慣性垂直速度)		○

ダウンリンク情報から風向・風速、温度を推定可能

2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

4

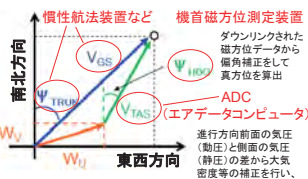
## 航空機の動態情報と気象情報の抽出 大気温度、風向・風速の推定

### (1) 大気温度の推定

マッハ数と真対気速度から、外気温を得る

$$T = \frac{1}{\gamma R} \left( \frac{V_{TAS}}{M} \right)^2$$

赤字のパラメータ:  
取得率が高い



### (2) 東西・南北風速の推定

① 国土地理院の磁気偏角の近似式を用いて磁方位を真方位に補正する

$$\psi_{HDG} = \psi_{MAG} - (D2015)$$

$$D2015 = 7^{\circ}57.201' + 18.750' \Delta\phi - 6.761' \Delta\lambda - 0.059' \Delta\phi^2 - 0.014' \Delta\phi \Delta\lambda + 0.579' \Delta\lambda^2$$

ただし、 $\Delta\phi = \phi - 37^{\circ}N$ ,  $\Delta\lambda = \lambda - 138^{\circ}E$

② 対地速度から真対気速度を差し引くことで、東西風速・南北風速を得る

$$W_x = V_{GS} \cdot \sin \psi_{TRUK} - V_{TAS} \cdot \sin \psi_{HDG}$$

$$W_y = V_{GS} \cdot \cos \psi_{TRUK} - V_{TAS} \cdot \cos \psi_{HDG}$$

重高他, "SSRモードS監視データを用いた気象予報データの評価解析", 第51回飛行機シンポジウム, 2013年11月.  
高橋他, "磁気図2015.0年値の作成", 国土地理院時報No.130, 2018年2月.

2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

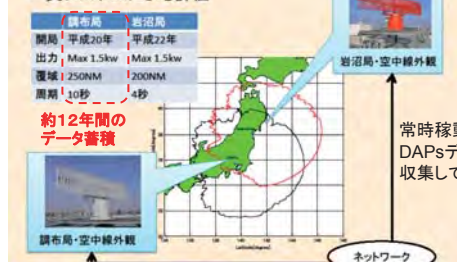
5

## 航空機監視装置(1)

SSRモードS (SSR-S) 調布実験局 (ENRI)

### 4. モードS実験ネットワーク

• 実システムによる評価



古賀他, "SSRモードSのネットワーク技術について", 第12回電子航法研究所研究発表会, 2012年

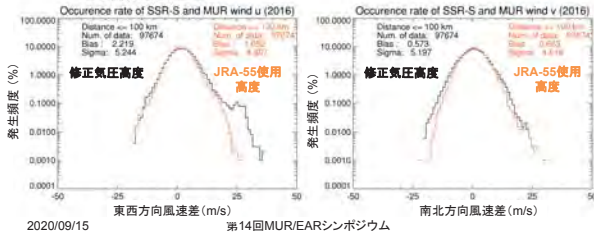
2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

6

## SSR-S: 風向・風速の検証と活用 MURレーダー(MUR)との比較検証(前回まで)

- 2014~2016年について、MURによる風速観測(対流圏・成層圏観測/標準)を真値として水平距離100km以内のデータで検証
- 東西風、南北風ともに良い相関が得られた
- 誤差特性と発生頻度分布
  - 2m/s程度のバイアス誤差成分の存在
  - 気象庁数値モデル再解析データ(JRA-55)による幾何高度の利用:分散は小さくなったがバイアス誤差は改善せず

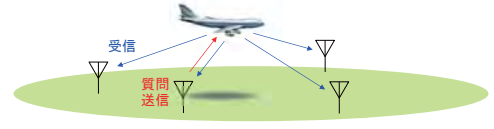


2020/09/15 第14回MUR/EARシンポジウム 7

## 航空機監視装置(2)

WAM(Wide Area Multilateration)

- 広域マルチラテレーション
  - 航空機から送信される信号(SSR応答信号、ADS-B信号)を複数の位置が既知である受信局で受信し、その時刻差から航空機位置を推定
  - 無指向性アンテナによるDAPs質問機能
- 国土交通省航空局が航空路における航空機監視のためにWAMを整備
  - 電子航法研究所は中部・近畿・瀬戸DAPsデータをご提供いただいている
    - MUR対流圏・成層圏観測(標準)期間(2020年4月以降)
  - SSR-S調布実験局によるDAPsデータと異なる点
    - MUR近辺でも比較的低高度まで取得(ただし、高度1.2km以上)
    - SSR-S調布実験局によるDAPsデータと異なる点
      - 風向・風速の推定に必要な航空機の動態情報に関連するメッセージ(40, 50, 60)の受信に時間差が存在(多くの場合は揃うのに10秒かかる)

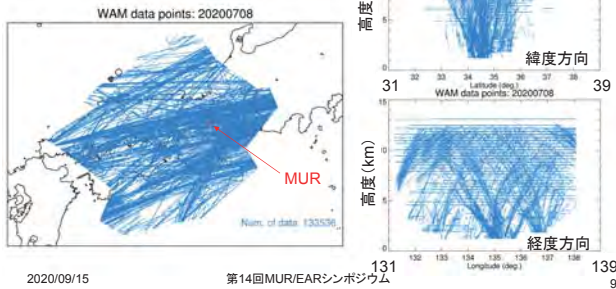


2020/09/15 第14回MUR/EARシンポジウム 8

## WAM: 風向・風速推定

データ分布: 2020年7月8日

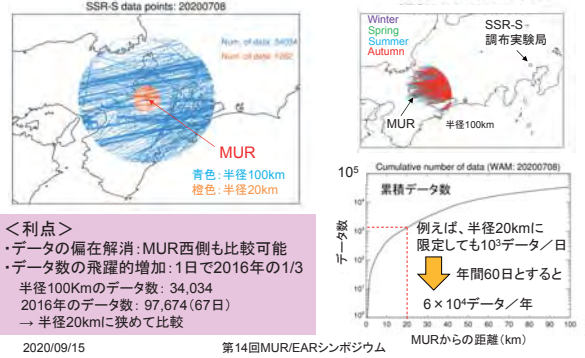
- 推定できたデータ数: 133,536
- 今後、処理方法(異常値の排除、補正)を改良予定



2020/09/15 第14回MUR/EARシンポジウム 9

## WAM: 風向・風速推定

データ分布(MUR周辺): 2020年7月8日①



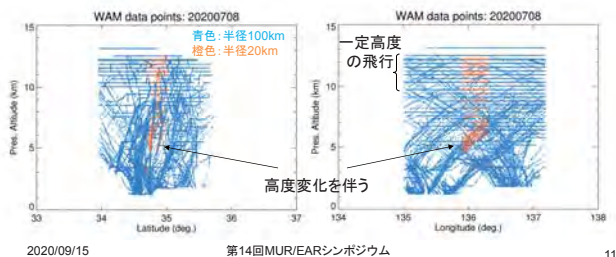
- <利点>
- データの偏在解消: MUR西側も比較可能
  - データ数の飛躍的増加: 1日で2016年の1/3
  - 半径100kmのデータ数: 34,034
  - 2016年のデータ数: 97,674 (67日)
  - 半径20kmに狭めて比較

2020/09/15 第14回MUR/EARシンポジウム 10

## WAM: 風向・風速推定

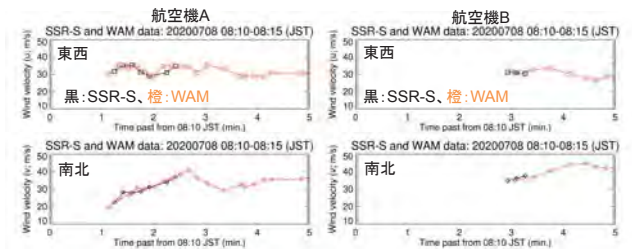
データ分布(MUR周辺): 2020年7月8日②

- SSR-S調布局よりも低高度まで取得
- 高度変化を伴うデータが含まれる: 誤差要因として要検討
  - メッセージ40, 50, 60の受信時刻差(代表値: 10秒)による影響
  - 対気速度に航空機の高さ方向の速度が影響
  - 今後、推定値への影響評価と補正方法についても検討する予定



2020/09/15 第14回MUR/EARシンポジウム 11

## SSR-S調布実験局とWAM 東西・南北方向の風速比較



- 2020年7月8日の2例(航空機A、航空機B)
  - それぞれ同一航空機のデータを比較
  - 今後、比較事例を蓄積してWAMデータの特性調査を行い、メッセージ受信時刻差の影響を受けないSSR-Sと同等な推定値のみを抽出するスクリーニング手法を開発する予定

2020/09/15 第14回MUR/EARシンポジウム 12



# WAMから推定した風向・風速とMURとの比較: 2020年7月8日(1)

- MURレーダー(MUR)データ
  - 対流圏・成層圏観測(標準)
- 比較手順
  - 水平方向: MURから半径100km, 20km以内のWAMデータを対象
  - 高さ方向: WAM風情報に近接する高度2点のMURデータの内挿(MUR風観測データの近接高度2点が欠損の場合は比較せず)
  - 時刻: WAM風情報に近接する時刻のデータ(±5分以内)と比較
  - WAMの風速推定値が150m/sを超えたデータは異常値として排除
- 航空機高度の算出方法
  - 今回は、気圧高度から変換した気圧と、信楽MUR観測所の気象観測値から計算される海面気圧、気温から修正気圧高度を算出
  - 今後、JRA-55の等圧面高度推定値で再計算する予定

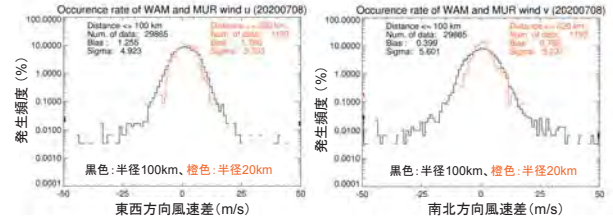
2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

13

# WAMから推定した風向・風速とMURとの比較: 2020年7月8日(2)

- 誤差の大きな推定値(異常値)の存在: 以下の要因が考えられる
  - メッセージ受信時刻差: 水平方向に異なる地点の動態情報を統合して推定することによる影響
  - 高度変化: メッセージ受信時刻差の影響、対気速度への航空機の高さ方向速度の混入
  - 異常値の発生している個別の時系列データを調査して原因を特定したい
- 半径20kmに限定した方が分散小を確認できたが、バイアス誤差大となった
  - 原因についてはデータ数を増やして調査する予定



2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

14

## まとめ

- 複数の航空機監視装置のDAPsから温度情報、風向・風速を推定
  - 従来のSSR-S調布実験局に加えて、WAMデータを利用
- WAMデータ
  - 利点: 領域拡大(MUR西側、低高度取得でデータ偏在の解消)、データ数飛躍的増加
  - 検討課題: 風向・風速の推定に必要なメッセージ(40, 50, 60)受信に時間差が生じることによる影響、高度変化の影響
  - 発展性: 高度変化の影響については、航空機の運動を補正して利用可能性を検討したい
- MURレーダーデータの風速を真値とした検証
  - 誤差の大きな推定値(異常値)が存在したが、今後、原因調査と補正、排除手法を検討
  - 半径20kmに限定した際にバイアス誤差が大きくなった。今後、昨年度までの結果と合わせて、航空機の飛行形態、型式、個体差等も考慮して調査する予定。
  - JRA-55の等圧面高度推定値で再計算する予定。
- 今後の計画
  - 幾何学的高度(GNSS高度、WAMIによる推定高度)の利用: 観測値としての気圧も利用
    - 観測時間、高度含む観測位置、気圧、温度、風向・風速のデータセット
  - 長期データの解析(一定高度を飛行する航空機)と、発展性(高度変化を伴う航空機)
- 2つの視点
  - 風情報を航空交通流制御に利用する運用概念の提案
  - 数値予報モデルの予測精度向上のための技術開発

2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

15

## 謝辞

- 本研究で用いた以下のデータをご提供いただきましたことに深く感謝を申し上げます
- WAMデータは国土交通省航空局交通管理部からご提供いただきました
  - MUR観測データは京都大学生存圏研究所からご提供いただきました
  - JRA-55データセットは京都大学生存圏研究所の生存圏データベースを通して気象庁から提供されたものを使用させていただきました

## 参考文献

- 重富他(2013), SSRモードS監視データを用いた気象予報データの評価解析, 第51回飛行機シンポジウム 3C03, 高松市, 2013年11月
- 瀬古他(2015), 航空機からのSSRモードSダウンリンクデータの同化実験(その1), 日本気象学会2015年秋季大会, 京都市, 2015年10月
- 瀬古他(2016), 航空機からのSSRモードSダウンリンクデータの同化実験(その2), 日本気象学会2016年秋季大会, 名古屋市, 2016年10月
- 高橋他(2018), 磁気圏2015.0年値の作成, 国土地理院時報No. 130, 2018年2月

2020/09/15

第14回MUR/EARシンポジウム

16