

第347回 生存圏シンポジウム

第11回
MUレーダー・赤道大気レーダー^{シナジー}
シンポジウム

平成29年9月7日・8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、完成当初の昭和 59 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。平成 16 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、また創立 100 周年を記念して新たに創設された電子情報通信学会マイルストーンにも選定された。本年 3 月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でき、受信感度が向上した。

一方、インドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に位置する赤道大気レーダー(EAR)は、平成 12 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。平成 13~18 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、平成 17 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plan「学術大型研究計画」(マスターplan 2014・2017) 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」(津田敏隆代表)が選定された。また、文部科学省のロードマップ 2014 に選定されたが、残念ながらロードマップ 2017 からは外れた。

本年 5 月には、第 15 回 MST レーダーワークショップが東京都立川市の国立極地研究所で開催された。18th EISCAT Symposium(主催: 国立極地研究所)と併催され、両ワークショップ/シンポジウムで 146 件の口頭発表(内、招待講演 31 件)及び 87 件のポスター発表が行われ、MU レーダー・赤道大気レーダーの研究成果について多くの発表が行われた。翌日には、ワークショップ参加の外国人 29 名が信楽 MU 観測所を見学した。

本年 9 月 7 日・8 日に、京都大学宇治キャンパスにおいて第 11 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。共同利用により得られた研究成果のほか、大気科学・レーダー工学に関する研究成果、計画について 23 件の研究発表があり、活発な議論が行われた。

平成 29 年 9 月

京都大学生存圏研究所
MU レーダー/赤道大気レーダー全国国際共同利用専門委員会
委員長 山本 衛

目 次

MU レーダー・赤道大気レーダー全国国際共同利用の現状	1
山本衛・橋口浩之(京大 RISH)	
ジャカルタ拡大首都圏における雷雨特性 －JALS2015 観測結果短報－	5
森修一・伍培明(JAMSTEC)・濱田純一(首都大/JAMSTEC)・Ardhi A. Arbain(東大 AORI/BPPT,Indonesia)・Sopia Lestari(メルボルン大 /BPPT,Indonesia)・Reni Sulistiyowati・Fadli Syamsudin(BPPT, Indonesia)	
全球水循環における熱帯沿岸降水による脱水作用	7
荻野慎也・山中大学・森修一(JAMSTEC)・松本淳(JAMSTEC・首都大)	
熱帯泥炭地社会へのレーダー気象学応用に関する展望	10
山中大学(JAMSTEC)・甲山治(京大 CSEAS)・大石哲(神大 RCUSS)・水野広祐(地球 研・京大 CSEAS)	
赤道ライダーにより観測されたケルート火山起源成層圏エアロゾルの鉛直輸送と EAR 鉛直 風の比較	13
阿保真・柴田泰邦・長澤親生(首都大)	
小型無人航空機と MU レーダーで観測された乱流エネルギー消散率の比較	16
橋口浩之(京大 RISH)・Hubert Luce(Toulon 大,仏)・Lakshmi Kantha・Dale Lawrence(Colorado 大,米)・Richard Wilson(LATMOS,仏)・津田敏隆・矢吹正教(京大 RISH)	
MU レーダー実時間アダプティブクラッター抑圧システムの開発	22
久保田匡亮・橋口浩之・山本衛・万城孝弘(京大 RISH)	
MU レーダーを用いたスペースデブリ形状・軌道推定に関する研究	25
池田成臣・鳥居拓哉・平田拓仁・山川宏(京大 RISH)	
Development of Software-Defined Multi-Channel Receiver System for the Equatorial Atmosphere Radar (EAR)	29
Nor Azlan Bin Mohd Aris・Hiroyuki Hashiguchi・Mamoru Yamamoto(京大 RISH)	
EMU(赤道 MU)レーダー計画の現状について	33
山本衛・橋口浩之(京大 RISH)・津田敏隆(京大 RISH/ROIS)	
気象学と超高層物理学の研究協力はどうすべきか	36
加藤進(京大名誉教授)	
赤道域 Ku 帯衛星回線の降雨減衰特性の年変動について	39
前川泰之・西村優・柴垣佳明(大阪電通大)	
MRR 観測に基づくブライドバンドの等価レーダ反射因子と雨滴の落下速度および平均粒 径の関係	45
米江泰貴・下舞豊志(島根大)	
ELF-VLF 帯電界計測網に基づいた関東圏における雷活動の電気的特性の評価	51
山下幸三(足利工大)・高橋幸弘(北大)	

第 IX 期南極重点研究観測 AJ0901「南極大気精密観測から探る全球大気システム」の概要	55
佐藤薰(東大院理)・堤雅基(極地研)・佐藤亨(京大院情報)・中村卓司(極地研)・齊藤昭則(京大院理)・富川喜弘(極地研)・西村耕司(極地研)・高麗正史(東大院理)・橋本大志(京大院情報)	
航空機監視レーダ (SSR モード S) から得られる気象観測情報の特性評価について	58
吉原貴之・瀬之口敦・毛塚敦・齋藤享・古賀禎(ENRI)・古本淳一(京大 RISH)	
GEONET に基づく 3 次元電離圏トモグラフィーの現状	62
水野遼・山本衛(京大 RISH)・斎藤享(電離航法研)・齊藤昭則(京大理)	
リアルタイム電離圏トモグラフィーの MU レーダー非干渉散乱観測による検証	66
斎藤享(電子航法研)・山本衛(京大 RISH)・齊藤昭則(京大理)	
衛星地上ビーコン観測による電離圏全電子数の自動解析手法の開発	69
坂本悠記・山本衛(京大 RISH)・Kornyanat Hozumi (NICT)	
Study of travelling ionospheric disturbances in the European and Japanese longitudinal sectors with Kharkiv incoherent scatter and MU radars	72
Sergii Panasenko(Institute of Ionosphere, 名大 ISEE)・Yuichi Otsuka(名大 ISEE)・Mamoru Yamamoto(京大 RISH)・Igor F. Domnin(Institute of Ionosphere)	
観測ロケット S-520-27 号機による電場観測データの再解析	76
西田圭吾・山本衛(京大 RISH)・石坂圭吾(富山県立大)・田中真(東海大)	
Local HF radio propagation simulator	79
Kornyanat Hozumi (NICT)	
新しい衛星=地上ビーコン観測用の 4 周波デジタル受信機の開発状況	82
山本衛(京大 RISH)	
数値シミュレーションと赤道大気レーダー観測によるプラズマバブル上昇速度の推定	86
横山竜宏(NICT)・S. Tulasi Ram・K. K. Ajith(IIG, India)・山本衛(京大 RISH)・K. Niranjan(Andhra Univ., India)	

MU レーダー・赤道大気レーダー全国国際共同利用の現状

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。

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インドプロファイラ(LQ-7)は、気象庁の全国 33 力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。

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/>)。

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。本研究計画は、さらに文部科学省のロードマップ 2014 にも選定されたが、これまでに予算化には至らなかった。今回見直されたロードマップ 2017 には残念ながら選定されなかった。

4. 共同利用の概要と今までの推移

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。2016 年度には、キャンペーン(長期間)観測課題として、前期に Kantha 氏代表の「Shigaraki UAV Radar Experiment (ShUREX 2016)」を、後期に佐藤薰氏代表の「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「生存圈データベース共同利用」の一環として共同利用に供している。

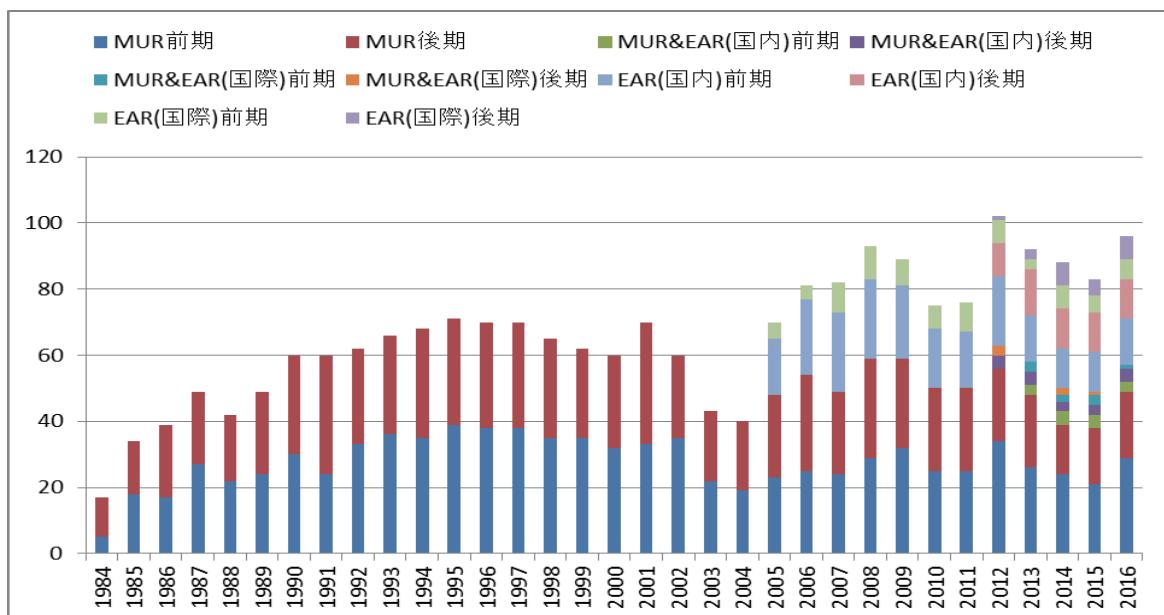


図 1. MU レーダー・赤道大気レーダー全国国際共同利用の課題件数の年次推移

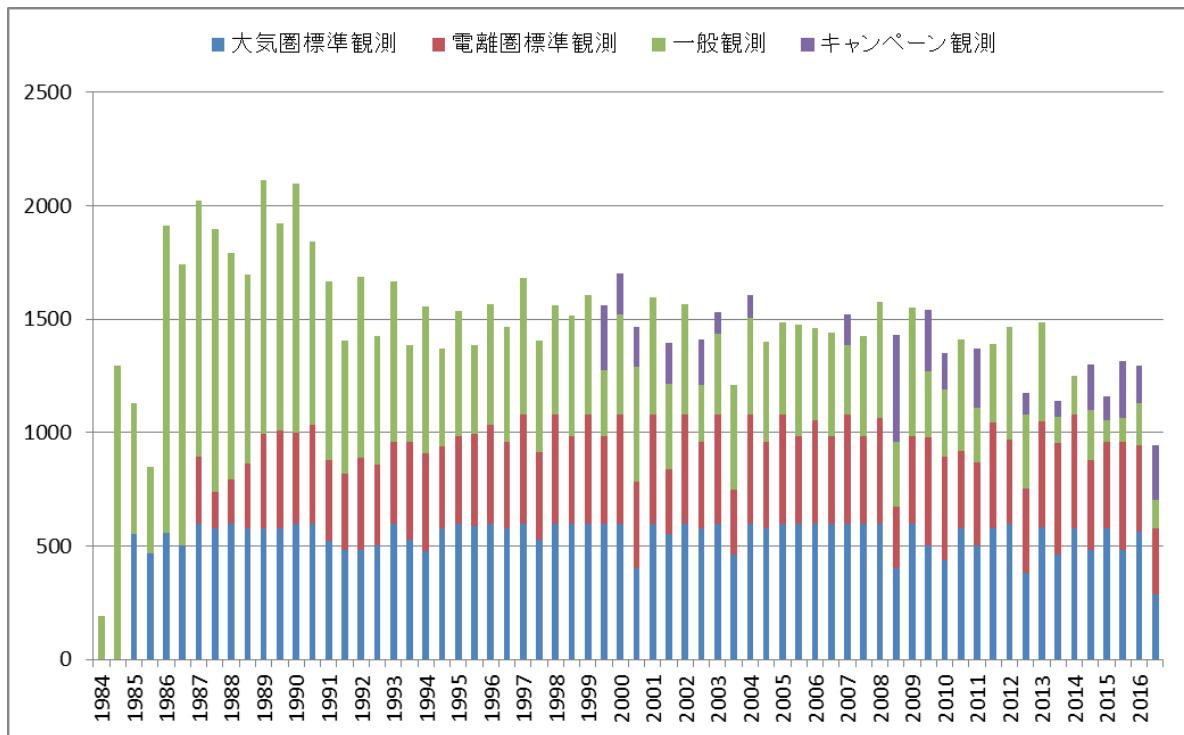


図2. MU レーダー全国国際共同利用の観測時間の半年毎の推移。

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、平成 19 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(国際科学会議)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。

5. MST レーダーワークショップの開催

第 15 回 MST レーダーワークショップ(正式名称: 15th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar)が、5 月 26~31 日に東京都立川市の国立極地研究所にお

いて開催された。本ワークショップは大気レーダーに関する最新の科学技術について、研究成果の発表ならびに情報・意見交換することを目的として、第1回が1983年に米国で開催され、その後2~3年毎に各国で開催されてきた。第4回を1988年に京都大学超高層電波研究センター(現 生存圏研究所)主催で京都で開催されて以来、今回は29年ぶりの日本での開催である。

本ワークショップは、世界10数カ所に存在するMST/IS レーダーに関する研究者が一堂に会する唯一の国際会議であり、科学的成果だけでなく、ハードウェア・信号処理など工学技術までをもカバーすることが特色の一つである。前回より、ワークショップで扱う範囲がIS レーダーによる電離圏研究にも拡大されており、今回は18th EISCAT Symposium(主催: 国立極地研究所)と併催し、両ワークショップ/シンポジウムで計15のセッション(内、6つの合同セッション)を設け、146件の口頭発表(内、招待講演31件)及び87件のポスター発表が行われた。参加者は19カ国から計182名(国外120名、国内62名)であり、参加機関は計84(国外66、国内18)であった。両ワークショップ/シンポジウムにおける、過去最多の参加者を記録した。

オプショナルツアーとして、ワークショップ翌日(6月1日)に信楽MU観測所MU レーダーの見学ツアーを開催し、29名(すべて外国人)の参加を得た。また、6月2日にも会議に参加していたCraig Heinselman EISCAT(欧州非干渉散乱レーダー)科学協会長らが信楽 MU 観測所を来訪した。

Lightning Characteristics over the Greater Jakarta, Indonesia

— Short Report of JALS2015 Observation —

Shuichi Mori¹(morishu@jamstec.go.jp), Peiming Wu¹, Hamada Jun-Ichi^{1,2},

Ardhi A. Arbain^{3,4}, Sopia Lestari³, Reni Sulistyowai^{3,5}, and Fadli Syamsudin³

⁽¹⁾JAMSTEC, ⁽²⁾Tokyo Metropolitan Univ., ⁽³⁾BPPT, ⁽⁴⁾AORI/Tokyo Univ., ⁽⁵⁾Melbourne Univ.

1. Introduction

- + Lightning frequency over Indonesian Maritime Continent (IMC) is quite high (Petersen and Rutledge 2001, Christian et al. 2003, Takayabu 2006, etc).
- + In particular, Bogor (south of Jakarta) had 322 days of lightning in one year (Guinness Book in 1988).
- + Lightning causes serious damage on nature and society over the IMC; forest fire, power outage, inrush/surge currents on many kinds of electronics.
- + Clarify lightning climatology and meso-scale characteristics of lightning (thunderstorm) over the IMC, in particular over Jakarta where social damage is quite serious.

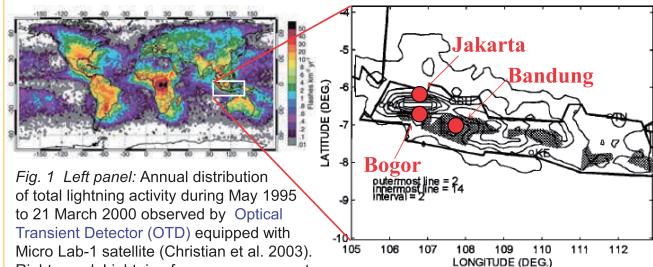
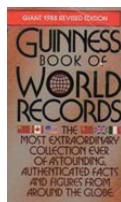


Fig. 1 Left panel: Annual distribution of total lightning activity during May 1995 to 21 March 2000 observed by Optical Transient Detector (OTD) equipped with Micro Lab-1 satellite (Christian et al. 2003). Right panel: Lightning frequency over west Java Island, Indonesia, observed with surface VLF receiver network. (Hidayat and Ishii 1998).

2. Data and Methodology

- + Spatial and temporal variation of lightning around Jakarta are presented based on BMKG (Indonesian Agency for Meteorology, Climatology, and Geophysics) operational surface (SYNOP) and satellite (TRMM/LIS) observations.
- + Diurnal, intraseasonal, and interannual variations of lightning and their relation to topography, namely elevation and/or proximity to coastline, were analyzed over Jakarta and the whole Indonesian region.
- + Meso-scale structure and regional variations of lightning and rainfall were analyzed during a campaign observation during 05-18 February 2015 over Jakarta by using a dual-polarimetric radar (DPR) and intensive soundings incl. HYdrometeor VVideo Sondes (HYVISs).

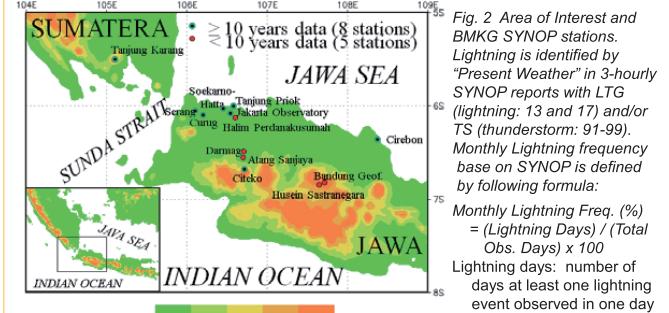


Fig. 2 Area of Interest and BMKG SYNOP stations. Lightning is identified by "Present Weather" in 3-hourly SYNOP reports with LTG (lightning: 13 and 17) and/or TS (thunderstorm: 91-99). Monthly Lightning frequency base on SYNOP is defined by following formula:
Monthly Lightning Freq. (%) = (Lightning Days) / (Total Obs. Days) x 100
Lightning days: number of days at least one lightning event observed in one day

3. Seasonal March and Variation with MJO Phase

- + All station has 13 years observation data, except for Jakarta observatory (12 years) and Tj. Priok (11 years). Lightning frequency affected much by local conditions, e.g. topography, proximity to sea.

Seasonal March

- + Stations at higher elevation (mountainous region) has frequency peaks in November and April. Whereas, those at low elevation (coastal region) have peaks in November, February and April. Lightning events are more frequent over inland than coastal region.
- + The highest frequency of lightning events is occurred just before and after the peak of rainy season (boreal winter) over inland region. Meanwhile, coastal region has the most frequent lightning during the peak of rainy season probably affected by Cross Equatorial Monsoon Surge (Hattori et al. 2011).

Variation with MJO Phase

- + Lightning frequency increases much while active MJO occurred over Indian Ocean (phase 3), and it gradually decreases during the period MJO's passing over the IMC (Phase 4 and 5) followed by a 2nd peak at Phase 7, which is consistent with results of Morita et al. (2006).

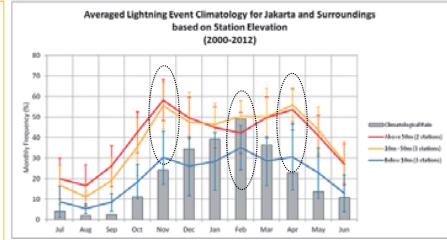


Fig. 3 Seasonal march of lightning frequency (lines) and monthly rainfall (bars) around Jakarta as depicted in Fig. 1. Stations for lightning frequency are divided into three categories by their site elevation:
Above 50 m (red, 2 stations)
50 – 10 m (yellow, 3 stations)
Below 10 m (blue, 3 stations)

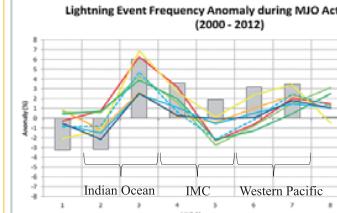


Fig. 4 Variation of lightning frequency (lines) at each station and rainfall (bars) with MJO active phase based on Real Time Multivariate MJO Index. They are depicted as anomaly value:
Lightning Freq. Anomaly (%) = (Lightning Freq. at each MJO Phase – Averaged Freq. during all MJO phases) x 100

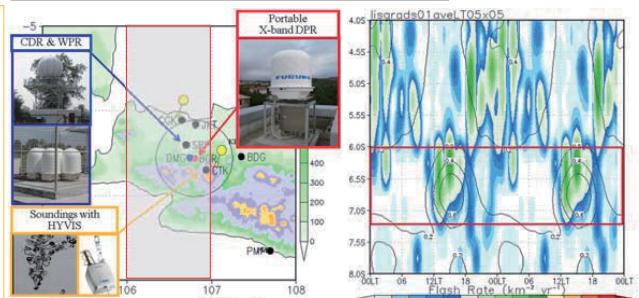


Fig. 5 Observation network over Jakarta during campaign observation in February 2015 (top left panel). Climatological view of diurnal variation of lightning flash rate observed with LIS/TRMM (colors) and GSMap rainfall (lines) over the shaded rectangular in the top left panel (top right panel). Area of rectangular in red line shows land region over the west Java Island. Day to day variations of surface rainfall and lightning reports during the campaign period (bottom left panel).

3. Preliminary Results: Campaign Observation in 2015

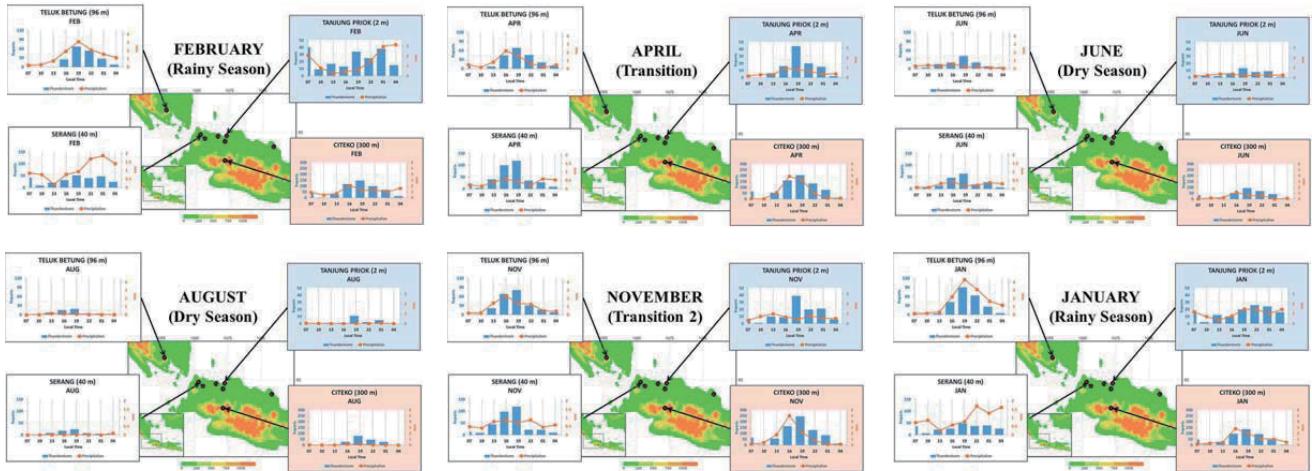
- + Lightning were frequently occurred in the afternoon to evening (night to early morning) over land (coastal sea) region as expected.
- + Lightning over land migrated from inland (mountainous side) to coastal region from afternoon to evening (sunset time). Whereas, those over coastal sea showed broad extent throughout the night.
- + Rainfall peaks followed the lightning events with a few hours, however, quantitative relation between them has not been cleared, yet.
- + Whereas, diurnal variation (DV) of lightning activity was much active a few days prior to the date of rainfall DV was maximum (figures not shown). It is also an open question should be investigated in next step.

4. Future Work

- + The study should be extended into the whole Indonesian region to clarify the lightning climatology over the IMC (see supplement figures).
- + Satellite (OTD and LIS/TRMM) and ground based remote sensing (WWLLN, GLD360, etc.) data should be examined more in detail.
- + Future study in particular to examine DP radar data obtained during the campaign observation in 2015 should be continued.

Supplementary Figures

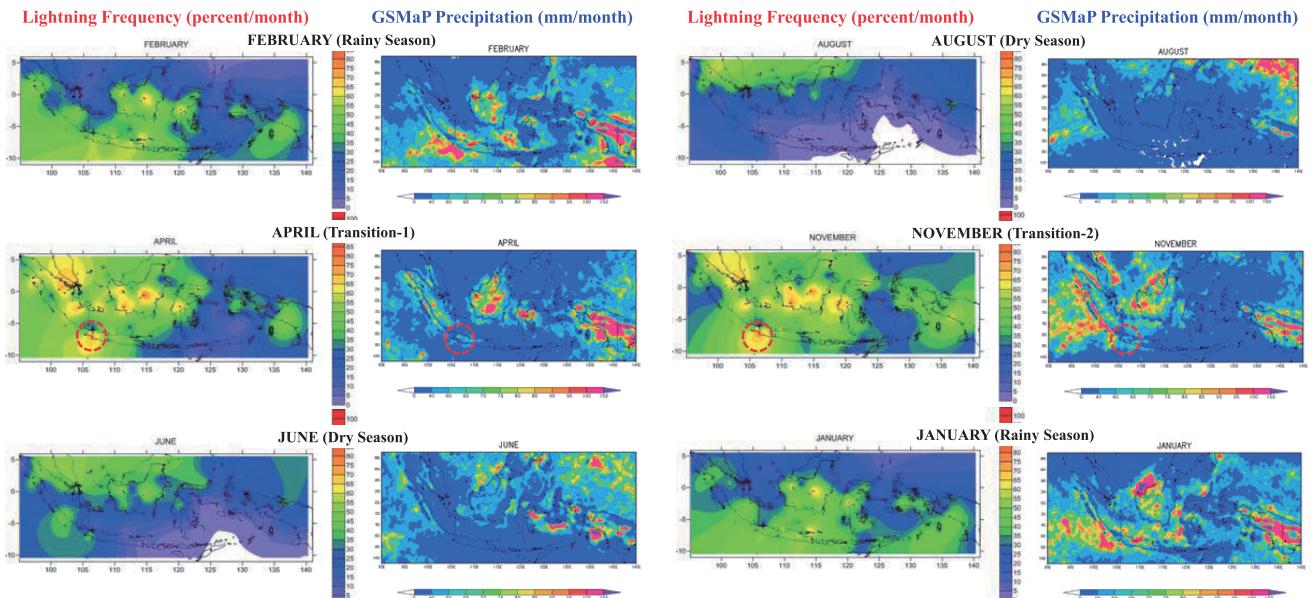
Diurnal Variation of Lightning and Precipitation and their Seasonal March



Seasonal variation affected the number of thunderstorm occurrences, but the daily pattern is affected much by diurnal cycle. The location has significant effect to the thunderstorm diurnal variation

Spatial Distribution of Lightning Report and Its Seasonal March

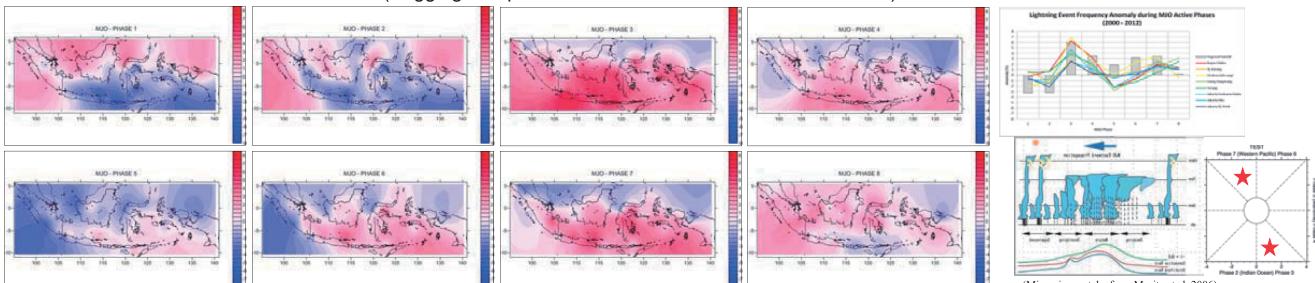
(Krigging interpolation of 96 SYNOP stations in Indonesia)



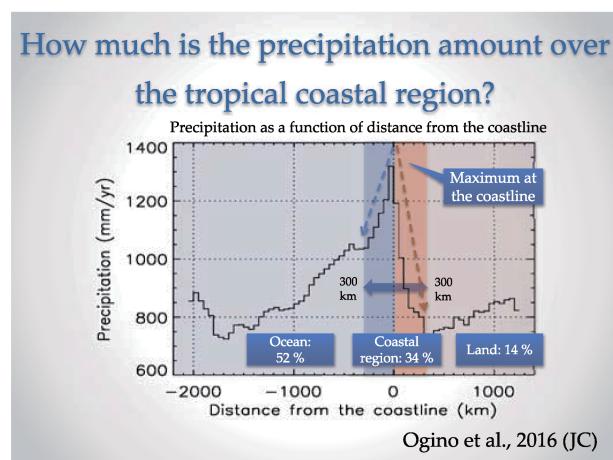
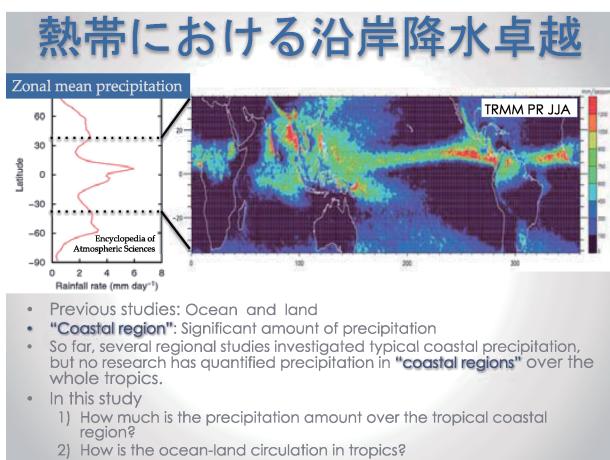
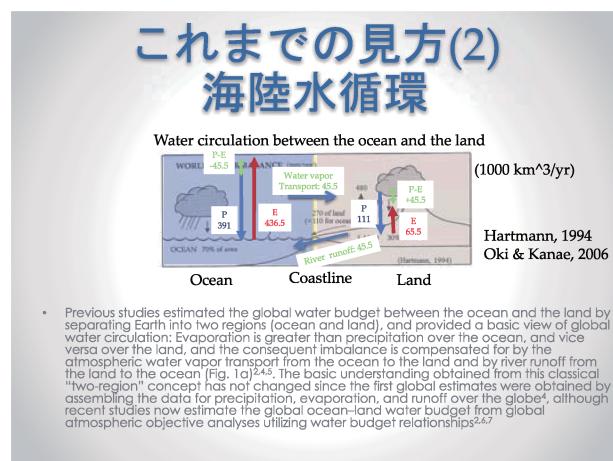
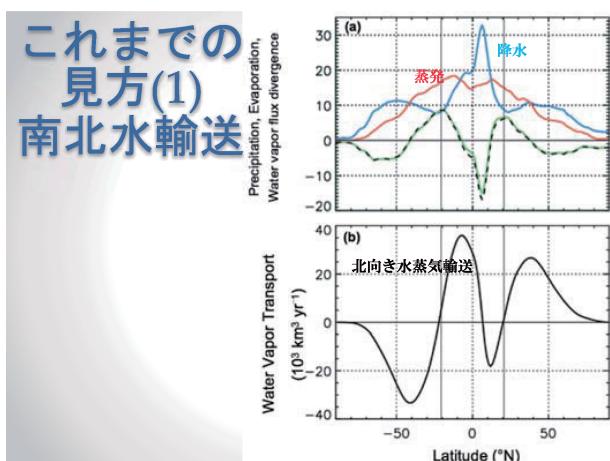
Seasonal march affected the thunderstorm occurrence over Indonesian maritime continent. Highest thunderstorm frequency observed in **April** and **November**, which were the transition between wet and dry season.

Spatial Distribution of Lightning Anomaly Variation with MJO phases

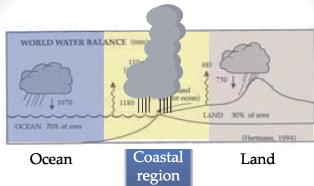
(Krigging interpolation of 96 SYNOP stations in Indonesia)



Positive anomaly (Increase of lightning frequency) mostly observed during MJO **phase 3 (eastern Indian ocean)** and **phase 7 (eastern Pacific Ocean)**.



目的

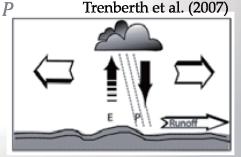


- Re-examine the ocean-land water circulation taking into account tropical coastal precipitation

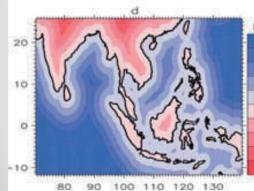
データ

- JRA-55 column integrated water vapor flux \vec{Q}
 - climatological mean for 30 years from 1981 to 2010
- Divergence $\nabla \cdot \vec{Q}$ at each grid
$$\nabla \cdot \vec{Q} = \frac{1}{a \cos\varphi} \left(\frac{\partial Q_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{\partial Q_\varphi \cos\varphi}{\partial \varphi} \right)$$
- Precipitation P diagnosed in the JRA-55 model
- Evaporation E estimated from the water budget relation

$$\nabla \cdot \vec{Q} = E - P$$



海岸線からの距離



- Elevation data: GLOBE (The Global Land One-km Base Elevation; Hastings et al. 1999)
 - $30^\circ \times 30^\circ$ (original) $\rightarrow 4 \text{ min} \times 4 \text{ min}$
- Defined
 - Coastline
 - Distance from the coastline (DFC) for each JRA-55 data cell

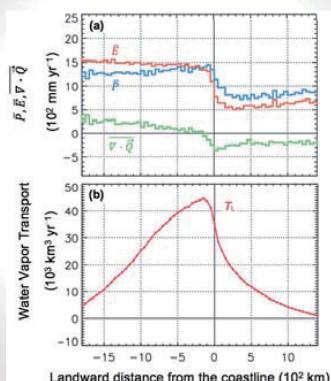
DFC variation of $\nabla \cdot \vec{Q}$, P , and E

- Divide the JRA-55 grid cells into every-50-km DFC bins
- Calculated the surface integrals of $\nabla \cdot \vec{Q}$ in each DFC bin: area-integrated $\nabla \cdot \vec{Q}$ (referred to as $\langle \nabla \cdot \vec{Q} \rangle$) as a function of DFC
- $\langle \nabla \cdot \vec{Q} \rangle$ was further divided by the total area of the grid cells in each DFC bin: area-averaged value $\bar{\nabla} \cdot \vec{Q}$
- \bar{P} and \bar{E} were obtained with the same manner

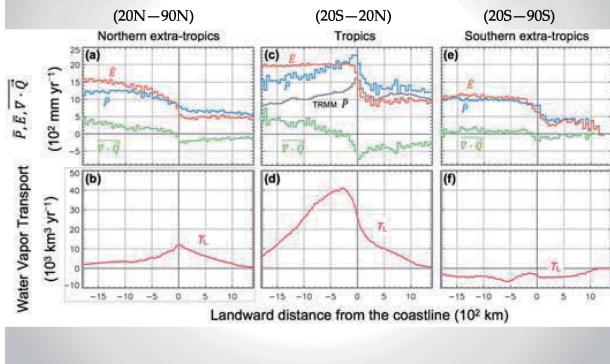
陸向き水蒸気輸送 T_L

- $\langle \nabla \cdot \vec{Q} \rangle$ is equal to the outflux of the water vapor from the area in each DFC bin both to the smaller DFC bin and to the larger DFC bin (Q_{DFC}) (according to the two-dimensional Gauss's theorem).
- By taking the summation of $\langle Q_{DFC} \rangle$ from the minimum DFC bin (the far edge of the ocean) to every DFC, we obtained the landward water vapor transport, T_L , as a function of DFC.

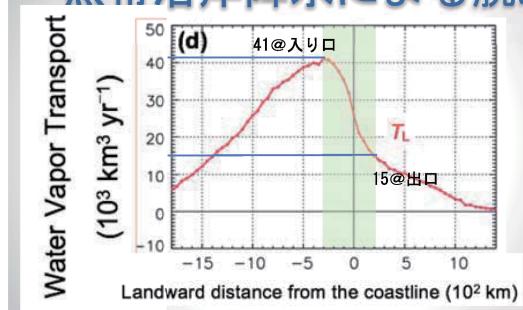
結果： 全球



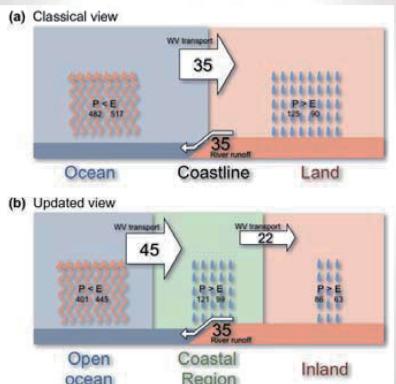
結果：中高緯度 VS 热帯



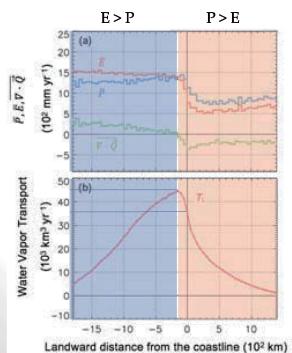
热帯沿岸降水による脱水



まとめ：新たな水循環像

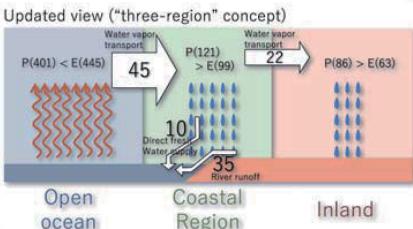


水蒸気輸送の観点からは 中心は沿岸入り口



海洋の塩分

- 淡水供給に伴う海洋塩分の変動は、海水の密度の鉛直・水平傾度の変動を介して、海洋力学場に影響を与える。
- 沿岸域における塩分は、主として河川からの淡水供給によって低く保たれていると考えられてきた。
- 本研究では、沿岸海側の降水による淡水供給が河川流出に匹敵する量であることを示した。
- 沿岸海側で供給される淡水は以下の点で、河川流出によるものと異なるため、沿岸域の循環場や生態系の理解において重要である。(1) 供給が河口に限局されない。(2) 純粋な水である。栄養塩や沈殿物、汚染物質等を含まない。(3) 時間に連続しておらず、間欠的である。

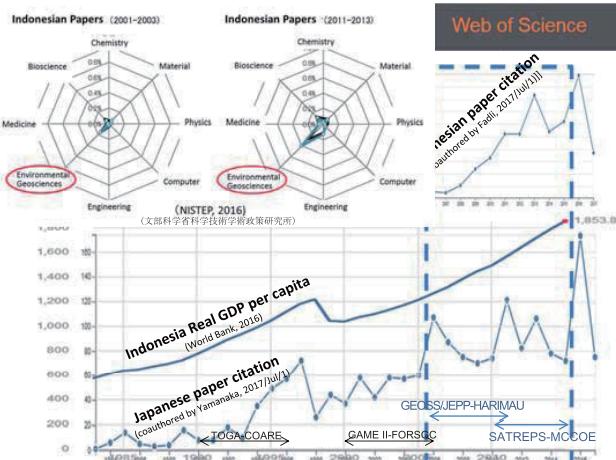
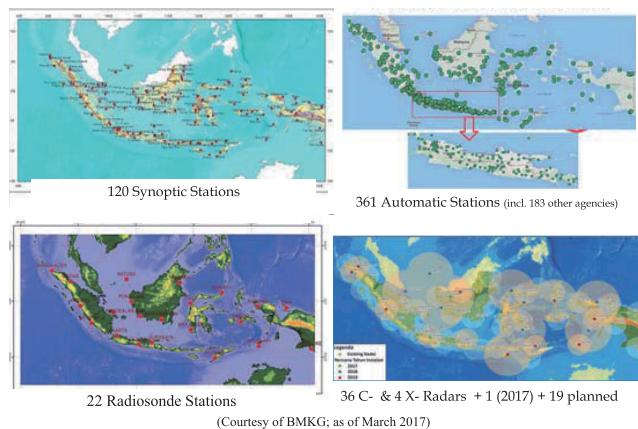


熱帯泥炭地社会へのレーダー気象学応用に関する展望

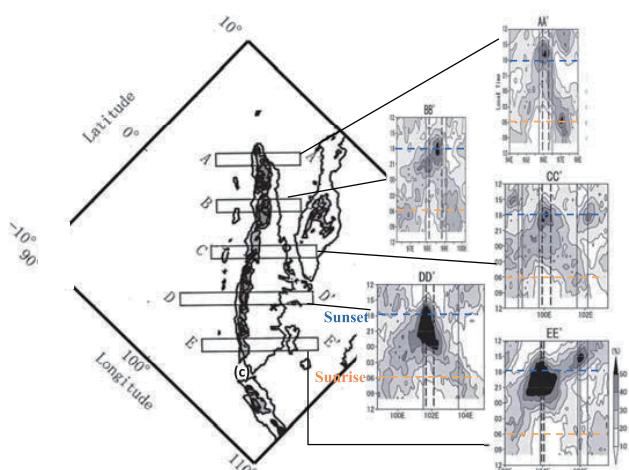
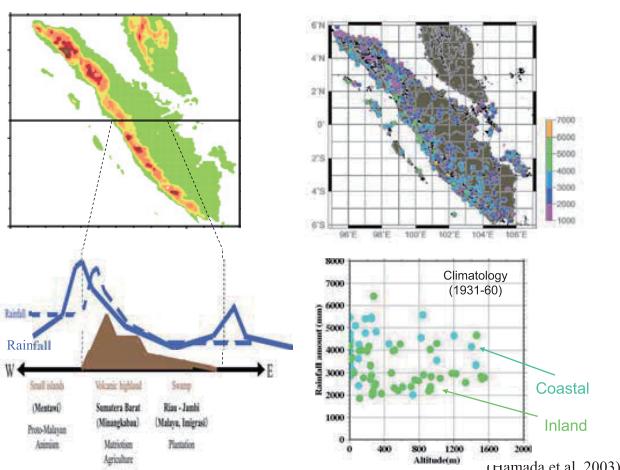
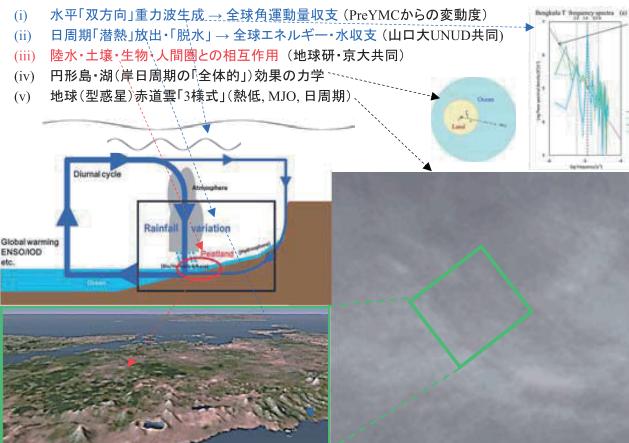
中山大学(JAMSTEC)・甲山治(京大CSEAS)・大石哲(神大RCUSS)
・水野広祐(地球研・京大CSEAS)



G20国に相応しい現業観測網が構築されつつある



「地球システムにおける」赤道上海大陸海岸線地帯の意義



Toward the Regeneration of Tropical Research Network on Paludiculture

熱帯泥炭社会プロジェクト全体について 水野広祐（プロジェクトリーダー）	
企画研究チームによる発表 ○佐藤百合	
農村社会経済チームによる発表 ○水野広祐、安部龍一郎、梶田謙介、細削倫子	
国際比較研究チームによる発表 ○内藤大輔、鶴島弘光、佐々木勝教	
大気・水文観測チームによる発表 ○甲山悟、戸野倉賀一、松見豊、山中大学、川崎昌博	
物質循環チームによる発表 ○伊藤雅之、平野高司、塙寺さとみ	
水野 広祐 総合地球環境学研究所助教授／京都大学東南アジア研究科 レジリエンスチームによる発表 ○嶋村鉄也	
サブリーダー 氏名 所属 甲山 治 京都大学東南アジア地域研究研究所客員教授	
統治チームによる発表 ○岡本正明、長谷川拓也、亀田幸典	

Epilogue (4): Interdisciplinary approach

熱帯泥炭地域における災害と大気・水文観測

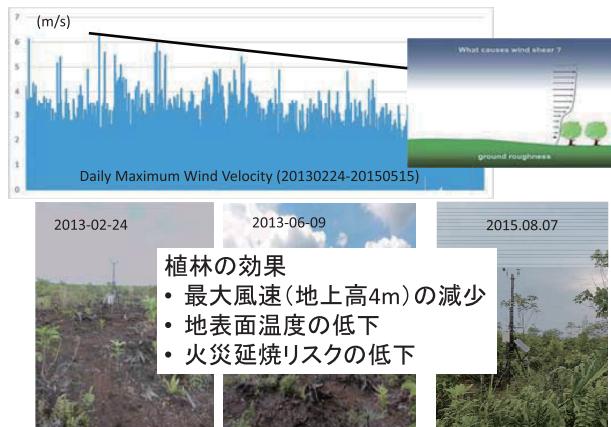
かつて……泥炭湿地は農耕に不向きな土地
現在……排水により、利用可能な対象へとなつた。
しかしながら、泥炭地生態系は人間干渉に対し不可逆的

今日の深刻な泥炭火災をもたらした要因:

- 1) 泥炭湿地林が人間による干渉に対して大変脆弱な生態系
- 2) 泥炭地社会は社会資本蓄積が少なく、実効支配のない国家管理地域であり、社会制度的にもきわめて脆弱
- 3) 熱帯泥炭社会を環境脆弱社会と考え「熱帯泥炭プロ」をすすめつつ「降水変動、災害とりスク管理（甲山研究）」の議論を進める

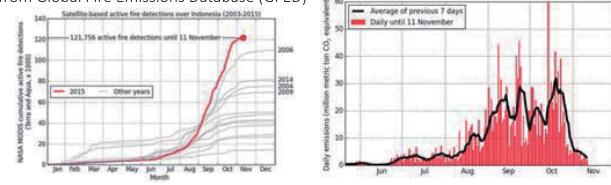


タンジュンルパン村における再湿地化と在来樹種植林

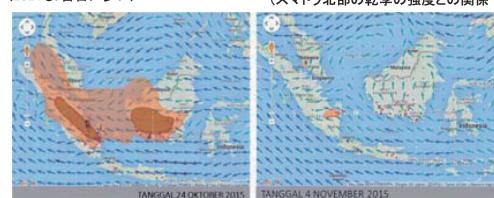


2015年の深刻な泥炭火災

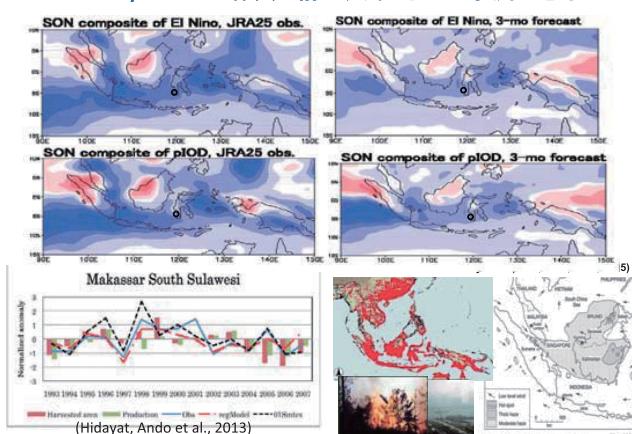
from Global Fire Emissions Database (GFED)



8月以後に集中(2014年は2-3月にも)
(スマトラ北部の乾季の強度との関係?)



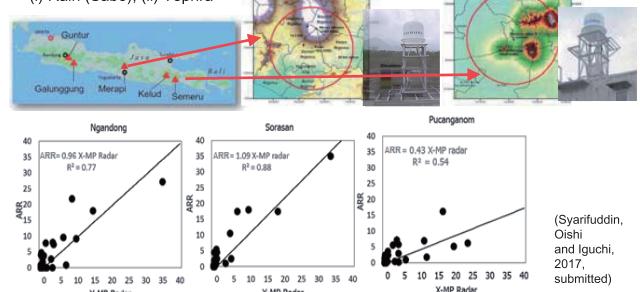
El Niño/IODの凶作、煙霧は広域的には予測できる



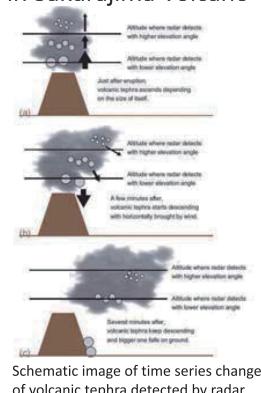
Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development Program Integrated Study on Mitigation of Multimodal Disasters Caused by Ejection of Volcanic Products

Leader: Haruhisa Nakamichi (Former: Masato Iguchi), DPRI Kyoto Univ.
Sub Group 1-3 Rain and Volcanic Ash Clouds Monitoring
Satoru Oishi (Leader), Masayuki Maki@Kagoshima Univ.

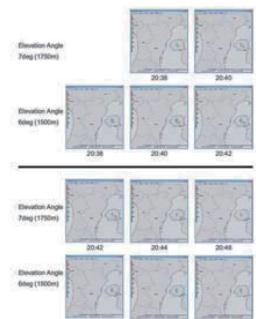
(i) Rain (Sabo), (ii) Tephra



Basic Study for Quantitative Tephra Estimation in Sakurajima Volcano



Sakurajima X-MP radar (14 km from the vent)
23 January 2015 case (Oishi & Iida et al.,
2016)



13

今後の展望

・過去観測の見直し

スマトラ東側：雨量よりも水はけの問題

ENSO, IODとの相関

・様々な気象レーダー

広域降雨観測・監視(基本的にはBMKG)

局地的な豪雨・土砂崩れの監視・防災

火山噴煙・森林火災煙霧への応用

赤道ライダーにより観測されたケルート火山 起源成層圏エアロゾルの鉛直輸送と EAR鉛直風の比較

阿保 真、柴田泰邦、長澤親生(首都大学東京)

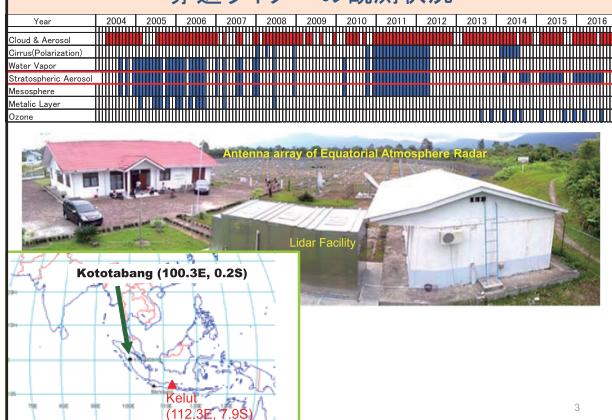
第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
2017年9月7-8日

はじめに

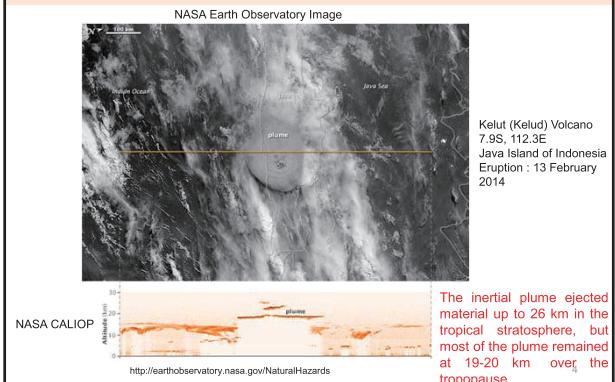
- 我々は2004年から赤道直下のコトタバンにおいて、地球大気の熱収支に重要な影響を及ぼす赤道領域の対流圏の雲・エアロゾル分布の連続観測を、小型ミーライダーを用いて現在まで継続している。
- 赤道域における成層圏・対流圏間の物質輸送は気候変動に影響を与えるが、その振る舞いは十分解明されていない。
- 2014年2月から行っている成層圏観測用大型ライダーによる偏光観測データ、CALIOPの衛星ライダーデータ並びにEARの鉛直風データを利用し、2014年に噴火したケルート火山に着目し成層圏エアロゾルの動態解析を行った。
- 2015~2016年のQBOの異常(Newman et al. GRL (2016))

2

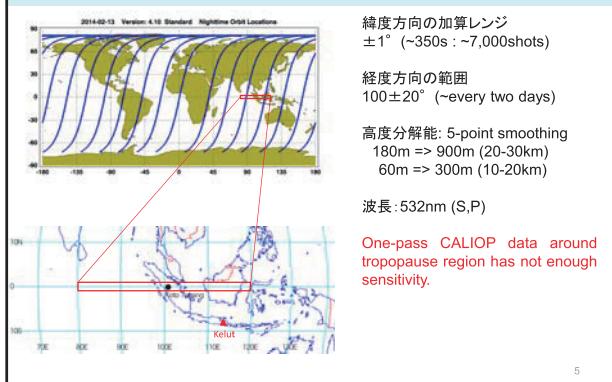
赤道ライダーの観測状況



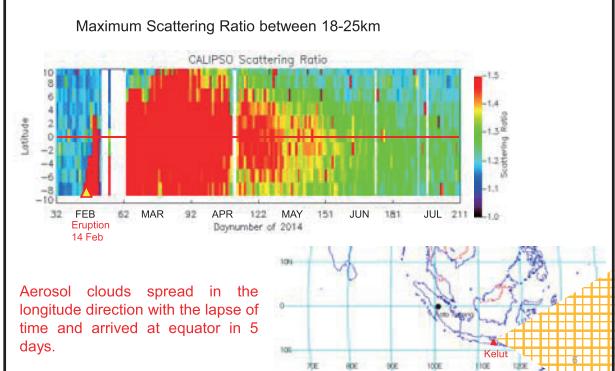
ケルート火山噴火(2014/2/13)

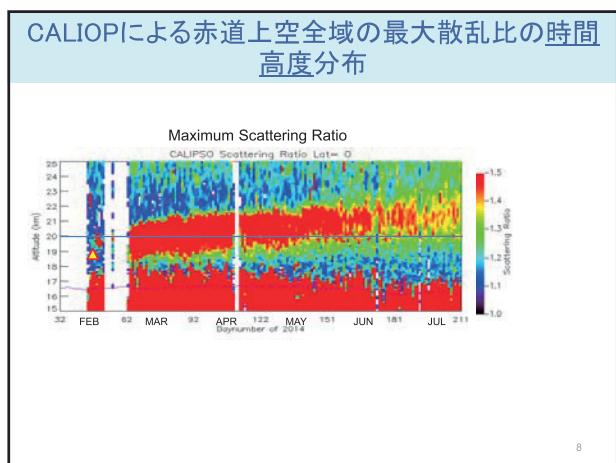
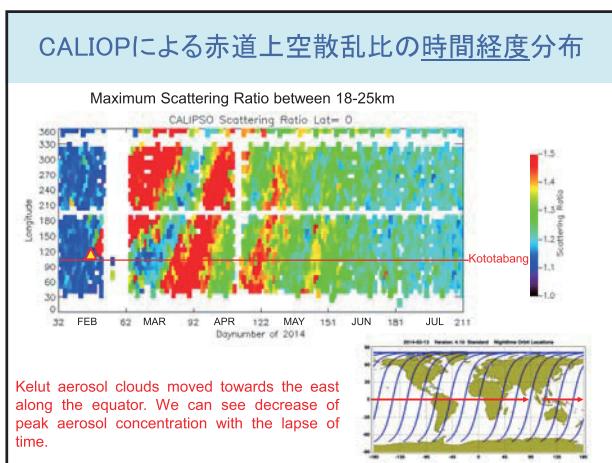


CALIOPデータ解析法

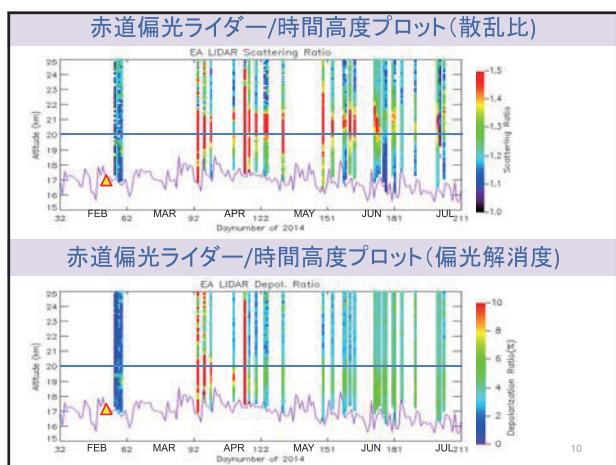
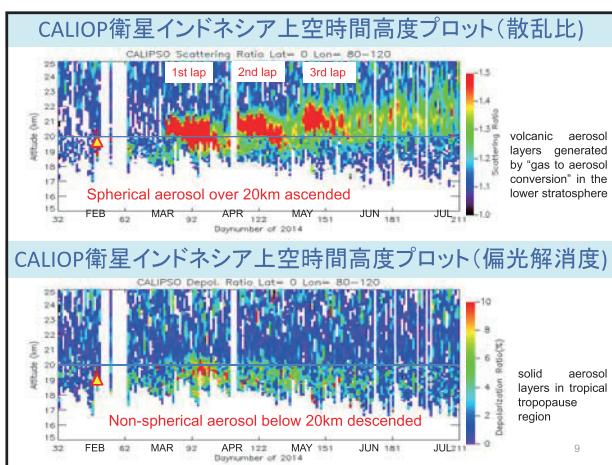


CALIOPによる赤道上空散乱比の時間緯度分布

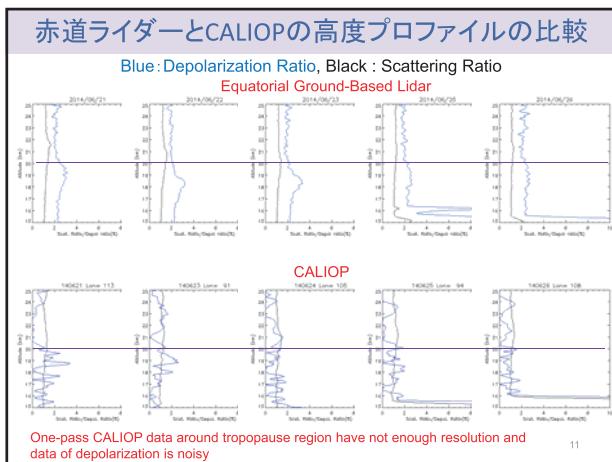




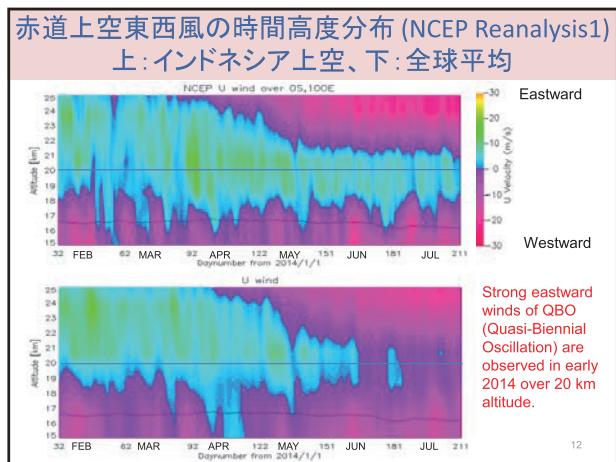
8



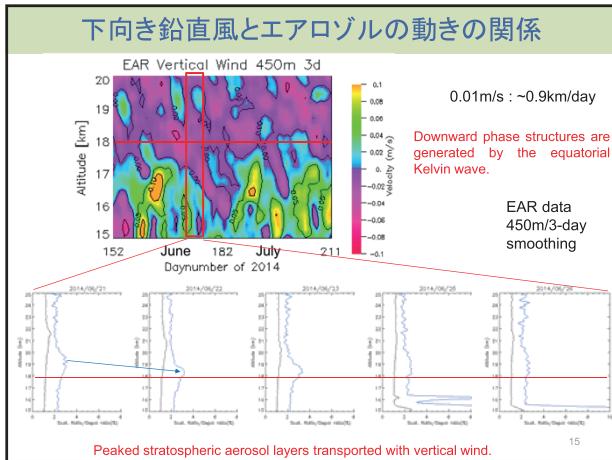
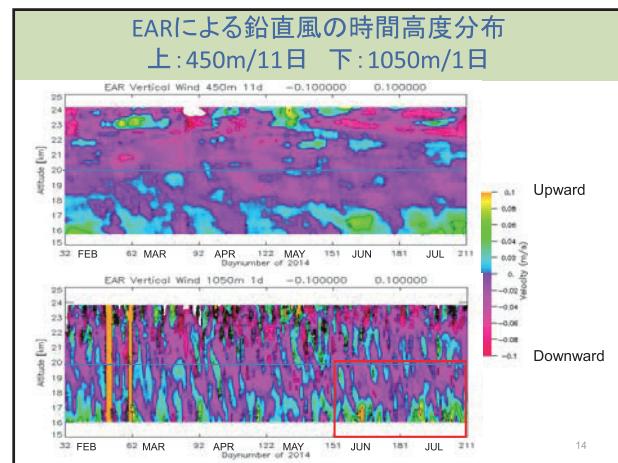
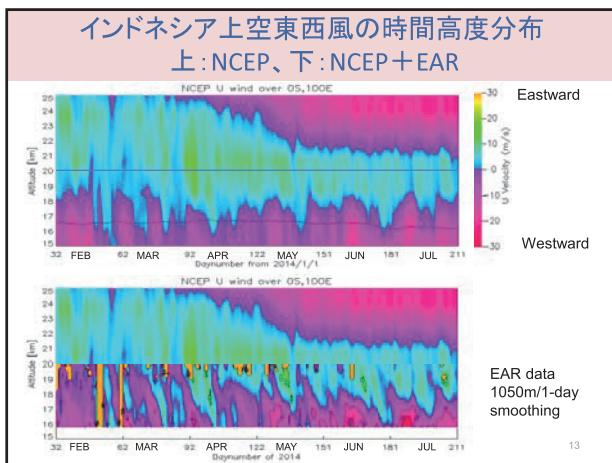
10



11



12



まとめ

- 衛星ライダーであるCALIOPデータの解析の結果からは、高度20kmより高い領域のKelut火山起源のエアロゾルが噴火後緯度方向に広がり5日で赤道に達し、その後赤道上空ではQBOによる顕著な東向きの風により経度方向に輸送され、約1ヶ月で地球を1周し、3周まで周回する様子が見られた。4周目に入る6月になると東向きの風が弱まり経度方向の動きは明瞭でなくなった。
- 非球形粒子は、主に高度20km以下にとどまり顕著な経度方向への輸送は見られず、インドネシア上空では6月にピーク高度が降下する様子が赤道ライダーにより観測された。
- EARの鉛直風観測結果から、この時期にケルビン波により鉛直風シア高度が下がっていく様子が見られた。
- これはケルビン波による成層圏から対流圏へのエアロゾルの鉛直輸送を地上ライダー及び赤道大気レーダにより観測したものと考えられる。
- 衛星ライダー、赤道ライダー、レーダー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-対流圏物質交換の直接観測が今後も期待出来る。

小型無人航空機と MU レーダーで観測された乱流エネルギー消散率の比較

橋口浩之¹・Hubert Luce²・Lakshmi Kantha³・Dale Lawrence³・
Richard Wilson^{4, 1}・津田敏隆¹・矢吹正教¹

1 京都大学生存圏研究所

2 Université de Toulon, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO),
UM 110, France

3 Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado Boulder, Boulder,
Colorado, USA

4 Université Pierre et Marie Curie (Paris06); CNRS/INSU, LATMOS-IPSL, Paris, France

1. はじめに

大気乱流は、物質やエネルギーの鉛直輸送の主要因で、航空機の安全運航に危険を及ぼす原因でもあり、その特性解明は重要な課題である。乱流エネルギー消散率 ε は、乱流の基本的なパラメータであり、VHF 帯 MST レーダー観測から求めることができる(Weinstock, 1981; Hocking, 1983, 1985, 1986, 1999; Fukao et al., 1994; Hocking and Hamza, 1997; Naström and Eaton, 1997)。MST レーダーは、主に自由大気中の乱流を測定するため、そのモデルは安定成層大気中のシアーアンダウントに伴う乱流の仮定に基づいている(例えば、Fukao et al., 1994; Kurosaki et al., 1996; Naström and Eaton, 1997)。このような乱流の場合、乱流渦の最大サイズは、成層乱流の外部スケールによって定義される(例えば Weinstock, 1981)。レーダーデータから乱流パラメータを求めるための別の主な仮定は、Kolmogorov-Obukhov-Corrsin(KOC)モデルに従う慣性小領域内に等方乱流が存在することである。したがって、 ε の推定は、ドップラー広がりが等方乱流から生じると仮定して、スペクトル幅の測定に基づいている。Hocking(1999)によれば、乱流の外部スケールとレーダーのサンプリング体積の大小に応じて異なる関係式が導かれる。

ShUREX(Shigaraki, UAV-Radar Experiment)キャンペーンが、2015～2017 年の 6 月に信楽 MU 観測所で実施された(Kantha et al., 2017)。低コストの無人小型航空機(UAV)が MU レーダー近傍で運用され、1Hz サンプリングの気温、湿度、気圧、風向・風速の他、高速サンプリングの気温・風速が測定された。このコロナド大学で開発された UAV は DataHawk Small Airborne Measurement Systems (SAMS)と呼ばれ、小型(両翼幅 1m)、軽量(700g)、低コスト(約\$1,000)、再利用可能、GPS による自律飛行可能という特徴を持っている(Lawrence and Balsley, 2013; Balsley et al., 2013)。本研究では、ShUREX2016において、MU レーダーの近傍(水平距離約 1km)で、上昇・下降飛行した(最高高度約 4km) 16 フライトのデータを使用して、MU レーダーデータから推定された ε と、UAV の高分解能ピトーセンサーデータから得られた ε の直接推定値とを比較する。

2. 実験の概要

2.1 MU レーダー

MU レーダーは、46～47MHz 範囲で等間隔の 5 周波数(すなわち 46.00, 46.25, 46.50, 46.75, 47.00MHz)のレンジイメージングモードで運用した(Luce et al., 2006)。また、水平風の情報も得るために、天頂と天頂角 10° で北、東の 3 方向にビームを走査するモードも併用した。サブパルス幅 $1 \mu\text{s}$ で、16 ビットのいわゆるスパンノ符号を用いて、IPP $400 \mu\text{s}$ で 32 点コヒーレント積分を行い、128 点の複素時系列データを 24.6 秒毎に得た。定期的にレーダーシステムの状態をチェックするため、約 30 分毎に約 1 分間 5 ビームの対流圈・成層圏標

準観測モードで運用した。サブパルス幅 $1 \mu\text{s}$ に相当する距離分解能は 150m であるが、海拔高度 1.245km～20.445km の範囲で 5m 毎に Capon 法によるレンジイメージング処理を行った(Palmer et al., 1999; Luce et al., 2001)。ただし、スペクトル幅の推定では、イメージング処理を行わない 150m 分解能のデータを用いた。

2.2 UAV システム

UAV の離着陸は、MU レーダーアンテナから南西へ約 1km の利用休止中の牧草地を借用して行った。UAV は自ら滑走して離陸することはできないため、図 1 に示すようにゴムで引っ張って離陸させる方法(Bungee 法)が取られた。着陸はいわゆる胴体着陸により行う。UAV と地上との間の通信は無線 LAN によって行われ、ゾンデ気象センサーによる 1Hz サンプリングデータの他、GPS による位置情報など UAV の飛行状態に関するデータをリアルタイムに得ることができる。UAV には、気象要素測定用の様々なセンサーが装備されている(Kantha et al., 2017)。市販の IMET ゾンデセンサーは、1Hz サンプリングで気圧、気温および相対湿度(PTU)のデータを提供し、高速応答ピトー管センサーは 400Hz サンプルの速度データを提供する。さらに、800 Hz サンプリングの気温測定のため、1ms 以下の高速応答のコールドワイヤーセンサーも使用された。UAV 搭載センサーの特性は Kantha et al. (2017) に詳しく述べられている。UAV には自動操縦が装備されており、MU レーダー近傍を飛行するように予めプログラムされた。本研究では、昇降中に測定されたデータのみを使用する。典型的には、昇降中に UAV は～2m/s の鉛直速度で直径約 100～150m の螺旋状に飛行する。キャンペーン中に行われた 41 回の飛行のうち、本研究では 16 回を MU レーダーとの比較のために使用した。



図 1. UAV の離陸の様子(Bungee 法)。

3. 乱流エネルギー消散率 ε の推定方法

3.1 MU レーダーデータからの推定

KOC 慣性小領域スペクトルが(最大渦の鉛直次元に関連する)浮力波数 k_B まで観察され、ブレーグ波数 $K_{Bragg} = 2k_r$ が $K_{Bragg} \gg k_B$ を満たす慣性小領域にあると仮定すると(Hocking, 1983)

$$\varepsilon \approx 0.47 \langle w'^2 \rangle^{3/2} k_B \quad (1)$$

ここで、 $\langle w'^2 \rangle$ は KOC 乱流によって生成される鉛直速度変動の二乗平均、 N は $N^2 = g / \theta d\theta / dz$ で定義された Brünt-Väisälä 角周波数、 g は重力加速度、 θ は温位である。

浮力波数は $k_B = N / \langle w' \rangle$ と定義することができ、式(1)は次のようになる。

$$\varepsilon \approx 0.47 \langle w'^2 \rangle N \quad (2)$$

乱流以外のブロードニング効果を除去した後のスペクトル幅 σ_t^2 から $\langle w'^2 \rangle$ を推定できる(例えば、Hocking, 1986; Fukao et al., 1994; Naström, 1997; Dehghan and Hocking, 2011)。 $\langle w'^2 \rangle$ の代わりに σ_t^2 を用いた式(2)は、レーダーデータから ε を推定するためによく使われる(例えば、Fukao et al., 1994; Naström and Eaton, 1997; Fukao et al., 2011; Kantha and Hocking, 2011; Wilson et al., 2014)。しかし、式(2)は、乱流渦の最大サイズがレーダーのサンプリング体積よりも小さい場合にのみ適用可能である(例えば、Hocking, 1986)。このサイズは、 $L_B = 1/k_B = \sqrt{\langle w'^2 \rangle} / N$ で表される浮力スケール L_B とすることができます、式(1)は次のように書き直すことができる。

$$\varepsilon \approx 0.47 \langle w'^2 \rangle^{3/2} / L_B \quad (3)$$

L_B がレーダーサンプリング体積に比べて大きい場合、パラメータ σ_t^2 は $\langle w'^2 \rangle$ を過小評価する。レーダー重み関数は、空間ローパスフィルターの役割を果たす(Labitt, 1979)。White et al. (1999)は以下の近似式を導いた。

$$\varepsilon_w \approx \left(\frac{4\pi}{1.6} \right)^{3/2} \frac{\sigma_t^3}{I^{3/2}} \quad (4)$$

$$I \propto \int_0^{\pi/2} d\phi \int_0^{\pi/2} \sin^3 \theta \left(b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta + \frac{L_H}{12} \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right)^{1/3} d\theta$$

b と a はレーダービームの距離方向と水平方向の大きさと $L_H = VT$ に関連し、 V はビーム走査時間 T の間の平均水平風速である。 $b = \Delta r / 2 (\Delta r = 150m)$ および $a = \theta_0 z$ (z は高度(m)、MU レーダーの場合 $\theta_0 = 1.32^\circ$) である。

式(4)は複雑ではあるが、式(2)のように N (通常はラジオゾンデ観測データから求められる)を必要としない利点がある。また、式(4)は、KOC 乱流が観測され、 L_B がサンプリング体積に比べて大きいとみなされる限り、乱流の発生源(対流不安定、シア

一不安定など)に關係なく有効である。なお、式(2)は湿った大気中では飽和状態の N^2 を推定する必要があるが、大気レーダーを用いた ε 推定の論文では考慮されていないことが多い。

乱流によるドップラースペクトル分散は、以下の式で求められる。

$$\sigma_t^2 \approx \sigma_{\text{meas}}^2 - \sigma_{\text{beam_broadening}}^2 \quad (5)$$

ここで σ_{meas}^2 は鉛直ビームで測定されたドップラ一分散であり、 $\sigma_{\text{beam_broadening}}^2$ はビームブロードニング効果による分散である。 σ_t^2 は式(4)で使用され、また式(2)または(3)の $\langle w'^2 \rangle$ の近似値として使用される。鉛直ビームのデータが使用されたため、式(5)は Naström(1997) や Dehghan and Hocking(2011) の式と比較して非常に簡単である。VHF 帯では、レーダエコーが(等方乱流でない)分反射によって強く影響され、 σ_t^2 が過小評価になるため(例えば、Tsuda et al., 1988)、通常鉛直ビームのデータは避けられる。しかし、本研究で使用したデータでは、アスペクト比(鉛直ビームと斜めビームのエコー強度比)が小さく、分反射の影響はほとんど無視できると考えられるため、鉛直ビームのデータを使うことにした。これにより、推定精度が高くないシアーブロードニングの補正を行う必要がなくなった。もう一つ、重力波に伴う時間変動ブロードニング(例えば Naström, 1997)もあるが、観測時間が短く(約 25 秒)、その寄与は十分に小さいと考えられるため、ここでは無視している。

UAV との鉛直プロファイルの比較においては、UAV の上昇・下降に応じて、同一高度のデータをその前後の時間で 4 分平均した。レーダーデータの高度分解能は 150m のため、線形補間して、UAV のサンプリング高度に合わせた。

3.2 UAV データからの推定

ピトーセンサーデータから ε を導く方法は、Kantha et al. (2017) に述べられている。周波数スペクトル(Kantha et al. の式(5))は、2.5 秒毎(2 倍オーバーサンプリングに対応)に 5 秒の Hanning 重み付けした時系列(サンプリングレート 400Hz なので 2000 点に相当)データから推定された。乱流の局所的な等方性と定常性、Taylor の凍結移流仮説を仮定すると、理論的な Kolomogorov 1 次元スペクトルは次のように書ける(Tatarskii, 1961; Hocking, 1983)。

$$S_U(f) = 0.5\varepsilon^{2/3} \left(\frac{U}{2\pi} \right)^{2/3} f^{-5/3} \quad (6)$$

U は平均風である。計算されたスペクトル $\hat{S}_U(f)$ が(少なくとも周波数帯域において)慣性小領域を示すと仮定すると

$$\hat{S}_U(f) = \alpha f^{-5/3} \quad (7)$$

で表せるはずである。すなわち、観測されたスペクトルから α を求めれば、次式から ε_{UAV} を得ることができる(例えば、Frehlich et al., 2003; Siebert et al., 2006)。

$$\varepsilon_{\text{UAV}} = \frac{2\pi}{U} \left(\frac{\alpha}{0.5} \right)^{3/2} \quad (8)$$

α は慣性小領域内で求める必要がある。10 Hz より高い周波数では、乱流が弱い場合にはノイズで、また主に上昇時のモーターの振動により複数のピークが表れており、正しくスペクトルが得られていない可能性がある。全てのスペクトルを注意深く調べ、1~7.5Hz 範囲のスペクトルから α を推定することに決めた。

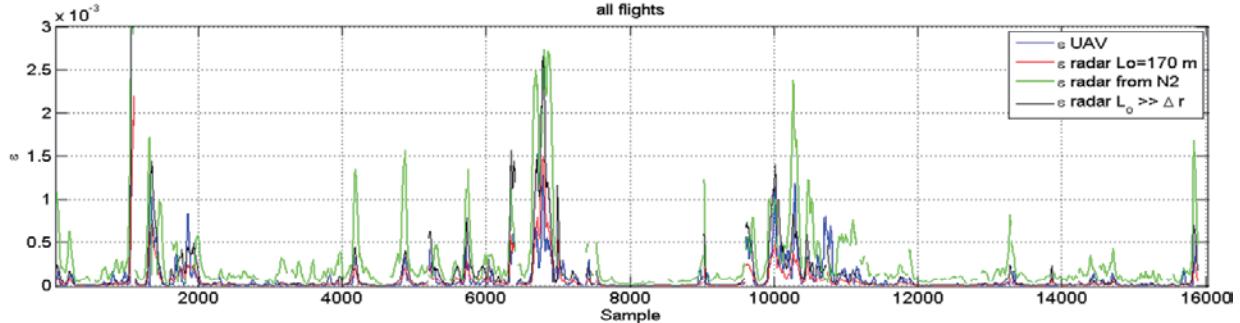


図 2. UAV と MU レーダーで得られた乱流エネルギー消散率 ε の比較。青線: UAV による推定値 ε_{UAV} 、赤線: 式(3)で $L_B = 170\text{m}$ とした推定値、緑線: 式(2)による推定値(N は UAV による気温データから推定)、黒線: 式(4)による推定値。

4. 結果とまとめ

ShUREX2016 キャンペーンにおける UAV と MU レーダーによる品質管理後のデータから求めた乱流エネルギー消散率 ε の比較を図 2 に示す。UAV と MU レーダーは水平距離で 1km 程度離れていたが、同じ高度・時間に ε のピークが観測され、同じ乱流イベントを捉えることができたと考えられる。乱流の外部スケールを 170m としたとき、強い ε のピークが良く一致した。これがレーダーの距離分解能(150m)に依存しているのか、検出された乱流の浮力スケールの典型値なのかは今後の検討課題である。赤線 ε_R は、少なくとも下部対流圏では、 $L_B = 170\text{m}$ (固定値) とスペクトル幅の測定値 σ_r を用いて良く一致している。黒線 $L_B \gg \Delta r$ 時の White et al.(1999) モデルは、 ε_{UAV} に比べて少し(平均で 2.2 倍)過大評価であった。緑線 ε_N は平均で ε_{UAV} より一桁大きかった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K13568 及び生存圏研究所生存圏ミッション研究の助成を受けたものです。MU レーダーは京都大学生存圏研究所によって管理・運用されています。

参考文献

- Balsley, B.B., D.A. Lawrence, R.F.Woodman, and D.C. Fritts, Fine-Scale Characteristics of Temperature, Wind, and Turbulence in the Lower Atmosphere (0–1,300 m) Over the South Peruvian Coast, *Boundary-Layer Meteorol.*, **147**, 165–178, 2013.
- Dehghan, A., W. K. Hocking, Instrumental errors in spectral-width turbulence measurements by radars, *J. Atmos. Sol.-Terr Phys.*, **73**, 1052–1068, 2011.
- Frehlich, R., Y. Meillier, M. A. Jensen, B. B. Balsley, Turbulence measurements with the Cires tethered lifting system during CASES-99: Calibration and spectral analysis of temperature and velocity, *J. Atmos. Sci.*, **60**, 2487–2495, 2003.
- Fukao, S., M.D. Yamanaka, N. Ao, W.K. Hocking, T. Sato, M. Yamamoto, T. Nakamura, T. Tsuda, and S. Kato, Seasonal variability of vertical eddy diffusivity in the middle atmosphere. 1. Three-year observations by the middle and upper atmosphere radar, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **99**, 18973–18987, 1994.

- Fukao, S., H. Luce, T. Mega, and M.K. Yamamoto, Extensive studies of large-amplitude Kelvin-Helmholtz billows in the lower atmosphere with the VHF Middle and Upper atmosphere radar (MUR), *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 1019–1041, 2011.
- Hocking, W.K., On the extraction of atmospheric turbulence parameters from radar backscatter Doppler spectra. I. Theory, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **45**, 89-102, 1983.
- Hocking, W.K., Measurement of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: a review, *Radio Sci.*, **20**, 1403-1422, 1985.
- Hocking, W.K., Observations and measurements of turbulence in the middle atmosphere with a VHF radar, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **48**, 655-670, 1986.
- Hocking, W.K., The dynamical parameters of turbulence theory as they apply to middle atmosphere studies, *Earth Planets Space*, **51**, 525-541, 1999.
- Hocking, W.K., and A.M. Hamza, A quantitative measure of the degree of anisotropy of turbulence in terms of atmospheric parameters, with particular relevance to radar studies, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, **59**, 1011-1020, 1997.
- Kantha, L., and W.K. Hocking, Dissipation rates of turbulence kinetic energy in the free atmosphere: MST radar and radiosondes. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **73**, 1043-1051, 2011.
- Kantha, L., D. Lawrence, H. Luce, H. Hashiguchi, T. Tsuda, R. Wilson, T. Mixa, and M. Yabuki, Shigaraki UAV-Radar Experiment (ShUREX 2015): An overview of the campaign with some preliminary results, *Progress in Earth and Planetary Science*, **4**, doi:10.1186/s40645-017-0133-x, 2017.
- Kurosaki, S., M.D. Yamanaka, H. Hashiguchi, T. Sato, and S. Fukao, Vertical eddy diffusivity in the lower and middle atmosphere: a climatology based on the MU radar observations during 1986-1992. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **58**, 727-734, 1996.
- Labitt, M., Some basic relations concerning the radar measurements of air turbulence. MIT Lincoln Laboratory, ATC Working Paper NO 46WP-5001, 1979.
- Lawrence, D.A., and B.B. Balsley, High-Resolution Atmospheric Sensing of Multiple Atmospheric Variables Using the DataHawk Small Airborne Measurement System, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**, 2352-2366, 2013.
- Luce, H., M. Yamamoto, S. Fukao, and M. Crochet, Extended radar observations with the Frequency radar domain Interferometric Imaging (FII) technique, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **63**, 1033-1041, 2001.
- Luce, H., G. Hassenpflug, M. Yamamoto, and S. Fukao, High-resolution vertical imaging of the troposphere and lower stratosphere using the new MU radar system, *Ann. Geophys.*, **24**, 791-805, 2006.
- Naström, G. D., Doppler radar spectral width broadening due to beamwidth and wind shear, *Ann. Geophys.*, **15**, 786-796, 1997.
- Nastrom G. D., F. D., Eaton, Turbulence eddy dissipation rates from radar observations at 5-20 km at White Sands Missile Range, New Mexico, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **102**, 19495-19505, 1997.
- Palmer, R. D., T.-Y. Yu, and P. B. Chilson, Range imaging using frequency diversity, *Radio Sci.*, **34**, 1485-1496, 10.1029/1999RS900089, 1999.
- Siebert, H., K. Lehmann, and M. Wendisch, Observations of small-scale turbulence and energy dissipation rates in the cloudy boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1451-1466, 2006.
- Tatarski, I., Wave Propagation in a Turbulent medium, Translated by R. A. Silvermann, Graw-Hill, New York, 1961.
- Tsuda, T., P.T. May, T. Sato, S. Kato, and S. Fukao, Simultaneous observations of reflection echoes and refractive index gradient in the troposphere and lower stratosphere, *Radio Sci.*, **23**, 655-665, 1988.
- Weinstock J., Energy dissipation rates of turbulence in the stable free atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 880-883, 1981.
- White, A.B., R.J. Lataitis, and R.S. Lawrence, Space and time filtering of remotely sensed velocity turbulence, *J. Atmos. Sci.*, **16**, 1967-1972, 1999.
- Wilson, R., H. Luce, H. Hashiguchi, N. Nishi, and Y. Yabuki, Energetics of persistent turbulent layers underneath mid-level clouds estimated from concurrent radar and radiosonde data, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **118**, 78–89, 2014.

MUレーダー実時間 アダプティブクラッター抑圧 システムの開発

京都大学生存圏研究所
久保田匡亮・橋口浩之・山本衛・万城孝弘

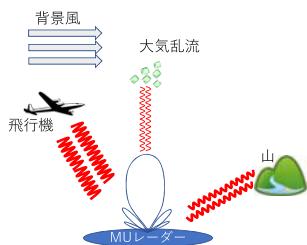
MUレーダー

- 中層大気と超高層大気を観測できる大気レーダー
- 19本×25群、475本のアンテナを擁する
- 個別制御することでピーム方向を変更できるアクティブフェーズドアレイアンテナ
- 25群で独立に観測可能



研究背景 | クラッター

- 観測対象の大気エコー以外に、**クラッター**（山からのエコーや飛行機からのエコー）が観測される
- 風速推定精度に影響がある



研究背景 | 先行研究との関係性

- アンテナパターンを制御することで地形性クラッターの抑圧に有効な**NC-DCMP**が提案され、**オフラインでの処理**が行なわれている
- 先行研究では、NC-DCMPをMUレーダーのシステムに組み込みオンラインでの処理が行なわれている
- 本研究では、航空機クラッターの**オンラインでの処理**を検討し、システムとして実装することを目的とする

本研究の意義

- 実時間処理
 - ✓信号処理の簡便化
 - ✓取得データ容量の削減
- NC-DCMP
 - ✓ソフトウェアでの実装が可能
 - ✓風速推定の精度向上
- 本研究の成果
 - ✓MUレーダーの風速推定精度の向上
 - ✓現在建設計画中の赤道MUレーダーにも応用可能

NC-DCMP

- 所望方向を指定
- 非所望波方向の応答を抑圧することで**出力電力を最小化**
- ウェイトベクトルのノルムに関する制約条件により**メインロープの形状が崩れるのを防ぐ**

NC-DCMPの基本式

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \left(P = \frac{1}{2} \mathbf{w}^H R_{xx} \mathbf{w} \right) \\ & \text{subject to } C^T \mathbf{w}^* = N \text{ and } |\mathbf{w}|^2 \leq \delta N \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \mathbf{w} = \frac{(R_{xx} + \sigma I)^{-1} C}{C^H (R_{xx} + \sigma I) C}$$

受信信号相関行列

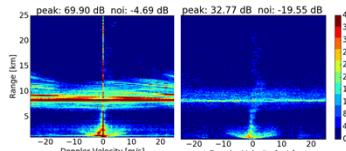
$$R_{xx} = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = E \begin{bmatrix} x_1 x_1^* & x_1 x_2^* & \cdots & x_1 x_M^* \\ x_2 x_1^* & x_2 x_2^* & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ x_M x_1^* & x_M x_2^* & \cdots & x_M x_M^* \end{bmatrix}$$

¹Kamio et al., 2004, *Annales Geophysicae*, 22, 4005–4012.

現在運用中のクラッター抑圧システムからの改善点

- 現在運用中のクラッター抑圧システムは2015年11月より運用を開始
- 地形性クラッターの抑圧に**有効**
- 航空機クラッターの抑圧には**不十分**

■2段階NC-DCMPを用いたクラッター抑圧システムにより、航空機クラッターを含めたクラッター抑圧を実現



2段階NC-DCMP

1. 航空機クラッターの到来方向(θ_u, ϕ_u)を推定
2. 方向拘束行列を計算
3. NC-DCMPを用いて航空機クラッターを分離再生
4. 元データから航空機クラッターを引く
5. 再度NC-DCMPを適用して静止目標からのクラッターを抑圧

天頂に向けてヌル形成



『榎本 大志, 2012, 南極大気レーダートレーニングシステムを用いた航空機クラッター抑圧, 京都大学修士論文』

2段階NC-DCMP

1. 航空機クラッターの到来方向(θ_u, ϕ_u)を推定
2. 方向拘束行列を計算
3. NC-DCMPを用いて航空機クラッターを分離再生
4. 元データから航空機クラッターを引く
5. 再度NC-DCMPを適用して静止目標からのクラッターを抑圧



『榎本 大志, 2012, 南極大気レーダートレーニングシステムを用いた航空機クラッター抑圧, 京都大学修士論文』

航空機位置情報の取得 | ADS-B

- 航空管制官が高い精度のGPS信号を用いてair trafficを監視するための技術
- ADS-Bの緯度・経度・高度・速度は各航空機ごとに測定され、各航空機が放送
- ADS-Bのデータは航空機ごとに依存しているため、データの間隔は不等間隔
⇒フィルタを用いた予測により任意の時間の航空機の位置情報を取得できることが必要



航空機位置情報の予測 | α - β フィルタ

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{sk} = x_{pk} + \alpha(x_{ok} - x_{pk}) \\ \dot{x}_{sk} = \dot{x}_{sk-1} + \beta/T_k \cdot (x_{ok} - x_{pk}) \\ x_{pk} = x_{sk-1} + T_k \cdot \dot{x}_{sk-1} \\ \dot{x}_{pk} = \dot{x}_{sk-1} \end{array} \right.$$

MVフィルタの α, β の関係式

$$\alpha = \sqrt{\beta} - \frac{\beta}{2}$$

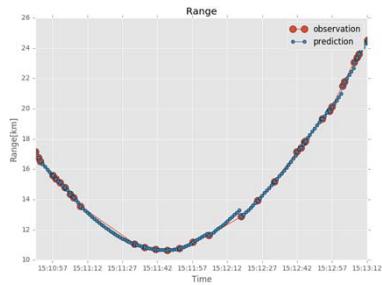
『小菅一義夫, α - β フィルタを使用したレーダー追尾における最適ゲイン, 1998, 無線情報通信学会論文誌, 3, 351-354』

ADS-Bデータを用いたフィルタ処理の概要

1. ADS-BデータはMULレーダーのレンジ30km以内のデータを使用
2. ADS-Bで得られた航空機の緯度・経度・高度をMULレーダーを原点とした直交座標に変換
3. 座標ごとにMVフィルタを適用
4. サンプリング間隔は1秒
5. ADS-Bの取得データがあれば採用
6. 次サンプリング時刻はADS-Bの取得データから1秒後

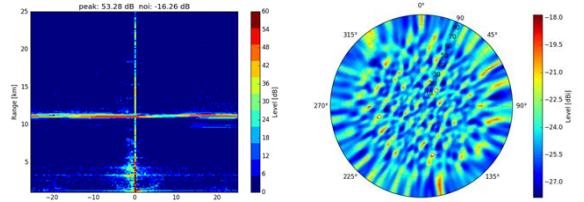
フィルタの適用例

ADS-Bで取得した実観測データにMVフィルタを適用($\alpha = 0.27, \beta = 0.1$)

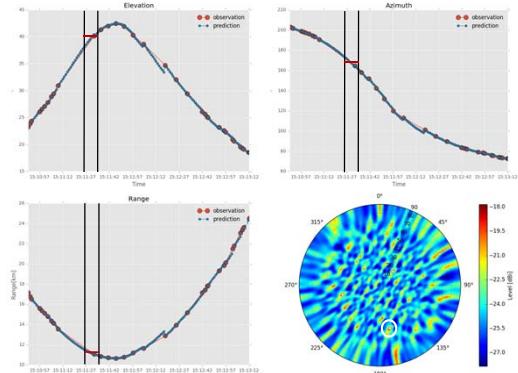


Capon法による到来方向推定結果

MUレーダーの実観測データを使用
(2017年1月28日 15時11分25秒から約8秒間、レンジ約11km)



Capon法による到来方向推定結果とADS-Bデータの比較（レンジ約11km）



まとめと今後の課題

口まとめ

- ✓ ADS-Bを用いた航空機の位置情報取得
- ✓ MVフィルタによる航空機の位置予測
- ✓ ADS-Bで取得したデータとCapon法による到来方向推定結果を比較し、航空機の位置情報を正しく推定できていることを確認
- ✓ ADS-Bデータを用いることで探索範囲を限定することが可能

口今後の課題

- ✓ 2段階NC-DCMPの適用及び改善、及びクラッター抑圧度の定量評価
- ✓ オフラインでの検討を考慮したシステムの要件の決定
- ✓ MUレーダーに組み込み、オンラインでの検討

MUレーダーを用いたスペースデブリ 形状・軌道推定に関する研究

○池田成臣、鳥居拓哉、平田拓仁、山川宏
(京都大学生存圈研究所 宇宙圈航行システム工学分野 山川研究室)

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

本日の発表内容

- 研究背景
- MUレーダーを用いた形状推定
- MUレーダーを用いた軌道推定
- まとめと今後の予定

2017/09/07

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

2

研究背景

近年スペースデブリが急激に増加

→ 運用を終えた人工衛星や破片等、活動の無い軌道上物体

地球周囲の物体数の推移(出典: NASA)

デブリの増加による問題

- 衛星の破損
- 新たなデブリの発生

→ 繼続的宇宙利用のために
デブリの観測・除去が必要

2017/09/07 第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 4

現在のデブリ観測の状況

現在のデブリ観測網
(出典: AFSPC)

現在の課題:

デブリ観測施設が欧米に集中しており、観測網の拡大が必要

→ デブリ観測用途以外のレーダーを用いた観測手法の確立により、
デブリ観測網の強化を目指す

2017/09/07 第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 5

山川研究室におけるデブリ観測への取り組み

山川研では信楽MUレーダーを用いたデブリ観測手法を提案

特徴:

- 既存の施設を利用できるため、コストが小さい
- 時間や天候に制限されない
- デブリ専用レーダーに比べ距離分解能が低く、専用の信号処理手法を考案する必要あり

MUレーダー鳥瞰図(出典: RISH)

→ 大気レーダーを用いたデブリ観測手法の確立を目指す

- スピン・形状情報の抽出手法について検討
- 軌道情報の抽出手法について検討

2017/09/07 第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 6

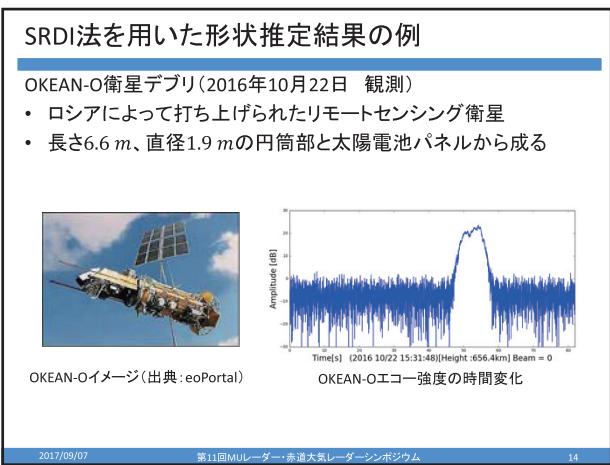
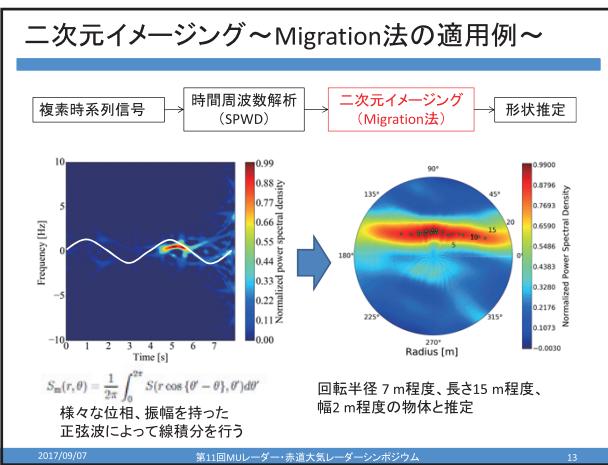
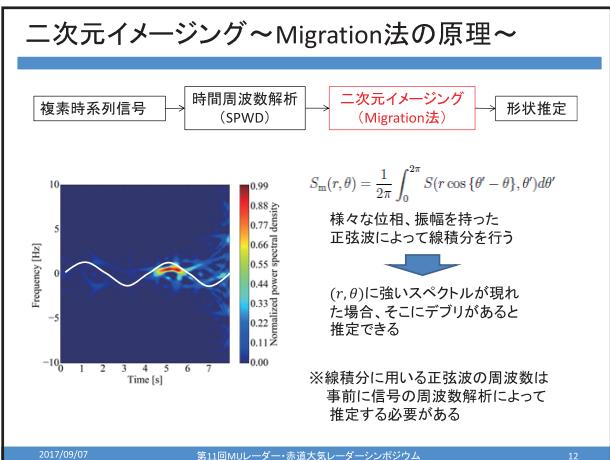
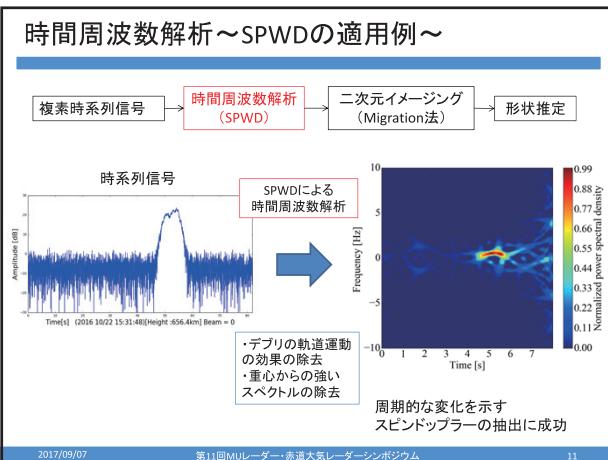
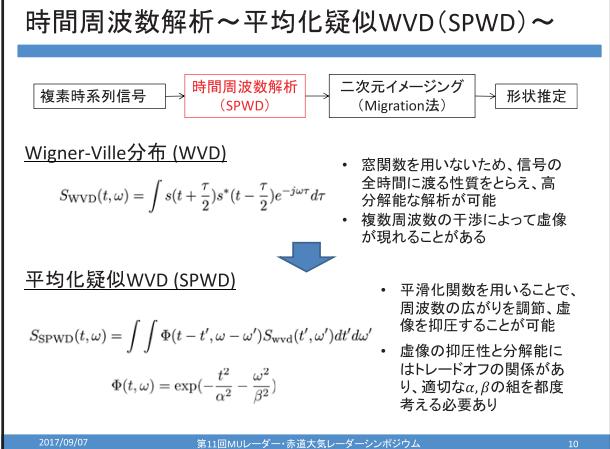
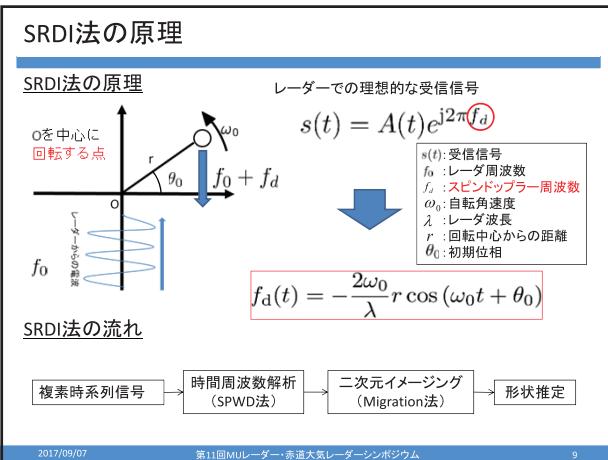
MUレーダーを用いた形状推定の概要

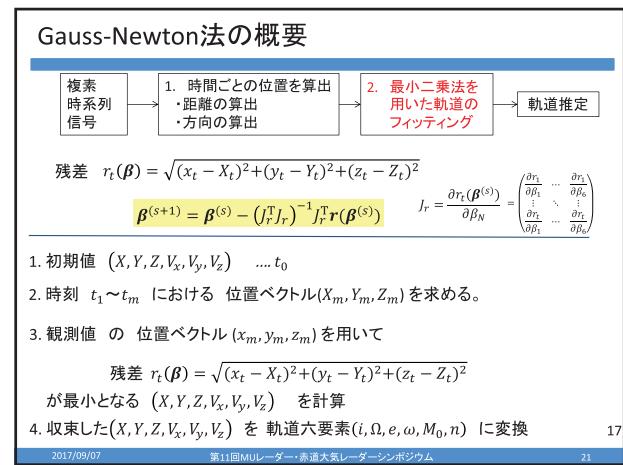
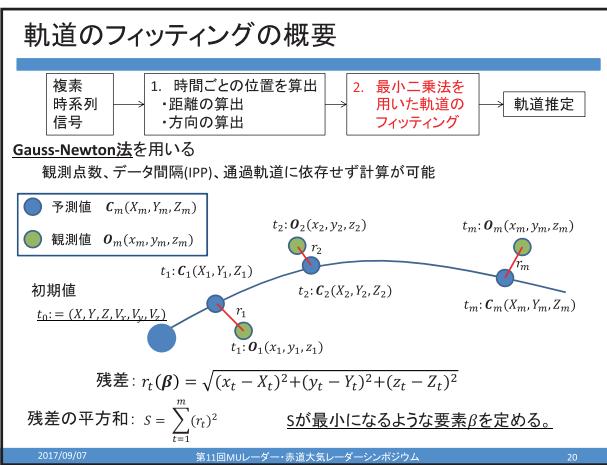
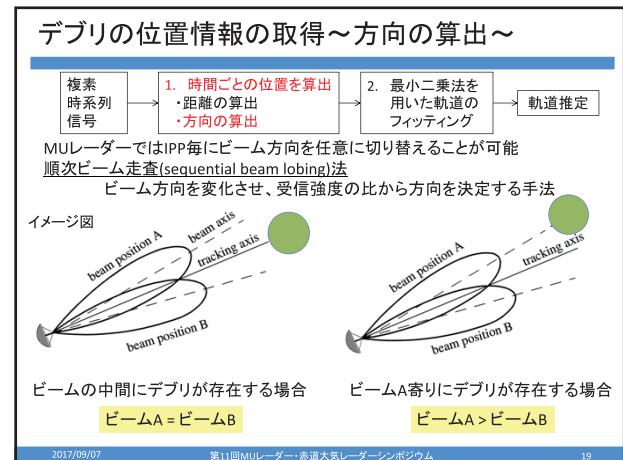
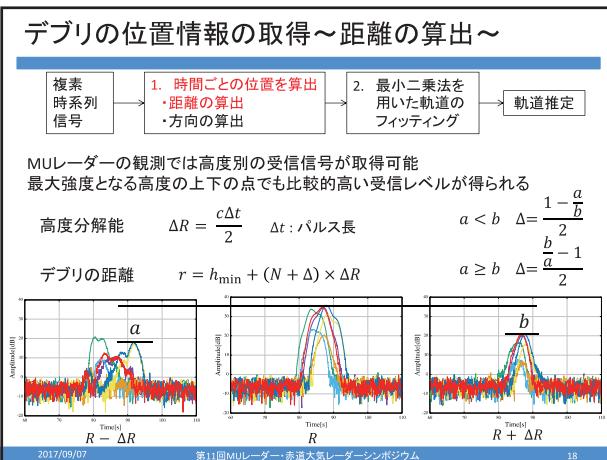
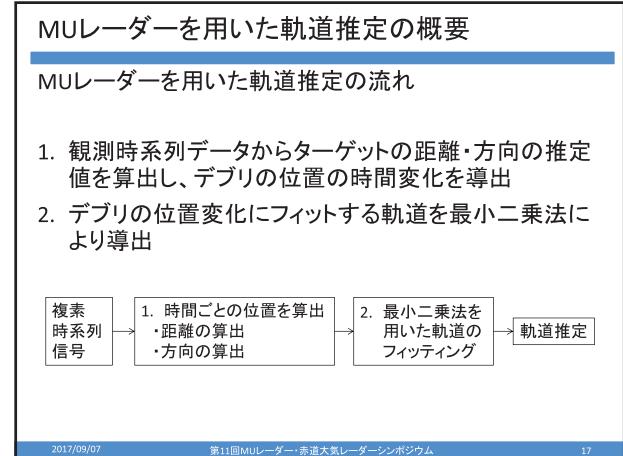
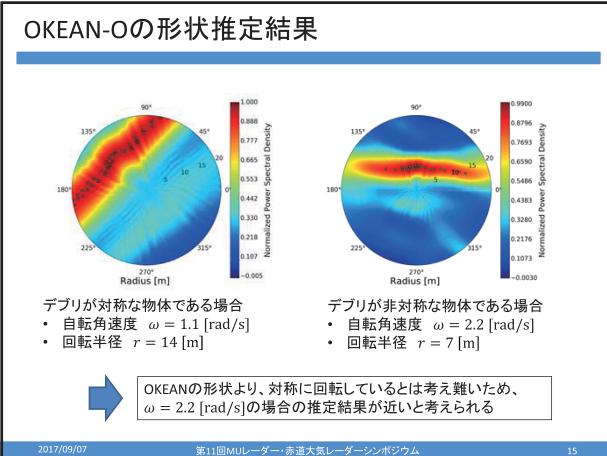
MUレーダーでスペースデブリを観測することを考えた場合、レンジ分解能がターゲットに対して大きいため、レンジ方向の情報を得られず、従来の形状推定手法は適用できない

→ Single-Range Doppler Interferometry (SRDI)法が提案された†
→ 対象物体の自転に起因するドップラーシフトを抽出、形状を推定

† Toru Sato, "Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry," IEEE transactions on geoscience and remote sensing 37.2 (1999): 1000-1005.

2017/09/07 第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 8





フィッティングの初期値の決定手法(Herrick-Gibbs法)

複素時系列信号 → 1. 時間ごとの位置を算出
・距離の算出
・方向の算出 → 2. 最小二乗法を用いた軌道のフィッティング → 軌道推定

3つの異なる時刻 t_1, t_2, t_3 における位置ベクトル r_1, r_2, r_3 より t_2 における速度をテイラー近似により求める手法

$$v_2 = -\Delta t_{32} \left(\frac{1}{\Delta t_{21} \Delta t_{31}} + \frac{\mu}{12r_1^3} \right) r_1 + (\Delta t_{32} - \Delta t_{21}) \left(\frac{1}{\Delta t_{21} \Delta t_{32}} + \frac{\mu}{12r_2^3} \right) r_2 + \Delta t_{21} \left(\frac{1}{\Delta t_{32} \Delta t_{31}} + \frac{\mu}{12r_3^3} \right) r_3$$

Herrick-Gibbs法を用いて速度を計算し、位置と速度から軌道決定が可能だがここでは、あくまで初期値の設定のためとしている

2017/09/07 第11回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 22

MULレーダーによる観測データからの軌道推定結果

OAO-3衛星デブリについて観測(2017年1月10日)

OAO-3衛星のイメージ

距離分解能	4800 m
高度の分割数	80
パルス幅	32 μs
最小高度	600 km
パルス間隔	8320 μs
ビーム方向 (方位角、天頂角)	(0,0),(120,2),(180,2),(240,2) (85,8),(100,8),(265,8),(250,8) (90,10),(255,10)

DATE [2017/01/10] TIME [13:05:34 >>> 13:07:08]
予測軌道とビーム配置

2017/09/07 第11回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 23

MULレーダーによる観測データからの軌道推定結果

- 距離の時間変化の観測

ビーム6の距離ごとのエコー

TLEからの予測値と観測値

カーブに沿ってはいるものの、数kmの誤差が見られる。

2017/09/07 第11回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 24

MULレーダーによる観測データからの軌道推定結果

- 方向の時間変化の観測

Azimuth[deg]

Zenith[deg]

方位角の時間変化

天頂角の時間変化

方位角、天頂角共にTLEから予測した時間変化と非常に良く一致する結果となった。(誤差は0.1°程度)

2017/09/07 第11回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 25

MULレーダーによる観測データからの軌道推定結果

Gauss-Newton法を用いて軌道のフィッティングを行った結果とNORADが公開しているTLEとの比較

TLE	軌道傾斜角 i [deg.]	昇交点赤経 α [deg.]	離心率 e	近地点引数 ω [deg.]	平均近点角 M [deg.]	平均運動 n
推定値	35.01	227.76	0.0007	226.54	214.40	14.58
真値	34.96	227.11	0.0185	70.63	10.23	14.16

- 方位角、天頂角によってのみ決まるパラメータ(i, Ω)はよく一致している。(これらは軌道面を決めるパラメータ)
- 距離の情報を使って計算されるパラメータ(e, n)には誤差が見られた。(これらは軌道の大きさを決めるパラメータ)

2017/09/07 第11回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 26

まとめと今後の予定

まとめ

- MULレーダーを用いた形状推定を実際の観測データに適用した。しかし、推定結果は実際の値より大きいものとなった。今後はより推定精度を上げるために複数のビームを用いる、散乱断面積変動を用いるなど新たな手法を試みる。
- MULレーダーを用いた軌道推定を実際の観測データに適用し、軌道面の推定に成功した。しかしながら、距離情報の誤差により軌道の大きさを規定するパラメータの推定には失敗しており、今後の課題となった。

今後の予定

- 形状推定における精度向上のための手法についての検討を行う。(複数ビームの利用、散乱断面積の情報の利用等)
- 軌道推定における距離情報の推定の改善に向けた検討を行う。(観測パラメータの見直し等)
- 今回は既知デブリであったが、未知デブリの場合にもこれらの手法が適用可能であるのか、検討を行う。
- MULレーダーを用いた観測を続け、データの蓄積を続ける。

2017/09/07 第11回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム 28

DEVELOPMENT OF SOFTWARE-DEFINED MULTI-CHANNEL RECEIVER SYSTEM FOR THE EQUATORIAL ATMOSPHERE RADAR (EAR)

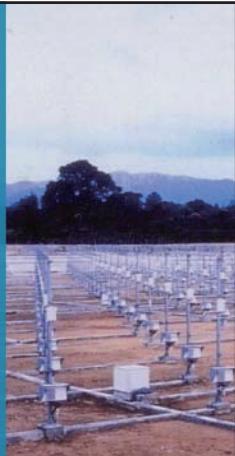
Nor AZLAN Bin Mohd Aris,
Hiroyuki Hashiguchi, and Mamoru Yamamoto

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

EQUATORIAL ATMOSPHERE RADAR (EAR)

The Equatorial Atmosphere Radar (EAR) is a VHF Doppler radar operating at 47 MHz with an active phased-array antenna system and located at Kototabang, West Sumatra, Indonesia (0.20S, 100.32E, 865 m above sea level).

The details regarding the system design and its specifications are well elaborated by Fukao et al. [Radio Sci., 2003]¹.



KEY CONTRIBUTIONS OF THE EAR MULTI-CHANNEL RECEIVER

Continuously obtain Radio Acoustic Sounding System (RASS) echoes through adaptive beam-steering.

Enabling Spaced-Antenna method

ADVANTAGES OF MULTI-CHANNEL RECEIVER

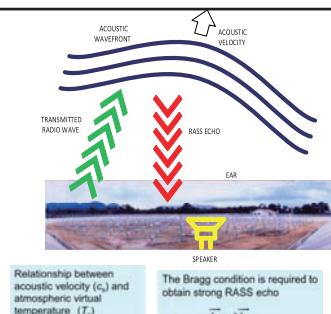
- Signals collection from multiple channels.
- Allows the implementation of several technique for observations improvement.
- Potential benefit for high quality and high resolution data.
- Software-defined radio – GNU Radio and USRP N210 series, enable flexibility in the processing of the signals, and lower development cost.



RADIO ACOUSTIC SOUNDING SYSTEM (RASS)

□ Radio Acoustic Sounding Systems (RASS) uses a sound source to create fluctuations in the index of refraction, from which radars obtain backscatter.

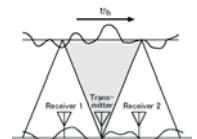
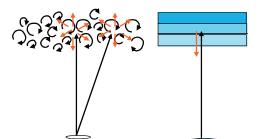
□ Combination of radio acoustic with an atmospheric radar enable the temperature observations.



Development of adaptive-beam steering – to continuously obtain RASS echoes.
It is difficult to correct background winds due to weak turbulence echoes in TTL.
→ Development of SA method

DEVELOPMENT OF SPACED-ANTENNA (SA) METHOD

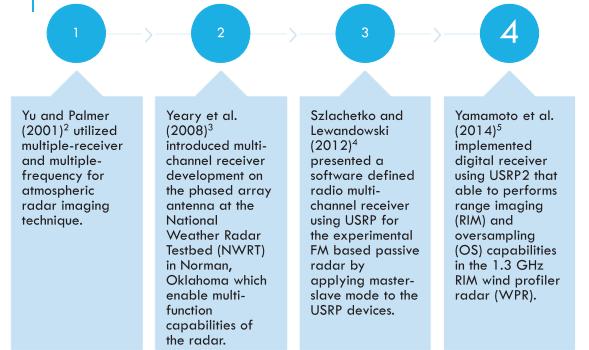
To improve the maximum observable height for horizontal wind and temperature.



□ To implement SA method to EAR, we develop multi-channel system of EAR.

□ Using multi-channel receivers, we can also observe the detail structures in the lower troposphere using spatial imaging technique.

EXAMPLES FROM PREVIOUS RESEARCHES



DIGITAL RECEIVER SPECIFICATIONS

Table 1: Digital receiver specifications

Parameter	Value
Center Frequency	47 MHz
Bandwidth	4 MHz
Sampling rate	10 MS/s

- This is a direct conversion type (homodyne) which avoid complexity due to the advantages of software-defined radio.
- It uses pulse compression technique to enhance signal to noise ratio and range resolution.

HARDWARE AND SOFTWARE SETUP

A personal computer is connected to USRP N210 devices through Gigabit Ethernet (GbE).

The computer specifications are as follow:

Table 2: Personal computer specifications

Parameter	Value
Operating system	Ubuntu 16.04.1 LTS
Memory	16373 MB
Processor	12 x Intel® Core™ i7-3930K CPU@3.2GHz
OS type	64-bit
Disk Space	967.5 GB

UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL N210 (USRP N210)

Table 3: USRP2 specifications

USRPN210 SPECIFICATIONS	
Motherboard	N210r4
Firmware version	12.4
FPGA version	11.1

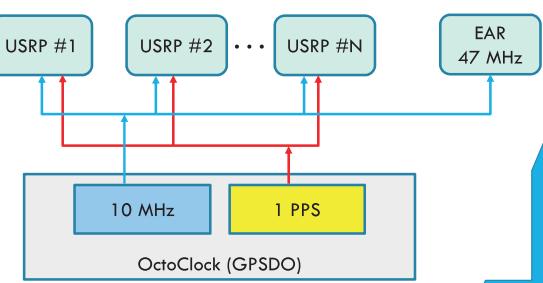
USRP N210 series is a hardware platform capable to sample data up to 250 MHz through its daughterboard BasicRX.

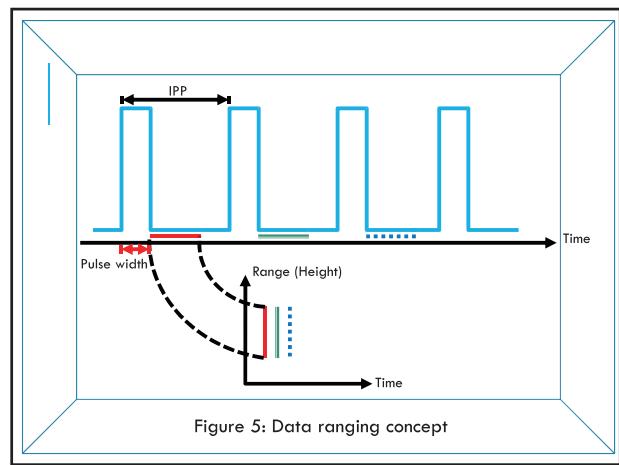
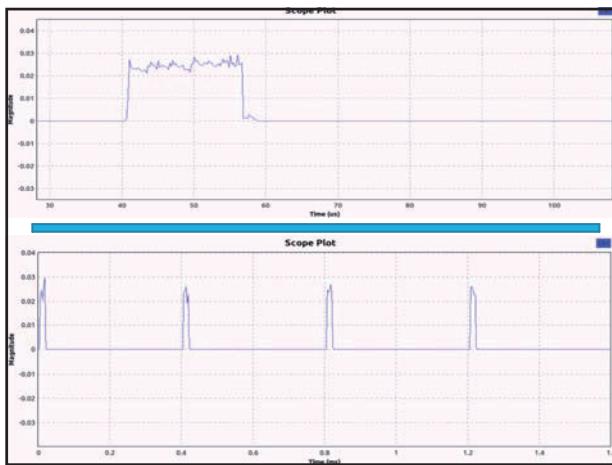
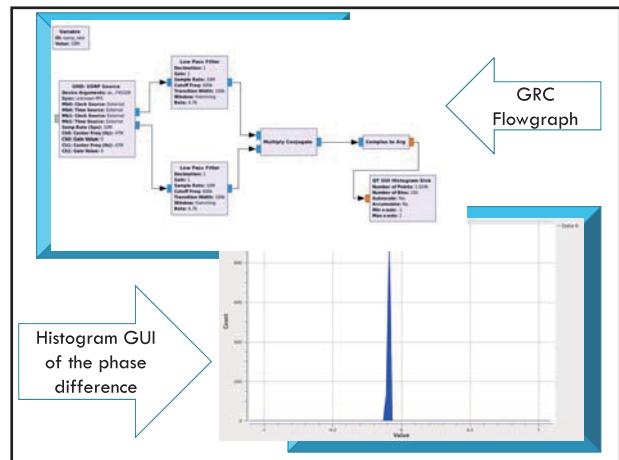
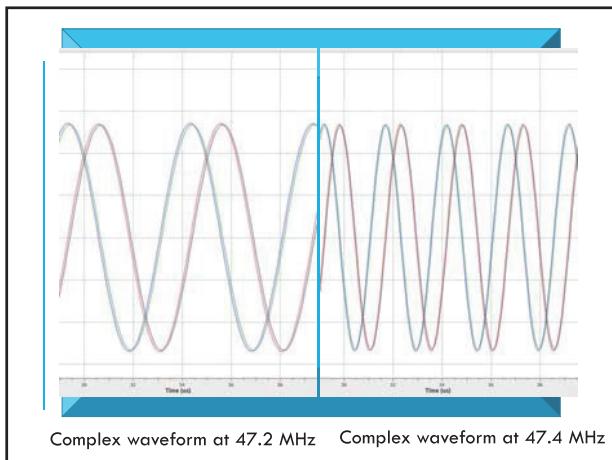
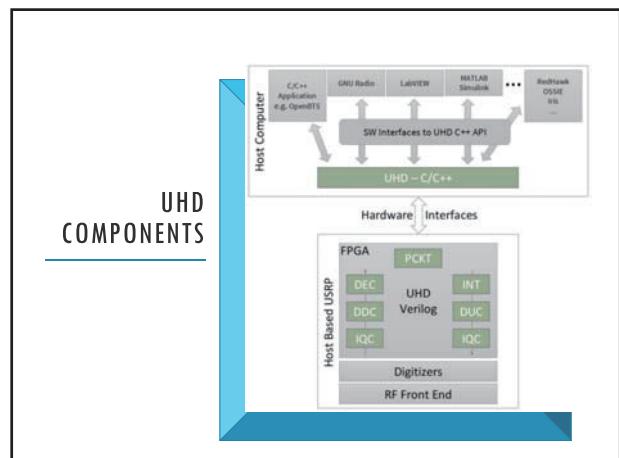
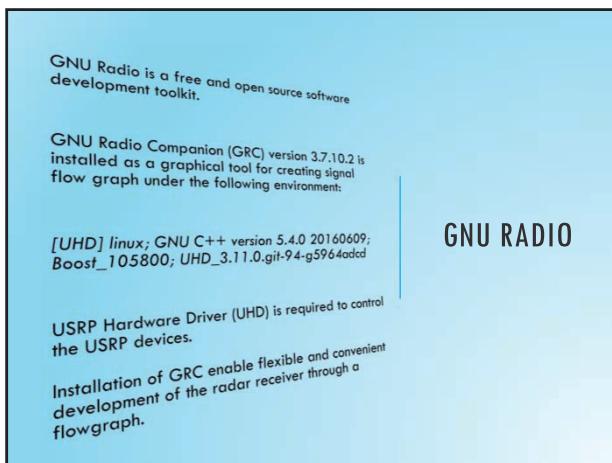
Multiple USRPs are able to be synchronized using 1 pulse per second (1 PPS) input.

MULTIPLE USRP DEVICES

1. A stable source of a digital clock have to be used for synchronous sampling in all USRP receivers for coherent operation.
2. We are using Ettus Research OctoClock as a solution for multi-channel synchronization.
3. It includes the internal source of GPS Disciplined Oscillator (GPSDO).

CURRENT CONFIGURATIONS OF SYNCHRONIZED MULTI-USRP





SUMMARY

1. USRP2/N210 device is synchronized using 10 MHz reference clock and 1 PPS for the development of the multi-channel receiver.
2. The signal processing is carried out using GNU Radio.
3. We have yet to test the synchronous signal processing using GNU Radio.

REFERENCES

- [1] S. Fukao *et al.*, "Equatorial atmosphere radar (EAR): System description and first results," *Radio Sci.*, vol. 38, no. 3, 2003.
- [2] T. Y. Yu, R. D. Palmer, and R. Di, "Atmospheric radar imaging using multiple-receiver and multiple-frequency techniques," *Radio Sci.*, vol. 36, no. 6, pp. 1493–1503, 2001.
- [3] M. Yeary *et al.*, "Introduction To Multi-Channel Receiver Development for the Realization Multi-Mission Capabilities At the National Weather Radar Testbed," pp. 1–7.
- [4] B. Szlachetko and A. Lewandowski, "A Multichannel Receiver of the Experimental FM Based Passive Radar Using Software Defined Radio Technology," *INTL J. Electron. Telecommun.*, vol. 58, no. 4, pp. 301–306, 2012.
- [5] M. K. M. Yamamoto *et al.*, "Development of a digital receiver for range imaging atmospheric radar," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 118, pp. 35–44, 2014.

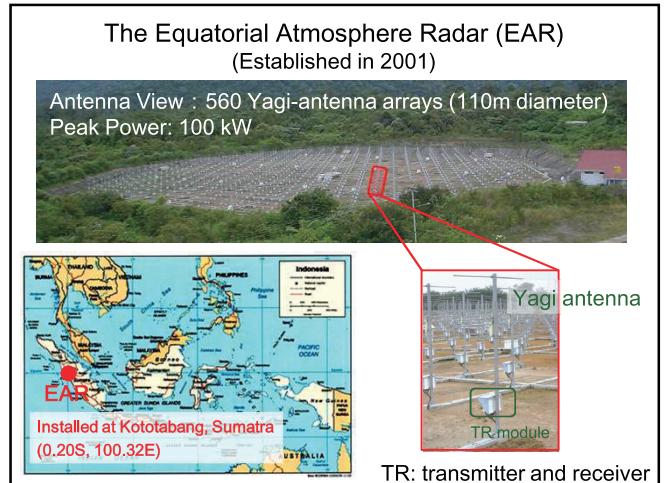
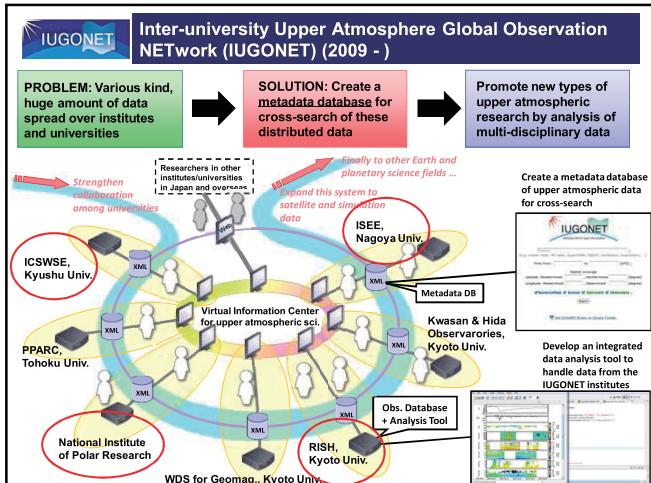
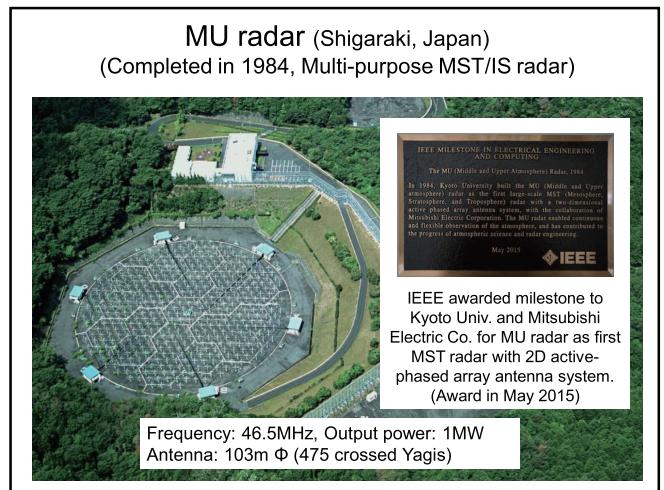
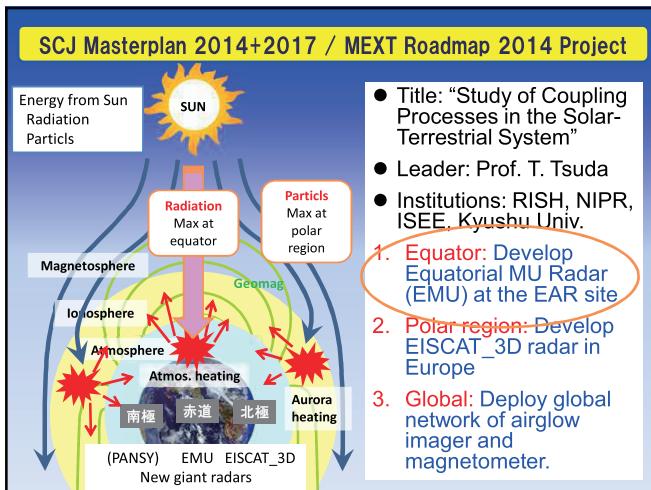
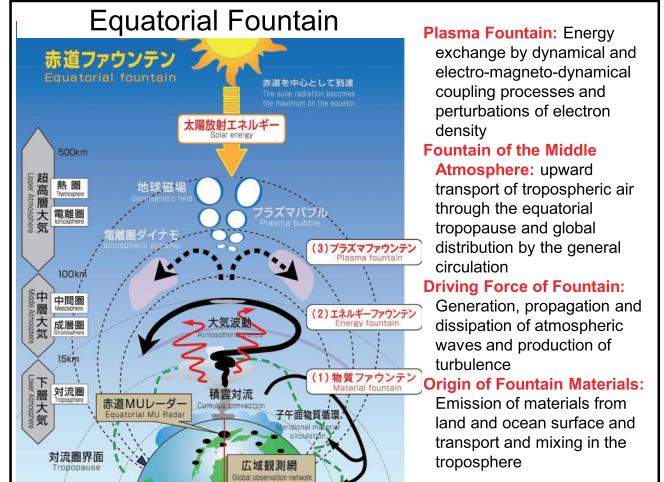
THANK YOU VERY MUCH
FOR YOUR ATTENTION

CONTACT INFORMATION:

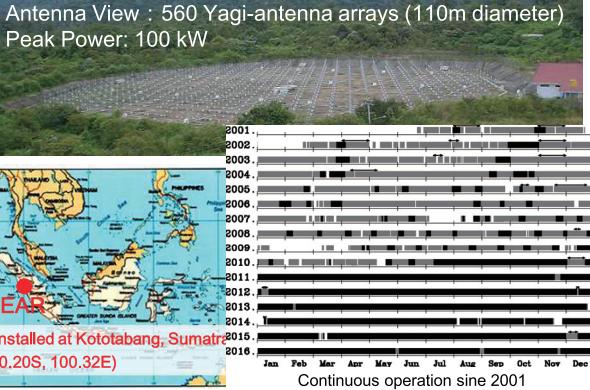
norazlan@rish.kyoto-u.ac.jp
norazlan@utem.edu.my

EMU(赤道MU)レーダー計画の現状について

山本衛, 橋口浩之, 津田敏隆
(京都大学生存圏研究所)

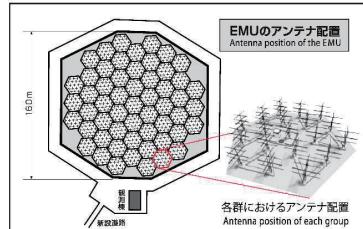


The Equatorial Atmosphere Radar (EAR) (Established in 2001)



EMUの観測システム Hardware system of the EMU

EMUでは、アンテナの大径化（直径約160m）と尖端送信出力の増大（500 kW）により、EARと比較して10倍以上の性能が向上します。また、19本×55群のサブアレイを用いたレーダーイメージング観測が可能となります。

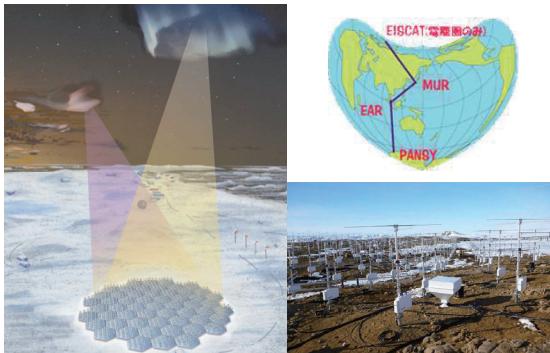


The large-sized antenna array of 160-m diameter and 500 kW peak output power enables the EMU to have 10-times higher sensitivity than the EAR. For radar imaging measurements, the 1045 Yagi elements can be divided into 55 sub-arrays, each of which is composed of 19 Yagi elements.

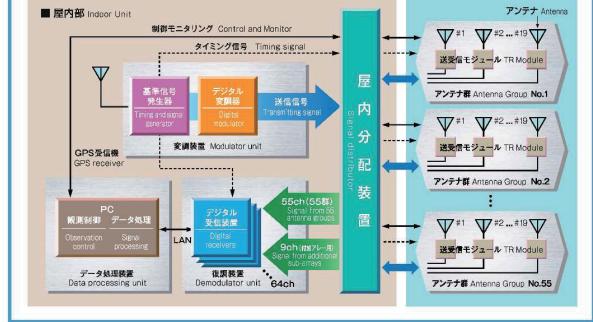
EMUの諸元 Specifications of the EMU

◆ 構成 Configuration	モニタリング用ラジオドップラーレーダー
◆ 中心周波数 Center Frequency	47MHz
◆ アンテナ Antenna	動作アレイ直径約160mのモニタリング用ラジオドップラーレーダー。アレイは、19本のYagi要素から構成される。開口面積: 16000m ² 。束方角: 30度以内の任意方向。天頂角30度以内の任意方向。アレイ指向性: 傾き角±30度。
◆ 送信機 Transmitter	構成: 1045個の送受信モジュールTRモジュール。動作周波数: Peak power 47MHz, 500kW (minimum)。偏波面: Circular polarization。
◆ 受信機 Receiver	構成: 同期交換式受信機。55つのデータ処理装置で構成される。

PANSY (Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar) NIPR + Univ. of Tokyo



EMU 系統図 Schematic diagram of the EMU



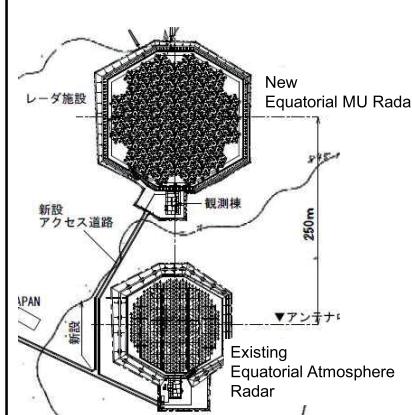
EMUは屋外のアクティブ・フェーズド・アレイ・アンテナ及び送受信モジュールと、屋内のデータ処理装置及び変調装置から構成されます。多チャンネルの高速デジタル信号処理により、EMUの観測性能を極限まで高めています。

The EMU comprises antenna and TR Module unit, data processing unit, modulator unit, and demodulator unit. Multi-channel digital signal processing brings out the full measurement capability of the EMU.

Comparison of MU Radar, EAR, and PANSY

	MU radar	EAR	PANSY
Photo			
Lon, Lat	34.85N, 136.11E	0.20S, 100.32E	69.00S, 39.59E
Number of antenna	475	560	1045
Number of RX channel	25 ch	1 ch	55 ch
Antenna aperture	8,300 m ² (103 m diameter)	9,500 m ² (110 m diameter)	20,000 m ² (160 m diameter)
TX module output	2.2 kW	200 W	500 W
Peak output power	1 MW	100 kW	500 kW
Antenna aperture × Output power (Relative number proportional to the radar sensitivity)	1.0 (standard)	0.11	1.2

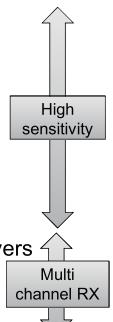
EMU will be next to EAR



- Equatorial MU Radar (EMU) will be installed next to the existing Equatorial Atmosphere Radar (EAR) at Kototabang, West Sumatra.
- EMU will be operated under collaboration with LAPAN based on success of RISH-LAPAN collaboration on the EAR.
- Detailed local survey was conducted in March 2012. Now design and installation plan of the EMU is precise and complete. We are ready to realize the new radar as soon as the funding would decided.

New observations with EMU

- Troposphere and lower stratosphere
 - Good data up to ~20km height.
- Mesosphere experiment
 - 60-80km height, daytime echoes
 - Atmospheric tides and gravity waves
- IS (incoherent scatter) experiment
 - Ionosphere plasma density, drift, and temperature measurement.
- Radar interferometry with multi-channel receivers
 - Radar imaging observations.
 - Meteor-echo observations.



Summary (1)

- EMU project status
 - The radar can be installed within one year after funding.
 - Radar design is almost fixed.
 - Detailed design improvements are underway. (Yagi antenna construction, Clutter mitigation, etc)
 - Location is next to EAR (West Sumatra, Indonesia)
- Preparation tasks
 - Visited RISTEK Minister of Indonesia for 2 times.
 - LAPAN was officially allocated as counterpart for EMU.
 - RISH-LAPAN MoU signed in 2014.
 - Location is secured by LAPAN. Construction permission is already obtained after environment assessment process.
 - 15th Anniversary of EAR will be held in Jakarta on August 4, 2016 (at RISTEK auditorium).
 - Project paper; Tsuda et al. (2016) *Radio Science*

15th anniversary of EAR
Ceremony/Symposium at Jakarta, Indonesia
August 4, 2016



Summary (2)

- 昨年からのうごき
 - 赤道大気レーダー15周年記念: 2016年8月4日ジャカルタ 在インドネシア日本大使館 次席公使 インドネシア研究・技術・高等教育省(RISTEKDIKTI) 研究開発総括官はじめ、222名参加
 - インドネシア政府のInterestを日本大使館を通じて文科省へ伝達した。
 - 日本学術会議マスタープラン2017重点大型研究(全28件)に採択された。
 - 極地研においてMST15/EISCAT18会議を開催し、182名の参加を得た(過去最大の開催)。
 - 文科省ロードマップ2017の審査。。。残念ながら、今回は掲載されなかった(掲載数は7件のみ)。
 - 京大他から文科省に概算要求、財務省へはなし。

15th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar (MST15/iMST2)

May 27-31, 2017
NIPR, Tokyo, Japan
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mst15/>



口頭発表146件
(内、招待講演31件)
ポスター発表87件

参加者
19カ国から計182名
(国外120名、国内62名)

参加機関
計84(国外66、国内18)

JpGU-AGU joint meeting (Makuhari, May 20-25, 2017)
18th EISCAT symposium (NIPR, May 26-30, 2017)

気象学と超高層物理学の研究協力はどうすべきか

加藤進、京大名誉教授

私が親しくお付き合いしてきた日本人3名の気象学者についてゆっくり考えたのは、ごく最近です。80歳代も終わりに近い高齢になって初めて感じた思いです。この3名ともに私より数年若い学者ですが、東大名誉教授1名、名古屋大学名誉教授1名、京大名誉教授1名です。専攻は皆、気象学ですが、東大名誉教授は特に理論専攻、出身は地球物理学科卒でした。名古屋名誉教授も同様理論専攻ですが、出身は東大物理学科卒でした。京大名誉教授は東大地球物理学科卒で、特に気象観測データー解析と研究が専攻です。彼等3名、共に可なり共通に気象学の体系に沿った考え方をお持ちでおられる点に興味を感じています。

私の歩いてきた道は多岐で、上述の著名な気象学者と可なり違っています。私は京大名誉教授ですが、京大地球物理学科卒で大学院生のとき、京大工学部電子工学教室教務員に雇われ、後、助手、専任講師、助教授になり電離層研究施設教授を経て京大付属超高層物理学センター長になりました。もともと超高層、電離層物理学の理論専攻ですが、教授昇任後は中層・超高層観測大型レーダー(MUレーダー)建設に従事しました。教務員としての主な仕事は学生実験の世話でしたが、丁度、IGYに備えて専ら電離層観測装置の組み立てに従事しました。まもなく京大に初めて Digital Computer KDC-I が導入されることになり、私はKDC-I のソフト・エンジニアとして働く専任講師に任命されました。このお陰で、私は世界で初めてラプラス大気潮汐方程式の級数解を厳密に解くことに成功し、幸運にも1日大気潮汐の negative mode 発見者になりました。この mode は気象学で知られていた Planetary 波のうち、12時間より長周期のものにも存在する mode であることも明らかになりました。これは大気波動研究における大きな成果になり、私は気象学分野で広くし知られる学者になったわけです。

私は電波工学科教授になった段階で、大気波動の観測する電波レーダー建設を工学者の同僚と計画することの重要性に気が付きました。丁度、国際中層大気行動観測計画(MAP)が準備された時でした。私が工学部で学んだ知識は我々の計画した大型レーダーMUレーダー設計特にレーダー・ビームの向きを計算機コントロール設計に役立ちました。気象観測可能なMUレーダー建設ためのワーキング・グループを設立し、只管レーダー完成に進みました。この日本気象学者の協力は国際的には唯一の貴重なものでした。MUレーダーはMAP成功

の最高の設備と云えます。特にMAPの重要な目的は大気重力波（AGW）の観測でしたから、その観測に大きな期待がありました。

でも今思うことは、AGWの飽和については気象学者とレーダー屋とは十分な相互理解には達していません。それは何故か？大きな課題です。私はそのためには気象学体系と電離層物理学屋、プラズマ物理学屋の研究との違いまで遡る必要性を感じています。AGWの線形理論を完成させたのは Hines(1960)でした。彼の線形理論は高度 z と共に振幅は $\exp(z/H)$ に infinitely 増大します。この増大は、彼の理論の方程式に彼が無視した非線形項 $\{(\nabla \cdot V) V\}$ を導入すれば、この項が与える braking 効果で、infinite 増大は抑えられ、簡単に飽和効果が得られます。予想できる飽和は Hines が得た増加効果項 $\exp(z/H)$ が消える筈です。結果は結局、単に sine 波動が飽和波として与えられる筈です。この最終的に達する飽和波への接近は asymptotic なので、接近の解析的表現は数学的に表現できません。でも安定な波動振幅の最大値 V_0 振幅値=位相速度、となり $V_0 = (\omega/k, \omega/m)$ になるはずです。なお ω 、 k 、 m は各々 frequency、水平、上向き垂直波数です。また V_0 は非線形効果で分裂し、中間圏の風、乱流に変わることも、上方に伝搬する新しい大気重力波に変換され熱圏まで伝搬するものもあるはずです。

ここで飽和波が持つ「dispersion は線形理論のものと同一」を仮定する必要があります。その根拠ははっきりしませんが、この仮定を認めると、飽和エネルギースペクトルが得られます。それは m^{-3} に比例します。この理論を詳しく論じた研究は見当たりません。このような大気重力波飽和の理解を気象学者にもお願いしたいと考えています。

最後になりましたが、レーダー観測理論の話です。特に中間圏観測では、用いるレーダーパルスが得るエコーは、散乱の大きい電子からのエコーが主です。電子は中間圏の地球磁界に捕らえられていますが、共存する質量が大きいイオンとの間に起こる静電場で引き寄せられ、最終的には電子はイオンと共に移動します。中間圏までの高度では、中性大気の乱流と動きを共にすることは明らかです。なぜなら $\text{div}V_t = 0$ にあります。ここで V_t =乱流速度です。この電子をイオンに引き寄せる静電場の強度が十分でないとイオンと電子の動きに差が出ます。観測の誤差になります。電波エコーの散乱電力は昔から知られていましたが、エコーの運動速度の研究は最近 (Kato, 2009) まで未知でした。直観的なアイデアに従えば、先ず安定なプラズマは、中性が保たれ電子とイオンの密度等しくなっています。つまり $N_e = N_i$ です。この電子をイオンに引きよせる強い静電場のた

に電子とイオンは co-move します。つまり軽い電子は重いイオンに引かれ電子はイオンとともに、つまり風と共に移動します。そしてレーダー観測で風速測定ができます。観測研究には Woodman et al. (1974)を参照。

最後に述べたいことは、気象学と超高層物理学は研究目的を同じにはできないことです。

参考文献

- Hines, C. O., Cana. J. Phys. 38, 1441 (1960)
Kato, S., J. Geophys. Res., 71, 1441 (1966)
Woodman, R.F. and A.. Gullen, J. Atmos. Sci. 31, 493 (1974)
Kato, S., T. Tsuda, M. Yamamoto, T. Sato and S. Fukao, J. Atmos. Terr. Phys.,
48, 1256 (1986)
Kato, S., Earth Planet. Space, 61 545 (2009)
Kato, S., M. Yamamoto and T. Nakamura, 8th MUR and Equatorial Radar
Symposium, p.53 (2014)
Kato, S., H. Hasiguti, T. Tsuda and M. Yamamoto, 通信ソサイエティマガジン
B-plus, Spring No. 36, p. 236 (2016)

赤道域 Ku 帯衛星回線の降雨減衰特性の年変動について

前川泰之・西村優・柴垣佳明（大阪電気通信大学）

1. はじめに

近年衛星通信回線は、C帯(6/4GHz)に加えて10GHz以上の周波数も盛んに用いられるが、周波数が10GHz以上の電波は降雨による影響を受けやすいため、効率的な回線設計や運用のためには降雨の影響を詳細に把握する必要がある[1]。特に最近では赤道域の多雨地域においても、大容量伝送が可能なKu帯等10GHz以上の周波数の利用が進み、その回線品質の調査が急務である。

本研究では、京都大学生存圏研究所(RISH、京都府宇治市)と赤道大気レーダー(EAR、インドネシア西スマトラ州)で2003年1月から2006年9月までの4年間にわたるスーパーバードC号機(軌道位置144°E)のKu帯上下回線(14/12GHz)における降雨減衰測定値[2], [3]を用い、それらの特性についてさらに詳しく検討を行う。特に上下回線の降雨減衰量の比には、降雨事象あるいは測定年によってかなりの変動があり、降水雲のタイプや雨滴粒径分布との関連性がすでに指摘されており[2], [3]、今回の報告では、測定年により卓越する降水雲の降雨タイプ等についてさらに詳しく調査を行った。

2. 測定システム

本研究の測定に用いたのは、京都大学宇治構内の生存圏研究所(RISH)とインドネシア西スマトラ州の赤道大気レーダー(EAR)とをスーパーバードCを介して結ぶKu帯のSCPCによるデータ伝送専用回線である。RISHでの上り回線の送信周波数は14.1292GHz、下り回線の受信周波数は12.7351GHzであり、EARでの上り回線の送信周波数は14.4651GHz、下り回線の受信周波数は12.3992GHzである。偏波面はいずれの局も上り回線は垂直偏波、下り回線は水平偏波をそれぞれ用いている。EARにおける仰角は約39°、RISHにおける仰角は約49°である。また各局の海拔高度はRISHが約50mと低地であるのに対し、EARは約865mと比較的高地にある。これらのVSAT局のアンテナとしては短径1.8mのオフセットグレゴリアンアンテナが用いられている[2]。

日本とインドネシアにおける両局の受信レベルは、16ビットのAD変換ボードを装備したパーソナルコンピュータ(PC)を両局に設置してVSAT局のIDU(In Door Unit)の受信機のAGC電圧を1秒毎にサンプルすることにより同時に取得した。このAGC電圧はIDUのパネルに表示される受信レベル(dBm値)により校正を行った。これらのデータは常時計測用PCのハードディスクに記録され、毎月定期的に同衛星の専用回線を通してRISHに転送される。さらに両局のデータはインターネット接続によって大阪電気通信大学に集約されて詳しく解析された。

本測定で利用した衛星回線はSCPC信号であり、他のチャネル信号と衛星中継器を共有するため中継器入力に対してバックオフが設けられ、中継器の線形増幅領域で用いられている。このため一方の局における14GHz帯の上り回線での送信電力変動が、他方の局の12GHz帯の下り回線にそのまま現れるので、降雨時の各局の上り回線減衰量を相手方の局の受信レベルを用いて同時にモニターすることにより推定可能となる。なおこの手法は、大阪電気通信大学らがかつてJCSAT1号機による大学間衛星利用共同実験[4]において、日本全国のKu帯上り回線降雨減衰データを収集したときに用いた方法を日本とインドネシアの間に応用したものである[2], [3]。

また1分降雨強度は、RISHでは転倒枠0.1mm雨量計で測定し、EARでは島根大学が設置した光学式雨量計(ORG)の測定データを使用した。なお、日本とインドネシアは約6000km離れており、Ku帯で今問題とする数dB程度以上の減衰を引き起こすような20mm/h以上の降雨強度が同時に発生する時間率は0.001%以下であり、実用上無視できる。またこのSCPCの受信機を用いた方法で測定可能な減衰量のダイナミックレンジは約20dB程度であり、衛星下り回線のビーコン波や中継器を飽和増幅した放送波を用いた減衰測定に比べて最大減衰量が幾分小さくなるが、Ku帯減衰量に関しては上下回線ともほぼ0.001%値までカバーできるという利点がある。

3. 上下回線の降雨減衰統計

本章では、まず図1に2003年から2006年の各年に得られた上下回線の降雨減衰年間累積時間率を示す。図1(a)～(d)より2003～2006年の各年において周波数の高い上り回線の方が下り回線より減衰量と時間率とも高い値が得られていることが分る。また、各年とも減衰が10～15dBを超えると時間率が急速に低下する傾向が見られ、これは熱帯特有の対流性降雨による雨域の局在性が原因と考えられる。

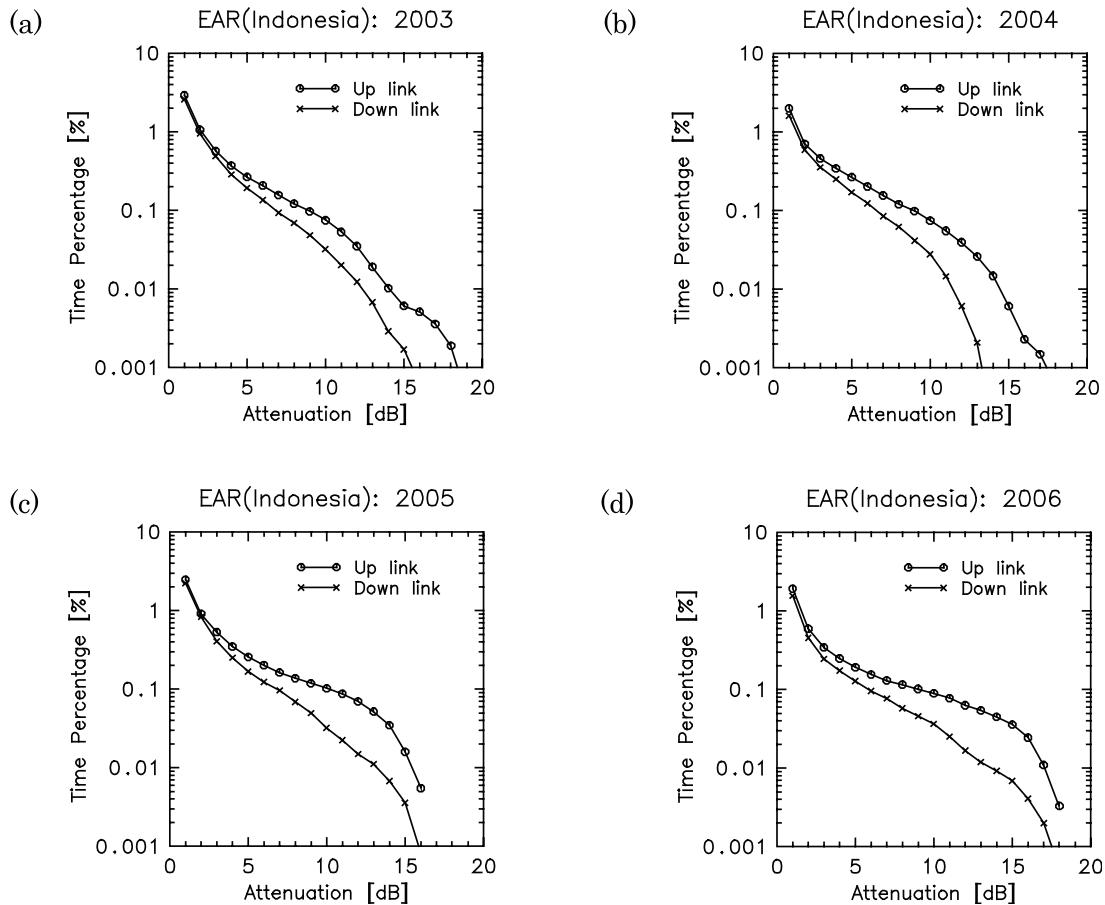


図1. 2003～2006年の各年にそれぞれ測定された上下回線降雨減衰量の年間累積時間率分布。

しかし、詳しく見ると上下回線同じ伝搬路であるにも関わらず、各減衰量に対する両者の時間率の割合や、同じ時間率に対する上下回線減衰比は各年の間で一定ではなく、むしろかなり顕著な年変動が存

在することが分る。

そこで本章では次に、EAR 地球局の上下回線で測定した降雨減衰比の降雨事象毎の事例示す。図 2 は(a)2003 年 2 月 13 日、(b)2003 年 6 月 27 日、および(c)2004 年 10 月 17 日における上下回線減衰量の測定例の相関図である。図中の細線は Jd(Joss-drizzle)。MP(Marshall-Palmer)、および Jt(Joss-thunderstorm)型の雨滴粒径分布[1]に基づく上下回線減衰比の理論計算値[2]である。各相関図の右側には、上下回線減衰量と降雨強度の時間変化を 3 時間にわたって示してあり、測定間隔は 1 分である。

図 2(a)より、減衰発生のピークが一回だけの比較的降雨継続時間が短くて降水雲のサイズが小さいと想定される例では、降雨減衰比は概して大きくなり、Jd 型に代表されるような比較的雨滴粒径分布が小さい方に偏った降水雲タイプによる事例といえる。この様な事例は減衰量の大小に関わらずピークが 1 回だけの時に多く見られる。次に図 1(b)の降雨減衰のピークが 2 回に分けて表れる事例では降雨減衰比はピーク一回の場合より少し小さくなる傾向があり、標準的な MP 型の雨滴粒径分布に近い降雨減衰比の値を示すことが分かる。さらに図 1(c)の様に降雨減衰のピークが 3 回以上にわたって表れて比較的降水時間が長く降水雲のサイズが大きいと思われる例では、減衰比はさらに小さくなる傾向があり、Jt 型に近い比較的大きな粒径に偏った雨滴粒径分布の影響が示唆される。

この様に、降雨減衰比は降水雲のサイズによる降水雲のタイプとその雨滴粒径分布の影響を大きく受けると考えられ、降水雲のサイズが大きくなつて発達するほど、概してその雨滴粒径分布も大きい方に偏る傾向があるためこの様な結果になると考えられる。

そこで、ピークが 1 回のみの降雨減衰を降水雲タイプ #1、ピークが 2 回表れる降雨減衰を降水雲タイプ #2、およびピークが 3 回以上の降雨減衰を降水雲タイプ #3 として降雨事象毎に分類し、それらの降雨タイプ (1, 2, 3) に対する降雨減衰比の測定値の降雨事象毎の平均値を計算した結果を、図 3 に 2003~2006 年の年毎の度数分布で示す。なお平均値の計算は降雨減衰の推定誤差 ($\pm 1\sim 2$ dB) を避けるために、上下回線とも 2~3dB 以上の減衰値について行った。

図 3 より、2003~2006 年のいずれの降雨事象においても、概して降雨タイプが 1、2、3 の順で降雨減衰比が大きく表れる傾向がある。また前半の 2003~2004 年は比較的減衰比が小さい降雨タイプ 3 もかなり多いのに対し、後半の 2005~2006 年は逆に減衰比が大きい降雨タイプ 1 の方が多く発生し 2005 年にこの傾向が著しいことが分かる。従って以上の様な降雨事象毎に表れる減衰比が小さくあるいは大きくなる降雨タイプの差異と、年毎に表れるそれらの発生頻度の差が、上下回線の降雨減衰比の年間統計に表れる変動の原因と考えられる。表 1 に降水タイプ 1、2、3 に対する 2003~2006 年の 4 年間通しての上下回線降雨減衰比の平均値、表 2 に 2003~2006 年の各年の減衰比の平均値を示す。

表 1. 各降水タイプの上下回線降雨減衰比の平均値

降雨タイプ	1	2	3
降雨減衰比	1.38141	1.27586	1.18901

表 2. 各年の上下回線降雨減衰比の平均値

測定年	2003	2004	2005	2006
降雨減衰比	1.26968	1.28800	1.38747	1.33217

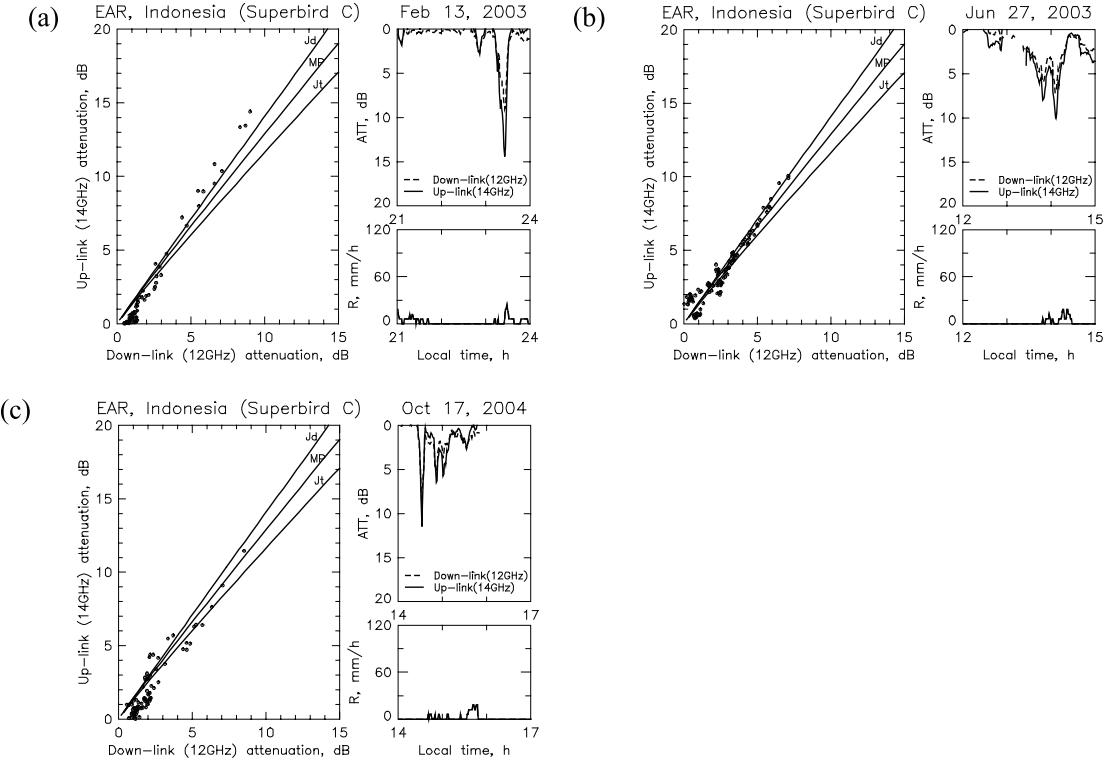


図2. (a)2005年3月11日、(b)2015年3月9日、(c)2004年10月17日における上下回線減衰量の測定例。左側に相関図、右側に減衰量と降雨強度の時間変化を示す。

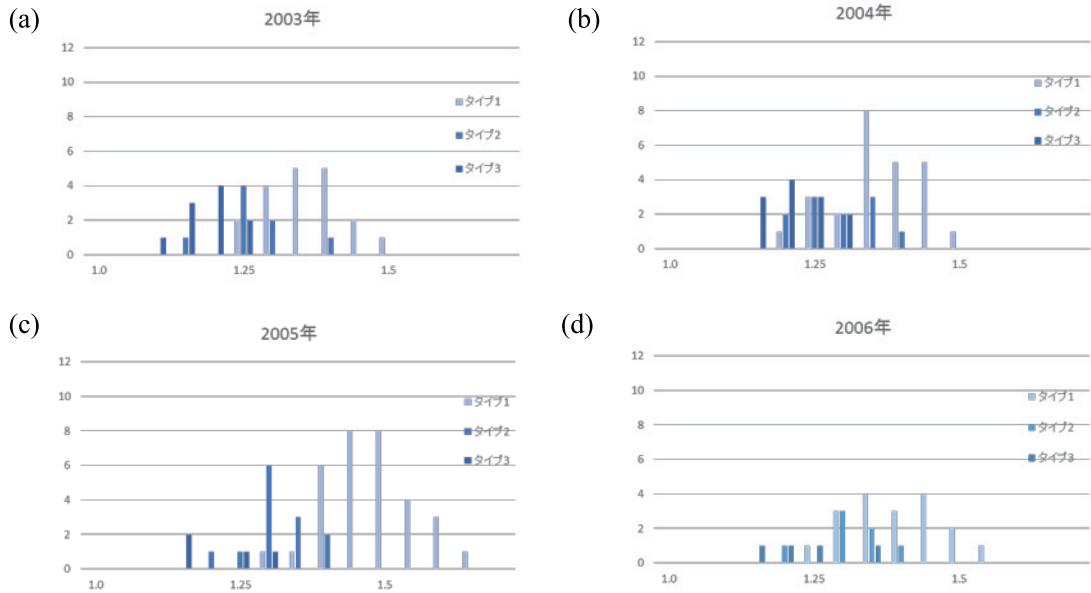


図3. (a)2003年、(b)2004年、(c)2005年、および(d)2006年における各降雨タイプ(1, 2, 3)の降雨事象に対する降雨減衰比の度数分布。

次に図4(a)に2003~2006年の各年に観測された降雨タイプ1、2、3の発生回数の度数分布と、(b)同発生率(%)を示す。図3より全般的に降水タイプ1が各年とも多いが、2003~2004年の発生回数は全体の約半分の50%にとどまるが、2005~2006年は60%以上に増加することが分かる。

これに対し降水タイプ3は2003~2004年の発生回数は全体の25%程度あるが2005年には約8%までに減少するが、2006年には約13%に戻る。また降水タイプ2の発生回数は各年とも全体の25%前後であり余り大きな変化は示さない。

さらに図5(a)に2003~2006年の雨季に観測された降雨タイプ1、2、3の発生回数の度数分布と、(b)同発生率(%)を示す。また、図6(a)に2003~2006年の乾季に観測された降雨タイプ1、2、3の発生回数の度数分布と、(b)同発生率(%)を示す。ここで雨季は毎年降水量の多い2~4月と9~11月の期間で、乾季はそれ以外の月の期間に定めてある。図5と図6より、降雨タイプ3は比較的雨季に、降雨タイプ1は比較的乾季にそれぞれ多く発生する傾向が示される。

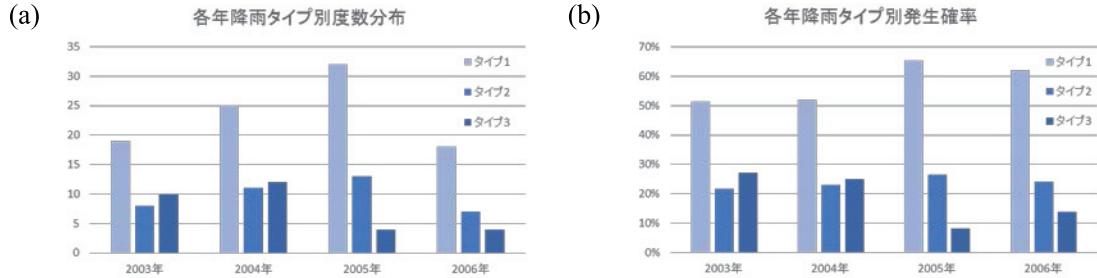


図4. (a)各年に観測された降雨タイプ1、2、3の発生回数の度数分布と、(b)同発生率(%)。

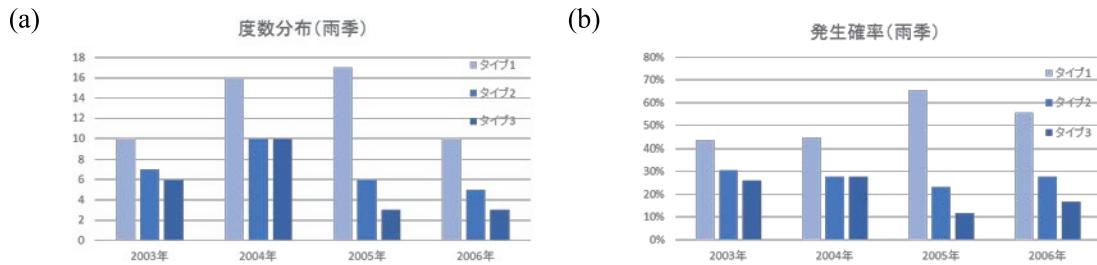


図5. (a)各年の雨季に観測された降雨タイプ1、2、3の発生回数の度数分布と、(b)同発生率(%)。

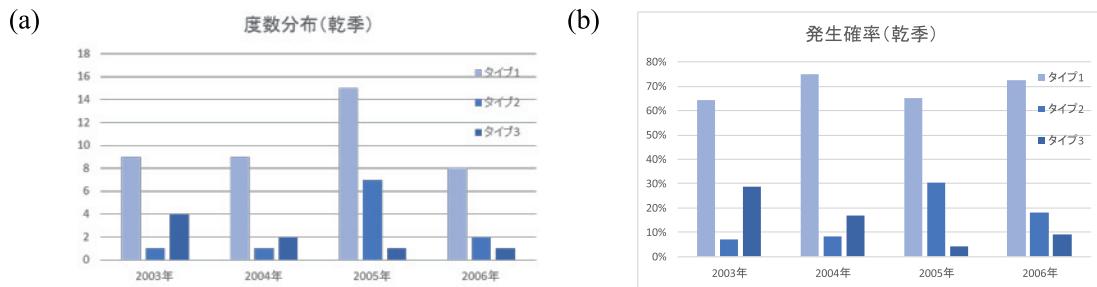


図6. (a)各年の乾季に観測された降雨タイプ1、2、3の発生回数の度数分布と、(b)同発生率(%)。

最後に図7に表2に示した2003~2006年の各年に得られた(a)降雨減衰比の降雨事象毎の平均値と、同年の降雨減衰累積時間率と上下回線の周波数(14/12GHz)に対応する降雨減衰係数(α dB/km) [5]から計算した(b)等価雨域通路長との関係を示す。等価雨域通路長は上下回線両方の値を用いて、降雨強度が20mm/h以上の場合について平均して求めた。図7より両者の間にかなり明らかな逆の相関があることが分かる

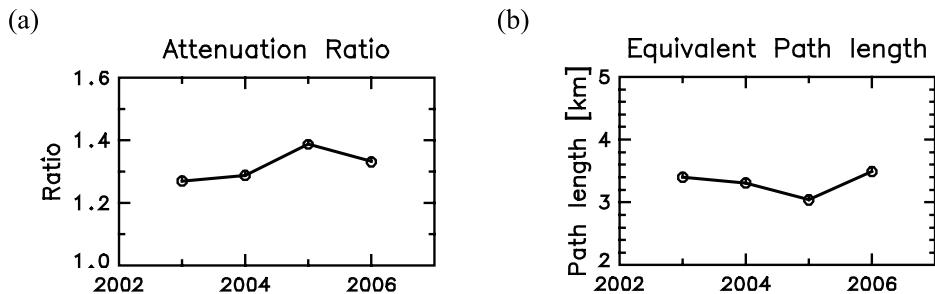


図 7. 各年の(a)上下回線降雨減衰比と(b)等価通路長の関係。

4. おわりに

赤道大気レーダ (EAR、インドネシア西スマトラ州) で 2003~2006 年の 4 年間に取得したスーパーバード C 号機の Ku 帯上下回線 (14/12GHz) における降雨減衰比について降雨事象毎に検討した結果、降水雲のスケールに関連した雨滴粒径分布の要因が指摘された。またその年変動は年間累積時間率分布から導いた等価雨域通路長の変化と逆の相関を示し、降水雲のスケールの変動との関係と一致する結果が得られた。

謝辞

EAR 研究にご協力いただいた京都大学生存圏研究所と島根大学の研究グループに感謝致します。

参考文献

- [1] 飯田尚志、“ウェーブサミット講座:衛星通信”、オーム社、1997.
- [2] Y. Maekawa, T. Fujiwara, Y. Shibagaki, T. Sato, M. Yamamoto, H. Hasiguchi, S. Fukao, “Effects of tropical rainfall to the Ku-band satellite communications links at the Equatorial Atmosphere Radar Observatory,” J. Meteor. Soc. Japan, vol. 84A, pp.211-225, 2006.
- [3] 前川、柴垣、佐藤、山本、橋口、深尾、“温帯および赤道域での Ku 帯衛星上下回線における伝搬特性の測定”、信学技法、AP2009-4, 2009-05.
- [4] T. Hatsuda, Y. Aoko, H. Echigo, F. Takahata, Y. Maekawa and K. Fujisaki, ”Ku-band long distance site-diversity (SD) characteristics by using new measuring system,” IEEE Trans. Antennas and Propagat., vol.52, No.6, pp.1481-1491, 2004.
- [5] “Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems,” Geneva, ITU-R Recommendation P618-8, 2005.

MRR 観測に基づくブライトバンドの等価レーダ反射因子と雨滴の落下速度および平均粒径の関係

米江泰貴・下舞豊志(島根大学大学院)

1 はじめに

レーダでの降雨観測をする際、融解層周辺ではよくブライトバンド（以後、BB）という現象が観測される。BB 中で融解中の雨滴からは強い等価レーダ反射因子 Z_e が観測され、降水の定量観測に誤差を生じさせる。これまで、X バンドを用いた降雨観測の結果から BB 幅と BB ボトムの Z_e の相関があると報告されている[1]。このことを参考にして BB 中の雨滴の特性について知るために、本研究では BB ボトムの等価レーダ反射因子 Z_e と雨滴の落下速度 W および平均粒径の関係について調べる。また、2 地域のデータについて解析することで、2 地域の雨滴の性質について検討する。

2 観測機器

本研究には Micro Rain Radar(以後、MRR)を用いる。このレーダは FMCW 方式の小型ドップラレーダで周波数 24.1 GHz である。鉛直ドップラ速度に対応する等価レーダ反射因子のスペクトルが測定できる。この鉛直プロファイルから BB を観測する。データの時間分解能は 60 秒、高度分解能は 150 m で 150~4500 m(AGL)の高度のデータを用いた。

3 使用したデータ

京都大学信楽 MU 観測所(滋賀県甲賀郡信楽町)において 2013~2014 年に得られた観測データのうち、合計 10 日間、840 分の観測データを用いた。コトタバン(インドネシア)においても同様に、2011~2013 年に得られた観測データのうち、合計 12 日間、1200 分の観測データを用いた。

4 ブライトバンド(BB)

雪粒子が落下し融解する過程で粒子からのエコーは大きく変化し融解中に等価レーダ反射因子 Z_e は最大となる。この最大値を BB ピーク、雪が完全に融解したと考えられる BB の下側の境界を BB ボトムとする。BB ボトムは鉛直プロファイルの曲率が最大の位置とした。本研究に用いた BB の形状を特徴付けるパラメータは①BB のピークから BB のボトムまでの幅（以後、BB 幅）②BB のボトムの Z_e である。図 1 に BB のパラメータの概略を示す。また、図 2 に BB が観測されたときの等価レーダ反射因子の 0~40 dBZ における時間・

高度断面図を示す。高度 3000 m 付近で明るい領域が BB を示している。

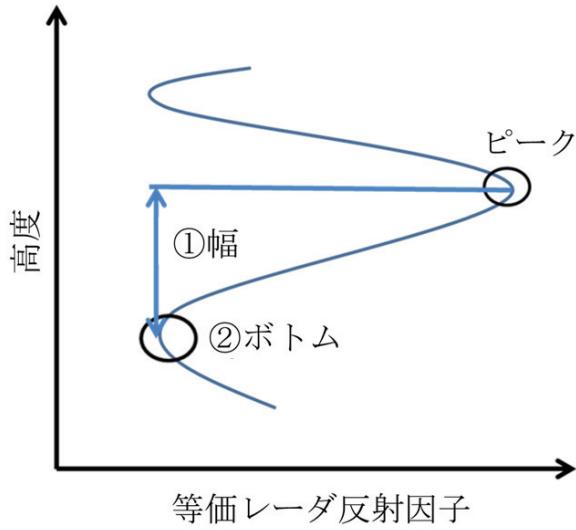


図 1 BB を特徴付けるパラメータ

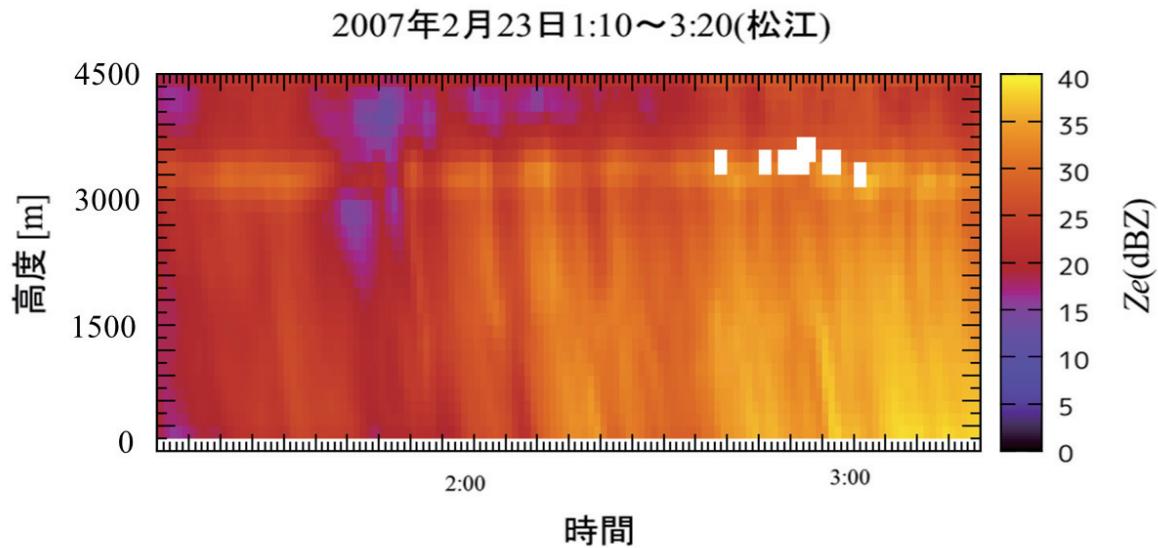


図 2 MRR による BB の観測例

5 平均粒径

平均粒径は粒径を質量で重み付けしたものであり、DSD のモーメント比で表される。

$$D_x = \frac{M_{x+1}}{M_x} = \frac{\int_0^{\infty} D^{x+1} N(D) dD}{\int_0^{\infty} D^x N(D) dD}$$

本研究では D_0 、 D_3 、 D_6 を用いる。 D_0 は雨滴の直径の平均、 D_3 は雨滴の体積の平均値、 D_6 は雨滴の散乱断面積の平均値に比例した量を表す。

6 観測結果

MRR によって観測された BB 幅についてのヒストグラムを図 3 に示す。

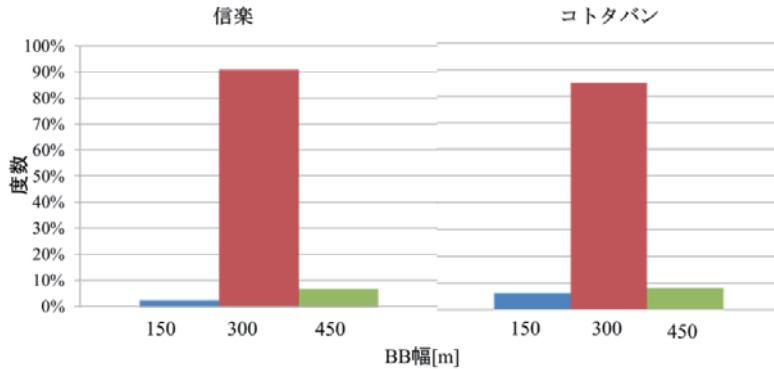


図 3 BB 幅のヒストグラム

この結果から最も観測回数の多かった BB 幅 300 m について解析した。

地域ごとに BB ボトムの Z_e と雨滴の落下速度 W の関係を図 4 に示す。

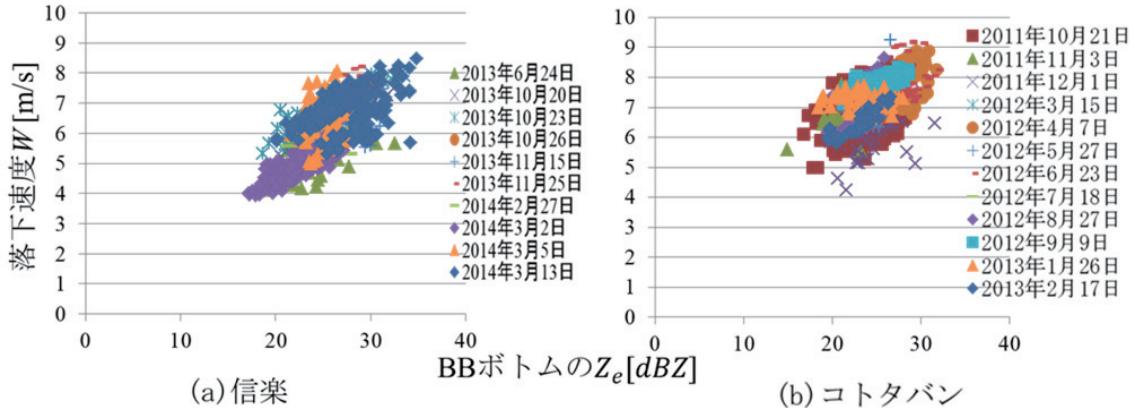


図 4 (a)信楽 (b)コトタバン で観測された
BB ボトムにおける Z_e と雨滴の落下速度 W の関係

図 4 より両地域とともに BB ボトムの Z_e が大きくなると雨滴の落下速度 W が速くなっている、正の相関が認められた。一般的に BB ボトムの Z_e が大きくなると大きな雨滴が多く存在すると考えられ、落下速度 W が大きくなるという結果は妥当であろう。

地域ごとに BB ボトムの Z_e と雨滴の平均粒径 D_0 、 D_3 、 D_6 の関係を図 5~7 に示す。図 5~7 より BB ボトムの Z_e とそれぞれの平均粒径に相関は認められなかった。しかし、 D_0 から D_6 になるにつれ少し相関が強くなっている。BB ボトムの Z_e と落下速度と同様に、 Z_e が大きいと大きな雨滴が多く平均粒径も大きくなることが予想されたが、予想と反する結果となった。

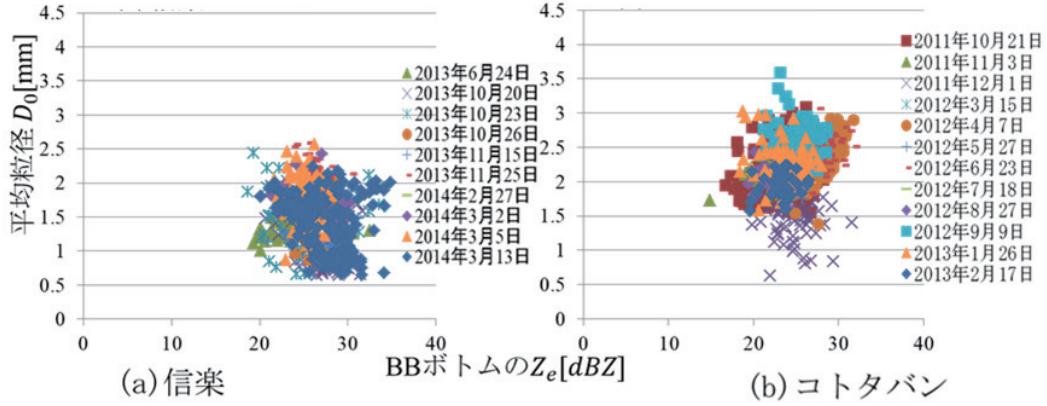


図5 (a)信楽 (b)コトタバン で観測された
BBボトムにおける Z_e と平均粒径 D_0 の関係

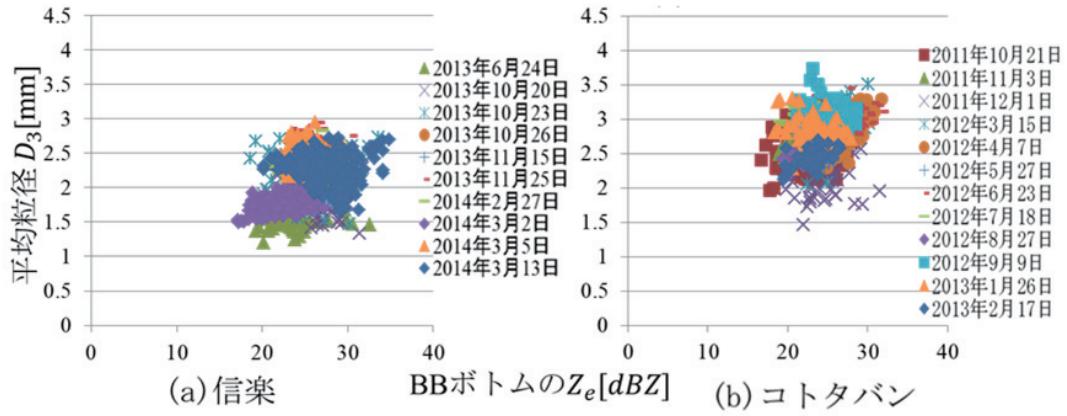


図6 (a)信楽 (b)コトタバン で観測された
BBボトムにおける Z_e と平均粒径 D_3 の関係

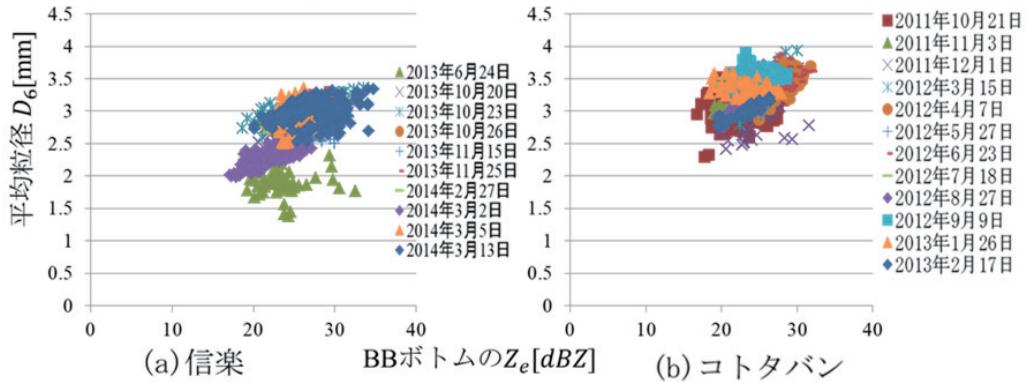


図7 (a)信楽 (b)コトタバン で観測された
BBボトムにおける Z_e と平均粒径 D_6 の関係

平均粒径についてより深く調べるために、降雨強度別にデータを分類した。データの分け方は 0~0.5、0.5~1、1~1.5、1.5~2 mm/h という 4 つとした。なお、2~ mm/h 以上はほとんど観測できなかつたので考えない。分類した結果を図 8、9 に示す。

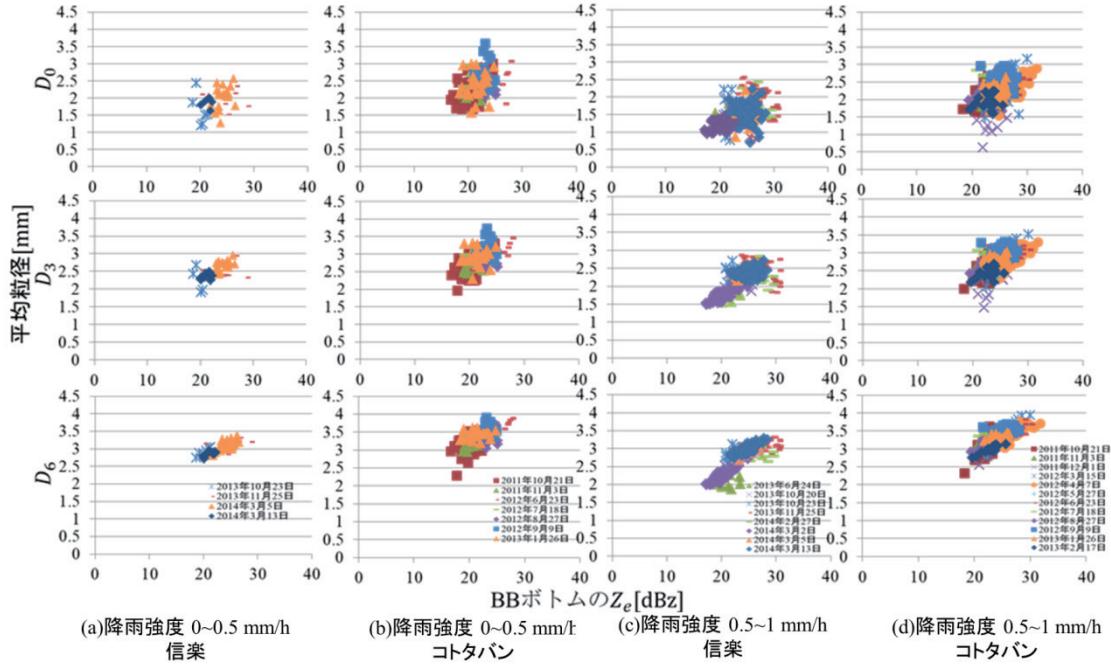


図8 降雨強度 0~0.5 mm/h の時に (a)信楽 (b)コトタバンで
降雨強度 0.5~1 mm/h の時に (c)信楽 (d)コトタバンで観測された
BB ボトムにおける Z_e と平均粒径の関係

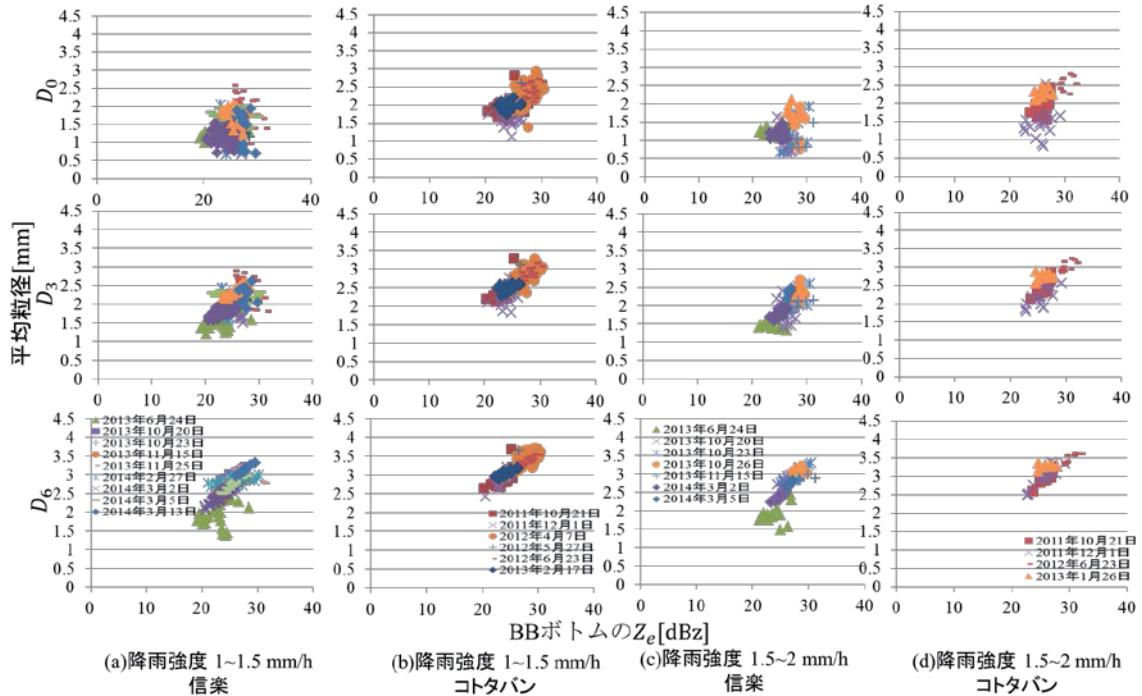


図9 降雨強度 1~1.5 mm/h の時に (a)信楽 (b)コトタバンで
降雨強度 1.5~2 mm/h の時に (c)信楽 (d)コトタバンで観測された
BB ボトムにおける Z_e と平均粒径の関係

図8、9より両地域ともにすべての降雨強度で、平均粒径 D_0 、 D_3 、 D_6 となるにつれてBBボトムの Z_e との相関が強くなっているのがわかる。 D_6 と Z_e は散乱断面積に準ずる値なので相関が認められるのは妥当であると考える。しかし、 Z_e と D_0 、 D_3 に相関が認められない理由はこの結果だけではわからない。ほかのパラメータを含めて検討しなければならないと考える。

信楽とコトタバンの雨滴の性質の違いについて考える。 Z_e に関して両地域とも20~30 dBZの範囲に観測値が集中している。落下速度 W に関して信楽は観測値が4~8 m/sに、コトタバンは5.5~9 m/sに集中している。また、平均粒径 D_0 に関して信楽は観測値が0.7~2.2 mmにコトタバンは1.5~3 mmに集中している。このことから、両地域の雨滴の総量は同程度だが信楽はコトタバンに比べ、粒径の小さな雨滴の比率が大きく落下速度が遅いことが考えられ、降雨には地域差があると思われる。

7 結論・まとめ

MRRを用いてBBが表れているときの信楽とコトタバンのデータの解析を行った。その結果、BBボトムの Z_e と雨滴の落下速度 W には正の相関が認められたが、BBボトムの Z_e と平均粒径には相関が認められなかった。降雨強度別にBBボトムの Z_e と平均粒径 D_0 、 D_3 、 D_6 の関係を見ると D_0 、 D_3 、 D_6 になるにつれて相関が強くなっている。 Z_e と落下速度 W 、 Z_e と D_6 に相関があったのは妥当な結果だったが、この2つ以外に相関がなかったことについては今後も検討が必要である。

信楽とコトタバンのBBボトムの Z_e と雨滴の落下速度 W 、平均粒径の違いから以下のことが考えられる。信楽とコトタバンの雨滴の総量が同程度であるが、信楽のほうが小さな雨滴の比率が大きく、落下速度が遅い。

8 課題・今後

平均粒径を降雨強度別に分類すると、 Z_e と D_6 には相関が認められたが D_0 、 D_3 には認められなかった。 Z_e と D_6 は散乱断面積に準ずる値なのでこの結果は妥当であるが、 Z_e と D_0 、 D_3 についてこのような関係となった理由は現状ではわからない。そのため、Z-R関係も含めて Z_e と雨滴の粒径の関わりについて調べる。また、雨滴粒径分布の違いについても検討する。

謝辞

本研究は京都大学生存圏研究所MUレーダ・赤道大気レーダ共同利用研究により実施されました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] Frederic Fabry and Isztar Zawadzki, 1995: Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation. J. Atmos. Sci., 52, 838–851.

ELF-VLF 帯電界計測網に基づいた関東圏における雷活動の電気的特性の評価

山下幸三（足利工業大学）、高橋幸弘（北海道大学）

1. はじめに

近年、積乱雲活動を原因とする豪雨・落雷の被害規模は拡大の一途を辿っている。気象学分野では降雨活動の監視、豪雨の直前予測における雷放電監視の有用性が指摘されている。既に雷データを用いた豪雨予測[1]、鉄砲水予測[2]が検討されている。工学分野では高性能化・高集積化が進む電子機器の雷サージ耐性低下が懸念されている[3]。社会インフラとして重要度が高い情報通信機器の安定稼働において、サージの原因となる雷活動把握は喫緊の課題である。

雷活動の把握には2つの側面が必要である。第一に雷活動の時空間分布の導出である。いつ、どこで雷活動があるのかを高精度・高感度に観測する必要がある。既に、様々な手法での雷観測網の構築が進んでいる。第二に雷活動の電気的特性の導出である。先行研究では、平均的な放電規模の100発分程度の規模のイベントの存在が確認されている[4]。放電規模の推定は先行事例が少なく、また対象とする地域や放電規模も限定的である。

2. 目的

本研究では、個々の雷放電の放電規模として、中和電荷モーメント $Q_z[\text{C}\cdot\text{km}]$ ($Q[\text{C}]$: 放電により中和された電荷量、 $z[\text{km}]$: 放電路長) の導出を検討する。先行研究では中和電荷モーメント $Q_z [\text{C}\cdot\text{km}]$ は主として巨大雷に対して導出されてきた[4]。本稿では ELF-VLF 帯電界データを用い、比較的小規模な雷放電に対して中和電荷モーメントの導出を検討する。

3. 観測

3.1. 観測網の概要

本研究では2016年夏季に、これまで京都大学生

存圏研究所・信楽観測所にて開発を進めてきた ELF-VLF 帯電界計測システムの試験観測を実施した。また、当該年度に新たに導入した容量性アンテナを組み合わせた雷観測網を関東圏に構築した。観測拠点の位置を図1に示す。

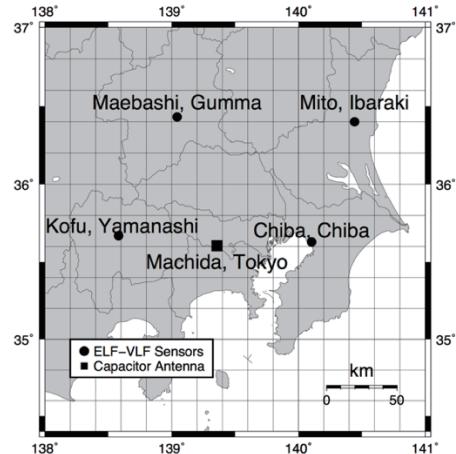


図1 2016年夏季における関東圏の雷観測拠点

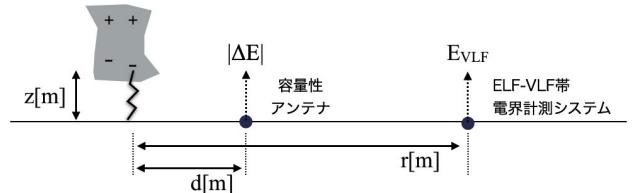


図2 2016年の関東圏雷観測の概要

ELF-VLF 帯電界計測システムは、関東圏における雷分布導出と共に、後述する個々の落雷の電気的特性の導出に用いた。雷放電から放射される電磁界 $E_{VLF}(t)$ は以下の式(1)で示される。ただし、光速を $c[m/s]$ 、伝搬距離を $r[m]$ 、電荷モーメントを $M [C\text{km}]$ としている。

$$E_{VLF}(t) \sim \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left\{ \frac{M}{r^3} + \frac{1}{cr^2} \cdot \frac{dM}{dt} + \frac{1}{c^2r} \cdot \frac{d^2M}{dt^2} \right\} \quad (1)$$

本研究では、式(1)第3項の放射項が支配的な地上波を用いるため、観測点から 50-150km 程度遠方の

雷放電を解析対象とした。

容量性アンテナシステムは、雷放電に伴い地上に生じる電界変動 $|\Delta E| [V/m]$ の計測が可能である。積乱雲内の電荷構造を、図 2 に示すように雲内上層に正電荷、下層に負電荷の分布を仮定した場合、負極性落雷に伴い生じる地上電界変動 $|\Delta E| [V/m]$ は以下の式(2)で表される。

$$|\Delta E| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2|Q|z}{(z^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

本研究では、雷放電の電流形態に対する考察と共に、上述の ELF-VLF 帯電界計測システムにより導出された電荷モーメントの妥当性検証に用いた。

3.2. ELF-VLF 帯電界計測システム

ELF-VLF 帯電界計測システムはダイポールアンテナ、プリアンプ、メインアンプ、GPS アンテナ、データ記録 PC から構成される。受信部のダイポールアンテナの全長は 2.3m である。データ記録は、PC を用いてサンプリング周波数 100 kHz で A/D 変換を行う。観測システムの概要を図 3 に示す。

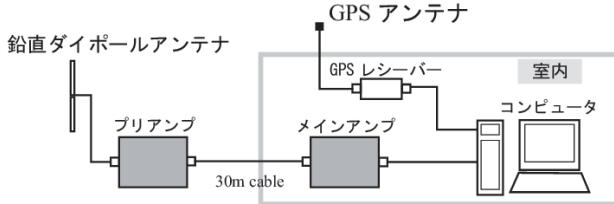


図 3 ELF-VLF 帯電界計測システムの概要

表 1 ELF-VLF 帯電界計測システムの諸元

項目	詳細
使用アンテナ	鉛直ダイポールアンテナ
観測成分	鉛直電界
サンプリング周波数	100 kHz
観測周波数帯	1-40 kHz

多点展開された観測システムは、GPS システムを

介して 10μs の精度で同期している。雷位置は、各観測点で検出された雷信号の時刻差を用いる到來時間差法に基づいて推定した。また、ELF-VLF 帯電界データを用いて、後述する中和電荷モーメントの推定も検討した。諸元を表 1 に示す。

3.3. 容量性アンテナシステム

容量性アンテナシステムでは、アンテナ部で検知された信号は RC 並列回路(時定数 $\tau = 0.1 [s]$)を通過したのち、非反転増幅回路で増幅し出力される。観測システムの概要を図 4 に示す。

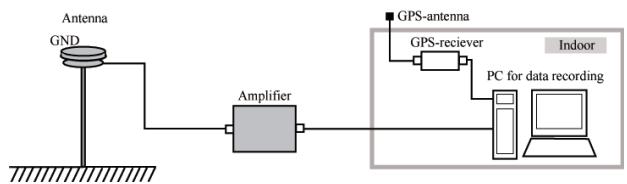


図 4 容量性アンテナを用いた電界計測系の概要

表 2 容量性アンテナシステムの諸元

項目	詳細
使用アンテナ	容量性アンテナ
観測成分	鉛直電界変動
時定数	0.1 s
サンプリング周波数	100 kHz

4. 解析結果

4.1. 解析イベントの選定

本稿では、解析対象の時間帯を 2016/9/8 14:00-15:00[JST]とし、ELF-VLF 帯電界計測システム及び容量性アンテナシステムの取得データを解析した。結果として、ELF-VLF 帯電界計測システムを用いて 45 イベントの位置標定に成功した。また、45 イベントのうち、40 イベントでは ELF-VLF 帯電界計測システムと容量性アンテナの同時取得に成功した。

観測事例を 2 例、以下に示す。図 5 の単一雷の場

合、電界変動 $|\Delta E|$ は短時間における急峻な変動を示している。それに対し図 6 に示す連続電流に伴う電界変動は緩やかな変動としている。ELF-VLF 帯電界計測システムで同定した雷位置と共に、電流形態の判定を含めた雷分布図を図 7 に示す。

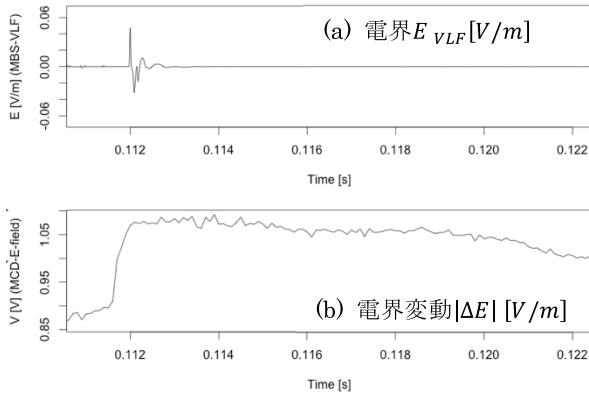


図 5 2016/9/8 14:15:19 に取得された群馬県前橋局での ELF-VLF 電界波形(上段)、(b)東京都町田市での電界波形(下段)

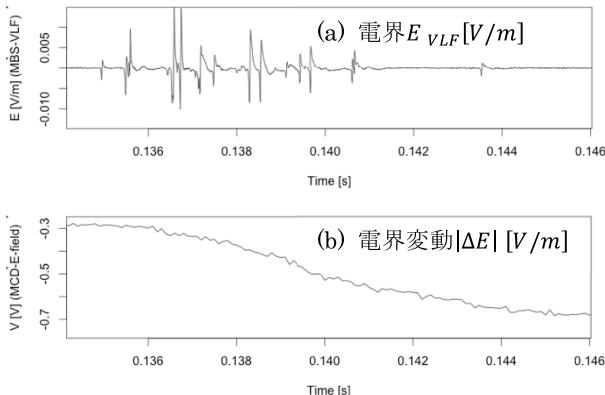


図 6 2016/9/8 14:36:24 に取得された群馬県前橋局での ELF-VLF 帯電界波形(上段)、東京都町田市での電界波形(下段)

ELF-VLF 帯電界計測システムと容量性アンテナの同時取得に成功した 40 イベントのうち、 $|\Delta E|$ の算出が容易である単一雷と判定されたのは 14 イベントであった。本稿では、電界変動 $|\Delta E|$ の評価が容易である単一雷のみを解析対象とする。

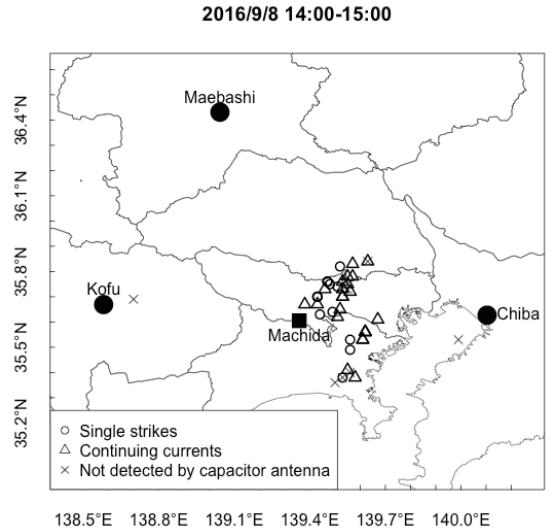


図 7 多点展開した ELF-VLF 帯電界計測ネットワークにより得られた 2016 年 9 月 8 日 14:00–15:00 の関東圏における雷分布図

4.2. 放電規模の推定

ELF-VLF 帯電界計測システムが受信する電磁界のうち、主要成分は放射界であると考えられる。受信電界を $E_{VLF} [V/m]$ 、光速を $c [m/s]$ 、伝搬距離を $r [m]$ 、放電路長を $z [m]$ 、電荷モーメントを $M = Qz [Ckm]$ 、電流モーメントを $I_M [kA \cdot km]$ とした場合、電界 $E [V/m]$ と電流モーメント $I_M [kA \cdot km]$ の関係式は以下の式(3)で示される[5]。

$$E \approx \frac{1}{c^2 r} \cdot \frac{d^2 M}{dt^2} \propto \frac{dI_M}{dt} \quad (3)$$

式(3)より、電界波形を積分したものが電流モーメント $I_M [kA \cdot km]$ の時間波形になると考えられる。電流波形の解析事例を図 8 に示す。図 8 下図の電流モーメント波形の積分より、中和電荷モーメントが導出できる。

なお、電流モーメント波形のピーク値は、Japan Lightning Detection Network (JLDN)により導出されるピーク電流値を用いて較正した。ELF-VLF 帯電界計測システムと容量性アンテナの同時取得に成功した単一雷イベント 14 イベントのうち、JLDN と

の同時計測に成功したものは 7 イベントであった。本稿では、これらに 7 イベントに対して電流モーメント I_M [kA · km] の時間波形、中和電荷モーメント Qz [Ckm] を導出した。

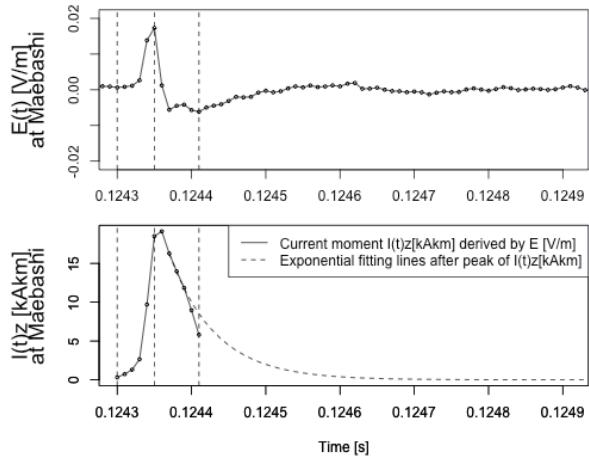


図 8 2016/9/8 14:15:19 に ELF-VLF 帯電界計測システムで取得した電界波形(上図)と、電界波形から導出した電流モーメント波形(下図)

5. 結果

ELF-VLF 帯電界データより導出した中和電荷モーメントの検証を実施した。解析では ELF-VLF 帯電界計測システムで得られた中和電荷モーメント Qz [Ckm] を式(2)に代入し、容量性アンテナで取得される電界変動データ $|\Delta E|$ を算出し、観測データと比較した。

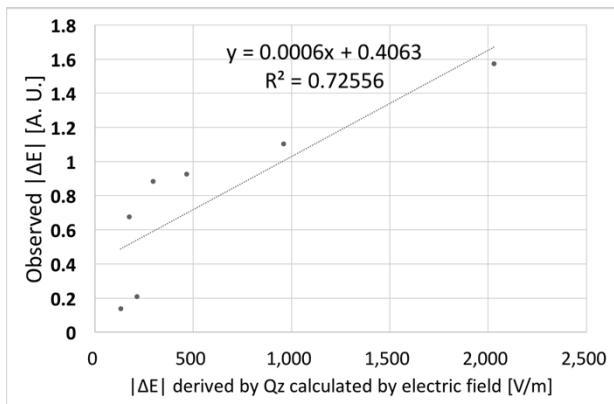


図 9 ELF-VLF 帯電界データより推定した地上電界変動(横軸)と、観測波形から算出した地上電界変動(縦軸)

結果として両データの相関係数は $R=0.84$ と高い値を得たが、解析イベントは少ない。引き続き、解析イベントの積み増しを行う必要性がある。

6. まとめ・今後の予定

本稿では、ELF-VLF 帯電界計測データを用い、雷放電に伴う中和電荷モーメント Qz [Ckm] の推定を検討した。比較検証データとして容量性アンテナによる地上電界変動データを用い、両者の間にある程度の一貫性を確認した。

得られた結果は、従来研究では解析対象外とされていた小規模な雷放電に対する規模推定の可能性を見出す結果と考えられる。ただし解析イベント数は 7 イベントと少ない。更なる検証が必要である。

参考文献

- [1] Mansell, E. R., C. L. Ziegler, and D. R. MacGorman: A lightning data assimilation technique for mesoscale forecast models, Mon. Wea. Rev., 135, pp.1732-1748 (2007)
- [2] Price C, Yair Y, Mugnai A, Lagouvardos K, Llasat MC, Michaelides S, Dayan U, Dietrich S, Di Paola FD, Galanti E: Using Lightning Data to Better Understand and Predict Flash Floods in the Mediterranean. Surveys in Geophysics, 32, pp.733–751 (2011)
- [3] 柳川俊一, よくわかる雷サージ対策技術, ISBN978-4-526-07450-9, 日刊工業新聞 (2015)
- [4] Yamashita, K., Y. Takahashi, M. Sato, and H. Kase, Improvement in lightning geolocation by time-of-arrival method using global ELF network data, J. Geophys. Res., 116, A00E61 (2011)
- [5] 工藤剛史, VLF 帯空電観測に基づいた落雷規模と雷雨活動に関する研究, 北海道大学博士論文 (2013)

第IX期南極重点研究観測AJ0901 「南極大気精密観測から探る 全球大気システム」の概要

佐藤薰（東大院理）、堤雅基（極地研）、
佐藤亨（京大院情報）、中村卓司（極地研）、
齊藤昭則（京大院理）、*富川喜弘（極地研）、
西村耕司（極地研）、高麗正史（東大院理）、
橋本大志（京大院情報）

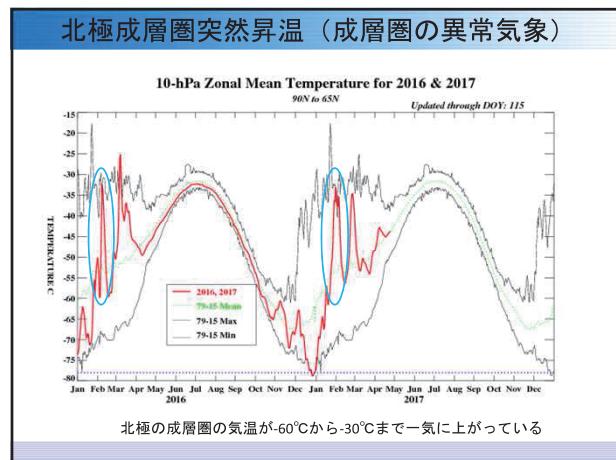
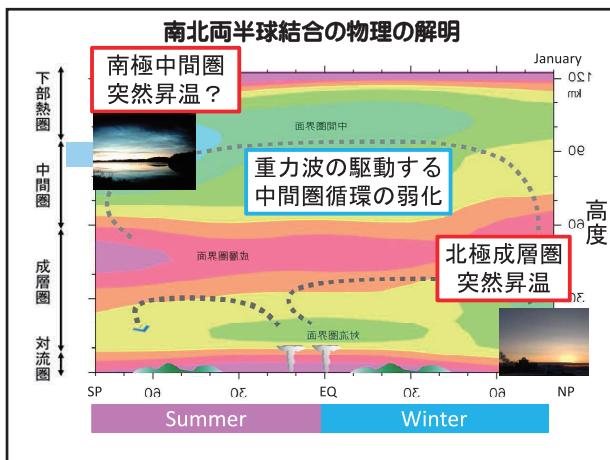
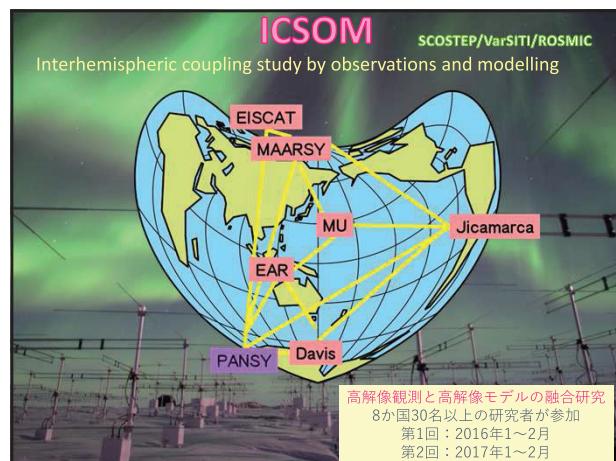
南極地域観測事業

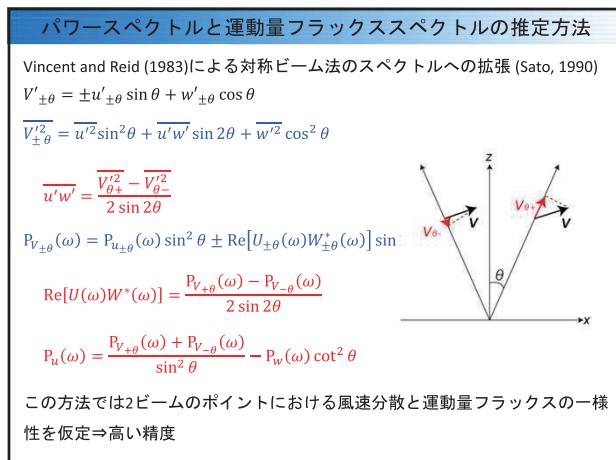
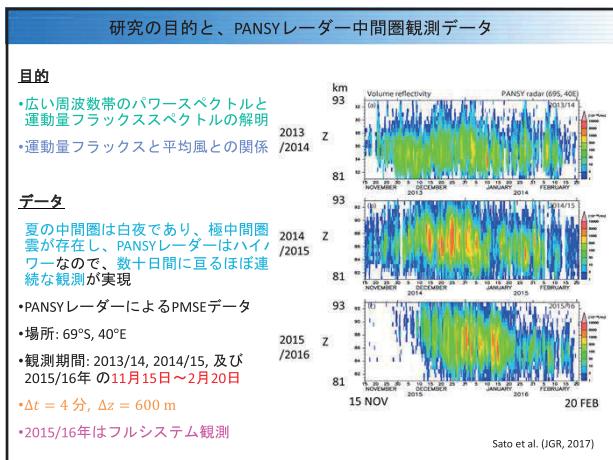
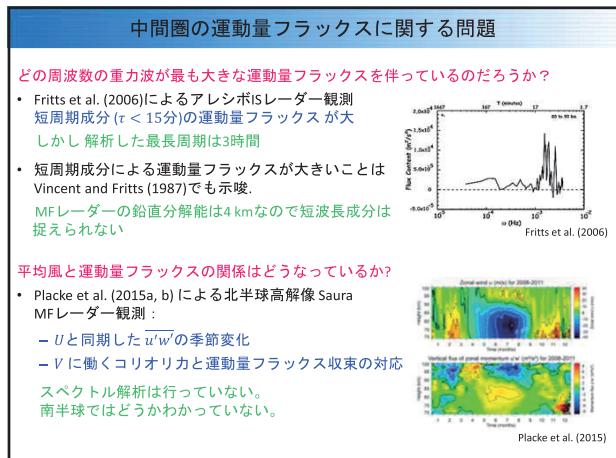
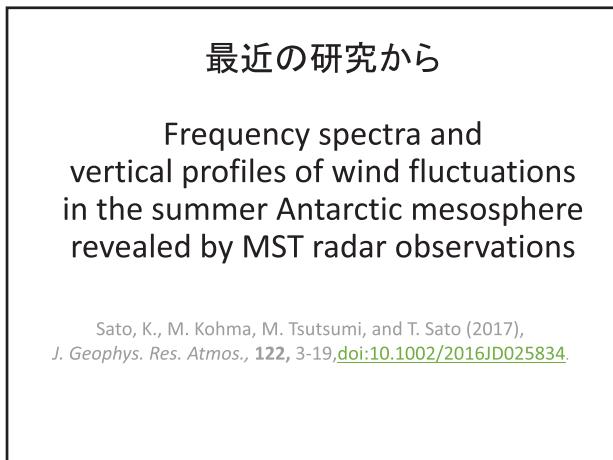
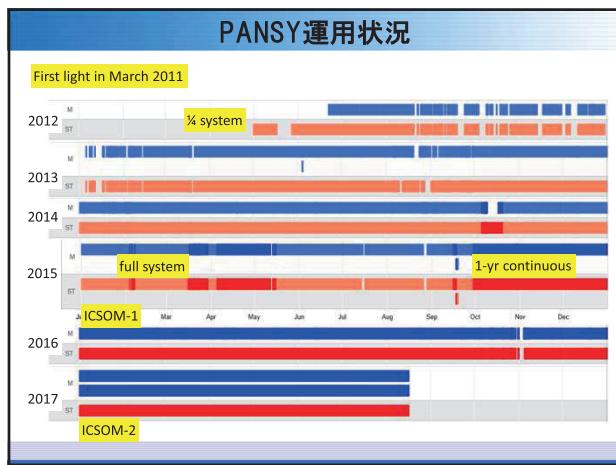
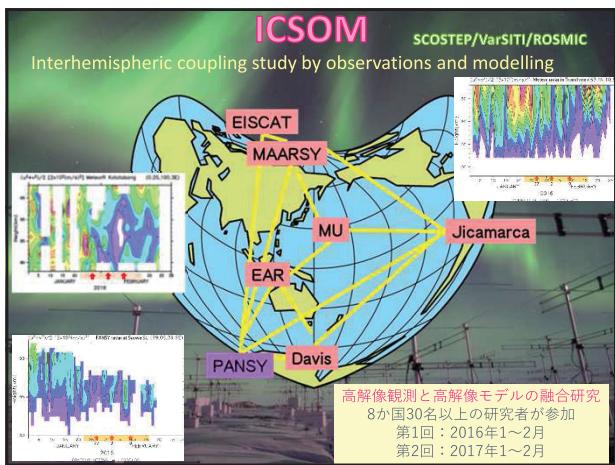
地球の気候・環境変動の鍵を握る南極において様々な観測を実施する国家事業として1956年より実施。

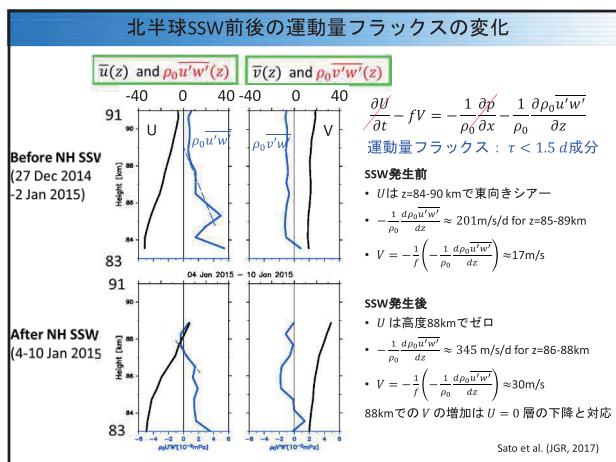
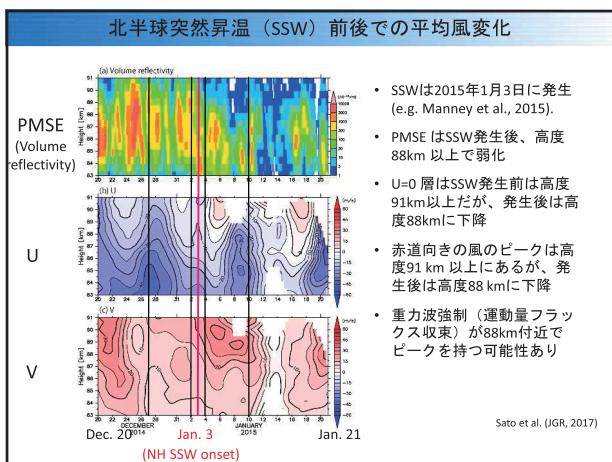
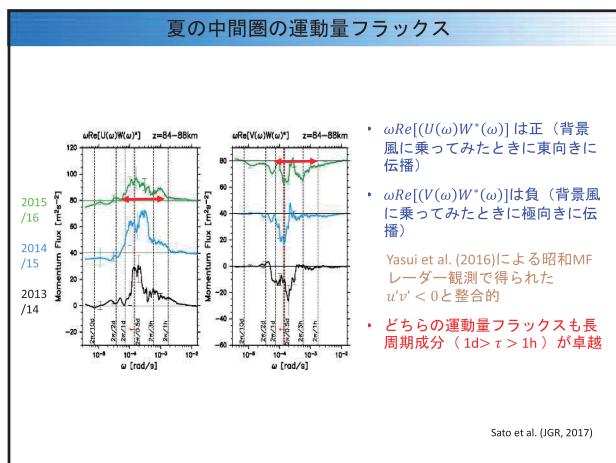
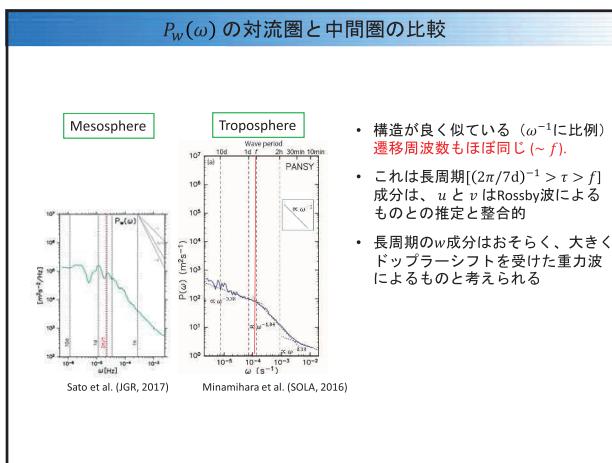
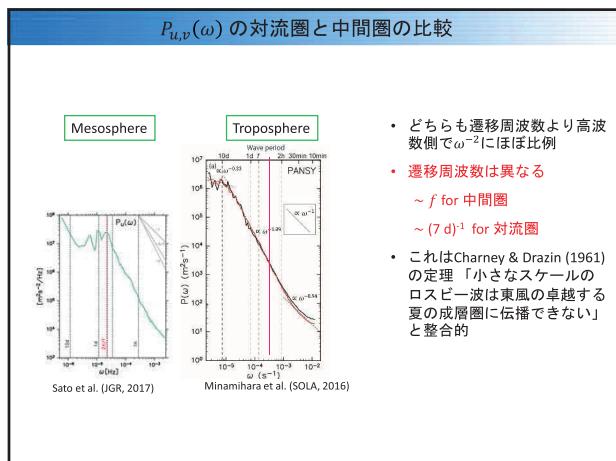
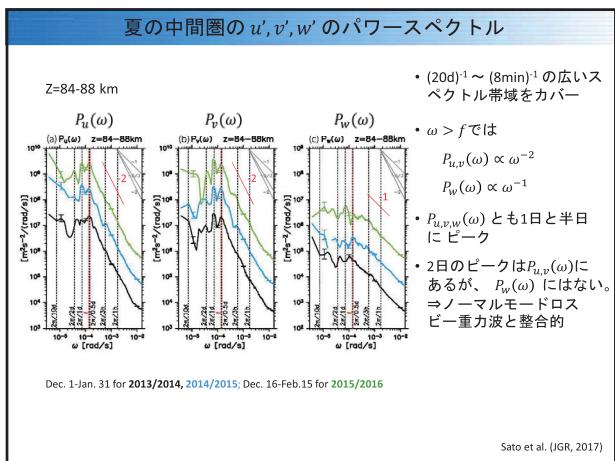
ボトムアップのプロジェクトを中心とした6カ年計画に基づき、日本南極地域観測隊を毎年派遣。

第VII期：第52～57次（H22～27）

第IX期：第58～63次（H28～33）







航空機監視レーダ(SSRモードS)から得られる気象観測情報の特性評価について

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・齋藤亨・古賀禎
京都大学生存圏研究所(RISH)
古本淳一

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

内容

- 背景
 - 4次元航法と気象
- SSR(二次監視レーダ)モードS
 - DAPs(Downlink Aircraft Parameters)機能概要
 - DAPsの普及状況(機上及び地上)
- 気象情報(風向・風速、温度)の推定と検証
 - 推定アルゴリズム
 - 推定値の検証と応用
- MUレーダーデータとの比較解析
 - データ概要
 - 長期解析に向けた初期結果
- まとめと今後の予定

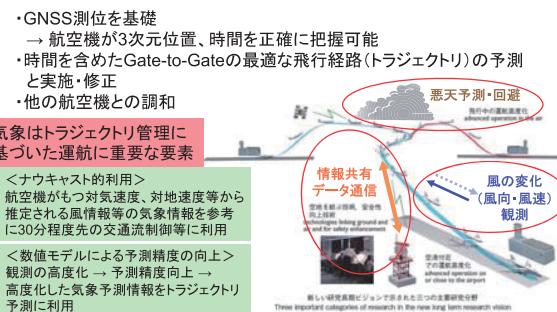
2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

2

1

トラジェクトリ管理に向けて 4次元航法に基づく運航と気象

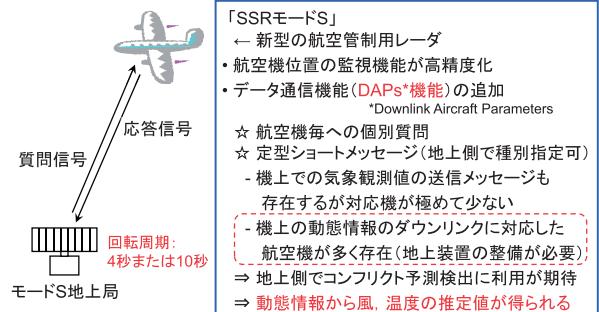


2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

3

SSRモードSのDAPs機能



2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

4

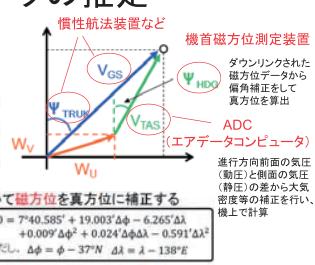
気象データの推定

● 気象データの推定

(1) 外気温
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) 東西風速・南北風速

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

$$\Psi_{Hdg} = \Psi_{Mag} - D2010$$

$$D2010 = 7°40.585° + 19.003Δφ - 6.265Δλ + 0.009Δφ² + 0.024ΔφΔλ - 0.591Δλ²$$

ただし、 $\Deltaφ = φ - 37°N$, $\Deltaλ = λ - 138°E$

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

$$\begin{aligned} W_u &= V_{GS} \cdot \sin \Psi_{TRK} - V_{TAS} \cdot \sin \Psi_{Hdg} \\ W_v &= V_{GS} \cdot \cos \Psi_{TRK} - V_{TAS} \cdot \cos \Psi_{Hdg} \end{aligned}$$

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。

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

5

メッセージ種別と機上装置の整備状況

義務化範囲 - ELS(基本監視): 欧州, EHS(拡張監視): 欧州の一部空域

番号	内容	義務化
05	拡張スキッタ・位置	*いわゆるADS-B
10	データリンク能力通報	○ ○
17	主要ADS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	対応機種で少ない
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)	○

ダウリング情報から風向・風速・温度を推定可能

(日本では義務化されていないが、通過機含め9割程度の航空機がEHSに対応している)
種別詳細はICAO, "Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter", Doc 9871, Second Edition, 2012を参照

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

6

地上局の整備状況

図3-1回 8 航空路監視レーダー配置及び区域



図: 内閣府、平成23年版交通安全白書、「http://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h23kou_haku/zenbun/genkyo/h3/h3s2_1.html」
2017/09/08 第11回MUR/EARシンポジウム

7

SSRモードS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

説明	岩沼局
開局	平成20年
出力	Max 1.5kw
覆域	250NM
周期	10秒
	4秒

約9年間のデータ蓄積



調布局・空中線外観

岩沼局・空中線外観

ネットワーク

常時稼動させてDAPsデータを収集している

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

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

8

MUレーダーデータの利用 風向・風速の精度検証とデータ品質改善

- SSR-Sから得られた風情報、温度情報に関する分野の動向
 - 数値気象モデル、気象通報(AMDR)等による精度評価とその応用(S. Haan, 2009, 2011)
 - 風向・風速に関しては従来の気象通報と同程度の精度と報告
 - 数値気象モデルに加えて、ドップラーレーダー、またはソーダーと組合せた風情報の精度検証(S. Haan, 2016)
 - 約9ヶ月間、~1.4m/sの精度(高度8kmまで)
 - 気象予報データとの比較、分解能(重富他, 2013)
 - 数値予報モデルへの同化実験(瀬古他, 2015, 2016)
- 品質向上のためのスクリーニング・補正手法の開発
- 巡航、旋回、上昇、降下の各フェーズでの誤差評価
 - 四季を通じた特性変化の把握など
- 長期データによる風情報の比較検証(統計解析)
- MUレーダー・高高度での巡航時、約9年間の蓄積データ
 - ドップラーライダー/ドップラーレーダー: 空港周辺の旋回、上昇、降下時

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

9

MUレーダーデータとの比較解析 データ比較の概要

・ MUレーダー(MUR)

– 対流圏・成層圏観測(標準)

2016年	月日	
	冬季	春季
冬季	1月21~31日、2月01,15~19日、12月02,12~16日	
春季	3月14~18日、4月11~15日、5月16~20日	
夏季	6月14~17日、7月25~29日、8月22~26日	
秋季	9月26~30日、10月24~28日、11月21~29日	

・ 比較手順

- 水平方向: MURから半径100km以内のSSR-Sデータを対象
- 高さ方向: SSR-S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: SSR-S風情報に近接する時刻のデータ(±5分以内)と比較
- SSR-S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

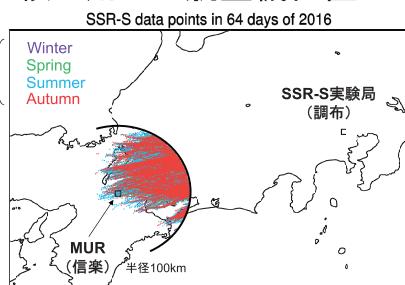
2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

10

MUレーダーデータとの比較解析 比較に用いた航空機位置

覆域の季節変化
に関する解析は
次回以降に予定



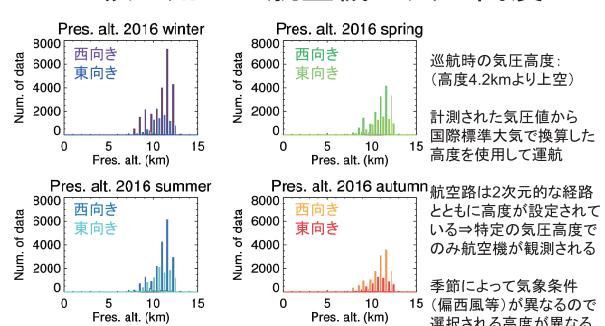
SSR-Sのデータ欠損期間もあり、2016年は64日のデータ比較が可能であった

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

11

MUレーダーデータとの比較解析 比較に用いた航空機の気圧高度

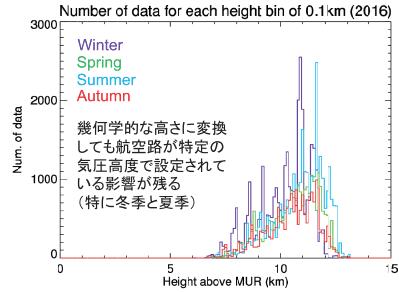


2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

12

MULレーダーデータとの比較解析 航空機のMUR面からの高度分布



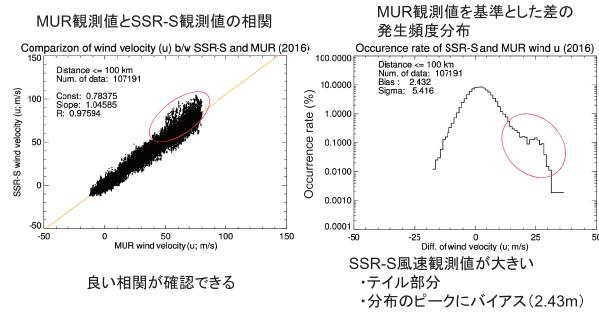
MUR地上気象観測値を用いて気圧、気温補正し、MUR面からの高度を算出

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

13

MULレーダーデータとの比較解析 風速(東西成分)の比較



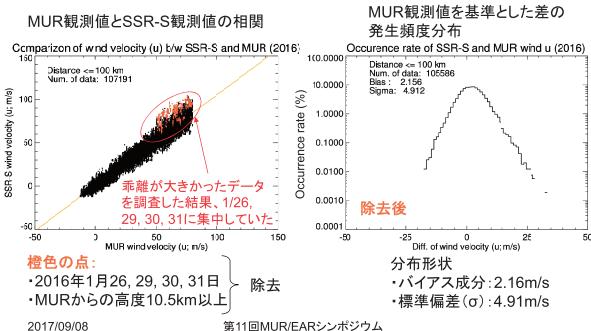
良い相關が確認できる

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

14

MULレーダーデータとの比較解析 風速(東西成分)の比較

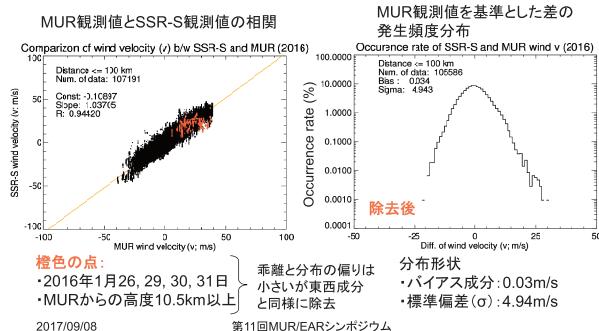


2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

15

MULレーダーデータとの比較解析 風速(南北成分)の比較



2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

16

まとめ

- 4次元航法
 - 実現には高度な気象予測情報が必要
- SSR(二次監視レーダ)モードSによる気象情報
 - 機上観測の気象通報(限定的)
 - 動態情報から気象情報(風向・風速、温度)の推定
- MURデータの利用
 - 推定データの品質改善、気象学への応用
 - 覆域端でのデータ収集
- SSR-S推定値とMUR結果との比較検証
 - 良い相関が得られたがSSR-Sから推定された風速の東西方向に2m/s程度のバイアスが存在
 - 風速推定に与える磁気偏角補正誤差の影響(要調査)

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

17

今後の予定

- 解析期間を拡張(2008年～2017年)
 - 比較対象とする空間的な離隔距離を狭めた比較
 - 気象学的な特定の事象に着目した解析
 - 利用価値が高まる状況とは?(前線性の擾乱などを予想)
 - 推定誤差の増減等、定量的な評価
 - 品質向上のためのスクリーニング・補正手法の開発
- MUR/SSR-Sの同時観測でデータ取得数を増加
 - SSR-S実験局の通常運転モード: 羽田空港、成田空港近辺の航空機により多く質問するよう設定
 - MURの対流圈観測モード期間中に上空通過機への質問を増加させる運転モードを実施予定
- 共同利用申請のもう一方の研究項目
 - SSRモードS実験局覆域端領域での受信データ収集

2017/09/08

第11回MUR/EARシンポジウム

18

参照文献

- de Haan, S. (2009), Quality assessment of high resolution wind and temperature observation from Mode S, KNMI scientific report, WR 2009-07
- de Haan, S. (2011), High-resolution wind and temperature observations from aircraft tracked by Mode-S air traffic control radar, *J. Geophys. Res.*, 116, D10111, doi:10.1029/2010JD015264.
- de Haan, S. (2016), Estimates of Mode-S EHS aircraft-derived wind observation errors using triple collocation, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 4141-4150, 2016.
- 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
- 濑古他(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
- 濑古他(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



GEONETに基づく 3次元電離圏トモグラフィーの現状

水野 遼, 山本 衛 (京大生存圏研)
斎藤 享 (電子航法研), 齋藤 昭則 (京大理)

発表内容

- ♦先行研究
 - ✧GEONETを用いた、電離圏の3次元トモグラフィー解析
- ♦過去観測データの解析結果のデータベース化
 - ✧大型計算機を用いた一括解析システムの開発
- ♦3次元トモグラフィー解析の誤差の評価
 - ✧解析結果のデータベースを用いたイオノゾンデとの比較
- ♦今後の予定・まとめ

2

電離圏3次元トモグラフィー解析

- ♦GPS衛星とGPS基地局の経路上に存在する電離圏の全電子数を観測
- ♦1200以上の観測点からなるGEONETのデータを利用

PS-TEC観測方程式

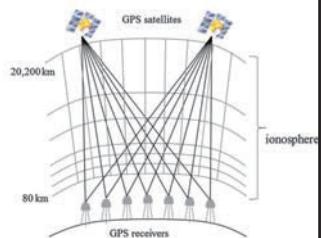
$$Ax = b$$

$$A = \begin{pmatrix} l_{11} & \dots & l_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ l_{m1} & \dots & l_{mn} \end{pmatrix}$$

l_{mn} : パスmがセルnを通過するパス長

x : 電子密度ベクトル

b : 絶対値TECベクトル



3

電離圏3次元トモグラフィの原理

評価関数

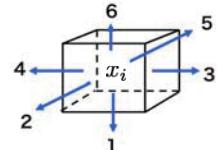
$$J(x) = \|b - Ax\|^2 + \lambda \|Wx\|^2$$

↓ 最小二乗項 ↓ ハイパーパラメータ
 ↓ 空間勾配への拘束項

空間勾配への拘束

$$Wx = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^6 C_{i,j} (x_i - x_{i,j})$$

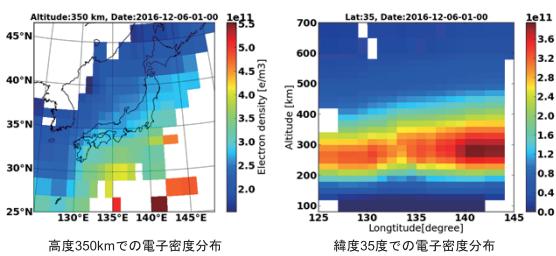
C_{ij} : セルiとセルjの勾配に掛けられる拘束係数



拘束係数が大 ⇒ 強い拘束 (高度 80km ~ 150km, 800km~)

拘束係数が小 ⇒ 弱い拘束 (高度 150km ~ 800km)

トモグラフィーのリアルタイム解析



電子航法研究所がリアルタイム収集する200点の観測データを用いて
2016年3月から15分おきの電離層の3次元トモグラフィー解析が行なわれている

リアルタイム解析結果のURL : <http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/>

5

本研究の目的

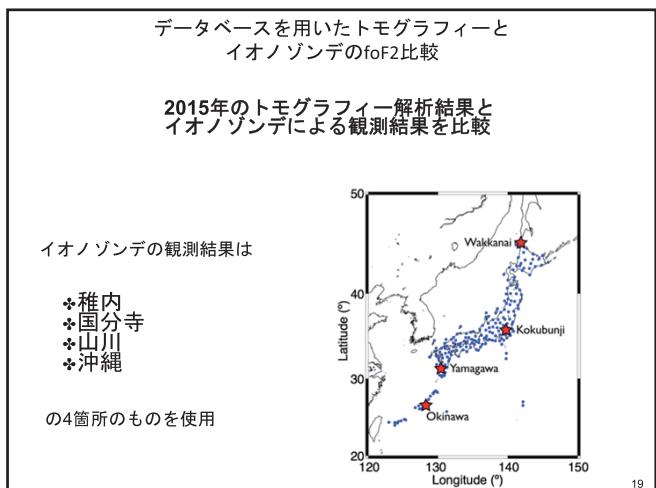
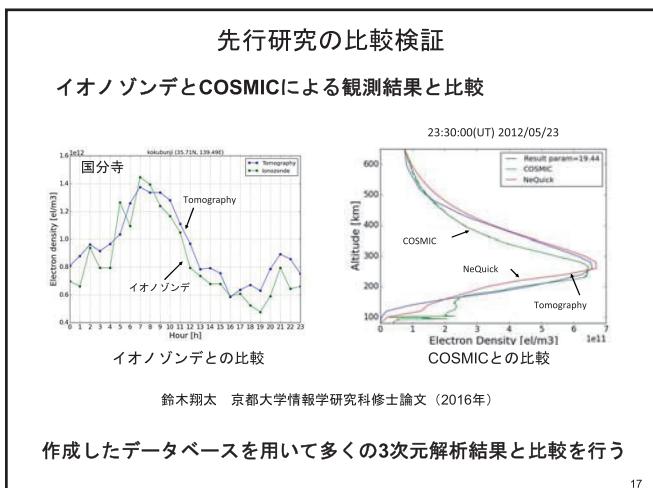
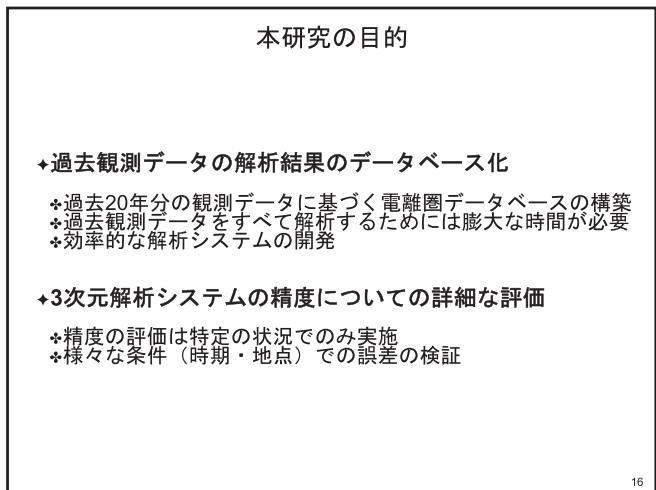
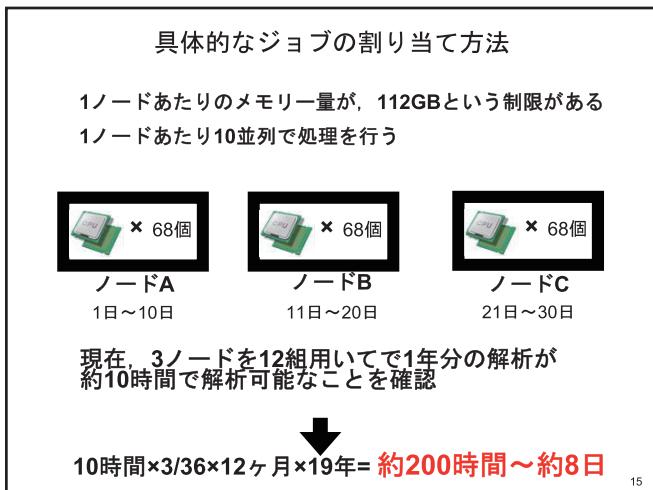
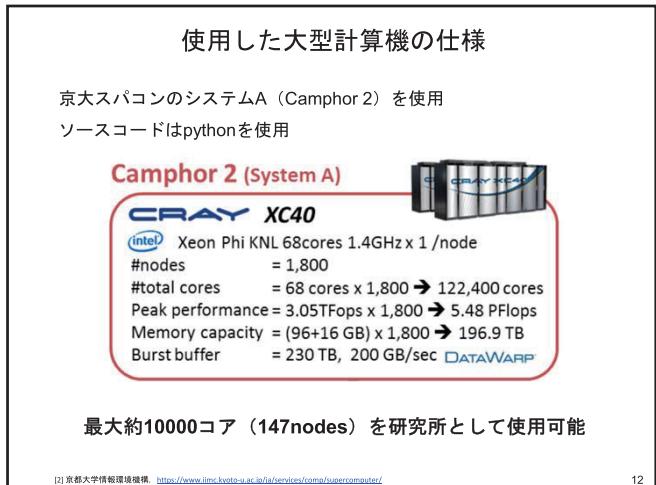
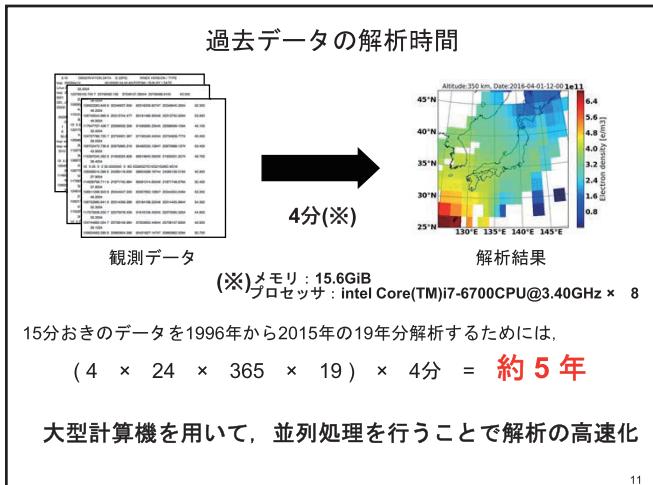
♦過去観測データの解析結果のデータベース化

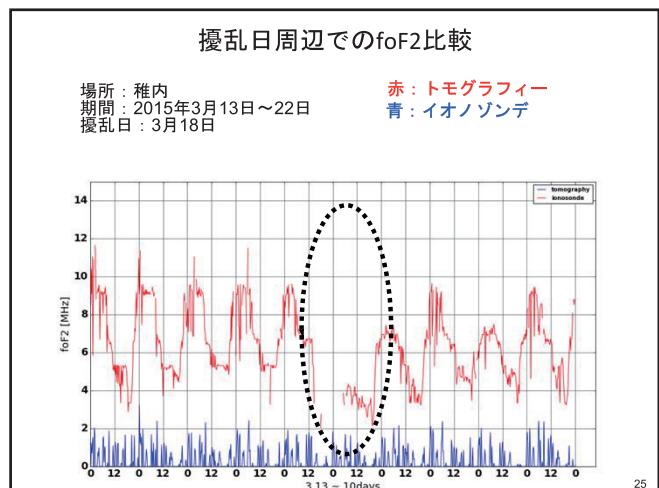
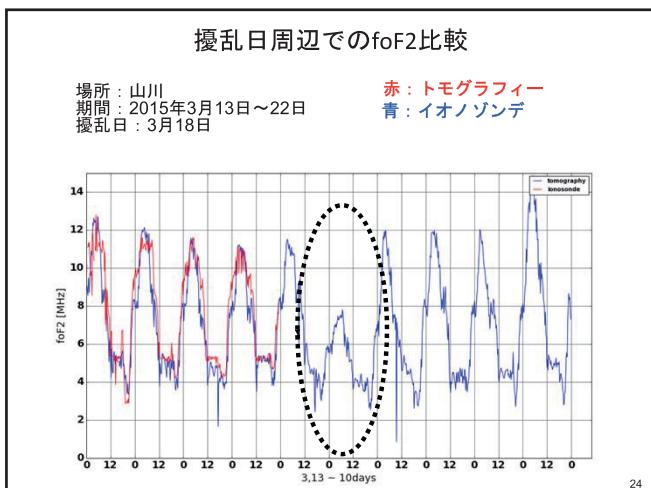
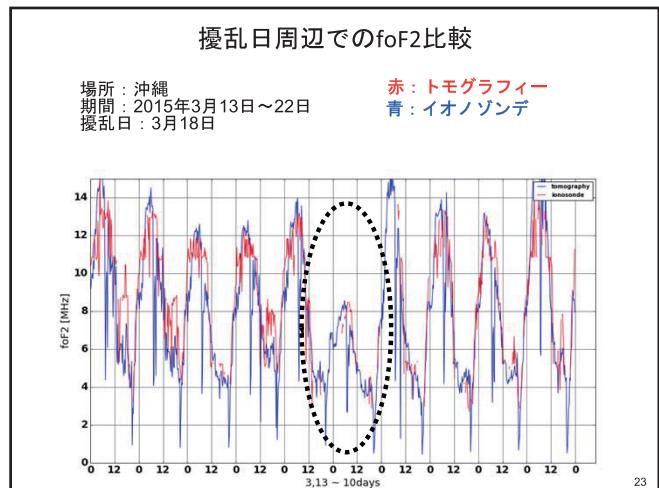
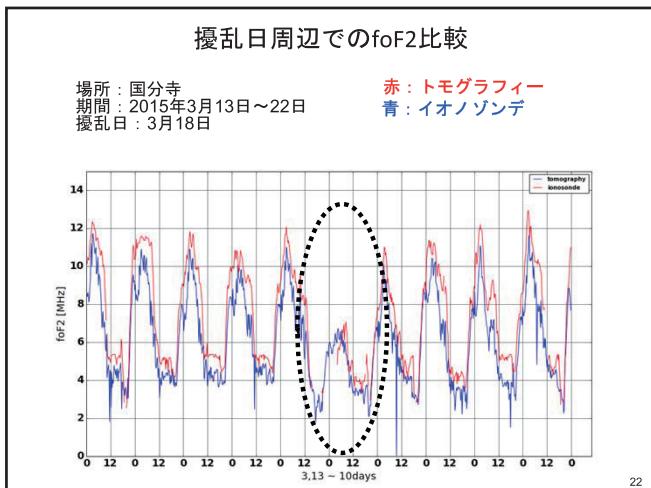
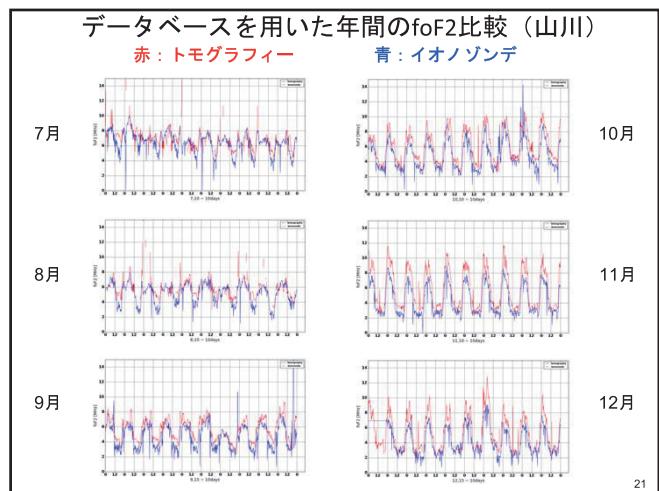
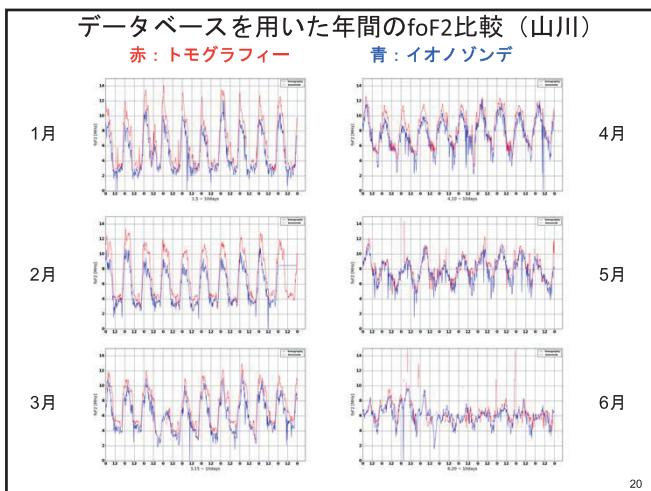
- ♦過去19年分の観測データに基づく電離圏データベースの構築
- ♦過去観測データをすべて解析するためには膨大な時間が必要
- ♦効率的な解析システムの開発

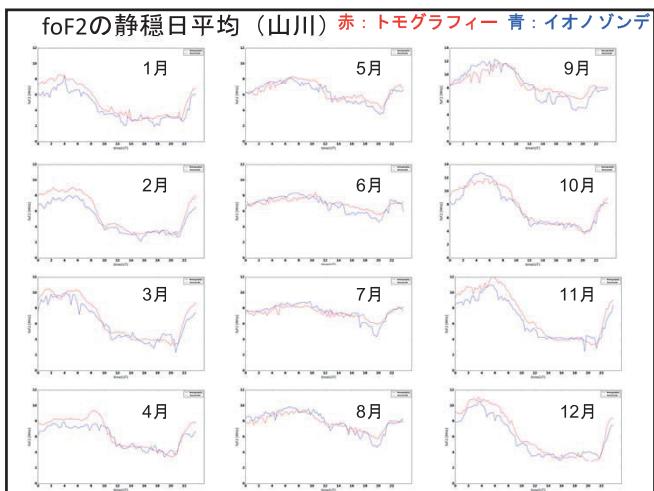
♦3次元解析システムの精度についての詳細な評価

- ♦精度の評価は特定の状況でのみ実施
- ♦様々な条件(時期・地点)での誤差の検証

6







今後の予定

- ♦過去観測データの一括解析
 - ※データ欠損に対応したシステムの開発
 - ※並列処理を用いた全ての過去データの解析
 - ※解析結果をweb上にて一般公開

- ♦3次元解析システムの誤差の評価
 - ※COSMICの観測結果との比較
 - ※比較対象として未使用的基地局のデータを使用
 - ※韓国・台湾の観測データを追加して解析

30

まとめ

- ♦過去観測データの解析結果のデータベース化
 - ※過去20年分の観測データに基づく電離圏データベースの構築
 - ※過去観測データをすべて解析するためには膨大な時間が必要
 - ※効率的な解析システムの開発

- ♦3次元解析システムの精度についての詳細な評価
 - ※精度の評価は特定の状況でのみ実施
 - ※様々な条件（時期・地点）での誤差の検証

31

リアルタイム電離圏トモグラフィーの MUレーダー非干渉散乱観測による検証

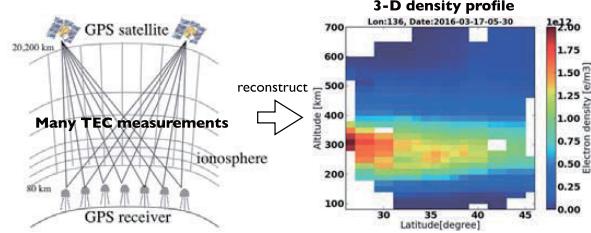
^{1*}Susumu Saito, ²Mamoru Yamamoto and ³Akinori Saito
¹Electronic Navigation Research Institute, Japan
²Research Institute of Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Japan
³Department of Science, Kyoto University, Japan

1

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日

GNSS tomography

- * GNSS tomography is a powerful technique to reconstruct 3-D ionospheric density profiles from total electron content (TEC) measurements.

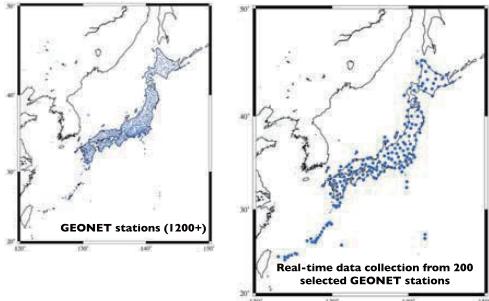


- * Objectives: Make 3-D ionospheric density profiles available by tomography in real-time

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日

2

GNSS network over Japan

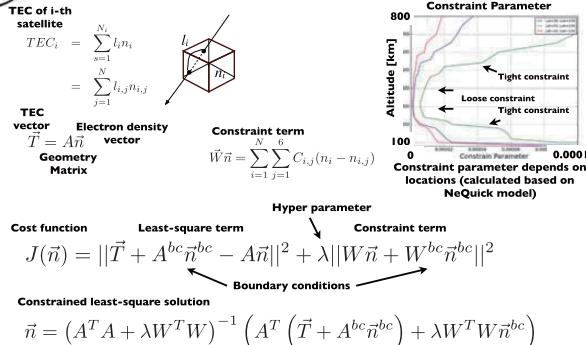


- * ENRI collects real-time measurement data from 200 selected GEONET stations.
- Utilize for real-time monitoring of 3-D ionospheric structures

3

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日

3-D tomography

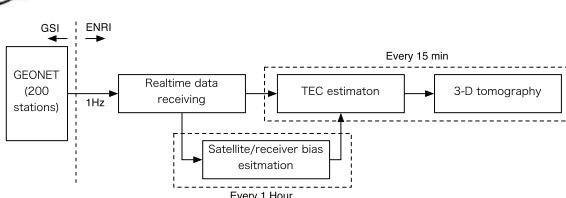


- * For details, see Seemara et al. [JGR, 2014], Chen et al. [EPS, 2016], and Saito et al. [NAVIGATION, in press].

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日

4

Real-time tomography system

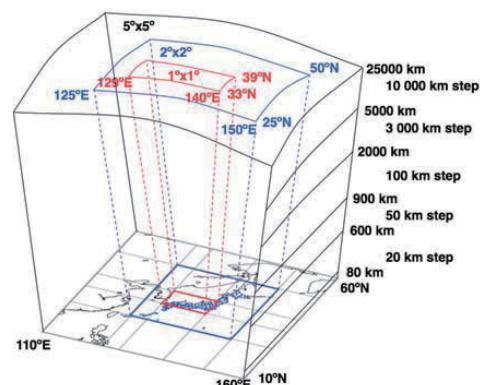


- * System
 - Linux Workstation (4-core 3.5GHz Xeon processor, 32GBRAM)
 - Software written in Python
- * Performance
 - ~6 min for whole process

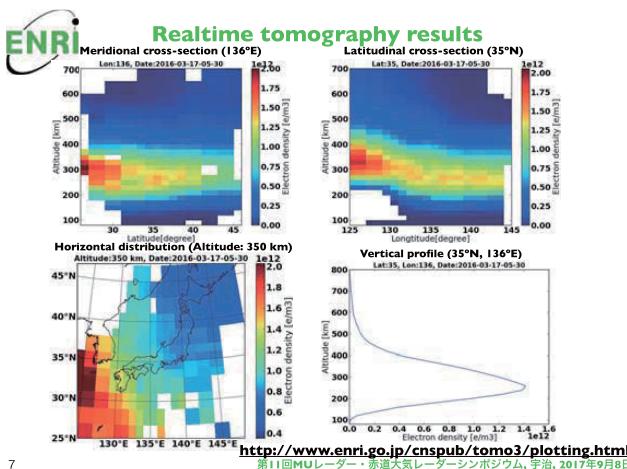
5

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日

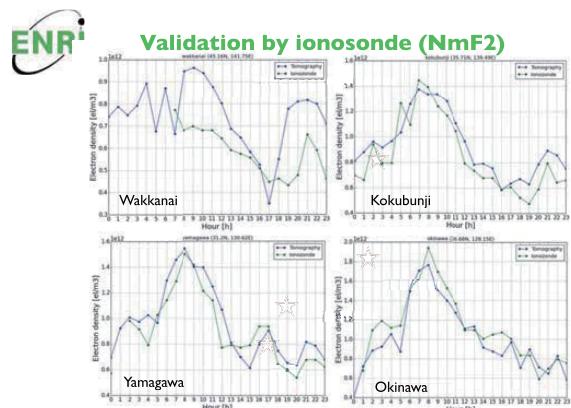
Tomographic reconstruction volume



第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日



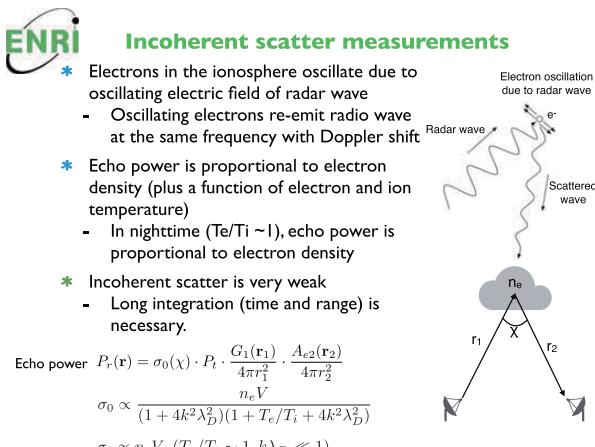
7



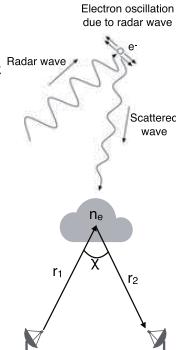
- * NmF2 are in good agreement with ionosondes except for edges of the tomography volume. => What about shape of Ne profile?

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日

8

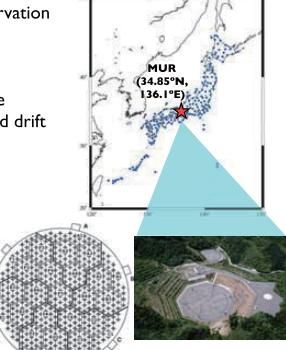


9

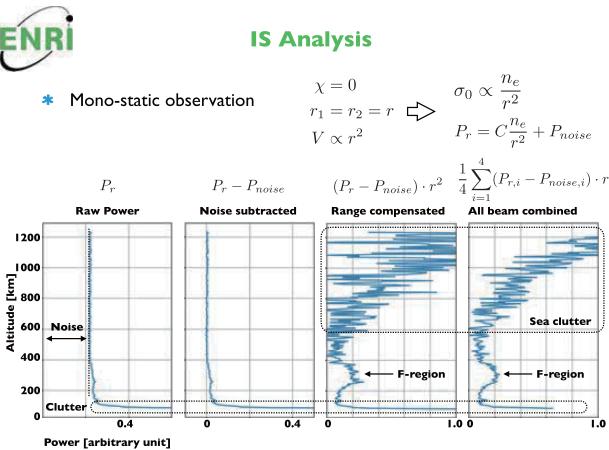


MUR IS observation

- * MU radar incoherent scatter observation
 - Frequency: 47.0 MHz
 - Peak power: 1 MW
 - Antenna diameter: 108m
 - Mode: single-pulse power profile (power only, no temperature and drift measurements)
 - Number of ranges: 256
 - Height range: 82-1234 km
 - Range resolution: 4.5 km
 - Integration period: 60 min
 - Number of beams: 4 (Az: 85, 175, 265, 355°, El: 70°)
- * Observation period
 - 10, 12, 13 May 2016
 - (IS data quality on 11 May 2016 was not good.)



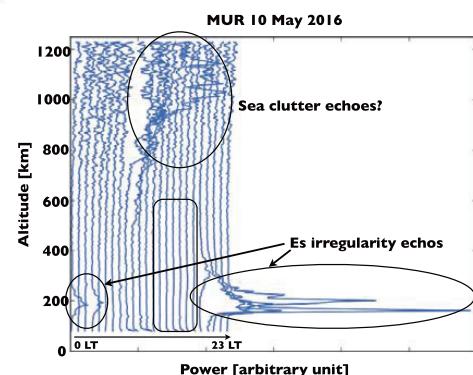
第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日



11

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日

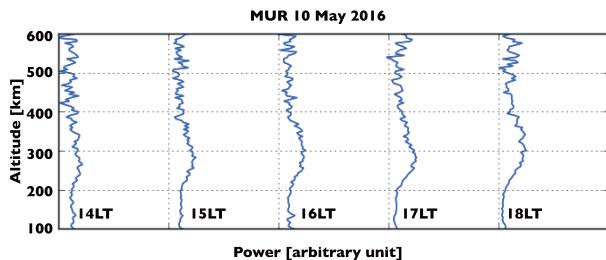
MUR IS results (I)



第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日



MUR IS results (2)

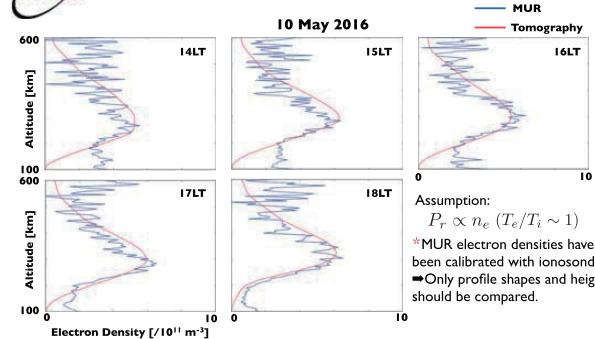


13

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日



Results

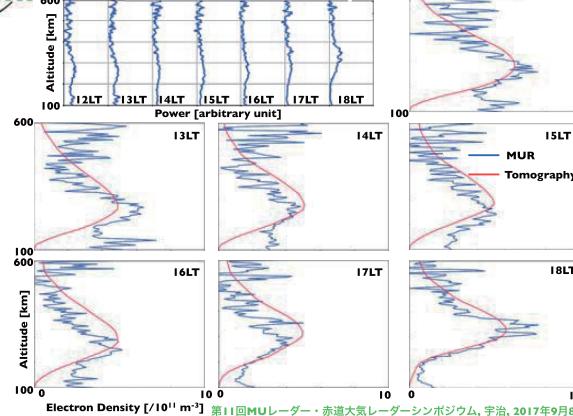


14

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日



More results: 12 May 2016

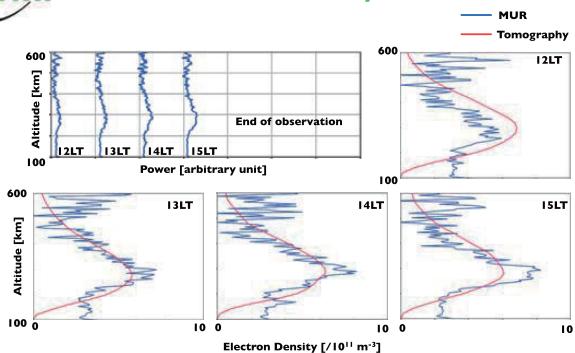


15

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日



More results: 13 May 2016



16

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日



Summary

- * Real-time 3-D ionospheric tomography system over Japan has been developed.
 - Every 15min with about 6 min latency
 - NmF2 in good agreement with ionosonde measurements
- * Tomography results are validated with MUR IS observations
 - Temporal variation of NmF2 values followed that of MUR IS peak density.
 - Peak heights as well as topside and bottomside profiles were in agreement with MUR measurements
- * Next steps
 - More data comparison in different local times, seasons, etc.
 - Comparison with MUR IS data with temperature measurements

Acknowledgment: This work is supported by JSPS Grant-in-Aid for Challenging Exploratory Research JP26630182.

17

第11回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2017年9月8日

衛星地上ビーコン観測による電離圏全電子数の自動解析手法の開発

坂本悠記 山本衛

(京都大学 生存圏研究所 山本研究室)

Kornyanat Hozumi
(情報通信研究機構)

1

研究背景・目的

研究背景

東南アジア地域でのビーコン衛星による電離圏観測のデータが蓄積

次のビーコン衛星は一度に多数打ち上げる計画

→膨大な数のデータ解析を簡単化する必要がある

・従来、全電子数(TEC)の算出はGPSとビーコン衛星信号を使って求めていた

・GPS信号は乱れる場合があり、そのときのTEC解析には多大な労力が必要

・一部の国ではGPS信号データの利用は許可制のため、研究がスムーズに行かない

→ビーコン衛星信号データのみを利用したTEC算出が望ましい

研究目的

・ビーコン衛星観測データを用いたバイアス推定及びTECの自動解析手法の開発

・観測データや算出データをデータベース化

・本分野の研究の効率化

2

ビーコン衛星による電離圏観測

ビーコン衛星観測での取得データ



3

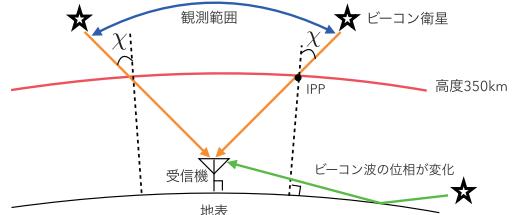
観測データの取り扱い手法の検討

地球の座標系と観測領域

地球が回転楕円体であるという事実に基づいて各パラメータを算出

・IPP (Ionospheric Penetration Point)

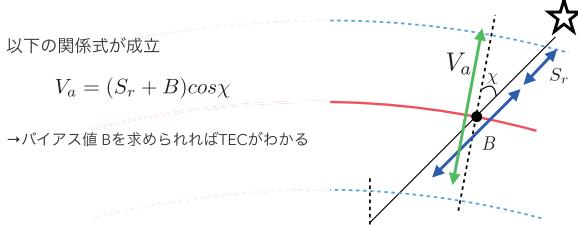
ビーコン衛星と受信機を結ぶ視線ベクトルが電子密度最大の高度に存在すると仮定した薄層と交わる点(高度350kmと仮定)

・不適切なデータを排除するために $\cos\chi > 0.4$ という条件を設けた

4

観測データの取り扱い手法の検討

全電子数の観測値と絶対値の関係

(斜め方向)相対TEC値 S_r : ビーコン衛星観測で得られる値バイアス値 B : 積分定数、一度の観測で一定値をとる(鉛直)絶対TEC値 V_a : 鉛直方向のTEC値

5

1観測点法による自動バイアス推定手法

1観測点法の概要

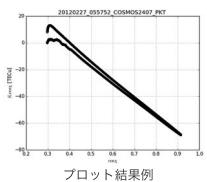
1つの受信機での観測データを用いて行うバイアス値推定法

絶対TEC値 $V_a = (S_r + B) \cos \chi$

$x = \cos \chi \quad y = S_r \cos \chi$ とおくと

$y = -Bx + V_a$

観測データの(x,y)プロット結果の傾きから

バイアス値 B が求まる実際は絶対TEC値 V_a は場所によって変動→この手法は V_a を一定と仮定するため正確な値と誤差が生じる

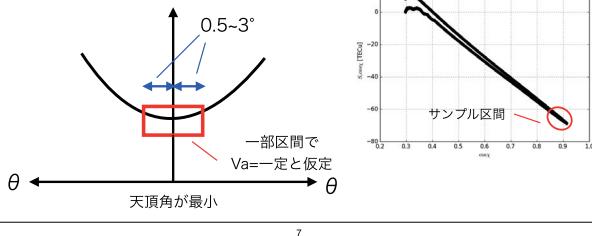
6

1観測点法による自動バイアス推定手法

先行研究 (Smitha. V. Thampi et al. 2014)

- ・相対TEC値Srの変動が小さい(=Vaの変化が小さい)範囲でバイアス推定
- ・天頂角最小の付近のデータ群に最小二乗法を用いてバイアス値を求める
→一部範囲のみを利用しているため受信信号のエラーに弱い

斜め方向相対TEC値 Sr

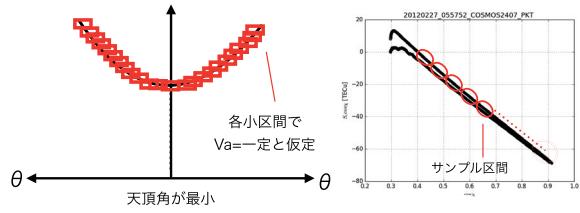


1観測点法による自動バイアス推定手法

小区間に区切ったバイアス推定 (小区間法)

- ・多数のデータを機械的に解析するために汎用性の高い手法を考案
- ・全体を小区間に分ける
- ・最小二乗法により各小区間に応じる一次式の傾きからバイアス値を求める
- ・サンプルをとるデータ範囲を $\cos\theta > 0.4$ とした

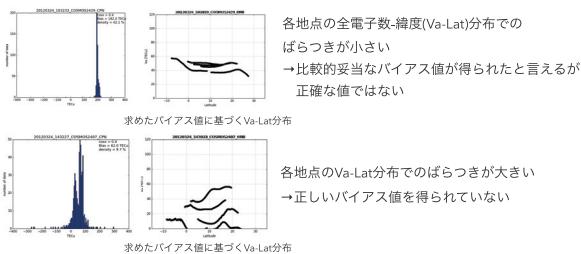
斜め方向相対TEC値 Sr



1観測点法による自動バイアス推定手法

小区間法の結果

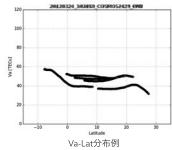
- ・小区間(1.28s)で $Va = \text{一定}$ と仮定して最小二乗法を用いてそれぞれの小区間でのバイアス値を算出
- ・5 TECu毎で区切り最頻出バイアス値を求める ※ 1 TECu = $10^{16} \text{個}/\text{m}^2$



多観測点法の自動化と精度の向上

多観測点法の概要

- ・同一のビーコン衛星に対して、複数地点に設置された受信機の観測データを用いて行う精度の高いバイアス値の推定法。
- ・本研究室で受信機を設置している5地点はCOSMOS衛星の軌道に沿っているためCOSMOS衛星からの観測データを解析した。
- ・各地点のバイアス値をそれぞれ決定し、Va-Lat分布を求める。
- ・各地点のTECのズレが最小(=1つの線)となったとき各バイアス値は正しい。
- ・長所
バイアス推定の精度が高い。
- ・短所
計算量が大きく推定に時間がかかる。
複数の受信機を用いるため観測環境の構築が大変。

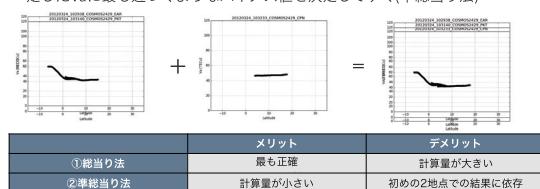


多観測点法の自動化と精度の向上

計算量の削減

2通りの計算法

- ① 小区間法の解を初期値とした5地点で総当たり(総当たり法)
- ② 小区間法の解を初期値とした2地点の総当たりで Va を確定、その後隣接地の Va が確定した Va に最も近づくようなバイアス値を決定してゆく(準総当たり法)



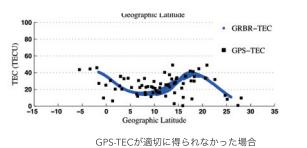
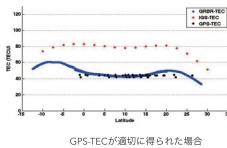
→ 小区間法の解を初期値として、準総当たり法、総当たり法の順にバイアス値の候補を絞っていくことで計算量を削減した。(総当たりのみを行う場合と比較して約1/2600)

11

多観測点法の自動化と精度の向上

GPSを用いた手法との結果比較

- ・他手法によるVa-Lat分布との比較・検証を行った
- ・比較対象はKornyanat Watthanasingmechai et al. 2014の論文中にある多観測点法で求めたVa-Lat分布
- ・Watthanasingmechai 氏はGPSから得たバイアス値を初期値として多観測点法で求めた
- GPS-TECが適切に得られない場合、バイアス推定が困難



12

多観測点法の自動化と精度の向上

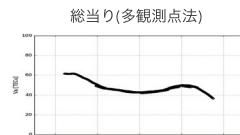
他手法との比較

2012/3/24 UT 10:31-10:46

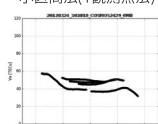
バイアス推定値 比較表 [TECu]

	EAR	PKT	CPN	BKK	CMU
小区間法	122	172	192	177	132
多観測点法	131	162	185	172	143
差	9	10	7	5	11

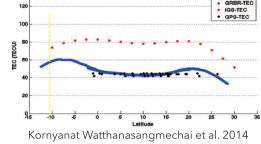
5地点の差の平均 = 8.4 TECu



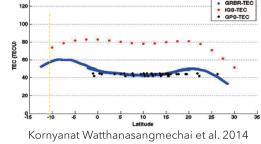
小区間法(1観測点法)



総当り(多観測点法)



先行研究



Kornyanat Watthanasantmechai et al. 2014

13

多観測点法の自動化と精度の向上

他手法との比較

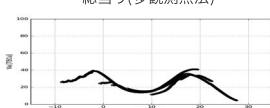
2012/3/24 UT 14:34-14:45

バイアス推定値 比較表 [TECu]

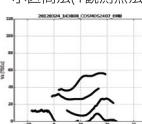
	EAR	PKT	CPN	BKK	CMU
小区間法	67	67	62	-3	-38
多観測点法	99	52	23	9	-7
差	32	15	39	12	31

5地点の差の平均 = 25.8 TECu

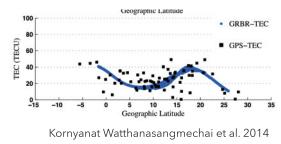
総当り(多観測点法)



小区間法(1観測点法)



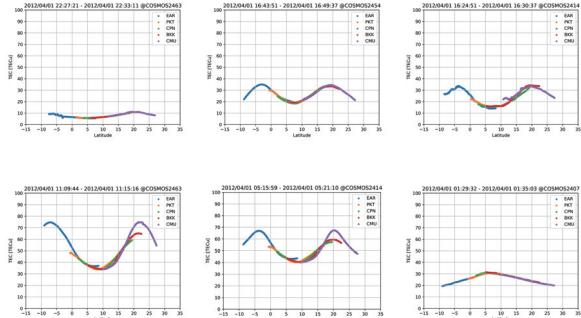
先行研究



Kornyanat Watthanasantmechai et al. 2014

14

作成した多観測点法による全電子数の緯度分布



15

結論と今後の課題

結論

- データ数が多量であるためコンピュータを用いて自動処理できるように、汎用性の高いTECの算出法を確立することを目指した。
- TECの自動算出に適した1観測点法である小区間法を考案した。さらにその結果を利用した多観測点法の考案により、高精度なバイアス推定及びTECの算出をすることが可能となった。

今後の課題

- 観測データや研究結果を数値データをもったNetCDF形式のデータベースを完成させる。
- 本研究により地球の東南アジア域の南北方向のTEC分布が明らかになった。この結果を活用して東西方向の精度の高い全電子数分布を算出したいと考えている。

16

 ⁴Institute of Ionosphere
 ²ISEE, Nagoya University
 ³RISH, Kyoto University

Study of travelling ionospheric disturbances in European and Japanese longitudinal sectors with Kharkiv incoherent scatter and MU radars

Sergii Panasenko^{1,2}, Yuichi Otsuka²,
Mamoru Yamamoto³, Igor F. Domnin¹

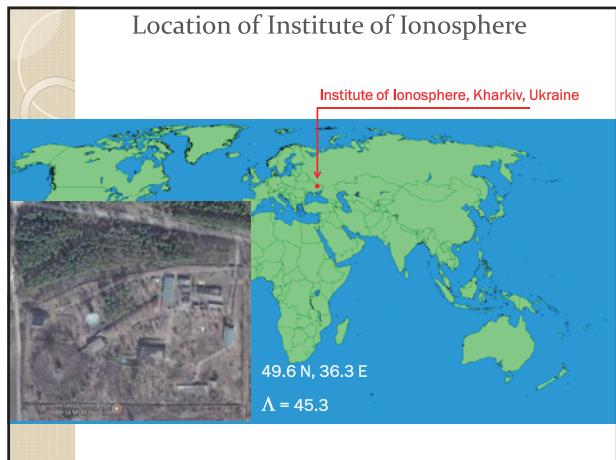
Outline

1. Introduction
2. Facilities, software and database
3. TIDs during quiet conditions
4. TIDs during solar eclipse
5. TIDs during high power radio transmission
6. TIDs observed with MU radar
7. Joint observation campaign
8. Summary

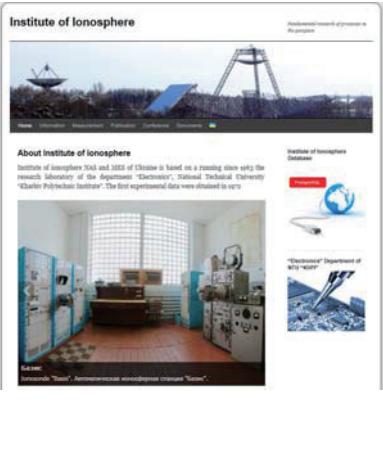
Introduction

Traveling ionospheric disturbances (TIDs) play a key role in dynamic coupling between different ionospheric regions and are one of the important sources of ionospheric variability. Most of TIDs is thought to be the manifestations of acoustic-gravity waves (AGWs) at the ionospheric heights but electromagnetic forces and electromagnetic coupling between E- and F-regions are responsible in many cases for TID generation, especially during the nighttime.

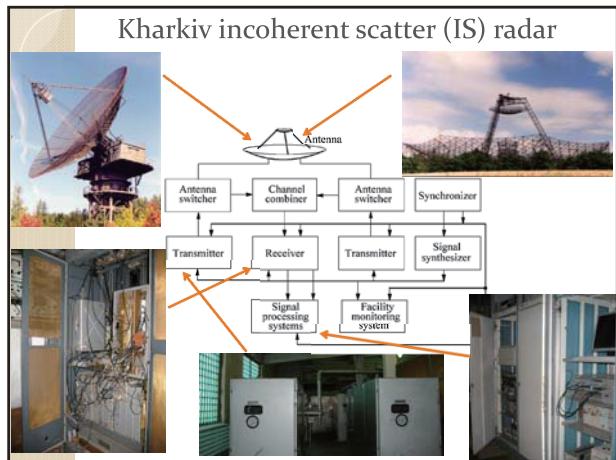
Despite the long-term investigations of TIDs with satellite and ground-based facilities and the considerable progress made in understanding their origins and characteristics, we have still uncertainties about TID generation and propagation on a global scale and their relationship to high energy natural and artificial processes. It should be noted that AGW/TID processes not only transport energy and momentum but also provide important information about disturbance source. AGWs/TIDs affect satellite orbits, operation of communication and navigation systems, geolocation accuracy, etc. So the efforts should be made to mitigate such negative influence. Finally, AGW/TID momentum and energy depositions are often comparable with those from regular dynamic processes such as winds and tides. It needs to be taken into consideration in global and regional modeling the dynamics and electrodynamics of the atmosphere and ionosphere.



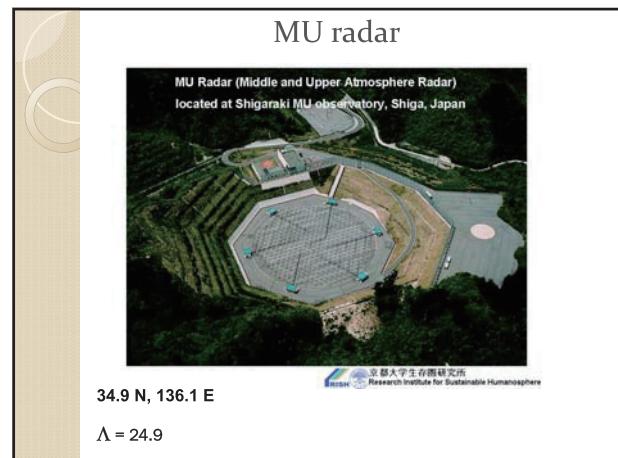
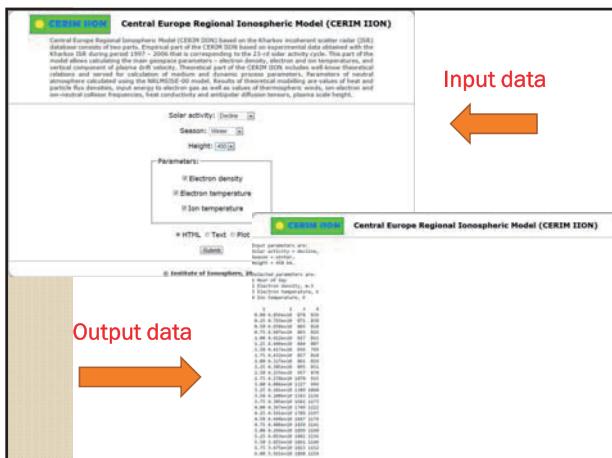
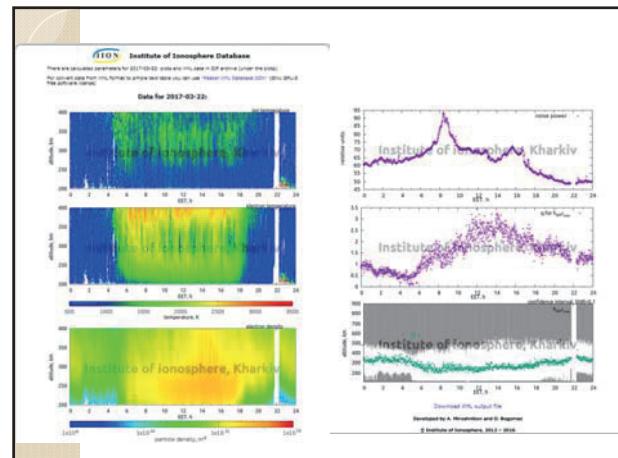
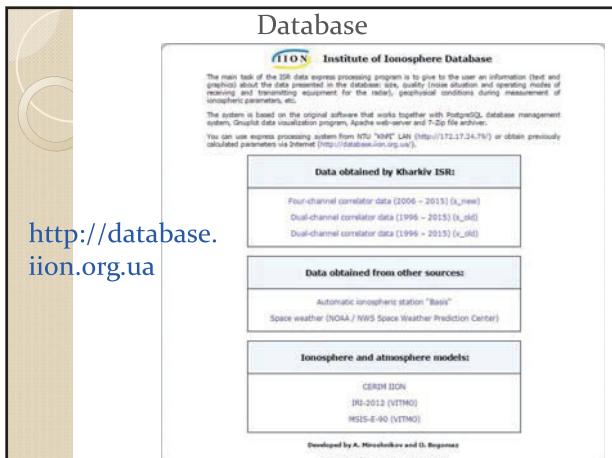
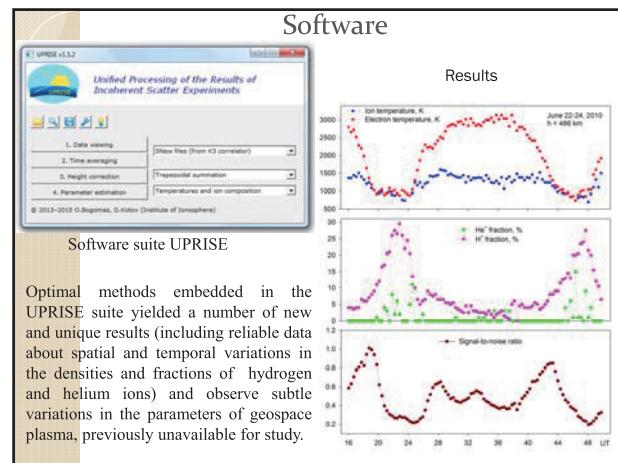
<http://iion.org.ua>

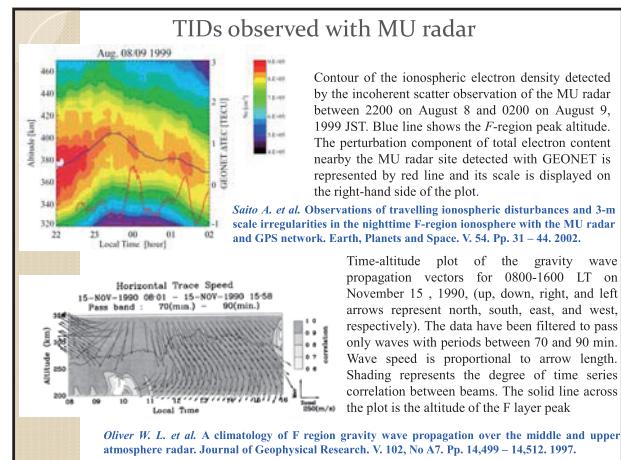
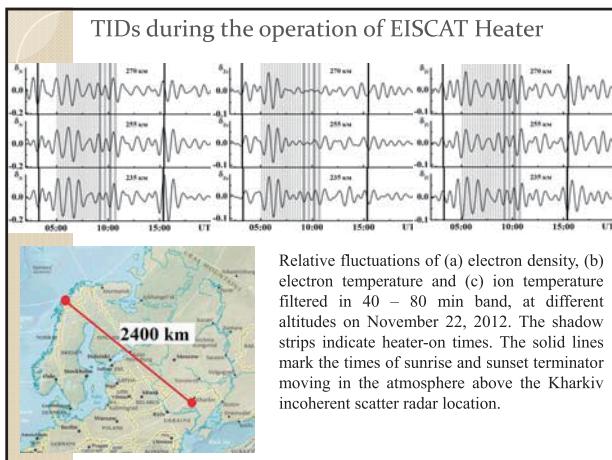
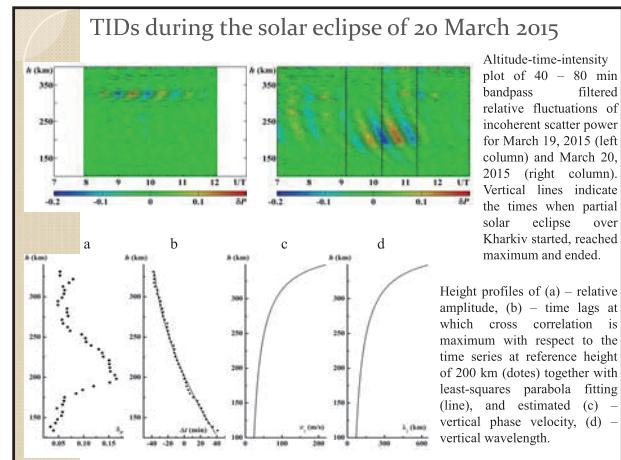
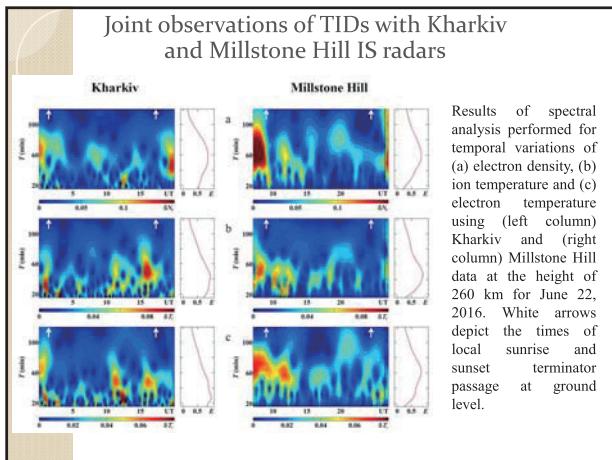
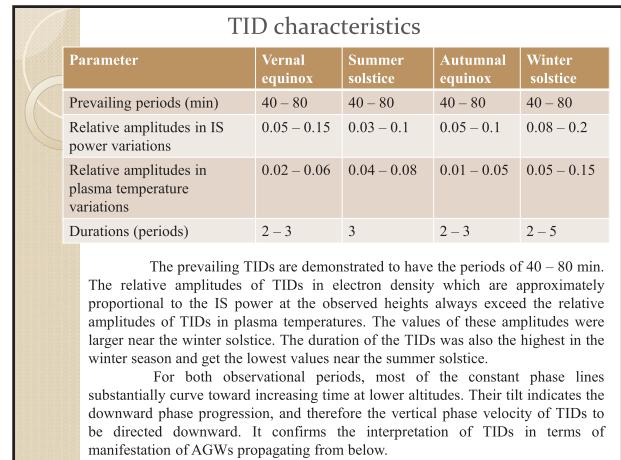
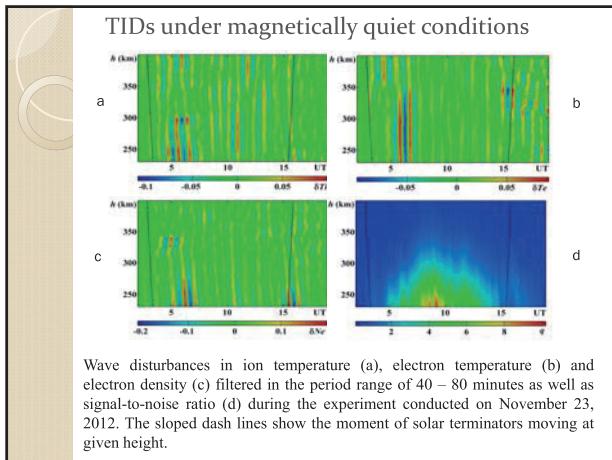


Institute of Ionosphere
 Environmental forecast of presence in the atmosphere
 About Institute of Ionosphere
 Institute of Ionosphere NOAA and ISEE of Ukraine is based on a running since 1973 the research laboratory of the department "Electromagnetic Field and Technical University" Kharkiv Polytechnic Institute - the first experimental data were obtained in 1973.
 Institute of Ionosphere
 Research
 "Electromagnetic Department of ISEE-NUPT"
 Ionosphere "Radar", Atmospheric wave propagation center "Sonic".



Main characteristics of the radar	
Antenna dish diameter	100 m for zenith directed antenna 25 m for fully steerable antenna
Half-power beam width	1.3° for zenith directed antenna 5.1° for fully steerable antenna
Effective aperture	3700 m ² for zenith directed antenna 290 m ² for fully steerable antenna
Carrier frequency	158 MHz
Peak pulse power	3.6 MW
Average power	100 kW
Pulse repetition frequency	24.4 Hz
Polarization	Circular and linear
Noise temperature	120 K 470 – 980 K
Altitude range	100 – 1000 km



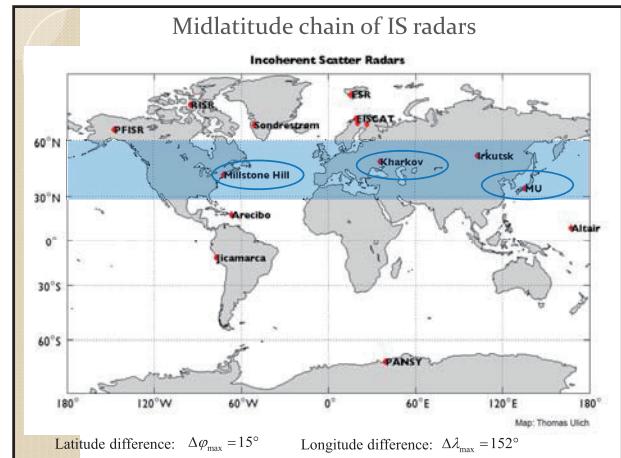


Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University
 Collaborative Research based on
 the MU Radar and Equatorial Atmosphere Radar (EAR)

Project:
Coordinated observations of light ions and TIDs with Shigaraki MU and Kharkiv IS radars

PI: Dr. Sergii Panasenko,
 Contact person in RISH: Prof. Mamoru Yamamoto

Kharkiv	Shigaraki	Millstone Hill
		



Summary

- Travelling ionospheric disturbances represent important dynamical process of energy and momentum transfer. They provide important information about disturbance source and strongly affect satellites, navigation and communication systems. Incoherent scatter radars enable simultaneous TID study in many ionospheric parameters.
- We presented the information about Institute of Ionosphere, its location, facility, software, database and main results concerning such ionospheric parameters as electron density, plasma temperatures and ion composition. The location of MU radar is also shown.
- The results of traveling ionospheric disturbance study using Kharkiv incoherent scatter and MU radars are demonstrated. We detected and estimated the characteristics of TIDs in quiet conditions as well caused by natural (solar eclipse) and artificial (high power radio waves) sources.
- Conduction of joint measuring campaigns with midlatitude IS radar chain will enable the progress in understanding TID generation, propagation and dissipation, examine different hypothesis about association of TIDs with their sources and improve global and regional models of dynamics and electrodynamics of the atmosphere and the ionosphere.



観測ロケットS-520-27号機による 電場観測データの再解析

西田圭吾、山本衛(京都大学生存圏研究所)、
石坂圭吾(富山県立大学)、田中真(東海大学)

Outline

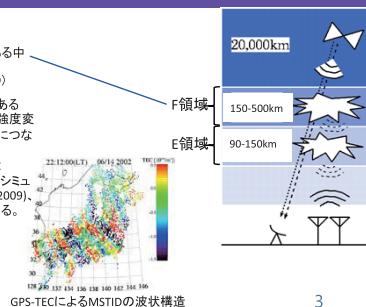
研究背景
ロケット・地上受信機・航空機による総合観測
ロケット実験の電場解析手法の構築
解析結果
電場解析手法の妥当性確認
まとめ

2

研究背景

研究対象：
中緯度の領域で夜間に発生するFAIである中規模伝搬性電離圏擾乱(Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbance ,MSTID)

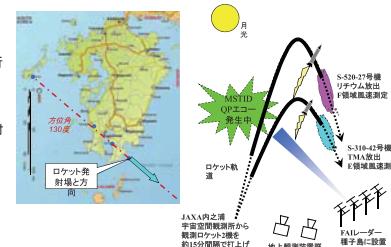
- 伝搬遅延や電子密度の不規則構造であるFAI(Field-Aligned Irregularity)は電波の強度変動を引き起こし、衛星通信の品質劣化につながる。
- 北西・南東方向の電子密度の波状構造
- 近年、プラズマ密度分布の時間変化がシミュレーションで再現され(Yokoyama et al., 2009)、MSTIDの発生機構の仮説が示されている。



3

ロケット・地上受信機・航空機による総合観測

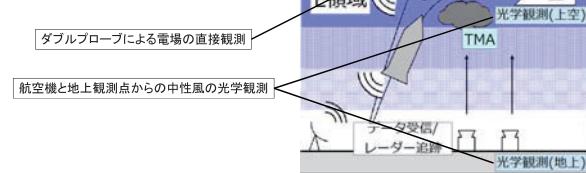
- 2013年7月20日に行われたS-520-27号機の観測データの解析を行う。
- 実験では地上の観測機器で MSTID が発生していることを確認し、南東方向にロケットが発射された。



4

ロケット・地上受信機・航空機による総合観測

- MSTIDの解明には電場、中性風、電子密度といったパラメータが重要とされている。
- MSTID発生時を狙って上記3つのパラメータを同時に観測できる点でロケット観測が有効である。

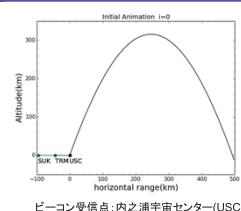


5

ロケット・地上受信機・航空機による総合観測

2周波ビーコン送信機を用いたトモグラフィー

デメリット
観測時間が短い、GPS-TECのように観測点が多くない。
メリット
電子密度の直接観測データが利用できる。
→ART, MART法において信頼性の高い初期値設定が可能



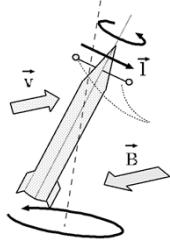
自然電場の再解析・全電子数のトモグラフィー解析を行い、MSTID発生機構解明のためのデータを提供することを目的とする。
本発表では自然電場解析結果を紹介する。

6

自然電場観測原理

電場観測の問題点

- ロケットのスピン周波数の変化によって座標系変換が困難
- 電場を測定したS-520-27号機について加藤(2014)が観測の実施と暫定的な解析を報告したが、精度の良いロケット姿勢データが出されたため、電場観測データの再解析を行った。
- 導出した電場の磁場直交性や水平成分の方向に問題があることが分かった。



7

自然電場観測原理

$$V = \vec{l} \cdot (\vec{E}_0' + \vec{v} \times \vec{B})$$

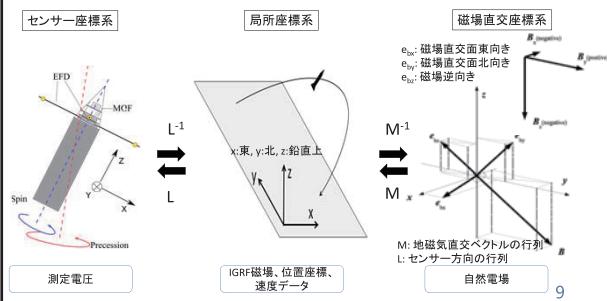
ダブルプローブで直接測定
ロケットの姿勢データより算出可能
位置座標と国際標準地球磁場(IGRF)モデルから算出可能
可搬型ドップラーレーダーで測定した位置
座標を微分することで算出可能

V: プローブ測定電圧
l: プローブ方向ベクトル
 \vec{E}_0' : 自然電場
 v : ロケット速度
 B : 地球磁場

- ダブルプローブをそれぞれxy軸、ロケットの回転軸をz軸としたセンサー座標系で計算する。
- 自然電場のうちロケットのプローブ平面に投影された自然電場成分 E_0' が導出できる。

8

自然電場観測原理



9

ロケット実験の電場解析手法の構築

$$L^{-1} \xrightarrow{L} \text{センサー座標系} \quad \text{局所座標系}$$

プローブ方向ベクトルの行列
 $L = \begin{bmatrix} l_{Xx} & l_{Xy} & l_{Xz} \\ l_{Yx} & l_{Yy} & l_{Yz} \\ l_{Zx} & l_{Zy} & l_{Zz} \end{bmatrix}$

誘導電場ベクトル(センサー座標系)
 $\begin{bmatrix} I_X \\ I_Y \\ I_Z \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} E_0' \\ E_{Bx} \\ E_{By} \end{bmatrix}$

- ロケットの姿勢データから得られたプローブ方向ベクトルの行列をかけて、センサー座標系に変換
- 添字がxxの成分はプローブx軸の東向き成分(局所座標x軸方向)を表す。

$\vec{l}_X = (l_{Xx}, l_{Xy}, l_{Xz})$

10

ロケット実験の電場解析手法の構築

$$\text{局所座標系} \xrightarrow{M^{-1}} \text{磁場直交座標系}$$

地球磁場ベクトルから磁場に直交する座標系の各単位ベクトルを計算する。

$M = [\vec{e}_{bx} \vec{e}_{by} \vec{e}_{bz}]$

$\vec{e}_{bx}, \vec{e}_{by}, \vec{e}_{bz}$ are unit vectors in the magnetic field orthogonal coordinate system.

11

ロケット実験の電場解析手法の構築

① 自然電場 E_0 の磁場直交の仮定
 $\vec{E}_0 \cdot \vec{e}_{bz} = 0$

② プローブ観測で不足しているのはロケットの基幹方向の電界成分 $k l_z$ であり、これを補うと電場の投射ができる。 $(k$ は定数)

$\vec{E}_0 + k \vec{l}_z = \vec{E}_0'$

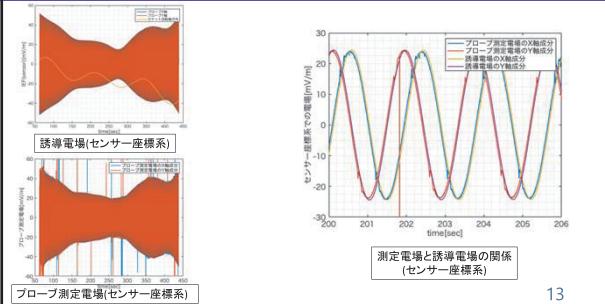
③ ②の関係式は磁場座標系の単位ベクトル $\vec{e}_{bx}, \vec{e}_{by}, \vec{e}_{bz}$ で表すことができる。変換行列 M によって各係数 α, β, γ が求められる。②式の $\vec{E}_0', l_x, l_y, l_z$ の係数 α, β, γ の添字を順に1, 2, 3とし、磁場平行成分に着目すると
 $\gamma_1 + k \gamma_2 = \gamma_3$

④ ①の仮定により電場の磁場平行成分はゼロなので、
 $\gamma_3 = 0, k = -\frac{\gamma_1}{\gamma_2}$

\vec{E}_0' : 導出したプローブ面での自然電場
 E_0 : 自然電場

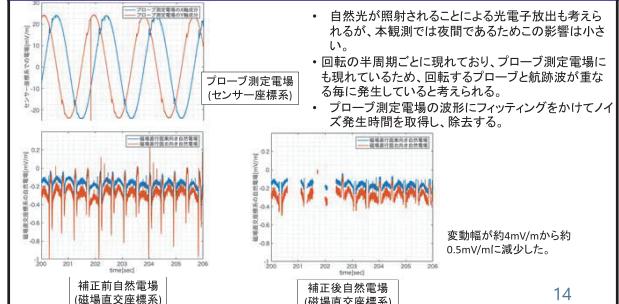
12

解析結果



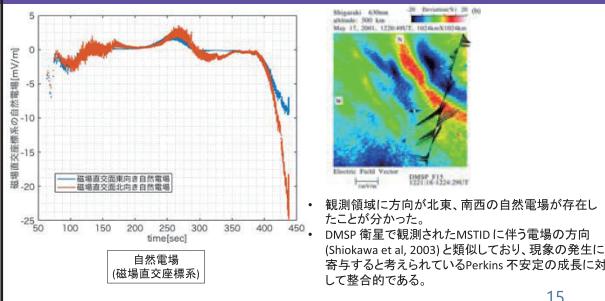
13

解析結果



14

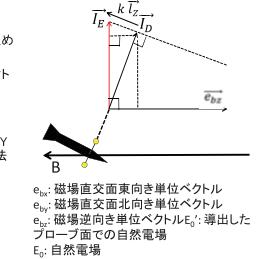
解析結果



15

電場解析手法の妥当性確認

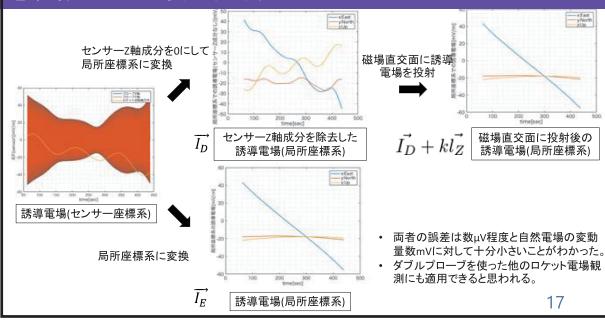
- 自然電場の磁場直交成分推定の妥当性を確認するため、計算値である誘導電場を用いて確認する。
- 誘導電場のセンサー座標系のZ軸成分を除いたベクトル \vec{I}_D （プローブ測定電圧と同じ方向）を求める。
- 提案手法で \vec{I}_D を磁場直交面に投射したベクトル $\vec{I}_D + k\vec{l}_Z$ と、Z軸成分を含む誘導電場 \vec{I}_E を比較する。
- 実際のプローブ測定電界はセンサー座標系でX軸とY軸成分しか持たないため、両者が一致すれば解析方法の妥当性が確認できる。



e_{bx} : 磁場直交面東向き単位ベクトル
 e_{by} : 磁場直交面北向き単位ベクトル
 e_{bz} : 磁場逆向き単位ベクトル \vec{E}_0 : 導出した
 プローブ面での自然電場
 E_0 : 自然電場

16

電場解析手法の妥当性確認



17

まとめと今後の予定

- ロケット実験の自然電場の解析手法を精査し、衛星観測によるMSTID発生時の自然電場の方向と整合性が取れていることを示した。
- 提案した電場解析手法の妥当性を示し、ダブルプローブを使った他のロケット実験の解析にも適用できる可能性が高いことを示した。
- 今後はビーコン送信機を用いたTECのトモグラフィー解析を進める。

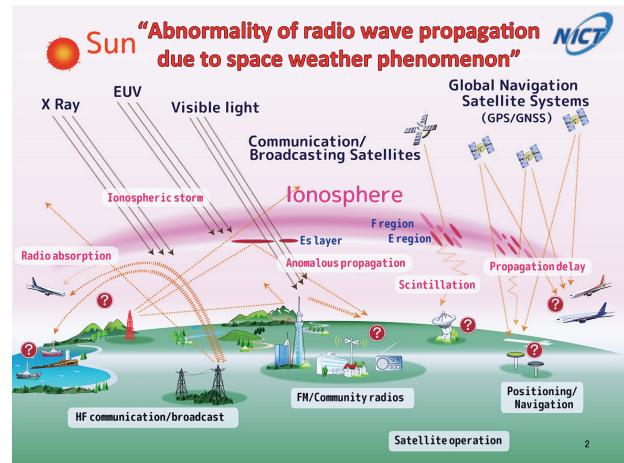
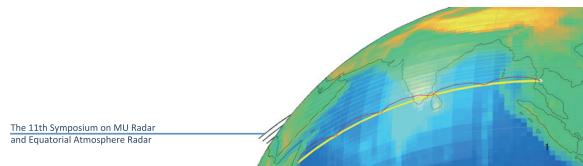
18



Local HF radio propagation simulator

Kornyanat Hozumi (kukkai@nict.go.jp).

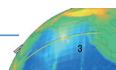
National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Japan



Introduction

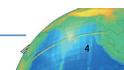
- HF band is officially used for emergency and disaster relief operation by International Amateur Radio Union (IARU), and Japan Amateur Radio League (JARL).
- The emergency traffic was kept active in the frequencies of 3.525 MHz, 7.030 MHz, 7.043 MHz, and 7.075 MHz.
- Those frequencies are normally affected from day-to-day bottom structure variation of the Earth ionosphere, which is influenced by both space weather activity and lower atmosphere.
- To ensure reliable use of precise information of radio propagation and space weather (in particular ionosphere), sustainable development of both radio propagation simulation and observation is mandatory.

The 11th Symposium on MU Radar and Equatorial Atmosphere Radar



Radio propagation Simulator

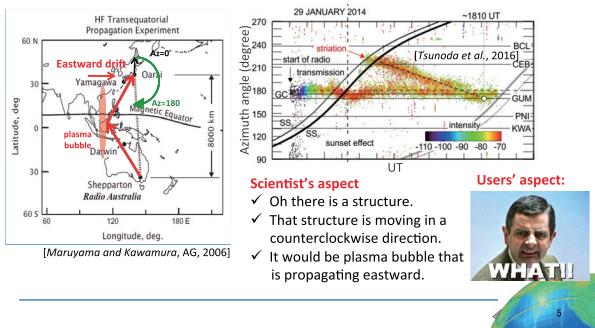
The 11th Symposium on MU Radar and Equatorial Atmosphere Radar



HF-TEP: HF Trans-Equatorial Propagation

"Example of ionospheric data that is difficult for users to understand"

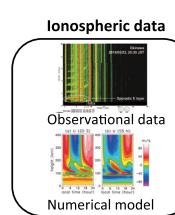
TEP between Japan and Australia is an excellent means to observe the plasma bubble over the ocean that is penetrating Japan.



Problems and challenges

"Abnormality of radio wave propagation due to space weather phenomenon"

- Various space weathers cause unreachable, intensity fluctuation, abnormal route propagation, propagation delay etc.
- Its evaluation and analysis are difficult.

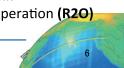


Provide data after appropriate evaluation and/or interpretation.

Users

- Aviation and marine radio
- Disaster prevention radio, FM broadcasting
- Shortwave communication
- Observation satellites (SAR, etc.)
- Satellite operation, navigation, positioning
- Amateur radio, etc.

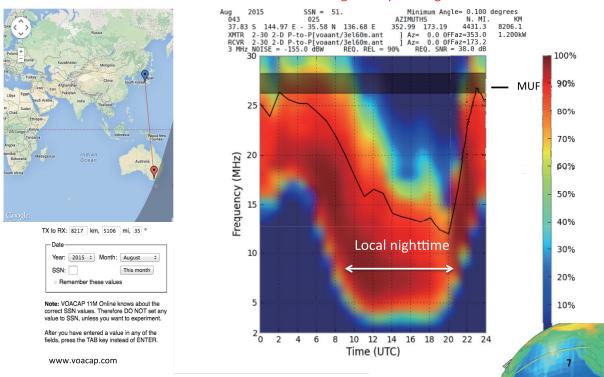
(→ Radio Propagation Simulator)
A bridge to link research to operation (R2O)





Popular propagation model: VOACAP

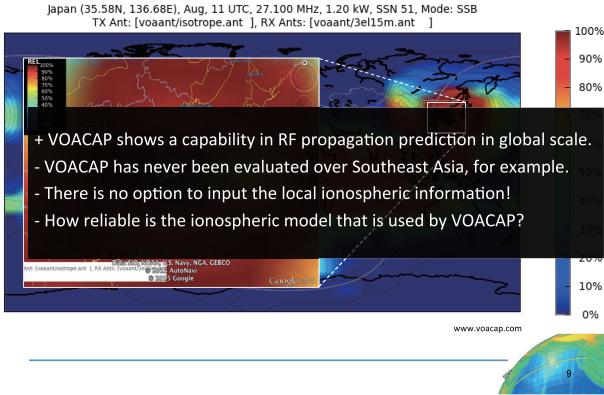
VOACAP: Voice of America Coverage Analysis Program



Example of coverage area map input

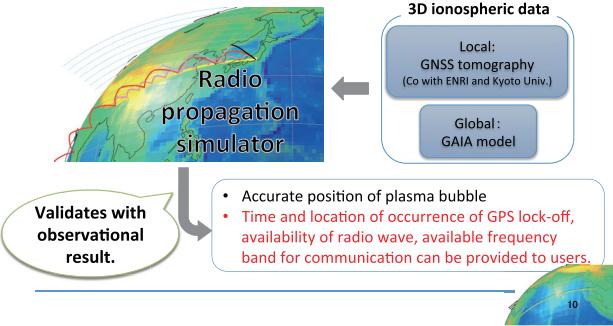


Example coverage area map for short wave

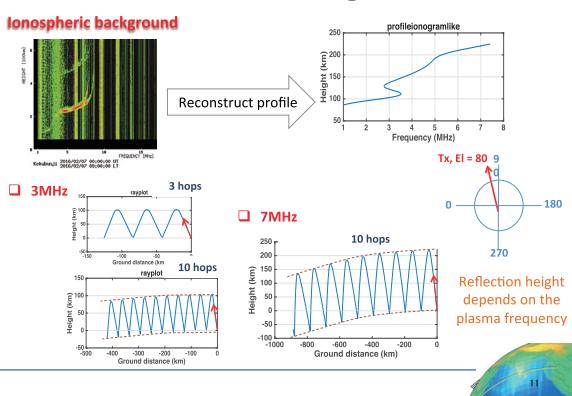


Model concept

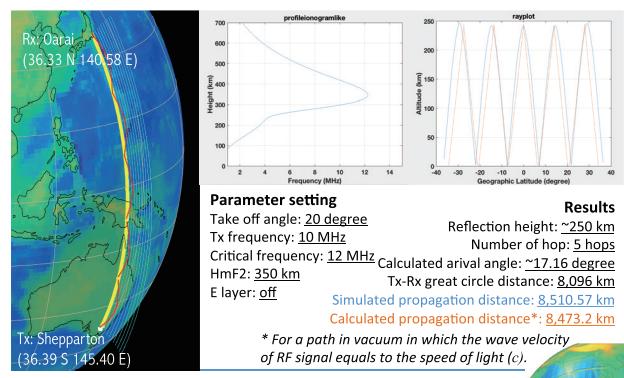
Reproduces the 3D electron density structure using GNSS tomography and GAIA model, and simulate radio wave propagation using 3D ray tracing. The simulation result is compared with observational result for evaluation.



Tx: Elevation angle = 80

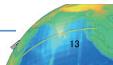


Model evaluation (Shepparton-Oarai)



Evaluation campaign (Planned to be held in winter 2017)

The 11th Symposium on MU Radar
and Equatorial Atmosphere Radar



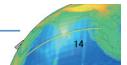
Ideas on Evaluation Campaign

- Develops GNU-Radio-based digital receiver for HF band.
- Propagation distance can be estimated by the time-lag information that is retrieved from waveform comparison between two Rx stations, which are receiving the same signal.
- Deploys NICT (and Kyoto Univ.) ionosonde for h'E and h'F parameters, which correspond to the reflection height of a signal with the same group delay.
- This allows retrieving a precise description of the local ionospheric profile, which is important for interpretation of the HF propagation distance.

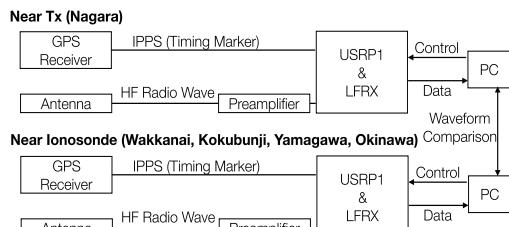
Note 1: I planned to use HF wave transmitted from radio NIKKEI in Nagara.

Note 2: Radio NIKKEI (35°27'54"N, 140°12'17"E)

The 11th Symposium on MU Radar
and Equatorial Atmosphere Radar

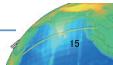


GNU-Radio-based digital receiver

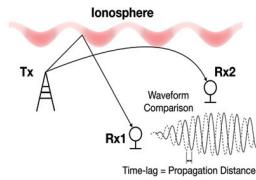


"Observational setup diagram of HF-START evaluation campaign."

The 11th Symposium on MU Radar
and Equatorial Atmosphere Radar



Time-lag technique

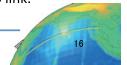


"The time-lag technique to retrieve propagation distance from multi stations."

Table 1 Planned HF Links

Link	1	2	3	4
Tx	Nagara	Nagara	Nagara	Nagara
Rx	Wakkai	Kokubunji	Yamagawa	Okinawa
Distance	1,086 km	71 km	1,008 km	1,504 km

"Location of Tx (dark blue circle), planned Rx stations for the campaign (red circle), and NICT ionosonde stations (red circle). The light blue strips show the possible radio path of each radio link."



What have been done and what next?

[Done]

- Basic part of the radio propagation simulator
- Design of an evaluation campaign

[Doing]

- Hardware preparations for evaluation campaign
 - Designs and assembles circuit interfaces and others.
- Software design for USRP
- Try to employ Raspberry Pi and small GPS module as NTP server.

[Next]

- Develops data post-processing for waveform comparison.
- Evaluate the simulator during the campaign. (Real-time challenge)

The 11th Symposium on MU Radar
and Equatorial Atmosphere Radar



新しい衛星＝地上ビーコン観測用の4周波デジタル受信機の開発状況

山本衛

岩田桂一君(修論) + 北藤典也君(M1インターン)
(京都大学生存圏研究所)

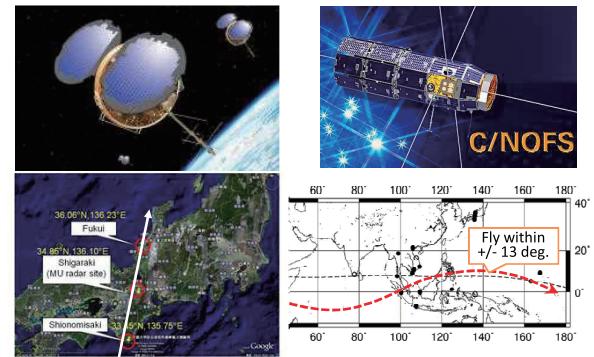
F3/C and C/NOFS used for beacon experiment

FORMOSAT-3/COSMIC

2D tomography over Japan

C/NOFS

GRBR network in SE-Asia & Pacific



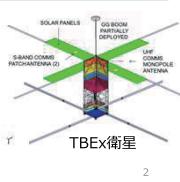
研究の目的と新型ビーコン衛星

老朽化し残り3機となったビーコン衛星の替わりとなる、
新型ビーコン衛星に対応した観測システムの開発。

名称	打上げ時期	機数	軌道傾斜角	ビーコン周波数	備考
COSMIC-2 (USA,Taiwan)	2018年 4月28日 (新情報)	6	24°	400 MHz 965 MHz 2200 MHz	主目的はGPS掩蔽観測
TBEx (USA)	2018年 4月28日 (新情報)	2	28.5°	150 MHz 400 MHz 1067 MHz	CUBESAT COSMIC-2と同時に打ち上げられる

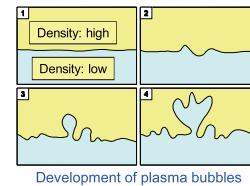
- ハードウェア:受信機の選定。

- 現在は1台の受信機で2周波数での観測を行っているが、新たに3周波数での観測に対応することが不可能。
- 新型観測システムでは周波数毎に受信機を用いる。
- 同期が問題となりうる。
(サンプルレート、開始タイミング、データ取得)

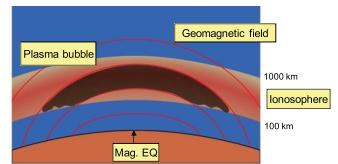


- ソフトウェア:新システムへの対応、手法の改善。

Low-latitude ionosphere Bubble or Equatorial Spread-F (ESF)

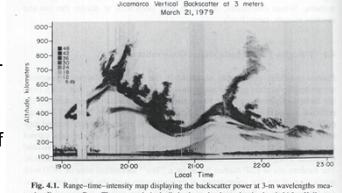


Development of plasma bubbles



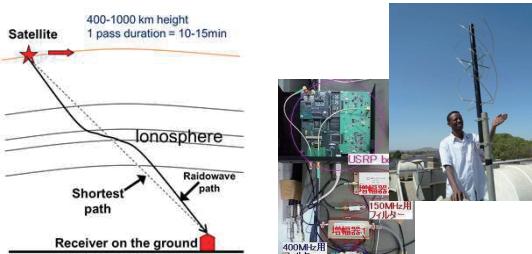
Meridional structure of plasma bubbles

- Rayleigh-Taylor instability is the mechanism.
- ESF occurs mainly near F-region sunset over the magnetic equator.
- VHF radar is very useful of observing bubble (ESF).



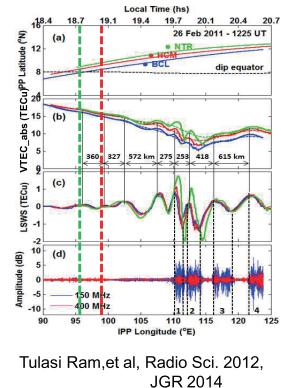
LEO satellite beacon and GRBR

- VHF(150MHz)/UHF(400MHz) beacon signals from LEO satellite are used for ionospheric TEC measurement for long time.
- GRBR (GNU Radio Beacon Receiver) was developed with GNU Radio and USRP-1 board at cost of 2000-3000 USD/system.
- Network of about 30 GRBRs already exist over Japan, southeast Asia, Pacific, etc., and used for studies.

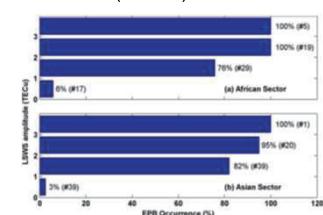


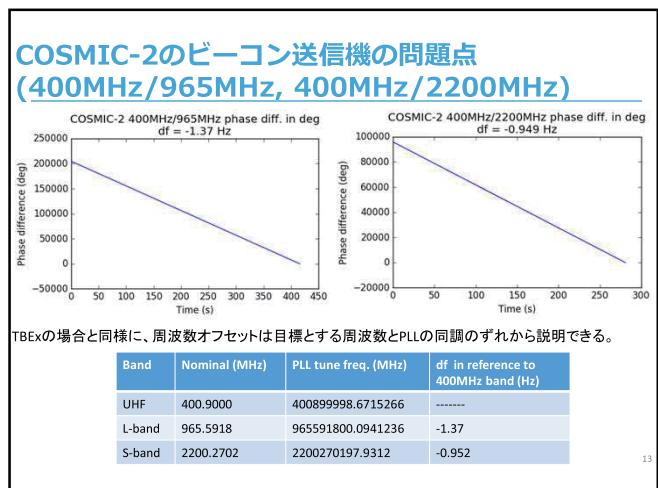
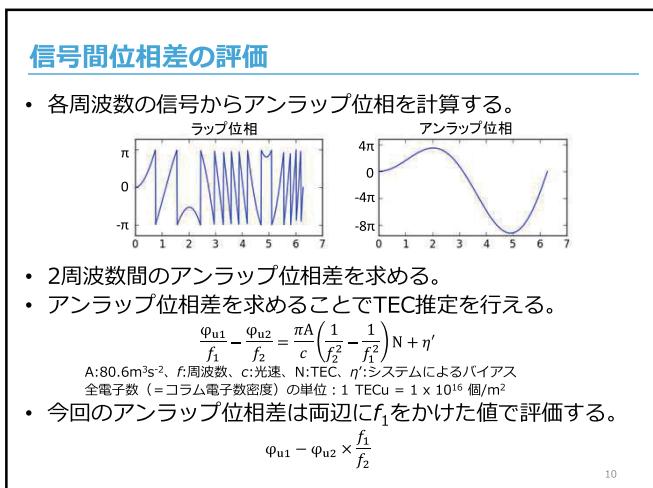
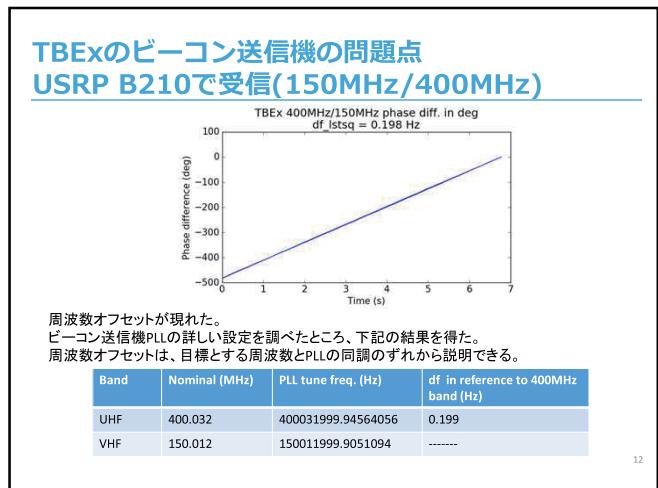
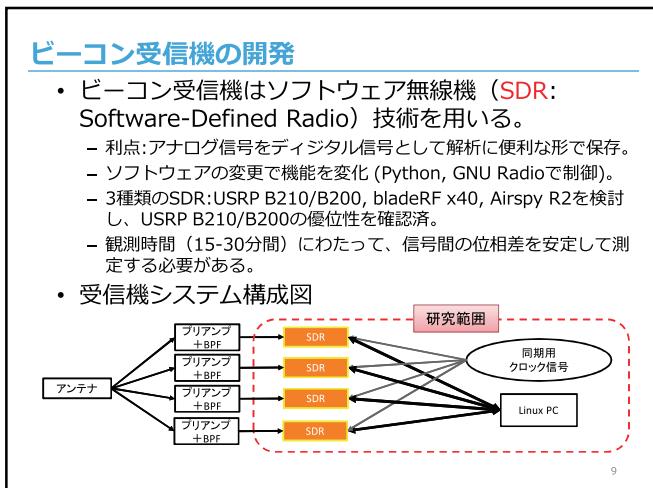
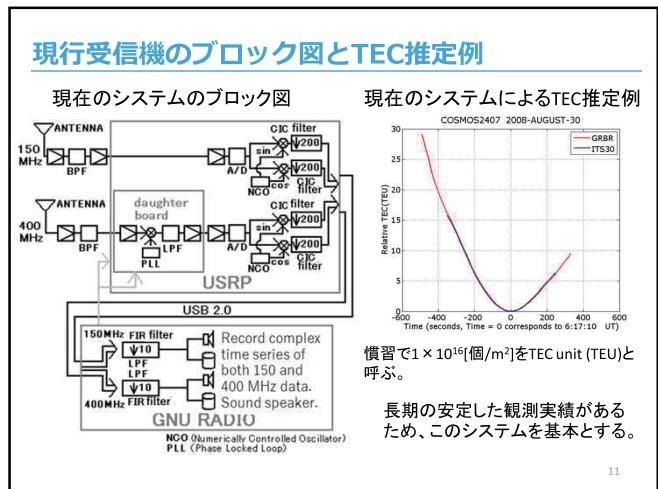
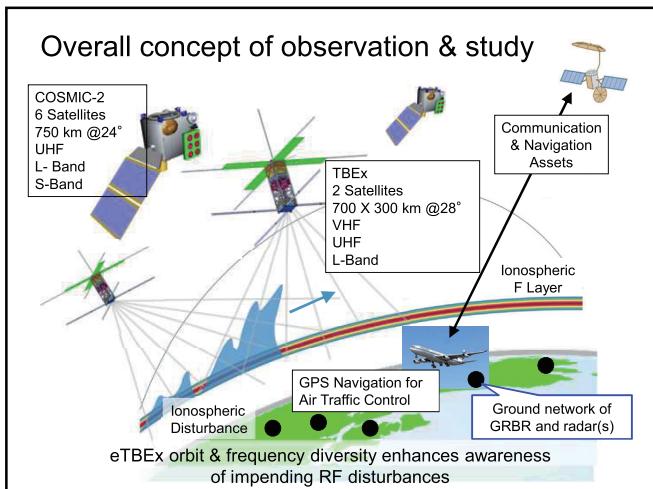
C/NOFS study: LSWS (Large-Scale Wave Structure) and bubble occurrence

- ❖ LSWS: zonal wave-like structures from C/NOFS pass over Vietnam which follow onset of bubbles. (left)
- ❖ Statistics show occurrence of ESF is more at intense LSWS events. (bottom)



Tulasi Ram, et al, Radio Sci. 2012,
JGR 2014





TEC推定への周波数オフセットの影響

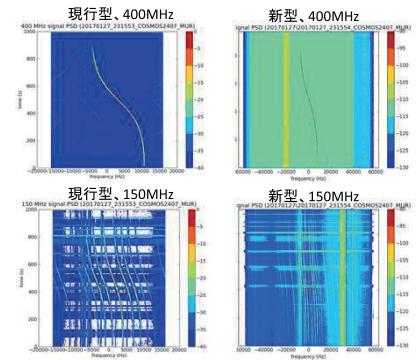
受信機USRP B200/B210, TBEx及びCOSMIC-2の送信機の周波数オフセットからTEC推定への影響を計算した。観測時間を1200sとしたとき、周波数オフセットから下記のTEC値が求められる。

機体	周波数[MHz]	周波数オフセット[Hz]	TEC値[TEU]
USRP	400/150	1.03×10^{-3}	0.0602
USRP	400/1067	-7.56×10^{-4}	0.314
Airspy	400/150	-9.54	-557
Airspy	400/1067	-14.3	5942
TBEx	400/150	0.199	11.6
COSMIC-2	400/965	-1.37	591
COSMIC-2	400/2200	-0.952	351

14

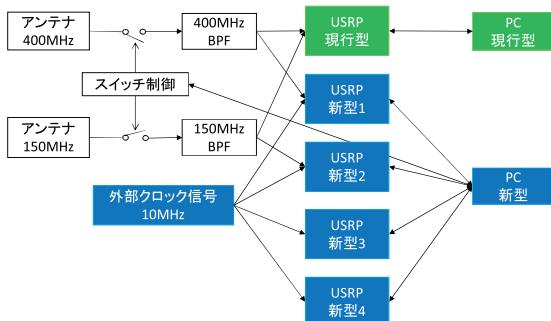
観測結果(2017/1/27 at 信楽MU観測所)

- 現行型と新型のシステムで同時に観測を行った。



観測実験(at 信楽MU観測所)

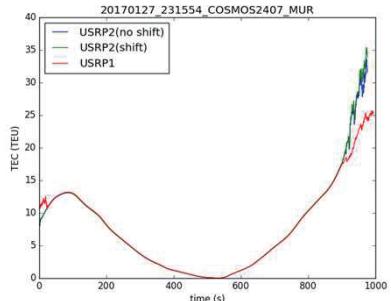
- 現行型と新型のシステムで同時に観測を行った。



15

観測実験(2017/1/27 at 信楽MU観測所)

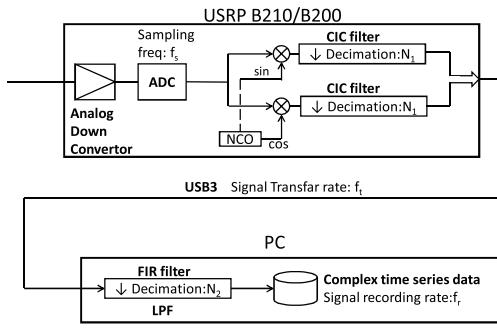
- 現行(USR1)と新型(USR2)の推定TEC値が等しく求められた。観測開始時間差は結果に大きく影響しない。



16

新システムのブロック図

- 1台のUSRPからPCまでのブロック図

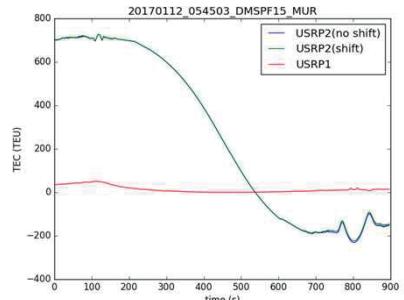


16

データ欠損によるTEC推定の失敗

TEC値の推定が大きく異なる観測例がある。

2つの信号のデータ数が大きく異なる(150MHzが約1.28秒短い)



19

データ欠損によるTEC推定の失敗

- データ取得量のスペックを下げ、データ欠損を減らす。
 - 条件を20分間の観測を10回行い、0.5秒以上のデータ欠損とデータ欠損が無い回数をそれぞれ測定。
 - USRPからPCの転送レート f_t の変更とUSRP台数の変更。

f_s	f_t	N_1	N_2
32MHz	2MHz 125kHz	16	16
32MHz	1MHz 125kHz	32	8
32MHz	125kHz 125kHz	256	1
51.2MHz	100kHz 100kHz	512	1

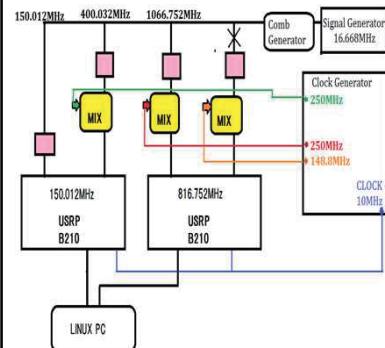
USRPが4台の場合				USRPが3台の場合					
データ欠損	2MHz	1MHz	125kHz	100kHz	データ欠損	2MHz	1MHz	125kHz	100kHz
0.5秒以上	8	4	5	2	0.5秒以上	0	2	1	0
0秒	0	0	3	8	0秒	3	8	6	10

「転送レートを下げる」、「台数を減らす」共に大きな効果があった。
転送レートでは特に100kHzに下ることで大きく改善した。
台数は4台から3台にするだけで大きな効果があった。

20

信号入力実験

USRP2台 × 2ch(sampling rate 200kHz)



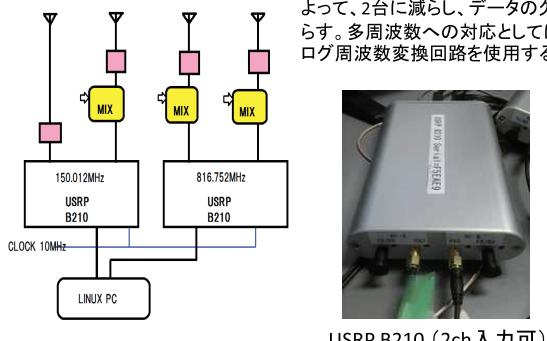
アナログ周波数変換器



Clock Generator

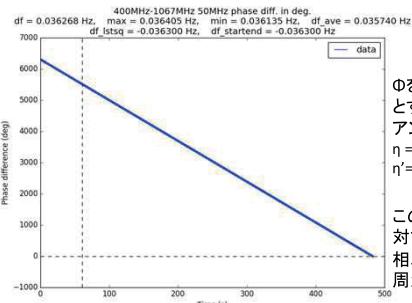
改善提案

受信周波数ごとにSDRを使用(全4台)していたが、USRP B210を2台使うことによって、2台に減らし、データの欠損を減らす。多周波数への対応としては、アナログ周波数変換回路を使用する。



USRP B210 (2ch入力可)

SDRの周波数オフセット測定



Φを各周波数のアンラップ位相とすると、
アンラップ位相差 η として
 $\eta = \Phi[400\text{MHz}] - \Phi[150\text{MHz}] * 8/3$
 $\eta = \Phi[400\text{MHz}] - \Phi[1067\text{MHz}] * 3/8$

このアンラップ位相差の時間に対する変位(傾き)がシステム位相バイアスとなっている。これを周波数オフセットと呼ぶ

周波数オフセット測定結果(sampling rate 200kHz)

400-150MHz間: 311.182 mHz 400-1067MHz間: 36.268 mHz

データ欠損の評価結果

実際の観測時間に近い1000秒間の観測を行い取得データ数の差を調査した。データ数差だけを求めるため、受信信号は特に入力せずに実施した。

USRP3台接続時のデータ欠損時間(岩田, 2017)

125kHz	100kHz
0 s	0 s
1.49504 s	0 s
0.02048 s	0 s
0.02048 s	0 s
0 s	0 s
0 s	0 s
0 s	0 s
0 s	0 s
0.02048 s	0 s
0 s	0 s

2入力USRP x 2台接続時のデータ欠損時間

200kHz
0 s
0 s
0 s
0 s
0 s
0 s
0 s
0 s
0 s
0 s

まとめ

- 新しいビーコン衛星TBExとCOSMIC-2に対応した4チャンネル受信機の開発中である。
- USRP B210 (2ch入力)を2台使用し、周波数変換回路(アナログ)を用いた構成が良さそう。
- 各周波数帯で取り扱える信号帯域は200kHzである。1MHzが望ましいので、もう少し工夫が必要。
- ごく最近に、ロケット打ち上げ予定が2018年4月28日とされた。開発を加速する必要がある。
- 別途開発中の多周波平面アンテナと組合せてテスト観測を実施したい。

数値シミュレーションと赤道大気レーダー観測によるプラズマバブル上昇速度の推定

横山 竜宏⁽¹⁾、S. Tulasi Ram⁽²⁾、K. K. Ajith⁽²⁾、山本 衛⁽³⁾、K. Niranjan⁽⁴⁾

⁽¹⁾情報通信研究機構、⁽²⁾Indian Institute of Geomagnetism, India、

⁽³⁾京都大学生存圏研究所、⁽⁴⁾Andhra University, India

研究目的

電離圏のプラズマは、その運動が中性大気との衝突によって強く支配されているため、中性大気と電離大気の相互作用を解明することは電離圏の物理過程を理解する上で非常に重要である。赤道域電離圏においては、赤道スプレッド F/プラズマバブルと呼ばれる現象の研究が古くから行われている。プラズマバブルに伴う局所的なプラズマ密度の不規則構造が発生した場合には、電波の振幅、位相の急激な変動（シンチレーション）が生じるため、GPS 等による電子航法に深刻な障害を及ぼすことが知られており、その生成機構と発生の日々変化の解明が強く求められている。現象の発見当初から、プラズマバブルは電離圏 F 領域下部における Rayleigh-Taylor 不安定が原因であると予想され、磁気赤道上の 2 次元断面における数値シミュレーションにより、不安定の非線形成長がプラズマバブル生成の主な原因であることが確認された。2000 年代後半以降になると、3 次元でのプラズマバブルシミュレーションが一般的となり、本研究でも、プラズマバブルを非常に高い空間分解能で再現できるモデルの開発を進めてきた(Yokoyama et al., 2014, 2015; Yokoyama and Stolle 2017)。本稿では、シミュレーションで再現されたプラズマバブルの上昇速度と、EAR 観測から推定されたプラズマバブルの上昇速度を比較し、シミュレーション結果の妥当性について検討を行った。プラズマバブルの上昇速度は、発生から電波伝搬に影響を及ぼすまでの時間に影響し、また最高到達高度は影響が及ぶ緯度範囲に関係するため、これらを定量的に評価することは重要な課題である。本研究の結果は Tulasi Ram et al. (2017)により JGR 誌に報告されている。

研究手法

プラズマバブル内部は、小スケールの不規則構造で満たされており、レーダー観測では半波長スケールの構造からのブレーグ散乱による強いコヒーレントエコーが受信される。このエコーの分布がプラズマバブルの構造と一致するとみなして、シミュレーション結果との比較を行う。赤道大気レーダー(EAR)は高速にレーダー ビームを走査可能であり、磁力線直交面内におけるプラズマバブルの 2 次元分布を高時間分解能で得ることができる。レーダーの視野内でプラズマバブルが発生、成長した場合を選び出し、エコー分布の上端高度の時間変化をプラズマバブルの上昇速度とみなす。一方、シミュレーションからは、密度の減少領域の上端高度は容易に判別できるため、その上端高度の時間変化から上昇速度を求めることができる。シミュレーション手法の詳細については Yokoyama et al. (2014)他を参照されたい。

結果

図 1 に EAR 観測視野内で日没後に発生、成長したプラズマバブルの観測例を示す。プラズマバブルの上端高度の変化は発生からの経過時間にほぼ比例し、約 117m/s であることが読み取れる。2010 年 5 月から 2013 年 4 月までの期間において、日没後に視野内で発生したケースが 68 例、真夜中付近で発生したケースが 18 例あり、それぞれのケースにおいてプラズマバブルの上昇速度と最高到達高度の推定を行った。その結果を図

2に示す。日没後の時間帯は、発生時刻が遅くなるにつれて上昇速度、到達高度共に現象するが、真夜中付近では明確な特徴は見られず、上昇速度は日没後と比べるとはるかに小さい。図3にシミュレーションから推定された日没後のプラズマバブルの上昇速度を示す。真夜中付近の電子密度分布を初期条件とした場合の計算も行い、EAR観測と比較した結果、シミュレーション結果は観測された上昇速度の範囲内であることが示された。観測から得られた上昇速度は広い範囲に分布しており、様々なパラメータが上昇速度の変動に寄与していると考えられる。

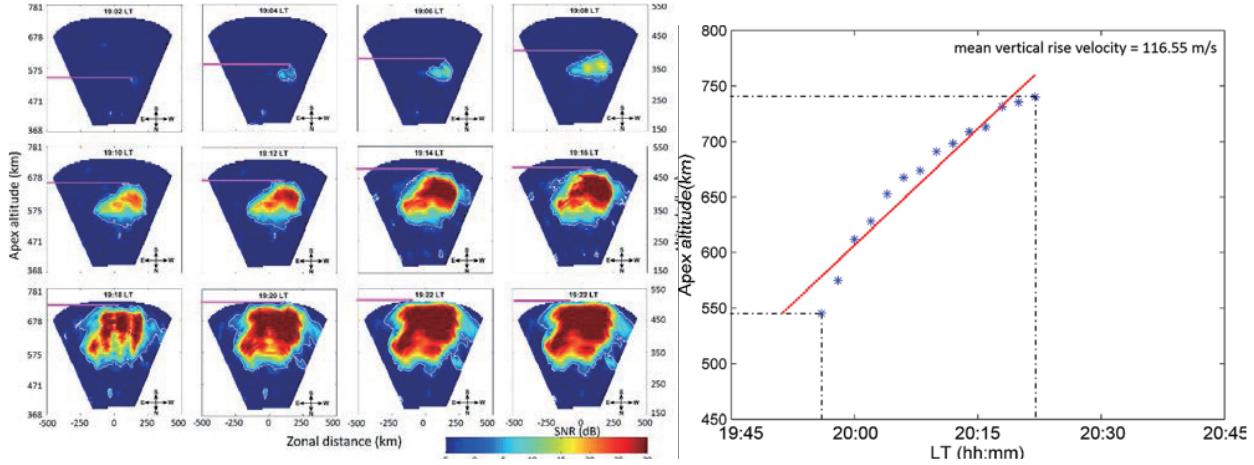


図 1: EAR 観測によるプラズマバブル上昇速度の推定

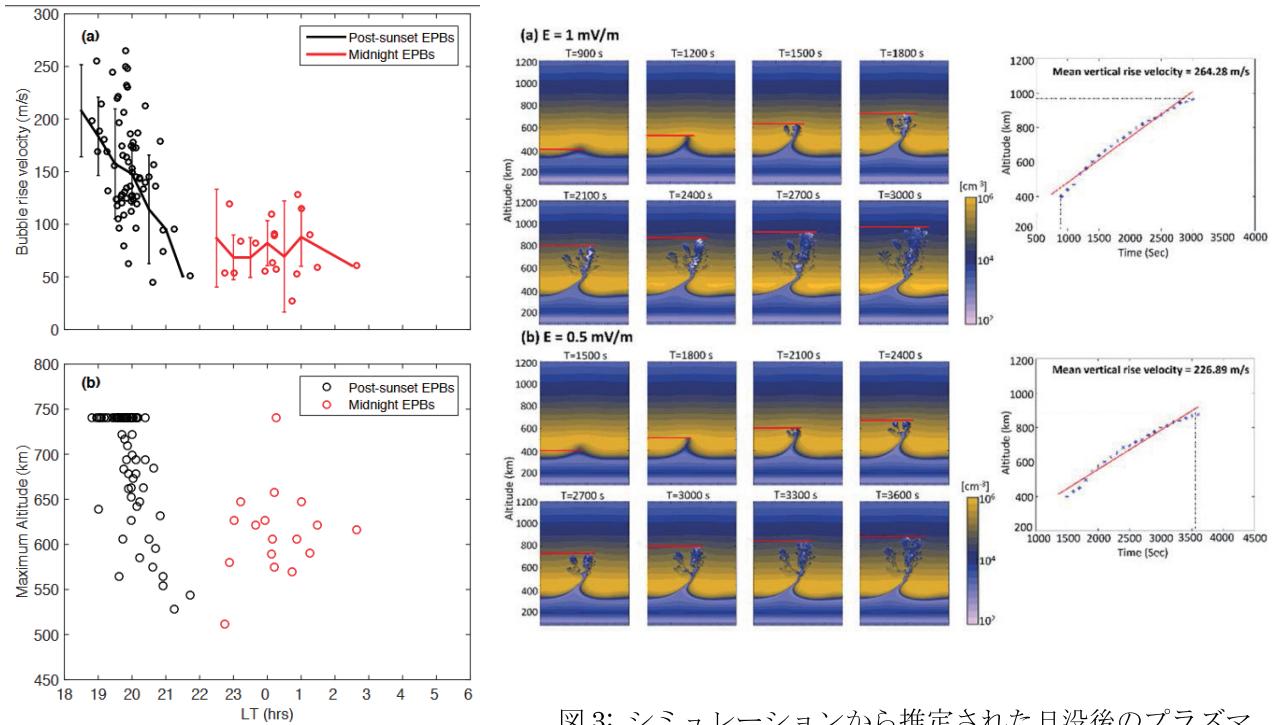


図 2: 2010 年 5 月から 2013 年 4 月の期間に観測されたプラズマバブル上昇速度の時刻変化

図 3: シミュレーションから推定された日没後のプラズマバブルの上昇速度。背景東向き電場が 1mV/m の場合(a)と 0.5mV/m の場合(b)を示している。

まとめ

本研究では、EAR 観測により観測されたプラズマバブルの上昇速度と、シミュレーションにより再現されたプラズマバブルの上昇速度を比較した。日没時と真夜中付近で異なる上昇速度が観測され、シミュレーションでも観測された範囲内の上昇速度が再現された。背景の電子密度分布と東西方向の電場により、上昇速度は大きく影響を受けることが示された。一方、観測から得られた上昇速度は広い範囲に分布しており、それ以外の要因も発生後の上昇速度に寄与していると考えられる。

参考文献

- Yokoyama, T., H. Shinagawa, and H. Jin, Nonlinear growth, bifurcation and pinching of equatorial plasma bubble simulated by three-dimensional high-resolution bubble model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 10,474-10,482, doi:10.1002/2014JA020708, 2014.
- Yokoyama, T., H. Jin, and H. Shinagawa, West wall structuring of equatorial plasma bubbles simulated by three-dimensional high-resolution bubble (HIRB) model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 8810-8816, doi:10.1002/2015JA021799, 2015.
- Yokoyama, T., and C. Stolle, Low and midlatitude ionospheric plasma density irregularities and their effects on geomagnetic field, *Space Sci. Rev.*, 206, 495-519, doi:10.1007/s11214-016-0295-7, 2017.
- Tulasi Ram, S., K. K. Ajith, T. Yokoyama, M. Yamamoto, and K. Niranjan, Vertical rise velocity of equatorial plasma bubbles estimated from Equatorial Atmosphere Radar (EAR) observations and HIRB model simulations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 6584-6594, doi:10.1002/2017JA024260, 2017.