

第 403 回 生存圏シンポジウム

第 13 回
MULレーダー・赤道大気レーダー
シンポジウム

2019年9月9日・10日

京都大学生存圏研究所

はじめに

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

一方、インドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に位置する赤道大気レーダー (EAR) は、2000 年度末に完成した大型大気観測用レーダーで、京都大学生存圏研究所 (RISH) とインドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) との協同運用により長期連続観測が続けられている。2001～2006 年度に実施された科研費・特定領域研究「赤道大気上下結合 (CPEA)」において、その中核設備として利用され、2005 年度から EAR 及びその関連設備の共同利用を開始した。当初から国際共同利用にも供しており、海外の研究者による共同利用が全課題数の約 3 割を占めている。また、京都大学では、赤道大気レーダーを MU レーダー並に高性能・高機能化するべく赤道 MU レーダー (EMU) を概算要求している。日本学術会議の学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン「学術大型研究計画」(マスタープラン 2014・2017) 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。現在、山極壽一京大総長を代表としてマスタープラン 2020 に応募中である。

本年 9 月 9 日・10 日に、京都大学宇治キャンパスにおいて第 13 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・レーダー工学に関連する研究成果、計画について 22 件の研究発表があり、活発な議論が行われた。

2019 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)	
航空機トランスポンダの受信信号から得られる高頻度水平風の特性評価と気象観測データとしての活用	4
吉原貴之・瀬之口敦・毛塚敦・齋藤享・古賀禎(ENRI)・古本淳一(メロウエザー)	
大気電場計測による首都圏の雷雲活動に関する研究	7
浜田純一・松本淳(首都大)・鴨川仁(静岡県立大)・高橋幸弘(北大)	
大気レーダーのためのスペクトル観測理論	9
西村耕司(極地研)	
パラメトリックスピーカーを用いた低騒音型 RASS 用音源の開発	12
橋口浩之・六車光貴 (京大 RISH)	
MU レーダー送受信モジュール制御機能の再開発	15
黒川浩規・山本衛・橋口浩之(京大 RISH)	
インドネシア泥炭地域レーダー観測に関する最近の話題	20
山中大学・川崎昌博(地球研)・松見豊(名大)・大橋勝文(鹿児島大理工)・Muhammad Arif Rahman (BMKG)・甲山治(地球研・京大東南研)・小川まり子(京大東南研)・橋口浩之(京大 RISH)・森修一(JAMSTEC)	
EAR 観測における雨滴エコーを利用した推定校正值の変動	23
下舞豊志・小野達也(島根大)	
Ku 帯衛星回線の台風通過時における降雨減衰変動特性	26
前川泰之・佐々木駿一・柴垣佳明(大阪電通大)	
TBEx 衛星・COSMIC-2 衛星からの 2 周波ビーコン波による低緯度電離圏観測手法の開発	31
氏原伸裕・山本衛(京大 RISH)	
新しい衛星＝地上ビーコン受信機の開発・配備・テスト観測状況	36
山本衛(京大 RISH)・Roland Tsunoda (SRI International)	
春季の東南アジア下部対流圏におけるオゾン増大：発生メカニズムと 3 次元構造	39
荻野慎也(JAMSTEC)・宮崎和幸(JAMSTEC, NASA)・藤原正智(北大)・野津雅人(首都大)・塩谷雅人(京大)・長谷部文雄(北大)・松本淳(JAMSTEC, 首都大)・Jacquelyn Witte・Anne Thompson (NASA)・Nguyen Hoang Anh・Nguyen Vinh Thu (ベトナム気象水文局)	
バングラデシュにおける降水システムと雷活動の関係	42
村田文絵・東修平(高知大)・寺尾徹(香川大)・林泰一(京大東南研)・S.M.Quamrul Hassan・Shamsuddin Ahmed(バングラデシュ気象局)	
火山起源成層圏エアロゾルをトレーサとした赤道域における物質の水平並びに鉛直輸送の観測	47
阿保真・柴田泰邦・長澤親生(首都大)	
南極大型大気レーダー (PANSY) で推定された南極上空の乱流エネルギー散逸率	50
高麗正史・佐藤薫(東大院理)・西村耕司・堤雅基(極地研)	

最近の IUGONET プロジェクトの活動とその成果報告	53
新堀淳樹(名大 ISEE)・田中良昌(極地研)・梅村宜生(名大 ISEE)・阿部修司(九大 ICSWSE)・上野悟(京大天文台)	
電離圏 3 次元トモグラフィーの衛星測位補正への応用について	56
斎藤享(電子航法研)・Suzelle Meyer (電子航法研/INSA, 仏)	
イオノズンデの受信アレイを用いた電離圏エコー到来方向の推定	59
西岡未知・前野英生・近藤巧・津川卓也(NICT)	
Comparison of occurrence characteristics of daytime medium-scale traveling ionospheric disturbances between GPS observation and GAIA simulation	62
Mani Sivakandan ・ Yuichi Otsuka ・ Ghosh Priyanka ・ Hiroyuki Shinagawa (NICT) ・ Yasunobu Miyoshi (Kyushu Univ.) ・ Atsuki Shinbori (ISEE, Nagoya Univ.) ・ Takuya Tsugawa ・ Michi Nishioka (NICT)	
Role of pre-reversal enhancement in the generation of equatorial plasma bubble using observation and model simulations	66
Ghosh Priyanka ・ Yuichi Otsuka ・ Mani Sivakandan (ISEE, Nagoya Univ.) ・ Takuya Tsugawa ・ Hozumi Kornyanat ・ Hiroyuki Shinagawa (NICT)	
衛星ビーコン観測に基づくアジア域の電離圏赤道異常の日変化・季節変化の研究	69
坂本悠記・山本衛(京大 RISH)・穂積コンニャナット (NICT)	
Overview of the new VHF radar project in Chumphon, Thailand	73
Kornyanat Hozumi ・ Takuya Tsugawa ・ Shinichi Hama (NICT) ・ Punyawit Jamjareegulgarn (KMITL PCC) ・ Pornchai Supnithi (KMITL) ・ Susumu Saito (ENRI) ・ Yuchi Otsuka (Nagoya Univ.)	

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。2017 年 7 月 17 日に信楽 MU 観測所に落雷があり、MU レーダーも被害を受けた。1 ヶ月ほどで仮復旧したが、完全復旧のため国大協保険により 2018 年度末に合成分配器及び分配合成制御器の一部を更新した。

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

MU レーダーは「世界初のアクティブ・フェーズド・アレイ方式の大気レーダー」として、2014 年 11 月に IEEE マイルストーンに認定された。これは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である IEEE が、IEEE の分野における歴史的偉業に対して認定する賞で、認定されるためには 25 年以上に渡って世の中で高く評価を受けてきたという実績が必要である。また、電子情報通信学会が創立 100 周年を記念して新たに創設した、電子情報通信学会マイルストーンにも選定された。これは、社会や生活、産業、科学技術の発展に大きな影響を与えた研究開発の偉業を選定し、電子情報通信の研究開発の歴史と意義を振り返ると共に、次の 100 年に向けて更なる革新を起こす次代の研究者や技術者にその創出過程を伝えることを目的としている。さらに、2018 年 3 月 15 日に電気学会から「でんきの礎」が授与された。これは、電気学会が社会の発展に貢献し、歴史的に記念される「モノ・場所・こと・人」を顕彰するために創立 120 周年の 2008 年に創設したものである。

3. 赤道大気レーダー

赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)は、周波数 47MHz、3 素子八木アンテナ 560 本から構成される直径約 110 m の略円形アンテナアレイを備えた、インドネシア共和国のスマトラ島中西部に位置する西スマトラ州コトタバンに 2000 年度末に完成した大型の大気観測用レーダーである。本装置は、小型の送受信モジュールが全ての八木アンテナの直下に備えられたアクティブ・フェーズド・アレイ構成をとっており、総送信出力が 100 kW、アンテナビーム方向を天頂角 30 度以内の範囲で自由に設定し、送信パルス毎に変えることができ、赤道域に設置されている大気レーダーの中で世界最高性能を誇っている。EAR はインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)との密接な連携のもとで運営されており、2001 年 7 月から現在まで長期連続観測を続けてきた。EAR 観測データの 10 分平均値はホームページ上で逐次公開されている。(EAR ホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/>)。

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、ロードマップ 2017 には残念ながら選定されず、これまでに予算化には至っていない。現在、山極壽一京大総長を代表者として、マスタープラン 2020 に応募中である。

4. 共同利用の概要と現在までの推移

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

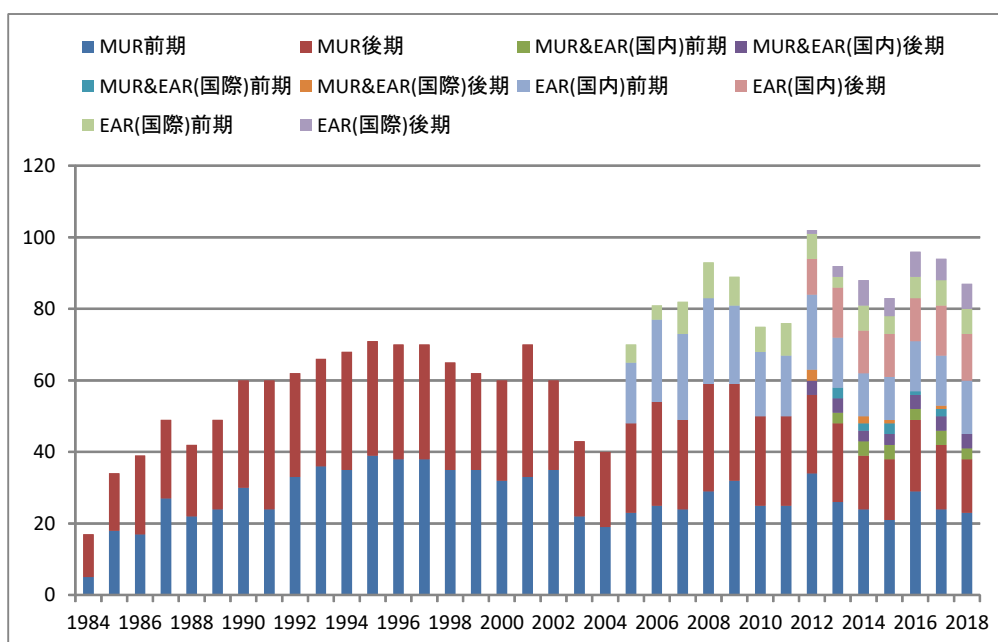


図 1. MU レーダー・赤道大気レーダー全国国際共同利用の課題件数の年次推移

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。2018 年度には、キャンペーン(長期間)観測課題として、後期に佐藤薫教授代表の「国際大型大気レーダーネットワーク同時観測」を実施した。観測データのうち標準観測については観測後直ちに、その他の観測については 1 年を経過したデータを「生存圏データベース共同利用」の一環として共同利用に供している。

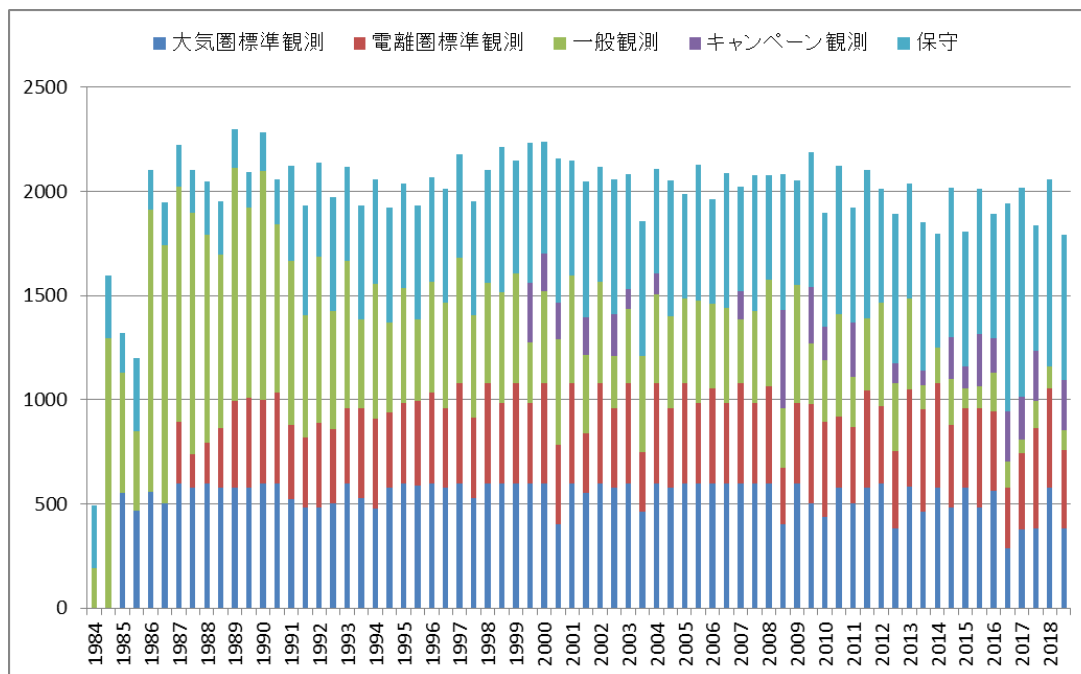


図 2. MU レーダー全国国際共同利用の観測時間の半年毎の推移。

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

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

航空機トランスポンダの受信信号から得られる 高頻度水平風の特性評価と気象観測データ としての活用

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
電子航法研究所 (ENRI)
吉原貴之・瀬之口敦・毛塚敦・齋藤享・古賀禎

メトロウェザー株式会社
古本淳一

2019/09/10

第13回MUR/EARシンポジウム

1

内容

- 背景
 - 4次元航法と気象
- SSR(二次監視レーダー)モードS
 - DAPs(Downlink Aircraft Parameters)の概要
 - SSR-S実験局と風向風速情報の抽出
- 気象情報としての検証と活用
 - MUレーダーデータとの風速の比較検証
 - 長期データの解析と気象学的な活用に向けて
- まとめ

2019/09/10

第13回MUR/EARシンポジウム

2

背景: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

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

気象情報利用の2つの視点

<ナウキャストの利用>
航空機がもつ気象情報を短時間予測・
検証して交通流制御等に利用

<数値モデルによる予測精度の向上>
観測の高度化
→ 予測精度向上
→ 高度化した気象予測情報を
トラジェクトリ予測に利用

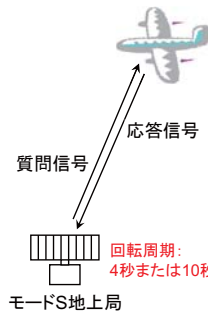


2019/09/10

第13回MUR/EARシンポジウム

3

SSR(二次監視レーダー)モードS DAPs機能



「SSRモードS」
← 導入が進みつつある航空管制用レーダー
・航空機位置の監視機能が高精度化
・データ通信機能(DAPs*機能)の追加
*Downlink Aircraft Parameters
☆ 航空機毎への個別質問
☆ 定型ショートメッセージ(地上側で種別指定可)
- 動態情報から風、温度の推定値が得られる

これら気象情報をトラジェクトリ管理に
使用したい

2019/09/10

第13回MUR/EARシンポジウム

4

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

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

ダウンリンク情報から風向・風速、温度を推定可能

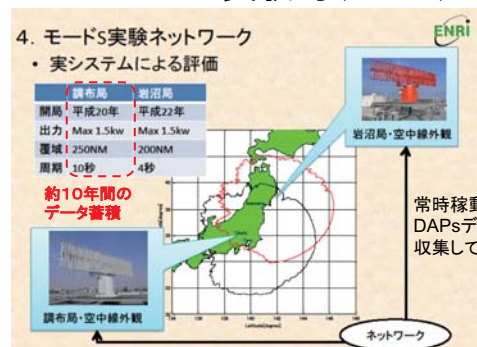
(日本では義務化されていないが、通過機含め9割程度の航空機がEHSに対応している)
種別詳細はICAO, "Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter", Doc 9871, Second Edition, 2012/を参照

2019/09/10

第13回MUR/EARシンポジウム

5

SSRモードS実験局(ENRI)



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

2019/09/10

第13回MUR/EARシンポジウム

6

気象情報(風向・風速、温度)の検証と活用 気象データの推定アルゴリズム

● 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

$$\Psi_{HDC} = \Psi_{MAG} - (D2015)$$

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

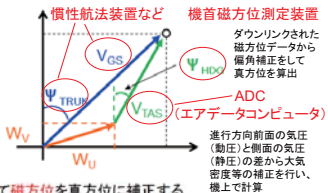
ただし、 $\Delta\phi = \phi - 37^{\circ}N$, $\Delta\lambda = \lambda - 138^{\circ}E$

② 対地速度から真対気速度を差し引くことで、東西風速・南北風速を得る

$$W_u = V_{GS} \cdot \sin \Psi_{TRUK} - V_{TAS} \cdot \sin \Psi_{HDC}$$

$$W_v = V_{GS} \cdot \cos \Psi_{TRUK} - V_{TAS} \cdot \cos \Psi_{HDC}$$

基源地: "SSRモードS監視データを用いた気象予報データの評価解析", 第51回飛行機シンポジウム, 2013年11月.
高橋他, "磁気偏角2015.0年値の作成", 国土地理院時報No.130, 2018年2月.
2019/09/10 第13回MUR/EARシンポジウム



慣性航法装置など
機首磁方位測定装置
ダウリンクされた磁方位データから偏角補正をして真方位を算出
ADC (エアデータコンピュータ)
進行方向前面の気圧(動圧)と側面の気圧(静圧)の差から気圧密度等の補正を行い、機上で計算

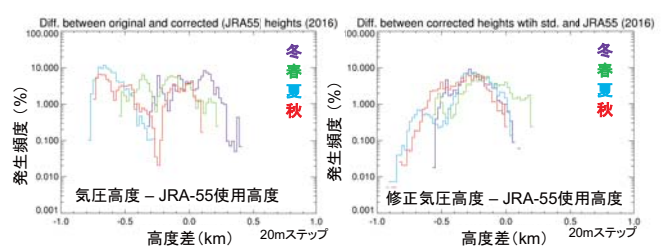
気象情報としての検証と活用 MURレーダーとの風速の比較検証

- 前回まで: MURによる風速観測を真値として比較検証
 - 東西風、南北風ともに良い相関が得られた
 - SSR-Sによる風速情報の誤差特性と発生頻度分布
 - 2m/s程度のバイアス誤差成分の存在
 - 発生頻度分布において特定の日に大きな誤差の集合が存在
 - 上記原因として考えられる事項
 - 磁気偏角補正 → 最新の国土地理院D2015の近似式で再解析した改善されなかった
 - 航空機の高度換算誤差(地上気圧補正ありの気圧高度) → 比較すべきMUR高度と空間差が生じている可能性 **未検証**
 - 鉛直シアーが存在する状況で乖離大
- 今回
 - 気象庁数値モデル再解析データ(JRA-55)から得られた航空機の幾何高度を使用した検証を実施

気象情報としての検証と活用 MURレーダーとの風速の比較検証

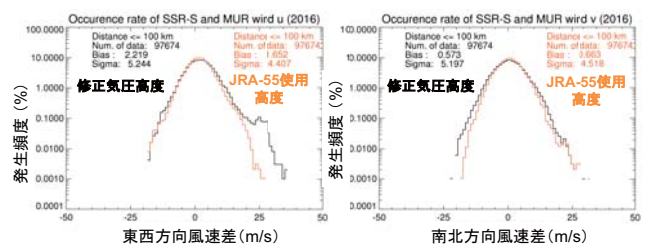
- MURレーダー(MUR)データ
 - 対流圏・成層圏観測(標準)
 - 冬季(12月~2月)、春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)
- 比較手順
 - 水平方向: MURから半径100km以内のSSR-Sデータを対象
 - 高さ方向: SSR-S風情報に近接する高度2点のMURデータの内挿(MUR風観測データの近接高度2点が欠損の場合は比較せず)
 - 時刻: SSR-S風情報に近接する時刻のデータ(±5分以内)と比較
 - SSR-Sの風速推定値が150m/sを超えたデータは異常値として排除
- 航空機高度の算出方法の変更
 - 従来: 気圧高度から変換した気圧と、信楽MUR観測所の気象観測値から計算される海面気圧、気温から修正気圧高度を算出
 - 今回: JRA-55の等圧面高度推定値(6時間毎、水平分解能1.25度×1.25度)について、航空機を囲む8点のグリッド値を時間及び空間内挿して幾何高度を算出

気象情報としての検証と活用 航空機高度の計算結果



- JRA-55を用いて算出した高度との乖離の発生頻度を表示
- 高度~1km程度内で乖離が存在

気象情報としての検証と活用 MURレーダーとの風速の比較(2016年)



- バイアス誤差はまだ存在している
- 2016年のデータについては乖離の大きな集合は解消されている

気象情報としての検証と活用 MURレーダーとの風速の比較(2015~2016年)

- 3年間について発生頻度分布を比較
 - 分散は全ての場合について改善
 - Bias誤差は東西方向について2014及び2015年の南北方向と同程度まで改善

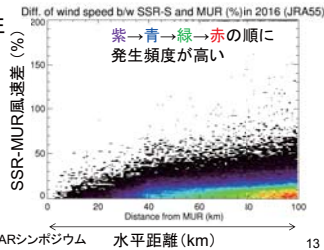
	東西方向		南北方向	
	Bias	Sigma	Bias	Sigma
2014	1.969	5.700	1.571	5.515
	1.436	4.943	1.624	4.937
2015	2.237	5.459	1.542	5.224
	1.553	4.805	1.442	4.730
2016	2.219	5.244	0.573	5.197
	1.652	4.407	0.663	4.518

上段: 修正気圧高度、下段: JRA-55使用高度 単位:m/s

気象情報としての検証と活用

長期データの解析と気象学的な活用に向けて

- 航空機高度の算出にJRA-55を用いた解析
 - 現在、2012年～2018年まで解析中
 - 比較データ数が増加することから、比較対象とする水平範囲を100kmから数10kmに狭めた検証をしたい
- 幾何高度情報付加の必要性
 - 数値予報モデルの初期値の利用
 - GNSS高度のダウンリンク
- 利用方法の具体化
 - 数値予報モデルへの同化
 - 温度情報も含めた応用先を検討中



2019/09/10

第13回MUR/EARシンポジウム

水平距離 (km)

13

まとめ

- SSRモードにより得られる気象情報
 - ダウンリンク情報から高頻度な風、温度情報が得られる
- MURレーダーデータの風速を真値とした比較検証
 - 前回までの解析で課題となっていた誤差要因の特定と解消のため、気象庁数値モデル再解析データ(JRA-55)から得られた航空機の幾何高度を使用した検証を実施
 - 2014年～2016年の3年間について東西方向及び南北方向誤差の発生頻度分布を比較したところ、分散は全ての場合について改善した。また、Bias誤差が大きかった東西方向についても改善がみられた。
- 今後
 - 上記誤差には水平位置の違いによる差も含まれていると考えられるため、比較範囲を狭めた検証を実施する予定
 - 年度後半で具体的な気象学的な応用先を検討し、提案したい

2019/09/10

第13回MUR/EARシンポジウム

14

謝辞

- 本研究で使用しましたJRA-55データセットは京大生存圏研究所の生存圏データベースを通して気象庁から提供されたものを使用させていただきました。ここに感謝を申し上げます。

参考文献

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

2019/09/10

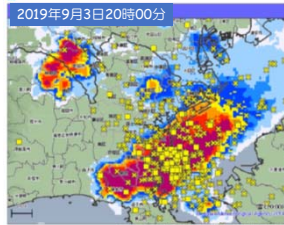
第13回MUR/EARシンポジウム

15

大気電場計測による首都圏の雷雲活動に関する研究

浜田純一（首都大学東京）・松本淳（首都大学東京）
鴨川仁（静岡県立大）・高橋幸弘（北海道大学）

雨雲の動き（高解像度降水ナウキャスト）



土砂崩れの現場@横浜市金沢区
（「朝日新聞デジタル」より）

（気象庁ホームページより）

発表アウトライン

研究目的：

雷観測を通じた豪雨発生と雷雲の発達過程の関連理解

首都圏の雷活動観測：

- ・フィールドミルを用いた大気電界観測
⇒ オリバラ2020プロジェクト@首都大
(⇒ SATREPS ULAT プロジェクト@北大)
- ・電磁界計測による落雷位置推定（防災科研）

事例解析：2019年5月4日の降雷イベント

- ・大気電場及び雷活動の変化
- ・雷雲の時空間変動：XRAIN観測データ解析

まとめと今後の予定：

大気電場観測@首都大・南大沢

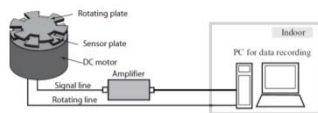
フィールドミル：

金属板を回転させ、電場によって誘導された電荷が移動する際の電流値から大気電場を測定する。雷雲の挙動や、雷の発生を検知することができる。

首都大・南大沢キャンパスでの観測：

- PCにて観測モニタリング、データ保存（2Hzデータ取得）。
- インターネット接続による時刻同期、観測状況モニタリング。
- 2018年8月1日より、連続観測を実施中。

Boltek社製フィールドミル



フィールドミルの構成

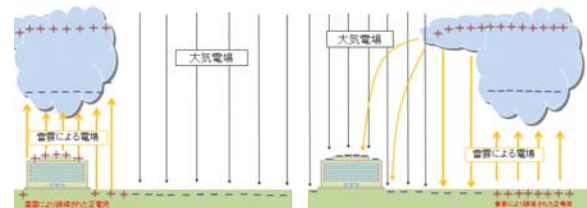
（山下他2017, システム制御情報学会誌）

（@南大沢キャンパス12号館屋上）

観測大気電場の正負と雷雲の位置関係

雷雲が観測地点の真上にある場合

雷雲が観測地点の遠方
（半径10km）程度にある場合

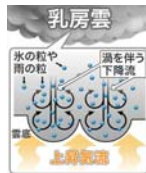


観測される大気電場は負の値を示す。

観測される大気電場は晴天静穏時よりも大きい正の値を示す。

※) 晴天静穏時大気電場変動は鉛直下向き(正と定義) 80~150 V/m程度
(鴨川仁さん@静岡県立大、提供)

降雷事例：2019年5月4日



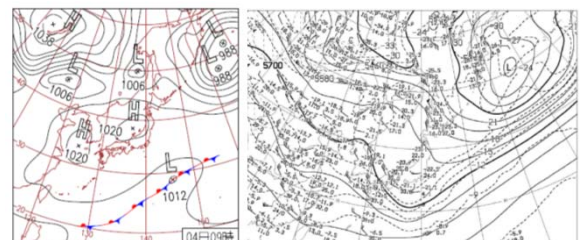
撮影：東京都足立区。4日(土)16時を過ぎた頃から、東京や埼玉の一部で「乳房雲」が目撃されている。（ウェザーニューズ・ウェブサイトより）



雷、あられの報告事例が20件。内15件が、15時台に集中。首都大・南大沢@八王子近くの、多摩、府中など。

（「ふるりポ」@防災科研：http://mizu.bosai.go.jp/key/fururipo）

地上・高層天気図：2019.05.04



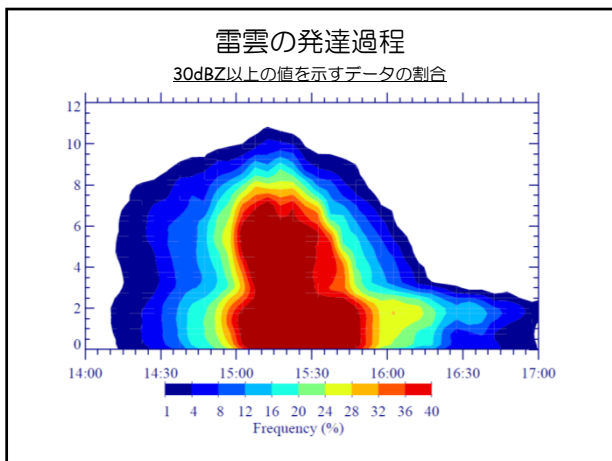
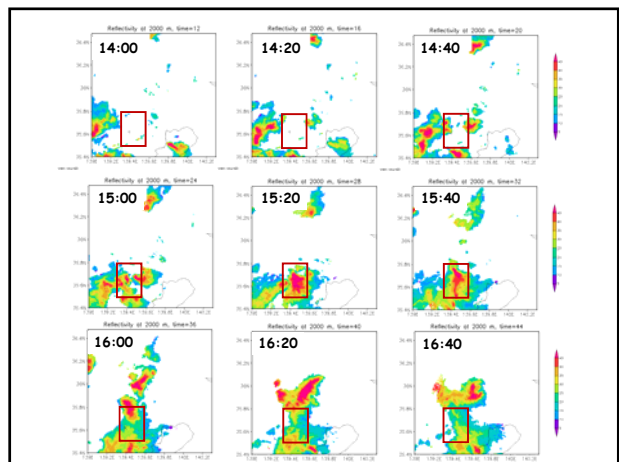
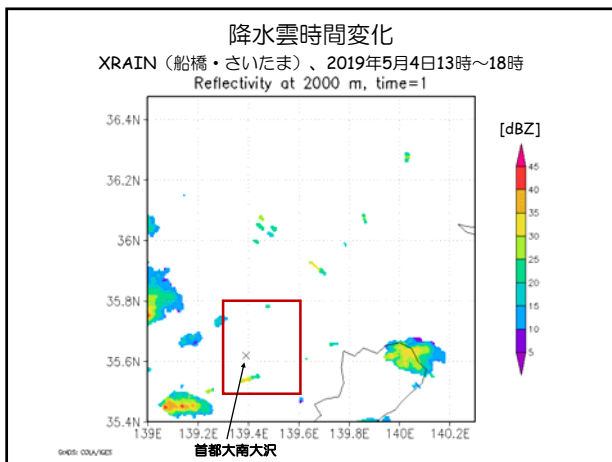
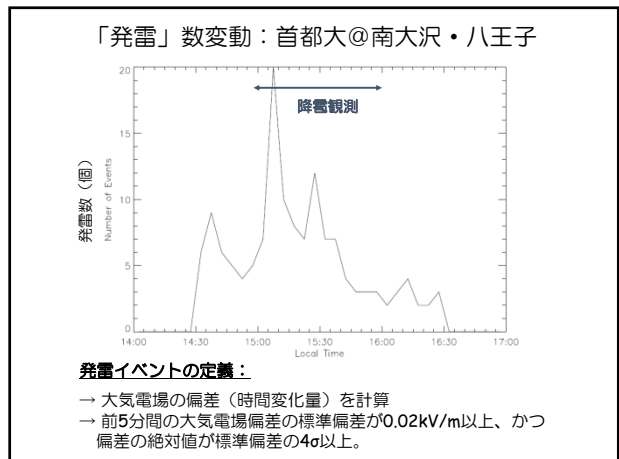
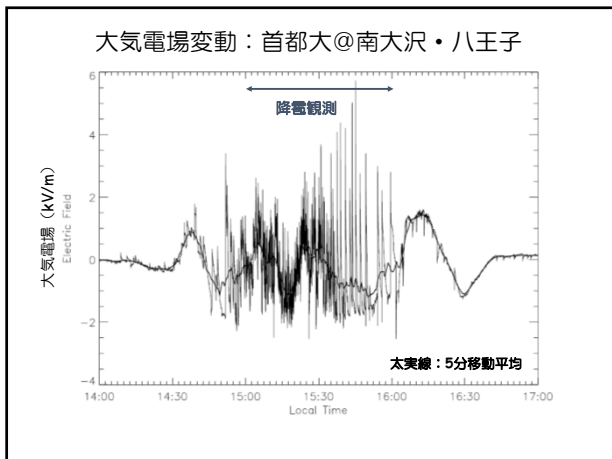
4日(土)東海や関東甲信で雷雨

高気圧に覆われて全国的に晴れたが、上空の寒気の影響で、東海や関東甲信では大気の状態が非常に不安定。所々で雷雨となり、ひょうの降った所も。室蘭市、旭川市でサクラ満開。

ANALYSIS 500hPa: HEIGHT(M), TEMP(°C)
AUPQ35 040000UTC MAY 2019

Japan Meteorological Agency

5月は降雷観測頻度の季節変化の気候学的極大（藤部2006、天気）



まとめと今後の予定

事例解析：降電イベント (2019.05.04)

- 雷雲の発達に伴う大気電場の変動を観測。
- 降雷の見られた15時過ぎの時間帯に多くの雷活動を観測。
- 高度10kmまで達する雷雲の発達。

今後の予定：

- 発雷イベントの推定方法の検討。
- 防災科研LMAデータとの比較。
- 大気電場の空間変動の解析：雷雲の空間構造の把握
- 東京学芸大@小金井周辺のフィールドミルデータとの比較。
- XRAIN (Multi-Parameter radar)降水粒子判別解析

Spectral Observation Theory for Atmospheric Radar 大気レーダーのためのスペクトル観測理論

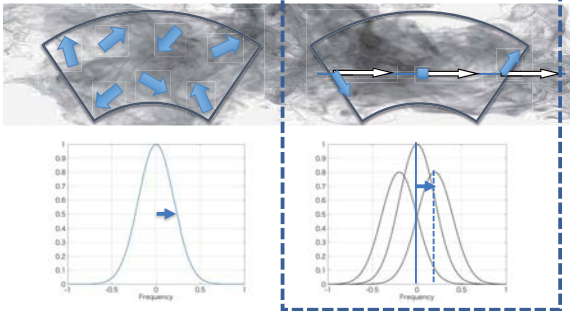
情報・システム研究機構 極域環境データサイエンスセンター
 情報・システム研究機構 国立極地研究所
 国立大学法人 総合研究大学院大学 複合科学研究科
 西村耕司

ビームデブロードニング問題

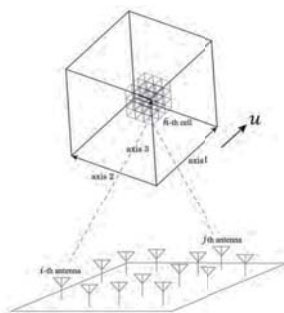
ビーム角広がりのため背景風がスペクトル幅に寄与=ビームブロードニング、乱流成分に対して無視できない大きさとなる

乱流による速度分散

平均風による速度広がり



1次元スペクトル観測理論



受信信号を離散形式で定式化

p: 送信フィルター (送信波形)

q: 受信フィルター

$$r_{hij}(t_n) = \int_0^{t_n} f_h \left(t_n + T - \frac{|\mathbf{x}_h - \mathbf{x}_i|}{c} \right) p_i \left(T - \frac{|\mathbf{x}_h(t_n) - \mathbf{x}_i| + |\mathbf{x}_h(t_n) - \mathbf{x}_j|}{c} \right) q_j \left(T - \frac{2R}{c} \right) dt$$

$$= f_h(t_n) \int_0^{t_n} p_i(T - T_{hij}(t_n)) q_j(T - T_R) dt$$

$$r_h(t_n) = f_h(t_n) \sum_i \sum_j g_{hij}(t_n)$$

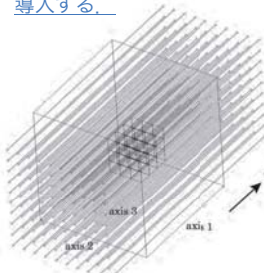
$$= f_h(t_n) g_h(t_n)$$

受信信号r(t)は、

$$r(t) = \sum_h f_h(t) g_h(t)$$

1次元スペクトル観測理論

風速ベクトルに沿って空間を1次元化し、スライス毎の $f(\mathbf{x}, t)$ の独立性の仮定を導入する。



ビーム全体のACFをスライス毎のACFの和として

$$G(\tau) = \sum_m \sum_l G_{lm}(\tau)$$

where $G_{lm}(\tau) = \sum_k g_{lm}^* \left(t + \frac{kL}{|u|} \right) g_{lm} \left(t + \frac{kL}{|u|} + \tau \right)$

と定義すると、受信信号のACF (の期待値) は

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

F: 乱流ACF (スペクトルのFT)
 G: ビームフィールドACF
 W: 時間窓ACF

となることが示される。

Nishimura et al., *IEEE Trans GRS*, conditionally accepted, 2019

研究目標

精密なレーダー観測理論とその計算手法の構築を行い、新しい物理量推定の方法論を確立する。

研究対象

対流圏・成層圏

- ・乱流時空間4次元スペクトル
- ・ビームデブロードニング
- ・SA法: クロスレンジ速度推定

中間圏・電離圏

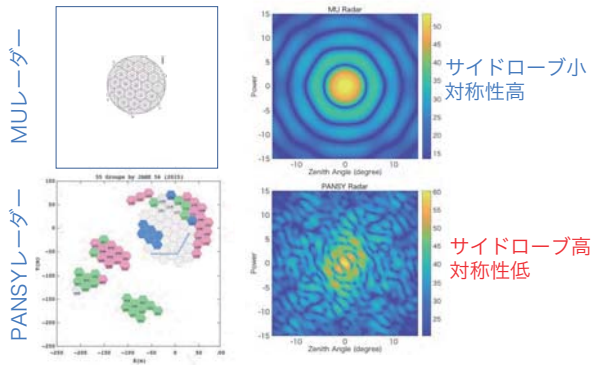
- ・弱電離エンハンスメントエコー
- ・コヒーレント構造散乱
- ・自由電子散乱



PANSYのアンテナレイアウト

アンテナ配置

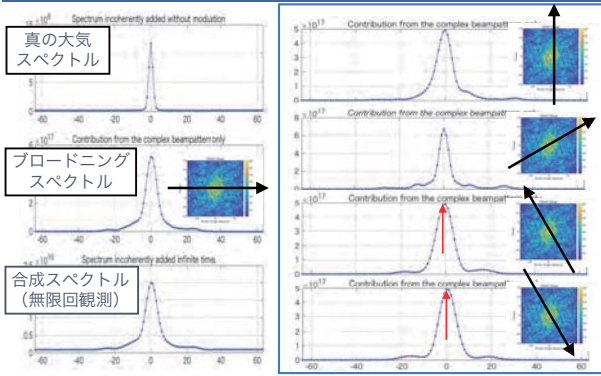
ビームパターン



サイドローブ小
対称性高

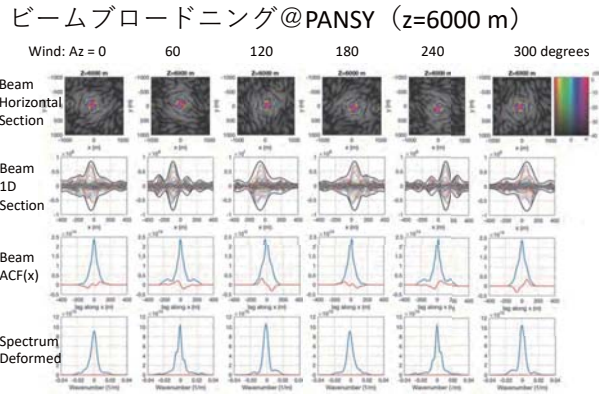
サイドローブ高
対称性低

ブロードニングの風速方位角依存性



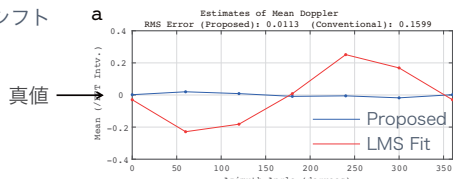
方位により幅が異なるだけでなく、周波数オフセットも存在する。

パラメータ推定：パワースペクトルの確率分布

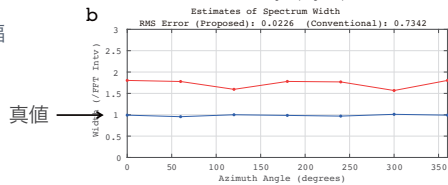


デブロードニングシミュレーション結果

ドップラシフト
推定値



スペクトル幅
推定値



Nishimura et al., IEEE Trans GRS, conditionally accepted, 2019

乱流4次元スペクトル計測

受信信号と4次元乱流スペクトルの解析的関係の導出1.

$r_i(t)$ を i 番目のアンテナで観測される受信信号とすると次の3次元空間積分で表すことができる。

$$r_i(t) = \int_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}, t) g_i(\mathbf{x}) w(t) d\mathbf{x}$$

- $f(\mathbf{x}, t)$ 大気の散乱の強さ
- $g_i(\mathbf{x})$ アンテナ i で受信する場合のビームパターン
- $w(t)$ 観測ウィンドウ
- \mathbf{x} 3次元空間変数

乱流4次元スペクトル計測

受信信号と4次元乱流スペクトルの解析的関係の導出2.

(再掲) 受信信号 $r_i(t) = \int_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}, t) g_i(\mathbf{x}) w(t) d\mathbf{x}$

このとき $r_i(t)$ と $r_j(t)$ の相互相関関数 $R_{ij}(\tau)$ は $F(\xi, \tau)$ に関する空間的一様性を仮定すると以下になる。

$$R_{ij}(\tau) = E_t[r_i^*(t) r_j(t)] = W(\tau) \int_{\xi} G_{ij}(\xi) F(\xi, \tau) d\xi$$

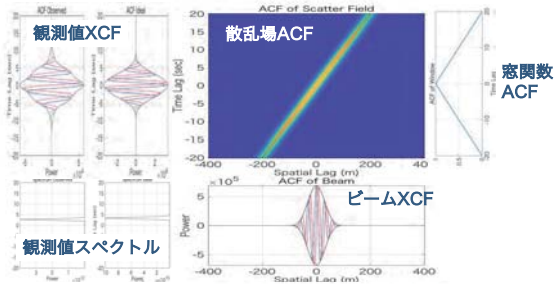
- $W(\tau)$ $w(t)$ の自己相関関数
- $G_{ij}(\xi)$ $g_i(\mathbf{x})$ と $g_j(\mathbf{x})$ の空間的相互相関関数
- $F(\xi, \tau)$ $f(\mathbf{x}, t)$ の時間・空間的自己相関関数
- ξ 空間的ラグ
- τ 時間的ラグ

乱流4次元スペクトル計測

受信信号と4次元乱流スペクトルの解析的関係の導出過程

$$\begin{aligned} R_{ij}(\tau) &= E_t[r_i^*(t) r_j(t)] \\ &= E_t \left[\int_{\mathbf{x}} \int_{\mathbf{x}'} f^*(\mathbf{x}, t) f(\mathbf{x}', t + \tau) g_i^*(\mathbf{x}) g_j(\mathbf{x}') w^*(t) w(t + \tau) d\mathbf{x} d\mathbf{x}' \right] \\ &= \int_{\mathbf{x}} \int_{\mathbf{x}'} g_i^*(\mathbf{x}) g_j(\mathbf{x}') E_t[f^*(\mathbf{x}, t) f(\mathbf{x}', t + \tau) w^*(t) w(t + \tau)] d\mathbf{x} d\mathbf{x}' \\ &= \int_{\mathbf{x}} \int_{\mathbf{x}'} g_i^*(\mathbf{x}) g_j(\mathbf{x}') E_t[f^*(\mathbf{x}, t) f(\mathbf{x}', t + \tau)] E_t[w^*(t) w(t + \tau)] d\mathbf{x} d\mathbf{x}' \\ &= \int_{\mathbf{x}} \int_{\mathbf{x}'} g_i^*(\mathbf{x}) g_j(\mathbf{x}') F(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \tau) W(\tau) d\mathbf{x} d\mathbf{x}' \quad \leftarrow \text{統計的独立性} \\ &= W(\tau) \int_{\mathbf{x}} \int_{\mathbf{x}'} g_i^*(\mathbf{x}) g_j(\mathbf{x}') F(\mathbf{x} - \mathbf{x}', \tau) d\mathbf{x} d\mathbf{x}' \quad \leftarrow \text{空間的一様性} \\ &= W(\tau) \int_{\xi} \int_{\xi'} g_i^*(\mathbf{x}) g_j(\mathbf{x} + \xi) F(\xi, \tau) \frac{\partial \mathbf{x}'}{\partial \xi} d\xi \quad \leftarrow \text{座標変換} \\ &= W(\tau) \int_{\xi} \int_{\mathbf{x}} g_i^*(\mathbf{x}) g_j(\mathbf{x} + \xi) d\mathbf{x} F(\xi, \tau) d\xi \\ &= W(\tau) \int_{\xi} G_{ij}(\xi) F(\xi, \tau) d\xi \quad \leftarrow i, j \text{の組が複数あれば解ける} \end{aligned}$$

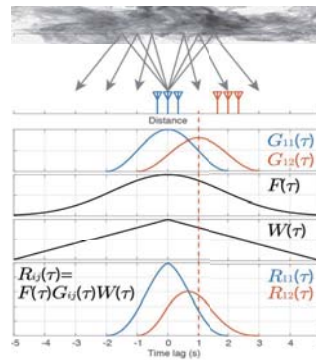
乱流4次元スペクトル計測



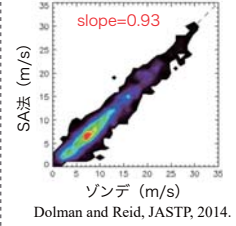
$R_{ij}(\tau) = W(\tau) \int_{\xi} G_{ij}(\xi) F(\xi, \tau) d\xi$
 観測値XCF 窓ACF \int_{ξ} ビーム 散乱場
 観測値スペクトル
 相関関数に関する観測方程式
 i, j の組が多数あれば $F(\xi, \tau)$ について解くことが可能となる

Spaced Antenna法によるクロスレンジ速度推定

受信アンテナ間の相関関数の遅延から速度を推定



推定速度にバイアスがあり、用いられなくなった。

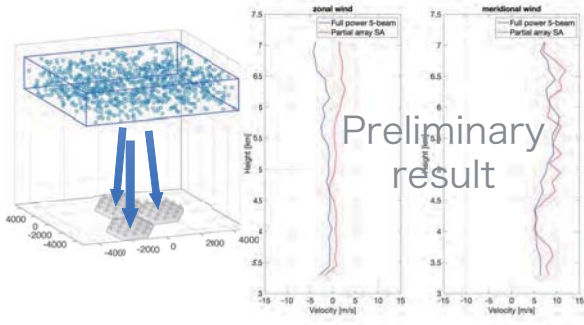


本研究により負バイアスの理由はスペクトル観測理論から明確となった
 Dolman and Reid, JASTP, 2014.

Spaced Antenna法によるクロスレンジ速度推定

MUレーダーによる5ビーム法との比較実験を実施

2019-08-06 11:33:12—11:40:50



Preliminary result

まとめ

- ✓ 1次元されたスペクトル観測理論に基づくビームデブロードニング法の開発
- ✓ 乱流4次元スペクトル計測
 - ✓ 4次元スペクトル観測理論を確立
 - ✓ PANSY/MUを用いた実測試験
- ✓ SA法によるクロスレンジ速度推定

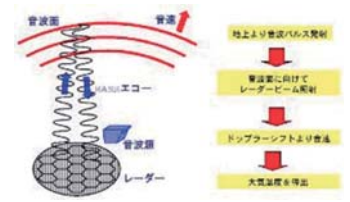
パラメトリックスピーカーを用いた 低騒音型RASS用音源の開発

橋口 浩之・六車 光貴
京都大学生存圏研究所

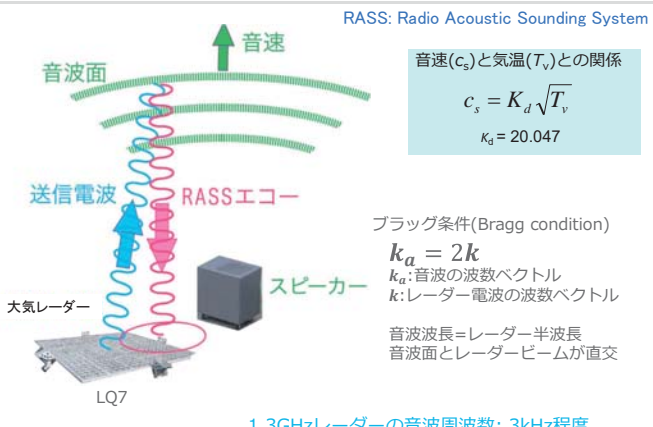
第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

研究の背景・目的

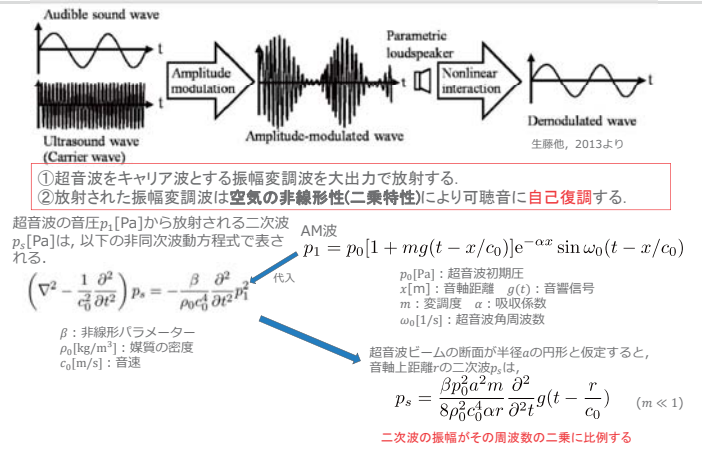
- 上空の気温高度分布を高分解能で観測することは重要である。
- 大気レーダーによるRASS(Radio Acoustic Sounding System)技術を用いた気温観測は、ラジオゾンデに比べて高時間分解能で測定できるが、騒音問題があり、観測場所が制限される。
- **パラメトリックスピーカー（超指向性スピーカー）**を使うことで、騒音問題を解決を目指す。
- 反射型とし、降雨時でも使用できるRASS用音源を開発する。



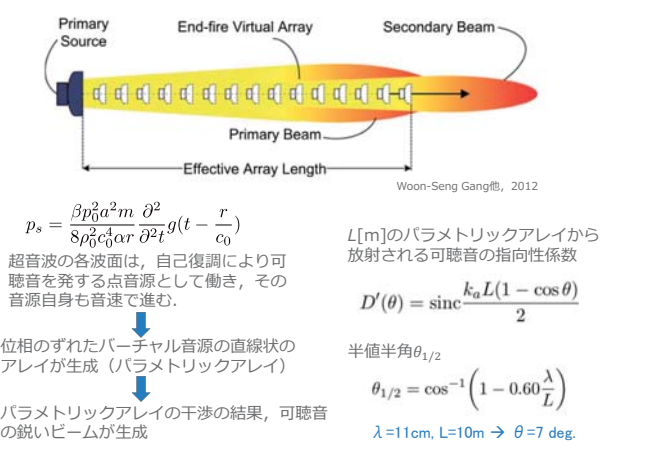
RASS(電波音波併用)法による気温プロファイルの観測



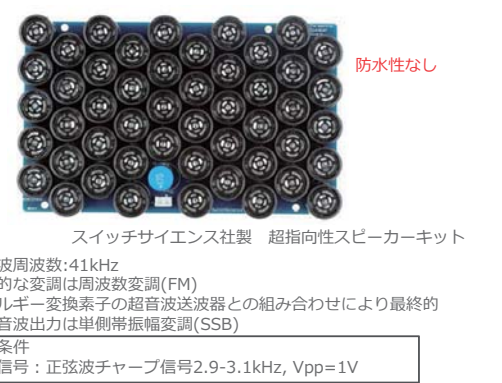
パラメトリックスピーカー自己復調



パラメトリックスピーカーパラメトリックアレイ

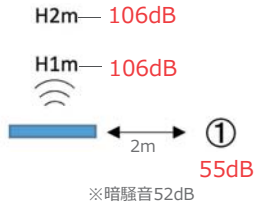


使用したスピーカー

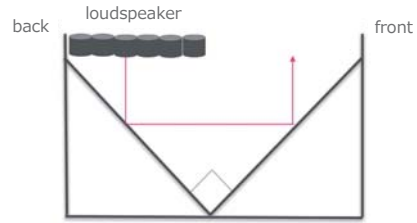


予備実験—反射板なし(1458素子)

素子数：1458素子 (650×650×160mm)
 防水性：IPX3相当 (スピーカー表面に撥水メッシュ、スピーカー面を下に向けた場合)



反射モデル; 防水性を確保



反射板素材
 コンパネ+コンクリート平板

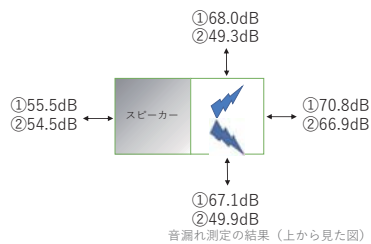
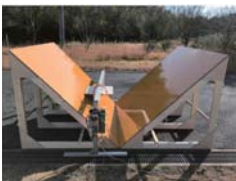
音漏れを減らすため

反射板素材検討

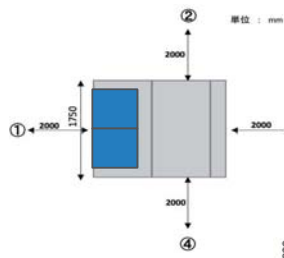


①アルミフレーム反射板モデル
 714×1326×706mm
 反射板と底板はABS10mmで側面はPP 5mmのプラスチックダンボール

②大型反射板モデル
 2600×1300×1300mm
 表面にウレタンコートを行った12mm合板



予備実験—反射板あり(1458素子×2=2916素子)



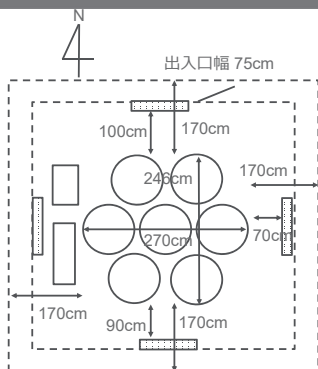
反射板素材
 コンパネ
 +
 コンクリート平板

暗騒音：52dB

スピーカーサイズ・測定位置

	測定位置					
	①	②	③	④	H1m	H2m
音圧[dB]	60	56	64	57	106	106

ルネベルグレンズ下部対流圏レーダー(LQ-7)

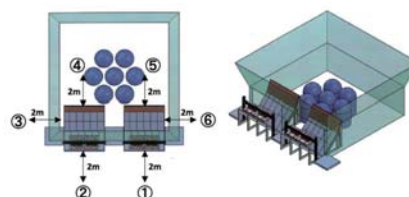


送受信装置
 送信ピーク出力: 2.8kW
 送信平均出力: 980W
 (16ビットSpano符号)



騒音測定—LQ7に設置

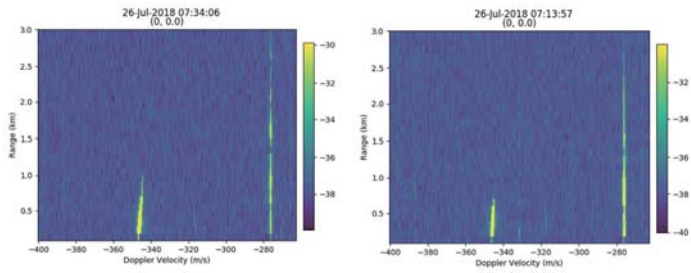
1458素子×2=2916素子×2=5832素子



スペースの問題でスピーカーを2つに分ける

暗騒音：52dB

	測定位置						
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
音圧[dB]	68	61	66	67	66	65	44



- 音波周波数のスイープ範囲を狭めて、今考えられる一番S/Nを稼げるパラメータでの観測
- 音圧的には1kmまで届いているようだが、安定的に取れるのは500~600m
- 風の状況によっては、直交条件が崩れて、エコーが取れなくなる。

Local Time (hh:mm:ss)	Temperature (Degree C)	Zonal wind (m/s)	Meridional wind (m/s)
07:34:00	25.7	-0.29	0.09

- 反射板により防水性のないパラメトリックスピーカーに防水性を持たせることができた。
- 実際にLQ7にスピーカーを設置したところ、音漏れが大きくなった。
← フェンスに音が反射している可能性
- 好条件だと高度1kmまでエコーが観測できる。
← 気温による適切なスイープ範囲
← 風の状況に応じたスピーカーの最適配置

MUレーダー送受信モジュール制御機能の再開発

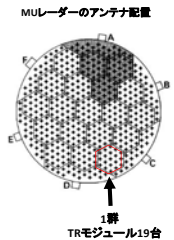
2019/9/9

黒川浩規・山本衛・橋口浩之
(京大大学生存圏研究所)



研究背景

MUレーダーでの観測において、観測に先立ってTRモジュール(全475台)に位相補正值や観測方向などの情報をセットする必要がある。この役割(1群19台のTRユニットの制御)は、完成当初の1984年から8085CPUとハードウェア論理回路の組み合わせで実現されてきた。しかし、老朽化+ICチップの製造中止のため、最新のCPUボードを活用した新しい制御系を再開発したい。



研究目的

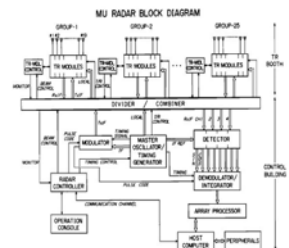
- CPUボード(ESP32)による8085CPUの同等機能の実現
- TRモジュール制御の信頼性向上と情報セットのための所要時間短縮などの実現
- ソフトウェアによってはさまざまな機能を持たせられる可能性がある
- 本研究では、TRモジュールコントローラを試作し、既存のSIO制御装置と同等の機能が実現できることの確認を目指した。



MUレーダーの動作

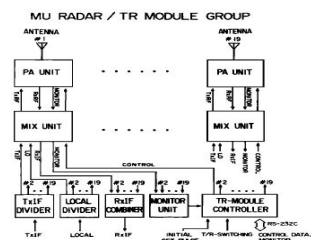
全475台のTRモジュールは、25の群に分割されている。それぞれの群に対して、1台のCPUコントローラが装備されている。

各群のコントローラは、ホストコンピュータにSIO (1200baudシリアルライン)で接続されており、ホストコンピュータからの命令に従って、TRモジュールを制御する。



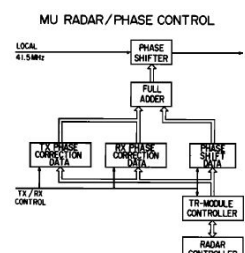
位相補正值の設定

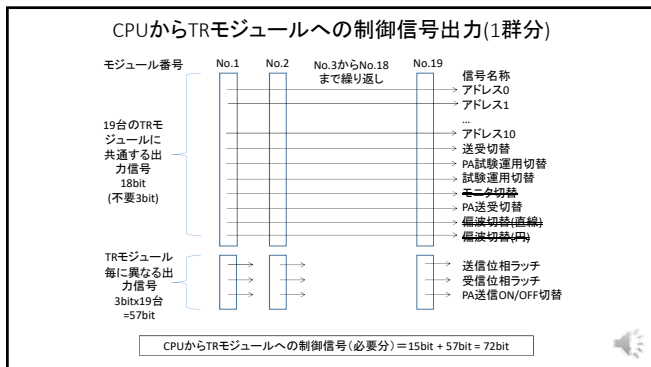
MUレーダーの起動時には、各TRモジュールの位相がバラバラであるため、1群すべてのモジュールの位相をそろえる必要がある。1つのアンテナを基準とする位相補正データが作成されている。コントローラは、そのデータをホストから受けとり、各モジュールに送出してメモリーに保存させる必要がある。



アンテナビーム方向の制御

アンテナビーム方向は各アンテナに正しい位相差の信号を送信・受信することで制御される。具体的には、ビームを観測方向へ方向させる位相と位相補正值を加算させることで、各アンテナの正しい位相値を生成する。アンテナ方向は、INITIAL SETで最初のビーム方向にセットされており、TR SWITCHINGで次の方向にセットされる。



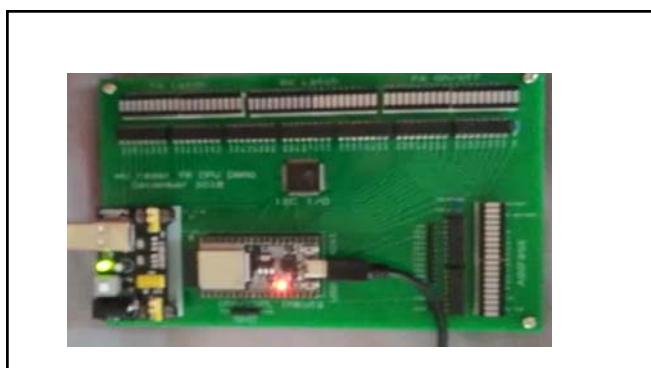
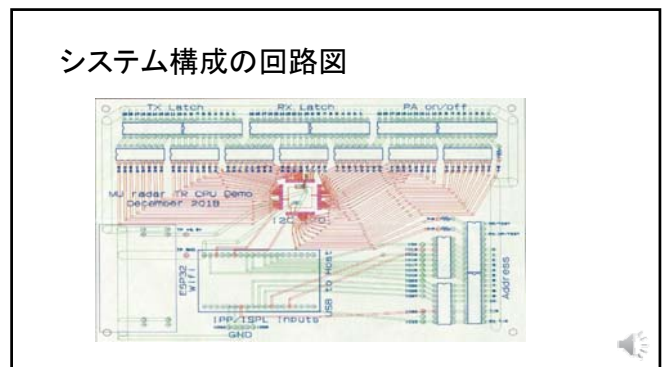
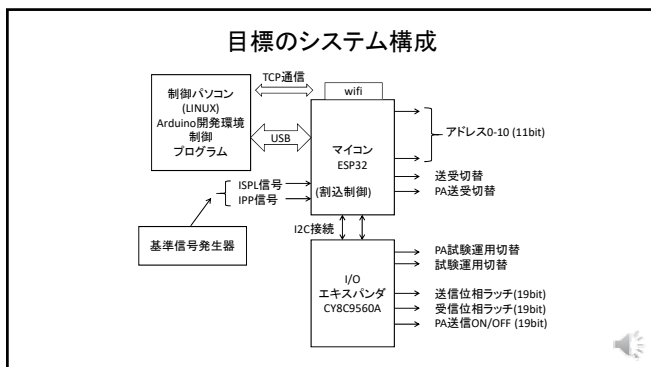


マイコンESP32

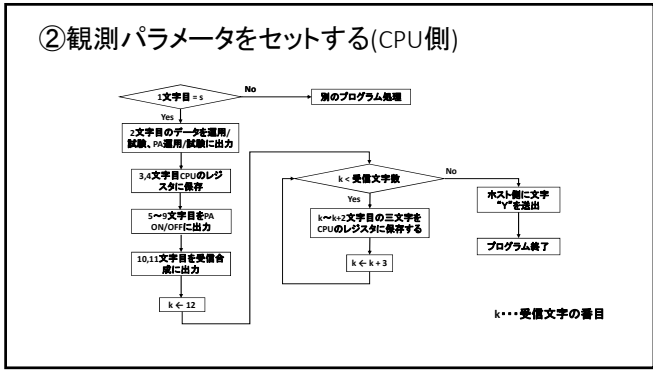
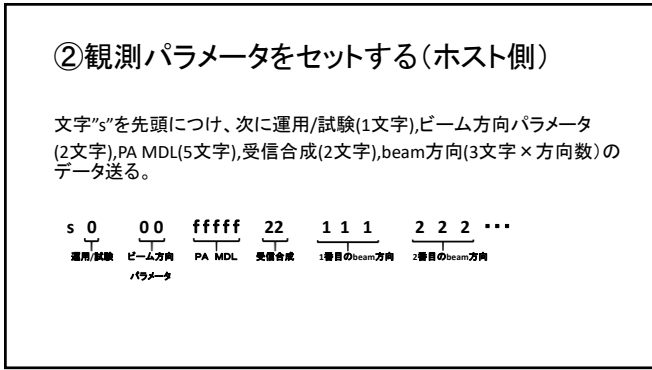
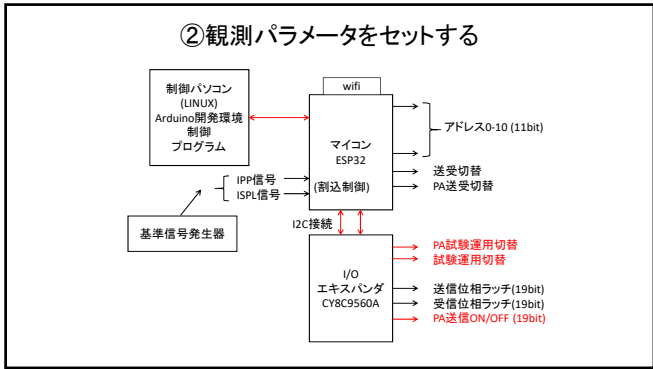
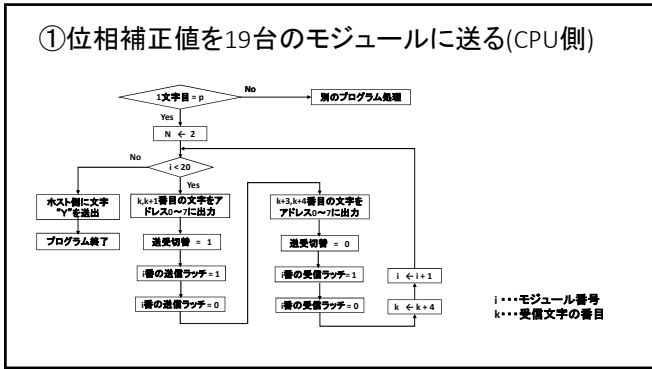
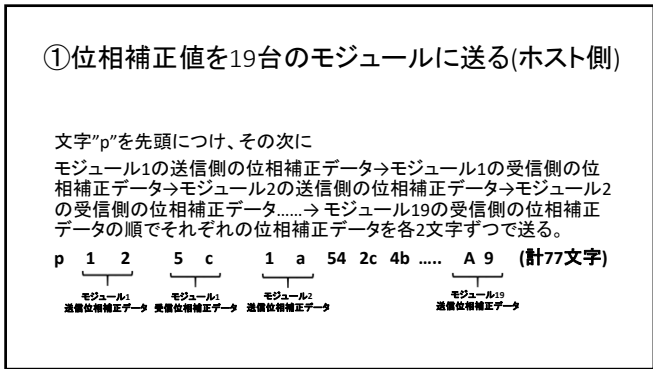
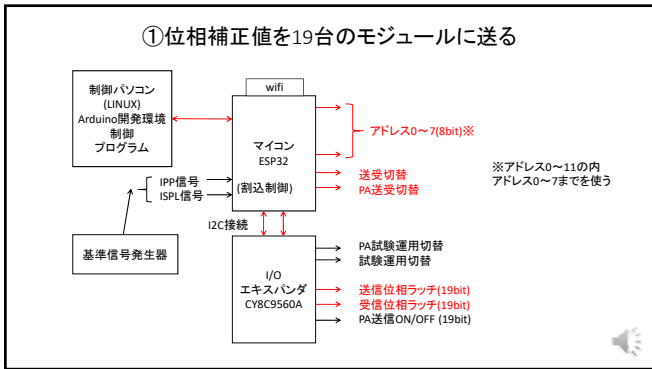
Espressif Systems (中国・上海)製

ESP32ボードの諸元

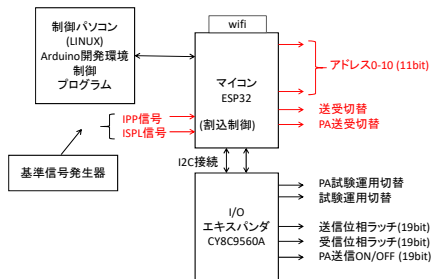
CPUコア	Xtensa LX6 デュアルコア240MHz
Wi-Fi	IEEE802.11b/g/n (2.4Ghz)
デジタル入出力ピン	入出力ピン15本 入出力ピン2本
通信機能	I2C,UART,SPI
開発環境	Arduino言語 python 他



- ### プログラム作成 (Arduino IDE)
- ①位相補正値を19台のモジュールに送る
 - ②観測パラメータをセットする
 - ③観測の開始と終了を割り込み信号ISPLとIPPIによって制御する
 - ④ホストから送られた直前のデータを送り返す



③観測の開始と終了



③観測の開始と終了

観測開始の時にISPLを立ち上げて、観測終了時にISPLを立ち下げる。

観測中はIPP信号を送信パルスごとに同期して送出する。

ビーム方向を変えたい時は、ビーム方向パラメータによってIPPのパルスを送るか、ISPLのパルスを送る。

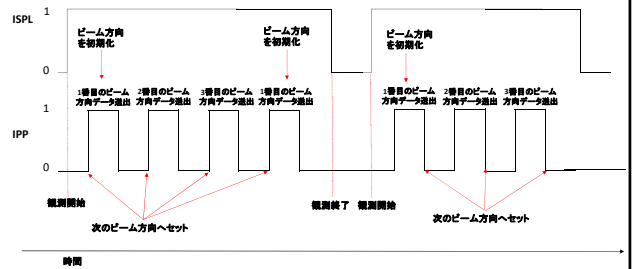
③観測の開始と終了 (CPU側)

割り込み制御として、ISPL信号とIPP信号を監視する。

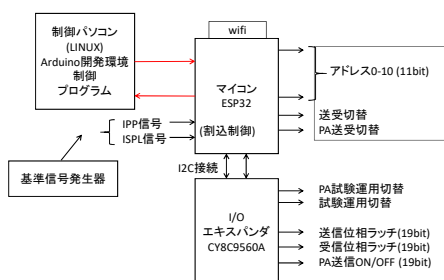
②で保存したビーム方向パラメータを読み取り、適切なタイミングでレジスタに保存したビーム方向番号データ(11bit)をAddress0~10に出力し、IPP信号の割り込みによって、送受切替とPA送受切替を同期させて制御する。

ビーム方向は観測開始時に初期化し、変更のタイミングごとにセットされたビーム方向総数の範囲で周期的に変更させる。

例 ビーム方向数は3方向 IPP信号走査間隔0回



④ホストから送られた直前のデータを送り返す



④ホストから送られた直前のデータを送り返す

・ホスト側のプログラム

文字"m"が送られる

例 m → CPU から s451872...1263 が送られてくる

・CPU側のプログラム

文字"m"を読み取り、Hostから送られた直前のデータを送り返す。

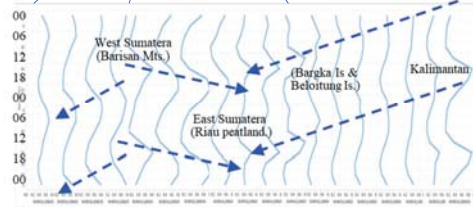
まとめと今後の課題や可能性

- 新しいマイコンESP32を使用したTRモジュールコントローラを試作し、基本的な動作ができることを確認した。
- ISPL信号とIPP信号の外部割込みや、CPUからの制御信号の出力が実際のMULレーダーの動作に見合う速度で正確に動作するかを確認する。
- WifiによるCPUとホスト間通信の実現
- 今後の制御機能の向上として、観測中にビーム方向を随時変更し目標を追尾する機能などの追加が考えられる。

インドネシア泥炭地域レーダー観測に関する最近の話題

山中大学^{1,2,3}・川崎昌博^{1,4}・松見豊⁵・大橋勝文⁶・Muhammad Arif Rahman⁷・
甲山治^{1,8}・小川まり子⁸・橋口浩之⁹・森修一³

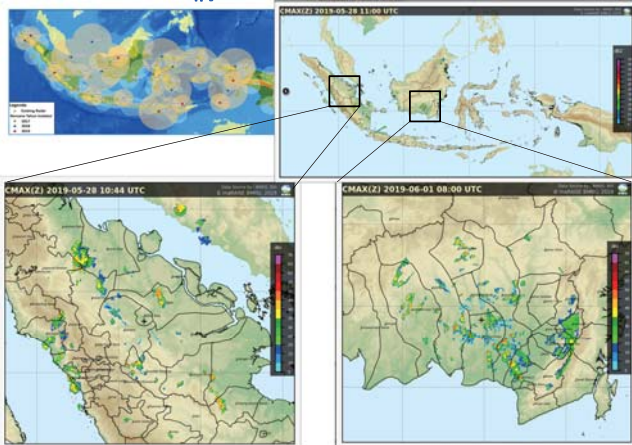
(¹地球研,²神大名誉教授,³JAMSTEC,⁴京大名誉教授,⁵名大名誉教授,⁶鹿大理工,⁷BMKG,⁸京大東南ア研,⁹京大生存研)



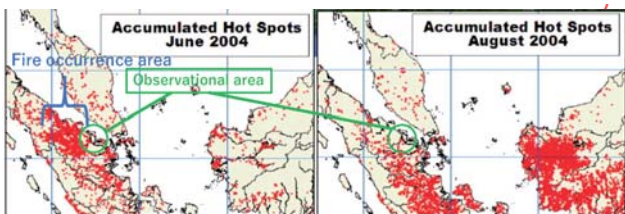
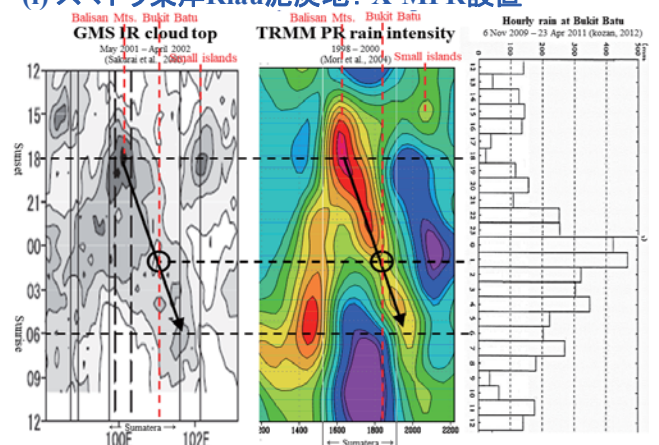
雨域の
日周期移動
(As-syakur et al., in preparation)

BMKG-CDR網

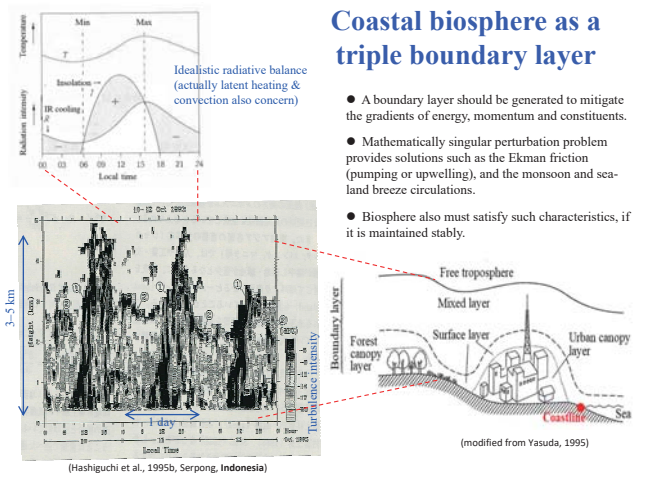
<https://www.bmkg.go.id/cuaca/citra-radar.bmkg>



(i) スマトラ東岸Riau泥炭地: X-MPR設置 (甲山・小川ら)



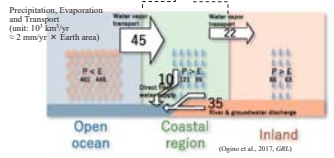
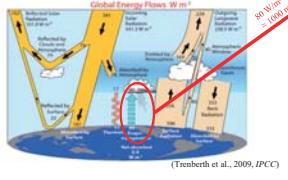
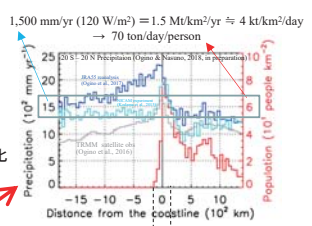
Coastal biosphere as a triple boundary layer



まとめに代えて: レーダー・気候・生物・人類共存物理学へ向けて

熱帯沿岸域を中心とした潜熱解放と降雨
 ↓
 降雨による純水の供給
 ↓
 純水による生物圏の維持・飽和
 ↓
 生物圏内での人類圏の派生
 ↓
 人類活動による陸面の変形
 ↓
 陸面変形による日周期海陸風・雲活動の変化

沿岸域の微細構造の時空間的連続観測
 ウィンドプロファイラを含めた。
 レーダーリモートセンシングが必須



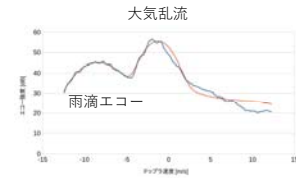
EAR観測における雨滴エコーを利用した推定校正値の変動

下舞豊志・小野達也
島根大学総合理工学部

2019年9月9日

はじめに

- EAR(赤道大気レーダー)はVHFレーダーであるため、大気乱流エコーに加えて、降雨時には降雨エコーを観測可能。
- この方法を用いると、上空のDSD(雨滴粒径分布)の高度変化を捉えることが可能となる。



はじめに

- 雨滴エコーからDSDを推定するためには、EARが適切に校正されている必要がある。
- EARは多数のモジュールから構成されており、総合出力を完全にモニターすることは困難である。

目的

- 上空の雨滴が、統計的性質を保ったまま地上へ落下すると仮定して、地上雨滴計観測とEARによる上空DSDを用いて校正値の推定を行う。

雨滴を素性の分かったターゲットと仮定

- 校正値の変動の状況から、EAR本体の動作状況がモニター可能?

赤道大気レーダー(EAR)

位置	東経100.32° 南緯0.20° 海拔865 m
中心周波数	47.0 MHz
送信出力	100 kW
アンテナ ビーム幅	3.4°
観測高度	1.5-20 km (大気乱流) 90 km以上 (電離圏 イレギュラリティ)
アンテナ開口 面積	9500 m ²



雨滴粒径分布 (DSD: Rain Drop Size Distribution)

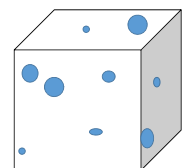
単位体積あたりに存在する
雨滴個数を単位直径ごとに
規格化したもの

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) \text{ [mm}^{-1}\text{m}^{-3}\text{]}$$

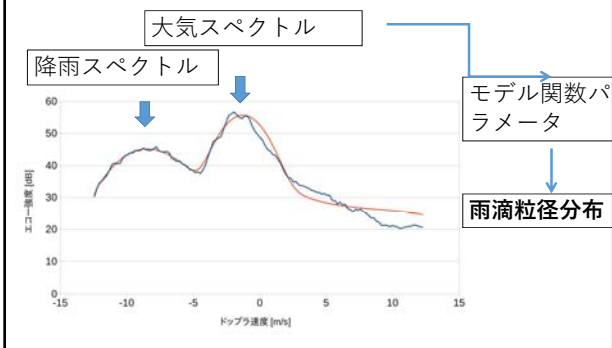
N_0 : 振幅パラメーター
 μ : 形状パラメーター
 Λ : スケールパラメーター



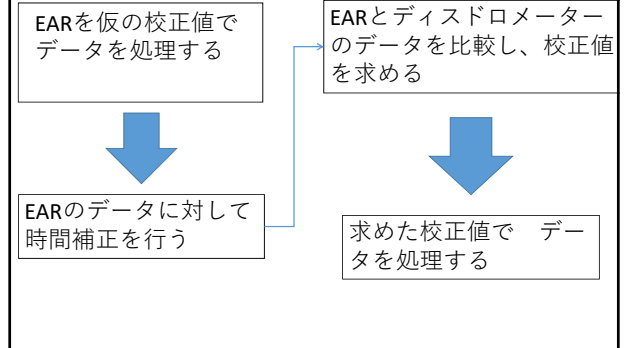
• レーダ反射因子
 $Z = \int N(D) D^6 dD$



EARのDSD推定原理



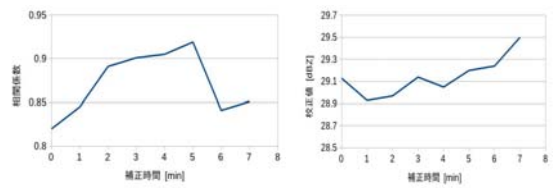
レーダーの校正原理



使用データ

- 降雨スペクトルが20分程度連続して観測されたイベントから抽出。
- 2003年3月～2004年12月の12例。

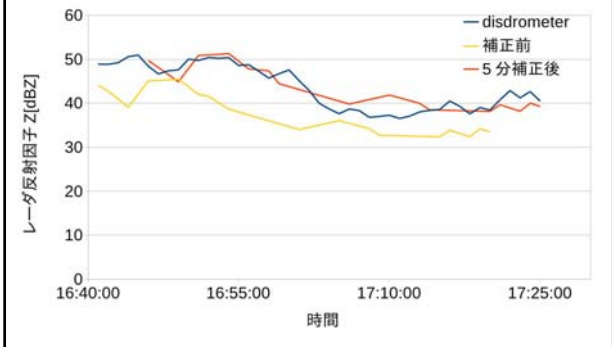
落下に伴う時間差の推定



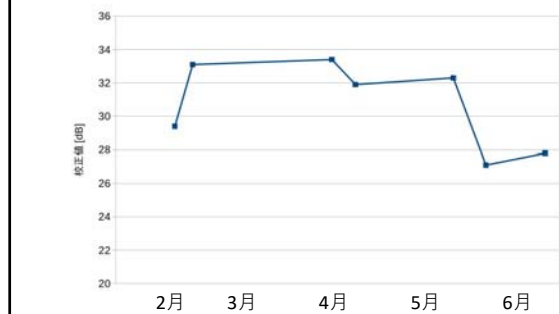
- EAR観測によるZ推定値と、地上雨滴計によるZの時間相関から、相関係数最大を与える時間差を用いた。
- 地上高2200mから地上まで、時間差5～6分。

レーダー反射因子の時間変動例

2003/03/20



校正値の時間変化



推定校正値の妥当性

- ハードウェアに起因する推定値変動？
- 6 dB は変動としては大きな値？

機器の状況モニター記録を利用

- モジュールごとに記録された送信エラー、制御エラーのログを活用!
(検討途中...)

今後の計画

- 推定校正値の長期変動
- EAR稼働ログとの比較・検証
- 出力の短期変動のモニター？

Ku 帯衛星回線の台風通過時における降雨減衰変動特性

前川泰之・佐々木駿一・柴垣佳明（大阪電気通信大学）

1. はじめに

近年衛星通信や衛星放送に対して、Ku 帯(14/12GHz)やさらに高い Ka 帯(30/20GHz)の利用が進んでおり、そのためにはこれらの周波数帯で大きくなる降雨減衰の発生時間率を正しく評価する必要がある[1]-[3]。降雨減衰予測に対しては、降雨強度累積時間率 0.01%値から求める方法が ITU-R 勧告等で通常用いられるが[4]、降雨強度の年変化等に伴って生じる長期間の統計的な降雨減衰の変動を明確にする必要がある。このためには衛星回線ではとくに地上の降雨強度のみならず、上空の降雨高度の変化に伴う雨域等価通路長の変化に注意する必要がある。

大阪電気通信大学では、Ka 帯通信衛星電波(19.45GHz、右旋偏波、仰角 49.5°:以下 CS と称す)と Ku 帯放送衛星電波(11.84GHz、右旋偏波、仰角 41.3°:以下 BS と称す)の降雨減衰を過去33年間(1986-2018)本学の寝屋川実験局で 1 分降雨強度とともに連続的に測定したデータを用い、それらのデータに長期にわたって見られる統計的な変動について研究を行ってきた。各年の降雨強度と降雨減衰の累積時間率分布の間に差異が生じる原因として、まず平均雨域等価通路長の年変化を指摘し、各年の降雨時平均地上気温や各種降雨タイプが及ぼす影響について議論した[5]。本研究では特に台風等と熱帯性降雨が雨域等価通路長に及ぼす影響に着目し、台風接近時に特徴的に現れる降雨減衰特性の特徴について、台風の通過方向に伴う風向の変化の観点からさらに調査を進めたので報告する。

2. 台風通過時の降雨減衰変動特性

最初に本章では、2017 年の 9 月に台風が寝屋川局に接近したときの降雨強度と降雨減衰の時間変化の例を示す。図1は 2017 年9月 17 日から 18 日に台風 18 号が寝屋川局の近くを通過したときの(a)降雨強度、Ku 帯降雨減衰、および局舎から台風の中心までの距離と、(b)台風 17 号の経路をそれぞれ示す[6]。図 1(a)より、降雨強度と降雨減衰は台風の接近とともに増大し、17 日の 18LT 頃から 18 日の 1LT まで顕著に現れていることが分る。また図1(b)より、このときの台風の経路は局舎(×印)のわずかに西側を過し、衛星電波の伝搬経路では近隣の枚方アメダスによると強い南西風(北東向の風)が吹いている[7]。

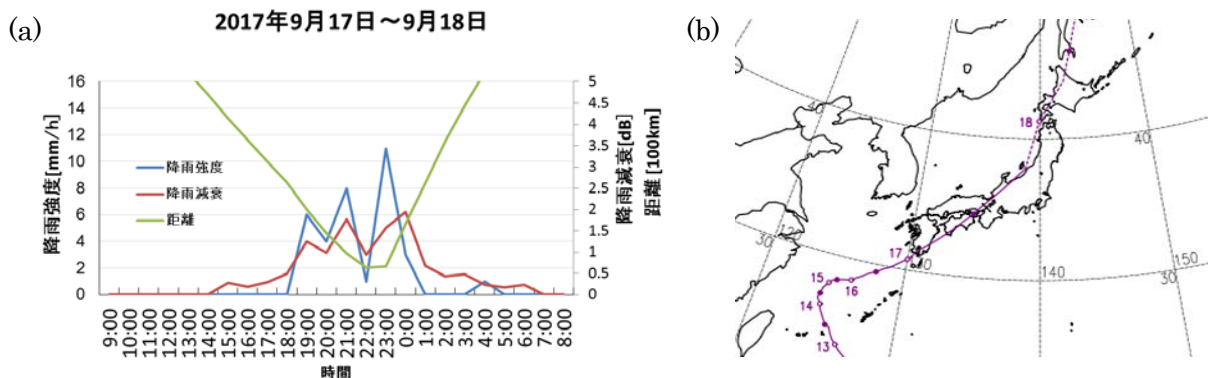


図1. 台風接近時の(a)降雨強度、Ku 帯降雨減衰、および局舎から台風の中心までの距離と、(b)台風の経路[6]。

この状況は、前回に報告した 2017 年 8 月 7 日の台風 5 号が接近したときとは対照的であり[8]、台風 5 号は寝屋川局の東側を通過したために、逆に強い北東風(南西向の風)が吹き付けていた。そして、8 月 7 日の台風 5 号の場合は、台風接近時に 4mm/h 程度の降雨強度に対して 3dB 以上の降雨減衰が 1 時間平均値で測定されたのに対し、図 1 に示した 9 月 17 日の台風 18 号では、10mm/h を超える降雨強度に対しても 2dB 程度の降雨減衰しか発生していないことが分る。この降雨強度と降雨減衰の比率の関係には、衛星伝搬路と台風通過に伴う強風との間に何らかの関係があることが示唆される。

3. 台風通過方向と雨域等価通路長の関係

図 2 は 1988 年から 2019 年の間に観測された 61 例の台風接近時について、降雨強度の平均値と BS 電波の降雨減衰の雨域等価通路長の関係を、台風の通過方向別に示したものである。降雨強度と降雨減衰の 1 時間平均値は、降雨強度が 8 mm/h 以上の値が得られた時間帯のものを選んだ。各台風接近時の降雨減衰の平均値 A [dB] は、降雨強度の平均値 R [mm/h] に対する減衰係数 $\alpha = aR^b$ [dB/km] で割ることによって雨域等価通路長 $L = A/\alpha$ [km] に変換した。なお、12GHz 帯 (BS、11.84GHz) では、 $a=0.02308$ 、 $b=1.1568$ である[5]。また台風の通過方向は寝屋川局の西側 (Δ 印)、ほぼ上空 (\circ 印)、および東側 (\times 印) を通過した場合に分類してある。

図 2 より、降雨強度が増すにつれて雨域等価通路長は全般的にやや減少する傾向にあるが、台風が前述の 2017 年 8 月 7 日の台風 5 号の様に東側 (\times 印) を通過する方が 9 月 17 日の台風 17 号の様に西側 (Δ 印) を通過する場合に比べて総じて等価雨域通路長が長い方に分布することが示される。

このことを明らかにするために、図 3 に台風が(a)西側、(b)上空、および(c)東側を通過した場合に対して雨域等価通路長のヒストグラムを示す。図 3 より、台風が(a)西側を通過したときは雨域等価通路長は 3~7km の間に分布するのに対し、逆に(c)東側を通過したときは 5~13km の間まで分布は増大し、(b)上空を通過したときはそれらの中間の分布を示すことが分る。

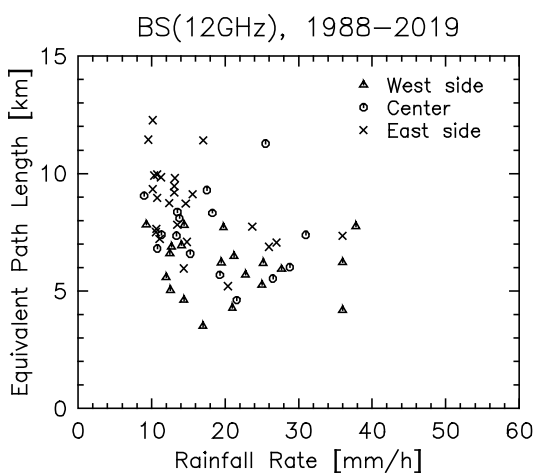


図 2. 降雨強度と雨域等価通路長の関係

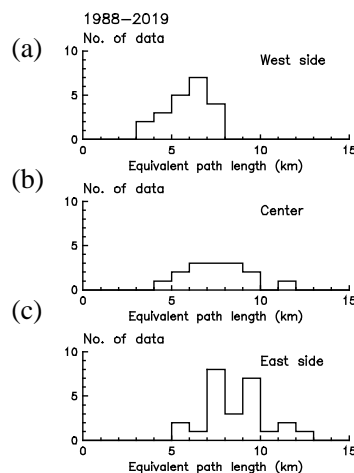


図 3. 台風の通過方向と雨域等価通路長の分布

4. 台風通過時の地上風速風向との関係

次に、上述の 61 例の測定例について、寝屋川局近隣の大阪府枚方市のアメダス(北東約 6.8km) で記録された風速の 1 時間平均値[7]を用いて、台風通過時の地上風速と大きさ方向と雨域等価通路長との

関係を調査した。図4は台風通過時の(a)地上風速の大きさ、および(b)風向と雨域等価通路長の関係を示す。地上風速と大きさと方向は風速が最も大きな値を示した時間のものを用いてある。また方向は北風(南方向)を 0° で時計回りに示してある。図4(a)より、地上風速の大きさが増大するほど雨域等価通路長はやや増加する傾向にあるが、その相関関係はそれほど風速の絶対値に関しては強く現れていない。また図4(b)の風向に関しては、前章で指摘したように北東風(南西方向)の場合が南西風(北東方向)の場合よりも総じて雨域等価通路長が長くなり、また北東風は台風が東側(×印)を通過するとき、南西風は西側(△印)を通過するときに概して多く現れることも分かる。また、図3(b)の点線はBS電波の伝搬路の方位角と逆方向(40.1°)、および同じ方向(220.1°)に相当する角度を示し、それらの方向に沿って北東風または南西風が来るときに、雨域等価通路長がばらつきは大きいものの、それぞれ最大と最少に近づく様子が示される。

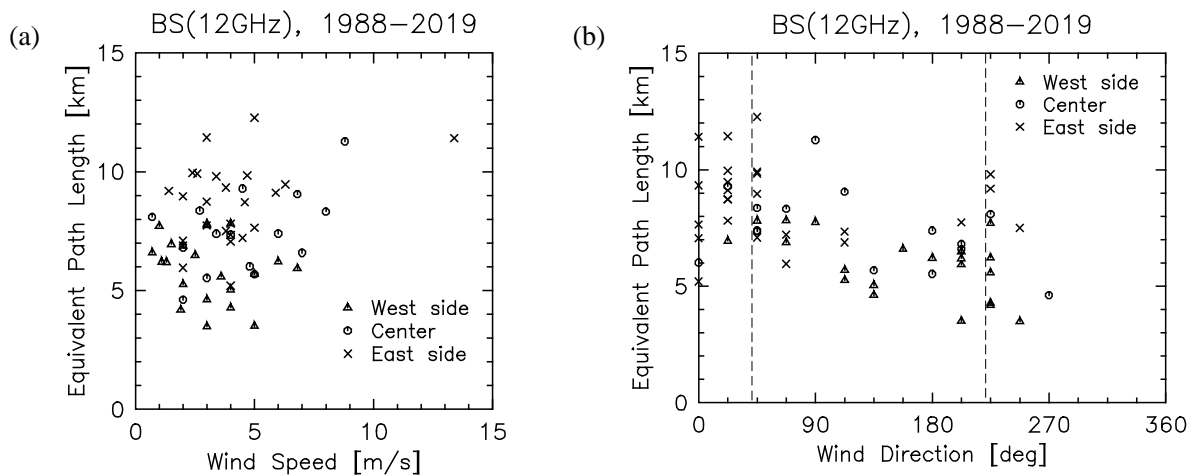


図4. 枚方アメダスによる台風通過時の地上風速の1時間平均値と雨域等価通路長の関係。(a)風速の大きさと(b)風向との相関図で、点線はBS電波の伝搬路に沿った方向を示す。

5. 電波伝搬路に対する風速との関係

前章の結果より、台風通過時の地上風速は雨域等価通路長に明らかに影響を及ぼしており、特に風向が顕著に作用していると考えられるので、本章ではBS電波の伝搬路(方位角 220.1°)に沿った地上風速の大きさの成分を抽出して雨域等価通路長との関係をさらに調べた。図5に伝搬路方向の風速の1時間平均値と雨域等価通路長の関係を示す。風速は伝搬路の逆方向(方位角 40.1°)から到来す成分を正の値、伝搬路の方向(同 220.1°)から到来する成分を負の値でそれぞれ示してある。図4(a)に比べて図5で示した衛星電波伝搬路に沿った風速成分の方が、相関関係が格段に増大していることが示される。また台風が西側を通過(△印)して衛星電波の到来方向から来る負の値の風速が強まると雨域等価通路長が5km前後まで顕著に減少するのに対し、逆に衛星電波の到来方向の逆から来る正の風速が強まると雨域等価通路長が10km前後まで増大する傾向が明らかである。

図5の点線は、降雨高度を3~7kmとした場合の雨域等価通路長を、衛星仰角(41.3°)による傾斜伝搬路の効果に、さらに伝搬路に沿った風速による雨滴の水平移流の効果を加えて計算し直した値であり、簡単な計算により実測値とよく合う結果が得られており、台風通過時の風速風向の影響が実証されたといえる。なお、ここでは雨滴の落下速度は5m/s程度と仮定しており、降雨高度に対する鉛直調整係数は

0.9(通常の降雨では 0.7~0.8)としている。水平風速が-5km 付近で雨域等価通路長が最少となるのは、衛星仰角の影響と水平移流の効果がちょうど相殺して伝搬路長が降雨高度に見かけ上等しくなるためと考えられる。また、水平風速は上空の便宜上降雨高度まで地上と同じに設定しているが、実際にはさらに強まっている可能性があり、さらに雨域等価通路長が地上風速に対して増大していると思われる。従って、今後 MU レーダー等による上空の風速の測定値によりさらに補正を行う必要があると考えられる。降雨高度が 7km と通常の降雨の場合の 4~5km に対してかなり高い値となるのも、上空の風速がさらに増大していることが影響している可能性があると言える。

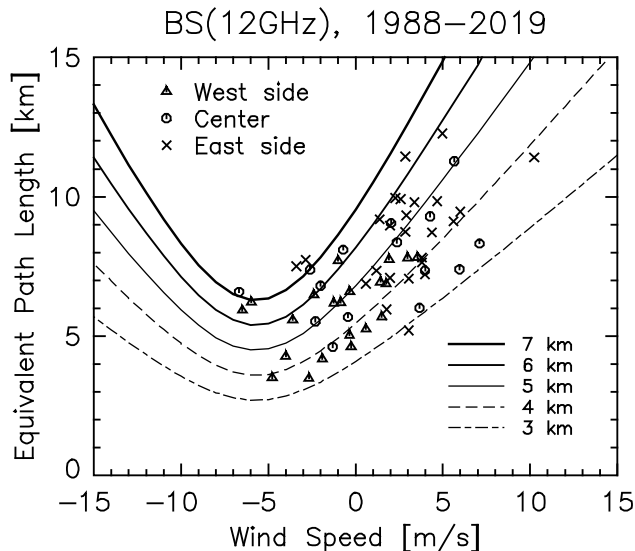


図5. 衛星伝搬路に沿った方向の地上風速(北東風を正)と雨域等価通路長の関係。図中の各実線と点線は降雨高度3~7km に対して雨滴の落下速度(5m/s)と伴に風速による水平移流を考慮した場合の計算値をしめす。

6. おわりに

1988年から2019年にかけて大阪電気通信大学(大阪府寝屋川市)において30年間以上にわたって測定されたKu帯放送衛星(BS)電波の降雨減衰データを用いて、その間に得られた61例の台風通過時の特徴について議論を行った。降雨事象毎に得られる降雨減衰の1時間平均値は降雨強度が同じであっても台風が通過する位置により著しい差異が生じ、減衰係数 α [dB/km]に対する雨域等価通路長は、寝屋川局の東側を通過する場合、西側を通過する場合に比べて2倍近く増加することが示された。

このとき近隣の枚方アメダスで記録された地上風速の1時間平均値は北風から北東風に集中し、衛星電波の到来方向(ほぼ南西)に対して逆向きの風が強いときに、雨域等価通路長が増大して降雨強度の対する減衰量が相対的に増大することが測定値と計算値の両方により示された。本研究により、衛星通信や衛星放送のマイクロ波帯電波(12GHz帯)の降雨減衰量が地上風速の大きさと方向によって実際に影響を受けることを、初めて測定と計算で実証した結果が得られたと言える。

今後はCS(Ka帯、20GHz)の他の周波数や、スーパーパートやJCSAT等のKu帯の方位角が異なる他の通信衛星伝搬路、あるいは、他の測定地点での降雨減衰データに対しても、台風による地上風速の影響の有無について調査を進める必要がある。また、MUレーダー観測により上空の風速との関係も詳しく調べる必要がある。

参考文献

- [1] H. Fukuchi, T. Koza, K. Nakamura, J. Awaka, H. Inomata, and Y. Otsu, "Centimeter wave propagation experiments using the beacon signals of CS and BSE satellite," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-31, no.4, pp.603-613, July 1983.
- [2] Y. Karasawa and Y. Maekawa, "Ka-band earth-space propagation research in Japan," Proc. IEEE, vol.85, no.6, pp.821-841, June 1997.
- [3] S. Nakazawa, S. Tanaka, and K. Shogen, "A method to transform rainfall rate to rain attenuation and its application to 21 GHz band satellite," IEICE Trans. on Commun., vol.E91-B, no.6, pp.1806-1811, 2008.
- [4] "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," Geneva, ITU-R Recommendation P618-8, 2005.
- [5] Y.Maekawa, A study on long-term rain attenuation characteristics in Ka and Ku band satellite communications, Proc. of The 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2011), ICSSC-17-1, Nara, Nov.-Dec. 2011.
- [6] <http://www.jma.go.jp/jp/typh/>.
- [7] <http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>.
- [8] 前川泰之、山田修稔、柴垣佳明、“Ku 帯衛星通信回線の台風接近時の降雨減衰特性”、第 12 回 MU レーダー・赤道レーダーシンポジウム、京都大学生存圏研究所、2018 年 9 月。

TBEx衛星・COSMIC-2衛星 からの2周波ビーコン波 による低緯度電離圏 観測手法の開発

氏原伸裕・山本衛
(京大大学生存圏研究所)

2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

1

発表内容

- 研究背景と目的
- 新しい衛星の軌道シミュレーション
- 観測データの処理方法についての検討
- 今後の予定

2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

2

発表内容

• 研究背景と目的

- 新しい衛星の軌道シミュレーション
- 観測データの処理方法についての検討
- 今後の予定

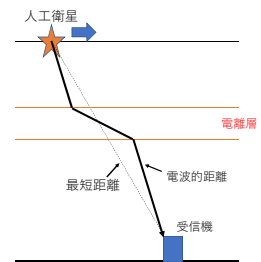
2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

3

研究背景・目的

- 赤道付近の電離圏のプラズマバブルの発生原因特定・予測
- 衛星からの異なる2周波数のビーコン波を解析することで電離圏TEC(Total Electron Content)を求めること
- 6月中に打ち上がる2種類のビーコン衛星による観測手法の開発



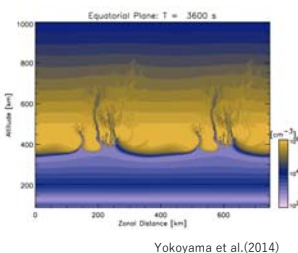
2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

4

プラズマバブル

- プラズマバブルは電子密度の空乏域であり、時間変化が複雑
- 前兆現象としてLSWS(Large Scale Wave Structure)が現れる
- LSWS:東西方向の波長数100kmに及ぶ大規模変動
- C/NOFS衛星によるビーコン観測から、LSWSの振幅が増大するとプラズマバブルの発生確率が增大することが分かっている



2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

5

先行研究と本研究

- C/NOFS衛星は観測頻度が約90分毎でLSWSの時空間構造を捉えるのは困難
- 新しく8機の衛星を飛翔させることで平均15分毎に観測可
- 新しい衛星の状況
TBEx衛星 (2機) とCOSMIC-2衛星 (6機) は2019年6月25日に打ち上げられた。現在は、それぞれの衛星の初期運用とチェックが行われている。
- 衛星軌道計算、受信信号解析ソフトウェア開発、受信機設置、観測データ処理方法についての検討を行ってきた

2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

6

発表内容

- 研究背景と目的
- 新しい衛星の軌道シミュレーション
- 観測データの処理方法についての検討
- 今後の予定

2019/09/09

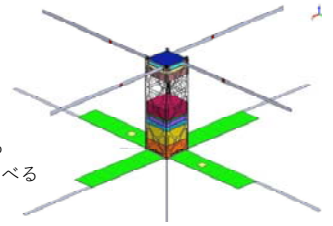
第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

7

人工衛星

TBEx

- 米国SRI Internationalの超小型衛星(2機)
- 低緯度軌道から地上へのビーコン観測により赤道プラズマバブル発生に関する仮説LSWSの時空間構造を調べる
- 軌道傾斜角28度

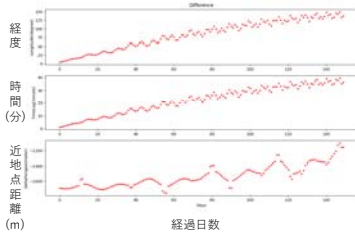


2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

8

TBEx軌道予測 (経度差、時間差、近地点距離差)



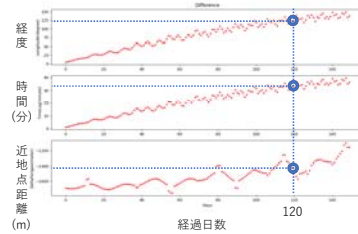
- 現在の軌道要素を用いて、今後の2機のTBExの相対位置関係を予測した。
- TBEx-Aから見たTBEx-Bの軌道の差
- 近地点：衛星が最も地球に近づく点
- 150日後まで計算
- 2019/9/1を0日目とする

2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

9

TBEx軌道予測 (経度差、時間差、近地点距離差)



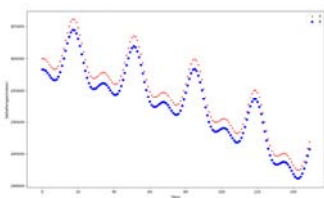
- 例(120日後)
- 経度差：123度
 - 時間差：32分
 - 近地点距離差：1445m

2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

10

TBEx軌道予測 (近地点距離)



- TBEx-B (青色)の近地点がTBEx-A (赤色)よりも約1500m低い。現在は約300kmである。
- 長期的には近地点が徐々に低下することが分かる。
- 局所的に見ると5km程山なりに変化している。

2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

11

発表内容

- 研究背景と目的
- 新しい衛星の軌道シミュレーション
- 観測データの処理方法についての検討
- 今後の予定

2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

12

観測原理

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

$$\psi = \frac{2\pi f}{c}L - \frac{\pi A}{Cf} \int N ds \quad (1)$$

← 全電子数

$f_1 = pf_r$ 、 $f_2 = qf_r$ となる2周波数を用いてLを消去する

$$\psi = \frac{\psi_1}{p} - \frac{\psi_2}{q} = \frac{\pi A}{Cf_r} \left(\frac{1}{q^2} - \frac{1}{p^2} \right) \int N ds \quad (2)$$

2つの電波の位相差から全電子数が求められる

2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

13

観測値 S_r と絶対TEC V_a

- 観測値 S_r : (未知のバイアスが含まれている)
- 観測方向に沿ったTEC : $S_r + B$ (バイアス考慮済みの絶対値)
- 絶対TEC V_a : 鉛直方向の絶対TEC値
- B : バイアス値
- x : 天頂角

$$V_a = (S_r + B) \cos x \quad (1)$$

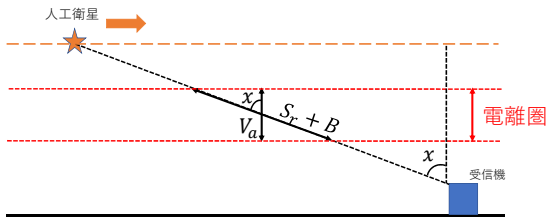
2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

14

相対TECと絶対TEC(概念図)

$$V_a = (S_r + B) \cos x \quad (1)$$



2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

15

バイアス値B

$$V_a = (S_r + B) \cos x \quad (1)$$

- 絶対TEC V_a を求めるためにはバイアス値Bを推定する
- Bは受信機と衛星に依存し、1衛星パス毎にリセットされる
- 今回はバイアス値を推定する方法を2つ検証した

2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

16

1観測点法(坂本, 2019)

$$V_a = (S_r + B) \cos x \quad (1)$$

式(1)から

$$S_r \cos x = -B \cos x + V_a \quad (2)$$

式(2)で $x = \cos x$, $y = S_r \cos x$ とおくと

$$y = -Bx + V_a \quad (3)$$

- V_a が一定とみなせるような小区間の (x, y) をプロットすると、グラフの傾きが $-B$ になる
- 1衛星パス全ての小区間でBを求め、最も多く得られたBをその衛星パスでのBと推定する

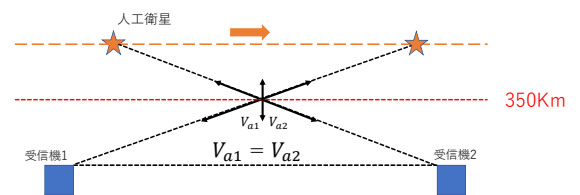
2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

17

2観測点法(Leitinger R et al. 1975)

- 1観測点法を2地点で行う
- 各地点で得られた同一点での絶対TECが一致することからBを推定する

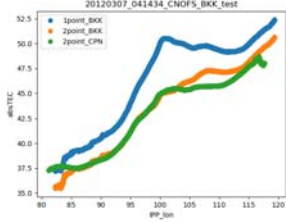


2019/09/09

第13回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

18

2つの推定法をTEC分布で比較



- 2012/03/07
- 横軸：IPPの経度
- 縦軸：絶対TEC

2019/09/09

第13回IMUリーダー・赤速大気レーダーシンポジウム

19

2つの推定方法の比較方法(1)

- 過去の観測データ20衛星パスを用いた
- 2012年3月のデータ(春分付近)
- 東方向に飛翔していたC/NOFS衛星
- 観測点はバンコク(東経100.29)、チュンボン(東経99.10)
- 南北に飛翔する極軌道衛星と南北5点の受信点を用いて5観測点法から求められたTEC値(坂本, 2019)を真値とし、そこからの偏差を調べた



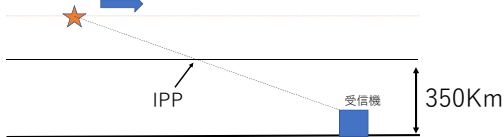
2019/09/09

第13回IMUリーダー・赤速大気レーダーシンポジウム

20

2つの推定方法の比較方法(2)

- 極軌道衛星とC/NOFS衛星の交点において、絶対TECを比較
- IPP交点の通過時間差が60分以内にある衛星パスを用いた
- IPP(Ionospheric Penetration Point)：ビーコン衛星と受信機を結ぶ視線ベクトルが高度350Km と交わる点
- IPPの緯度・経度が一致する点を交点とした



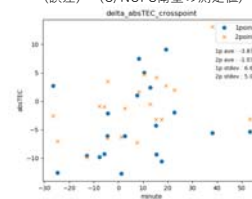
2019/09/09

第13回IMUリーダー・赤速大気レーダーシンポジウム

21

誤差比較結果

- 横軸：交点通過時間差
(通過時間差) = (C/NOFS衛星の通過時刻) - (極軌道衛星の通過時刻)
- 縦軸：交点での絶対TEC値の測定誤差
(誤差) = (C/NOFS衛星の測定値) - (極軌道衛星の測定値)



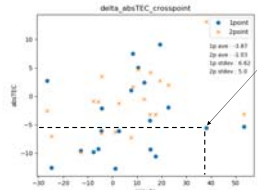
2019/09/09

第13回IMUリーダー・赤速大気レーダーシンポジウム

22

誤差比較結果

- 横軸：交点通過時間差
(通過時間差) = (C/NOFS衛星の通過時刻) - (極軌道衛星の通過時刻)
- 縦軸：交点での絶対TEC値の測定誤差
(誤差) = (C/NOFS衛星の測定値) - (極軌道衛星の測定値)



- グラフの読み方
- 1観測点法で得られた値
 - 極軌道衛星よりも約37分遅く観測点を通過
 - 真値よりも6低い値を計測

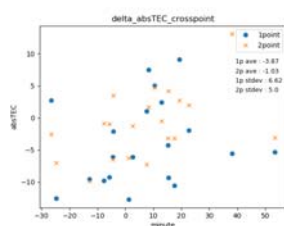
2019/09/09

第13回IMUリーダー・赤速大気レーダーシンポジウム

23

誤差比較結果

- 誤差平均、標準偏差ともに2観測点法が優れている
- 2観測点法を用いるためチュンボンに受信機を設置予定



	1観測点法	2観測点法
誤差平均	-3.87	-1.03
標準偏差	6.62	5.0

2019/09/09

第13回IMUリーダー・赤速大気レーダーシンポジウム

24

発表内容

- 研究背景と目的
- 新しい衛星の軌道シミュレーション
- 観測データの処理方法についての検討
- 今後の予定

今後の予定

- 衛星が安定し通信が始まり次第、データ解析を進める

新しい衛星＝地上ビーコン受信機の開発・配備・テスト観測状況

山本衛(京大 RISH)・Roland Tsunoda (SRI International)

対流圏オゾン

春季の東南アジア下部対流圏におけるオゾン増大: 発生メカニズムと3次元構造

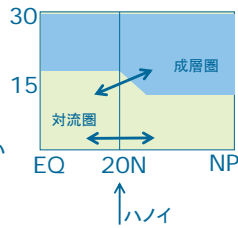
荻野慎也 (JAMSTEC)・宮崎和幸 (JAMSTEC, NASA)・
藤原正智 (北大)・野津雅人 (首都大)・塩谷雅人 (京大)・
長谷部文雄 (北大)・松本淳 (JAMSTEC, 首都大)・
Jacquelyn Witte・Anne Thompson (NASA)・
Nguyen Hoang Anh・Nguyen Vinh Thu (ベトナム気象水文局)



- 大気汚染物質
- 温室効果ガス
- オゾン前駆物質: NO₂, CO
- 成層圏からの流入
- 衛星からの観測が難しい
- オゾンゾンデによる高度プロファイル観測が依然として有力な観測手段

ハノイ、ベトナム

- 亜熱帯
 - 対流圏・成層圏
 - 熱帯・中緯度
- インドシナ半島
 - 継続的なオゾンゾンデ観測がない



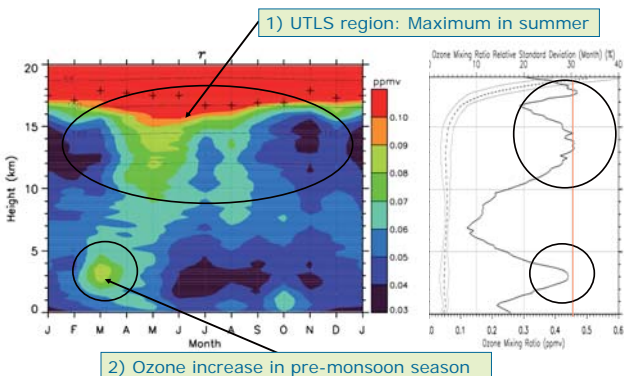
ハノイでのオゾンゾンデ観測

- Monthly observation
 - Once or twice/month
 - From Sep 2004, for ~14 years
- Campaign observation
 - A few days interval for 2-4 weeks
 - Every winter in 2004-2012
 - Every summer in 2016-2018
- AMO (Aero-Meteorological Observatory)
- SOWER (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region)
- JAMSTEC
- One of the SHADOZ stations (Southern Hemisphere Additional OZonesondes) since 2008



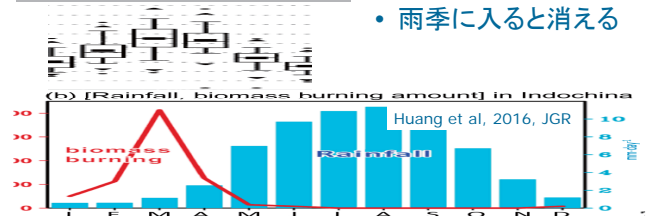
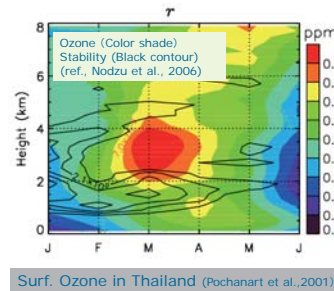
オゾンの平均的な季節変化

Ogino et al., 2013 (JGR)

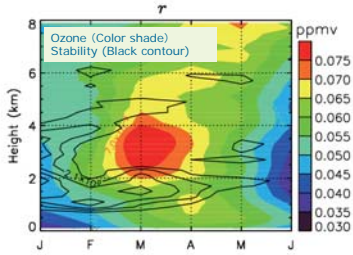


春季オゾン増大 (雨季直前)

- 3月の高度3km
- 2つの安定層の間
- 3月にはインドシナで焼畑
- タイの地表オゾンは3月に最大
- 雨季に入ると消える

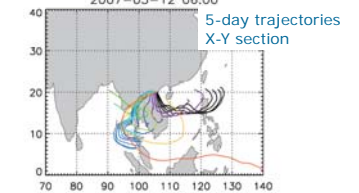
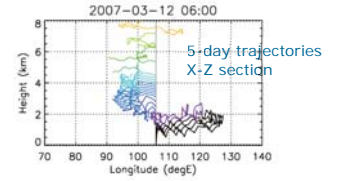
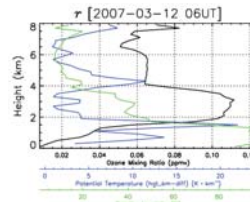


目的・手法



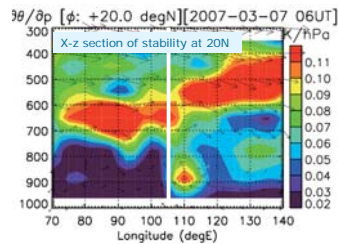
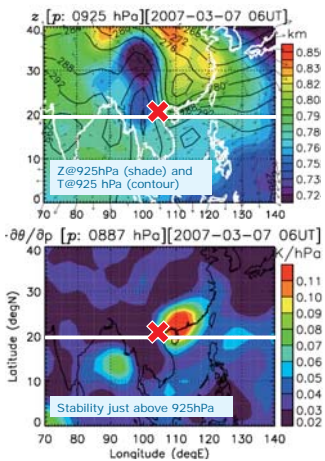
- 問い
 - ソースは？
 - 輸送過程は？
 - 3次元的な構造・広がりは？
- 手法
 - 後方流跡線
 - 気象場
 - 化学輸送モデル実験

典型例の後方流跡線解析(2007年3月12日)



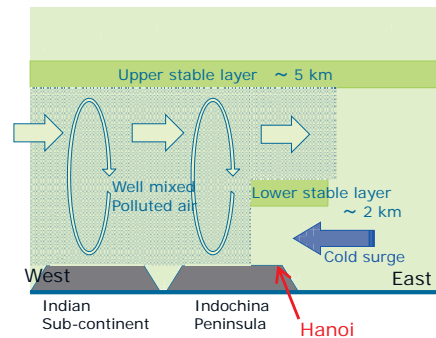
- 0-2 km: from the ocean in the east
- 2-4 km: from the land in the west or the southwest

気象場



- Typical cold surge near surface
- Stable layer just above cold surge intrusion
- Vertical structure of stability
 - Lower stable layer: near Hanoi
 - Upper stable layer: broad extent

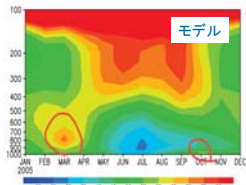
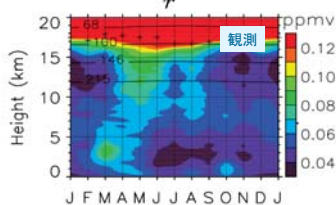
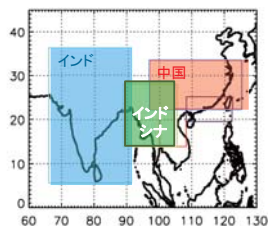
ここまでのまとめ



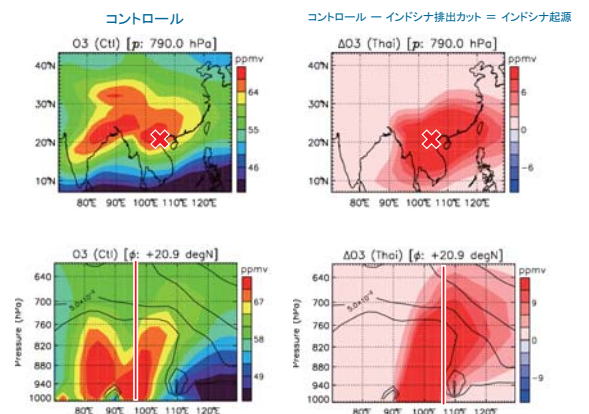
化学輸送モデルによる感度実験

Ogino, Miyazaki et al., 2019 (paper in prep.)

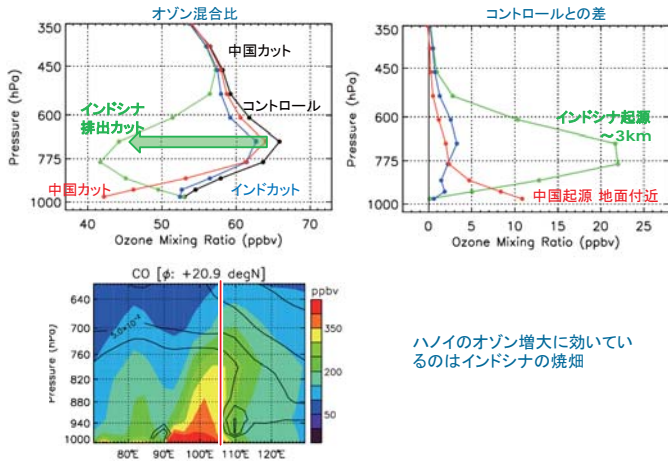
- 化学輸送モデルCHASER
- インド、インドシナ、中国の各領域でのオゾン前駆物質(CO, NO₂, etc)の排出をカット (ref., Miyazaki et al., 2015, ACP)
- 問い
 - 3次元構造は？
 - どの領域が効いている？
 - 広域影響は？



水平・鉛直構造

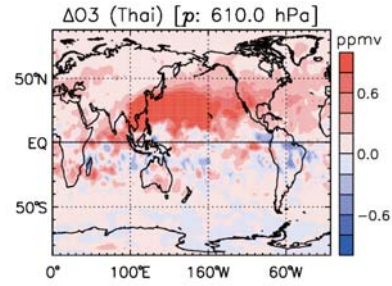


どこが効いているか？



ハノイのオゾン増大に効いているのはインドシナの焼畑

より広域には？

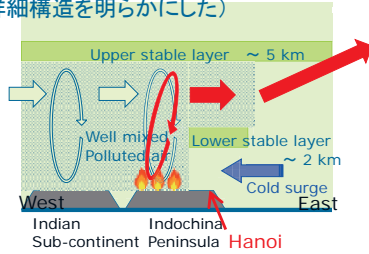


The chemical transport model suggests that the ozone originated from the biomass burning over northern Thailand can be transported widely eastward across the Pacific ocean.

c.f., PEM-West, TRACE-P studies.

まとめ

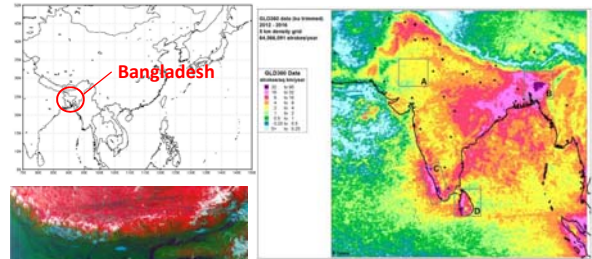
- ハノイでの継続的なオゾンゾンデ観測 → 3月の高度3kmにオゾン増大
- インドシナの焼畑起源
- 水平規模 ~1000km@700hPa
- 鉛直混合と西風による輸送 + 下層の北西モンスーン
- さらに東方に輸送され、太平洋全域に広がる（そのソース付近の詳細構造を明らかにした）



Bangladeshにおける 降水システムと雷活動の関係

村田文絵, 東修平(高知大), 寺尾徹(香川大),
 林泰一(京大東南研), S. M. Quamrul Hassan,
 Shamsuddin Ahmed(Bangladesh 気象局)

はじめに



雷ストローク密度(1平方キロメートルあたり
 1年あたりのストローク数)。Vaisalaの雷データ
 セットGLD360を用いた2012-2016年のデータに
 基づく(Nag, 2017)。
 大洪水時のNOAA-10による衛星画像
 (Hofer and Messerli,2006)の表紙

Bangladeshにおける雷被害トップ10 Dewan et al. 2017による(1990-2016年)

TABLE 3. Top 10 lightning days in chronological order that caused multiple lightning-related fatalities since 1990 (figures in parentheses represent deaths in each district).

Date and year	Districts	Number of fatalities
2 Jun 1991	Kurigram	27
31 May 1993	Cox's Bazar	31
3 Jun 2007	Mymensingh (9), Lalmonirhat (4), Netrakona (3), Rangamati (2), Brahmanbaria (1), and Khulna (2)	21
5 Jun 2007	Cox's Bazar (7), Chapai Nawabganj (6), Manikganj (2), Barisal (2), Pabna (1), Comilla (1), Kishoreganj (2), Bagerhat (1), and Faridpur (1)	23
21 May 2011	Rajshahi (4), Jamalpur (2), Joypurhat (3), Narsingdi (2), Gaibandha (2), Satkhira (2), Sherpur (1), and Kishoreganj (1)	17
23 May 2011	Chapai Nawabganj (10), Rajshahi (4), Pabna (2), Natore (2), Noakhali (2), Chandpur (1), Gopalganj (1), and Manikganj (1)	24
6 May 2013	Sunamganj (4), Kishoreganj (3), Madaripur (3), Netrakona (3), Noakhali (2), Bagerhat (2), Chandpur (1), Maulvibazar (1), Habiganj (1), Chittagong (1), Thakurgaon (1), Mymensingh (1), Sherpur (1), and Comilla (1)	25
7 May 2015	Sunamganj (5), Jamalpur (3), Sherpur (3), Chandpur (2), Gaibandha (2), Dinajpur (2), Mymensingh (1), and Chittagong (1)	19
12 May 2016	Narail (7), Pabna (6), Rajshahi (5), Brahmanbaria (4), Kishoreganj (4), Sirajganj (3), Tangail (3), Dhaka (2), Bogra (2), Natore (2), Naogaon (2), Gazipur (2), Dinajpur (2), Natoreganj (1), Pirojpur (1), Netrakona (1), Habiganj (1), Niphatari (1), Bhakati (1), and Patuakhali (1)	51
13 May 2016	Habiganj (4), Sirajganj (4), Rajbari (4), Sylhet (4), Chittagong (3), Joypurhat (3), Naogaon (2), Dhaka (2), Gaibandha (2), Narail (2), Kishoreganj (2), Tangail (2), Sunamganj (1), Chandpur (1), Jessore (1), and Gazipur (1)	38

雷被害の経年変化(Dewan et al. 2017)

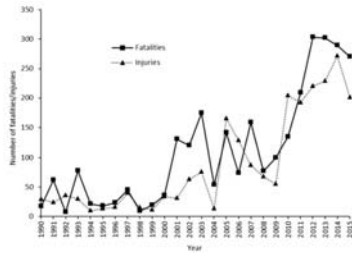


FIG. 6. Interannual variation of lightning-related fatalities and injuries in Bangladesh.

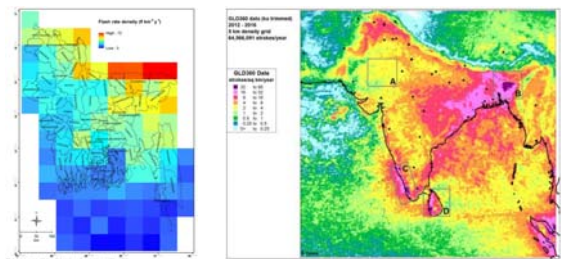
雷被害発生時の状況

TABLE 5. Activities and locations of Bangladesh fatalities due to lightning.

Activity and location	Number	Percentage (%)
Outdoors		
Farming	1225	39.7
Returning home/walking around homesteads	332	10.8
Others (clearing forests, sand collection, working at construction sites, repairing vehicle, working at business, near police camp, and staying under eucalypt)	271	8.8
Fishing/bathing/boating	253	7.6
Herding	110	3.6
Playing on the fields (e.g., football)	71	2.3
Transport related (e.g., motorcycles, bikes)	47	1.5
Under tree	28	0.9
Indoors		
Inside house	737	23.9
At school class room	32	1.0
Total	3086	100.0

(Dewan et al. 2017)

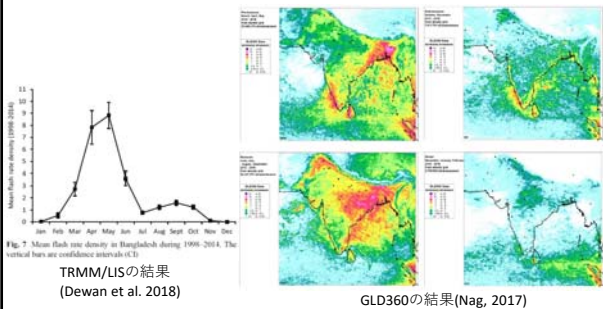
年間の雷活動度の分布 GLD360(右)とTRMM/LIS(左)



TRMM/LISの結果
 (Dewan et al. 2018)

GLD360の結果(Nag, 2017)

雷活動の季節変化



本研究の目的

降水システムに関する先行研究

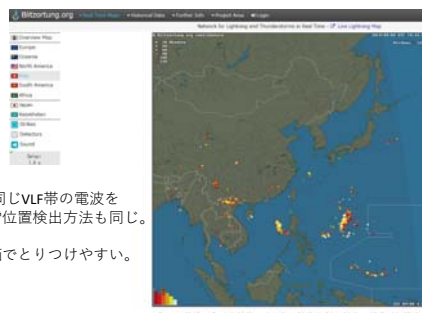
- Islam et al.(2005)はDhakaのレーダーデータを用いて、システムの移動速度や寿命などの特徴を調べ、 Bangladesh 上で発達する降水システムは寿命が平均で約5.7時間、平均移動速度は約5m/sであることを示した。
- Rafiuddin et al.(2010)はDhakaのレーダーで観測された降水システムを分類し、それぞれのシステムの発生しやすい季節などを調べ、弧状型システムは他のシステムより速く移動し、寿命が短いことを示した。



降水システムの構造や発生時の環境場、システムの発生場所などの広範囲での動きについてはまだ充分解明されていない。
降水システムと雷活動の関係について研究がない。

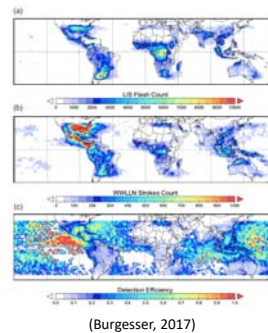
Bangladeshの気象レーダーとWorld Wide Lightning Location Network (WWLLN)の雷活動データを用いて、「どのような降水システムによって雷活動が生じるのか？」を明らかにする。
解析期間は2010~2013年の3~9月とする。

別の雷データBlitzortung by 湘南工大・成田さん



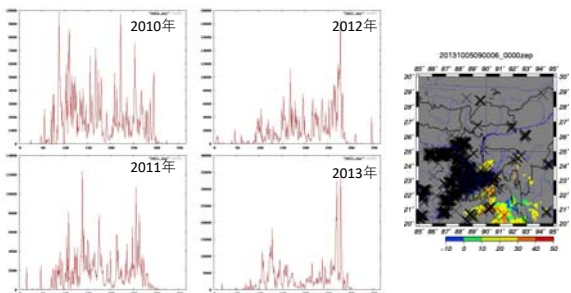
WWLLNと同じVLF帯の電波をつかい、雷位置検出方法も同じ。
装置が安価でとりつけやすい。
無料。
2010-2013年のデータはない。

World Wide Lightning Location Network (WWLLN)とTRMM/LISの比較



- TRMM/LISが光学センサーで雷光を検知するのに対してWWLLNは雷に伴うVLF帯の電波を検知する。
- LISが雲間放電WWLLNは電流が大きい対地放電を検出。

Bangladesh領域(20-30N, 85-95E)の雷活動の季節変化

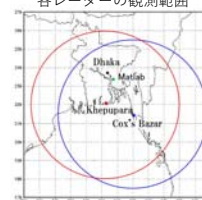


→ 2013年9月の終わりに10月(ポストモンスーン季)に異常に雷検出数が多い日がある。

使用データ

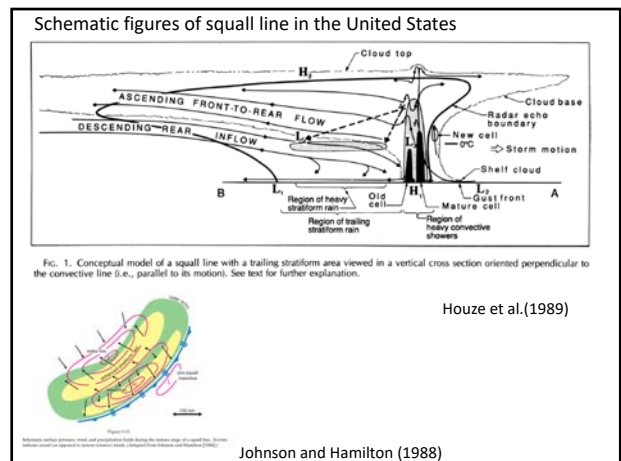
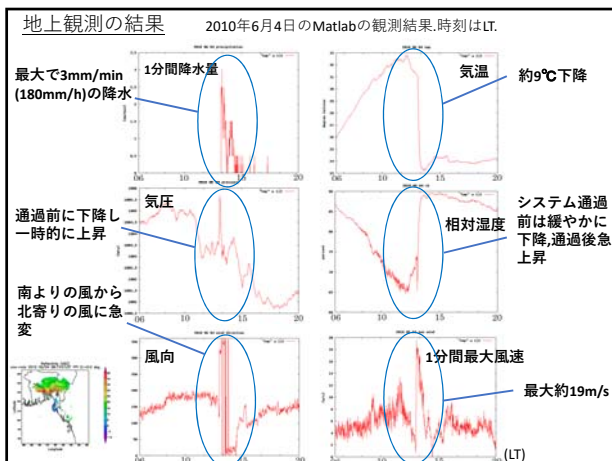
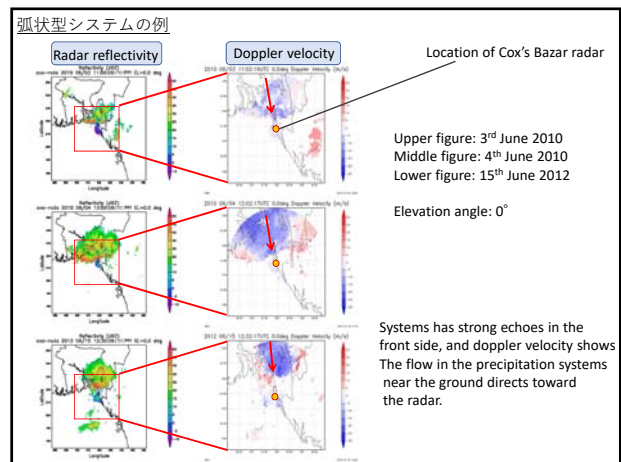
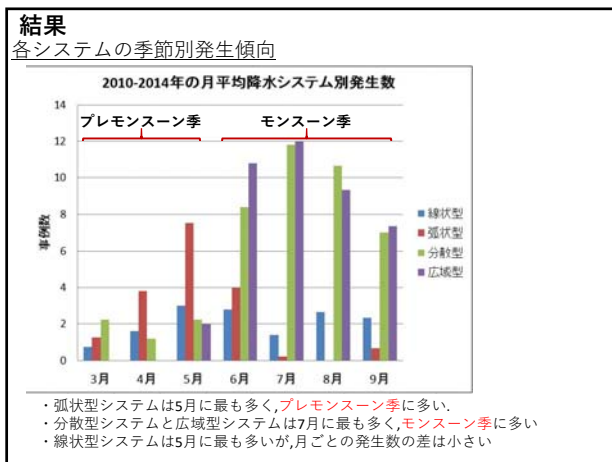
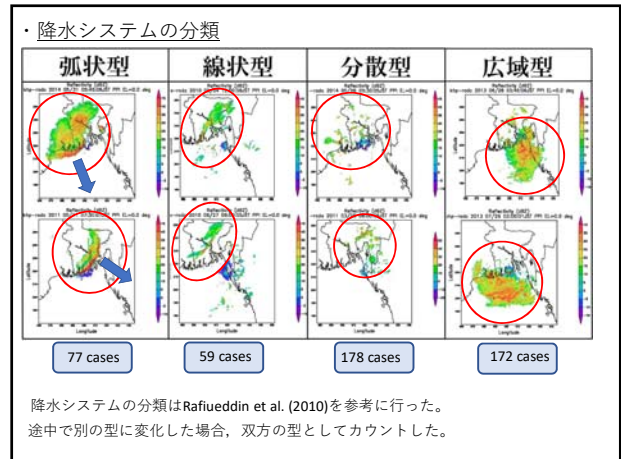
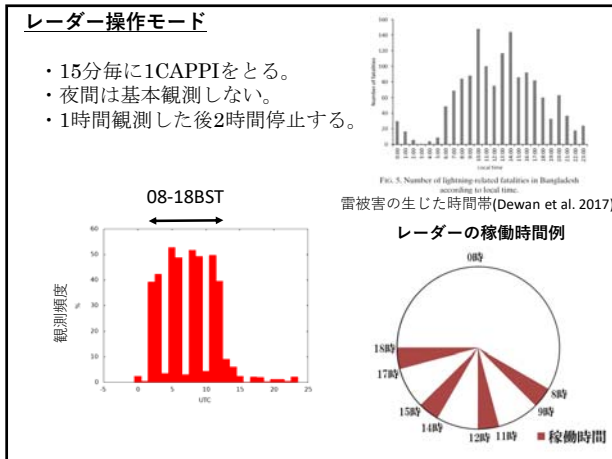
Cox's Bazar及びKhepuparaのレーダーデータ (Sバンドレーダー)

- Cox's Bazarレーダー (青枠)
北緯17.4~25.4度,東経87.7~96.2度
設置高度は約24m
 - Khepuparaレーダー (赤枠)
北緯18.0~26.0度,東経85.9~94.5度
設置高度は約33m
- 使用仰角は0.0度と3.0度
各レーダーの観測範囲

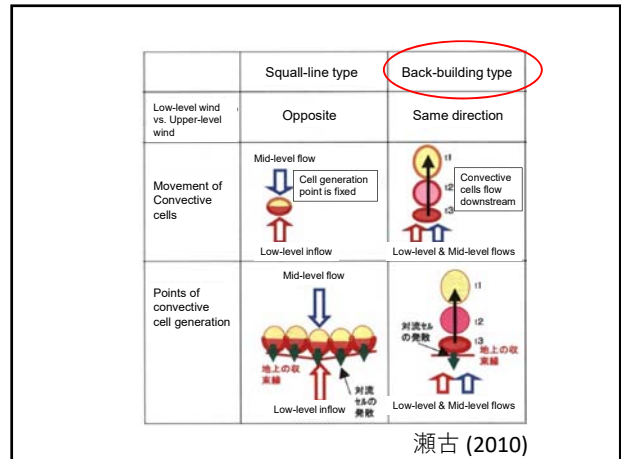
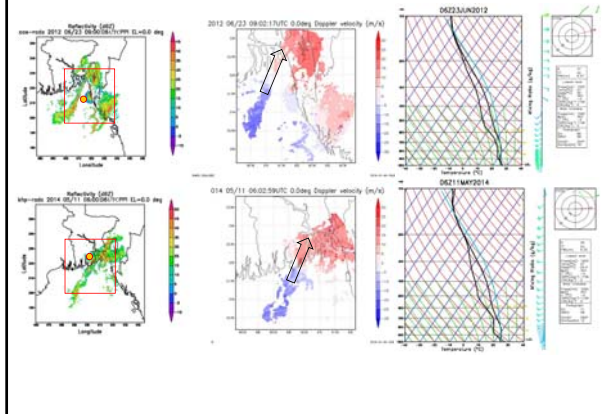


両レーダーの諸元

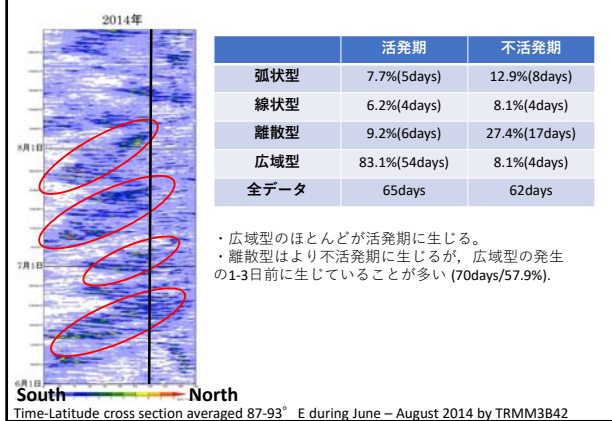
観測項目	ドップラー速度
周波数	2.84GHz
距離分解能	0.63km
パルス繰り返し周波数	720Hz
観測範囲	200km
観測項目	反射強度
周波数	2.84GHz
距離分解能	1.25km
パルス繰り返し周波数	320Hz
観測範囲	440km



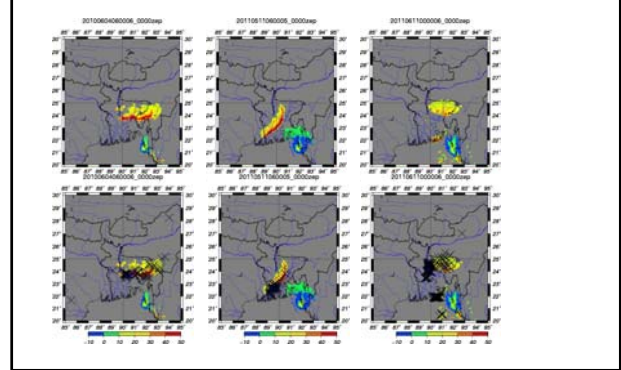
線状型システムの例



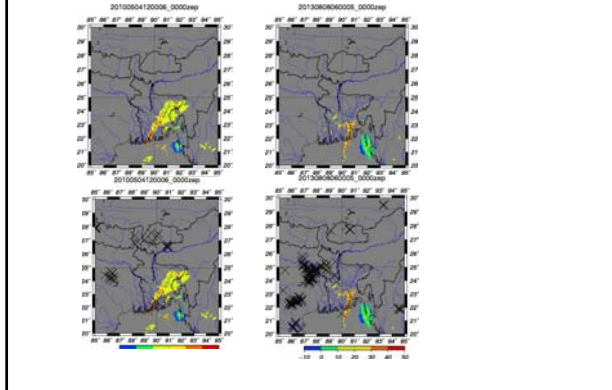
季節内変動との関係



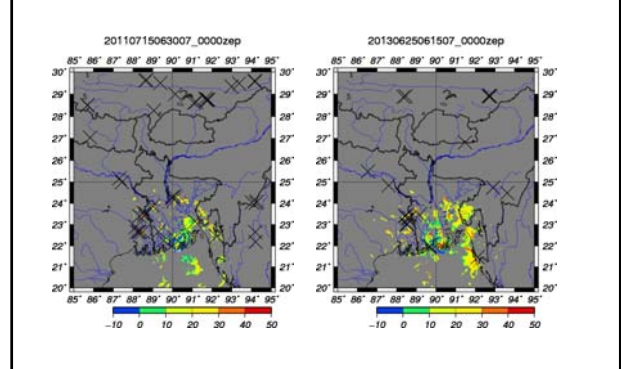
雷活動との関係(弧状型)



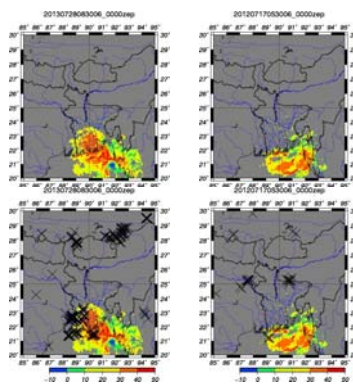
雷活動との関係(線状型)



雷活動との関係・離散型




雷活動との関係(広域型)



まとめ

- バングラデシュにおける雷活動の気候学的な特徴
 - 南アジア域の中で雷活動度が高い地域。特にメガラヤ高原の南側の地域が多い。
 - プレモンスーン季(4-5月)が最も雷活動が高い。
- バングラデシュで見られる降水システムの特徴
 - 弧状型：プレモンスーン季に卓越。降水システムは西のChotta Nagpur高原やHimalaya高原, Meghalaya高原付近で発生する傾向がある。
 - 線状型：プレモンスーン季・モンスーン季両方で卓越する。
 - 離散型・広域型：モンスーン季に卓越。広域型は季節内変動の活発期と対応しており、離散型は活発期の前に卓越する傾向がある。
- 降水システムと雷活動の関係
 - 4つの型の中で、弧状型の対流性降水部分と広域型の降水システムの一部で特に活発な雷活動がみられる。



火山起源成層圏エアロゾルをトレーサとした赤道域における物質の水平並びに鉛直輸送の観測

阿保 真、柴田泰邦、長澤親生(首都大学東京)

第13回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
2019年9月9-10日

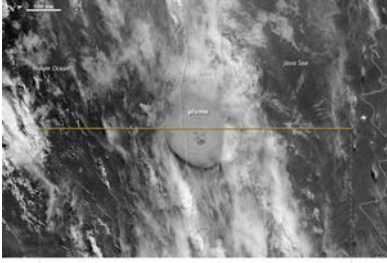
はじめに

- 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。
- Kototabang設置の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年に噴火したケルト火山により成層圏に注入されたエアロゾルをトレーサとしてその動態解析を行った。
- 2019年6月に噴火した新たな事例についても速報する。

2

ケルト火山噴火(2014/2/13)


NASA Earth Observatory Image



Kelut (Kelud) Volcano
7.9S, 112.3E
Java Island of Indonesia
Eruption: 13 February 2014

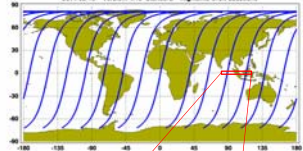
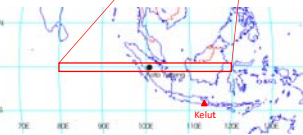
The inertial plume ejected material up to 26 km in the tropical stratosphere, but most of the plume remained at 19-20 km over the tropopause.

NASA CALIOP



<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards>

水平/鉛直方向輸送の解析 -CALIOPデータ解析法-

緯度方向の加算レンジ
±1° (~350s : ~7,000shots)

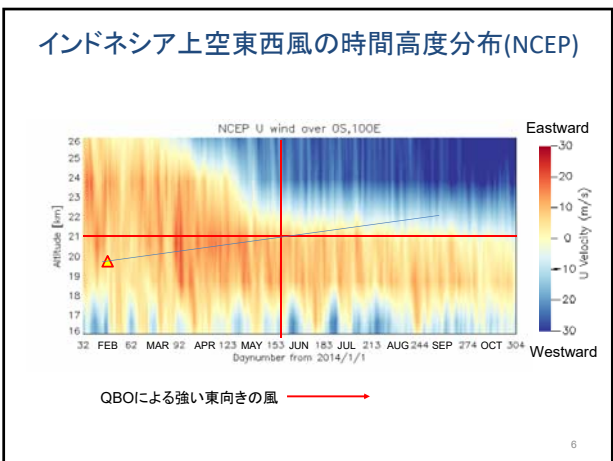
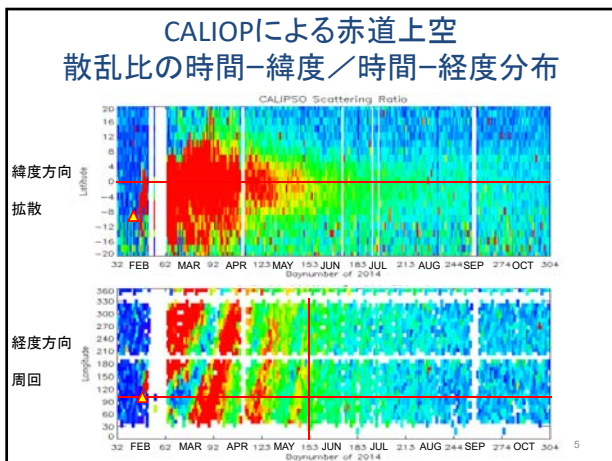
経度方向の範囲
100±20° (~every two days)

高度分解能: 5-point smoothing
180m => 900m (20-30km)
60m => 300m (10-20km)

波長: 532nm (S,P)

One-pass CALIOP data around tropopause region has not enough sensitivity.

4



エアロゾルの分離解析

ash消散係数(δ大)とsulfate消散係数(δ小)に分離

硫酸液滴

Total attenuated backscatter β_t
 Perpendicular / parallel backscatter $\beta_{\perp} / \beta_{\parallel}$
 Volume depolarization ratio δ
 Particulate backscatter β_p
 Scattering ratio SR
 Molecular backscatter β_m

Theoretical depolarization ratios :

ash ($\delta_a=0.36$) / sulfate ($\delta_s=0.01$)

Ash-related attenuated backscatter β_a

Sulfate-related attenuated backscatter coefficients β_s

$$\delta = \beta_{\perp} / \beta_{\parallel} = \beta_{\perp} / (\beta_t - \beta_m) \quad (1)$$

$$\beta_p = \beta_t - \beta_m \quad (2)$$

$$SR = \beta_p / \beta_m \quad (3)$$

$$\beta_a = \beta_p \frac{(\delta_p - \delta_a)(1 + \delta_a)}{(\delta_a - \delta_s)(1 + \delta_p)} \quad (5)$$

$$\beta_s = \beta_p - \beta_a \quad (6)$$

Extinction coefficients for ash particles α_a

sulfate aerosol α_s

Particulate depolarization ratio δ_p

Molecular depolarization ratio $\delta_m = 0.0037$

$$\delta_p = \frac{SR \times \delta \times (\delta_m + 1) - \delta_m \times (\delta + 1)}{SR \times (\delta_m + 1) - (SR + 1)} \quad (4)$$

$$\alpha_a = 40 \times \beta_a \quad (7)$$

$$\alpha_s = 50 \times \beta_s \quad (8)$$

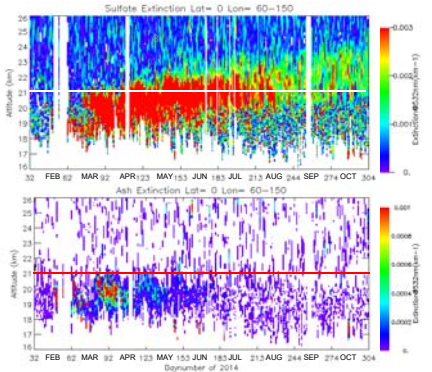
[Vernier 2016]

7

CALIOPIによるインドネシア上空観測 時間-高度分布

Sulfate消散係数
(球形、粒径小)
上昇

Ash消散係数
(非球形、粒径大)
沈降



Brewer-Dobson circulation

赤道付近のBrewer-Dobson circulation
 による平均的上昇速度は~300m/month
 [Rosenlof, 1995; Corti et al., 2005]

0.26μmのAshは2km落ちるのに17ヶ月かかる
 BDを考えないより3倍長い (2000/(418-300))
 Ash can impact climate on longer time
 scale than previously thought.
 [Vernier 2016]

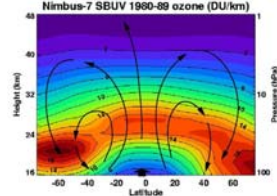


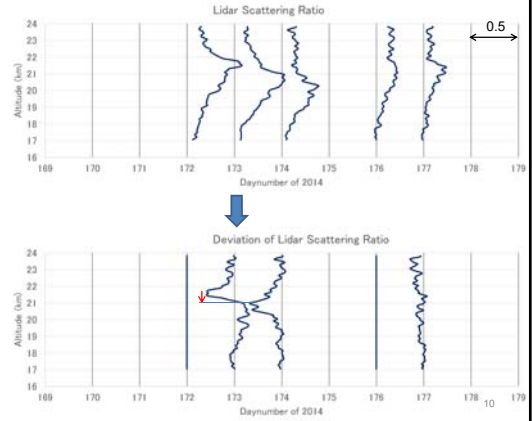
Table 1. Theoretical Calculation of Sedimentation Rate of Particles of 0.08, 0.15, 0.26, and 0.37 μm Radius, Using a Mass Density of 1670 kg/m³ for Sulfate and 2500 kg/m³ for Ash

Particle Radius (μm)	Slip Factor (No Unit)	理論的沈降速度 Sedimentation Rate (m/Month)
0.08	30 (sulfate)	79 (sulfate)
0.15	16 (sulfate)	154 (sulfate)
0.26	10 (sulfate/ash)	279 (sulfate)/418 (ash)
0.37	7 (sulfate/ash)	418 (sulfate)/625 (ash)

地上ライダー観測に見られたエアロゾルの鉛直輸送

散乱比

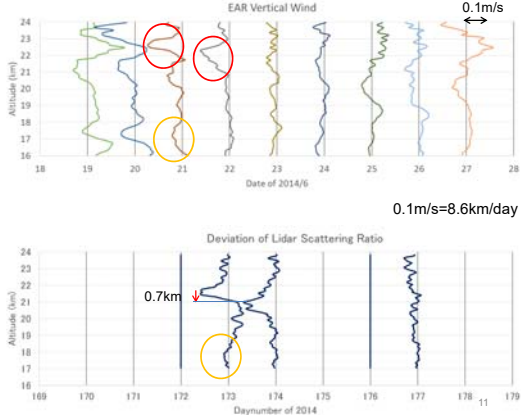
散乱比の
1日前から
の増減分



EAR鉛直風とエアロゾルの動きの関係

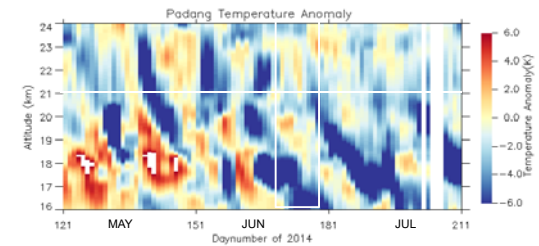
赤道大気
レーダによる
鉛直風
(1日平均)

散乱比の
1日前から
の増減分



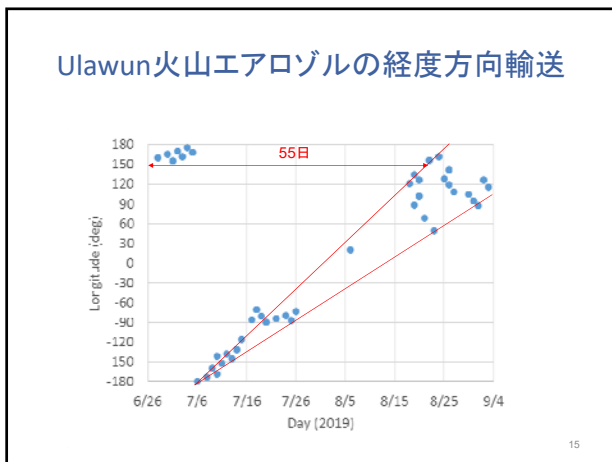
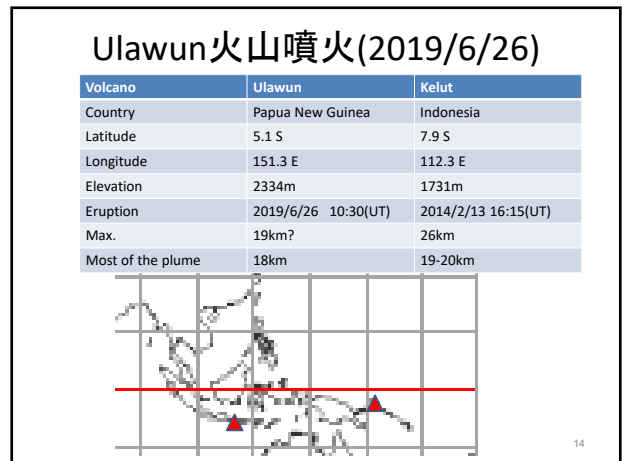
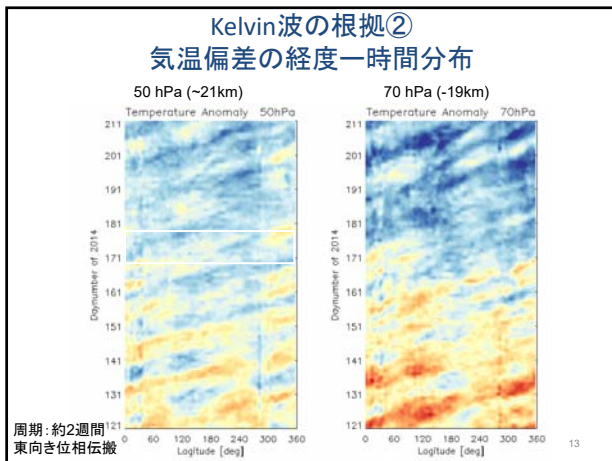
Kelvin波の根拠① 気温偏差の時間高度分布

ラジオゾンデによる気温偏差



周期: 約2週間
下向き位相伝搬

12



- ### まとめ
- 水平輸送 (衛星ライダー-CALIOPデータの解析)
 - Kelut火山起源のエアロゾルが噴火後緯度方向に広がり、赤道に達した
 - その後赤道上空でQBOによる顕著な東向きの風により経度方向に輸送され、地球を3周する様子が見られた
 - 6月になると東向きの風が弱まり経度方向の動きはなくなった
 - 鉛直輸送 (地上ライダー-EARデータの解析)
 - 粒径の小さい硫酸液滴エアロゾルはBrewer-Dobson循環で上昇、粒径の大きい火山灰は沈降により降下する様子が確認出来た。
 - 6月に地上ライダー観測から火山起源成層圏エアロゾルの下方への鉛直輸送が観測された
 - この鉛直輸送が起こった高度はEARの鉛直風観測結果から、下向き鉛直風が強い領域であった
 - 前後の期間の気温偏差の時間-高度、経度-高度分布図より、これは赤道ケルビン波に連動したものと考えられる。
 - 衛星ライダー、赤道ライダー、赤道レーダを組み合わせることにより、火山エアロゾルをトレーサとした赤道域の成層圏-対流圏物質交換の直接観測が今後も期待出来る。

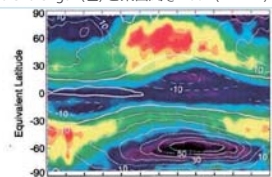
南極大型大気レーダー (PANSY) で 推定された南極上空の乱流エネルギー散逸率

高麗正史、佐藤薫 (東大院理)、
西村耕司、堤雅基 (極地研)

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム (2019-09-10)

成層圏極渦付近の混合過程

Equivalent length (色) と東西風 @ 460K (~17km)



水平/等温位面混合

- Rossby波の碎波に伴う Surf zone (McIntyre and Palmer, 1983)
- ジェット (強いPV勾配) 付近の Transport Barrier
- Sub-vortex 領域 ($\theta \leq 400K$) (McIntyre, 1995)

Allen and Nakamura (2001)
Equivalent length は
実効的な水平渦拡散係数と関係

鉛直/非断熱混合

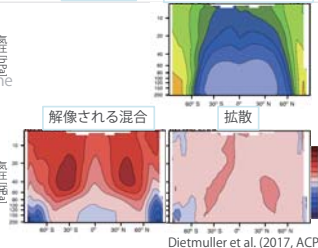
- Age of Air のモデル間のばらつきの原因の1つ (Dietmuller, et al., 2018)
- VHFレーダーのスペクトル幅による乱流パラメータ推定 (Wilson, 2004)
乱流渦拡散係数 $K = \gamma \epsilon N^{-2}$ (γ : 比例定数、 ϵ : 乱流運動エネルギー散逸率)
※ 先行研究のほとんどが北半球中緯度を対象とし、
極渦の季節変化との関係は調べられていない

成層圏極渦付近の混合過程

Age of Air 残差循環 Transit Time

水平/等温位面混合

- Rossby波の碎波に伴う Surf zone (McIntyre and Palmer, 1983)
- ジェット (強いPV勾配) 付近の Transport Barrier
- Sub-vortex 領域 ($\theta \leq 400K$) (McIntyre, 1995)



鉛直/非断熱混合

- Age of Air のモデル間のばらつきの原因の1つ (Dietmuller, et al., 2018)
- VHFレーダーのスペクトル幅による乱流パラメータ推定 (Wilson, 2004)
乱流渦拡散係数 $K = \gamma \epsilon N^{-2}$ (γ : 比例定数、 ϵ : 乱流運動エネルギー散逸率)
※ 先行研究のほとんどが北半球中緯度を対象とし、
極渦の季節変化との関係は調べられていない

The PANSY radar

Mesosphere-Stratosphere-Troposphere/Incoherent Scatter radar at Syowa Station (69S, 40E) in the Antarctic

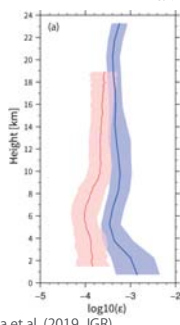
System	Pulse Doppler radar. Active phased array system
Center freq.	47MHz
Antenna	Array consisting of 1045 crossed Yagi antennas equivalent to the circular area with a diameter of 160m (18000m ²), light and tough (12.6kg/antenna)
Transmitter	1045 solid-state TR modules Peak Power: 520kW
Receiver	55 channel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

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

Full system observation started in March 2015.

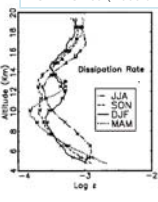
PANSYレーダーによって推定された南極上空の乱流エネルギー散逸率 ϵ_R

赤線: レーダーによって推定された ϵ_R の中央値 赤領域: 25/75percentile
青線: ラジオゾンデによって推定された ϵ_T の中央値 青領域: 25/75 percentile



下部成層圏では ϵ_R と ϵ_T がよく対応
中部・上部対流圏では、 ϵ_T が ϵ_R に比べ、かなり大きい

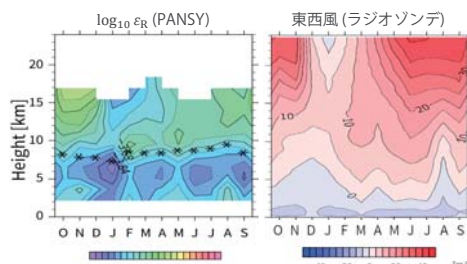
New Mexico (Nastrom and Eaton, 1997)



ϵ^R は対流圏界面直上で極大を持ち、下部成層圏で高度とともに増大
→ Nastrom and Eaton (1997) と整合

Kohma et al. (2019, JGR)

PANSYレーダーによって推定された南極上空の乱流エネルギー散逸率 ϵ_R



5~10月の高度10~15kmで ϵ が増大
→ 極渦の季節変化がUTLSの ϵ を変調?

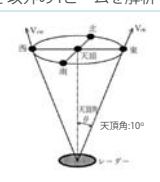

等価緯度-温位断面に基づき
極渦の季節変化を乱流パラメータで特徴づける

Kohma et al. (2019, JGR)

データ：南極昭和基地大型大気レーダー (PANSYレーダー)

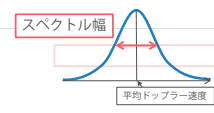
Mesosphere-Stratosphere-Troposphere/Incoherent Scatter (MST/IS) radar @ Syowa Station (69.0°S, 39.5°E)

System	Pulse Doppler radar. Active phased array system	時間分解能：200s
Center freq.	47MHz	高度分解能：150m
Antenna	Array consisting of 1045 crossed Yagi antennas equivalent to the circular area with a diameter of 160m (18000m ²), light and tough (12.6kg/antenna)	天頂向き以外の4ビームを解析
Transmitter	1045 solid-state TR modules Peak Power : 520kW	
Receiver	55 channel digital receiving systems Ability of imaging and interferometry obs	
Power consumption	75kW (E-class amplifier)	
Peripheral	24 antennas for E-layer FAI observation	

7

データ：スペクトル幅から推定した速度分散



本研究における速度分散の計算

乱流に伴う速度分散 (σ_{Turb}^2) を次のように見積もる

$$\sigma_{Turb}^2 = \sigma_{obs}^2 - \sigma_B^2 - \sigma_S^2 - \sigma_{time}^2$$

- σ_B : ビームブロードニング \Rightarrow アンテナの配置を考慮し除去 (Nishimura et al., in revision)
- σ_S : シアーブロードニング $\Rightarrow |\partial u / \partial z| \Delta r \sin \theta / 2$ として推定
- σ_{time} : 時間ブロードニング \Rightarrow 小さいとして無視

本研究では、

- 大気成層による分反射の影響を受けにくい鉛直ビームを使用

8

データ：スペクトル幅から推定した速度分散

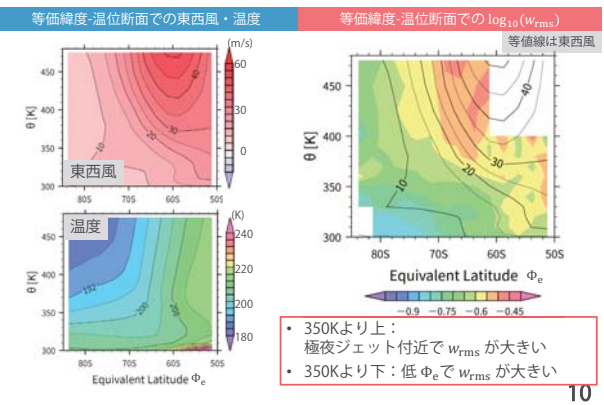
- エコスペクトル幅から乱流に伴う速度分散 w_{rms}^2 を解析
- エネルギー散逸率 ϵ_R ・乱流拡散係数 κ との関係 (Hocking et al., 2016)
- $$\epsilon_R \propto N w_{rms}^2, \quad \kappa \propto N^{-1} w_{rms}^2$$
- 今回は2016~2018年の w_{rms} についての結果を示す
 - データ間隔：~200 s \Rightarrow 1ヶ月あたり12,000プロファイル以上

データ：再解析データ

- JRA-55 (Kobayashi et al., 2015)
- $\Delta x = 1.25^\circ$ 、等温位面データ (300~475K)
 - U, V, GP, Temp, potential vorticity (PV), etc.
 - PVに基づく等価緯度 Φ_e (Butchart and Remsburg, 1986) \Rightarrow 等PV線に沿った平均

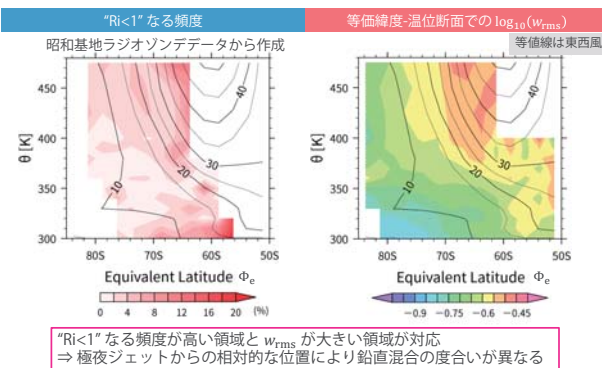
9

等価緯度-温位面座標での乱流パラメータ (6~9月)



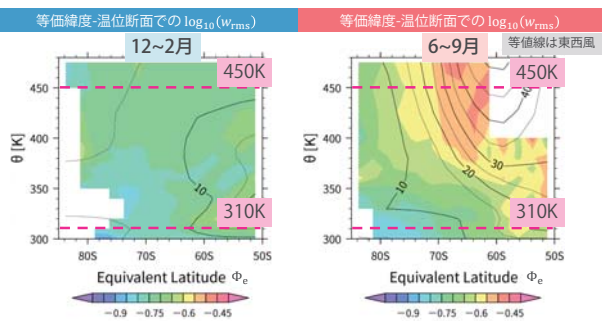
10

等価緯度-温位面座標での乱流パラメータ (6~9月)



11

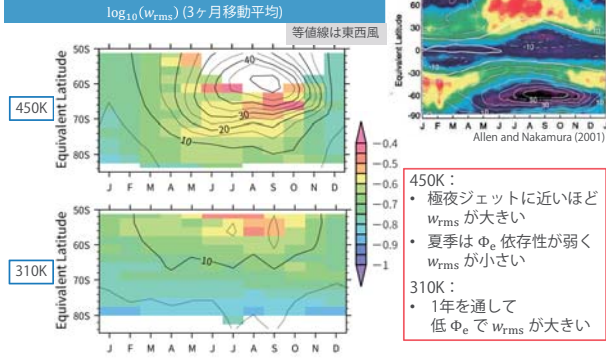
等価緯度-温位面座標での乱流パラメータ (12~2月 vs. 6~9月)



12

乱流パラメータの季節変化

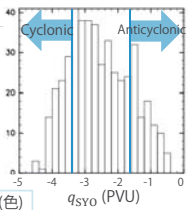
Equivalent Length (色) と東西風 @ 460K



450K:
 • 極夜ジェットに近いほど w_{rms} が大きい
 • 夏季は Φ_e 依存性が弱く w_{rms} が小さい
 310K:
 • 1年を通して低 Φ_e で w_{rms} が大きい

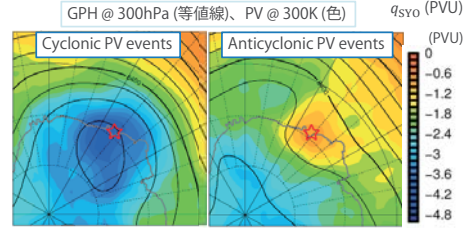
13

圏界面付近の総観規模擾乱と乱流パラメータ (6~9月)



圏界面付近のPV擾乱

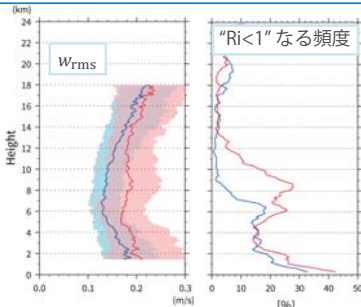
- 昭和基地上空のPV (q_{SVO}): (30°-50°E, 65°-75°S) で領域平均した300面のPV
- Anticyclonic PV events : $q_{SVO} > \text{mean} + \text{stddev.}$
- Cyclonic PV events : $q_{SVO} < \text{mean} - \text{stddev.}$



14

圏界面付近の総観規模擾乱と乱流パラメータ (6~9月)

Anticyclonic PV: 赤実線: 中央値, 赤影: 25th-75th percentile
 Cyclonic PV: 青実線: 中央値, 青影: 25th-75th percentile



圏界面付近の高気圧性PV偏差に伴い $z=6-10\text{km}$ で w_{rms} が大 \Rightarrow "Ri < 1" なる頻度が大きい高度と対応

昭和基地ラジオゾンデデータから作成

15

まとめ

PANSYレーダーにより推定された乱流速度分散の平方根 w_{rms} を用い、等価緯度-温位断面上において成層圏極渦を乱流パラメータの観点で特徴づけた

1. 350Kより上の高度 (極渦領域)

- 極渦の十分内側に比べ、極夜ジェット付近で w_{rms} が大 \Leftarrow "Ri < 1" なる頻度が大きい領域と対応
- 夏季は Φ_e 依存性が弱く、総じて w_{rms} が小

2. 350Kより下の高度 (Sub-vortex領域)

- 低 Φ_e で w_{rms} が大きい
- 総観規模の高気圧性PV擾乱に伴い、高度6~10kmにおいて w_{rms} が大 \Leftarrow "Ri < 1" なる頻度が大きくなる高度領域と対応

16

IUGONET 第13回MURレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
第403回生存圏シンポジウム
京都大学 宇治キャンパス 宇治総合研究実験1号棟4階遠隔会議室 HW401
2019年9月9-10日
Metadata DD for Upper Atmosphere

最近のIUGONETプロジェクトの活動とその成果報告

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

IUGONET 1. はじめに

1.1 IUGONETプロジェクトについて

超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究 (IUGONET)
 各大学・研究機関に分散している様々な太陽・超高層大気観測データを効率的に収集・解析を行うインフラを開発

- IGY以降の約60年間に蓄積された地上観測データの共有
- 超高層大気長期変動メカニズムに関する分野横断型研究推進

IUGONET 1. はじめに

1.2 全球地上観測ネットワーク

IUGONET 1. はじめに

1.3 IUGONETプロジェクトの概要

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

IUGONET 2. IUGONETデータ解析システム

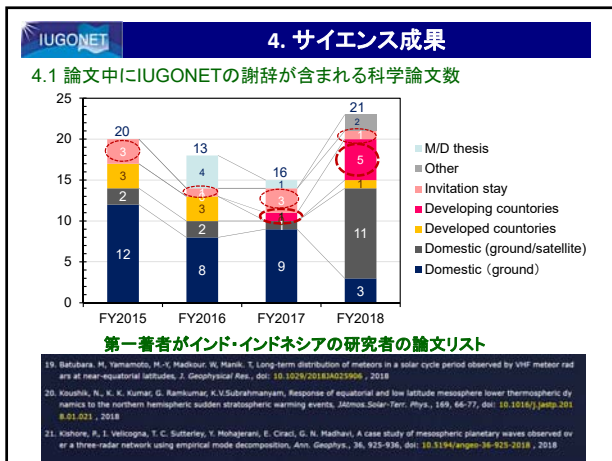
2.1 IUGONETデータ解析サービス(IUGONET Type-A)

IUGONET 2. IUGONETデータ解析システム

2.2 IUGONET Type-Aで何を学べるか?

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

データの概要
 データ利用ポリシー
 コンタクト先
 データベースの所在



4. サイエン্স成果

4.2 サイエン্স成果の事例紹介

ストロモス圏発光するオーロラのナゾを解明
尾崎 紀 (金沢大学理工研究域)

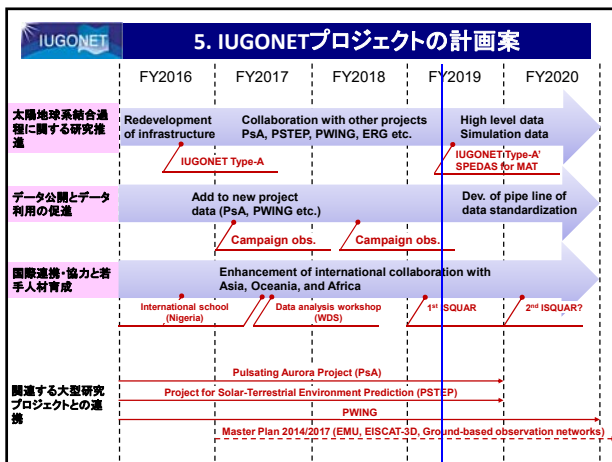
オーロラは、宇宙空間から降り注ぐ粒子が、高度100km付近の酸素原子を励起して発光する現象です。特にマゼンタの発光を伴った電子の衝突によって発生する電子オーロラは、極域を中心に広く観測されるが、そのメカニズムは不明です。今回、わが国の2台のストロモス圏発光するナゾの観測装置オーロラが観測されました。このナゾのストロモス圏発光する電子オーロラの発光を観測のありかたち (2016年11月17日、プロジェクト...)

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

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

IUGONET解析ツールやデータベースを用いて得られた新しいサイエン্স成果についてWeb上でその内容をわかりやすく解説。

<http://www.iugonet.org/publication/result.jsp>



- ### 6. まとめ
- IUGONETプロジェクト(<http://www.iugonet.org>)はweb service (IUGONET Type-A)とIUGONET データ解析ソフト(UDAS/SPEEDAS)を開発してきた。これらのツールは以下のwebサイトにて利用可
 - IUGONET Type-A: <http://search.iugonet.org/>
 - Analysis software: <http://www.iugonet.org/en/software.html>
 - 2018年度において発展途上国に属する第一著者によって書かれたいくつかのサイエン্স論文が出版された。
 - これらの国でのアウトリーチ活動によってIUGONETデータベースやツールを用いた新しい科学成果が出てきた。
 - 将来的にIUGONET Type-Aにいくつかの種類の地球科学データ(Solar surface (Ca obs.) [NAOJ], GPS-TEC [Nagoya U/NICT])を追加予定である
 - QLプロットも充実する予定[MAGDAS, ADON]
 - 非IDL利用者向けに新しいデータ解析ソフト(例えば、MATLABベース)を開発予定である。

ENRI M.P.A.T.

電離圏3次元トモグラフィの衛星測位補正への応用について

*1 齋藤 享, *2 Suzelle Meyer
 *1 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所
 *2 Institut National des Sciences Appliquées Toulouse, France

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2019年9月10日

1

ENRI M.P.A.T.

Ionosphere tomography

TEC of i-th satellite
 $TEC_i = \sum_{j=1}^N n_{ij}$
 $= \sum_{j=1}^N k_{ij} n_{e,j}$

TEC vector
 $\vec{T} = A\vec{n}$

Geometry Matrix
 $W\vec{n} = \sum_{j=1}^N C_{ij}(n_j - n_{e,j})$

Constraining term
 $\lambda ||W\vec{n} + W^{i0} \vec{n}^{i0}||^2$

Cost function
 $J(\vec{n}) = ||\vec{T} + A^{i0} \vec{n}^{i0} - A\vec{n}||^2 + \lambda ||W\vec{n} + W^{i0} \vec{n}^{i0}||^2$

Constrained least-square solution
 $\vec{n} = (A^T A + \lambda W^T W)^{-1} (A^T (\vec{T} + A^{i0} \vec{n}^{i0}) + \lambda W^T W^{i0} \vec{n}^{i0})$

* For details, see Seemara et al. [JGR, 2014], Chen et al. [EPS, 2016], and Saito et al. [NAVIGATION, 2017].

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2019年9月10日

2

ENRI M.P.A.T.

Realtime 3-D ionosphere tomography

GEONET stations (200 selected)

Grid parameters:
 25000 km, 10 000 km step, 5000 km, 3 000 km step, 2000 km, 100 km step, 800 km, 50 km step, 600 km, 20 km step, 80 km, 60°N

Every 15 min with about 6 min latency

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2019年9月10日

3

ENRI M.P.A.T.

GNSS correction by tomography

Reconstructed ionosphere by tomography

Applicable tomography corrections

Tomography correction at $t=0$
 Tomography correction at $t=15$

6 min latency
 Tomography analysis every 15min.

* Calculate ionospheric delays from the reconstructed ionospheric density profiles for each satellite based on the approximate location of the user
 * Correction may be 6-21 minutes old by considering the cadence and latency.

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2019年9月10日

4

ENRI M.P.A.T.

Previous works

Single-frequency (no correction)
 Horizontal error, Vertical-EW error

Dual-frequency correction
 Horizontal error, Vertical-EW error

Single-frequency with tomography correction
 Horizontal error, Vertical-EW error

25 October 2016 04:4 UT (Max. Kp = 6+)
 Vertical position error

	Mean	1- σ
SF/no corr.	4.61	2.13
DF	0.46	3.20
SF/tomo.	0.05	1.75

Vertical Position Error

Vertical position error (m)

Vertical position error (m)

* Good results were obtained for a user at the center of the GNSS network used for tomography
 - mean error equivalent to dual-frequency (IFree)
 - random error equivalent to single-frequency

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2019年9月10日

5

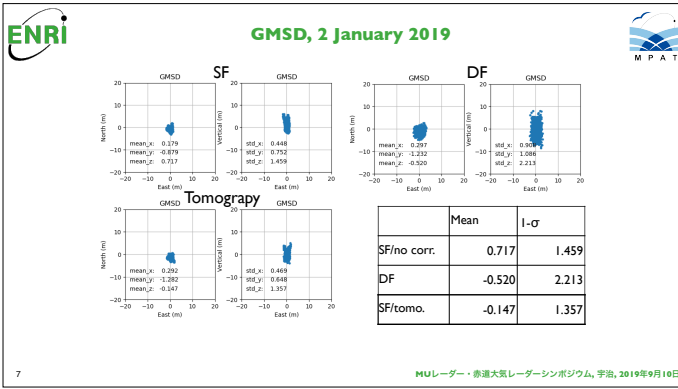
ENRI M.P.A.T.

Objectives

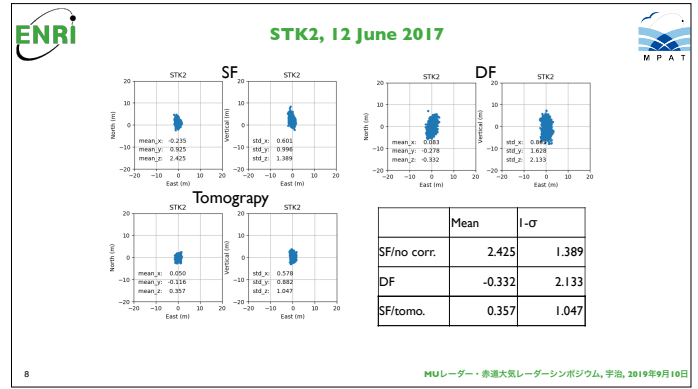
* Evaluate the performance of ionospheric correction by the 3-D tomography extensively
 * Data: 55 days in 2016-2018
 - Four stations not used for tomography
 - STK2
 - MIZU
 - GMSD
 - TONAKI
 - Season
 - At least 3 days per season per location
 - Magnetic activity
 - 16 magnetic disturbed days are included

MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2019年9月10日

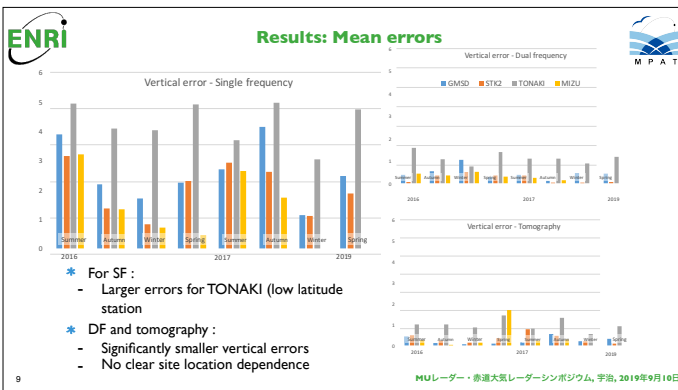
6



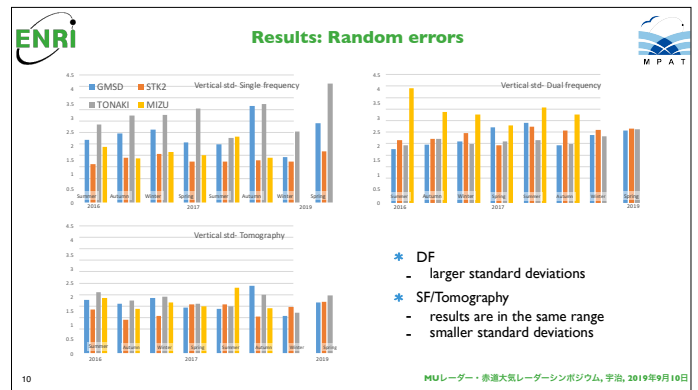
7



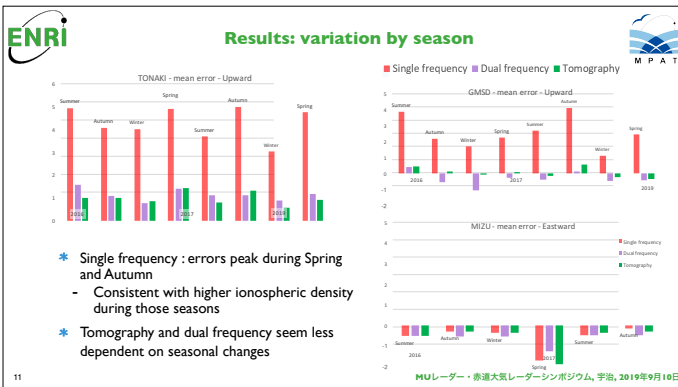
8



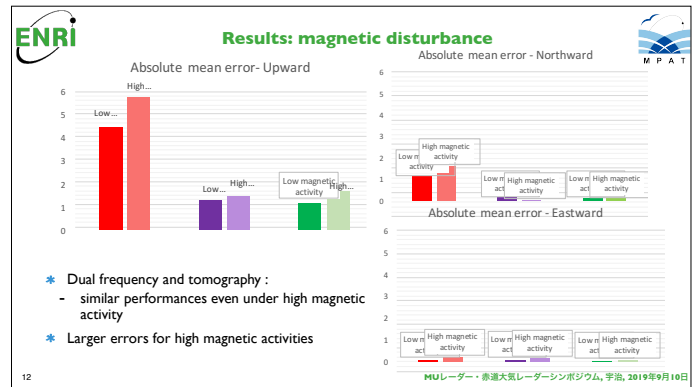
9



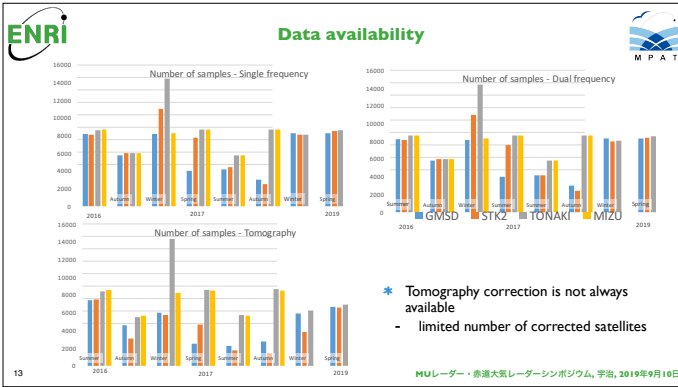
10



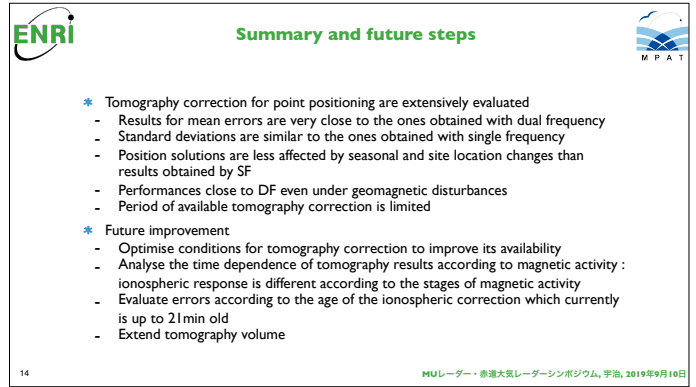
11



12

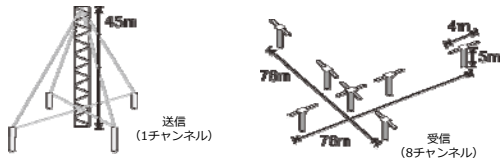


13



14

イオゾンデの受信アレイを用いた電離圏エコー到来方向の推定



西岡未知・前野英生・近藤巧・津川卓也(NICT)

はじめに

- NICTの国内イオゾンデ定常観測は、2017年5月以降、VIPIR2 (Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar 2)で行われている。

	VIPIR2	10C(2001-2017)
パルス	シングルパルス	シングルパルス
観測モード	垂直/斜入射	垂直/斜入射
平均/尖頭電力	32W / 4kW	80W / 10kW
掃引周波数	1-30 MHz	1-30 MHz
レンジ	60-1500km	60-1500km
解像度	16 bit	8 bit
掃引時間	~15 sec	~15 sec
パルス掃引周波数	50-100 Hz (<250 Hz)	50, 100 Hz
送信チャンネル	1 チャンネル	1 チャンネル
受信チャンネル	8 チャンネル	2 チャンネル

- 8チャンネルのアレイアンテナにより、電波到来方向の推定や正/異常波の分離などが可能。
- 将来的には、イオノグラム読み取りパラメータに加え、エコー到来方向等も定常的に提供したい。本研究はその準備段階として、電波到来方向を推定し、その手法の妥当性・特徴を確認することが目的。

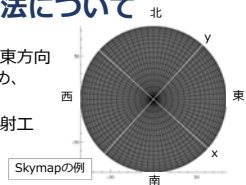
NICTにおけるVIPIR2について



- 送信は45mデルタ、受信は5mダイポール8本を使用。
- 北海道/東京/鹿児島/沖縄の4局。
- 国分寺では、毎時00/15/30/45分に送受信。
- 北海道・鹿児島・沖縄では国分寺観測の75秒前・75秒後・150秒後にそれぞれ送受信。各局で斜入射受信も行う。
- パルス反復周波数は10ms(送信は80μsシングルパルス、受信は、10μsごとに1000回)で1MHz-30MHzを20kHz毎に掃引。

電波到来方向推定手法について

- フーリエ映像法を用い、方位角(北から東方向に正)・天頂角5度ごとに受信強度を求め、skymapとして表示
- 到来方向既知の実験用電波および、斜入射エコーのデータで到来方向を推定した。



フーリエ映像法

各信号 s_i^p (i はアレイ番号、 p はパルス番号)に重みづけをすると、アレイ出力信号 y^p は、

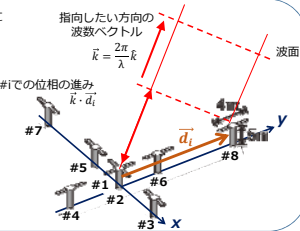
$$y^p = \sum_{i=1}^8 s_i^p w_i$$

ただし、 $w_i = e^{-jk \cdot \vec{d}_i}$

このときの輝度は出力パワーに相当し、

$$P = \sum_{p=1}^{N_p} |y^p|^2$$

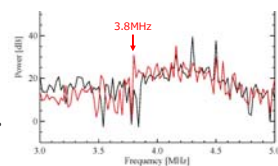
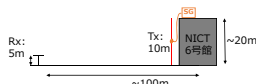
P を任意の所望ベクトル \vec{k} に対して計算する。



実験手法



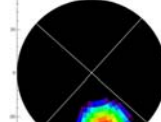
- NICT6号館の屋上より、Signal Generatorを用い微弱電波を送信、アレイアンテナで受信。
- A : 方位角(AZ)190°、天頂角(ZE)85°
- B : 方位角(AZ)175°、天頂角(ZE)85°



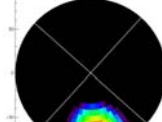
- ノイズの少ない周波数を選び、1.3MHz-28MHzで数点ずつ実験。

実験結果<3.8MHz再現性>

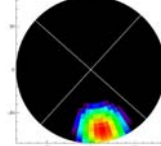
15時58分45秒 (AZ:167°, ZE:50°)



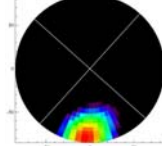
16時00分00秒 (AZ:172°, ZE:50°)



16時01分15秒 (AZ:167°, ZE:55°)

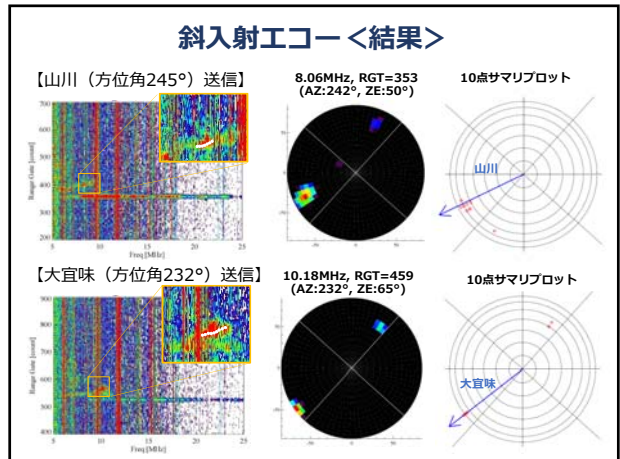
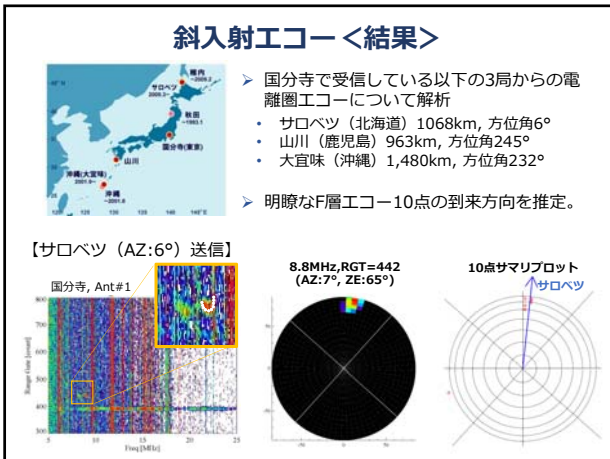
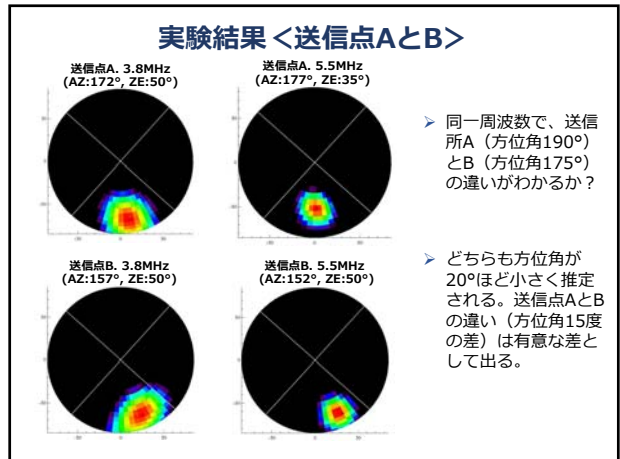
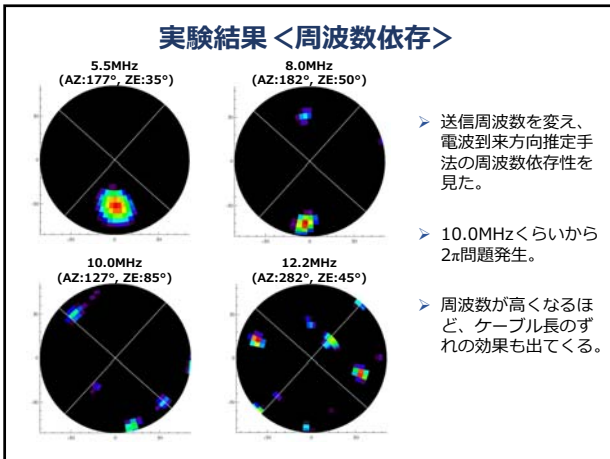


16時02分30秒 (AZ:182°, ZE:70°)



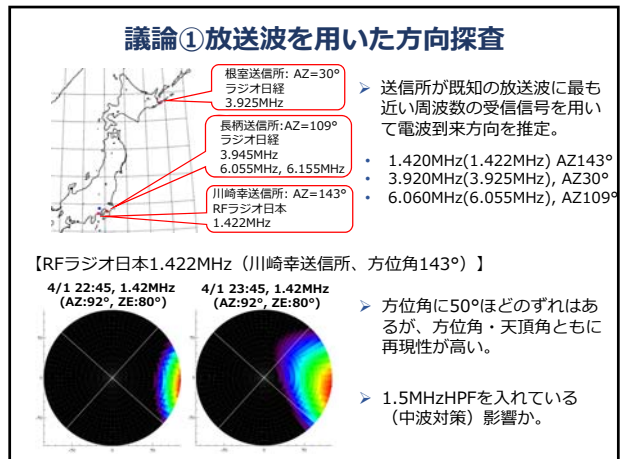
- 3.8MHzの再現性を確認。

- 方位角は167°-182°。送信SGの方位角(AZ=190°)と概ね一致。



観測のまとめ

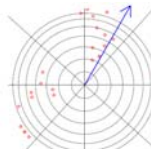
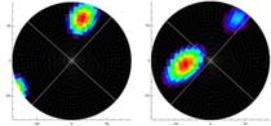
- ▶ VIPIR2の受信アレイアンテナデータを用いて、フーリエ映像法に基づく電波到来方向の推定を行い、その手法の妥当性を確認した。
- ▶ 実験用電波および斜入射の電離圏エコー受信データを用い、10MHz以下であれば当手法が有用であることが示された。方位角の分解能は10°-15°、天頂角の分解能も15°ほどあることがわかった。



議論① 放送波を用いた方向探査

【ラジオ日経3.925MHz（根室送信所、方位角30°）】

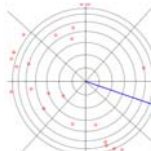
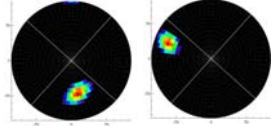
4/1 23:15, 3.92MHz (AZ:12°, ZE:35°) 4/1 23:30, 3.92MHz (AZ:262°, ZE:25°)



▶ 両周波数帯とも、方位角・天頂角に再現性がない。

【ラジオ日経6.055MHz（長柄送信所、方位角109°）】

4/1 22:45, 6.06MHz (AZ:167°, ZE:50°) 4/1 23:00, 6.06MHz (AZ:285°, ZE:50°)



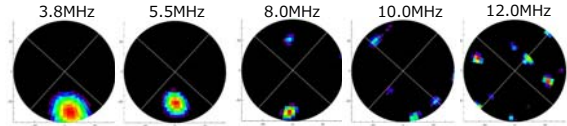
▶ 受信帯域幅の影響？

▶ 放送波変調の影響？

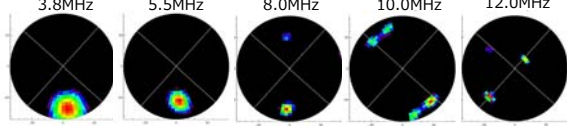
議論② ケーブル長の影響

▶ キャリブレーション信号の各チャンネルの位相を用いて、ケーブル長の補正が可能。

【ケーブル長補正前】



【ケーブル長補正後】



▶ 10MHz以上で補正の効果は見られる。まだ改善の余地はありそう。

まとめ

- ▶ VIPIR2の受信アレイアンテナデータを用いて、フーリエ映像法に基づく電波到来方向の推定を行い、その手法の妥当性を確認した。
- ▶ 実験用電波および斜入射の電離圏エコー受信データを用い、10MHz以下であれば当手法が有用であることが示された。方位角の分解能は10°-15°、天頂角の分解能も15°ほどあることがわかった。
- ▶ 本手法で放送波の到来方向を推定するのは難しいことがわかった。
- ▶ 10MHz以上、1.5MHz以下の部分は、ケーブル長の効果の補正を入れる必要があり、手法の改善が今後の課題。
- ▶ 今後、本格的に電離圏エコーで解析を進めたい。観測モードの変更や、ドップラ速度の導出もできるので、本観測に興味のある方、アドバイスいただける方、是非お声かけください。

Comparison of occurrence characteristics of daytime medium-scale traveling ionospheric disturbances between GPS observation and GAIA simulation

M. Sivakandan¹, Y. Otsuka¹, P. Ghosh¹, H. Shinagawa², Y. Miyoshi³, A. Shinbori¹, T. Tsugawa² and M. Nishioka²

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

2. National Institute of Information and Communication Technology (NICT), Koganei, Tokyo, Japan.

3. Kyushu University, Fukuoka, Japan.

Traveling ionospheric disturbances (TIDs) are wave-like perturbations of the ionospheric plasma. According to the wave parameters such as wavelength, phase speed and period TIDs are categorised into medium and large scale TIDs. Medium scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs) have wavelength, phase speed and period in the range of 100-500 km, 100-250 m/s and 15-90 minutes respectively. Most often, the MSTIDs propagate towards southeast or south during daytime and southwest during nighttime, which gives an evidence showing that generation mechanisms are different between daytime and nighttime. Though the observational results show that occurrence of daytime MSTID is maximum during the winter, the day-to-day and longitudinal variation of occurrence are not yet explored well.

We have analysed total electron content (TEC) data obtained from more than 1,200 GPS receivers in Japan in 2011. To obtain perturbation component of TEC, which could be caused by MSTID, we have subtracted 1-hour running average from the original TEC time series for each pair of satellites and receivers, and converted the slant to vertical TEC. We have defined MSTID activity as dI/I , where dI is the standard deviation of the perturbation component within 1 hour, and I is 1-hour average absolute vertical TEC. MSTID activity is found to be higher in winter than in other seasons. We have compared the observed MSTID activity with the MSTID activity obtained from TEC simulated by the GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere-ionosphere for Aeronomy). To estimate the MSTID activity from the GAIA TEC data, we obtained detrended TEC by subtracting 2-hour running average from the TEC, and calculated standard deviation of the detrended TEC in 2 hours. MSTID activity was obtained as a ratio of the standard deviation to the 2-hour averaged TEC.

Figure 1 top and bottom panel show the GPS observed and GAIA simulated absolute TEC (left side), detrended TEC (middle) and MSTID activity (right side) respectively. Present analysis shows that daytime MSTID activities simulated by the GAIA are also higher in winter (December-February) than in other season, indicating that the GAIA succeeded to reproduce seasonal variation of the MSITD activity during daytime. In addition to this, day-to-day and longitudinal-latitudinal variation of daytime MSTID activity will also be detailed in the presentation.

In order to estimate the correlation between GPS observed and GAIA simulated MSTID activity, Pearson correlation method is used. Before carryout the correlation analysis, we have classified the data into two category viz., mid latitude and low mid latitude.

In figure 2 top panels show the correlation coefficient of observed and model simulated MSTID activity in low mid latitudes and bottom panels represent the correlation at mid latitudes at 11 Japanese standard time (JST). Similarly, correlation of GAIA and GPS observed MSTID activity at 17 JST is shown in figure 3. Our analysis shows that in mid-latitude GAIA simulated MSTID activity have fairly good correlation with the GPS observation. However, the correlation between the GAIA simulated and GPS observed MSTID activity is poor.

Recently, Miyoshi et al., 2018 showed that the wavelength of GAIA simulated daytime MSTIDs ranging from 700-1500 km, however GPS observation daytime MSTIDs wavelength varies from 200-500 km (Otsuka et al., 2013). Thus, we attribute that the difference in the wavelength from the model simulation and observation can be a possible reason for the noted poor correlation. There is another possibility that GAIA may not reproduce all the gravity wave event as such exist in the real atmosphere. However, in order to get a better understanding of the capability of GAIA to reproduce the daytime MSTIDs one should know what parameters controls the occurrence of daytime MSTID in GAIA. In that sense, wind can be a one of the important parameter which will affect the upward propagation of the gravity waves. Therefore, role of background wind in the generation of daytime MSITD need to be studied in future.

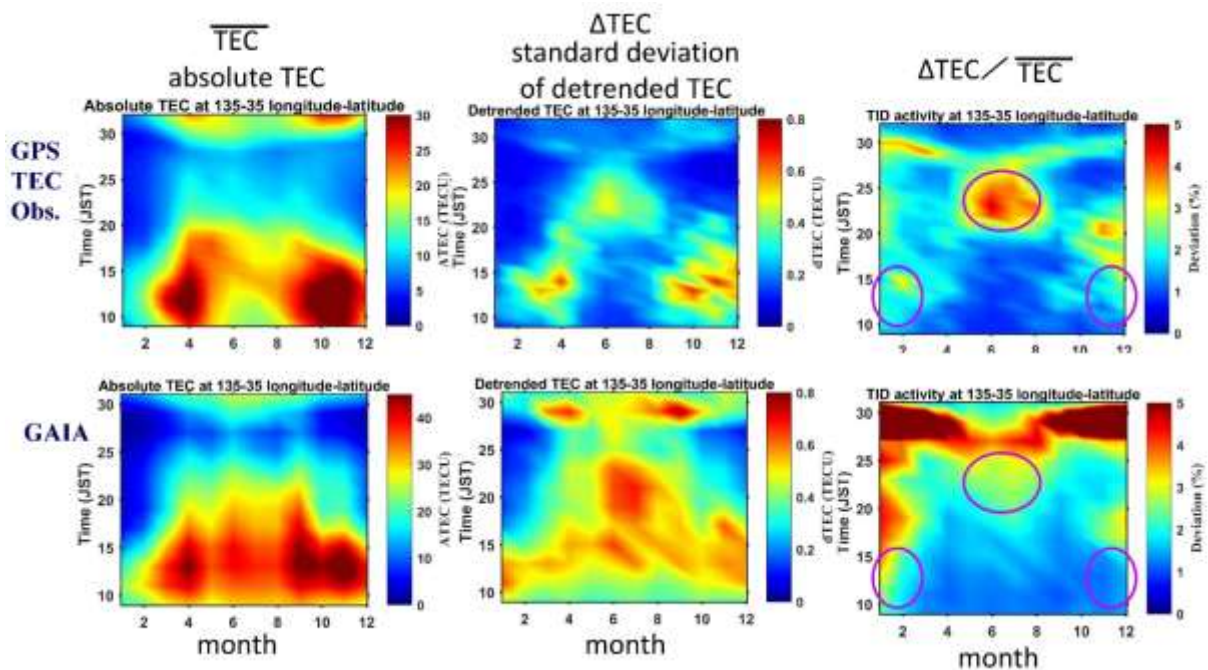


Figure 1 Seasonal variation of MSTID activity obtained from GPS observation and GAIA model simulation

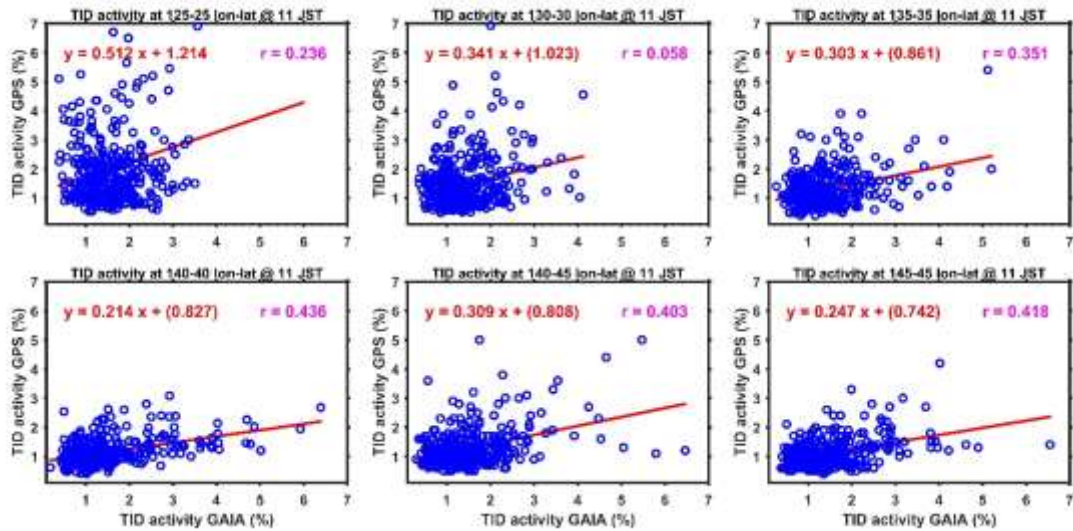


Figure 2 Correlation of GPS observed and GAIA simulated MSTID activity in mid (40-45° latitude) and low mid latitude (25-35°) at 11 JST

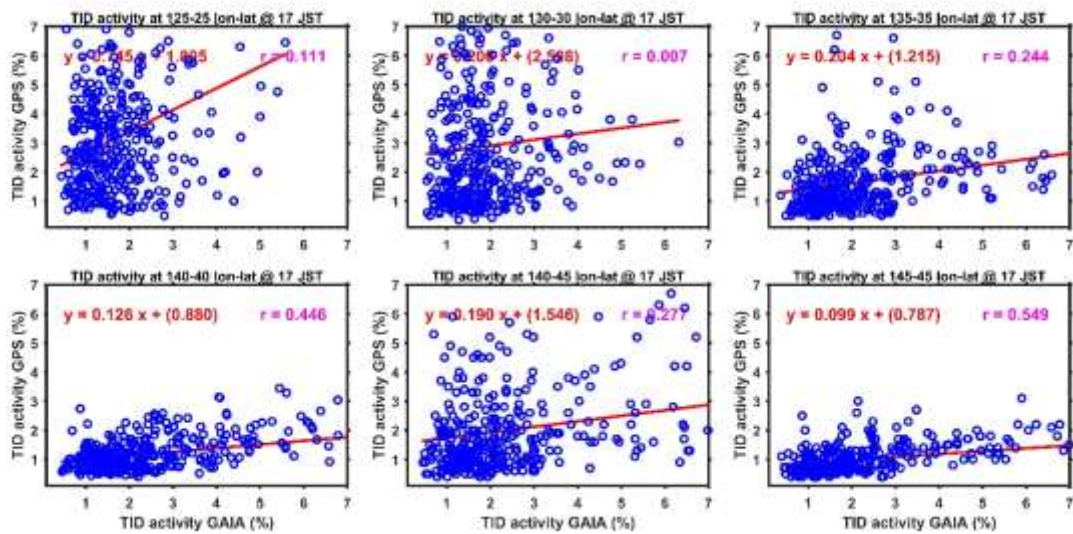


Figure 3 Correlation of GPS observed and GAIA simulated MSTID activity in mid (40-45° latitude) and low mid latitude (25-35°) at 17 JST

In overall summary, our investigation shows that GAIA can successfully reproduce the seasonal variation of the occurrence of daytime MSTID activity. Furthermore, MSTID activity observed in GAIA and GPS observation show fairly good correlation over the mid latitude, however over the low mid latitude the correlation is poor.

References

Otsuka, Y., Suzuki, K., Nakagawa, S., Nishioka, M., Shiokawa, K., and Tsugawa, T.: GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe, *Ann. Geophys.*, 31, 163–172, <https://doi.org/10.5194/angeo-31-163-2013>, 2013.

Miyoshi, Y., Jin, H., Fujiwara, H., & Shinagawa, H. (2018). Numerical study of traveling ionospheric disturbances generated by an upward propagating gravity wave. *J. Geophys. Research: Space Physics*, 123, 2141– 2155. <https://doi.org/10.1002/2017JA025110>

Role of pre-reversal enhancement in the generation of equatorial plasma bubble using observation and model simulations

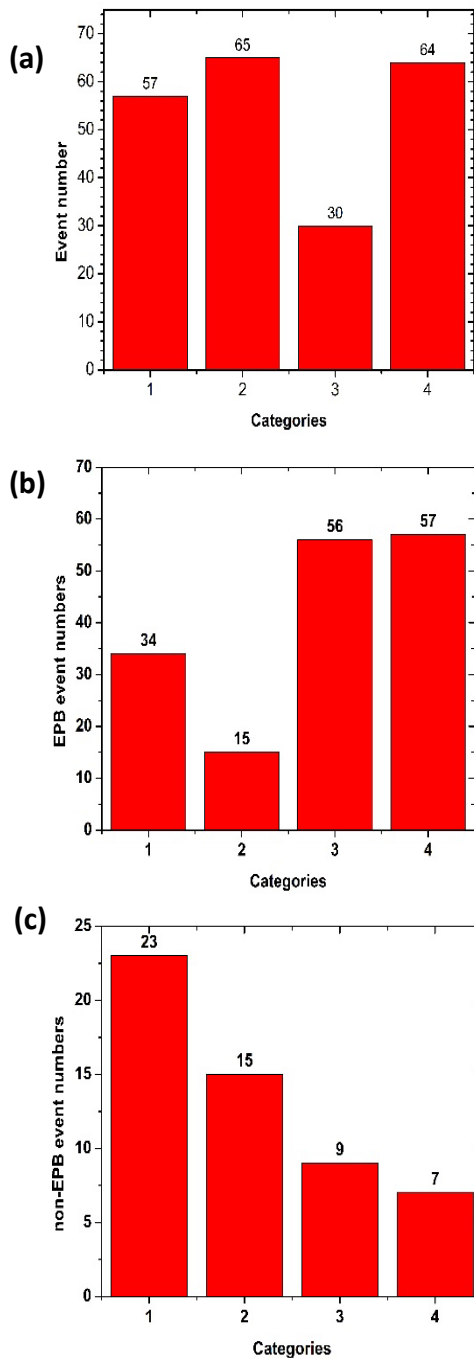
*Priyanka Ghosh¹, Yuichi Otsuka¹, Sivakandan Mani¹, Takuya Tsugawa², Kornyanat Hozumi²
and Hiroyuki Shinagawa²*

¹ *Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan.*

² *National Institute of Information and Communications Technology, Koganei, Tokyo, Japan*

The equatorial plasma bubble (EPB) or equatorial spread-F (ESF) generated during post sunset hours as large regions of low ionospheric plasma density are well-known due to their unique nature and adverse effects on communication and navigation systems. Although the Rayleigh Taylor instability (RTI) is known to be the governing mechanism of EPB, the exact seeding mechanism is not clear yet. Pre-reversal enhancement (PRE) is generated due to the enhancement of the eastward electric field at the evening terminator (at the magnetic equator) which further enhances the resulting $E \times B$ drift. PRE is believed to be one of the main controlling factor for the generation of EPB. There have been studies to show the connection of the PRE on the generation of EPB observed by the C/NOFS satellite (Huang et al., 2015). Using Ground-to-topside model of Atmosphere-ionosphere for Aeronomy (GAIA), daily and seasonal variation of the RTI growth rate simulated and the obtained results are compared with EPB occurrence rate (Shinagawa et al., 2018). However, the day-to-day variation of GAIA generated PRE is not compared with observation and the probable mechanism controlling the PRE in GAIA model is also not explored.

In the present study, ionosonde observations at Chumphon (10.7°N, 99.4°E; 0.86°N magnetic latitude) in Thailand and Bac Lieu (9.3°N, 105.7°E; 0.62°N magnetic latitude) in Vietnam are used to calculate upward drift velocity of the F layer, corresponding to PRE during the equinoxial months of March, April, September and October of 2011-2013. The observations are compared with the whole atmosphere ionosphere coupled model Ground-to-topside model of Atmosphere-ionosphere for Aeronomy (GAIA) consisting of three models (an ionosphere model, a neutral atmosphere model, and an ionospheric electrodynamic model). The virtual height ($h'F$) are manually scaled from the ionograms at time intervals of 5 min between 17:00 and 24:00 LT (LT = UT + 7 h) during 01-16 March 2011 (equinoxial month) over Chumphon (10.7°N, 99.4°E; 0.86°N magnetic latitude) in Thailand. The vertical drift is derived from rate of change of $h'F$ ($dh'F/dt$ with $h'F$, above 300 km) is considered as an indicator for vertical motion during the evening time. In our analysis, we have taken 3-point running average to smooth the vertical drift so now the temporal resolution of ionosonde becomes 15 min while in case of GAIA it is 30 min. In case of GAIA model simulations, the vertical component of plasma drift due to the zonal component of the electric field E at the magnetic equator is derived using the electric field and magnetic field data (in the eastward, southward and upward direction). The observation period (01-16 March 2011) is classified in two categories: EPB occurrence day (8 days) and non-EPB occurrence day (7 days). It is observed that the vertical drift obtained using ionosonde ranges between 40-68 m/s on the EPB occurrence day and 15-40 m/s during the days with no EPB. In the GAIA model simulations, the vertical drift varies from 12-45 m/s during the days with EPB while it ranges between 20-45 m/s during the non-EPB days.



The analysis is extended for all the event days over Chumphon and Bac Lieu during March – April 2011-2013. Out of 216 event days, 162 events were EPB days and 54 days were non-EPB days (shown in **Figure 1**). The event days are categorized in four groups: (a) Observed PRE < 30 m/s and GAIA PRE < 30 m/s, (b) Observed PRE < 30 m/s and GAIA PRE ≥ 30 m/s, (c) Observed PRE ≥ 30 m/s and GAIA PRE < 30 m/s, (d) Observed PRE ≥ 30 m/s and GAIA PRE ≥ 30 m/s. The categories are selected in such a way that they can symbolise how PRE values the EPB (Category 1) and non-EPB days (Category 4) are reproduced in GAIA simulations along with the cases when GAIA overestimates (Category 2) or underestimates (Category 3) the PRE observed in ionosonde. It is seen that GAIA is able to reproduce the PRE seen in ionosonde but in most of the cases, GAIA underestimates the ionosonde observed peak PRE values. Correlation coefficient of the ionosonde observation and GAIA simulation is poor. The peak PRE values obtained from ionosonde and GAIA is compared and it is observed that although the difference between the peak PRE values varies within 20 m/s, there are stances when the difference reaches 40-60 m/s which may contribute to the poor correlation coefficient of the observation and model simulation.

According to Farley et al. (1986), the eastward wind in the F-region is related to PRE generation mechanism. However, the role of E-region wind on PRE generation is not studied. It is observed that the PRE is large when the E-region wind is westward at sunset. The detailed analysis of the eastward neutral wind in the E-region will be carried out in future to check if there is any link between the E-region wind and PRE.

Figure 1. Comparison of peak PRE obtained from ionosonde and GAIA over Chumphon and Bac Lieu during March-April (2011-2013).

References:

1. Huang, C.-S., and M. R. Hairston (2015), The postsunset vertical plasma drift and its effects on the generation of equatorial plasma bubbles observed by the C/NOFS satellite, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **120**, 2263–2275, doi:10.1002/2014JA020735.
2. Shinagawa, H., H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, T. Yokoyama and Y. Otsuka (2018), Daily and seasonal variations in the linear growth rate of the Rayleigh-Taylor instability in the ionosphere obtained with GAIA, *Progress in Earth and Planetary Science*, **5:16**, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0175-8>

3. Farley, D. T., E. Bonelli, B. G. Fejer and M. F. Larsen (1986), The prereversal of the zonal electric field in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **91**, 13,723-13,728.

第13回 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

衛星ビーコン観測に基づくアジア域の電離圏赤道異常の日変化・季節変化の研究

坂本悠記¹, 山本衛¹, 穂積コンヤナツト²

1. 京都大学 生存圏研究所
2. 情報通信研究機構

目次

- 1 研究背景
- 2 ビーコン衛星観測を用いた東南アジアでの電離圏観測
- 3 TEC推定手法の開発
- 4 赤道異常の統計解析
- 5 赤道異常の南北非対称性の解明
- 6 結論

研究背景 / 目的

— 研究背景 —

- ・近年自動運転技術などでGPSの精度向上が求められている。そのため電離圏構造やその現象解明は不可欠となっている。
- ・我々は電離圏の構造解明のために東南アジア地域でビーコン衛星による電離圏観測を実施している。
- ・これまで本観測による電離圏全電子数(TEC)の計算に大きな時間がかかっていた。

— 目的 —

1. 電離圏観測によって得られたデータからTEC算出手法開発
2. この手法によって得られたTEC分布をデータベース化
3. このデータを用いて低緯度地域におけるTEC変動現象(赤道異常)の解明

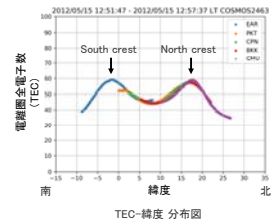
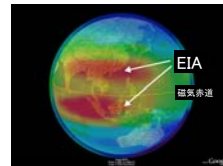
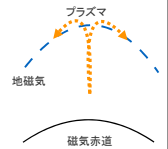
3

赤道異常について

— 赤道異常 (EIA) —

昼間の東向きの電場と地磁気による効果で赤道上空の電離層が持ち上げられ、磁力線に沿って噴水のように磁気赤道の南北に落ちてくることで作られる領域。

赤道異常の発達具合はGPSなどの精度に影響を与えるが、現象の発達速度は日によって大きく異なり予測困難。



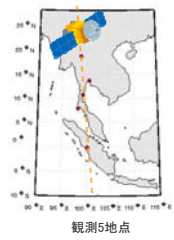
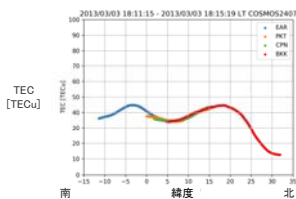
衛星ビーコン観測ネットワーク

— 観測ネットワーク —

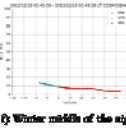
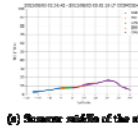
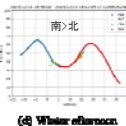
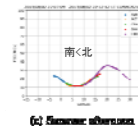
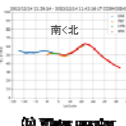
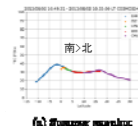
- ・東経100度 南緯0.2度-北緯18.2度にかけて5地点に受信機を配備。(Kototabang, Phuket, Chunphon, Bangkok, Chiangmai)
- ・受信機にはGRBR(GNU Radio Beacon Receiver)を使用。

— 観測衛星 —

- ・極軌道衛星: COSMOS 2454, 2429, 2414, 2463, 2407, RADCAL, DMSP-F15
- ・期間: 2012年3月 ~ 2015年9月
- ・有効データ数: 約7800 衛星パス



TEC分布変化サイクル

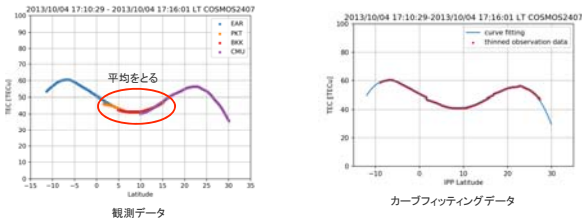


季節・時間帯によって赤道異常におけるTEC分布の南北非対称性に左図のような傾向があるとわかった

TEC分布の関数化

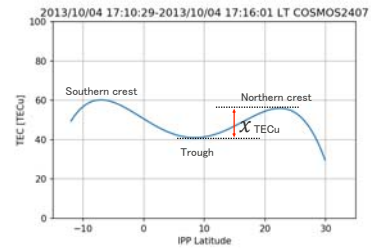
データを扱いやすくするためにTEC分布を関数化した

- 観測データを緯度0.1度単位に間引く
- 重なっている観測範囲は平均値をとる
- TEC分布グラフに対して4次元関数カーブフィッティングを実施



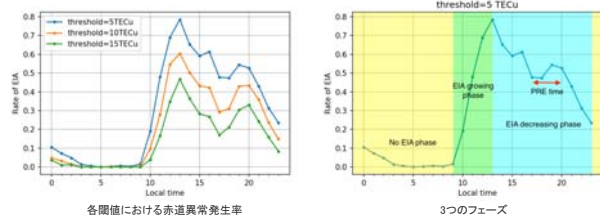
赤道異常の定義

- 本研究では以下の条件で赤道異常を定義した
- 関数が観測範囲内(-15度~30度)で2つの極大値と1つの極小値をもつ
 - 極小値と極大値の差が閾値 ΔTEC_u 以上である



各時間における赤道異常発生率

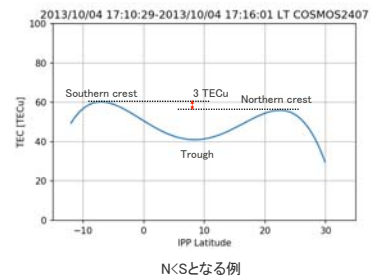
各時間のデータ総数に占める赤道異常を示すデータの割合を調べた



- EIA成長フェーズ: 9:00~13:00LT, 赤道異常の割合が増加する時間帯
 EIA減衰フェーズ: 13:00~23:00LT, 赤道異常の割合が低下する時間帯
 (PRE発生時間: 17:00~20:00LT, Pre-Reversal Enhancementが発生する時間帯)
 EIAなしフェーズ: 23:00~9:00LT, 赤道異常がほぼ見られない時間帯

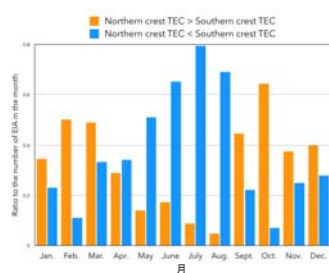
赤道異常南北非対称性の大小関係の定義

- 本研究では以下の条件で南北大小関係を定義した
- N>S: 北crestのTEC-南crestのTEC > 3 TECu
 - N<S: 南crestのTEC-北crestのTEC > 3 TECu



赤道異常南北非対称性の大小関係(成長フェーズ)

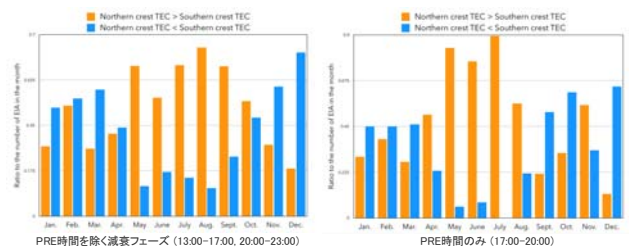
EIA成長フェーズ(9:00~13:00LT)における南北大小関係を調査した。(2012~2015)
 2012~2015年の期間について、各月の赤道異常を示すデータ数に対するN>S, N<Sのデータ数の割合を求めた。



- 4~8月(北半球の夏期)では、赤道異常は北crest<南crestとなる傾向がある。
 9~3月(北半球の冬期)では、赤道異常は北crest>南crestとなる傾向がある。

赤道異常南北非対称性の大小関係(減衰フェーズ)

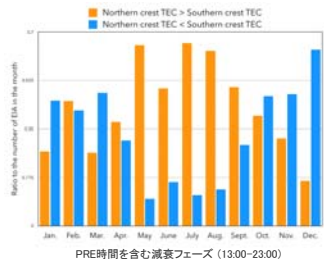
EIA減衰フェーズ(13:00~23:00LT)においてPREがある時間とない時間での南北大小関係を調査した。(2012~2015)



PREに関わらず減衰フェーズでは南北大小関係は基本的に変わらない

赤道異常南北非対称性の大小関係(減衰フェーズ)

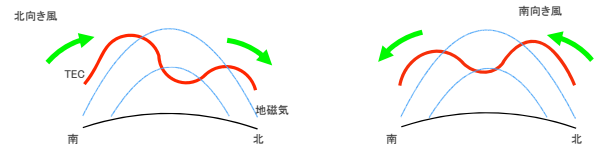
EIA減衰フェーズ(13:00-23:00LT)において南北大小関係を調査した。(2012-2015)



4-9月(北半球の夏期)では、赤道異常は北crest>南crestとなる傾向がある。
10-3月(北半球の冬期)では、赤道異常は北crest<南crestとなる傾向がある。

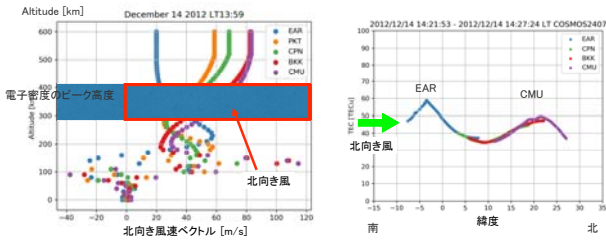
先行研究

熱圏での北向き風(南向き風)は北半球側(南半球側)の電離圏高度を押し下げる。結果として電子の再結合が促進されるので風下側のTECは減少する。(Wattanasangmechai et al. 2015)
→ 2012年3月での先行研究だったので、2012-2015年のデータを用いて検証した。



GAIAでの検証 (2012/12/14 14LT 減衰フェーズ)

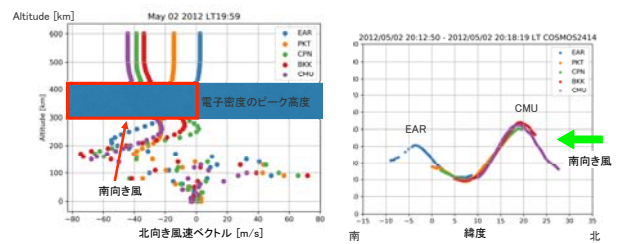
GAIAでの風速シミュレーションの結果



風上側TEC > 風下側TEC が確認できる

GAIAでの検証 (2012/5/2 20LT 減衰フェーズ)

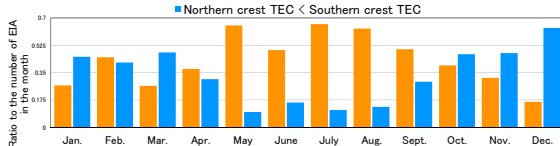
GAIAでの風速シミュレーションの結果



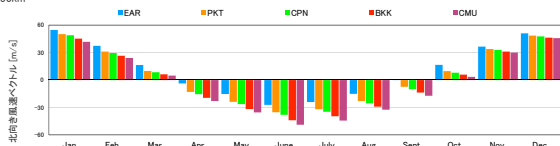
風上側TEC > 風下側TEC が確認できる

赤道異常の南北非対称性と風向きとの関係性 (減衰フェーズ)

2012-2015, 13:00-23:00の平均



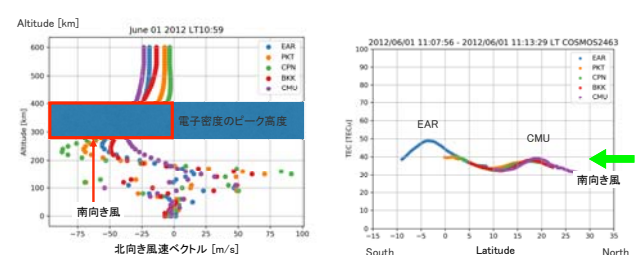
2012-2015, 13:00-23:00の平均
Alt=350km



先行研究によると北向き風(南向き風)は南crest>北crest(南crest<北crest)となる。この結果は長期間の検証において先行研究を支持する結果となった。

GAIAでの検証 (2012/6/1 11LT 成長フェーズ)

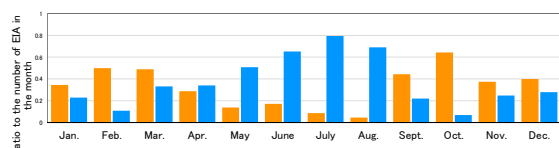
GAIAでの風速シミュレーションの結果



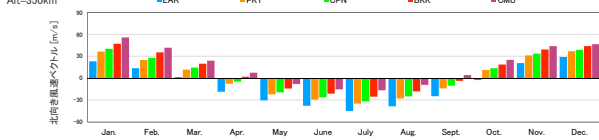
風上側TEC < 風下側TEC とこれまでの結果と異なる

赤道異常の南北非対称性と風向きとの関係性 (成長フェーズ)

2012-2015, 9:00-13:00の平均
 Northern crest TEC > Southern crest TEC (成長フェーズ)



2012-2015, 9:00-13:00の平均

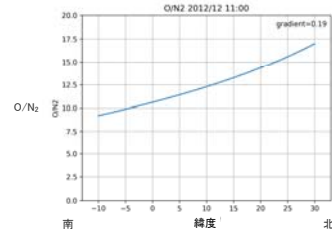


北向き風 (南向き風)は南crest<北crest (南crest>北crest)となる。
 この結果は長期間の検証において先行研究と正反対の結果となった。

MSISによるO/N₂の緯度分布

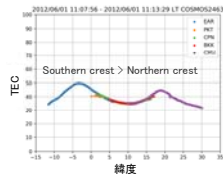
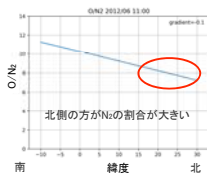
熱圏中の原子分子構成に注目した。
 経験的大気モデルであるMSISを用いてO/N₂の緯度分布を算出した。
<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>

以下はO/N₂の緯度分布図の例 (2012年12月 11LT, 高度=350km, 経度=100E)
 傾き(gradient)は最小二乗法により算出

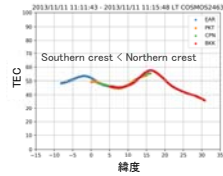
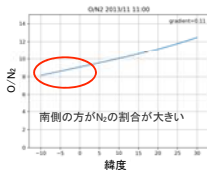


赤道異常の南北非対称性とO/N₂比の比較

例1:
 2012年6月
 11:00LT

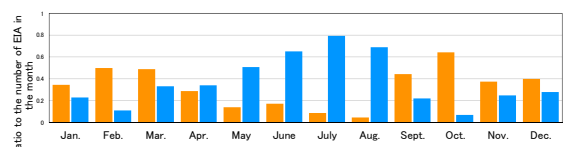


例2:
 2013年11月
 11:00LT

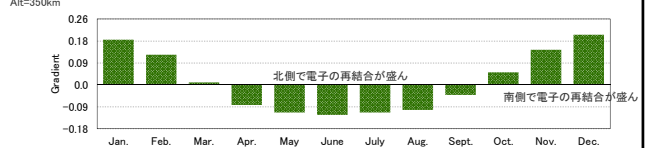


赤道異常の南北非対称性と(O/N₂)-緯度グラフ傾きの関係性 (成長フェーズ)

2012-2015, 9:00-13:00の平均
 Northern crest TEC > Southern crest TEC



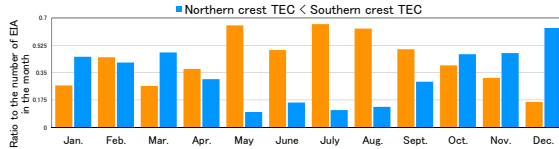
2012-2013, 9:00-13:00の平均



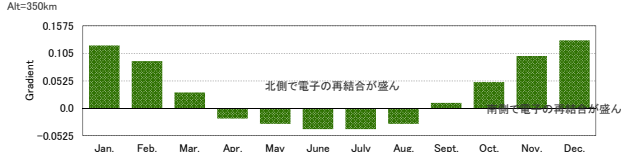
成長フェーズ(9:00-13:00)では赤道異常の南北非対称性は原子分子構成比によって支配される。

赤道異常の南北非対称性と(O/N₂)-緯度グラフ傾きの関係性 (減衰フェーズ)

2012-2015, 13:00-23:00の平均
 Northern crest TEC > Southern crest TEC



2012-2013, 13:00-23:00の平均



減衰フェーズ(13:00-23:00)では赤道異常の南北非対称性は原子分子構成比によって支配されない。

結論

- TEC推定手法を考案し、広範囲(タイ-インドネシア)長期間(2012-2015)高精度のTEC分布を得た。
- 得られたTEC分布などをNetCDF形式でデータベース化した。

赤道異常におけるTEC分布形は常に風や大気中の原子分子との再結合に影響を受けるが、本研究では以下のことがわかった。

- 9:00-13:00は赤道異常の成長フェーズである。この時間帯の南北非対称性は風向きではなく大気中の原子分子の構成に支配される。
- 13:00-23:00は赤道異常の減衰フェーズである。この時間帯の南北非対称性は大気中の原子分子の構成ではなく風向きに支配される。

Overview of the new VHF radar project in Chumphon, Thailand

Kornyanat (Kukkai) Hozumi,

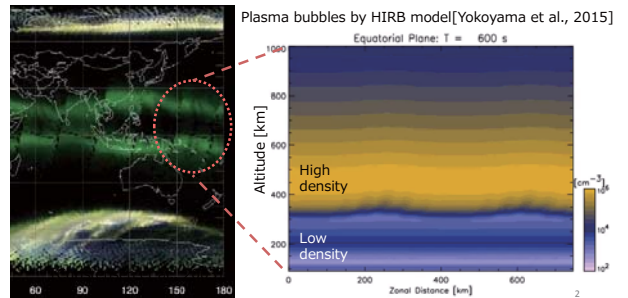
Takuya Tsugawa, Shiniji Hama (NICT),

Punyawi Jamjareegulgarn (KMITL PCC), Pornchai Supnithi (KMITL),
Susumu Saito (ENRI), Yuchi Otsuka (Nagoya Univ.)

1

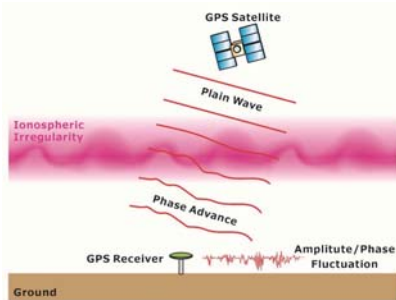
EPB (Equatorial Plasma Bubble)

Plasma Bubble is a ionospheric “Bubble” generating in the ionosphere over the magnetic equator just after the sunset. It is one of the **source of largest error of GNSS in low-latitude region** due to spatial gradient of TEC and GNSS scintillation.



2

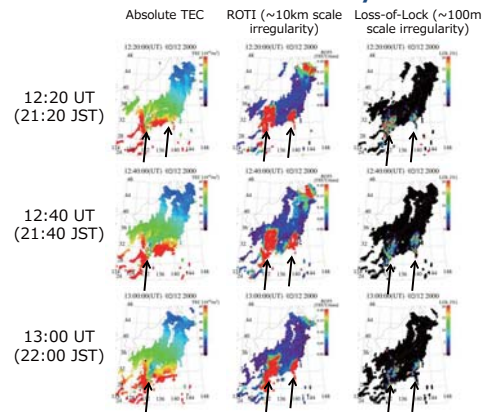
GPS scintillation



- Several 100m scale ionospheric irregularity causes GPS scintillation which results in loss-of-lock on GPS signals in the worst case.

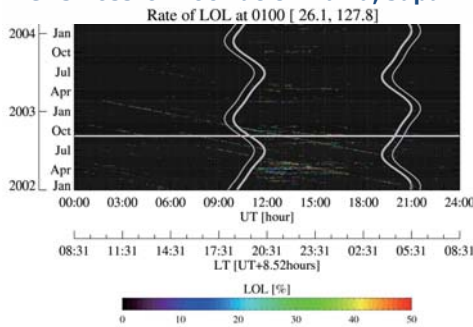
3

GPS Loss-of-Lock Caused by Plasma Bubble



4

GPS Loss-of-Lock at Okinawa, Japan

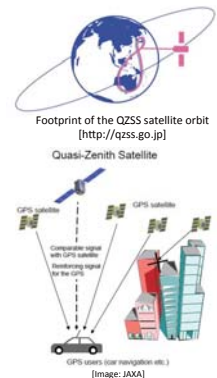


- Rate of LOL of 2 or more GPS satellites during 2002-2006.
- During **Mar-Apr in 2002**, the RLOL in the nighttime (21-24 JST) exceeds 30% (**once per three days on the average**).

5

QZSS for precise positioning

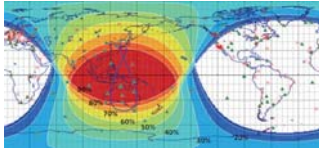
- JAXA and the government of Japan have **operated** the Quasi-Zenith Satellite System (**QZSS**) since **2010**. Four QZSS satellites are operated now.
- QZSS combines with other GNSS such as GPS to increase the number of satellites especially at the areas among buildings and mountains.
- In addition, there are some **high-precision positioning services** using reinforcement information (e.g., ionospheric delay) from QZSS
 - **SLAS**: sub-meter level augmentation service based on DGPS
 - **CLAS**: cm level augmentation service based on RTK-PPP



6

Is it possible to expand QZSS services to overseas?

- These **services are now available only in Japan**, will be expanded in the world.
- In the low-latitude region such as **Southeast Asia**, the **ionospheric variation is large due to plasma bubble**, equatorial anomaly, etc., and the observation network to make reinforcement information is not substantial compared to Japan.
- In order to **expand the use of QZSS overseas**, it is necessary to **verify that the precise positioning technique using QZSS can demonstrate the same performance in the low-latitude region as in Japan.**



Availability of QZSS

7

“Ionospheric effects on GNSS” project

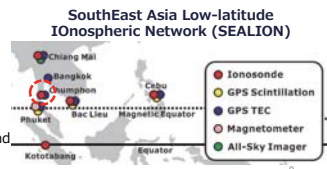
- Since 2017, NICT have started the research program (2017-2019) to **verify the ionospheric effects on the precise positioning technique** using GNSS including QZSS as a collaborative research with the Ministry of Internal Affairs and Communications.
- This project consists of
 - Empirical investigation on the ionospheric effects on GNSS positioning in the southeast Asia region
 - **More precise observations of plasma bubbles to determine their location, generation time, and scale by means of additional ionospheric measurements.**
 - Investigation of ionospheric effects on individual positioning techniques (single frequency, DGPS, and RTK-PPP) and consideration of methods to mitigate and/or prevent the positioning errors under severe ionospheric conditions.

8

For precise observation of EPB structures

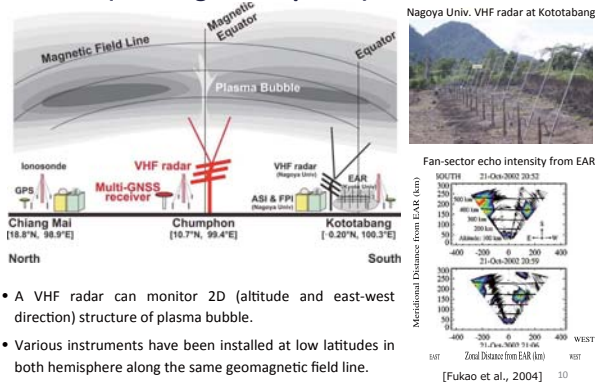
- It is important to identify which satellite-receiver path suffers from plasma bubble structures for verifying the ionospheric effects on GNSS positioning.
- Among several observation methods for plasma bubble listed below, **we decided to install VHF radar at the magnetic equator. Chumphon is the best site for its installation.**

- Ionosonde: only occurrence of spread-F due to plasma bubble
- All-sky imager: 2D structures (at clear sky conditions)
- GNSS receiver network: 2D structures (dense network is needed)
- **VHF radar: 3D structures (assuming extent along the magnetic field line)**
- IS radar: 3D structures (very expensive both for installation and operation)



9

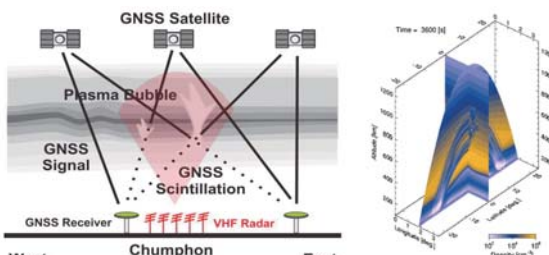
A new VHF radar project in Chumphon (the magnetic equator), Thailand



- A VHF radar can monitor 2D (altitude and east-west direction) structure of plasma bubble.
- Various instruments have been installed at low latitudes in both hemisphere along the same geomagnetic field line.

[Fukao et al., 2004]

Concept of VHF radar monitoring of plasma bubbles for GNSS



[Yokoyama et al., 2014]

- Backscatter radar detects plasma bubbles in the radar beams
- Satellite ray-paths crossing the same magnetic field lines as the detected plasma bubbles are rejected.

11

Events (selected) for Chumphon VHF radar

- 2018 Apr:** Face-to-face meeting with NBTC (Thailand) for explanation of VHF radar system, and negotiation for frequency usage sharing with Thai army.
- 2018 May:** Contract started for VHF radar project.
- 2018 Jun:** Area permission for VHF radar from KMITL.
- 2018 Aug:** Kick-off meeting at KMITL Chumphon campus.
- 2019 Mar:** NBTC public hearing for Thailand frequency planning issue.
- 2019 May:** Clearing + flattening the area, and electrical construction.
- 2019 Jun:** Radar hut installation, and 180-day frequency permission @ 39.65 MHz from NBTC.
- 2019 Nov:** Installation of VHF radar equipment, and press release in Thailand.
- 2019 Dec:** Start observations.
- 2020 Jan:** Opening ceremony + international workshop.

12

Some activities



Negotiation for frequency usage sharing with Thai army



NBTC public hearing



Kick-off meeting

13

VHF radar area and specification



- 18 Yagi 130m
- 9 beams $\pm 60^\circ$ (azimuth) zenith angle of $\sim 0^\circ$
- Operating frequency: 39.65 MHz (25kHz BW)
- Peak power : 20 kW
- Average power : 1.5kw
- Range: 1000 km (latitudinal coverage up to Northern Thailand $\sim 20^\circ N$)
- Beam cycle: 1-2 min (Pulse-to-pulse beam switching)

14

Site surveying & preparation



Site surveying



Site preparation

15

Radar hut installation



Radar hut installation

Thanks to the heavy rain, we realized that the door needs to be fixed.

16

VHF radar site: Before and after



Other R&D plans for ionospheric observations



- Installing **multi-GNSS scintillation monitor** (Septentrio PolarRX5s) to multi-GNSS receivers at the **three magnetic equator sites** in June-Sep in 2019.
- Investigating quantitative relationship between ionospheric phenomena and GNSS positioning/navigation errors.
- Developing useful indices and scales of ionospheric disturbances for the GNSS positioning errors.
- Method to mitigate and/or prevent the GNSS large positioning errors.

18

Summary

- The new VHF radar will be installed soon in Chumphon, (magnetic latitude station) Thailand.
- The operating frequency was approved at 39.65 MHz.
- The press release will be done in Bangkok in November 2019.
- The first operation is planned to be in December 2019.
- The opening ceremony and international workshop will be held in Chumphon in January 2020.
- Scientific as well as engineering collaborations are welcome.