

第322回 生存圏シンポジウム

第10回  
MU レーダー・赤道大気レーダー<sup>シナジー</sup>  
シンポジウム

平成28年9月8日・9日

京都大学生存圏研究所



## は　じ　め　に

滋賀県甲賀市信楽町に位置する MU レーダーは、完成当初の昭和 59 年から全国共同利用に供され、広範な学問分野に渡る多くの成果を上げ続けている。平成 16 年に導入された「MU レーダー観測強化システム」では、レーダーイメージング観測が可能になるなど、常に世界で最も高機能な大型大気レーダーの一つとして活躍を続けている。MU レーダーは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) より、IEEE マイルストーンに認定された。また、MU レーダー・赤道大気レーダーのデータベースの重要性が認められ、生存圏研究所は 2016 年 3 月に ICSU(国際科学会議) の WDS(世界科学データシステム) の Regular Member に認定された。来年 3 月には学内予算により「MU レーダー高感度観測システム」を導入予定で、送受信制御ユニットなどの一部が更新され、受信感度が向上する見込みである。

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、平成 12 年度末に完成した大型大気観測用レーダーで、京都大学生存圏研究所(RISH) とインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)との協同運用により長期連続観測が続けられている。平成 13~18 年度に実施された科研費・特定領域研究「赤道大気上下結合(CPEA)」において、その中核設備として利用され、平成 17 年度から EAR 及びその関連設備の共同利用を開始した。当初から国際共同利用にも供しており、海外の研究者による共同利用が全課題数の約 3 割を占めている。EAR の完成から 15 周年を記念して、平成 28 年 8 月 4 日にジャカルタ Sari Pan Pacific ホテルにおいて、赤道大気レーダー 15 周年記念行事を開催した。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ープラン「学術大型研究計画」(マスターープラン 2014) 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 にも選定されている。

平成 28 年 9 月 8 日・9 日に、京都大学宇治キャンパスの木質ホールにおいて第 10 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や計画について 22 件の研究発表があり、活発な議論が行われた。

来年 5 月には、第 15 回 MST レーダーワークショップを東京において主催する予定である。共同利用の成果についても多くの発表が行われることが期待される。

平成 28 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)	
EAR・気象レーダー観測に基づいた西スマトラ山岳域での季節内変動に伴う対流活動に関する研究	4
柴垣佳明(大阪電通大)・橋口浩之(京大 RISH)・下舞豊志(島根大)・山中大学(JAMSTEC)	
スマトラ島南西沿岸域における Pre-YMC2015 海陸同時キャンペーン観測の概要	7
森修一・勝俣昌己・米山邦夫(JAMSTEC)・鈴木賢士(山口大)・Noer Hayati (BMKG, Indonesia)・Fadli Syamsudin (BPPT, Indonesia)	
2015 年 12 月にコトタバンで観測された波動にともなう水蒸気・雲変動	9
鈴木順子・荻野慎也・城岡竜一(JAMSTEC)・橋口浩之(京大 RISH)・阿保真・柴田泰邦(首都大)	
海大陸西岸の「重力波族」による海陸境界層～対流圏界層結合(背景と速報)	11
山中大学・荻野慎也・米山邦夫(JAMSTEC)・Bengkulu 観測班(JAMSTEC・首都大・BPPT・BMKG)・みらい観測班(JAMSTEC)	
アジア太平洋地域における電離圏全電子数勾配特性	17
斎藤亨(電子航法研)	
Optical and radio observations of post-midnight irregularities at magnetically low-latitudes	20
Tam Dao・Yuichi Otsuka・Kazuo Shiokawa (名大 ISEE)・Michi Nishioka (NICT)・Mamoru Yamamoto (京大 RISH)・Suhaila M Buhari・Mardina Abdullah (Universiti Kebangsaan Malaysia)	
Equinoctial asymmetry in the east-west distribution of scintillation occurrence and latitudinal variation of zonal scintillation drift and neutral wind	24
Prayitno Abadi・Yuichi Otsuka・Kazuo Shiokawa (名大 ISEE)・Clara Y Yatini (LAPAN, Indonesia)	
高精細プラズマバブルシミュレーションと地上・衛星観測との比較	27
横山竜宏・陣英克・品川裕之(NICT)・Claudia Stolle (GFZ Potsdam, Germany)	
新・衛星＝地上ビーコン観測と赤道大気レーダーによる低緯度電離圏の時空間変動の解明	30
山本衛・岩田桂一(京大 RISH)・松永真由美(愛媛大)・斎藤昭則(京大理)・斎藤亨(電子航法研)・横山竜宏・陣英克(NICT)・Huixin Liu(九大理)・大塚雄一(名大 ISEE)	
GEONET GPS-TEC 観測に基づく電離圏 3 次元トモグラフィーとその応用	33
山本衛・水野遼(京大 RISH)・斎藤昭則(京大理)・斎藤亨(電子航法研)	
新しい衛星ビーコン観測用デジタル受信機の開発	37
岩田桂一・山本衛(京大 RISH)	
ELF-VLF 帯電磁界計測に基づいた雷放電観測による積乱雲早期検知の検討	42

山下幸三(サレジオ高専)・高橋幸弘(北大)・増田拓・岩男辰雄・虫明一彦(いろはプロジェクト)	
MU レーダー実時間アダプティブクラッター抑圧システムの開発	45
橋口浩之・万城孝弘・久保田匡亮・山本衛(京大 RISH)・佐藤亨(京大情報)・西村耕司(NIPR)・橋本大志(京大情報)	
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活用について	49
吉原貴之・毛塚敦・齋藤亨・古賀禎・瀬之口敦(ENRI)・古本淳一(京大 RISH)	
Ku 帯高仰角衛星回線における対流圏シンチレーションと大気乱流の関係	52
前川泰之・柴垣佳明(大阪電通大)	
小型無人航空機・MU レーダー同時観測実験	57
森昂志・橋口浩之(京大 RISH)・Lakshmi Kantha・Dale Lawrence・Tyler Mixa (Colorado 大, 米)・Hubert Luce (Toulon 大, 仏)・Richard Wilson (LATMOS, 仏)・津田敏隆・矢吹正教(京大 RISH)	
グライダーとリモートセンサーを用いた下部対流圏の微細構造の観測	61
藤吉康志・佐藤博紀(北大)	
EAR と MRR を用いた風と BB の関係の検討	64
永田哲規・下舞豊志(島根大)・橋口浩之(京大 RISH)	
赤道大気レーダ EAR と人工衛星 GPM/DPR から得られた降雨強度プロファイルの比較及び検討	70
Tengfei Ou・下舞豊志(島根大)・橋口浩之 (京大 RISH)	
赤道ライダーと CALIOP 衛星データ解析による赤道域火山起源成層圏エアロゾルの動態	73
阿保真・柴田泰邦・長澤親生(首都大)	
EAR-RASS による赤道域の気温プロファイルの観測に関する研究	76
田畠啓・津田敏隆(京大 RISH)	



# 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」を導入予定で、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)する見込みである。

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

MU レーダーは「世界初のアクティブ・フェーズド・アレイ方式の大気レーダー」として、2014 年 11 月に IEEE マイルストーンに認定された。これは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である IEEE が、IEEE の分野における歴史的偉業に対して認定する賞で、認定されるためには 25 年以上に渡って世の中で高く評価を受けてきたという実績が必要である。

## 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

ら今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 の完成から 15 周年を記念して、2016 年 8 月 4 日にジャカルタ Sari Pan Pacific ホテルにおいて、生存圏研究所とインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)の共催により、赤道大気レーダー15 周年記念行事が行われた。インドネシア大使館 本清耕三公使、インドネシア研究・技術・高等教育省(RISTEKDIKTI) Muhammad Dimyati 研究開発総括官、京都大学 稲葉カヨ理事・副学長らが祝辞を述べた。

EAR は MU レーダーに比べて送信出力が 1/10 であり、中間圏や電離圏の IS 観測を行うには感度が不足している。また、受信チャンネルは 1 個のみであるため、空間領域のイメージング観測ができないなど、機能面でも MU レーダーに劣っている。下層大気で発生した大気波動が上方へ伝搬し、上層大気の運動を変化させる様子など、大気の構造・運動の解明をより一層進めるため、MU レーダーと同等の感度・機能を有する「赤道 MU レーダー(EMU)」の新設を概算要求している。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)を日本学術会議のマスター プラン 2014 に提案し、27 件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 において、11 件の新規課題の一つに選定されている。

#### 4. 共同利用の概要と今までの推移

MU レーダーは、アジア域最大規模の大気観測用大型レーダーであり、高度 2 km の対流圏から、高度 400 km の超高層大気(熱圏・電離圏)にいたる大気の運動、大気循環を観測する。1984 年の完成以来、全国共同利用に供され、超高層物理学、気象学、天文学、電気、電子工学、宇宙物理学など広範な分野にわたる多くの成果を上げている。図 1 にこれまでの共同利用課題数の推移を赤道大気レーダー共同利用の課題数とともに示す。また、図 2 に MU レーダーの観測時間の推移を示す。2015 年度には、キャンペーン(長期間)観測課題として、前期に阿部新助氏代表の「小惑星起源メテオロイドの探査」を、後期に佐藤薰氏代表の「国際大型大気レーダーネットワーク同時観測」を実施した。観測データのうち標準観測については観測後直ちに、その他の観測については 1 年を経過したデータを「生存圏データベース共同利用」の一環として共同利用に供している。

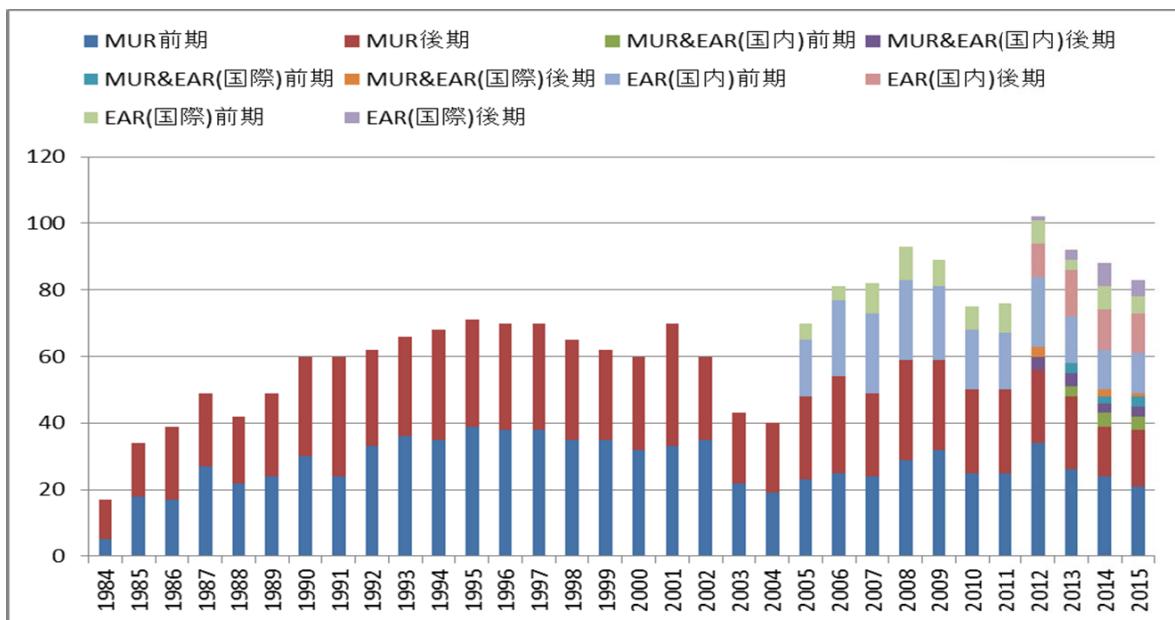


図 1. MU レーダー・赤道大気レーダー全国国際共同利用の課題件数の年次推移

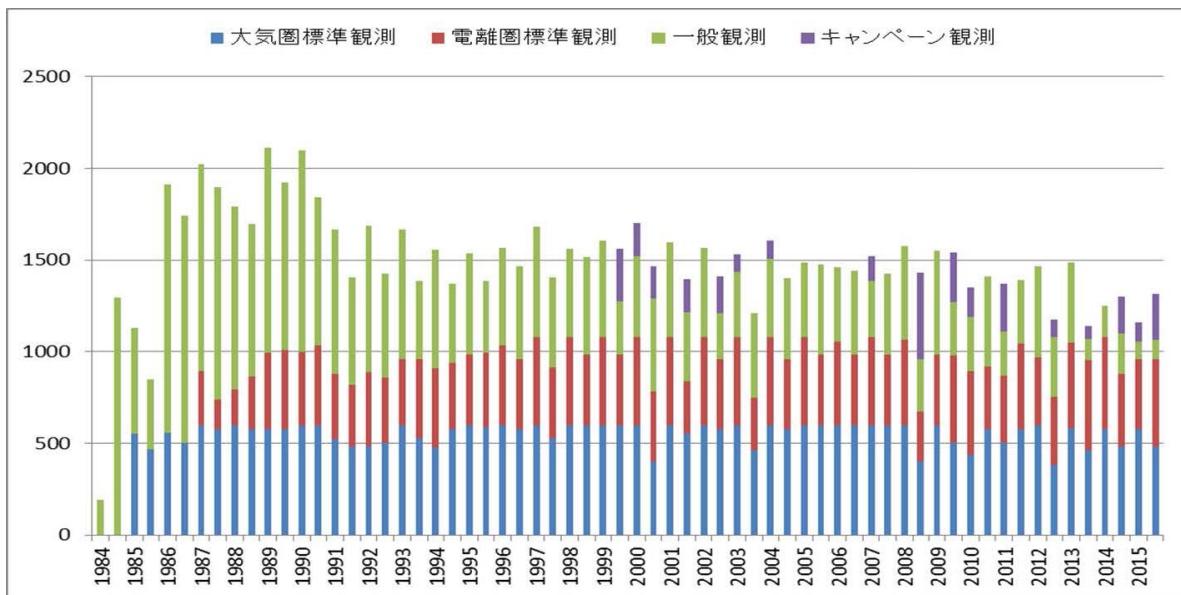


図2. MU レーダー全国国際共同利用の観測時間の半年毎の推移。

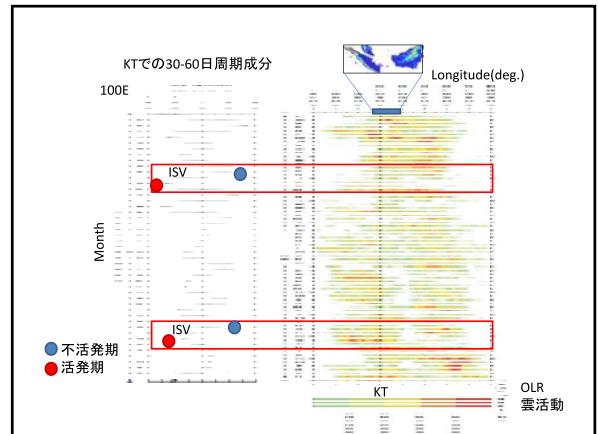
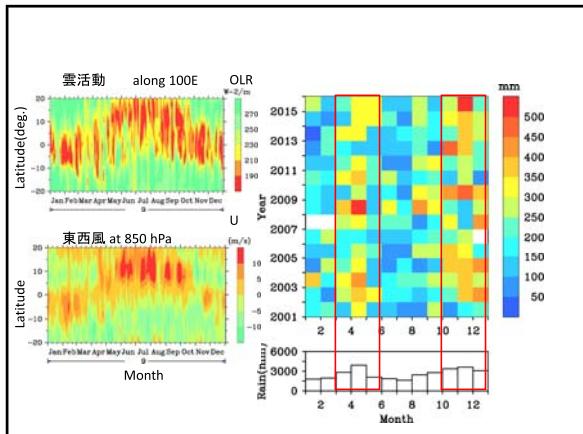
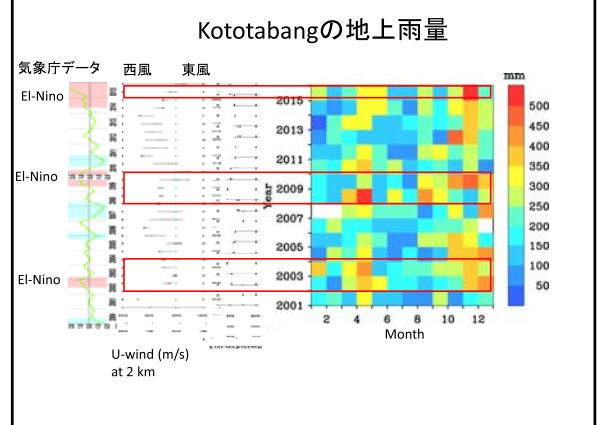
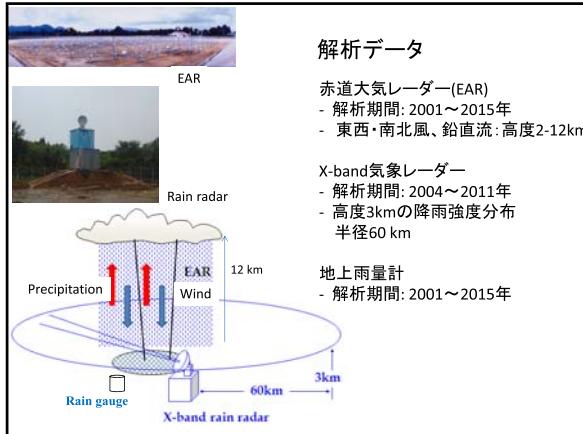
一方、EAR は、本研究所の重要な海外拠点として、国内外の研究者との共同研究によって生存圏の科学を推進するという大きな役割を担っている。同時にインドネシアおよび周辺諸国における研究啓発の拠点として、教育・セミナーのための利用も想定される。EAR は 2005 年度から全国国際共同利用を開始した。EAR の共同利用については、開始当初の議論から以下のような性格付けが行われてきた。(1) EAR の共同利用は、施設が外国に位置することから必然的に「全国」「国際」型が重なった形態をとること、(2) 「国際」対応について、当初 2 年間は、利用者を原則として日本及びインドネシアからに限定して開始し、平成 19 年度から本格的な全国国際共同利用施設として運営すること、(3) 共同利用は学術目的とし、海外からの利用者の資格は個別に判断すること等である。また、EAR 共同利用には、EAR を直接利用するものの他、EAR サイトへの機器の持込み観測、すなわち観測場所としての利用も含まれる。実際の観測実施については、EAR の特性を考慮し、課題をいくつかのグループに分けてスケジュールする方式を取っている。また予算の許す範囲において、EAR までの旅費(日本人研究者については日本から、インドネシア人研究者についてはインドネシア国内旅費)を支給している。

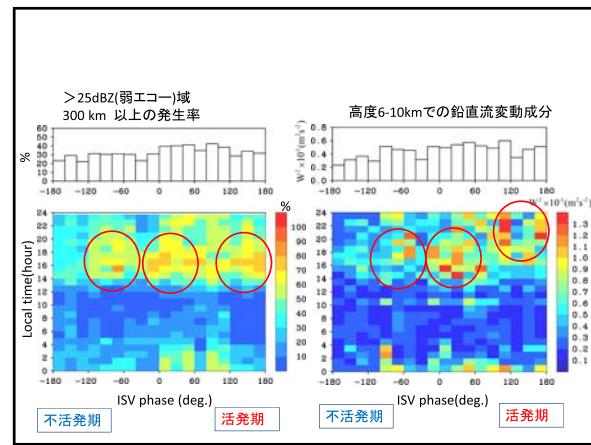
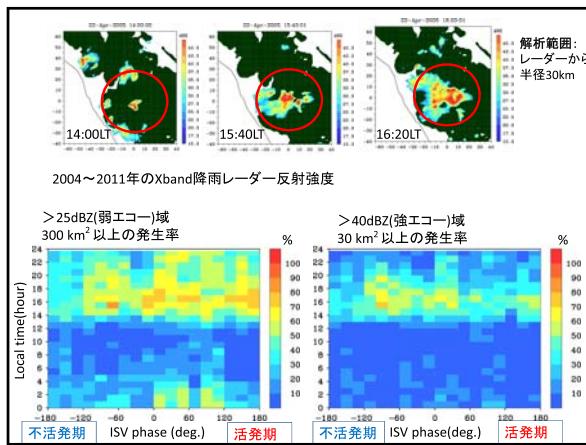
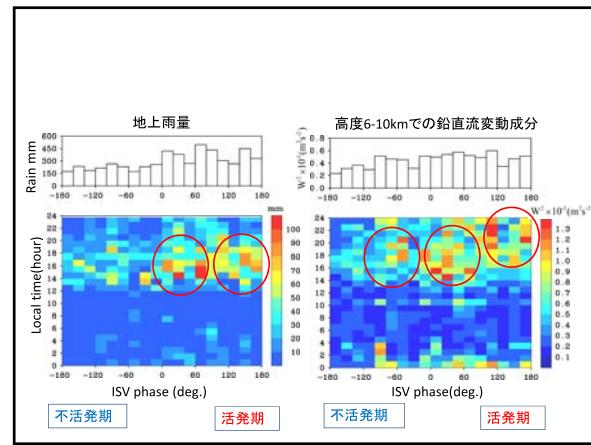
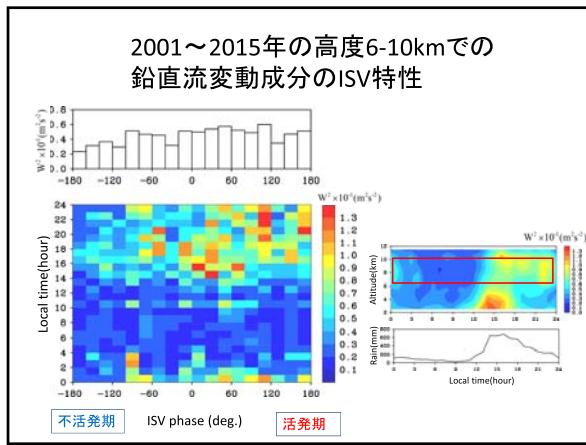
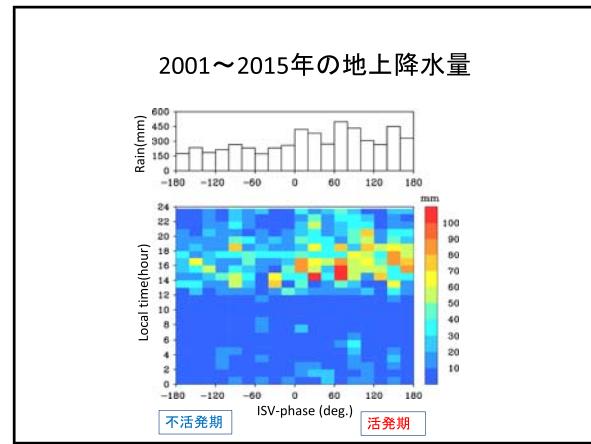
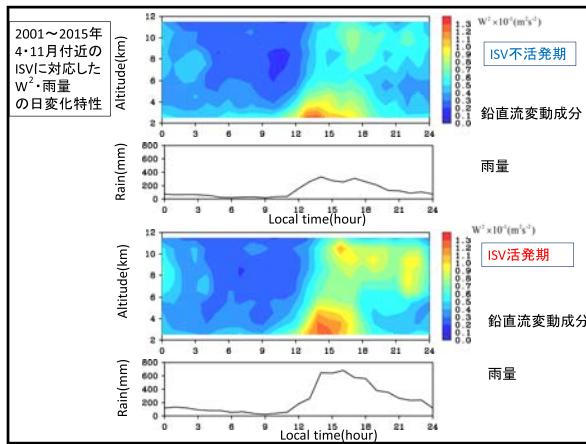
MU レーダー及び赤道大気レーダーによって得られたデータは、IUGONET プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」(<http://www.iugonet.org/>)によって、メタデータ・データベースが整備され、また解析ソフトウェア UDAS により簡単に図をプロットできる環境も構築されている。MU レーダー・赤道大気レーダーのデータベースの重要性が認められ、生存圏研究所は 2016 年 3 月に ICSU(国会科学会議)の WDS(世界科学データシステム)の Regular Member に認定された。MU レーダー及び赤道大気レーダーの全国国際共同利用はこれま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

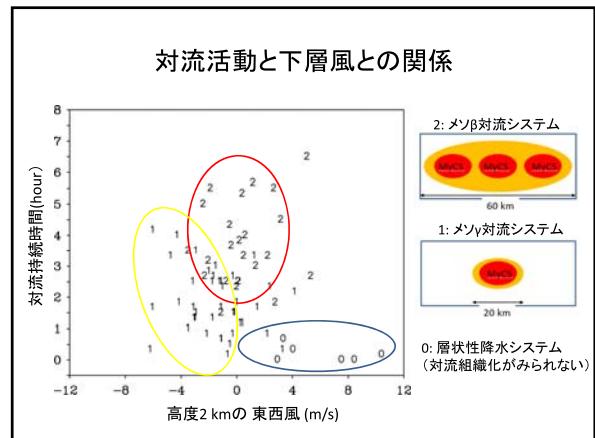
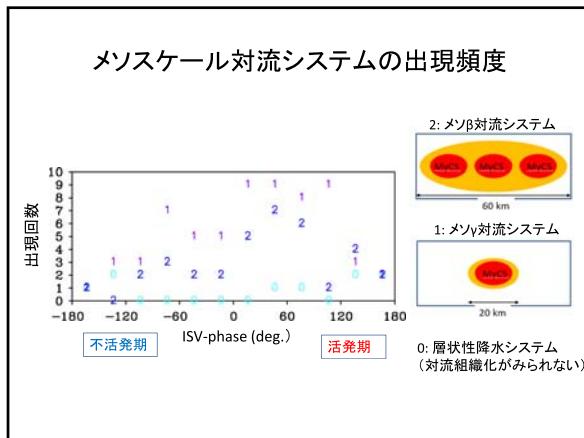
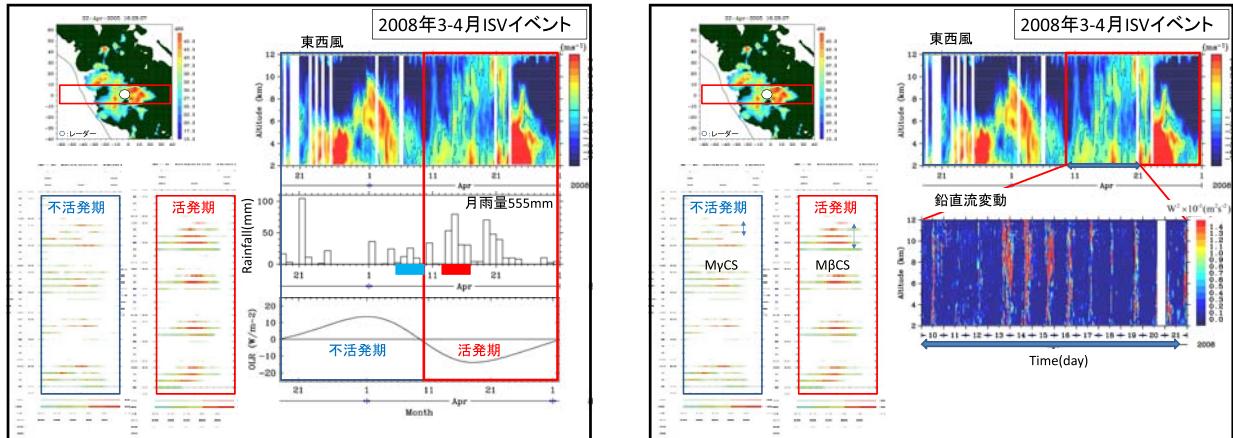
## EAR・気象レーダー観測に基づいた 西スマトラ山岳域での季節内変動に伴う 対流活動に関する研究

柴垣佳明(大阪電気通信大学)  
橋口浩之(京都大学RISH)  
下舞豊志(島根大学)  
山中大学(JAMSTEC)

- 西スマトラ山岳域では、地形性の日周期対流が卓越する。
- このような日周期対流は、インド洋で発達した季節内変動に伴う対流システムの環境場の影響を強く受ける。
- 本発表では、EAR・気象レーダー・雨量計による長期観測データを用いて、西スマトラ山岳域での季節内変動に伴う対流活動の特徴について報告する。







## まとめ

- 15年間の雨量データから、Kototabangでの降水活動の年々変化、季節変化、季節内変化、日変化特性を調べた。
- 季節内変動の不活発期・活発期における対流活動の日変化特性を示した。
- 季節内変動の活発期前半には降水活動に対応した鉛直変動成分が、その後半には降水活動ピークから遅れた時刻に大きな鉛直変動成分が現れた。
- 季節内変動に伴うメソ対流システムの持続時間や下層場との関係を明らかにした。

## スマトラ島南西沿岸域における Pre-YMC2015 海陸同時キャンペーン観測の概要

森 修一・勝俣昌己・米山邦夫（海洋研究開発機構）

鈴木賢士（山口大学）・Noer Hayati（BMKG）・Fadli Syamsudin（BPPT）

### 1. はじめに

国際プロジェクト海大陸研究強化年（YMC : Years of the Maritime Continent）に対するパイロット研究として、世界有数の沿岸豪雨（帶）が形成されるインドネシア・スマトラ島南西沿岸において、みらい（MR15-04）と共同した海陸同時キャンペーン観測 Pre-YMC2015 を実施した。ここでは、同観測のうちベンクル陸上観測点における観測体制および観測結果の概要について報告する。

### 2. ベンクル陸上観測の概要

#### ①観測期間

2015 年 11 月 09 日～12 月 25 日（47 日間）

うち、みらい MR15-04 同期観測は

2015 年 11 月 24 日～12 月 17 日（24 日間）

#### ②観測体制

ベンクル陸上観測点は、BMKG（インドネシア気象気候地球物理局）ベンクル空港測候所（A）および Mess Pemda レーダー観測点（B）の 2ヶ所（図 1）があり、各々下記の観測が実施された。

##### ・ラジオゾンデ観測（A）

Vaisala RS92-SGPD 送信機および TOTEX TA-200 バルーンを用い、観測期間全体を通じて 1 日 8 回（3 時間毎）観測を実施。おおむね、高度約 20km までの気圧、気温、湿度、風向、風速を計測。

##### ・ビデオゾンデ観測（A）

山口大との共同により「みらい」同期観測期間中の雨天時に計 18 回のビデオゾンデを放球し、降水雲中の雨滴等ビデオ画像等を取得すると共に、みらい二重偏波レーダーにゾンデ追跡観測を実施。

##### ・X バンド二重偏波レーダー（MPR）観測（B）

Furuno MPR（WR-2100）により 11 月 23 日～12 月 25 日の間、観測半径 50km において 6 分間隔のボリュームスキャン（23 仰角）を実施。

##### ・BMKG C バンドドップラーレーダー現業観測（A）

観測半径 120km、および 240km の 2 モードにて、10 分間隔でボリュームスキャンを実施。機材故障のため、観測期間は 12 月 11～25 日のみ。

##### ・自動気象ステーション（A, B）

Vaisala MAWS201 にて、気温、湿度、風向、風速、降水量、日射量を 1 分毎に計測。

##### ・ディスクロメータ（A）

OTT-Parsivel2, Thies-LPM, および METEK-MRR2 を設置し、雨滴粒径分布を 1 分毎に計測。

### 3. 観測結果の概要（一部）

ラジオゾンデ観測結果（図 2）によると、観測開始から 12 月 10 日までの約 1 ヶ月間は地表付近の浅い海陸風循環を除き、上空はほぼ東風が卓越していた。地表付近は対流不安定が強く、レーダー観測（図略）によれば午後から日没の間に山麓部を中心として雷雨となる日周期変化が卓越していた。一方、12 月 11 日以降は地表から高度約 10km に掛けて強い西風が入り、大気成層は安定化されたため、ベンクルにおける夕立（雷雨）はなくなり、主として夜間に拡がる沿岸海上の降水が中心となる

大きな変化を観た。今後はMJOなど大規模擾乱のスマトラ島通過フェイズとの関係や、みらいラジオゾンデ観測との比較、およびレーダー観測データの解析を加えることにより、大気・沿岸海洋相互作用を通じたスマトラ島沿岸豪雨のメカニズム解明に繋げると共に、YMC本観測（2017-2019年）に向けた研究戦略について検討し議論を進める予定である。

#### 謝辞

ベンクル陸上観測に御支援頂いた（株）グローバルオーシャンディベロップメント（GODI）、インドネシア技術評価応用庁（BPPT）、気象気候地球物理庁（BMKG）、ベンクル大学、ベンクル州政府、ならびに「みらい」同期観測に御尽力いただいたMR15-04乗組員の皆さんに感謝致します。

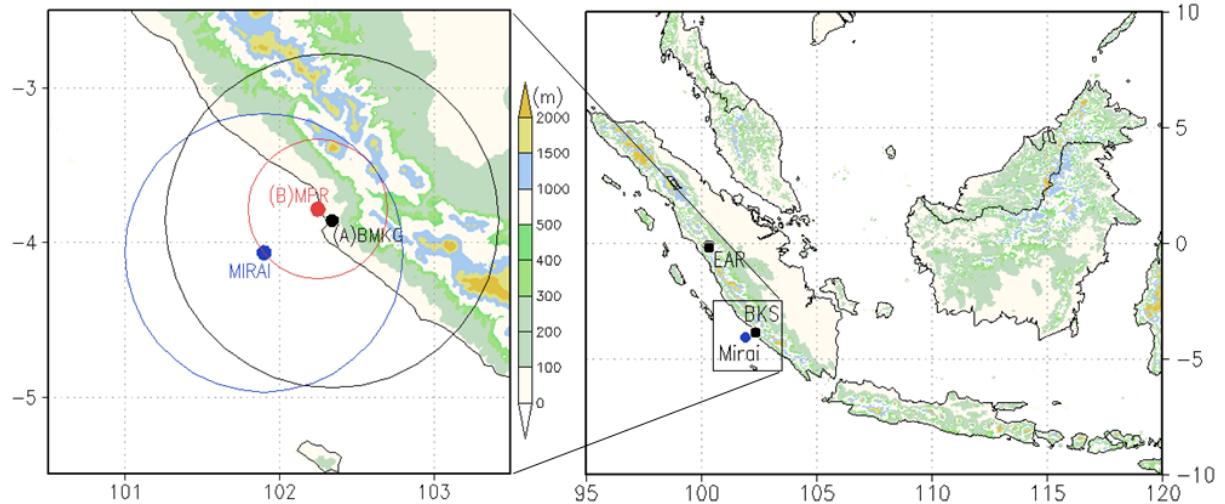


図1 ベンクル陸上観測点配置図（右：広域図、左：拡大図）。拡大図の（A）BMKGはベンクル空港測候所、（B）MPRはMessPemdaレーダー観測点を各々示す。また、拡大図内の円は各々レーダー観測範囲を示す（MPR：半径50km、BMKG：半径120km、Mirai：半径100km）。

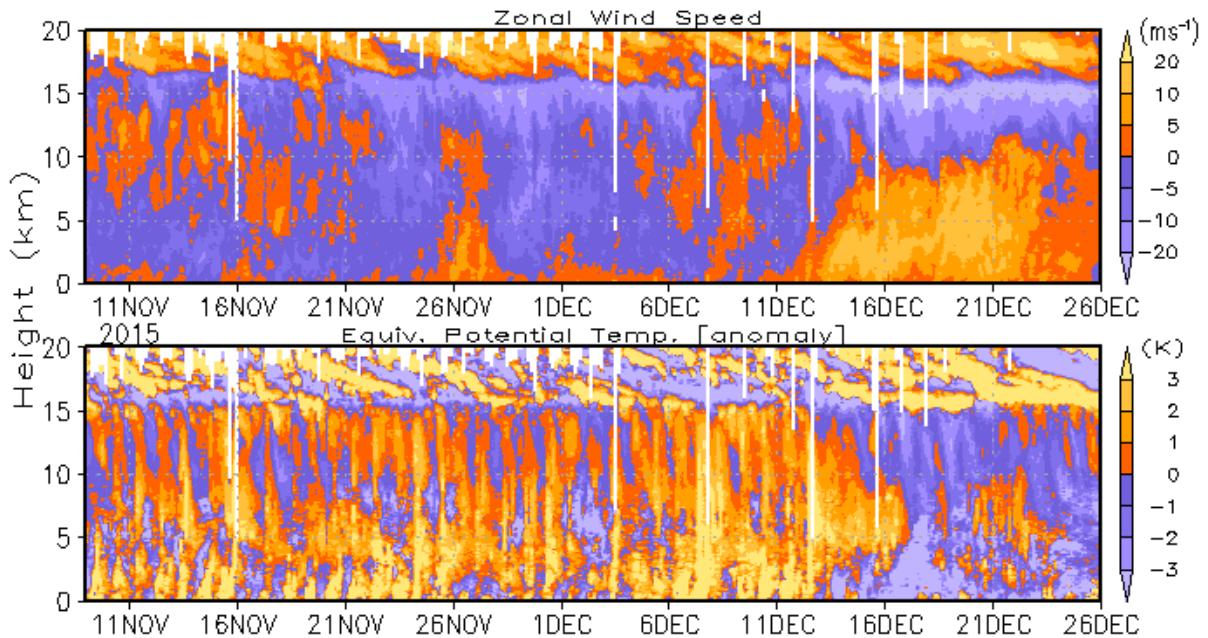


図2 ベンクル陸上観測点におけるラジオゾンデ観測結果（上図：東西風速、下図：相当温位偏差）。

## 2015年12月にコトタバンで観測された 波動にともなう水蒸気・雲変動

鈴木順子 (JAMSTEC・DCOP)

荻野慎也<sup>1</sup>, 城岡竜一<sup>1</sup>, 橋口浩之<sup>2</sup>, 阿保真<sup>3</sup>, 柴田泰邦<sup>3</sup>

1: JAMSTEC, 2: 京都大, 3: 首都大

### 1. はじめに

対流圏界面遷移層にみられる巻雲変動

- 成層圏水蒸気変動への寄与  
(→成層圏へ流入する水蒸気の脱水の証拠)
- 地球放射収支への寄与



- ・巻雲の出現時  
(過)飽和水蒸気・水晶

巻雲出現高度の水蒸気変動をもたらす鉛直流・温度分布に注目して解析をおこなった

### 2. データ

コトタバンでの観測データ(0.20S、100.32E、2015年12月3日～14日)

#### 1. ゾンデ観測(合計20回、1- 3回/day)

- ラジオゾンデ+CFH鏡面冷却型水蒸気ゾンデ+オゾンゾンデ(5回)  
風、温度、気圧、水蒸気(相対湿度)、オゾン混合比
- 他のゾンデ観測データ(15回)  
風、温度、気圧、精密温度値、オゾン混合比など

#### 2. ライダー(首都大)

後方散乱比(30m、20分間隔)

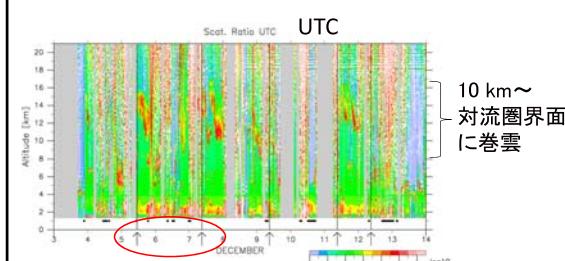
#### 3. 赤道大気レーダー(京都大、LAPAN)

鉛直流(150m、1時間間隔)

### 2. データ(Pre-YMC期間のコトタバン観測風景)

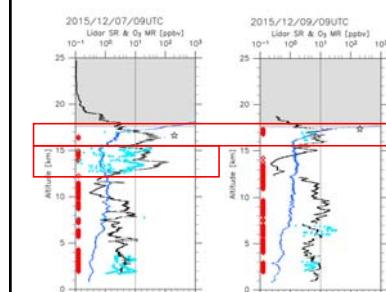


### 3. 解析結果 巷雲の鉛直分布(ライダー)

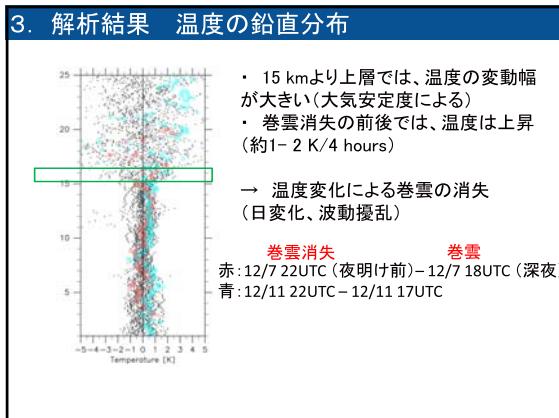
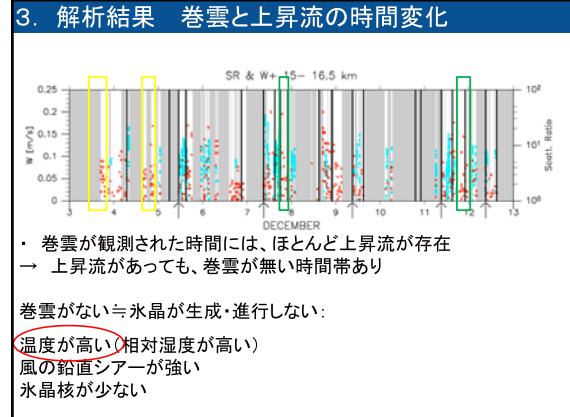
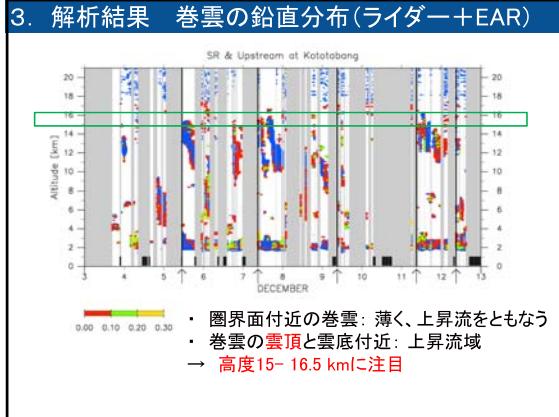


- 期間中、積雲対流活動が活発(アンビル起源の巷雲)
- ほぼ毎日、降水あり

### 3. 解析結果 巷雲の鉛直分布(特殊ゾンデ)



- 相対湿度(RH > 100%)と巷雲の発生高度は対応
- 界面直下(15~17.5 km)の薄い巷雲: 上昇流+オゾン混合比大
- 上部対流圏(10~15 km)の巷雲: 上昇流を伴わない高度あり



**まとめ**

**卷雲の上昇流分布を観測的に確認した**

**Pre-YMC観測期間中の2015年12月上旬、**

- ・ 対流圏界面直下に卷雲が存在し、上昇流域内で消失
- ・ 卷雲消失と温度変動の対応を確認

**今後の課題**

- ・ 温度変動の要因を特定(日周期、波動擾乱)
- ・ 卷雲の生成消滅過程における、鉛直流と温度偏差について、定量的に解明(他の集中観測データを利用)
- ・ 水晶の形や雲粒数を観測できる測器を新たに加え、観測実施

# 海大陸西岸の「重力波族」による海陸境界層～対流圏界層結合(背景と速報)

山中大学<sup>1</sup>・荻野慎也・米山邦夫（海洋研究開発機構）・Bengkulu 観測班\*・みらい観測班†

## 1. はじめに(背景)

加藤先生の外部波(負等価深度)大気潮汐(Kato, 1966)ならびに松野先生の赤道波(Matsuno, 1966)の理論的発見から丁度半世紀が経過した。大気潮汐は自転する地球上への日射加熱で強制される全球的位相構造をもつ波動であり、その日周期成分は昼夜両半球間の循環となる。地球は自転軸が傾いたまま公転するので日射加熱は緯度・季節で変化し、それによる夏冬両半球間の循環が対流圏モンスーンの一部ならびに中間圏大循環である。一方、1年を通じて日射加熱の強い地上赤道域と南北両亜熱帯との間には Hadley 循環、赤道域でも特に加熱の強い海大陸域と東西両大洋との間には Walker 循環が生じ、これらの循環は赤道波の重畠で表わされる。今書いた地上で最も「加熱の強い海大陸域」が何故そうなるのか、その正体が海陸の熱的コントラストによるもう一つの日周期で、海岸線周辺に局在して位相構造をもつ日周期海陸風循環であり、このことを我々は最近 20 年間の観測によって明らかにしてきた(例えば Hashiguchi et al., 1995, 1996; Murata et al., 2002; Wu et al., 2003; Mori et al., 2004; Sakurai et al., 2005; Yamanaka, 2016)。

海大陸を中心とした赤道域での日周期海陸風循環の卓越は、中緯度での年周期のモンスーン(の大部分を占める大陸大洋間の)循環の卓越に相当する基本的なものである。赤道域では低気圧活動も殆どないため、降雨変動における最も卓越した要因であり、従って降雨分布は海岸線地帯(距離にして約 300 km 以内)に集中し(Ogino et al., 2016)，また多島海で海岸線が最長な海大陸域が地球上の最多雨域になる(Yamanaka, 2016)。

日周期海陸風循環は、重力波の上下(3 次元的伝播なので同時に陸・海向き)伝播両成分の(下端境界で鉛直流が 0 になるような)重合せである(例えば小倉, 1997 の 6 章；小倉, 1978 の 7 章を参照)。このような基本的には安定成層中で強制的に起こされる循環(水平対流)の一部で、水蒸気相変化(条件付不安定)により自発的に起こるもの(鉛直対流が積(乱)雲である。これらと普通の(慣性)重力波に、赤道波の一種だが分散関係やエネルギー分配が共通の Kelvin 波(cf. 松野, 1970)を加えて「重力波族」と呼ぶことにする。これらのうち Kelvin 波は対流圏内を東進する季節内変動(超雲団, MJO 等)の赤道近傍の卓越成分であり、成層圈準 2 年振動(QBO)東風層上端で西風加速を担うが、それより規模の小さい(慣性)重力波としては東西両方を含め様々な方向に伝播するものが期待され(地形起源の停滯性成分は下部成層圏まで碎波して失われる；Tanaka and Yamanaka, 1985)，そのような双(多)方向の波動の励起源としても対流圏最下層の(主産物として日周期海陸風循環を生む)日射加熱強制過程は有望である。

ここでは、2015 年 11～12 月にスマトラ島南西岸とその沖で行われた GPS ゾンデ集中観測に基く「重力波族」の解析結果速報と、末尾で少し今後のプロファイラ観測を展望する。

## 2. Pre-YMC 観測

海大陸研究強化年(YMC; 2017～19)に先立ち、スマトラ島南西岸 Bengkulu およびその西南西約 50 km の沿海上(海洋地球研究船みらい)で 2015 年 11～12 月に Pre-YMC として、気象(Doppler, Multi-parameter)レーダー、GPS ゾンデ等を用いた集中観測が実施された(図 1；森他, 2015, 2016)。特に 12 月 13 日頃には MJO 上陸

\* 森修一・伍培明・横井覚・清木亜矢子・H. Bellenger (海洋研究開発機構)・濱田純一・井上知栄 (首都大学東京) ; F. Syamsudin, R. Sulistyowati, S. Lestari (BPPT); Agus (BMKG-Bengkulu 空港測候所).

† 勝俣昌己・耿驥・茂木耕作 (海洋研究開発機構)      <sup>1</sup> 神戸大学名誉教授

に伴う日周期降雨の「激変」(夜間の陸→海移動の不規則化)があった(横井他, 2016)(図2参照). 以下ではこの「激変」前後約1週間について、両地点の毎3時間GPSゾンデ集中観測に基いた「重力波族」の実態を示す.

### Pre-YMC observations in Nov-Dec 2015

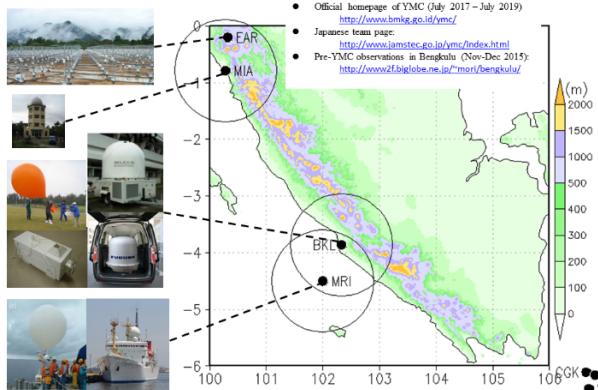


図1. PreYMC 観測網(森他, 2015, 2016 参照).

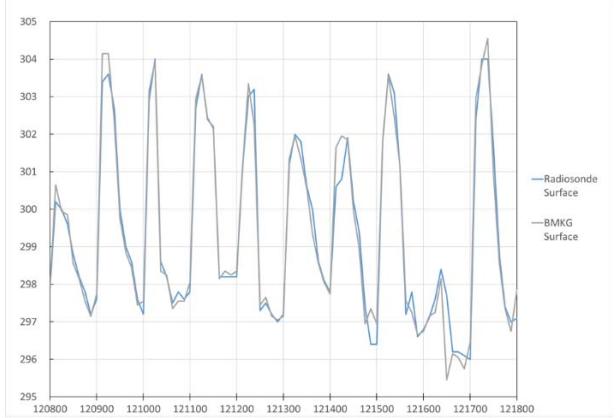


図2. ラジオゾンデと定常観測の Bengkulu 地上気温.

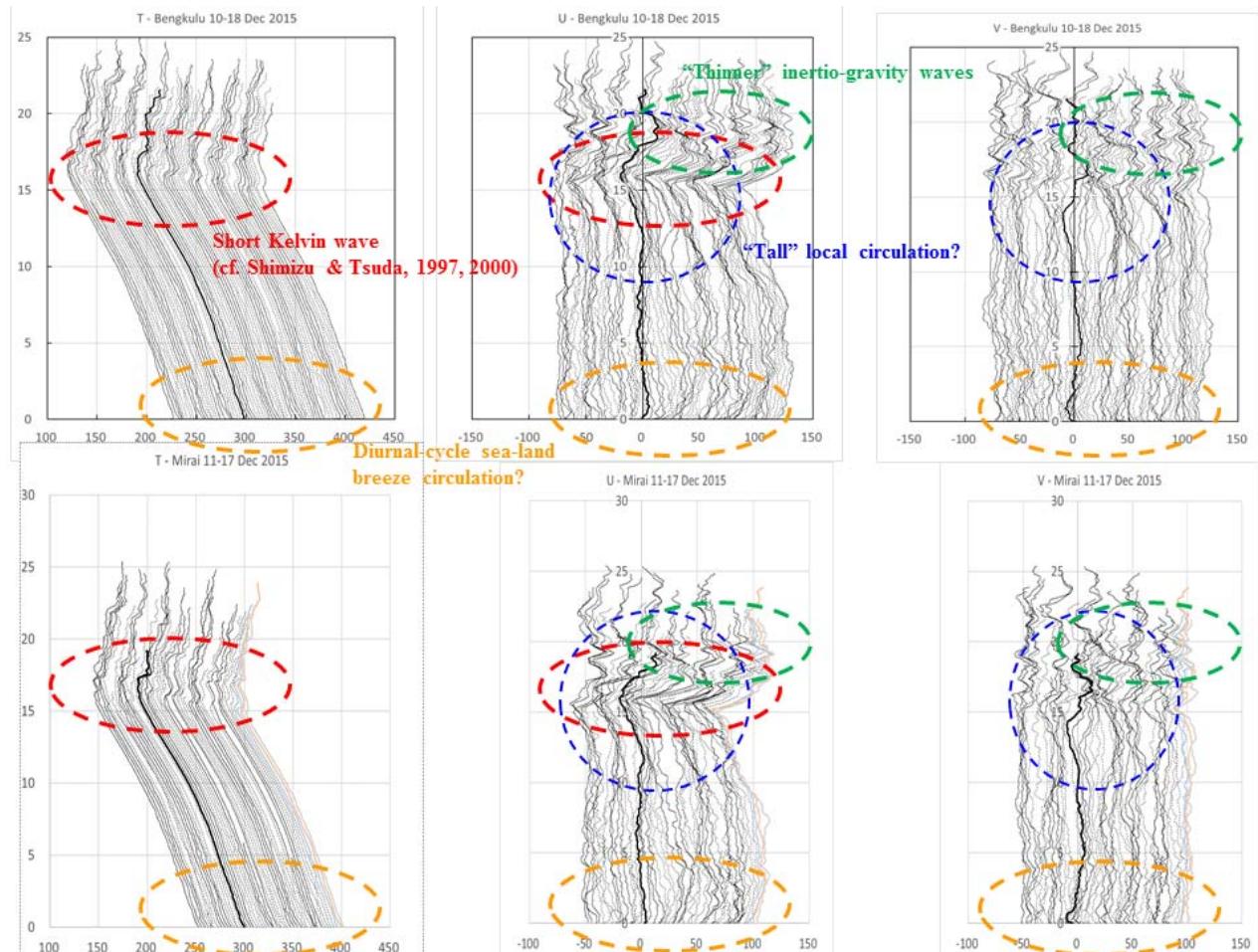


図3. 日周期降雨「激変」期(2015年12月10~18日)の Bangkulu(上)・みらい(下)GPS ゾンデ温度(左, 横軸 K), 西・南風(中・右, m/s)の鉛直分布(縦軸 km). 実線は00~09Z (07~16LT)で日中、破線は12~21Z (19~04LT)で夜間に相当、13日00Zを太実線でこれを基準に1時間あたり1m/sずつ前後にずらして示す. 破線楕円は「重力波族」諸波動を示す(本文参照).

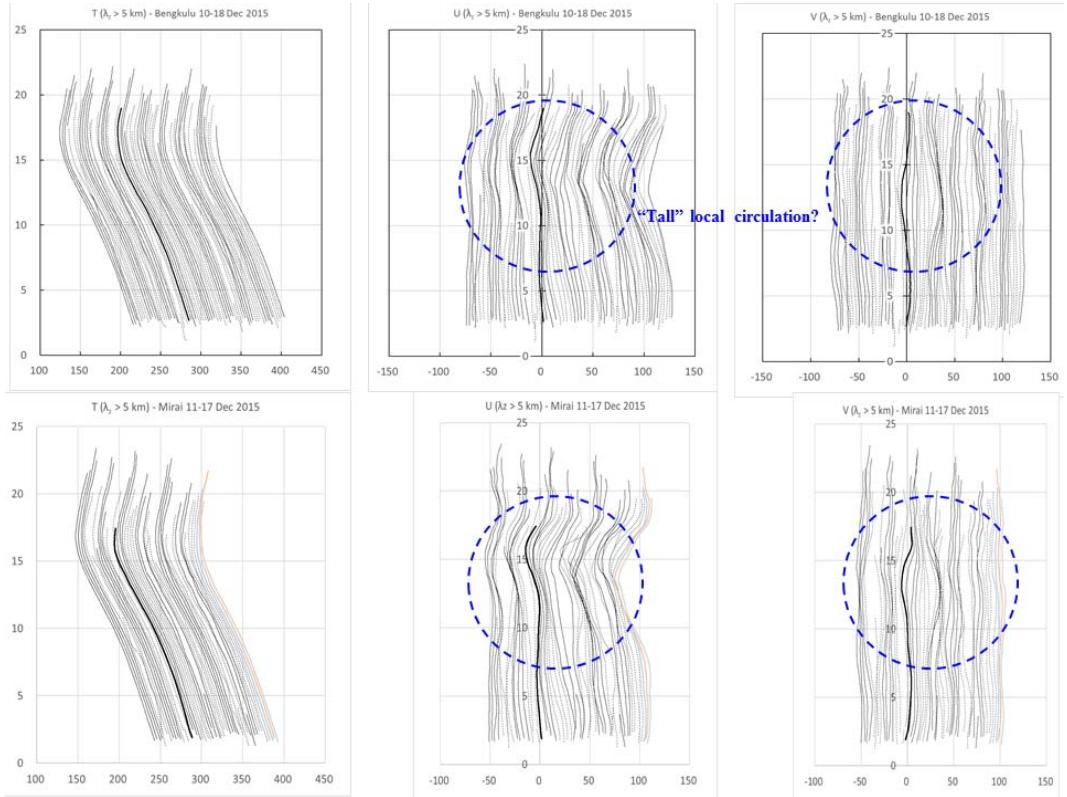


図 4. GPS ゾンデ鉛直プロファイル(図 3)の鉛直波長>約 5 km に相当する成分.

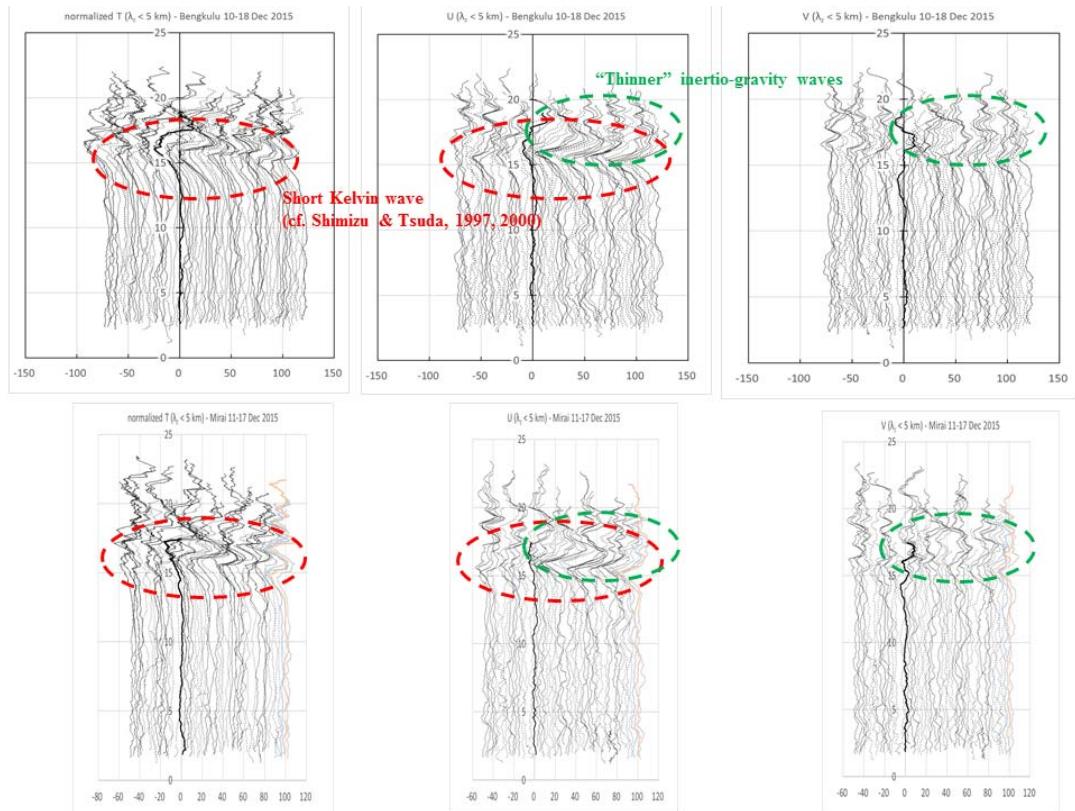


図 5. GPS ゾンデ鉛直プロファイル(図 3)の鉛直波長<約 5 km の成分. 温度(左)については、鉛直波長>5 km で除した上、Väisälä-Brunt 振動数/重力加速度~0.0015 で割り風速変動とエネルギー的に等価にしている.

### 3. 単色波解析

各観測データについて上昇時間 1000 秒(鉛直波長約 5 km)を境に長い成分と短い成分に分けた(cf. Ogino et al., 1995) (図 3~5). (a)対流圏最下層の海陸風, それとほぼ同期して(b)中・上部対流圏に節をもつ循環(上下伝重力波の重畠), それより長周期で(c)圏界面付近に現れる鉛直波長の短い Kelvin 波(位相速度は重力波的だが東西風速と温度に顕著; cf. Shimizu & Tsuda, 1997), (d)下部成層圏のさらに短波長の慣性重力波(橢円偏波)が見出された. 特に「激変」期には(c)(d)が重なって出現し, 圏界面付近に薄く強い鉛直シア層を形成した.

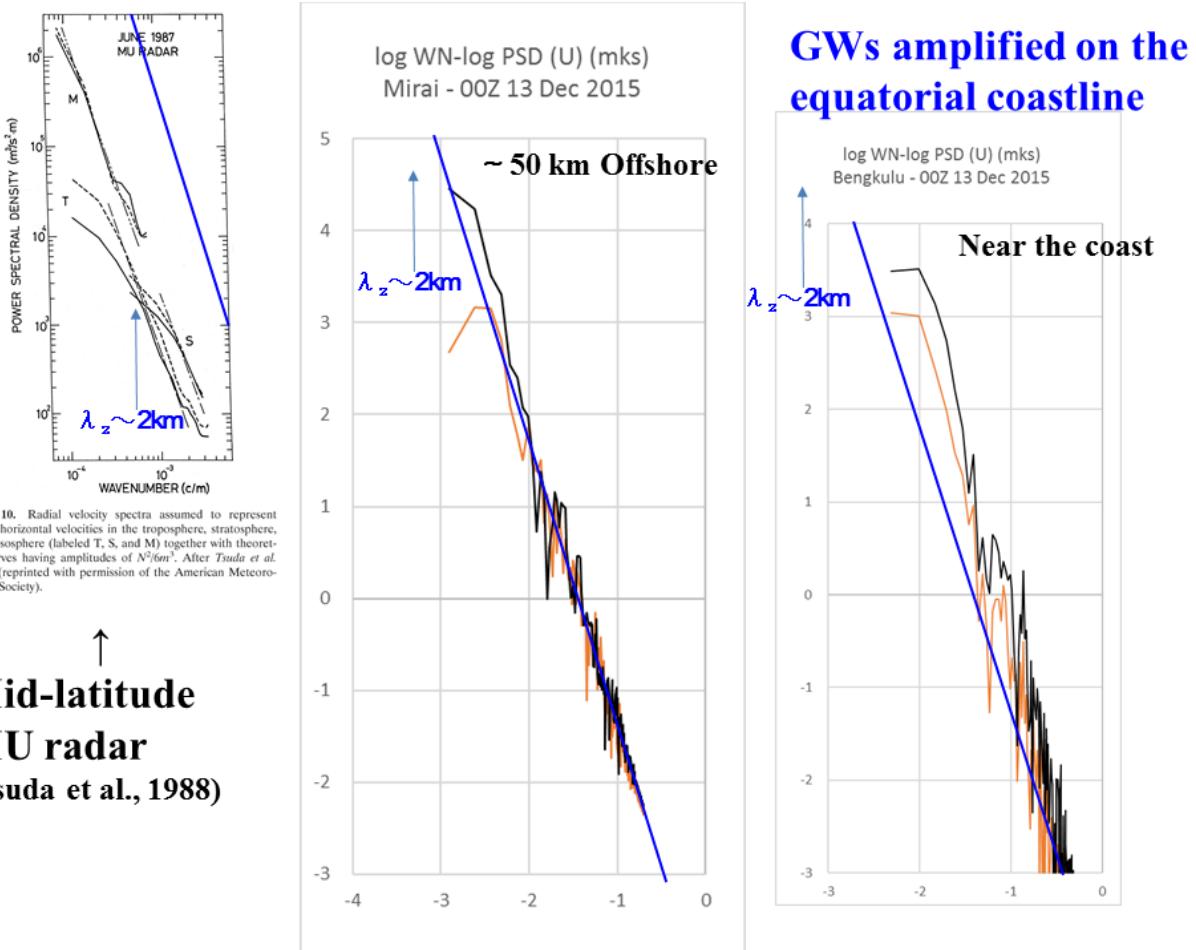


図 6. GPS ゾンデ鉛直プロファイル(図 3)の鉛直波数スペクトル解析例。「激変」当日の 12 月 13 日 00Z(07LT)のみらい(中央)と Bengkulu(右)の西風成分風速についてそれぞれ上・下端から約 20 km 幅について解析したもの。左上は比較のために示した中緯度 MU レーダー観測での普遍的なスペクトル(Tsuda et al., 1986)で、これと縦軸が相対的に合うように並べている。

### 4. 鉛直波数スペクトル解析

各観測の生(放球後の等間隔時系列)データから周波数スペクトルを計算し、平均上昇速度を用いて鉛直波数スペクトルに換算した(cf. Yamanaka et al., 1996) (図 6). この観測では成層圏最下部までしか観測されていないので、成層圏内での飽和を示す白色ノイズへの折れ曲がりまでは明瞭に描き出せていないが、海上観測の高波数側-3乗則は過去の中緯度観測で普遍的に見られたもの(cf. Tsuda et al., 1986)とから 1~2 術大きく(振幅 3~10 倍)，陸上(海岸線上)でも形状は同様であるが、強さは海上よりさらに 1 術程度大きい。

## 5. 各高度の時系列解析

各観測生データから線形内挿により、鉛直(ジオポテンシャル高度)等間隔なデータを作成した。「激変」前の高度 1 km 程度以下で海陸風に対応した向きの海陸温度勾配が見られ、特に陸面の日周期変化が顕著である(図 7)。前節の鉛直波数スペクトルも今後この鉛直等間隔データで再計算するが、周波数スペクトルは時間間隔の粗さに加え高度 6 km 以上では欠測があり、特に(今回の観測対象ではなかった)成層圏側では難しい(図 8)。

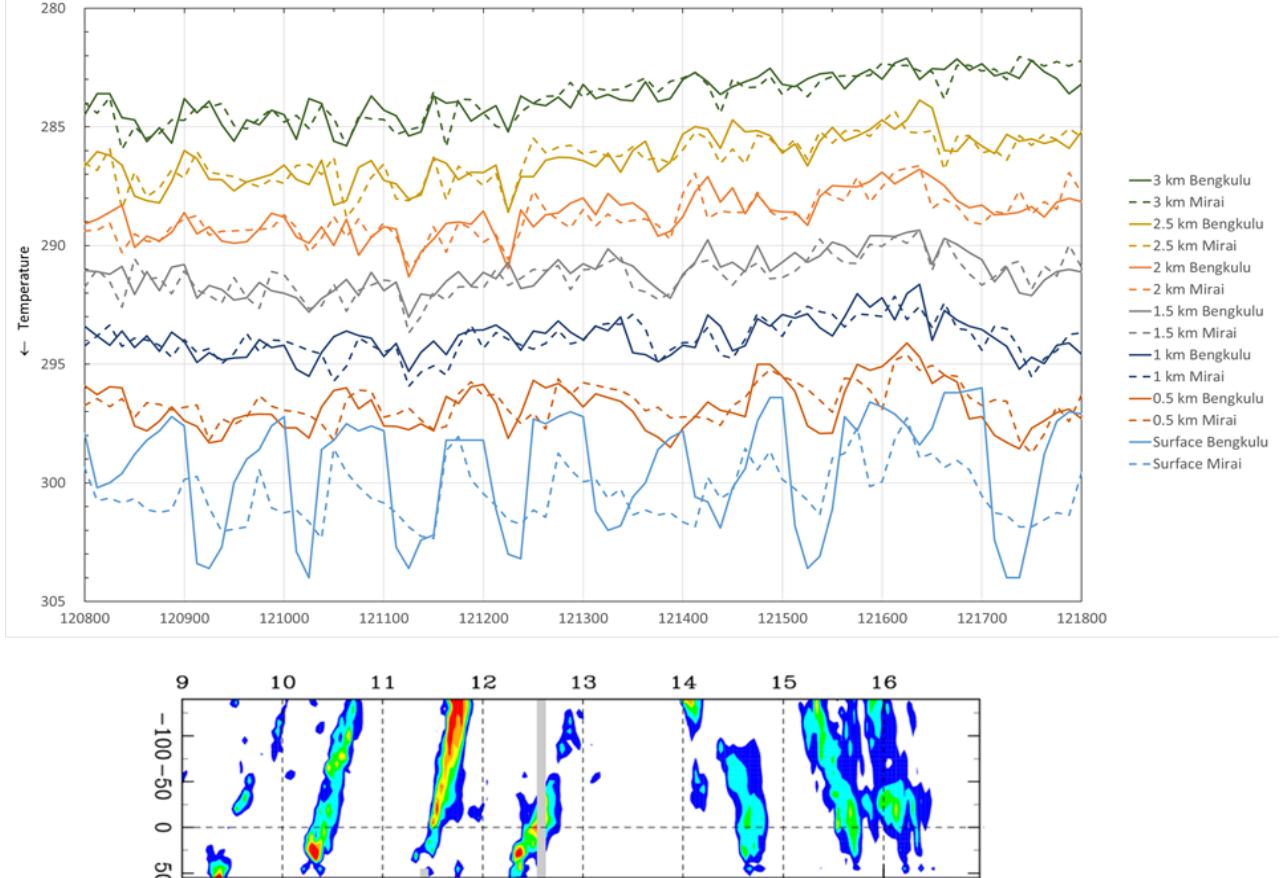


図 7. Bengkulu(実線)・みらい(破線)GPS ゾンデによる地上～3 km 高度(500 m ごと)の温度の時間変化。横軸は時間(UTC), 縦軸は下向きに温度をとる(上ほど高高度になる)。下にはみらいレーダーによる降雨強度の Hovmöller(海岸線距離・時間)図(横井他, 2016, 凡例等詳細は同論文参照)を比較のために示す。

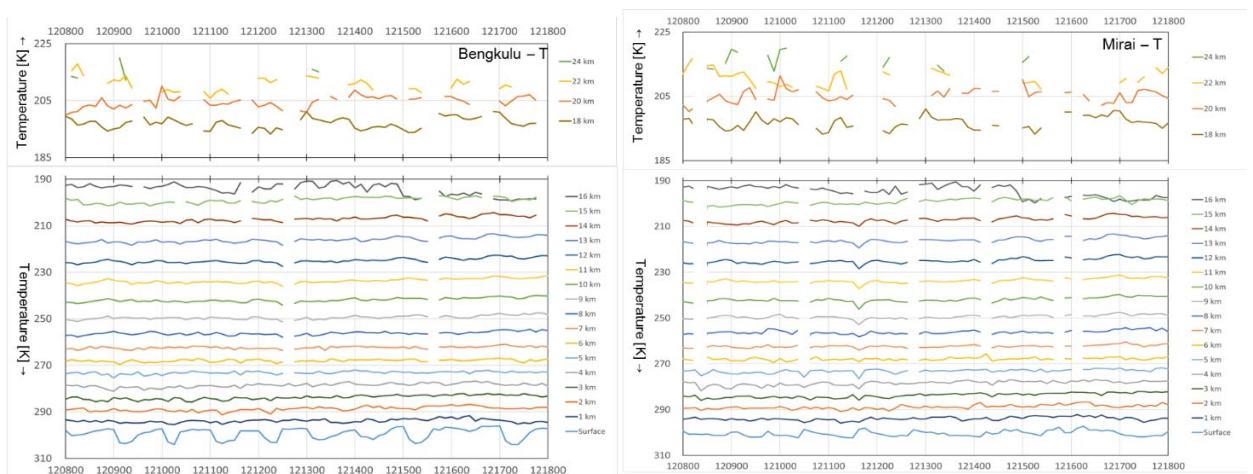


図 8. Bengkulu(左)・みらい(右)GPS ゾンデによる高度 1 km ごとの温度の時間変化。時間および対流圏内(下)の温度のとり方は図 7 と同様で、成層圏内(上)の温度については上向きに高温にとっている。

## 6. おわりに(展望)

日周期の対流雲や降雨が卓越し、地上年雨量 3,000 mm 以上が集中する海岸線から 300 km 以内 (Ogino et al., 2016) では、対流圏～下部成層圏の「重力波族」の出現も顕著である。このような観測研究は、現地の数値天気予報実現や成層圏も含む全球気候変動予測向上に大きく貢献すると確信している。

より詳しい「重力波族」研究には時間高分解能な大気レーダー観測が必須である。Bengkulu (4°S) はスマトラ西岸で唯一小島嶼がなく、みらい停船も含め理想的な日周期観測を目指す YMC 観測地に選定されたが、赤道上のEARは離れすぎ内陸過ぎて活用しにくい。HARIMAU (FY2005～9) 設置 WPRs (Yamanaka et al., 2008) で、BMKG が継続運用の Manado を除く 2 基 (Pontianak, Biak) の移設を LAPAN と協議したいが、SATREPS でイ国移管したため日本メーカーが対応できない問題がある。今も日本資産 (京都大学新プロ BLR を海洋研究開発機構 SATREPS で修復) の Serpong WPR の活用 (実質 MCCOE 観測部門の BPPT-BBTMC (旧 UPTHB) と協議) や、観測経費にも獲得必要な科研費で新規 1 基導入 (これで HARIMAU-WPRs も実質対応)を考えつつある。

## 文 献

- Hashiguchi, H., S. Fukao, M. D. Yamanaka, T. Tsuda, S. W. B. Harijono and H. Wiryosumarto, 1995a: Boundary layer radar observations of the passage of the convection center over Serpong, Indonesia (6°S, 107°E) during the TOGA-COARE intensive observation period. *J. Meteor. Soc. Japan*, **30**, 543–548.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, T. Tsuda, M. D. Yamanaka, D. L. Tobing, T. Sribimawati, S. W. B. Harijono and H. Wiryosumarto, 1995b: Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L-band clear-air Doppler radar: Initial results. *Radio Sci.*, **30**, 1043–1054.
- Kato, S., 1966: Diurnal atmospheric oscillation, 1. Eigenvalues and Hough functions. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3201–3209.
- Matsuno, T., 1966: Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J. Meteor. Soc. Japan*, **44**, 25–43.
- Mori, S., J.-I. Hamada, Y. I. Tauhid, M. D. Yamanaka, N. Okamoto, F. Murata, N. Sakurai and T. Sribimawati, 2004: Diurnal rainfall peak migrations around Sumatera Island, Indonesian maritime continent observed by TRMM satellite and intensive rawinsonde soundings. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2021–2039.
- 森修一・勝俣昌己・米山邦夫・F. Syamsudin, 2016: スマトラ島 Pre-YMC2015 集中観測計画について. 第9回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム報告書, 26–28.
- 森修一・勝俣昌己・米山邦夫・鈴木賢士・Nurhayati・F. Syamsudin, 2016: スマトラ島南西沿岸域における Pre-YMC2015 海陸同時キャンペーン観測の概要. (本報告書所収)
- Murata, F., M. D. Yamanaka, M. Fujiwara, S.-Y. Ogino, H. Hashiguchi, S. Fukao, M. Kuds, T. Sribimawati, S. W. B. Harijono and E. Kelana, 2002: Relationship between wind and precipitation observed with a UHF radar, GPS rawinsonde and surface meteorological instruments at Kototabang, West Sumatra during September–October 1998. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 347–360.
- Ogino, S.-Y., M. D. Yamanaka and S. Fukao, 1995, Meridional variation of lower stratospheric gravity wave activity: A quick look at Hakuho-Maru J-COARE cruise rawinsonde data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 407–413.
- Ogino, S.-Y., M. D. Yamanaka, S. Mori and J. Matsumoto, 2016: How much is the precipitation amount over the tropical coastal region? *J. Climate*, **29**, 1231–1236.
- 小倉義光, 1978: 気象力学通論, 東京大学出版会, 260pp.
- 小倉義光, 1997: メソ気象の基礎理論, 東京大学出版会, 228pp.
- Sakurai, N., F. Murata, M. D. Yamanaka, H. Hashiguchi, S. Mori, J.-I. Hamada, Y.-I. Tauhid, T. Sribimawati and B. Suhardi, 2005: Diurnal cycle of migration of convective cloud systems over Sumatera Island. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 835–850.
- Shimizu, A. and T. Tsuda, 1997: Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia. *J. Geophys. Res.*, **102**, 26159–26172.
- Shimizu, A., and T. Tsuda, 2001: Seasonal and QBO-related variations in gravity wave activities observed with radiosondes at Bandung, Indonesia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 185–200.
- Tanaka, H., and M. D. Yamanaka, 1985: Atmospheric circulation in the lower stratosphere induced by the mesoscale mountain wave breakdown. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 1047–1054.
- Tsuda, T., T. Inoue, D. C. Fritts, T. E. VanZandt, S. Kato, T. Sato, and S. Fukao, 1988: MST Radar Observations of a Saturated Gravity Wave Spectrum, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2440–2447.
- Wu, P.-M., J.-I. Hamada, S. Mori, Y. I. Tauhid, M. D. Yamanaka and F. Kimura, 2003: Diurnal variation of precipitable water over a mountainous area in Sumatera Island. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1107–1115.
- Yamanaka, M. D., 2016: Physical climatology of Indonesian maritime continent: An outline to comprehend observational studies. *Atmos. Res.*, **178–179**, 231–259.
- Yamanaka, M. D., S. Mori, Wu P.-M., Hamada J.-I., N. Sakurai, H. Hashiguchi, M. K. Yamamoto, Y. Shibagaki, M. Kawashima, Y. Fujiyoshi, T. Shimomai, T. Manik, Erlansyah, W. Setiawan, B. Tejasukmana, F. Syamsudin, Y. S. Djajadihardja, and J. T. Anggadiredja, 2008: HARIMAU radar-profiler network over Indonesian maritime continent: A GEOSS early achievement for hydrological cycle and disaster prevention. *J. Disaster Res.*, **3**, 78–88.
- Yamanaka, M. D., S.-Y. Ogino, S. Kondo, T. Shimomai, S. Fukao, Y. Shibagaki, Y. Maekawa and I. Takayabu, 1996: Inertio-gravity waves and subtropical multiple tropopauses: Vertical wavenumber spectra of wind and temperature observed by the MU radar, radiosondes and operational rawinsonde network. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **58**, 785–805.
- 横井覚 他, 2016: 海陸同期ラジオゾンデ観測でとらえたスマトラ島西岸域の日変化. 日本気象学会講演予稿集, C302.

## アジア太平洋地域における電離圏

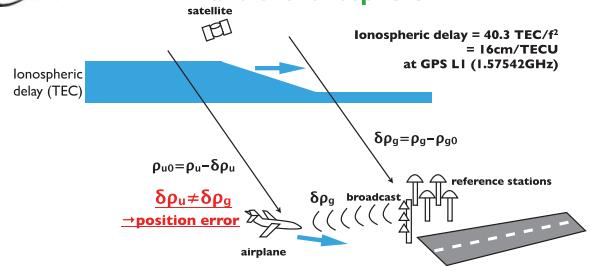
### 全電子数勾配特性

齋藤 享

海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所

**Acknowledgment:** This study is partly supported by MLIT program to facilitate collaboration with research organization in developing countries. The analysis was conducted as a training program for Thamawoot Pocathikorn, and Mr. Yuranan Limpanavadee, Aeronautical Raido Of Thailand.

第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

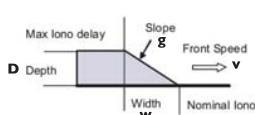


- \* GBAS provides guidance for airplane precision approach and landing.
- \* Spatial gradient in ionospheric delay (equivalently TEC) can be an error source.
- \* Technical standards are defined by ICAO (International Civil Aviation Organization)

第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

### Ionospheric threat model

- \* Ionospheric threat model defines possible ranges of variation in ionospheric delay, ionospheric threat model, must be defined to design safe systems using GNSS.
- \* ICAO is developing technical standards for Category-III GBAS based on the following ionospheric threat model where ionospheric gradient is approximated by a linear front.



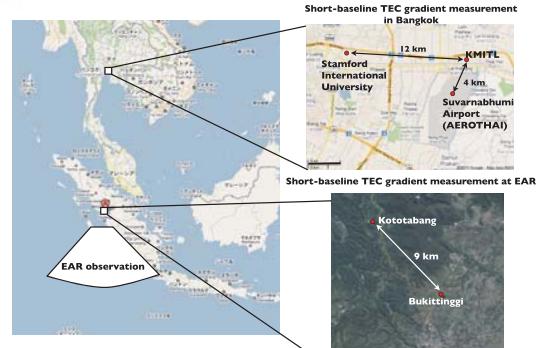
Parameter	Range of values
Width (w)	25-200 km
Depth (D)	0-80 m
Front speed (v)	0-1500 m/s
Slope (g)	depending on v

Front speed (v)	Upper bound on gradient slope (g)
v < 750 m/s	500 mm/km
750 ≤ v < 1500 m/s	100 mm/km

Threat model adopted for GAST-D (CAT-III GBAS) [GBAS CAT-II/III Development Baseline SARPs, ICAO, 2011]

第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

### Observations in Southeast Asia



- \* Characterizing TEC gradient
  - EAR site (baseline 9km) and Bangkok (baseline 12km)
- \* Plasma bubble monitoring by EAR

第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

### Precise ionospheric gradient estimation Single-Frequency Carrier-Based and Code-Aided technique (SF-CBCA)

#### \* Basic equations

$$\text{Carrier-phase} \quad \Phi^p = r^p + b - B^p - \delta I^p + \delta T^p + \lambda N^p + \epsilon_\Phi^p$$

$$\text{Code (pseudo-range)} \quad \rho^p = r^p + b - B^p + \delta I^p + \delta T^p + \epsilon_\rho^p$$

$$\text{Iono-free combination} \quad L^p \equiv \frac{\Phi^p + \rho^p}{2}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{SD}^p &\equiv \Phi_{SD}^p - r_{SD}^p \\ &= b_{SD} - \delta I_{SD}^p + \lambda N_{SD}^p + \epsilon_{\Phi,SD}^p \quad (\delta T_{SD}^p \approx 0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{SD}^p &\equiv L_{SD}^p - r_{SD}^p \\ &= b_{SD} + \frac{\lambda N_{SD}^p}{2} + \frac{\epsilon_{\Phi,SD}^p + \epsilon_{\rho,SD}^p}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Phi}_{SD}^p \\ \tilde{L}_{SD}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -I & \lambda I \\ 1 & O & \lambda I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{SD} \\ \delta I_{SD}^p \\ N_{SD}^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{\Phi,SD}^p \\ \epsilon_{\Phi,SD}^p + \epsilon_{\rho,SD}^p \end{bmatrix}$$

#### \* Solve for $b_{SD}$ , $\delta I_{SD}$ , and $N_{SD}$ by Kalman Filtering.

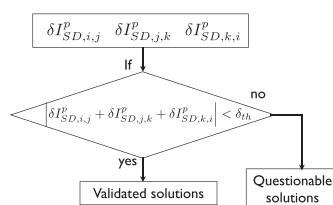
第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

### SF-CBCA Ambiguity resolution and validation

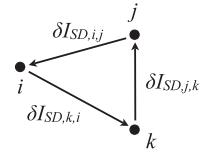
#### \* Ambiguity resolution by LAMBDA and modification to $b_{SD}$ and $\delta I_{SD}$ .

$$[b_{SD, float}, \delta I_{SD, float}, N_{SD, float}] \rightarrow [b_{SD, fix}, \delta I_{SD, fix}, N_{DD, fix}]$$

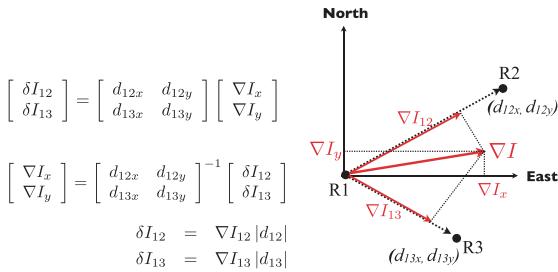
#### \* Validation of solutions by using cyclic sum



第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日



## Gradient vector estimation

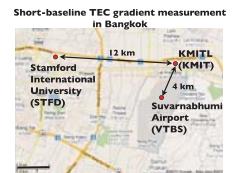


第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

7

## Analysis of data obtained in Bangkok

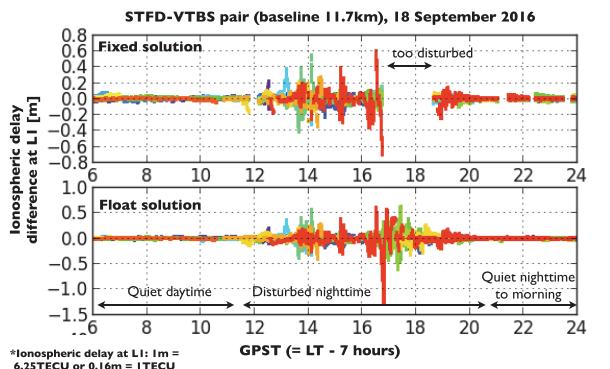
- \* Observations around Bangkok international (Svarnabhumi) Airport, Thailand
- \* Two weeks data in September-October 2011
  - September 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25
  - October 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
- \* September-October is a plasma bubble active season in the region
- \* All days in geomagnetic quiet period
  - $|D_{st}| < 50 \text{ nT}$
  - Max  $K_p = 4+$ , mostly < 2



第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

8

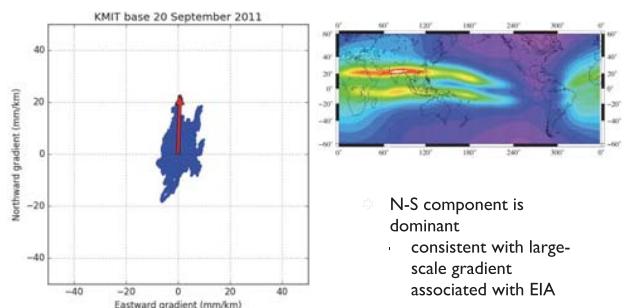
## Example



\* Ionospheric delay at L1:  $1\text{m} = 6.25\text{TECU}$  or  $0.16\text{m} = 1\text{TECU}$

9

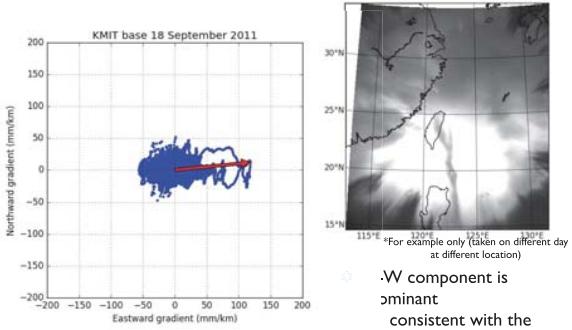
## Nominal ionosphere - Gradient vector



第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

10

## Anomalous ionosphere - Gradient vector



第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

11

## Nominal ionosphere - $\sigma_{vig}$ summary

Day	PDF			CDF		
	N-S $\sigma_{vig}$	W-E $\sigma_{vig}$	W-SE $\sigma_{vig}$	N-S $\sigma_{vig}$	W-E $\sigma_{vig}$	W-SE $\sigma_{vig}$
18/9/2011	2.45	0.91	2.14	3.11	1.32	1.40
20/9/2011	5.46	1.67	1.03	5.91	1.94	2.46
21/9/2011	1.81	0.97	0.72	2.41	1.29	1.19
22/9/2011	4.87	1.08	0.96	5.40	1.44	1.38
23/9/2011	3.34	1.95	2.00	4.08	2.47	2.34
24/9/2011	2.29	1.04	0.96	2.95	1.44	1.26
25/9/2011	1.65	1.24	1.45	2.14	1.70	1.84

\* N-S component is dominant.

\* The largest  $\sigma_{vig}$  was 5.91 mm/km.

第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

12

## Maximum gradient summary

STFD-KMIT pair (baseline 12 km)

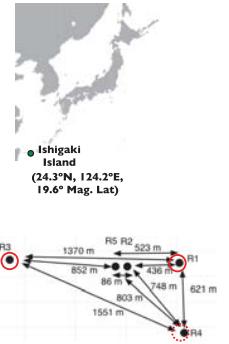
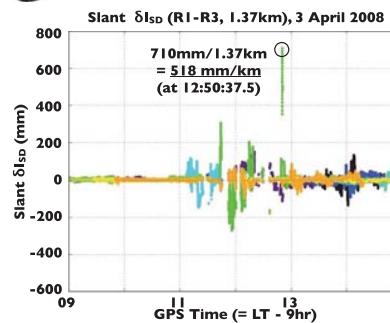
Date	Max gradient (mm/km)	PRN	Elevation (degree)	Azimuth (degree)	Time
2011/09/18	117.4289	29	28.40	-107.38	16:48 pm
2011/09/20	9.2667	05	15.43	39.99	14:49 pm
2011/09/21	58.6251	26	51.59	48.90	14:08 pm
2011/09/22	82.5978	05	36.43	73.59	13:10 pm
2011/09/23	109.6079	29	56.53	-149.34	15:04 pm
2011/09/24	102.9773	29	42.45	131.66	13:19 pm
2011/09/25	94.9202	29	55.78	-147.03	14:59 pm
2011/10/01	108.2316	29	48.96	-132.05	14:57 pm
2011/10/02	107.1058	29	54.12	147.15	13:20 pm
2011/10/03	82.4109	15	73.36	78.96	13:53 pm
2011/10/04	11.0068	09	26.20	-71.51	13:26 pm
2011/10/05	86.6698	21	39.87	116.30	14:41 pm
2011/10/06	84.3785	29	54.31	147.66	13:04 pm
2011/10/07	145.4409	21	31.13	118.92	14:10 pm

★: Disturbed days

第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

13

## Comparison with Ishigaki results



- \* Maximum gradient tends to be smaller in Bangkok than in Ishigaki.
- Relative geometry of EIA crest, plasma bubble, and observer may play a role.

第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

14

## Ionospheric gradient evaluation in Asia-Pacific Region

- \* At ICAO (International Civil Aviation Organization) Asia-Pacific region, regional assessment of ionospheric delay gradient is going on.
  - Volunteers from India, South Korea, Indonesia, Singapore, Thailand and Japan are working by sharing data and analysis efforts.
  - Preliminary results show
    - maximum: 518mm/km at Ishigaki
    - slant gradient tend to be larger around EIA crest region than around magnetic equator.
  - Results of Ishigaki and Bangkok are the part of this activity

第10回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016年9月8-9日

15

The 10<sup>th</sup> symposium of MU radar and Equatorial Atmosphere Radar  
September 8-9, 2016

## Optical and radio observations of post-midnight irregularities at magnetically low-latitudes

Tam Dao (#1), Yuichi Otsuka (1), Kazuo Shiokawa (1).

Michi Nishioka (2), Mamoru Yamamoto (3), Suhaila M Buhari (4), Mardina Abdullah(4)

1. UEE, Nagoya University, Japan. 2. NICT, Tokyo, Japan

3. RISH, Kyoto University, Uji, Japan. 4. Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

## Introduction

- Plasma bubbles and irregularities appear in the equatorial and low-latitude ionosphere. They can affect the satellite communications.
- Post-sunset plasma bubbles are well-known to be caused by the Rayleigh-Taylor instability (RTI) at post-sunset time, especially in equinoxes and high solar activity.
- However, post-midnight irregularities (FAIs) which observed recently and occurred frequently around June solstice during solar minimum has not been fully understood yet.

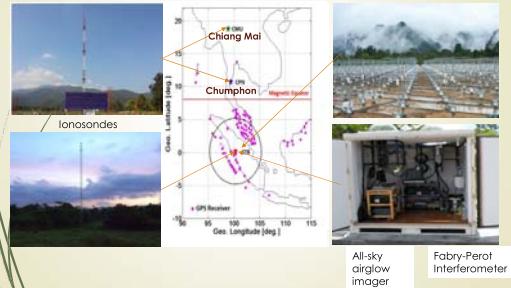
## Objectives

Contribute to understand the mechanism of post-midnight FAI's generation, we investigate the relationship of neutral winds and temperature to the post-midnight FAIs .

A case study of post-midnight FAIs on July 9, 2010 is carried out using optical and radio observations such as plasma bubbles, thermospheric neutral winds and temperature, and the altitude of ionospheric F region at Kototabang and in Southeast Asia.

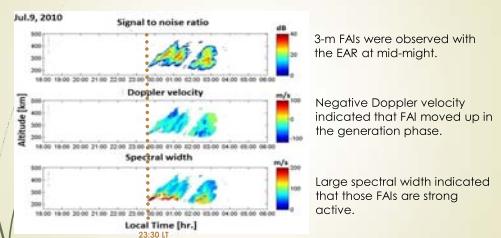
## Observations

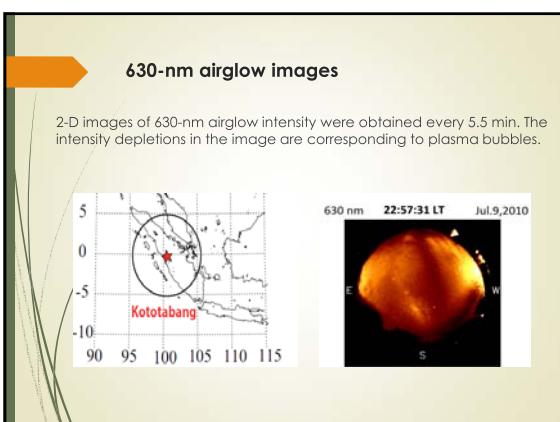
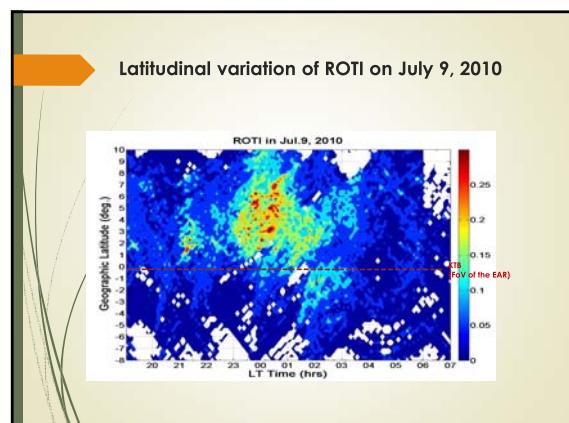
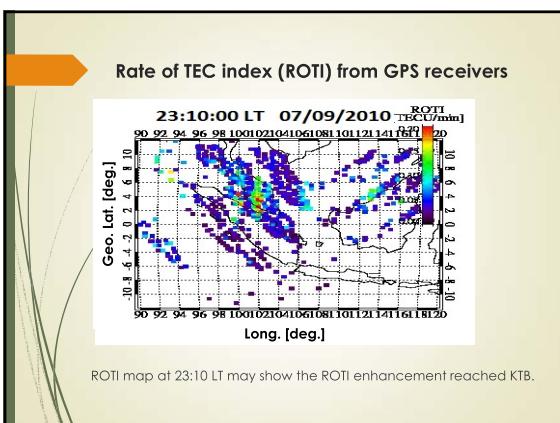
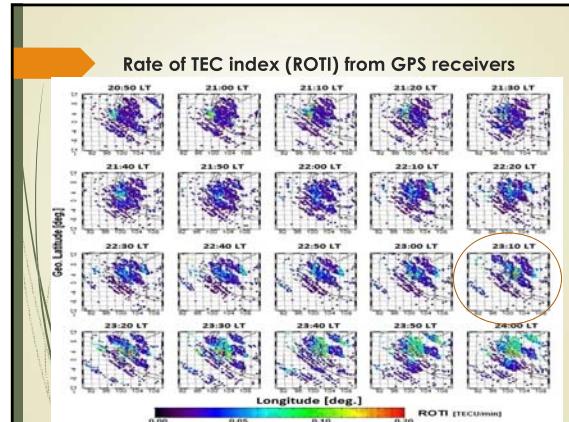
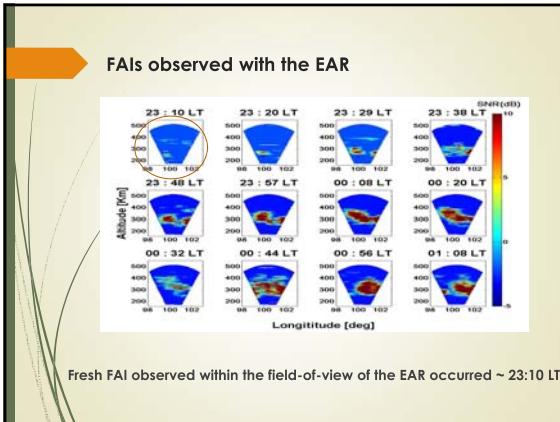
The Equatorial Atmosphere Radar (EAR)



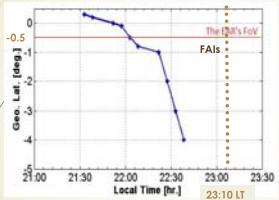
## Data Analysis

### FAIs observed with the EAR at Kototabang (KTB)





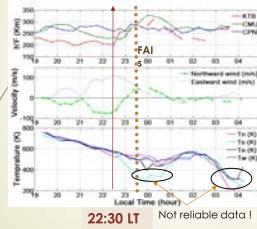
### Poleward of airglow depletion



Poleward of 630nm airglow depletion.

Plasma bubble extended rapidly from 22:30 LT

### F-layer altitude, thermospheric neutral wind, and temperature

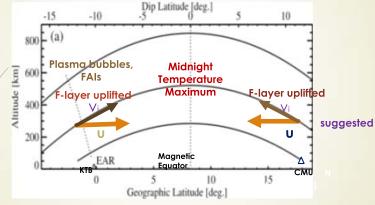


Our data indicate that Midnight Temperature Maximum (MTM) could exist at the north of KTB (equatorial region)

F layer uplifted at KTB and CMU, but not at CPN

### Discussions

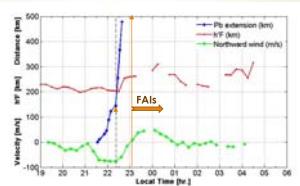
#### Discussion (1)



MTM caused by the meridional wind convergence could be related to the occurrence of FAIs

#### Discussion (2)

Equatorward wind  $\rightarrow$  F-layer uplift  $\rightarrow$  plasma bubbles extend  $\rightarrow$  FAIs



Equatorward wind may increase growth rate of plasma bubble.

#### Discussion (3)

Growth rate of Rayleigh-Taylor Instability ( $\gamma$ )

$$\gamma = \left( \frac{E}{B} + \frac{g}{v_{in}} \right) \frac{1}{N} - \frac{\partial N}{\partial z}$$

The F-layer in Chumphon is not uplifted  $\rightarrow$  no E existed

F layer uplifted at KTB and CMU  $\rightarrow$   $v_{in}$  decreased  $\rightarrow$   $g/v_{in}$  increased  $\rightarrow$  increase growth rate of plasma bubble

## Conclusions

### Conclusion (1)

Our observations on the night of July 9, 2010 are summarized as follows:

1. Post-midnight FAIs in this event collocated with plasma bubble.
2. The plasma bubble extended faster when the F-layer at KTB and CMU uplifted and equatorward thermospheric wind enhanced at KTB, then 3-m FAIs was observed.
3. Equatorward gradient of thermospheric temperature was observed at KTB.

### Conclusion (2)

We speculate that:

1. Post-midnight FAIs was associated with plasma bubble that grew during nighttime.
2. F-layer ascend at low-latitudes could increase the growth rate of R-T instability due to the decrease of  $g/v_{in}$ , resulting in growth of plasma bubble.
3. Convergence of the neutral wind could be related to MTM.

**Thank you very much  
for your attention!**

**ISEE**

## Equinoctial asymmetry in the east-west distribution of scintillation occurrence and latitudinal variation of zonal scintillation drift and neutral wind

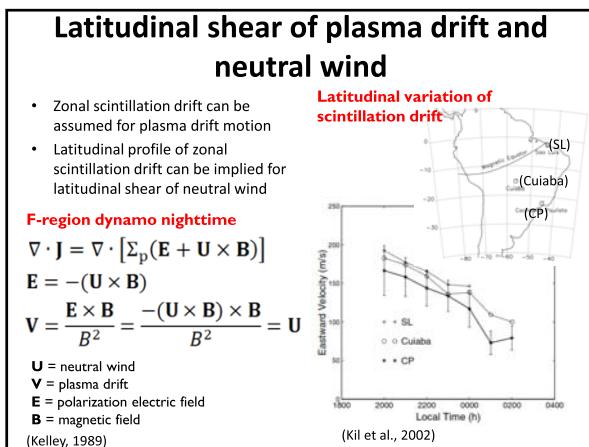
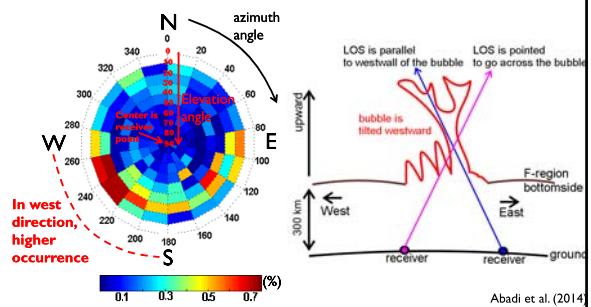
Prayitno Abadi<sup>1,2</sup>, Yuichi Otsuka<sup>1</sup>, Kazuo Shiokawa<sup>1</sup>, and Clara Y. Yatini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University, Japan  
<sup>2</sup>Space Science Center, Indonesian National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN)

E-mail: p-abadi@isee.nagoya-u.ac.jp

## Tilt of Plasma Bubble and Scintillation

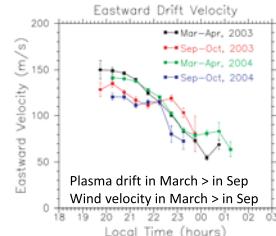
The East-West distribution of scintillation → due to tilted structure of plasma bubble  
The westward tilt of plasma bubble → due to latitudinal/altitudinal shear of plasma drift



## Equinoctial asymmetry in the ionosphere

### Equinoctial Asymmetry in the scintillation drift

Three GPS receivers in Kototabang Indonesia



### A research question

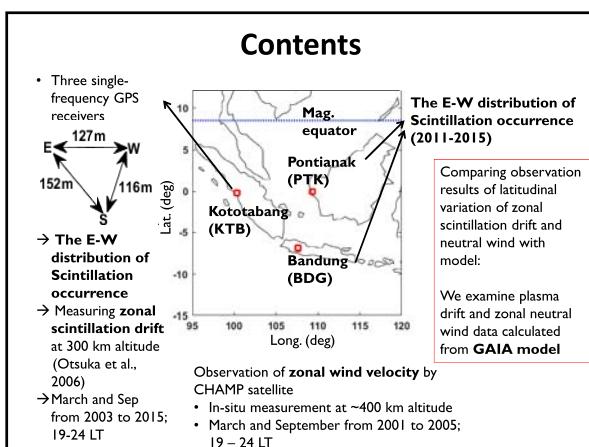
The difference of tilted structure of plasma bubble at March and September equinox?

### Purpose

To investigate the equinoctial asymmetry

- (1) East-west distribution of scintillation occurrence
- (2) latitudinal variation of zonal scintillation drift (plasma motion) and neutral wind

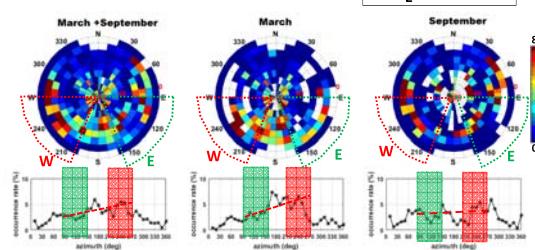
(Otsuka et al., 2006)



## East-west distribution of scintillation (1)

Scintillation distribution observed from KOTOTABANG (KTB) Station

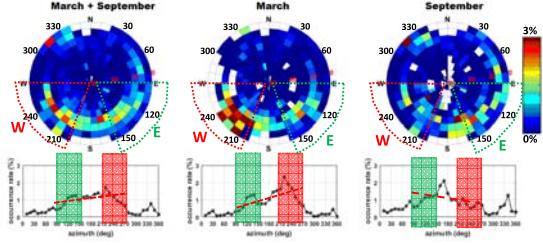
- South sky of KTB station
- Westward direction > eastward direction in March equinox



## East-west distribution of scintillation (2)

Scintillation distribution observed from **PONTIANAK (PTK) Station**

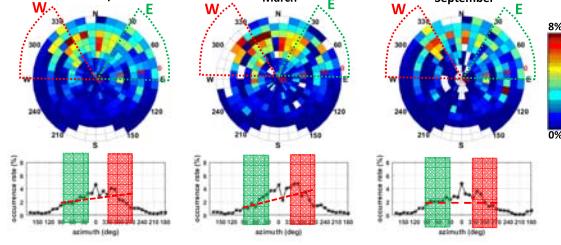
- South sky of PTK station
- Westward direction > eastward direction in March equinox



## East-west distribution of scintillation (3)

Scintillation distribution observed from **BANDUNG (BDG) Station**

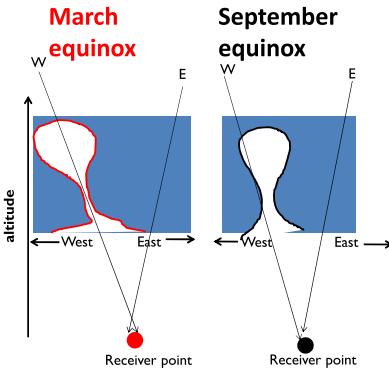
- North sky of BDG station
- Westward direction > eastward direction in March equinox



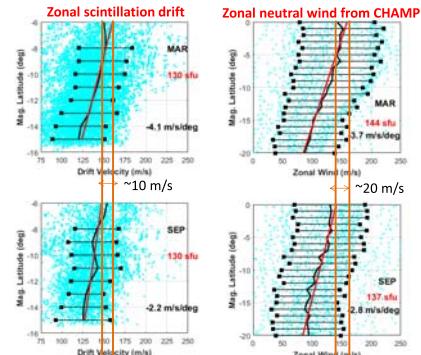
## East-west distribution of scintillation (4)

Equinoctial asymmetry in the east-west distribution of scintillation occurrence

In March equinox, higher occurrence in the westward direction than in eastward direction  
Plasma bubble could be more tilted westward in March equinox than in September equinox

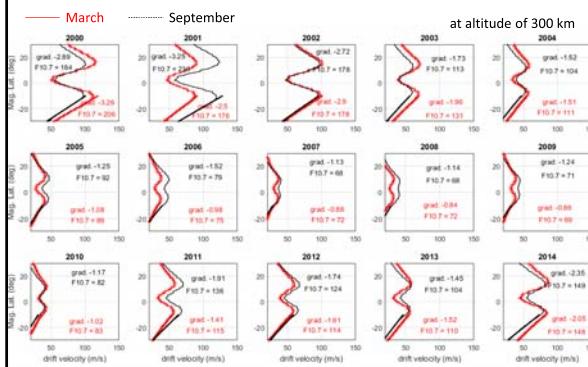


## Latitudinal Variation for Zonal Scintillation Drift and Neutral Wind

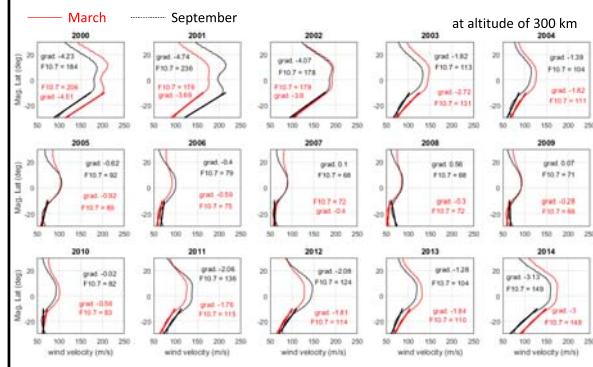


These results support our idea that plasma bubble is more tilted westward in March equinox than that in September equinox

## Latitudinal variation of plasma drift from GAIA model

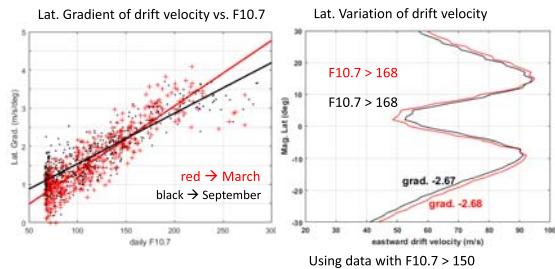


## Latitudinal variation of neutral wind from GAIA model



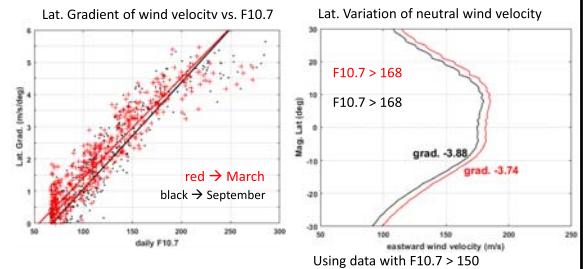
## Can GAIA model reproduce the equinoctial asymmetry?

For Latitudinal variation of plasma drift



## Can GAIA model reproduce the equinoctial asymmetry?

For Latitudinal variation of neutral wind



## Summary

- Using GPS receivers, closely spaced-receivers, and in-situ measurement of CHAMP satellite
  - We found that the E-W distribution of scintillation occurrence is different between March and September equinox. In **March equinox**, scintillation occurrence is higher in westward directions than that in eastward directions. In **September equinox**, the difference of scintillation occurrence at both directions is not discernable.
  - We found that the latitudinal gradient of both zonal scintillation drift and neutral wind in March equinox is more steeper than that in September equinox. This finding imply that plasma bubble is more tilted westward in March equinox than that in September equinox.
  - Hence, we suggested our finding on the equinoctial asymmetry in westward tilt of plasma bubble, and also in the latitudinal variation of both zonal scintillation drift and neutral wind.
- The equinoctial asymmetry of plasma drift and zonal wind is not reproduced by GAIA model.

**Thank You**

# 高精細プラズマバブルシミュレーションと 地上・衛星観測との比較

横山 竜宏<sup>(1)</sup>, 陣 英克<sup>(1)</sup>, 品川 裕之<sup>(1)</sup>, Claudia Stolle<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> 情報通信研究機構, <sup>(2)</sup>GFZ Potsdam, Germany

## 研究目的

電離圏のプラズマは、その運動が中性大気との衝突によって強く支配されているため、中性大気と電離大気の相互作用を解明することは電離圏の物理過程を理解する上で非常に重要である。赤道域電離圏においては、赤道スプレッドF/プラズマバブルと呼ばれる現象の研究が古くから行われている。プラズマバブルに伴う局所的なプラズマ密度の不規則構造が発生した場合には、電波の振幅、位相の急激な変動（シンチレーション）が生じるため、GPS等による電子航法に深刻な障害を及ぼすことが知られており、その生成機構と発生の日々変化の解明が強く求められている。現象の発見当初から、プラズマバブルは電離圏F領域下部におけるRayleigh-Taylor不安定が原因であると予想され、磁気赤道上の2次元断面における数値シミュレーションにより、不安定の非線形成長がプラズマバブル生成の主な原因であることが確認された。2000年代後半以降になると、3次元でのプラズマバブルシミュレーションが一般的となったが、プラズマバブル内部の構造の形成については深く議論されてこなかった。本研究では、プラズマバブルを非常に高い空間分解能で再現できるモデルを新たに開発し、プラズマバブルの非線形成長過程を明らかにすることに成功した(Yokoyama et al., 2014, 2015)。本稿では、過去のレーダー観測から得られたプラズマバブルの空間構造(e.g., Tsunoda, 2015)、プラズマバブル内部の電子密度不規則構造のスペクトル(e.g., Singh and Szuszczewicz, 1984)、プラズマバブル内部の磁場変動(e.g., Stolle et al., 2006)について紹介する。

## 研究手法

正イオンとしてNO<sup>+</sup>(E領域)とO<sup>+</sup>(F領域)の2種類を与える。各イオンと電子の連続の式、運動方程式、電流保存の式は以下で与えられる。

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i) = S_i \quad (1)$$

$$q_j(\mathbf{E} + \mathbf{V}_j \times \mathbf{B}) + M_j \mathbf{g} - \frac{\nabla(N_j k_B T)}{N_j} + M_j \nu_{jn}(\mathbf{U} - \mathbf{V}_j) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left[ e \left( \sum_i N_i \mathbf{V}_i - N_e \mathbf{V}_e \right) \right] = 0 \quad (3)$$

磁気赤道を中心とするダイポール座標系を用い、磁気赤道上で高度88-1270km、緯度方向に±20度、経度方向に3.4度の領域を確保した。プラズマバブルの壁面では密度勾配が非常に急峻となるため、その密度勾配を離散グリッド状で再現するためには、精度の高い数値スキームが必要である。本研究で開発した数値モデルでは、水平方向のグリッド間隔を約0.5kmとし、移流スキームに時間、空間共に3次精度を持つCIP法を用いた。経度方向に波長267kmの変動を人工的に与え、そこからのプラズマバブルの成長過程について計算を実施した。

## 結果と今後の課題

図1に、ALTAIR レーダー観測から得られたプラズマバブルに伴う不規則構造の2次元構造と、シミュレーションから得られたプラズマバブルの電子密度分布を示す。F層下部が持ち上がった数百kmスケールの構造(upwelling)の西側で特に不安定となり、二次的なプラズマバブルの構造(secondary plumes)が発生している特徴が良く再現されている。この構造が東向きに伝搬することによって、EAR観測等では、RTI(range-time-intensity)プロット上で時間と共に上方に伸びるようなplume構造として観測される。

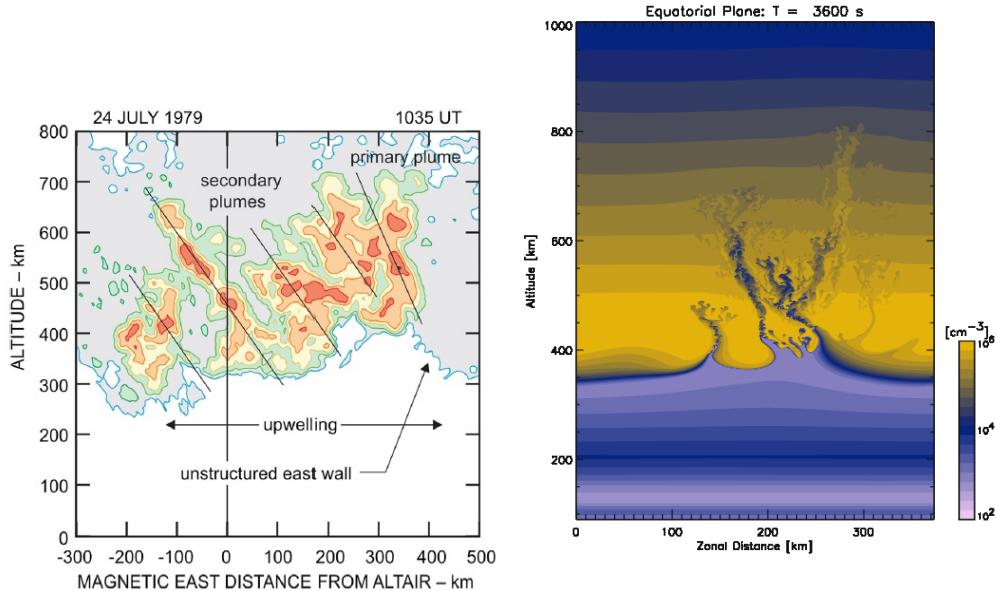


図1: (左図)ALTAIR レーダー観測から得られたプラズマバブルに伴う不規則構造の2次元構造(Tsunoda, 2015)。(右図)シミュレーションから得られたプラズマバブルの電子密度分布。

図2に、過去の衛星観測を元にしたプラズマバブル内部の東西方向の不規則構造のパワースペクトルの特徴と、図1に示したプラズマバブル東西方向の平均パワースペクトルを示す。波長1km以上のスケールにおいて、スペクトルの傾きは観測結果と近い値を取る様子が見られる。1km以下のスケールについては、空間分解能をさらに上げる必要があるが、GPSシンチレーションを起こすようなスケールの不規則構造を直接再現できる可能性がある。

図3に、Swarm衛星観測とシミュレーションそれぞれから得られた電子密度と磁場変動3成分を示す。磁場変動は、観測された磁場から固有磁場モデルを引いた残差を示している。磁気赤道をはさんだ南北両半球にプラズマバブルに伴う密度減少が観測され、その内部において主磁場方向に数nT強められている様子が見られる。これは反磁性効果によるもので、プラズマ圧と磁気圧が一定に保たれるという仮定から導くことができる。また、プラズマバブルの周囲を流れる沿磁力線電流によって、直交方向の磁場も変動している。シミュレーションにおいては、沿磁力線電流を含む電流分布を計算できるように、3次元の分極ポテンシャルを計算するように改良した。その結果、衛星観測結果と同様に磁場3成分に変動が作られることが明らかとなった(Yokoyama and Stolle, 2016)。

今後は、全球大気圏電離圏モデルから得られる背景の条件を本研究で開発した領域モデルに組み入れ、プラズマバブルの生成条件について検討を進める予定である。また、空間分解能を向上させ、GPSシンチレーションを起こす不規則構造のスケールを直接再現することを目指す。

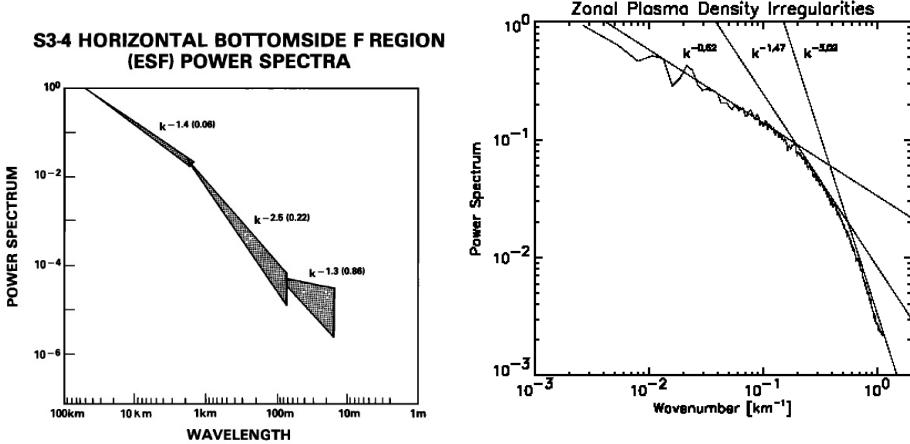


図 2: (左図) 過去の衛星観測を元にしたプラズマバブル内部の東西方向の不規則構造のパワースペクトルの特徴 (e.g., Singh and Szuszczewicz, 1984)。(右図) 図 1 に示したプラズマバブル東西方向の平均パワースペクトル。

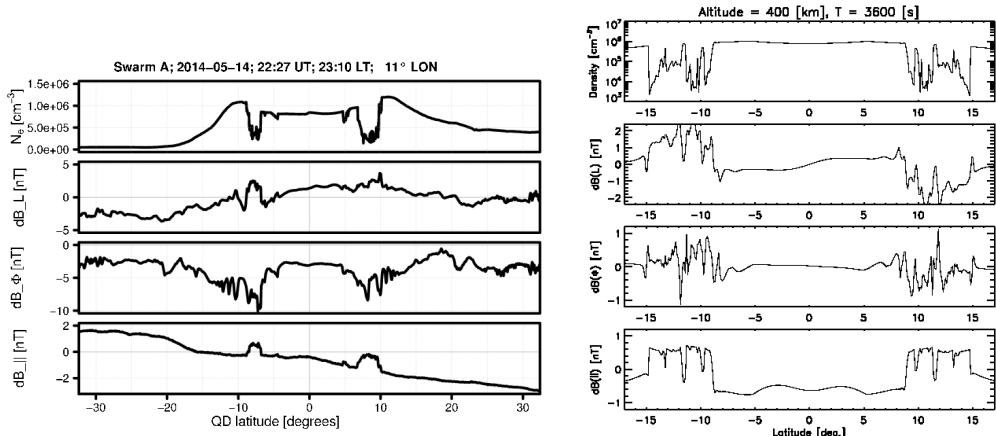


図 3: (左図) Swarm 衛星観測による電子密度と磁場変動の 3 成分。(右図) シミュレーションから得られた電子密度と磁場変動の 3 成分。

## 参考文献

- Singh, M., and E. P. Szuszczewicz, Composite Equatorial Spread *F* wave number spectra from medium to short wavelength, *J. Geophys. Res.*, **89**, 2313-2323, 1984.
- Stolle, C., H. Lühr, M. Rother, and G. Balasis, Magnetic signatures of equatorial spread *F* as observed by the CHAMP satellite. *J. Geophys. Res.*, **111**, A02304, doi:10.1029/2005JA011184, 2006.
- Tsunoda, R. T., Upwelling: a unit of disturbance in equatorial spread *F*, *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 9, doi:10.1186/s40645-015-0038-5, 2015.
- Yokoyama, T., H. Shinagawa, and H. Jin, Nonlinear growth, bifurcation and pinching of equatorial plasma bubble simulated by three-dimensional high-resolution bubble model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **119**, 10,474-10,482, doi:10.1002/2014JA020708, 2014.
- Yokoyama, T., H. Jin, and H. Shinagawa, West wall structuring of equatorial plasma bubbles simulated by three-dimensional high-resolution bubble (HIRB) model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **120**, 8810-8816, doi:10.1002/2015JA021799, 2015.
- Yokoyama, T., and C. Stolle, Low and midlatitude ionospheric plasma density irregularities and their effects on the geomagnetic field, *Space Sci. Rev.*, revised, 2016.

## 新・衛星＝地上ビーコン観測と 赤道大気レーダーによる 低緯度電離圏の時空間変動の解明

--- 科研費・基盤Aの進捗状況 ---

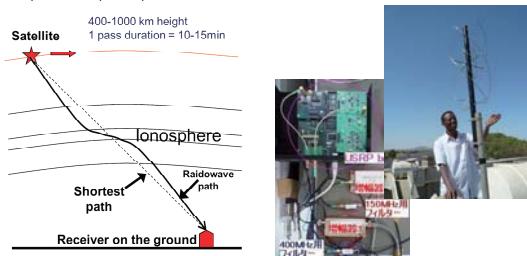
山本衛・岩田桂一(京大RISH)  
松永真由美(愛媛大)  
斎藤昭則(京大理)  
斎藤亨(電子航法研)  
横山竜宏・陣英克(NICT)  
Huixin Liu (九大理)  
大塚雄一(名大ISEE)

## 科研費・基盤研究(A)「新・衛星＝地上ビーコン 観測と赤道大気レーダーによる低緯度電離圏 の時空間変動の解明」

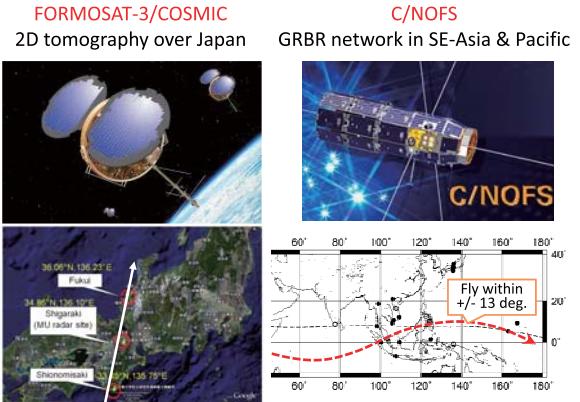
- 期間・代表者：平成27～30年度(4年間)、山本衛
- 研究課題
  - 次世代ビーコン衛星に対応するデジタル受信システムの開発(山本・松永)
  - EARと衛星ビーコン観測による空間スケール数百m～数千kmの電離圏構造の解明(山本・橋口・斎藤亨・横山・大塚)
  - EAR長期観測データを用いた太陽活動度変動に対する電離圏構造の変動解析(山本・橋口・斎藤昭則・横山)
  - GAIAシミュレーションデータを活用した電離圏大気圏相互結合の解明(山本・斎藤昭則・横山・陣・Liu・大塚)

## LEO satellite beacon and GRBR

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



## F3/C and C/NOFS used for beacon experiment



## TBEx and COSMIC-2 projects

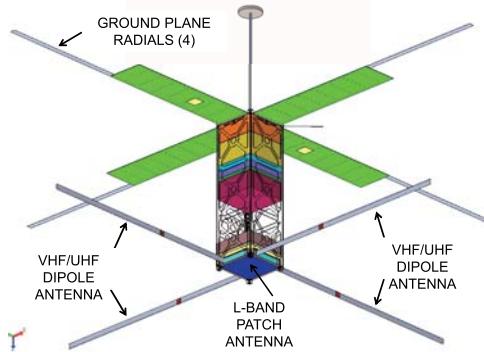
Project Name	Units	Inclination	Beacon frequency	Note
FORMOSAT-7/ COSMIC-2 (USA,Taiwan)	6	24°	383 MHz 400 MHz 965 MHz 2200 MHz	GPS-RO satellite, but has beacon TX. 383 MHz modulated Others are CW.
TBEx (USA)	2	28.5°	150 MHz 400 MHz 1067 MHz	3U CUBESAT with beacon TX only. Decided launch with COSMIC-2.

- Satellites for 150/400MHz beacon are getting old. **C/NOFS** stopped.
- There are three new satellite launches planned in 2015-2017. Especially **F7/C2** and **TBEx** will fly in the low-latitude region.
- We will study the low-latitude ionospheric disturbance by the new satellite-ground beacon experiment.

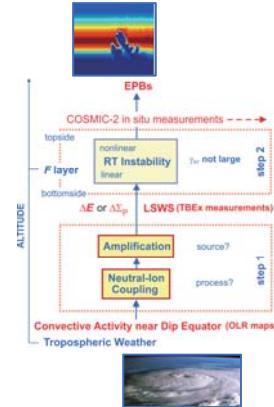
## TBEx: Tandem Beacon Experiment by SRI International

- Funded by NASA: Low-Cost Access to Space (LCAS) Program
- Two CubeSats: Identical tri-frequency (150, 400, 1067 MHz) radio beacons
- To be launched in tandem into near-identical (~28 deg inclination) orbits (Piggyback with **COSMIC-2!!**)
- TBEx objective:** Capture space-time description of equatorial plasma bubbles (EPBs)
- Overall science question:** Does causal relationship exist between tropospheric weather, large-scale wave structure (LSWS), and EPBs?

## TBEx: 3U CUBESAT beacon antenna design



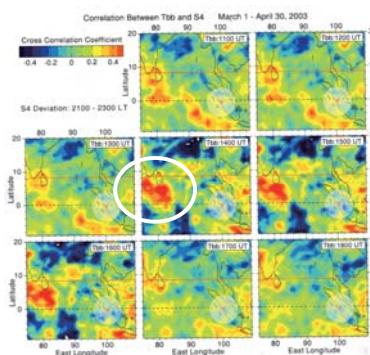
## Causal Link: Convective Activity to EPBs?



- Input, Stage 1: Outgoing longwave radiation (OLR) can be used to map distribution of convectively active regions
- Output, Stage 1 (or Input, Stage 2): Large-scale wave structure (LSWS) can be measured as TEC variations using TBEx & cluster of ground receivers
- Output, Stage 2: Equatorial plasma bubbles (EPBs) can be measured with ground-based radar & F7/C2 in situ sensors
- Partitioning link into two stages allows clear evaluation of roles played by contributing sources and processes

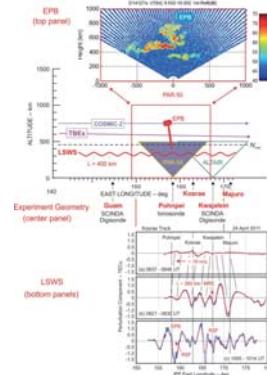
## Relationship between plasma bubble and weather

Ogawa et al, Earth Planets Space, Vol. 61, pp. 397-10, 2009



- Correlation between
  - Daily variation of nighttime GPS S4 index at the EAR site (Indonesia)
  - Daily variation of Tbb as cloud-top temperature
- Maximum correlation was ~0.4. Enhanced region is shifted west of S4 measurement location.

## Envisioned Coordinated Measurements for eTBEx



- LSWS from TEC variations from TBEx (bottom panel)
- EPBs from PAR-50 and COSMIC-2 in situ data (center panel)
- Convective activity from OLR maps (not shown here)
- Partitioning of scintillation regions with TBEx and F7/C2 beacons
- Joint PAR-50 and ALTAIR measurements, if possible (field campaigns)

12

## TBEx and COSMIC-2 beacon signals

Project Name	Units	Inclination	Beacon frequency	Note
FORMOSAT-7/ COSMIC-2 (USA,Taiwan)	6	24°	383 MHz 400 MHz 965 MHz 2200 MHz	383 MHz modulated Others are CW.
TBEx (USA)	2	28.5°	150 MHz 400 MHz 1067 MHz	Decided launch with F7/C2.

- We develop a new GRBR system that covers 150/400/965/1067MHz signals for new satellites.
- Antenna design ... Dr. Mayumi Matsunaga (Ehime U.)
- Digital receiver development ... Yamamoto + Iwata (RISH)

## TBEx + COSMIC-2 launch vehicle: Falcon Heavy Scheduled in August 2016 → September 2017 ??

Recent Falcon-9 problems



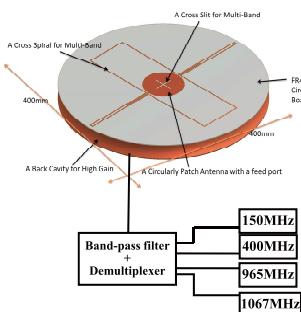
Failure in June 2014



Another failure in September 2016

## Development of new GRBR

Antenna part by Prof. Matsunaga at Ehime Univ.



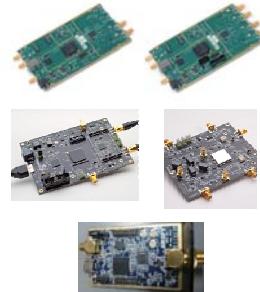
### CONCEPT

- 150MHz, 400MHz, 965MHz and 1067MHz Right-Hand Circular polarization
- Single feed (One port)
- Maximum size: 400mm x 400mm
- Getting high antenna gain with cavity back

## Development of new GRBR

SDR part by Kyoto Univ. + Hsing Wu Univ.

Software: Keep using GNU Radio (Open SDR toolkit, very popular)  
Hardware: Now evaluating three different SDR boards shown below.



USRP B200 (left) and B210 (right) from Ettus.  
Cost: highest, F-tune: wide-band, most accurate  
RX + TX, USB3.0, Sync: 10MHz  
<https://www.ettus.com/>

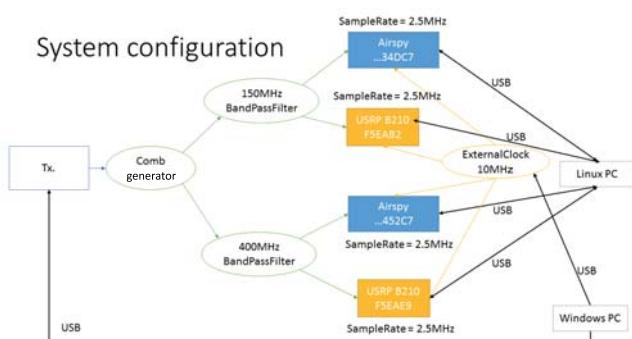
Blade RF x40 (left) and up/down converter XB-200 (right) from Nuand.  
Cost: middle, F-tune: wide-band, coarse tuning  
RX + TX, USB3.0, Sync: 38.4MHz  
<https://www.nuand.com/>

Airspy  
Cost: lowest, F-tune: narrower, coarse tuning  
RX only, USB2.0, Sync: 10MHz  
<http://airspy.com/>

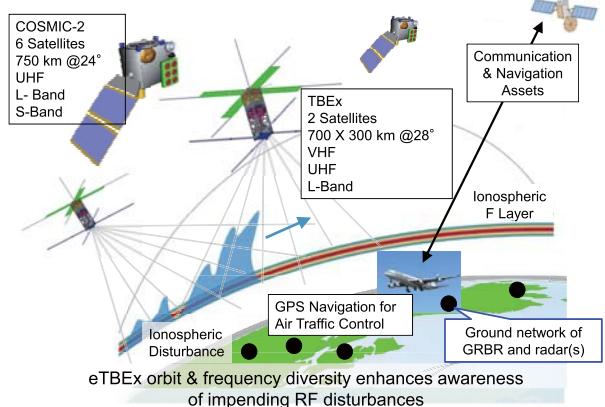
## USRP/Airspy mixed synchronization

Test of 150/400MHz signal on desk

### System configuration



## TBEx／COSMIC-2衛星打上げ後の状況



## GEONET GPS-TEC観測に基づく電離圏3次元トモグラフィーとその応用

山本衛・水野遼(京大RISH)  
斎藤昭則(京大理)  
斎藤亨(電子航法研)

## Contents

- GEONET
  - "GNSS Earth Observation Network System" by GSI (Geospatial Information Authority of Japan)
  - Every 30s data are available from 1200+ locations
  - Realtime 1s data are now available from most locations, but with costs
- Three dimensional (3D) Tomography analysis with constrained least-squares method
  - Technique, and results from model/real data
- Realtime 3D tomography service
  - System description and achievements  
We started the service since April 2016



### Real-time GPS-TEC 3D tomography

#### Problems against the real-time system

- Number of stations is reduced to 200

Original tomography analysis was using data from all GEONET stations (1200 locations). But for the real-time system we can use data from only 200 stations that comes from limitation of the ENRI-GSI contract.

→ Need to obtain stable result from 200 data.

- Calculation speed-up

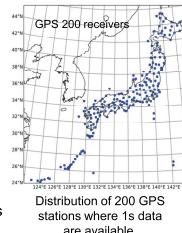
Original 3D tomography analysis took about 30 minutes of calculation by MATLAB.

→ Calculation speed-up is necessary. (Aimed period/latency is 15min)

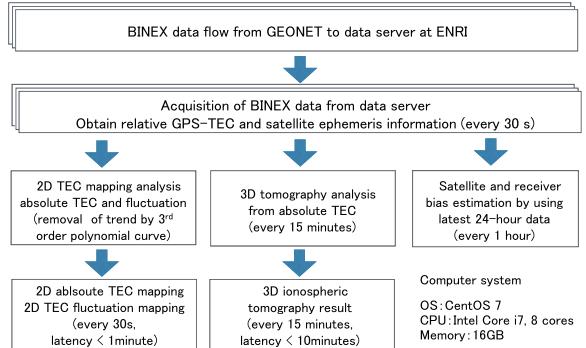
- Estimation of absolute TEC

Estimation of absolute TEC is necessary before the tomography, in the original analysis, it was determined by other system.

→ Absolute TEC estimation is necessary included in the real-time system.



### Realtime tomography analysis system



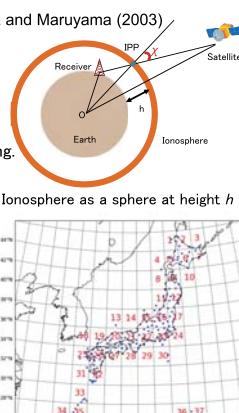
### Estimation of biases

#### Assumption

- Ionosphere is a thin sphere at certain height.

- Biases do not change for 24 hours.

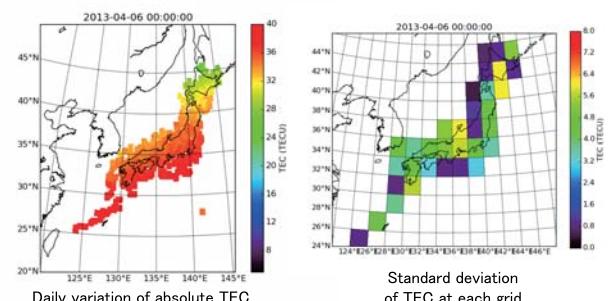
- TEC is constant within 2deg × 2deg at any timing.



Maxtrix size: about 50000 x 3000  
Ratio of non-zero elements < 0.1%  
⇒ Large sparse matrix LSE solver  
Improved over 10min → less than 1s

39 areas of 2deg × 2deg grid

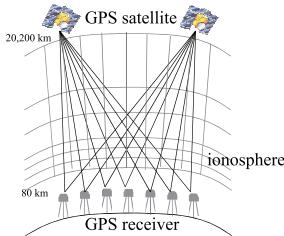
### Distribution of absolute TEC (with < 1 min latency)



Typical TEC variation  
Morning (~0:00 UT) ⇒ Noon (~6:00 UT) Low latitude TEC is high. Area of high TEC moves westward.  
Noon (~6:00 UT) ⇒ Night (~12:00 UT) TEC decreases from north-side.  
Night (~12:00 UT) ⇒ Morning (~18:00 UT) TEC gradually decreases, and flattened.  
Standard deviation of TEC at 2deg × 2deg cell is within several TEC units.

## 3D tomography with GPS-TEC

- Use the TEC data along the ray path from GPS satellite to GPS receiver



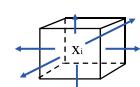
GPS-TEC observation matrix  
 $\bar{A}\bar{x} = \bar{b}$   
 GPS-TEC value  
 Electron density in each grid  
 Length of path in each grid

- Limitation of the GPS observation: lack of horizontal observation path
- The proposed method combines least-square fit and constrain conditions.

## Constrained least-squares method

- Constrain matrix

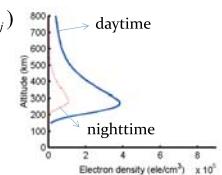
$$\bar{W}\bar{x} \approx 0$$



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

Constrain parameter

Strong constrain  
 80 ~ 150 km; 800 km ~  
 Weak constrain  
 150 ~ 800 km

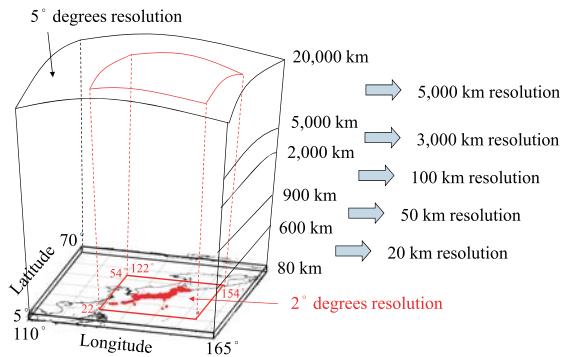


Least-square term Hyper parameter Constrain term

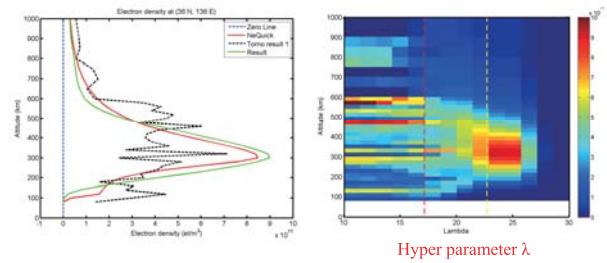
- Cost function:

$$J(\bar{x}) = \|\bar{b} - \bar{A}\bar{x}\|^2 + \lambda \|\bar{W}\bar{x}\|^2$$

## Area & grid of 3D GPS tomography

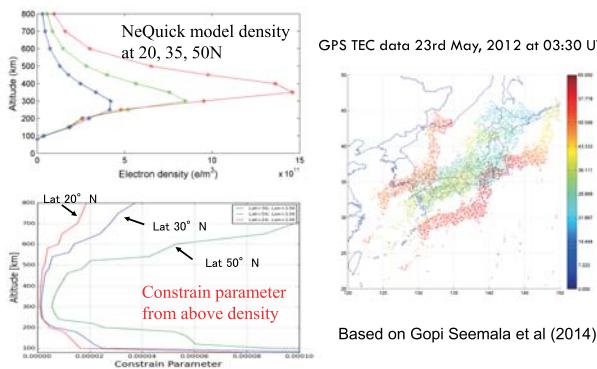


## Example result of constrained least-squares fitting



We conduct many fitting runs by changing hyper parameter, and select appropriate results from them. This selection scheme is the key!

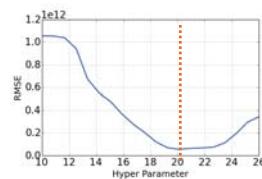
## Selection of constrain parameter



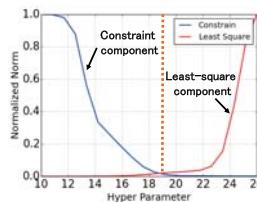
Based on Gopi Seemala et al (2014)

## Selection of hyper parameter $\lambda$

Select  $\lambda$  with minimum RMSE



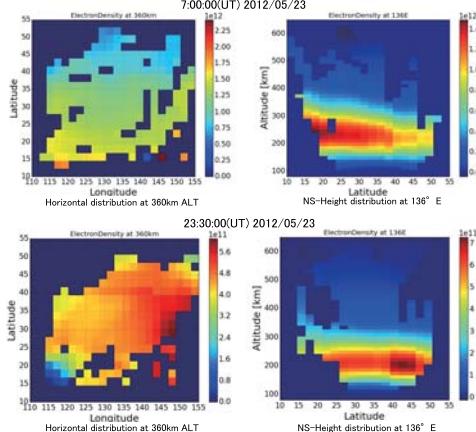
Relationship between  $\lambda$  and RMSE



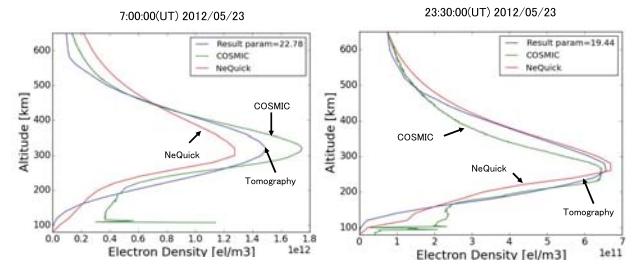
Relationship between  $\lambda$  and normalized least-squares and constraint components

L-curve method ... Select  $\lambda$  where least-squares component and constraint component balance.

## Result of 3D tomography from the real GPS-TEC data

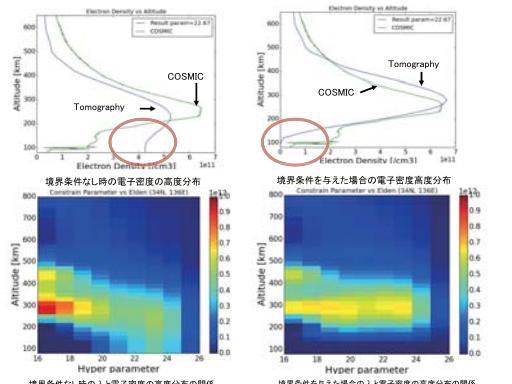


## Comparison to GPS occultation with COSMIC



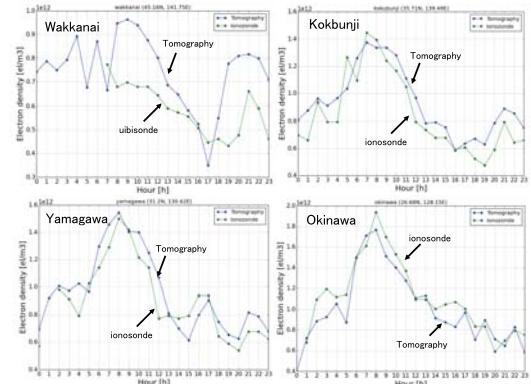
Tomography results well resemble to COSMIC occultation density profile.  
Tomography cannot resolve Sporadic-E layer that is found from COSMIC occultation.

## Variation of analysis by boundary condition



ピーク電子密度が低下する時間帯(23:30 UT)では、トモグラフィ解が高度下方向へ分散する現象が確認された。境界条件を適応している場合は、解の分散は起きておらずCOSMICとよく一致する結果が得られている。

## Comparison to ionosonde F2 peak density

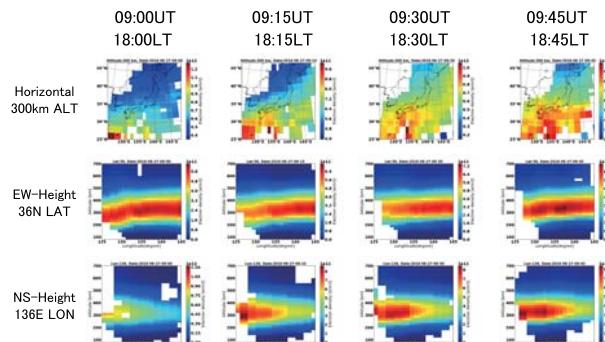


Tomography results well resemble F2-peak density from ionosondes at Kokubunji, Yamagawa, and Okinawa. Differences are large at Wakkanai, but this is edge of the analysis region.

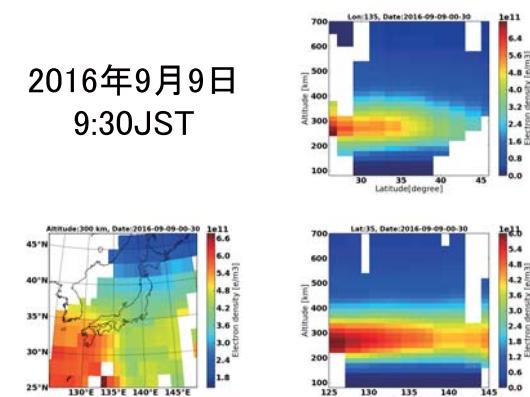
We started real-time service in April 2016

<http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/>

Example of today (June 27, 2016)



2016年9月9日  
9:30JST



## まとめと課題

- GPS-TECを用いたリアルタイム3次元トモグラフィーを開発
  - 電子航法研の全国200地点からの1秒値(BINEX)を利用。
  - 15分ごとに解析、解析時間は10分以下。  
(1時間ごとにバイアス値を推定)
  - LINUX PC (Intel i7 CPU) + Pythonプログラム
  - <http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/> から公開中。
- これからの取り組み
  - 解析結果の検証: MUレーダー、イオノゾンデ他との比較
  - 過去データの解析
    - GEONETのRINEXデータは入手済(約6テラバイト)
    - オンデマンド解析(最新PCで解析=5分以下)
    - 大量解析(パソコン利用? 要検討)
    - 全受信局(1200-1300点)を使ったら?
  - データ表示プログラムの充実化(webサービスも重要)

## 応用

### イノベーション

- 研究用途
- 電波伝搬シミュレーションに利用(NICT)
- トモグラフィー解析に含まれないGNSS-TECの検証
- 合成開口レーダーへの影響評価など
- 。。。

### 国際化

- 台湾 and/or 韓国の地上GPS観測結果を加えて解析範囲を拡大?
- オープンプログラマ化?
- 。。。

これらを議論するためのWSを行いたい。

# 新しい衛星ビーコン観測用ディジタル受信機の開発

岩田桂一、山本衛（京都大学生存圏研究所）

## 1 研究背景及び目的

以前より低軌道人工衛星(LEOS: Low Earth Orbit Satellites)からのビーコン信号を地上受信機で受信することで、電離圏の全電子数 (TEC: Total Electron Content) が推定されている。この電離圏 TEC 推定によって、電離圏の様態の解明に貢献することが期待されている。これはビーコン信号の電波的経路が電離圏の電子の影響を受けて最短距離から曲がるが、周波数が異なると電子の影響の大きさも異なることを利用して、周波数の異なる 2 つの信号の分析から行われている。現在、周波数は 3:8 となる 150 MHz と 400 MHz の 2 周波数が用いられている。

しかし、利用している人工衛星の老朽化が進んでおり、既に停止したものもある。そのため、新たな人工衛星が計画されており、本研究ではこの新型人工衛星に対応する観測システムの開発を行う事を目的とする。対応予定の新型人工衛星のビーコン信号の周波数は新たに 965 MHz と 1067 MHz が加わり、最大で同時に 3 周波数の受信を行う必要がある。このため対応周波数の増加と、高周波数化に対応することが必要となる。

## 2 TEC 推定

衛星ビーコン観測による TEC 推定は下式で求められる。

$$\frac{\text{phase\_unwrap}_1 - \text{phase\_unwrap}_2}{f_1 - f_2} = \frac{\pi A}{c} \left( \frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) \text{TEC} + \eta'$$

ただし、 $f_1$ 、 $f_2$  は 2 つのビーコン信号の周波数、 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  は光速、 $A = e^2 / \{(2\pi)^2 m \epsilon_0\} = 80.6 \text{ m}^3 \text{s}^{-2}$ 、 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$  は自遊空間の誘電率、 $e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 、 $m = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 、 $\eta$  はシステム位相バイアスである。上式より、2 つのビーコン信号の位相差を求めることで、TEC 値推定が可能となる。

## 3 観測システムの構成

対応予定である新型人工衛星と周波数は、COSMIC2 衛星の 400 MHz、965 MHz、TBEx 衛星の 150 MHz、400 MHz、1067 MHz である。これらの人衛星は 2017 年 9 月以降に同時に低緯度域に打ち上げられる。これらからのビーコン信号をアンテナで受信し、ディジタル受信機へと伝搬する。ディジタル受信機として、ソフトウェア無線機 (SDR: Software-Defined Radio) を用いる。SDR の制御とデータの保存と解析には LinuxPC を用いる。また同種の SDR を 4 台用いて、つまり各周波数に対して 1 台用いることとし、4 台の SDR はクロック信号によって動作を同期させる。シス

ム構成図は図 1 のようになる。

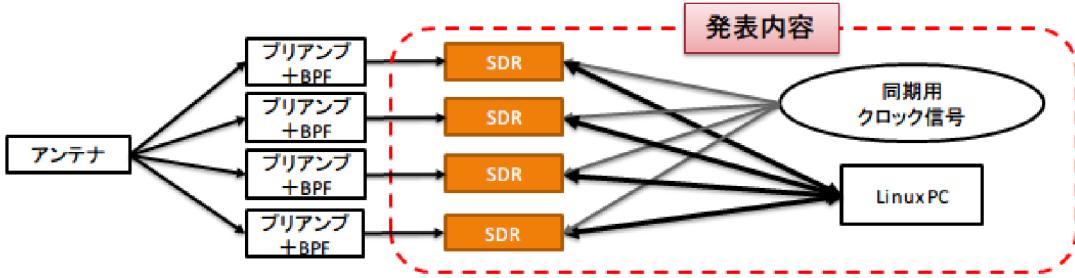


図 1: システム構成図

#### 4 SDR の比較検討

制御ソフトである GNURadio で利用可能な SDR は 複数製品があり、今回は USRP B210/B200、BladeRF x40、Airspy R2 の 3 製品を検討した。なお、現在の システムでは USRP の旧型を用いている。各 SDR の周波数チューニング性能について検討した。ただし今回の発表では USRP と Airspy のみを扱う。

USRP と Airspy に 150MHz /400MHz の信号を入力し、それぞれでのアンラップ位相差を求めた。

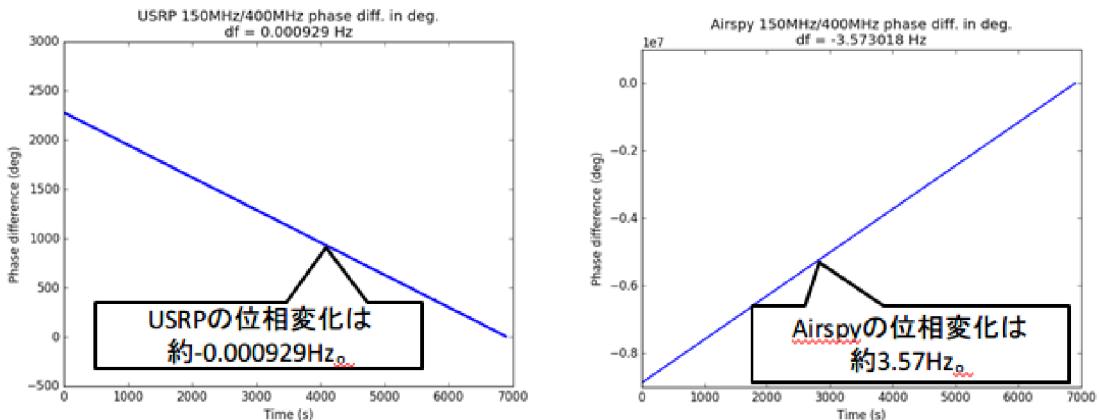


図 2: USRP と Airspy の 150MHz/400MHz を入力とした時間に対するアンラップ位相差

図 2 より Airspy の方が USRP よりアンラップ位相差の変化が大きいことが分かる。このアンラップ位相差の変化は一定であり、受信システムで発生しているものなので周波数オフセットとして扱うことになる。

次に Airspy の設定周波数を 150MHz と 400MHz とし、それぞれの場合にその周波数の信号を入力して観測された周波数との誤差のアンラップ位相を求めた所、150MHz は-0.0067679 Hz、400MHz は-9.536749 Hz であった。また、100~1200MHz 間の 10MHz 毎に受信設定し、各周波数での設定周波数と観測周波数との差を検討した。

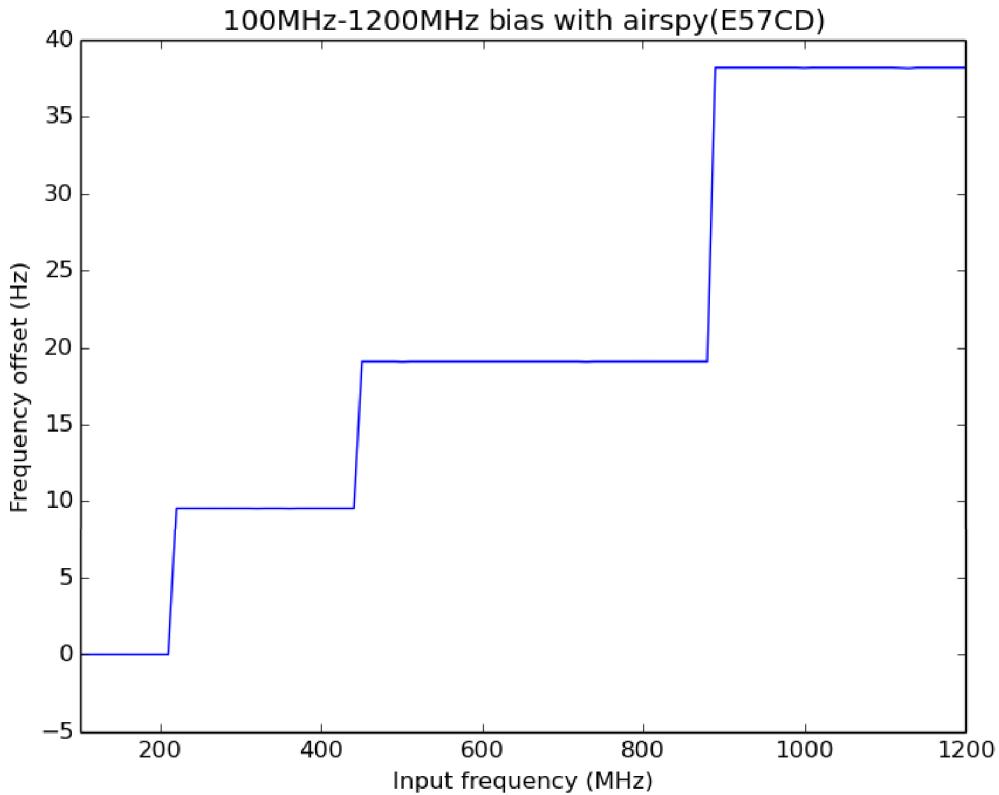


図 3:Airspy の 100MHz から 1200MHz での入力周波数に対する観測周波数の誤差  
図 3 から Airspy は設定周波数に対して規則的に誤差が大きくなることが分かった。

次に USRP と Airspy の個体による周波数チューニング性能を検討した。それぞれ 4 台ずつを用いて、そのうち 2 台で周波数オフセットを計算し、その平均値と標準偏差値をそれぞれ個体の組み合わせで 100 回計算した。各組み合わせでの平均値と標準偏差値を求め、これらの平均値と標準偏差値を求めた。

		平均値		標準偏差値	
		平均値	標準偏差値	平均値	標準偏差値
USRP	400MHz/150MHz	1.03mHz	0.00192mHz	0.0147mHz	0.00892mHz
	400MHz/1067MHz	-0.756mHz	0.00260mHz	0.00160mHz	0.000204mHz
Airspy	400MHz/150MHz	-9.54Hz	3.11mHz	0.0568mHz	0.106mHz
	400MHz/1067MHz	-14.3Hz	6.41mHz	0.0183mHz	0.0131mHz

表 1:USRP と Airspy の個体による周波数オフセットの平均値と標準偏差値

## 5 新型人工衛星の送信機との実験

次に新型人工衛星の送信機からの信号を直接ケーブルで USRP に送信した。TBeX の送信機からの 150MHz / 400MHz の信号の時間に対するアンラップ位相差を図 4 に、

COSMIC-2 の送信機からの 400MHz / 965MHz と 400MHz / 2200MHz の信号の時間に対するアンラップ位相差を図 5 に示す。

図 4 より周波数オフセットが 0.0737Hz とわかり、同様に図 5 から -1.37Hz、-0.949Hz であることが分かった。これらの周波数オフセットは USRP の周波数オフセットより大きいため原因を検討した所、送信機の PLL の目標周波数と実際に設定される周波数の誤差があることが分かった。この誤差によって上記の値に近い 0.0745Hz、-1.37Hz、-0.951Hz が求まった。つまり、送信機の PLL の目標周波数とのズレからほぼ説明できる。

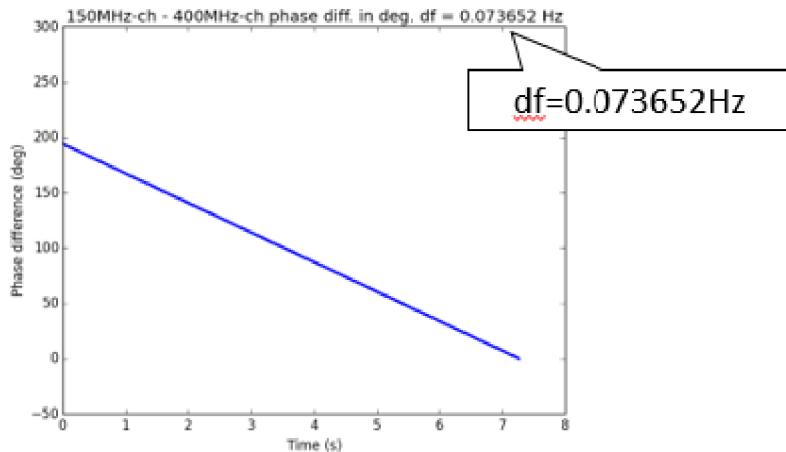


図 4: TBEx からの 150MHz/400MHz の時間に対するアンラップ位相

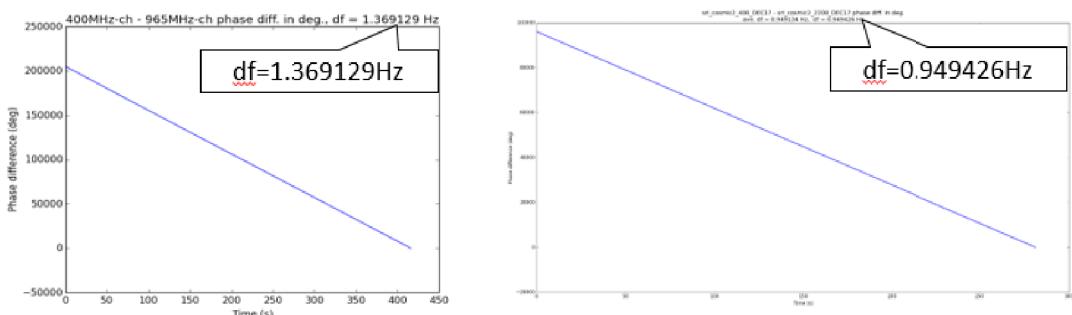


図 5: COSMIC-2 からの 400MHz / 965MHz と 400MHz / 2200MHz の時間に対するアンラップ位相

## 6 周波数オフセットが TEC 推定に与える影響

最後にこれまでの結果から得られた周波数オフセットによる TEC 推定への影響を検討した。実際の観測の測定時間に近い 20 分間での影響を検討した所、表 2 のようになつた。TEC 推定の実際の例では 20 分間で TEC が約 0~30 を 1 往復するため、USRP はほとんど問題ないが、Airspy の平均値、TBEx と COSMIC-2 の送信機による周波数

オフセットはシステムバイアスとして計算しなければならないことが分かった。

機体	周波数[MHz]	周波数オフセット[Hz]	TEC[TEU]
USRP	400/150	$0.00103 \pm 0.00147$	$0.0602 \pm 0.000859$
	400/1067	$0.000756 \pm 1.60 \times 10^{-5}$	$0.314 \pm 0.000665$
Airspy	400/150	$9.54 \pm 5.68 \times 10^{-5}$	$557 \pm 0.00331$
	400/1067	$14.3 \pm 1.83 \times 10^{-5}$	$5940 \pm 0.00760$
TBEx	150/400	0.0745	11.6
COSMIC-2	400/965	1.37	590
	400/2200	0.952	351

表 2:各周波数オフセットが 20 分間で TEC 推定に与える影響

## 5まとめと今後の予定

SDR の周波数チューニング性能を検討した。また、新型人工衛星の送信機にバイアスがあることが分かった。今後は、受信システムを実際に構成、実際の人工衛星からの受信テストを行う。また、受信データから TEC 値を推定する信号処理手法、取得データの効率のよい解析手法についても検討を行う。

## 参考文献

- [1] Yamamoto, M., "Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio," Earth Planets Space, 60, e21-e24, 2008
- [2] Davies, K., "Recent progress in satellite radiobeacon studies with particular emphasis on the ATS-6 radio beacon experiment," Space Sci. Rev., 25, 357-430, 1980

# ELF-VLF 帯電磁界計測に基づいた雷放電観測による積乱雲早期検知の検討

山下幸三<sup>1</sup>・高橋幸弘<sup>2</sup>・増田拓<sup>3</sup>・岩男辰雄<sup>3</sup>・虫明一彦<sup>3</sup>

1:サレジオ工業高等専門学校 電気工学科

2: 北海道大学 大学院理学院 宇宙理学専攻

3:株式会社いろはプロジェクト

## 1. はじめに

近年、積乱雲に伴う雷雨被害が国内外において多数報告されている。都市の下水処理能力を超える豪雨は都市型水害により、落雷は鉄道網・送電網・通信網の停止により、都市機能を麻痺させる。雷雨被害の低減を可能とする積乱雲監視法の確立は、都市機能の維持における喫緊の研究課題である。

積乱雲監視における有用な方法論の一つとして、積乱雲に伴う雷放電の観測が挙げられる。雷放電による電磁界放射は数 Hz から数 GHz にわたる広帯域に及ぶ。LF 帯以上の周波数帯における観測では、高感度・高精度な雷観測が実現できる。米国では 100 点以上の落雷センサーが北米に配備・運用され、落雷検出率は 80–90%、位置推定誤差は 500m 以下と見積もられている<sup>[1]</sup>。また、長距離伝搬特性を持つ低周波帯の電磁界計測では、少数観測点による総観規模の雷活動監視が可能である。World Wide Lightning Location Network では VLF 帯電界計測センサーを全球約 40 点に配備し、位置推定精度 30km 程度、検出率 30% 程度で全球落雷分布の導出に成功している<sup>[2]</sup>。各手法に利点があり、観測目的に合わせて手法を使い分け相補的に利用する必要がある。

## 2. 目的

本研究は、従来研究では総観規模の落雷活動監視に適用してきた ELF-VLF 帯電磁界計測システムによる対流セル(空間スケール: 約 10km)の監視を検討するものである。長距離伝搬特性を持つ ELF-VLF 帯電磁界計測網を従来にない高密度で構築し、雷観測の高感度化を図った。

本稿では 2015 年 8 月 17 日の取得データを観測事例とし、解析対象とした時間帯における雷分布を導出した。既存の雷観測網により導出された雷分布と比較し、関東圏に構築した ELF-VLF 帯電界計測網の雷位置推定精度、雷放電検出感度を検証した。

## 3. 観測

本研究では ELF-VLF 帯電界計測システムを山梨県甲府市・千葉県大網白里市・群馬県前橋市の 3 点に設置し、2015 年夏季に関東圏における雷放電観測を実施した。観測網の概要を図 1 に示す。

観測システムの諸元を下記の表 1 にまとめる。鉛直電界の受信アンテナとして、各点にダイポールアンテナを設置した。受信信号をプリアンプ・メインアンプで構成される受信回路にて増幅し、データ記録 PC にて AD 変換する。サンプリング周波数は 100kHz である。なお、各観測点におけるデータ記録は、GPS 受信機により誤差 10 マイクロ秒以下で時刻同期している。

発雷地点の推定では、到來時間差法を適用した。雷信号の到来時刻として、各点で得られた過渡波形のピーク振幅値に対応した時刻を用いた。

表 1 観測システムの諸元

項目	詳細
観測成分	鉛直電界
観測周波数帯	1-40kHz
サンプリング周波数、分解能	100 kHz, 16 bits 分解能
記録データの時刻精度	<10μs (Irig-B Time code 取得)
データ記録形式	連続波形取得

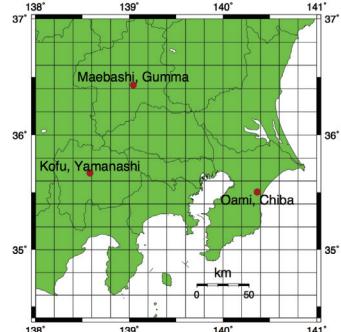


図 1 関東圏 ELF-VLF 帯電磁界計測網

## 4. 結果と考察

### 4.1. 雷位置推定の精度評価

本研究では多点計測で得られた電界信号の到来時間の差を用いて発雷地点を推定した。位置推定精度の検証のため、Japan Lighting Detection Network(JLDN)の雷データを比較対象として使用した(表 2 参照)。同データの落雷の捕捉率 90%以上、発雷地点推定における平均誤差は 500 m 以下と見積もられている。

表 2 JLDN データとの比較条件

項目	詳細
時間帯	2015 年 8 月 17 日 14:00-17:00
解析イベント数	全 42 イベント (落雷:34 イベント、雲放電:8 イベント)
解析領域	北緯 35°40'24" / 東経 139°28'53" を中心とした 300km × 300km

結果を図 2 に示す。雷位置推定における JLDN データとの差異は平均値 4.5km, 中央値 3.8km となった。空間スケール 10km 程度の対流セルの監視に必要な精度を得られたと考えられる。

また、全 42 イベントのうち、8 イベントは雲放電による電界であった。先行研究では、落雷と雲放電の双方を取得した観測による積乱雲監視の有効性が議論されている。本結果は、従来研究では主として落雷活動監視に適用してきた ELF-VLF 帯電界計測を雲放電観測へ適用する事に成功したことを示すものと考えられる。

### 4.2. 観測事例

2015 年 8 月 17 日 15:00-15:20 の時間帯における 10 分ごとの降雨領域と雷活動領域の変位を図 3 に示す。東京湾沿岸に沿って生じた南北約 100km にわたる降雨領域の東への移動に伴い、雷活動領域も同様に東へ移動していることが確認できた。

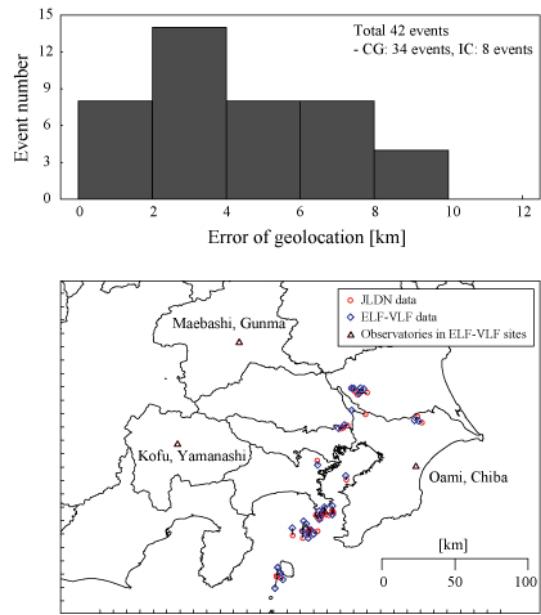


図 2 2015 年 9 月 17 日 14:00-17:00 に実施した JLDN の雷データとの雷位置推定の比較 (上図: 誤差分布、下図: 全 42 イベントの空間分布の差異)

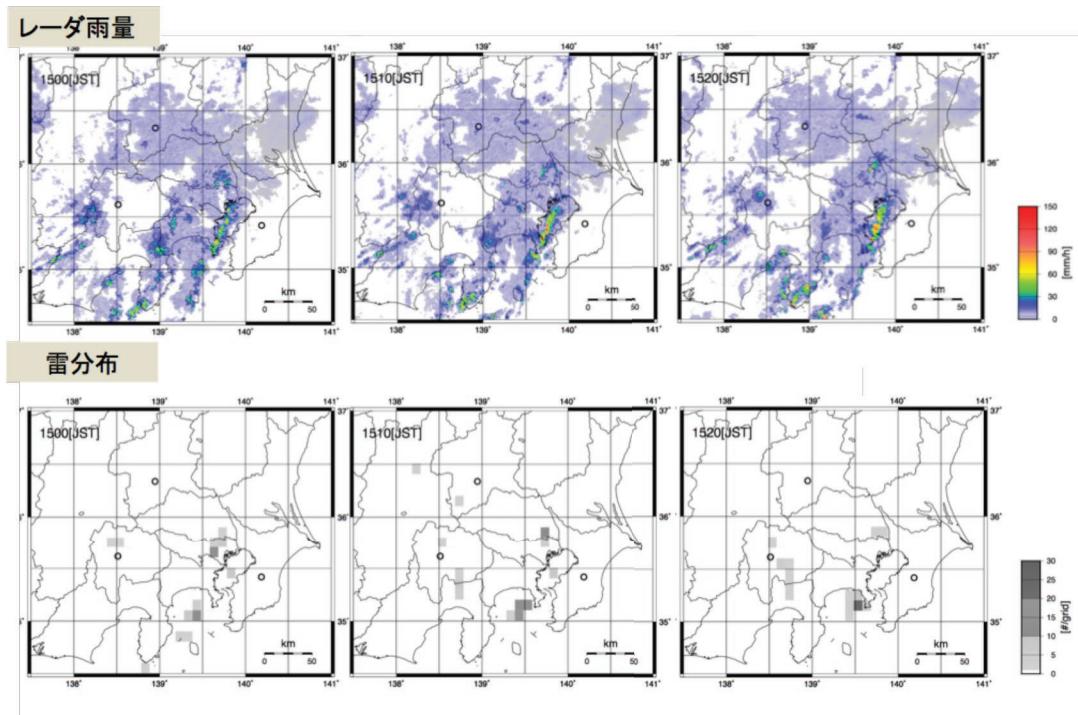


図 3 2015 年 8 月 17 日 15:00-15:20 における降雨領域と雷活動領域

## 5.まとめ・今後の予定

本稿では 2015 年夏季に実施した雷放電観測の一例を報告した。関東圏に約 100km 間隔で ELF-VLF 帯電磁界を配備し、空間スケール 10km 程度の積乱雲監視へ応用できる可能性を示した。深刻な気象災害を受けている東南アジア多島域において、積乱雲（空間スケール 10km 程度）と、台風（空間スケール 1000km 以上）の監視を同一の観測システムで扱うことができる観測網は存在しない。異なる空間スケールの雷活動監視を同一の観測システムで実現できる点において、本研究で開発した観測システム、解析手法の拡張性は高い。

また、ELF-VLF 帯電磁界計測より電磁界の放射強度が弱い雲放電の観測に成功したことを確認した。この結果は、これまで観測点間隔 10km 程度の高密度電磁界計測網を組む必要があった雲放電観測の実施コストの大削減を示唆するものであると考えられる。

今後、本研究で確立した雷放電の位置推定アルゴリズムの自動化に取り組み、国内外の観測網の自動観測化を推進する予定である。

## 参考文献

- [1] Cummins, K. L., M. J. Murphy, E. A. Bardo, W. L. Hiscox, R. B. Pyle, and A. E. Pifer, A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network, *J. Geophys. Res.*, 103(D8), 9035-9044, doi:10.1029/98JD00153 (1998)
- [2] Abarca, S. F., K. L. Corbosiero, and T. J. Galarneau Jr., An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth, *J. Geophys. Res.*, 115, D18206, doi:10.1029/2009JD013411 (2010)

## MUレーダー実時間アダプティブ クラッター抑圧システムの開発

橋口浩之<sup>1</sup>・万城孝弘<sup>1</sup>・久保田匡亮<sup>1</sup>・山本衛<sup>1</sup>・

佐藤亨<sup>2</sup>・西村耕司<sup>3</sup>・橋本大志<sup>2</sup>

1: 京都大学生存圈研究所

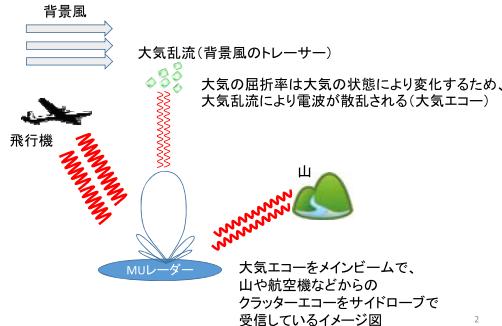
2: 京都大学情報学研究科

3: 国立極地研究所

1

### 研究背景

大気レーダーの観測対象: 大気エコー(<<クラッターエコー>>)



2

### MUレーダー (Middle and Upper atmosphere radar)

航空写真と主要諸元

475本のアンテナそれぞれに送受信機が取り付けられており  
それを個別に制御し、高速にビーム方向を変更できる  
アクティブラセードアレイアンテナ

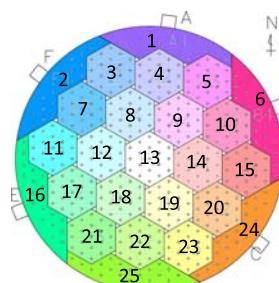


Parameter	Value
Location	Shigaraki, Shiga, Japan (34.85° N, 136.10° E)
Radar System	monostatic pulse radar, active phased array system
Frequency	46.5 MHz
Antenna	circular array of 475 crossed Yagi's
aperture	8330 m <sup>2</sup> (103 m in diameter)
beam width	3.6° (one way half power for full array)
steerability	steering is completed in each IPP
beam directions	165°, 0°, -30° off zenith angle
polarizations	linear and circular

Parameter	Value
Transmitter	475 solid state amplifiers
peak power	1 MW (maximum)
average power	50 kW (duty ratio 5%) (maximum)
bandwidth	3.5 MHz (maximum)
Range resolution	150 m

3

### 超多チャンネル受信システム



475本のハムアンテナが19本ずつ  
25グループに分けられており、  
2004年に超多チャンネル受信システム  
を導入したことにより  
信号を独立に受信できるように  
なった

4

### 主な成果と発表内容

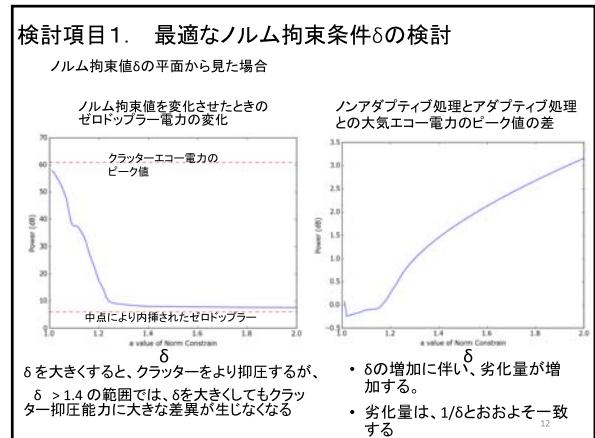
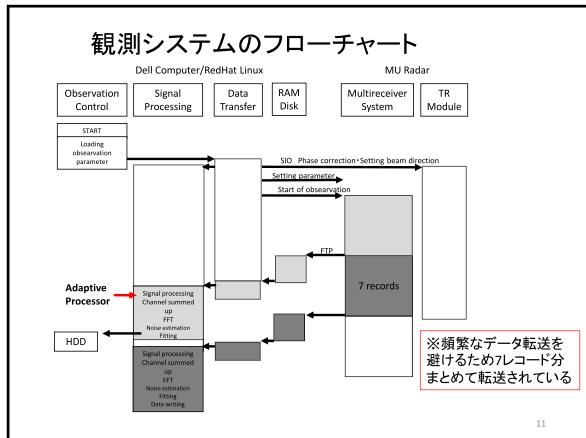
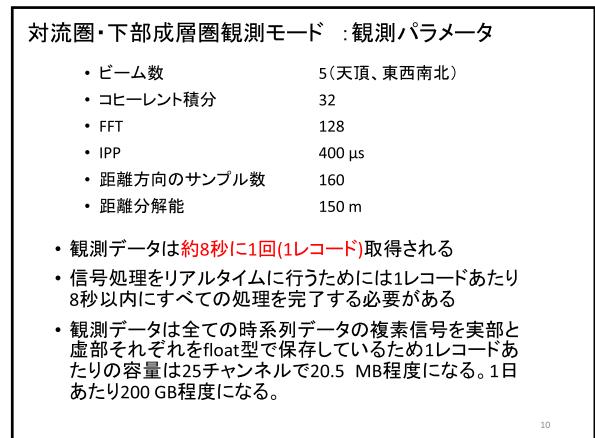
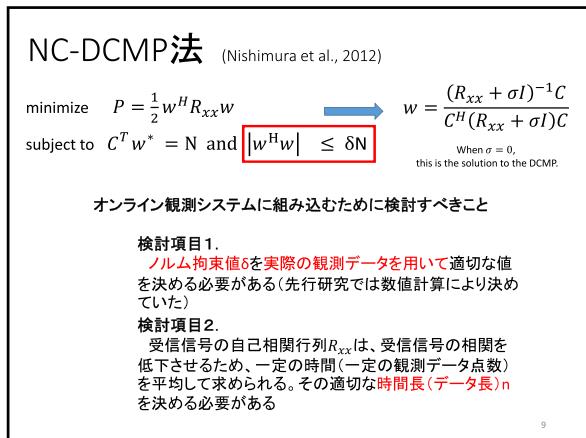
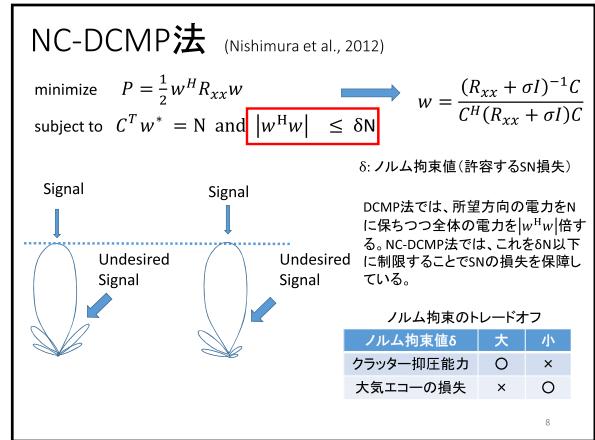
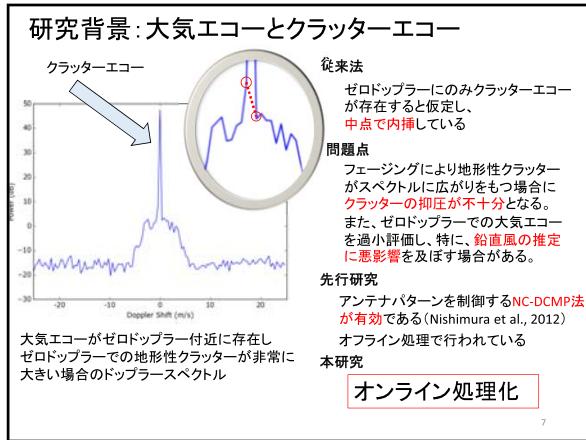
- ✓ 実時間(リアルタイム)処理としてクラッター抑圧システムを開発し、対流圏・下部成層圏標準観測モードに導入・運用開始(2015/11～)
  - 実観測データを用いて2つのパラメータの決定
    - ノルム拘束値δ
    - 受信信号の自己相関行列の平均を求めるためのデータ数n
  - 時間処理の実現
    - 160高度、5ビーム、128点時系列データに対して、  
要求時間: 8.2秒 → 0.2秒程度(最悪でも1.4秒程度)
- ✓ 中間圏標準観測モードに導入・運用開始(2015/11～)
  - 主に流星エコーの抑圧
  - 発表時間の関係で割愛

5

### 本研究の意義

- 実時間(リアルタイム)処理  
(対流圏・下部成層圏標準観測モード、中間圏標準観測モード)
  - 信号処理の簡便化
  - 取得データ容量の削減
    - オフライン処理 数100 GB/日 → 数100分の1程度
    - HDD等の記憶装置の制約の少ない連続観測が可能に
- 用いる手法: NC-DCMP法 (DCMP法を改良した手法)  
(ノルム拘束付方向拘束付電力最小化法; Norm Constrained-Directionally Constrained Minimum Power)
  - ソフトウェアで実装可能
  - ハードウェアの変更を必要としない
  - 鉛直風の推定の改善
- 本研究の成果は、現在建設予定の赤道MUレーダーにも応用可能

6



### 計算時間の見積もり ( $\delta = 1.25$ )

NC-DCMP法 (Nishimura et al., 2012)

$$\text{minimize } P = \frac{1}{2} w^H R_{xx} w$$

$$\text{subject to } C^T w = N \text{ and } |w^H w| \leq 8N$$

この繰り返し処理が律速段階  
初期値のDCMP法による  
ウェイトノルムが大きいと  
ステップ数が増える。  
Newton法を適用すると  
高々6ステップ程度となつた。  
(中央値は1.5ステップ程度)  
最悪の場合の計算時間  
 $5 \text{ beam} \times 160 \times 6 \text{ steps} \times 0.3 \text{ (ms)}$   
 $= 1.4 \text{ (s)}$

1レコードあたり8秒以内を十分に  
満足できる。

NC-DCMP法の解法  
手順1 DCMP法を解く  
手順2 ノルム拘束条件を満たせば終了  
手順3 疑似雑音を拡大、手順2へ  
この繰り返し処理がNC-DCMP法  
の律速段階となる

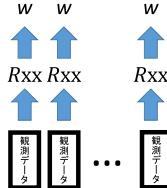
疑似雑音を知ることで、強い干渉波  
信号出力を検出するもれされ、所要信  
号の相位を知れる

13

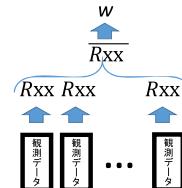
### 検討項目2. 用いるデータ長(時間長)の検討

受信信号の相關行列 $R_{xx}$ は、到来波の相関を低下させるため、一定の時間を平均したものが一般に用いられる。従来、1レコード分(8秒)で十分とされていたが、より長時間のデータを用いることを検討する。

1レコードに対し1つのウェイペクトルを求めアダプティブ処理を行う



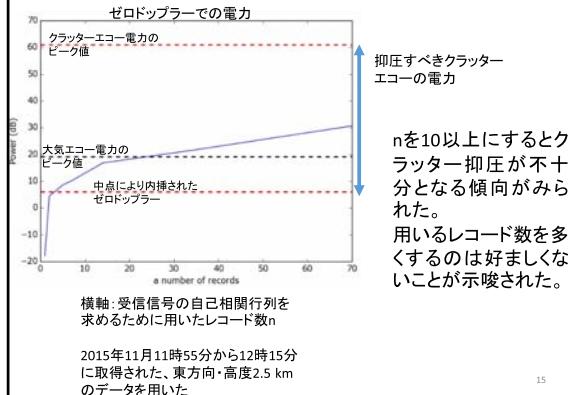
複数のレコードに対し、1つのウェイペクトルを求めアダプティブ処理を行う



計算量を削減できる

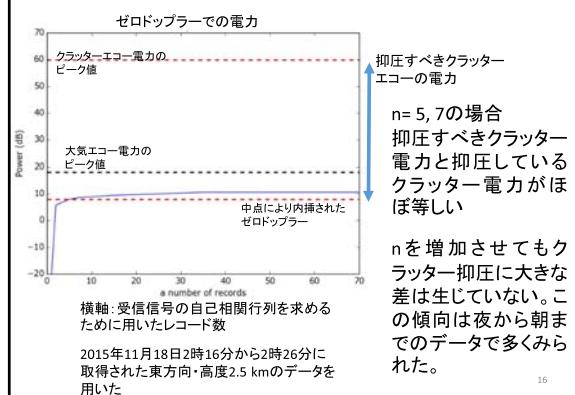
14

### 用いるレコード数の検討: 検討結果(日中のデータ)



15

### 用いるレコード数の検討: 検討結果(深夜帯のデータ)



16

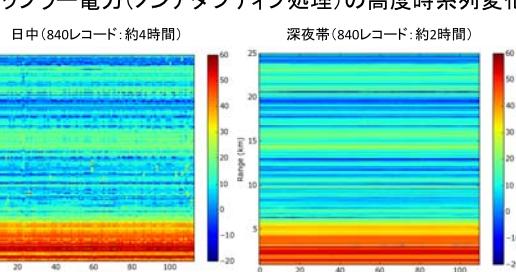
### 用いるレコード数の検討: 検討結果の考察

n	日中	日没後
1	過剰	過剰
2から7	適当	適当
14以上	不十分	適当

- 用いるレコード数
  - n=2~7が適当
  - 実装の容易さの観点からn=7を採用することにした
    - 7レコードずつホストPCに転送されるため
- 観察された傾向
  - nが増加するとクラッターアクセスが不十分となる傾向が見られた。
    - 特に日中ににおいて顕著である。
- 考えられる原因
  - MULレーダーからクラッターエコー源までの空間の気温分布の変化により、クラッターエコーの伝搬経路が変化したと考えられる

17

### ゼロドッパー電力(ノンアダプティブ処理)の高度時系列変化



18

## 対流圏・下部成層圏標準観測モードへのNC-DCMP法の実装方法

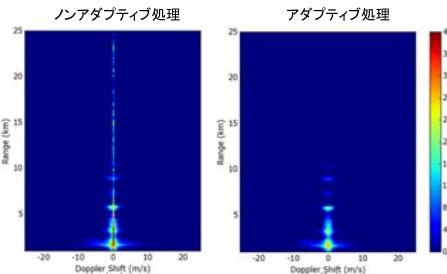
- 検討項目1. ノルム拘束値
  - $\delta = 1.25$ と決定した
- 検討項目2. 受信信号の自己相関行列の求め方
  - 7レコードで平均処理し、1つのウエイトベクトルを求め、それぞれのレコードでアダプティブ処理を行う

2015年11月より  
アダプティブラッターカー抑圧処理システムを  
実時間処理として運用を開始。  
安定に動作している。

※現在は、ノンアダプティブ処理、アダプティブ処理両方のデータを残している

19

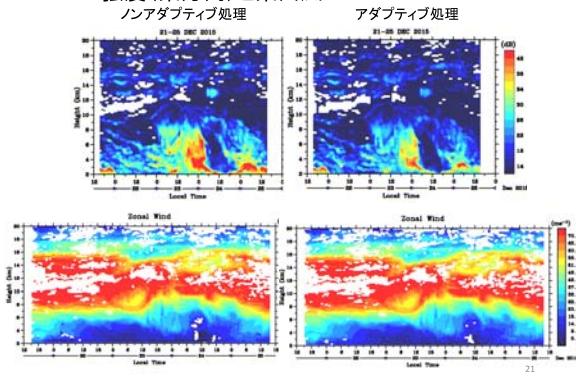
## オンライン観測システムへの実装と取得できたデータ



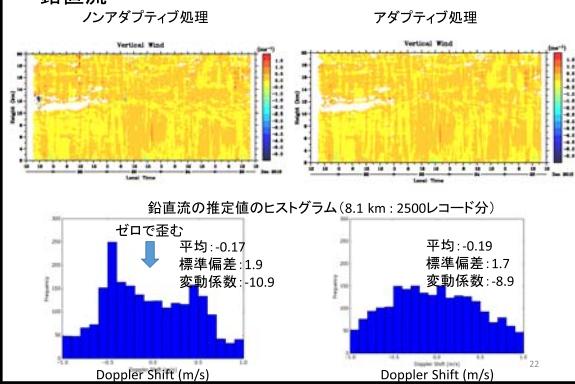
2015年12月22日0時0分49分から3時29分42分までの観測  
データをインコヒーレント積分得られたドップラースペクトル

20

## オンライン観測システムへの実装と取得できたデータ エコー強度(東方向)と東西風



## オンライン観測システムへの実装と取得できたデータ 鉛直流



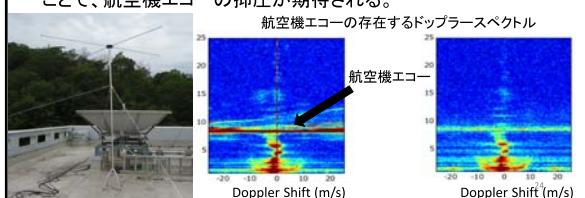
## まとめ

- MUレーダーの対流圏・下部成層圏標準観測モードに、NC-DCMP法による実時間アダプティブラッターカー抑圧処理を実現した。
- アダプティブ処理を適用する最適な時間長(データ長)やノルム拘束値 $\delta$ を検討し、決定した。
- 実環境に実装し、2015年11月から運用を開始した。
- アダプティブ処理により、風速データに悪影響を及ぼしていないこと、特に弱い鉛直流の推定が改善されていることを確認した。
- 同様の検討を行い、中間圏標準観測モードにもアダプティブ処理を実施した。クラッターエコーだけでなく、流星エコーの抑圧にも効果がある。

23

## 今後の発展

- 最適なノルム拘束値 $\delta$ は、各ビーム・各高度において時々刻々と変化する可能性が高い。アダプティブに最適な $\delta$ を決めることで、SN劣化の小さい、クラッターカー抑圧を実現できる。
- MUレーダー超多チャンネルデジタル受信システムに、4つの受信チャンネルが余っている。天頂付近に感度のない受信専用アンテナを導入して、グランドクラッターカーをより積極的に抑圧する。
- 現状でも、航空機エコーの軽減効果はあるが、十分ではない。ADS-B信号による、現在位置・高度・速度などの情報も利用することで、航空機エコーの抑圧が期待される。



## 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活用について

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所  
電子航法研究所(ENRI)  
吉原貴之・毛塚敦・齋藤享・古賀慎・瀬之口敦  
京都大学生存圈研究所(RISH)  
古本淳一

2016/9/9

第10回MUR/EARシンポジウム

1

## 内容

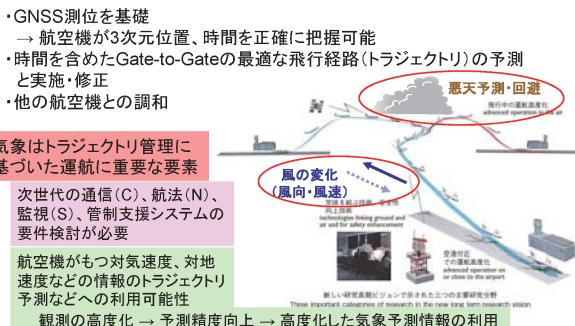
- 背景
  - 4次元航法と気象
- SSR(二次監視レーダ)モードS
  - DAPs(Downlink Aircraft Parameters)機能概要
  - DAPsの普及状況(機上及び地上)と取得状況
- 気象情報(風向・風速、温度)の推定
  - アルゴリズム、推定例
- MULレーダーデータの利用目的
  - 推定データの品質改善
- 今後の計画
  - MULレーダーデータを用いた長期精度評価
  - SSR信号のバイ斯塔イック観測

2016/9/9

第10回MUR/EARシンポジウム

2

## 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



2016/9/9

第10回MUR/EARシンポジウム

3

## SSRモードSのDAPs機能



2016/9/9

第10回MUR/EARシンポジウム

4

## メッセージ種別と対応義務化

メッセージ種別(255個, 56bit長)		義務化	
番号	内容	ELS	EHS
05	拡張スキッタ・位置 *いわゆるADS-B		
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、真経路角、対地速度、経路角変化率、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)		○

義務化範囲 - ELS(基本監視): 欧州, EHS(拡張監視): 欧州の一部空域  
種別詳細は「ICAO, "Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter", Doc 9871, Second Edition, 2012」を参照  
2016/9/9

5

## BDS44: 気象通報・基本情報

BDS44: Meteorological Routine Air Report

パラメータ名	範囲	単位	備考
FOM/SOURCE	0: Invalid 1: INS 2: GNSS 3: DME/DME 4: VOR/DME 5~15: Reserved		Status Bitなし
風速	0~512	1 knot	Status bitは風向と共に
風向	0~360	180/256 degrees	Status bitは風速と共に
外気温	-128~128	0.25 °C	Status bitなし
平均静圧	0~2,048	1 hPa	
Turbulence	0: NIL 1: LIGHT 2: MODERATE 3: SEVERE		値の定義はPANS-ATM( ICAO Doc 4444)にて規定
湿度	0~100	100/64 %	

6

## 機上対応のモニタ結果

	観測月間	2012年3月	2010年3月
モードS機材の総数*	2,466機	2,289機	
BDS番号	内容	対応率	対応率
ADS-B 05	拡張スキッタ位置	74.5 %	68.9 %
ELS 20	航空機便名	82.0 %	74.2 %
40	選択垂直方向意図	81.1 %	74.2 %
44	気象通報・基本情報	0.9 % (23機)	1.8 % (39機)
45	気象通報・ハザード情報	0.9 % (23機)	1.8 % (39機)
50	経路および旋回通報	82.6 %	76.3 %
EHS 60	機首方位および速度通報	81.7 %	74.7 %

海外で義務化されているメッセージ種別は高い対応率となっている傾向あり

2011年1月 - ELS: 85.9%, EHS: 78.5%, ADS-B: 67.2%

2013年1月 - ELS: 84.4%, EHS: 84.0%, ADS-B: 77.8%

2014年7月 - ELS: 90.8%, EHS: 87.9%, ADS-B: 82.3%

7

## 機上側の整備状況

DAPs機能に対応している航空機と一言でいえども、整備状況によりダウンリンク可能な動態情報は異なる

- 多くの機材から取得可能な動態情報
- 航空機便名、選択高度、気圧設定値、真経路角、対地速度、真対気速度、機首磁方位、指示対気速度、マッハ数など
- 現時点では取得がほぼ見込めない動態情報
- 風向、風速、外気温、平均静圧、湿度、Turbulence, Wind Shear, Mircoburst, Icing, Wake Vortexなど
- ← 海外での対応義務化が整備状況を左右
- ⇒ ただし、青字は赤字の動態情報から推定可能（後述）

2016/9/9

第10回MUR/EARシンポジウム

8

## 地上局の整備状況

図3-1回 航空路監視レーダー配達及び覆域図



図: 内閣府、平成23年版交通安全白書、[http://www8.cao.go.jp/koutou/taisaku/h23kou\\_haku/zenbun/genkyo/h3/h3s2\\_1.html](http://www8.cao.go.jp/koutou/taisaku/h23kou_haku/zenbun/genkyo/h3/h3s2_1.html)  
2016/9/9 第10回MUR/EARシンポジウム

9

## SSRモードS実験局(ENRI)

### 4. モードS実験ネットワーク

#### ・実システムによる評価

調布局 岩沼局

開局 平成20年 平成22年

出力 Max 1.5kw Max 1.5kw

覆域 250NM 200NM

周期 10秒 4秒

レーダーの更新に伴い  
DAPs機能の段階的な導入を予定\*

\*平成26年度CARATS監視アドホックの報告資料より

調布局・空中線外観

岩沼局・空中線外観

常時稼動させて  
DAPsデータを  
収集している

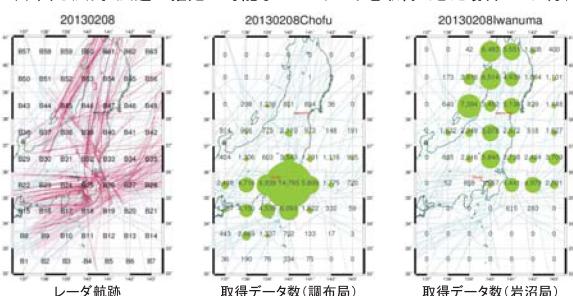
ネットワーク

古川他、"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  
2016/9/9 第10回MUR/EARシンポジウム

10

## DAPsデータの取得傾向

DAPsデータを取得できる位置、高度、時刻は航空交通流に依存  
(下図は風向・風速の推定が可能なDAPsデータを取得できた場合の1日分)



平林他、"SSRモードS監視データを用いた上層風情報の取得傾向"、第52回飛行機シンポジウム、2014年

11

## 気象データの推定

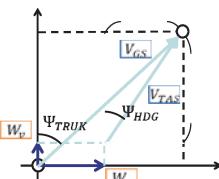
### ● 気象データの推定

#### (1) 外気温

マッハ数と真対気速度から、外気温を得る

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

赤字のパラメータ:  
取得率が高い



#### (2) 東西風速・南北風速

① 国土地理院の磁気偏角の近似式を用いて磁方位を真方位に補正する

$$\Psi_{HDG} = \Psi_{MAG} - D2010$$

$$D2010 = 7^{\circ}40.585' + 19.003'\Delta\phi - 6.265'\Delta\lambda + 0.009'\Delta\phi^2 + 0.024'\Delta\phi\Delta\lambda - 0.591'\Delta\lambda^2$$

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

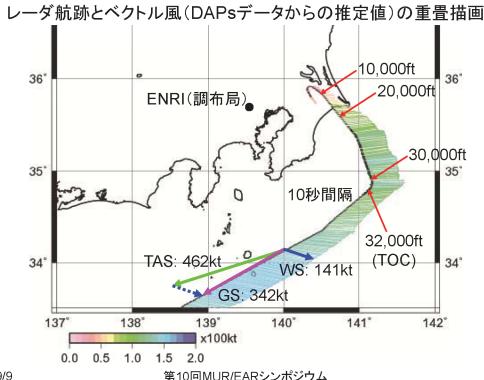
$$W_u = V_{GS} \cdot \sin \Psi_{TRUK} - V_{TAS} \cdot \sin \Psi_{HDG}$$

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

古川他、"SSRモードS監視データを用いた気象予報データの評価解析"、第51回飛行機シンポジウム、2013年11月。

12

## 風向・風速(推定値)の描画例



13

## DAPsデータの最小分解能と精度

- DAPsデータは機上から地上へのデータ通信に伴い、右の表のように規格化される
- 対地速度や真対気速度、マッハ数の最小分解能が気象データの推定精度に影響する可能性あり

- パラメータ毎に最小分解能の範囲で一様分布の確率密度関数を仮定し、気象データ(推定値)とのRMSEを多重積分により算出

DAPsデータの最小分解能に対する RMSE(全データの平均)

外気温 [K]	東西風速 [m/s]	南北風速 [m/s]
1.05	0.341	0.353

重富他、「SSRモードS監視データを用いた気象予報データの評価解析」、第51回飛行機シンポジウム、2013年11月。

2016/9/9

第10回MUR/EARシンポジウム

14

DAPsデータの最小分解能		
パラメータ名	最小分解能	データ種別
時刻	—	モードSレーダ 観測値
機体識別番号	—	
レーダーサイフлаг	—	
緯度	—	
経度	—	
気圧高度	25 [ft]	
対地速度	2 [kt]	モードSレーダ DAPs
真対気速度	2 [kt]	
指示対気速度	1 [kt]	
真経路角	90/512 [deg]	
機首磁方位	90/512 [deg]	
マッハ数	0.004	
気圧設定値	0.1 [mb]	
ロール角	45/255 [deg]	

## MULレーダーデータの利用

### 風向・風速の精度検証とデータ品質改善

- 数値気象モデルを用いた精度評価(S. Haan, 2009)
  - 風向・風速に関しては従来の気象通報と同程度の精度と報告
- 品質向上のためのスクリーニング・補正手法の開発
  - 推定における仮定条件の複雑化、分類
  - 巡航、旋回、上昇、降下の各フェーズ
- 短期的・限定的なデータによる検証(事象毎の解析)
  - 気象通報(BDS44)に対応したダウリンクデータ
  - 実験機を用いた飛行実験
- 長期データによる検証(統計解析)
  - MULレーダー(高高度)**
  - ドップラーライダー／レーダー(空港周辺)

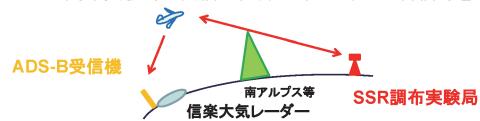
2016/9/9

第10回MUR/EARシンポジウム

15

## 信楽でのSSR-S応答信号の収集

- 調布SSR実験局の覆域端(東海地方の山地の影響)
  - 信楽MU観測所にADS-B(放送型自動従属監視)受信機設置
  - 調布実験局で受信が困難であるような応答信号を収集



## 気象学分野への応用

- 数値予報モデルへの入力
  - 高頻度(実験用SSRのDAPs取得: 1回転 約30機)
  - リアルタイム
  - 質問する航空機の選択(データ品質、情報の多様性、感度解析)

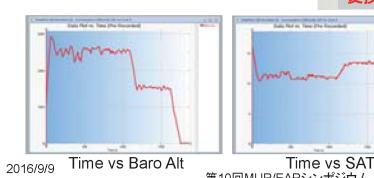
2016/9/9

第10回MUR/EARシンポジウム

16

## 実験用ARINC429データ取得装置

- システム概要
- 実験用航空機のARINC429データバスを流れる各種データを変換器(Ballard USB 429)経由でノートPCに保存
    - 一種の疑似Flight Data Recorder
  - 修理改造検査済み
  - 取得したRAWデータは変換器付属のソフトウェアでデコードし、CSVファイル出力することが可能



17

## まとめ

- 将来の航空交通管理
  - 4次元航法: 実現には高度な気象情報が要求される
- SSR(二次監視レーダ)モードSによる気象情報
  - 気象通報(限定的)
  - 動態情報から気象情報(風向・風速、温度)の推定
- MULレーダーデータの利用
  - 推定データの品質改善、気象学への応用
  - 覆域端でのデータ収集
- 高度化された気象情報
  - 航空機の安全かつ効率的な運航にフィードバック

2016/9/9

第10回MUR/EARシンポジウム

18

# Ku 帯高仰角衛星回線における 対流圏シンチレーションと大気乱流の関係

前川泰之・柴垣佳明（大阪電気通信大学）

## 1. はじめに

C 帯 (6/4GHz) や Ku 帯 (14/12GHz) のマイクロ波帯の電波を用いる衛星回線では主に対流圏の大気や降雨の影響を大きく受ける。特に 10GHz 以上の周波数帯では降雨によって生じる降雨減衰が最も大きな問題であるが、大気乱流による屈折率変動が原因で秒単位の受信レベルに変化が生じる対流圏シンチレーションも、高温多湿な気象状況では回線品質上かなり大きな問題となる場合がある[1]。本研究では、大阪電気通信大学で最近 1 秒間隔のサンプリング間隔で記録された放送衛星 BS 電波 (11.84GHz、右旋円偏波) の受信レベルデータ[2]を用いて、比較的高仰角 ( $41.2^\circ$ ) の傾斜伝搬路における対流圏シンチレーションによる減衰の年間および月間累積時間率分布を求め、最新の ITU-R 勧告[3]で提案されている対流圏シンチレーションによる減衰の予測値と比較したので報告する。

## 2. 測定方法

図 1 に本学における Ku 帯 BS 電波の測定システム図を示す[2]。BS 電波と降雨強度はそれぞれ、本学衛星通信研究施設の屋上に設置された直径 45cm のオフセットパラボラアンテナと気象庁規格の分解能 0.1mm の雨量計で測定されている。これらの測定信号は、同研究施設室内に置かれた C/N レベルメータとスイッチング電源にそれぞれ送られ、パソコンコンピュータにより 1 秒毎にサンプルされている。普段の降雨減衰の統計解析は、降雨強度とともにこれらの 1 分平均値を用いて時間分解能 1 分で受信レベルの解析を行っているが、今回は秒単位の変動である対流圏シンチレーションの解析を詳しく行うため、1 秒間隔の測定値をそのまま平均せずに用いた。

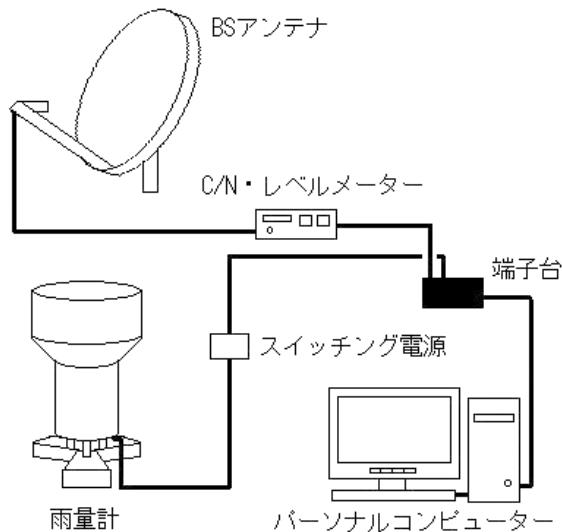


図 1. Ku 帯 BS 電波受信レベルと降雨強度の測定システム図。

### 3. ITU-R 勧告の対流圏シンチレーションによる減衰の推定法

本章では、ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunications Sector) が ITU-R P.618-12 [3]で提案している対流圏シンチレーションによりマイクロ波帯衛星回線で生じる減衰量の累積確率分布の推定法を述べる。対象となる周波数帯は 55GHz 以下のマイクロ波帯で、推定に必要とされるパラメータは以下の通りである。

- $f$ : 使用周波数 (GHz)
- $\theta$ : 衛星方向の仰角(°)
- $D$ : アンテナの物理的直径(m)
- $\eta$ : アンテナ開口効率
- $t$ : 地球局の地点における平均気温(°C)
- $h_L$ : 乱流層の高さ(m)

以上のパラメータから、対流圏シンチレーション発生時間率の推定に必要な以下の量を順次求める。

#### 大気の電波屈折率（水蒸気成分） $N_{wet}$

絶対温度(K)と飽和水蒸気圧(hPa)を(1)式と(2)式でそれぞれ求め、大気の電波屈折率の水蒸気成分を(3)式で導出する効果を含めて導出する。必要なパラメータを以下に示す。

$$T = t + 273.15 \quad (1)$$

$$e = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t}{t+237.3}} \quad (2)$$

$$N_{wet} = 72 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (3)$$

#### 基準尖頭出力電圧の標準偏差 $\sigma_{ref}$

大気の電波屈折率（水蒸気成分） $N_{wet}$ から、基準尖頭出力電圧の標準偏差(dB)を(4)式で求める。

$$\sigma_{ref} = 3.6 \times 10^{-3} + 10^{-4} \times N_{wet} \quad (4)$$

#### 伝搬路長 $L$

乱流層である  $h_L$  の高さを 2000 (m) とし、伝搬路長  $L$ (m) を(5)式で求める。ここで、 $\theta$  は衛星方向の仰角で 41.2° である。

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2.35 \times 10^{-4}} + \sin \theta} \quad (5)$$

#### アンテナ有効直径 $D_{eff}$

アンテナ有効直径  $D_{eff}$  (m)を、アンテナの開口効率  $\eta$  とアンテナの物理的直径  $D$ (m)を用いて求める。

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D \quad (6)$$

## アンテナ平均化係数 $g(x)$

アンテナ平均化係数を計算するにあたり必要な値  $x$  を求める。

$$x = 1.22 D_{eff}^2 (f / L) \quad (7)$$

以上の値を用いてアンテナ平均化係数を求める。

$$g(x) = \sqrt{3.86 (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin \left[ \frac{11}{6} \tan^{-1} \frac{1}{x} \right] - 7.08 x^{5/6}} \quad (8)$$

ここで、平方根の引数が負の場合（つまり  $x$  の値が 7 以上の場合）は、シンチレーションによる減衰の大きさは 0 となる。

## 適用期間と伝搬経路による信号の標準偏差

基準尖頭出力電圧の標準偏差、アンテナ使用周波数、アンテナ平均化係数、そして自由空間仰角を用いて標準偏差を求める。

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1/2}} \quad (9)$$

## 時間率 $p$ に対する時間率因子 $a(p)$

時間率  $p$  を  $0.01\% < p \leq 50\%$  の範囲でとり、時間率  $p$  に対する時間のパーセンテージ因子  $a(p)$  を求める。

$$a(p) = -0.061 (\log_{10} p)^3 + 0.072 (\log_{10} p)^2 - 1.71 \log_{10} p + 3.0 \quad (10)$$

## 減衰の大きさ $A(p)$

時間のパーセンテージ因子  $a(p)$  と標準偏差を用いて減衰の大きさを式(11)で求める。

$$A(p) = a(p) \cdot \sigma \quad (11)$$

## 4. ITU-R 勧告値と測定値との比較

図2に、2010 年から 2015 年の間の 8 月の一ヶ月間に測定された対流圏シンチレーションによる減衰の累積時間率分布を、それぞれ示す。ここで対流圏シンチレーションの測定値には、降雨による減衰が混入するのを防ぐために雨量が記録されていない晴天時の時間帯のデータ用いてある。また細線は3章で述べた ITU-R 勧告による同月の累積時間率分布の推定値を示す。表 1 は ITU-R 勧告で必要とされる 8 月の地上気温の平均値の実測値を示す。ここでも雨量の記録がない晴天時の平均値を用いている。

図2より、対流圏シンチレーションによる減衰の累積時間率の測定値はが、ITU-R 勧告値といずれの年の夏季の8月においても、かなり良い一致が見られることが分る。詳しく見ると時間率が比較的大きい1dB以下の減衰値は ITU-R 勧告値よりも低い時間率を示すのに対し、減衰が1dB以上と大きくなると時間率が ITU-R 勧告値をむしろ上回る、傾向にあることが分る。また、各年の累積時間率の測定値には、表 1 に

示した平均気温の年変化から予測されるITU-R勧告値の変動以上に、顕著な年変動が認められるが、やはり夏季の8月の平均気温が高いほど、対流圏シンチレーションによる累積時間率も増加する傾向にあると言える。

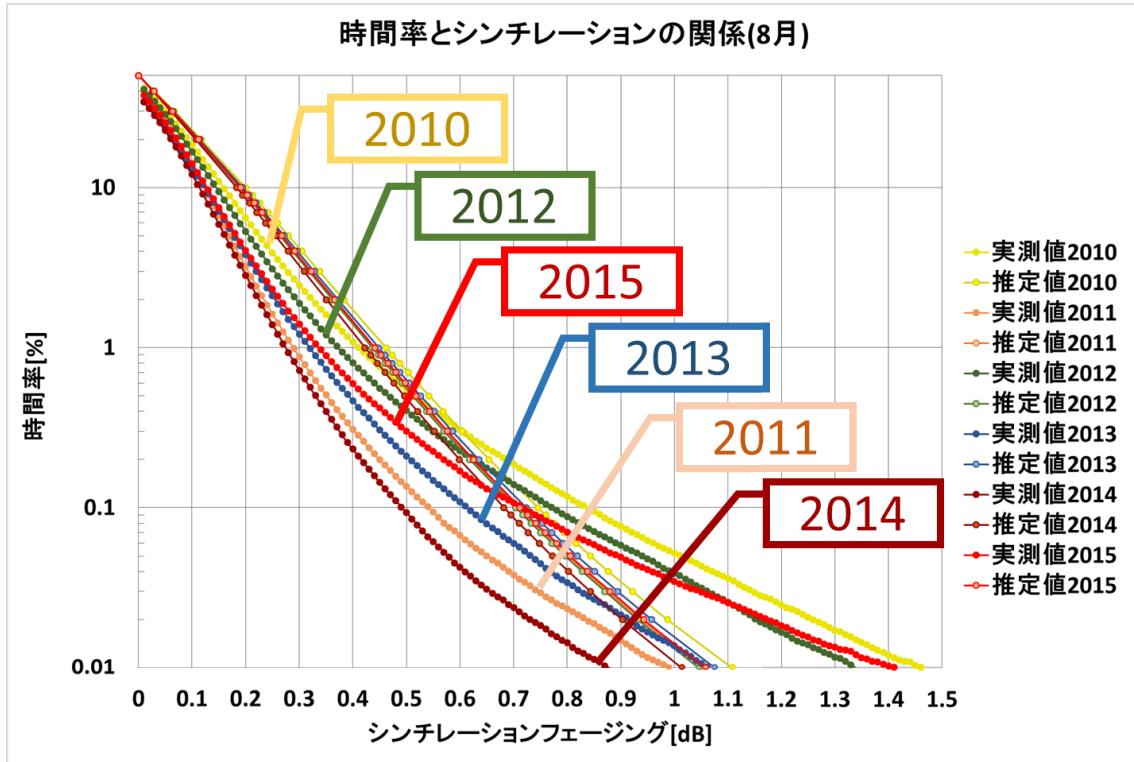


図2. 2010～2015年の8月に測定された対流圏シンチレーションによる減衰の累積時間率分布とITU-R勧告による予測値。

表1. 各年の8月の晴天時における平均気温。

2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
30.4°C	29.2°C	29.0°C	29.7°C	28.3°C	28.7°C

次に、2015年の1月から12月まで、月別に対流圏シンチレーションによる減衰の測定値を求めて、各月の平均気温から算出したITU-R勧告による予測値と比較した結果を、図3において、(a)1.0、(b)0.3、(c)0.1、および(d)0.03%の累積時間率に相当する等確率値について示す。ここでも測定値と予測値はいずれも各月の晴天時の値と平均気温を用いて求めてある。

図3(a)と(b)より、時間率が0.3%以上と大きく、減衰量が0.5dB程度以下と比較的小さい範囲では、シンチレーションの発生はITU-R勧告値と同様に高温多湿の夏季に集中する傾向にあるが、図3(c)と(d)より、時間率が0.1%以下と小さく、減衰量が0.5dB程度以上となると、夏季のみならず1月から3月の冬季から早春にかけても同様の大きさの対流圏シンチレーションの発生が見られることが分る。これは従来の夏季に主として発生する気温と水蒸気密度の増加に基づくITU-R勧告による予測値とは異なるメカニズムで発生する受信レベル変動と考えられ、屈折率変動の要因としては夏季の対流性乱流による変動とは異なり、冬季にむしろ卓越する上空のジェット気流等のシアインスタビリティ(Shear Instability)による層状性乱流との関連が予想される。

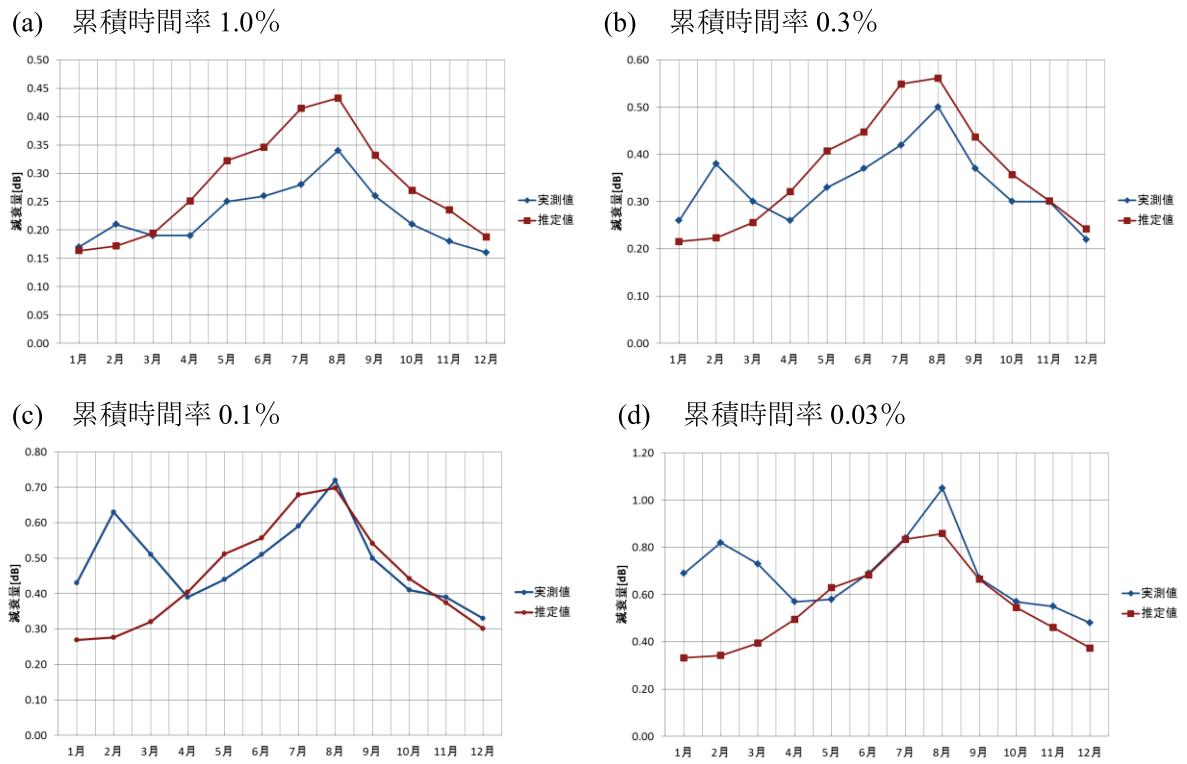


図3. 2015年の月別での対流圏シンチレーションによる減衰の測定値とITU-R勧告値の比較。  
累積時間率における等確率値はそれぞれ、(a)1.0%、(b)0.3%、(c)0.1%、および(d)0.03%。

#### 4. おわりに

本学衛星通信研究施設で測定された BS 電波の秒単位の対流圏シンチレーションによる減衰の累積時間率分布とITU-R 勧告に予測値との比較を過去6年間にわたって調べた結果、夏季の高温多湿時に発生する対流性乱流による変動についてはITU-R 勧告値と良い結果が見られたが、BS電波の測定値には、1月から3月の冬季から早春にかけても予測値を上回る変動が確認され、層状性乱流との関連も指摘された。今後 MU レーダーによる上空の風速や、エコーパワー等の情報とも比較することにより、これらの発生メカニズムに違い等を検討する予定である。特に、天頂・非天頂間のエコーパワー比を調べることにより、対流性乱流と層状性乱流の発生期間や時期等を特定することにより、これらの問題の解決を図ることを目標とする。

#### 参考文献

- [1] Y. Karasawa, K. Yasukawa, and M. Yamada, "Tropospheric Scintillation in the 14/11-GHz bands on earth space path with low elevation angles," IEEE Trans. Antennas & Propag. Vol. 36, No.4, pp.563-569, 1988.
- [2] 前川泰之、三浦秀美, “Ku帯衛星回線の降雨減衰統計の長期間年変動特性について”, 信学技報、A・P2016-20 (2016-05).
- [3] “Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems,” Geneva, ITU-R Recommendation P618-12, 2015.

2016年9月9日  
第10回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

## 小型無人航空機・MULレーダー同時観測実験

森 昂志<sup>1</sup>・橋口 浩之<sup>1</sup>・Lakshmi Kantha<sup>2</sup>  
Dale Lawrence<sup>2</sup>・Tyler Mixa<sup>2</sup>・Hubert Luce<sup>3</sup>  
Richard Wilson<sup>4</sup>・津田 敏隆<sup>1</sup>・矢吹 正教<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学生存圏研究所  
<sup>2</sup> Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado Boulder, Boulder, Colorado, USA  
<sup>3</sup> Université de Toulon, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM 110, France  
<sup>4</sup> Université Pierre et Marie Curie (Paris06); CNRS/INSU, LATMOS-IPSL, Paris, France

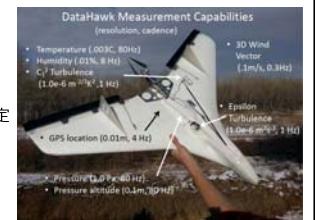
### 研究背景

従来から下層大気の観測にはラジオゾンデ（気象気球）が用いられている  
→ 風に流されるため、レーダーと同じ場所の観測が困難

対流圈の観測手法としてUAVが注目されている

( UAV : Unmanned Aerial Vehicle , 無人航空機)

- 各種センサーを搭載
- プロペラや翼を装備
- GPSによる位置情報の取得、飛行位置の指定



任意の場所のデータを取得できる

### ShUREX2015の概要

- 2015年6月に信楽MU観測所(滋賀県甲賀市信楽町)で実施
  - UAVをMULレーダーの近くに飛ばして同時に運用
  - 気温、湿度、気圧、風向、風速の他、乱流構造定数 $C_L^2$ や乱流エネルギー消費率 $\epsilon$ などの乱流パラメータを測定
  - ライダーやラジオゾンデも運用（本発表では省略）
- 主な目的**
- 乱流パラメータについてMULレーダーとUAVの観測値を比較する
  - UAVの大気観測装置としての有用性を実証する
  - K-H不安定の構造や大気重力波などを測定する上で同時観測の相乗効果を実証する

### MULレーダー周波数イメージング観測

位置	滋賀県甲賀市信楽町 34°.51'15"N, 136°.06'20"E
中心周波数	46.5MHz
周波数帯域	3.5MHz
アンテナ	直交ハムアンテナ475本
構造	直径103m円形アレイ
機能	電子ビーム方向走査
ビーム幅	3.6° (半倍全幅)
送信出力	1MW (尖頭電力)

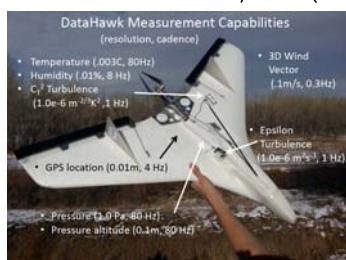


天頂方向の周波数イメージング観測と天頂角10°で北、北東、東、南東、南の5方向の観測

### キャンペーンで使用したUAV

コロラド大学で開発された  
DataHawk Small Airborne Measurement Systems (SAMS)  
というUAVを使用

- 両翼幅1m
- 軽量(700g)
- 低コスト(約1000\$)
- G P Sによる自律飛行
- 再利用可能

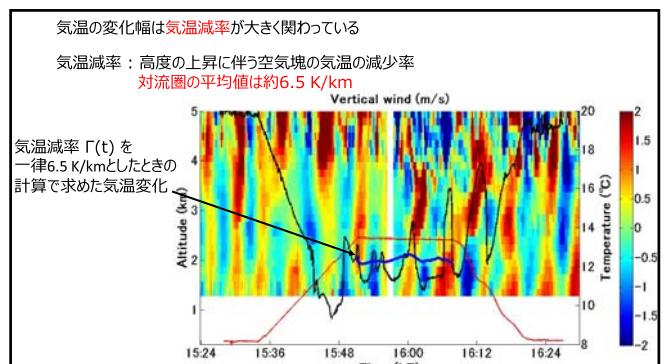
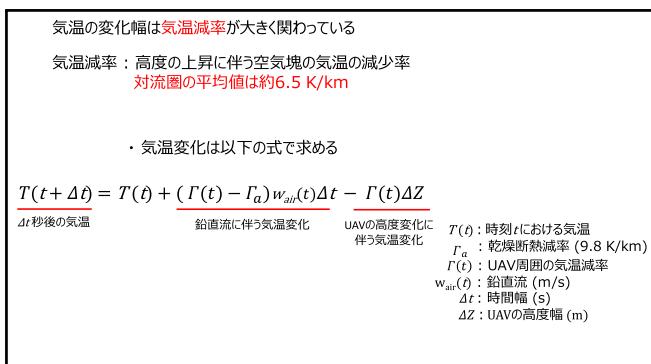
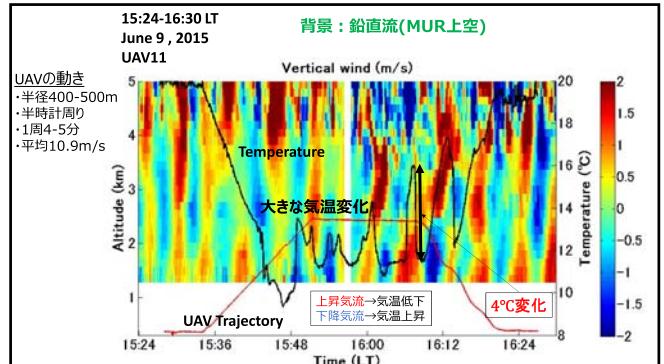
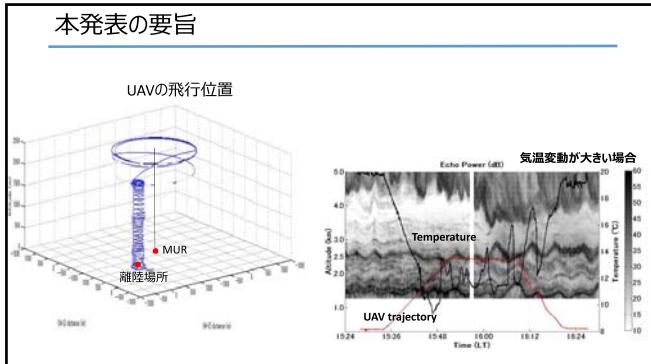
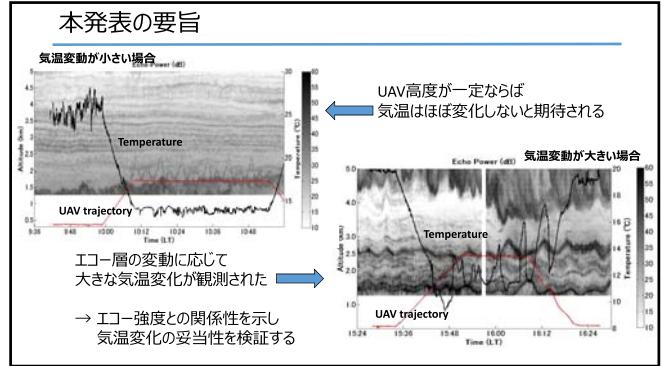
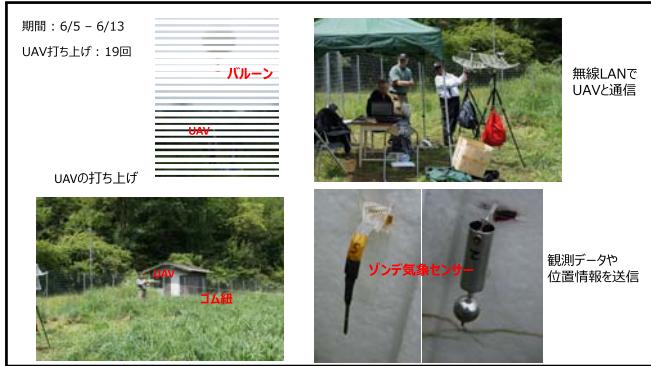


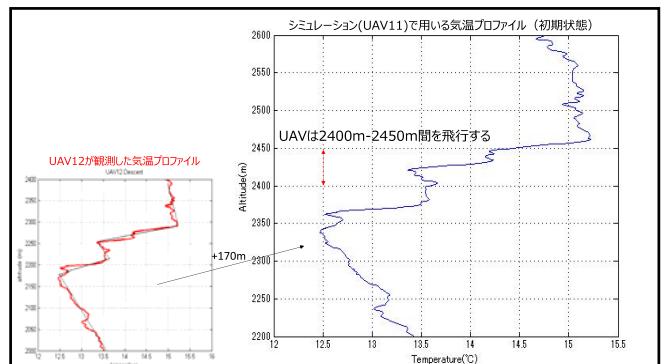
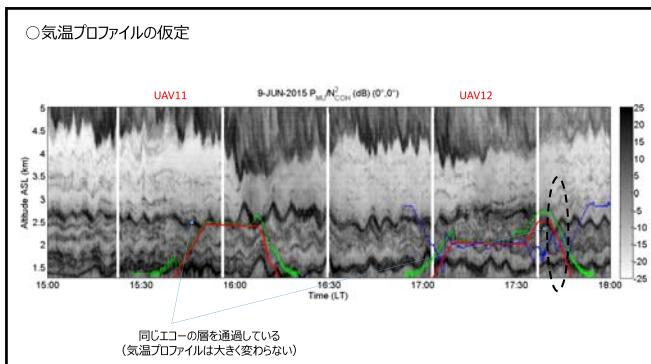
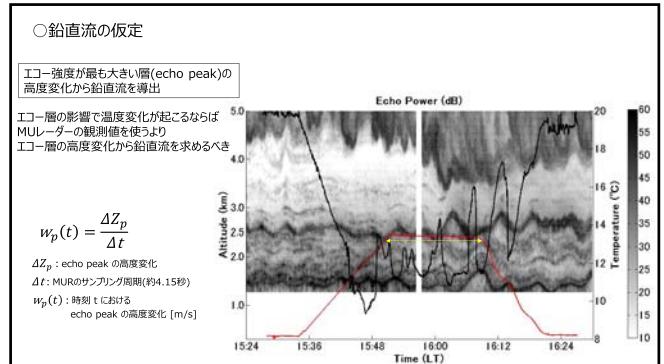
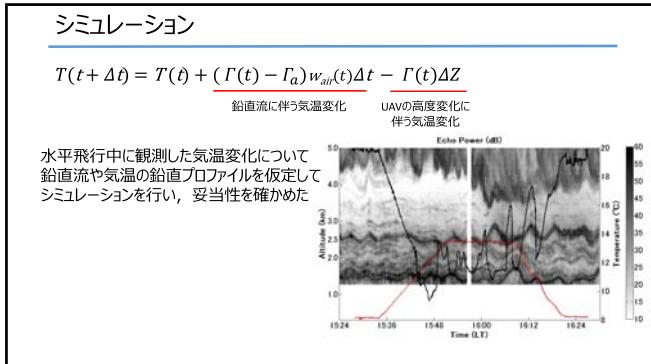
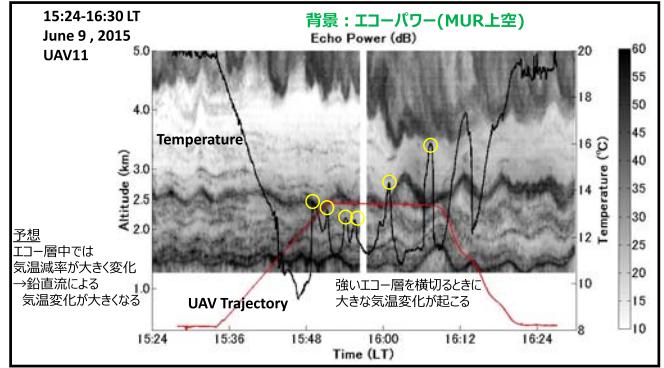
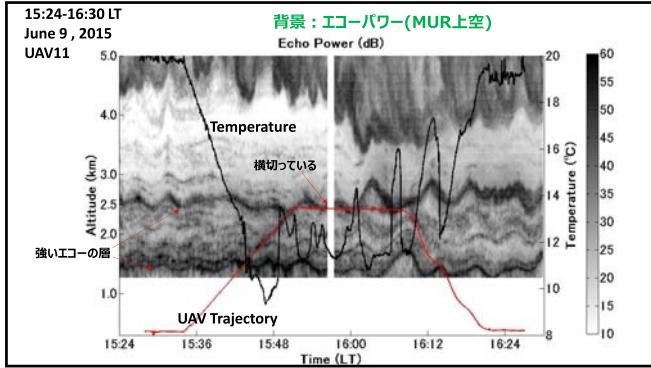
### 観測方法

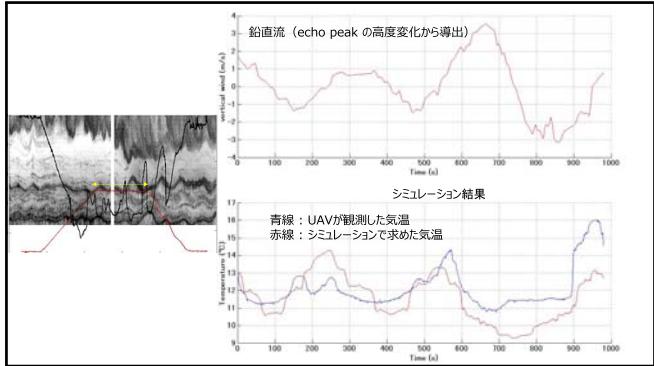
- MULレーダーから離れた場所で離陸
- 高度を上げながらMULレーダーに接近
- MULレーダー上空をしばらく旋回
- 打ち上げ場所に帰還



1回の飛行は30-60分







## まとめ

- ShUREXキャンペーンの中でUAVとMULレーダーの同時観測により下部対流圏のデータを取得した
  - UAVは下部対流圏ではラジオゾンデより有用な観測装置になる可能性がある
  - 水平飛行時に強いエコー層中で鉛直流と相関のある大きな気温変化が観測された
  - エコー強度の特に強い領域を飛行中に大きな変化が起こる
  - シミュレーションにより気温変化の大部分を再現できた
- 今後は
- 鉛直流と気温プロファイルを調整してシミュレーションを継続する。
  - 今年5/26～6/13のデータも用いて、UAVとMULレーダーで観測された乱流パラメータを比較・解析する

## グライダーとリモートセンサーを用いた 下部対流圏の微細構造の観測



## グライダーとは

エンジンを持たない飛行機 → 滑空機；主に、滑翔競技やレジャー用途に使用  
非常に軽量350kg(空虚重量)

### グライダーを気象観測に用いる利点

- ✓ 高度3000m程度まであれば、比較的自由に飛行できる
- ✓ 低速で飛行するため、センサー部の保護が容易
- ✓ 軽量なため、大気の運動による動揺(特に上下方向)に敏感である
- ✓ 大気を汚さない
- ✓ 100kg程度までなら搭載可能

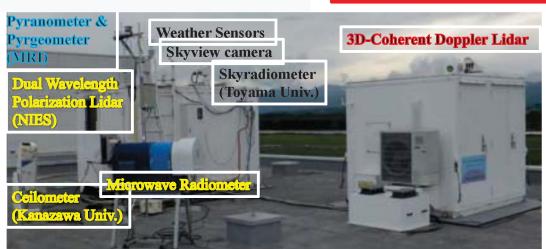


観測地

観測に用いた複座のグライダー

研究目的：地上に設置した複数のリモートセンサーの観測範囲内を、各種観測装置を搭載したグライダーで飛行することにより、大気中の乱れの実態解明を行う。

3次元走査型コヒーレントドップラーライダー、  
マイクロ波放射計、シロメータ、  
国立環境研の2波長偏波ライダー、  
スカイラジオメーター、長波・短波放射計、  
全天カメラ、地上気象観測装置等

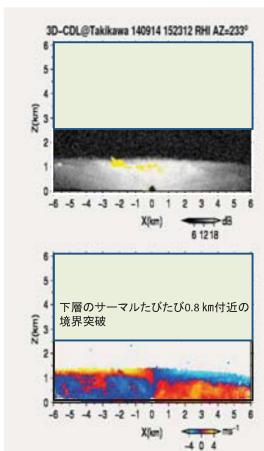


## 観測機器

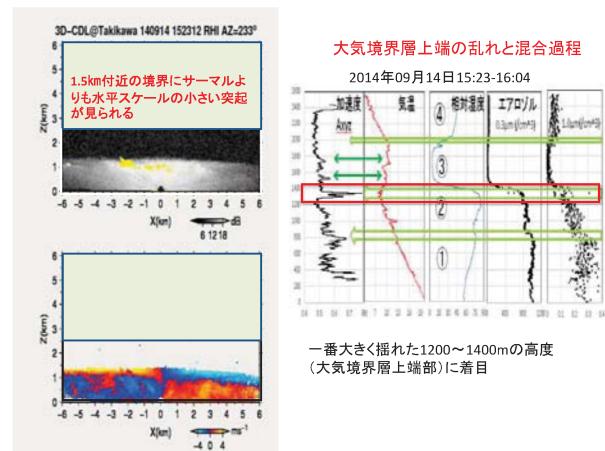
時刻同期はGPS利用



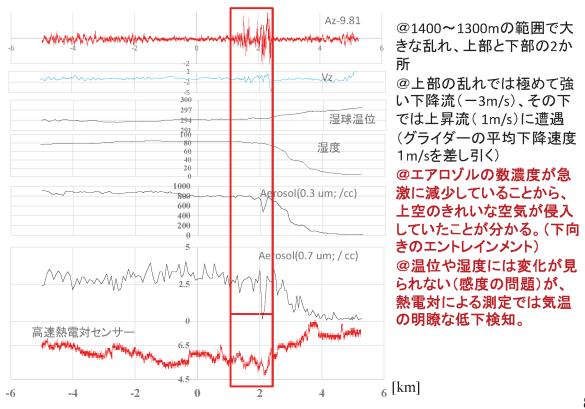
軽飛行機に曳航されて3000m(自由対流圏)まで上昇  
軽飛行機から切離後、ライダー観測範囲内を自由滑空しながら往復



水平揺れは、水平方向への進路調整による  
飛行機は浮力を利用するため、構造上(水平断面と鉛直断面)鉛直方向の抵抗は大きいが  
水平方向は小さい。  
その結果が約3倍の感度の違いになっている。



4) 1576~1039m: 15:53:52~16:04:07

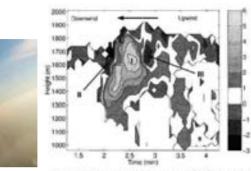


8



最も揺れた高度のカメラ画像

1400m 目前の小積雲に突入 1367m



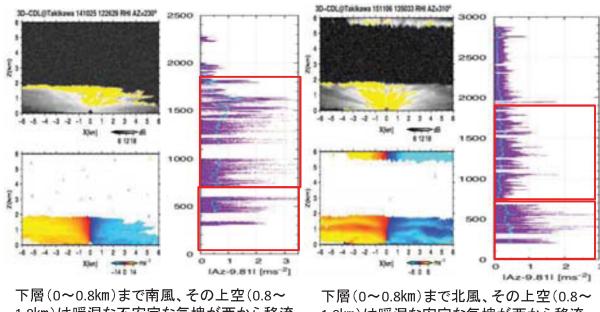
GPSから求めた水平スケールを見ると、強い下降流域の幅は15m。それに続く上昇流域の幅は30mと極めて狭い領域で雲頂エントレインメントが生じている。

Kollas et al. (2001)

### 大気境界層内でも多層構造の存在で高度によって揺れが異なる

2014年10月25日

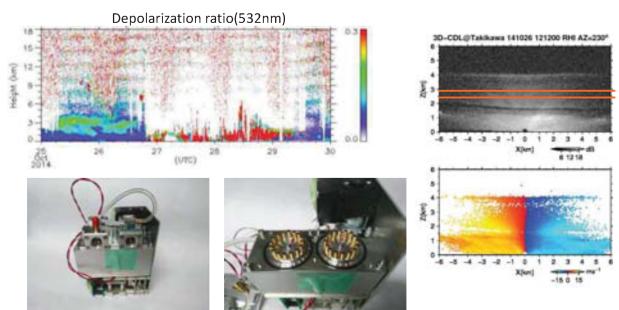
2015年11月6日



リモートセンサーによる上空監視の必要性

### 自由対流圈内に存在した成層構造内に見られたエアロゾル組成の違い

2014年10月25日から26日にかけて、滝川上空に大きな偏光消度を示すエアロゾル層が大気境界層上空に出現⇒グライダーでエアロゾルを採取



11

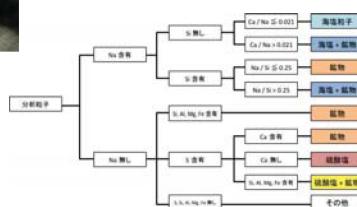
### SEM(及びEDX)により分析



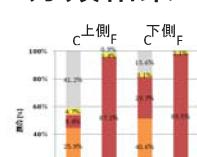
- 1メッシュあたり分析粒子数 100粒子

#### 分析粒子分類

元素分析では含有元素まで  
 分析した粒子を分類し、粒子の種類を判別する  
 海塩、硫酸塩、鉛物、それらの混合物に分ける



### 分類結果



- 微小粒子は硫酸塩が非常に多い
- 粗大粒子は硫酸塩の割合小さく、鉛物の割合が大きい
- 海塩粒子の割合は全体的に小さい



一方、自由対流圈でも3kmで捕集した粒子には、2.5kmの粒子よりもCuとZnが多く含まれていた。  
 亂れの少ない自由対流圏では、鉛混合が少なく、長い距離異なった大気質を維持したまま輸送される。  
 亂れの測定の重要性が示された

12

## まとめ

- ✓ グライダーによる気象要素やエアロゾル数密度の測定結果は、地上に設置したリモートセンサーによる大気の鉛直分布と整合的で、気象観測プラットフォームとしての有利性が確認できた。
- ✓ グライダーとリモートセンサーとの同時観測を継続することで、雲の発生ばかりではなく、地球温暖化予測、様々な大気物質（バクテリアやウィルスも含む）の輸送とモニタリング、そして大気中の波・乱れの解明を進めることが可能



# EAR と MRR を用いた風と BB の関係の検討

永田哲規・下舞豊志(島根大学大学院)・橋口浩之(京大 RISH)

## はじめに

レーダで降雨観測をする際、融解層周辺ではしばしばライトバンド現象が観測される。このライトバンド現象はレーダによる降水の定量観測に誤差を生じさせる。ライトバンドは層状性降雨で発生するとされているが対流の混ざった雨でも弱いライトバンドが発生することが分かっている。ライトバンドの強さは粒子の密度や直径、融解の過程、凝集やライミング等の関係により複雑に変化し、ライトバンドの強さ  $\Delta Z_e$  を考慮することで対流がない場合に降雨強度推定の改善ができることも分かっている<sup>[1]</sup>。また、上空の鉛直乱流を仮定することで弱い降水において粒子融解モデルでよい一致が得られることが過去の研究<sup>[2]</sup>で示された。これらの事から上空の風を考慮することはライトバンド研究において重要であると考えられる。

## 使用機器・データ

### Micro Rain Radar(以下 MRR)

MRR は周波数 24.1GHz で FMCW 方式の小型ドップラーレーダであり、鉛直ドップラー速度に対応する等価レーダ反射因子のスペクトルが測定できる。この鉛直プロファイルから Bright Band(以下 BB)を観測する。データの時間分解能は 1 分、高度分解能は 150m で 150~4500m(AGL)の高度のデータを用いた。今回研究に用いたデータは 2012 年 2 月 2 日 0 時~6 時にインドネシアのコトタバンで観測されたデータを使用した。

### 赤道大気レーダ(以下 EAR)

EAR は周波数 47MHz で中層、超高層、下層大気を観測できる大型レーダであり、高度 2~20km(ASL)対流圏の風を観測することができる。この風の観測データと BB のパラメータの関係を調べる。鉛直風を探すために EAR 観測データベースの公開データ(時間:10 分毎、高度:150m 毎)を使用し、さらに詳しく調べるために生データを使用した。今回用いたデータは MRR が BB を観測した時間と同時刻のデータとした。

### Parsivel

Parsivel は地上に落下してくる雨滴粒子の DSD と降水強度を観測する装置であり、インドネシアのコトタバンでの降水強度の実観測するために用いている。データの時間分解能は 1 分で、降水観測分解能は 0.001mm/h のデータを使用している。今回用いたデータは MRR が BB を観測した時間と同時刻のデータとした。

## ライトバンド(BB)

過去の研究では、ライトバンドを特徴付けるパラメータとしてライトバンドの強さ $\angle Z_e^{[1]}$ が用いられてきた。落下粒子が大きい時 $\angle Z_e$ は大きくなり、小さい時 $\angle Z_e$ は大きくなる傾向が過去の研究<sup>[1]</sup>で確認されている。また、 $\angle Z_e$ は雪粒子の密度に反比例することも過去の研究<sup>[3]</sup>で分かった。

図1にライトバンドを特徴付けるパラメータについて示す。

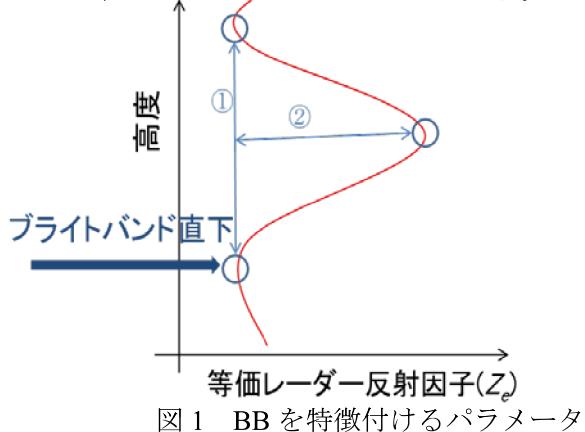


図1 BB を特徴付けるパラメータ

雪粒子が落下し融解する過程で粒子からのエコーは大きく変化し融解中に等価レーダー反射因子 $Z_e$ は最大となる。この最大値をBBピーカー、雪が完全に融解したと考えられるBBの下側の境界をBB直下、それらの差を $\angle Z_e$ とする。今回はBBの境界の定義として過去の研究<sup>[4]</sup>を参考に $Z_e$ の鉛直プロファイルの曲率が最大の位置をBBの境界とした。

図1の①がBBの上側の境界から下側の境界までの距離(BB幅)②がBBの強さ( $\angle Z_e$ )を示す。

MRRによりBBが観測された2012年2月2日0時~6時の $Z_e$ の高度プロファイルを示す。

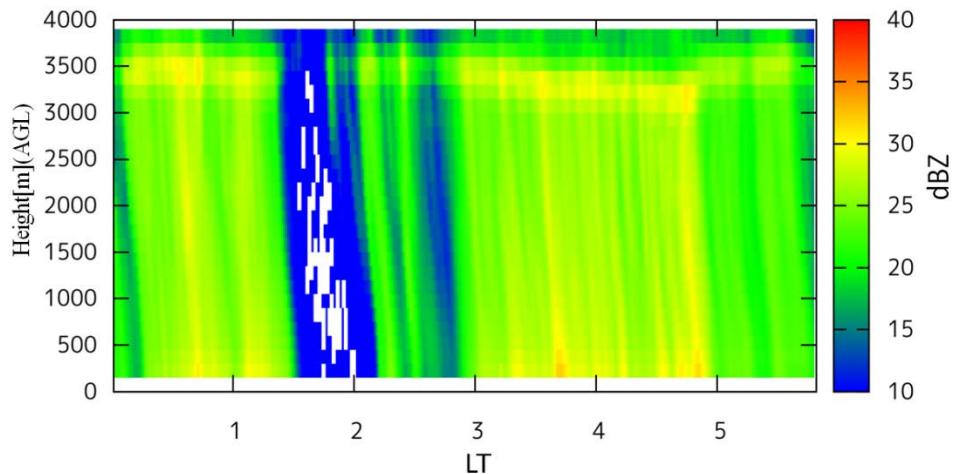


図2 MRRにより2012年2月2日0時~6時に観測されたBB

1時半~2時の時間ではBBは確認できないが、それ以外の時間では長時間に渡って3500m高度付近でBBが確認できる。

MRR によって観測された BB 直下と BB ピークの  $Z_e$  の時間変化を図 3 に示す。また、同時に Parsivel によって観測された降水強度の時間変化を図 4 に示す。

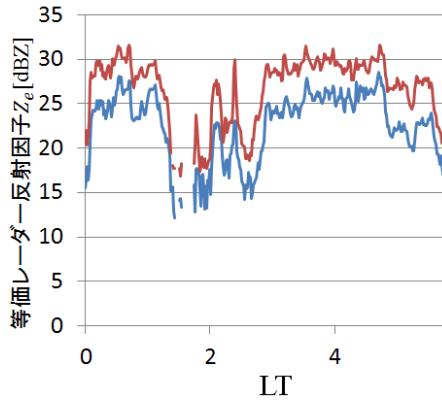


図3 BB直下とピークの $Z_e$ の時間変化(MRR)

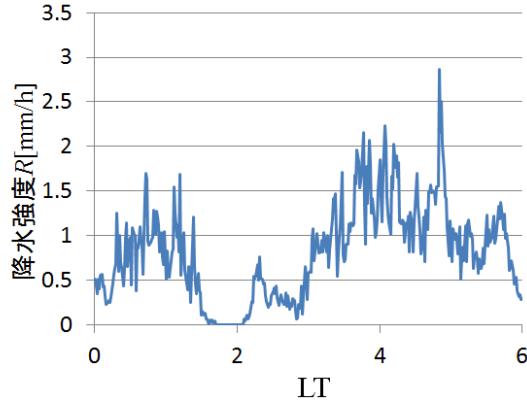


図4 地上における降水強度の時間変化(Parsivel)

図 2 で BB が確認できない 1 時半～2 時頃では地上での降水も 0mm/h であることが分かる。落下時間を考慮し、10 分の時間差で Parsivel によって観測された降水強度と 2 点での  $Z_e$  の相関を調べると、BB 直下の  $Z_e$  と Parsivel で観測された降水強度の間には 0.78 の相関があり、BB ピークとの間には 0.75 の相関があった。 $Z_e$  は鉛直風に影響されないため、完全に雨滴となっている BB 直下では特に良い相関が得られた。

MRR によって観測された地上付近と BB 直下の降水強度の時間変化を図 5 に示す。

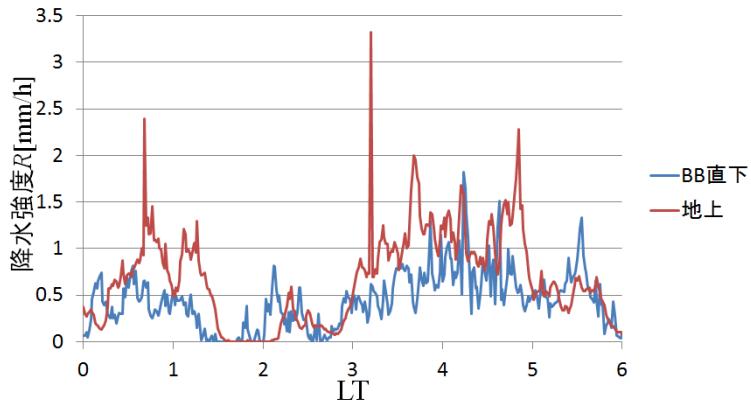


図5 BB直下と地上付近での降水強度の時間変化(MRR)

Parsivel で観測された降水強度と MRR で観測された降水強度の相関は地上で 0.82、BB 直下で 0.70 となり、 $Z_e$  の場合よりも相関は低くなつた。

MRR による降水強度推定は鉛直風の影響を受けるため、この差の要因の一つに鉛直風が関わっていると考えらえられる。

鉛直風の影響を調べるために、2012年2月2日0時~6時にEARで観測された鉛直風の高度プロファイルを図6に示す。

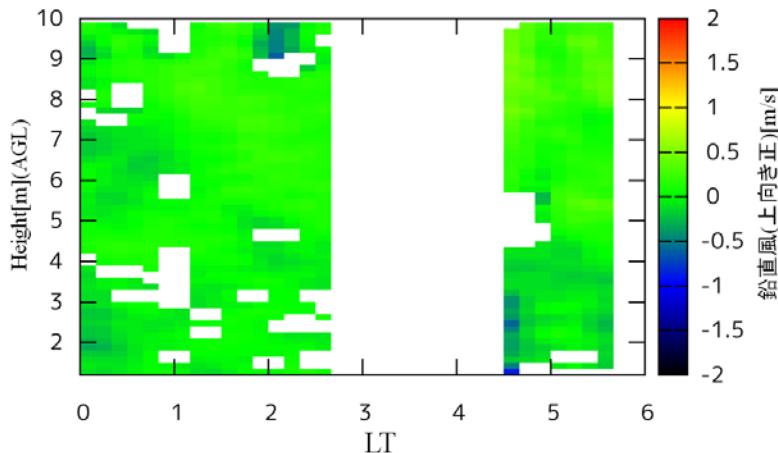


図6 EARによって2012年2月2日に観測された鉛直風の高度プロファイル(10分平均)

$Z_e$ と降水強度の関係を乱す要因の一つとして考えられる鉛直風を調べると、欠損値は多いが4時半頃にBB高度から下向きの風が観測されていることが分かる。

この鉛直風がフィッティングのミスによるものであるかを確認するために4時31分にBB直下の高度3080m(AGL)でEARによって観測されたドップラースペクトルを図7に示す。

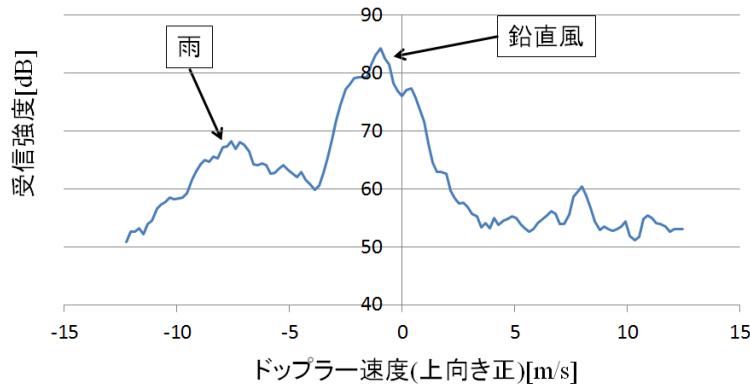


図7 2012年2月2日4時31分に高度(AGL)3080mで  
観測されたドップラースペクトル(EAR)

4時31分の鉛直風を調べてみると、実際に鉛直風が観測されていることが分かる。また、この前後の時間も同様に調べたところ、この鉛直風は高度(ASL)3600m~4100m付近で確認でき、4時20分~40分の20分間発生していることが分かった。

これより上の高度では雪が融解して速度変化していく過程が確認できた。よって、この高度では雪はすでに融解し終わっており、鉛直風には雪のスペクトルは混ざっていないと考えられる。

2012年2月2日4時10分~35分にMRRによりBB直下で観測された雨滴のドップラースペクトルを図8に示す。

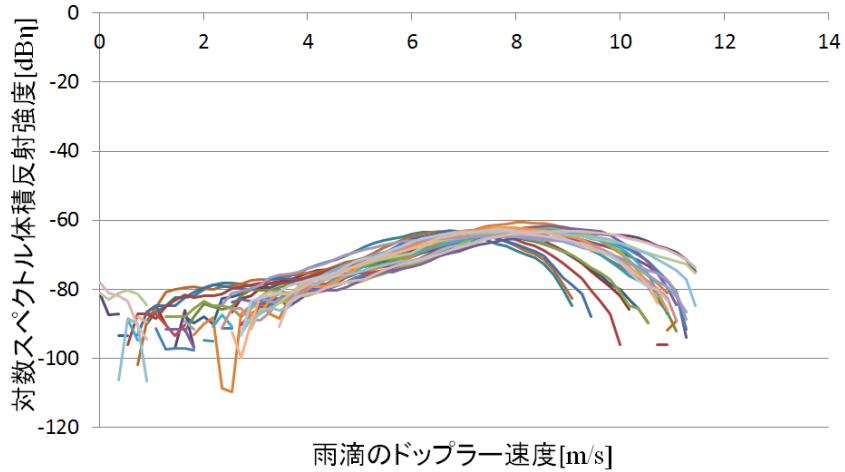


図8 4時10分~35分にBB直下で観測された雨滴のドップラースペクトル(MRR)

鉛直風が観測されなかった時間を除いて、鉛直風が観測された時間では全てのデータで10m/sを超えるドップラーエコーが観測された。10m/sを超える雨滴は計算上直径5mmを超える。しかし、0~3mm/h以下の降水イベントで直径5mmを超える雨滴が長時間観測されるとは考えづらいため、これは鉛直風の影響であると考えられる。

2012年2月2日0時~6時にMRRによって観測されたBBの強さ $\Delta Z_e$ の時間変化とヒストグラムを図9に示す。

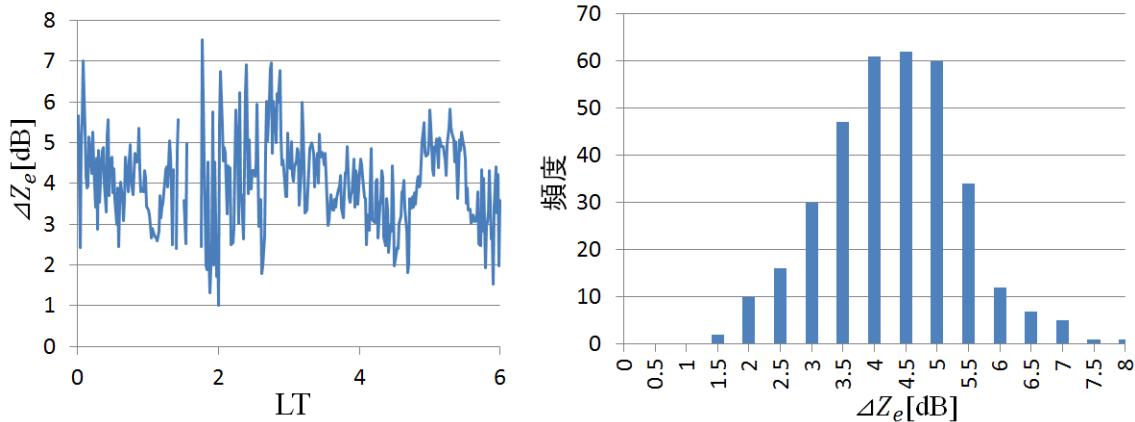


図9 MRRにより観測されたBBの強さ $\Delta Z_e$ の時間変化とヒストグラム

ドップラー速度が大きい理由として凝集や大きい雪片の融解が理由として考えられる。しかし、どちらの場合でも $\Delta Z_e$ が大きくなることが過去の研究<sup>[5]</sup>から分かっており、4時20分~40分の間は $\Delta Z_e$ は平均よりも低くなっているため大きな雪片や雨滴の影響ではないと考えられる。これらの結果から、実際にBB高度から下向きの風が発生している可能性が高いと考えられる。

### 結論・まとめ

MRRで観測されたBB直下のパラメータとParsivelで観測された降水強度の相関を調べた結果、どちらの場合でもいい相関が得られたがRとの相関は $Z_e$ との相関より低くなかった。 $Z_e$ は鉛直風の影響を受けないがRは影響を受ける。そのため、鉛直風の影響を調べるためにEARで観測された鉛直風を調べると4時半頃に下向きの風が観測されていることが分かった。EARで観測されたBB高度のドップラースペクトルでは下向きの風が明瞭に確認でき、MRRで観測されたBB直下の雨滴のドップラースペクトルでは10m/sを超えるドップラースペクトルが長時間観測されていた。

それらの結果から、実際にBB高度から下向きの風が発生している可能性が高いと考えられる。

### 課題・今後

鉛直風がBB高度から発生して数百m下方まで降水観測に影響を与える可能性が示唆されたため、この鉛直風を考慮して降水強度の推定を行う必要がある。

鉛直風の発生条件を調べたい。しかし、鉛直風の発生は稀であり2010年~2012年のデータで明瞭に鉛直風が発生しているのは今回用いたデータのみだった。

鉛直風の発生条件を調べるためにもデータを収集する必要がある。

### 参考文献

- [1] A. Huggel, W. Schmid, and A. Waldvogel, 1996: Raindrop Size Distributions and the Radar Bright Band. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1688–1701.
- [2] Tomoki KOSHIDA, Shin MIYAZAKI, Daisuke KOMORI, Masahiro KOIKE, Shinjiro KANAE, and Taikan OKI, 2009: Estimation of the vertical profile of precipitation particles under melting condition by combining the observation of 1-D Doppler radar and melting calculation model. 水工学論文集 53.367-372.
- [3] Wim Klaassen, 1988: Radar Observations and Simulation of the Melting Layer of Precipitation. *J. Atmos. Sci.*, 45, 3741–3753.
- [4] Frederic Fabry and Isztar Zawadzki, 1995: Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation. *J. Atmos. Sci.*, 52, 838–851.
- [5] Ronald E. Stewart, John D. Marwwitz and John C. Pace, 1984: Characteristics through the melting Layer of Stratiform Clouds. *J. Atmos. Sci.*, 41, 3227–3237.

# 赤道大気レーダ EAR と人工衛星 GPM/DPR から得られた降雨強度プロファイルの比較及び検討

Tengfei Ou\*, 下舞豊志（島根大学）, 橋口浩之（京大 RISH）  
(島根大学大学院総合理工学研究科)

## 1 背景・目的

近年では異常気象による被害が頻繁に報道されている。その被害による損失は経済だけに留まらず、人命に被害も及んでいる。降水による被害を抑え込むために、地球全体の広範囲の降水リアルタイムモニタリングを実現しようとしているのが GPM (全球降水観測計画) です。瞬時かつ広範囲で地球観測が可能な人工衛星 GPM/DPR (DPR : 二周波降水レーダ) が用いられて、今までのない降水の観測精度が期待されている。本研究では、地上にある赤道大気レーダ EAR 及び上空 407[km] にある人工衛星 GPM/DPR から同時観測によって、得られた降雨強度プロファイルの比較及び検討し、GPM/DPR による降雨強度プロフィールの精度を確かめることを目的にする。

## 2 使用機器

地上ではインドネシアの赤道直下にある赤道大気レーダ EAR 及び地上の雨滴粒径分布を観測機器 Parsivel を用いている。

上空では JAXA と NASA が共同開発した地球観測衛星 GPM を用いている。

## 3 手法

降雨強度プロファイルの比較を行うため、同時に、同地域の観測データを選び、地上にある観測機器 Parsivel を用いて、統計的に赤道大気レーダ EAR のレーダ反射因子 Z の校正を行い、校正後のデータ解析<sup>[1]</sup>による降雨強度プロファイルを比較する。

本研究では、2014 年 12 月 12 日 17 時から 19 時までのデータを用いて校正を行った。また、GPM/DPR では、EAR 地点における観測時刻は同日の 17 時 21 分のデータを用いた。GPM/DPR は軌道上における三次元の

データを所得しているが、本研究では鉛直のデータのみを扱った。

具体的には、EAR の鉛直ビームから観測できた大気スペクトルから雨の情報を抽出した。また、AGL 1725~2025[m], 2025~2325[m] の雨雲を均一の雲として仮定し、雨滴はそれでおよそ何分くらいで地上に到達するのかを、相関係数の計算結果<sup>[2]</sup>及び物理法則に従った推定結果を用いて、何時から何時までのレーダ反射因子 Z を用いるのかを決める。

決めた校正值を用いて、EAR のデータ解析を行い、GPM/DPR による降雨強度の観測結果と比較する。

更に、EAR の観測範囲を疑似的に広げるために、水平風の情報を考慮し、雨は水平風とともに流されることを仮定する。GPM/DPR のフードプリントである 5[km] を移動するためのおよそ需要時間を EAR から観測された水平風ベクトル情報を用いて推定する。

## 4 解析結果

EAR によって推定した上空のレーダ反射因子 Z と地上 Parsivel によって推定されたレーダ反射因子 Z の結果から相関係数を算出した。図 1, 図 2 において高度 2025~2325[m] では 15 分前後、1725~2025[m] ではおよそ 13 分前後で、それぞれピークを迎えている。

また、物理的に考えて、直径 1[mm] の雨粒の終端速度を用いて計算した結果、上空 2000[m] から地上に到達するまではおよそ 15 分はかかる。

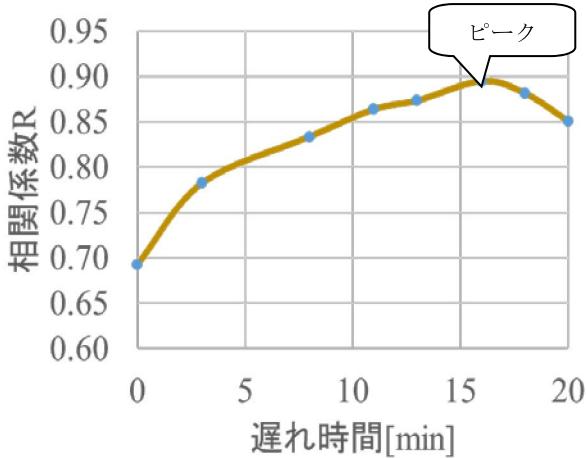


図1 高度 2025~2325[m]から  
地上に到達するまでの  
遅れ時間の相関係数の関係

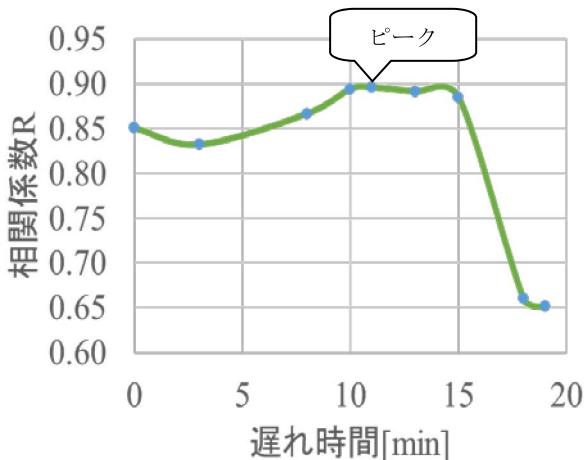


図2 高度 1725~2025 [m]から  
地上に到達するまでの  
遅れ時間の相関係数の関係

従って、2025~2325[m]では15分、  
1725~2025[m]では13分遅れたレーダ反射因子Zを用いて、校正値を算出した結果、-30.30[dBZ]を得られた。

-30.30[dBZ]を用いて、EARによるデータの解析を行うと、EARとGPM/DPRによる降雨強度プロファイルの結果を図3、レーダ反射因子Zの高度プロファイルの結果は図4のように示す。

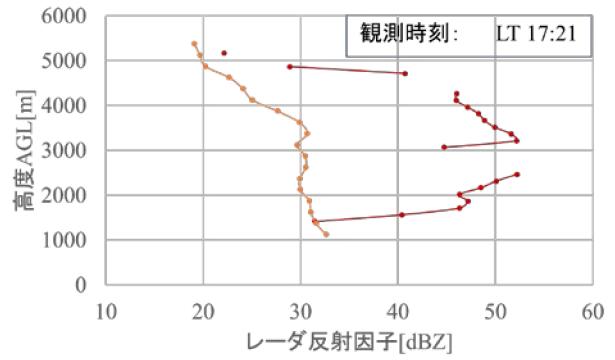


図3 GPM/DPR, EAR による降雨強度の推定結果

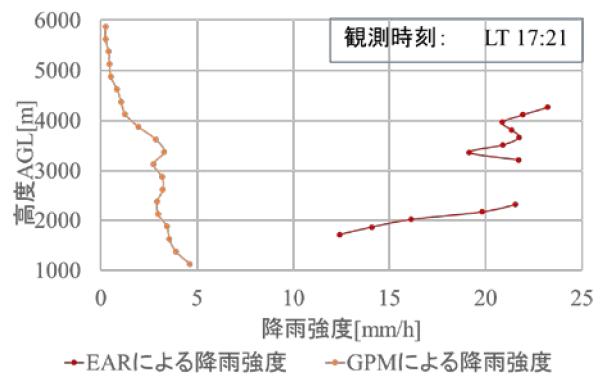


図4 GPM/DPR, EAR によるレーダ反射因子Zの推定結果

EARとGPM/DPRによる降雨強度プロファイル及びレーダ反射因子Zの高度プロファイルからでは、いずれも同じのような変動が見られなかった。

水平風に乗った雨粒を考慮して、擬似的にEARの観測範囲を広げようとするため、EARによる観測された水平風は周囲の風にも影響し、尚且つ観測されたプロファイルは不变だと仮定する。EARによる水平風の結果観測は図5のように示す。またGPM/DPRによる推定氷結高度、地上のMAWSによる観測気温による氷結高度も示している。

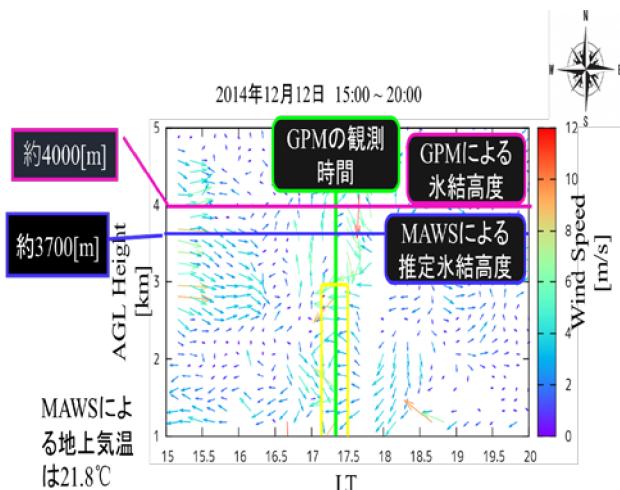


図 5 EAR による水平風の観測結果

雨粒の推定結果だけを扱いたいため、MAWS による推定氷結高度より低い、AGL1200~3000[m], 17:10~17:30 の水平風ベクトルを用いて、単純計算した結果、およそ 5[km]を移動したという結果を得ている。

## 5 まとめ

本研究では、同時かつ同地域の降雨のデータを扱い、統計を用いて、EAR の校正值を -30.30[dBZ] に確定したが、降雨強度プロファイル、レーダ反射因子 Z の高度プロファイルからでは、いずれも、同じのような変動を見られなかった。

それは、EAR の鉛直方向のビームが照射された範囲と、GPM/DPR によって照射された範囲は異なるからだと考えられる。つまり、雨雲の非一様性によるものだと考えられる。

EAR の観測範囲を擬似的に広げるために、水平風を考慮し、ベクトルの単純計算を用いて AGL1200~3000[m]において、17:10~17:30 の水平風はおよそ 5[km]を移動した。

## 6 課題

雨粒の移動を考慮し、擬似的に広げた EAR プロファイルを合成する。再び GPM/DPR から得られた降雨強度プロファイルの比較を試みる。また周波数の違いに

よる結果の異なりを考慮し、Ku バンドによる観測結果について比較する。

## 謝辞

京都大学生存圏研究所からのデータ提供、ご協力頂いた方々に深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] T. Kozu Estimation of raindrop size distribution from spaceborne radar measurement[J], pp 18, 1992.
- [2] 前園宜彦、「概説 確率統計」、サイエンス社, pp. 129, 2007.

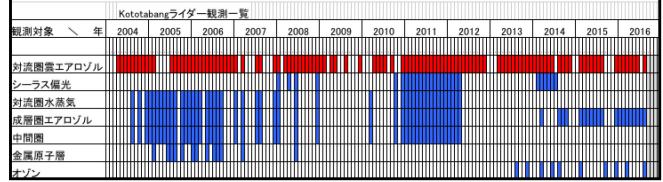
# 赤道ライダーとCALIOP衛星データ解析による赤道域火山起源成層圏エアロゾルの動態

阿保 真, 柴田泰邦, 長澤親生  
首都大学東京

2016年9月8日  
第10回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

## はじめに

- 我々は2004年から赤道直下のインドネシア・コトタバン(0.2° S, 100.3° E)において、地球大気の熱収支に重要な影響を及ぼす赤道領域の対流圏の雲・エアロゾル分布の連続観測を、小型ミライダーを用いて現在まで継続している。
- 波長532nmのミライダーは、2004年4月から連続観測を開始し、途中数ヶ月程度の断続的な欠測期間はあるが、12年間のデータが蓄積されている。
- 大型ライダーは主に成層圏上部から中間圏の気温測定用であるが、今回下部成層圏のデータを見直した。
- さらに2014年2月から行っている大型ライダーによる偏光観測データを利用し、2004年から2015年の間に噴火した低緯度の火山に着目しその動態解析を行った。



## 過去12年の低緯度大規模火山噴火の一覧

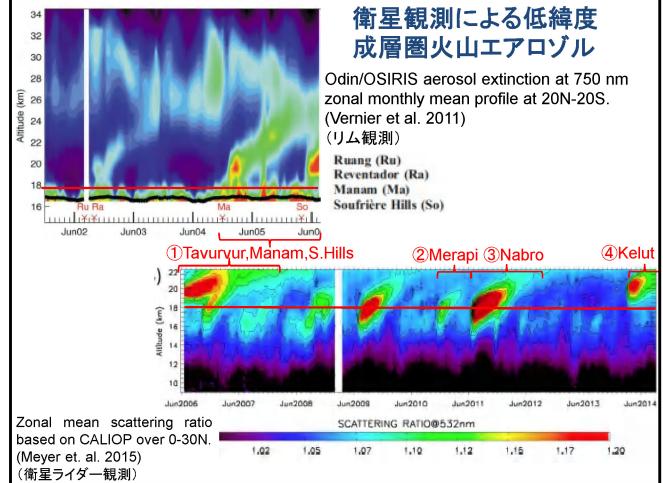
■ 赤道域(緯度10°以下)  
の噴火 ■ 成層圏に達した  
噴火

Volcano	Latitude	Longitude	Elevation	ERuption	VEI	Ash Alt.	SO2
④ Kelut	7.93S	112.31E	1731 m	2014/02/13	4	26km	200kt
③ Nabro	13.37N	41.70E	2218 m	2011/06/12	4	13.7km	103kt
② Merapi	7.54S	110.44E	2988 m	2010/11/04	4	18km	227kt
Rabaul(Tavurvur)	4.27S	152.20E	688 m	2006/10/07	4	18km	
CALIPSO 2006/6~							
Soufrière Hills	16.72N	62.18W	915 m	2006/05/20	3	17km	
Manam	4.08S	145.04E	1807 m	2006/02/27		19km	54kt
Manam	4.08S	145.04E	1807 m	2005/01/28	4	24km	
Manam	4.08S	145.04E	1807 m	2004/10/24		18km	
Equatorial Lidar 2004/4~							
Pinatubo	15.13N	120.35E	1486 m	1991/06/15	6	40km	30Mt

## 衛星観測による低緯度成層圏火山エアロゾル

Odin/OSIRIS aerosol extinction at 750 nm zonal monthly mean profile at 20N-20S.  
(Vernier et al. 2011)  
(リム観測)

Ruang (Ru)  
Reventador (Ra)  
Manam (Ma)  
Soufrière Hills (So)

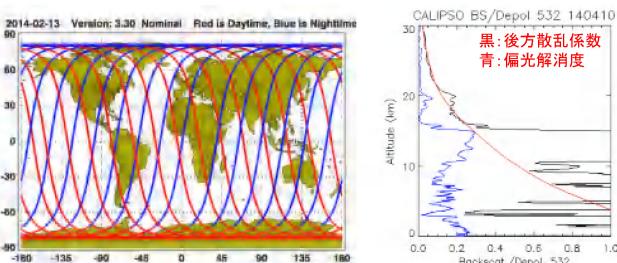


## CALIOP データの解析法

CALIPSO衛星の軌道

2日間でほぼ同じ経度に戻る

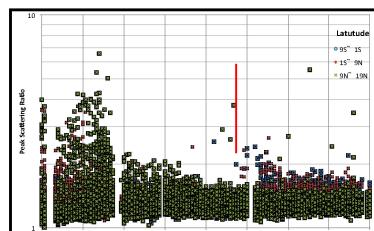
CALIOPの波長532nm後方散乱係数データから、散乱比を計算  
経度±10°の範囲を軌道ごとに積算  
緯度、経度、ピーク散乱比、ピーク高  
度をプロット  
使用データは夜間のみ



## 散乱比の時間推移

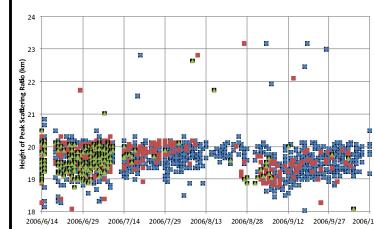
CALIOP

① Manam,S.Hills,  
Tavurvur

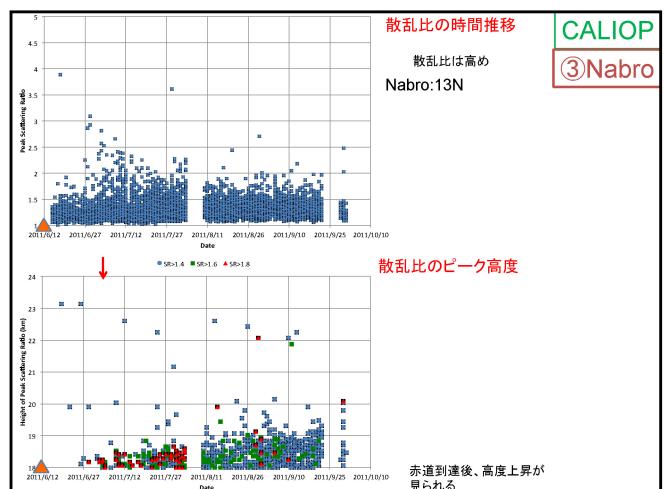
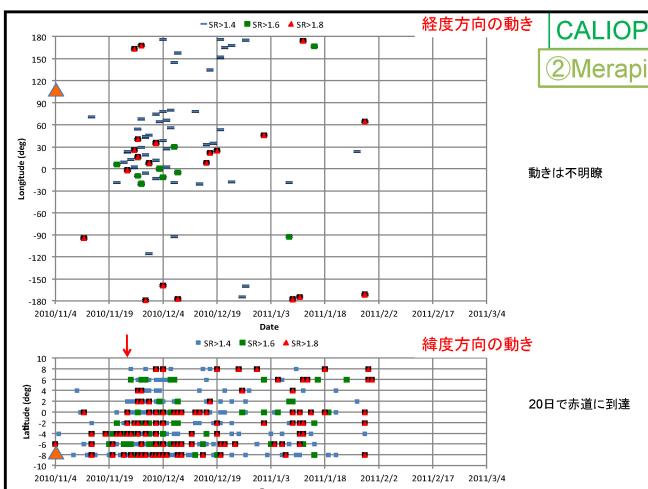
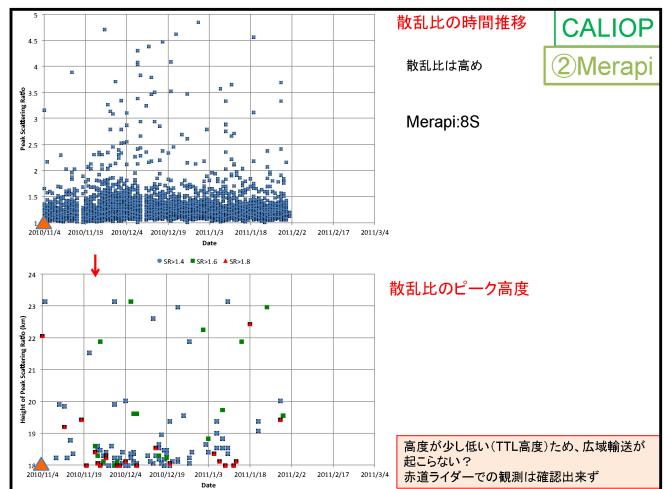
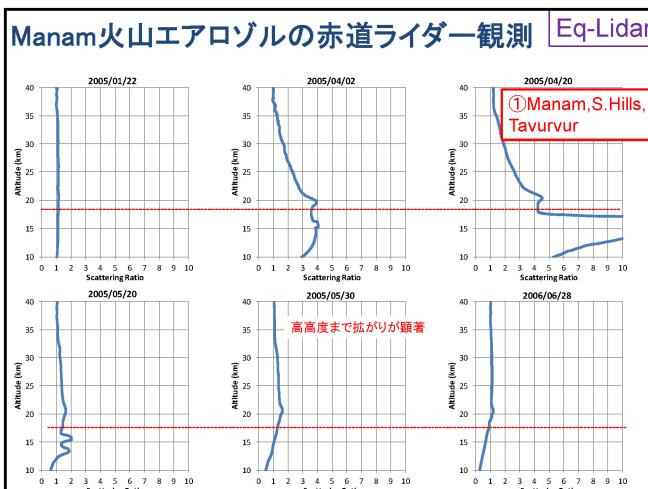
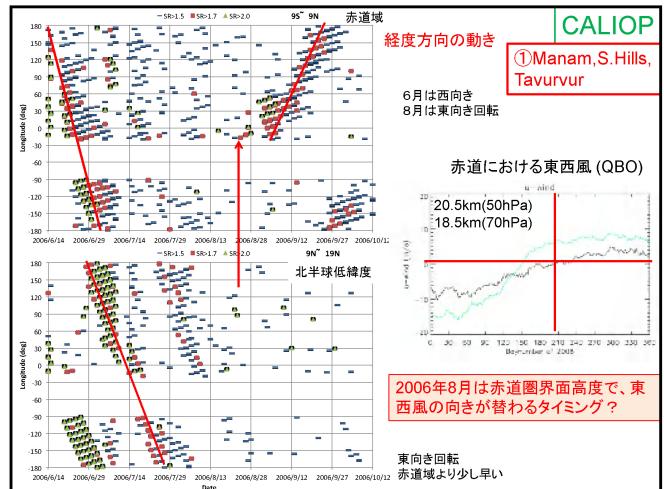
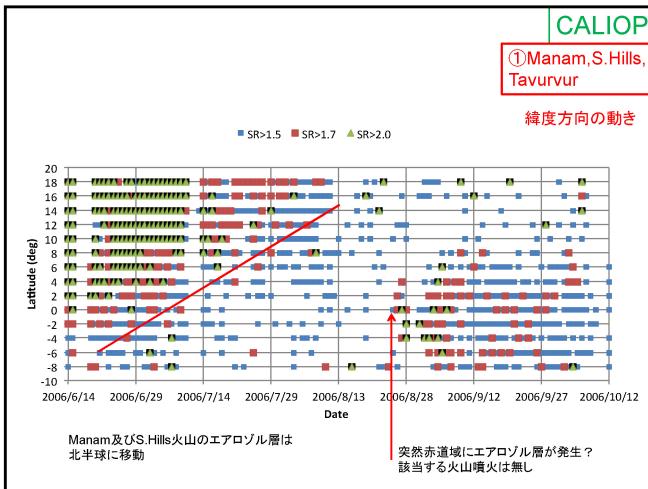


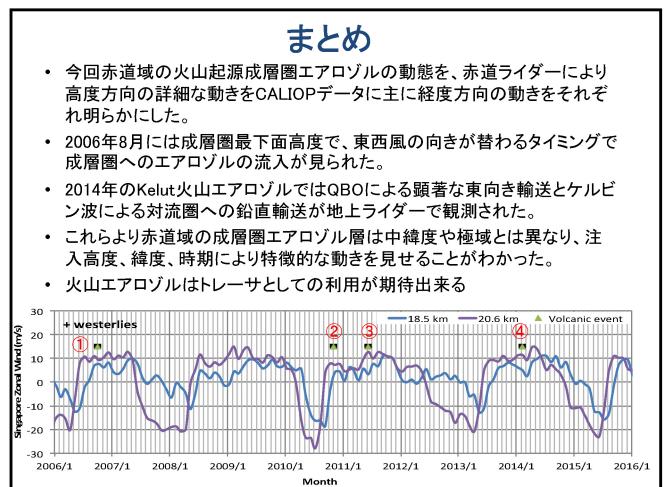
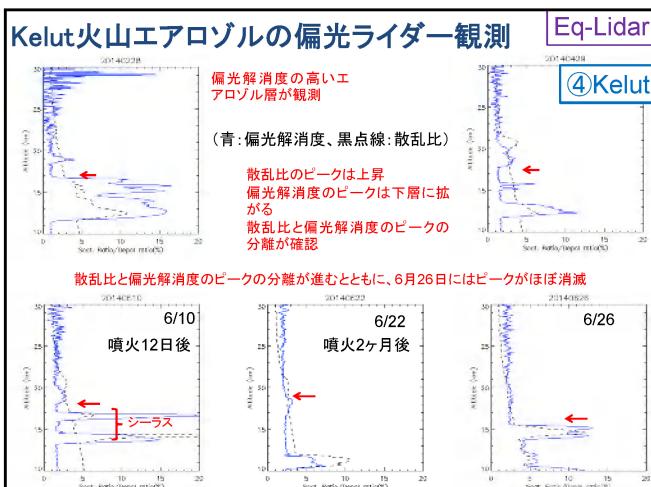
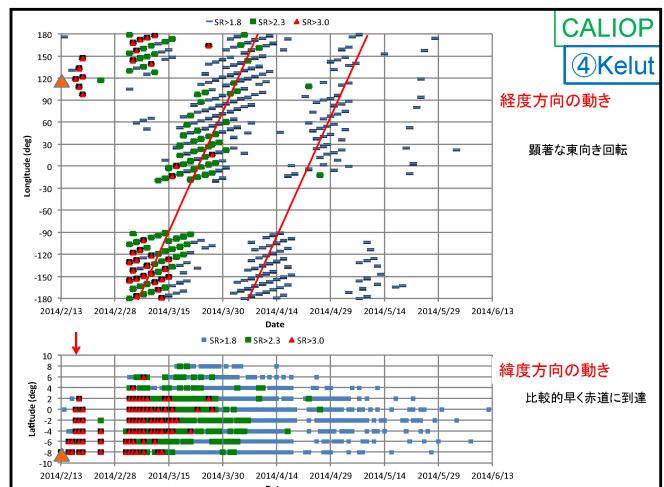
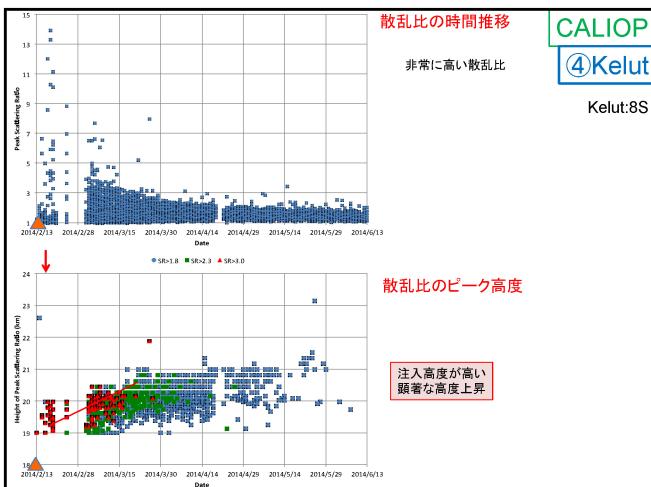
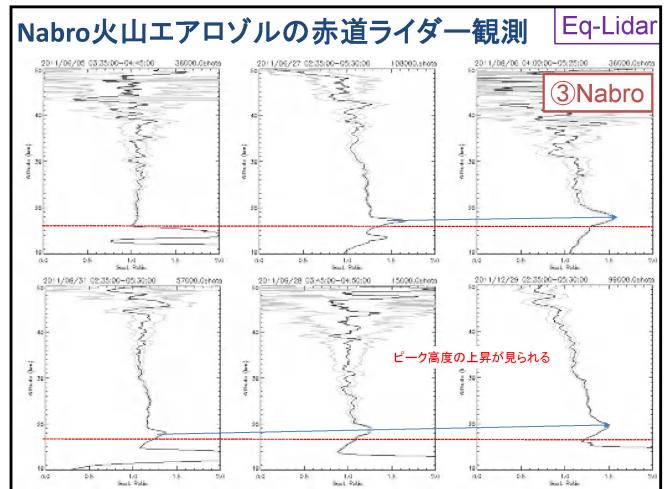
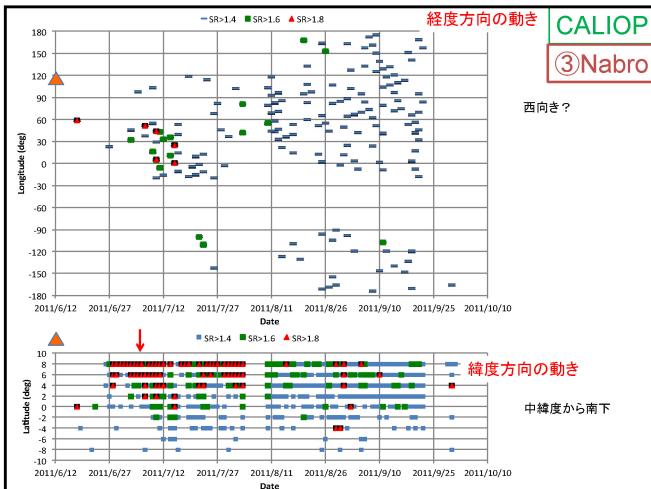
## 散乱比のピーク高度

Manam: 4S  
S. Hills: 17N  
Tavurvur: 4S



CALIOP観測開始時点でManam及び  
S. Hills火山のエアロゾル層がある





# EAR-RASS による赤道域の気温プロファイルの 観測に関する研究

田畠啓<sup>1</sup> 津田敏隆<sup>1</sup>  
京都大学生存圏研究所

## 1. 研究背景

赤道域の対流圏界面付近の UTLS (Upper Troposphere and Lower Stratosphere, 10~20 km) ではエネルギーや物質の交換など特有の現象が起こっている。これらの現象の解明には高精度・高時間分解能の気温観測が重要である。本研究では赤道大気レーダー (EAR) に RASS (Radio Acoustic Sounding System) を適用し、UTLS の広い高度範囲で連続的に気温を観測することを目指す。

## 2. 原理

RASS は大気レーダーと音波発射装置で構成される。レーダーアンテナに設置したスピーカーから強力な音波を発射する。音波による大気密度の周期的な粗密構造は屈折率を変化させる。レーダービームを適切に操作すれば、音波面からブリッジ散乱が起こり、その後方散乱波 (RASS エコー) をアンテナで受信できる。RASS エコーはドップラー効果により音速に応じて周波数が遷移しているので、その周波数を検出することで散乱高度の音速を知ることが出来る。大気中では気温と音速に以下の関係式が成り立つので、気温の高度プロファイルを導くことができる。

$$T_v = \left( \frac{C_s}{K_d} \right)^2$$

ここで  $T_v$  は仮温度 (湿度による大気密度変化を考慮した温度)、 $K_d$  は定数である。

## 3. 方法

本研究では 2016 年 2 月から 9 月まで複数回にわたって数日間の観測キャンペーンを行った。気温・風速の背景場は RASS で用いる音波の伝搬に大きな影響を与えることから、音波面を ray-tracing 計算し することで、音波の伝播を解析する。それをもとに準リアルタイム的にアンテナビーム走査を行う。また音源の配置、使用する音波の周波数についても検討を行った。

EAR アンテナ面上の図 1 の位置にスピーカーを設置し RASS 観測を行った。音源はアンテナ中央に 4 つ外周上の各方位に 5 つ配置されている。

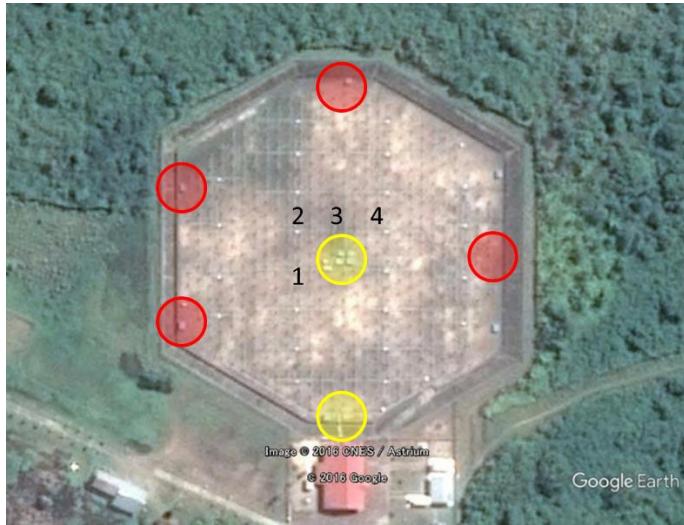


図 1. EAR 面の音源の配置。丸印の位置にスピーカーを設置した。黄色の地点では SPL を計測した。

スピーカー	SPL (dB)
中央 1	126.5
中央 2	134.8
中央 3	133.0
中央 4	134.3
南	132.8

表 1. スピーカーの音圧レベル(SPL)

#### 4. 音波面の ray tracing

RASS 観測ではブラング散乱を利用している。音源をアンテナ中央に設置した場合、音波と電波の進行ベクトルが平行（レーダービームと音波面が垂直）のとき、強い RASS エコーが得られる。ここで、音波の伝播は各高度の風速・気温によって影響を受けるので、音波伝播を ray tracing によってモデル計算し、強い RASS エコーが期待できる高度領域を 3 次元で推定することで、観測可能な高度を検討する。この結果からレーダービームの方位と音源の設置位置を最適化することで広域な高度範囲で観測が可能になる。また、ブラング条件から音波の波長はレーダーの波長の半分である必要があり、115Hz~85Hz に周波数がスイープするチャーピング音波を使用することで目的の高度での観測が可能になる。

図 2 に ray tracing 計算の一例を示す。右図は 5 月 31 日の 12 時 (LocalTime) ごろ EAR で観測された風速を入力として計算した RASS 観測可能な範囲を示し、左図は実際に ray tracing 計算結果を受けて決定したビームで 12:56 に観測された RASS スペクトルである。この図から ray tracing 計算の結果から得られた観測可能な高度域と、実際に気温観測できた高度域が一致することが確認できる。またエコー強度の強弱と ray tracing 結果が対応している。

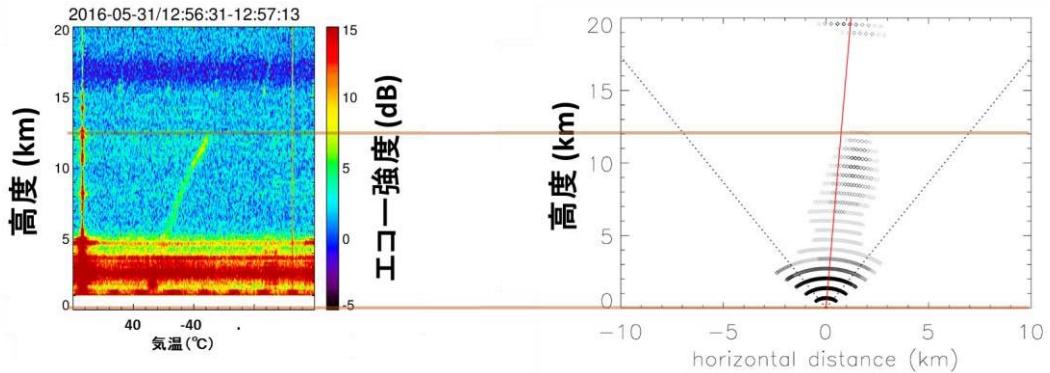


図 2. ray tracing 計算結果（右）とその時観測された RASS スペクトル。ray tracing では音波の伝播を計算しそのうちの RASS エコーが受信可能になる音波を図にプロットしている。右図は包囲角  $60^\circ$  の平面で赤線は天頂角で  $2^\circ$  傾斜しておりこの方向のビームでプロットされた点と重なる高度での気温観測が期待できる。

## 5. 使用する音源

前述のとおりブレーカー条件から使用する音源周波数と RASS 観測できる高度には対応関係がある。高高度では気温が低くなり、音速は遅くなるため使用すべき周波数小さくなる。今回 EAR では周波数  $47\text{MHz}$  としているので、この波長の半分は  $3.189\text{ m}$  になる。RASS では広い高度の気温を観測できるよう、一定の幅の周波数をスイープする FM チャープ音を音源として使用した。表 2 では一定の温度減率を仮定したときの音源周波数と高度の対応関係を示している。現在  $85\sim 115\text{ Hz}$  の間を 2 秒間かけて変化する音源を使用し、対流圏海面付近の観測を視野に入れている。また使用する音の周波数を目的の高度に合わせて狭域化したとき、特定の音が出ている時間が長くなりより強いエコーが得られるのではないかと考えられる。観測可能な高度を対流圏界面付近限定し、狭い周波数帯のみを使用する試みも行った。

周波数 (Hz)	85	90	100	115
音速 (m/s)	271.3	286.6	318.4	366.2
温度 (°C)	-90.0	-68.8	-20.9	60.5
高度* ( km)	17.0	14.4	7.06	-5.46

表 2. 使用する音波の周波数と RASS 観測可能な高度との対応関係。ただし温度に関して地上を  $25^\circ\text{C}$ ・温度減率を  $6.5^\circ\text{C}/\text{km}$  と計算した。

## 6. 観測結果

RASS で観測されるビームの視線方向の速度には、音速に加えて視線方向の風速成分が重畠されている。EAR で同時観測している風速から視線方向成分を算出してこれを補正する。この際風速は鉛直と 4 方位に天頂角  $10^\circ$  の 5 ビームで観測し、同じ高度で風速は一定という仮定のもと合成している。通常の風速観測に加え RASS 観測と同じ方向のビームで風速を観測すれば、時間分解能を落とす代わりに合成による誤差のない補正が期待できる。

この風速補正を適用した RASS 観測結果を図 3 に示す。高度 8~10 km の気温の連続観測に成功している。

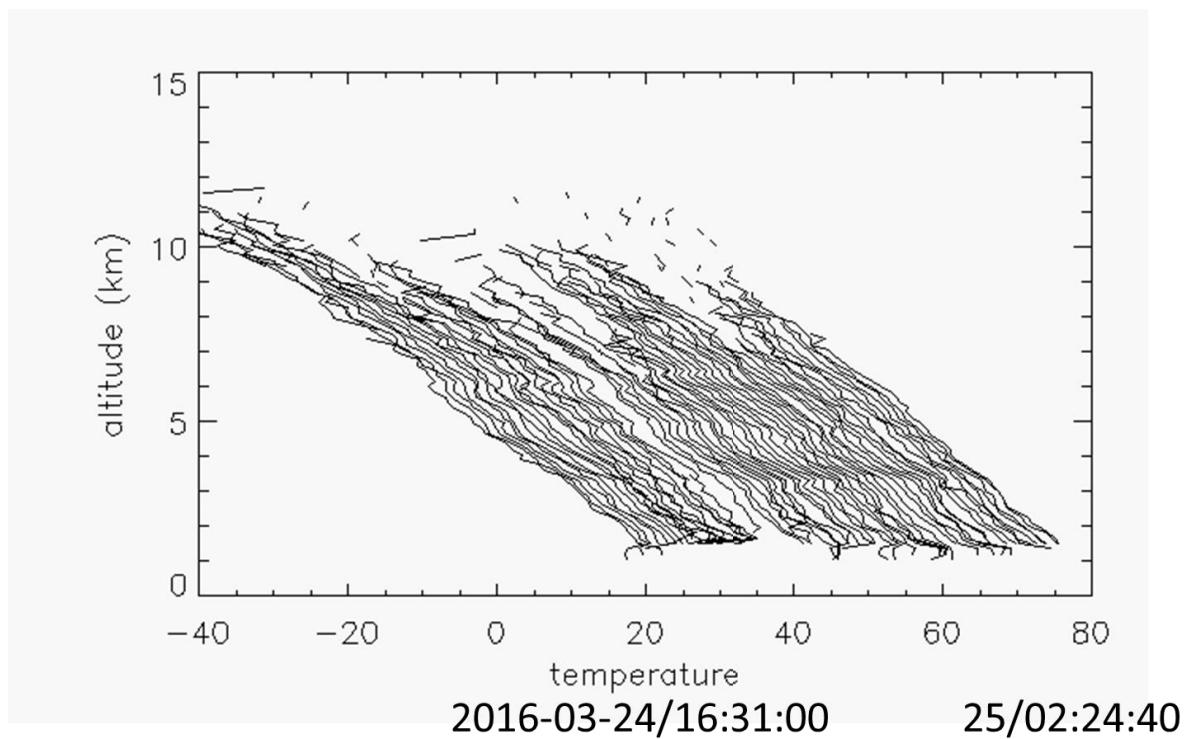


図 3. 2016 年 3 月 24 日 16 時 30 分から翌 2 時 24 分までに観測された気温プロファイル。最も高い高度まで観測できた鉛直ビームによる観測結果のみを用い、約 2 分ごとに得られる観測結果を 10 分ごとに平均した。

## 7. まとめと今後の予定

安定して稼働する音源システムを構築し、これを利用し RASS 観測を行った。地上から高度 14 kmまでの気温を数時間の間連続的に観測することに成功した。また RASS 観測結果を解析し風速補正により気温の算出を行った。解析結果には時間的に不連続な点がみられ、複数ビームの平均を利用するなど統計的に処理をしたい。また今後 RASS と同じ方向のビームで風速を観測することによる風速補正の精度向上の効果を検討したい。

現在建設予定である赤道 MU レーダーでは EAR の約 10 倍の出力があり RASS エコー強度の増大が見込める。EAR による RASS の高度限界を決定している要素が受信強度不足であるならば EMU での 14 km を超える高高度の観測を期待できる。