

第 474 回 生 存 圏 シ ン ポ ジ ウ ム

第 16 回
MUレーダー・赤道大気レーダー
シンポジウム

2022年9月5日・6日

京都大学生存圏研究所

は じ め に

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

一方、インドネシア共和国西スマトラ州の赤道直下に位置する赤道大気レーダー(EAR)は、2000 年度末に完成した大型大気観測用レーダーで、京都大学生存圏研究所(RISH)とインドネシア国家研究イノベーション庁・航空宇宙研究機構(LAPAN/BRIN)との協同運用により長期連続観測が続けられている。2001～2006 年度に実施された科研費・特定領域研究「赤道大気上下結合(CPEA)」において、その中核設備として利用され、2005 年度から EAR 及びその関連設備の共同利用を開始した。当初から国際共同利用にも供しており、海外の研究者による共同利用が全課題数の約 3 割を占めている。また、京都大学では、赤道大気レーダーを MU レーダー並に高性能・高機能化するべく赤道 MU レーダー(EMU)を概算要求している。日本学術会議の学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン「学術大型研究計画」(マスタープラン 2014・2017・2020)の重点大型研究計画に EMU を主要設備の一つとする「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」(2014・2017 は津田敏隆代表、2020 は山極壽一京大総長代表)が選定された。

本年 9 月 5 日・6 日に、第 16 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。昨年同様、新型コロナウイルス(COVID-19)の感染拡大防止のためオンラインで開催した。共同利用により得られた研究成果のほか、大気科学・レーダー工学に関連する研究成果、計画について海外からも含め 20 件の研究発表があり、活発な議論が行われた。

2022 年 9 月

京都大学生存圏研究所
MU レーダー/赤道大気レーダー共同利用・共同研究専門委員会
委員長 橋口 浩之

目 次

MU レーダー・赤道大気レーダー共同利用の現状	1
橋口浩之(京大 RISH)	
衛星回線における近年の降雨減衰時間率の増加について	4
前川泰之・柴垣佳明 (大阪電通大)	
島根県と広島県における MP レーダと AMeDAS との比較	7
難波秀年・下舞豊志 (島根大)	
2022 年 7 月 5 日に高知県で発生した線状降水帯の X バンド二重偏波レーダー RHI 観測による鉛直構造解析	12
中陽・村田文絵・佐々浩司・藤井虎太郎 (高知大)	
ふた山形状の雨滴粒径分布の観測事例解析	15
岡崎恵(京大理)・竹見哲也(京大防災研)・阿波田康裕(JAXA)・大石哲(神大都市安)	
層状性降水雲中の固体降水粒子観測計画	16
重尚一 (京大理)	
航空交通管制用信号を用いた二次レーダーシステムによるパッシブ対流圏気象観測の精度評価	18
橋本大志 (極地研)・森修一 (JAMSTEC)・虫明一彦 (いろはプロジェクト)	
波状雲撮影のための全天カメラの製作と初期観測	21
草野友輝・下舞豊志 (島根大)	
TKE dissipation rates estimated from vertical velocity spectra measured by Doppler lidar and radar in the Convective Boundary Layer	25
Luce Hubert, Yabuki Masanori, Hashiguchi Hiroyuki (RISH, Kyoto Univ.)	
IUGONET プロジェクトの活動と最近の成果について	29
新堀淳樹(名大 ISEE)・田中良昌(極地研)・阿部修司(九州大学 i-SPES)・今城峻(京大 WDC)・上野悟 (京大天文台)・能勢正仁 (名大 ISEE)	
インドネシアにおける煙霧のライダー観測計画	32
柴田泰邦・阿保真 (都立大)	
海陸風起源双方向重力波による赤道成層圏 QBO 頑健化: 問題点と観測的確認方法	35
山中大学 (地球研)・荻野慎也 (JAMSTEC)	
A review of SEALION activities	38
Hozumi Kornyanat, Nishioka Michi and ionospheric working group (NICT)	
タイ・チュンポンにおける下向きに伸びる沿磁力線不規則構造の VHF レーダー観測	41
大塚雄一・塩川和夫(名大 ISEE)・Kornyanat Hozumi・西岡未知・津川卓也(NICT)・斎藤享(電子航法研)・Pornchai Supnithi・Punyawi Jamjareegulgarn(KMITL)・山本衛(京大 RISH)	
赤道大気レーダーで観測された 150km エコーの太陽・地磁気活動依存性	44
横山竜宏・高木理絵子・山本衛 (京大 RISH)	
S-520-32 号機観測ロケットからご地上までの2周波ビーコン観測－観測機器の開発と結果の速報－	47
山本衛 (京大 RISH)・高橋透 (電子航法研)・芦原祐樹 (奈良高専)	

2022 年 1 月 15 日に日本上空で観測された電離圏擾乱の特性について.....	48
斎藤享・吉原貴之・高橋透 (電子航法研)	
外付け受信専用アンテナを用いたアダプティブクラッター抑圧システムの開発.....	51
橋口浩之・矢吹諒・木村侑希大・西村耕司 (京大 RISH)	
バイスタティックレーダーによる低高度域観測技術の開発	54
王元・西村耕司・橋口浩之(京大 RISH)・橋本大志・堤雅基(極地研)・佐藤亨(京大)・佐藤薫 (東大理)	
MU レーダーを用いた DDMA-MIMO 観測実験 -月面エコーを用いたビーム幅の検証-	58
松田知也・西村耕司・橋口浩之 (京大 RISH)	

MU レーダー・赤道大気レーダー共同利用の現状

橋口浩之
(京都大学生存圏研究所)

1. はじめに

MU レーダーは 1984 年の完成当初から、また赤道大気レーダー(EAR)も 2005 年から全国(国際)共同利用に供し、多くの研究成果を生み出してきた。当初は異なる共同利用委員会を組織し、課題の審査やレーダー運用等の議論を行ってきたが、2012 年 6 月に両委員会を統合して MU レーダー/赤道大気レーダー全国国際共同利用専門委員会(2020 年より MU レーダー/赤道大気レーダー共同利用・共同研究拠点専門委員会)を組織し、2012 年 12 月公募分から共同利用を統一した。本報告では、共同利用の現状について報告する。

2. MU レーダー

MU レーダーは滋賀県甲賀市信楽町に位置する中層・超高層及び下層大気観測用 VHF 帯大型レーダーであり、高度 1~25 km の対流圏・下部成層圏、高度 60~90 km の中間圏及び高度 100~500 km の電離圏領域の観測が可能である。MU レーダーの最大の特徴は、アンテナ素子毎に取り付けた小型半導体送受信機(合計 475 個)を個別制御することにより、1 秒間に 2500 回という高速でレーダービーム方向を変えることが可能であり、また、25 個のサブアレイアンテナに分割して使用することも可能である点である。こうした柔軟なシステム設計のため、開発後 35 年以上を経た今も世界で最も高機能な大型大気レーダーの一つとして活躍を続けている。2003 年度には「MU レーダー観測強化システム」が導入され、レーダーイメージング観測などの機能向上が図られた。2016 年度末には全学経費(設備整備経費)により「MU レーダー高感度観測システム」が導入された。送受信制御ユニット、アンテナ素子、およびアンテナ同軸ケーブルの一部が更新され、受信感度が向上(回復)した。2017 年 7 月 17 日に信楽 MU 観測所に落雷があり、MU レーダーも被害を受けた。1 ヶ月ほどで仮復旧したが、完全復旧のため国大協保険により 2018 度末に合成分配器及び分配合成制御器の一部を更新した。2021 年 8 月 23 日に再び落雷があり、MU レーダー超多チャンネルデジタル受信システムが被害を受けた。すぐに仮復旧し、完全復旧のため文部科学省に災害復旧予算を申請し、認められた。来夏頃に納入の予定である。

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ィンドプロファイラ(LQ-7)は、気象庁の全国 33 カ所の現業用ウィンドプロファイラとして採用されている。MU レーダーの標準的な観測モードのデータはホームページ上で逐次公開されている。(MU レーダーホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/>)。

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

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 はインドネシア国家研究イノベーション庁・航空宇宙研究機構(LAPAN/BRIN)との密接な連携のもとで運営されており、2001 年 7 月から現在まで長期連続観測を続けてきた。EAR 観測データの 10 分平均値はホームページ上で逐次公開されている。(EAR ホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/>)。2019 年 9 月 29 日に赤道大気観測所近傍に落雷があり、赤道大気レーダーも被害を受けた。11 月初めに仮復旧したが、完全復旧のため文部科学省に災害復旧予算を申請し、認められた。来年夏頃の更新を目指している。また、落雷の影響と思われるが、2020 年 4 月中旬から電波を送信できなくなり、観測を中断している。出張修理が必要であるが、渡航制限が続いているため、復旧に時間を要している。

EAR は MU レーダーに比べて送信出力が 1/10 であり、中間圏や電離圏の IS 観測を行うには感度が不足している。また、受信チャンネルは 1 個のみであるため、空間領域のイメージング観測ができないなど、機能面でも MU レーダーに劣っている。下層大気が発生した大気波動が上方へ伝搬し、上層大気の運動を変化させる様子など、大気の構造・運動の解明をより一層進めるため、MU レーダーと同等の感度・機能を有する「赤道 MU レーダー(EMU)」の新設を概算要求している。この EMU を主要設備の一つとする大型研究計画「太陽地球系結合過程の研究基盤構築」(代表：津田敏隆)は日本学術会議のマスタープラン 2014・2017 の重点大型研究計画の一つとして採択された。さらに、マスタープラン 2020 に、山極壽一京大総長を代表者として応募し、重点大型研究計画の一つとして採択された。「未来の学術振興構想」の策定に向けた「学術の中長期研究戦略」に応募予定である。

4. 共同利用の概要と現在までの推移

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

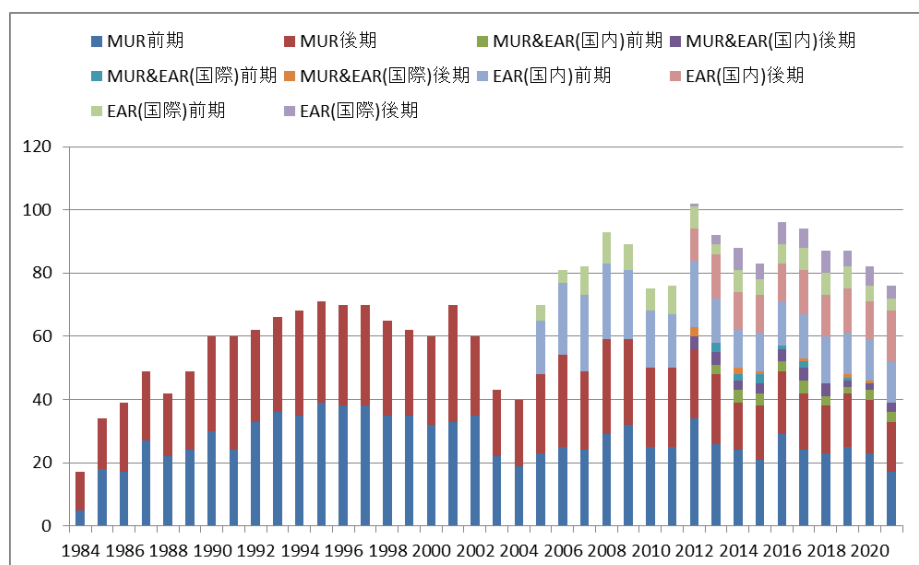


図 1. MU レーダー・赤道大気レーダー全国国際共同利用の課題件数の年次推移

同利用課題数の推移を赤道大気レーダー共同利用の課題数とともに示す。また、図 2 に MU レーダーの観測時間の推移を示す。2017 年 2~4 月には MU レーダー高感度観測システムの整備のため、共同利用観測を休止した。2021 年度には、キャンペーン(長期間)観測課題として、後期に佐藤薫教授代表の「国際大型大気レーダーネットワーク同時観測」を実施した。観測データのうち標準観測については観測後直ちに、その他の観測については 1 年を経過したデータを「生存圏データベース共同利用」の一環として共同利用に供している。

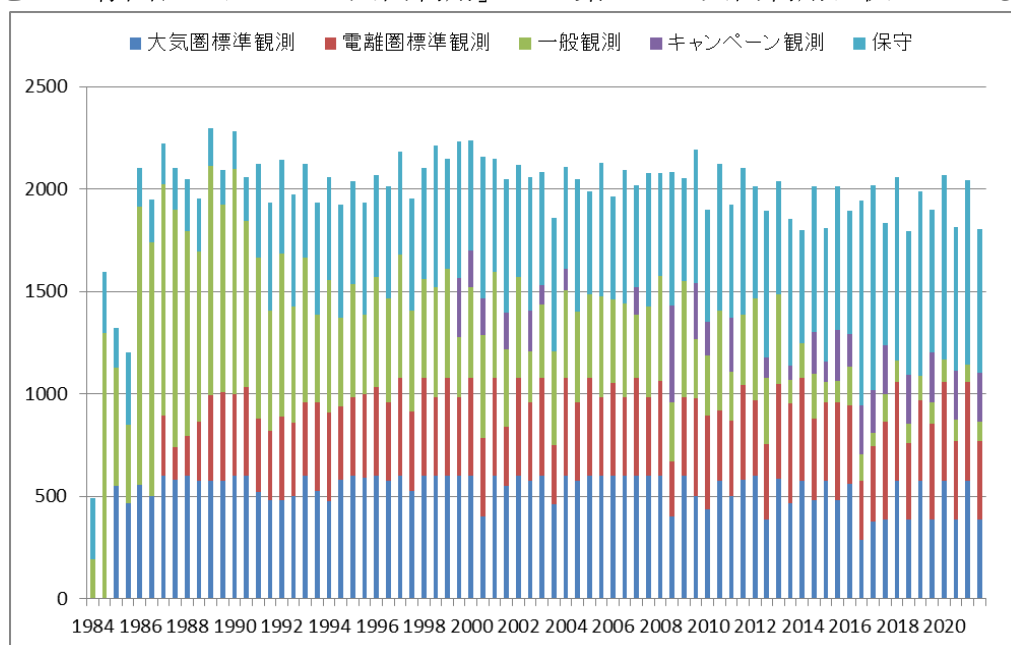


図 2. MU レーダー全国国際共同利用の観測時間の半年毎の推移。

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

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

衛星回線における近年の降雨減衰時間率の増加について

前川泰之・柴垣佳明（大阪電気通信大学）

1. はじめに

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

大阪電気通信大学では、Ka 帯通信衛星電波(19.45 GHz、右旋偏波、仰角 49.5°:以下 CS と称す)に加えて、Ku 帯放送衛星電波(11.84 GHz、右旋偏波、仰角 41.3°:以下 BS と称す)の降雨減衰を過去32年間(1988–2019)本学の寝屋川実験局で1分降雨強度とともに連続的に長期間測定を行った。そして、これらのデータに長期にわたって見られる雨域等価通路長の統計的な変動について研究を行ってきた[4]。前回の報告では台風通過時に加えての寒冷前線、温暖前線、停滞前線等による降雨について上空の風速が雨域等価通路長に与える影響について検討した[5]。今回は 2006 年以後に顕著に見られる雨域等価通路長の増大に伴う降雨減衰時間率の増加について着目し、電波伝搬路上で生じている降雨減衰特性の変化とそれらを引き起こす気象学的要因について考察を行ったので報告する。

2. 2006 年前後の降雨減衰特性

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

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

図 2 は BS 電波の降雨減衰長期統計を 2006 年の前後で ITU-R 予測値と比較したものであり、(a)1988–2006 年と(b)2007–2019 年に分けて示してある。図 2(a)より、2006 年以前では測定値は降雨強度(×印)による ITU-R 予測値(細い点線)と良い一致を示すが、図 2(b)より 2006 年以後では両者は大きな差異を示すことが分かる。また、図 2(b)の太い点線は ITU-R 勧告における等価通路長に対する水平修正係数 $r_{0.01}$ を 1.10 倍、垂直調整係数 $r_{0.01}$ を 1.36 倍とした場合の予測値で、等価通路長を $1.10 \times 1.36 \approx 1.5$ 倍とした場合の予測値は測定値とよく一致することが分かる。また 2006 年以降にこれらの係数が増加することは、降雨事象毎の等価通路長と降雨減衰継時間がその分平均として増加することから証明されている[7]。また、2006 年以後の等価通路長の 1.5 倍程度の増加に関しては、近隣の RISH(宇治市)および MU レーダー(甲賀市)、または守口市と四條畷市における 2002 年ないし 2005 年以降の BS 電波測定においても確かめられている。

図 3 は 1988 年から 2019 年に 32 年間にわたって大阪電気通信大学(寝屋川市)測定された各年の(a)BS 電波降雨減衰の等価通路長、(b)降雨時地上気温(5~10 月)、(c)台風・夕立等の熱帯性対流性降雨の発生率、および(d)日本近海の海面温度の偏差(実線)とインド洋ダイポールモード指数(点線)を比較したものである[8]、[9]。図 3(a)と(b)より、等価通路長と地上気温は 2006 年以降に段階的な顕著な増加を示すことが分かり、この年を境に周囲の気象状況等が大きく変化したことが示唆される。また、前述の様に 2006 年までは(a)等価通路長は(b)地上気温、(c)対流性降雨発生率、および(d)日本近海の海面温度と良い相関を示し、エルニーニョ・ラニーニャ現象とも対応が見られるが、2006 年以降はこれらの間の関係性があまり明白でなくなり、これらの他になんらかの要因が新たに等価通路長の年変動に加わっていると思われる。その一つの可能性として、図 3(d)に点線で示したように、インド洋西部の海面温度上昇にともなうインド洋ダイポールモード指数の増加による正のモードの出現が、2006 年以降極めて頻繁に発生するようになったことが挙げられる。詳しいメカニズムはまだ不明な点が多いが、前述の 2006 年までの太平洋赤道域のエルニーニョ・ラニーニャ現象とともに、2006 年以降は日本の気候変動への影響が増加している可能性がある。その結果、最近の衛星電波降雨減衰の等価通路長の増加による年間時間率増大等にも関係していると考えられる。

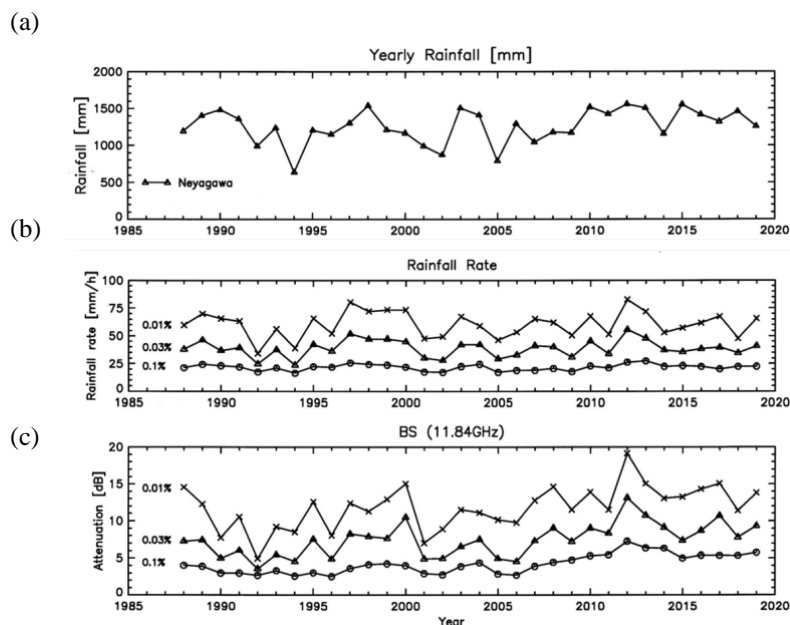


図 1. 1988 年から 2019 年の間に大阪電気通信大学(寝屋川市)で測定された(a)年間降水量、(b)降雨強度の年間時間率 0.1, 0.03, および 0.01% 値、および(c)BS 電波の降雨減衰の同時間率値。

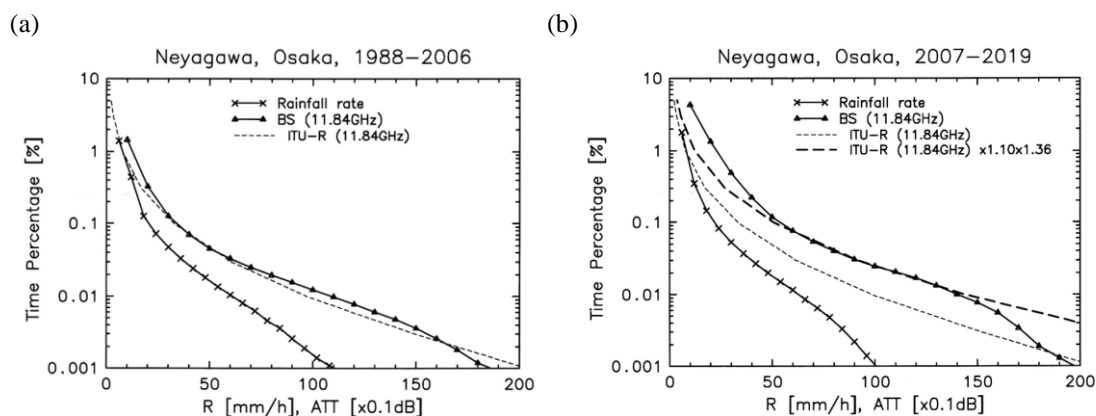


図 2. 2006 年前後の降雨減衰および BS 電波降雨減衰時間率の長期統計と ITU-R 予測値との比較

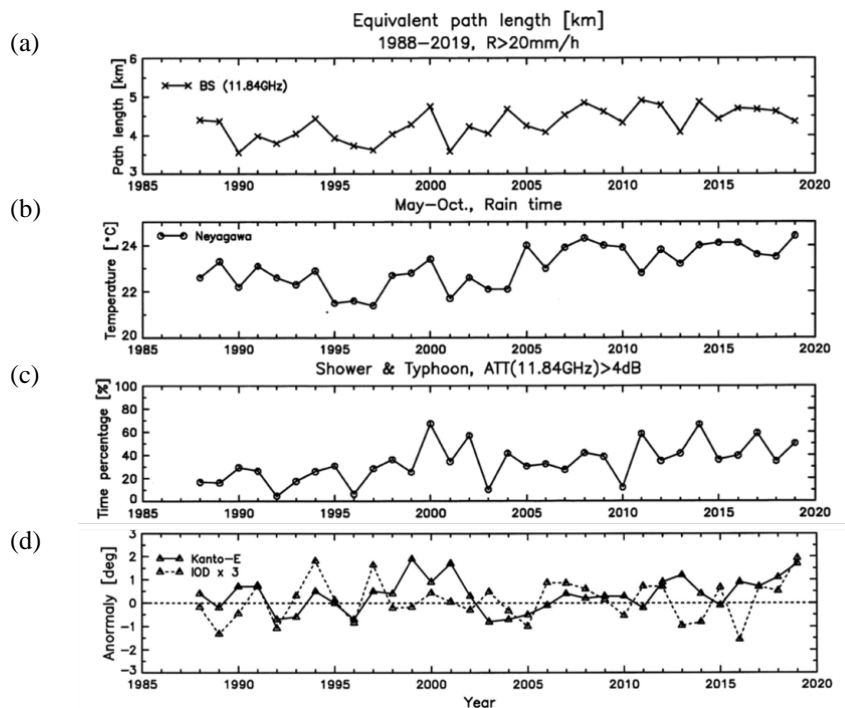


図3. 1988~2019年における (a)BS 電波降雨減衰の等価通路長、(b)降雨時地上気温(5~10月)、(c)対流性降雨発生率、および(d)日本近海の海面温度の偏差(実線)とインド洋ダイポールモード指数(点線)

3. おわりに

1988年から2019年にかけて大阪電気通信大学(大阪府寝屋川市)において30年間以上にわたって測定されたKu帯放送衛星(BS)電波等の降雨減衰データを用いて、最近の降雨減衰統計の増加と雨域等価通路長の著しい増大等の要因についてその発生状況について述べた。その原因として、2006年までの太平洋赤道域のエルニーニョ・ラニーニャ現象とともに、インド洋インド洋ダイポールモード現象が関与している可能性を述べた。

参考文献

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

島根県と広島県における MP レーダと AMeDAS との比較

難波秀年・下舞豊志(島根大学大学院自然科学研究科)

1. 背景

日本の降水量は季節ごとの変動が厳しく、梅雨時や台風の時に集中するため、それに伴う災害が数多く報告されている。そのため、電波で雨や雪などの分布と強さを測る気象レーダは、天気予報などになくてはならないものとなっている。一方で、実際に観測地点に降った降水量を観測することが可能であるのが AMeDAS である。これらの 2 つの観測装置を用いて今日の気象予測や防災対策は行われている。しかし、従来の気象レーダは、降雨強度の推定精度が低下する場合がある。気象レーダ観測によるレーダ反射因子から降雨強度を正確に求めることが気象レーダにおける長年の目標となっている。(1)(2)

2. 目的

従来の気象庁単偏波レーダネットワークによる年間降雨量観測値を AMeDAS と比較すると、多くの地点で過大評価すると報告されている。(9)

そこで 2019 年以降、新たに国交省から提供されている 2 種類の周波数帯のマルチパラメーターレーダを用いた降水量データを気象庁が使用することで、2018 年以前より降雨強度の推定精度が向上していると考えられている。(3)

そこで、実際に C バンド MP レーダの観測範囲である島根県の降水量データと X バンド MP レーダの観測範囲である広島県の降水量データのそれぞれと AMeDAS 観測降水量で比較を行うことで、それぞれの観測誤差や観測の特徴を検討していく。

3. 原理

3.1 マルチパラメーターレーダ(MP レーダ)の概要

マルチパラメーターレーダとは水平偏波と垂直偏波の 2 種類の電波を同時に送信・受信できるレーダのことを示し、MP レーダは二重偏波レーダとも呼ばれる。(6)(7)

特徴として、落下中の雨滴がつぶれた形をしている性質を利用し、偏波間位相差から高精度に降雨強度を推定することが可能とされている。現在は、X バンド(約 9.5GHz)と C バンド(約 5.4GHz)の 2 種類の周波数の MP レーダが用いられている。

3.2 AMeDAS 観測の概要

AMeDAS(Automated Meteorological Data Acquisition System)とは「地域気象観測システム」と呼ばれ、全国約 1300 か所設置されている観測装置である。AMeDAS は転倒ます型雨量計により、設置された場所の降水量をリアルタイムで観測することができる。(8)

4. 使用データ

使用したデータは、2021 年 4 月~10 月の島根県、広島県における 1km メッシュ全国合成レーダーエコー強度 GPV と AMeDAS 日積算降水量である。(4)

本研究の対象の観測範囲は、広島県広島市牛尾山の気象レーダーから半径 50km 圏内と島根県の C バンド MP レーダーの観測範囲内かつ X バンド MP レーダーの観測範囲外の AMeDAS 観測地点を対象とし、図 4 に比較対象の AMeDAS 観測地点を示す。

そして、本研究では、2021 年 4 月~10 月のデータの AMeDAS 降水量が島根県、広島県ともに全観測地点の平均が 10 mm 以上である日だけを対象とした。

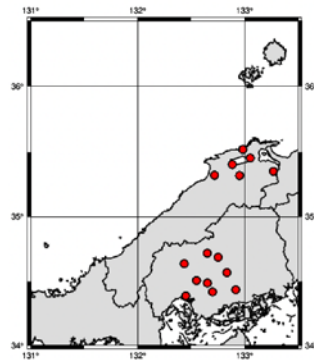


図 4. 本研究で用いた AMeDAS 観測地点の概略図

5. 比較方法

まず、AMeDAS 降水量と比較するため、10 分間隔で提供されている降雨強度データから、日積算降雨強度を算出する。

次に、AMeDAS 観測地点の座標と降雨強度データの格子点が一致しないため、図 5.1 に示すように、AMeDAS 観測地点に最も近い格子点を中心に 4 つの格子点上の降雨強度との差がどの程度生じているか、式(5.1)の計算から降水量比を求め島根県と広島県の MP レーダーと AMeDAS の降水量比の比較を行う。

$$\text{降水量比} = \frac{\text{日積算降雨強度データ}}{\text{AMeDAS 日積算降水量}} \quad (5.1)$$

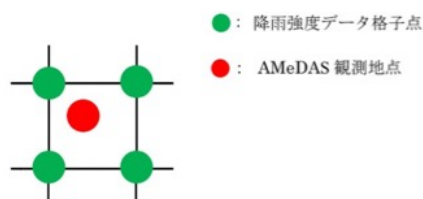


図 5.1 領域平均を算出するために用いる格子点の概略図

6. MP レーダと AMeDAS 降水量との比較結果

2021 年 4 月~10 月の島根県と広島県をそれぞれ式(5.1)の計算から求めた比率を AMeDAS 降水量が 5.5~20mm, 20.5~40mm, 40.5mm~60mm, 60.5mm~80mm, 80.5mm~100mm, 100.5mm 以上の場合の 6 通りに分けて,それぞれで比率の平均値及び標準偏差を求め, エラーバーを使用して比較した.2021 年 4 月~10 月島根県の比較結果を図 6.1 に示し, 2021 年 4 月~10 月の広島県の比較結果を図 6.2 に示す.

ここでの縦軸は比率, 横軸の値は AMeDAS 降水量が 5.5~20 mm の場合を 20, 20.5~40 mm の場合を 40, 40.5~60 mm の場合を 60, 60.5~80 mm の場合を 80, 80.5~100 mm の場合を 100, 100.5 mm 以上の場合を 120 とする.

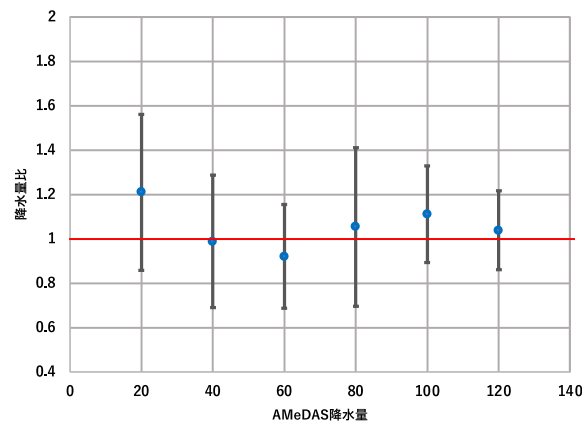


図 6.1. 島根県における AMeDAS 降水量と比率の関係

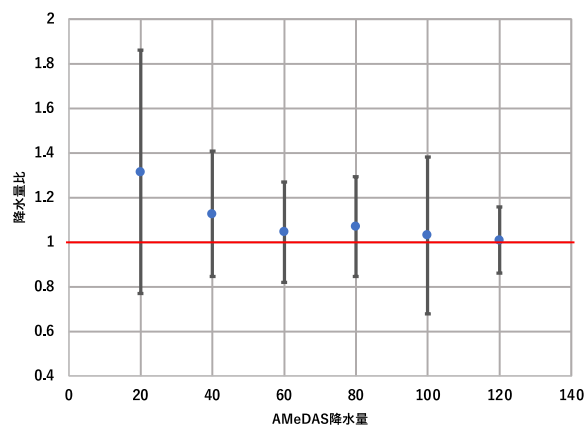


図 6.2. 広島県における AMeDAS 降水量と比率の関係

図 6.1, 図 6.2 より, 平均値に関して広島県では全ての降水量範囲において MP レーダによる観測が AMeDAS に比べ, 過大評価する傾向が見られた. 特に 5.5mm~20mm の範囲では他の降水量範囲に比べ大きく過大評価していることがわかる.

標準偏差に関して, 5.5mm~20mm の範囲でばらつきは広島県が島根県に比べ, 2 倍の値を示した.

その他の降水量範囲に関しては平均値と標準偏差がともに島根県と広島県で大きな差は確認できず、降水量観測において C バンド MP レーダと X バンド MP レーダで観測精度の差が小さいことがわかる。

広島県において 5.5mm～20mm の範囲で平均値、標準偏差とともに島根県より大きい値を示している。MP レーダによる降水量、AMeDAS 降水量を比較したものを広島県、島根県についてそれぞれ図 6.3、図 6.4 に示す。

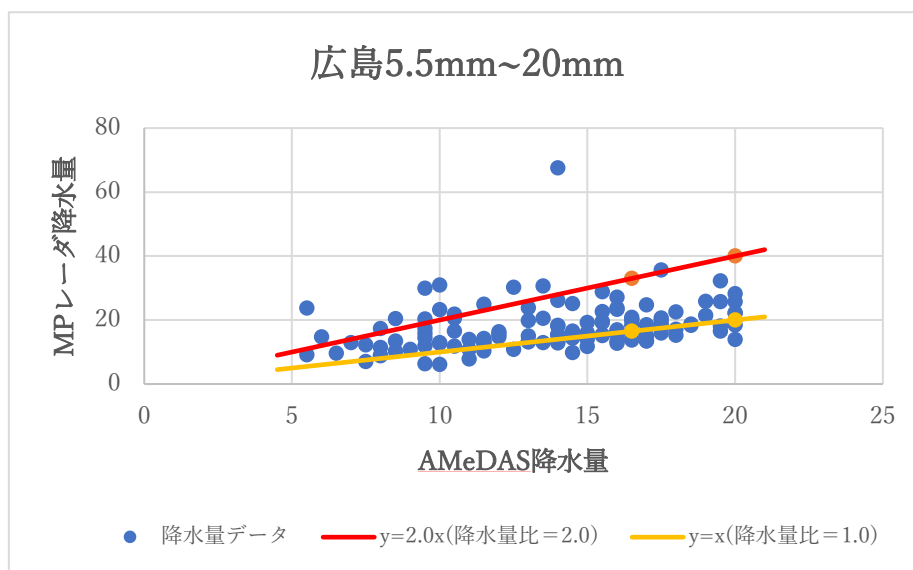


図 6.3. 広島県における MP レーダと AMeDAS 降水量の関係

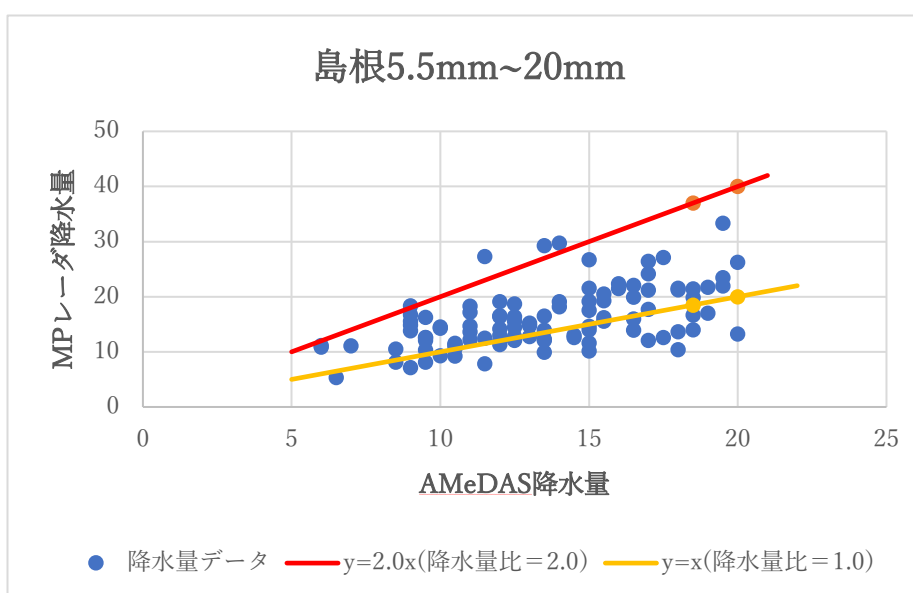


図 6.4. 島根県における MP レーダと AMeDAS 降水量の関係

図 6.3, 図 6.4 より広島県の方が島根県に比べ、降水量比が 2 倍以上の過大評価しているケースが多く存在したが、降水量データの比較結果から両県ともに観測降水量に顕著な傾向は確認できなかった。

7. まとめ

比較結果から、広島県を観測している X バンド MP レーダでは全ての観測範囲で過大評価する傾向にあることが確認できた。

5.5mm~20mm の範囲で広島県が島根県に比べ、平均値と標準偏差で大きな値を示した結果から降水量データで比較を行い、広島県の方が 2 倍以上の過大評価するデータが多く確認できたが、両県とも目立った傾向は見られず、全ての降水量範囲で X バンド MP レーダの観測範囲である広島県と C バンド MP レーダの観測範囲である島根県に大きな差はないことが確認できた。

今後は、AMeDAS の各観測地点の観測降水量と MP レーダの観測降水量を対象に、過大評価や過小評価しているか比較を行うことや広島県の 5.5mm~20mm の範囲で 3 倍以上の過大評価を示した原因に関して調査をすることが必要である。

8. 謝辞

本研究に使用した気象庁数値予報 GPV データは京都大学生存圏研究所から提供を受けました。

ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

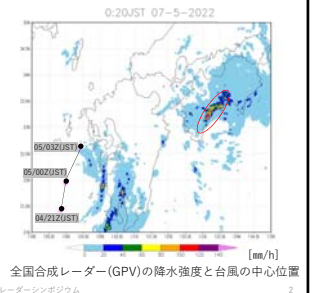
- [1] 深尾昌一郎, 浜津享助, “気象と大気のレーダーリモートセンシング,” 京都大学学術出版, pp.42-46, 2005
- [2] 岡本健一編著, “地球環境計測,” オーム社, pp.176-182, 1999
- [3] 気象庁予報部, “高解像度降水ナウキャストの改良について,” 配信資料に関する技術情報第 507 号, 2019
- [4] 気象庁観測部, “1km メッシュ全国合成レーダ GPV の提供等について,” 配信に関する技術情報気象編第 162 号, pp.1-10, 2004
- [5] 長野勝博, “レーダによる降雨予測,” 新砂防, Vol.43 No.1(168), pp.43-44, 1990
- [6] 気象庁の気象レーダについて
(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>)
- [7] マルチパラメーターレーダの概要
(<http://mp-radar.bosai.go.jp/mpradar.html>)
- [8] AMeDAS の仕組み
(<https://tenki.jp/docs/note/amedas/page-1.html>)
- [9] Ishizaki and Matsuyama, “SOLA”, 2018

2022年7月5日に高知県で発生した 線状降水帯のXバンド二重偏波レーダー RHI観測による鉛直構造解析

*中陽（高知大院）・村田文絵（高知大理工）・
佐々浩司（高知大理工）・藤井虎太郎（高知大院）

本事例の概要

- 2022年7月4日22時ごろ～5日2時ごろまで
高知県中西部で線状降水帯が発生
- 台風4号が九州の西部海上に存在
- 窪川で日雨量375.0 mm(観測史上7位)、
1時間降水量 91.0 mm(観測史上1位)
→土砂崩れや浸水等の被害が生じた

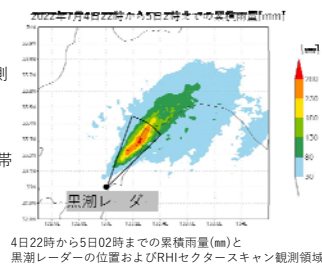


研究概要

- 線状降水帯発生時に、Xバンド二重偏波
レーダーによるRHIセクタースキャン観測
を実施 (Range Height Indicator)

研究目的

- RHI観測データの解析を行い、線状降水帯
の鉛直構造の特徴を調査する
 - RHI観測結果
 - 降水粒子判別結果



レーダーおよびRHIセクタースキャン観測について

- 黒潮レーダー：FURUNO社製のXバンド二重偏波レーダー(WR2120)
 - 設置位置：北緯 33.027°、東経133.008°
 - 送信周波数：9.4 GHz
 - 動径方向の分解能：150m
- RHIセクタースキャン観測
 - 方位角20°～50°の範囲を3°ずつRHI観測
 - 仰角：各方位角で0°～90°
 - 約40秒で観測領域を走査
 - 解析対象期間：2022年7月4日23時～5日03時

解析手法

- RHI観測データに降雨減衰補正を実施 (Maesaka et al. 2011)
 - K_{DP} (偏波間位相変化率) と仰角より
 Z_H (水平偏波の反射強度)、 Z_{DR} (反射強度差) を補正
- ①のデータを用いて降水粒子判別を実施 (Kouketsu et al. 2015)

降雨減衰補正について

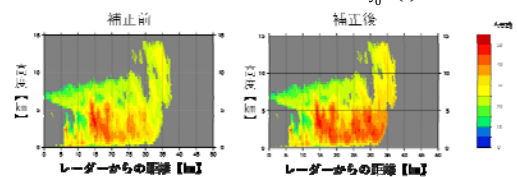
- 減衰量を算出し補正 (Maesaka et al. 2011)

- 各グリッドでの減衰量(A_H , A_{DR})の推定
- 各グリッドまでの減衰量(PIA)の積算

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.2925 + 7 \cdot 10^{-4} e^I + 1 \cdot 10^{-3} e^{I^2} + 3 \cdot 10^{-4} e^{I^3} \\ a_2 &= 0.0298 + 5 \cdot 10^{-4} e^I + 2 \cdot 10^{-4} e^{I^2} + 3 \cdot 10^{-4} e^{I^3} \\ b_1 &= 1.1009 - 3 \cdot 10^{-3} e^I - 4 \cdot 10^{-4} e^{I^2} \\ b_2 &= 1.293 \end{aligned}$$

$$A_{H(DR)} = a_{1(2)} K_{DP}^{b_{1(2)}}$$

$$PIA = \int_0^r A(r) dr$$



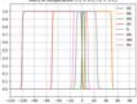
降水粒子判別手法について

降水粒子判別：Kouketsu et al.(2015)の手法を使用

- ファジー理論に基づき、観測データ (Z_H , Z_{DR} , K_{DP} , ρ_{HV}) と気温の推定値を 0～1 へ数値化

$$\beta(x, a, b, m) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-m}{a} \right)^{2b}}$$

a : インプット変数
 m : $\beta=0.5$ となる x の値
 b : $\beta=1$ となる x の値
 b : 関数の急峻さに関するパラメータ



→算出値を集約し、各粒子の評価値を算出(8つのカテゴリ)

- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| 1. 霧雨 (DZ : Drizzle) | 5. 氷晶 (IC : Ice crystal) |
| 2. 雨 (RN : Rain) | 6. 乾いた霰 (DG : Dry Graupel) |
| 3. 湿った雪 (WS : Wet Snow) | 7. 湿った霰 (WG : Wet Graupel) |
| 4. 乾いた雪 (DS : Dry Snow) | 8. 判別なし (NC : Not Classified) |

→評価値が一番大きいカテゴリに判別する (10^{-10} より小さい → 判別なし)

第16回MUレーダー・赤道大気レーダー観測システム

7

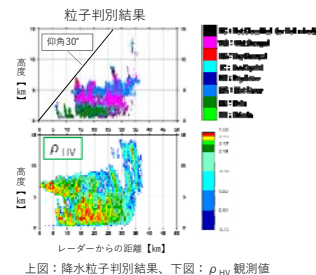
先行研究に基づく降水粒子判別の結果

- 判別が不鮮明で非現実的
 - 融解層が2～3kmと低い (潮岬では0°C層高度は約5km)
 - 地表付近でWGの判別
 - 全体的にノイズがっている

- Kouketsu et al.(2015)の手法

…WS、Hail mixed を除き、
 ρ_{HV} の範囲は0.96以上

→ ρ_{HV} の値が低いことが原因か

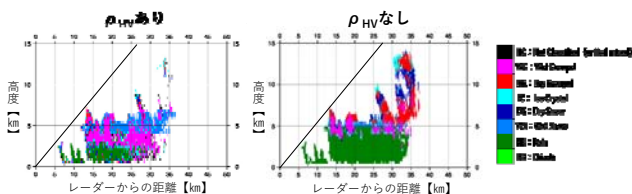


上図：降水粒子判別結果、下図： ρ_{HV} 観測値

第16回MUレーダー・赤道大気レーダー観測システム

8

ρ_{HV} を使用しない降水粒子判別の結果



- 全体的に現実的な結果となり、ノイズが減少する
- 融解層高度は、4-5km程度に変わる → 潮岬の高層観測結果に近づく

○今回は ρ_{HV} を使用せず降水粒子判別を行った

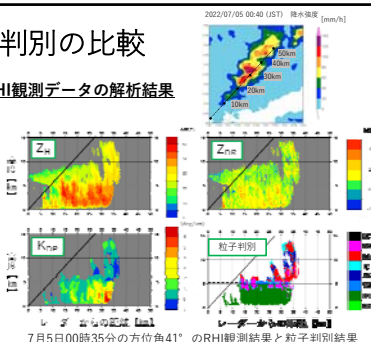
第16回MUレーダー・赤道大気レーダー観測システム

9

RHI観測と降水粒子判別の比較

7月5日00時35分、方位角41°のRHI観測データの解析結果

- 降水強度や K_{DP} の観測結果など
 - 30km付近に強雨が存在 (Z_H の値はやや低め)
- 粒子判別結果より、30km付近の上空にDGとWGが存在
 - 降水強度が高くなる傾向
- 上空にDGやWGが存在する場所
 - 降水強度が高くなる傾向
- Z_{DR} の値があり、 K_{DP} の値はない (水平距離20km付近の上空)領域
 - 調査中

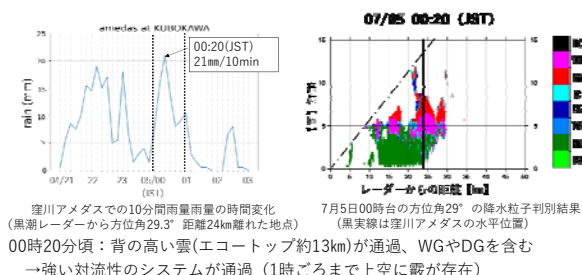


7月5日00時35分の方位角41°のRHI観測結果と粒子判別結果

第16回MUレーダー・赤道大気レーダー観測システム

10

窪川アメダス雨量と粒子判別結果の比較

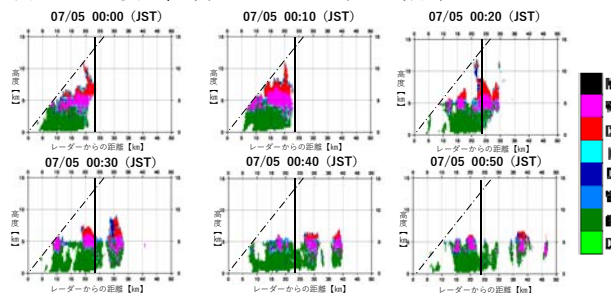


窪川アメダスでの10分間雨量雨量の時間変化 (黒潮レーダーから方位角29.3° 距離24km離れた地点)
 7月5日00時台の方位角29°の降水粒子判別結果 (黒実線は窪川アメダスの水平位置)
 00時20分頃：背の高い雲(エコートップ約13km)が通過、WGやDGを含む
 →強い対流性のシステムが通過 (1時ごろまで上空に霰が存在)

第16回MUレーダー・赤道大気レーダー観測システム

11

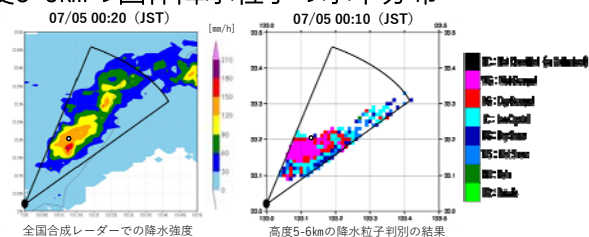
7月5日0時台、仰角29°の判別結果



第16回MUレーダー・赤道大気レーダー観測システム

12

高度5-6kmの固体降水粒子の水平分布

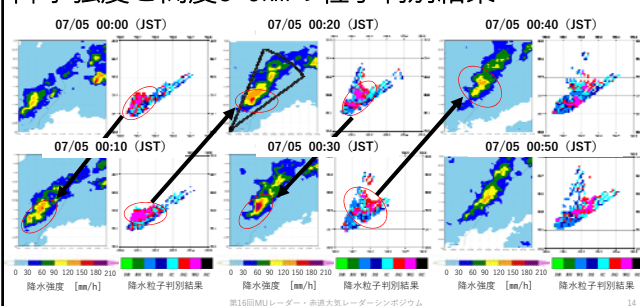


降水強度が約60 mm/h 以上の領域や、窪川アメダス上空
 → 高度5~6kmにWGやDGなどの霰が存在（地上の強雨に10分ほど先行する）

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

13

降水強度と高度5-6kmの粒子判別結果



14

まとめ

本研究では、2022年7月5日未明に高知県で発生した線状降水帯のRHIセクタースキャン観測データの解析および降水粒子判別を行った。

- ・降水粒子判別…Kouketsu et al.(2015)の手法を使用
 →結果は非現実的に (ρ_{HV} 観測値の低さが原因)
 → ρ_{HV} を使用せず判別を実施 … 現実的な結果が得られた
- ・地上で強雨となった時間→融解層直上に霰 (DG, WG) が判別された
 …地上の降水に10分程度先行する

今後の課題

- ・降水粒子判別の妥当性の検討 (ρ_{HV} 観測値の使用法、 K_{DP} 欠損域の確認)
- ・強雨をもたらす気流場の解明 (室戸レーダーとのデュアルドップラー解析)

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

15

ふた山形状の雨滴粒径分布の観測事例解析

岡崎恵(京大理)・竹見哲也(京大防災研)・
阿波田康裕(JAXA)・大石哲(神大都市安)

層状性降水雲中の固体降水粒子観測計画

重 尚一
(京都大学大学院理学研究科)

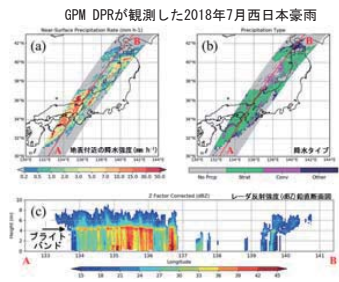
研究目的:

様々な鉛直構造をもった層状性降水が発生する日本の地の利を生かし、日本が誇る衛星搭載降水レーダーならびに地上設置レーダーそれぞれの観測特性を有機的に組み合わせ、大気の鉛直流を基軸に層状性降水過程(=弱い上昇流の下での固体降水粒子の成長)を解明する。



なぜ層状性降水か? 日本域で近年多発している広域豪雨

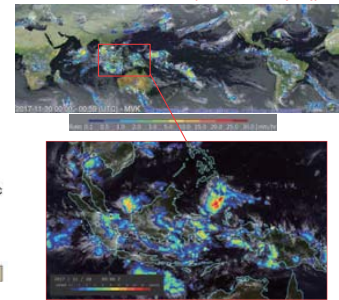
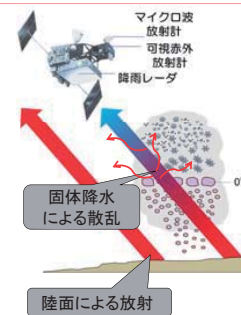
- 「弱い降水強度=層状性降水」という固定観念が支配的で、対流性降水に対して二次的に位置づけられてきた。
➢ 科学研究費助成事業データベース:
「積乱雲」や「対流性」という語を含む採択研究課題を検索して29件見つけられるのに対し「豪雨」で検索すればもっと増える。「乱層雲」や「層状性」という語では採択研究課題は3件(約10分の1)しか見つけられない。
- 「2018年7月西日本豪雨」のように、近年日本域で多発している広域豪雨の総雨量に強い降水強度の層状性降水が大きく貢献している(Yokoyama et al. 2020; Tsuji et al. 2020)。
➢ GPM DPRが観測した2018年7月西日本豪雨:
ブライトバンドを持つ層状性降水が、10 mm h⁻¹以上の強い雨をもたらしており、「強い降水強度=対流性降水 vs. 弱い降水強度=層状性降水」という二項対立的な枠組みでは捉えきれないことを示している。



Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP)

<http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>

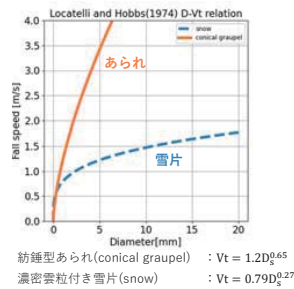
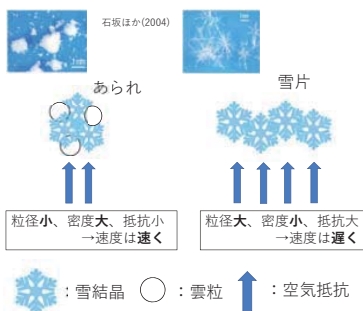
陸上でのマイクロ波放射計の降水推定原理



GSMaP hourly rain with Himawari-8 cloud (20-30 Nov 2017)

あられと雪片の終端落下速度の違い

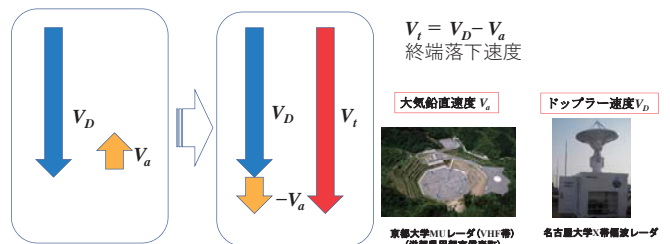
篠原他 (2022)



固体降水粒子の終端落下速度の推定

篠原他 (2022) から大幅改訂

Xバンドレーダーから求められる個体降水粒子ドップラー速度: V_D
MUから求められる大気鉛直速度: V_a



沖縄梅雨期集中降雨観測実験 (2004年5月22日-6月9日)時の主要観測機器

岡本先生CREST-GSMP最終報告
(2007年10月23日)
パワーポイントに添記



10minサイクル
15仰角のボリュームスキャン
+2 or 4方位角のRHIスキャン(大宜味・恩納上空他)



マイクロ波レーダー



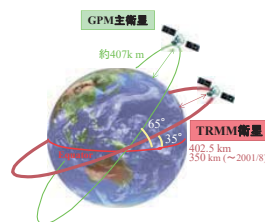
時間分解能:164s(水平・鉛直風)
高度分解能:100m(1.3μs)



時間分解能:1/3s→60sec平均値
高度分解能:50m 鉛直上向き連続観測

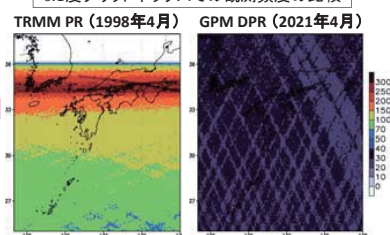
合計109個のGPSソナデを飛揚して環境場の気温、湿度、風の鉛直プロファイルのデータを取得した。ソナデ観測は6時間間隔の定常観測に加えて、降雨イベント時やTRMMとAqua衛星の上空飛来時に行った。

TRMM PR(軌道傾斜角35度) vs. GPM DPR(軌道傾斜角65度)



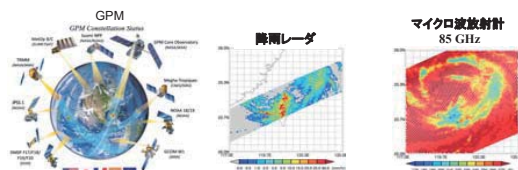
2014年4月～2020年10月にかけて、GPM DPRがMUレーダーの上空を通過する回数の平均は8.06回/月(最小6回/月、最大10回/月)
(戸田望君@京大理4回生調べ)

0.1度グリッドボックスでの観測頻度の比較



広瀬正史さん(名城大)作成データベースより
<https://www.rain-clim.com/gallery.html>

希望するMU割り込み観測



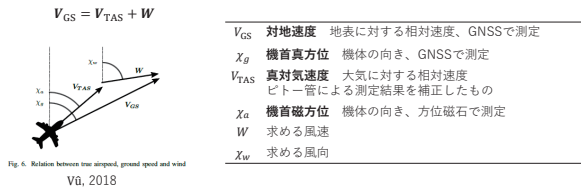
- ・ 顕著な降雨イベント時
- ・ GPM主衛星, GCOM-W衛星, (+EarthCARE衛星)の上空飛来時

まとめ

- ・ 層状性降水の重要性
 - 2018年7月西日本豪雨, 2010年パキスタン洪水, 2013年米コロラド州洪水
- ・ 層状性降水過程観測の困難さ
 - 弱い上昇流($\sim 1-10 \text{ cm s}^{-1}$), 固体降水粒子の弱い散乱シグナルと多様性
- ・ 終端落下速度の違いを利用したあられと雪片の判別
 - 終端落下速度導出における大気鉛直速度の重要性
- ・ 希望するMU割り込み観測
 - 顕著な降雨イベント時 + GPM主衛星, GCOM-W衛星等の上空飛来時
- ・ TRMM PR/GPM DPRとMU同時観測データの利用
 - 2008/2009年MU観測キャンペーンなど
- ・ 間もなく始まる雲・降水の衛星ドップラー観測時代
 - ・ EarthCARE W帯雲ドップラーレーダー, AOS-I Ku 帯降水ドップラーレーダー

風向・風速の計算方法

航空機の姿勢と速度から推定



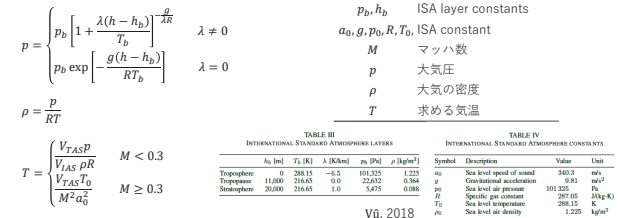
2022年9月5日

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

7

気温の計算方法

International Standard Atmosphere (ISA) を用いて推定



2022年9月5日

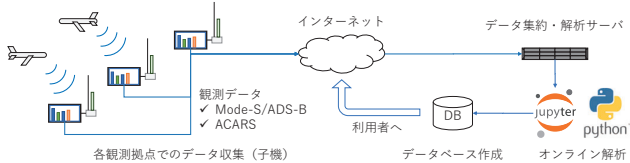
第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

8

開発中のSSRモードS/ADS-B気象観測システム

観測・データ集約・オンライン解析・データ公開までを統合

- 子機はJAMSTEC、信楽MU観測所、インドネシアの各空港（予定）等
- データ集約・解析装置は極地研に設置

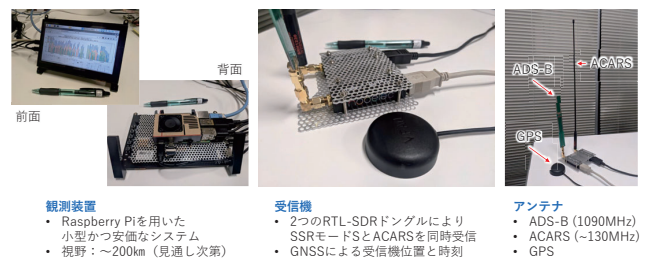


2022年9月5日

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

9

観測装置（子機）の外観



2022年9月5日

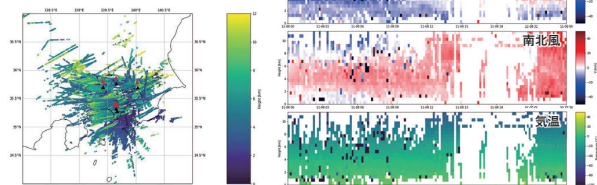
第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

10

観測データ例

2021/11/8 0000-2400 UTC

- 東京周辺5地点に観測装置を設置
- 夜間は航空機が少ないため苦手

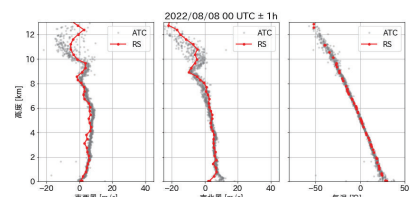


11

ラジオゾンデとの比較例（1）

JAMSTEC屋上の観測装置と定常ラジオゾンデ観測（館野）

- 90km離れた地点のためか、風速の一致度はそれほど良くない

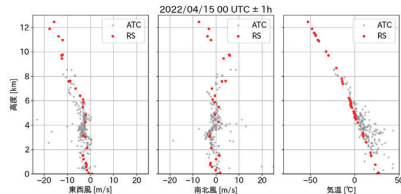


12

ラジオゾンデとの比較例（２）

ジャカルタでの予備実験：現地定常ラジオゾンデとの比較

- 空港とラジオゾンデ観測点が併設されており、1対1比較が可能
- 現状は下記1日分の予備実験のみ。9月中に現地へ定常設置し、長期比較へ



2022年9月5日

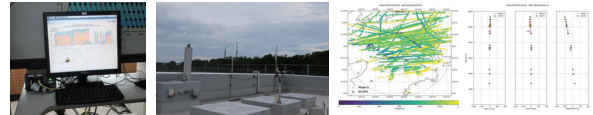
第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

13

MUレーダー共同利用の状況

2021年7月より観測所に装置を設置

- 関西にはSSRモードS質問局が無い
 - ✓ 関東の質問局を拾った高層・少数の航空機のみでの受信
- 質問局の無い地域での観測のために、質問信号発信機の開発を検討中
 - ✓ 小型のSDRと無指向性アンテナを用いた簡易システム等
 - ✓ 完成すればMUレーダーとの比較観測も容易に



2022年9月5日

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

14

まとめと今後の課題

SSRモードS/ADS-B航空気象観測システムの開発状況

- ✓ 観測装置の開発はおおむね完了
- ✓ 他測器との比較による精度評価検討を開始

ラジオゾンデ観測との比較

- ✓ JAMSTEC × 館野 を含め、国内では観測拠点が空港が遠いため難しい
- ✓ 空港とラジオゾンデ観測拠点が近いインドネシアでの観測に期待

今後の課題

- MUレーダーとの比較
 - 関西には質問信号地上局がなく、気象データの取得に難あり
 - 質問信号発信機の開発を検討中
- 長期観測による定量的な精度評価、気象データ逆算アルゴリズムの改良

2022年9月5日

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

15

波状雲撮影のための全天カメラの製作と初期観測

草野友輝 下舞豊志（島根大学）

1. 背景

地球の大気循環や気候変動，異常気象など大気重力波が影響を及ぼしている．大気重力波は地面に対して水平，鉛直方向に伝搬しており密度の低い上層の大気に影響を与える．しかし大気重力波の励起源については，依然として未解明なことも多く，観測的知見を深めることが求められている．

2. 目的

大気重力波の励起源について調べるために，大気重力波によって生成されていると考えられている波状雲に着目し，その形状をとらえることで大気重力波のパラメータを間接的に推定することを目指しており，本研究では先行研究で生じた問題点を改め，新たな全天カメラを製作し，初期観測を行った．

3. 原理

3.1 波状雲

大気重力波の一つである山岳波によって波状雲が生成される．気流が山にぶつかり強制的に持ち上げられ，重力による復元力を受け上下することにより，飽和水蒸気量が小さい高い高度で雲が発生している．その雲を観測することで大気重力波のパラメータを間接的に推定できる．なお，波状雲については，山岳波以外にもいくつか発生原因が考えられている．

3.2 投影図

全天カメラで撮影された波状雲は歪んだ形をしており，そのままではパラメータ推定が困難である．そこで本研究では，波状雲の発生高度を仮定して，撮影した全天画像を投影することにより，波のパラメータの推定を行う．

2台のカメラで高度推定をする際には，ある高度で仮定した投影図を2台のカメラ間の距離を考慮し重ね合わせ，波状雲がうまく重なり合った場合に，仮定した高度が正しいと考えて，高度推定を行う．

4. 全天カメラの製作

これまで本研究室では，防犯カメラと魚眼レンズを組み合わせで簡易全天カメラの製作を試みてきたが，すでにプログラムが内蔵していることから撮影間隔など細かい制御をす

ることが困難であった。そのため本研究では、細かい制御を可能にするため USB カメラと Raspberry Pi 3 を使用し全天カメラを製作した。

本研究で用いたカメラ(ELP-USB8MP02G-L180)を図 1 に示す。用いたカメラはカメラの画角が 180 度のモジュールを採用し、全天カメラの製作の簡略化を行った。



図 1 本研究で用いた USB カメラ

屋外で長期的な観測を目的としていることから、ネットワークと電源供給をケーブル 1 本にまとめる PoE 接続と防水ボックス、アクリルドームを用いて製作を行った。製作した全天カメラを図 2 に示し、システムの構成の概略図を図 3 に示す。



図 2 製作した全天カメラ

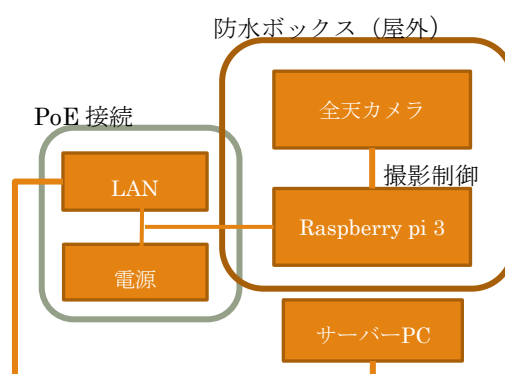


図 3 システム構成の概略図

5. 初期観測

製作した 2 台のカメラを島根大学総合理工学部 2 号館の屋上に設置して初期観測を行った。天頂角は水準器で合わせ、方位角は撮影時にコンパスを撮影し、方位角のずれは画像ソフトウェアを用いて回転させることにより修正した。設置したカメラを図 4 に示し、初期観測における観測条件と設定を表 1 に示す。

表 1 観測条件と設定



図 4 設置カメラ

解像度	800×600
撮影間隔	10 秒間
撮影期間	4~9 月 : 5~19 時 1~3,10~12 月 : 6~18 時
プログラム稼働時間	1 時間
撮影開始時間	毎時 00 分
制御ソフトウェア	OpenCV
画像 1 枚当たりのデータ量	約 450KB
保存日数(メモリ : 32GB))	約 10 日

6. 観測結果とパラメータ推定

2022 年 7 月 30 日のデータを用いて見かけの速度と波長の推定を行った。撮影した画像 (2022 年 7 月 30 日 5:33:15, 同日 5:36:15) をそれぞれ図 5, 6 に示す。

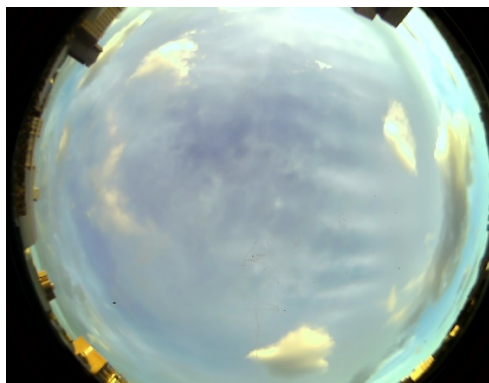


図 5 2022.07.30.05:33:15

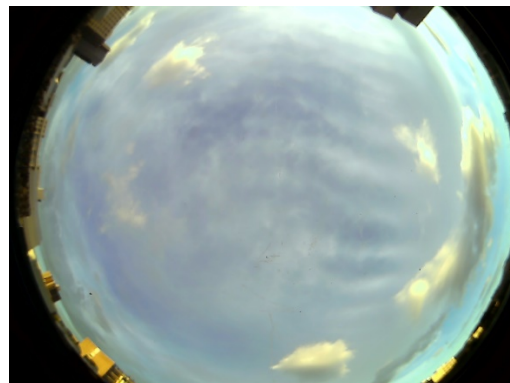


図 6 2022.07.30.05:36:15

また、高度を 2500m と仮定した投影図を図 7, 8 に示す。

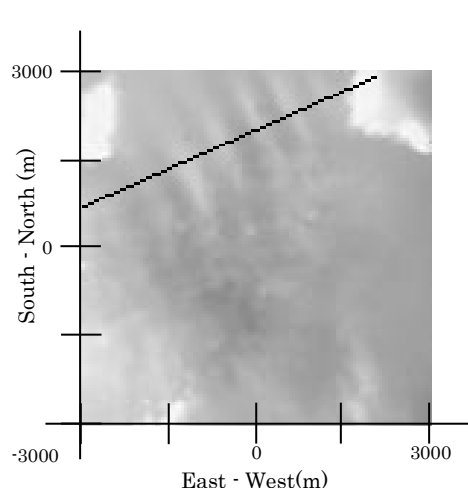


図 7 図 5 から高度を 2500 m と
仮定した場合の投影図

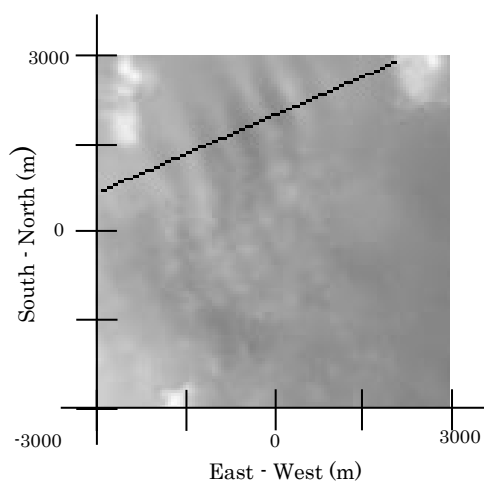


図 8 図 6 から高度を 2500 m と
仮定した場合の投影図

図 7, 8 の黒い線は波状雲の移動方向を示しており、黒い線の部分を輝度値グラフにしたものを図 9 に示す。

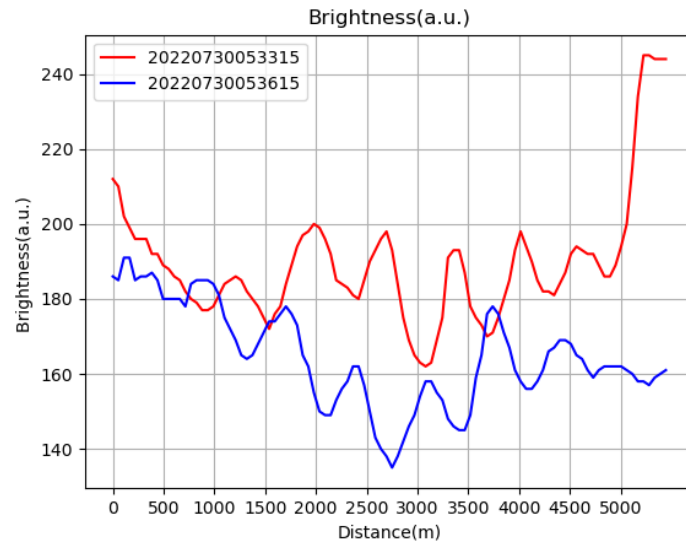


図 9 波状雲の輝度値グラフ

見かけの速度は 2 つのデータの同ピークの間隔から求めることができるため、データ間隔が 3 分で 300 m 移動していることがわかるため、見かけの速度は南東に 1.7 m/s で移動していると推定できる。

波長は、1 つのデータの隣り合うピーク間に値するため、ピーク間は約 600 m であることから波長は 600 m と推定できる。

7. まとめ

屋外に設置するために防水加工をした全天カメラの製作を行い、初期観測を行った。波状雲が撮影された 2022 年 7 月 30 日のデータを用いて見かけの速度と波長の推定を行い、実際の高度が 2500 m と仮定すると見かけの速度は南東に 1.7 m/s、波長は 600 m と推定することができた。

8. 今後の方針

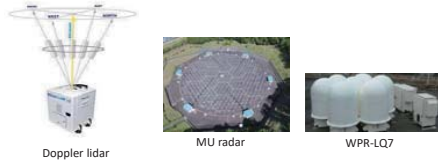
京都大学生存圏研究所 MU 観測所に、製作した 2 台の全天カメラを設置し、波状雲の高度推定を行う。また、不必要な全天画像を保存しないプログラムの作成を行い、保存可能期間やデータ収集の自動化を行う。3 台目の全天カメラを製作し、3 台のカメラを用いて高度の推定やパラメータ推定を行い推定の妥当性を高める。

TKE dissipation rates estimated from velocity spectra measured by Doppler lidar and radars in the Convective Boundary Layer

Hubert Luce, Masanori Yabuki, Hiroyuki Hashiguchi

Research Institute for Sustainable Humansphere, Kyoto University, Kyoto, Japan

Acknowledgment: The Doppler lidar data were provided by EKO Instrument Co. LTD



Doppler lidar

MU radar

WPR-LQ7

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

Outline:

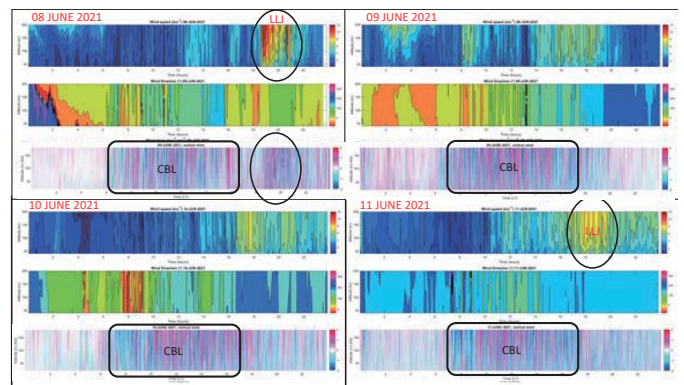
1. TKE dissipation rates ε from time Doppler Lidar data: application to a 4-day dataset (08-11 June 2021)
2. Attempt of application of the « Lidar method » to MU radar and LQ7 BLR in CBL
3. About new measurements at Shigaraki (Sep. 2022).

1. TKE dissipation rates ε from time Doppler Lidar data: application to a 4-day dataset (08-11 June 2021)

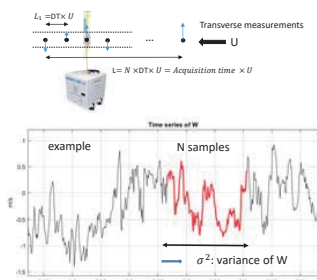
Lidar Specifications

Specifications	WindCube Lidar	VHF MU radar	UHF WPR
Wavelength	1.54 μm	6.45 m	1357.0
Range resolution (m)	20	150	100
Range (km)	0.04-0.20	1.2-23	0.6-10
Dwell Time DT (s)	4	~24	60
Beam directions	5	3 or 5 or more	3 or 5

Tests on data collected on 08-11 June 2021 (4 days) at Tokyo (during clear air conditions).



Processing method from Lidar data –used for CBL



Acquisition time: (DT=4 s) x N
N=64 → 256 s = 4 min 16 s

O'Connor et al. (2010)

$$\sigma^2 = \int_{k=2\pi/L}^{k_1=2\pi/L_1} S(k) dk$$

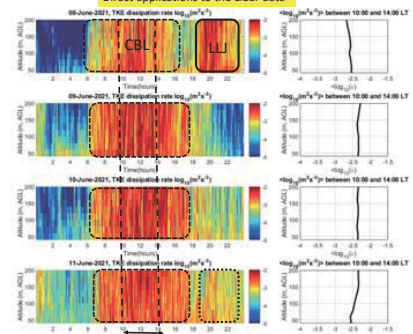
With (one dimensional transverse spectrum)
 $S(k) = a e^{2/3} k^{-5/3}, a = 4/3 \times 0.52$

We get:

$$\varepsilon = 2\pi \left(\frac{2}{3a} \right)^{3/2} \sigma^3 \left(L^{2/3} - L_1^{2/3} \right)^{-3/2}$$

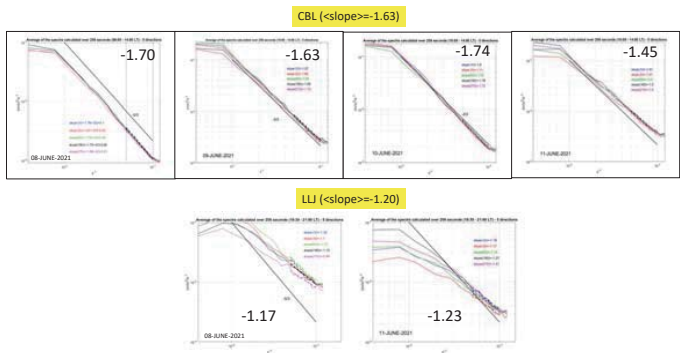
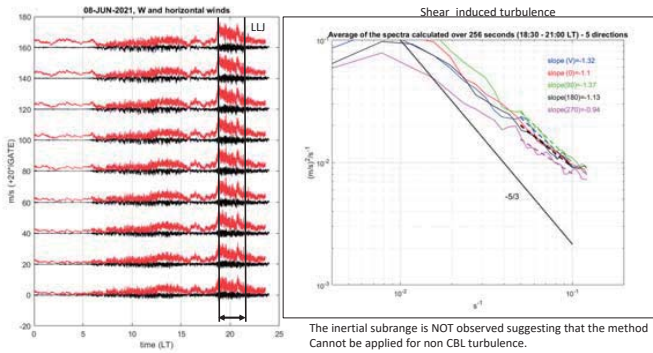
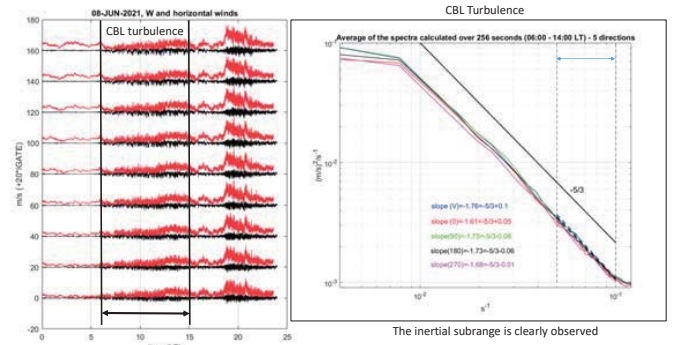
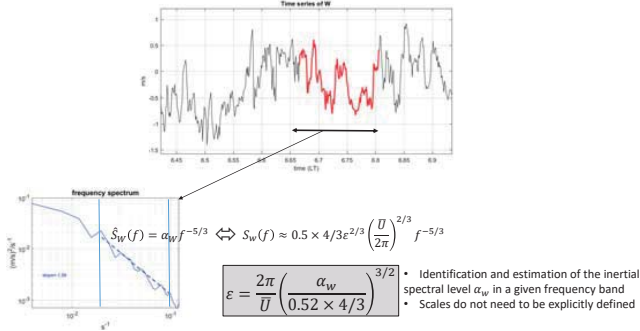
- Very simple if the hypotheses are verified
- No need to calculate spectra.

Direct applications to the Lidar data

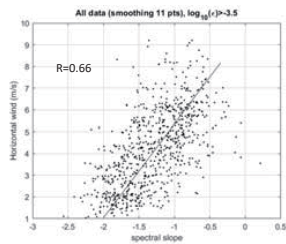


- ~Constant with height (40-200 m)

The spectral approach (\Rightarrow used for UAV time series)

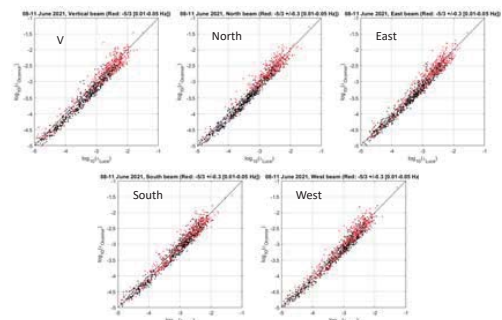


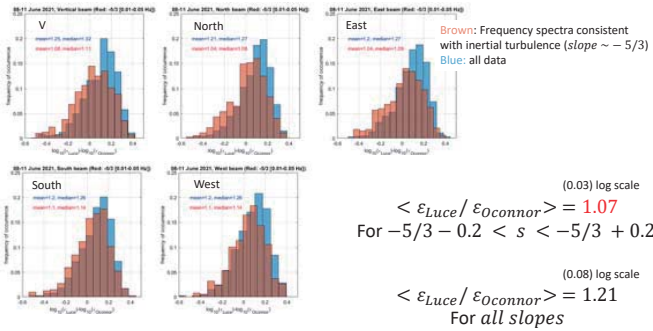
Spectral slope vs horizontal wind...



The scatter plot suggests a linear relationship between the horizontal wind and the spectral slope of the frequency spectra in a constant frequency band. This surprising result must be interpreted in light of additional statistics and may be due different extents of the inertial subrange according to the turbulence sources (convection or shear).

Comparisons between results obtained from O'Connor et. al. and spectral methods





Validation of the interpretation of the frequency spectra in CBL

A general kinematic spectral model for horizontally homogeneous vertical velocity field in the mixed layer of the CBL (Kristensen et al., 1989):

$$S(f) = \frac{l_w}{U} \frac{1 + \frac{8}{3} \left(\frac{l_w 2\pi f}{U a(\mu)} \right)^{2\mu}}{\left(1 + \left(\frac{l_w 2\pi f}{U a(\mu)} \right)^{2\mu} \right)^{\frac{5}{6\mu} + 1}}$$

« Along-wind (transverse) integral scale »:

$$l_w = \sigma^3 / (a(\mu)^{-5/2} (\pi \alpha / 2)^{3/2} \varepsilon)$$

$$a(\mu) = \pi \frac{\mu! \left(\frac{5}{6\mu} \right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2\mu}\right) \Gamma\left(\frac{1}{3\mu}\right)}$$

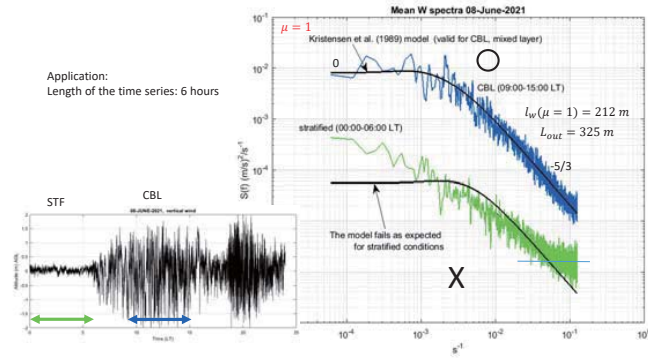
$$0.5 \leq \mu \leq 1$$

μ governs the curvature of the spectrum across the transition from 0 to -5/3

$$(a(\mu)^{-5/2} (\pi \alpha / 2)^{3/2}) l_w \triangleq L_{out}$$

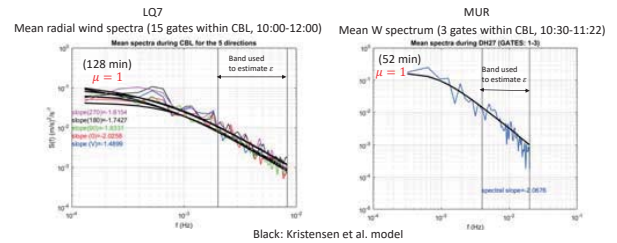
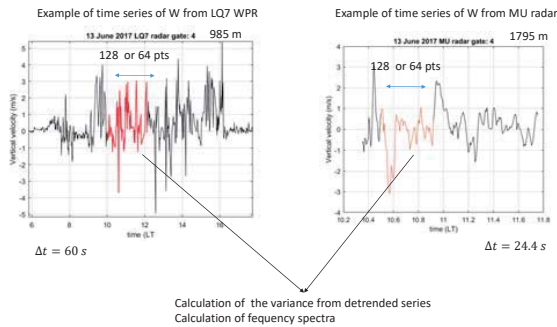
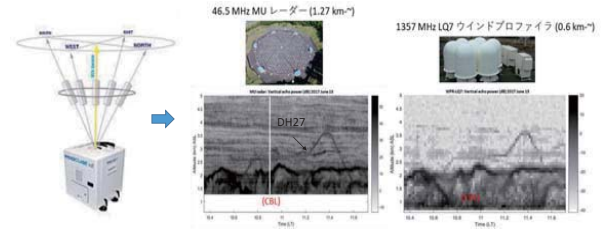
$$\varepsilon = \sigma^3 / L_{out}$$

Application:
Length of the time series: 6 hours

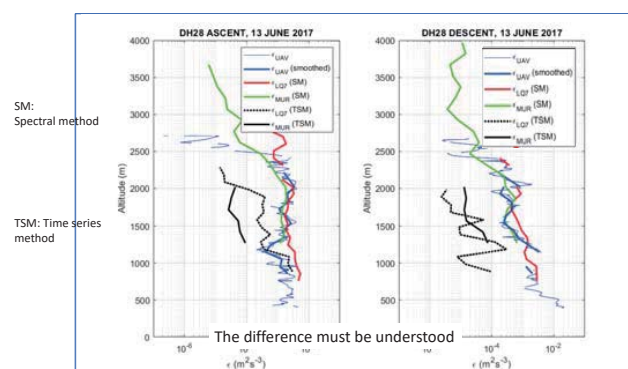
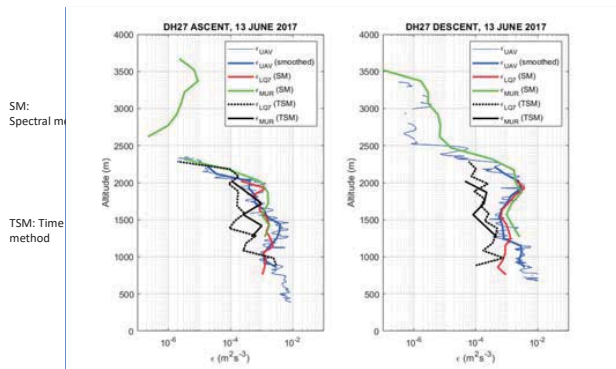


2. Attempt of application of the « Lidar method » to CBL measurements from MU radar and LQ7 wind profiler

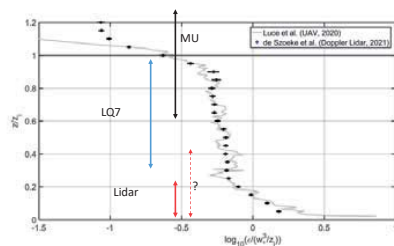
In principle, not applicable to standard ST radar measurements in the free atmosphere (contamination by gravity waves!)




The frequency spectra are quite consistent with the theoretical model



Future plans:
Simultaneous comparisons between Doppler lidar, LQ7 and MUR to better understand the cause of these disagreements. (Some tests will be made from observations planned in September 2022).





第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
第474回生存圏シンポジウム
2022/09/05 16:30-16:50

IUGONETプロジェクトの活動と最新の成果について

新堀淳樹(名古屋大学宇宙地球環境研究所)・田中良昌(極地研究所)・阿部修司(九州大学i-SPES)・今城峻(京都大学WDC)・上野悟(京都大学天文台)・能勢正仁(名古屋大学宇宙地球環境研究所)



1. はじめに


1.1 IUGONETプロジェクト

超高層大気長期変動の地球上ネットワーク観測・研究「IUGONET」の目的

日本の大学・研究機関によって管理されている超高層大気観測データを一元的に取り扱うデータ解析システムの開発

- 太陽地球系物理学分野のサイエンスの推進
- 国際貢献・人材育成
- データサイエンス分野との連携、新しい領域研究の推進

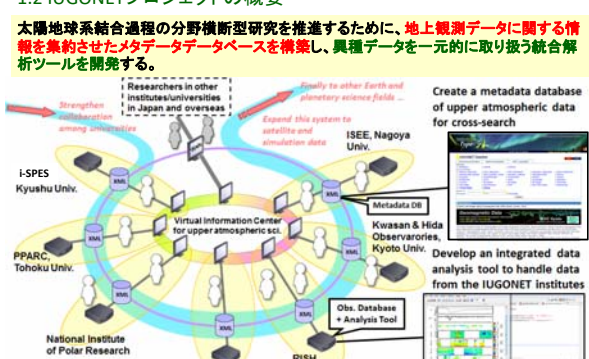





1. はじめに

1.2 IUGONETプロジェクトの概要

太陽地球系結合過程の分野横断型研究を推進するために、地上観測データに関する情報を集約させたメタデータデータベースを構築し、異種データを一元的に取り扱う統合解析ツールを開発する。

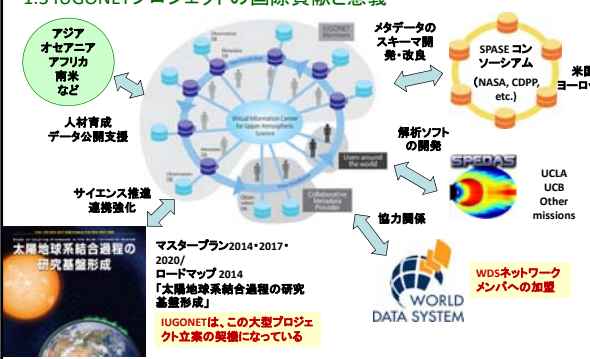


[Hayashi+, 2013]




1. はじめに

1.3 IUGONETプロジェクトの国際貢献と意義



アジア・オセアニア・アフリカ・南米など
人財育成・データ公開支援
サイエンス推進・連携強化
メタデータのスキーマ開発・改良
SPASE Consortium (NASA, CDDP, etc.)
SPEDAS
UCLA, UCB, Other missions
WDCネットワークメンバーの加盟
WORLD DATA SYSTEM


マスタープラン2014・2017・2020/
ロードマップ2014
「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」
IUGONETは、この大型プロジェクト立案の契機になっている



2. IUGONETデータ解析システム

データ検索webサービス

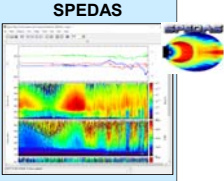
見たいデータを開く
データについて知る
データを可視化する
データ解析方法を学ぶ




<http://search.iugonet.org>

統合解析ツール

データ解析を行う
論文用の図を作成する

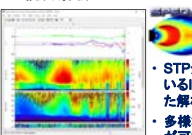


- メタデータデータベースには、様々な装置から取得された太陽～地球大気、惑星にわたる多種多様なデータセットが1200以上登録されている。
- メタデータは、STP分野の国際標準フォーマットであるSPASEメタデータを拡張して記述している。
- 多様な衛星・地上観測ミッションで取得されたデータを、1つの統合解析ツールで包括的に解析することが可能である。




3. 統合データ解析ツール

1. 統合解析ツール: SPEDAS/UDAS




- STP分野で普及しているIDLをベースにした解析ツール。
- 多様なデータの解析が可能。
- 有償ソフトウェア。

2. MATLAB解析ツール: M-UDAS




- 特に、ヨーロッパやアフリカ等で広く利用。
- 有償ソフトウェア。

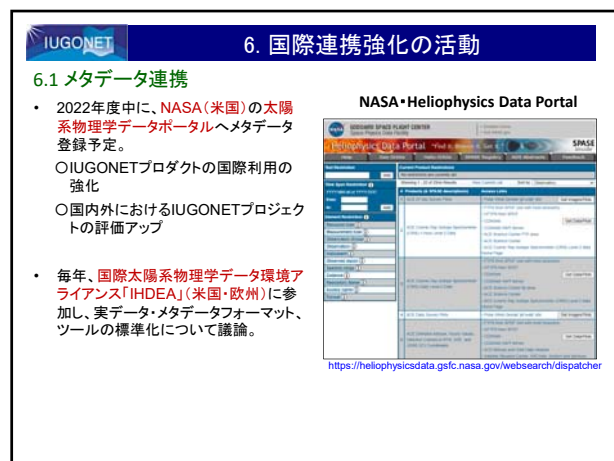
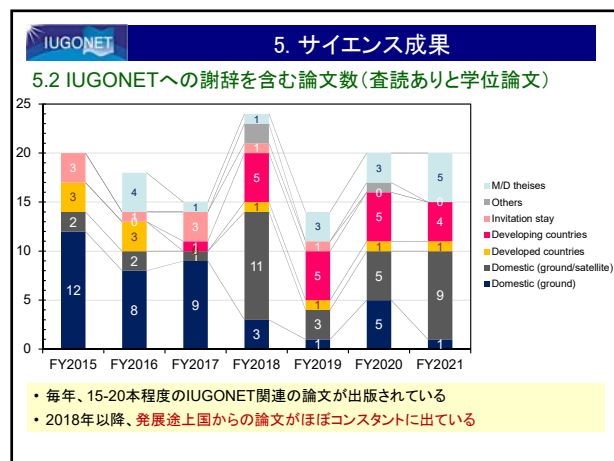
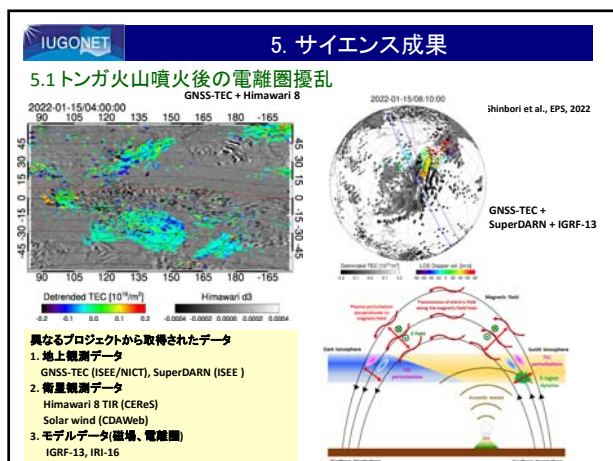
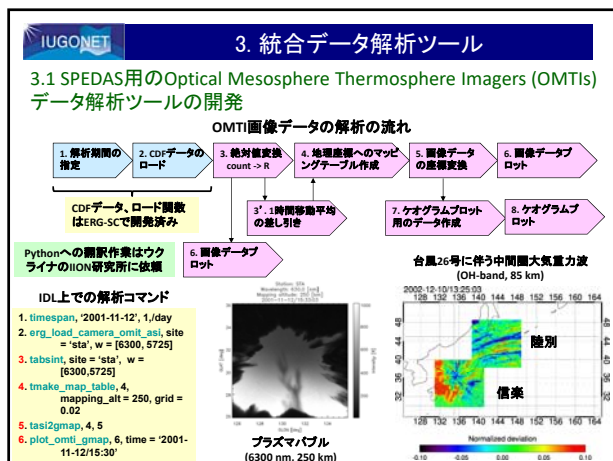
3. Python解析ツール: pyudas



Under development
FY2022～
フリーウェア
データサイエンスへの応用に対応
学生アルバイトによるロード関数の開発



太陽
地球大気
宇宙プラズマ
IUGONET観測点



6. 国際連携強化の活動

6.1 メタデータ連携

- SPASEコンソーシアム(米国・欧州)と、定期的にオンライン会議を開催。
- IUGONETの拡張メタデータを本家SPASEに取り込む方向で検討中。

→SPASE2.5.0からIUGONETの拡張メタデータが取り込まれることが決定した。

← SPASE2.5.0

6.2 World Data Systemへの参加

現在、IUGONET自身がWDSのネットワークメンバーへの登録申請を目指している。2022年度中に登録予定。

IUGONET参加機関の京大生存圏研究所と京大地球磁気センターは、既にWDSの正規メンバー。

7. 今後の活動スケジュール

	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023	FY2024	FY2025	FY2026
太陽地球系物理学のサイエンスの推進	UDAS v2.00公開	UDAS v2.00公開	UDAS v2.00公開	UDAS v2.00公開	UDAS v2.00公開	UDAS v2.00公開	UDAS v2.00公開
データ公開支援							
国際貢献人材育成							
他のSTPプロジェクトの動向							

8. まとめと今後の方策

- 2009年度のプロジェクト開始以降、日本の大学・研究機関が所有する多様な超高層大気データの公開を支援。
- 超高層大気研究の研究基盤(メタデータデータベース、解析ツール)を開発・公開。
- 1200以上のデータセットのメタデータを作成し、メタデータデータベース(IUGONET Type-A)に登録。
- 統合解析ツール(SPEDAS、M-UDAS)を開発・公開済み。
- pythonベースの解析ツール開発を学生アルバイトとして実施中。
- IUGONETデータベース「Type-A」論文のプレスリリースを行った。
- 毎年2〜3回の解析講習会を国内外で開催し、若手研究者育成に貢献。
- 米国、欧州の機関とメタデータ・解析ツール連携を強化。

今後の方策:

- 2022年度中にpythonベースの解析ツール(pyudas)を開発し、データサイエンスへの応用を推進。
- NASAの太陽系物理学データポータルへメタデータを登録予定。
- 2022年度中に、WDSネットワークメンバーへ加盟予定。
- 講習会を通じ、特に東南アジア・アフリカ・南米・オセアニアの研究者との連携を強化。

9. 研究集会のお知らせ

MTI/データ解析手法・ツール/現象報告会/衛星大気観測合同研究集会

【日程】2022年 9月 27日(火) - 30日(金)

【開催方式】ハイブリッド(27-29日)、オンライン(30日)

現地:名古屋大学、オンライン:zoom

【締切】旅費を希望される方:9月9日(金)

旅費を希望されない方:9月16日(金)


参加申し込みは以下のウェブサイトからお願い致します。

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScFj9R8s3ZFENjbVez8MOTqjQqWeeX-G7RH73bGV9j_5raggw/viewform

■「太陽地球系物理学分野のデータ解析手法、ツールの理解と応用」

本研究集会は、データ解析にフォーカスし、有用な解析手法の情報共有や、各々の研究において抱えている解析課題の解決を通じて、それぞれの研究活動を加速させることを目的とする。特に、学生の皆さんには、研究成果の発表だけでなく、その場で解決したい課題の相談や、今後新たに取り組みたい研究テーマの紹介などの話題提供も歓迎する。これらの話題については、オンラインのポスター発表を計画しており、関連のある研究者に入室・サポートしていただけるよう調整する。また、Python解析ツールであるPySPEDASを利用した解析講習会も予定している。

31




インドネシアにおける煙霧の ライダー観測計画

柴田泰邦、阿保 真

東京都立大学


第16回MULライダー・赤道大気ライダーシンポジウム
2022.9.5-6



研究背景と目的

背景：

- 近年インドネシアで野焼きによる森林火災から煙霧が多く発生している
- 熱帯特有の雲の多さによって衛星観測による**常時観測**に至っていない



Fire Report for Indonesia
During this time period, there were **87,960** alerts

DISTRIBUTION OF FIRE ALERTS: 10 Sep 2019 - 17 Sep 2019

GREATEST NUMBER OF FIRE ALERTS BY PROVINCE: 10 Sep 2019 - 17 Sep 2019
Source: <https://www.wmf.or.jp/activities/activity/4103.html>

目的：

- 煙霧測定に特化した**偏光ライダーシステム**を開発
- Kototabang上空における煙霧の高度分布を計測



Bukittinggiでの煙霧




通常時 (Bukittinggi)

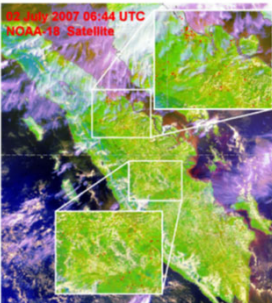


煙霧時 (Bukittinggi)
2019年9月24日

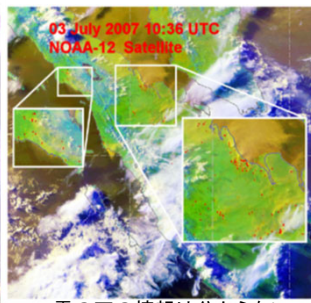
9/24: 数百m先が煙っていた。
9/25: 雨で煙はおおむね洗い流された。
9/26: 雨
9/27: 視界が悪くなってきた。
9/28: 数百m先が煙っていた。



NOAAによるホットスポット検出



03 July 2007 06:44 UTC
NOAA-18 Satellite

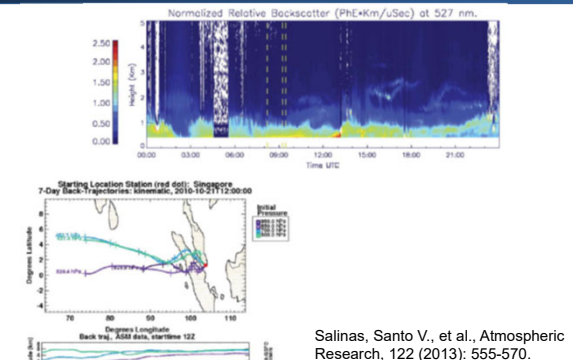


03 July 2007 10:36 UTC
NOAA-12 Satellite

雲の下の情報はいらない

煙霧観測に特化した**ライダーシステム**を提案

2010/10/21 Singapore

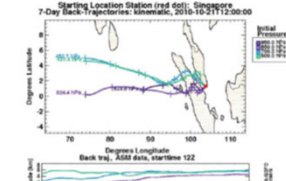


Normalized Relative Backscatter (P₀E*km/uSec) at 527 nm.

Starting Location Station (red dot): Singapore

7-Day Back-Trajectories (km/min): 2010-10-21 12:00:00

Salinas, Santo V., et al., Atmospheric Research, 122 (2013): 555-570.



Map showing the location of Singapore and the back-trajectories of the smoke plume.

2013/07/24-25, 2014/03/03-04 Penang Island, Malaysia

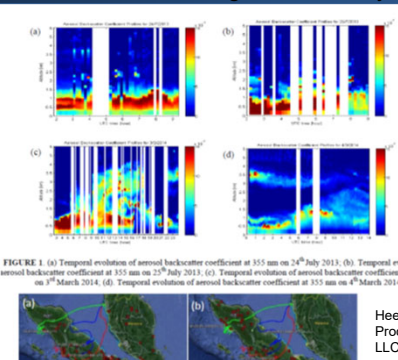
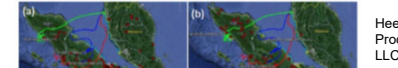
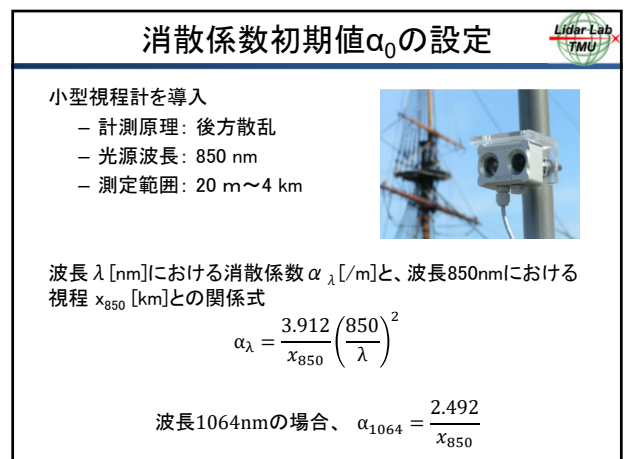
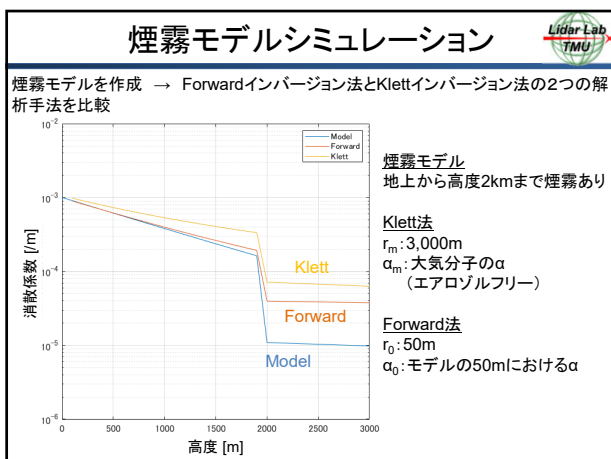
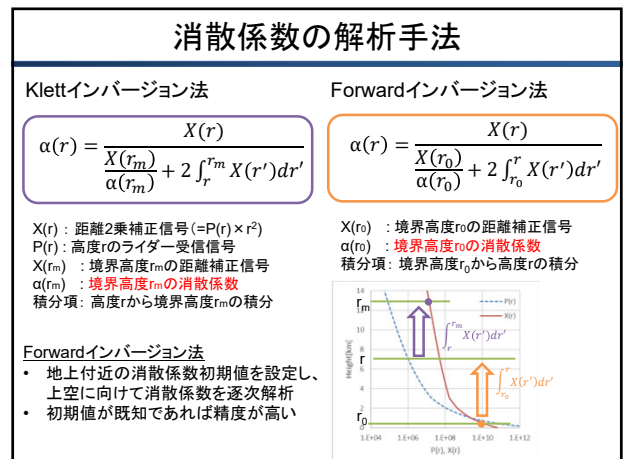
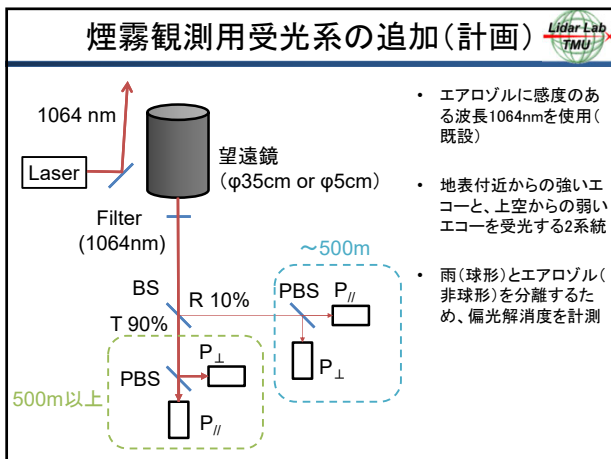
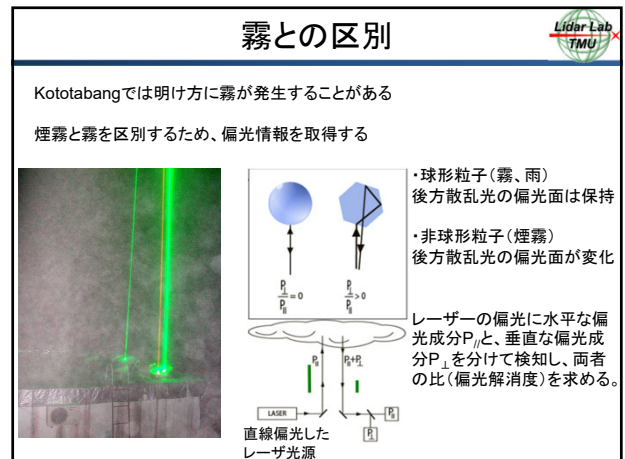
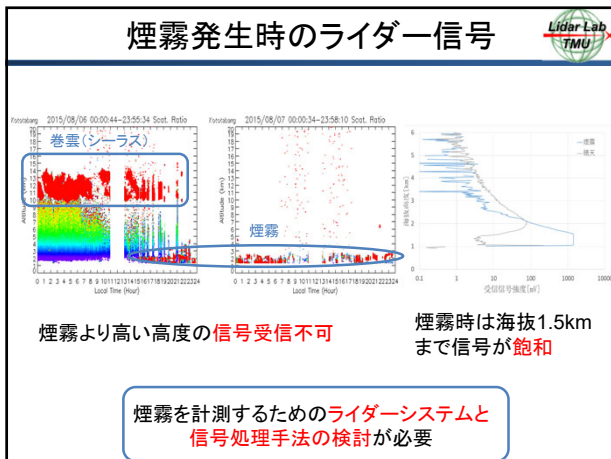


FIGURE 1. (a) Temporal evolution of aerosol backscatter coefficient at 355 nm on 24th July 2013. (b) Temporal evolution of aerosol backscatter coefficient at 355 nm on 25th July 2013. (c) Temporal evolution of aerosol backscatter coefficient at 355 nm on 3rd March 2014. (d) Temporal evolution of aerosol backscatter coefficient at 355 nm on 4th March 2014.



Map showing the location of Penang Island and the back-trajectories of the smoke plume.

Hee, Wan Shen, et al., AIP Conf. Proc., Vol. 1657, AIP Publishing LLC, 2015.



国内での疑似煙霧観測



実験測定環境	
レーザ波長	1064 nm
出力	10 mJ
サンプリング周期	8 ns
繰り返し周波数	10 Hz
望遠鏡直径	75 mm
レーザ光と望遠鏡の中心間	70 mm
レーザビームの仰角	45°
光検出	APD

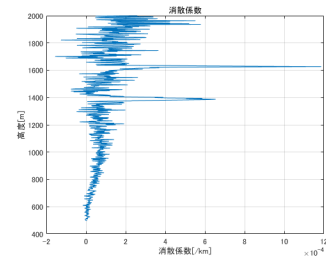


小型ミーライダー

雲・エアロゾルの観測

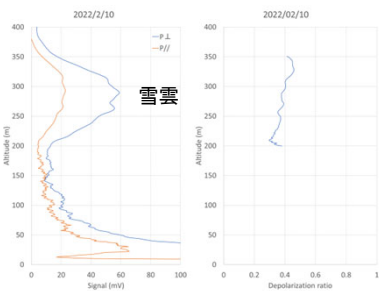


2021年11月16日



Forwardインバージョン法での解析結果

偏光解消度の観測例



- 2022年2月10日の降雪時に偏光ライダー観測を実施
- 雲の偏光解消度は約0.4で雪雲(氷雲)と識別

まとめ

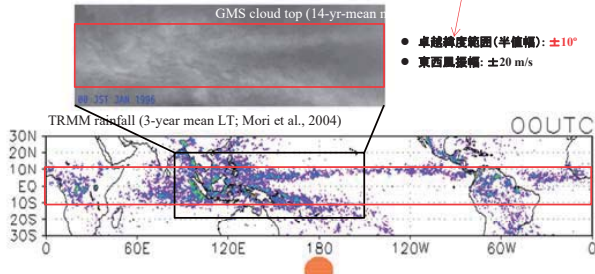


- 煙霧観測に特化した偏光ライダーを設計
 - ダイナミックレンジを広げるため、受信を2系統に分ける
 - 霧と煙霧を区別するため、偏光チャンネルを付加
- 国内で受信系の確認実験を行っている
 - ダイナミックレンジの確認
 - 雪雲を利用した偏光解消度の観測

海陸風起源双方向重力波による赤道成層圏QBO頑健化: 問題点と観測的確認方法

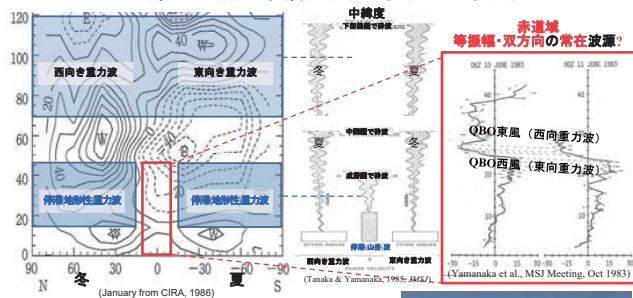
山中 大学(総合地球環境学研究所)・荻野 慎也(海洋研究開発機構)

赤道域擾乱: 日周期(沿岸域) > 季節内/経年変動(外洋上) > 年周期(半球間)
海陸共存と自転を大気へ伝える 昼夜と両岸の2つの対称性



海大陸(IMC)などの沿岸日周期(CDC)は洋上の季節内変動や運動帯の台風と並ぶ(より有力な)対流層生成機構

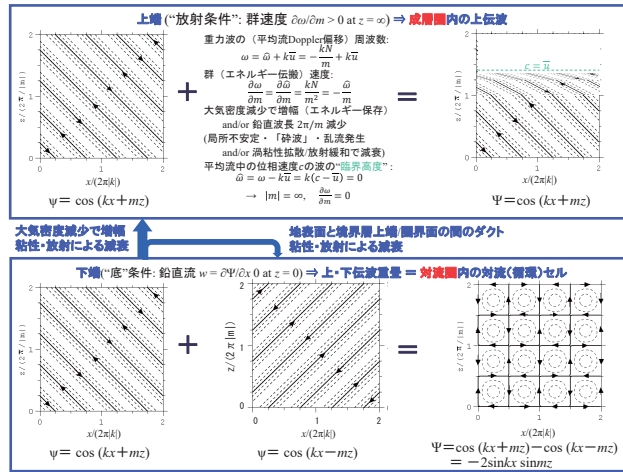
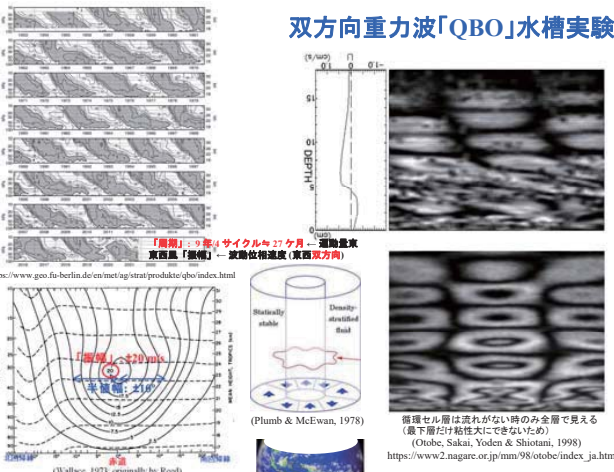
内部重力波と中層大気力学(1980年代)



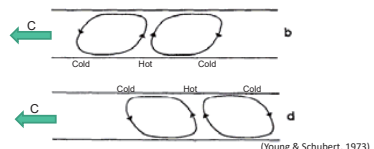
● 中緯度年周期は放射収支で頑健化

- 停滞波は弱風層を作る
- 東西波は逆風層を作る

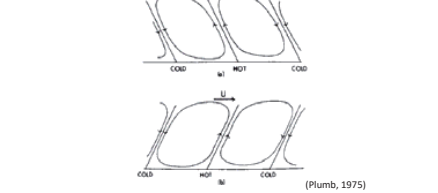
Balloons for Solar Eclipse, 11 Jun 1983 at Watukosek, Jawa Timur (NAO, ISAS (now JAXA), LAPAN (now BRIN); started in 1981)



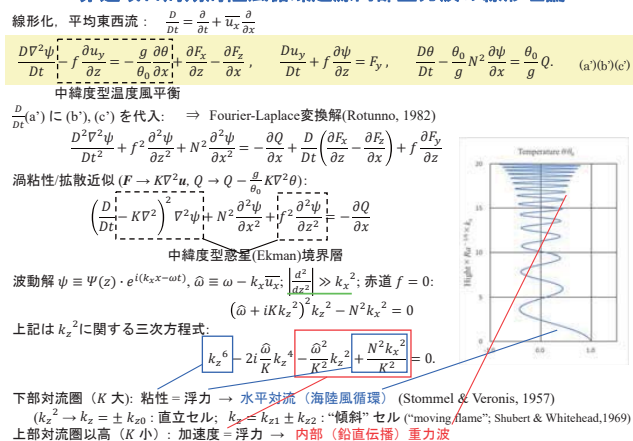
金星「超回転」と「動く炎」 (全球位相構造をもつ潮汐波)



- 地球赤道QBOも西風は「超回転」
- 地球赤道日周期海陸加熱は「次々点火消火」
- 局地位相構造(海岸準拠)

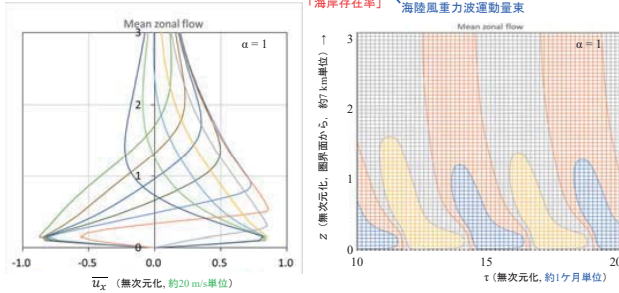


赤道域日周期海陸風循環起源内部重力波の線形理論

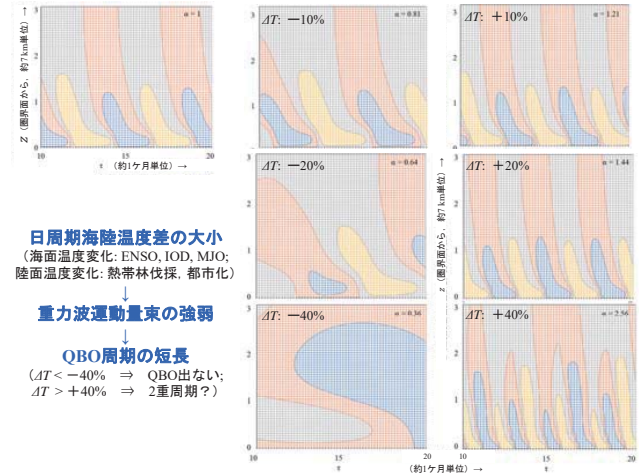


Plumb (1977) 双(東西)方向重力波モデルによる基本特性確認

$$\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial t} - K \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial z^2} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} (F_+ + F_-), \quad F_{\pm} = \omega_{\pm} F_{0\pm} \exp \left[-\int_0^z \frac{\mu N k_x}{\omega_{\pm}^2} dz + \frac{z}{H} \right]$$



- QBO振幅 ($\pm 20\sim 40$ m/s) は東西方向の波の位相速度で決まる。
- QBO振動周期は日周期海陸風循環振幅で決まる運動量束に反比例。
- QBO存在範囲は日射日周期卓越 ($< 23.4^\circ$) と内部波型 (鉛直伝搬可能, $< 30^\circ$) による。
- 高速な地球自転が局所的日射強制を実質的に帯状均質化する。



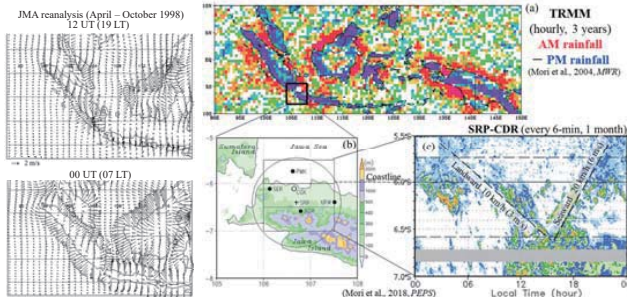
日周期海陸温度差の大小
(海面温度変化: ENSO, IOD, MJO;
陸面温度変化: 熱帯林伐採, 都市化)

重力波運動量束の強弱

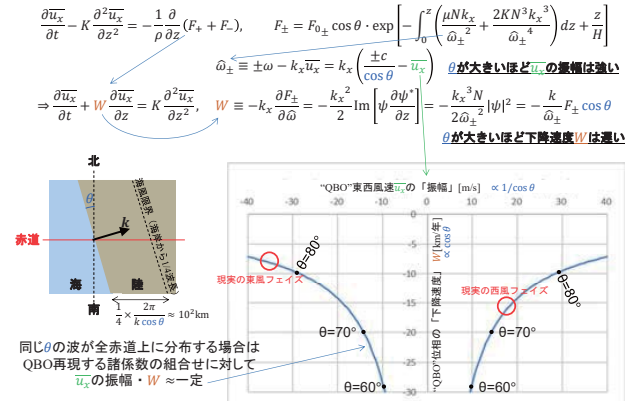
QBO周期の短長
($\Delta T < -40\%$ \Rightarrow QBO出ない;
 $\Delta T > +40\%$ \Rightarrow 2重周期?)

沿岸日周期重力波の観測的様相: 頑健性と振幅変動

- 赤道域海陸風循環=内部重力波, 水平位相速度 $c = \omega/k$ は海陸双方で東西両岸逆方向
- 大島嶼沿岸(水平波長 $k^{-1} >$ 数百km), 振幅 \propto 海陸温度差 $k\Delta T$ (周波数 $\omega = 2\pi/1$ 日)
- 個々の雲より長波長で遅い: $c = 1\sim 3 \times 10^2$ km/10 h = 3~7 m/s < 積乱雲下の強風 (~ 20 m/s)
- 大島嶼間を伝播, 途上の小島嶼(水平伝播方向の決まった波を作らない)で励振される
- 海上では陸上より速く, 季節間変動 (Kelvin/混合Rossby重力波) に位相変動される
- モデルでの再現にはかなりの高分解能が必要



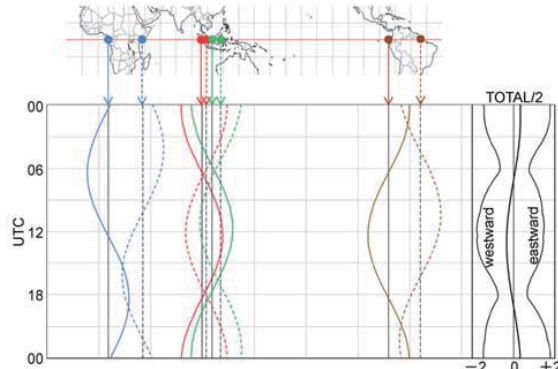
海岸線の向き(波の向き)と平均帯状流加速



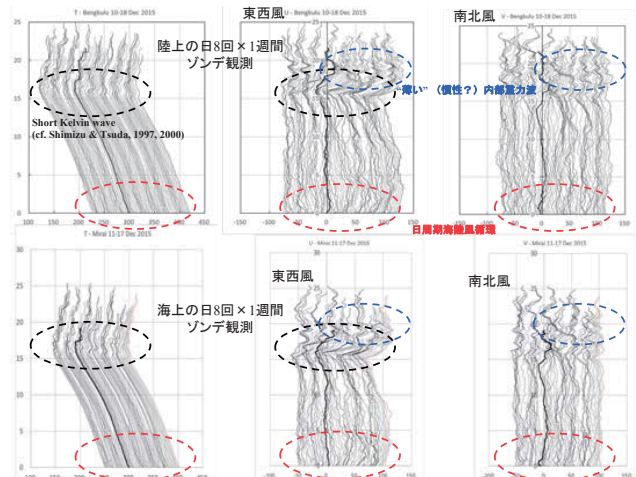
現実の海岸線は局在し, もっと南北に近い \Rightarrow 観測から現実の海陸風の分布を知る必要

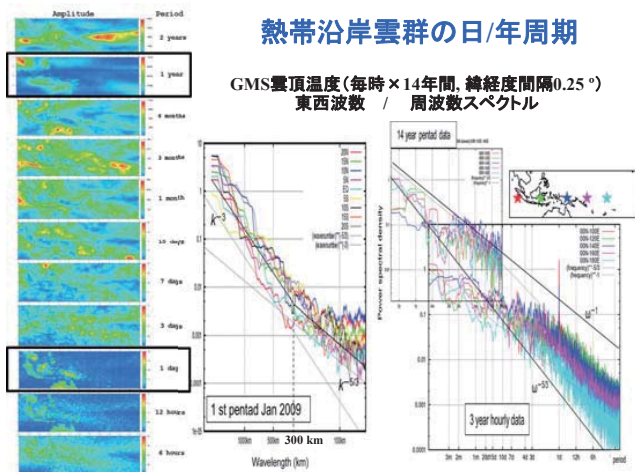
赤道上の海岸線分布と東西向運動量鉛直束の「帯状均質化」

「海岸存在率」 α は経度 (λ) の関数で積分内に入れねばならないが...



アフリカ・南米がIMCとほぼ $-90^\circ, 180^\circ$ の位置関係, 地球自転が充分に高速





熱帯沿岸雲群の日/年周期

GMS雲頂温度(毎時×14年間, 緯経度間隔0.25°)
東西波数 / 周波数スペクトル

現時点の結論と展望

- 地球の陸海空3圏の三重境界である海岸線のまわりに局地的に日周期位相構造をもつ赤道域日周期海陸風循環は陸向き海向き双方の頑健な波源となる。
- 赤道域日周期海陸風循環に起因する重力波によるQBOの頑健化は、中緯度山越え気流(停滞波)による中部成層圏弱風層生成(とそれによる東西伝播波の中間圏界面上下での帯状風逆転やその直上までの均質圏の維持)などと共に自転地球表面による大気圏コントロールである。
- 海岸線の子午線からのずれは、QBOの東西風「振幅」を大きく、「下降速度」を遅くする(現実のQBOは東風フェイズが強く、下降速度も遅い)。
- 季節内振動、年(半年)周期季節変化(モンスーン)、ENSO、IOD、より長期的な気候変動や陸面的人為的变化は、沿岸日周期海陸風循環(とそれに伴う降雨)を変調するので、それを通じてQBOも変調され得る。
- 海岸の局在に加えて、惑星規模赤道波(Kelvin波、混合Rossby重力波)は小規模重力波を組織化する役割をもち得る。
- 観測から海陸風循環の地理的变化、海陸風循環に対応して抽出した重力波の鉛直伝搬を解析する必要がある。(現時点では日周期海陸風循環を完全に再現できる全球モデルはない)

A review of SEALION activities

Activities to solve a real-world problem on **precise positioning (centimeter-level)** and communication system in order to **protect fragile ICT infrastructures** from the space weather risk, to **stimulate the economic competitiveness** via innovations, and to **promote the safely use of the radio infrastructure** in the aging society.

Koranyan HOZUMI (Kukkai),
Nishioka Michi and ionospheric working group
National Institute of Information and Communications Technology
Radio Research Institute, Radio Propagation Research Center, Space Environment Laboratory

第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Title

1

Overview

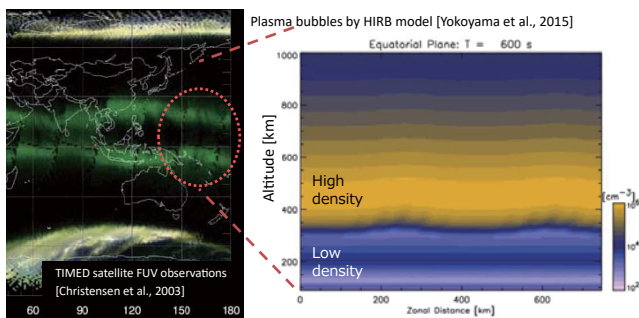
- EPB (Equatorial Plasma Bubble)
- Background and Significant
- Why is Southeast Asia?
- Activity overview in Southeast Asia
 - SEALION activities
 - New magnetometer site at Songkhla, Thailand (August 2022~)
 - EPB Alert system (mid 2021~)
 - Activities in Asia
- Summary

第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Overview

2

EPB (Equatorial Plasma Bubble)

- **Equatorial Plasma Bubble** is an ionospheric "Bubble" generating in the ionosphere over the magnetic equator just after the sunset.

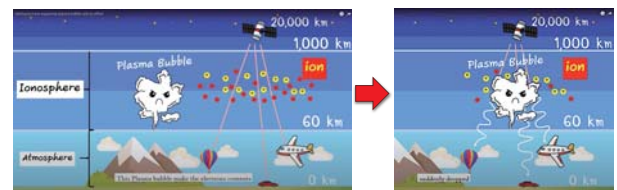


第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - EPB

3

EPB (Equatorial Plasma Bubble)

- EPB distorts the passing-trough signals.
- It is one of the **sources of largest error of GNSS positioning in low-latitude** region due to spatial gradient of TEC and GNSS scintillation.



Source:
NICTchannel: Getting to know equatorial plasma bubble and its effect
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=M9WRXHJPIOk>

第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - EPB

4

Japan Post tests delivery robots. (October 2020)

Source: Nippon TV News 24 Japan, <https://www.youtube.com/watch?v=Y0MZIS0LSE>

Prime Minister of Japan and His Cabinet

ドローンによる医薬品配送に関するガイドライン

"Guidelines for Delivery of Pharmaceutical Supplies Using Drones"

Source: https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamuji/nki/kanminkyougi_dai16/betten3.pdf

2021年6月 内閣官庁 厚生労働省 国土交通省

第1章 適用範囲

1.1 適用範囲

本ガイドラインは、ドローンの実証事業において、薬局関係者又は医療機関の関係者がドローンを用いて処方箋により調剤された薬剤を患者に配達する場合（薬局関係者及び店舗事業者が一般医薬品を販売する場合を含む）及び郵便局関係者がドローンを用いて医薬品を医療機関等に配達する場合を対象とする。

なお、本ガイドラインは実証事業の実施状況を踏まえ必要に応じて見直しを行う。

Mail Delivery by Drone: Japan Post Invests 3 Billion Yen for Commercial Drone Delivery by 2023

Posted by Miriam McIntyre on July 18, 2021

Japan Post is committed to implementing mail delivery by drone in remote areas by 2023.

This article published in collaboration with JUIDA, the Japan UAV Industrial Development Association.

Source: <https://dronefile.com/2021/07/18/mail-delivery-by-drone-japan-post/>

Jiji Press

Seven-Eleven Japan, ANA Test Drone Delivery System

Tokyo, Dec. 1 (Jiji Press)—Seven-Eleven Japan Co. and ANA Holdings Inc. "Q202" on Thursday showed to the media a test of a delivery system using a remote-controlled drone in a residential area in a suburb of Tokyo.

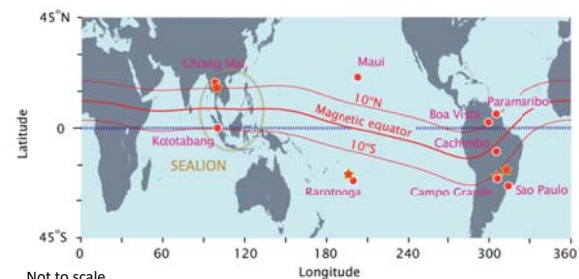
The two companies aim to commercialize the drone delivery system around 2025 after further tests. The system is expected to be in high demand from residents in remote islands and sparsely populated areas.

Source: <https://jiji.com/jp/eng/7g-ind&k=2021120300459> (2021/12/03-13:22)

第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Background and significance

Why is Southeast Asia?

- The suitable location for monitoring the plasma bubbles needs to cover both geomagnetic northern and southern hemispheres.
- There is limited land on the Earth.
- Southeast Asia is a very unique observation location in the world.

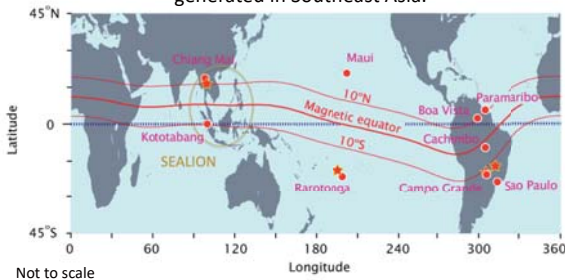


第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Why is Southeast Asia?

5

Why is Southeast Asia?

In additions, the plasma bubble propagates eastward and extends its structure to a higher latitudes. It means that the plasma bubbles those affect the Japanese meridian are generated in Southeast Asia.

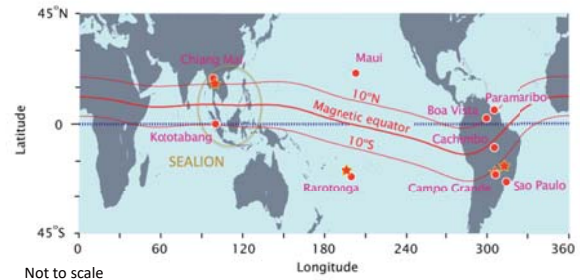


第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Why is Southeast Asia?

7

Why is Southeast Asia?

Ionosphere has a local characteristic. It is the reason why we need to have ionospheric observation network expanded its coverage as large as possible.

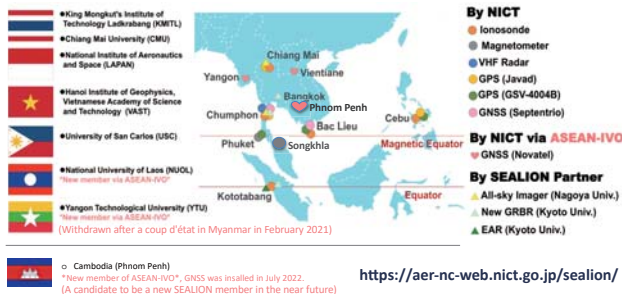


第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Why is Southeast Asia?

8

SEALION*: Pioneering in ionospheric observation in Southeast Asia since 2003.
(*SouthEast Asia Low-latitude Ionospheric Network)

- Established by NICT and started the observation since 2003
- Operated with an international effort.
- Purpose: to study the influence of radio propagation by ionospheric disturbance e.g., **Equatorial Plasma Bubble**



第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - SEALION

9

Activity Overview in Southeast Asia

SEALION

- The website was renewed.
- New data including the Chumphon VHF radar data were released to public.
- Almost all ground-based observations stopped due to lack of a proper maintenance during the COVID-19. → Now trying to recover them.
- New site: Magnetometer at Songkhla, Thailand (August 2022~)

EPB Monitoring and Visualization System

EPB Alert system prototype is on the way.

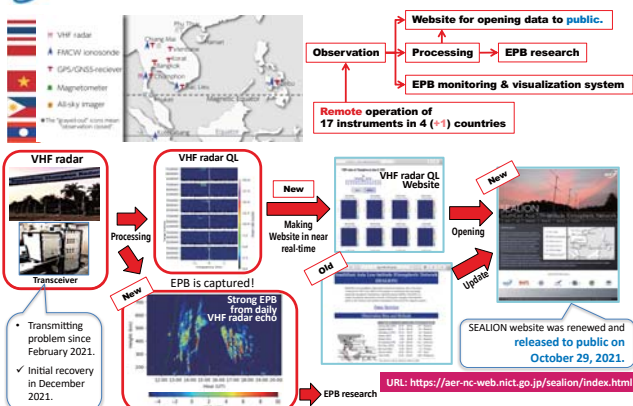
Activities from Asia

ASEAN-IVO, NSTF (Thailand), the first Thailand white paper on space weather, etc.

第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Activity review

10

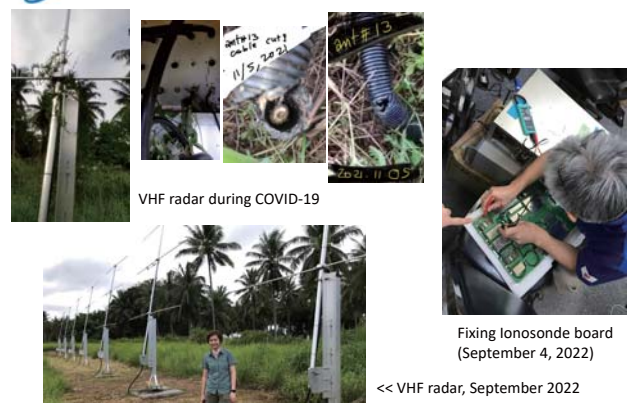
SEALION activities



第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Activity review

11

Chumphon site maintenance (September 2022)



第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Activity review

12

NICT New magnetometer site @Songkhla, Thailand



第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Activity review

13



EPB Alert System (mid 2021~)



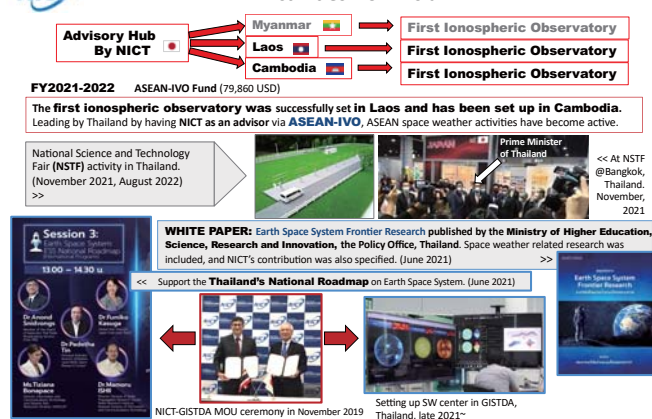
- EPB Alert system prototype was developed.
- Using data from the SEALION network.
- Positioning error are the result from the ASEAN-IVO project.

第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Activity review

14



Activities from Asia



第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Activity review

15



Summary

- With an international collaboration, the SEALION network has been continuously operated and maintained in 5 countries even with COVID-19 pandemic. Ionospheric observation network has been expanded to Cambodia via the **ASEAN-IVO** project.
- The **new magnetometer site at Songkhla, Thailand** started.
- The **SEALION** website was renewed and released to public. New data from the **Chumphon VHF radar** were also released via the website.
- **EPB Alert** system prototype is being developed.
- Thailand **white paper** on Earth Space System Frontier Research was published. Setting up a **new space weather center in Thailand** was stated.

第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム - Summary

16

タイ・チュンボンにおける下向きに伸びる沿磁力線 不規則構造の VHFレーダー観測

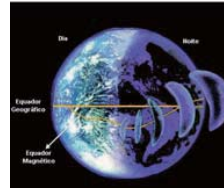
大塚雄一、塩川和夫(名大ISEE)、Kornyanat Hozumi、西岡未知、
津川卓也(NICT)、斎藤享(電子航法研)、Pornchai Supnithi、
Punyawi Jamjareegulgarn(KMITL)、山本衛(京大RISH)



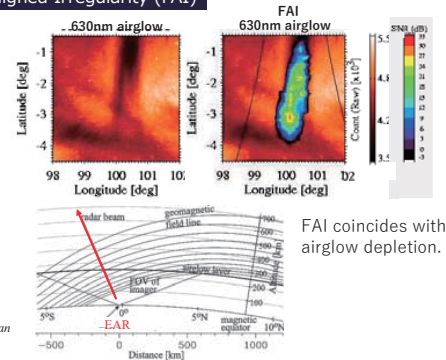
The Chumphon VHF radar is operated by KMITL in Thailand and NICT in Japan.

Plasma Bubble and Field-Aligned Irregularity (FAI)

Plasma bubble is a localized electron density depletion in the ionosphere.

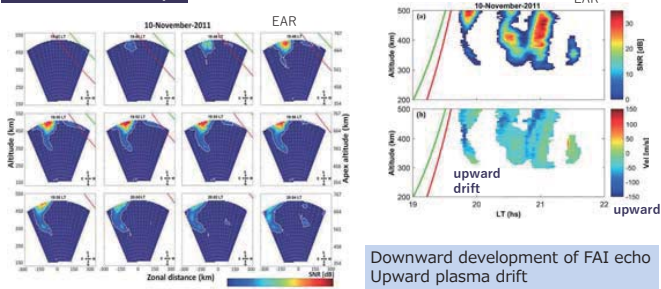


[Takahashi et al., Proceedings of the Brazilian Decimetric Array Workshop, 2008]



FAI coincides with airglow depletion.

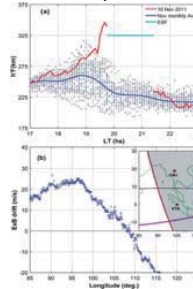
Previous Study



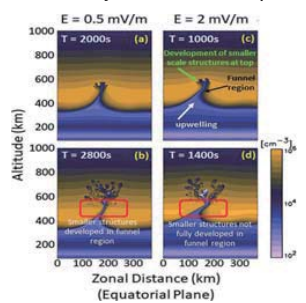
Downward development of FAI echo
Upward plasma drift

Tulasi Ram et al. (2020) Dilatory and Downward Development of 3-m Scale Irregularities in the Funnel-Like Region of a Rapidly Rising Equatorial Plasma Bubble

Intense upward drift



Dilatory and Downward Development



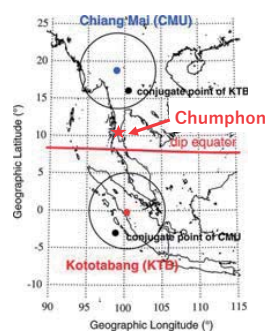
Tulasi Ram et al. (2020) Dilatory and Downward Development of 3-m Scale Irregularities in the Funnel-Like Region of a Rapidly Rising Equatorial Plasma Bubble

Purpose

Investigate downward development of
FAI echo near magnetic equator

Observations

- Chumphon VHF radar
- All-sky airglow imager at Chumphon
- GNSS TEC (Total Electron Content)



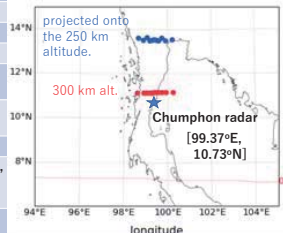
Specification of the Chumphon VHF radar

Item	value
Operating frequency:	39.650 MHz
Antenna:	Linear array of 18 three-element Yagi antennas
Beam width	12° in azimuth / 40° in zenith (half-power, full-width)
Beam steering	Beam direction is changeable for each pulse
Transmitter:	Solid-state pulse transmitter
Peak power	20 kW
Duty cycle	7.5% (max.)
Pulse width	1-200 μ s
Receiver	Single coherent receiver
A/D converter	16 bit



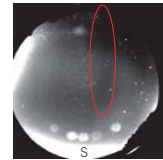
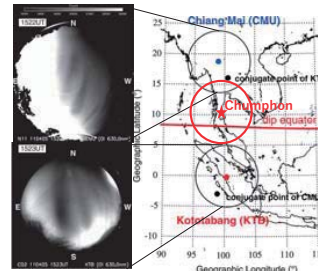
Observation Parameters for F-region FAI

Parameter	Multi-beam mode	Doppler mode
Pulse width	32- μ s x 8-bit complementary code	13-bit Barker code
Range	140.0 – 797.6 km	140.0 – 816.8 km
Range resolution	4.8 km	4.8 km
No. of height data	138	142
No. of FFT point	128	256
Inter-pulse period	6 ms	6 ms
No. of coherent integration	2	2
No. of spectrum average	1	1
No. of beam	11	1
Azimuth of beam direction (from north)	-60°, -48°, -36°, -24°, -12°, 0°, 12°, 24°, 36°, 48°, 60°	-48°, -24°, 0°, 24°, 48°, 60° each
Zenith of beam direction	9.6°	9.6°
Time resolution	~ 130 s	~ 130 s



All-sky airflow imaging observation in Thailand and Indonesia

630nm airflow



Plasma bubble observed at Chumphon on Jan. 28, 2020.

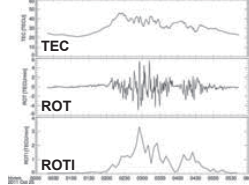
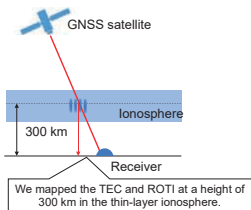


All-sky imager installed at Chumphon radar site

Fukushima et al. (JGR, 2015)

Analysis method

Brief description of the Rate of TEC Index (ROTI)



TEC, ROT and ROTI observed at the point of the GPS receiver (28°N, 278°E) (2011.10.25/00:00–06:00 UT)

Calculation method of ROTI with GNSS-TEC data

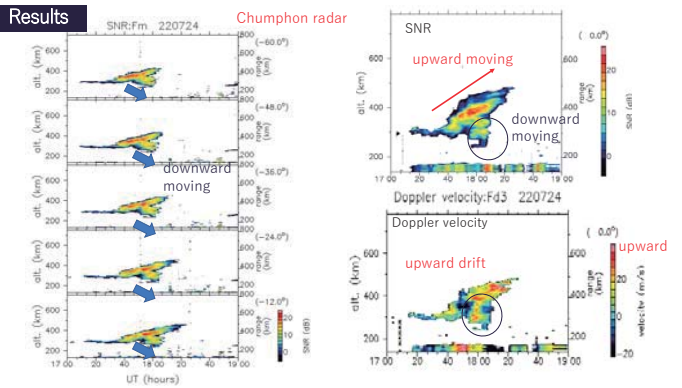
$$ROT = \frac{T(t_0+0.5) - T(t_0)}{0.5} \text{ [TECU/min]}$$

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \text{ [TECU/min]}$$

$T(t)$ [TECU] : TEC at time t
[TECU] = $10^{16}/m^2$

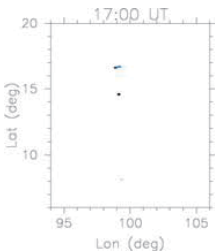
[Pi et al., 1997] [Courtesy of Sori]

Results

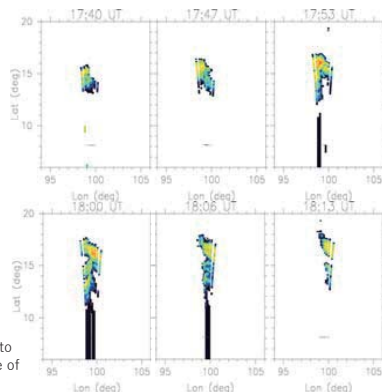


FAI Observed by Chumphon VHF radar

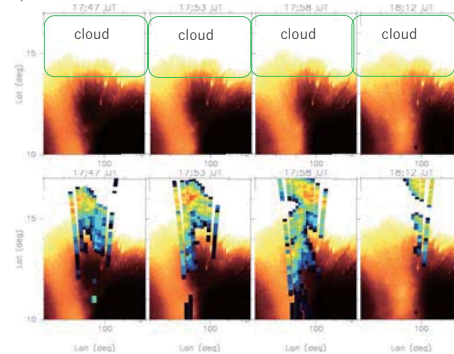
July 24, 2022



Echo regions mapped along B -field onto the 630-nm airflow layer at an altitude of 250 km

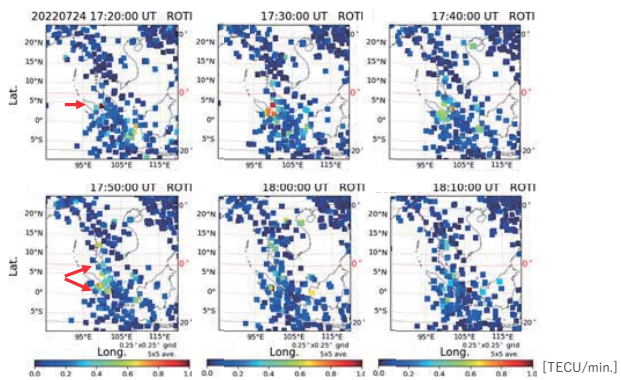


July 24, 2022



630-nm airflow at 250 km altitude

FAI echo regions are mapped on the 630-nm airflow layer at an altitude of 250 km along B -field



Summary

- By using the Chumphon VHF radar, [downward-moving F-region FAI](#) was observed around midnight on Jul 24, 2022.
- The downward-moving FAIs
 - has upward Doppler velocity.
 - coincides with airglow depletion.
- ROTI enhancement (TEC irregularity) appeared first at off-magnetic equator, and extended to magnetic equator and higher latitudes.

⇒ After plasma depletion is formed, the irregularities grow first at off-equator (higher altitudes), and then extend to equator (lower altitudes).
 ⇒ [downward-moving F-region FAI](#)

赤道大気レーダーで観測された 150kmエコーの太陽・地磁気活動依存性

横山竜宏・高木理絵子・山本衛
京都大学生存圏研究所

150-km Echoes

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH

VOL. 69, No. 9

MAY 1, 1964

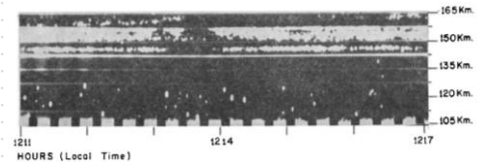
Evidence of a Stratified Echoing Region at 150 Kilometers in the Vicinity of the Magnetic Equator during Daylight Hours

B. R. BAILEY

Central Radio Propagation Laboratory
National Bureau of Standards, Boulder, Colorado

Radar observations made at the Jicamarca Radar Observatory near Lima, Peru, have shown evidences of a narrow, stratified echoing region which exists during daylight hours in the height range extending approximately from 140 to 170 km. This is well above the 105- to 115-km region ascribed to the equatorial electrojet. The

are apparent. The two echoes which appear in the vicinity of 150 km are typical of the majority of echoes received from this region during the period of observations. At times, however, up to five simultaneous echoes have been observed in this region. It can be seen that the duration of any one



150-km Echoes

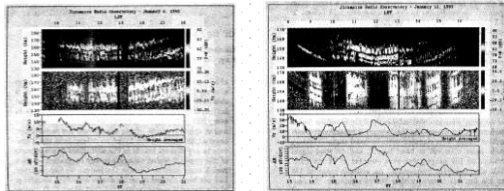
GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 20, NO. 18, PAGES 1987-1990, SEPTEMBER 15, 1993

HIGH RESOLUTION OBSERVATIONS OF 150 KM ECHOES AT JICAMARCA

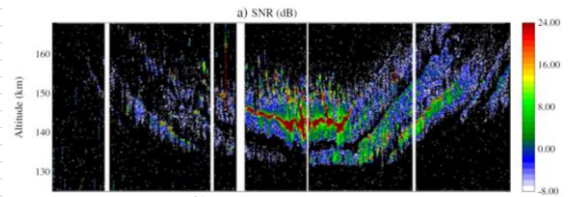
Erhan Kudeki and Clinton D. Fawcett

Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign

Abstract. High resolution soundings of equatorial upper E-region echoes at Jicamarca exhibit gravity wave modulated signal intensity distributions and Doppler velocities corresponding to vertical plasma drifts. A gravity wave wind driven interchange instability is suggested as a possible generation mechanism of the field-aligned plasma irregularities responsible for the echoes. The echoes may be utilized in gravity wave studies and in solar electric field measurements by radars with modest sensitivities.



150-km Echoes



Chau and Kudeki (2013)

- Discovered by the Jicamarca radar in 1964. The mechanism has been still unclear.
- Vertical Doppler velocity from 150-km is a very good measurement of the F-region ExB vertical drift.

Mechanism

Geophysical Research Letters

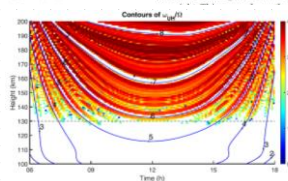
RESEARCH LETTER
10.1029/2020GL087391

The Photoelectron-Driven Upper Hybrid Instability as the Cause of 150-km Echoes

William J. Longley^{1,2}, Meers M. Oppenheim¹, Nick M. Pedatella¹, and Yakov S. Dimant¹

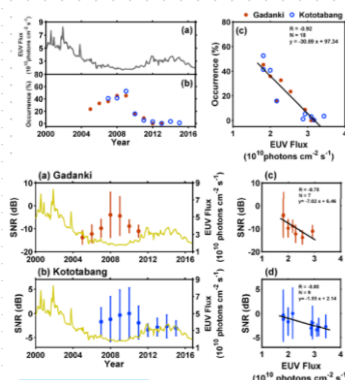
¹Department of Physics and Astronomy, Rice University, Houston, TX, USA, ²University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA, ³Center for Space Physics, Boston University, Boston, MA, USA, ⁴High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA

Abstract 150-kilometer echoes are strong, coherent echoes observed by equatorial radars looking close to perpendicular to Earth's magnetic field. Observations over a day show a distinct necklace pattern with echoes descending from 170 km at sunrise to 130 km at noon, before rising again and disappearing



- Necklace shape with regard to the solar zenith angle.
- Several gaps due to thermal electrons Landau damping.

Solar Activity Dependence



Patra et al. (2017)

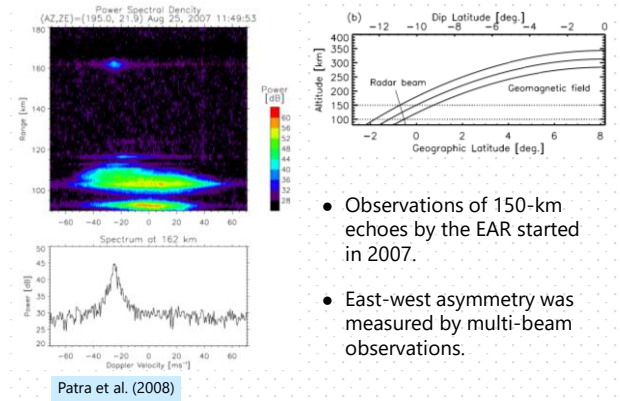
- Occurrence and SNR of 150-km echoes was inversely correlated with solar activity.
- The relationship between the echoes and EUV flux is more complex than expected.
- Dependence on the geomagnetic activity has not been reported.

Equatorial Atmosphere Radar (EAR)



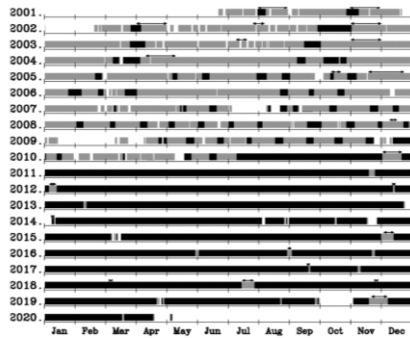
Kototabang, Indonesia (100.32°E, 0.2°S, M-Lat. 10.36°S) 47MHz
Since 2001, 110m diameter, 560 elements, 100kW peak power

EAR Observations of 150-km Echoes



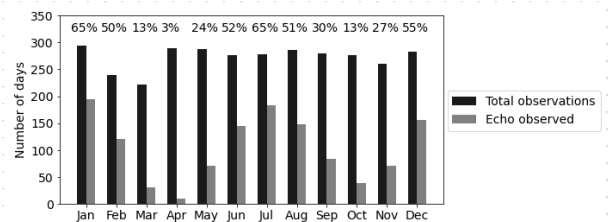
- Observations of 150-km echoes by the EAR started in 2007.
- East-west asymmetry was measured by multi-beam observations.

EAR Observations for FAIs



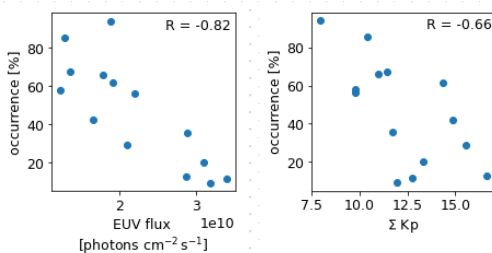
Ionospheric observations were conducted in black period.
<https://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/data-fai/>

Monthly Occurrence Rate of 150-km Echoes



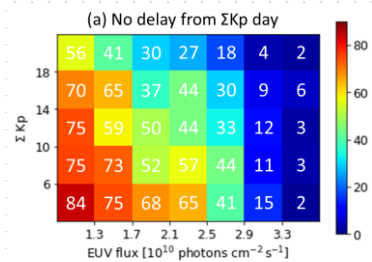
- Statistics of EAR observation from 2007 to 2019.
- Echoes with a SNR of over -6 dB in ranges of 130–170 km and 0900–1500 LT are counted.
- High occurrence in summer and winter.

Yearly Occurrence Rate vs EUV Flux and ΣKp

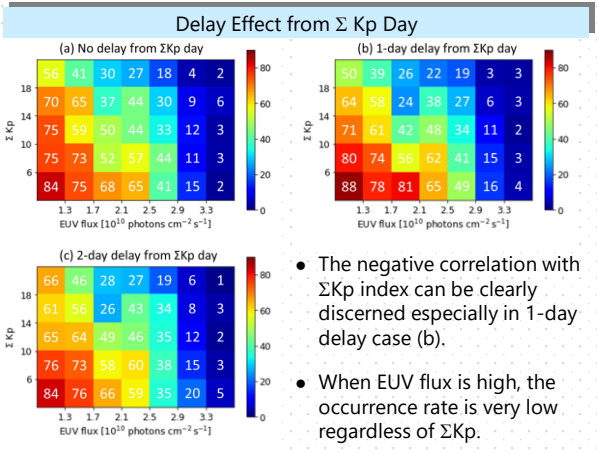


- EUV flux measured by SOHO satellite
- ΣKp is a sum of 8 Kp values per day
- Negative correlation with EUV flux and ΣKp .

Occurrence Rate of 150-km Echoes vs EUV and ΣKp



- Clear anti-correlation with EUV and ΣKp .
- EUV dependence is larger than ΣKp .



- The negative correlation with Σ Kp index can be clearly discerned especially in 1-day delay case (b).
- When EUV flux is high, the occurrence rate is very low regardless of Σ Kp.

Discussion

- The photoelectron-driven upper hybrid instability proposed by Longley et al. (2020) can explain many aspects of 150-km echoes, but not everything.
- Under the conditions of small solar zenith angle in equinoxes and during the high solar activity period, the solar EUV flux would become strong and generate more photoelectrons. The total photoelectron density, that is, the solar EUV flux, is not a key factor in the photoelectron model.

Discussion

- Although gravity waves have been thought as a key factor of 150-km echoes, the dependence on geomagnetic activity suggests that electrodynamics should be more significant than the dynamics of neutral atmosphere.
- The fact that geomagnetic activity correlates with the occurrence rate of 150-km echoes observed 1 day after when the Σ Kp was measured implies that overshielding or disturbance dynamo electric field may play a role in suppressing the occurrence of 150-km echoes.
- However, electric fields do not explicitly appear in the derivation of photoelectron-driven upper hybrid instability (Longley et al. 2020).

Summary

- The occurrence rate of the 150-km echoes shows a semiannual variation with two peaks in solstices and the negative correlation with the EUV flux.
- Geomagnetic activity correlates with the occurrence rate of 150-km echoes observed after one day when Σ Kp was measured during the low and medium solar activity period. However, the occurrence rate is always low during the high solar activity period regardless of the geomagnetic activity.

Yokoyama, T., R. Takagi, and M. Yamamoto, Solar and geomagnetic activity dependence of 150-km echoes observed by the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia, *Earth, Planets and Space*, 74, 113, doi:10.1186/s40623-022-01675-6, 2022.

S-520-32 号機観測ロケットからご地上までの2周波ビーコン観測
ー観測機器の開発と結果の速報ー

山本衛（京大 RISH）・高橋透（電子航法研）・芦原祐樹（奈良高専）

2022年1月15日に日本上空で観測された電離圏擾乱

の特性について

齋藤 享、吉原 貴之、高橋 透

海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所



[CSU/CIRA and JAXA/JMA]

- * Hunga Tonga-Hunga Ha'apai火山の噴火
 - 22.55S, 175.39W
 - 2022年1月15日04:27 UT
- * 噴火に伴い様々な大気・海洋変動が観測された
 - 大気圧力波（ラム波）
 - 津波、気象津波
 - 電離圏変動

1

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日

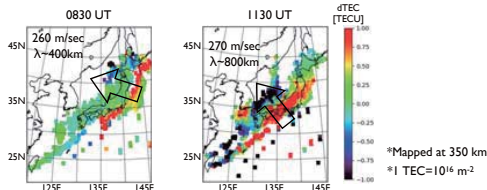
2

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日

日本上空における電離圏擾乱(TID)

* 2種類のTID

- 08-11 UT: 地表の大気圧力波の到達よりも早く発生
- 11-13 UT: 地表の大気圧力波の到達とほぼ同期して発生

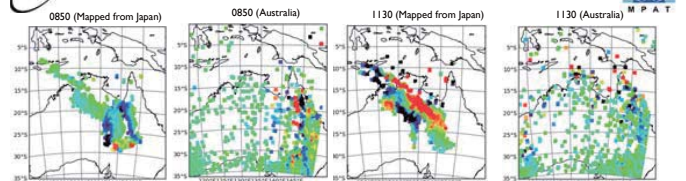


Saito, S. (2022), Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022, Earth Planets Space, 74, doi:10.1186/s40623-022-01619-0

3

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日

磁気共役性



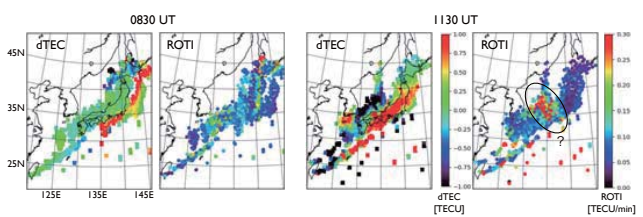
- * 第1のTIDは磁気共役
 - 南半球において励起されたTIDに伴う電場が北半球に投影[Lin et al., 2022; Saito 2022; Shinbori et al. 2022]
- * 第2のTIDは磁気共役性なし
 - 北半球は既に夜間でありE領域ダイナモが働かなかった(?)

4

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日

TIDに伴う電離圏不規則構造

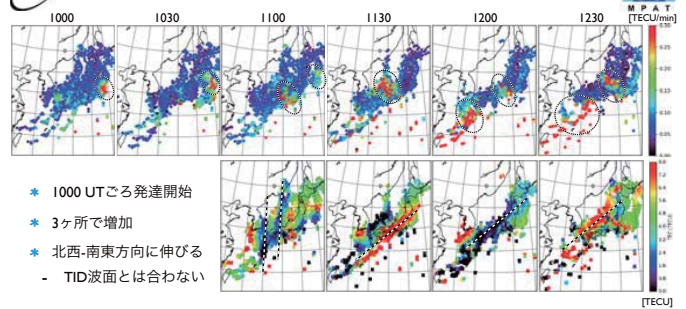
- * 08-11 UT
 - TID波面に沿った小規模電離圏不規則構造の増加(ROTI増加)あり
- * 11-13 UT
 - 強いROTI増加がみられるが、TIDの構造・伝播とは相関が見られない



5

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日

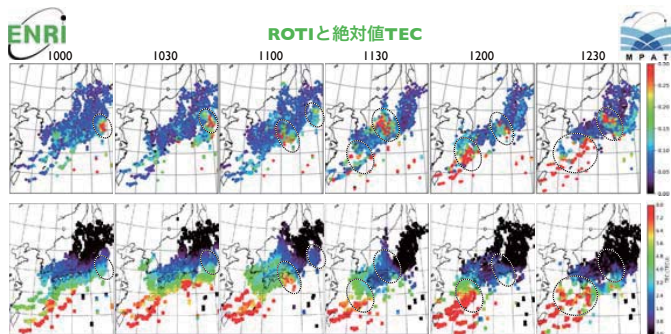
電離圏不規則構造の発達(ROTI増加)



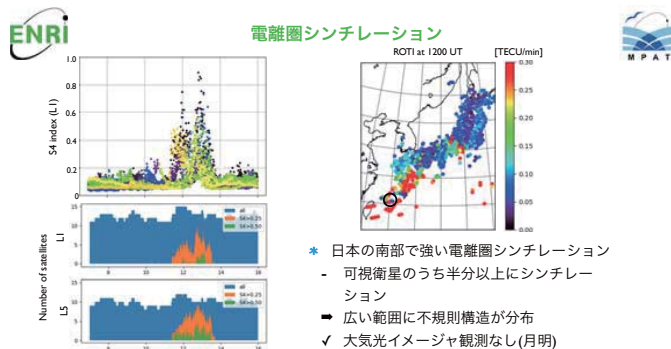
- * 1000 UTごろ発達開始
- * 3ヶ所で増加
- * 北西-南東方向に伸びる
 - TID波面とは合わない

6

第16回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日



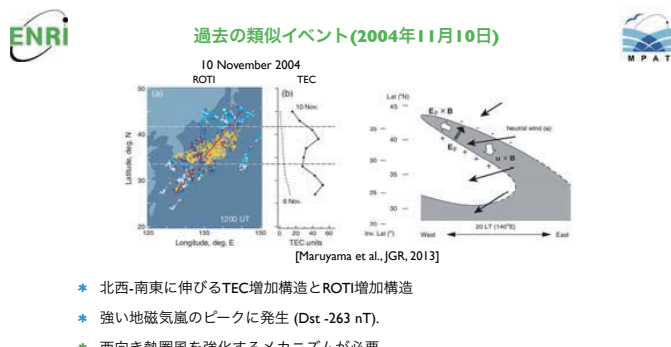
7 * ROTI増加領域とTEC増加領域は一致
第16回IMUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日



8 * 日本の南部で強い電離圏シンチレーション
- 可視衛星のうち半分以上にシンチレーション
- 広い範囲に不規則構造が分布
✓ 大気光イメージャ観測なし(月明)
第16回IMUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日



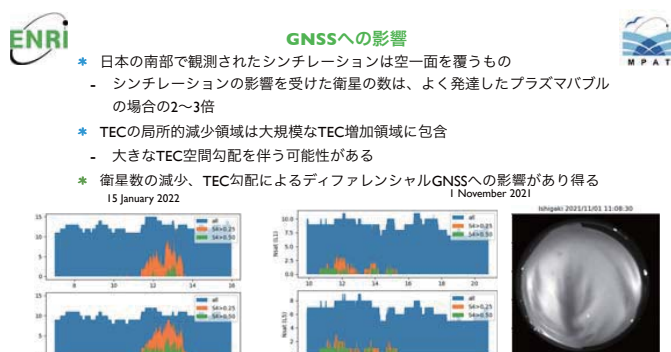
9 * 2022年1月14日に発生した地磁気嵐の回復相
- 最大Dst: -9 nT at 23 UT on 14 January 2022
- Dst (TID発生時): -55~-35 nT
- 最大Kp = 5-
* 地磁気活動はそれほど高くないものの、地磁気嵐の影響を考慮する必要あり
第16回IMUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日



10 * 北西-南東に伸びるTEC増加構造とROTI増加構造
* 強い地磁気嵐のピークに発生 (Dst -263 nT).
* 西向き熱圏風を強化するメカニズムが必要
第16回IMUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日



13 * Swarm衛星が熱圏風の変化を観測 [Harding et al., 2022]
- 30°W ~ +30°Eにおいて東向き中性風が増大
- 日本付近の中性風の観測はないが、通常と大きく変わっていてもおかしくはない
* 物理メカニズムは不明
- トンガ噴火との関連性?
- 地磁気嵐の効果?
- 噴火と地磁気嵐の相乗効果?
第16回IMUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日



14 * 日本の南部で観測されたシンチレーションは空一面を覆うもの
- シンチレーションの影響を受けた衛星の数は、よく発達したプラズマバブルの場合の2~3倍
* TECの局所的減少領域は大規模なTEC増加領域に包含
- 大きなTEC空間勾配を伴う可能性がある
* 衛星数の減少、TEC勾配によるディファレンシャルGNSSへの影響があり得る
15 January 2022
第16回IMUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2022年9月6日



まとめ



- * 2022年1月15日のトンガ海底火山噴火の後の電離圏擾乱について検討
 - 08-11 UT: TID波面に沿ったROTI増加
 - 11-13 UT: 強いROTI増加、TID波面とは異なる構造
- * 強いROTI増加領域の特徴
 - 北西-南東方向に伸び、TEC増加領域と一致
 - 2004年11月10日に強い地磁気嵐に伴って観測された現象[Maruyama et al., 2013]と類似
 - 赤道異常の発達と西向き熱圏風が重要
 - 噴火との直接の関係は不明であるものの、通常時と異なる熱圏風(強い東向き風)が大西洋-欧州上空で観測[Harding et al., 2022]
 - 小規模電離圏不規則構造は通常のプラズマバブルよりも広く分布
 - GNSSに対する電離圏の影響評価において考慮が必要

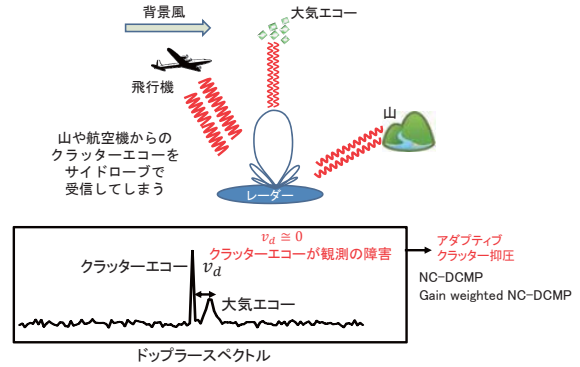
外付け受信専用アンテナを用いた アダプティブクラッター抑圧システムの開発

橋口 浩之・矢吹 諒・木村 侑希大・西村 耕司

京都大学 生存圏研究所(RISH)

第16回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム (2022.9.5-6)

研究背景



Norm Constrained Directionally Constrained Minimization of Power

□ NC-DCMP (ノルム拘束・方向拘束付き出力電力最小化法)

- 所望方向 (θ_0, ϕ_0) への応答は保持
- 妨害波方向にヌル(出力電力最小化)
- ビームパターンを崩しすぎないNC-DCMP

DCMPの原理

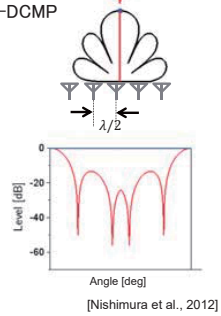
$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{w}}{\text{minimize}} \quad \left(P = \frac{1}{2} \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \right) \\ & \text{subject to} \quad \mathbf{C}^T \mathbf{w}^* = 1 \\ & \quad \quad \quad \|\mathbf{w}\|^2 \leq U \\ & \quad \quad \quad \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C} \\ & \quad \quad \quad \mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}}{\mathbf{C}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}} \end{aligned}$$

受信信号相関行列

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] + \alpha \mathbf{I} \\ &= E \begin{bmatrix} x_1 x_1^* & x_1 x_2^* & \cdots & x_1 x_M^* \\ x_2 x_1^* & x_2 x_2^* & \cdots & x_2 x_M^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_M x_1^* & x_M x_2^* & \cdots & x_M x_M^* \end{bmatrix} + \alpha \mathbf{I} \end{aligned}$$

方向拘束

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}(\theta_0, \phi_0)$$



Gain-weighted NC-DCMP

- 所望方向のゲインが低いアンテナを同等に扱うとノイズレベルのみが上昇する
- 所望方向に対するゲイン比を予め方向拘束に組み込む

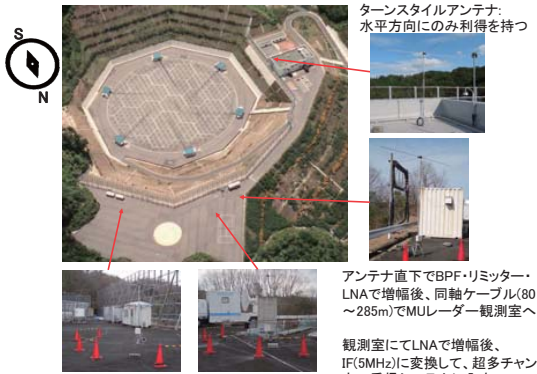
$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \frac{\sqrt{M}}{\|\mathbf{G}(\theta_0, \phi_0)\|} \sqrt{\mathbf{G}(\theta_0, \phi_0)} \circ \mathbf{C} \\ \mathbf{G}(\theta_0, \phi_0) &= [G_1(\theta_0, \phi_0), G_2(\theta_0, \phi_0), \dots] \\ G_i(\theta_0, \phi_0) &: i\text{-番目の素子の所望方向ゲイン} \end{aligned}$$

外付けアンテナによるSN比の劣化の少ない抑圧手法



[Hashimoto et al., 2016]

MULレーダーと外付けアンテナ(2021.3.19~)

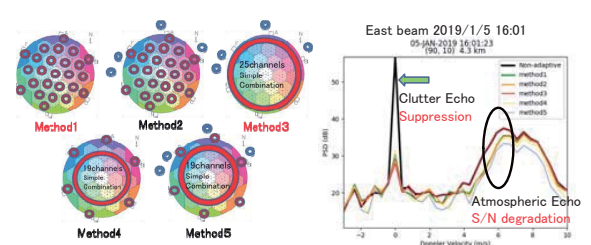


ターンスタイルアンテナ:
水平方向にのみ利得を持つ

アンテナ直下でBPF・リミッター・LNAで増幅後、同軸ケーブル(80~285m)でMULレーダー観測室へ

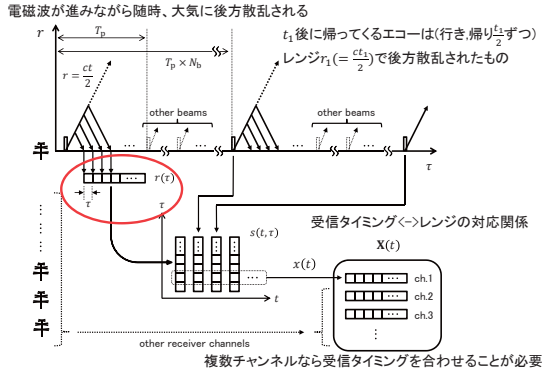
観測室にてLNAで増幅後、IF(5MHz)に変換して、超多チャンネル受信システムに入力

アンテナ配置によるクラッター抑圧と信号(S/N)劣化

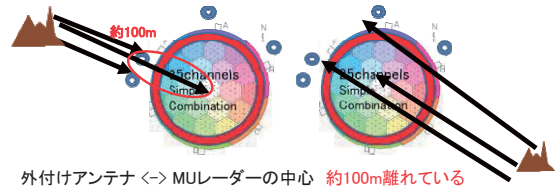


どれもクラッター抑圧には一定の効果がある。従来はMethod 1を標準的に使っていたが、メインローブにも影響を与えるため、S/Nが劣化する。Method 3は、25群を単純合成しメインローブを維持し、外付けアンテナでクラッター抑圧を行うため、S/N劣化はほぼない。しかし、時々クラッター抑圧が不十分になる問題があった。

大気レーダーにおけるレンジ(距離)



クラッター抑圧の失敗:レンジずれが原因の一つ



クラッター(北): 外付けアンテナがメインアンテナより前に受信
 クラッター(南): 外付けアンテナがメインアンテナより後に受信
 クラッター源の方向でレンジずれの修正量に変化
 クラッター源の方向はUnknown
 ->総当たりにレンジずれを修正する

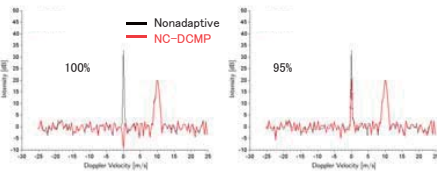
レンジ最適化(シフト処理)

シフト処理の方法

- まず、アンテナ1本ずつで確認
- 外付けアンテナのデータを総当たりにシフトする

抑圧度Zの定義

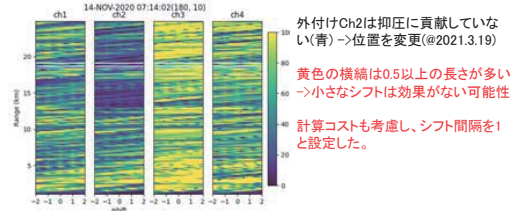
- $S_W(0)$ と $S_{NA}(0)$ の比を抑圧度とする (W: 最適ウェイト)
- $$Z = 1 - \frac{S_W(0) - \text{Noise}_{NA}}{S_{NA}(0) - \text{Noise}_{NA}} \quad (\text{最大値は100\%とする})$$



レンジ最適化(アンテナ)

南ビーム 2020/11/14 07:14 (1データ:1分)

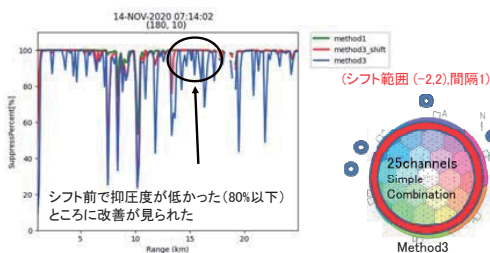
- X-axis: シフト範囲 (-2から2まで0.1間隔→41通り)
- Y-axis: 距離
- 1シフトは150mに対応 (MULEーダー)
- 最適シフト量はクラッター源の方向に依存 (クラッター源は不明)
- = 距離ごと、外付けアンテナごとに 総当たりで最適化(組合せ最適化)
- > N^4 の計算量(0.1間隔の場合 $41^4=2825761$, 間隔1でも $5^4=625$)



レンジ最適化(組合せ最適化)

抑圧結果(Method3)

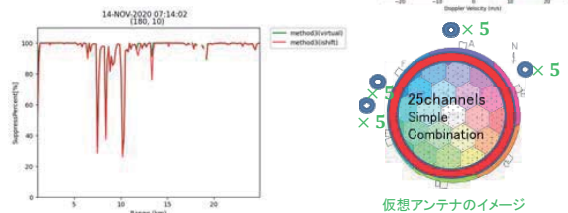
- レンジ最適化の効果は高かった(青->赤)
- 計算コストが高く、実時間処理は困難



隣接レンジ信号を加えたNC-DCMP

隣接レンジ信号を用いたMethod3

- シフトした外付けアンテナのデータ = レンジのずれた仮想チャンネル
- Gain weighted NC-DCMP (1+5x4 チャンネル) (隣接レンジ信号±2)
- 抑圧度、S/Nは組合せ最適化に劣らず、計算時間は短い(1分観測データの処理が約4秒)



まとめ

□ 研究成果

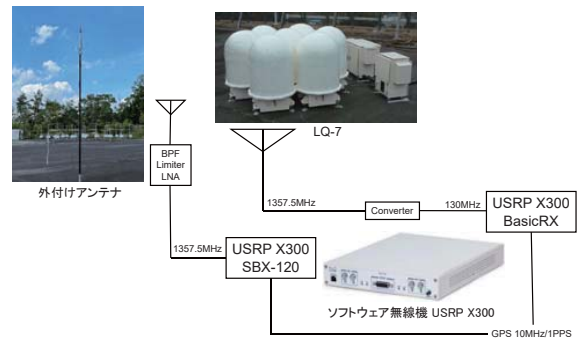
- 外付けアンテナ(ターンスタイルアンテナ)の有用性の提示
- 外付けアンテナ運用の問題点(レンジずれ)の発見と解消
→組合せ最適化では計算コストが高く実用性に問題
- 隣接レンジ信号の利用による実用性の改善(計算コスト1/15)
- 実用的な新たなクラッター抑圧手法の開発

□ 将来計画

- 外付けアンテナ配置の検討でさらに抑圧度が向上する可能性がある(北側へのアンテナ設置が困難)
- LQ-7(1.3GHz帯ウィンドプロファイラー)、EAR(赤道大気レーダー)への適用。既存システムは受信チャンネルが1つのみのため、ソフトウェア無線機(USRP X300)を用いて多チャンネル受信を実現

LQ-7(1.3GHz帯ウィンドプロファイラー)を用いたアダプティブクラッター抑圧

MUレーダーと同様、外付けアンテナを用いたアダプティブクラッター抑圧を実現する。
LQ-7は単一の受信チャンネルしか持たないため、ソフトウェア無線機USRP X300を用いた受信システムを構築し、多チャンネル受信を可能とする。

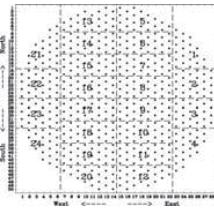


赤道大気レーダー(EAR)を用いたアダプティブクラッター抑圧

MUレーダーの受信専用外付けアンテナを用いたアダプティブクラッター抑圧を赤道大気レーダー(EAR)に応用する。EARは単一の受信チャンネルしか持たないため、ソフトウェア無線機を用いて多チャンネル受信を可能とする。



MUレーダーと同様の
受信専用アンテナ



ソフトウェア無線機(USRP X300)

バイスタティックレーダーによる 低高度域観測技術の開発

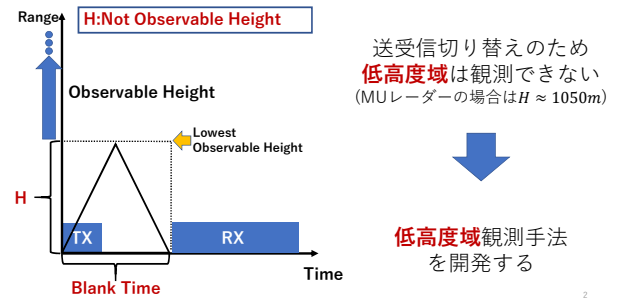
Development of low altitude observation technology by bistatic radar

王元・西村耕司・橋口浩之(京大RISH)

橋本大志・堤雅基(極地研)・佐藤亨(京大)・佐藤薫(東大理)

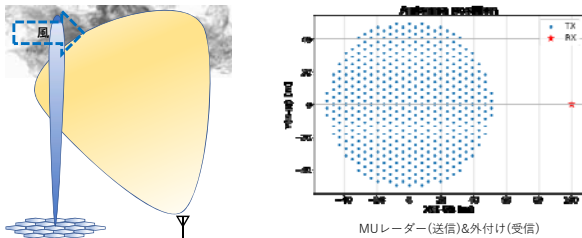
2022/09/06 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

研究背景と目的



研究方法

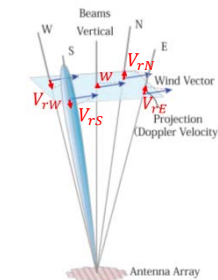
外付け受信専用アンテナによる低高度域の観測



3次元風速と風速分散推定モデルの検討が必要

5ビームDBS(Doppler Beam Swing)

三次元風速を5方向の視線方向ドップラー速度から推定



東西風 u の推定式

$$V_{rE} = w \sin \theta + u \sin \theta$$

$$V_{rW} = w \cos \theta - u \sin \theta$$

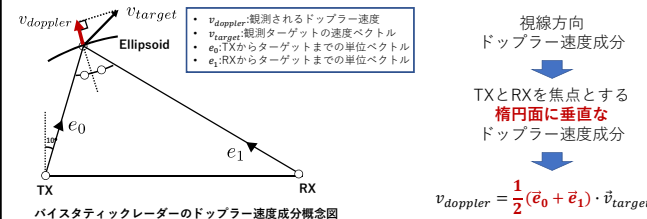
$$u = \frac{V_{rE} - V_{rW}}{2 \sin \theta}$$

南北風 v と鉛直風 w の推定式

$$v = \frac{V_{rN} - V_{rS}}{2 \sin \theta} \quad w = V_{rV}$$

バイスタティックドップラー速度

三次元風速を正しく推定するには、バイスタティックドップラー速度の特性を利用



精度良く推定するには天頂、東西南北5ビームを出すことが必要

バイスタティック法

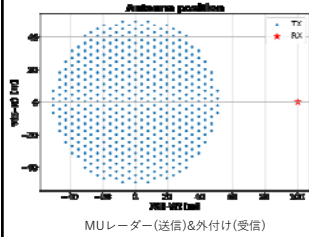
5ビームから得る5つのドップラー速度から一次方程式を解くことにより、**風速の推定**を行う

$$\begin{cases} v_{vd} = \frac{1}{2}(\vec{e}_{v0} + \vec{e}_{v1}) \cdot \vec{v}_{\text{target}} \\ v_{ed} = \frac{1}{2}(\vec{e}_{e0} + \vec{e}_{e1}) \cdot \vec{v}_{\text{target}} \\ v_{wd} = \frac{1}{2}(\vec{e}_{w0} + \vec{e}_{w1}) \cdot \vec{v}_{\text{target}} \\ v_{sd} = \frac{1}{2}(\vec{e}_{s0} + \vec{e}_{s1}) \cdot \vec{v}_{\text{target}} \\ v_{nd} = \frac{1}{2}(\vec{e}_{n0} + \vec{e}_{n1}) \cdot \vec{v}_{\text{target}} \end{cases} \rightarrow \text{行列化} \rightarrow \begin{bmatrix} v_{vd} \\ v_{ed} \\ v_{wd} \\ v_{sd} \\ v_{nd} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \vec{e}_{v0} + \vec{e}_{v1} \\ \vec{e}_{e0} + \vec{e}_{e1} \\ \vec{e}_{w0} + \vec{e}_{w1} \\ \vec{e}_{s0} + \vec{e}_{s1} \\ \vec{e}_{n0} + \vec{e}_{n1} \end{bmatrix} \cdot \vec{v}_{\text{target}}$$

\vec{v}_{target} 以外の成分は既知、**擬似逆行列を用いる**ことで
 \vec{v}_{target} を求める

モノスタティック近似法

送信アレイの中心と外付けアンテナ間の距離を無視し、受信アンテナは送信アレイの中心にあると仮定することを**モノスタティック近似法**という

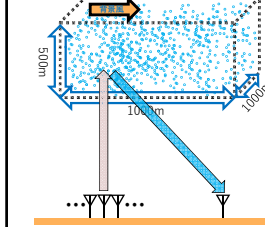


$$\begin{cases} u = \frac{V_E - V_W}{2 \sin \theta} \\ v = \frac{V_N - V_S}{2 \sin \theta} \\ w = V_V \end{cases}$$

- u, v, w : それぞれ東西風、南北風と鉛直流
- V_V : 観測される鉛直ビームのドップラー速度
- E, W, S, N : それぞれは東西南北を指す
- θ : 天頂角

三次元体積散乱シミュレーション

等方性散乱を仮定した準物理的な**散乱シミュレーション**で精度検証をする



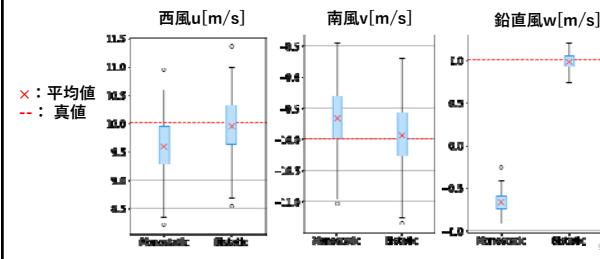
パラメーター設定:

- ビーム方向: 鉛直東西南北5方向
- 観測レンジ: 300m
- 散乱ターゲット数: 2×10^8 個
- 風速: $(u, v, w) = (10, 10, 1) [m/s]$
- 速度分散: $\sigma = 0.5 [m/s]$
- サンプル数: 2000回
- サンプル間隔: 0.032s

散乱シミュレーションで得た信号を処理した後...

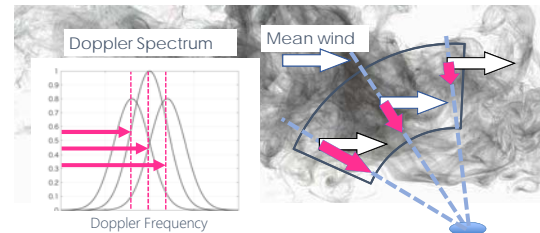
バイスタティックレーダーによる風速推定

散乱シミュレーションを100回行い、**モノスタティック近似法とバイスタティック法を比較する**



ビームブロードニング

レーダービームの広がりにより生じる**スペクトル幅**



求めようとするスペクトル幅より大きくなるので**ビームブロードニングを評価することが必要**

ビームブロードニングモデル

スペクトル観測モデルのフーリエ変換

スペクトル観測方程式: $R(\tau) = F(\tau) \times G(\tau) \times W(\tau)$

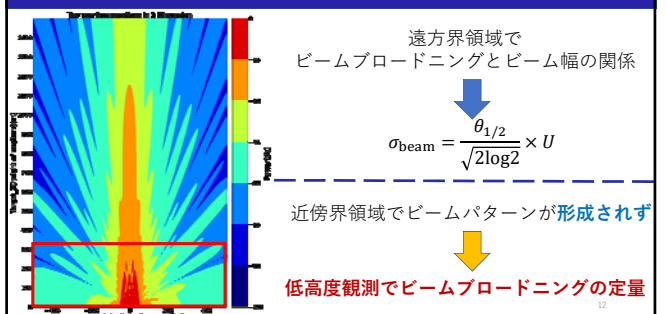
CF (受信信号) (電波散乱) (ビームフィールド) (窓函数)

$F[R(\tau)] = F[F(\tau)] \times F[G(\tau)] \times F[W(\tau)]$

$\sigma_{\text{obs}}^2 = \sigma_{\text{turb}}^2 + \sigma_{\text{beam}}^2 + \sigma_{\text{win}}^2 + \text{error}$

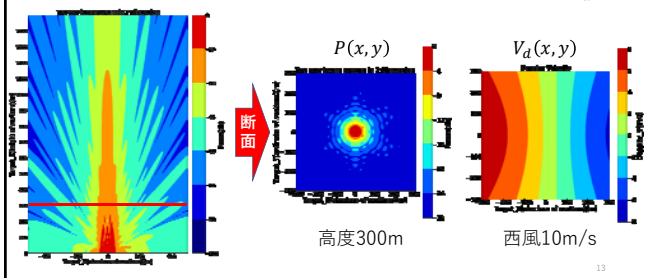
容易に計算

ビームブロードニングの計算



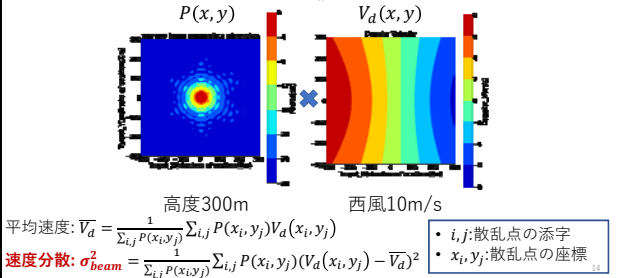
手法1:ビームパターン重み付け評価

高さ300mの水平断面で2-Wayビームパターン P とドップラー速度 V_d を計算



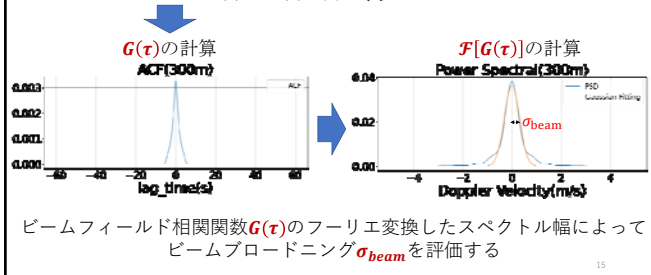
手法1:ビームパターン重み付け評価

ビームパターン P でドップラー速度 V_d を重み付けた2次モーメント



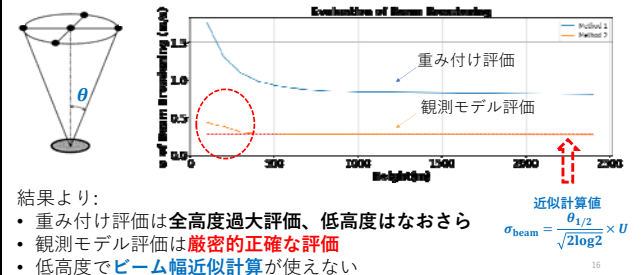
手法2:観測モデルから厳密評価

スペクトル観測方程式 $R(\tau) = F(\tau)G(\tau)W(\tau)$



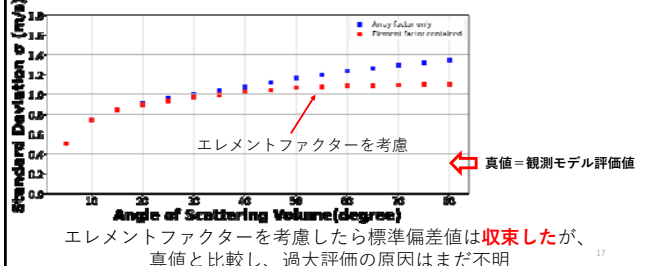
ビームブロードニング評価結果

水平断面領域サイズ $\theta = 45^\circ$ 、背景風西風10m/sのビームブロードニング



ビームパターン重み付け評価の続き

低高度300m、背景風西風10m/sで
計算領域度数とビームブロードニングの関係図

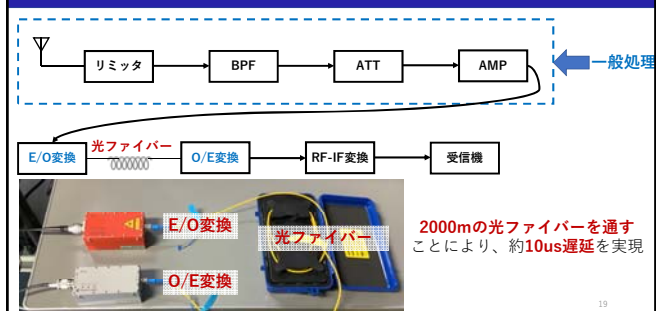


低高度実証実験の準備

信楽MUレーダーを用いて実証実験を行う



低高度実証実験の準備

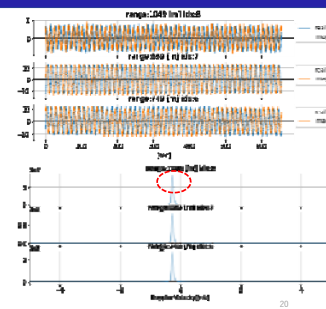


低高度域観測信号解析

取れた信号には**未知な正弦波成分**

観測及び信号処理情報:

- ・ビーム方向：鉛直東西南北5方向
- ・送信：25チャンネル全群
- ・受信：26チャンネル1本
- ・光ファイバー装置あり
- ・シングルパルス 1us
- ・観測持続時間：10min
- ・FFT点数：1875個(1min)
- ・サンプリング間隔：0.032s



まとめと今後の予定

- 大気レーダーには送受信切り替えのため低高度域は観測できないので、外付け受信専用アンテナの設置により、低高度域のバースタティック観測を行う。
- 低高度域観測は主に3次元風速と速度分散を対象とし、それぞれ推定モデルを検討する必要がある。
- 散乱シミュレーションを利用し、バースタティック法とモノスタティック近似法で3次元風速の推定を行った。推定結果より、モノスタティック近似の水平風の推定には非常に大きい誤差は無いが、鉛直風の推定には実用性がなく、バースタティック法で正確な計算をするべきだとわかった。
- 風速分散の推定には、観測モデル評価は厳密的正確な評価しているが、ビームパターン重み付け評価について、アレーファクターとエレメントファクター両方考慮して標準偏差値は収束したが、過大評価の原因はまだ不明で、正しく評価できていない。今は検討しているところ。
- 現在MUレーダーと光ファイバーを用いて、低高度信号が取れて、未知な正弦波成分の解明と解析を行っているところ。

ご清聴ありがとうございました

MUレーダーを用いた DDMA-MIMO観測実験 一月面エコーを用いたビーム幅の検証ー

○松田 知也、西村 耕司、橋口 浩之
(京都大学 生存圏研究所)

目次

1. 研究の背景
2. MIMOレーダーの原理
3. MUレーダーを用いたDDMA-MIMO観測
4. 月面反射エコーを用いたビーム幅の検証 (1)
(送受信アンテナパターン推定)
5. 月面反射エコーを用いたビーム幅の検証 (2)
(高分解能到来方向推定)
6. まとめと今後の予定／課題

1. 研究の背景

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

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



1. 研究の背景

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

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

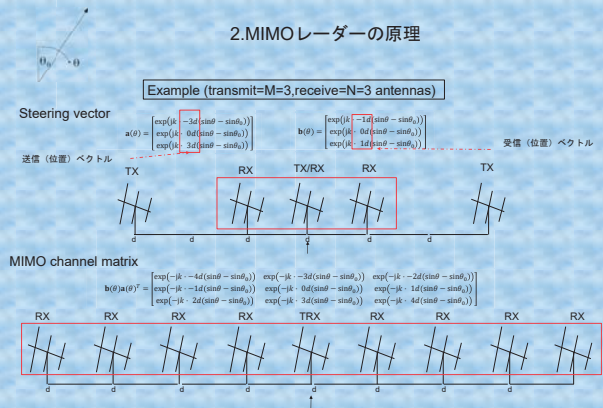


2.MIMOレーダーの原理

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

Type	SISO (Single-Input Single-Output)	SIMO (Single-Input Multiple-Output)	MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)
Configuration	-Single Antenna -Single receiver/Antenna	-Single Antenna (radiation) -Multiple receivers/Antennas	-Multiple transmitters/Antennas (radiations) -Multiple receivers/Antennas
Ex.	-Weather radar (with a parabolic antenna) -Wind profiler radar	-Phased array weather radar -MU radar(*)	-MU radar (大気レーダーで唯一MIMO処理が可能なシステム)
Image			

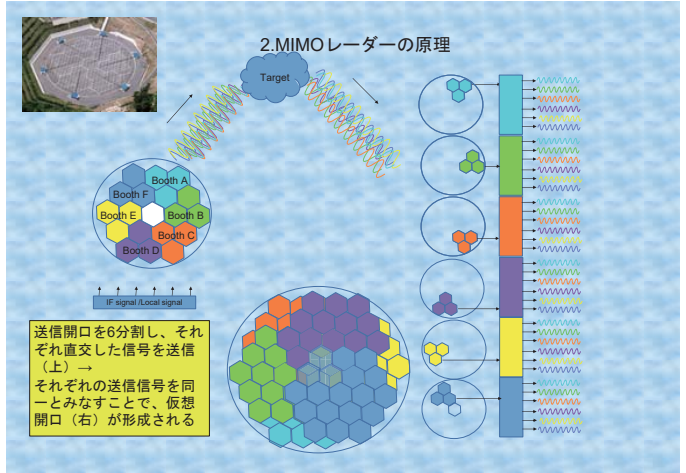
2.MIMOレーダーの原理



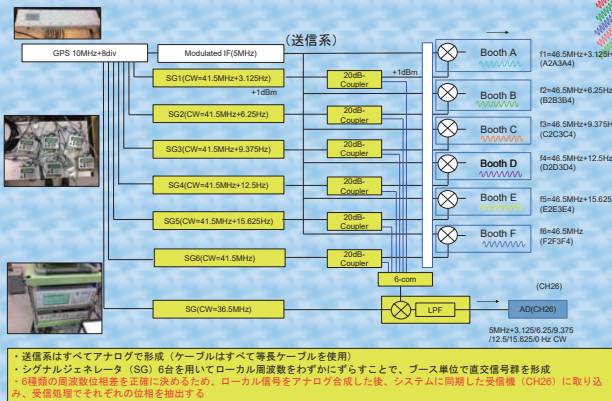
2.MIMOレーダーの原理

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

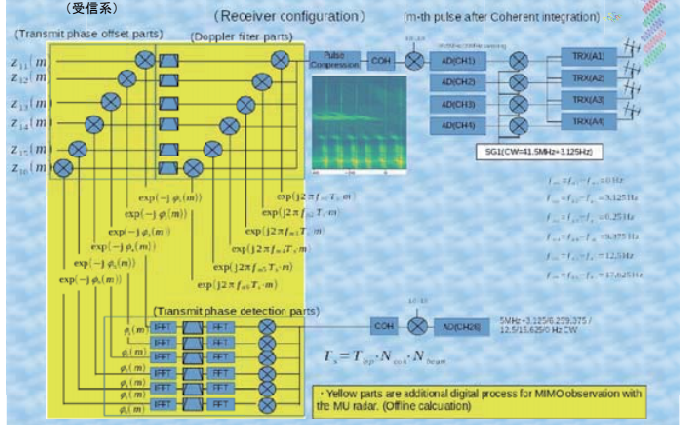
ナイキスト速度が確保しやすいVHF帯はDDMAが適している。
DDMAはMUレーダーでもすぐに実現可能(他の方法はシステムの改造が必要)



3. MUレーダーを用いたDDMA-MIMO観測

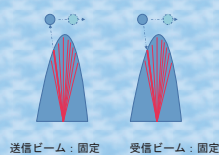
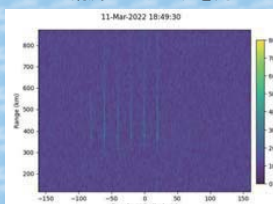


3. MUレーダーを用いたDDMA-MIMO観測

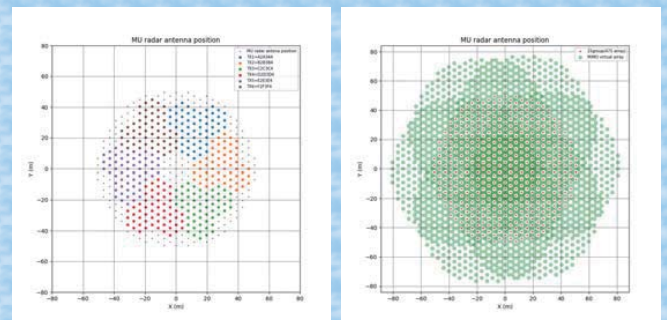


4.月面反射エコーを用いたビーム幅の検証(1) 送受信アンテナパターン推定

- ・送受信ビームは月のラジアル速度がゼロとなる方)に固定
- ・月が送信ビームを横切る形で移動→月面反射エコーの時間変化が送受信アンテナパターンに相当する
- ・通過するための必要時間は約2時間(ビーム角度に換算すると約30°)
- ・2022/3/11に観測実験を実施。参考データ(通常=SIMO観測)は2021/12/17に観測したデータを用いている。



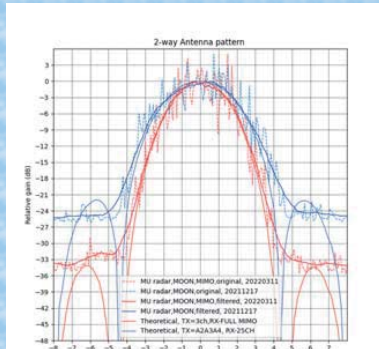
4.月面反射エコーを用いたビーム幅の検証(1) 送受信アンテナパターン推定



送信アンテナ分布: 3群(57本)単位で6つのサブアレーを構成し、それぞれから直交する信号を送信。

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

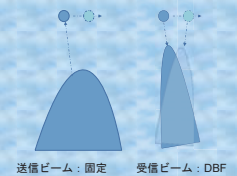
4.月面反射エコーを用いたビーム幅の検証 (1) 送受信アンテナパターン推定



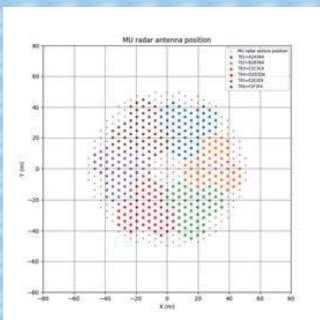
(1)受信データをMIMO処理してプロット (赤点線)、(2)比較のため(1)をスムージング (赤太線) に対して(3)送受信アンテナパターン計算値 (赤細線) が一致→MIMO仮想開口が形成されていることが確認できた。
比較のため、送信1群、受信全群で観測した結果 (21/12/17) も合わせて示している (青点線、青太線、青細線)

5.月面反射エコーを用いたビーム幅の検証 (2) 高分解能到来方向推定

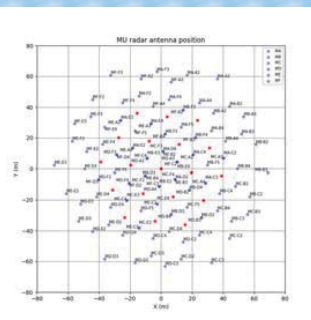
- Beamformer法とCapon法を適用。
- 送信ビームは月のラジアル速度がゼロとなる方向に固定
- 受信は各サブアレーアンテナ単位でデジタルビームフォーミング
- 議論を単純化するため同一開口 (正六角形配置) のサブアレーアンテナ群 (19群) を用いた。
- 2022/3/11に観測実験を実施。参考のための観測 (通常=SIMO観測) は2022/6/25に観測したデータを用いている。
- SIMO観測は送信25群 (全群) 観測、受信は19群を用いている。



5.月面反射エコーを用いたビーム幅の検証 (2) 高分解能到来方向推定



送信アンテナ分布: 3群 (57本) 単位で6つのサブアレーを構成し、それぞれから直交する信号を送信。

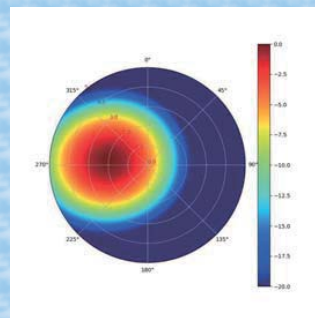


受信アンテナ分布: 19x6=114本の受信アンテナと見なして受信 (青) 赤は物理的な位置を示す

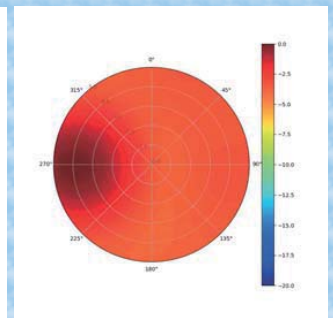
5.月面反射エコーを用いたビーム幅の検証 (2) 高分解能到来方向推定

Beamformer

$$P_{BF}(\theta) = \frac{P_{out}}{\alpha^H(\theta)\alpha(\theta)/2} = \frac{\alpha^H(\theta)R_{xx}\alpha(\theta)}{\alpha^H(\theta)\alpha(\theta)}$$



MIMO(220311)

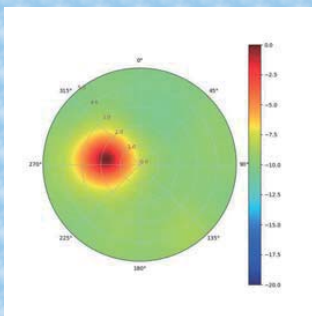


SIMO(220627)

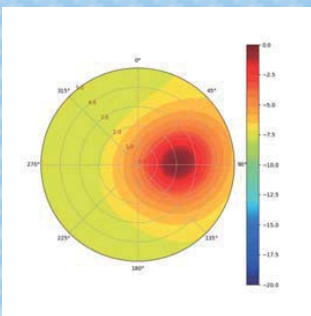
5.月面反射エコーを用いたビーム幅の検証 (2) 高分解能到来方向推定

Capon

$$P_{CAP}(\theta) = 2P_{out} = \frac{1}{\alpha^H(\theta)R_{xx}^{-1}\alpha(\theta)}$$



MIMO(220311)

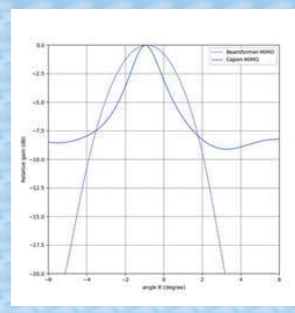


SIMO(220627)

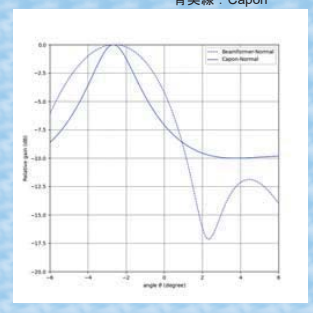
5.月面反射エコーを用いたビーム幅の検証 (2) 高分解能到来方向推定

AZ=90deg cut pattern (Beamformer VS Capon)

青破線: Beamformer
青実線: Capon



MIMO(220311)

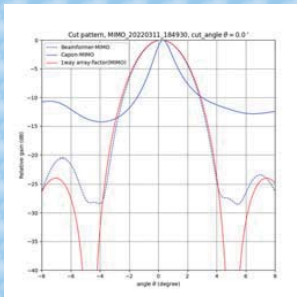


SIMO(220627)

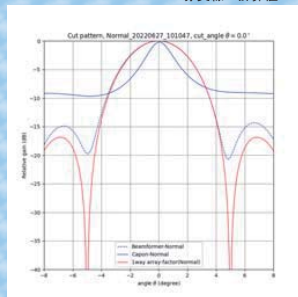
5.月面反射エコーを用いたビーム幅の検証 (2) 高分解能到来方向推定

AZ=0deg cut pattern (Beamformer VS Capon)

青破線: Beamformer
青実線: Capon
赤実線: 計算値



MIMO(220311)



SIMO(220627)

Beamformer法は一様励振アレーの電力指向性パターンと理論上一致する→1wayアンテナパターン計算値を比較したところSIMO、MIMO観測とも良く一致した。
MIMO観測結果の方が、Beamformer/Caponともにより狭い角度分解能を得られている。

6.まとめと今後の予定／課題

【まとめ】

- ・ DDMA-MIMO方式をMUレーダーに適用した。
- ・ 月面反射エコーを利用して、送受アンテナパターンを測定して理論パターンと良い一致をみた。
- ・ 高分解能到来方向推定としてBeamformer/CaponをMIMO受信データに適用し、Beamformer法において理論パターンと良い一致をみた。
- ・ Capon法とMIMOを組み合わせることにより、高い角度分解能を得ることをSIMOと比較することで確認した。

【今後の予定／課題】

- ・ 対流圏観測への適用・実験検討
- ・ 他方式の理論検討 (CDMA)
- ・ MIMO大気レーダー／気象レーダーへの適用理論まとめ