

第11回 MST レーダーワークショップ (MST-11) の報告^{*1}

津 田 敏 隆^{*2}・山 本 真 之^{*3}・古 本 淳 一^{*4}

1. 会議の概要

大気レーダーに関する最新の科学技術について、研究成果の公表ならびに情報・意見交換のために1980年代より数年ごとに開催されている MST レーダーワークショップの第11回会議 (MST-11と通称) が2006年12月11-15日にインドで開催された。(なお, MST は Mesosphere-Stratosphere-Troposphere ; 中間圏・成層圏・対流圏の略である。)

MST-11はインド宇宙科学研究機関 (ISRO : Indian Space Research Organization) に属する国立大気科学研究所 (NARL : National Atmosphere Research Organization) が主催し, 初日はガダンキにある NARL 内の MST レーダー観測所で, 2 日目以降はティルパティ市の Hotel Fortune Kences で開催された。開会式にはインドの A. P. J. Abdul Kalam 大統領が出席された。ワークショップ参加者および州政府関係者など約1,200名が参加するなか, 大統領による特別講義が行われた。インド国内から230名, 海外11ヶ国から55名が参加した。日本人参加者は16名と最多で, 次いで米国11名, フランスとドイツが各 6 名, カナダ 5 名, スウェーデン 3 名, さらに, 英国, ノルウェイ, ペルー, 台湾, イタリアから各 2 名が出席した。

MST-11のプログラム構成を議論する国際運営委員会 (ISC : International Steering Committee) は, J.

L. Chau (ペルー, ヒカマルカ電波観測所), K. S. Gage (米, 海洋大気庁), W. K. Hocking (カナダ, 西オンタリオ大学), E. Kudeki (米, イリノイ大学), D. Narayana Rao (インド, NARL), I. Reid (オーストラリア, アデレード大学), J. Roettger (ドイツ, マックス・プランク研究所), 津田敏隆の 8 名で構成されている。W. K. Hocking が議長, 津田敏隆が副議長を務め, NARL 所長の D. N. Rao が現地の対応を引き受けた。ワークショップは 6 つのセッションで構成されたが, それらの主題は (1) Radar scattering processes in the atmosphere, (2) Ionospheric processes, (3) Instrumentation, Technical and signal processing, (4) Meteorology with Atmospheric Radars, (5) Mean winds, radar temperatures, waves, tides (including CAWSES), (6) Atmospheric forcing and mixing (all levels), including CAWSES である。これらのセッションに総計320の論文が投稿され, うち, 口頭講演が136件, ポスター発表は170件であった (14件が当日キャンセルされた)。

以下, セッション毎の概要を報告する。

(津田敏隆)

2. 大気中のレーダー散乱過程

セッション1では, 大気中の電波散乱機構に関する講演が行われた。本セッションの開始に先立ち, SCOSTEP 議長である Geller (米, ニューヨーク州立大学) より SCOSTEP に対する MST レーダー観測の貢献に対する期待が述べられた。

Fritts (米, コロラド・リサーチ・アソシエイツ) は Kelvin-Helmholtz 不安定 (KHI) の 3 次元シミュレーションから, 乱流散乱エコーを引き起こす Bragg スケール (レーダーの半波長スケール) の屈折率変動

^{*1} Report on eleventh international workshop on technical and scientific aspects of MST radar (MST-11).

^{*2} Toshitaka TSUDA, 京都大学生存圏研究所。

^{*3} Masayuki K. YAMAMOTO, 京都大学生存圏研究所。

^{*4} Jun-ichi FURUMOTO, 京都大学生存圏研究所。

© 2008 日本気象学会

が KHI の渦中心部は小さく乱流層辺縁付近で強くなることを示した。また観測面からは高井 (日本, 京都大学) が MU レーダーの多周波観測とライダーで得られた温度観測データを組み合わせ、強いレーダーエコーが乱流の強い領域ではなく屈折率高度勾配の大きい領域から得られることを示した。Luce (フランス, ツーロン大学) は, MU (Middle and Upper atmosphere) レーダー多周波数観測による KHI 乱流渦の周波数領域干渉計映像法の結果を示し, また Hasenpflug (日本, 京都大学) は, MU レーダーの多ビーム観測と空間イメージング観測を用いてレーダーエコーの空間依存性と風速の鉛直シアーとの関連を示した。

Röttger (ドイツ, マックス・プランク研究所) は Jicamarca (ペルー) の SOUSY (SOUNDing SYstem) VHF レーダーの送受信帯域を広げることによって鉛直分解能を従来の 150 m 程度から 30-40 m まで向上させた高鉛直分解能のデータを示した。こうした新しい観測データは分反射エコーの散乱機構解明に役立つと期待される。

また, Chen (台湾, 建國技術學院) は ST (Stratosphere - Troposphere) レーダーを用いた風速測定のパイアスに関して MU レーダーの多周波・多チャンネル観測を用いて調べた結果を示し, Muschinski (米, マサチューセッツ大学) は, 風速推定に対する “reflectivity flux (反射率フラックス)” の重要性を述べた講演を行った。その他, カナダ・インド・英国・スウェーデンからの研究者による講演が実施された。

(山本真之, 古本淳一)

3. 電子擾乱による散乱

セッション 2 は 2 日目の午後から 3 日目の午前中にかけて行われ, 電離層・中間圏における電子擾乱や, 流星に関連したプラズマ密度の擾乱に起因する電波のコヒーレント散乱やインコヒーレント散乱に関連した理論及び観測結果に関する 64 編の講演が行われた。

最初に電離圏 E 領域及び F 領域における電波の散乱機構に関連した講演が実施された。Woodman (ペルー, ヒカマルカ電波観測所) は 70 年間にわたる赤道域スプレッド F 現象に関するレビューを行った。Patra (インド, NARL) は, 日中に観測される高度 150 km 付近のレーダーエコー観測のレビューと将来展望を示した。斎藤 (日本, 情報通信研究機構) は, MU レーダーの多チャンネル観測結果を用いて, 電

離圏 E 領域及び F 領域における準周期エコーの空間構造を示した。そのほか, インド・米国・ブラジル・日本の研究者による, 口頭及びポスターでの講演が実施された。

引き続き中間圏及び流星に関連した電波の散乱気候に関する講演が行われた。特に Polar Mesospheric Summer Echo (PMSE) や Polar Mesospheric Winter Echo (PMWE) の生成要因に関する講演が行われた。Havnes (ノルウェー, トロムソ大学) は, 電波による人工的な電子の加熱を用いて PMSE を変調した観測結果を示すことにより, PMSE の考えうる発生メカニズムを論じた。PMSE に関する北極域及び南極域における観測結果を述べた多数の講演を通じて, 南極域中間圏においては, 北極域中間圏よりも PMSE の強度が弱く, また PMSE が観測される期間も限られることが示唆された点は注目に値する。

口頭発表のほか, 30 編以上のポスター発表により, 中波 (Middle Frequency; MF) レーダー・MST レーダー・流星レーダーによる観測, ロケット観測, 計算機実験による中間圏及び電離圏 D 領域における研究成果が発表された。

(山本真之)

4. 観測機器, 技術, 及び信号処理

セッション 3 は 1 日目の最後と 2 日目の午前中に実施され, MST レーダーの観測技術側面や新しい観測手法に主眼を置いた 47 編の講演 (29 編はポスター発表, 18 編は口頭発表, うち 4 編は招待講演) が実施された。講演においては, 1) デジタル受信機的设计手法, 2) アレイアンテナを用いたデジタルビームフォーミング, 3) マルチチャンネル受信機, 4) 高分解能観測を実現するためのレーダーシステム最適化, 5) レーダーによる 3 次元イメージング観測及び干渉計観測, 6) バイスタティックおよびマルチスタティックレーダー観測技術, 7) 信号変調器の最適化技術, 8) レーダーイメージングに関する信号処理法の比較, 9) Radio Acoustic Sounding System (RASS) を用いた温度観測, 10) 高鉛直分解能での屈折率観測, 11) レーダーシステムのキャリブレーション, 12) 不要信号 (クラッター信号や干渉信号) の抑圧技術, 13) レーダー送信信号の符号化, 14) 低高度信号の検出手法, などの MST レーダーに関連するハードウェア・ソフトウェア技術を取り扱った講演が行われた。

特に, 複数のアンテナ面からの受信信号を処理する

ことにより乱流や風速の空間分布を知ることが可能である干渉計法やマルチスタティックレーダー技術に関する講演は興味深いものであった。西村（日本，京都大学）による招待講演ではインドネシア・スマトラ島に設置された赤道大気レーダーに外付けのアンテナアレイを設置することによりはじめて実現した対流圏下層の風速空間分布計測手法が述べられた。Hassenpflug は MU レーダーの多周波・多チャンネル観測機能を用いて，レーダーにおける信号イメージング手法の比較結果を示した。

各国で進められている MST レーダーの開発状況に関する講演も本セッションで行われた。Chau（ペルー，ヒカマルカ電波観測所）は米国で開発中の Advanced Modular Incoherent Scatter Radar (AMISR) と呼ばれる UHF 帯高機能レーダーの初期観測結果を示すとともに，広帯域パルスや多周波観測を用いた下層大気の詳細構造解明へ向けての可能性を示した。Kirkwood（スウェーデン，宇宙物理研究所）は，南極における VHF 帯レーダーの観測計画と機器の開発状況を示した。Wannberg（スウェーデン，EISCAT 科学協会）は，高緯度電離圏における電子ドリフト速度の立体構造の解明や干渉計法によるレーダー観測を目的とした EISCAT (European Incoherent Scatter Association) 3D と呼ばれる 240 MHz 帯のマルチスタティックレーダーのシステム概要ならびに観測計画を述べた。インドの MST レーダーでも外付けアンテナによるレーダーの多チャンネル化の計画が進行中であり，Sarma（インド，NARL）は，インドの MST レーダーにおける多チャンネル化に用いるデジタル受信システムの開発状況を示した。また，大気境界層の風速観測を目的とした VHF 帯の小型レーダーの開発に関する講演が，Hocking（カナダ，西オンタリオ大学），McLaughlin（オーストラリア，DeTect），Srinivasulu（インド，NARL）により実施された。（山本真之）

5. 大気レーダーによる気象学

セッション 4 では，MST レーダーの気象学分野への応用に関する講演が行われ，レーダー観測網 (Radar Network)，降水，湿度，水蒸気混合 (Precipitation, Humidity, Water Vapor Mixing)，境界層 (Boundary Layer Meteorology)，前線や山岳循環等による波動生成 (Wave Generation by Meteorological Process (fronts, mountain flow))，気象学一般 (General

Meteorology) のサブセッションに関する多数の講演，活発な議論が交わされた。

レーダー観測網のサブセッションでは，新しく計画されたレーダーネットワークについての講演が 4 件，種々の測器を組み合わせた観測システムが 1 件及び UHF, VHF ウインドプロファイラを用いた対流活動と降雨の観測についての発表が 2 件行われた。Hocking（カナダ，西オンタリオ大学）はオンタリオ，ケベック両州に展開されている VHF 帯ウインドプロファイラネットワークを紹介し，D. N. Rao（インド，NARL）は，インドのレーダーネットワーク構築計画に関する詳細な報告を行った。また，アフリカで最初のレーダーネットワークとなるナイジェリアのレーダーネットワークに関する講演が予定されていたが，残念ながら講演者が参加できずキャンセルとなった。

降水，湿度，水蒸気混合のサブセッションにおいては口頭，ポスター合わせて 27 件の講演が行われた。MST レーダーに UHF や S バンドのレーダーを組み合わせた研究の講演が活発に行われた他，筆者らも取り組むウインドプロファイラを用いた水蒸気プロファイル推定についても 5 件の講演が行われた。また，降雨粒径や Z-R 関係に関する講演が行われた。中村（日本，名古屋大学）による招待講演では GPM (Global Precipitation Measurement) プロジェクトでの，MST レーダーを用いた地上検証への利用への期待が述べられた。

境界層のサブセッションでは 4 件の口頭発表と 8 件のポスター発表が行われた。Lai（台湾，長栄大学）は都市化が進む台湾南部における，深刻な大気汚染イベントの発生と 915 MHz ウインドプロファイラによる風速鉛直構造の関係を議論した。

前線や山岳循環等による波動生成のサブセッションでは 14 件の講演が行われた。Reddy（インド，国立熱帯気象研究所）や Rama（インド，サティッシュ・ドハワン宇宙センター）はインドモンスーンのアクティブ・フェイズ中の熱帯ジェット構造について報告した。また Dhaka（インド，デリー大学）は強い対流イベント発生時の熱帯上部 UTLS (Upper Troposphere Lower Stratosphere) 領域の大気重力波特性を赤道大気レーダーを用いて調べ，鉛直波数 2-3.5 km，周期 10-70 分の重力波が卓越する結果を紹介した。

気象学一般のサブセッションでは 6 件の講演行われた。Nastrom（米，セント・クラウド州立大学）は中緯度の 3 つの MST レーダーのデータを用いて C_n^2

(乱流の屈折率構造定数) と相対渦度の鉛直成分の関係について論じた。また Kumar (インド, ヴィクラム・サラブハイ宇宙センター) はガダンキの MST レーダーとライダー観測データを用いて対流圏界面域の風速条件が熱帯における絹雲の生成に大きな影響を与えていることを論じた。(古本淳一)

6. MST 領域における平均風, レーダー観測による気温, 波動, 及び潮汐 (CAWSES を含む)

セッション 5 は, 「平均風と気温」と「波動 (重力波, 惑星波動), 及び潮汐」をテーマとした講演が行われた。前者では 3 件の招待講演を含む 13 件の口頭発表と 13 のポスター発表, 後者では 6 つの口頭発表と 18 件のポスター発表が行われた。

平均風と気温のサブセッションではまず Avery (米, コロラド大学環境科学協同研究所) により CAWSES の概要および CAWSES における MST レーダーコミュニティの役割についての招待講演が行われた。引き続き行われた Singer (独, 大気物理ライプニッツ研究所) による招待講演では流星エコーの減衰時間から得られた中間圏界面付近の気温の季節変化を極, 中緯度, 低緯度域について調べ冬季の成層圏突然昇温に対する中間圏の温度の応答を議論した。夏期に観測される中間圏の低温と, VHF 帯レーダーでの強い中間圏エコーや夜光雲の発生との関連を議論した。また 2006 年 3, 4 月に行われた CAWSES-India tidal campaign の概要を Gurubaran (インド, 赤道地球物理研究所) が招待講演で紹介した。さらに極域から熱帯域までの様々な領域について平均風や気温の特性についての多くの講演が行われた。観測手段も MST レーダーだけに留まらず, 流星レーダー, MF レーダー, ライダー, 大気光イメージャ観測等の複数測器を組み合わせた研究が多く発表された。流星レーダーを用いた中間圏下部熱圏 (MLT) 領域の気温測定と他測器との比較が多く報告された。

波動 (重力波, 惑星波) と潮汐のサブセッションの口頭発表では, (1) 低緯度 MLT 領域の季節内振動と対流圏内季節内振動の関係, (2) ISRO が 5 年間にわたり実施している中層大気力学プログラムに基づくガダンキとティルネルベリでの長期間観測データを用いた長周期振動 (準二年振動, 一年振動, 半年振動) の解析, (3) 低緯度の VHF 帯レーダー及びラジオゾンデ観測による重力波の解析, (4) MU レーダー・RASS 観測による高い分解能温度観測を用いた大気

安定度変動や波動エネルギー伝搬の解析, が主に議論された。(1) に関して Sridharan (India, NARL) は MJO (Madden-Julian Oscillation) の移動するインド洋の端にあたるインド, インドネシアの流星レーダー, MF レーダーデータを用いて解析した MJO と中間圏季節内振動の関係を報告した。

ポスターセッションでは対流圏界面構造の変化, ライダー観測に基づく成層圏重力波の観測, MST レーダーやライダー観測を用いた低緯度 2/4 日波の観測などの講演が行われた。(古本淳一)

7. (全層を対象とした) 大気強制と混合 (CAWSES を含む)

本セッションは最終日 (5 日目) の午後に実施され, 力学的過程が平均流の変化や大気微量物質の輸送や混合に与える影響に焦点をあてた講演が行われた。本セッションにおいては, 4 編の招待講演を含む 16 編の口頭発表と, 16 編のポスター発表が実施された。本セッションは, さらに運動量フラックス (momentum flux), 結合過程 (coupling processes), 乱流混合 (turbulent mixing), 成層圏-対流圏の交換過程 (stratosphere-troposphere exchange processes) のサブセッションに分けられ講演が実施された。

運動量フラックスのサブセッションにおいて, Gopa Dutta (インド, オスマニア大学) は, インドの MST レーダーの観測データを用いた運動量フラックスの研究成果を示した。また, 異なる緯度における運動量フラックスの観測結果を示すとともに, 短周期重力波が生成する運動量フラックスの低緯度における季節変化や年々変化を正しく見積もる重要性を強調した。Antonia (インド, ヴィクラム・サラブハイスペースセンター) は, レイリーライダーと流星レーダーの観測による運動量フラックスの観測結果を用いて, 半年振動 (semi-annual oscillation: SAO) の成因への重力波の寄与を考察した。

結合過程のサブセッションにおいては, 日本発のプロジェクト (赤道大気上下結合) の研究成果につき, 深尾 (日本, 京都大学) による招待講演が行われた。Ramkumar (インド, NARL) は, 南インドにおけるいくつかの観測サイトにおける MST レーダー・流星レーダー・MF レーダーなどの観測機器結果を示すとともに, これらの機器による観測キャンペーンの必要性を論じていた。

乱流混合のサブセッションでは, Hocking (カナ

ダ、西オンタリオ大学) による招待講演において、MST レーダーによる乱流計測手法に関するレビューが行われた。この分野の第一人者である同氏の発表は過去の観測成果のまとめとして、特に若手の研究者にとり良い勉強の機会であった。Hoffman (ドイツ、大気科学ライプニッツ研究所) は、VHF レーダーで得られた乱流のエネルギー消散率と運動量フラックスの観測データから、対流圏ジェットの通過時に安定度の高い対流圏界面上部で乱流強度の増大が見られることを示した。

成層圏-対流圏交換過程のサブセッションでは、G. Vaughan (英国、マンチェスター大学) と Hooper (英国、マンチェスター大学) による招待講演により、英国の Aberystwyth に設置された MST レーダーと航空機との同時観測による対流圏界面近傍の観測結果が示された。講演では山岳波やシア不安定による重力波の砕波や乱流強度の増大が詳細に示されており、優れた時間及び鉛直分解能を持つレーダーと、空間的な温度や風速の観測が可能である航空機との同時観測の有用性を改めて実感するものであった。また、T. N. Rao (インド、NARL) は、Esrang MST Radar (ESRAD) とオゾンゾンデで得られた 6 年間の観測データを用いて、北極域における圏界面沈降 (Tropopause Folding) は冬季に多く発生することを述べた。

(山本真之)

8. おわりに

今回は35歳以下の若手研究者を対象に Best paper

award が設けられ、下記の15名が受賞した。セッション (1) 高井智明 (日本、京都大学), (2) Smitha V. Thampi (インド、宇宙物理研究所), 斎藤 享 (日本、情報通信研究機構), (3) Manas R. Padhy (インド、NARL), Tom Grydeland (ノルウェー、トロムソ大学), Arpit Gupta (インド、情報通信技術大学), 西村耕司 (日本、京都大学), (4) 古本淳一 (日本、京都大学), Padmavathi Kulkarni (インド、NARL), Debhashis Nath (インド、NARL), K. N. Uma (インド、NARL), (5) K. Kishore Kumar (インド、ヴィクラム・サラブハイ宇宙センター), S. Sridharan (インド、NARL), Simon Peter Alexander (日本、京都大学), (6) Maria Antonia (インド、ヴィクラム・サブライハイ宇宙センター)。また深尾 (日本、京都大学), Woodman (ペルー、ヒカマルカ電波観測所), P. B. Rao (インド、NARL) がこれまでの MST レーダーの技術的・大気科学的発展に関する功績を称えられ、honorable speech を行った。会議最後には、次回の MST レーダーワークショップ (MST-12) が2009年にカナダ・オンタリオ州・ロンドンで開催されることが決定された。

(津田敏隆)

略語一覧

CAWSES: Climate And Weather of the Sun-Earth System

SCOSTEP: Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics