

MUレーダー全国国際共同利用専門委員会

1. 共同利用施設および活動の概要

信楽 MU 観測所は、滋賀県甲賀市信楽町神山の国有林に囲まれた山中に 1982 年に開設された。観測機器の中核を担う MU レーダー（中層・超高層大気観測用大型レーダー；Middle and Upper atmosphere radar）（図 1）は、アジア域最大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 500 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。

MU レーダーの最大の特徴は、アンテナ素子毎に取り付けた小型半導体送受信機（合計 475 個）を個別制御することにより、1 秒間に 2500 回という高速でレーダービーム方向を変えることが可能であり、また、25 個のサブアレイアンテナに分割して使用することも可能である点である。こうした柔軟なシステム設計のため、大型大気レーダーとしての感度は世界 4-5 番目ではあるものの、開発後 25 年を経た今も世界で最も高機能な大型大気レーダーとして活躍を続けている。なお、2010 年 9 月 3-4 日には MU レーダー 25 周年記念祝賀式典および 25 周年記念国際シンポジウムが京都大学宇治キャンパス宇治黄檗プラザにおいて開催された。

なお、MU レーダーシステムには、レーダー、計算機工学の進歩に合わせ最新のレーダー観測技術を導入しシステム拡充が行なわれている。すなわち 1992 年に「実時間データ処理システム」、1996 年に「高速並列レーダー制御システム」、2004 年に「MU レーダー観測強化システム」が導入された。特に、最近導入されたが MU レーダー観測強化システムでは、空間領域及び周波数領域の柔軟なレーダーイメージング観測が可能となった。

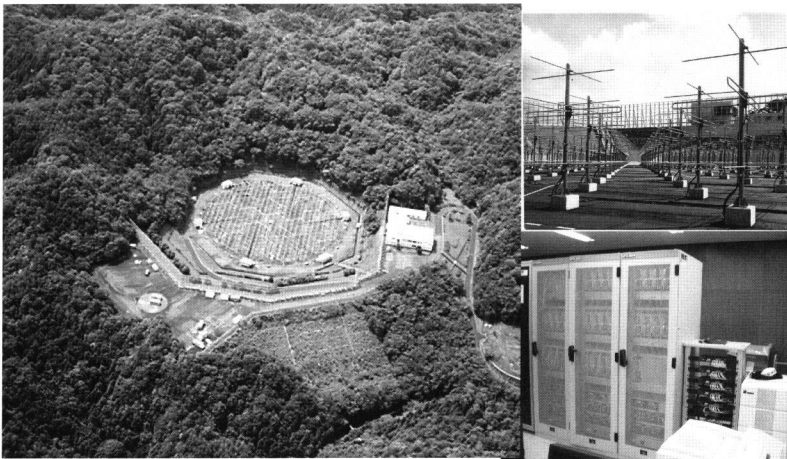


図 1: 信楽MU観測所全景（左）と MU レーダーアンテナアレイ(右上)、MU レーダー観測強化システムで導入された超多チャンネルデジタル受信機（右下）。

信楽 MU 観測所には、アイオノゾンデ、ラジオゾンデ受信機、レイリー・ラマンライダー装置、L帯境界層レーダー、RASS 用音波発射装置等の機器が設置されている他、地上気象観測装置、高感度自記雨量計による地上の気圧・気温・湿度・風向・風速・降雨量の同時測定が行なわれ共同利用に供されている。アイオノゾンデは地上から送信電波周波数を変化させながら電波を発射し、電離層からの反射波を受信することで電子密度の高度分布を観測する。一方で、ラジオゾンデ観測は、ヘリウムを充填した小型気球に観測装置を取り付けて放球し、高度 30km 付近以下の気圧、気温、湿度、風向、風速分布を測定する。なお、1999 年には「レーダー・ライダー複合計測システム」によりレイリー・ラマンライダーシステムおよび下部熱圏プロファイラレーダー(LTPR)が導入され、中層大気及び下部熱圏の観測体制が強化された。

信楽 MU 観測所は、MU レーダーと協同観測するさまざまな大気観測機器の開発フィールドとしても活用されている。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)は、気象庁の全国 31 カ所の現業用ウインドプロファイラとして採用されている。

上記の通り、近年は信楽 MU 観測所に多くの関連観測装置が集積しつつあり、大気観測の一大拠点となりつつある、今後は MU レーダーの新機能や周辺観測装置を一層充実させこれらの共同利用を推進する。

なお信楽 MU 観測所には共同利用者のための研修室、宿泊施設が整っており、インターネット環境やテレビ会議システムも整備されており、利用者からの積極的な測定機器等の持ち込みや、研究会の開催などへの利便性も計られている。

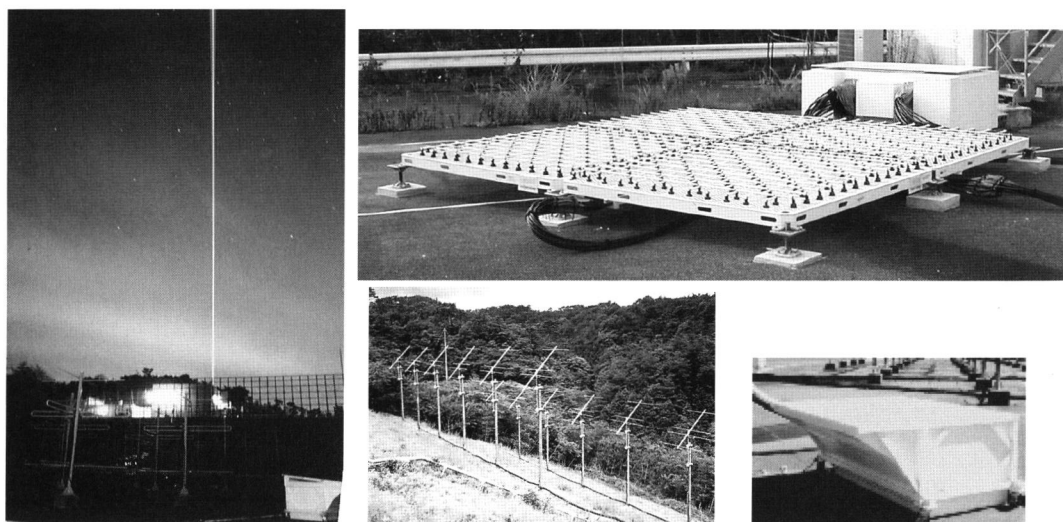


図 2： 信楽 MU 観測所に設置されたレイリー・ラマンライダー (左)、下部対流圏レーダー (右上)、下部熱圏プロファイラレーダー(LTPR)(下中)、RASS スピーカー(下右)

2. 共同利用研究の成果

下記に、近年の共同利用研究の成果を2件記述する。また主な修士論文、博士論文のリスト、共同利用研究の成果による学術賞および学術論文誌に発表された論文リストを文末に示す。

1. 「対流圏の3次元超多チャンネルイメージング」

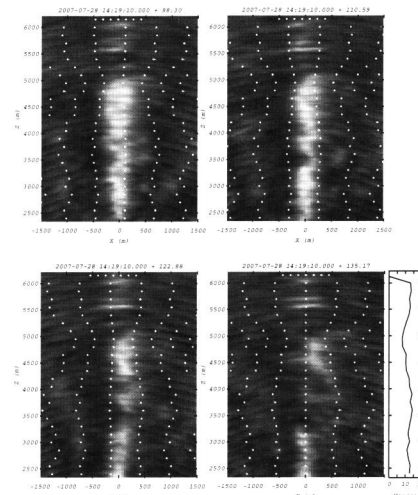
西村耕司（情報・システム研究機構）、佐藤亨（京大院情）、佐藤薫（東大院理）

乱流散乱の微細構造を可視化するため、MUレーダーによる空間・周波数多チャンネル干渉計観測を利用した3次元高分解能イメージング法の開発を行っている。高い空間・時間分解能を実現することで、レーダーの視野を通過する間の散乱構造の変化が観測可能となり、乱流現象の理解が深められることが期待される。

MUレーダーは5周波までの送受信周波数切り替え機能および25群のサブレイ分割受信機能を有しており、これにより最大125チャンネルの空間・周波数干渉計を構成することができる。基本的には、対象の3次元位置に対応する位相回転を与えて受信信号を加算することにより、3次元空間各点における散乱信号強度の推定像を得ることができる。高分解能な推定像を得るためには、注目する空間位置以外からの散乱信号を除去した推定を行う必要があり、最小分散推定(Capon法など)や雑音部分空間射影を用いる方法(MUSIC法など)いくつかの選択肢が存在する。ここでは、分布散乱体に対して最も良い特性を示すCapon法を用いる。

散乱体となる乱流は背景風による移流によりレーダーに対して移動しているが、チャンネル間相関行列の積分時間内の移流が一定以上になると正しい像が得られなくなる(Nishimura and Sato, 2008)。そこで強度推定の対象とする空間を仮想的なセルに分割し、各セル毎の可視化処理において、移流によるチャンネル間位相差の時間変化が0となるよう位相補正を行う。この処理では、各セル毎に125次元の一次方程式の解を求めるため、計算量は比較的大きなものとなる。

2007年7月28日の観測で得られたデータに対してイメージング処理を行った結果のXZ(東西-鉛直)断面を図3に示す。送受信ビーム方向は天頂、時間分解能は6秒とした。高度3000から4000m付近で西側より移流してきた構造が、変化しながら視野内を通過していく様子を捉えている。東西背景風はおおよそ東向き15m/sである。分解能は対象の構造に依存するため一様でないが、レンジ方向、クロスレンジ方向共に最高で5倍程度になっている。各画像中央部(X=0)で上下に伸びる高輝度のカラムは、主にビームパターンと散乱の非等方性による強調効果によるものである。このようにエコー強度の推定空間分布は、所望の乱流強



度分布にシステマティックなオフセットが重畳したものとなる。特に非等方性による変化はダイナミックであり、時間平均による推定が困難なため除去が容易でない。このため、移流を積極的に利用した乱流強度の推定を試みている。

2. 「成層圏突然昇温時の電離圏観測」

H. Liu・山本衛（生存研）、大塚雄一（名大 STE 研）、川村誠治（NICT）

成層圏突然昇温(SSW)は、冬季の極域で成層圏の気温が急激に数十度も上昇する現象である。最近、SSW が全球の電離圏に大きく影響することが明らかになり、国際的な共同観測が実施されている。MU レーダーでは、2010年1月にSSW イベントが電離圏標準観測中に発生したため、観測時間をやりくりして初めて対応できた。本年度は観測課題を得て準備し、2月1日のイベントを含む1月29日～2月5日に観測できた。解析結果が楽しみである

3. 共同利用状況

MU レーダー観測全国国際共同利用の公募は年間2回（前期(4～9月)と後期(10～3月)）にわけて実施している。応募課題は「MU レーダー全国国際共同利用専門委員会」によって審査され観測スケジュールが決定されている。その運用時間は年間約 3,000 時間以上であるが、申請される観測延べ時間は共同利用観測に供することのできる合計を上回るため「大気圏」および「電離圏」の標準的観測を定期的に設けて、複数の研究課題が同じ標準観測データを共用している。また、観測時間を重点的に割り当てる「キャンペーン観測」も行われている。表1に過去7年間の採択課題数および共同利用者数の推移を示す。またこれまでの共同利用課題数と観測時間の推移を図4に示す。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。

表1: 過去7年間の採択課題数、共同利用者数

年度	平成 16 年	平成 17 年	平成 18 年	平成 19 年	平成 20 年	平成 21 年	平成 22 年
採 択 課 題 数 *	48 (0)	48 (2)	54 (6)	49 (2)	59 (8)	54 (10)	51 (5)
共 同 利 用 者 数 **	223	162	102	215	310	261	292 (学内 103 学外 189)

* ()内数字は国際共同利用課題数、 ** 研究代表者および研究協力者の延べ人数

4. 専門委員会の構成及び開催状況（平成22年度）

○委員会開催実績：

第1回委員会 2010年9月3日 11:30-13:00、第2回委員会 2011年3月7日 14:00-16:00

○委員会構成：

藤吉康志（北大）、岡野章一（東北大）、高橋正明（東大）、塩川和夫（名大）、山中大

学（海洋研究開発機構）、廣岡俊彦（九大）、中村卓司（国立極地研究所）、村山泰啓（情報通信研究機構）、Robert D. Palmer（オクラホマ大）、A.K. Patra（NARL）、家森俊彦（京大理学）、佐藤亨（京大情報学）、津田敏隆（京大 RISH）、塩谷雅人（京大 RISH）、山本衛（委員長・京大 RISH）、橋口浩之（京大 RISH）、吉村剛（京大 RISH）、高橋けんし（京大 RISH）、山本真之（京大 RISH）、古本淳一（京大 RISH）

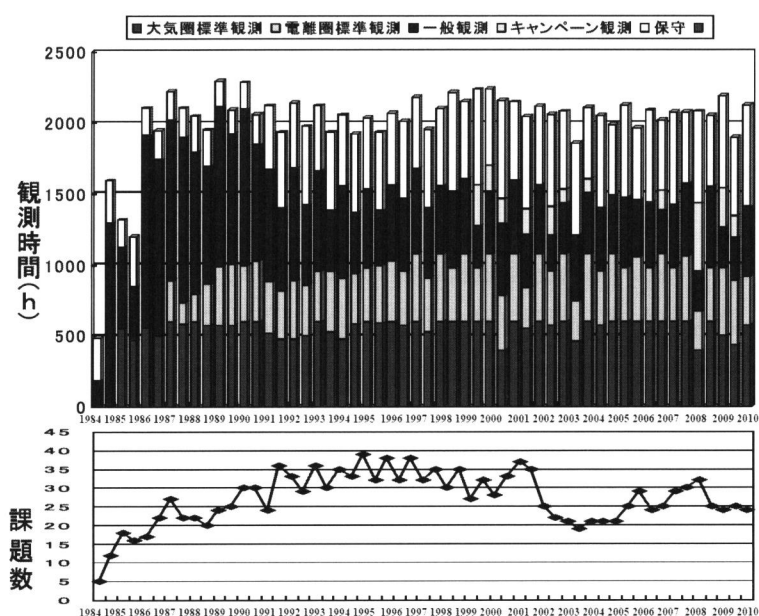


図 6 MU レーダー観測共同利用の観測時間及び課題数の年次推移

修士論文リスト(2004 年以降)

(所外)

- 松村充、「地表一熱圏間の音波共鳴の観測的研究」、京都大学理学研究科修士論文、2009.
- 坂崎貴俊、「WINDAS および MU レーダで明らかになった日本上空の対流圏～下部成層圏の風の日変動」、北海道大学大学院環境科学院修士論文、2010.
- 原田 知幸、「マルチスタティック大気レーダーと適応信号処理による高空間分解能 3 次元風速場推定法」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2008.
- 伊藤毅、「BS 受信レベル変動を用いた Ku 帯電波対流圏シンチレーションの変動特性の解析」、大阪電気通信大学大学院工学研究科修士論文、2007.
- 後藤 英公、「赤道大気レーダーのマルチスタティック化による 3 次元風速場推定法の開発」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2006.
- 小野間史樹、「レーダー・光学同時観測による電離圏 E 領域電子密度不規則構造に関する研究」、名古屋大学大学院工学研究科修士論文、2005.
- 福井 哲央、「MU レーダー観測による晴天自由大気における乱流拡散に関する研究」、京都大学大学院理学研究科修士論文、2004.
- 福尾 憲司、「マルチスタティック大気レーダによる風速推定精度の検討」、京都大学大学

院情報学研究科修士論文、2004.

小竹論季、「GPS 観測網を用いた日中の中規模伝搬性電離圏擾乱の研究」、名古屋大学大学院工学研究科修士論文、2004.

鈴木臣、「A study of gravity waves in the mesopause region using all-sky airglow imagers (全天大気光イメージャーを用いた中間圏重力波の研究)」、名古屋大学大学院理学研究科修士論文、2004.

柏柳太郎、「擬似雑音系列を用いた風観測用流星レーダに関する研究」、東京都立大学大学院工学研究科修士論文、2004

(所内)

池野伸幸、「可搬型 X 帯及び Ka 帯気象レーダーの開発に関する研究」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2011.

脇阪洋平、「ソフトウェア無線技術を用いたウィンドプロファイラー用デジタル受信機の開発」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2011.

太田修史、「小型ラマンライダーを用いた地表付近の水蒸気分布のフィールド観測」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2010.

森谷裕介、「大気境界層観測用イメージングウインドプロファイラの開発」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2010.

篠田智仁、「Continuous observation of temperature profile by the 443MHz wind profiling radar with RASS in Okinawa」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2009.

岸豊久、「VHF 帯大気レーダーとライダーによる日抗す院内および周辺の風速観測」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2008.

青木祐一、「統合観測 FERIX-2 による中緯度電離圏 E-F 領域相互作用に関する研究」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2008.

松ヶ谷篤史、「Frequency domain interferometric imaging to monitor detailed temperature profiles with the MU radar-RASS measurement」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2007.

高井智明、「Characteristics of scattering layers in the troposphere revealed by simultaneous observations with a Raman/Mie lidar and the MU radar」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2007.

前川暁紀、「レーダーと GPS-TEC 観測に基づく中緯度電離圏 E・F 領域の電磁氣的相互作用に関する研究」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2006.

井村真悟、「Development of a new humidity-retrieval algorithm from turbulence echo power」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2006.

杉本尚悠、「Development of a water vapor Raman LIDAR for boundary layer observation」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2006.

福島徹也、「A study on variability of airglow structure with dual-site imaging

- observations]、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2004.
- 博野雅文、「Investigations on the Spatiotemporal Structure of Turbulence Back-scattering in the Troposphere and Lower Stratosphere Based on the MU radar Observations]、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2004.
- 丸本雅人、「SEEK-2 観測キャンペーンにおける中緯度電離圏 { V_{it} E} 領域イレギュラリティの空間構造に関する研究」、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2004.
- 岩井聡、「An estimation method of humidity profiles using a wind profiler radar with RASS]、京都大学大学院情報学研究科修士論文、2004.

博士論文リスト(2004年以降)

- 梅本泰子、「Studies on orographic rainbands based on combined wind profiler-weather radar observations」、京都大学大学院理学研究科博士論文、2007
- 小竹論季、「Statistical study of global behavior of medium-scale traveling ionospheric disturbances based on GPS observation」、名古屋大学大学院工学研究科博士論文、2007.
- 鈴木臣、「Study of mesospheric gravity wave dynamics based on airglow imaging observations at middle and low latitudes」、名古屋大学大学院理学研究科博士論文、2007.
- 植松明久、「An Observational Study of Fog Structure and Dynamics with a Millimeter-Wave Scanning Doppler Radar」、京都大学大学院情報学研究科博士論文、2006.
- 吉村玲子、「Contribution of gravity waves to ionization layers in the lower E region (Rocket-ground-based observations of the lower thermosphere/ionosphere)」、東京大学大学院理学研究科博士論文、2004.
- Gernot Hassenpflug、「Study of Turbulence Structures in the Lower Atmosphere Using Spaced Antenna Techniques With the MU Radar」、京都大学大学院情報学研究科博士論文、2004.
- 横山竜宏、「A study of midlatitude ionospheric E-region irregularities with rocket/radar experiment and numerical simulation」、京都大学大学院情報学研究科博士論文、2004.

学会賞(2004年以降)

- 中村卓司、平成22年5月26日 光学・電波協同観測による大気波動の励起・伝播・碎波の研究、地球電磁気・地球惑星圏学会、田中館賞、2010.
- 深尾昌一郎、「大気レーダーの開発と活用による気象学・気象技術の発展への貢献」、日本気象学会藤原賞、2009.
- 橋口浩之、「下部対流圏レーダーの開発とその大気観測研究への応用」、日本気象学会堀内

賞、2008.

山本 衛、中緯度電離圈イレギュラリティの構造と発生機構に関する研究、地球電磁気・地球惑星圏学会、田中館賞、2007.

主な学術論文

特に被引用回数の多い論文 10 件を示す (回数を[括弧内]に表示)。末尾に「*」を付した 3 件は、第三者が研究成果を 2 次的に利用 (引用) した論文で、キーワードに「MU radar」を含んでおり、学会への MU レーダーの浸透の深さを示す例となっている。

Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, et al., The MU radar with an active phased-array system, 1. Antenna and power-amplifiers, *Radio Sci.*, **20** (6), 1155-1168, 1985. [被引用回数 : 179]

Tsuda T., M. Nishida, C. Rocken, et al., A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET), *J. Geophys. Res.*, **105** (D6), 7257-7273, 2000. [164]

Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, et al., The MU radar with an active phased-array system .2. In-house equipment, *Radio Sci.*, **20** (6), 1169-1176, 1985. [144]

Alexander, M. J., Interpretations of observed climatological patterns in stratospheric gravity wave variance, *J. Geophys. Res.*, **103** (D8), 8627-8640, 1998 [132] *

Yamamoto, M., S. Fukao, R. F. Woodman, et al., Midlatitude E-region field-aligned irregularities observed with the MU radar, *J. Geophys. Res.*, **96** (A9), 15943-15949, 1991. [124]

Mathews, J. D., Sporadic E: current views and recent progress, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **60** (4), 413-435, 1998. [118] *

Woodman, R. F., M. Yamamoto, S. Fukao, Gravity-wave modulation of gradient drift instabilities in the midlatitude Sporadic-E irregularities, *Geophys. Res. Lett.*, **18** (7), 1197-1200, 1991. [112]

Osullivan, D., T. J. Dunkerton, Generation of inertia-gravity waves in a simulated life-cycle of baroclinic instability, *J. Atmos. Sci.*, **52** (21), 3695-3716, 1995. [105] *

Fukao, S., M. D. Yamanaka, N. AO, et al., Seasonal variability of vertical eddy diffusivity in the middle atmosphere. 1. 3-year observations by the Middle and Upper-atmosphere radar, *J. Geophys. Res.*, **99** (D9), 18973-18987, 1994. [103]

Fukao, S., M. C. Kelley, T. Shirakawa, et al., Turbulent upwelling of the midlatitude ionosphere. 1. Observational results by the MU radar, *J. Geophys. Res.*, **96** (A3), 3725-3746, 1991. [102]