

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18340140  
 研究課題名（和文）MU レーダー・RASS 観測による風速・気温・水蒸気の微細変動特性の研究

研究課題名（英文）Study on the wind velocity, temperature and humidity variation revealed by MU radar-RASS measurements

研究代表者  
 津田 敏隆 (TSUDA TOSHITAKA)  
 京都大学・生存圏研究所・教授  
 研究者番号：30115886

## 研究成果の概要：

本研究では、大気レーダーに音響発射装置を付加した RASS (Radio Acoustic Sounding System) を活用して、気温・風速・水蒸気の時間・高度分布を精測し、大気波動、乱流、積雲の動態を解明した。信楽MU観測所、沖縄の443MHz レーダー (NICT)、西スマトラの赤道大気レーダー (EAR)、およびガダンキのMST レーダーによる観測を実現し、得られたデータを衛星観測ともあわせて気象擾乱の特性解析を明らかにした。また最新のレーダー技術を適用して RASS の気温鉛直分解能を向上させた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,700,000円	0円	5,700,000円
2007年度	5,000,000円	1,500,000円	6,500,000円
2008年度	3,600,000円	1,080,000円	4,680,000円
総計	14,300,000円	2,580,000円	16,880,000円

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：気象・海洋物理・陸水

キーワード：ウインドプロファイラ、RASS、気温観測、大気擾乱、沖縄、インド、干渉計

## 1. 研究開始当初の背景

対流圏、下部成層圏の気象現象を解明するには、大気の運動、温度、水蒸気という3つの気象要素を精密に観測することが必要である。特に前線、台風、集中豪雨など局所的気象擾乱のメカニズム解明にはこれらを同時かつ高分解能で観測することが極めて重要である。気温、水蒸気はそれぞれ大気の安定度や、降雨雲形成などを支配する重要な物理量であるがこれらのリモートセンシング手法は難しく、従来の観測手法としては温度、水蒸気センサーを搭載したラジオゾンデを気球により上空に飛翔させる直接観測が標準的観測手段として用いられてきた。このラ

ジオゾンデ観測のデータサンプル間隔は数時間であり激しい気象現象を捉えることは不可能であった。

RASS (Radio Acoustic Sounding System) はレーダーと音波源を併用し大気温度を推定する手法である。強力な音波を地上の音波源から発射し、音波に伴う大気屈折率変動による電波散乱体を人工的に上空に形成する。これにレーダー電波を照射して受信した散乱のドップラー周波数シフトから大気温度を観測する間接測定手法である。研究代表者らは RASS を大型の VHF 帯大気レーダーである MU (Middle and Upper atmosphere) レーダーに応用することで、対流圏、下部成層圏の大

気温度を時間分解能 3 分、高度分解能 150m で測定することに成功している(Tsuda et al. 1994)。さらに MU レーダー・RASS で取得されるデータを高度利用し大気乱流エコー特性と RASS により推定される温度から水蒸気の高高度分布を推定する手法を開発することに成功している(Tsuda et al. 2001; Furumoto et al., 2003)。これにより時間分解能数分、高度分解能 150m で風速、温度、水蒸気を観測することに成功している。これらの研究代表者らが開発してきた大気レーダーの高度利用手法を、MU レーダーをはじめとする各種の大気レーダーに活用することにより風速、温度、水蒸気分布及び乱流強度を同時観測し、気象擾乱に伴う時間変動及びその詳細特性を得ることが重要である。

さらにレーダー観測により得られる 3 次元風速より小さなスケールの擾乱である大気乱流は、運動エネルギーを顕熱エネルギーへ受け渡す役割を果たしている。またオゾンや二酸化炭素など大気微量物質の鉛直拡散、混合にかかわる重要な気象要素である。この乱流の生成機構を詳細に知るためには風速、温度の微細構造を乱流強度と同時に高い鉛直分解能で観測することが重要である。

2004 年には MU レーダーに超多チャンネル受信システムが導入され、MU レーダーの中心送信周波数を 46-47 MHz で変化させて異なる中心周波数の受信電波に最適な複素重みを乗じて合成することでレーダーの受信高度レンジ内部の微細構造が得られる FII(Frequency domain Interferometric Imaging)が適用可能となった。一般に大気水平方向に薄い層構造をしていることが知られており、風速、温度の微細構造を乱流強度の関係を調べるには高い鉛直分解能でのこれらの同時観測が重要である。

## 2. 研究の目的

本研究では研究代表者らが開発してきた大気レーダーの高度利用手法を活用することにより風速、温度、水蒸気分布及び乱流強度を同時観測し、気象擾乱に伴う時間変動及びその詳細特性を観測することを目的とした。今までの開発により従来の気球観測の観測間隔(数時間)と比べて時間分解能 3 分と極めて良い時間分解能で大気風速、温度、水蒸気を同時に観測することができるようになった。本研究ではこの技術を活用して気象擾乱のメカニズム解明に活用する。研究申請当初の具体的な研究目的は以下の通りである。

### (1) 気象擾乱に伴う風速、温度、水蒸気分布の詳細解析

RASS 観測で得られた気温・風速データ等(時間分解能数分)を解析し、従来の気球観測に(数時間)と比べ、数十倍も良い時間分解能で、大気現象の詳細特性を

解明し、気象擾乱のメカニズムを研究する。

従来の RASS 観測で蓄積されたデータ、ならびに新たに行う RASS 観測で熱力学過程を支配する大気パラメータを同時に測定し、得られたデータを用いて気象擾乱の解析を行う。

### (2) 風速、温度の微細構造観測手法の開発

従来の MU レーダーを用いた風速、温度、水蒸気構造観測の水平鉛直分解能を向上させる技術開発を行う。実際に、MU レーダー観測強化システムを用いた MU レーダー・RASS 観測を行い、観測データに最新の信号処理技術を応用することでレーダー探査領域内の微細構造を観測する。

## 3. 研究の方法

本研究では、RASS を活用したレーダー観測を実施し、得られたデータの解析から大気擾乱特性を研究する。具体的研究方法は以下の通りである。

### (1) VHF レーダー・RASS による風速・気温・水蒸気・乱流の精密観測

大型 VHF レーダーである MU レーダーや EAR 等に RASS を適用して、風速・気温を時間分解能数分高度分解能 150m という高分解能で観測する。なお同時に、水蒸気プロファイルも大気レーダーから得る。得られたデータを用いて気象擾乱時の気温の変動特性や大気波動特性を調べる。また、乱流のエネルギー消散率や鉛直拡散係数を大気レーダー・RASS から観測する手法を用いて乱流特性を同時に解析する。

### (2) レーダー干渉計技術を用いた気温の微細構造の観測

MU レーダーの多チャンネル受信システムによる複数周波数観測機能を用いた RASS 観測を行い、従来と比べて数倍高い鉛直分解能の観測を実現する。MU レーダー・RASS イメージング観測に加えてラジオゾンデ観測を併用して、データ検証を行う。

### (3) 沖縄での RASS 観測の実現

情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センターが沖縄県国頭郡恩納村に運用している 443 MHz ウインドプロファイラを用いた RASS (443 MHz WPR・RASS) 観測を実現し、台風や梅雨前線に伴う豪雨など亜熱帯特有の気象現象の解明を目指す。

### (4) 熱帯域積雲対流活動の温度、水蒸気微細構造の観測

熱帯域の積雲対流活動は全球規模の気候変動に影響を与えることが知られている。その微細構造を観測することを目的として、インドネシア・赤道大気レーダーにおける RASS 観測を実現する。さらにインド・国立大気科学研究所との共同で

ガダンキ・MST レーダーでの RASS 観測実験を実現し、下部成層圏までの気温微細構造を観測する。

#### 4. 研究成果

##### (1) VHF レーダー・RASS による気温・水蒸気・乱流の精密観測

MU レーダー及び EAR を用いた RASS 観測を実施した。さらに RASS 観測で得られた気温観測結果を用いて気温や乱流パラメータの詳細構造を解析した。4 日間にわたって連続的に下部対流圏まで観測できた夏期の観測例について、RASS による温度により大気安定度を得てこれを用いて圏界面付近の乱流鉛直拡散係数(K)を導出した。RASS により得られた高時間分解能の K は、従来の気球観測による気候学的な K とよく対応し、信楽上空における夏期の典型的な振舞いを示すと考えられる。

RASS の温度を用いて、最低温度で定義した圏界面高度と WMO 定義で決定した圏界面高度を比較したところ WMO 定義の圏界面高度が  $1 \pm 0.6$  km 低い結果が得られた(Alexander et al. 2007;2008a)。

RASS による K は、WMO 定義の圏界面高度を境に明瞭な差が見られ、高時間分解能の観測における圏界面高度の定義としては WMO 定義の圏界面高度が有用であることがわかった(Alexander et al. 2007)。一方で、乱流エネルギー消散率は  $0.5 \pm 0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  から  $0.7 \pm 0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  まで増加している (Alexander et al. 2008a)。

対流圏界面付近では 12 時間周期の上方伝搬する重力波がみられこれにより対流圏界面高度に不連続構造が発生した。一方で高度 5-15km ではピークが午後に見られる 1 日周期波動が卓越しこの波動エネルギーは上方伝搬していることがわかった(Alexander et al. 2008)。

さらに、乱流散乱エコー特性を用いたレーダーによる水蒸気推定手法について、MU レーダーと L 帯境界層レーダーを見合わせた推定(Imura et al. 2007)や、より水蒸気観測精度を向上させる 1 次元変分法を用いた新手法を開発した(Furumoto et al. 2007)。

##### (2) レーダー干渉計技術を用いた気温の微細構造の観測

RASS の高度分解能を向上させるため、FII の RASS 観測への適用について研究した。特に FII 解析に反復解法手法を適用した新しいアルゴリズムを開発し MU レーダーの観測結果を検証した。RASS を用いた FII 観測の高度分解能を向上させる最適パラメータを数値計算により決定するこ

とで MU レーダーを用いて高度分解能が従来の 150 m から約 50m に向上することを検証した(投稿準備中)。また、将来的に 443MHz-WPR・RASS に FII を適用した際の最適パラメータを決定し 36 m の優れた鉛直分解能での気温観測が期待できることを示した。

##### (3) 沖縄での RASS 観測の実現

443 MHz WPR・RASS での気温観測を実現するためのシステム開発を行った。さらに得られたデータを用いて沖縄亜熱帯地域特有の気象現象の解析を行った。RASS スピーカーの開発及び遠隔制御監視システムを開発により無人連続観測を可能とした。また、レーダーの 1 次データをレーダーサイトから京都大学に転送し、2.5 時間以内に高度分解能 100 m、時間分解能 20 分の気温プロファイルを導出できるようにした。

RASS の毎日 0700-2000LT の連続観測を 2008 年 2 月 4 日に開始した。観測で得られた気温プロファイルは同時刻に那覇の気象台より打ち上げられたラジオゾンデの結果とよく一致した。将来的には観測結果をリアルタイムで気象庁に転送し現業数値予報モデルへ同化することで天気予報の精度向上への貢献が期待できる(投稿準備中)。

さらに得られた気温プロファイルを用いて沖縄亜熱帯域において夏季に太平洋高気圧に覆われた際に頻繁に現れるメソスケール対流システムの発生・発達メカニズムの事例解析を行った。この結果、まず高度 2km 以下で静的安定度が低下しさらに沖縄本島の東西岸からの海風が島の上でぶつかることによって、水平風の収束が強まり上昇流が強化されることが、対流雲が発生の成因であることがわかった(投稿準備中)。

##### (4) 熱帯域積雲対流活動の温度、水蒸気微細観測

インドネシア域における EAR・RASS 観測を実施し、気温・水蒸気プロファイル得ただけでなく、さらにインド・国立大気科学研究所との共同でガダンキ・MST レーダーを用いた研究を推進した。

MST レーダーを用いた RASS 観測に必要な 94-125Hz の音波を用いた高出力音波発射装置を設計した。さらに音波伝搬のレイトリングを行い、強い RASS エコーを受信できる最適なアンテナビーム方向を予測した。MST レーダーを用いた RASS 観測を 18 時間行い、高度 1.5-10km (条件が良い時は高度 14km まで)の気温を観測した。この結果はラジオゾンデ観測値

と 1K 以内の差に収まったが、両者の差が大きい時は、視線方向風が強い時に対応している (Sarma et al. 2008)。

さらに、ガダンキ・MST レーダーで得られた 3 分時間分解能の風速データを用いた対流圏—下部成層圏の風速変動について、2 時間以下の短周期の重力波活動の季節変動を調べた。水平及び鉛直風の分散値は明瞭な年周変化を示し上部対流圏、下部成層圏では 7-9 月の雨期に最大となった。これは静止気象衛星から得られた OLR や TRMM による雨量計の季節変動とよく一致し、深い対流活動が短周期重力波のソースであることを強く示唆している。

対流圏界面付近では水平風分散は風速シアの 2 乗によく対応しており、シアにより直接重力波が生成されていることを示唆する一方で、ガダンキでは地形効果による重力波生成効果は小さいこともわかった (Dutta et al. 2008)。

一方で、インドネシア重力波活動の季節内分布をの EAR による 12km 以下の風速を用いて調べたところ、春分、秋分に最大となる明瞭な半年分布を示した。この分布は TRMM により観測された降水と地上降水量と良く対応した。EAR による鉛直風分散の半分は 2 時間周期以下の対流活動により、残りの半分は 24 時間以下の周期の波動活動に伴うものであることがわかった。TRMM による高度 2km における降水観測結果は EAR サイトでの地上降水より大きく、これは EAR サイトが地域の降水分布を代表していないことを示唆している (Alexander et al. 2008b)。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. Alexander S. P., T. Tsuda 2008a: High-Resolution Radio Acoustic Sounding System (RASS) Observations and Analysis up to 20km, J. Atmos. and Ocean Tech., 25, 1383-1396, doi:10.1175/2007JTECHA983.1.
2. Dutta, G., T. Tsuda, P. V. Kumar, M. C. A. Kumar, S. P. Alexander, T. Kozu 2008: Seasonal variation of short-period (<2 hr) gravity wave activity over Gadanki, India (13.5N, 79.2E), J. Geophys. Res., 113, D14103, doi:10.1029/2007JD009178.
3. Alexander, S. P., T. Tsuda, Y. Shibagaki, and T. Kozu 2008b: Seasonal gravity wave activity observed with

the Equatorial Atmosphere Radar and its relation to rainfall information from the Tropical Rainfall Measuring Mission, J. Geophys. Res., 113, D02104, doi:10.1029/2007JD008777.

4. Sarma, T. V. C., D. N. Rao, J. Furumoto, and T. Tsuda 2008: Development of radio acoustic sounding system (RASS) with Gadanki MST radar - first results, Ann. Geophys., 26, 2531-2542.
5. Alexander S., T. Tsuda 2007: Measurements of vertical eddy diffusivity across the tropopause using radio acoustic sounding system (RASS), Geophys. Res. Lett., 34, L06803. doi:10.1029/2006GL028753.
6. Furumoto, J., S. Imura, T. Tsuda, H. Seko, T. Tsuyuki, K. Saito 2007: The Variational Assimilation Method for the Retrieval of Humidity Profiles with the Wind-profiling Radar, J. Atmos. Ocean. Technol., 24, 1525-1545.
7. Imura, S., J. Furumoto, T. Tsuda, T. Nakamura, A. Behrendt, M. Onishi 2007: Estimation of Humidity Profiles by Combining Co-locating VHF and UHF Wind-profiling Radar Data, J. Meteorol. Soc. Japan, 301, 301-319.

[学会発表] (計 28 件)

1. Furumoto, J., T. Shinoda, T. Tsuda, and A. Matsugatani 2009: Application of the frequency - domain interferometric imaging to RASS measurements, MST-12 workshop, London, Canada.
2. Shinoda, T., J. Furumoto, T. Tsuda, S. Satoh, and Y. Murayama 2009: Continuous observations of temperature profiles by 443 MHz wind profiling radar with RASS in Okinawa, MST-12 workshop, London, Canada.
3. Mikami, A., J. Furumoto, T. Tsuda, S. Satoh, S. Nagai and T. Kawabata 2009: Meso-gamma-scale convective systems observed by a 443MHz wind-profiling radar with RASS in the Okinawa subtropical region, MST-12 workshop, London, Canada.
4. Sarma, T. V. C. and T. Tsuda 2009: RASS observations up to UTLS region at Gadanki (13.46oN, 79.17oE), MST-12 workshop, London, Canada.
5. Sarma, T. V. C. and T. Tsuda 2009: A study of tropical tropopause

- variation at Gadanki (13.46N, 79.17E) using a long-term MST radar data-base supplemented with radiosonde and RASS measurements, MST-12 workshop, London, Canada.
6. Dutta, G., T. Tsuda, P. V. Kumar, M. C. A. Kumar, S. P. Alexander and T. Kozu 2009: Seasonal variation of short-period (<2h) gravity wave activity over Gadanki, India (13.5N, 79.2E), MST-12 workshop, London, Canada.
  7. Sarma, T. V. C. 2009: Continuous monitoring of atmospheric temperature profiles with the MST radar-RASS at NARL, A workshop on "Ground-based atmosphere observation network in equatorial Asia"; the Asia-Africa Science Platform (AA-SP) Program of JSPS.
  8. 古本淳一、津田敏隆、佐藤晋介、2008:443MHz帯ウインドプロファイラを用いた沖縄亜熱帯域における水蒸気プロファイルの推定、日本気象学会2008年度秋期大会、仙台。
  9. 篠田智仁、古本淳一、津田敏隆、2008:周波数領域干渉計を用いたRASSによる気温観測の高鉛直分解能化、日本気象学会2008年度秋期大会、仙台。
  10. 三上彩、古本淳一、津田敏隆、川畑拓矢、佐藤晋介、443MHzウインドプロファイラ・RASSを用いた沖縄亜熱帯域における孤立積乱雲に関する研究、日本気象学会2008年度秋期大会、仙台。
  11. 佐藤晋介、古本淳一、篠田智仁、三上彩、津田敏隆、永井清二、村山泰啓、2008:400MHz帯WPR/RASSで観測された対流境界層の発達、日本気象学会2008年度秋期大会、仙台。
  12. 古本淳一、津田敏隆、篠田智仁、2008:周波数領域干渉計映像法を用いたRASS観測による高鉛直分解能気温観測、日本気象学会2008年度春期大会、横浜。
  13. Sarma, T. V. C., T. Tsuda, J. Furumoto, 2008: RASS Observations of virtual temperature up to UTLS region at Gadanki (13.5N, 79.2E)、日本気象学会2008年度春期大会、横浜。
  14. 篠田智仁、古本淳一、津田敏隆、佐藤晋介、永井清二、村山泰啓、2008:400MHz帯WPR・RASSを用いた亜熱帯域気温高度分布の定常観測、日本気象学会2008年度春期大会、横浜。
  15. 三上彩、古本淳一、津田敏隆、佐藤晋介、2008:400MHz帯ウインドプロファイラ・RASSを用いた沖縄亜熱帯域の対流雲の観測、日本気象学会2008年度春期大会、横浜。
  16. Furumoto, J., T. Tsuda, T. Shimomai, and T. Kozu, 2007: Continuous Humidity Observation in a Tropical Region with the Equatorial Atmosphere Radar (EAR), International CAWSES Symposium, Kyoto.
  17. Furumoto, J., T. Tsuda, and H. Seko, 2007: Use of GPS Precipitable Water Vapor Data to Retrieve Humidity Profiles with a Wind-profiling Radar, AOGS 2007 Assembly, Bangkok, Japan.
  18. 古本淳一、大西正典、津田敏隆、佐藤晋介、村山泰啓、井口俊夫、2007:400MHz帯ウインドプロファイラ・RASS観測による亜熱帯域温度微細構造の観測、日本気象学会2007年度春期大会、東京。
  19. 松ヶ谷篤史、古本淳一、津田敏隆、2007:周波数干渉計映像法を用いたMUレーダー・RASS観測による気温の高高度分解能観測、日本気象学会2007年度春期大会、東京。
  20. Furumoto, J., T. Tsuda, T. Kozu, 2006: Continuous humidity monitoring in a tropical region with the Equatorial Atmosphere Radar (EAR), Eleventh International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Tirupati, India, 416-420.
  21. Imura, S., J. Furumoto, T. Tsuda, T. Nakamura, 2006: Retrieval of humidity profiles by simultaneous co-located VHF and UHF wind-profiling radar data, Eleventh International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Tirupati, India, 401-405.
  22. Furumoto, J., T. Tsuda, H. Seko, K. Saito, 2006: Humidity retrieval from the turbulence echo characteristics using one-dimensional variational assimilation method, Eleventh International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Tirupati, India, 406-410.
  23. Matsugatani, A., J. Furumoto, and T. Tsuda, 2006: The Frequency Domain Interferometric Imaging to Monitor the Temperature Profiles with the MU Radar-RASS, Eleventh International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Tirupati, India, 343-346.
  24. Sarma, T. V. C., D. N. Rao, J. Furumoto and T. Tsuda, 2006: Design and Development of an Acoustic Attachment to Gadanki MST Radar for RASS

Observations, Eleventh International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Tirupati, India, 279-283.

- 2 5. Sarma, T. V. C., D. N. Rao, J. Furumoto and T. Tsuda, 2006: First RASS Observations using Gadanki MST Radar, Eleventh International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Tirupati, India, 589-591.
- 2 6. Alexander S., T. Tsuda, and J. Furumoto, 2006: Effects of Atmospheric Stability on Tropospheric Wave and Energy Propagation, Eleventh International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Tirupati, India, 647-649.
- 2 7. 古本淳一、津田敏隆、瀬古弘、斉藤和雄、2006:GPS掩蔽およびウインドプロファイラデータを用いて水蒸気プロファイル推定を行う1次元変分法手法、日本気象学会2006年度秋期大会、名古屋.
- 2 8. 松ヶ谷篤史、古本淳一、津田敏隆、2006:MUレーダー・RASSイメージングによる温度微細構造の観測、日本気象学会2006年度秋期大会、名古屋.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

津田 敏隆 (TSUDA TOSHITAKA)  
京都大学・生存圏研究所・教授  
研究者番号：30115886

### (2) 研究分担者

古本 淳一 (FURUMOTO JUN-ICHI)  
京都大学・生存圏研究所・特定助教  
研究者番号：10402934

### (3) 研究協力者

佐藤 晋介 (SATO SHINSUKE)  
情報通信研究機構、電磁波計測技術センター、主任研究員  
研究者番号：30358981

永井 清二 (NAGAI SEIJI)  
情報通信研究機構、沖縄亜熱帯計測技術センター、センター長

村山 泰啓 (MURAYAMA YASUHIRO)  
情報通信研究機構、電磁波計測技術センター、グループ長  
研究者番号：00359001

Simon Peter Alexander

Australian Antarctic Division, Australia,  
Researcher

Gopa Dutta

Osmania University, India, Associate  
Professor

T. V. Chandrasekhar Sarma

National Atmospheric Research Laboratory,  
India, Senior Researcher