

機関番号：14301
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21740343
 研究課題名(和文) 周波数領域干渉計映像法を用いたRASS観測による気温の高鉛直分解能観測
 研究課題名(英文) Monitoring of the virtual temperature profile by applying Frequency-domain Interferometric Imaging (FII) to RASS measurement
 研究代表者
 古本淳一 (FURUMOTO JUN-ICHI)
 京都大学・生存圏研究所・助教
 研究者番号：10402934

研究成果の概要(和文)：

気温を高い時間分解能で観測できるレーダーリモートセンシング技術であるRASS(Radio Acoustic Sounding System)の性能を向上させ従来観測できなかったより微細な気温観測を可能とした。複数のレーダー周波数観測により鉛直分解能を向上させる周波数領域干渉計映像法をRASS観測に応用する新アルゴリズムを開発しMUレーダーを用いて従来150mに留まっていた鉛直分解能を60mまで向上させることに成功した。また、沖縄におけるRASSの自動連続観測の実現や、従来観測が難しかった接地境界層領域への展開を進めた。

研究成果の概要(英文)：

RASS (Radio Acoustic Sounding System) is a radar remote sensing system to measure temperature profile with a high temporal resolution. This study aims to improve the vertical resolution of RASS measurement by applying FII (Frequency-domain Interferometric Imaging) technique to RASS measurement. By applying the above technique to the improvement of the vertical resolution with the MU radar with RASS was achieved to 60 m from 150 m in conventional technique. This study enabled us the daytime continuous unmanned operation of the RASS measurement in Okinawa. We also tried the development of the new technique to observe temperature profile in the surface boundary layer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：地球大気計測、気象学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気温推定、RASS、レーダーイメージング、干渉計

1. 研究開始当初の背景

気温は気象擾乱の熱力学メカニズムを考える上で重要なパラメータの一つである。一般に対流圏内では気温は高度とともに減少するがその微細変動は気象擾乱の振舞いに大きな影響を与えることが知られている。さらに気温の鉛直勾配は大気の静的安定度を決定付けこれが積雲対流や乱流の生成・維

持・消滅に重要な役割を果たす。こうしたメカニズムを解明するには高い時間、鉛直分解能で気温を時間連続的に観測することが重要である。

従来、気温観測として最も広く行われている気球によるラジオゾンデ観測では鉛直分解能数値10mでの気温測定が可能である(例えば、Miloshevick et al., 2006)。さらに

研究用途では短い時定数の気温センサーを用らに優れた鉛直分解能での気球観測も行われている。Luce et al. (2002)はこうした高い気球観測では鉛直分解能 0.1m という鉛直分解能の気温センサーによる気球観測と MU (Middle and Atmosphere atmosphere) レーダーの同時観測実験 (MUTSI: the MU radar Temperature Sheets and Interferometry) キャンペーンを実施し、気温の鉛直薄膜構造と乱流エコー構造の関係を示している。気球観測は高精度、高鉛直分解能での測定が可能であるものの、気球が地上から観測最大高度に達するまでに時間が掛かるため観測時間間隔を1時間より短くすることは難しい。

リモートセンシング技術を用いた気温測定法としては、マイクロ波放射計 (Solheim et al., 1998; Ware et al. 2003) や ラマン・ライダー (Nedeljkovic et al., 1993; Goldsmith et al., 1994; Behrendt et al., 2004) などによる地上からの気温観測が実用化されている。放射計観測では得られる鉛直分解能が 1km 程度であり、また降雨時には雨滴からの放射のため測定精度が低下する。また、ライダー観測は一般に観測が夜間に限られまた雲底以上の高度の観測が難しい。一方、衛星からの観測としては、GPS 電波が地球をかすめて通過する掩蔽データを低軌道衛星で受信することで気温を測定する GPS 掩蔽観測 (Hocke 1997; Kursinski et al., 2000) や Aqua 衛星搭載の AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) といった観測が近年行われるようになった。衛星観測は全球に渡るデータを得られる利点があるものの、観測頻度は一般に高くない。

このように、様々な測器が開発されているものの天候や時間に関わりなく気温を測定する手法は現在に至るまでいまだ発展途上である。研究代表者らが開発・実用化を進めてきた RASS は天候、時間に関わらず気温を高い精度に観測できることから、降雨を伴う擾乱解明に役立つものと期待されている。

RASS では、地上から発射された音波により上空に形成される音波面に対してレーダー電波を照射し、散乱電波 (RASS エコー) をレーダーで受信する。受信電波のドップラー周波数遷移から音速を求め音速が気温に依存することを利用して気温を測定できる。現在までに研究代表者が開発を進めてきた MU レーダーを用いた RASS (MU レーダー・RASS) では時間分解数分、鉛直分解能 150m での気温観測に成功している

一方、複数のレーダー中心周波数を用いて鉛直分解能を向上させる周波数領域干渉計映像法 (FII) が近年開発されている。従来 FII は乱流エコー強度の微細構造観測を対象として行われてきた。例えば Luce et al.,

(2006) は MU レーダーの乱流エコー観測に FII を適用することで高度分解能を向上させ、乱流の薄層構造を観測することに成功している。

本研究課題は FII を RASS 観測に適用する (RASS-FII) ことで鉛直分解能を従来の 150m から数十メートルまで向上させ RASS 観測の鉛直分解能の限界を打破する優れた分解能の気温高度分布を得る。こうして得られた類い希な気温データを用いて大気乱流層に伴う気温微細変化や積雲スケールの気温微細擾乱を捉えることが可能とする。

さらに MU レーダーや L 帯下部対流圏レーダーで開発が行われてきた RASS 観測の実用化を目指して様々なレーダーへの RASS の適用や、気温の接地境界層観測に向けた研究の新展開のための基礎的研究を進める。

2. 研究の目的

気温は、気象擾乱の解明上極めて重要なパラメータである。特に災害をもたらすことのある梅雨前線や台風に伴う集中豪雨のメカニズムの解明には気温の微細構造の精密かつ高い時間・空間分解能の観測が極めて重要である。上記の通り気温観測に関しては、様々なリモートセンシング手法が開発されているものの、天候や時間に関わりなく高い時空間分解能で気温を測定する技術は未だに発展途上である。研究代表者が実用に向けて研究開発を行ってきた RASS は音波と電波を併用したレーダー間接観測法であり、従来の気球観測と比べて数分間隔という極めて高い時間分解能で気温を測定可能できる利点がある。RASS では雨滴や雲がある条件の下でも 0.5K という気球観測に匹敵する高精度で気温を測定できることから時に災害をもたらす激しい気象擾乱のメカニズム解明に役立つことが期待されている。

従来の RASS 観測の鉛直分解能は 150 m 程度に留まっていたが、さらなる鉛直分解能高度化を目指し本研究課題では複数のレーダー周波数を用いて鉛直分解能を向上させる周波数領域干渉計映像法 (FII) (Luce et al. 2001) を RASS 観測に適用することで、鉛直分解能を 40m 程度まで向上させることを目指す。これにより従来の間接測定では成し遂げられなかった優れた鉛直、時間分解能での全天候型微細気温鉛直構造を観測可能となり、大気乱流や積雲スケールの気象擾乱の内部メカニズム解明に大きく寄与することが期待される。

さらに RASS を一般的な測器として発展させるため、従来 MU レーダーや L 帯下部対流圏レーダーで開発が行われてきた RASS 観測の実用化を目指して他レーダーでの RASS 定常観測化や、気温の接地境界層観測に向けた研究の新展開のための基礎的研究を進める。

3. 研究の方法

本研究では、MU レーダーを用いた RASS 観測に FII を適用する手法(RASS-FII)を開発する。本研究課題開始前まで得られた基礎的な RASS-FII 観測実験の知見を活用し安定的に高精度(誤差 0.5K 以内)かつより高鉛直分解能で気温プロファイルを得る手法を確立することを目的とする。

特に、従来の研究による FII 解析は乱流散乱エコー強度の高鉛直分解能観測にのみ行われてきたものであるため、乱流散乱及び RASS 観測の相違点を十分に考慮する。特に、乱流散乱エコー観測と異なり RASS 観測の散乱体である音波は高速(~300m/s)で遠ざかっているため、ある特定高度からの散乱波は限定された時間にのみ得られる。このため、FII 解析結果を時間方向に切り出すことによって所望高度以外の信号を取り除き、さらに鉛直分解能を向上させる。

また、RASS 観測では人工的に音波による屈折率変動を上空に作り出すことから、地上より発射する音波パラメータを変化させることで散乱体の特性を自由に変化させることができる。この利点を活用するため、FII 解析結果の鉛直分解能を最も向上する音波パラメータ数値シミュレーションで得て、実際に観測を実施し、ラジオゾンデとの同時観測により結果を検証する。

従来乱流散乱エコー強度の高鉛直分解能観測に行われてきた FII 観測を RASS に適用するアルゴリズム開発を行った。既存の MU レーダーを用いた RASS に FII を適用する基礎的なアルゴリズムを発展させ、気温の微細構造観測を安定的かつ高精度、高鉛直分解能で得る手法開発を行う。

上記に述べたとおり、RASS 観測が乱流散乱観測と異なることに着目し、FII 解析を行った後、さらに時系列を時間方向に切り出し所望高度以外の高度からの信号を取り除くことでさらに高度分解能を向上させる。

開発されたアルゴリズムの検証のため数値シミュレーションを行い、得られた結果との比較から性能向上を検証する。さらに、音波やレーダーパラメータをさまざまに変化させた場合に期待される鉛直分解能をシミュレーションより得て最も鉛直分解能を向上させる最適なパラメータを計算する。

上記でシミュレーションを用いて計算された最適なレーダー、音波パラメータを用いて、MU レーダーの RASS での FII 観測実験を実施する。得られた結果を開発されたアルゴリズムに適用し実データでの鉛直分解能向上を検証した。検証のためラジオゾンデの同時観測を実施した。得られた気温微度分布の比較し、RASS-FII による鉛直分解能向上を実証する。

443MHz-WPR では MU レーダーでは測定できない大気境界層の気温鉛直分布を測定することができる利点がある。大気境界層の発達に伴う気温の微細鉛直構造を観測することを目的として、RASS 手法を 443MHz-WPR に適して自動観測を実現するソフトウェアを作成した。最適なスピーカーを自動的に計算し、有効なスピーカーのみを使用するソフトウェアを開発する。これにより沖縄の 443MHz-WPR を用いた RASS では昼間の気温の定常観測が実現しており、定常観測を継続することにより様々な気象現象解明が期待されている。本課題により得られる、従来の手法では観測できなかったユニークな高鉛直・時間分解能の気温データは様々な気象擾乱の解明に役立つことが考えられる。そのうち下記の孤立積乱雲に着目してその発生・発達要因と気温微細構造に着目して解析を行う。

さらに、RASS 観測の低減のため、周囲への音漏れをできるだけ防ぐシステムの開発を行う。特に傾けた RASS 観測の実現に向けて、音波ビームを任意の方向に出すことができるスピーカーやウインドプロファイラで発射するシステムを試作する。

4. 研究成果

複数のレーダー周波数観測により鉛直分解能を向上させる FII 法を RASS 観測に応用する新アルゴリズムを開発した。これにより従来の測定では成し遂げられなかった優れた鉛直、時間分解能での全天候型微細気温鉛直構造を観測可能とした。MU レーダーを用いて複数の周波数を用いた RASS 観測結果を用いてアルゴリズムを検証したところ従来 150 m に留まっていた鉛直分解能を 60m まで向上させることに成功した。さらに、検討を行なったところ、音波の種類を変えることでより高鉛直分解能の観測も可能であることがわかった。

さらにアルゴリズムの精度を向上させるためにはレーダーパルスが矩形でないことによる影響を取り除く必要がある。当初のプログラムでは一定の温度減率を持つ気温プロファイルを用いて補正を行っていたが、より精度の高い気温プロファイル推定を行うため、レーダーイメージングにより得られた高鉛直分解能の気温プロファイルを用いて補正を行い、さらに繰り返しレーダーイメージングを行う反復解法アルゴリズムを開発した。

また接地境界層の微細な擾乱は積雲対流などの気象擾乱発生の源となることが知られている。本研究では、従来の RASS 観測では観測ができなかった接地境界層へ観測領域を広げることをめざした。また、接地境界層に発生するサーマルやプルームといった

微細な擾乱は、対流圏全層に及ぶ大規模な積乱雲の発生源となっている。1.3GHz 帯ウィンドプロファイラのアンテナ回転台により任意の方位角、天頂角にアンテナを向けることを可能とし、実際に用いた RASS 観測を行うためのスピーカシステムを作成し、試験観測実験を実施した。

さらに 443 MHz WPR・RASS での気温自動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。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。

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 J. Furumoto, T. Shinoda, A. Matsugatani, and T. Tsuda, Measurement of detailed temperature profile within the radar range gate using range imaging technique, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 28, 1, 22-36, 2011. (査読有り)
- ② Shinoda, T., J. Furumoto, S. Satoh, S. Nagai, Y. Murayama, and T. Tsuda, Observations of temperature profiles by 443-MHz wind profiling radar using a radio acoustic sounding system in Okinawa, *J. Atmos. Solar-Terres. Phys.*, 10.1016/j.jastp.2010.08.013, 2011 (査読有り)
- ③ Chen, J. S., J. Furumoto and T. Nakamura, Effects of radar beamwidth and anisotropy on multiple-frequency range imaging of MST-VHF radar, *Radio Sci.*, accepted, 2010. (査読有り)
- ④ Yu, T.-Y., J. Furumoto, and M. Yamamoto, Clutter suppression for high-resolution atmospheric observations using multiple receivers and multiple frequencies, *Radio Sci.*, 45, RS4011, doi:10.1029/2009RS004330, 2010. (査読有り)
- ⑤ Mikami, A., T. Kawabata, S. Satoh, J. Furumoto, S. Nagai, Y. Murayama and T. Tsuda, Meso- γ -scale convective systems observed by a 443-MHz wind-profiling radar with RASS in the Okinawa subtropical region, *J. Atmos. Solar-Terres. Phys.*, doi:10.1016/j.jastp.2010.07.010, 2010. (査読有り)
- ⑥ Hayashi, H., J. Furumoto, X. Lin, T. Tsuda, Y. Shoji, Y. Aoyama, and Y. Murayama 2009: Validation of Refractivity Profiles Retrieved from FORMOSAT-3/COSMIC Radio Occultation Soundings: Preliminary Results of Statistical Comparisons Utilizing Balloon-Borne Observations, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 20, 1, 51-58. (査読有り)
- ⑦ 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. (査読有り)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 古本 淳一、佐藤晋介、津田敏隆、村山泰啓、沖縄における 443MHz ウィンドプロファイラ-RASS 連続観測による温度プロファイルの長期間解析、気象学会 2010 秋期大会、2010 年 10 月 27 日、京都。
- ② 佐藤晋介、古本淳一、田口一典、低騒音型 RASS 用アレイスピーカシステムの開発、日本気象学会 2010 春期大会、2010 年 5 月 26 日、東京。
- ③ 古本淳一、津田敏隆、佐藤晋介、永井清二、村山泰啓、川畑拓矢、斎藤和雄、400MHz 帯 WPR・RASS による亜熱帯域気温連続観測の精度検証、日本気象学会 2009 年度秋期大会、2009 年 11 月 29 日、福岡。
- ④ 佐藤晋介、古本淳一、永井清二、川村誠治、花土弘、中川勝広、村山泰啓、津田敏隆、400MHz 帯 WPR/RASS による梅雨前線帯の降水過程と温度場の観測、日本気象学会 2009 年度秋期大会、2009 年 11 月 25 日、福岡。
- ⑤ 佐藤晋介、永井清二、村山泰啓、井口俊夫、熊谷博、古本淳一、津田敏隆、400MHz 帯 WPR/RASS による冬季沖縄の大気境界層の観測、日本気象学会 2009 年度春期大会、2009 年 5 月 29 日、つくば。

- ⑥ Furumoto, J., T. Tsuda, T. Shinoda, A. Matsugatani, 2009: Improvement of vertical resolution of RASS measurement by applying frequency-domain interferometric imaging, Twelfth International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, London, Canada, 2009年5月22日、107-110.
- ⑦ 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, Twelfth International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, London, Canada, 2009年5月22日, 111-114.
- ⑧ Mikami, A., J. Furumoto, T. Tsuda, S. Satoh, S. Nagai, Y. Murayama, and T. Kawabata, 2009: Meso-scale convective systems observed by a 443 MHz wind-profiling radar with RASS in the Okinawa subtropical region, Twelfth International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, London, Canada, 2009年5月18日, 199-202.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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