

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82636

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610138

研究課題名(和文)レンジイメージング大気レーダー観測による大気乱流の発生・維持メカニズムの解明

研究課題名(英文)Observational study on generation and maintenance mechanism of atmospheric turbulence using range imaging atmospheric radars

研究代表者

山本 真之(Yamamoto, Masayuki)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所センシングシステム研究室・主任研究員

研究者番号：90346073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：オーバーサンプリング付きレンジイメージング(OS付きRIM)を用いた1.3GHz帯大気レーダーによる高分解能観測を実施することで、サーマル等に伴う大気境界層内の鉛直流擾乱の詳細を示した。大気レーダー用外付けデジタル受信機にトリガ信号取り込み機能を付加することで、OS付きRIMを用いた50MHz帯大気レーダーによる高分解能観測を実施した。風速・大気乱流の測定値を高精度で得ることに貢献する、大気エコーのスペクトルパラメータ推定手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Range imaging (RIM) is a technique that enhances range resolution of atmospheric radars (ARs) by using multiple frequencies. Oversampling (OS) is a technique that samples received signals with a time interval shorter than the transmitted pulse width. By using both RIM and OS, ARs are able to resolve small scale turbulence. Measurements using ARs were carried out. The oversampled signals were collected by installing a digital receiver to the ARs. From high resolution measurements by the 1.3 GHz ARs using RIM and OS, small scale disturbances of vertical air motions in the atmospheric boundary layer were resolved. By implementing the capability of trigger signal collection to the digital receiver, we realized high resolution measurements by the 50 MHz AR using RIM and OS. Techniques for processing Doppler spectra collected by ARs were developed. By using only spectral data in which clear air echoes are dominant, the techniques can reduce uncertainties in estimating spectral parameters.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：大気乱流 大気レーダー 自然現象観測・予測 リモートセンシング

## 1. 研究開始当初の背景

大気中の乱流(大気乱流)は様々な時間・空間スケールにおける大気の輸送・拡散・混合に重要な役割を果たす。しかし、大気乱流を高分解能で連続測定する手段は限られているため、その発生・維持メカニズムは十分に理解されていない。大気レーダー(ウィンドプロファイラ)は、大気の屈折率擾乱に起因する電波散乱を用いることで、晴天大気中の風速を優れた時間分解能で計測できる。大気レーダーは、研究用途のみならず、天気予報のもととなる数値予報に用いるための、風速観測データを得る手段としても利用される。しかし、従来の大気レーダーは鉛直分解能が粗い(100~数100m)ため、大気乱流の生成源である大気不安定波等を十分に解像できなかった。

## 2. 研究の目的

レンジイメージング(RIM)は、多周波切替え送信と適応信号処理を用いることで、大気レーダーのレンジ(高度)分解能を向上させる観測手法である。過去に実施された研究により、RIMが、大気乱流の主要な生成源である大気不安定波の観測に有用であることが示されている。

オーバーサンプリング(OS)は、送信パルス幅より短い時間間隔で受信信号をサンプリングする観測手法である。研究代表者らは、RIMに加えてOSを用いる、OS付きRIMを開発した。従来のRIMの欠点である受信強度のレンジ依存性を解消できるOS付きRIMは、RIM機能を持つ大気レーダーのレンジ分解能をさらに高めることが可能である。

本研究は、OS付きRIMを用いた大気レーダーによる風速・大気不安定波・大気乱流の高分解能観測を実施することで、大気乱流の発生・維持メカニズムを解明することを目的としている。

## 3. 研究の方法

風速・大気不安定波・大気乱流の観測手段として、大気境界層における観測を行う1.3GHz帯大気レーダーと、対流圏の上部に至る広い高度範囲を観測可能である50MHz帯大気レーダーを用いた。

本研究で使用する大気レーダーはRIM機能を有するが、OS機能は有していない。OSを行う手段として、本研究を実施した山本・川村が中心となり開発している大気レーダー用外付けデジタル受信機(以下、デジタル受信機)を用いた。デジタル受信機は、安価なハードウェア構成とするため、汎用ソフトウェア無線機である Ettus Research 社製 USRP と、ワークステーションを用いている。USRPは、大気レーダーの受信機出力をサンプリングし、さらにデジタル直交検波を行う。ワークステーションは、デジタル直交検波を行った受信信号に対し、パルス圧縮の復号や時間積分(コヒーレント積分)等のリアルタ

イムデータ処理を行う。リアルタイムデータ処理により、ハードディスクに保存する測定データ量を減らしている。ワークステーションのオペレーティングシステムは、Linux である。ワークステーションで実行するリアルタイムデータ処理のプログラムは、汎用プログラミング言語である C++を用いて作成した。OS付きRIMを用いた50MHz帯大気レーダーによる観測を実施するため、デジタル受信機の機能向上を行った。

大気レーダーを用いた大気乱流の詳細なデータ解析を実施するには、風速・大気乱流の測定データを高精度で得る必要がある。大気レーダーは、大気エコーのスペクトルパラメータ(エコー強度・ドップラー速度・スペクトル幅)を推定することで、風速・大気乱流に関する測定値を得る。そのため、大気エコーのスペクトルパラメータを精度良く推定することは、風速・大気乱流に関する測定値を高精度で得ることに貢献する。本研究では、大気エコーのスペクトルパラメータを推定する手法の開発にも取り組んだ。

## 4. 研究成果

### (1) 1.3GHz帯大気レーダーによる大気境界層の高分解能観測

滋賀県甲賀市の京都大学生存圏研究所信楽MU観測所に設置された1.3GHz帯大気レーダー(LQ-7)、及び東京都小金井市の情報通信研究機構に設置された1.3GHz帯大気レーダー(LQ-13)は、ともにOS付きRIM機能を持つ。受信信号のOSには、デジタル受信機を用いた。OS付きRIMを用いたLQ-7及びLQ-13による大気境界層の高分解能観測を実施することで、サーマル等に伴う大気境界層内の鉛直流擾乱の詳細を示した。

高分解能観測の実施により得られた成果は、ストームジェネシスを捉えるための先端フィールド観測の実施(京都大学防災研究所・中北英一教授代表の基盤研究S)につながった。新たなフィールド観測の目的の一つは、OS付きRIM機能を持つ1.3GHz帯大気レーダーを主要な観測手段のひとつとして用いた、豪雨のタマゴの生成過程解明である。

### (2) 大気レーダー用外付けデジタル受信機の機能向上

信楽MU観測所には、50MHz帯大気レーダーであるMUレーダーが設置されている。MUレーダーから得る受信信号のOSを行うため、デジタル受信機にトリガ信号取り込み機能を付加した。

USRPは、常時データサンプリングとワークステーションへのデータ転送を行う。そのため、USRPの動作は、MUレーダーの送受信と同期しない。MUレーダーの送受信とデジタル受信機のリアルタイムデータ処理を同期させるため、MUレーダーの受信機出力と送受信制御用信号(トリガ信号)の両方を、USRPを用いてサンプリングした。さらに、ワーク

ステーションにおいて、トリガ信号を用いた測距処理（レンジング）を行った。トリガ信号取り込み機能を付加したデジタル受信機を用いることで、OS 付き RIM を用いた MU レーダーによる、高分解能観測を実現した。

デジタル受信機は、汎用性に優れる USRP とワークステーションを用いている。また、リアルタイムデータ処理のプログラムは、汎用プログラミング言語である C++ を用いて作成されている。そのため、リアルタイムデータ処理のプログラムは、ハードウェアへの依存性が低い。この特長を生かすことで、LQ-7・LQ-13 と MU レーダー間の差異（ビーム切り替えのタイミングが異なる）に対応するためのプログラムの変更が、効率的に行えた。さらに、並列プログラミングを容易に行え、かつ C++ で利用可能である OpenMP を用いることで、プログラムの汎用性を損なうことなく、リアルタイムデータ処理を高速化できた。

汎用性に優れる USRP とワークステーションを用いているため、デジタル受信機の機能が容易に変更・拡張できることを、本研究で示せたと考えている。

### (3) データ処理手法の開発

大気エコーのスペクトルパラメータを推定する手法を開発した。開発した手法では、大気エコーのピーク位置と連続しており、かつ強度がノイズレベルよりも大きいスペクトルデータに対し、大気エコーが卓越して存在すると判定する。次に、大気エコーが卓越して存在すると判定されたスペクトルデータのみを用いて、大気エコーのスペクトルパラメータを推定する。多くの場合、大気エコーは、ドップラースペクトルの限られたドップラー速度の範囲にのみ存在する。そのため、開発した手法では、推定精度を低下させる雑音の影響を減じることが可能である。推定に用いる制御パラメータと大気エコーの特性（信号対雑音比・スペクトル幅）を変化させた計算機実験により、開発した手法の推定精度を評価した。

50MHz 帯大気レーダーを用いた降水時における測定では、大気エコーと降水粒子エコーの両方がドップラースペクトルに存在する。大気エコーのスペクトルパラメータを推定する際に降水粒子エコーが混入すると、推定精度が低下する。そのため、大気エコーと降水粒子エコーの両方が受信エコーのドップラースペクトルに存在する条件下で、大気エコーのスペクトルパラメータを推定する手法を開発した。開発した手法では、大気エコーのピーク位置と連続しており、かつ大気エコーのピーク位置におけるスペクトル強度との強度差が一定範囲内にあるスペクトルデータに対し、大気エコーが卓越して存在すると判定する。そのため、開発した手法では、推定精度を低下させる降水粒子エコーの影響を減じることが可能である。MU レーダーの観測結果を用いることで、開発した手法を

評価した。

### (4) 今後の研究発展

本研究の成果は、ストームジェネシスを捉えるための先端フィールド観測の実施のみならず、高分解能・高データ品質を両立する次世代ウィンドプロファイラの開発実施につながった。次世代ウィンドプロファイラでは、高レンジ分解能を実現する手段として、OS 付き RIM を用いる。本研究で得た、OS 付き RIM による観測成果が、次世代ウィンドプロファイラの開発実施につながった。本研究において機能を向上させたデジタル受信機は、次世代ウィンドプロファイラの開発に活用されている。次世代ウィンドプロファイラを用いた今後の観測実施により、大気乱流の発生・維持メカニズムの解明に貢献していく。

大気レーダーで得られる高分解能の測定データが広く利用されることは、大気科学・環境学・防災学・リモートセンシング工学の発展につながると考えている。大気レーダーで得られる高分解能の測定データが広く利用されるためには、大気レーダーによる風速・大気乱流の測定データを高精度で得ることが必要である。本研究で得たデータ処理手法の開発成果を基に、大気レーダーに関するデータ処理の高精度化につながる技術開発を、今後も実施していく。

### (5) 謝辞

本研究で用いた LQ-7 及び MU レーダーは、京大生存圏研究所により運用されています。LQ-7 及び MU レーダーの運用に携わる皆様に、感謝いたします。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 4 件）

- (1) Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Spectral parameters estimation in precipitation for 50 MHz band atmospheric radars, *Radio Sci.*, 50, 789-803, doi:10.1002/2014RS005643, 2015. 査読有
- (2) Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Error estimation of spectral parameters for high-resolution wind and turbulence measurements by wind profiler radars, *Radio Sci.*, 49, 1214-1231, doi:10.1002/2013RS005369, 2014. 査読有
- (3) Yamamoto, M. K., T. Fujita, Noor Hafizah Binti Abdul Aziz, T. Gan, H. Hashiguchi, T.-Y. Yu, and M. Yamamoto, Development of a digital receiver for range imaging atmospheric radar, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 118, 35-44, doi:10.1016/j.jastp.2013.08.023, 2014. 査読有

- (4) 山本真之, マルチリモートセンサーによる雲の微細構造の解明, 低温科学, 72, 195-205, 2014. 査読有  
論文へのアクセス用アドレス :  
<http://hdl.handle.net/2115/55033>
- [学会発表] (計 29 件)
- (1) 山本真之・川村誠治, 情報通信研究機構における 1.3GHz 帯ウィンドプロファイラの開発, 日本気象学会 2015 年度秋季大会, 2015 年 10 月 28-30 日, 京都テラス (京都府京都市) .
- (2) Gan, T.・M. K. Yamamoto・H. Okamoto・H. Hashiguchi・M. Yamamoto, Spectral parameters estimation in precipitation for 50 MHz band atmospheric radars, 第 9 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 2015 年 9 月 10-11 日, 京都大学宇治キャンパス (京都府宇治市) .
- (3) Luce, H., R. Wilson, H. Hashiguchi, M. K. Yamamoto, T. Gan, and K. Shimizu, New insights in atmospheric turbulence and stability from high resolution radar and balloon data, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 12th Annual Meeting, 2015 年 8 月 2-7 日, サンテック (シンガポール) .
- (4) 山本真之・GAN Tong・川村誠治・橋口浩之・中城智之・岡谷良和・山本衛, ウィンドプロファイラーレーダー用デジタル受信機の開発, 日本気象学会 2014 年度秋季大会, 2014 年 10 月 21-23 日, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市) .
- (5) 山本真之・Tong Gan・川村誠治・橋口浩之・中城智之・岡谷良和・山本衛, コンフィギュラブルなウィンドプロファイラーレーダー用デジタル受信機の開発, 電子情報通信学会 2014 年ソサイエティ大会, 2014 年 9 月 23-26 日, 徳島大学 (徳島県徳島市) .
- (6) Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Okamoto, H. Hashiguchi, and M. Yamamoto, Development of a signal processing method for vertical wind velocity measurement by wind profiler radars, EarthCARE Workshop 2014, 2014 年 9 月 17-19 日, 日本科学未来館 (東京都江東区) .
- (7) Yamamoto, M. K., T. Gan, M. Yabuki, H. Hashiguchi, H. Okamoto, T. Nakajo, and M. Yamamoto, Vertical wind measurement in the boundary layer by 1.3-GHz range-imaging wind profiler radar, EarthCARE Workshop 2014, 2014 年 9 月 17-19 日, 日本科学未来館 (東京都江東区) .
- (8) Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Error estimation of spectral parameters for high-resolution wind and turbulence measurements by wind profiler radars, 14th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, 2014 年 5 月 25-31 日, São José dos Campos (ブラジル).
- (9) Yamamoto, M. K., T. Gan, T. Fujita, Noor Hafizah Binti Abdul Aziz, H. Hashiguchi, T. Nakajo, H. Okamoto, T.-Y. Yu, and M. Yamamoto, Development of a range-imaging boundary layer radar with oversampling capability, 14th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, 2014 年 5 月 25-31 日, São José dos Campos (ブラジル).
- (10) 山本真之・Gan Tong・藤田俊之・Noor Hafizah Binti Abdul Aziz・岡谷良和・橋口浩之・山本衛, コンフィギュラブルな大気レーダー用デジタル受信機の開発, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 4 月 28 日-5 月 2 日, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市) .
- (11) 山本真之・T. Gan・Noor Hafizah Binti Abdul Aziz・橋口浩之・中城智之・山本衛, 1.3GHz 帯レンジイメージングウィンドプロファイラーによる大気境界層内鉛直流擾乱の詳細観測, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 11 月 19-21 日, 仙台国際センター (宮城県仙台市) .
- (12) 川村誠治・橋口浩之・山本真之・東邦昭・山本衛・梶原佑介・別所康太郎・工藤淳・岩渕真海・星野俊介・足立アホロ, 次世代ウィンドプロファイラーの研究開発, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 11 月 19-21 日, 仙台国際センター (宮城県仙台市) .
- (13) Yamamoto, M. K., Noor Hafizah Binti Abdul Aziz, T. Fujita, T. Gan, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, and T.-Y. Yu, Development of range-imaging boundary layer radar, International Symposium on Earth-Science Challenges (ISEC) 2013, 2013 年 10 月 3 日-5 日, 京都大学宇治キャンパス (京都府宇治市) .

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 真之 (YAMAMOTO, Masayuki)  
情報通信研究機構・電磁波計測研究所センシングシステム研究室・主任研究員  
研究者番号 : 90346073

### (2) 連携研究者

川村 誠治 (KAWAMURA, Seiji)  
情報通信研究機構・電磁波計測研究所センシングシステム研究室・主任研究員  
研究者番号 : 10435795