

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13568

研究課題名(和文) 小型無人航空機の直接観測による大気レーダー散乱機構研究の新展開

研究課題名(英文) Study on atmospheric radar scattering mechanism based on comparison with direct measurements using unmanned aerial vehicles

研究代表者

橋口 浩之 (Hashiguchi, Hiroyuki)

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号：90293943

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)：大気レーダーは、天候に関わりなく、高時間分解能で風向風速の高度分布を連続的かつ自動的に観測できることから、気象研究から予報業務まで広範囲に利用されている。大気レーダーの晴天時の散乱体は、大気乱流や密度成層などから生じる屈折率変動と言われている。過去にラジオゾンデとの同時観測から、気温や湿度変動とレーダー観測エコーとの対応が議論されているが、概ね説明がつくものの、両者の差異はレーダーとラジオゾンデの観測領域の違いが原因とされてきた。本研究では、MUレーダー上空を気象センサーを搭載した小型無人航空機(UAV)で直接測定し、同じ空間領域を同時観測した。

研究成果の概要(英文)：An atmospheric radar (wind profiling radar) can continuously observe the height profiles of wind velocities with high temporal resolution. It is widely used for meteorological research, operational forecasting, and so on. Scattering targets of the atmospheric radar in the clear air conditions are fluctuations of radio refractive index due to atmospheric turbulence. Although the relation between temperature and humidity fluctuations and radar echoes has been discussed from the simultaneous observation with the radiosondes and has been generally explained, the difference between them is due to the difference between the observation volumes of radar and radiosonde. In this study, we measured directly over the MU radar with a small unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a meteorological sensor and simultaneously observed the same region. Observation field campaigns called the Shigaraki UAV-Radar Experiment (ShUREX) were carried out in 2015 and 2016.

研究分野：レーダー大気物理学

キーワード：小型無人航空機 大気レーダー 大気乱流 MUレーダー ウィンドプロファイラー

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 大気レーダーによるリモートセンシング

気象現象のリモートセンシングは、研究手段としてだけでなく、気象予報や防災など実社会との繋がりも大きい。気象レーダーは、雨滴を散乱体として、降水分布やそのドップラーシフトから水平風の情報を得ることができ、その散乱機構はほぼ解明されていると言って良い。気象レーダーは降水時しか情報が得られないという大きな制約があるが、一方、本研究の対象とする大気レーダー(ウィンドプロファイラーとも呼ばれる)は、天候に関わりなく、風向風速の高度分布を連続的かつ自動的に観測でき、さらに鉛直方向を高精度に測定可能で、時間分解能に優れるという特長がある。これまで、大気重力波や乱流等の研究、さらにはメソ気象観測や気象予報業務への応用が盛んに行われてきている。

Woodman and Guillen [1974]がペルー・ヒカマルカの巨大な IS(Incoherent Scatter)レーダーを用いて、初めて、中層大気の観測に成功したのが1970年代初めのことである。その後、欧米を中心に大気観測専用のレーダー(大気レーダー)が開発され、我が国でも我々のグループが MU レーダーを完成させた[Fukao et al., 1985]。下層大気の流れ分布を観測する機能に特化した小型レーダーも開発され、ウィンドプロファイラーと称されるようになった。我々が三菱電機(株)と共同開発した「下部対流圏レーダー(Lower Troposphere Radar: LTR)」[Hashiguchi et al., 2004]は、気象庁が2000年度に導入した大気レーダー33台から成る観測網(Wind Profiler Network and Data Acquisition System: WINDAS)の構成レーダーとして採用されている[Ishihara et al., 2006]。現在、WINDASの観測データは天気予報のための現業数値予報モデルの初期データとして入力され、従来予報が困難であった集中豪雨などの局地現象に対する予報精度の向上に貢献している。

### (2) 大気レーダーの散乱機構

降水粒子を標的とするマイクロ波帯の気象レーダーと異なり、大気レーダーは電波が伝搬する媒体(大気)そのものが標的となる。従って、天気にかかわらず風速観測が可能なのが際立った特長である。大型大気レーダーは、中層大気の中小規模大気運動、特に大気重力波・乱流等の観測で目覚ましい成果を挙げている[例えば、Tsuda, 2014]。応用はかなり進んでいるが、その本質である散乱機構については、直接観測も室内実験も難しく、気象レーダーに比べて、まだ未知の部分が多く残されている。

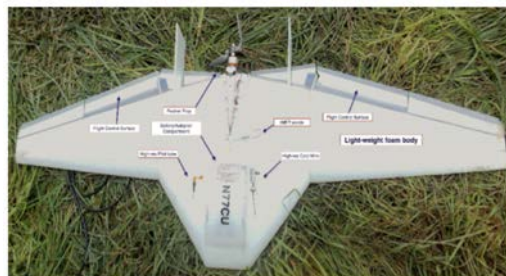
大気レーダーの晴天時の散乱体は、大気乱流や密度成層などから生じる屈折率変動と言われているが、その実体を捉えた観測例はない。屈折率変動を伴う大気に電波が入射すると、ごく僅か、その界面に分極電界が生じ、

そこから電波が再放射される。下層大気の屈折率は気温、気圧、及び水蒸気圧で決まるため、大気乱流に伴って密度変動が生じ、電波の屈折率も空間的に変動するためと言われている。過去にラジオゾンデとの同時観測から、気温や湿度変動とレーダー観測エコーとの対応が議論されているが、概ね説明がつかないものの、両者の差異はレーダーとラジオゾンデの観測領域の違いが原因とされてきた。

## 2. 研究の目的

### (1) 無人航空機(UAV)による直接観測

近年、下写真のような小回りの利く小型無人航空機(UAV)の研究利用が可能となった。本研究では、世界最高性能の VHF 帯大気レーダーである MU レーダーのサンプリングボリューム内を、気象センサーを搭載した UAV で同時観測し、大気レーダーの散乱機構を初めて観測的に明らかにすることを目的とする。



観測実験で使用した UAV

## 3. 研究の方法

### (1) MU レーダー・UAV 同時観測実験の実施

平成27年度、28年度に各1回ずつ MU レーダー(下写真)と無人航空機(UAV)との同時観測実験を実施した。UAVの飛行に必要な許認可は時間的に余裕をもって事前に取得した。UAVは地上から離陸し、バッテリーが持続する間、上昇・下降を繰り返すことを基本の運用パターンとしたが、バッテリーを節約し、より高高度かつ長時間の運用を可能とするため、ヘリウムガスを充填した気球によって上空まで持ち上げ、リモートで紐を切断すると同時に、プロペラモーターをオンにする運用方法も試した。UAVはGPSにより自身の位置情報を得て自律飛行が可能であり、予めプログラムを組んでおくことも、その場の判断で柔軟に飛行方法を変更することも可能である。ShUREX (Shigaraki, UAV-Radar Experiment) キャンペーンと名付け、UAVが安全に飛行可能な風速が10m/s以下であることも考慮し、風の比較的弱い2015年6月1~14日、2016年5月25日~6月14日を観測期間とした。この期間、MUレーダーは連続運用し、気象条件やMUレーダーの観測データを確認しながらフライトの実施を判断した。



MU レーダー (滋賀県甲賀市信楽町)

## (2) UAV システム

実験に使用した UAV は、コロラド大で開発された DataHawk UAV [Lawrence and Balsley, 2013] で、小型(両翼幅約 1m)、軽量(~1kg)、低コスト(\$1,000~2,000)、再利用可能、GPS による自律飛行可能という特徴がある。UAV 搭載のラジオゾンデセンサーを流用した 1Hz サンプルングの気温・湿度・気圧データに加えて、800Hz の高速サンプルングの気温センサーによる乱流パラメータの高分解能データを取得する試みも行った。

UAV の離着陸は、MU レーダーアンテナから南西へ約 1km の利用休止中の牧草地を借用して行った。UAV は自ら滑走して離陸することはできないため、ゴムで引っ張って離陸させる方法(Bungee 法)か、ヘリウムを詰めた気象気球で上空に持ち上げ適当な高度に達したところで切り離す方法(Balloon 法)で行う。国内で行う初めての実験であったので、ほとんどのフライトをより安全な Bungee 法で行った。UAV と地上との間の通信は無線 LAN によって行われ、ゾンデ気象センサーによる 1Hz サンプルングデータの他、GPS による位置情報など UAV の飛行状態に関する情報がリアルタイムに得られる。飛行方法は予め離陸前にプログラムしておくが、状況に応じて離陸後に飛行方法を変更することも可能である。MU レーダーでリアルタイムに風速を推定して、安全のため風速 10m/s を越える場合には飛行を見合わせた。なお、着陸はいわゆる胴体着陸により行う。

## (3) MU レーダーの観測モード

MU レーダーは、天頂ビームで 46~47MHz 範囲で等間隔の 5 周波数(すなわち 46.00, 46.25, 46.50, 46.75, 47.00MHz)のレンジイメージングモードで運用した[Luce et al., 2006]。また、水平風の情報も得るため、天頂角  $10^\circ$  で北、北東、東、南東、南の 5 方向にビームを走査するモードも併用した。サブパルス幅  $1\mu s$  で、16 ビットのいわゆるスパノ符号を用いて、IPP  $400\mu s$  で 32 点コヒーレント積分を行い、天頂 5 周波と斜方 5 方向の 512 点の複素時系列データを 65.5 秒毎に得た。128 点(すなわち 16.4 秒)のデータを 4.096 秒毎にオーバーラップして切り出し、

エコー強度、平均ドップラー速度、スペクトル幅等のパラメータを推定した。定期的にレーダーシステムの状態をチェックするため、約 33 分毎に約 1 分間 5 ビームの対流圏・成層圏標準観測モードで運用した。

サブパルス幅  $1\mu s$  に相当する距離分解能は 150m であるが、海拔高度 1.245km~20.445km の範囲で 5m 毎に Capon 法によるレンジイメージング処理を行った [Palmer et al., 1999; Luce et al., 2001]。Capon 法はターゲットの分布についての事前情報が不要なため、広く使われている方法である。一方、受信信号の共分散行列の特異値分解に基づく MUSIC アルゴリズムは、予め数が既知のハードターゲットに適用されるパラメトリック法であり、大気乱流のような分布型ターゲットには適用できないが、後に述べる UAV を検出する目的には有効な方法である。

## (4) 実験データの初期解析

MU レーダーは通常オンラインで積分処理を行い、データ量を圧縮して保存している。本観測実験では、UAV のフライトタイミング決定のためにリアルタイムに一次処理を行うと共に、事後にオフラインにより様々な信号処理手法を試すためにできるだけ生データに近いデータを保存した。MU レーダーに対して、UAV 自身が大気散乱に比べて桁違いに大きな散乱体となり、完全に同じ時間・距離におけるデータから大気パラメータを推定することは不可能であるので、僅かに時間の異なるデータを用いた。UAV データについても品質管理を丁寧に行い、最終的なデータセットを作成した。

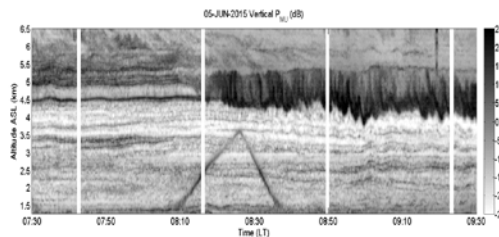
## (5) 大気レーダー散乱機構解析

上で整備したデータセットを用いて、大気レーダーの散乱機構について検討・考察した。これまでに提唱されている散乱機構で説明可能なこと、説明不可能なことを明確に区別する。解析結果については次節で述べる。

## 4. 研究成果

下図に MU レーダーのレンジイメージングモード Capon 法で得られたエコー強度の時間高度変化の例を示す。この時、UAV は MU レーダーの周囲を大きく螺旋を描きながら 3425m まで約 2.5m/s の割合で上昇し、8 時 25 分頃から 3.9m/s の割合で下降した。高度 5km 程度に大気乱流と思われる強いエコーが得られているが、その下は比較的穏やかで、8 時 10 分頃に最下層に表れた UAV からのエコーが徐々に上昇し、8 時 25 分頃から下降に転じ、8 時 35 分頃に消える様子がきれいに捉えられている。本研究の本来の目的とは若干外れるが、UAV は GPS により時々刻々の正確な位置が記録されているので、これを利用して MU レーダーのレンジキャリブレーションを試みた。単体のターゲットを仮定して MUSIC 法による推定も行ったが、Capon 法による結果

と良く一致し、両者の平均的な差は 2m 以下であった。GPS による UAV の位置情報との比較から、MU レーダーのレンジに 25m の補正が必要であることを見出した。これまでの MU レーダーのレンジキャリブレーションは最短の  $1\mu s$  パルスに相当する 150m 程度の精度でしか行えていなかったが、今回レンジイメージングにより数 m 程度の精度で行うことができたと言える。逆に、高分解能のレンジイメージングデータの信頼性を評価できたとも言える。



2015 年 6 月 5 日 7 時 30 分～9 時 30 分に MU レーダーレンジイメージングモードで得られたエコー強度の時間高度変化。8 時 10～40 分頃の下層の三角形のエコーが UAV によるもの。

MU レーダーと UAV の観測データからそれぞれ下部対流圏の屈折率勾配の二乗を推定し、比較・検討した。成層が見られる領域では小さな逆転層により両者が一致しない場合があったが、他の大部分では概ね一致する結果が得られた。一方、大気乱流の存在が示唆される場所では MU レーダー観測から求めた値の方が大きくなった。これは比較を行うにあたり、等方散乱モデルを区別しなかったためであると考えられる。乱流からの等方性散乱が起こる場合はエコー強度の決定に屈折率勾配以外の要素が寄与することを確認した。

## 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 1 件)

- ① Hubert Luce, Lakshmi Kantha, Hiroyuki Hashiguchi, Dale Lawrence, Masanori Yabuki, Toshitaka Tsuda, and Tyler Mixa, Comparisons between high-resolution profiles of squared refractive index gradient  $M2$  measured by the Middle and Upper Atmosphere Radar and unmanned aerial vehicles (UAVs) during the Shigaraki UAV-Radar Experiment 2015 campaign, *Ann. Geophys.*, 35, 423-441, doi:10.5194/angeo-35-423-2017, 2017.

[学会発表] (計 20 件)

- ① 橋口浩之・Lakshmi Kantha・Dale Lawrence・Mixa Tyler・Hubert Luce・Richard Wilson・津田敏隆・矢吹正教・森

昂志, Shigaraki UAV-Radar Experiment (ShUREX 2015), 第 9 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2015 年 9 月 10-11 日.

- ② 森昂志・橋口浩之・Lakshmi Kantha・Dale Lawrence・Mixa Tyler・Hubert Luce・Richard Wilson・津田敏隆・矢吹正教, Shigaraki UAV-Radar Experiment (ShUREX 2015), 第 29 回大気圏シンポジウム, 相模原, 2016 年 3 月 8-9 日.
- ③ 森昂志・橋口浩之・Lakshmi Kantha・Dale Lawrence・Tyler Mixa・Hubert Luce・Richard Wilson・津田敏隆・矢吹正教, 小型無人航空機・MU レーダー同時観測実験, 日本気象学会 2016 年度春期大会, 東京, 2016 年 5 月 18-21 日.
- ④ 橋口浩之・森昂志・Lakshmi Kantha・Dale Lawrence・Tyler Mixa・Hubert Luce・Richard Wilson・津田敏隆・矢吹正教, 小型無人航空機・MU レーダー同時観測実験, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 千葉, 2016 年 5 月 22 日-26 日.
- ⑤ 森昂志・橋口浩之・Lakshmi Kantha・Dale Lawrence・Tyler Mixa・Hubert Luce・Richard Wilson・津田敏隆・矢吹正教, 小型無人航空機・MU レーダー同時観測実験, 第 10 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2016 年 9 月 8-9 日.
- ⑥ 森昂志・橋口浩之・Lakshmi Kantha・Dale Lawrence・Tyler Mixa・Hubert Luce・Richard Wilson・津田敏隆・矢吹正教, 小型無人航空機・MU レーダー同時観測実験, 日本気象学会 2016 年度秋期大会, C301, 名古屋, 2016 年 10 月 26-28 日.
- ⑦ Hubert Luce・Richard Wilson・橋口浩之・津田敏隆・矢吹正教・L. Kantha・D. Lawrence, International collaborative study on atmospheric turbulence based on simultaneous observations with the MU radar, small unmanned aerial vehicles (UAV), and radiosonde balloons, 生存圏ミッションシンポジウム, 宇治, 2017 年 2 月 23-24 日.
- ⑧ Lakshmi Kantha, Dale Lawrence, Hubert Luce, Hiroyuki Hashiguchi, Toshitaka Tsuda, Richard Wilson, Tyler Mixa, and Masanori Yabuki, Shigaraki UAV-Radar Experiments (ShUREX): Measuring Turbulence in the Lower Troposphere, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, PEM15-04, 千葉, 2017 年 5 月 20 日-25 日.
- ⑨ 橋口浩之・森昂志・Luce Hubert・Kantha Lakshmi・Lawrence Dale・Mixa Tyler・Wilson Richard・津田敏隆・矢吹正教, 大気成層構造の小型無人航空機・MU レーダー同時観測, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, PEM15-P01, 千葉, 2017 年 5 月 20 日-25 日.
- ⑩ 橋口浩之・森昂志・Hubert Luce・Lakshmi Kantha・Dale Lawrence・Tyler Mixa・

- Richard Wilson・津田敏隆・矢吹正教, 大気成層構造の小型無人航空機・MU レーダー同時観測, 日本気象学会 2017 年度春期大会, P106, 東京, 2017 年 5 月 25-28 日.
- ⑪ Lakshmi Kantha, Dale Lawrence, Hubert Luce, Hiroyuki Hashiguchi, Toshitaka Tsuda, R. Wilson, T. Mixa, and M. Yabuki, Shigaraki UAV-Radar Experiments (ShUREX): Measuring Turbulence in the Lower Troposphere, The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, M4-6 (invited), Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.
- ⑫ Hubert Yves Luce, Lakshmi Kantha, Hiroyuki Hashiguchi, Dale Lawrence, Masanori Yabuki, and Toshitaka Tsuda, Comparisons between turbulent kinetic energy dissipation rates estimated from MU radar data and UAV-borne Pitot sensors during ShUREX 2016 campaign, The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, M4-7, Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.
- ⑬ Hubert Yves Luce, Hiroyuki Hashiguchi, Lakshmi Kantha, Dale Lawrence, Tyler Mixa, Toshitaka Tsuda, and Masanori Yabuki, Evaluation of the performance of the range imaging technique using small UAVs as hard targets during ShUREX campaigns (2015-2016), The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, E1M1-P7, Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.
- ⑭ Richard Wilson, H. Hashiguchi, L. Kantha, D. Lawrence, T. Mixa, M. Yabuki, H. Luce, and T. Tsuda, Turbulence measurements from UAV and meteorological balloons: a comparison, The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, M4-P1, Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.
- ⑮ Hubert Yves Luce, Lakshmi Kantha, Hiroyuki Hashiguchi, Dale Lawrence, Masanori Yabuki, Toshitaka Tsuda, and Tyler Mixa, Comparisons between high-resolution profiles of squared refractive index gradient M2 estimated from MU radar and UAV data collected during the ShUREX 2015 campaign, The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, M4-P2, Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.
- ⑯ Hubert Yves Luce, Masanori Yabuki, Hiroyuki Hashiguchi, and Lakshmi Kantha, Deep, in-cloud Kelvin-Helmholtz billows observed simultaneously by the MU radar, a fisheye camera and two lidars, The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, M4-P3, Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.
- ⑰ Hubert Yves Luce, Lakshmi Kantha, Hiroyuki Hashiguchi, Noriyuki Nishi, Dale Lawrence, T. Tsuda, and M. Yabuki, A detailed analysis of steep humidity gradients above a turbulent cloud top using MU radar, UAV and balloon measurements, The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, M4-P4, Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.
- ⑱ Hubert Yves Luce, Lakshmi Kantha, Hiroyuki Hashiguchi, Dale Lawrence, Masanori Yabuki, Toshitaka Tsuda, and Tyler Mixa, Concurrent MU radar, UAV and balloon observations of temperature and moisture finescale structures during the ShUREX2015 campaign, The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, M4-P6, Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.
- ⑲ Hubert Yves Luce, Atsushi Kudo, and Hiroyuki Hashiguchi, MU radar observations of turbulence possibly due a convective instability below melting layer of precipitation, The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, M4-P7, Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.
- ⑳ Hiroyuki Hashiguchi, Takashi Mori, Hubert Luce, Lakshmi Kantha, Dale Lawrence, Tyler Mixa, Richard Wilson, Toshitaka Tsuda, and Masanori Yabuki, Simultaneous observations of atmospheric structure with UAV and the MU radar, The 15th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar MST15/iMST2, M4-P8, Tachikawa, Tokyo, Japan, May 27-31, 2017.

[その他]

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~hasiguti>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋口 浩之 (HASHIGUCHI, Hiroyuki)  
 京都大学・生存圏研究所・准教授  
 研究者番号：90293943

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

(4)研究協力者

Lakshmi Kantha

米・コロラド大学・教授

Dale A. Lawrence

米・コロラド大学・教授

Hubert Luce

仏・トゥーロン大学・准教授

Richard Wilson

仏・LATMOS, CNRS・准教授

矢吹正教

京都大学・生存圏研究所・助教

研究者番号: 80390590

津田敏隆

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号: 30115886