

Shigaraki UAV-Radar Experiment (ShUREX 2015)

橋口浩之¹・Lakshmi Kantha²・Dale Lawrence²・Tyler Mixa²・Hubert Luce³・
Richard Wilson^{4,1}・津田敏隆¹・矢吹正教¹・森昂志¹

1 京都大学生存圏研究所

2 Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado Boulder, Boulder, Colorado, USA

3 Université de Toulon, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM 110, France

4 Université Pierre et Marie Curie (Paris06); CNRS/INSU, LATMOS-IPSL, Paris, France

1. はじめに

ShUREX(Shigaraki, UAV-Radar Experiment)キャンペーンが、6月1～14日に信楽 MU 観測所で実施された。低コストの無人小型航空機(UAV)が MU レーダーの近くで運用され、温度、湿度、気圧、風向・風速の他、温度に関する乱流構造定数 C_T^2 や乱流エネルギー消散率 ε などの乱流パラメータが高分解能で測定された。このコロラド大学で開発された UAV は DataHawk Small Airborne Measurement Systems (SAMS) と呼ばれ、小型(両翼幅 1m)、軽量(700g)、低コスト(約\$1,000)、再利用可能、GPS による自律飛行可能という特徴を持っている(Lawrence and Balsley, 2013; Balsley et al., 2013)。UAV は、その時の風の状況にも依るが、40m～1km 程度の半径で、螺旋を描いて上昇・下降したり、一定高度を円状に飛行してデータを取得するのが一般的である。

ShUREX キャンペーンは次のようなことを目的として実施された。

- MU レーダー上空を UAV 搭載のゾンデセンサーで観測し、MU レーダー観測との比較を通して、ラジオゾンデ観測から推定される乱流運動エネルギー(TKE)消散率 ε のより正確なキャリブレーションと検証を行う。
- UAV 搭載ゾンデセンサーによる ε の測定値と、同じく UAV 搭載の高分解能ピトーセンサーによる測定値を比較する。
- MU レーダーによる屈折率に関する乱流構造定数 C_n^2 と UAV 搭載高分解能気温センサーによる温度に関する乱流構造定数 C_T^2 を比較する。
- 安価な UAV の大気測定装置としての有用性を実証する。
- K-H 不安定の構造や大気重力波などを測定する上で、UAV と MU レーダーの同時観測に相乗的効果があることを実証する。

2. 実験の概要

2.1 UAV システム

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。牧草地は離着陸に十分な広さであったが、周囲に山が迫っており、信楽 MU 観測所との間に山を挟み見通してはいたため、トランシーバーによる通信がクリアでないなど、パーフェクトな場所とは言えなかった。UAV は自ら滑走して離陸することはできないため、図 1 に示すように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。今回は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 サンプリングデータその他、GPS による位置情報など UAV の飛行状態に関するデータをリアルタイムに得ることができる。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ので、草がクッションになる今回の場所は最適であった。



図 1. UAV の離陸の様子。(左)Bungee 法。(右)Balloon 法。

2.2 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° 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。

3. 観測例 -- UAV エコーを利用した MU レーダーのレンジキャリブレーション --

表 1 にキャンペーン期間中の UAV のフライト状況を示す。図 2 は、No.2 フライト時に MU レーダー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である。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。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。

表 1. フライトの状況

| No. | Time Tag | Max height | Aircraft | Launch | Purpose |
|-----|------------------|------------|----------|---------|----------------------|
| 1 | June 5 06:32:13 | 3.0 | N78CU | bungee | Over the field |
| 2 | June 5 07:48:46 | 3.0 | N78CU | bungee | Over the field |
| 3 | June 5 09:12:56 | 4.0 | N74CU | bungee | Over the field |
| 4 | June 7 05:44:00 | 3.7 | N78CU | bungee | Over the field |
| 5 | June 7 07:14:11 | 4.2 | N77CU | bungee | Over the field |
| 6 | June 7 09:44:58 | 3.5 | N77CU | bungee | Over the field |
| 7 | June 7 10:55:36 | 3.9 | N77CU | bungee | Over the field |
| 8 | June 7 12:55:28 | 3.2 | N77CU | bungee | Over the field |
| 9 | June 7 15:34:41 | 3.2 | N75CU | bungee | Over the field |
| 10 | June 7 17:33:43 | 4.3 | N75CU | bungee | Over the field |
| 11 | June 9 15:46:14 | 2.4 | | bungee | Over the radar |
| 12 | June 9 16:55:11 | 2.5 | | bungee | Over the radar |
| 13 | June 10 07:28:08 | 0.7 | | bungee | Gravity Wave |
| 14 | June 10 08:22:20 | 2.0 | | bungee | Gravity Wave |
| 15 | June 10 10:16:52 | 1.8 | | bungee | Gravity Wave |
| 16 | June 11 05:32:11 | 2.3 | N78CU | bungee | Cn2 comparison radar |
| 17 | June 11 09:23:03 | 5 | N78CU | balloon | Near the radar |
| 18 | June 13 09:34:20 | 1.7 | N78CU | bungee | Gravity Wave |
| 19 | June 13 12:12:43 | 2.7 | N78CU | balloon | Long term Survey |

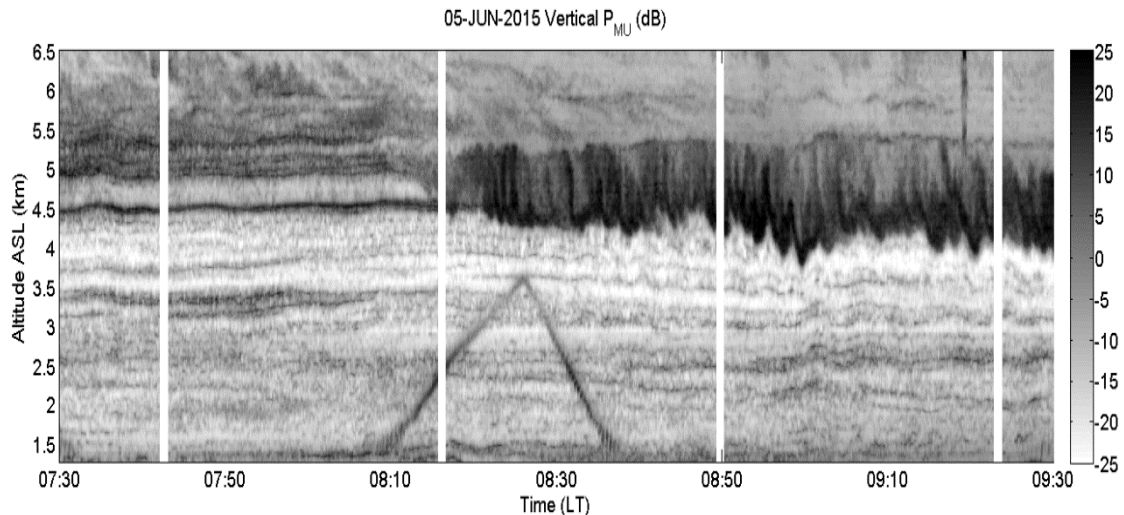


図 2. 2015 年 6 月 5 日 7 時 30 分～9 時 30 分に MU レーダーレンジイメージングモードで得られたエコー強度の時間高度変化。8 時 10～40 分頃の下層の三角形のエコーが UAV によるもの。

4. まとめ

ShUREX2015 キャンペーンにおいて、MU レーダーをレンジイメージングモードで連続運用し、UAV で下部対流圏のデータを取得した。UAV は、高分解能の乱流センサーを搭載し、小スケールの大気運動や構造を研究するための新たなツールである。本稿では、キャンペーンの主目的からは外れるが、MU レーダーのレンジイメージング観測の有効性を評価することに重点を置いた。これまでの MU レーダーレンジイメージング観測から、Capon 法により大気乱流エコー分布を高分解能で得られることが示されてきたが、レンジイメージングは UAV のようなハードターゲットを高分解能で検出することにも有効であることを示した。レンジイメージング観測が、パルスレーダーのレンジ分解能を改善するのにとっても有効な手段であることを改めて示すことができた。また、副産物として、MU レーダーシステムのレンジキャリブレーションを数 m の精度で実施することができた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K13568 の助成を受けたものです。MU レーダーは京都大学生存圏研究所によって管理・運用されています。

参考文献

- Balsley, B.B., D.A. Lawrence, R.F. Woodman, and D.C. Fritts, Fine-Scale Characteristics of Temperature, Wind, and Turbulence in the Lower Atmosphere (0–1,300 m) Over the South Peruvian Coast, *Boundary-Layer Meteorol.*, **147**, 165-178, 2013.
- Lawrence, D.A., and B.B. Balsley, High-Resolution Atmospheric Sensing of Multiple Atmospheric Variables Using the DataHawk Small Airborne Measurement System, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**, 2352-2366, 2013.
- Luce, H., M. Yamamoto, S. Fukao, and M. Crochet, Extended radar observations with the Frequency radar domain Interferometric Imaging (FII) technique, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **63**, 1033-1041, 2001.
- Luce, H., G. Hassenpflug, M. Yamamoto, and S. Fukao, High-resolution vertical imaging of the troposphere and lower stratosphere using the new MU radar system, *Ann. Geophys.*, **24**, 791-804, 2006.
- Palmer, R. D., T.-Y. Yu, and P. B. Chilson, Range imaging using frequency diversity, *Radio Sci.*, **34**, 1485-1496, 10.1029/1999RS900089, 1999.