

Shigaraki UAV-Radar Experiment (ShUREX 2015)

森昂志¹・橋口浩之¹・Lakshmi Kantha²・Dale Lawrence²・Tyler Mixa²・
Hubert Luce³・Richard Wilson⁴・津田敏隆¹・矢吹正教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

近年、対流圏の観測手法として、GPS を利用した自律飛行により任意の場所のデータを取得できる小型無人航空機(UAV)が注目されている。2015年6月に信楽 MU 観測所(滋賀県甲賀市信楽町)で ShUREX(Shigaraki UAV-Radar Experiment)キャンペーンが実施された。コロラド大で開発された低コストの UAV が MU レーダーの近くで運用され、気温、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。

本研究では、特に乱流中を飛行する UAV が観測した気温変化について検討する。通常、高度が一定なら気温はほとんど変化しないと期待されるが、キャンペーンにおいて乱流中を水平飛行する UAV が大きな気温変化を観測した。この変化のエコー強度との関係性を述べるとともに、シミュレーションによって変化の妥当性を確かめる。

2. 観測実験の概要

キャンペーンでは UAV と MU レーダーの他、本稿では述べないが、ライダーやラジオゾンデも運用した。

2.1 UAV システム

UAV はコロラド大学で開発された SAMS と呼ばれるものを使用した(図 1)。UAV 搭載のセンサーにより気温、湿度、気圧などを 1 秒毎にリアルタイムに得ることができる。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、図 2 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。

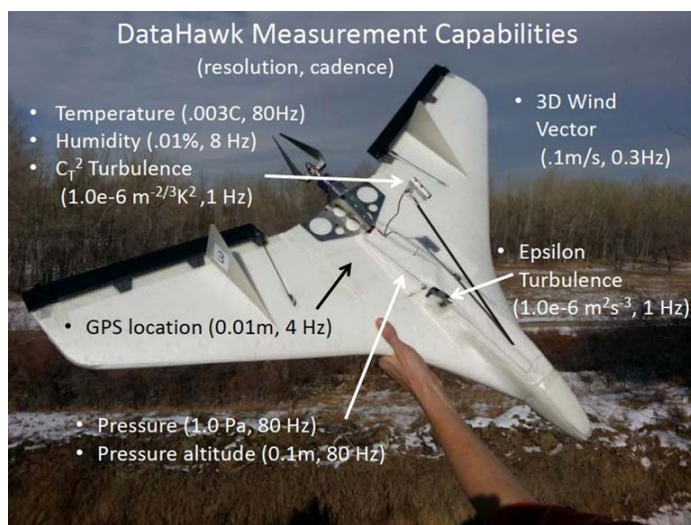


図 1. ShUREX2015 キャンペーンで使用したのと同型の UAV [Lawrence and Balsley, 2013].



図 2. UAV の離陸の様子. (左)Bungee 法. (右)Balloon 法.

2.2 MU レーダー

信楽 MU 観測所の MU レーダーは中心周波数 46.5MHz, アンテナ直径 103m, 送信出力 1MW の大型大気レーダーである(図 3). 本キャンペーンでは, 天頂ビームで 46~47MHz 範囲で等間隔の 5 周波数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ンノ符号を用いて, 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。



図 3. MU レーダー

3. 観測結果

6 月 9 日の観測結果を図 4 に示す。MU レーダー上空では上昇流と下降流が頻繁に入れ替わり, UAV はその中を高度約 2.43km でほぼ水平に飛行していることが分かる。通常, 高度が一定なら気温はほとんど変化しないと期待されるが, 比較的大きな変

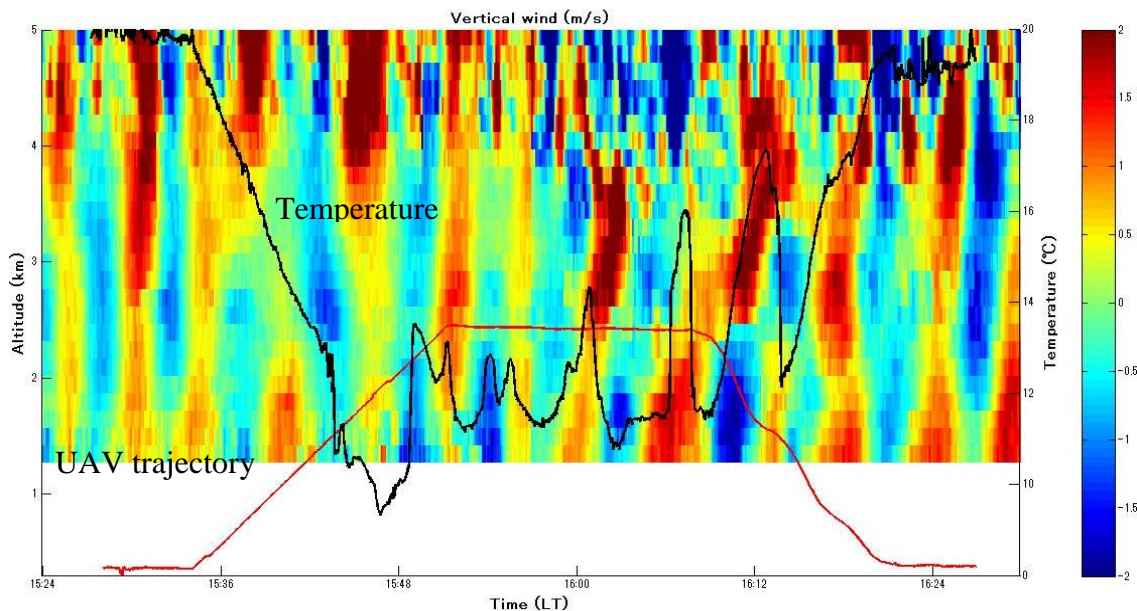


図 4. 2015 年 6 月 9 日 15 時 24 分~16 時 30 分に MU レーダー近傍において、UAV で測定された気温(黒線)と MU レーダーで測定された鉛直流(コンタ)の時間(高度)変化。赤線は UAV の高度を示す。このとき UAV は 4~5 分周期で MU レーダーを中心とした半径 400~500m の円を描いて半時計周りに旋回している。

化が観測されている。MU レーダーで観測された鉛直流との比較から、定性的には、鉛直流に伴う断熱圧縮・膨張により気温が上下したと言えるが、それだけでは説明できない大きな気温変化が観測されている。この時、背景風は 10m/s 前後の西風である。また、図 5 に示すように、高度 1.5km と高度 2.5km 付近にエコー強度の強い(乱流の強い)層があり、UAV はその中を出入りしていることが分かる。

図 5 から、UAV がこれらのエコーの強い層に入るときに気温が大きく上昇し、出るときに大きく低下していることが分かる。乱流中では気温減率が異常な値を取ることで鉛直流による気温変化が不規則になると考えられる。

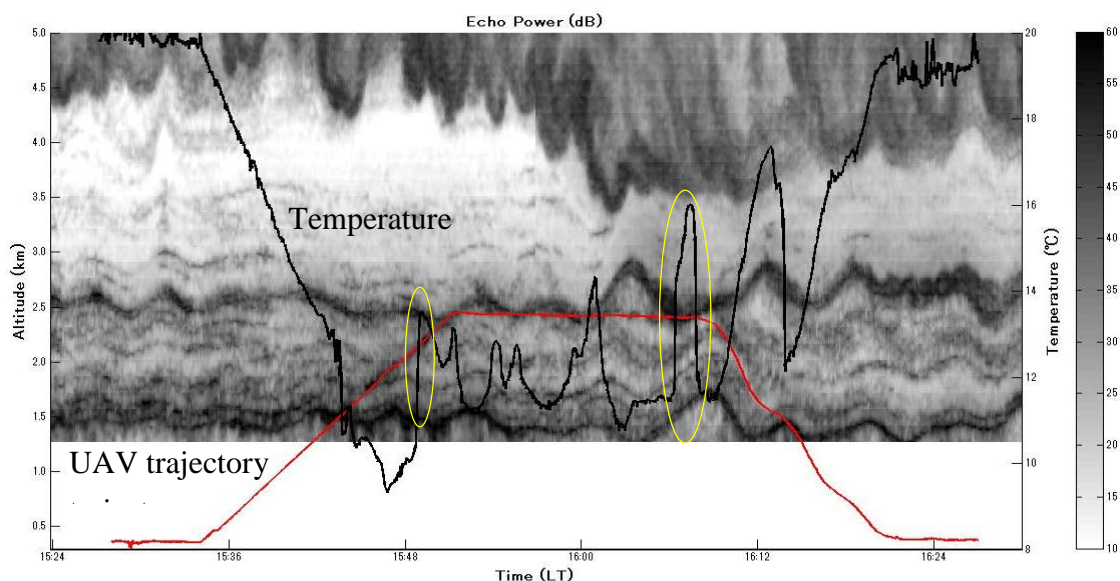


図 5. 2015 年 6 月 9 日における MU レーダー周波数イメージング観測によるエコー強度(コンタ)及び UAV の飛行高度(赤線)と気温(黒線)の時間(高度)変化。

4. シミュレーション

図 6 に UAV の上昇・下降中に観測された気温の高度変化を示す。上昇中の 2130m 付近で +50K/km の大きな気温変化が起こっている。これは図 5 における左の丸印で示した変化にあたる。ただし、下降中の 2130m 付近では同様の変化は見られない。

図 5 から、エコーの層は数百 m に渡り上下に移動していることがわかる。上昇中、2130m にあった層がその後 2430m まで移動したと仮定して、UAV が高度 2430m 付近を水平飛行中に観測した気温変化を再現できるかシミュレーションを行った。

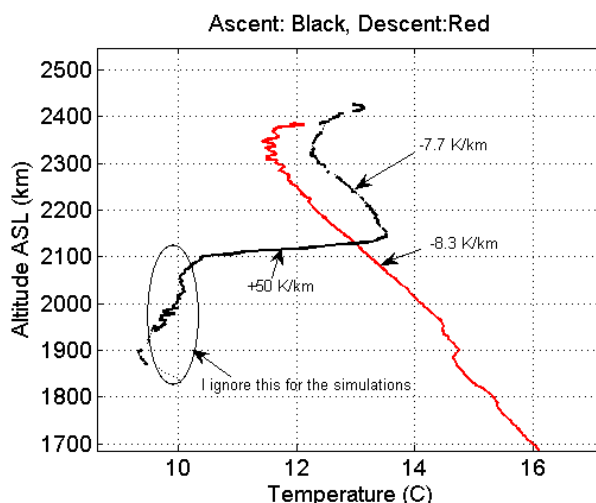


図 6. 2015 年 6 月 9 日 15 時 24 分～16 時 30 分に UAV が観測した気温の高度変化。黒線は上昇中、赤線は下降中。横の数字は気温の高度変化から求めた気温減率。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーションに際して以下の条件を設定した。

- UAV が水平飛行を行う高度 2430m 付近の気温減率を 50K/km とする
- 鉛直流による気温変化のみ考慮する
- 簡単のため鉛直流は上昇流と下降流が周期的に変化すると仮定する

図 7 はシミュレーションで仮定した気温の高度変化である。気温減率については、2400m から 2460m までは図 6 の 2130m 付近の値と同じく 50k/km とした。その他の高度は図 6 の -7.7K/km と -8.3K/km の平均値である -8K/km とした。

次に鉛直流を仮定する。図 4 から、UAV の水平飛行中は上昇流と下降流のセットが約 300 秒周期で発生している。よって、上昇流と下降流が 150 秒ずつ交互に起こるものとする。鉛直流の強さは、図 4 の全体的な鉛直流の強さを考慮して、最大 2m/s と 1m/s の場合について検討する。

鉛直流と気温減率が決まれば、鉛直流に伴う断熱圧縮・膨張による時間 Δt における気温変化 ΔT は以下の式で求めることができる。

$$\Delta T = (\Gamma_a - \Gamma(t))w_{\text{air}}(t)\Delta t$$

ここで、 Γ_a は乾燥断熱減率 (-9.8K/km)、 $\Gamma(t)$ は図 7 のように変化する気温減率である。また、 $w_{\text{air}}(t)$ は鉛直流の強さである。

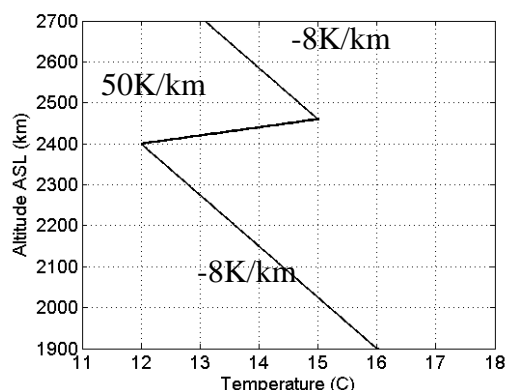


図 7. シミュレーションにおける気温の高度変化. 横の数字は気温減率.

4.2 シミュレーション結果

図 8 に、高度 2430m の大気に対するシミュレーション結果を示す。鉛直流に伴って 2430m にある空気塊は上図のように変動する。図 7 において、空気塊が 2400m から 2460m の範囲を通るとき、気温減率が 50K/km であるので気温は急激に変化するが、この範囲を出ると気温減率は -8K/km となるので気温はほとんど変化しなくなる。よって、下図のように短時間で 4K 近い気温変化が起こり得る。

図 5 の右の丸印で示す UAV で観測された 4K の気温変化はこのシミュレーション結果で説明できる。なお、図 8(下)の赤線は気温減率を全ての高度で -6.5K/m とした時の気温変化であり、これと比べてもシミュレーションにおける気温変化は非常に大きなものとなっている。

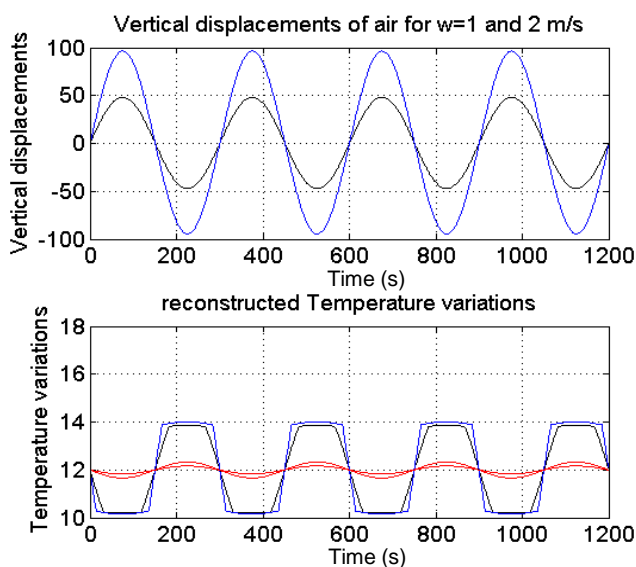


図 8. 高度 2430m の大気に対するシミュレーション結果. (上)空気塊の変動幅. (下)鉛直流による気温変化. 青線、黒線はそれぞれ鉛直流が最大 2m/s, 1m/s の時、赤線は気温減率を全高度で -6.5K/km とした時の結果.

5. まとめ

ShUREX キャンペーンの中で UAV と MU レーダーの同時観測により下部対流圏のデータを取得した。UAV は乱流中でも安定飛行が可能であり、下部対流圏においてはラジオゾンデより有用な観測装置になり得る可能性がある。本稿では、乱流中の気温変化についてエコー強度との関係性を示し、シミュレーションにより気温変化の妥当性を検証した。シミュレーションでは上昇流と下降流が周期的に変化するとしたため、UAV が観測した気温変化との時間的な一致は見られなかったが、変化の幅という点ではシミュレーション結果と矛盾しない。今後は鉛直流を MU レーダーによる観測値に近づけるなどして定量的なシミュレーションを行うとともに、気温変化について風向や UAV の飛行位置などとの関係性を検討する予定である。

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., 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.