

2016年9月9日  
第10回MULレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム

## 小型無人航空機・MULレーダー同時観測実験

森 昂志<sup>1</sup>・橋口 浩之<sup>1</sup>・Lakshmi Kantha<sup>2</sup>  
Dale Lawrence<sup>2</sup>・Tyler Mixa<sup>2</sup>・Hubert Luce<sup>3</sup>  
Richard Wilson<sup>4</sup>・津田 敏隆<sup>4</sup>・矢吹 正教<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学生存圏研究所  
<sup>2</sup> Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado Boulder, Boulder, Colorado, USA  
<sup>3</sup> Université de Toulon, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM 110, France  
<sup>4</sup> Université Pierre et Marie Curie (Paris06); CNRS/INSU, LATMOS-IPSL, Paris, France

## 研究背景

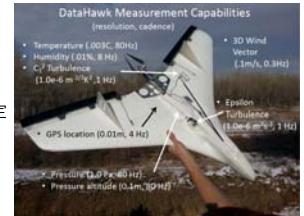
従来から下層大気の観測にはラジオゾンデ（気象気球）が用いられている  
→ 風に流されるため、レーダーと同じ場所の観測が困難

対流圏の観測手法としてUAVが注目されている

(UAV: Unmanned Aerial Vehicle, 無人航空機)

- ・各種センサーを搭載
- ・プロペラや翼を装備
- ・GPSによる位置情報の取得, 飛行位置の指定

任意の場所のデータを取得できる



## ShUREX2015の概要

- ・2015年6月に信楽MU観測所(滋賀県甲賀市信楽町)で実施
- ・UAVをMULレーダーの近くに飛ばして同時に運用 米グループがUAV運用を担当  
仏グループがMURイメージング観測を担当
- ・気温, 湿度, 気圧, 風向, 風速の他, 乱流構造定数C<sub>2</sub>や乱流エネルギー消散率εなどの乱流パラメータを測定
- ・ライダーやラジオゾンデも運用 (本発表では省略)

### 主な目的

- ・乱流パラメータについてMULレーダーとUAVの観測値を比較する
- ・UAVの大気観測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同時観測の相乗効果を実証する

## MULレーダー周波数イメージング観測

位置	滋賀県甲賀市信楽町 34° 51'15" N, 136° 06'20" E
中心周波数	46.5MHz
周波数帯域	3.5MHz
アンテナ	直交八木アンテナ475本
構造	直径103m円形アレイ
機能	電子ビーム方向走査
ビーム幅	3.6° (半値全幅)
送信出力	1MW (尖頭電力)

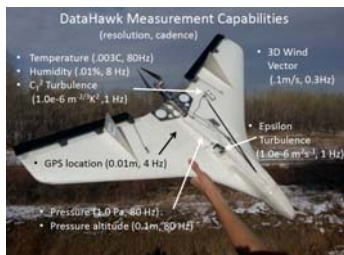


天頂方向の周波数イメージング観測と天頂角10°で北, 北東, 東, 南東, 南の5方向の観測

## キャンペーンで使用したUAV

コロラド大学で開発された  
DataHawk Small Airborne Measurement Systems (SAMS)  
というUAVを使用

- ・両翼幅1m
- ・軽量(700g)
- ・低コスト(約1000\$)
- ・GPSによる自律飛行
- ・再利用可能



## 観測方法

- MULレーダーから離れた場所で離陸
- ↓
- 高度を上げながらMULレーダーに接近
- ↓
- MULレーダー上空をしばらく旋回
- ↓
- 打ち上げ場所に帰還



1回の飛行は30-60分

期間：6/5 - 6/13  
UAV打ち上げ：19回

無線LANで UAVと通信

観測データや 位置情報を送信

バルーン  
UAV  
UAVの打ち上げ

UAV  
ゴム紐

ソナデ気象センサー

### 本発表の要旨

気温変動が小さい場合

UAV高度が一定ならば 気温はほぼ変化しないと期待される

気温変動が大きい場合

エコー層の変動に応じて 大きな気温変化が観測された

→ エコー強度との関係性を示し 気温変化の妥当性を検証する

### 本発表の要旨

UAVの飛行位置

UAV trajectory

Echo Power (dB)

Temperature (°C)

Altitude (km)

Time (LT)

MUR

離陸場所

気温変動が大きい場合

15:24-16:30 LT  
June 9, 2015  
UAV11

背景：鉛直流(MUR上空)

UAVの動き  
・半径400-500m  
・半時計周り  
・1周4-5分  
・平均10.9m/s

Vertical wind (m/s)

Temperature (°C)

Altitude (km)

Time (LT)

UAV Trajectory

大きな気温変化

上昇気流→気温低下  
下降気流→気温上昇

4°C変化

気温の変化幅は気温減率が大きく関わっている

気温減率：高度の上昇に伴う空気塊の気温の減少率  
対流圏の平均値は約6.5 K/km

・ 気温変化は以下の式で求める

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

$\Delta t$ 秒後の気温      鉛直流に伴う気温変化      UAVの高度変化に伴う気温変化

$T(t)$  : 時刻  $t$  における気温  
 $\Gamma_a$  : 乾燥断熱減率 (9.8 K/km)  
 $\Gamma(t)$  : UAV周囲の気温減率  
 $w_{air}(t)$  : 鉛直流 (m/s)  
 $\Delta t$  : 時間幅 (s)  
 $\Delta Z$  : UAVの高度幅 (m)

気温の変化幅は気温減率が大きく関わっている

気温減率：高度の上昇に伴う空気塊の気温の減少率  
対流圏の平均値は約6.5 K/km

気温減率  $\Gamma(t)$  を一律6.5 K/kmとしたときの計算で求めた気温変化

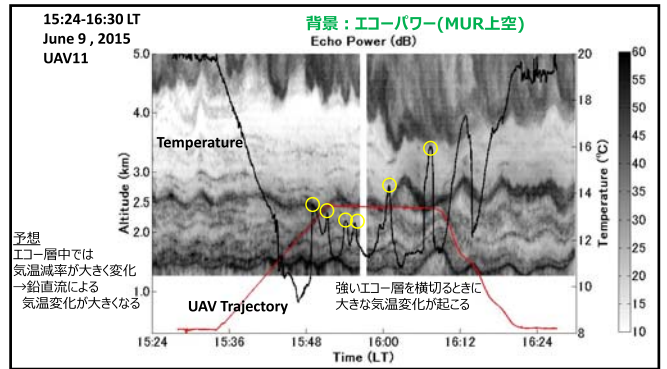
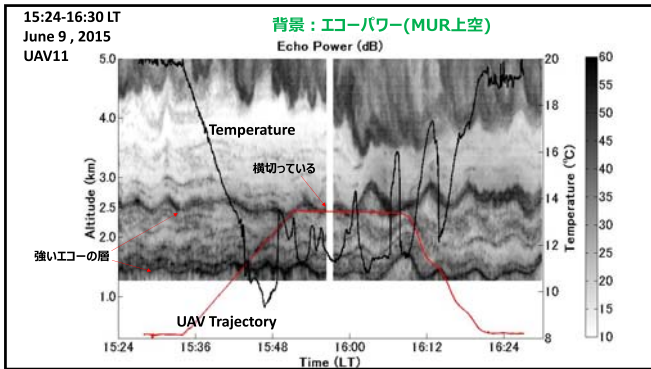
Vertical wind (m/s)

Temperature (°C)

Altitude (km)

Time (LT)

UAV Trajectory



### シミュレーション

$$T(t + \Delta t) = T(t) + \underbrace{(\Gamma(t) - \Gamma_a)}_{\text{鉛直流に伴う気温変化}} w_{air}(t) \Delta t - \underbrace{\Gamma(t) \Delta Z}_{\text{UAVの高度変化に伴う気温変化}}$$

水平飛行中に観測した気温変化について鉛直流や気温の鉛直プロファイルを仮定してシミュレーションを行い、妥当性を確かめた

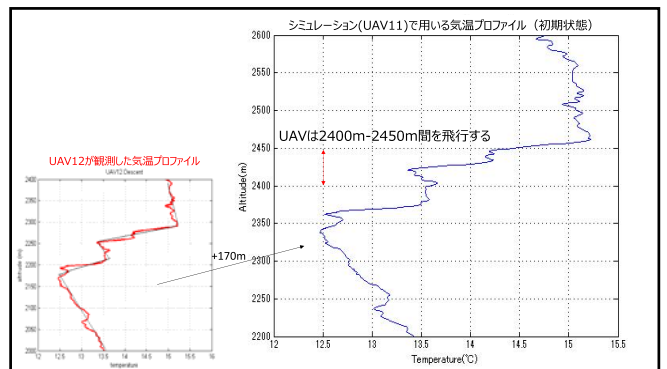
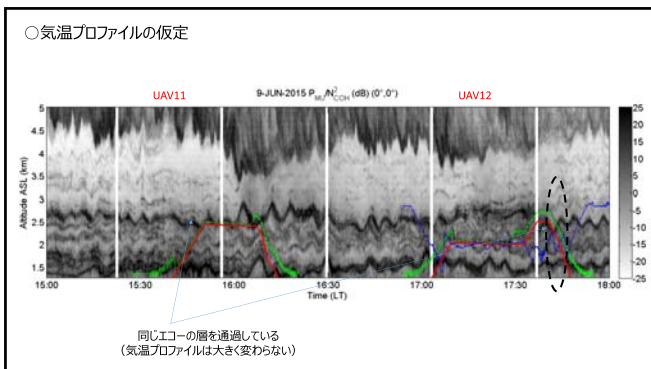
### ○鉛直流の仮定

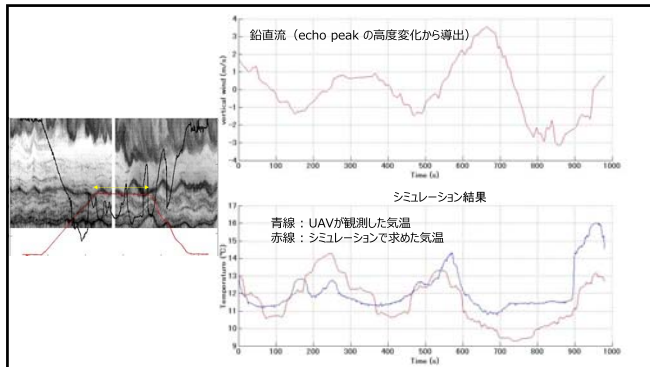
エコー強度が最も大きい層 (echo peak) の高度変化から鉛直流を導出

エコー層の影響で温度変化が起こるならば MURレーダーの観測値を使うよりエコー層の高度変化から鉛直流を求めるべき

$$w_p(t) = \frac{\Delta Z_p}{\Delta t}$$

$\Delta Z_p$ : echo peak の高度変化  
 $\Delta t$ : MURのサンプリング周期(約4.15秒)  
 $w_p(t)$ : 時刻 t における echo peak の高度変化 [m/s]





## まとめ

- ShUREXキャンペーンの中でUAVとMUL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は下部対流圏ではラジオゾンデより有用な観測装置になる可能性がある
  - 水平飛行時に強いエコー層中で鉛直流と相関のある大きな気温変化が観測された
  - エコー強度の特に強い領域を飛行中に大きな変化が起こる
  - シミュレーションにより気温変化の大部分を再現できた
- 今後は
- 鉛直流と気温プロファイルを調整してシミュレーションを継続する。
  - 今年5/26～6/13のデータも用いて、UAVとMULレーダーで観測された乱流パラメータを比較・解析する