

# 小型無人航空機と MU レーダーで観測された乱流エネルギー消散率の比較

橋口浩之<sup>1</sup>・Hubert Luce<sup>2</sup>・Lakshmi Kantha<sup>3</sup>・Dale Lawrence<sup>3</sup>・  
Richard Wilson<sup>4,1</sup>・津田敏隆<sup>1</sup>・矢吹正教<sup>1</sup>

1 京都大学生存圏研究所

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

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

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

## 1. はじめに

大気乱流は、物質やエネルギーの鉛直輸送の主要因で、航空機の安全運航に危険を及ぼす原因でもあり、その特性解明は重要な課題である。乱流エネルギー消散率  $\varepsilon$  は、乱流の基本的なパラメータであり、VHF 帯 MST レーダー観測から求めることができる(Weinstock, 1981; Hocking, 1983, 1985, 1986, 1999; Fukao et al., 1994; Hocking and Hamza, 1997; Naström and Eaton, 1997)。MST レーダーは、主に自由大気中の乱流を測定するため、そのモデルは安定成層大気中のシア不安定に伴う乱流の仮定に基づいている(例えば、Fukao et al., 1994; Kurosaki et al., 1996; Naström and Eaton, 1997)。このような乱流の場合、乱流渦の最大サイズは、成層乱流の外部スケールによって定義される(例えば Weinstock, 1981)。レーダーデータから乱流パラメータを求めるための別の主な仮定は、Kolmogorov-Obukhov-Corrsin(KOC)モデルに従う慣性小領域内に等方乱流が存在することである。したがって、 $\varepsilon$  の推定は、ドップラー広がりから等方乱流から生じると仮定して、スペクトル幅の測定に基づいている。Hocking(1999)によれば、乱流の外部スケールとレーダーのサンプリング体積の大小に応じて異なる関係式が導かれる。

ShUREX(Shigaraki, UAV-Radar Experiment)キャンペーンが、2015~2017年の6月に信楽 MU 観測所で実施された(Kantha et al., 2017)。低コストの無人小型航空機(UAV)が MU レーダー近傍で運用され、1Hz サンプリングの気温、湿度、気圧、風向・風速の他、高速サンプリングの気温・風速が測定された。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)。本研究では、ShUREX2016において、MU レーダーの近傍(水平距離約 1km)で、上昇・下降飛行した(最高高度約 4km) 16 フライトのデータを使用して、MU レーダーデータから推定された  $\varepsilon$  と、UAV の高分解能ピトーセンサーデータから得られた  $\varepsilon$  の直接推定値とを比較する。

## 2. 実験の概要

### 2.1 MU レーダー

MU レーダーは、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、天頂と天頂角  $10^\circ$  で北、東の 3 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、128 点の複素時系列データを 24.6 秒毎に得た。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 30 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  $1\mu\text{s}$  に相当する距離分解能は  $150\text{m}$  であるが、海拔高度  $1.245\text{km}\sim 20.445\text{km}$  の範囲で  $5\text{m}$  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)。ただし、スペクトル幅の推定では、イメージング処理を行わない  $150\text{m}$  分解能のデータを用いた。

## 2.2 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  $1\text{km}$  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 1 に示すようにゴムで引っ張って離陸させる方法(Bungee 法)が取られた。着陸はいわゆる胴体着陸により行う。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  $1\text{Hz}$  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データをリアルタイムに得ることができる。UAV には、気象要素測定用の様々なセンサーが装備されている(Kantha et al., 2017)。市販の IMET ゾンデセンサーは、 $1\text{Hz}$  サンプルングで気圧、気温および相対湿度(PTU)のデータを提供し、高速応答ピトー管センサーは  $400\text{Hz}$  サンプルの速度データを提供する。さらに、 $800\text{Hz}$  サンプルングの気温測定のため、 $1\text{ms}$  以下の高速応答のコールドワイヤーセンサーも使用された。UAV 搭載センサーの特性は Kantha et al. (2017) に詳しく述べられている。UAV には自動操縦が装備されており、MU レーダー近傍を飛行するように予めプログラムされた。本研究では、昇降中に測定されたデータのみを使用する。典型的には、昇降中に UAV は  $\sim 2\text{m/s}$  の鉛直速度で直径約  $100\sim 150\text{m}$  の螺旋状に飛行する。キャンペーン中に行われた 41 回の飛行のうち、本研究では 16 回を MU レーダーとの比較のために使用した。



図 1. UAV の離陸の様子(Bungee 法)。

### 3. 乱流エネルギー消散率 $\varepsilon$ の推定方法

#### 3.1 MUレーダーデータからの推定

KOC 慣性小領域スペクトルが(最大渦の鉛直次元に関連する)浮力波数  $k_B$  まで観察され、ブラッグ波数  $K_{\text{Bragg}} = 2k_r$  が  $K_{\text{Bragg}} \gg k_B$  を満たす慣性小領域にあると仮定すると(Hocking, 1983)

$$\varepsilon \approx 0.47 \langle w^2 \rangle^{3/2} k_B \quad (1)$$

ここで、 $\langle w^2 \rangle$  は KOC 乱流によって生成される鉛直速度変動の二乗平均、 $N$  は  $N^2 = g/\theta d\theta/dz$  で定義された Brünt-Väisälä 角周波数、 $g$  は重力加速度、 $\theta$  は温位である。

浮力波数は  $k_B = N/\langle w \rangle$  と定義することができ、式(1)は次のようになる。

$$\varepsilon \approx 0.47 \langle w^2 \rangle N \quad (2)$$

乱流以外のブロードニング効果を除去した後のスペクトル幅  $\sigma_t^2$  から  $\langle w^2 \rangle$  を推定できる(例えば、Hocking, 1986; Fukao et al., 1994; Naström, 1997; Dehghan and Hocking, 2011)。 $\langle w^2 \rangle$  の代わりに  $\sigma_t^2$  を用いた式(2)は、レーダーデータから  $\varepsilon$  を推定するためによく使われる(例えば、Fukao et al., 1994; Naström and Eaton, 1997; Fukao et al., 2011; Kantha and Hocking, 2011; Wilson et al., 2014)。しかし、式(2)は、乱流渦の最大サイズがレーダーのサンプリング体積よりも小さい場合にのみ適用可能である(例えば、Hocking, 1986)。このサイズは、 $L_B = 1/k_B = \sqrt{\langle w^2 \rangle}/N$  で表される浮力スケール  $L_B$  とすることができ、式(1)は次のように書き直すことができる。

$$\varepsilon \approx 0.47 \langle w^2 \rangle^{3/2} / L_B \quad (3)$$

$L_B$  がレーダーサンプリング体積に比べて大きい場合、パラメータ  $\sigma_t^2$  は  $\langle w^2 \rangle$  を過小評価する。レーダー重み関数は、空間ローパスフィルターの役割を果たす(Labitt, 1979)。White et al. (1999)は以下の近似式を導いた。

$$\varepsilon_w \approx \left( \frac{4\pi}{1.6} \right)^{3/2} \frac{\sigma_t^3}{I^{3/2}} \quad (4)$$

$$I \propto \int_0^{\pi/2} d\phi \int_0^{\pi/2} \sin^3 \theta \left( b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta + \frac{L_H}{12} \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right)^{1/3} d\theta$$

$b$  と  $a$  はレーダービームの距離方向と水平方向の大きさと  $L_H = VT$  に関連し、 $V$  はビーム走査時間  $T$  の間の平均水平風速である。 $b = \Delta r/2$  ( $\Delta r = 150\text{m}$ ) および  $a = \theta_0 z$  ( $z$  は高度(m)、MUレーダーの場合  $\theta_0 = 1.32^\circ$ ) である。

式(4)は複雑ではあるが、式(2)のように  $N$  (通常はラジオゾンデ観測データから求められる)を必要としない利点がある。また、式(4)は、KOC 乱流が観測され、 $L_B$  がサンプリング体積に比べて大きいとみなされる限り、乱流の発生源(対流不安定、シア

一不安定など)に関係なく有効である。なお、式(2)は湿った大気中では飽和状態の  $N^2$  を推定する必要があるが、大気レーダーを用いた  $\varepsilon$  推定の論文では考慮されていないことが多い。

乱流によるドップラースペクトル分散は、以下の式で求められる。

$$\sigma_i^2 \approx \sigma_{meas}^2 - \sigma_{beam\_broadening}^2 \quad (5)$$

ここで  $\sigma_{meas}^2$  は鉛直ビームで測定されたドップラー分散であり、 $\sigma_{beam\_broadening}^2$  はビームブロードニング効果による分散である。 $\sigma_i^2$  は式(4)で使用され、また式(2)または(3)の  $\langle w^2 \rangle$  の近似値として使用される。鉛直ビームのデータが使用されたため、式(5)は Naström(1997)や Dehghan and Hocking(2011)の式と比較して非常に簡単である。VHF帯では、レーダエコーが(等方乱流でない)分反射によって強く影響され、 $\sigma_i^2$  が過小評価になるため(例えば、Tsuda et al., 1988)、通常鉛直ビームのデータは避けられる。しかし、本研究で使用したデータでは、アスペクト比(鉛直ビームと斜めビームのエコー強度比)が小さく、分反射の影響はほとんど無視できると考えられるため、鉛直ビームのデータを使うことにした。これにより、推定精度が高くないシアーブロードニングの補正を行う必要がなくなった。もう一つ、重力波に伴う時間変動ブロードニング(例えば Naström, 1997)もあるが、観測時間が短く(約 25 秒)、その寄与は十分に小さいと考えられるため、ここでは無視している。

UAV との鉛直プロファイルの比較においては、UAV の上昇・下降に応じて、同一高度のデータをその前後の時間で 4 分平均した。レーダーデータの高度分解能は 150m のため、線形補間して、UAV のサンプリング高度に合わせた。

### 3.2 UAV データからの推定

ピトーセンサーデータから  $\varepsilon$  を導く方法は、Kantha et al. (2017)に述べられている。周波数スペクトル(Kantha et al.の式(5))は、2.5 秒毎(2 倍オーバーサンプリングに対応)に 5 秒の Hanning 重み付けした時系列(サンプリングレート 400Hz なので 2000 点に相当)データから推定された。乱流の局所的な等方性と定常性、Taylor の凍結移流仮説を仮定すると、理論的な Kolomogorov 1 次元スペクトルは次のように書ける(Tatarskii, 1961; Hocking, 1983)。

$$S_U(f) = 0.5\varepsilon^{2/3} \left( \frac{U}{2\pi} \right)^{2/3} f^{-5/3} \quad (6)$$

$U$  は平均風である。計算されたスペクトル  $\hat{S}_U(f)$  が(少なくとも周波数帯域において)慣性小領域を示すと仮定すると

$$\hat{S}_U(f) = \alpha f^{-5/3} \quad (7)$$

で表せるはずである。すなわち、観測されたスペクトルから  $\alpha$  を求めれば、次式から  $\varepsilon_{UAV}$  を得ることができる(例えば、Frehlich et al., 2003; Siebert et al., 2006)。

$$\varepsilon_{UAV} = \frac{2\pi}{U} \left( \frac{\alpha}{0.5} \right)^{3/2} \quad (8)$$

$\alpha$ は慣性小領域内で求める必要がある。10 Hz より高い周波数では、乱流が弱い場合にはノイズで、また主に上昇時のモーターの振動により複数のピークが表れており、正しくスペクトルが得られていない可能性がある。全てのスペクトルを注意深く調べ、1~7.5Hz 範囲のスペクトルから $\alpha$ を推定することに決めた。

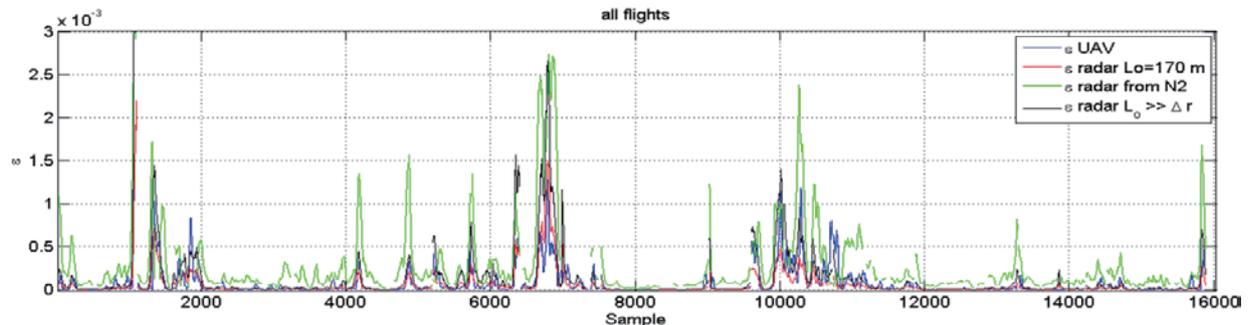


図 2. UAVとMUレーダーで得られた乱流エネルギー消散率 $\varepsilon$ の比較。青線: UAVによる推定値 $\varepsilon_{UAV}$ 、赤線: 式(3)で $L_B = 170m$ とした推定値、緑線: 式(2)による推定値( $N$ は UAVによる気温データから推定)、黒線: 式(4)による推定値。

#### 4. 結果とまとめ

ShUREX2016 キャンペーンにおける UAV と MU レーダーによる品質管理後のデータから求めた乱流エネルギー消散率 $\varepsilon$ の比較を図 2 に示す。UAV と MU レーダーは水平距離で 1km 程度離れていたが、同じ高度・時間に $\varepsilon$ のピークが観測され、同じ乱流イベントを捉えることができたと考えられる。乱流の外部スケールを 170m としたとき、強い $\varepsilon$ のピークが良く一致した。これがレーダーの距離分解能(150m)に依存しているのか、検出された乱流の浮力スケールの典型値なのかは今後の検討課題である。赤線 $\varepsilon_R$ は、少なくとも下部対流圏では、 $L_B = 170m$  (固定値)とスペクトル幅の測定値 $\sigma_l$ を用いて良く一致している。黒線 $L_B \gg \Delta r$ 時の White et al.(1999)モデルは、 $\varepsilon_{UAV}$  に比べて少し(平均で 2.2 倍)過大評価であった。緑線 $\varepsilon_N$ は平均で $\varepsilon_{UAV}$ より一桁大きかった。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K13568 及び生存圏研究所生存圏ミッション研究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.
- Dehghan, A., W. K. Hocking, Instrumental errors in spectral-width turbulence measurements by radars, *J. Atmos. Sol.-Terr Phys.*, **73**, 1052-1068, 2011.
- Fröhlich, R., Y. Meillier, M. A. Jensen, B. B. Balsley, Turbulence measurements with the CIRES tethered lifting system during CASES-99: Calibration and spectral analysis of temperature and velocity, *J. Atmos. Sci.*, **60**, 2487-2495, 2003.
- Fukao, S., M.D. Yamanaka, N. Ao, W.K. Hocking, T. Sato, M. Yamamoto, T. Nakamura, T. Tsuda, and S. Kato, Seasonal variability of vertical eddy diffusivity in the middle atmosphere. 1. Three-year observations by the middle and upper atmosphere radar, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **99**, 18973-18987, 1994.

- Fukao, S., H. Luce, T. Mega, and M.K. Yamamoto, Extensive studies of large-amplitude Kelvin-Helmholtz billows in the lower atmosphere with the VHF Middle and Upper atmosphere radar (MUR), *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 1019–1041, 2011.
- Hocking, W.K., On the extraction of atmospheric turbulence parameters from radar backscatter Doppler spectra. I. Theory, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **45**, 89-102, 1983.
- Hocking, W.K., Measurement of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: a review, *Radio Sci.*, **20**, 1403-1422, 1985.
- Hocking, W.K., Observations and measurements of turbulence in the middle atmosphere with a VHF radar, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **48**, 655-670, 1986.
- Hocking, W.K., The dynamical parameters of turbulence theory as they apply to middle atmosphere studies, *Earth Planets Space*, **51**, 525-541, 1999.
- Hocking, W.K., and A.M. Hamza, A quantitative measure of the degree of anisotropy of turbulence in terms of atmospheric parameters, with particular relevance to radar studies, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, **59**, 1011-1020, 1997.
- Kantha, L., and W.K. Hocking, Dissipation rates of turbulence kinetic energy in the free atmosphere: MST radar and radiosondes. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **73**, 1043-1051, 2011.
- Kantha, L., D. Lawrence, H. Luce, H. Hashiguchi, T. Tsuda, R. Wilson, T. Mixa, and M. Yabuki, Shigaraki UAV-Radar Experiment (ShUREX 2015): An overview of the campaign with some preliminary results, *Progress in Earth and Planetary Science*, **4**, doi:10.1186/s40645-017-0133-x, 2017.
- Kurosaki, S., M.D. Yamanaka, H. Hashiguchi, T. Sato, and S. Fukao, Vertical eddy diffusivity in the lower and middle atmosphere: a climatology based on the MU radar observations during 1986-1992. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **58**, 727-734, 1996.
- Labitt, M., Some basic relations concerning the radar measurements of air turbulence. MIT Lincoln Laboratory, ATC Working Paper NO 46WP-5001, 1979.
- 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**, 791-805, 2006.
- Naström, G. D., Doppler radar spectral width broadening due to beamwidth and wind shear, *Ann. Geophys.*, **15**, 786-796, 1997.
- Nastrom G. D., F. D., Eaton, Turbulence eddy dissipation rates from radar observations at 5-20 km at White Sands Missile Range, New Mexico, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **102**, 19495-19505, 1997.
- Palmer, R. D., T.-Y. Yu, and P. B. Chilson, Range imaging using frequency diversity, *Radio Sci.*, **34**, 1485-1496, 10.1029/1999RS900089, 1999.
- Siebert, H., K. Lehmann, and M. Wendisch, Observations of small-scale turbulence and energy dissipation rates in the cloudy boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1451-1466, 2006.
- Tatarski, I., Wave Propagation in a Turbulent medium, Translated by R. A. Silvermann, Graw-Hill, New York, 1961.
- Tsuda, T., P.T. May, T. Sato, S. Kato, and S. Fukao, Simultaneous observations of reflection echoes and refractive index gradient in the troposphere and lower stratosphere, *Radio Sci.*, **23**, 655-665, 1988.
- Weinstock J., Energy dissipation rates of turbulence in the stable free atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 880-883, 1981.
- White, A.B., R.J. Lataitis, and R.S. Lawrence, Space and time filtering of remotely sensed velocity turbulence, *J. Atmos. Sci.*, **16**, 1967-1972, 1999.
- Wilson, R., H. Luce, H. Hashiguchi, N. Nishi, and Y. Yabuki, Energetics of persistent turbulent layers underneath mid-level clouds estimated from concurrent radar and radiosonde data, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **118**, 78–89, 2014.