

大気の乱れを見る

ルース ウーベル^{1*}

See atmospheric turbulence

Luce Hubert^{1*}

概要

大気の乱れ（大気乱流）とは、速度や向きが不規則に変化する大気の流れのことです。大気乱流は、航空機の安全運航、気象予報の精度、大気汚染物質の拡散、風力発電機の寿命、地上からの天体観測などに影響を与えます。雲を伴う目に見える乱流は、乱流のごく一部の姿で、しばしば雲から遠く離れた場所でも発生し、晴天大気乱流（Clear Air Turbulence: CAT）と呼ばれます。乱流は風速や屈折率の乱れを発生させるため、これらの乱れに感度を持つセンサーやリモートセンシング装置を、乱流検出に利用することができます。本稿では、地上のドップラーレーダーや、気球や小型無人航空機（UAV）に搭載されたセンサーが、この目的のためにどのように利用されるかなどについて紹介します。

1. はじめに

乱流とは、流体の流れが不規則になったもので、スケール、位置、向きが常に変化する。空間上のどの地点でもその時間的変化は予測不能である。それに対して、乱流でない流れ場は層流とよばれる。乱流はレオナルド・ダ・ヴィンチ（1452～1519年）によって研究されたが（図1）、アイルランドの物理学者オズボーン・レイノルズ（1842～1912年）の研究により、乱流のメカニズムがより深く理解されるようになった。

大気中では、雲の中や縁で発生する乱流が目に見えることがある。しかし、雲のない領域でも発生することがある。これは晴天大気乱流（CAT）と呼ばれる。雲がないので肉眼では見ることができない。航空機の乗客は、CATによって発生する衝撃をよく経験する。しかし、このような衝撃は、熱対流や波動に伴う垂直方向の気流によっても発生することがあり、乱流とは呼べないものもあるが、これらの動きは、しばしば乱流の原因となる。



図1. レオナルド・ダ・ヴィンチによる乱流の表現（～1508年）。(Royal Collection Trust Copyright Her Majesty Queen Elizabeth II 2021)

2. 乱流の発生源

地球の重力と空気の圧縮性のため、空気の密度は高度が高くなるほど小さくなる。重い空気は軽い空気の下にあるため、そのままにしておくとも時間が経ってもこの状態を維持することになる。空気は安定していると言われている。しかし、水平方向の空気の動きや空気密度の変化がある場合、強制的または自発的に垂直方向の動きが発生することがある。これらは、それぞれ動的不安定性、対流不安定性と呼ばれる。不安定性が増幅されると、運動エネルギーが流体の減衰能力を超えることがある。このとき、動きが乱れることになる。乱流状態への移行は、流体の粘性にも依存する。粘性は、運動に対抗する能力を反映する流体の特性である。

2023年11月8日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所大気圏観測データ解析分野

* E-mail: luce.hubert.3w@kyoto-u.ac.jp

大気中では、密度の低い（暖かい）空気の上に密度の高い（冷たい）空気があるとき、熱対流不安定性が生じる。その結果、鉛直方向の上昇気流と下降気流が発生する。これらの動きは対流セルを形成し（図 2a）、最終的に乱流になる。例えば、対流不安定性は、日中熱された地面と接触している空気が加熱されることで発生することがある。また、降水が蒸発して乾燥した層の上部が冷やされることによっても発生する。下からの加熱と上からの冷却のいずれの場合も、これらの不安定性は、発生源から垂直方向に 1km 以上離れた場所で CAT を引き起こす可能性がある¹⁾。識別が困難な場合が多いため、航空機にとって危険である。

動的不安定は、安定した空気界面が水平速度の鉛直変化に拘束されることで発生する。水平速度の垂直変化率、すなわち鉛直方向の速度勾配を "ウィンドシア" と呼ぶ。ウィンドシアが十分強いと、界面で波が発生する。波が大きくなると、ロールが起きたり、割れたりする。この波は「ケルビン-ヘルムホルツ波」と呼ばれ、雲の上で見られることもあるが、雲がないところでは気づかれないことが多い。動的不安定性は、異なる速度で移動する 2 つの気塊が出会い、暖かい空気の塊が冷たい空気の塊と重なる気象前線において頻繁に発生する。

水に石を投げ入れると水面に波が立つように、大気中にも重力波と呼ばれる波が発生することがある。例えば、山岳波は大気重力波の一種で、安定した空気の塊が山を越えて上空に押し上げられることで発生する。下流で発生した波が増幅・砕波が起こる、遠く離れた場所でも（最大数百 km!）乱流を発生させることがある。

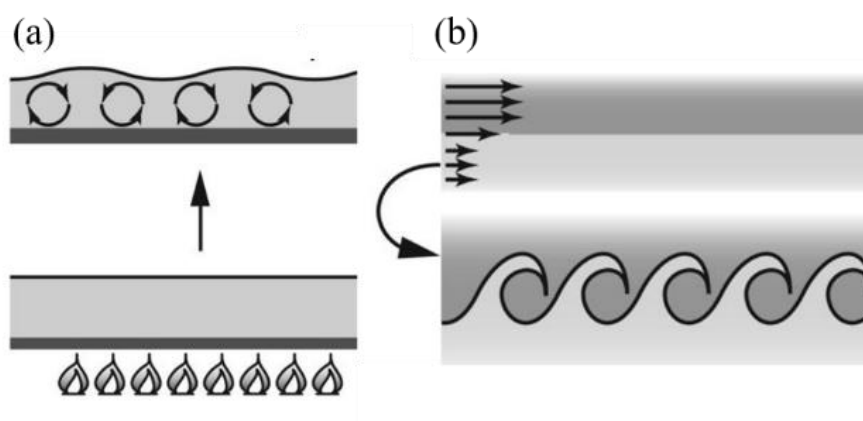


図 2. (a) 底面からの加熱によって生じる対流不安定性の模式図、(b) 動的不安定性の模式図 (Gallay and Brun, 2017 より引用)。

3. 乱流のいくつかの特性

不安定性が発生すると、運動が渦を形成する移行が起こることがある。大きな渦は小さな渦に分裂し、大きな渦から小さな渦へのエネルギー移動が可能になる（図 3）。小さな渦は、流体の分子粘性によって減速され消滅し、その運動エネルギーは熱に変換される。このように、ある渦がより小さな渦にエネルギーを与える過程を「コルモゴロフ・エネルギー・カスケード」(Kolmogorov energy cascade) と呼ぶ（図 3）。この現象は、エネルギーが注入される外部スケール (outer scale) l_0 と、運動エネルギーが熱に変換される内部スケール (inner scale) l_η によって制限された「慣性小領域」(inertial subrange) と呼ばれるスケール範囲で生じる²⁾。

²⁾ 乱流体力学では、渦の特徴的な長さをスケール(scale)と定義している。スケール l は波数 k に対して $k \sim 2\pi/l$ で表される（図 3）。

乱流混合は、速度のランダムな変動だけでなく、温度や湿度の変動も引き起こす。この温度や湿度の変動は、後述するレーダーの標的となる。

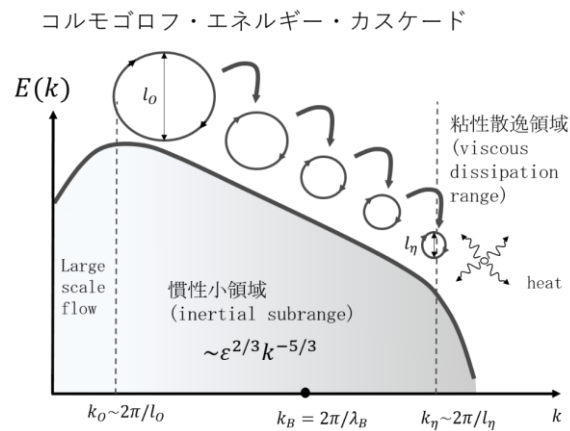


図 3. 乱流スペクトル（エネルギーが波数成分に分布する様子）を模式的（対数スケール）。

4. 乱流の影響

大気の流れは、航空輸送に影響を与えるだけではない。また、人間活動に関連する多くの分野に影響を及ぼす可能性がある。

天気予報の質は、基本的に大気中およびその境界におけるエネルギーと物質の輸送と移動を表現し、予測する能力に依存している。これらの予測をより小さな空間・時間サイズで行うと、乱流がエネルギーバランスに与える影響は大きくなる。実際、乱流は混合を引き起こすため、熱、運動量、物質の鉛直方向輸送に関与している。現在の数値予報モデルでは（まだ）乱流運動を表現できないが、より大きなスケールでの影響を考慮する必要がある。これは「乱流のパラメタリゼーション」と呼ばれる。正しいパラメタリゼーションを行うには、乱流の特性を十分に理解する必要がある。大気モデルは、乱流のパラメタリゼーションが不十分なため、数値メッシュサイズを小さくすると非現実的な結果になることがよくある。

乱流は、自然由来の汚染（火山の脱ガス、放射能など）や人為由来の汚染（化学工業、石油や石炭、天然ガスなどの化石燃料、交通輸送など）の拡散に重要で役割を果たすのは明らかである。しかし乱流は、風力発電機の効率を低下させ、装置の部品の摩耗や損傷を増加させることによって、その寿命にかなりの影響を与える可能性がある。

乱流は、大気中の電磁波の伝搬にも影響を与える。物質が波の伝搬に与える影響を表すために、「屈折率」という無次元数 (n) が定義されている。屈折率とは、真空中の光速を物質中の光速で割った値であり、物質中での光の進み方を記述する上での指標である。屈折率 n が変化すると、電磁波の伝搬に影響を与える。例えば、水と空気の界面で光が屈折したり反射したりすることは、誰しもが経験したことがあることだろう。下層大気では、空気の屈折率は主に温度と湿度に依存する。そのため、乱流によって屈折率の揺らぎが発生する。この大気の揺らぎが、夜間に見える星のまたたきを引き起こすのである。このように、地上からの天体観測では、大気の揺らぎがしばしば問題となる。大気中を伝搬する電磁波は屈折、反射、散乱のいずれかを受ける（図 4）。特に、光通信を中心とした通信に影響が出る可能性がある。

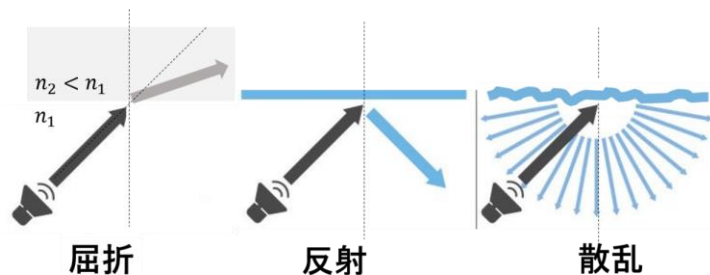


図 4. 界面からの屈折、表面からの反射、粗面からの散乱(等方性散乱：散乱は方向には依存しない)。

5. レーダーによる大気乱流観測

レーダー技術は、ある種の電波が温度や湿度の変化に敏感であることを利用している²⁾。送信アンテナを使い、パルス変調波を標的に向かって短時間送信する。標的で散乱されたパルスは受信アンテナで受信される。一般的に、送受信に同じアンテナを使用する。この場合、乱流からの後方散乱エコーが測定される(図 5)。送信パルスと受信パルスの間の時間を測定することで、標的までの距離を算出することができる。

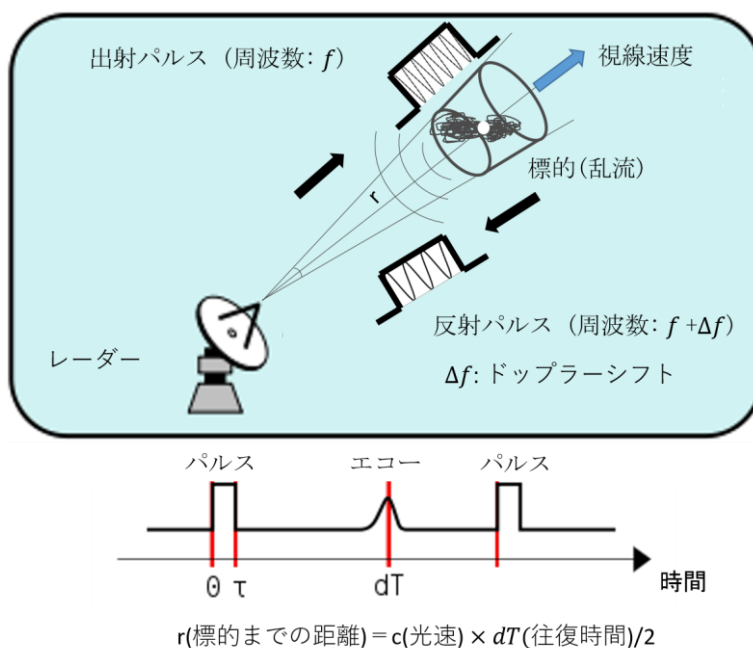


図 5. レーダーの原理。

乱流後方散乱のメカニズムは、ブラッグ条件(Bragg selection)原理に基づいている。レーダー波の半波長(λ_B)に相当する距離で屈折率が変化すると、電波が同位相で足しあわされ、建設的干渉が発生する。等方性乱流からのブラッグ後方散乱が起こるためには、 λ_B が乱流の内部スケール l_η より大きく、外部スケール l_o より小さい必要がある(波数 $k_B = 2\pi/\lambda_B$ を図 3 に示す)³。実際には、CATのエコーを受信できるパルスレーダーは、数十センチメートル(UHF)から数メートル(VHF)の波長で動作している。運用する高度範囲(成層圏～対流圏、約 1～20km)にちなんで VHF では「ST レーダー」、UHF で

³ ただし、速度揺らぎのスペクトルと屈折率揺らぎのスペクトルは区別して考える必要がある。2つのスペクトルは、簡略化のため合成されている。

は「ウィンドプロファイラー」(約 0.3~5km) と呼ばれる。図 6 は、信楽 MU 観測所に設置された VHF 帯 MU レーダー (周波数 46.5MHz、波長 6.45m)³⁾ と LQ7 ウィンドプロファイラー (周波数 1357MHz、波長 22cm) のアンテナアレイを示したものである。



図 6. (左) 滋賀県甲賀市信楽町にある MU レーダーアンテナアレイ全景写真。(右) LQ7 ウィンドプロファイラーアンテナアレイ。

レーダーエコーの強さは、基本的にブラッグ波長における空気の屈折率変動の振幅に依存する。したがって、非常に強いエコーは、温度および/または湿度の激しい変動に対応する。この特性により、動的不安定性または対流不安定性に関連する乱流を観測できる。図 7 は、MU レーダーで観測された動的不安定性による波状ロールを形成した例である。

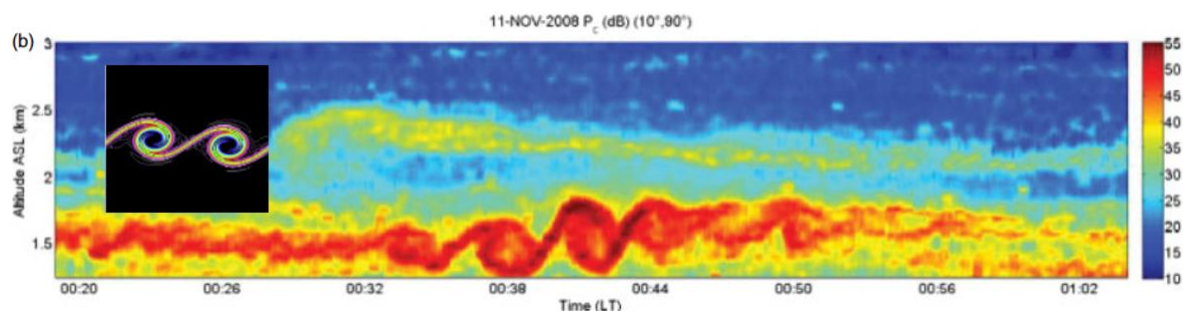


図 7. MU レーダーエコーパワーの分布図。ケルビン-ヘルムホルツ不安定性によるロールが何本も連続する様子が描かれている。

しかし、エコーの強度と動的乱流の強度 (速度揺らぎによる) は必ずしも一致しない。ミルクを注いだコーヒーカップをかき混ぜ続けると、やがてコーヒーとミルクの間の不均一性がなくなるのと同じように、乱流が活発な間は温度や湿度の不均一性が小さくなり、その結果エコーの強さも小さくなる。

ST レーダーやウィンドプロファイラーはドップラーレーダーである。ドップラー効果を使って風を測定する。ドップラー効果とは、送信機と標的との距離が時間的に変化すると、送信波と受信波の周波数や波長がずれることである。したがって、標的が視線方向に一定速度で移動している場合、受信波の周波数は送信波の周波数からずれることになる。この周波数差は、視線速度に比例する。図 8a は、この理想的なケースにおける「ドップラースペクトル」を模式的に表したものである。乱流による速度変動がある場合、ドップラーピークはドップラー周波数の平均値付近で広がる (図 8b)。このスペクトルの広がりを見積もることで、図 3 で定義した乱流運動エネルギー (TKE) を推定することができる。広がりが大きいほど、TKE は大きくなる。

単位時間あたりに散逸する運動エネルギーの量を TKE 散逸率 ε と呼ぶ。 ε は乱流の強さを定量化したものである。航空分野では (Energy dissipation Rate) $EDR = \varepsilon^{1/3}$ が使用される。慣性乱流の場合、乱流スペクトルのレベルは $\varepsilon^{2/3}$ に比例する (図 3)。乱流の外部スケールがわかっているならば、レーダー計測で得られた TKE から ε を推定することができる。しかし、この推定は困難であり、長年にわたって研究が続けられてきた。それは、(1) 慣性乱流以外の複数の現象が速度変動スペクトルに寄与している可能性があること (非乱流運動など)、(2) 慣性領域のスペクトル範囲や慣性領域外の乱流の特性はまだ非常によく分かっておらず、おそらく乱流源によって大きく変動すること、(3) レーダー測定から TKE を推定するには多くの機器効果を考慮しなければならないこと、などが理由である。このように、 ε を求めるために用いられるモデルは、非常に単純化された仮説に基づくものである。これらのモデルは、乱流を直接測定できる原位置観測装置と比較して評価されなければならない。これらの機器は、気象観測気球や最近では小型無人航空機 (UAV) に搭載されることがある。

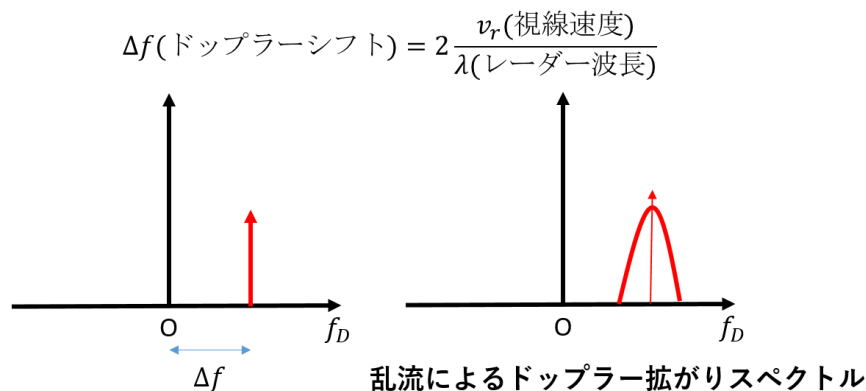


図 8. 乱流のない場合 (右) とある場合 (左) のドップラーспекトルの理想化された表現。

6. 現場観測による大気乱流

EDR は民間航空機で測定され、パイロットレポート (PIREPs) に記載されている⁴⁾。これは、かなり不正確でパイロットの主観的なものである。気象観測用気球の下に吊るされたラジオゾンデを使って、高度 30km までの気圧、温度、湿度、速度を測定することは、世界中で毎日行われていることである (図 9a)。ラジオゾンデの観測は、精度が十分でなく、垂直分解能も不十分であるため、乱流を測定するためのものではない。しかし、センサーの性能は向上しており、標準的なラジオゾンデのデータから乱流のパラメータを推定する処理方法が開発されている。この推定は間接的なものであり、まだ検証の必要のある仮定やモデルに基づいている⁵⁾。

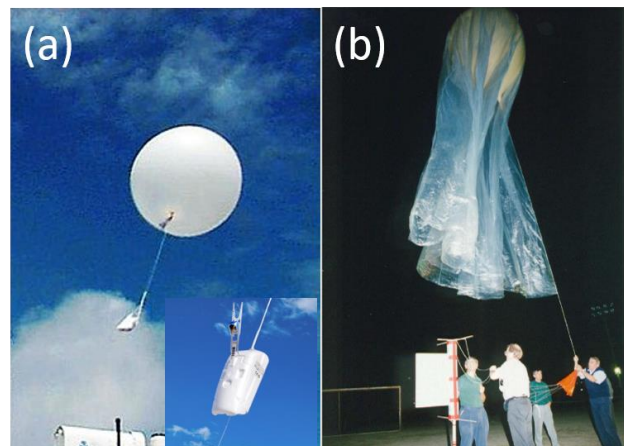


図 9. (a) GPS ラジオゾンデ iMS-100 | 明星電気株式会社 (b) 高解像度気球計測のための特殊装置 (2000 年, 滋賀県甲賀市信楽町)。

温度と速度の乱流変動を直接測定するには、高分解能 (High Resolution -HR-) のセンサーが必要である。HR 温度計測は、直径わずか数マイクロメートルのコールドワイヤーセンサーで行える⁶⁾。ワイヤー線に一定の電流を流し (加熱しないように十分に低い電流)、温度変化によりワイヤーの抵抗値を変化させる。この変化を測定することで、対応する温度変化を推し量れる。0.001°C の温度変化を 1 ミリ秒で測定できる。しかし、このセンサーは非常に壊れやすく、水滴で壊れてしまうことがある。一方、

乱流速度の変動を直接測定するには、ホットワイヤーセンサーを使用する。ワイヤー線は電流によって加熱され、ワイヤー線の周りの空気の循環によって引き起こされる冷却は、速度に依存する。速度に関する精度は 1cm/s 程度である。ピトー管のような他の装置も、圧力測定から速度を測定するために使用できる。

飛行プラットフォームに搭載された HR センサーにより、温度と速度の時系列を収集できる。時系列をスペクトル解析して、図 3 に示すような波数分布を推定することで、例えば ε のような乱流パラメータを推定できる。

HR センサーは、標準的な測定と同様に気象観測気球の下に設置することが可能である(図 9b)。しかし、気球の後流によって発生する乱流の影響を受けて測定ができないことがある。後流の影響を軽減するために、気球の上にプラスチック製のケープをかぶせる(図 9b)⁷⁾。また、気球の降下中に計測を行うための新しい装置も開発された。一方、気球は水平方向の風に流されるため発射地点から非常に遠く(時には数百 km)へ漂流することがある。このため、レーダーによる観測との比較は困難である。

最近ではドローンを気象学的に利用することがブームになっている。ドローンは空飛ぶロボットで、遠隔操作が可能である。ドローンには、気球と比較して多くの利点がある。例えば、再利用可能な測定器を用いて繰り返し測定することができる。コロラド大学では、上記のセンサーを用いて乱流を測定するために特別に設計された固定翼の航空機型ドローン(DataHawk UAV)を開発した⁸⁾。DataHawk UAV は超軽量約 1kg で翼の幅は約 1m しかない。MU 信楽観測所で 2015 年、2016 年、2017 年の 3 回のフィールドキャンペーン(ShUREX-Shigaraki UAV Radar EXperiment と呼ぶ)で使用し、MU レーダーおよび LQ7 ウィンドプロファイラーと比較した(図 10)⁹⁾。これらの実験では、動的不安定時や対流不安定時に ε を推定するために使用するレーダーモデルの性能を評価した。レーダーと UAV の測定結果が大きく異なるため、多くの不確定要素が存在するが、強い分散を示すものの、 ε 推定値の交差検証が可能となった。(図 10h)

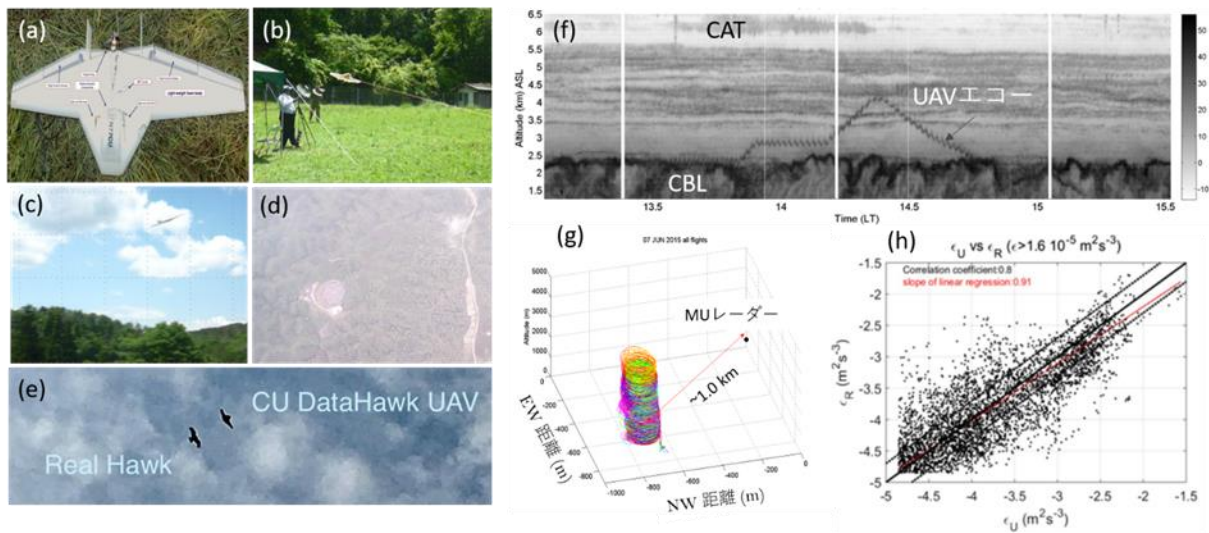


図 10 . (a) 乱流センサーを搭載した DataHawk UAV。(b) と (c) SHUREX2015 キャンペーンでの DataHawk UAV の離陸直後の様子。(d) 小型カメラを搭載した DataHawk UAV から見た下側の写真で、MU レーダーが見えている。(e) DataHawk UAV の飛行中のサプライズゲスト。(f) MU レーダーのエコーパワーの分布図。(g) ShUREX2015 で観測された UAV の軌道の 3D 表示。(h) UAV とレーダーデータから推定される ε の散布図。

7. 展望

大気乱流の測定は、依然として困難である。しかし、UAV の開発は、その可能性の大きさから、計測技術の歴史に大きな転機をもたらすものである。間接的ではあるが、時間的・高度的に連続した観測を可能にするドップラーレーダーと同時観測することで、乱流の特性やそれを発生させる動的・対流的不安定性の特性を明らかにすることが可能となる。他の ST レーダーの周辺に乱流センサーを設置するプロジェクトが南極で検討されている（PANSY レーダー、47MHz）¹⁰⁾。また、今後検討される予定である（例：インドネシア、赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar）、47MHz）¹¹⁾。

参考文献

- 1) A. Kudo, H. Luce, H. Hashiguchi, and R. Wilson, Convective Instability underneath Mid-level Clouds: Comparisons between Numerical Simulations and VHF Radar Observations, J. Appl. Meteor. Clim., 54, 2217-227, 2015.
- 2) 深尾昌一郎, 浜津享助, “気象と大気のレーダーリモートセンシング”, 京都大学学術出版会, 2005, pp. 491.
- 3) MUレーダー : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu>
- 4) パイロットレポート (PIREPs) : <https://www.jma-net.go.jp/naha-airport/PIREP.html>
- 5) R. Wilson, F. Dalaudier, and H. Luce, Can one detect small-scale turbulence from standard meteorological radiosondes?, Atmos. Meas. Tech., 4, 969, 1000, 2011.
- 6) HR センサー: https://ja.wiki5.ru/wiki/Mass_flow_sensor
- 7) H. Luce, M. Crochet, and F. Dalaudier, Temperature sheets and aspect sensitive radar echoes, Ann. Geophys., 19, 899-920, 2001.
- 8) D.A. Lawrence, D. A. and B. B. Balsley, High-resolution atmospheric sensing of multiple atmospheric variables using the DataHawk small airborne measurement system, J. Atmos. Ocean. Tech., 30, 2352-2366, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00089.1>, 2013.
- 9) L. Kantha, 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. Prog. Earth Planet Sci., 4: 19 (DOI 10.1186/s40645-017-0133-x), 2017.
- 10) PANSY (Program of the ANTArctic SYowa MST/IS) レーダー: <https://pansy.eps.s.u-tokyo.ac.jp/>
- 11) 赤道大気レーダー (EAR) : <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear>

著者プロフィール



Hubert Luce

<略歴> 1992 年トゥーロン大学・ソフィア-アンティポリス大学卒業 (フランス)/1996 年トゥーロン大学物理学博士/1998-2002 年 京都大学超高層電波研究センターPostdoctoral Researcher/2002-2021 年トゥーロン大学助教授/2021 年より京都大学生存圏研究所教授、現在に至る。<研究テーマ> 下層大気のレーダーと「その場」(in situ) データ解析。下層気乱流、波動および不安定性の複合機器観測。大気乱流が鉛直輸送と雲のライフサイクルに与える影響。