

雲科学と3次元走査型コヒーレントドップラーライダー

Cloud Science and 3D-Coherent Doppler Lidar

藤吉康志

Yasushi FUJIYOSHI

北海道大学 低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

ABSTRACT

Air-motion is the key factor that connects aerosols and clouds especially in the atmospheric boundary layer. 3D-scanning coherent Doppler lidar (3D-CDL) is the only tool that can measure 3D distribution of aerosols, winds and clouds. Thus, we deployed a 3D-CDL on May of 2004 at Sapporo, Japan, to progress the Cloud Science. Our group deployed the 3D-CDL at Nagasaki, Tokyo, and Takikawa to pursue various scientific projects. In this presentation, the author will present the expected and un-expected research topics.

1. 北大低温研の3D-CDL装置の概要

我々は、風、エアロゾル、雲、降水までをシームレスに研究するために、3次元走査型のコヒーレントドップラーライダー（三菱電気（株）製）（以下3D-CDLと呼ぶ）を中心として、その他多様な観測装置を併用しながら「雲科学」的観測を継続中である。

図1は北海道滝川市にある滝川スカイパークの屋上に設置した3D-CDLと各種観測装置の外観である。3D-CDLの初期の諸元については「気象研究ノート219号」「LESの気象への応用と検証」（藤吉編、2008）に紹介しているが、2010年10月以降、高出力化したファイバアンプと励起光発生装置を追加することにより、長期間安定した連続観測が可能となった。さらに2012年度には処理レンジビン数を80から200に増やし、最少距離分解能を30mとするために信号処理ボードを交換した。同時にスキャナ角度データ分岐ユニットを追加し、光送受信ユニットも更新した。また、札幌から離れた遠隔地での無人連続観測が可能ないように、装置の監視とデータバックアップ、及び自動時刻同期が可能なシステムも構築した。またバックアップPCにデータ取得後、データ変換と生データの可視化、VAD計算などの解析を準リアルタイムで行うことにより、解析時間を短縮させている。

観測は、研究対象に合わせてPPI、RHI、セクターPPI、セクターRHI、POINTを組み合わせた走査スケジュールを組んでいる。また、現象の時間変化あるいは連続性を確認できるように、低仰角のPPIと互いに直交する2方位のRHI走査を最低4回以上連続して繰り返している。また、設置地点の状況によっては、マイナスの俯角観測を行うことでライダー設置高度よりも下層のデータも取得している。

これまで3D-CDLを用いて以下の観測を実施あるいは実施中である。

- 1) 2005年4月～2007年7月まで、寒冷地域でかつ大都市、かつ海岸と郊外にも近い札幌での観測。
- 2) 2009年7月～2011年5月まで、長崎市池島（北緯32.880度、東経129.591度、海拔約75m）において、環境省の地球温暖化対策技術開発事業（CO₂大幅削減に貢献する洋上ウィンドファームの事業性評価のための風況調査手法の技術開発）の一環として実施した海上風の観測。

- 3) 2011年7月～2014年2月まで、東京都目黒区の東工大岡山キャンパスにおいて、文部科学省 科学技術振興調整費／科学技術戦略推進費「気候変動に対応した新たな社会の創出に向けた社会システムの改革プログラム-気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」の一環として、メガシティ上空の風の観測。

- 4) 2014年8月～現在まで、北海道滝川市の滝川スカイパークで科研B「瞠目的手法による大気境界層内の鉛直混合が雲・大気質・放射場に及ぼす影響解明」と宇宙航空研究開発機構（独法）のEarthCARE研究公募（検証）委託研究課題「In situ observations of vertical profiles of air quality using gliders」の一環として、グライダーによる上空現場観測と3D-CDLの同時観測。

以下では、上記4地点で得られた特筆すべき観測結果について簡単に紹介する。



図1 滝川スカイパークに設置した北大低温研の3D-CDL（右のコンテナ）と各種観測装置

2. 札幌での観測

札幌での観測事例については、藤吉他(2005、2008)、Fujiyoshi et al. (2009)、藤吉(2010)、Fujiwara et al. (2011、2012)、藤吉・藤原(2012、2014)で報告している。最初の驚きは、JRビルなどの高層ビルによる後流(wake flow)や、ビル群による摩擦効果、いわゆる大気境界層の風の場に及ぼす都市効果があっさり可視化されたことである。しかし特筆すべき発見は、地上風速が5 m/s以上で見られるストリーク構造であった。ストリーク構造は室内実験やLarge Eddy Simulation (LES)ではその存在が予想されていたが、実際の自然界でユビキタスに発生していることが我々の観測から明らかとなった。日中以外の時間帯では地上風速が5 m/s以下

でもストリーク構造が出現する。もちろん限りなく無風に近い状態では、ほとんど組織化された構造はみられず、地面付近が湿っている場合には霧が発生することが多い。

一方、地上風速が 5 m/s 以下でかつ晴れた日中には、ベナードセルが発生しているであろうことまでは想定内ではあった。しかし、札幌のような都会でもベナードセルの連結部で直径 100 m 程度のダストデビルが発生していることを見出したのは予想外の発見であった。ただしこのダストデビルは塵などで可視化されず、ライダーのみで検出できたことから、「ダストデビルの構造を持つ不可視の鉛直渦(Dust Devil-like Vortex)」と名付けた。

さらに、3D-CDL を用いることで、札幌上空を通過する海風前線の詳細な水平および鉛直構造が観測できるであろうことまでは当然期待していた。しかし、海風の上空に多層構造(複数の安定層)が存在していた場合、海風の通過がトリガーとなって、内部重力波が発生したり、ベルヌーイ効果で海風前線の通過に連動して或る特定高度で風速が強まる現象を見出したこと、言い換えれば、接地境界層の現象によってより上空の風の方が大きな影響を受けていることがドップラーライダーを用いることで容易に可視化できたことは全くの想定外であった。

上記は大気境界層内で見いだされた大気現象であるが、自由対流圏でもカール状パターンと名付けた新たな構造を発見した。図 2 の 3~4 km の範囲に見

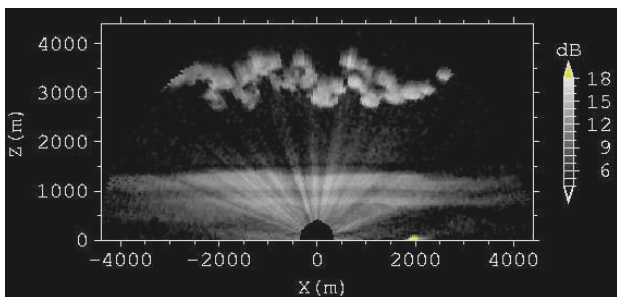


図 2 2007 年 5 月 1 日に、大気境界層の上端(約 1.5 km)より上空の 3~4 km の高度範囲に出現したカール状パターン。

られるパターンがそれである。このパターンは雪粒子によって可視化されたものであり、薄い中層雲が消滅する際に頻りに形成されることがその後の観測でも確認されている(Fujiyoshi et al., 2012)。このパターンが出現すると、時に自由対流圏にダウンバーストのような狭い範囲に強い下降流が発生することがある。それは、このパターンを形成する雪粒子が落下中に昇華蒸発し、かつ、0°C 高度を通過する際に周囲から融解熱を奪う時である。ただし、この強い下降流は大気境界層上端に存在する気温逆転層(安定層)のおかげで地上にまで到達することはなく、これをハンモック効果と名付けた(Fujiyoshi et al., 2012)。

3. 池島での洋上風観測

海上では陸上に比べて風速が強く、地形などの障害物による乱れが少ないため、洋上風力発電のポテンシャルは高い。一方、洋上風力発電では、風車本体を含めた建設コスト・初期投資コストが大きい。そこで、洋上ウィンドファームの事業性を評価するためには、洋上風力の既存量の正確な把握が必要不可欠である。そこで、3D-CDL を用いた風況観測システムの構築を行い、海上の風速の鉛直分布・水平分布・乱れ強度・強風・突風の実態把握を行い、それに加えてバードストライクの危険性についても調査し、風況観測システムとしての適用可能性の検証を行った。

例えば、鳥の高度別の飛行数と 3D-CDL で得られた風速の高度変化との比較を行うことで、鳥の数は日の出直後と日の入り直後に多く、比較的風速が弱い晴天日の日中には、大気境界層の発達と一致するように鳥の飛行高度のピークが上昇していることなども明らかにすることができた(Fujiyoshi et al., 2011)。また、海面の風の抵抗係数の推定や、風の水平分布に及ぼす小さな島の風上・風下効果なども定量化でき、さらに大気中を伝わる内部重力波の詳細な水平・鉛直構造をとらえることにも成功した(藤吉・藤原, 2014)。

以上は計画通りの成果であったが、ここでも想定外の現象をみつけることができた。それは、半径 4 km の 3D-CDL の狭い観測範囲内に、典型的な竜巻よりは直径や鉛直渦度共に小さいが、ダストデビルよりは強い不可視竜巻である(Fujiwara and Fujiyoshi, 2014)。図 3 左上に示した 2010 年 12 月 21 日 13 時 30 分のドップラー速度の水平分布を見ると、観測点から約 3 km 北に離れた地点に、渦の存在を示すドップラー速度の極値の正負の対が見える。これを拡大すると、反時計周りの“親渦”と“子渦”が確認できる(図 3 右)。子渦と親渦の直径は 105 m と 234 m、鉛直渦度は 0.32 s^{-1} と 0.17 s^{-1} であ

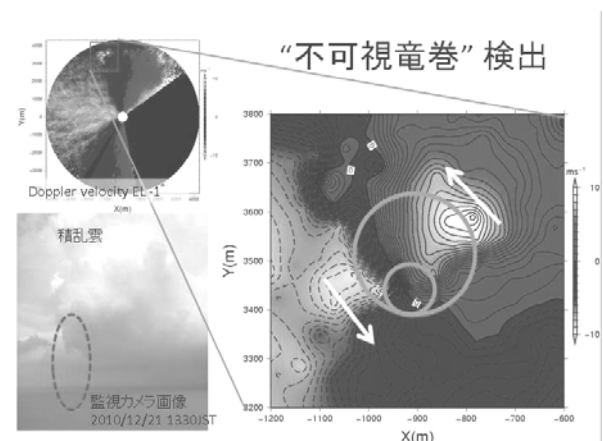


図 3 2010 年 12 月 21 日に長崎市池島の北 3 km を通過した不可視竜巻。

った。この渦は、コマ状のメソβスケールの渦状擾乱が西から東に通過した際、池島のほぼ真北で急発達したメソγスケールの降水系の南端部で発生したものである。これまで竜巻の存在は主に目視で確認され、降水を伴う雲が発生しない限り、通常の気象レーダでは竜巻の内部構造の観測は困難である。一方、今回の観測事例は、目に見えない複数の「竜巻もどき」が、非降水域にも発生していることを明らかにしたものである。

4. 東京都目黒区大岡山での観測

東京でも、札幌と同様に風の弱い日中にはベナードセルが予想通り観測された。意外であったのは、ベナードセルが冬季にも発生していたこと、そして、札幌ではみられないくらい綺麗な水平構造が検出できたことである。

一方、ある程度地上風速が大きいと、これも予想通りストリーク構造が出現した。観測期間中、東京はたびたび台風に襲われたため、札幌では観測できなかった地上風速が 30 m/s を越える時でもストリーク構造が出現することが確認できた (図 4)。な

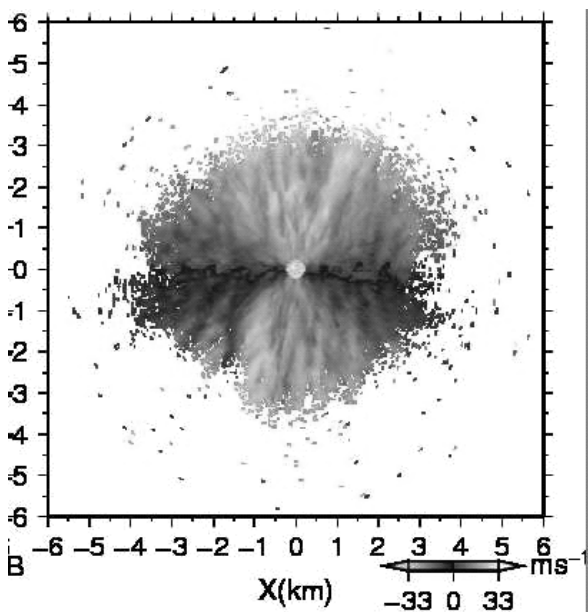


図 4 台風 18 号通過時の風の水平構造 (2013 年 9 月 16 日 11 時 21 分)。

かでも特質すべき成果は、東京都上空で 3D-CDL によって観測された筋状乱流構造 (ストリーク構造や水平ロール渦など) の間隔を大気安定度および風速シアとの関係から整理し、3D-CDL の観測高度における局所的な風速シアを説明変数として用いることで、従来別々に捉えられてきたこれら筋状乱流構造を、シア不安定という同一のメカニズムとそれに基づくスケリングで統一的に定量化が可能となったことが示唆されたことである (八木ほか, 2014 ; 2015)。

予想外の観測として、「強い下降流を伴うしぐれ」の発見であった。寒気吹き出し時には、関東平

野部では冬季であっても風が弱い時には昼前に対流混合層が発達し、下層は乾燥するが対流混合層上端では晴天積雲が発生する。このような場の上空に日本海から冷たい空気が氷晶雲を伴いながら侵入すると、その先端部では対流混合層の上昇流が強まり、下層の積雲が上空の氷晶雲と混合することで成長した雪粒子が落下する。その際、下層の乾燥した空気内で雪粒子が昇華蒸発することで下降流内の湿度が上昇し雲底高度が下がり、かつ強い下降流と乱流が発生し、この強い下降流が地上で発散することで突風をもたらしたと言える。数値実験の結果から、冬型の気圧配置時には関東山地を廻りこむ風が収束することにより上昇流が形成され、その風下に帯状の湿潤域が形成されるために日本海側から侵入した雲が持続されやすい。言い換えれば、強い寒気吹き出し時、風速が弱い日中に対流混合層が発達し、大気境界層内の湿度は低いが境界層上端に晴天積雲が発生するような場に北寄りの冷たい空気塊が侵入してくる条件下では、羽田空港周辺は「しぐれ」に伴う下層大気の視程悪化と乱気流に注意が必要である。

さらに予想外の成果として、海風前線や陸風前線通過時に短時間だけ出現する「オゾンディップ+エアロゾルジャンプ」あるいは「オゾンジャンプ+エアロゾルディップ」の発見である。3D-CDL と地上でのオゾン濃度やエアロゾルの数濃度、各種気象要素を詳細に比較した結果、これらの現象は単純に移流 (すなわち水平方向の変化) によって発生しているのではなく、対流混合層の高度変化、言い換えれば、大気境界層の鉛直混合が重要であることを示すことができた (藤吉, 2013)。

5. 北海道滝川市での観測

雲・エアロゾルの多層構造の解明とそれが地球放射収支に及ぼす効果を定量的に明らかにするためには、雲・エアロゾル・放射の鉛直および水平分布を長期にわたって詳細に in situ 観測する必要がある。そこで、我々は札幌から約 65 km 北東にある滝川スカイパークでグライダー観測と 3D-CDL および各種地上観測装置との同時観測を実施中である (図 2)。

グライダー観測のメリットは、気球の線観測とは異なり、飛行している時間・空間平均値が作成可能である点、自身から出す排気ガスの影響が皆無な点、ある程度狙った空域を飛べることなどである。一方、短所は高度制限であるが、セスナ機で牽引してもらうことで上空 3~4 km 程度までは到達できる。また、観測用航空機に比べれば重い測器を搭載することは困難であるが、100 kg までは搭載可能である。

グライダーには、下向き短波・長波放射計、マルチチャンネルのエアロゾルカウンター、電子顕微鏡分析用エアロゾルサンプラー、前方と上空撮影用 GPS 付きビデオカメラ、2 種類の気温・湿度センサー (2 秒サンプリング)、3 本の高速熱電対気温センサー (100Hz でサンプリング)、気圧計、3 軸振動計 (グライダーの 3 軸姿勢、3 軸加速度、進行方向を 100Hz で測定) を搭載している。

図5は、グライダーと3D-CDLの同時観測結果の一例であるが、大気境界層下層の海風領域とその上空の大気、さらに、自由対流圏内の大気の風の場合、大気質の違いなどが、リモートセンサーと現場観測を比較することでより正しく理解することができる。

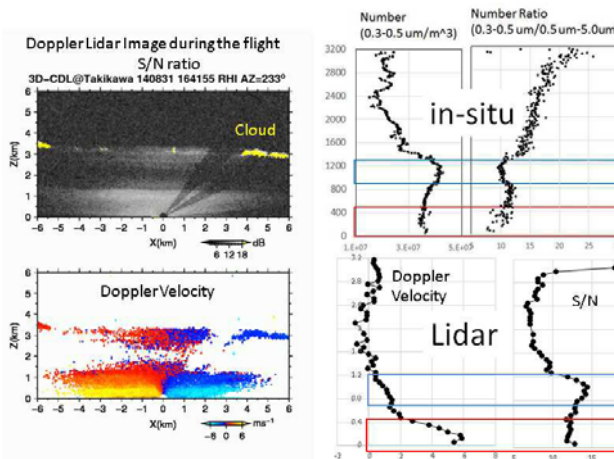


図6 2014年8月31日の観測事例

5. 今後の展望

滝川スカイパークには2015年8月にNICTのウィンドプロファイラーを仮設してグライダー、3D-CDLを初めとした各種装置との同時観測を予定している。特に、これまでは困難であった大気中の乱流強度の直接比較が楽しみである。

さらに、グライダーを用いて、エアロゾルのみではなく、ウィルスやバクテリアなどの採取も予定している。これらの手法は、今後鳥やエアロゾルなどを介在とした口蹄疫や川崎病などに代表される疫病予防（モニタリング）にも応用したいと考えている。

引用文献

- Fujiwara C., K. Yamashita, M. Nakanishi, and Y. Fujiyoshi, 2011: Dust devil-like vortices in urban area detected by a 3-D scanning Doppler lidar, *J. Appl. Meteor. Climatology*, 50, 534-547.
- Fujiwara, C., K. Yamashita, and Y. Fujiyoshi, 2012: Observed effect of mesoscale vertical vorticity on rotation sense of dust devil-like vortices in an urban area, *SOLA*, 8, 25-28, doi:10.2151/sola.2012-007.
- Fujiwara, C. and Y. Fujiyoshi, 2014: Detection of invisible waterspout using a 3D scanning Doppler lidar. *SOLA*, 10, 127-130, doi:10.2151/sola.2014-026.
- 藤吉康志, 山下和也, 藤原忠誠, 2005: 3次元走査型コヒーレントドップラーライダーによる大気境界層の流れの可視化, *天気*, 52, 665-666.
- Fujiyoshi, Y., K. Yamashita, and C. Fujiwara, 2006: Visualization of streaks, thermals and

waves in the atmospheric boundary layer, *J. Visualization*, 9(4), 359.

藤吉康志, 山下和也, 藤原忠誠, 中西幹郎, 2008: 雲科学とLES-ドップラーライダーを用いた滝の流れの観測, 気象研究ノート219号「ラージエディ・シミュレーションの気象への応用と検証」、141-165.

Fujiyoshi, Y., K. Yamashita, and C. Fujiwara, 2009: Detection of organized airflow in the atmospheric boundary layer using a 3D-scanning coherent Doppler lidar, *Proc. SPIE*, Vol. 7382, 738204; doi:10.1117/12.835943.

藤吉康志, 2010: 雲科学のためのリモートセンシング, *光電技報*, 26, 2-5.

Fujiyoshi, Y., C. Fujiwara, M. Kawashima: Short summary of two years field observations of winds over the ocean -WINPOD-L(Wind Power Observation by Doppler Lidar), 5th Korea-Japan-China joint conference on meteorology, 24-26 Oct. 2011, Busang, Republic of Korea

Fujiyoshi, Y., A. Umehara, and C. Fujiwara, 2012: Hammock effect of atmospheric boundary layer for downdraft associated with new-type of organized turbulent air motion, 16th Conference on Clouds and Precipitation, 29 July - 3 August 2012, Leipzig, Germany

藤吉康志, 藤原忠誠, 2012: 「都市でも発生するダストデビル」、「都市問題」、後藤・安田記念東京都市研究所発行、103(10)、10-14.

藤吉康志, 2013: ドップラーライダーによる流れの観測と物質輸送, *ながれ(日本流体力学会誌)*, 32号(特集センシング技術と気象研究), 301-306.

藤吉康志, 藤原忠誠, 2014: 北大低温研のドップラーライダーで観測された大気現象の解析事例, 気象研究ノート229号「高層気象観測の発展と現状」108-122.

八木綾子, 稲垣厚至, 神田学, 藤原忠誠, 藤吉康志, 2014: 相似則に基づいた大気境界層における水平乱流場の分類, *水工学論文集 B1(水工学)*, 70(4), I_325-I_330.

八木綾子, 稲垣厚至, 神田学, 藤原忠誠, 藤吉康志, 2015: ドップラーライダーを用いた筋状乱流構造の間隔に関する研究, *水工学論文集 B1(水工学)*, 71(4), I_415-I_420.