

見えないものを観る、掴めないものを掴む最新観測技術 -風の流れと雲-

藤吉康志(北海道大学・低温科学研究所)

最近では存在しないものを見せてくれるバーチャルリアリティー流行りであるが、一方、現実には存在するもので目には見えない大切なものが数多くある。その典型が風である。かつて風は、感じるものであって見るものでは無かったが、最近、レーザー光を使って空気の動き（つまり風）を3次元的に観測することができる装置が開発され、我々もこの装置を使って観測を行っている。

1. 観天望気

場の空気や流れを読むことは、社会生活に必要とされる能力の一つである。それと同様に、空を眺めて天気を予想する「観天望気」は、情報化社会の現代でも身を守る上で必要不可欠である。そもそも「観天望気」とは、漁師にとって一番怖い風波を予測するためのものであった。しかし、風を目で見ることはできないので、大気の流れを可視化してくれる雲を見て、風波を予想したと言われている。また、山にかかる笠雲を見て、湿った強い風を伴う嵐の接近をいち早く探知することもできる。

このように、大気の流れを可視化してくれる雲を注意深く観察することで、おおよその大気の流れを予想することができる。それでは、雲の無い晴天域に吹く風は穏やかであろうか？答えは否である。その典型が、晴天乱流である。雲による揺れは予想や回避が可能であるが、晴天乱流は「見えない」だけに避けられず、航空機のパイロットが最も警戒する大気現象のひとつである。

さらに、集中豪雨による災害を防ぐため、雲の中に潜む「豪雨の卵」を気象レーダーでとらえる試みが始まっている。しかし、通常のレーダーでは、1mm前後の比較的大きな雨や雪粒子しか観測できないため、仮に「豪雨の卵」をみつけても、数分後に豪雨が発生してしまう。十分な予測時間を確保するためには、豪雨が育つ環境（「豪雨の母体」）を可能な

限り早期に診断する必要がある。そのような大気の場合には、まだ雲が発生していないので、何らかの手段を用いて風を観る必要がある。

そこで我々は、通常ではとらえることのできない大気の流れを3次元的に観測し、乱流、エアロゾル、雲の発生までをシームレスに研究するために、三次元走査型のドップラーライダーを導入した（図1）。



図1 北大低温研のドップラーライダーの外観

2. 風を観る最新装置

この装置は、肉眼では見えない近赤外（波長 1.54 μm ）のレーザー光を送信し、エアロゾルと呼ばれる大気中に浮かんでいる微粒子によって散乱された光を増幅して受信する。光の送受信及び光の向きは、図1のコンテナの上部に固定されたスキャナーを回転させることで変化させる。このレーザーで使われている光はアイセーフ波長帯と呼ばれ、人間の目にあたっても安全であることから、世界各地の飛行場にも設置されている。

この装置では、上空のエアロゾルの濃度や、風向風速の三次元分布を観測することができる。観測範囲は最大半径 20km であるが、通常は距離分解能 50m(切り替え可能)、探知距離 4km で観測を行って

いる。走査速度は、水平鉛直共に約 1rpm (約 1 分間で水平あるいは鉛直に 1 回転) である。

3. 都会に吹く風

都会に吹く風として有名なものは、ビル風と呼ばれる地面付近に吹く強風である。同時に、高層建築物は上空を吹く風の障害物となっているため、広い範囲で、周囲 (特に風下) の気流を乱している。図 2 は、JR 札幌タワーなどの高いビルの風下に発生した後流域が、ドップラーライダーによって可視化された例である。これらのビルの風下数 km にわたって周囲に比べて風が弱まっている。このような高層建築物が引き起こす風の乱れは、都市の汚染物質や排熱の輸送効率を大きく変化させ、ヒートアイランドの形成にも密接に関係している。

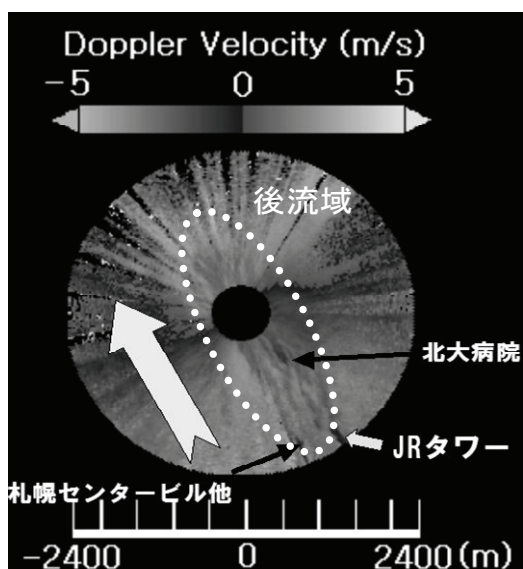


図 2 高層建築物によって生じた後流の可視化例 (2005 年 3 月 15 日)。仰角 2.2 度のドップラー速度の水平分布。南東の風 (白矢印で風向を示した) で、風速は 5m s^{-1} 程度。右下の JR 札幌タワーやホテルの風下で周囲に比べてドップラー速度が小さくなっている。

4. 身近に吹く風の可視化

地表面から上空数 km までの高度範囲は、大気境界層と呼ばれ、われわれ人間を含むほとんどの陸上生物

の生活圏である。人間活動や事故で発生する有害物質の輸送・拡散、またバードストライクや病原菌の越境に関わる鳥や虫の飛行行動の解明にも、大気境界層の気流の知識は不可欠である。このように気象学・気候学のみならず環境科学、災害科学、都市工学、さらには生態学の観点からも大気境界層の気流構造の解明は重要な課題である。

4.1 穏やかな晴天日に吹く風

穏やかな晴天日に出現する風を、ラージエディシミュレーション (LES) という数値モデルで計算すると、図 3 のような構造が出現する。黒く見える場所が下降流域であり、白く見える細い上昇流域が漁網のように見えることから、「網目状」構造と呼ばれる。網の目毎に、風向や風速が変化しているため、このような構造が通過する際には頬を撫でるような風が吹く。

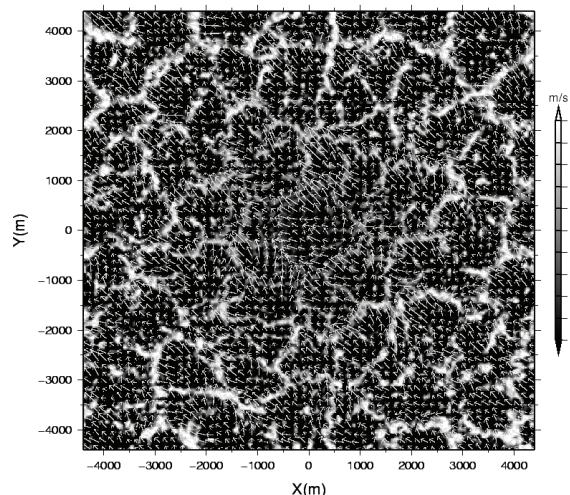


図 3 LES で再現された静穏日に出現する典型的な風の水平構造 (網目状構造)。細かい矢印は風の向きと速さを示している。

一方、穏やかな晴天日には、野外で催し物が行われるが、そのような時に、テントが吹き飛ばされる突風事故が時々発生する。これは、鉛直・水平スケールが比較的小さい (1m~100m) 渦構造であるダストデビル (つむじ風) が原因である。砂漠や平らな地面では、ダストデビルは文字通り、巻き上げられた土埃 (時には小動物) で可視化される (図 4)。ところがドップラーライダーを用いた我々の研究によ



図 4 砂漠に出現したダストデビル。
(写真提供：藤原忠誠)

れば、不可視の“ダスト”デビルが、札幌のような都市域でも頻繁に発生することが明らかになってきた。その水平や鉛直スケールは砂漠で発生するダストデビルとほぼ同じある。都市域でも発生する“不可視のダストデビル”は、ダストデビルと同様に「網目」の結び目で発生している

ことが、理論的にも観測的にも確認されている。それ以外に、海風前線に沿っても発生することから、穏やかな晴天日の午後にもこそ、このような突風に注意が必要である。

4.2 強風時の風の構造

それでは、地上で毎秒 5m を越えるような強い風が吹く時には、どのような“風の形”が観えるのであろうか？弱風時に形成される“網目”の縦横比がほぼ 1 であるので、強風時には、風向に沿った細長い構造が予想される。

図 5 は、地上で毎秒 10m 前後の北西風が吹いた曇天時に出現した筋状（ストリーク）構造を、ドップラーライダーで可視化した例である。ほぼ風の主方向に沿った筋状の構造が見られ、筋の間隔は約 900m である。このようなストリーク構造は、風が強い場合（地上風速 5m/s 以上の時）にはほとんど常に出現する。筋と筋の間は、周囲よりも風速が弱いことから“低速ストリーク”と呼ばれ、上昇流域と一致する。

これと似た筋状構造は、冬季の日本海上に発生する雪雲にも見られ、水平ロール渦と呼ばれている。ただし、ストリーク構造の水平間隔や背の高さは水平ロール渦の 1/10 程度であり、大気境界層を満たす

背の高い水平ロール渦に対して比較的地表面近傍（地表から数 100m）にのみ存在する。

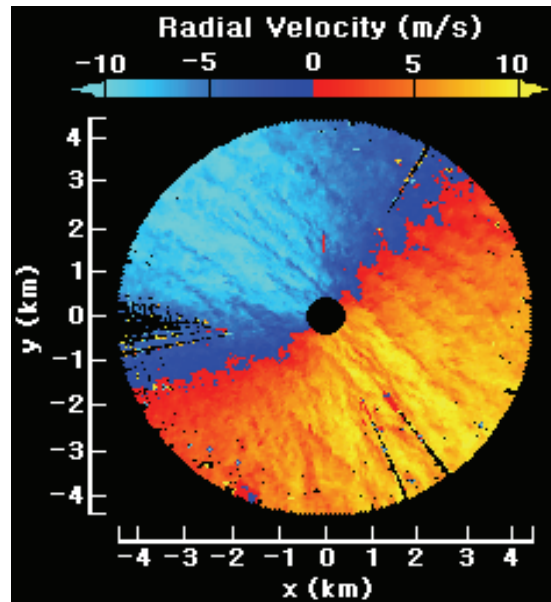


図 5 ドップラーライダーで可視化された低速ストリーク構造。

5. 晴天乱流の可視化

5.1 Kelvin-Helmholz シアー不安定波

航空機事故のほとんどは、晴天乱流によって引き起こされているが、文字通り、肉眼では見ることができない。自由大気中に発生する波や乱れは、Kelvin-Helmholz 波が原因と言われている。K-H 波は雲で可視化され、しばしば写真撮影されているが、目に見えない K-H 波を可視化した観測事例は限られている。

図 6 は、高さ 3km 付近の大気境界層上面に形成された K-H 波をとらえたものである。波の最大振幅は約 400m、波長は約 1000m であった。この事例でさらに興味深いのは、地面から 1km の間に存在する乱流境界層が、その上空に存在する層流域との境界面を押し上げ、波長数 km の重力波を発生させていることである。ドップラー速度を使った解析によれば、下層の乱流によって励起された重力波が、K-H 波を発生させる要因であることが示唆されている。

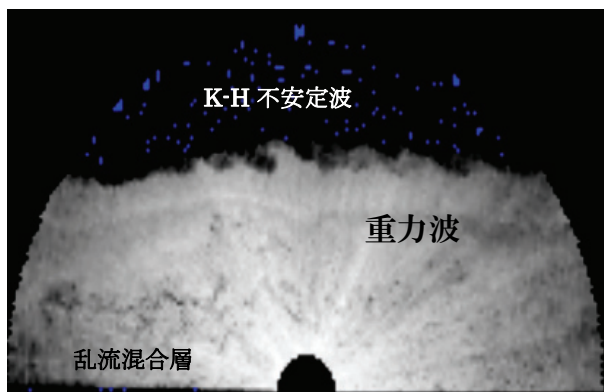


図6 K-H波と重力波の観測事例。画像は、縦横共ライダー観測点を中心とした半径4.4kmの範囲を表示。

5.2 未知の晴天乱流の可視化

雲、特に層状性の雲の底は、基本的に、気温・湿度・風・エアロゾル等の不連続面に位置しているので、力学的・熱力学的な不安定現象が起こりやすいはずであるが、意外と雲底部の組織的な構造に関する研究は少ない。その主な理由は、現象の水平スケールが数100mでかつ発生時間が数分程度であることに加え、目に見えないため、存在そのものを知られる機会が極めて少ないためであろう。しかしながら、4.1で紹介したような不可視の“ダストデビル”のように、新しい観測装置を用いることで初めてとらえることができた大気現象がある。

その観測事例を、図7(上、下)に示す。既知のタイプの雲で一番近い形状を示すのは、マンマタス(乳房雲)である。しかし、マンマタスは、発達した積乱雲から延びる厚いカナトコ雲の雲底に発生するが、これらは何れも高度3~4kmに存在した目に見えないくらい薄い層雲が消滅していく過程で出現した組織的な構造である。それにもかかわらず図7(上)中に白矢印で示した個所は、毎秒9mに近い予想以上に強い下降流を伴っており、図7(下)に示した構造でもK-H波を超える上昇・下降流が存在する。

このように、晴天乱流には悲劇的な航空機事故を引き起こす前までは知られていなかった積乱雲の雲

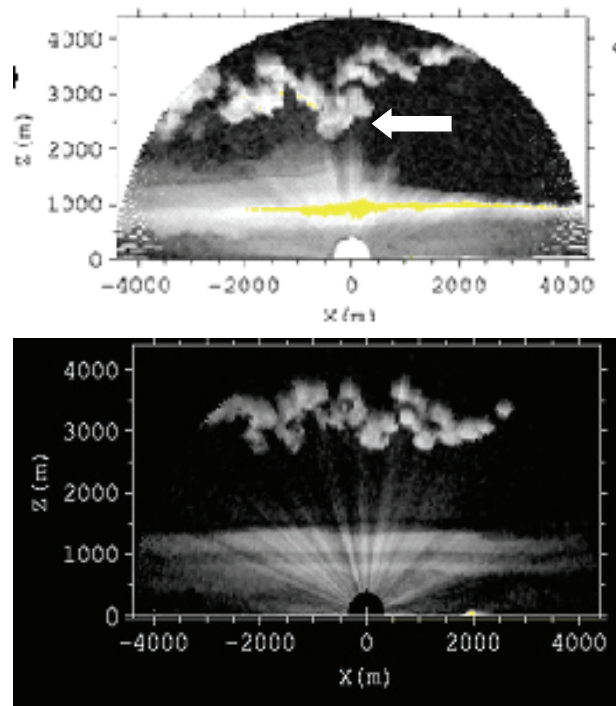


図7 強い下降流を伴うマンマタス状の薄い雲の観測事例。

底部で発生するダウンバーストのように、既知の現象以外に危険な自然現象はまだまだ数多く存在する。

6. 豪雨の母体の可視化

“ゲリラ”豪雨といえども、まったく何の前触れも無く襲ってくるわけではない。“豪雨の卵”を抱えた雲から“卵が孵る”までの時間が短いために、避難警告が間に合わないことが問題である。豪雨をもたらす積乱雲のような対流雲は、地表から雲粒の種となるエアロゾルを含んだ湿った空気塊(サーマル)が上昇し、それが凝結高度に達した時に発生する。従って、大気境界層内のサーマルの発生頻度、上昇速度、到達高度などを同時に観測できるドップラーライダーは、豪雨の母体を監視する装置として最適である。

例えば、図8は2005年5月3日12時に、晴天積雲が発生していた時の、ほぼ主風向(西南西風)に沿ったS/N(受信信号の強さに対応)の鉛直断面である。風は、図の左側から右側に吹いている。S/N

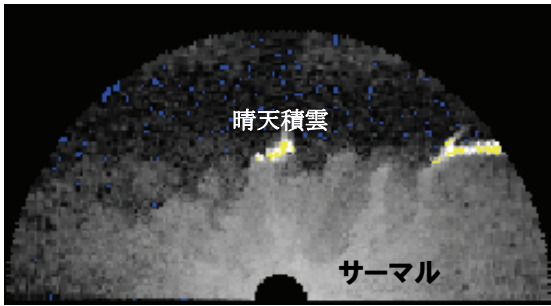


図 8 サーマルの上端に発生した晴天積雲の観測事例。画像は、縦横共ライダー観測点を中心とした半径 4.4km の範囲の S/N 比を表示。

の値が大きい高度約 2.5km 付近の領域は、積雲の雲底部を示している。積雲より下層で比較的弱い散乱を示しているのはエアロゾルである。ただし、雲凝結核の濃度、上昇速度、空気塊の初期の湿度の変動を反映して、形成される雲底高度は必ずしも一定では無い。また、地面から上昇する空気塊の上昇速度（浮力）も互いに異なっており、発生したサーマルがいつも雲を形成するわけでは無い。

7. 風の利用

地球温暖化の防止と限りある燃料資源の節約のために、風力発電は今後その重要性が増すであろう。ただし、陸上では設置場所と騒音という大きな制限がある。一方、洋上ウィンドファームは、建設コストは割高であるが、陸上よりも強い風が期待できるため、海で囲まれた日本のような国では、発電ポテンシャルは高い。

しかし、陸上の風の観測は世界各地で行われているが、海上の風の 3 次元構造については、これまでほとんど観測事例がない。そこで我々は、長崎半島沖合の池島に本装置を移設し、海上の風力資源の見積もりを行っている。

また、航空機や風車にとって、バードストライクは回避すべき重要な課題である。本来、「風と鳥」は密接不可分であり、気象学の先達は、鳥の飛行パターンから大気の流れについて多くを学んできた。狭

い領域における短時間の鳥の動きを捉えるには目視観測が、グローバルスケールの渡りには衛星通信を用いた追跡法が最適である。その中間のスケールでは、レーダーを用いた観測が行われている。レーダーでは、100km 前後の水平スケール内の鳥の動きをとらえることができると同時に、どの高さを選択的に選んで飛んでいるかが昼夜問わず検出可能である。更に最近では、レーダー電波の散乱パターンや鳥の鳴き声から、鳥の種類の自動判別が或る程度まで可能となってきた。

このように、鳥の種類毎の行動パターンについては、従来のバードウォッチによる観測データも含めて、限定的ではあるがデータの蓄積がある。一方、鳥が飛んでいる高度の気象データについては、気象観測網が不十分であるため、ほとんど蓄積が無い。気象庁が、2001 年 4 月から全国で運用を開始したウィンドプロファイラー網では、地上から対流圏中層までの風を、高度 300m 毎に 10 分間隔で観測可能である。幸か不幸か、これらのウィンドプロファイラーのデータに、鳥のエコーがノイズとなって入りこみ、そのデータを解析することで、渡り鳥の活動の日変化や季節変化の地域特性の解明が進んだ。しかし、これだけでは、鳥の飛行高度を予測するための情報としては、不十分である。

そこで我々は、本装置を用いることで、鳥の行動と風環境との比較も行っている。その結果、鳥達は、長年住み慣れたその場所の風環境（局地風）を最大限利用して行動していることが明らかとなってきた。このような鳥の習性を理解することで、バードストライクの被害を軽減させたいと考えている。

8. まとめ

このように、ドップラーライダーを用いることで、大気中の、通常ではとらえることのできない波や乱流構造を可視・定量化でき、乱流、エアロゾル、雲の発生までをシームレスに研究することができる。また、本装置を有効に使うことで、気象学のみではなく、海洋学、生態学、都市工学、エネルギー工学などにも大きな貢献が期待される。