

ラマンライダーとウィンドプロファイラーで観測した寒冷前線面の鉛直構造

Vertical distributions of water vapor, particles, and wind during the passage of a cold front as revealed by the Raman lidar and wind profiler observations

酒井哲¹、永井智広²、中里真久²、松村貴嗣^{2,3}、笹岡雅宏²

Tetsu Sakai¹, Tomohiro Nagai², Masahisa Nakazato², and Takatsugu Matsumura^{2,3}, and Masahiro Sasaoka²

¹名古屋大学環境学研究科 21 世紀 COE 研究員、²気象研究所、³科学技術振興事業団

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ²Meteorological Research Institute, ³Japan Science and Technology Corporation

Abstract: The vertical distributions of the water vapor, particles, and three-dimensional wind were measured using a Raman lidar and a wind profiler during the passage of a cold front during 19–20 March 2002 over Tsukuba, Japan. The leading edge of the cold frontal head was identified by a sharp decrease in the backscattering ratio below an altitude of 2.5 km. The cold air mass showed the geometrical and dynamical characteristics of gravity (density) current: nose and head at the leading edge, billows behind the head, and feeder flows in the middle height region. The observed results indicate that the cold front efficiently lifted the water vapor and aerosols from the lower troposphere to the free troposphere.

1. はじめに

寒冷前線面は、地表から上空へ伸びる暖気と冷気の境界面である。前線面では、暖気の下に冷気もぐり込み、暖気が持ち上げられることによって雲や降水が発生する。その周辺では突風や乱流が発生し、気象・航空災害をもたらすことが知られている。また最近では、寒冷前線面付近の大気運動が大気境界層物質を自由対流圏に輸送するものとして注目されている。今回は、寒冷前線通過時における水蒸気とエアロゾル・風の鉛直分布を、ラマンライダーとウィンドプロファイラーを用いて観測した結果を報告する。

2. 観測装置と概要

2.1 ラマンライダー

ラマンライダーは、大気水蒸気分子・窒素分子によるラマン散乱とレイリー散乱、粒子（エアロゾル・雲）散乱を用いて水蒸気混合比と粒子後方散乱比の鉛直分布を観測する。観測では、波長 532 nm のレーザーパルス（30 Hz、最大 800 mJ/pulse）を鉛直上方に射出し、大気分子・粒子からの後方散乱光を口径 1 m の反射望遠鏡で集光、光電子増倍管で検出する。検出成分（波長）は水蒸気ラマン散乱（660 nm）、窒素ラマン散乱（607 nm）、レイリー・粒子散乱（532 nm）とその偏光成分である。観測装置とデータ解析方法の詳細は Sakai et al. (2003)を参照されたい。測定高度範囲は地上約 0.2 km～15 km である。データの高度分解能は 48 m、時間分解能は 3 分である。

2.2 ウィンドプロファイラー

ウィンドプロファイラーは大気分子あるいは粒子のドップラー速度の鉛直分布を観測する。観測では、周波数 1290 MHz（波長 23 cm）の電磁波を 5 方向（鉛直方向と、鉛直から 15 度傾いた 4 つの方位角方向）に順次射出し、大気屈折率のゆらぎによる散乱波のドップラーシフトをフェイズドアレイアンテナで検出する。これにより 3 次元風速の鉛直分布を得る。データ解析方法の詳細については笹岡 (2003)を参照されたい。測定高度範囲は地上約 0.31 km～4 km である。データの高度分解能は 405 m、時間分解能は 10 分である。

なお、二つの観測装置は水平方向に約 20 m 離れている。

2.3 観測の概要

寒冷前線の観測は、2002年3月19日1903 JSTから20日0722 JST（日本標準時）にかけて、気象研究所（つくば市）においておこなった。20日0300 JSTの地上天気図によると、寒冷前線が東北地方から関東地方の太平洋側に伸びており、その末端が観測点上空を通過していた。前線の進行速度を地上気象官署の観測データから見積もると、 12 ms^{-1} であった。なお、この期間中観測点では降水は観測されなかった。

3. 観測結果

3.1 寒冷前線面におけるエアロゾル・水蒸気の鉛直構造

Figure 1 にラマンライダーとウィンドプロファイラーで観測した粒子後方散乱比(a)と水蒸気混合比(b)、風ベクトル（図中矢印）の高度-時間断面図を示す。風ベクトルは、前線面に対する水平相対速度と鉛直速度の合成を示す。0540 JST以降の水蒸気データは、太陽光による背景光ノイズのために測定できていない。なお、水蒸気混合比と後方散乱比は凝結・蒸発が無ければどちらも保存量なので、大気のトレーサと見なすことができる。

後方散乱比データ（Fig. 1a）を見ると、0115 JST頃に高度0.5–2.5 kmの後方散乱比が約3から1.5以下に急激に減少したことがわかる。この時間とほぼ対応して、気象観測鉄塔頂上（高さ213 m）の温度が約4度減少していた（Fig. 1c）。つまり、この時間帯に寒冷前線面が観測点を通過し、上空の大気が暖気から冷気に移行したと考えられる。暖気側（0115 JST以前）では高度3 km以下の後方散乱比が約3と大きい値を示し、冷気側（0115 JST以後）では約1.5と比較的小さい値を示した。一方、水蒸気混合比（Fig. 1b）は後方散乱比と異なる分布を示し、前線面付近（高度約3 km以下、0030–0230 JST）でその前後よりも高い値（約 2.5 g kg^{-1} ）を示した。共に大気のトレーサとみなせる後方散乱比と水蒸気混合比が異なる分布をしている理由は不明であるが、前線の移動にともなってエアロゾルと水蒸気が発生源から気塊へ流入する場所・時間が異なっていたことと、流入後の凝結・蒸発過程をともなった鉛直混合が主な理由と考えられる。

（アーク雲）

前線面の先端部において、後方散乱比が100を越える領域を数箇所観測した（Fig. 1aの高度2.7–3.5 km、0030–0230 JST）。これらは暖気が前線面に沿って上昇したことによって発生した雲であると考えられる。その根拠は、ウィンドプロファイラーで観測した鉛直風速が雲の下方と内部（高度1.6–4.1 km）で $0.5\text{--}1.1 \text{ ms}^{-1}$ の上昇流を示したことと、ライダーで観測した水蒸気混合比が雲底（高度2.7 km）で水飽和（相対湿度100%）に達していたことである。

3.2 重力流と似た構造

冷気側のエアロゾルと風の鉛直分布（Fig. 1a）には、重力流（Fig. 2）と似た特徴が見られた。以下にその特徴を述べる。

（鼻と頭）

冷気先端部付近（0115–0230 JST、高度0.5–2.5 km）では、後方散乱比の小さい（ <1.5 ）領域が下層ほど暖気側に突き出した“鼻”状の分布をしていた。また、冷気の高さ（ここでは後方散乱比が1.5以下になる高度とする）は先端部で $\sim 3.5 \text{ km}$ 、後方部で $\sim 3.0 \text{ km}$ （0700 JST）であり、先端部の方が後方部より高い“頭”状の分布をしていることが分かる。これらの分布は、後に述べる冷気内の前線面へ向かう流れと、冷気先端部付近の上昇流により形成されたものと考えられる。

（背面上部の波状の分布）

冷気背面上部（0300 JST以降、高度2.5–3.5 km）の後方散乱比は波状の分布を示した。この波状の分布は、水平風の鉛直シアによって生じた不安定（ケルビン–ヘルムホルツ不安定）によって形成されたものと考えられる。20日0230 JSTのレーウィンゾンデ観測によると、高度2.9–4.0

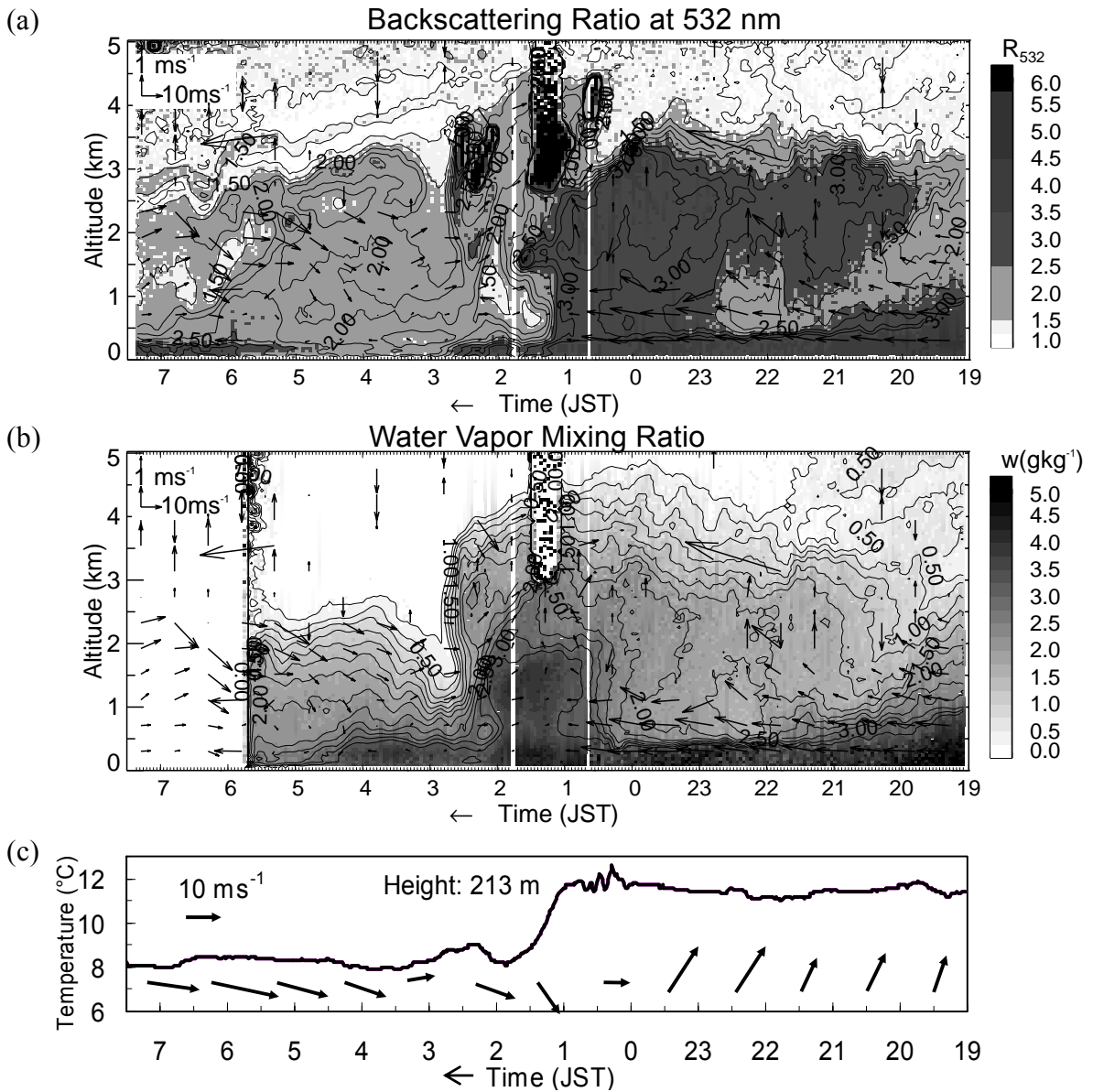


Fig.1: Temporal and vertical cross section of the backscattering ratio (a) and the water vapor mixing ratio (b) obtained using the Raman lidar for the period ranging from 1903 JST 19 March to 0722 JST 20 March 2002 over Tsukuba. The arrows in the cross sections show the Doppler wind vectors (vertical and horizontal components relative to the front motion) that were obtained using the wind profiler. The lower panels show the temporal variations of temperature and the horizontal wind vectors at 213 m in height.

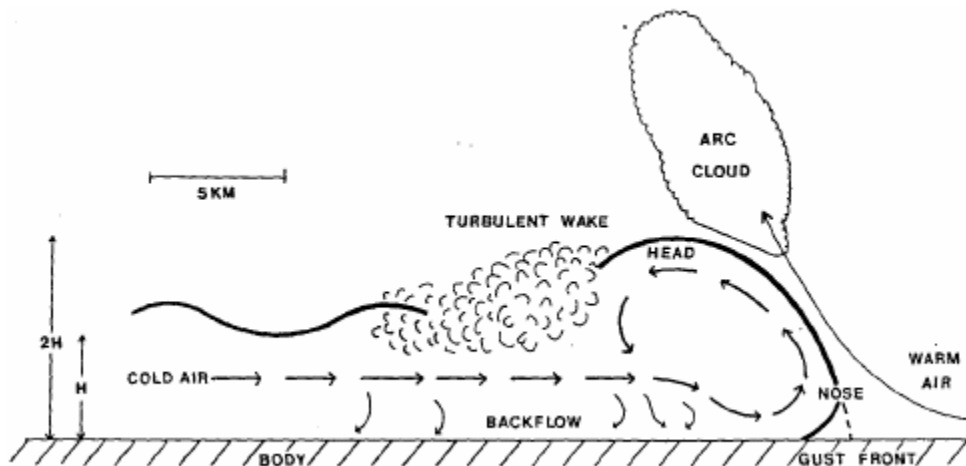


Fig. 2: Schematic vertical cross section of a mature thunder storm outflow (gravity current) (after Drogemeier and Wilhelmson, 1987). Note the correspondence with Fig. 1a.

km で水平風速が 25 ms^{-1} から 50 ms^{-1} に変化していた。この値から流れの不安定の指標であるリチャードソン数を求めると 0.75 であり、この領域がケルビン-ヘルムホルツ不安定波の維持される条件下にあったことが分かる。

(内部での前線面に向かう流れ)

冷氣内部の高度 0.5–2.5 km において、前線面に向かう水平方向の流れ（平均相対速度 5 ms^{-1} ）が観測された。また、鉛直風は、後方部で下向き（ $\sim 0.3 \text{ ms}^{-1}$ 、0330–0530 JST）から先端部で上向き（ $\sim 0.2 \text{ ms}^{-1}$ 、0130–0330 JST）に変化しており、冷氣内部で内部循環（図では反時計回り）があったと考えられる。この流れは、重力流の鉛直構造を形成するための重要な要素であると考えられている(Simpson, 1997)。

3.3 自由対流圏への輸送量の見積り

前線面付近において上昇流が観測されたことから、この付近では下部対流圏のエアロゾルと水蒸気が自由対流圏へ輸送されていると考えられる。そこで、観測データに基づいてこれら物質の鉛直輸送量を見積もった。

ウィンドプロファイラーで観測した前線面付近における平均上昇流速は 0.7 m s^{-1} 、ライダーで観測したエアロゾル後方散乱係数は $1.1 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 、水蒸気濃度は $2.1 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-3}$ であった。エアロゾルについては消散/後方散乱係数比を 50 sr、質量消散係数を 1 g m^{-2} (Sokolik and Toon, 2001)と仮定すると、その質量濃度は $5.5 \times 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$ と見積もられる。前線の水平スケールを前線に対して垂直方向に 110 km (ライダーデータとゾンデの水平風速から推定、雲のある領域は除く)、水平方向に 760 km (天気図と GMS 衛星雲画像から推定) とすると、前線面での鉛直輸送量はエアロゾルが $3.2 \times 10^3 \text{ kg s}^{-1}$ 、水蒸気が $1.2 \times 10^5 \text{ kg s}^{-1}$ となる。また、同様に空気の輸送量を計算すると $5.5 \times 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$ となり、この値は Stohl (2001)が ECMWF 気象データを用いて見積もった北半球春季の寒冷前線にともなう大気境界層から自由対流圏への空気平均輸送量 ($6.6 \times 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$) の約 80%に対応する。また、Stohl (2001)の見積もりでは、春季の寒冷前線にともなう輸送量が、年間の総輸送量の約 4%を占めると推定している。このように、寒冷前線面付近の上昇流は、下部対流圏物質を自由対流圏へ効果的に輸送していると考えられる。

4. まとめ

ラマンライダーとウィンドプロファイラーを用いて寒冷前線面通過時における水蒸気とエアロゾル、3次元風速の鉛直分布を観測した。前線面の通過にともない、高度 0.5–2.5 km のエアロゾル後方散乱比は急激に減少した。水蒸気混合比はエアロゾルと異なる分布を示し、前線面付近で高濃度を示した。冷氣内のエアロゾルと風速分布は、重力流と似た特徴を示した。寒冷前線面付近では、下部対流圏物質が自由対流圏へ効果的に輸送されていることが示唆された。

参考文献

1. Sakai, T., T. Nagai, T. Nakazato, Y. Mano, and T. Matsumura, Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water vapor mixing ratio over Tsukuba, *Appl. Opt.*, **42**, 7103–7116, 2003.
2. 笹岡雅宏, 集団化アルゴリズムを用いた境界層レーダーの風速推定精度の改善, *天気*, **50**, 161–174, 2003.
3. Droegemeier, K.K. and R.B. Wilhelmson, Numerical simulation of thunderstorm outflow dynamics. Part I: outflow sensitivity experiments and turbulence dynamics, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1180–1210, 1987.
4. Simpson, J.E., *Gravity Currents in the Environment and the Laboratory*, Cambridge University Press, 244pp, 1997.
5. Sokolik, I.N. and O.B. Toon, Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols, *Nature*, **381**, 681–683, 1996.
6. Stohl, A., A 1-year Lagrangian “climatology” of airstreams in the Northern Hemisphere troposphere and lowermost stratosphere, *J. Geophys. Res.*, **106**, 7263–7279, 2001.