

長距離輸送エアロゾルが大気境界層の発達に与える影響

工藤 玲¹, 青柳 暁典², 西澤 智明³

¹気象庁気象研究所 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1)

²気象庁 (〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4)

³国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Impact of the long-range transported aerosols on the atmospheric boundary layer evolution

Rei Kudo¹, Tomonori Aoyagi², and Tomoaki Nishizawa³

¹Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052

²Japan Meteorological Agency, 1-3-4 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122

³National Institute of environmental studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

Abstract: Vertical profiles of the aerosol physical and optical properties, with a focus on spring mean and on five transport events, were investigated in Tsukuba, Japan, by a synergistic remote sensing method that uses lidar and sky radiometer data. The retrieved aerosol vertical profiles of the springtime mean and five transport events were input into our developed one-dimensional atmospheric model, and the impacts of the aerosol vertical profiles on the evolution of the atmospheric boundary layer (ABL) were studied by numerical sensitivity experiments. Aerosols caused the net downward radiation and the sensible and latent heat fluxes at the surface to decrease. The decrease of the temperature in the ABL and the direct heating of aerosols in the free atmosphere strengthened the capping inversion around the top of the ABL. Consequently, the ABL height was decreased.

Key Words: Lidar, Sky radiometer, Aerosol, Atmospheric boundary layer, One-dimensional atmospheric model

1. はじめに

地表面に到達する太陽光は、地表面の加熱と地中水分の蒸発を引き起こす。そして、乱流によって、熱と水蒸気は大気へ運ばれる。これらの大気境界層内の物理過程は、地球大気のエネルギー・水循環において重要な役割を担っている。エアロゾルは、太陽光を散乱・吸収することで、大気境界層の物理過程に大きな影響を与える。これまでの研究によって、大気境界層内のエアロゾルは、境界層高度の低下、地上気温の低下などを引き起こすが、それらの正負は光吸収性などの光学特性に依存することが示されている¹⁾。一方、自由大気中を長距離輸送されるエアロゾルの影響については、あまり調べられていない。しかし、長距離輸送されるエアロゾルは、領域規模に広がり得るため、大気境界層への影響を調べることは重要である。

本研究²⁾では、まず、ライダーと分光放射計(スカイラジオメーター)を用いた地上リモートセンシングによって、加熱率を見積もるために必要なエアロゾルの光学特性(光学的厚さ、一次散乱アルベド、位相関数)の鉛直分布を導出した。そして、得られたエアロゾル光学特性を一次元大気モデルに入力し、感度実験を行うことで、自由大気中のエアロゾルが大気境界層の発達に与える影

響を明らかにした。

2. 手法

2.1 観測データとエアロゾルの解析方法

使用した観測データは、環境研のライダーの減衰付き後方散乱係数(532, 1064 nm)と全偏光消度(532 nm)、気象研のスカイラジオメータの直達光と散乱光。観測地点はつくば市。観測期間は2012年から2013年の2年間。

エアロゾル光学特性の鉛直分布の導出には、SKYLIDAR³⁾を用いた。この手法では、まず、スカイラジオメータからエアロゾルの複素屈折率、粒径分布、粗大モードの非球形粒子の割合の気柱量を推定する。次に、それらの鉛直分布をライダーの観測データに最適化する。最終的に、消散係数、一次散乱アルベド、位相関数の鉛直分布を導出することが出来る。そして、これらの光学特性から加熱率を見積もることが可能となる。

本研究では、以上のデータと解析手法によって、エアロゾルの微物理・光学特性の鉛直分布の春季の平均値と、自由大気中に高濃度のエアロゾルが飛来した5ケースの日平均値を解析した。

2.2 一次元大気モデルと感度実験方法

気象庁現業モデルの大気境界層スキームを基

に、気象研究所で開発された高精度な大気放射伝達モデルを組み込んだ一次元大気モデルを開発した。大気の鉛直層は40kmまでの70層、乱流過程は Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 3 スキーム、地表面フラックスはバルク法、地中は2mまでの10層。地中の含水率は固定値を与えた。エアロゾルの鉛直分布は、初期値のまま固定した。凝結過程は考慮していないため、雲は発生せず、潜熱解放による大気加熱もない。大気放射伝達モデルは、0.3~3.0 μm を54バンドに分割した短波長帯と3.0~50.0 μm を19バンドに分割した長波長帯に分けて計算した。エアロゾルは短波長帯のみ感度があるものとし、長波長帯への影響は無視した。水蒸気、二酸化炭素、酸素、オゾンの吸収は、相関 k 分布法によって計算した。放射伝達は Doubling and adding 法によって解いた。

以上の一次元大気モデルに、2.1の解析結果(春季と5ケースのエアロゾル光学特性)を入力し、24時間積分する(EXP1)。エアロゾル無しの実験(EXP0)も行い、2つの実験結果の差によって大気境界層に与える影響を調べた。また、エアロゾルの光学的厚さを変えないように、全てのエアロゾルを大気境界層内に圧縮したプロファイルを作成し、それを入力した実験(EXP2)を行った。この結果をEXP1の結果と比較することで、エアロゾルの鉛直分布自体がどう影響するかについて調べた。

3. 結果

3.1 エアロゾルの鉛直分布

532nmの光学的厚さの春季の平均値は、大気境界層内で0.08、自由大気内で0.13。自由大気中を飛来してきたエアロゾルの方が大きい値を示した。自由大気中で特に大きな光学的厚さを示した5ケースを抽出し、後方流跡線解析を行った。その結果、5ケース中、3ケースは中国の砂漠域を起源としており、推定された粒径分布の粗大粒子が多いことから、ダストが主体であることが分かった。また、1ケースは、ロシアで発生した森林火災を起源としており、微小粒子が主体であった。最後の1ケースでは、ロシアの森林火災から南に離れた中国寄りの地域が飛来元であり、粒径分布の特徴からダストと森林火災両方の粒子が混ざっていたと考えられた。5ケースの自由大気中の光学的厚さは0.24~0.33、オンゲストローム指数は0.47~1.82、一次散乱アルベドは0.95~0.98、ライダー比は47~61であった。

3.2 感度実験

EXP1とEXP0の差から、エアロゾルの大気境界層への影響を調べた。エアロゾルによって、地表面での正味の下向き放射は20~50 Wm^{-2} 減少、顕熱フラックスは10~30 Wm^{-2} 減少、潜熱フラックスは10~30 Wm^{-2} 減少した。その結果、大気境

界層内の気温は0.3~0.5K減少した。一方で、自由大気の気温は、エアロゾルによる直接加熱によって0~0.4K増加した。これらの結果、大気境界層上端付近の逆転層は強化され、顕熱フラックスの減少と合わせて、大気境界層高度は0~200m減少した。

EXP2における地表面の正味下向き放射の減少量、顕熱・潜熱フラックスの減少量は、EXP1とほぼ同じ値であった。しかし、自由大気でのエアロゾルの直接加熱が無いこと、大気境界層内でのエアロゾルの直接加熱が強いことによって、EXP1と比べると、大気境界層上部の逆転層は弱まり、結果、大気境界層高度の低下は0~100m程度であった。以上から、大気境界層の発達において、エアロゾルの加熱率の鉛直分布が大きな影響を与えていることが分かった。

4. まとめ

2012から2013年のつくば市で行われたライダーとスカイラジオメータの観測から、SKYLIDARによって、エアロゾルの微物理・光学特性の鉛直分布を導出し、春季の平均値と5ケースの高濃度エアロゾルの飛来イベントを解析した。それらを一次元大気モデルの入力値として、エアロゾルが大気境界層の発達へ与える影響を感度実験によって調べた。エアロゾルは、地表面の正味下向き放射、顕熱・潜熱フラックスを減少させた。顕熱フラックスの減少は、大気境界層内の気温低下を招いた。自由大気中のエアロゾルによる直接加熱は、自由大気中の気温を増加させた。これらの気温の変動は、大気境界層上部の逆転層を強化した。顕熱フラックスの減少と逆転層の強化により、大気境界層高度は減少した。エアロゾルの存在高度を大気境界層内に限定すると、これらの影響は小さくなった。これらの結果から、大気境界層の発達において、エアロゾルの加熱率の鉛直分布が重要な役割を担っていることが示された。

参考文献

- 1) Yu, H., et al., 2002: Radiative effect of aerosols on the evolution of the atmospheric boundary layer. *J. Geophys. Res.*, 107, 4142, <https://doi.org/10.1029/2001JD000754>.
- 2) Kudo, R. et al., 2018: Characteristics of aerosol vertical profiles in Tsukuba, Japan, and their impacts on the evolution of the atmospheric boundary layer. *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 3031-3046, <https://doi.org/10.5194/amt-11-3031-2018>.
- 3) Kudo, R., et al., 2016: Vertical profiles of aerosol optical properties and the solar heating rate estimated by combining sky radiometer and lidar measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 3223-3243, <https://doi.org/10.5194/amt-9-3223-2016>