

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510026

研究課題名(和文) 能動・受動型測器と数値モデルを複合利用したエアロゾルの大気境界層への影響解明

研究課題名(英文) Study of the impact of aerosols on the atmospheric boundary layer using the combinations of active and passive remote sensing, and one-dimensional atmospheric numerical model

研究代表者

工藤 玲 (Kudo, Rei)

気象庁気象研究所・気候研究部・研究官

研究者番号：00414508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)： 能動・受動型測器の複合利用によって解析した季節毎のエアロゾル光学特性の鉛直分布を、一次元大気モデルに入力し、境界層への影響を調べた。エアロゾルによる地上日射の減少は、顕熱フラックスを減少させ、境界層高度と気温の低下を招いた。春冬の自由大気中の高濃度エアロゾルによる直接加熱は、大気の安定度を変え、上記の影響を強化させた。

エアロゾル光学特性の1976～2008年の変動が境界層へ与える影響を、同モデルを用いて調べた。エアロゾルの変動は、地上日射の増加、顕熱・水蒸気フラックスの増加、境界層高度の上昇と水蒸気量の増加、温室効果の増加の過程により、地上気温の上昇をもたらす可能性が示された。

研究成果の概要(英文)： Using the combination of active and passive sensors, the seasonal changes in the vertical profiles of aerosols were analyzed. Furthermore, their impacts on the atmospheric boundary layer were investigated by the one dimensional atmospheric model. The aerosols decreased the surface solar radiation, the sensible heat flux, and the boundary layer height. In spring, these influences were strengthened by making the atmospheric condition more stable due to the direct heating of aerosols in the free atmosphere.

The impacts of the long-term variations of aerosols on the atmospheric boundary layer were investigated using the same model. It was shown that the changes of aerosols from 1976 to 2008 at Tsukuba could cause an increase of the surface air temperature through the processes of an increase of surface solar radiation, increases of sensible and water vapor fluxes from the surface, increases of the boundary layer height and water vapor content, and an increase of the greenhouse effect.

研究分野：大気放射

キーワード：エアロゾル 大気放射 大気境界層 リモートセンシング 大気モデル

1. 研究開始当初の背景

太陽から降り注ぐ日射のエネルギーは、一旦地表で吸収され、長波放射の形で上空大気や宇宙空間に向けて再放出されると共に、顕熱や潜熱といった熱フラックスとして地表に近い大気に輸送され、さらに大気境界層の乱流過程によって自由大気へと運ばれ、地球大気を駆動するエネルギー源となる。このため大気境界層の物理過程は、エネルギー・水・物質循環の起点であり、気候へ影響を及ぼす重要な過程である。エアロゾルは、日射を直接散乱・吸収することで、大気を加熱する効果と地表面に達する日射量を減衰させる効果をもつ。一次元大気境界層モデルを用いた理想実験によると、大気境界層の形成に対して、エアロゾル光学特性の鉛直分布が重要な要素であることが示されている。

エアロゾル光学特性の鉛直分布は、ダストや汚染物質の流入により、複雑な構造をなしていると考えられる。既存の受動型光学測器による観測では、エアロゾル光学特性の気柱代表値を精度よく得ることが出来るが、鉛直分布についての情報を知ることは出来ない。一方、能動型光学測器を用いた観測手法では、エアロゾル光学特性の鉛直分布に比例する信号を得ることが可能であるが、その絶対値を推定するには多くの過程を必要とする。これらの理由から、エアロゾルの2次元もしくは3次元動的な動態の把握は難しく、エアロゾルが大気境界層へ与える影響に関する理解も不十分なままである。

2. 研究の目的

能動型・受動型測器を複合利用することで、エアロゾル光学特性の鉛直分布を観測する。そして、観測結果を一次元大気モデルへ入力し、感度実験を行うことで、エアロゾルが大気境界層へ与える影響を解明する。具体的には、以下の3つの目標を立てた。

(1) 能動型・受動型測器を用いた複合リモートセンシング

能動(ライダー)・受動型測器(スカイラジオメータ)の複合利用により、エアロゾル光学特性の鉛直分布を推定する手法を開発する。そして、つくば市における通年観測を実施し、季節毎、ダスト等の高濃度イベント毎の特徴を調べる。

(2) エアロゾルの短期変動が大気境界層へ与える影響

観測から得られた季節毎、高濃度イベント毎のエアロゾル光学特性の鉛直分布を一次元大気モデルへ入力し、大気境界層への影響を評価する。

(3) エアロゾルの長期変動が大気境界層へ与える影響

先行研究で得られているつくば市のエアロゾル光学特性の1976~2008年の長期変動

を一次元大気モデルへ入力し、エアロゾルの長期変動が大気境界層へ与える影響を評価する。

3. 研究の方法

(1) 能動型・受動型測器を用いた複合リモートセンシング

大気境界層への影響を調べるためには、以下のエアロゾル光学特性の鉛直分布が必要になる。消散係数(エアロゾル総量を表す)、一次散乱アルベド(光吸収性を表す)、

位相関数(散乱によるエネルギーの分配方向を表す)。これまで、スカイラジオメータを用いた手法では、これら全ての光学特性が得られるが、気柱代表値(鉛直積算値)であった。一方、ライダーを用いた手法では、鉛直分布が得られるものの、一部の要素に止まっていた。このため、本研究ではまず、これらの観測データを複合利用することで、すべての光学特性の鉛直分布を推定するリモートセンシング手法の開発を行った。そして、つくば市で実施した2012年1月から2014年3月までのスカイラジオメータとライダーの観測データを解析し、エアロゾル光学特性の季節変動と高濃度イベントの特徴を調べた。

開発したリモートセンシング手法は、2ステップで構成される。ステップ1では、エアロゾル光学特性の気柱代表値を推定する。ステップ2で、鉛直分布を推定し、最終的な出力とする。

ステップ1では、スカイラジオメータの光学的厚さと散乱・直達比のデータ、そして、ライダーの偏光解消度を鉛直平均したデータを用いる。これらの入力値に対して、エアロゾルの複素屈折率、微小粒子と粗大粒子の二山を仮定した粒径分布を最適化することで、光学特性の気柱代表値を導出する。また、粗大粒子に占める非球形粒子の割合も最適化する。

観測値への最適化は、最尤法に基づいて行う。最尤法では、観測値と最適化するパラメータから計算される値との差の二乗平方和を評価関数とし、これを最小化することでパラメータが最適化される。この非線形最小二乗問題を解くために、ガウス・ニュートン法と直線探索法を組み合わせたアルゴリズムを構築した。しかし、本研究のように、異なる単位、かつ、幅広いオーダーの変動幅を持つ多数の物理量を扱う問題では、解を得ることが困難な場合が多い。これを解決するために、最適化パラメータと観測値に対して、対数関数に基づいた独自の交換手法を考案した。これにより、最適化パラメータと観測物理量が無次元化され、数百個の最適化パラメータに対しても、高速で安定に解を得ることが出来るようになった。

ステップ2では、ライダー観測の減衰付後方散乱係数と偏光解消度の鉛直分布に加えて、ステップ1で得られた光学的厚さと一次散乱アルベドの気柱代表値を用いる。さらに、

高波長分解能ライダーのデータある場合には、分子散乱による減衰付後方散乱係数のデータを加える。ステップ1と同様に、これらの入力データに対して、複素屈折率、粒径分布、非球形比の鉛直分布を最適化する。粒径分布は、ここでも二山を仮定するが、各山の半径と分散は、ステップ1で得られた気柱代表値で固定する。そして、各山の体積の鉛直分布を最適化する。

以上により、複素屈折率、二山の粒径分布、粗大粒子の非球形比の鉛直分布が得られる。そして、消散係数、一次散乱アルベド、位相関数(非等方因子)の光学特性が計算される。図1に解析結果の一例を示す。2013年3月26日の上空にダストが飛来した時の結果である。図のように、大気境界層内と上空に流入されたエアロゾルの光学特性を分別して得ることが出来るようになる。

開発した手法は、ダスト移流などの複数のエアロゾルの状況を想定したシミュレーションデータへの適用によって性能を評価した。また、実際の観測データを解析し、スカイラジオメータによる既存の手法を用いた結果との比較や、解析された光学特性を用いて計算した地表面日射量を観測値と比較することで、他の手法や観測と整合性のある結果が得られることを確認した。

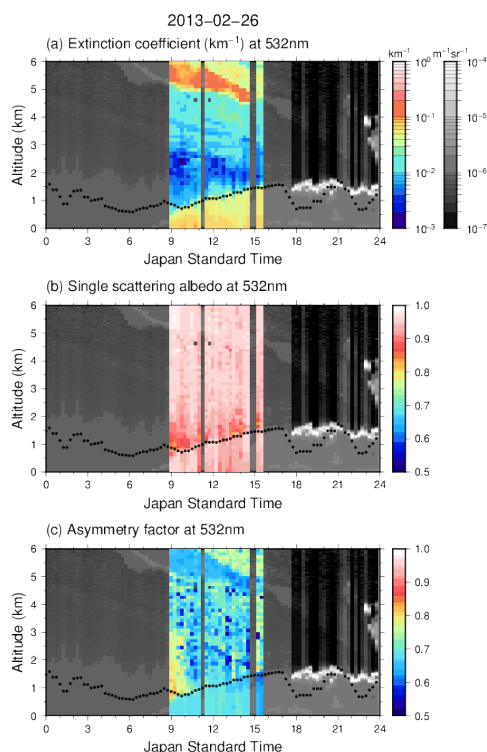


図1. 2013年3月26日の解析例。色は、消散係数(上)、一次散乱アルベド(中)、非等方因子(下)を示している。白黒は、ライダー観測の減衰付後方散乱係数。点線は、ハール関数を用いたウェーブレット変換によって解析された大気境界層高度。

(2) エアロゾルの短期変動が大気境界層へ与える影響

エアロゾル光学特性の鉛直分布を入力して、詳細な放射場・大気境界層の計算を行う一次元大気モデルを構築した。そして、(1)のリモートセンシングによって得られた季節毎、高濃度イベント毎のエアロゾル光学特性の鉛直分布が、大気境界層へ与える影響を評価した。

一次元大気モデルは、気象庁の現業非静力学モデルで用いられている大気境界層スキームに、気象研究所で開発された大気放射伝達モデルを組み込んで構築した。乱流過程は、Mellor-Yamada-Nakanishi-Niinoのレベル3スキームによって計算した。地表面フラックスの計算には、パルク法を用いた。地中温度は、乾燥した砂地・粘土の熱容量、熱伝導係数を与え、熱伝導方程式を解くことで求めた。地中の体積含水率は、0.2で固定し、蒸発によって水分が枯渇しないようにした。地表面から大気へ水蒸気は供給されるが、大気中の凝結過程は含めなかったため、潜熱放出によって大気が加熱されることはない。

放射伝達モデルは、短波長帯(0.3~3.0 μ m)を54バンドに、長波長帯(4~50 μ m)をガスの吸収帯に応じた19バンドに分けた。ガス吸収は、水蒸気、二酸化炭素、オゾン、酸素を考慮し、相関k分布法を用いて計算した。放射伝達は、Discrete-Ordinate法によって各層の反射率と透過率を求め、Adding法によって計算した。地表面反射は、ランバート反射を仮定し、衛星観測で得られている地表面アルベドの気候値を与えた。

モデルの水平風、熱、水の方程式では、乱流輸送と放射による加熱以外に、鉛直流による熱、水、水平風の移流を考慮した。大気場の初期値には、再解析データから作成した季節毎の平均値を用いた。

エアロゾル光学特性をモデルへ入力する際には、モデル内で粒子の乱流輸送や沈着等が導入されていないため、観測結果の鉛直分布をそのままにして与えた。

以上の設定で、季節毎、高濃度イベント毎のエアロゾルに対して、それぞれ24時間の積分を行った。また、エアロゾルが無かった場合の実験も行い、その差をみることで、エアロゾルの影響を調べた。さらに、光学特性を変えないようにしながら、エアロゾルの鉛直分布を大気境界層内に圧縮した実験を行うことで、鉛直分布の影響を調べた。

(3) エアロゾルの長期変動が大気境界層へ与える影響

先行研究によって、つくば市のエアロゾル光学特性は、1976年から2008年にかけて、光学的厚さが減少し、一次散乱アルベドが増加していたことが分かっている。この長期変動が、大気境界層へ与える影響について(2)の一次元大気モデルを使って調べた。

ここで用いるエアロゾル光学特性のデータは、気柱代表値の年平均値である。各年毎のエアロゾルに対して50日の積分を行い、

境界層の変動が平衡状態となった 40 日目の結果を抽出する。そして、1976～2008 年の時系列を構築し、長期変動を調べた。エアロゾルのデータは、気柱代表値であるため、モデルへ入力する際に、鉛直分布を仮定する必要がある。(1)のリモートセンシングの結果より、一年を平均すると、大気中のエアロゾルのほとんどが、大気境界層内にあることが分かったため、この実験では、ほとんどのエアロゾルを大気境界層内に閉じ込める方法を取った。

4. 研究成果

(1) 能動型・受動型測器を用いた複合リモートセンシング

2012 年から 2013 年のデータを解析し、つくば市のエアロゾル光学特性の季節変動を導出した。大気境界層内の光学的厚さは、年間を通じてあまり大きな変動はなく、0.1 程度であった。しかし、自由大気中の光学的厚さは、春と冬に大きくなっていった。特に、春の平均値 0.12 は、大気境界層内と同程度以上であった。

消散係数の鉛直分布から、一年を通して、概ね 3 層の鉛直構造 (0-1.5km、1.5-3.5km、3.5-6.5km) が見られた。一次散乱アルベドは、大気境界層内で小さくなっており、自由大気中よりも大気境界層内のエアロゾルの方が、光吸収性が強いことが分かった。また、エアロゾルの濃度が大きい時ほど、光吸収性が弱くなっていった。粒子サイズは、自由大気中の上部では、ダストと思われる粗大粒子が卓越しており、自由大気中の下部と大気境界層では、微小粒子が卓越していた。また、エアロゾルの濃度が大きい時ほど、微小粒子が卓越する傾向があった。

自由大気中で特に高濃度のエアロゾルが検出された 6 事例に関して、その特徴を解析し、後方流跡線解析を使って流入起源を調べた。4 事例では、粗大粒子が卓越しており、西から流入していたことから中国の砂漠起源のダストと考えられた。北から流入していた 2 事例では、微小粒子が卓越しており、衛星から検出されたロシアの森林火災が起源と推測された。光吸収性等の他の特性には、事例毎に有意な差は見られなかった。

(2) エアロゾルの短期変動が大気境界層へ与える影響

どの季節、高濃度イベントにおいても、エアロゾルによる地表面日射量の減少は、地表面からの顕熱フラックスの減少を引き起こした。そして、大気境界層高度の低下が見られた(図 2 下)。高濃度イベントにおいては、大気境界層の日最大高度は、約 200m 低下していた。また、大気境界層が発達するタイミングは遅くなり、崩壊するタイミングが早まることが分かった。顕熱フラックスの減少は、大気境界層内の気温の低下ももたらした(図 2 上)。高濃度イベントでは、日平均で約 0.3

度の低下となった。水蒸気に関しては、地表からの水蒸気フラックスの減少が見られたが、大気境界層内の比湿の変化は、ごくわずかであった。

エアロゾルの鉛直分布を大気境界層内に圧縮した実験では、エアロゾルの直接加熱が大気境界層内で強まることで、気温の低下幅が小さくなった(図 2 上)。また、大気境界層高度の低下幅も小さくなっていった(図 2 下)。これには、エアロゾルによる境界層内の加熱によって、大気の安定度が弱くなったことが寄与していた。水蒸気については、水蒸気フラックスの減少幅が小さくなり、地表付近の比湿にわずかな増加がみられた。

以上の結果から、エアロゾルは、大気境界層高度の低下と温位の低下をもたらすことが分かった。そして、春と冬には、自由大気中のエアロゾルによる加熱が、より大きな影響を及ぼす要因となっていることが示された。

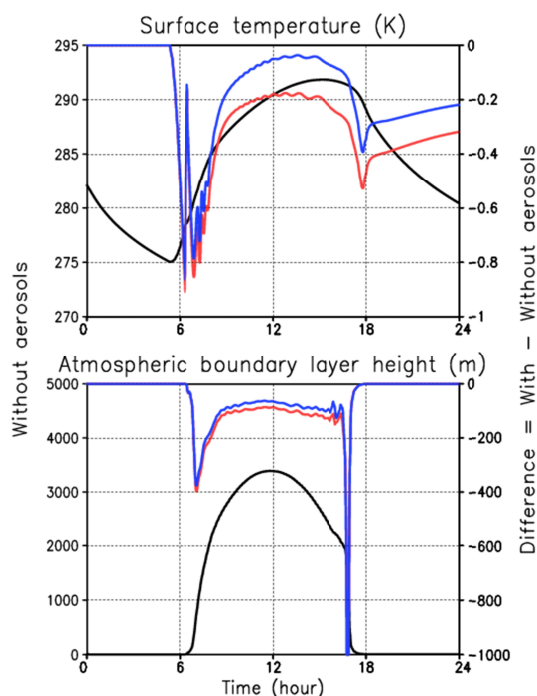


図 2. エアロゾル光学特性の春の平均値に対する地上気温(上)と大気境界層高度(下)の感度実験の結果。黒実線は、エアロゾルが無かった場合の変動(左軸)。赤実線は、エアロゾルがあった場合と無かった場合の差(右軸)。青実線は、エアロゾルの鉛直分布を圧縮した場合とエアロゾルが無かった場合の差(右軸)。

(3) エアロゾルの長期変動が大気境界層へ与える影響

長期的なエアロゾルの光学的厚さの減少と一次散乱アルベドの増加は、地表面へ入射する日射量の増加をもたらした。その日射量の増加によって、地表面からの顕熱・水蒸気フラックスが増加した。顕熱フラックスの増加は、大気境界層高度を上昇させた。水蒸気フラックスの増加は、大気境界層内の水蒸気

量を増加させた。さらに、水蒸気量の増加による温室効果は、日平均気温の増加を引き起こした。エアロゾルの変動を無くし、二酸化炭素とオゾン増加のみを考慮した実験では、上記のような変動はごくわずかであった。これは、二酸化炭素やオゾンと比べて、エアロゾルの方が地表面の熱・水収支にもたらす影響が、大きいことに起因する。

以上のように、エアロゾル光学特性の長期変動は、短波放射 気象場 長波放射 気象場のプロセスによって、大気境界層の長期変動をもたらす可能性が示された。

このモデル実験は、現実を再現することを目的としてはいないが、得られた日平均気温の増加傾向は、観測による地上気温の上昇傾向と整合性のある変動であった(図3)。しかし、実験で得られた上昇幅(約0.1度/10年)は、観測結果の上昇幅(約0.4度/10年)よりも小さいため、エアロゾルの変動が地上気温の上昇をもたらしたと説明することが出来るものではない。しかし、エアロゾルの変動が、地上気温の上昇に対して、いくらかの寄与がある可能性が指摘される。

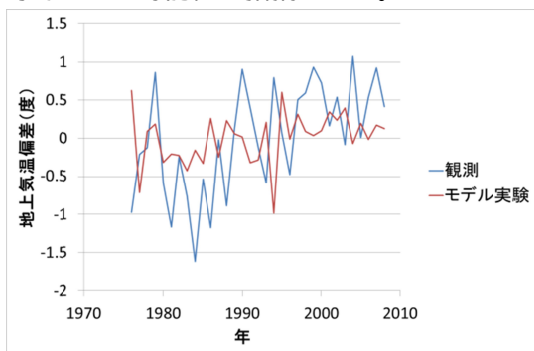


図3. 地上気温の日平均値の偏差。つくば市の観測結果(青)とモデル実験の結果(赤)。

(4)まとめと今後の展望

エアロゾルは、主として、地表面へ入射する日射量の変動によって引き起こされる顕熱フラックスの減少によって、大気境界層高度と境界層内の気温の低下を招いていた。また、春と冬に自由大気へ流入するエアロゾルがもたらす直接加熱は、大気の安定度を変えることで、上記の影響をより大きくしていることが分かった。

エアロゾルが与える境界層内の水蒸気量への影響は、短期的には小さかった。しかし、長期変動においては、エアロゾルがもたらす水蒸気量の変動が、長波放射を変動させ、それがまた地表面の熱・水収支を変化させるといふプロセスで、エアロゾルの影響を拡大させていることが分かった。

これらのエアロゾルがもたらす大気境界層への影響は、雲の発生・発達環境にも影響があると考えられるため、今後は、凝結過程も含めたプロセス研究を行う必要がある。

本研究で開発したりモートセンシング手法は、国内研究機関で運営されているスカイラジオメータとライダーの観測網への適用

を想定して開発しているため、今後は、広域観測網を使ってエアロゾル光学特性の鉛直分布をモニタリングすることが出来るようになる。また、本研究で行った事例解析のように、後方流跡線解析と組み合わせた解析は、越境汚染の定量的なモニタリングに有効である。

スカイラジオメータとライダーの複合リモートセンシングで用いた最適化アルゴリズムは、様々な観測に応用可能である。今後、EarthCARE 衛星搭載のライダーとイメージャーの複合解析に応用し、エアロゾル光学特性の全球3次元分布の観測へ貢献する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8件)

工藤玲, エアロゾルの光学特性と直接効果, 低温科学, 72, 113-126 (2014), 査読あり.

西澤智明, ライダー等を用いたエアロゾル・雲推定アルゴリズム, 低温科学, 72, 159-168 (2014), 査読あり.

Uchiyama, A., R. Kudo, Continuous ground-based observation of aerosol optical properties at Tsukuba, Japan: Trend and Climatology, J. Meteor. Soc. Japan, 92, 93-108 (2014), 査読あり.

Uchiyama, A., R. Kudo, Column water vapor retrievals from sky radiometer (POM02) 940 nm data, J. Meteor. Soc. Japan, 92, 195-203 (2014), 査読あり.

T. Nishizawa, Development of an aerosol component retrieval algorithm using EarthCARE satellite-borne lidar data, J. Rem. Sens. Soc. Japan, 33, 367-376 (2013), 査読あり.

R. Kudo, A. Uchiyama, O. Ijima, N. Ohkawara, and S. Ohta, Aerosol impact on the brightening in Japan, J. Geophys. Res., 117, doi:10.1029/2011JD017158 (2012), 査読あり.

T. Nishizawa, Development of two-wavelength high-spectral-resolution lidar and application to shipborne measurements, Proceeding of International Laser Radar Conference 2012, 147-150 (2012), 査読あり.

工藤玲, 地上日射量の世界減光・増加傾向, エアロゾル研究, 27, 249-255 (2012), 査読あり.

[学会発表](計 13件)

工藤玲, エアロゾルの長期変動が大気境界層へ与える影響, 日本気象学会, 2014年度春季大会, 2014年5月22日,

横浜.

工藤玲, EarthCARE の ATLID-MSI 複合エアロゾルプロダクトの開発, 日本気象学会 2014 年度秋季大会, 2014 年 10 月 23 日, 福岡.

R. Kudo, Development of ATLID-MSI synergy for retrieving the vertical profiles of aerosol components, EarthCARE Workshop 2014, 2014 年 9 月 8 日, Tokyo, Japan.

R. Kudo, Development of ATLID-MSI synergy for retrieving the vertical profiles of aerosol components, AGU fall meeting 2014, 2014 年 12 月 16 日, San Francisco.

T. Nishizawa, Aerosol and cloud retrieval algorithms from ATLID and MSI measurements, EarthCARE workshop 2014, 2014 年 9 月 3 日, Tokyo, Japan.

T. Nishizawa, Current status of the Asian dust and aerosol lidar observation network (AD-Net), 4th Joint ACTRIS WP2/WP20 Workshop, 2014 年 10 月 28-31 日, Lille, France.

T. Nishizawa, Japanese aerosol and cloud retrieval algorithms using EarthCARE ATLID and MSI, CALIPSO/CloudSat science meeting, 2014 年 11 月 3-5 日, Washington DC, USA.

工藤玲, ライダーとスカイラジオメータから推定したエアロゾル光学特性の鉛直分布, 日本気象学会 2013 年度春季大会, 2013 年 5 月 17 日, 東京.

R. Kudo, Development of an algorithm to estimate the aerosol vertical profile from sky radiometer and lidar measurements, International SKYNET workshop 2013 and the 19th CERE International Symposium on Remote Sensing, 2013 年 7 月 5 日, Chiba.

T. Nishizawa, Introduction of Raman scatter measurement function to NIES lidar network observation, International SKYNET workshop 2013 and the 19th CERE International Symposium on Remote Sensing, 2013 年 7 月 5 日, Chiba.

T. Nishizawa, Observation of air pollution aerosols and Asian dusts using the Asian Dust and aerosol lidar observation Network (AD-Net), Asia Center for Air Pollution Research, 2013 年 7 月 26 日, Tuskuba.

T. Nishizawa, Ground-based lidar network observation of aerosol and clouds in AD-Net, International SKYNET workshop 2013 and the 19th CERE International Symposium on Remote Sensing, 2013 年 7 月 5 日,

Chiba.

西澤智明, Mie-Raman ライダーを用いたエアロゾルの地上ネットワーク観測, レーザーセンシングシンポジウム, 2013 年 9 月 12 日, 箱根.

工藤玲, ライダーとスカイラジオメータから推定したエアロゾル光学特性の鉛直分布, 日本気象学会 2012 年度秋季大会, 2012 年 10 月 5 日, 北海道札幌市.
R. Kudo, Aerosol impact on the brightening in Japan, International Radiation Symposium 2012, 2012 年 8 月 9 日, Berlin, Germany.

西澤智明, 次世代大気モニタリングネットワーク用多波長高スペクトル分解ライダーの開発(3), 第 30 回レーザーセンシングシンポジウム, 2012 年 9 月 6 日, 香川県小豆郡土庄町.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

工藤 玲 (KUDO REI)
気象庁気象研究所・気候研究部・研究官
研究者番号: 00414508

(2) 研究分担者

西澤 智明 (NISHIZAWA TOMOAKI)
独立行政法人国立環境研究所・環境計測研究センター・主任研究員
研究者番号: 10462491

(3) 連携研究者

青柳 暁典 (AOYAGI TOSHINORI)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・主任研究官
研究者番号: 10442740