

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月19日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740316

研究課題名（和文）地上日射の世界的減光・増光傾向に対するエアロゾルの影響解明

研究課題名（英文）Impact of aerosols on the global dimming and brightening

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

研究成果の概要（和文）：世界の地上日射は、1950～1980年代まで減光傾向、その後、増光傾向にある。本研究では、世界の広帯域日射の長期観測から、エアロゾルの量と光吸収性を表す光学特性を推定し、地上日射への影響を調べた。1976～2008年の日本では、1980年代に光吸収性の強いエアロゾルが多くなっていた。エアロゾル量の増加と光吸収性の強化は、ともに地上日射の減光を促す。このため、日本の地上日射の減光・増光が起きていた。1995～2010年の世界28地点では、エアロゾル量は増加していたが、光吸収性は弱体化していた。このため、エアロゾルの地上日射への影響は小さかった。

研究成果の概要（英文）：Surface solar radiation in the world has a decreasing trend until the 1980s (global dimming) and an increasing trend up to now (global brightening). In order to evaluate the impact of aerosols on the dimming and brightening, we estimated two aerosol optical properties, which represent the aerosol amount and light absorption, from the long-term measurements of the surface broadband solar radiation in the world. Using the measurements from 1976 to 2008 at 14 sites in Japan, we found the increase of the amount of light absorptive aerosols in the 1980s. Both an increase of aerosol amount and an increase of light absorption mean a decrease of surface solar radiation. The dimming and brightening in Japan was attributed to these changes in aerosols. At 28 sites in the world, the aerosol amount increased from 1995 to 2010, but the light absorption weakened. Therefore, the impact of aerosols on the brightening at the analyzed 28 sites was small.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	0	2,200,000
2011年度	500,000	0	500,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	0	2,700,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気候変動、エアロゾル、地上日射、大気放射、光学特性

1. 研究開始当初の背景

地上日射は、地球上の生命活動や気候形成に対する主要なエネルギー源である。その観

測は、1950年代の国際地球観測年以降、世界中で行われるようになった。近年までの観測によると、世界の地上日射量は、1980年代ま

で減光傾向にあり (Global dimming)、その後、増加傾向に転じている (Global brightening)。地上日射は、地表面の様々な物理過程を通して、気候へ影響するため、Global dimming and brightening (GDB) の気候への影響が懸念されている。特に、地上気温へ直接影響をもたらすため、地球温暖化との関連が重要視されている。GDB は、雲の影響を取り除いた統計にもみられることから、雲だけでなく、エアロゾルが主要因として挙げられている。

エアロゾルは、日射を直接散乱・吸収することで、地上に到達する日射量を減少させる。この効果は、概ね、光学的厚さ (エアロゾルの量に比例する。以下 AOD_0) と一次散乱アルベド (値が小さいほど光吸収性が強い。以下 SSA_0) によって決まる。従って、GDB へのエアロゾルの影響を定量的に調べるには、AOD と SSA の長期・広域変動を把握する必要がある。

1990 年代後半以降、スカイラジオメータという分光日射計が世界中に展開され、精度良く AOD と SSA を推定できるようになった。しかし、GDB への影響を調べるには、期間が短い。広帯域日射観測は、1950 年代から行われており、大気混濁度 (AOD と等価) の長期変動が調べられている。しかし、地上日射への影響を定量的に調べるには、一次散乱アルベドの長期変化も知る必要である。

2. 研究の目的

長期広域観測されている広帯域日射計のデータから、AOD と SSA を推定する手法を開発する。そして、AOD と SSA の長期・広域変動を導出し、GDB に対するエアロゾルの影響を定量的に評価・解明することを目的とする。

3. 研究の方法

広帯域日射計による観測には、全天・直達・散乱光がある。これまでは直達光から大気混濁度が推定されていたが、他は有効利用されてこなかった。散乱光は、エアロゾルの光吸収性に強く依存する。本研究では、直達光と同時に散乱光を利用することで、AOD と SSA を推定する手法を開発する。そして、スカイラジオメータによる高精度の AOD、SSA と比較し、本研究の手法の精度を検証する。

1970 年代から日本 14 地点で行われてきた広帯域日射観測から、AOD と SSA を推定し、日本における Dimming and Brightening へのエアロゾルの影響を評価・解明する。

次に、World Radiation Data Center (WRDC、世界 1184 地点、1964 年以降) と The Baseline Surface Radiation Network (BSRN、世界 52 地点、1992 年以降) において蓄積されている観測データを用いて、GDB へのエアロゾルの影響を評価・解明する。

4. 研究成果

(1) AOD・SSA の推定法の確立

直達・散乱光の分光観測からは、AOD と SSA の推定法が多数ある。しかし、広帯域観測に含まれるエアロゾルの情報は、極端に少なくなるため、既存の手法を使うことはできない。そこで、エアロゾルの粒径分布と複素屈折率に対して最大限の仮定をすることで、AOD と SSA を推定した。具体的には、粒径分布に対して、総量と分布の傾きの 2 つのパラメータから成るユング分布を仮定し、分布の傾きを固定した。複素屈折率 (実部・虚部) は、波長に対して一定と仮定し、また、実部を固定した。従って、推定するパラメータは、エアロゾルの総量と複素屈折率虚部の 2 つ。前者は AOD に、後者は SSA に最も影響を与えるパラメータである。観測は、直達・散乱光の 2 つ、推定パラメータも 2 つなので、安定に解である AOD と SSA を得ることができる。

この推定法を実際の観測に適用した際には、上記の仮定が、解に誤差を与える。そこで、感度実験によって、誤差を見積もった。結果、最も影響を与える仮定は、粒径分布の傾きであった。しかし、波長 $0.75 \mu\text{m}$ の AOD に与える影響は、非常に小さいことが分かったため、波長を限定することで、実用的な AOD が得られることが分かった。また、仮定した粒径分布の傾きの値が、真値と 50% の差がある時に、SSA に与える誤差は、5% 内に収まることが分かった。このため、傾きのパラメータへある程度現実的な値を与えることが出来れば、実用的な精度で SSA を推定することが可能である。

開発した手法を実際の観測値に適用し、スカイラジオメータの推定値と比較した (図 1)。AOD、SSA 共に、粒径分布の傾きを固定したことによる誤差の季節変動が見られた。しかし、年平均値で比較すると、AOD、SSA とともに差は 0.02 程度であった。これにより、本研究で開発した手法は、年平均ベースでは実用的な精度を持つことが証明された。

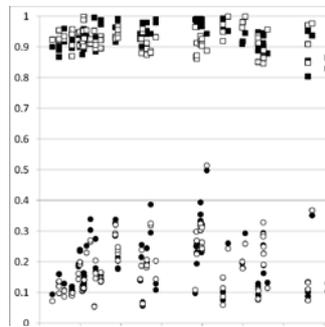


図 1: つくばの 2007 年の観測を使って、広帯域日射計 (白) とスカイラジオメータ (黒) から推定した AOD (丸)、SSA (四角)。

(2) 日本の Dimming and Brightening

1976~2008年の国内14地点の観測データを開発した手法で解析した。これらの地点においても、DimmingとBrighteningが確認されている(図3d)。開発した推定法を用いて解析した結果、1980年代から2000年代にかけて、AODは0.02の減少、SSAは0.21増加していた(図2)。次に、エアロゾルの地上日射への影響を評価した。地上日射は、観測地点の緯度の違いに起因する太陽高度の違いに依存する。このため、本研究では、地上日射を大気上端入射光に対する比として扱うことで観測地点の緯度依存性を軽減している。図3aは、エアロゾル無しで計算した地上日射の変動で、水蒸気、二酸化炭素、オゾンの変動が含まれている。しかし、図3aの地上日射の変動は小さく、これらのガスの影響は無かった。次に、図2の光学特性の推定結果を使って、快晴下の地上日射の変動を計算した(図3b)。快晴下の地上日射は、1980年から2000年代にかけて、0.05増加していた。この内、AOD減少の寄与が0.01、SSA増加の寄与が0.04であり、SSA増加の影響が特に強いことが分かった。

雨無し曇天下の地上日射観測(図3c)と快晴下の地上日射(図3b)との差から、雲の影響量を求めた(図4)。しかし、有意な傾向は見られなかった。このことから、日本におけるBrighteningは、雲ではなく、エアロゾルの変動、特にSSAの増加によってもたらされていたことが分かった。

Dimmingに関しては、解析できる地点が少ないことと、観測期間が短かったため、解析出来なかった。しかし、1980年代にAODが最大、SSAが最小になっていることから、エアロゾルの変動が要因と考えられる。

AODとSSAの変動傾向を日本各地の地上のエアロゾル重量濃度観測と比較した(図5)。AODとSPM(Suspended Particulate Matter)との比較では、ともに減少傾向が見られた。しかし、相関係数は、0.52で中程度であった。これは、AODが大気気柱を代表する量であるのに対し、SPMが地上付近を代表する量であるという、空間スケールの違いによるものと考えられる。

SSAを減少させる主要因は、黒色炭素である。しかし、黒色炭素の長期観測は無い。そこで、代替データとして、ベンゾ[a]ピレン(BaP)重量濃度の地上観測を用いた。BaPは、ディーゼルの排気等に含まれる煤の表面に付着して見られる物質である。発がん性であるため、国内で幅広く観測されている。そして、黒色炭素と相関が良いことが知られている。本研究で得られたSSAとBaPの変動傾向を比較したところ、非常に相関が高かった(相関係数-0.84)。これらのことから、環境規制等の人間活動によって、エアロゾルの

量と質(AODとSSA)が変化した結果、Brighteningが起きたと考えられる。

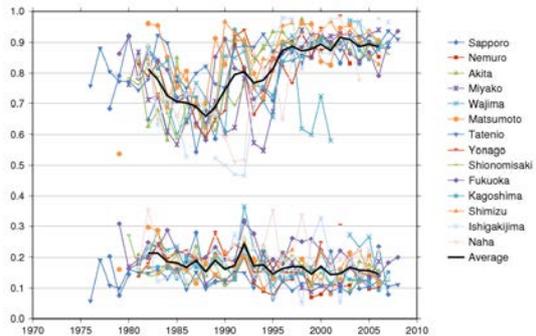


図2 日本14地点のAOD(上)とSSA(下)の年平均値。実線は、10地点以上の解析結果がある時に計算した地点間の平均値。

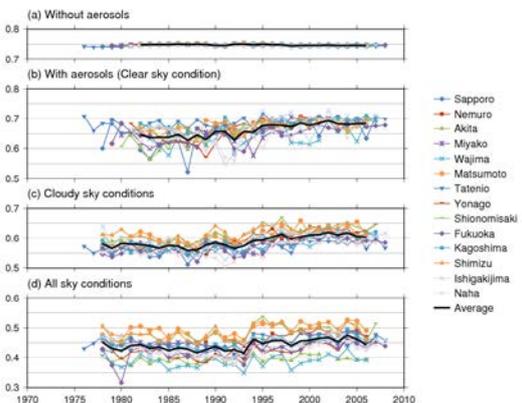


図3 日本14地点のエアロゾル無で計算した地上日射(a)、推定したエアロゾル光学特性を使って計算した快晴下の地上日射(b)、雨無し曇天下で観測された地上日射(c)、全天下で観測された地上日射(d)の年平均値。実線は、地点に対する平均値。

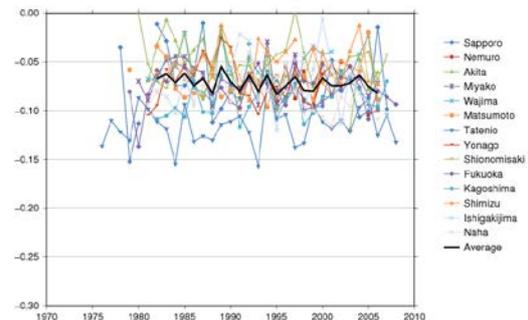


図4 快晴下の地上日射(図3b)と雨無し曇天下の地上日射(図3c)との差から求めた雲の地上日射への影響。

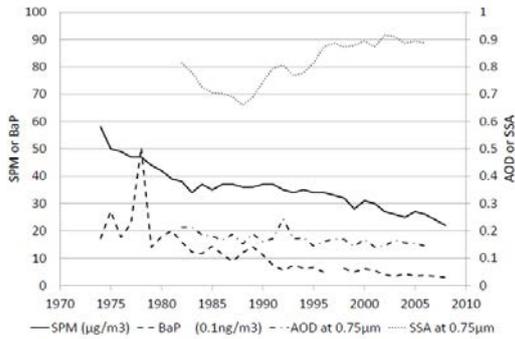


図5 広帯域日射計によって推定されたAOD(一点破線)とSSA(点線)の年平均値と、地上観測によるSPM(実線)とBaP(破線)の重量濃度の年平均値。

(3) Global brightening

インターネットを通して手に入る WRDC と BSRN の広帯域日射観測データを収集した。解析に必要な散乱光と直達光のデータが手に入った地点は、1995～2010年で、WRDC 12 地点、BSRN 41 地点であった。このため、Global Dimming に関しては調べることが出来なかった。

まず、広帯域日射観測から推定した AOD と SSA を、観測地点の近い AERONET (スカイラジオメータと同様の測器による NASA の観測網) の推定値と比較した。AOD、SSA とともに、バイアスは 0.01 程度、誤差の二乗平均は 0.1 程度であった。バイアスは小さいが、ばらつきが大きかった。粒径分布の傾きに与えた値等を見直す必要がある。また、AERONET と広帯域日射の観測地点の環境(都市や郊外)の違いを調べる必要がある。

次に各地点の AOD の平均値の分布(図6)を他研究の衛星観測の結果と比較した。地点数は少ないが、ヨーロッパや、中央アフリカ～西アジア～東アジアに渡る値の大きい領域は、衛星観測と整合的であった。また、北アメリカ東岸の値の大きい領域も整合的であった。SSA の分布(図7)に関しては、際立った傾向は見られなかった。

解析した地点の内、10年以上の解析期間が得られた 28 地点の変動傾向を調べた。日本の解析と同様に、AOD と SSA の傾向を求め(図8、9)、AOD と SSA から計算される快晴下の地上日射の傾向を調べた。そして、ここでは、全天下の日射観測との差によって、雲の影響を見積もった。結果は、北アメリカ(12 地点)、ヨーロッパ(6 地点)、アフリカ(1 地点)、オセアニア(4 地点)、北極(2 地点)、南極(3 地点)に分けて集計した。

(a) 北アメリカ

各地点の変動傾向を平均すると AOD が $+0.02 \pm 0.01$ /decade、SSA は $+0.14 \pm 0.07$

/decade で、ともに増加傾向にあった。AOD の増加は、地上日射を減らす、SSA の増加は、地上日射を増加させる。このため、快晴下の地上日射に顕著な傾向はなかった。一方、全天下の日射観測は、 $+0.02 \pm 0.01$ /decade の Brightening を示していた。よって、エアロゾル光学特性は変動しているが、Brightening をもたらしているのは、雲の変動であると考えられる。

(b) ヨーロッパ

各地点を平均した変動傾向は、AOD が -0.01 ± 0.02 /decade、SSA が $+0.04 \pm 0.12$ /decade で、共にばらつきが大きく、顕著な傾向はなかった。このため、快晴下の地上日射も有意な傾向無し。全天下の日射観測も増加傾向にあるが、顕著ではない。他の研究でも、ヨーロッパの地上日射は、1990 年代以降、あまり大きく変化していない。

(c) アフリカ

解析地点が、1 地点のため、地域の代表性はない。AOD が $+0.06$ /decade、SSA が $+0.08$ /decade で、どちらも増加傾向にあるが、有意ではない。AOD 増加の影響が強く、快晴下の地上日射は、 -0.02 /decade の減少傾向であった。一方、全天下の日射観測に顕著な傾向はなく、雲の変動が、エアロゾルの影響を打ち消していると考えられる。

(d) オセアニア

各地点を平均した変動傾向は、AOD が $+0.01 \pm 0.01$ /decade、SSA が $+0.03 \pm 0.07$ /decade で、どちらも増加傾向。しかし、どちらもばらつきが大きい。快晴下の地上日射には、顕著な傾向が見られなかった。また、全天下の日射観測は、増加傾向であるが、大きな変動ではない。他の研究結果でも、全天下の地上日射は、増加傾向を示しているが、変動幅は小さい。

(e) 北極

2 地点中、AOD の増加が 1 地点、減少が 1 地点。SSA は、2 地点とも増加傾向。しかし、これらの変動は、大きくない。快晴下の地上日射の変動も顕著ではない。全天下の日射観測にも大きな変動はない。

(f) 南極

各地点を平均した変動傾向は、AOD が $+0.03 \pm 0.02$ /decade、SSA が $+0.09 \pm 0.08$ /decade でともに増加傾向。快晴下の日射は、減少傾向。一方、全天下の日射観測は、増加傾向。このため、雲の影響がエアロゾルの影響を上回って Brightening をもたらしている。

全体的には、1990 年代後半以降は、エアロゾルの光学特性も、地上日射も大きく変動していない。これは、日本も同様である。しかし、AOD と SSA がともに増加している地点が数多く見られた。これらの地上日射に対する影響は、相反するものであるため、結果的に、

地上日射への影響は、大きな変化をもたない。また、日本では有意な傾向を持たなかった雲の変動による影響が、無視できない地点が多いことが分かった。

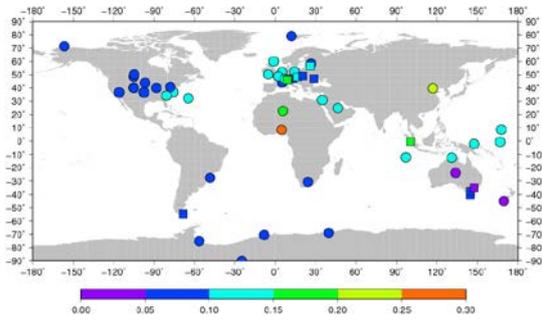


図6 BSRN (丸) と WRDC (四角) のデータから推定した AOD の分布。

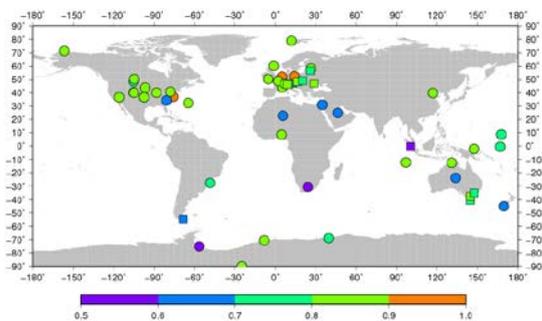


図7 図6と同じ。ただし、SSA の分布。

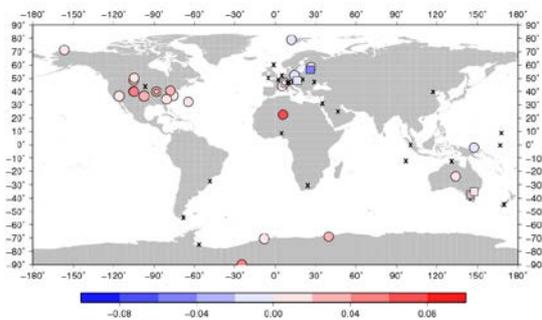


図8 BSRN (丸) と WRDC (四角) のデータから推定した AOD のトレンドの分布。バツ印は、10年以上の解析期間を得られなかった地点。二重丸、二重四角は、95%有意な変動を示す。

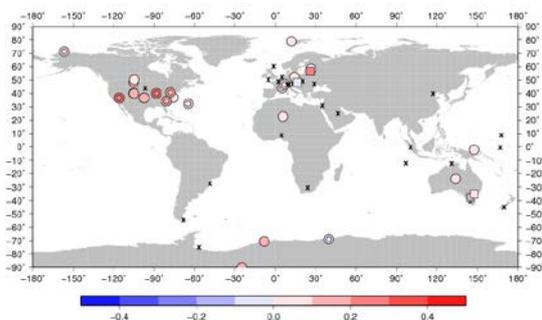


図9 図8と同じ。ただし、SSA のトレンドの分布。

(4) 解析結果の応用

本研究で得られた AOD と SSA の長期・広域変動は、観測から得られた結果としては、世界で初めてのものであり、様々な応用が考えられる。まだ研究中であるが、温暖化問題への応用例と、エアロゾル輸送モデルとの比較例を示す。

温暖化問題におけるエアロゾルの直接効果による放射強制力の正負は、SSA の値によって決まる。よって、本研究で得られた SSA の長期・広域変動の結果は、エアロゾルの温暖化への影響について、新しい知見を与える可能性を持つ。そこで、大気放射伝達モデルを組み込んだ次元大気境界層モデルを作成し、本研究で得られたつくばの AOD と SSA の長期変動が、地上気温にどのように影響を与えるか感度実験を行った。結果、1990年頃を境に、エアロゾルは、地上気温を上げる方向から、下げる方向へシフトしていることが分かった (図10)。これは、1990年代後半から2000年にかけて、SSA が大きく増加していたことが要因であった。この結果は、エアロゾルの長期変動が、より冷却に寄与する方向に向かっていることを示している。

本研究で得られたエアロゾルの長期変動は、エアロゾルの全球輸送モデルの検証材料になり得る。エアロゾル全球輸送モデル SPRINTARS で計算された日本の Brightening は、過小評価されている。そこで、本研究のエアロゾル光学特性の長期変動と比較したところ、SPRINTARS の SSA の変動が過小評価されている可能性が指摘された。

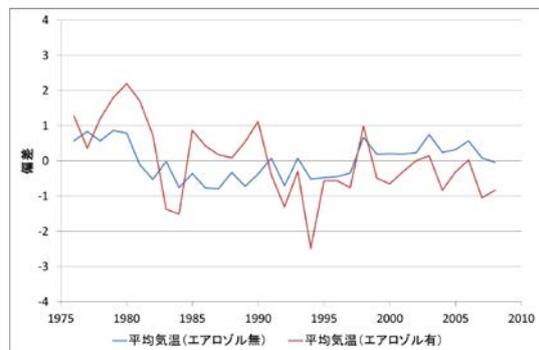


図10 エアロゾル無 (青) とエアロゾル有 (赤) で計算した地上気温の日平均値の全期間平均からの偏差 (°C)。モデル中では、可降水量、二酸化炭素、オゾンの年々変動を考慮している。

(5) まとめ

世界各地の広帯域日射計による直達光と散乱光の長期観測から、エアロゾルの AOD と SSA を推定する手法を確立した。これを用いて、1976年から2008年の日本の広帯域日射観測のデータを解析した。結果、1980年代に AOD が大きく、SSA が小さかったため、地上日射の Dimming and Brightening が起きてい

ることが分かった。また、雲の変動による影響はないことも分かった。次に、WRDC と BSRN で公開している 1995 年から 2010 年の世界各地の広帯域日射観測のデータを解析した。結果、この期間多くの地点で、地上日射は、変動は小さいが増光傾向にあった。そして、エアロゾル光学特性の変動は、顕著ではなかったが、AOD と SSA がともに増加している地点が多く見られた。これらの地上日射への影響は、相反するものであるため、結果的に、地上日射に対しての影響は小さかった。このため、地上日射の増光傾向には、雲の変動が主に寄与している可能性がある。

世界各地で顕著な Brightening が報告されているのは、1980 年代から 2000 年にかけての統計においてである。本研究の解析期間は、2000 年代に偏っており、この期間、顕著な変動を示している地点は少なかった。他の研究でも、2000 年以降、Brightening に陰りが見えている地点があるとの報告がある。これらのことから、2000 年までの GDB に続いて、地上日射の変動傾向がまた変わってきている可能性がある。

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 5 件)

- ① Kudo, R., A. Uchiyama, O. Ijima, N. Ohkawara, and S. Ohta, Aerosol impact on the brightening in Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, D07208, doi:10.1029/2011JD017158 (2012), 査読有.
- ② Kudo, R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, T. Sakami, and O. Ijima, Decadal changes in aerosol optical thickness and single scattering albedo estimated from ground-based broadband radiometers: a case study in Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, D03207, doi:10.1029/2010JD014911 (2011), 査読有.
- ③ Kudo, R., Studies on long-term variations in aerosol optical properties and direct effect by ground-based radiometers, Doctor Thesis, Hokkaido University (2011), 査読有.
- ④ Nakayama, T., R. Hagino, Y. Matsumi, Y. Sakamoto, M. Kawasaki, A. Yamazaki, A. Uchiyama, R. Kudo, N. Moteki, Y. Kondo, K. Tonokura, Measurements of aerosol optical properties in central Tokyo during summertime using cavity ring-down spectroscopy: Comparison

with conventional techniques, *Atmos. Environ.*, 44, 3034-3042, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.05.008 (2010), 査読有.

- ⑤ Kobayashi, E., A. Uchiyama, A. Yamazaki, R. Kudo, Retrieval of aerosol optical properties based on the spheroid model, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 88, 847-856, doi:10.2151/jmsj.2010-505 (2010), 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

- ① R. Kudo, and A. Uchiyama, Direct effect of aerosol optical properties on global dimming and brightening, AGU fall meeting 2011, 2011 年 12 月 10 日, San Francisco, California, USA.
- ② 工藤玲, 青柳曉典, 西澤智明, 光吸収性エアロゾルの大気境界層への影響, 日本気象学会 2011 年度秋季大会, 2011 年 11 月 18 日, 名古屋大学.
- ③ 工藤玲, 内山明博, 山崎明宏, 坂見智法, 日本のエアロゾル光学特性の長期変動と地上日射への影響, 日本気象学会 2011 年度春季大会, 2011 年 5 月 20 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター.
- ④ 工藤玲, 内山明博, 山崎明宏, 坂見智法, つくばにおけるエアロゾル光学特性の長期変動と地上日射への影響, 日本気象学会 2010 年度秋季大会, 2010 年 10 月 29 日, 京都テルサ.
- ⑤ Kudo, R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, T. Sakami, Impacts of aerosol optical thickness and single scattering albedo on the dimming and brightening in Japan, The 16d CERES International Symposium on Climate Change Studies through activities of SKYNET and Virtual Laboratory for Climate Diagnostics, 2010 年 10 月 22 日, ホテルゆがふいんおきなわ.
- ⑥ Kudo, R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, T. Sakami, Influences of aerosol optical thickness and single scattering albedo on global dimming and brightening, The 3rd Asia Pacific Radiation Symposium, 2010 年 8 月 27 日, Yonsei University, Seoul, Korea.

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