

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25740001

研究課題名(和文)多波長分光撮像装置を利用したエアロゾル光学特性計測手法の開発

研究課題名(英文)Development of methodology for measuring aerosol optical properties using hyperspectral imager

研究代表者

眞子 直弘(MANAGO, NAOHIRO)

千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・特任助教

研究者番号：00644618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の対象であるエアロゾルの光学特性はエアロゾル粒子の粒径に大きく依存し、その影響は前方散乱(散乱角が小さい散乱)、すなわち太陽周辺における天空光の輝度分布に顕著に現れる。しかしながら、従来の装置では最小散乱角3度、角度分解能1度程度の観測しかできなかった。本研究ではハイパースペクトルカメラを用いることで最小散乱角1度、角度分解能0.1度の精度で太陽近傍の輝度分布を測定することに成功した。これにより、エアロゾルの粒径分布をより正確に測定できるようになった。また、天空光の輝度分布を画像データとして取得することにより効率的に観測を行い、雲などの障害物を容易に識別できるようになった。

研究成果の概要(英文)：Aerosol optical properties, the target of our research, depend strongly on the aerosol particle size, and its influence is most remarkable in the forward scattering (scattering with a small scattering angle). However, the measurable scattering angle of conventional instruments are not so small, around 3 deg with angular resolution of 1 deg. In this research, we used a hyperspectral camera and succeeded in measuring radiance distribution around the sun as close as 1 deg with an angular resolution of 0.1 deg. Accordingly, we could obtain more reliable aerosol size distribution. Besides, since we take radiance distribution as images, we can make observation efficiently, and we can distinguish obstacles like clouds easily.

研究分野：大気環境リモートセンシング

キーワード：エアロゾル PM2.5 リモートセンシング ハイパースペクトル

1. 研究開始当初の背景

(1) 固体または液体の微粒子が混ざった大気(エアロゾル)は地球温暖化に大きな影響を及ぼす他、PM2.5 と呼ばれる微小粒子状物質(概ね 2.5 μm 以下の微粒子)が人の健康に害を与えるなど、我々の生活に密接に関わっており、時間的・空間的に激しく変動するエアロゾルの特性を監視することが重要である。

(2) エアロゾルは光を散乱・吸収する特性があり、これを利用することでエアロゾルの光学的厚さ(エアロゾル量の目安)、粒径分布、単一散乱アルベド(吸光性の目安)、非対称性パラメータ(散乱の異方性の目安)といった物理・光学特性を測定することができる。

(3) 従来から広い波長帯で強力な光を放つ太陽を利用したエアロゾル測定が行われており、広域に分布するエアロゾルを監視するための世界規模の大気放射観測網が発達してきている(Holben et al., 1998)。ここで使われている装置は古くからある技術に基づくものであるが、近年の半導体センサーや計算機関連の進歩は目覚ましく、これらを応用すればより良い測定が可能である。

2. 研究の目的

(1) 本研究はエアロゾル測定の精度および効率を向上することを目的としている。

(2) 従来型装置の問題 1 (空間分解能)
エアロゾルの性質は特にエアロゾル粒子の粒径に大きく依存している。粒径が大きいほど1粒子当りの影響は大きくなるが、その効果は特に前方散乱(散乱角が小さい散乱)の強度に顕著に現れる。そのため、太陽のごく近傍(5度以内程度)における天空光の強度分布を詳細に観測することが重要である。しかしながら、従来の測定装置の視野角は1度程度と広いため、詳細観測には適していない。

(3) 従来型装置の問題 2 (観測効率)
また、エアロゾルの粒径分布や吸光特性を導出するためには広い範囲の天空光強度分布を測定する必要があるが、従来の装置は同時に1方向の天空光しか測定できないために効率が良くない。

(4) 従来型装置の問題 3 (雲判定)
さらに、エアロゾルの測定結果は雲の影響を強く受けるため、雲がある時のデータを除外する必要があるが、従来の観測方法では空間をまばらにサンプリングするために雲の有無を判定するのが難しい。

(5) 以上に挙げた空間分解能、観測効率、および雲判定の問題を解決することにより、より信頼度の高いエアロゾル測定を実現する。

3. 研究の方法

(1) 測定装置

本研究では、従来の装置のように同時に1方向の天空光を観測するのではなく、カメラのように広い範囲の天空光を高い空間分解能で同時観測することによって上記問題を解決する。天空光の強度は散乱角だけでなく、色(波長)によっても異なる。この波長ごとの光の強度(分光放射輝度、スペクトル)もエアロゾルの粒径分布や吸光特性などの情報を含んでおり、重要な観測量である。そこで、一般的なカラーカメラ(3色)より遥かに多い数百色の識別ができるハイパースペクトルカメラ(HSカメラ)を用いて天空光の分光放射輝度の空間分布を測定する。これだけ波長分解能が高いと水蒸気などの分子による吸光量が分かるため、水蒸気カラム量などが測定できるという利点もある。表1に本研究で使用するHSカメラ(エバ・ジャパン、NH-2)の主要スペックを挙げる。このHSカメラは2次元CMOSアレイセンサーの1次元が波長、他の1次元が空間Xに割り当てられており、空間Y方向の走査を行うスキャナを内蔵しているためにカメラ単独でハイパースペクトル画像(HS画像)を取得できる。

表 1. HSカメラ NH-2 の主要スペック

センサー種類	CMOS
分光方式	透過型回折格子
最大画素サイズ	752 × 480
視野範囲	16° × 10°
空間サンプリング	0.02°
空間分解能	0.07°
波長チャンネル数	480
波長範囲	350 ~ 1100 nm
波長サンプリング	1.6 nm
波長分解能	6 nm (典型値)
色深度	10 ビット
本体サイズ	76×62×193 mm
重量	850 g

(2) 解析方法

様々な散乱角における天空光と共に直達太陽光のスペクトルを取得し、これらの測定データを放射伝達シミュレーションを使って再現する。放射伝達シミュレーションではエアロゾルの物理・光学特性を仮定するが、仮定を変えながら反復計算を行い、シミュレーション結果が実測データと一致するように最適化することでエアロゾル特性を求めることができる(Manago and Kuze, 2010)。

ただし、HSカメラから得られるデータは直

接シミュレーションと比較できるわけではなく、先に装置校正によって測定量を物理量に変換する。また、シミュレーションの方でも波長分解能などを HS カメラと合わせるための補正を行う。

4. 研究成果

(1) まず、HS カメラで測定された量を物理量に変換するための校正方法を確立した。校正が必要な物理量は、波長、輝度、画角の3つである。

波長校正は水銀、カドミウム、クリプトン、アルゴン等の放電ランプおよび Nd:YAG レーザーを用いて行った。結果を図 1 に示す。波長 400~1064 nm の範囲で 14 本の輝線を使って求めた 5 次近似式を用いて波長チャンネル番号を波長に変換したところ、精度は 0.29 nm (RMS, 1 次式を用いた場合の精度は 1.9 nm) であった。独立した輝線スペクトルの幅から波長分解能 (FWHM) を見積もった結果、波長 450 nm で 5 nm、波長 1064 nm で 8 nm 程度だった。

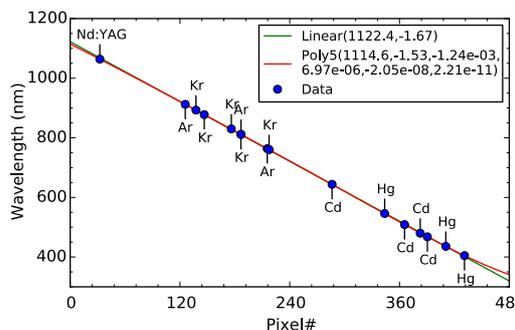


図 1. HS カメラ NH-2 の波長校正結果

輝度校正は光源に天空光を用いた場合とハロゲンランプを用いた場合の 2 通りで行った。波長 450~700 nm の範囲において両者の結果は良い一致を示した。しかしながら、それより短波長側ではハロゲンランプ、長波長側では天空光を用いた場合に感度を過大評価する結果となった。ハロゲンランプは短波長、天空光は長波長で強度が弱いことから測定誤差が大きくなったと考えられる。短波長側に天空光、長波長側にハロゲンランプの結果を用いて得られた感度曲線を図 2 に示す。解析では校正誤差の少ない波長 450~700 nm の範囲のみを使用する。

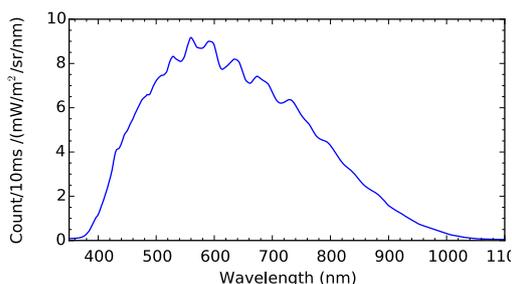


図 2. HS カメラ NH-2 の波長感度特性

以上の波長・輝度校正結果は HS カメラの中心 10×10 画素を使って得られたものである。画像全体の波長校正係数の一様性を調べるため、透過型拡散板で拡散させた蛍光灯の HS 画像を取得した。全画素に同じ波長校正係数を適用して求めた 550 nm 付近にある輝線の見かけのピーク波長は 0.4 nm (RMS) 程度のばらつきを持っていた。一方、輝度校正係数の一様性はトワイライトフラット (日没前、天頂付近の天空光) の HS 画像から見積もった。X 方向に並んだセンサーの個性に由来する非一様性 (RMS) は 1.4% 程度、それを除いた光学系の非一様性はトワイライトフラット自体の非一様性を含めて 1.2% と見積もられた。

さらに、波長校正係数、輝度校正係数の温度依存性を調べるため、HS カメラ内部に温湿度センサー (Sensirion, SHT21) を内蔵して恒温槽 (Espec, MC-710T) に入れ、温度を 0 度から 40 度まで 10 度刻みで変化させながら透過型拡散板を通して恒温槽の外にある水銀ランプやハロゲンランプの HS 画像を取得した。その結果、温度による見かけの波長ずれは温度の 3 次関数と波長の 2 次関数の組み合わせでモデル化できることが分かった。得られたモデルの誤差 (RMS) は 0.1 nm 程度と見積もられた。一方、輝度の温度依存性は入射光が無い時の信号 (ダーク) とダークを差し引いた信号で分けられ、前者は温度の 5 次関数、後者は温度と波長の 5 次 B スプライン補間を使ってモデル化できた。得られたモデルの誤差は温度 40 度以下で 0.7%、温度 40 度以上も含めると 2% と見積もられた。

HS カメラの画角はレンズから 1.2 m 離れた壁に貼った 1 cm 目盛の方眼紙の HS 画像から見積もった。HS 画像から格子点の位置を抽出し、光学シミュレーションと比較することで、X、Y 方向の画角はそれぞれ 0.022 度/画素、0.020 度/画素と求めた。画像周辺の歪みは測定誤差に比べて十分に小さかった。X 方向の画角は CMOS センサーの画素サイズで決まるのに対し、Y 方向の画角はスキャナモーターのステップ数で決まる。夜間に取得した遠方にある街灯の HS 画像から、空間分解能は 0.07 度と見積もられた。

参考のため、偏光フィルターを用いて HS カメラ (NH-2) の偏光依存性を調べた結果、偏光による信号強度の変化は ±1~2% 以下であることが分かった。

(2) 天空光の HS 画像を利用してエアロゾル特性を導出するため、千葉大学環境リモートセンシング研究センター (CEReS, 35.6°N, 140.1°E) において雲がない快晴時に観測を行った。図 3 に HS カメラを用いて太陽周辺の天空光輝度分布を測定した例 (取得日時: 2013 年 5 月 24 日 12 時 27 分 JST, 太陽天頂角: 18.6 度) を示す。図 3(a) は波長 550 nm の天空光輝度分布である。太陽は右上の位置にあるが、視野に直接入らないように約 2 m

離れた位置にかざした棒で遮られている。図 3(b)は天空光輝度を太陽からの離角（散乱角）を横軸にとってプロットしたものである。全データ点がほぼ1つの曲線上に乗っていることから、散乱角が等しい同心円上の天空光輝度がほぼ同じであることが分かる。また、最小散乱角は1度まで観測できていることも分かる。このデータと共に校正済み分光器（英弘精機、MS-720）を使って直達太陽光の分光放射照度および天頂方向（視野全角 20 度）の天空光の分光放射輝度を測定した。

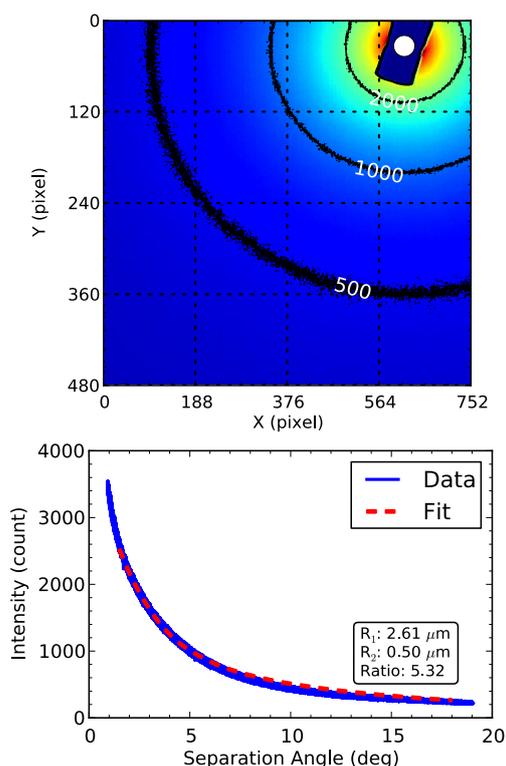


図 3. HS カメラで測定された太陽近傍の天空光輝度分布 (a) および天空光輝度の離角依存性 (b)。波長は 550 nm。(a)において太陽は右上の白丸の位置があるが、棒で遮られている。

これらの実測値を放射伝達シミュレーションコード MODTRAN4 を使って計算した値と比較した。ここで、エアロゾル粒子は球形であり、粒径分布は対数正規分布に従うと仮定した。MODTRAN4 に入力する消散係数、吸収係数、位相関数といった光学パラメータは粒径分布と複素屈折率で記述されるエアロゾルモデルから Mie 散乱理論を用いて計算した。

まず、1 成分のエアロゾル粒子のみを考え、対数正規分布のモード半径、広がり幅、複素屈折率の実部、虚部、および光学的厚さの 5 パラメータで記述されるエアロゾルモデルを考察した。観測で得られる情報が全てのパラメータを決定するのに十分でない可能性があったので、広がり幅と複素屈折率の実部

をそれぞれ 0.26、1.53 に固定し、残りの 3 パラメータを最適化して実測データの再現を試みた。しかしながら、このような 1 成分モデルでは図 3(b)の青線のような太陽近傍における天空光輝度の急激な増加を再現することはできなかった。

このような太陽近傍における天空光輝度の増加は粒径の大きいエアロゾルの寄与が原因と考えられる。そこで、複素屈折率等は同一でモード半径のみが異なる成分を追加した 2 成分エアロゾルモデルを考察した。この場合、図 3(b)の赤点線のように散乱角 1 度から 20 度までの天空光輝度を良く再現することができた。この時得られた 2 成分のモード半径は $0.5 \mu\text{m}$ と $2.6 \mu\text{m}$ であり、波長 550 nm における消散断面積の重みを付けた混合比は 5 : 1 だった。これを CERE 隣接する別の建物に設置された測定器（スカイラジオメーター）の測定値と比較するために体積分布に換算すると、ピーク半径は $1.5 \mu\text{m}$ と $7.4 \mu\text{m}$ となり、ピーク比は 1:1 となる。スカイラジオメーターで測定された体積分布には半径 $1.2 \mu\text{m}$ と $5.9 \mu\text{m}$ にピークが見られ、ピーク比は 1 : 0.7 であった。両者の結果は良く似ているが、HS カメラの方が大きい粒子を若干多めに見積もっている。この原因としては、HS カメラの方が太陽近傍を詳細に観測できているので、大きい粒子に感度があることが考えられる。

(3) これまでに紹介した観測例では HS カメラを三脚に載せて手で太陽に向けていた。その後、HS カメラをコンピュータ制御可能な経緯台に搭載して全天を自動観測できるシステムを構築した。また、カメラレンズを非球面アクロマティックレンズ、フィルターホイール、及びバッフル筒で構成される入射光学系に置き換えることで、内面反射に由来する迷光および回折格子の 2 次光の影響を抑制できるように改善した。さらに、球形・非球形エアロゾルの光学パラメータを粒径ごとにあらかじめ計算して作成したルックアップテーブルを利用することにより、解析プログラムの高速化を行った。

(4) 本研究で開発した手法を利用すればこれまでの装置よりもエアロゾル測定を精度よく効率的に行えると思われる。現状の問題は装置が高価なことであるが、それをクリアできれば次世代のエアロゾル測定装置の候補として有望である。

HS カメラの利点として雲が画像として見えるために雲除去が容易であることを挙げたが、逆に雲そのものを観測対象にすることもできる。本研究の応用として、HS カメラとライダーの同時観測によって雲の物理・光学特性を導出するといったことも検討中である。

<引用文献>

① Holben, B. N., et al., AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, Remote Sensing of Environment 66, pp. 1-16, 1998.

② Manago, N., and H. Kuze, Determination of tropospheric aerosol characteristics by spectral measurements of solar radiation using a compact, stand-alone spectroradiometer, Appl. Opt. 49, pp. 1446-1458, 2010.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Manago, N., H. Saito, Y. Mabuchi, Y. Takara, M. Suzuki, and H. Kuze, Retrieval of tropospheric aerosol properties using hyperspectral imaging camera, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International, 査読無, 2013, pp. 2192-2195, DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6723250

[学会発表] (計 7 件)

① 齊藤隼人, 眞子直弘, 恒吉智明, 中村快平, 久世宏明, ハイパースペクトルカメラとミー散乱ライダーの同期観測による雲の光学特性評価, 第 57 回日本リモートセンシング学会学術講演会, 2014 年 11 月 7 日, 京都大学宇治おうばくプラザ (京都府宇治市五ヶ庄)

② Manago, N., H. Saito, Y. Takara, M. Suzuki, and H. Kuze, Application of hyperspectral camera for aerosol characterization, The 6th Indonesia Japan Joint Scientific Symposium (IJSS), Oct. 30, 2014, Yogyakarta (Indonesia)

③ 齊藤隼人, 眞子直弘, 恒吉智明, 中村快平, 久世宏明, スラントパスライダーとハイパースペクトルカメラを利用した雲計測, 第 32 回レーザーセンシングシンポジウム, 2014 年 9 月 5 日, 高山市民文化会館 (岐阜県高山市昭和町)

④ 眞子直弘, 齊藤隼人, 高良洋平, 鈴木睦, 久世宏明, 天空光のハイパースペクトル画像を利用した対流圏エアロゾル特性の導出, 第 56 回日本リモートセンシング学会学術講演会, 2014 年 5 月 16 日, 産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂 (茨城県つくば市東)

⑤ 眞子直弘, 齊藤隼人, 馬淵佑作, 高良洋平, 鈴木睦, 久世宏明, ハイパースペクトルカメラを利用したエアロゾル特性導出手法の開発, SICE 第 39 回リモートセンシングシンポジウム, 2013 年 11 月 15 日, 東京農業大学世田谷キャンパス (東京都世田谷区桜丘)

⑥ Manago, N., H. Saito, Y. Mabuchi, Y. Takara, M. Suzuki, and H. Kuze, Retrieval of tropospheric aerosol properties using hyperspectral imaging camera, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2013, Jul. 24, 2013, Melbourne (Australia)

⑦ Manago, N., H. Saito, Y. Mabuchi, Y. Takara, T. Fujimori, F. Ando, N. Noro, M. Suzuki, and H. Kuze, Application of newly-developed hyperspectral cameras to retrieve aerosol optical properties, International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2013, May 15, 2013, 幕張セミナーハウス (千葉県習志野市茜浜) (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

眞子 直弘 (MANAGO, Naohiro)
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・特任助教
研究者番号: 00644618

(2) 研究協力者

久世 宏明 (KUZE, Hiroaki)
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・教授
研究者番号: 00169997

齊藤 隼人 (SAITO, Hayato)
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・大学院生

馬淵 祐作 (MABUCHI, Yusaku)
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・大学院生