

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 5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740311

研究課題名（和文）熱輻射光の方位-偏光特性による黒色炭素粒子の形状推定法の開発

研究課題名（英文）Developments of methods for estimating particle shape of black carbon aerosols from polarization and directionality of thermal emission

研究代表者

茂木 信宏（MOTEKI NOBUHIRO）

東京大学・大学院理学系研究科・特任助教

研究者番号：20507818

研究成果の概要（和文）：大気中の黒色炭素（BC）エアロゾル（微粒子）の形状の分析法の開発は、人為起源エアロゾルの気候影響や微粒子計測技術の分野では最先端かつ重要な研究課題である。本研究では微粒子から放出される熱輻射光の方位・偏光依存性を記述する一般理論（Rytov 理論）を実験的に検証することにより、BC の形状分析が可能な新しい原理を提唱した。Rytov 理論によって推定されるように、光波長よりも小さなサイズの微粒子についても放出される熱輻射光の方位依存性・偏光状態が粒子形状によって決定されることを実証した。

研究成果の概要（英文）：The generalized Kirchhoff's law (Rytov theory) predicts that the polarization state of thermal emission from an individual small particle depends on the particle shape. We show for the first time experimental evidence confirming this prediction for particles smaller than the wavelength. We propose that the measurement of the polarization state of thermal emission may be applicable to real-time analysis of the shape of black carbon particles in air.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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・エアロゾル

1. 研究開始当初の背景

黒色炭素粒子（ブラックカーボン：BC）は化石燃料やバイオマスの燃焼に伴い発生し、太陽放射を効率的に吸収するエアロゾルである。対流圏大気中の BC の濃度空間分布と個々の BC 粒子の光吸収効率を定量的に評価

することは気候変動の理解の上できわめて重要である。BC の光吸収効率は粒子形状に強く依存するため、大気中での BC の粒子形状を観測に基づいて明らかにする必要がある。包括的な大気観測を行う手段として、従来の捕集試料の電子顕微鏡による手動分析

だけでは不可能で、高速な測定原理が必要である。従来、レーザー光を粒子に照射したときの光散乱強度の角度依存性や偏光状態の変化を検出して粒子形状を推定する「光散乱」の原理が、アスベスト、氷雲などの非球度の高い粒子の検出に用いられてきた。しかし、光散乱の原理は、化学組成にほとんど依存しない応答特性を示すため、多種多様な成分が同一粒子内や他の粒子間に混在している大気エアロゾルの中で、BC を判別してその粒子形状を分析することが不可能である。したがって、BC の形状分析の目的では従来に無い新たな微粒子計測原理が必要である。研究代表者はこれまで、レーザー加熱した微粒子の熱輻射光の計測により、大気エアロゾルの中で他の成分との混在の形態に関わらず BC のみを選択的に検出することが可能なレーザー誘起白熱法 (LII 法) の基礎研究と、それを用いた BC の大気観測を世界に先駆けて行ってきた。そこで、BC を選択的に検出できる LII 法の延長線上にある方法で、BC の粒子形状を測定することはできないか検討し、「粒子形状が球形のときには熱輻射光は等方的・無偏光となるが、非球形のときには、その形状に応じて異方的・偏光の特徴を示す」という仮説を立てた (図 1)。



図 1 : 微粒子から放出される熱輻射光 : 矢印の色は偏光成分・矢印の長さは強度を表す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大気中の BC 形状を高速で分析するための新しい原理を開発することである。その原理として、レーザー加熱した微粒子から放出される熱輻射光の方位・偏光特性を計測する方法を検討している。その原理の有効性の実証のためには、微粒子から放出される熱輻射光の方位・偏光依存性とその微粒子の形状によって決定されると推定する Rytov 理論を実験的に検証することが最も重要である。そこで、2年間の本研究では、非球形微粒子から放出される熱輻射光の方位・偏光状態が、Rytov 理論と整合的かどうか実験的に検証することを最優先目標とした。

3. 研究の方法

BC は高強度のレーザーを照射すると、4000°C程度まで加熱され、可視光の熱輻射光を放出するという特徴がある。大気中のエアロゾルの中で、このような可視の熱輻射を放出するエアロゾルは BC 以外にはないため、熱輻射を利用すれば BC のみを選択的に分析できる。非球形粒子から放出される熱輻射光は、その粒子形状に応じて、偏光・方位依存性を持つことが理論的には推測されている (Rytov 理論)。従って、Rytov 理論を検証すれば、熱輻射光の偏光・方位依存性の測定により BC の形状の分析が可能なが証明される。しかしこれまで、Rytov 理論の検証実験は報告されていない。Rytov 理論を検証するため、単一粒子から放出される熱輻射光・散乱光の方位・偏光特性を同時に測定できる「偏光分離型レーザー誘起白熱法」の実験装置を開発した (図 2)。

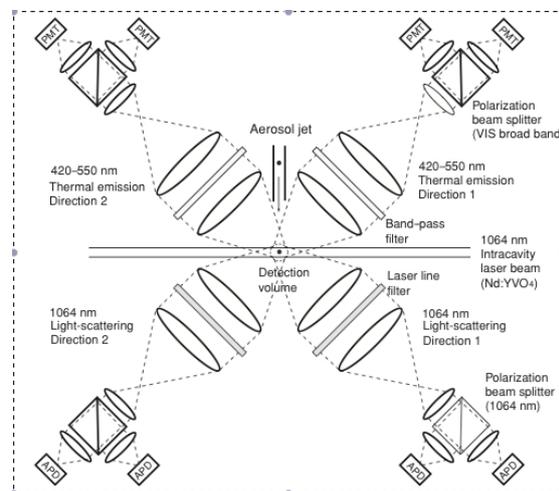


図 2 : 偏光分離型レーザー誘起白熱法の実験装置

この装置は、Nd:YVO4 レーザーの共振器内にエアロゾルを導入し、単一粒子がレーザーを横断する最中の熱輻射光・散乱光の波形を測定するものである。

装置の性能評価として、測定される散乱光の偏光・方位依存性と粒子形状の間に理論的に推定されるような対応があるかどうかの検証実験を行った。その検証実験では、形状が正確に分かっている非球形粒子であるポリスチレン粒子の2球クラスターを装置に導入して散乱信号を測定し、その測定値を、2球クラスターに近い形状の偏長楕円体粒子についての電磁気学の理論計算値と統計的に比較した。その結果非常に良い一致が見られた (図 3)。開発した装置において、散乱光の方位・偏光状態が、測定される粒子形状によって決まっており、それが理論と一致していることが検証された。

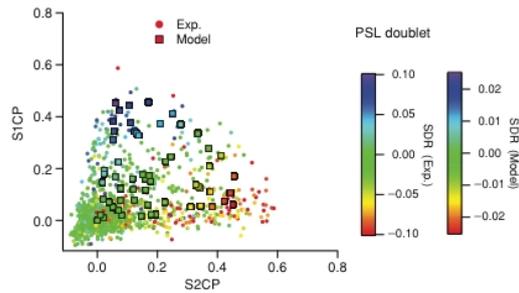


図3：ポリスチレン粒子の2球クラスターの散乱光の方位・偏光状態について、測定結果と理論計算の比較

4. 研究成果

炭素粒子から放出される熱輻射光について、その方位・偏光依存性が Rytov 理論と整合的かどうかを検証するために、試験粒子として、薄い板状の形状をしているグラファイト破砕微粒子を偏光分離型レーザー誘起白熱装置で測定した。散乱光の方位・偏光依存性はポリスチレンの2球クラスターの場合と同様、電磁気学の理論計算とよく一致した(図4a)。熱輻射光の方位・偏光依存性の測定値は、Rytov の熱輻射理論を用いて計算結果とよく一致した(図4b,c)。これは、微粒子からの熱輻射現象を理論・実験の両面から整合的に解明した世界初の結果である。Rytov の理論は、波長よりも小さな物体から放出される熱輻射光を定量的に予測できる現在唯一の物理理論であるので、本研究による検証の成功は、BC の形状分析への応用に限定されず科学技術全体においても普遍的意義のある成果だと考えられる。

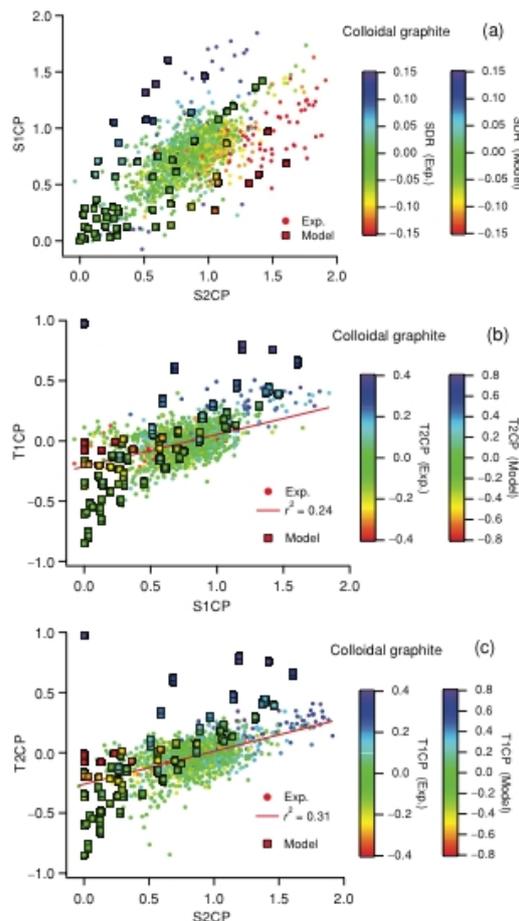


図4：グラファイト粒子の散乱光 (a), 熱輻射光 (b, c) の方位・偏光依存性の測定結果と理論計算の比較

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4件)

① N. Moteki, N. Takegawa, K. Koizumi, T. Nakamura, and Y. Kondo (2011), Multiangle polarimetry of thermal emission and light scattering by individual particles in airflow, *Aerosol Science and Technology*, 45: 10, 1184-1198.

② N. Moteki, and Y. Kondo (2010), Dependence of laser-induced incandescence on physical properties of black carbon aerosols: Measurements and theoretical interpretation, *Aerosol Science and Technology*, 44:8 663-675.

③ N. Moteki, Y. Kondo, and S. Nakamura (2010), Method to measure refractive indices of small nonspherical particles: Application to black carbon particles, *Journal of Aerosol Science*, 41, 513-521.

④ N. Moteki, Y. Kondo, T. Nakayama, K. Kita, L. K. Sahu, T. Ishigai, T. Kinase, Y. Matsumi (2010), Radiative transfer modeling of filter-based measurements of light absorption by particles: Importance of particle size dependent penetration depth, *Journal of Aerosol Science*, 41, 401-412.

〔学会発表〕(計2件)

① 茂木信宏, 竹川暢之, 小泉和裕, 中村貴之, 近藤豊, 「微粒子から放出される熱輻射光の偏光・方位依存性の検証実験」, 日本気象学会春季大会, 2011年5月20日, 東京都国立オリンピック記念青少年総合センター

② 茂木信宏, 竹川暢之, 小泉和裕, 中村貴之, 近藤豊, 「光学的手法による浮遊エアロゾルの形状分析法の開発」, 大気化学討論会, 2010年11月19日, 首都大学東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

茂木 信宏 (MOTEKI NOBUHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・特任助教
研究者番号：20507818

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし