

学 位 論 文 題 名

Characteristics of temporal variation of
aerosol optical properties revealed
by the long-term measurement of solar aureole

（長期間の太陽周辺光の地上観測から明らかにした
エアロゾルの光学的特性の時間変動）

学位論文内容の要旨

エアロゾルが太陽放射を散乱・吸収する直接効果と、それが雲核として働く間接効果とを明らかにすることは、温暖化予測において極めて重要な課題である。しかし、エアロゾルは多種多様な物質で構成され、かつ時間・空間変動が大きいと、これらの効果を観測的に実証することは困難である。近年、衛星観測や数値モデルによってエアロゾルのグローバル分布が求められるようになってきたが、アルゴリズムや得られた結果の検証も含め、それらの変動特性を正確に把握するためには、長期間の観測から得られる精度の良いデータとの比較が必要不可欠である。そこで本研究では、1997 年 7 月から約 4 年余り、札幌で連続観測を行い、エアロゾルの光学的特性の様々な時間スケールの変動特性を明らかにした。さらに、より低緯度の地点（新潟、つくば、東京）と合わせて比較することにより、広い緯度範囲でのエアロゾルの光学的特性の時間変動特性の相違を明らかにした。

観測は、太陽直達光と周辺光の 5 波長の放射輝度を自動測定できる Sky radiometer を用いて行った。太陽直達光と周辺光の角度分布（30 度まで）を規格化した放射輝度から、インバージョン法を用いて気柱あたりのエアロゾルの粒径分布を求め、そこから、エアロゾルの光学的特性として重要な指標の一つである波長 $0.5\mu\text{m}$ の光学的厚さ $\tau(0.5)$ を求めた。この方法は、長期間の観測による測器の劣化に依存しない結果が得られるという利点と、測器の劣化の影響を受ける直達光のみから計算するよりも感度及び精度共に良い測定が可能という利点をもつ。また、エアロゾルの光学的厚さの波長依存性から、粒径の大小の指標となるオングストローム指数 α を求めた。このようにして求めた $\tau(0.5)$ と α の関係を用いて、エアロゾルの光学的特性の時間変動を調べた。

札幌における $\tau(0.5)$ は、春に最大（0.38）で、秋に最小（0.21）という季節変化を示した。また、 $\tau(0.5)$ の月平均値と標準偏差の間には正の相関があり、このことは、バックグラウンドの光学的厚さが季節変化するというよりは、大きな光学的厚さをもたらすイベントの発生頻度が季節変化していることを意味している。一方、 α は、明瞭な季節変化は見られなかったが、夏に最大（1.27）、春に最小（1.09）になるという季節変化を示した。このような季節変化と体積粒径分布の間の関係を調べたところ、春は他の季節よりも全粒径で濃度が高く、特に、半径 $0.5\mu\text{m}$ 以上の粒子の増大が顕著であった。この

ことは、黄砂粒子の影響が北日本にも現れていることを示唆する。事実、1998 年 4 月 20 日と 2001 年 4 月 10 日に発生した大規模黄砂現象では、半径 $2.0\sim 3.0\mu\text{m}$ を中心とした粒子の増大が確認された。また、夏に半径 $0.2\mu\text{m}$ 付近の粒子の増大がみられ、光学的厚さを増加させる原因となる粒子が季節によって異なることが明らかとなった。

次に、エアロゾルのタイプ及び緯度によって、このような季節変動がどのように異なるのかを明らかにした。すなわち、札幌、つくば、東京の 3 地点全てのデータ (59,847) から、 $\tau(0.5)$ と α の平均値を求め (それぞれ 0.29 と 1.18)、測定した $\tau(0.5)$ と α とこの平均値との大小の関係から、エアロゾルを 4 つのタイプ (Type-I~IV) に分類した。Type-I は、平均値より $\tau(0.5)$ は小さいが α は大きい粒子、Type-II は、 $\tau(0.5)$ も α も大きい粒子、Type-III は、 $\tau(0.5)$ も α も小さい粒子、そして Type-IV は、 $\tau(0.5)$ は大きい α は小さい粒子である。その結果、どの地点でも Type-I の出現頻度が高く (約 4 割)、我が国では Type-I のエアロゾルが緯度によらず卓越していることが分かった。Type-II は、どの地点でも冬の出現頻度が少ないが、とりわけ札幌は全ての季節で少なかった。一方、東京では冬以外の季節、特に夏に Type-II の頻度が高かったが、他の地点では年間を通じて頻度が低かった。すなわち、Type-II のエアロゾルは、高緯度あるいは寒冷地域では発生しにくいタイプであり、都市汚染大気中の光化学反応による 2 次生成粒子である可能性が示唆される。ただし、1998 年 8 月 21 日に札幌で極めて大きな α (約 1.7) と大きな $\tau(0.5)$ をもつエアロゾル (すなわち、Type-II) が観測された。バックトラジェクトリー解析と衛星データ解析から、この粒子はシベリアの森林火災によって形成されたものと確認された。Type-IV は、全地点で春に増大した。これは、先に述べた、どの地点でも春に $\tau(0.5)$ が最大で、 α が最小であるという結果とも矛盾せず、Type-IV は黄砂に関連したエアロゾルであることが示唆された。また、意外にも札幌は、他地点と比べると晩冬から春先にかけて Type-IV の頻度が多いことも分かった。札幌では、Type-III のピークが秋に現れ、秋にも大粒子の影響があることが示されたが、春と秋では黄砂の源や輸送過程が異なっている可能性も示唆された。

Sky radiometer の観測は雲の影響を大きく受け、札幌では季節によって取得データの約 3~4 割、つくばでは 3~7 割しか計算することができない。また、太陽周辺の解析範囲内の角度 (本研究では 30 度まで) が晴れていても、それ以外に雲が存在している場合がある。そこで、雲が発生しているような湿潤な環境場で存在するエアロゾルの光学的特性と、晴天時のエアロゾルの光学的特性の違いを調べた。用いたデータは、1996 年 6 月から 2000 年 4 月までのつくばにおける Sky radiometer と鉛直分布と雲の有無を検出できる Lidar の同時観測データである。この結果によると、太陽周辺以外に雲がある割合は、解析したデータのうち約 1~2 割であった。太陽周辺以外に雲がある場合と無い場合を比べてみると、雲がある場合ではどの季節でも $\tau(0.5)$ が 0.1~0.2 程度高い方へシフトしており、 α は大粒子が寄与する方へ 0.2~0.5 程度シフトしていることが確認された。すなわち、雲が発生しているような湿潤な大気環境場では、その周辺に、より光学的に厚く、かつより大きなエアロゾルが存在し、このような効果がエアロゾルの時間変動特性に約 1~2 割程度影響していることを明らかにした。言い換えれば、雲の周辺に存在するエアロゾルが直接効果に及ぼす影響も無視できない。この効果は直接効果と間接効果の両方を含んでいることから、ハイブリッド効果と名づけた。

以上のように、今後長期間のデータを蓄積することは重要であるが、過去のデータを精度のよいデータで引き継ぐことも必要である。そこで、札幌で 1930 年代から継続されている直達日射計を用いて測定された大気混濁度と、我々の測定から求めた大気混濁度との比較を行った。1997 年以降

のデータのみであるが、両者の相関は 0.8 と高いが、本装置を用いた計算結果の方が 0.02 程度小さかった。また、冬は、他の季節に比べると相関係数が低い。これは、直達日射計から求める場合は水蒸気の見積もりに、一方 Sky radiometer から求める場合は地表面のアルベードの変化に誤差を含む可能性があることを示唆するものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 吉 康 志

副 査 教 授 山 崎 孝 治

副 査 教 授 河 村 公 隆

副 査 助 教 授 遠 藤 辰 雄

副 査 教 授 太 田 幸 雄 (北海道大学大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

Characteristics of temporal variation of aerosol optical properties revealed by the long-term measurement of solar aureole

(長期間の太陽周辺光の地上観測から明らかにした
エアロゾルの光学的特性の時間変動)

エアロゾルが太陽放射を散乱・吸収する直接効果と、それが雲核として働く間接効果とを明らかにすることは、温暖化予測において極めて重要な課題である。近年、衛星観測や数値モデルによってエアロゾルのグローバル分布が求められるようになってきたが、アルゴリズムや得られた結果の検証も含め、エアロゾルの時空間変動特性を正確に把握するためには、長期間の観測から得られる精度の良いデータとの比較が必要不可欠である。そこで本研究では、1997年7月から約4年余り、札幌で連続観測を行い、エアロゾルの光学的特性の様々な時間スケールの変動特性を明らかにし、さらに、より低緯度の地点（つくば、東京）と合わせて比較することにより、広い緯度範囲での時間変動特性の相違を明らかにすることを目的とした。

観測は、太陽直達光と周辺光の5波長の放射輝度を自動測定できる Sky radiometer を用いて行った。太陽直達光と、規格化した周辺光の角度輝度分布から、インバージョン法を用いて気柱あたりのエアロゾルの粒径分布を求め、そこから、エアロゾルの光学的特性として重要な指標の一つである波長 $0.5\mu\text{m}$ の光学的厚さ $\tau(0.5)$ を求めた。また、エアロゾルの光学的厚さの波長依存性から、粒径の大小の指標となるオングストローム指数 α を求めた。このようにして求めたエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の関係をj用いて、エアロゾルの光学的特性の時間変動を調べた。

札幌における $\tau(0.5)$ は、春に最大で秋に最小という季節変化を示した。春は他の季節よりも全粒径で濃度が高く、特に、半径 $0.5\mu\text{m}$ 以上の粒子の増大が顕著であった。このことは、黄砂粒子の影響が北日本にも現れていることを示唆する。事実、1998年と2001年の4月に発生した大規模黄砂現象では、半径 $2.0\sim 3.0\mu\text{m}$ を中心とした粒子の増大が確認された。さらに、1998年8月に札幌で極めて大きな α と大きな $\tau(0.5)$ をもつエアロゾルが観測

された。バックトラジェクトリー解析と衛星データ解析から、この粒子はシベリアの森林火災によって形成されたものと確認された。

次に、札幌、つくば、東京の3地点全てのデータから、 $\tau(0.5)$ と α の平均値を求め、測定した $\tau(0.5)$ と α とこの平均値との大小の関係から、エアロゾルを4つのタイプに分類した。Type-Iは、平均値より $\tau(0.5)$ は小さいが α は大きい粒子、Type-IIは、 $\tau(0.5)$ も α も大きい粒子、Type-IIIは、 $\tau(0.5)$ も α も小さい粒子、そしてType-IVは、 $\tau(0.5)$ は大きい α は小さい粒子である。その結果、どの地点でもType-Iの出現頻度が高く(約4割)、我が国ではType-Iのエアロゾルが緯度によらず卓越していることが分かった。Type-IIは、どの地点でも冬の出現頻度が少ないが、とりわけ札幌は全ての季節で少なかった。一方、東京では冬以外の季節、特に夏にType-IIの頻度が高かったが、他の地点では年間を通じて頻度が低かった。すなわち、Type-IIのエアロゾルは、高緯度あるいは寒冷地域では発生しにくいタイプであり、都市汚染大気中の光化学反応による2次生成粒子である可能性が示唆される。Type-IVは全地点で春に増大し、黄砂に関連したエアロゾルであることが示唆された。札幌では、Type-IIIのピークが秋に現れ、秋にも大粒子の影響があることが示されたが、春と秋では黄砂の源や輸送過程が異なっている可能性も示唆された。

さらに、雲が発生しているような湿潤な大気環境場では、その周辺により光学的に厚く、かつより大きなエアロゾルが存在し、このような効果がエアロゾルの時間変動特性に約1~2割程度影響していることが明らかとなった。言い換えれば、雲の周辺に存在するエアロゾルが直接効果に及ぼす影響も無視できない。この効果は直接効果と間接効果の両方を含んでいることから、ハイブリッド効果と名づけた。

また、札幌で1930年代から継続されている直達日射計を用いて測定された大気混濁度と、我々の測定から求めた大気混濁度との比較を行った。1997年以降のデータのみであるが、両者の相関は0.8と高いが、本装置を用いた計算結果の方が0.02程度小さかった。また、冬は、他の季節に比べると相関係数が低い。これは、直達日射計から求める場合は水蒸気の見積もりに、一方Sky radiometerから求める場合は地表面のアルベードの変化に誤差を含む可能性があることを示唆するものである。

このように、本研究で得られた成果は、これまでデータが少なかった高緯度地域のエアロゾルの光学的特性とその時間変動の解明に大きく貢献し、その結果、地球気候システムにおいて極めて重要な役割を担うエアロゾルの理解をさらに深めることができると期待される。

よって審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ、申請者が博士(地球環境学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。