

1. 東アジア域における大気エアロゾルの太陽放射吸収による大気加熱率の評価

斉藤 勝仁^{1*}・太田 幸雄¹・村尾 直人¹・市原 健一郎¹・山形 定¹

¹北海道大学大学院工学研究科環境フィールド工学専攻（〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目）

* E-mail: sai118@eng.hokudai.ac.jp

本研究では、エアロゾルの地上観測結果に基づき東アジア域の光学厚さの広域分布図を作成した。この結果、春季には、中国大陸沿岸部の光学厚さは0.33～0.84、韓国で0.45、日本の日本海側においては0.23～0.34であり、一方、夏季には中国大陸沿岸部で0.29～1.32、韓国で0.64、日本の日本海側で0.19～0.27であった。すなわち、中国沿岸部から東方に離れるにつれて光学厚さが減少していく事が分かった。次にエアロゾルの実測値と光学厚さの算出結果を基に放射伝達方程式を解きエアロゾルの太陽放射吸収による大気加熱率を算出した。この結果、札幌においては、春～夏の加熱率は0.6K/day～0.8 K/dayであった。一方、中国では札幌に比べ、春に5K/day、夏に9K/dayと6～10倍の大きな加熱率となった。

Key Words : East Asia, Atmospheric aerosols, Heating rate, Aerosol optical depth

1. はじめに

地球温暖化の主な原因として二酸化炭素が挙げられているが、大気エアロゾル（気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子）も地球温暖化に大きく影響していると考えられている。すなわち大気エアロゾルは太陽放射を散乱・吸収することにより、地表面に到達する太陽放射量を変化させ、気候影響を引き起こす（直接効果）。ただし大気エアロゾルは、大気中での寿命が短く、発生源もさまざまであるため、その分布は、時間・空間的に不均一である。そのため、エアロゾルの気候影響を正確に把握するためには、エアロゾルの総量（光学厚さ、すなわちエアロゾルによる消散係数の地表から大気上端までの総和）と、光学特性（散乱係数、吸収係数）及び化学組成の、各地域における季節別の測定値が不可欠である。これらの値を基に放射伝達方程式を解くことにより、エアロゾルの太陽放射吸収による大気加熱率の鉛直分布が計算される。この大気加熱率は、大気大循環の駆動力となることにより、各地域の気候変動を引き起こす。

このような背景から本研究では、地上観測による実測値を基にして、エアロゾルの太陽放射吸収による大気加熱率を評価することを目的とした。2007年春季から、札幌の北海道大学工学部屋上において、晴天時にサンフォトメーターを用いて太陽直達光を測定し、得られた値よりエアロゾルの光学厚さを算出した。この測定値を基に、放射伝達方程式を解

くことによりエアロゾルによる大気加熱率を計算した。

2. 光学厚さとオングストローム指数の算出

本研究ではサンフォトメーターPPGS100（プリード社）¹⁾を用いて、大気エアロゾルの光学厚さの地上観測を行っている。光学厚さの算出には以下の（1）式を用いる。

$$\tau_m(\lambda) = \frac{\ln\left(\frac{V_o(\lambda)}{V(\lambda) \cdot s}\right)}{m} - \left(\frac{P}{P_0} \tau_\gamma(\lambda) + \tau_o(\lambda)\right) \quad (1)$$

ここで

$\tau_m(\lambda)$: エアロゾルの光学厚さ

$V_o(\lambda)$: 使用するサンフォトメーターの検定定数

$V(\lambda)$: サンフォトメータの読取値

s : 太陽～地球間距離の補正係数

m : 大気路程

$\tau_o(\lambda)$: オゾンの光学厚さ

$\tau_\gamma(\lambda)$: 空気分子の Rayleigh 散乱による光学厚さ

P : 気圧

P_0 : 海面における気圧（標準気圧：1013.2 hPa）

である。

光学的厚さの算出には、使用するサンフォトメーターの検定定数 $V_0(\lambda)$ を知る必要がある。 $V_0(\lambda)$ は、大気上端での測定を想定したときに得られる波長別の出力値（電圧値）である。本研究では、検定定数 $V_0(\lambda)$ が既知の標準測器GER-2600（SVC社）²⁾ との並列観測によって、PPGS-100の検定定数を以下のように求めた。

観測した時の測器の出力を $V(\lambda)$ とすると

$$V(\lambda) = V_0(\lambda) \cdot \frac{1}{s} e^{-\tau(\lambda) \cdot m} \quad (2)$$

この（２）式は、それぞれの測器について成り立つ。よって標準測器の式を⁽¹⁾で表し、同時に並列運転した検定定数が未知の測器を⁽²⁾で表すと、以下の（３）式の関係が成り立ち、使用する測器の検定定数が求まる。

$$V_0^{(2)}(\lambda) = V_0^{(1)}(\lambda) \cdot \frac{V^{(2)}(\lambda)}{V^{(1)}(\lambda)} \quad (3)$$

また、光学的厚さ $\tau_m(\lambda)$ における波長に対する依存性は、以下の（４）式で定義される。

$$\tau_m(\lambda) = \beta \lambda^\alpha \quad (4)$$

ここで

α : オングストローム指数

β : オングストロームの混濁係数である。

オングストローム指数 α は、（４）式から最小自乗法により算出した。

なお、エアロゾルの粒径分布を

$$dn/dr = Cr^{-(a+1)} \quad (5)$$

で表すと

$$\alpha = a - 2 \quad (6)$$

となり

① $\alpha > 1$ ($a > 3$) の時、小粒子が多い、

② $\alpha = 1$ ($a = 3$) の時、いわゆるユング分布となる、

③ $\alpha < 1$ ($a < 3$) の時、大粒子が多い、ことを示す。

以上のように、オングストローム指数 α はエアロゾルの粒径分布を示したものであり、オングストローム指数の値が大きいとエアロゾルは小粒子が卓越し、小さいと大粒子が卓越していることに対応する。

3. 札幌における観測

北海道大学工学部A棟屋上 [43.1° N, 141.3° E] において2007年5月から、晴天時で太陽周辺に目視で雲が認められない場合の10時、12時、14時に、太陽直達光観測を行った。観測波長帯は350-1050nmを使用した。太陽直達光観測から、380, 400, 500, 675, 870 nmの5波長における光学的厚さ $\tau_m(\lambda)$ を求め、さらにこの光学的厚さの波長依存性から求まるオングストローム指数 α を算出した。図-1に波長500 nmにおける光学的厚さの日平均値と、オングストローム指数の日平均値を示す。

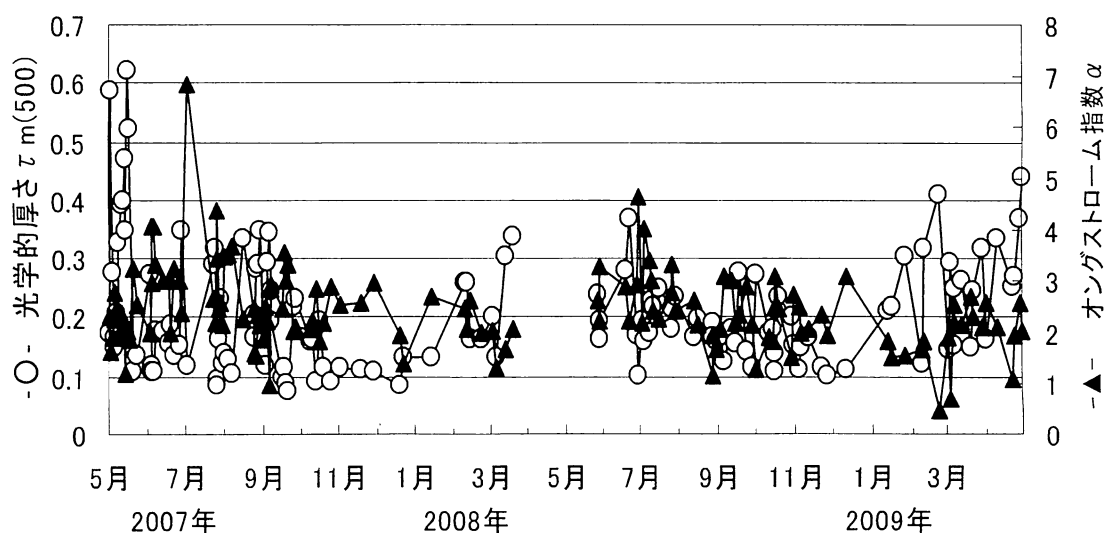


図-1 札幌における光学的厚さ $\tau_m(500)$ とオングストローム指数 α の日平均値

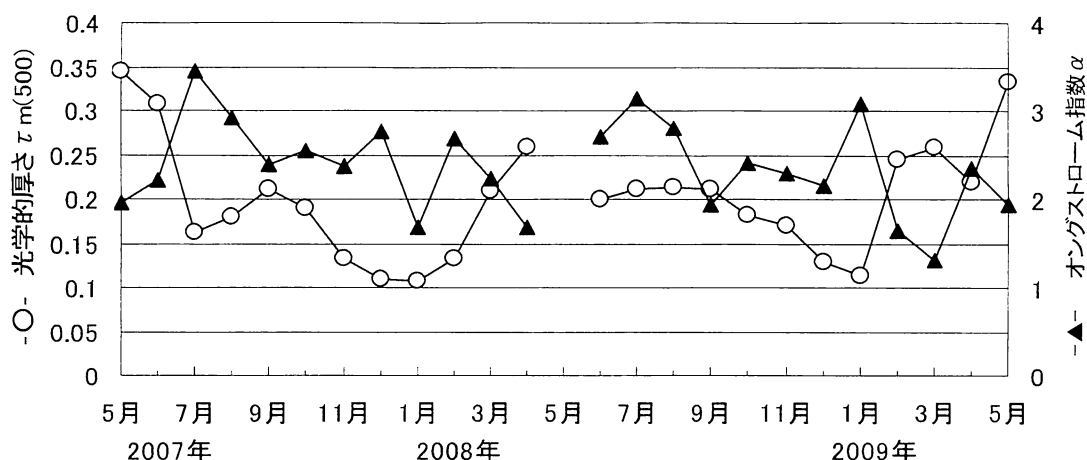


図-2 札幌における光学的厚さ $\tau_m(500)$ とオングストローム指数 α の月平均値

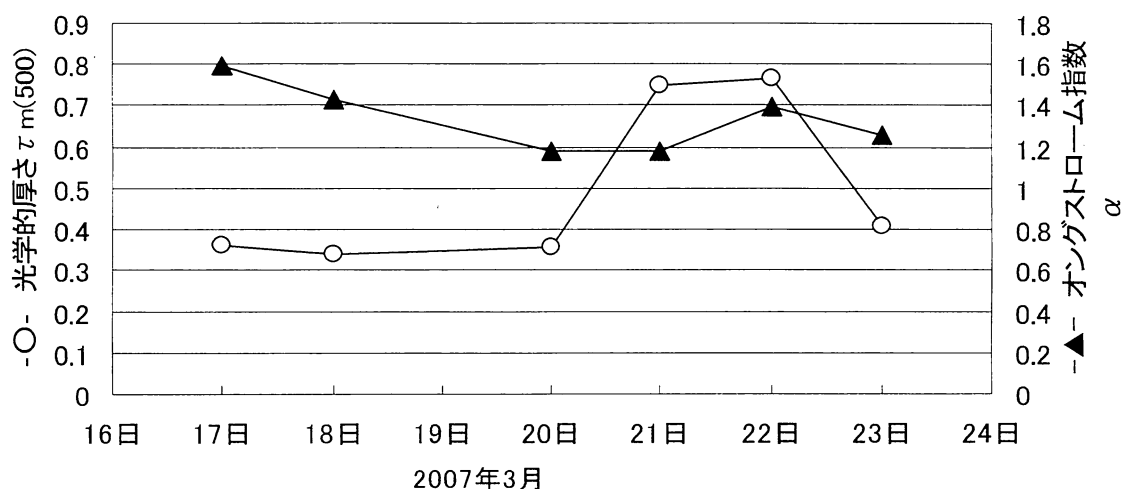


図-3 2007年3月の福江島における光学的厚さ $\tau_m(500)$ とオングストローム指数 α の日平均値

図から、観測期間中における札幌の光学的厚さの最大値は2007年6月12日の0.62であり、最小値は2007年10月18日の0.08である。また、オングストローム指数の最大値は2007年7月30日の6.8であり、最小値は2009年3月21日の0.46である。さらに、観測期間中に光学的厚さが0.3以上で、かつオングストローム指数が1.2未満の日は2007年6月10日、2007年10月13日、2009年3月21日、2009年3月31日の4日間である。これらの日の光学的厚さとオングストローム指数のそれぞれの値は、2007年6月10日が0.41と0.46、2007年10月13日が0.47と1.2、2009年3月21日が0.41と0.46、2009年3月31日が0.3と0.69であった。これらの日は、札幌において粗大粒子が卓越していたと考えられる。

また図-2に、波長500 nmにおける光学的厚さとオングストローム指数の月平均値を示す。図から、光学的厚さは春季にかけて上昇し、5月に0.35と最

も大きい値をとる。またオングストローム指数は、2009年3月に1.3という値をとっているが、それ以外の月は、1.6～3.5という大きな値をとっており、札幌におけるエアロゾルは微小粒子が卓越していると考えられる。

4. 福江島における観測

長崎県の福江島に設けた大気環境観測施設において、2007年3月16日～25日の10日間、エアロゾルの観測を行った。福江島は五島列島の最南端で長崎市から西に約100kmの地点に位置している。観測施設の近辺には大規模な道路やエアロゾルの発生源は存在しない。

観測された光学的厚さとオングストローム指数の日平均値を図-3に示す。光学的厚さ τ_m は、21～22

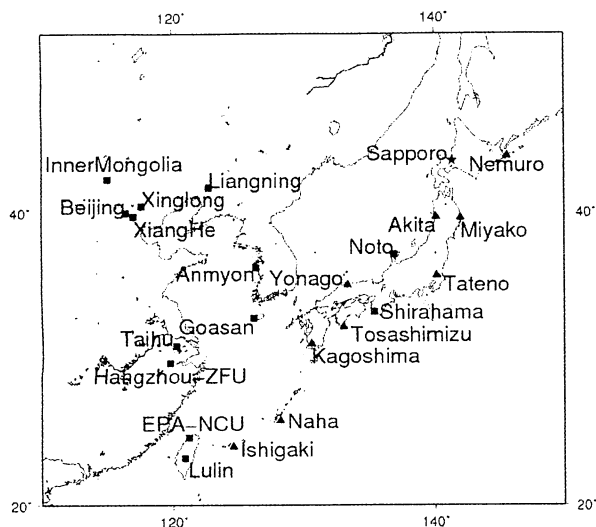


図-4 光学的厚さ算出地点

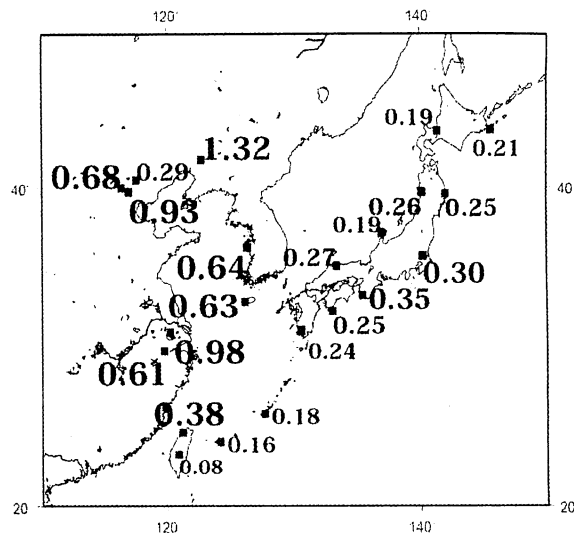


図-6 東アジア域における夏季の光学的厚さ

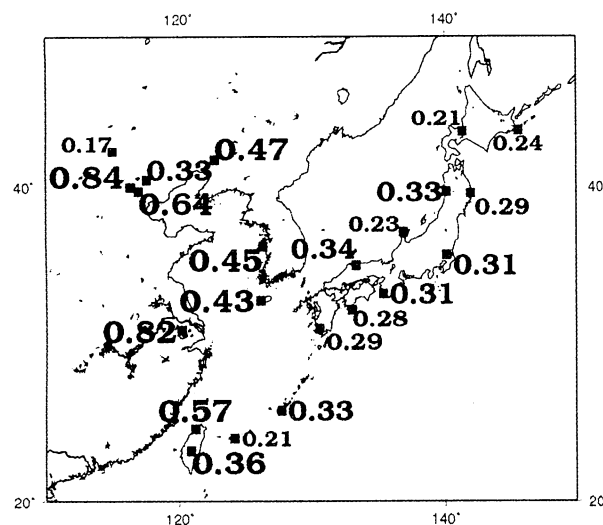


図-5 東アジア域における春季の光学的厚さ

日に0.75、それ以外の日は0.35～0.4という値をとっており、21～22日に高濃度のエアロゾルが飛来している。また小川[2008]³⁾によると、21日～22日にかけて中国大陸沿岸部から、人為起源の微小粒子を多く含んでいる気塊が福江島に到達している。しかし、その日のオングストローム指数 α と他の日の値とを比較すると、オングストローム指数にはそれほど大きな目立った変化は見られない。

このことから、21～22日には、中国大陸地域から高濃度のエアロゾルが飛来しているが、そのエアロゾルは黄砂などの粗大粒子だけではなく、人為起源の微小粒子をも多量に含んでおり、その結果、オングストローム指数がほとんど変わらなかったものと思われる。

5. 東アジア域における光学的厚さの広域分布

東アジア地域のエアロゾルの波長500nmにおける光学的厚さ $\tau_m(500)$ の季節ごとの広域分布を求めた。エアロゾルの光学的厚さの算出には、NASAによるAERONET⁴⁾ (Aerosol RObotic NETwork)と気象庁による国内直達日射観測網とを利用した。

AERONET は、アメリカ国立航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)によって 1993 年から地球規模で展開されている地上観測網である。太陽直達光と大気散乱光の観測値から、光学的厚さとオングストローム指数を算出している。

図-4に光学的厚さの算出地点を示す。AERONETのデータにはVersion1とVersion2があるが、本研究では、最も精度が高いVersion2のLevel_2.0を使用した。さらにその中でも、太陽高度が高く、精度が高いと考えられる、10時から14時の間に観測された500nmでの観測結果を使用した。図-5及び図-6に、春季及び夏季のエアロゾルの光学的厚さの広域分布を示す。

春季においては、中国大陸沿岸部で光学的厚さが0.33～0.84、韓国で0.45、日本の日本海側においては0.23～0.34という値をとっている。一方、夏季には、中国大陸沿岸部で0.29～1.32、韓国で0.64と春季に比べて高くなっているが、一方、日本の日本海側においては春季に比べてやや低く0.19～0.27の値をとる。

これは、東アジア地域の光学的厚さは、季節にともなう高気圧の勢力の変化や風向の変化によって大きな影響を受けているためである。大規模なエアロ

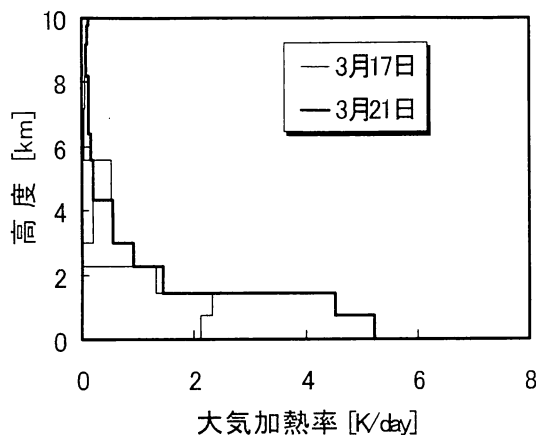


図-7 福江島における大気加熱率の鉛直分布

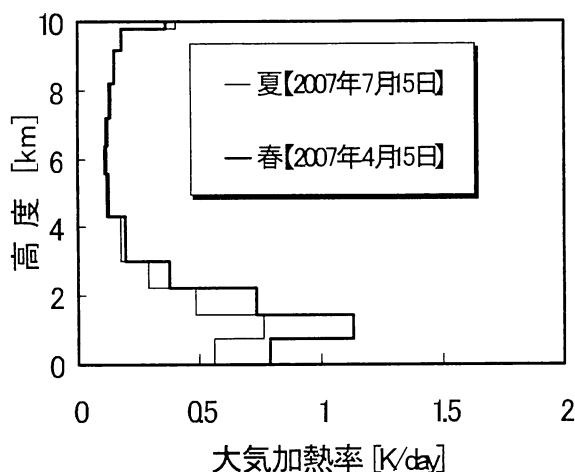


図-8 札幌における大気加熱率の鉛直分布

ゾルの発生源は中国大陸沿岸部の都市域と内陸の砂漠地域である。春季には、大陸からの吹き出しにより、西方から東方へとエアロゾルが吹き流されることが多い。その結果、土壌粒子と沿岸部の都市大気エアロゾルの双方の影響を受けて、東シナ海域の光学的厚さが上昇する。一方、夏季には、中国沿岸部では日射量の増加により光化学大気汚染が進行し、光化学エアロゾルが大量に生成されて光学的厚さが高くなる。

6. エアロゾルによる大気加熱率の算出

エアロゾルは、日射を吸収し、大気を加熱する。特に、黒色炭素のような黒い粒子の場合には、その程度が大きい。ここでは、エアロゾルの太陽放射吸収による大気加熱率を算出し、どの程度、エアロゾ

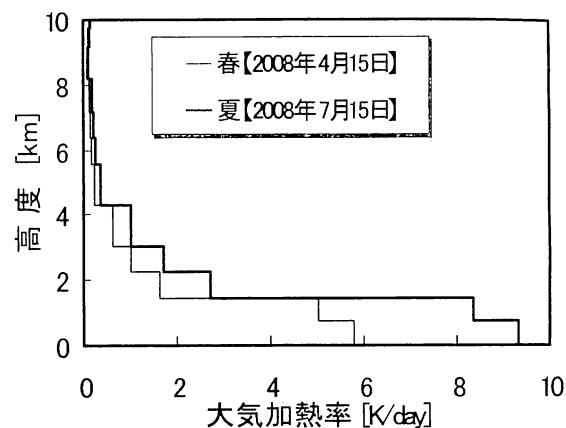


図-9 北京における大気加熱率の鉛直分布

ルが大気を加熱しているのか考察する。

本研究では、第3章・第4章で示した観測結果を用いて、エアロゾルの光学的特性を決定した。次に地表から上空83kmまで23層の大気を考え、放射伝達方程式を解くことによって、各層での正味の放射フラックスを算出し、大気加熱率の鉛直分布を求めた。計算では大気全体を23層に区切ったが、本研究では対流圏エアロゾルによる影響に注目しているので、高度10kmまでの結果を図に示す。

図-7に春季の福江島についての算出結果を示す。計算日は2007年3月17日と3月21日である。3月21日は、中国大陸からの汚染気塊が福江島に到達した日である。地表から2kmまでの大気加熱率に着目すると、中国大陸からの汚染気塊によって、17日の平常時（2 K/day）よりも5 K/dayと2倍程度大気加熱率が大きくなっている。

図-8に、札幌における春(2007年4月15)及び夏(同年7月15日)の大気加熱率を示す。札幌においては春及び夏の加熱率は0.6 K/day～0.8 K/dayと、あまり大きくない。これは、札幌では光学的厚さが0.2程度と小さいためである。

図-9に、北京における春(2008年4月15)、及び夏(2008年7月15日)の大気加熱率の鉛直分布を示す。北京では札幌に比べて、春に5 K/day、夏に9 K/dayと6～10倍の大きな加熱率が生じている。これは、中国大陸沿岸部では年間を通じて光学的厚さが大きく、特に夏季には中国沿岸部は日射量の増加により光化学反応が促進され、光学的厚さがより大きくなるためと考えられる。

なお本実験では、1日あたりのエアロゾルによる大気加熱率を算出したが、計算においてはまる1日中晴れていることを仮定している。しかし実際には、

一日中快晴の日ばかりではなく、日中に曇る場合もあるなどを考慮する必要がある。

7. 結論

本研究では、エアロゾルの観測値を基に東アジア域におけるエアロゾルの光学的厚さおよび光学特性（吸収係数、散乱係数）を把握し、その結果に基づいて大気加熱率を算出した。

検定を行ったサンフォトメーターPPGS-100を用いて、札幌において2007年5月から観測を実施し、現在も測定中である。また福江島では2007年3月17日～23日まで観測を行った。その結果、札幌では、札幌の光学的厚さの最大値は2007年6月12日の0.62であり、最小値は2007年10月18日の0.08である。また、オングストローム指数の最大値は2007年7月30日の6.8であり、最小値は2009年3月21日の0.46である。さらに、観測期間中に光学的厚さが0.3以上で、かつオングストローム指数が1.2未満の日は、2007年6月10日、2007年10月13日、2009年3月21日、2009年3月31日の4日間である。これらの日の光学的厚さとオングストローム指数のそれぞれの値は、2007年6月10日が0.41と0.46、2007年10月13日が0.47と1.2、2009年3月21日が0.41と0.46、2009年3月31日が0.3と0.69であり、これらの日では、粗大粒子が卓越していたと考えられる。また、波長500 nmにおける光学的厚さとオングストローム指数の月平均値から、光学的厚さは、春季にかけて上昇し、5月に0.35と最も大きい値をとることが分かる。またオングストローム指数は、2009年3月に1.3という値をとっているが、それ以外の月は、1.6～3.5という大きな値をとっており、札幌におけるエアロゾルは微小粒子が卓越しているものと思われる。

また、春季の福江島では光学的厚さが0.35程度であったが、中国大陸からの汚染気塊の到達時には0.75まで上昇した。しかし、汚染気塊の到達時のオングストローム指数と他の日の値とを比較すると、

オングストローム指数にはそれほど大きな目立った変化は見られない。このことから、中国大陸地域から高濃度エアロゾルが飛来しているが、そのエアロゾルは黄砂などの粗大粒子だけではなく、人為起源の微小粒子をも多量に含んでいることが分かる。

次に、本研究では、上記の観測結果と AERONET 及び気象庁の直達日射観測網データから、東アジア域の光学的厚さの広域分布図を作成した。春季には、中国大陸沿岸部の光学的厚さは 0.33～0.84、韓国で 0.45、日本の日本海側においては 0.23～0.34 であり、一方、夏季には中国大陸沿岸部で 0.29～1.32、韓国で 0.64、日本の日本海側で 0.19～0.27 であった。すなわち、中国大陸沿岸部から東方に離れるにつれて光学的厚さが減少している。

上記のエアロゾルの実測値と光学的厚さの算出結果をもとに、エアロゾルの太陽放射吸収による大気加熱率を算出した。春季の福江島において、中国大陸からの汚染気塊の到達時と平常時について加熱率の算出を行ったところ、汚染気塊到達時には平常時（2 K/day）の 2 倍の 5 K/day の加熱率が算出された。札幌においては、春季に 0.6 K/day、夏季に 0.8 K/day の大気加熱率が算出され、年間を通してそれほど大きくはない。一方、中国（北京）では、春季に 5 K/day、夏季に 9 K/day と札幌に比べ 6～10 倍の大きな加熱率となった。これは、北京では年間を通じて光学的厚さの大きい、さらに夏季には中国沿岸部では日射量の増加により光化学大気汚染が進行し、光化学エアロゾルが大量に生成され、光学的厚さがより大きくなるためと考えられる。

参考文献

- 1) ブリード社ホームページ：
<http://www.prede.com/file121.html#pggs100>
- 2) Spectra Vista Corporation 社ホームページ：
<http://www.spectravista.com/2600.html>
- 3) 小川 洗平：東シナ海域大気エアロゾルの光化学特性
北海道大学工学研究科修士論文、
pp. 9-30, 2008.
- 4) AERONETホームページ：<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>