

北海道大学 ○太田幸雄、村尾直人
(株) パシフィックコンサルタンツ 林 健太郎

1. はじめに

近年、北極圏では、冬季から春季にかけて Arctic haze と呼ばれるスモッグが発生するようになった。これは、主としてヨーロッパロシアおよび中央ヨーロッパにおいて排出された大気汚染物質が北極圏にまで輸送された結果生じているものである。この haze は、煤および硫酸粒子と硫酸塩粒子を多量に含んでいると言われており、北極圏の放射収支および熱収支に大きな影響を与えていると予想される。また、北極圏の熱収支の変化は、北極圏の気候変動のみではなく、大気大循環過程を通して地球全体の気候にまで影響を与えている可能性も大きい。

ところでこの北極圏の大気汚染物質が気候に及ぼす影響を評価する場合には、北極海域はもち論のことその周辺(北極周辺域)をも含むより広域での大気汚染物質の年間を通しての濃度測定が必要不可欠である。これまで北極海域では、Arctic haze の出現している春季には多くの測定が行われているが、年間を通しての測定は非常に少なく、また北緯60~70度の北極周辺域での大気汚染物質の年間測定は全く行われていない。そこで我々は、この北極圏の大気汚染物質が気候に及ぼす影響を評価することを目的として、1990年夏から1992年夏まで2年間、アラスカにおいて大気中のエアロゾル成分およびSO₂等のガス状成分の濃度測定を行った。またそれと並行して、北極圏大気エアロゾルの気候影響を評価するための計算モデルの開発も行っている。今回、1991年夏までの測定結果を報告するとともに、北極圏大気エアロゾルの気候に及ぼす影響についての計算の途中結果についても報告する。

2. アラスカにおける大気汚染物質の測定

米国アラスカ州 Fairbanks市郊外のEster Dome山頂(標高 720m)にあるアラスカ大学地球物理学研究所の観測所において、1990年9月から1992年8月まで大気中のエアロゾルおよびガス状成分の測定を行った。測定項目は粒径2 μm以下の微小大気エアロゾルの総重量濃度(TSP)、およびその微小大気エアロゾル中の黒色純炭素成分(Elemental carbon)、粒子状有機炭素、SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、NH₄⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Al成分と、ガス状のSO₂、HCl、HNO₃およびNH₃成分である。

微小大気エアロゾルについては、大気サンプリング系を二系統設置し、各々の系について流量毎分20 lで一ヶ月間空気を吸引した。一系統は50%分離径が2 μmのサイクロン分離器を通して直径4.7 mmの石英繊維ろ紙上に大気エアロゾルを捕集し、他の一系統ではやはりサイクロン分離器を通してテフロンフィルター上に大気エアロゾルを捕集した。ガス状物質のサンプリングにおいては、SO₂およびHClの同時捕集系と、HNO₃捕集系、NH₃捕集系の三系統のサンプリング系を設置した。おのおの流量毎分7 lで一ヶ月間空気を吸引した。各系ではまず最初にテフロンフィルターによりエアロゾルを除去し、次に試薬含浸ろ紙上に各ガス成分を捕集した。なおSO₂およびHCl捕集用としてはNa₂CO₃含浸ろ紙、HNO₃捕集用としてはNaCl含浸ろ紙、NH₃捕集用としてはシュウ酸含浸ろ紙を用いた。

図1に粒径2 μm以下の微小大気エアロゾルの組成分析結果を示す。図中のOrganicsは粒子上有機物量、S. S. Cationは海塩粒子中に含まれるNa⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺を合計したもの、SoilはAlの土壌粒子中の含有量を8%として求めた土壌粒子量、TPMは相対湿度が30%以下での総重量濃

度である。1990年9月から1991年5月までは大気エアロゾルの総重量濃度は $1.0 \sim 1.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ であり、またエアロゾルの総重量濃度はほぼ図に示した各成分の和に等しいことが分かる。なお、図1で分けて示したように1991年の6、7月に総重量濃度が $4 \sim 10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ にまで急上昇しているが、これは付近で森林火災があったとのことで、その影響を受けたものと思われる。一方、筆者等がこれまで日本国内で測定してきた微小大気エアロゾルの総重量濃度は例えば北海道のニセコ山麓では $5 \sim 10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、札幌で $17 \sim 46 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、東京（新宿）で $25 \sim 48 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ であった。これらのことから、アラスカ大陸中央部の高度 700m 付近では、森林火災等の影響のない場合の微小大気エアロゾルの濃度は、日本でもかなり清浄と思われるニセコ山麓のさらに $1/5 \sim 1/10$ であり、東京に比べると $1/25 \sim 1/50$ の非常に低い濃度であることが分かる。

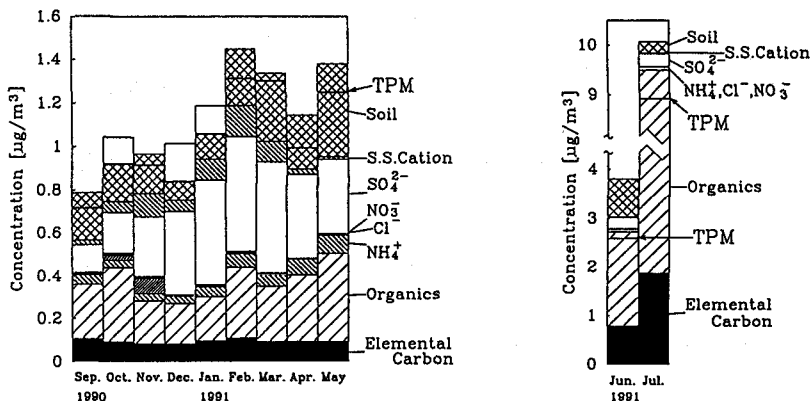


図1. アラスカにおける大気エアロゾルの組成分析結果

図2、3に同じEster Dome山頂で測定された大気中の SO_2 ガスおよび総硝酸濃度を示す。図3では、ガス状の HNO_3 濃度にさらに粒子状の NO_3^- 濃度を等モルの HNO_3 濃度に換算して加え、総硝酸濃度で示してある。アラスカにおける SO_2 濃度は $0.05 \sim 0.15 \text{ ppbv}$ 、総硝酸濃度は $0.01 \sim 0.05 \text{ ppbv}$ であった。札幌の郊外における SO_2 濃度は 1 ppbv 程度、総硝酸濃度は 0.5 ppbv であることから、これらガス状成分もやはり札幌の $1/10 \sim 1/20$ 程度の低濃度であることが分かった。

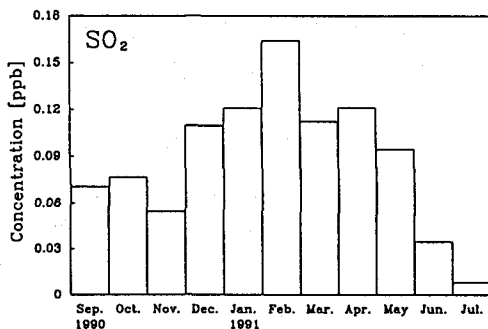


図2. アラスカにおける SO_2 濃度

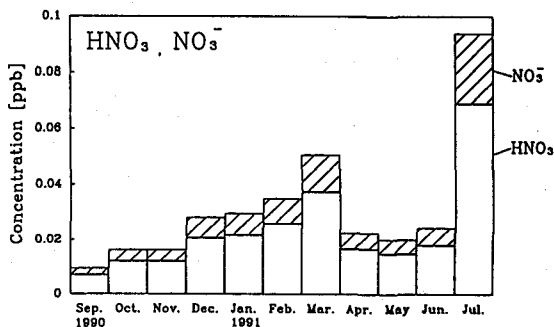


図3. アラスカにおける総硝酸濃度

3. 北極圏大気エアロゾルの気候影響評価

大気層を、地表から 2 km までの大気境界層、高度 $2 \sim 10 \text{ km}$ までの自由対流圏、高度 10 km 以上の成層圏の3層から成るものとした。成層圏エアロゾルおよび自由対流圏エアロゾルについてはこれまでの観測値を基に各々全球一様な組成のものを与えた。大気境界層内のエアロゾルについては地球上の各地域のエアロゾルを、北極大気エアロゾル（北緯 70 度以北）、北極周辺域大気エアロゾル

(北緯60～70度)、陸上大気エアロゾル(北緯60度～南緯70度の大陸域)、北半球海上大気エアロゾル(北緯0～60度の海洋域)、南半球海上大気エアロゾル(南緯0～70度の海洋域)、南極大気エアロゾル(南緯70度以南)の6種類に分類した。各々のエアロゾルについて、これまでの我々の測定および文献値を基にその組成を決定し、それに基づき各エアロゾルの放射特性(散乱光の角度分布関数と単一散乱アルベド)を求めた。さらに、Fairbanks およびPoint Barrowにおける大気混濁度の測定値、およびToon and Pollack(1976)の推定値に基づき、各緯度帯毎の大気エアロゾルの光学的厚さを与えた。この各緯度帯毎の混濁大気について、Delta-P3近似法を用いて放射伝達方程式を解き、大気上端での各緯度帯毎の planetary albedo (太陽放射の反射率)を求めた。気候モデルとしては、Thompson and Schneider (1979)を基本として、以下に示すような季節変化を考慮した緯度方向一次元のエネルギーバランス気候モデルを用いた。

$$R(\partial T / \partial t) = Q(1 - \alpha) - IR - \text{div } F$$

ここで、 R : 熱慣性量、 T : 気温、 t : 時間、 Q : 大気上端での太陽放射量、 α : 大気上端での planetary albedo、 IR : 大気上端から宇宙空間への赤外放射量、 F : 水平方向への熱輸送量、である。なお、今回はとくに北極圏のエアロゾルの効果を調べるために、北極エアロゾルおよび北極周辺域エアロゾルの2種類のエアロゾルのみ季節変化するものとし、その他の4種類のエアロゾルは季節変化しないものとして扱った。

図4、5に、北極圏エアロゾル中の黒色純炭素および有機物粒子、すなわち煤粒子の濃度が現在の2倍に増加した場合、および北極圏の年間のエアロゾル濃度が北極圏が最も清浄である秋季の濃度のままである場合(発生源対策が進んで北極圏が清浄な環境に戻ったと考えられる場合、すなわちClean Arctic)の二つの場合についての計算結果を示す。図4は緯度別の年平均地表気温の現在の値からの変化量である。北緯75度以北の北極域において、煤粒子の濃度が2倍に増加した場合には、年平均で1.5℃気温が上昇すること、一方北極圏が清浄に戻った場合には、年平均で0.7℃気温が低下することが分かる。

また図5は、北緯55度から85度までの各緯度帯における季節別の地表気温の現在の値からの変化量である。煤粒子の濃度が2倍に増加した場合には、北緯65度以北の北極圏において、特に夏季に1.5～2.5℃の気温上昇を示すこと、逆に北極圏が清浄な値に戻った場合には、夏季に1.2℃程度気温が低下するという予測結果が得られた。

なお、本計算モデルにおいては、冬季の北極海に存在している開水面からの熱および水蒸気の大気中への輸送効果が取り込まれていない。そのため、上記の気温変化量は約3割程度過大に評価しているものと思われ、今後の改善が必要である。

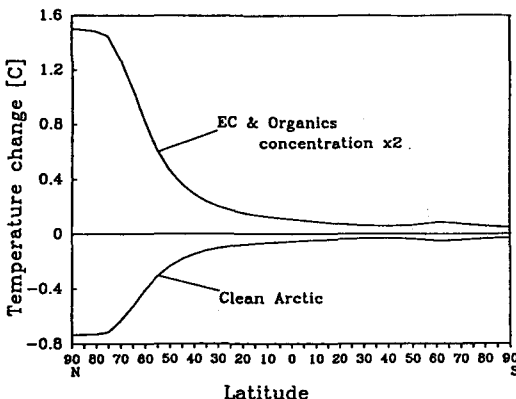


図4. 緯度別の年平均気温変化量

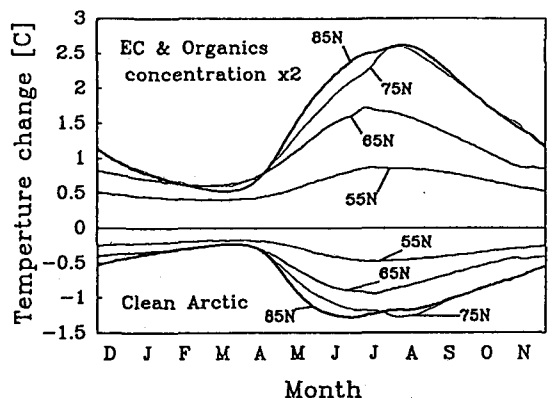


図5. 各緯度帯における季節別気温変化量