

大気エアロゾルの気候形成に及ぼす効果 (I)

北海道大学工学部衛生工学科 ○太田幸雄・村尾直人・溝口 勲

1. はじめに

近年、大気中の二酸化炭素やフロンガス等の濃度が増加し、これらの気体の温室効果に伴う地球の温暖化が危惧されている。しかし、大気中には気体状物質の他に粒子状の物質（大気エアロゾル）も存在し、この大気エアロゾルもまた太陽放射（日射）を散乱吸収することにより地球-大気系の反射率（アルベド）を変え、熱収支を変化させて気候に影響を及ぼしている。これらの大気エアロゾルは、煤粒子や土壌粒子のような吸収性（着色）エアロゾルと、硫酸粒子や海塩粒子のような透明なエアロゾルとに大別されるが、吸収性エアロゾルが増加すると太陽放射をより吸収することにより地球は温暖化し、透明なエアロゾルが増加すると太陽放射をより宇宙空間に跳ね返すことにより地球は寒冷化する。一方また、大気エアロゾルの中で、硫酸塩粒子や海塩粒子等の水溶性粒子は、水蒸気が凝結して雲粒を生成する際の核（雲核）となるため、水溶性エアロゾルの増加は、雲の粒径分布を変え、雲の反射率を変えて、地球-大気系の熱収支を変化させ、やはり気候に大きな影響を及ぼすことになる。このため、現在地球上に存在している大気エアロゾルが地球を温暖化する方向に作用しているのか、又は寒冷化する方向に作用しているのか、さらには今後人間活動が巨大化して行った場合に、大気エアロゾルの増加は二酸化炭素等による温室効果を加速する方向に働くのか、それとも抑制する方向に働くのか、といった問題を明らかにするためには、大気エアロゾルの総量（濃度）だけではなく、さらに各成分すなわち大気エアロゾルの組成についても、その挙動を明らかにして行く必要がある。

以上のような観点から、我々は現在、大気エアロゾルの組成分析を行い、その結果に基づいて大気エアロゾルが現在の気候の形成に果たしている役割を明らかにすること、及び将来の大気エアロゾルの増加変質に伴う気候への影響の予測評価を行うことを目的とした研究を進めている。昨年から今年にかけてまずその第一歩として、比較的バックグラウンドに近いと思われる北海道ニセコ山麓において大気エアロゾルの通年観測を行いその組成分析を行った。また比較のために、東京都渋谷区笹塚においても都市大気エアロゾルの通年観測を行い組成分析を行った。そこで、今回それらの組成分析結果について述べ、さらにその結果に基づき大気エアロゾルが気候形成に及ぼす効果について見積りを行ったので、その結果について報告する。

2. 大気エアロゾルの組成分析

図1に北海道ニセコ山麓、図2に東京都笹塚において捕集された粒径 $5\ \mu\text{m}$ 以下の大気エアロゾルの相対湿度 55% 下での全重量濃度 (TPM)、及び各成分濃度の季節変化を示す。黒色純炭素 (Elemental Carbon: E.C.)、有機物、 exSO_4^{2-} (非海塩起源硫酸)、土壌粒子、その他 (NO_3^- 、 NH_4^+ 、海塩) の各成分で全重量濃度の90%程度を占めており、粒径 $5\ \mu\text{m}$ 以下の大気エアロゾルはこれらに水分を加えた8成分でほぼ構成されているものと考えられる。ニセコにおける大気エアロゾルは、全重量濃度が $5\sim 11\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり秋に低濃度、冬～春期に高濃度となっている。一方、東京の大気エアロゾルの全重量濃度は $22\sim 48\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ でニセコの約5倍の高濃度であり、夏期に低く冬期に高濃度になっている。

大気エアロゾル中の各成分のうち、E.C. 成分は黒色であり太陽放射を強く吸収することから、また硫酸塩成分は太陽放射を散乱する他に雲核となることから、気候影響については特に注目される成分であるが、その両者を比較すると、東京での exSO_4^{2-} の濃度は、平均 $4.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ で、全重量濃度の11%を占めるに過ぎず、一方E.C. は、平均 $8.8\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ で、全重量濃度の25%と大きな割合を占めている。これに対して、図1

のニセコでの exSO_4^{2-} は、平均 $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と低濃度ではあるが、全重量濃度に占める割合は25%と比較的大きい値をとっている。一方、ニセコにおけるE.C.の平均濃度は、 $0.64 \mu\text{gC}/\text{m}^3$ と非常に低く、また全重量濃度に占める割合も約8%と小さい。

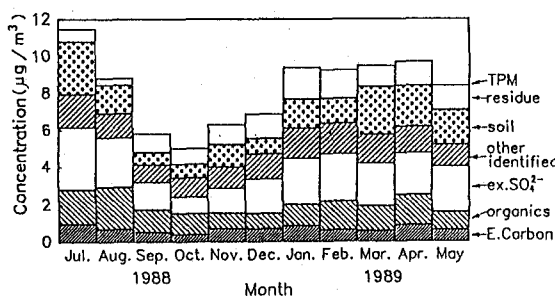


図1. 北海道ニセコ山麓において測定された大気エアロゾルの組成分析結果

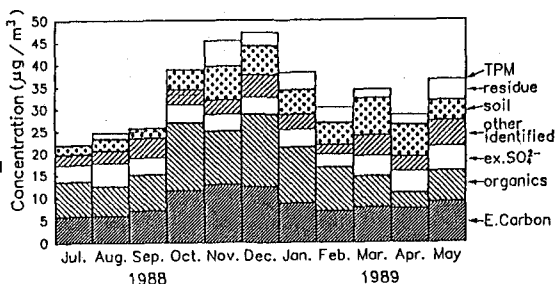


図2. 東京都渋谷区笹塚において測定された大気エアロゾルの組成分析結果

3. 大気エアロゾルの光学特性

上で決定された組成分析結果を基に、大気エアロゾルの体積消散係数 σ_{ext} 、及び単一散乱アルベド ω を計算により求めた。大気エアロゾルの体積表示の粒径分布としては二山分布を考慮し、各成分の複素屈折率として、E.C.については $1.75-0.55i$ 、土壌粒子については $1.55-0.008i$ 、他の透明なエアロゾル成分については $1.55-0.0i$ を採用した。図3に、ニセコの大気エアロゾルの波長 $0.55 \mu\text{m}$ における体積消散係数及び単一散乱アルベドの季節変化を示す。体積消散係数は $0.3 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 、単一散乱アルベドは $0.8 \sim 0.9$ 程度であり、全体としてはかなり透明に近いエアロゾルの特性を示している。図4には、ニセコにおける年間平均の大気エアロゾル濃度及び組成に対して計算された各成分毎の消散係数の波長分布を示す。太陽放射エネルギーが最も多く存在している波長 $0.3 \sim 1.0 \mu\text{m}$ の領域においては硫酸アンモニウム、Elemental carbon、有機物及び海塩粒子が大きな消散係数を与えている。

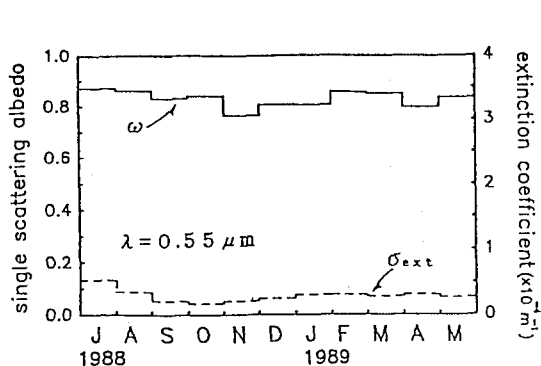


図3. ニセコにおける大気エアロゾルの組成分析結果より求められた単一散乱アルベド ω と体積消散係数 σ_{ext} の季節変化

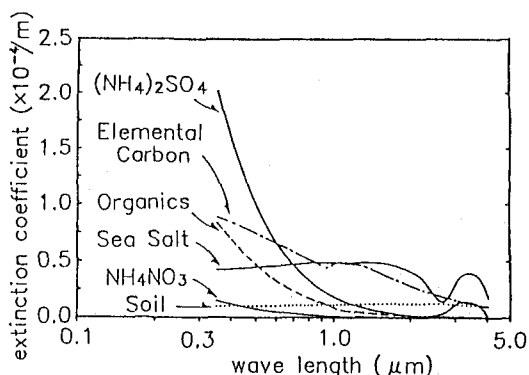


図4. ニセコにおける大気エアロゾルの各成分毎の体積消散係数の波長分布

4. 大気エアロゾルによる気候影響

ニセコにおいて測定された大気エアロゾルをほぼバックグラウンドエアロゾルと考え、その組成を基に、エアロゾルの存在する大気中の太陽放射の散乱吸収量を計算した。大気モデルとしては、厚さ2kmの大気境界層、高さ2kmから11kmまでの自由対流圏及びそれ以上の高さの成層圏の3層モデルを採用した。また大気エアロゾル濃度の高度分布としては、成層圏及び自由対流圏中の大気エアロゾルの濃度はこれまで飛行機観測等によって得られた平均値を用い、大気境界層内のエアロゾル濃度のみが高濃度でかつ地域的に変化しているものと仮定した。なお、放射伝達方程式の解法としては、十分な精度を持ち、かつ計算時間の非常に短い、デルタ関数近似のP3近似解法を開発し、計算に用いた。また、近赤外領域の水蒸気の吸収帯による吸収効果も厳密に取り入れた。

図5に、地表面が陸地面（反射率 $A_s = 0.15$ ）で、太陽高度が天頂から測って 63° （緯度 45° での年平均の太陽高度で、図では $\mu = 0.45$ で示されている）、大気混濁度 β が0.125（清浄大気に相当する）で、大気エアロゾルの組成はニセコにおけるエアロゾルと同じであると仮定した時の、大気境界層内及び自由対流圏内における大気エアロゾル及び水蒸気の太陽放射散乱吸収による一日当たりの加熱率を示す。大気境界層内で 1.5°C/day 、自由対流圏内で 1.0°C/day の加熱を示している。参考として、東京において最も汚染のひどい日の加熱率（ $\beta = 0.30$ の場合）を計算したところ、 6.8°C/day の加熱となり、東京のような大都市においては、大気汚染によりかなりの大気加熱が生じることが分かった。

図6に、ニセコにおける大気エアロゾルと同じ組成のエアロゾルを与えた場合の、晴天日における、大気上端での反射率（ α ）と地表面の反射率（ A_s ）との差 $\Delta\alpha$ （ $=\alpha - A_s$ ）について、様々な反射率の地表面を仮定した場合の計算結果を示す。 $\beta = 0.125$ はニセコ程度の清浄大気の場合、 $\beta = 0.30$ は東京の汚染のひどい日の大気に相当する。ニセコと同じ組成で同じ程度の濃度のエアロゾルでは、地表面反射率が0.35以下の場合には、大気上端での反射率が増加するために地球—大気系が得る太陽放射量は減少し、大気エアロゾルの存在は地球を寒冷化する方向に作用する。一方雪面（反射率0.50～0.90）のように反射率の高い地表面上では、大気上端での反射率は減少し、地球—大気系がより太陽放射を獲得することになるため、大気エアロゾルの存在は地球を温暖化する方向に作用する。またこの傾向は、大気エアロゾル濃度が増加する程（ β が増加する程）大きくなる。

以上のように、大気エアロゾルによる気候への影響は、大気エアロゾルの量のみならず、その組成（成分）に依存し、さらに地表面の反射率にも依存するため、今後、大気エアロゾルの組成すなわち各成分毎の地球規模での分布を測定していくこと、及び大気エアロゾルの増加及び変質（組成のへ変化）についての予測評価を行っていくことが、重要な課題となるものと思われる。

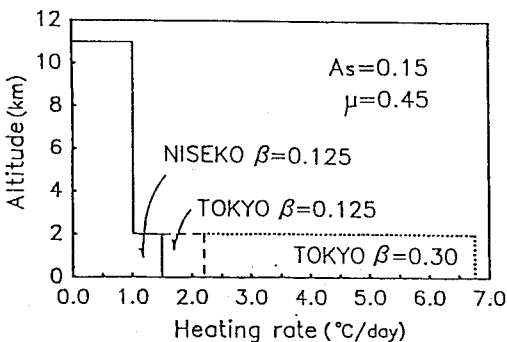


図5. 大気エアロゾル及び水蒸気の太陽放射散乱吸収による大気加熱率

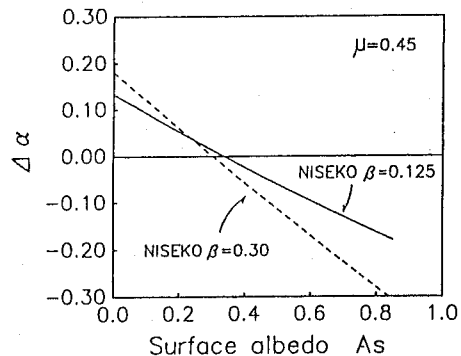


図6. 大気エアロゾルの存在による大気上端での反射率の変化（ $\Delta\alpha = \alpha - A_s$ ）

（ α ：大気上端での反射率、 A_s ：地表面反射率）