

大気エアロゾルの気候形成に及ぼす効果 (II)

北海道大学工学部 ○太田幸雄・村尾直人・溝口 勲

1. はじめに

近年、大気中における二酸化炭素等の温室効果気体の濃度が増加しており、これらの濃度増加に伴う地球の温暖化が危惧されている。しかし一方、大気中には、固体及び液体の微粒子もまた存在している。これらは大気エアロゾル (Atmospheric aerosol) と呼ばれており、粒径が $0.003\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ にまでも及びその成分も様々な、多成分分散粒子の集合体である。この大気エアロゾルは、粒子であるため、太陽放射 (日射) を散乱・吸収し、地球—大気系の受け取る放射量 (熱量) を変化させて気候に大きな影響を与えている。これを大気エアロゾルのアルベド効果と言う。この大気エアロゾルのアルベド効果は、鉛直大気柱内に含まれるエアロゾルの総量 (大気混濁度) に依存することは勿論であるが、さらに大気エアロゾルの太陽放射吸収特性によっても大きく異なる。例えば硫酸粒子等の透明なエアロゾルでは、太陽放射を散乱し宇宙空間に跳ね返す効果のみが卓越するため、その増加により地球—大気系の受け取る太陽放射量は減少し、地球は寒冷化する。一方、煤粒子のように非常に強く太陽放射を吸収するエアロゾルでは、太陽放射を吸収する効果が太陽放射を宇宙空間へ跳ね返す効果よりも卓越するため、煤粒子の増加に伴い地球は温暖化する。以上のように大気エアロゾルの吸収特性は、気候に及ぼす大気エアロゾルのアルベド効果を評価する上で、決定的に重要な因子である。

しかしながらこれまでのところでは、大気エアロゾルの吸収特性の測定は、主として精密な光学機器を用いて行われてきたため、長期間の野外での測定は殆ど行われて来なかった。そこで我々は、数年前から、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の吸収特性を決定する方法を開発し、札幌、小笠原父島、八丈島、東京、北海道ニセコ山麓等において、大気エアロゾルの吸収特性の測定を行ってきた。今回、それらの測定結果を基にして、大気エアロゾルの存在が現在の気候の形成に及ぼす影響を評価し、さらに将来の人為起源エアロゾルの増加に伴う気候の変化についての予測を行ったのでその結果について発表する。

2. 大気エアロゾルの組成分析

図1及び図2に、東京及び北海道ニセコ山麓において各月毎に測定された粒径 $5\mu\text{m}$ 以下 (分粒装置の50%分離径が $5\mu\text{m}$) の大気エアロゾルについての組成分析結果を示す。図において、TPMは相対湿度50%以下で測定されたエアロゾルの総重量濃度、ECは黒色純炭素、s. s. Cationは海塩起源のナトリウムやカルシウム等の陽イオンを示す。また Waterは、大気エアロゾルのうち、水溶性のエアロゾルが海塩粒子、硫酸アンモニウム粒子及び硝酸アンモニウム粒子から成り立っているものとして、Tang (1980) の相対湿度の変化に伴う粒子の成長・収縮の実験結果に基づいて計算により求めた水分量である。これらの図より、代表的な都市大気エアロゾルである東京の大気エアロゾル、及び陸上のバックグラウンド大気エアロゾルと考えられるニセコの大気エアロゾルのいずれにおいても、黒色純炭素 (EC)、有機物 (Organics)、硫酸塩 (SO_4^{2-})、硝酸塩 (NO_3^-)、塩素 (Cl^-)、アンモニウム (NH_4^+)、海塩起源陽イオン (s. s. Cation) 及び土壌粒子 (Soil) を加え合わせると総重量の80%程度を占めることから、 $5\mu\text{m}$ 以下の大気エアロゾルは、ほぼこれら各成分に水分を加えた9成分で構成されているものと考えられる。

図1より、東京の大気エアロゾルの総重量は $25\sim 50\mu\text{g m}^{-3}$ であり、冬～春に高く、夏に比較的低濃度である。成分中では黒色純炭素と有機物が多く、特に黒色純炭素は $6\sim 13\mu\text{g m}^{-3}$ と高濃度で、エアロゾル全

体の20~28%を占めている。一方、図2のニセコ山麓のエアロゾルは、総重量が $5 \sim 10 \mu\text{g m}^{-3}$ であり、冬~春に高く、秋に低濃度である。成分としては硫酸塩と土壌粒子が多く、特に硫酸塩成分は $1 \sim 3 \mu\text{g m}^{-3}$ の濃度で存在し、エアロゾル全体の20~30%を占めている。一方、黒色純炭素粒子成分は $0.4 \sim 0.9 \mu\text{g m}^{-3}$ と低濃度であり、エアロゾル全体に占める割合も4~10%程度である。以上のように、ニセコ山麓の大気エアロゾルは東京のエアロゾルに比べて濃度は1/5であり、また黒色純炭素成分の割合も少なく、比較的吸収性の低いエアロゾルであると言える。

3. 大気エアロゾルの光学的特性

以上の組成分析結果に基づき、大気エアロゾルは、黒色純炭素粒子、有機物粒子、硫酸アンモニウム粒子、硝酸アンモニウム粒子、海塩粒子及び土壌粒子の6種類の成分粒子で構成されているものと仮定し、各成分粒子ごとの複素屈折率と粒径分布を用いて、体積消散係数 σ_{ext}^i と体積散乱係数 σ_{sca}^i とを計算した。次に各成分粒子のこれらの係数の和として大気エアロゾル全体の体積消散係数 $\sigma_{\text{ext}} (= \sum \sigma_{\text{ext}}^i)$ 及び体積散乱係数 $\sigma_{\text{sca}} (= \sum \sigma_{\text{sca}}^i)$ を求め、大気エアロゾルの単一散乱アルベド $\omega (= \sigma_{\text{sca}} / \sigma_{\text{ext}})$ を求めた。この単一散乱アルベドは、大気エアロゾルによる太陽放射の吸収の程度を示す因子であり、もし大気エアロゾルが透明で全く吸収がなかったら ω は1.0となり、一方吸収性の強い(黒い)エアロゾルの場合は ω は1よりもはるかに小さい値をとる。東京のエアロゾルについてこれらの値を計算した結果では、単一散乱アルベド ω は0.6前後、体積消散係数 σ_{ext} は $1 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ であった。一方、ニセコの大気エアロゾルについての計算結果を図3に示す。ニセコの大気エアロゾルでは ω は0.8~0.9で、東京のエアロゾルに比べて吸収性が非常に小さいことを示している。また、ニセコの大気エアロゾルの体積消散係数 σ_{ext} は $0.3 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 程度であり、東京の場合の約1/5となっている。

4. 気候形成に及ぼす大気エアロゾルの効果

以下の手順により、大気エアロゾルが気候形成に及ぼす効果について計算を行った。まず、大気層を図4に示すように地表から2kmまでの大気境界層、2~11kmまでの自由対流圏、及び高さ11km以上の成層圏の3層から成るものと仮定した。自由対流圏及び成層圏エアロゾルの光学的特性としてはこれまでに飛行機観測によって測定されたものを用いた。大気境界層内のエアロゾルについては、地球上の各地における大気境界層エアロゾルを、北極圏大気エアロゾル、陸上バックグラウンド大気エアロゾル、北半球海上大気エアロゾ

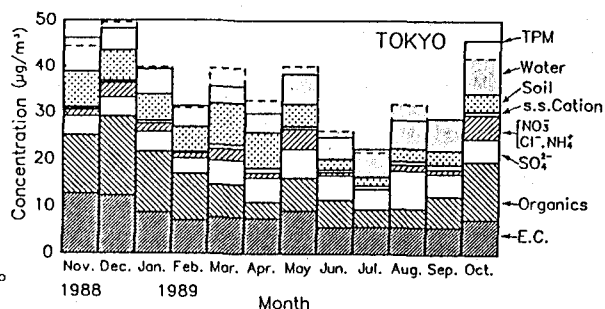


図1. 東京の大気エアロゾルの組成

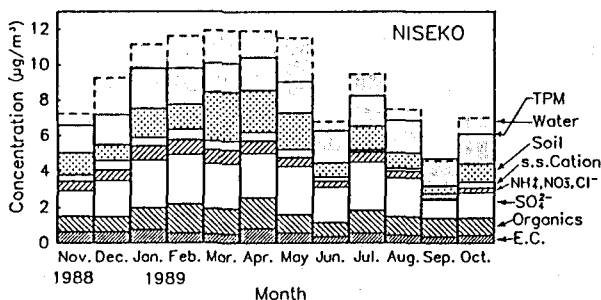


図2. 北海道ニセコ山麓の大気エアロゾルの組成

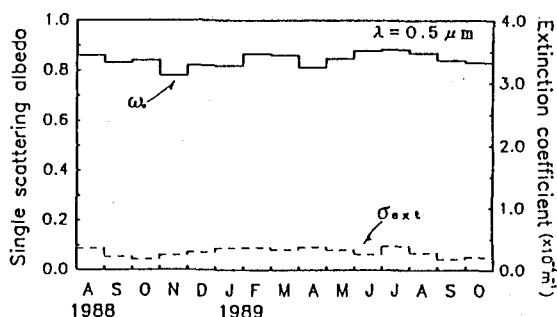


図3. ニセコの大気エアロゾルの光学特性

ル、南半球海上大気エアロゾル、及び南極大気エアロゾルの五つのタイプに分類し、世界各地におけるエアロゾルの各成分の測定結果を基に、上述の組成分析に基づく吸収特性の算定法により、これら五つのタイプのエアロゾルの光学的特性を求めた。また、やはり文献値を基に、世界各地における大気エアロゾル層の光学的厚さ（大気柱内に含まれるエアロゾル総量に比例する）の緯度分布を作成した。

以上の方法で作成された緯度別エアロゾルモデルを用いて、散乱吸収過程をも考慮した太陽放射に関する放射伝達方程式を解くことにより、緯度10度毎の大気上端でのアルベド（太陽放射波長領域全体の反射率）を求めた。

次にこの大気上端でのアルベドの計算結果を用い、エネルギーバランス気候モデルを適用することにより大気エアロゾルが存在した場合の各緯度帯毎の地表面平均気温の変化量についての計算を行った。結果を

図5に示す。図中のIce albedo feedback とは、高緯度の氷河及び万年雪が溶けることにより反射率の低い（黒い）地面が現れ、太陽放射をより多く吸収してさらに気温を上げるフィードバック効果のことであり、LH feedback とは、水蒸気が南北方向に輸送される際に潜熱が輸送されるが、気温の上昇により大気中に含まれる水蒸気量が増加するため、その潜熱輸送量がさらに増大する効果を示す。両feedbackを考慮した結果、大気エアロゾルの存在により、大気エアロゾルが全く存在しなかった場合に比べて、地表面気温は極域で

1.2℃、赤道域で0.8℃だけ冷却されていることが分かった。

また、最近、北極圏においては、ヨーロッパ諸国及びソ連からの汚染物質の流入により大気汚染が深刻化しているが、この汚染物質中には多量の煤粒子及び硫酸塩粒子が含まれていると言われている。そこで、北緯60度及び70度以北の北極圏大気中において、エアロゾルの全量が2倍に増加した場合（ $\beta \times 2$ ）、及び全量が2倍に増加し且つ黒色純炭素粒子の大気エアロゾル中に占める割合が2倍に増加した場合（ $\beta \times 2$ and $EC \times 2$ ）についての、地表面気温の変化量についての計算を行った。結果を図6に示す。北緯60度以北の全エアロゾル量が2倍に増加するがエアロゾルの組成は変わらない場合は、北半球の地表面気温は0.1℃程度低下するが、北緯60度以北の全エアロゾル量が2倍に増加し、且つ全エアロゾル中に占める煤粒子の割合が2倍に増加した場合には、北極圏の地表面気温は逆に0.2～0.3℃上昇することが分かる。このように大気エアロゾルの気候に及ぼす効果は、その全量のみではなく、さらにその組成の変化特に黒色純炭素等の吸収性粒子成分のエアロゾル全体に占める割合の変化により大きく異なることが予想される。

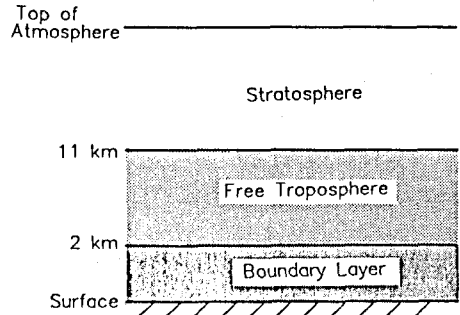


図4. 三層大気モデル

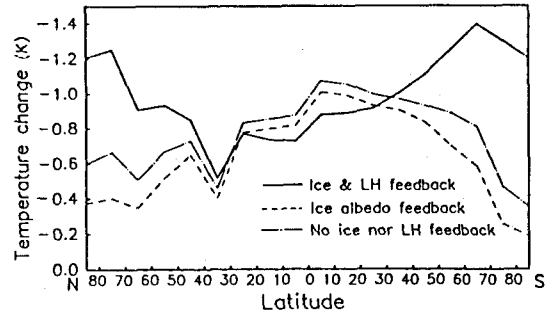


図5. 大気エアロゾルの存在による地表面気温の変化量

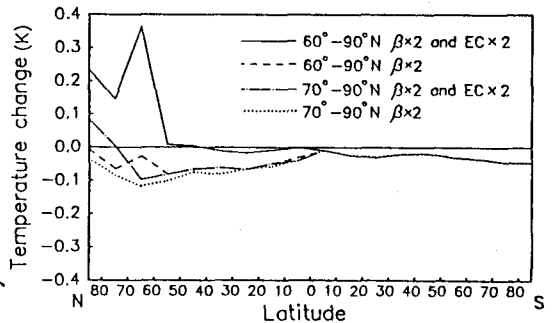


図6. 北極圏大気エアロゾルの増加及び変質に伴う地表面気温の変化量