

エアロゾルの放射強制力の変動及びメカニズムの実態解明に関する研究

(3) 数値モデル計算によるエアロゾルの放射強制力への影響評価

国土交通省 気象庁 気象研究所

環境・応用気象研究部 第一研究室

気候研究部 第五研究室

田中泰宙

千葉 長

平成17～19年度合計予算額 5 3, 7 5 6 千円(全課題分)
 (うち、平成19年度当初予算額 1 8, 0 4 8 千円(全課題分))

[要旨]

大気大循環モデルと結合した全球エアロゾル輸送モデルMASINGARを用いて、エアロゾルが相対湿度とともに日射を反射・吸収する性質（光学特性）を変える効果と、雪氷面に降下したエアロゾルが雪氷面の反射率を変える効果を定量的に評価するためのシミュレーションを行った。MASINGARの放射過程にエアロゾルの直接的な放射への影響を考慮し、5年間の数値実験を行った。この実験では、相対湿度によってエアロゾルの光学特性が変化する場合と、相対湿度の上限を0%、最大相対湿度 50%、90%と仮定した場合のエアロゾルの放射収支への影響を調べた。実験によるエアロゾルの放射収支への影響の全球平均値は、相対湿度を0%と仮定した場合は -0.54 W m^{-2} 、光学特性が変化する場合に -1.48 W m^{-2} となり、相対湿度によるエアロゾルの湿潤効果はエアロゾルの冷却効果を顕著に強めることが明らかとなった。また、各エアロゾル成分の光学的特性に対する相対湿度の影響を調べると、冷却効果をもつエアロゾル（硫酸塩、有機炭素、海塩エアロゾル）はより冷却効果を強め、加熱効果をもつエアロゾル（黒色炭素）はより加熱効果を強める効果をもつことが示されている。特に、海塩エアロゾルは吸湿性の影響が大きいいため、吸湿性の効果は海洋上で大きくなる。また、東アジアでは海塩の影響に加えて硫酸塩、炭素系エアロゾルも多くなるため、吸湿性の影響は特に大きくなる。雪氷面への吸収性エアロゾルの沈着の積雪アルベドへの効果を取り入れ、15年間分の積分を行った。吸収性エアロゾルとしては黒色炭素および鉱物ダストエアロゾルを扱った。エアロゾル沈着による年平均の全球放射収支への影響は雲の影響を考慮しない場合は $+1.04 \pm 0.20 \text{ W m}^{-2}$ 、考慮した場合は $+0.42 \pm 0.35 \text{ W m}^{-2}$ となった。この結果はエアロゾルの直接・間接効果による放射強制力の値にも匹敵するものである。黒色炭素、鉱物ダストの影響はそれぞれ $+0.09 \pm 0.27 \text{ W m}^{-2}$ と $+0.04 \pm 0.30 \text{ W m}^{-2}$ となり、若干の加熱効果を示すものの、年々変動が大きいことが示された。

[キーワード] エアロゾル、放射強制力、化学輸送モデル、湿潤効果、積雪アルベド

1. はじめに

産業革命以降、人間の活動によって大気中に排出された様々な物質は、全球的な気候の変化をもたらしてきたと考えられている¹⁾。その影響は大気中への二酸化炭素、メタン、フロンなどの温室効果気体による地球温暖化の効果のみでなく、大気エアロゾルの増加の影響も無視できないものであることが明らかとなっている。大気エアロゾルは大気放射を散乱・吸収することによ

て放射収支を変化させる効果（直接効果）や、雲の凝結核として作用することにより雲の光学的特性を変化させ、間接的に放射収支を変化させる効果（間接効果）を通じて、地球の放射収支に影響を与えている。その他にも、エアロゾルは大気中の気体の化学反応経路を変化させること²⁾や、雪氷面上に沈着して雪面の反射率（アルベド）を変化させること³⁾、海洋に沈着し植物プランクトンの栄養塩としてはたらし炭素循環に影響を与えること⁴⁾など、影響は多岐にわたっていることが指摘されている。

しかしながら、大気エアロゾルが放射へ影響を与えるメカニズムは、温室効果気体と比較して不確実な点が多い。その原因としては、大気エアロゾルの寿命は数日程度と比較的短く、空間的・時間的な分布も非一様性が大きいこと、大気エアロゾルの組成は硫酸塩、黒色炭素、有機炭素、海塩、鉱物ダストなど多種多様でありそれぞれの光学的特性に不明な点が多いこと、混合状態によって光学的特性が変化すること、などが挙げられる。また、エアロゾルが地表に沈着した後の間接的な気候への影響は、そのプロセスそのものの定量的な物理モデル化が従来の評価では十分になされていない。そのため、大気エアロゾルの気候への影響を調べる上では、これらのプロセスを表現する数値モデルを構築し、シミュレーションによって定量的に調査することが必要である。

2. 研究目的

本研究では、エアロゾルが直接・間接的に放射強制力に影響を及ぼすメカニズムを明らかにするとともに、それを取り入れた数値モデルを構築し、放射強制力の変動のメカニズムとその実体を明らかにすることより、地球温暖化予測の精度向上に資することを目的としている。このサブ課題では、従来の研究では十分に考慮されていないエアロゾルのプロセスとして、サブ課題1および2で扱われる次の2つの効果を全球数値モデルに採り入れ、数値シミュレーションを通じて総合的な定量的評価を行う。

(1) エアロゾルが相対湿度とともに日射を反射・吸収する性質（光学特性）を変える効果

硫酸塩や海塩のように吸水性をもつエアロゾル粒子では、粒子が大気中の水分を吸収することによって粒子の大きさと組成が変化する。このため、大気中の水分量は大気エアロゾルの光学的特性に顕著な変化をもたらす、その結果として大気エアロゾルの放射強制力にも大きな影響を及ぼしていると考えられるが、その大きさの推定値は数値モデルに依存する部分が大きく、詳細は不明である。本研究では、大気エアロゾルの湿潤効果を考慮した上で直接的な放射収支への影響を計算できるように全球エアロゾル輸送モデルの改良を行い、そのモデルで大気エアロゾルへの湿度の効果の有無の条件を加えて数値実験を行い、その結果を解析することによって、エアロゾルが相対湿度とともに日射を反射・吸収する性質（光学特性）を変える効果の放射強制力への影響を明らかにすることを目的とする。

(2) 雪氷面に降下したエアロゾルが雪氷面の反射率を変える効果

雪氷面のアルベドへの影響は、雪氷面と気温が正のフィードバック効果をもつことから気候に大きな影響をもつ可能性がある。「すす」(黒色炭素, BC)やダストなど吸収性をもつエアロゾルなどの不純物が雪に混入すると、積雪面アルベドが低下するため、地球温暖化を加速させる効果が生じる。Hansen and Nazarenko (2004)⁵⁾は雪氷アルベドを通じた「すす」の気候への影響を、雪氷面アルベドを一様に下げて感度を調べる数値実験によって見積もり、この効果の影響が年平均

の全球平均気温で+0.10~+0.25℃と、無視できないものであると論じている。しかし、「すす」などエアロゾルの沈着量は地域や時間によって非常に大きく異なること、雪面アルベドは雪の粒子の粒径などに依存し不純物の影響も単純ではないことなど、依然明らかでない点が多い。

本研究では、大気大循環モデルと結合されたエアロゾル輸送モデルに吸収性エアロゾルが積雪アルベドに与える影響を取り入れたモデルを組み入れ、その放射収支への影響を計算できるようにモデルを改良する。その数値実験によって大気エアロゾルの積雪面への沈着が放射収支に及ぼす影響を探ることを目的とする。

3. 研究方法

(1) 全球エアロゾル輸送モデルの概要

数値実験には気象研究所で開発している全球エアロゾル輸送モデル Model of aerosol species in the global atmosphere (MASINGAR) (Tanaka et al., 2003; Tanaka and Chiba, 2005)^{6,7)} を用いる。MASINGARは気象研究所の大気大循環モデル MRI/JMA 98 AGCM (Shibata et al., 1998)⁸⁾ と物質循環モデルを結合した大気エアロゾル輸送モデルである。大気力学モデル部分は短波・長波放射、大規模凝結、乱流鉛直輸送、陸面過程などの各物理過程を含んでいる。エアロゾル物質循環モデルでは、エアロゾルの大規模移流、乱流拡散、積雲対流、重力沈降による輸送過程と、地表面近くでの乾性沈着、降水による湿性沈着による除去過程を扱う。

主要な大気エアロゾル成分として、このモデルには硫酸塩、黒色炭素、有機炭素、海塩、鉱物ダストが含まれている。硫酸塩エアロゾルの前駆気体となる二酸化硫黄(SO₂)の放出量はEDGAR HYDE 1.3⁹⁾、黒色炭素の大気への放出量はGEIA 放出量データベース¹⁰⁾に基づいて与える。鉱物ダストは地表面における風速や地表面の状態を考慮したパラメタリゼーション、また海塩エアロゾルは海面付近の風速に基づくパラメタリゼーションに従って、気象条件に基づいた放出量を計算する。

① 大気エアロゾルの湿潤効果の放射強制力への影響

本研究ではMASINGARは大気力学モデル内の短波・長波放射過程に、物質循環モデルによって計算された各種エアロゾルの3次元空間分布と光学的特性を与えることによって、エアロゾルの放射への効果をモデル内で計算することができるようにモデルを改良した。この計算方法では、エアロゾルを考慮しない場合と、あるエアロゾル種のみが存在しない場合、全てのエアロゾル種が存在する場合に関して放射過程の計算を行い、それらの差分を取ることによって、一度の計算で各エアロゾル種およびエアロゾル種合計の放射への影響を計算する。放射計算に用いるエアロゾルの光学特性は、硫酸塩、黒色炭素、有機炭素、海塩に関してはChin et al. (2002)¹¹⁾の値を用いる。鉱物ダストエアロゾルの光学的特性には依然不明な点が多く、提唱されている光学特性のパラメータにも、特に吸収特性に関しては大きな差がある。このことは鉱物ダストエアロゾルの放射への影響を考慮する上で今後の課題となる。本研究では、本研究グループの青木らがタクラマカン砂漠の観測値に基づいて作成したADEC-2光学モデルを用いた(Aoki et al., 2005; Tanaka et al., 2007)^{12,13)}。

エアロゾルが存在する場合とエアロゾルが存在しない場合の放射収支計算を使い分けることによって、エアロゾルの放射収支への影響を力学モデルにフィードバックさせることもさせないこ

とも可能である。また、エアロゾル濃度と雲粒の有効半径を関係づけることによってエアロゾルの間接効果の影響を計算することも可能であるが、この実験ではまずエアロゾルの直接効果に対する湿潤効果を調べることが目的であるため、間接効果の計算は含めていない。

硫酸塩エアロゾルの湿度依存性は Kiehl et al. (2001)¹⁴⁾ の近似関数による手法を用いる。黒色炭素、有機炭素および海塩エアロゾルの粒径の湿度依存性は Chin et al. (2002)¹¹⁾ の値を用いる。鉍物ダストエアロゾルは非吸湿性と仮定し、湿度依存性をもたせていない。図1に、モデルで用いる相対湿度とエアロゾル半径の成長率の関係を示す。エアロゾルの吸湿による粒径成長は、相対湿度が90%以上になると急激に上昇している。特に、吸湿性の最も高い海塩エアロゾルでは、相対湿度98%では4倍も粒径が増加する。

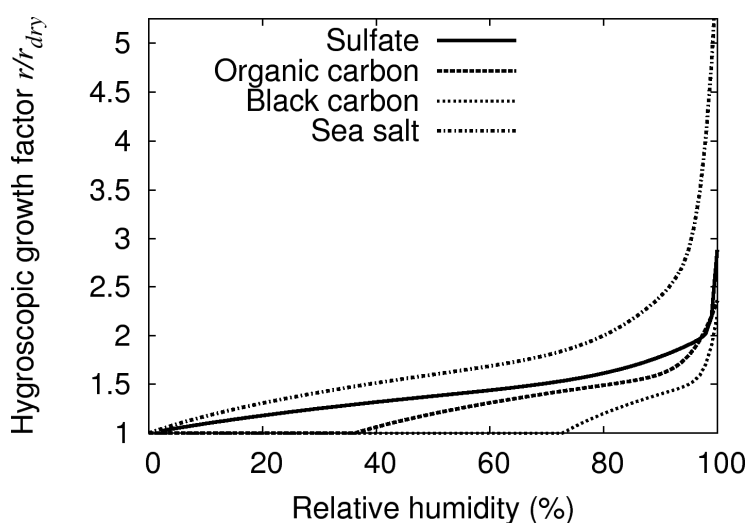


図1. 相対湿度とエアロゾル半径の成長率の関係。

② 吸収性エアロゾル沈着を考慮した積雪アルベドモデル

ここでは、エアロゾル輸送モデルによって計算される黒色炭素 (BC) と鉍物ダストの沈着量を用いて積雪面アルベドを求めるモデルを開発し、エアロゾルの積雪面アルベドへの影響を通じた気候への影響を見積もる。積雪アルベドに影響するエアロゾルとして、光の吸収性の強い黒色炭素と鉍物ダストエアロゾルを実験の対象として扱う。積雪面のアルベド計算には昨年度までにサブ課題2で開発された積雪アルベドモデルを基にする。この積雪アルベドモデルでは、雪粒子の有効粒径、雪の中の不純物(BC およびダスト) 量、および太陽天頂角からアルベドを求める。この詳細なモデルの結果を全球モデルで用いるため、取り得る範囲の各パラメータについて計算された結果をルックアップテーブル化した。以下に、全球モデルで計算するときの積雪不純物と雪粒子の有効半径の扱いについて説明する。

積雪不純物の扱い

雪の不純物の影響は、BC およびダストの沈着量から Snow Impurity Factor (SIF) として表す。SIF は次のように表現する。

$$\text{SIF} = Ka_{\text{BC}} C_{\text{BC}} + Ka_{\text{dust}} C_{\text{dust}} \quad (1)$$

ここで Ka_{BC} , Ka_{dust} はBC およびダストの質量吸収係数、 C_{BC} , C_{dust} は積雪表層中のBC およびダストの質量混合比である。

積雪の有効粒径とエージング（履歴）の効果

積雪粒子の有効半径は、積雪面上の温度の関数として表す。まず、降雪時の積雪の有効粒径は地表付近の気温によって初期値を定め、降雪後に気温が上昇した場合には粒径を成長させる。これは北見および新庄における積雪観測での気温と降雪時の積雪有効半径との経験的な関係から求められた関係を用いる。図2に、モデルで用いる積雪アルベドモデルでの地表付近気温と積雪有効半径の関係を示す。この関係式における有効粒径は、気温が -30°C 以下の時には $20\mu\text{m}$ 、気温 10°C 以上の時は 2mm とし、気温 0°C 以下の時は緩やかに、気温 0°C を超えると急激に粒径が大きくなる。エージングの効果を考慮するため、雪の有効粒径と表層雪中のBCおよびダスト混合比に履歴をもたせ、閾値(1 mm hour^{-1})以上の降雪があった場合には更新する。

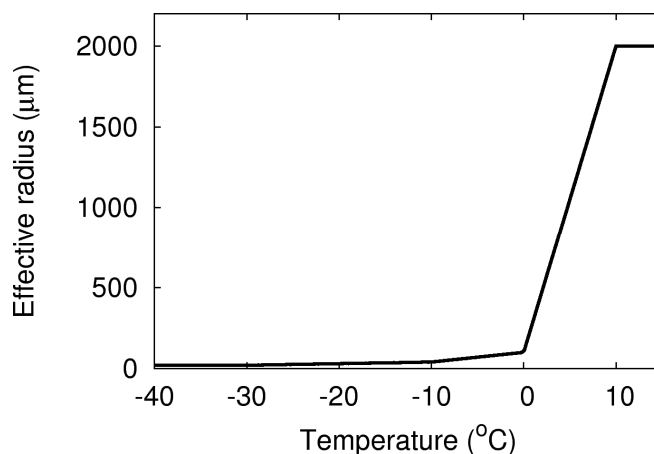


図2. 積雪アルベドモデルでの地表付近気温と積雪有効半径の関係。

(2) 実験設定

① 大気エアロゾルの湿潤効果の放射強制力への影響

エアロゾルの放射収支への影響に対する湿潤効果を求めるため、湿潤効果を考慮した場合と、湿潤効果を考慮せず、相対湿度を0%と仮定した場合、相対湿度の上限値を50%, 90%とした場合の放射収支への影響を比較する。ここでは、エアロゾルの光学特性への湿潤効果のみを調査対象とする。大気場および大気エアロゾル濃度を各実験で同一にするために、エアロゾルの放射効果は大気力学過程にはフィードバックさせない。また湿潤効果によるエアロゾルの力学的な効果、すなわち粒径が変化することによる重力沈降速度の変化なども考慮しない。本実験ではモデルの水平解像度はT63 (約 $1.8^{\circ} \times 1.8^{\circ}$)、鉛直解像度は地表面から0.4hPaまでの30層と設定した。実験

では海面水温と海氷については月毎の HadISST1 データ¹⁵⁾ を与える。本実験では西暦1997年10月から2002年12月までを対象として積分を行い、後の5年間の結果を解析した。なお、気象場のデータ同化は行わない。

② エアロゾル沈着が積雪アルベドに及ぼす影響

エアロゾル沈着による積雪アルベドへの放射収支への影響を求めるため、(1) 黒色炭素および鉱物ダストエアロゾルの沈着の積雪アルベドへの効果を考慮した場合と、(2) 黒色炭素および鉱物ダストの沈着が全くないと仮定した場合の放射収支への影響を比較する。また、黒色炭素と鉱物ダストのそれぞれの影響を調べるため、(3) 鉱物ダストのみが積雪アルベドに影響すると仮定した場合、および(4) 黒色炭素のみが積雪アルベドに影響すると仮定した場合の実験も行う。実験1と2の差から吸収性エアロゾル沈着の影響、実験1と3の差から黒色炭素の影響、実験1と4の差から鉱物ダストの影響を求める。本実験では長期間の積分を行うため、モデルの水平解像度はT42(約 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$)、鉛直解像度は地表面から0.4hPaまでの30層と設定した。実験では海面水温と海氷については月毎の HadISST1 データ (Rayner et al., 2003)¹⁵⁾ を与えた。なお、気象場のデータ同化は行わない。本研究では西暦1979年10月から1995年12月までを対象として積分を行い、後の15年間の結果を解析した。

4. 結果・考察

(1) 大気エアロゾルの湿潤効果の放射強制力への影響

①エアロゾルの放射収支への影響

図3に硫酸塩、黒色炭素、有機炭素、海塩、鉱物ダスト、エアロゾルの総合の大気上端における直接効果による放射収支への影響の5年間の平均水平分布を示す。表1にその全球平均値と年々変動の幅を示している。放射の直接効果はフィードバックさせていないため、5年間の積分において、放射への影響の年々の変動幅は 0.05 W m^{-2} 以内と小さい。

それぞれのエアロゾルはその分布と光学的特性を反映して、それぞれ異なった放射への寄与を示している。まず、硫酸塩エアロゾルは、北極・南極を除いて、ほとんど全球で地球を冷却する働きをもつことが示されている。全球平均の大気上端における放射収支への影響は $-0.51 \pm 0.01 \text{ W m}^{-2}$ となっている。

炭素系エアロゾルは黒色炭素と有機炭素で顕著な違いを示している。黒色炭素は全球において地球を加熱する効果をもつ。この実験ではその加熱効果は全球平均で $+0.47 \pm 0.01 \text{ W m}^{-2}$ となっている。有機炭素エアロゾルは全球平均で $-0.34 \pm 0.01 \text{ W m}^{-2}$ となり、ほとんどの地域で冷却効果となっているが、若干の光学的吸収性をもつため、北緯 70° より北、および南緯 60° より南では放射収支への影響はほとんど0ないし若干の加熱となっている。このモデルで与えられた炭素系エアロゾルの放出量データベースではアフリカ低緯度地帯におけるバイオマス燃焼の影響が顕著であり、この地域の放射収支への影響は黒色炭素・有機炭素とも、大きな値となっている。

海塩エアロゾルはほとんどの地域で冷却効果となっている。地域ごとの値は大きくないものの、発生源となる海洋の面積が大きいために、 $-0.75 \pm 0.01 \text{ W m}^{-2}$ と、全球平均では比較的大きな放射収支への影響を示している。

鉱物ダストエアロゾルの放射収支への影響は全球平均で $-0.28 \pm 0.03 \text{ W m}^{-2}$ と弱い冷却効果だが、その水平分布は地表面のアルベドと低層雲の存在に大きく依存している。硫酸塩や炭素系エ

エアロゾルの放出量は年平均の放出量データに従っているのに対して、鉱物ダストエアロゾルは気象条件に従って放出量が増えるため、放射強制力の年々変動もやや大きくなっている。鉱物ダストエアロゾルの放射への影響は、陸面では砂漠地域や雪氷面、低層雲の頻度の高い高緯度の海洋上では加熱となっており、アルベドの低い陸面や中・低緯度の海洋上では冷却となっている。この違いは特にサハラ・サヘル地域では顕著であり、サハラ砂漠上では加熱、サヘル地域上では冷却の効果となっている。このような地表面アルベドへの依存性は、鉱物ダストの光学的特性に大きく依存している (Aoki et al., 2005)⁸⁾。

エアロゾル全体を考慮した場合、全球平均では $-1.48 \pm 0.02 \text{ W m}^{-2}$ の冷却効果となり、総合的には大気エアロゾルは地球を冷却する方向に働いていることが示されている。今回の実験の結果は平成17年度の報告書での結果の -1.01 W m^{-2} よりも冷却が強くなっている。これは、気象場を客観解析値でデータ同化しない場合、データ同化する場合よりも大気モデルの風速が若干強くなる傾向にあるため、風によって放出される海塩エアロゾルおよび鉱物ダストエアロゾルの量が多くなるのが主な原因である。

表1には、放射への影響を、雲の影響を除外した場合 (clear sky condition) と、雲の影響を含めた場合 (whole sky condition) とに関して示している。Clear sky と whole sky の条件での評価を比較すると、clear sky 条件では冷却効果が大きくなっている。これはエアロゾルの浮遊している高度と雲の高度との関係によるもので、散乱の大きいエアロゾルの上に雲があると短波放射が遮蔽されてエアロゾルの冷却効果が弱まること、また吸収の大きいエアロゾルの下に雲があると惑星アルベドが低下し加熱効果が強くなることによる。表1では、特に海塩エアロゾルの差が顕著である。これは、海塩エアロゾルの質量の大部分を担う $1 \mu\text{m}$ 以上の粗大粒子が主に雲底より下にあることが原因である。

表 1. (1) 雲なし条件、(2) 雲を含む条件でのエアロゾルの大気上端における放射収支への影響の全球平均値、および(3)それらの差。単位は W m^{-2} 。誤差は 1 標準偏差。

	(1)Clear sky	(2)Whole sky	Difference(1)-(2)
Sulfate	-0.84 ± 0.02	-0.51 ± 0.01	-0.33
Black carbon	$+0.40 \pm 0.01$	$+0.47 \pm 0.01$	-0.07
Organic carbon	-0.52 ± 0.01	-0.34 ± 0.01	-0.18
Sea salt	-1.38 ± 0.02	-0.75 ± 0.01	-0.63
Mineral dust	-0.46 ± 0.05	-0.28 ± 0.02	-0.18
Total	-2.94 ± 0.02	-1.48 ± 0.01	-1.46

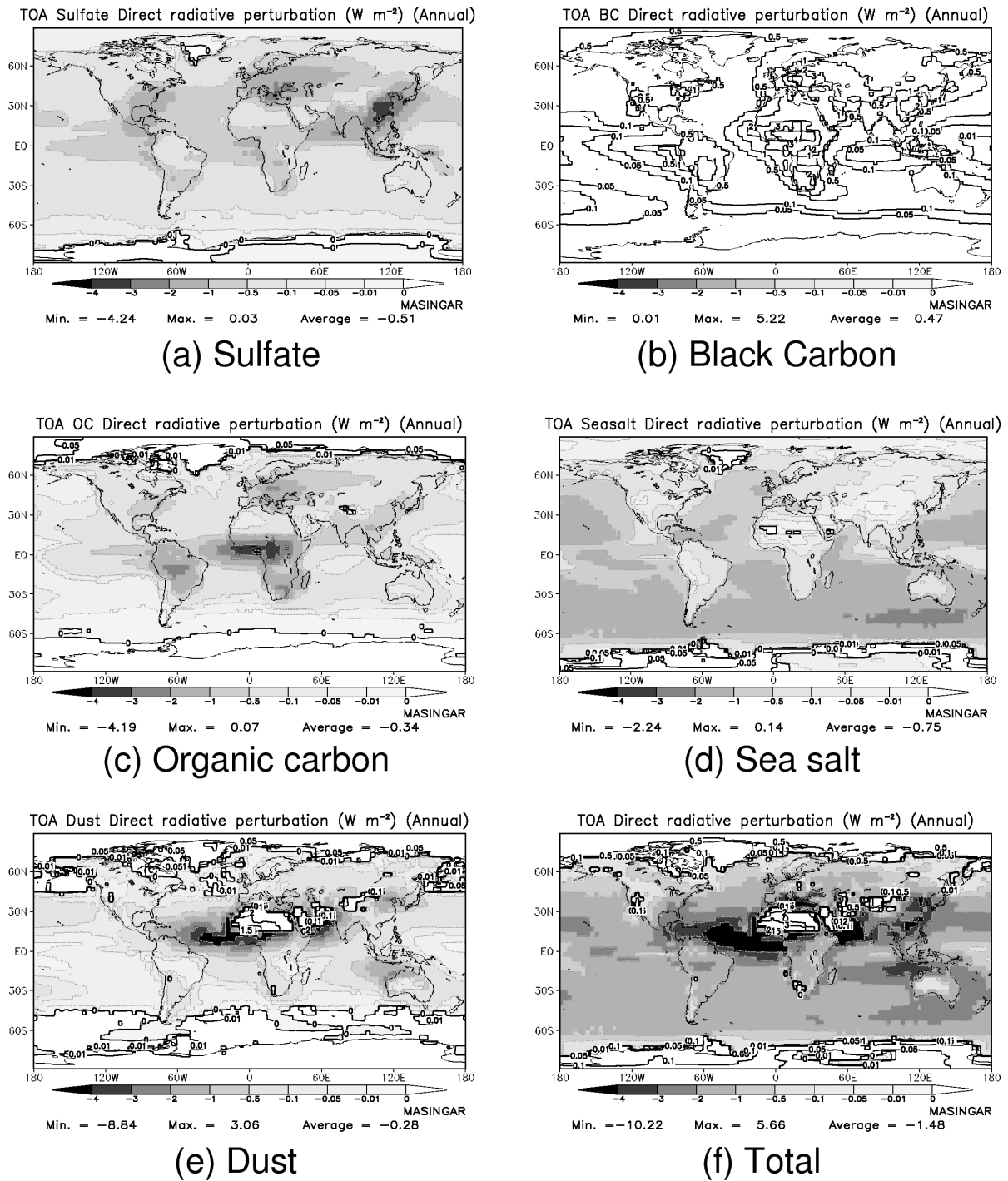


図3. (a)硫酸塩、(b)黒色炭素、(c)有機炭素、(d)海塩、(e)鉱物ダスト、(f)エアロゾルの総合の直接効果による大気上端における放射収支への影響の1998年から2002年の平均分布(単位は $W m^{-2}$)。加熱の部分は実線による等値線で、冷却の部分は灰色の濃度で表している。

②大気エアロゾルの湿潤効果の放射強制力への影響

図4に、エアロゾルの放射に対して相対湿度による粒径成長の効果がない場合とある場合の放射

強制力の差の分布を示す。エアロゾルの吸湿特性の有無による放射強制力の評価値の差は、海洋上で大きい。これは吸湿性の高い海塩エアロゾルの量が多いこと、海洋上の相対湿度が高いことが原因である。また東アジア地域では海塩エアロゾルの他に硫酸塩や炭素系エアロゾルも多いため、特に影響が大きくなる。

表2に相対湿度を0%とした場合、モデルによって計算される相対湿度によってエアロゾルの光学的特性を変化させた場合での放射収支への影響の値、および両者の差を示す。エアロゾル全体としては相対湿度の効果が無い場合、エアロゾルの放射収支への影響の全球平均値は 1.46 W m^{-2} の差を生じている。すなわち湿度の効果が無い場合は -0.54 W m^{-2} であるのに対して、湿潤効果を取り入れると -1.46 W m^{-2} となり、その差分 0.94 W m^{-2} 分、エアロゾルが地球を冷却する効果が大きく見積もられる。

各エアロゾルの成分に対する相対湿度の影響は各々の特性によって異なっている。炭素系エアロゾルに対する相対湿度の考慮の効果は、黒色炭素では加熱の効果はわずかに上昇、有機炭素は冷却効果が上昇している。炭素系エアロゾルでは、相対湿度の上限を50%、90%とした場合でも放射強制力の値の変動は小さい。これに対して、硫酸塩エアロゾルと海塩エアロゾルは湿潤効果に対する放射強制力の感度が大きい。特に、相対湿度の上限を90%とした場合にも硫酸塩は冷却効果が -0.51 W m^{-2} から -0.46 W m^{-2} に減少、海塩エアロゾルは -0.75 W m^{-2} から -0.63 W m^{-2} に減少しており、相対湿度が90から100%の狭い領域でも放射強制力の変化が見られる。全体的にはどの種のエアロゾルも、湿潤効果の考慮はそれらのもつ放射への影響を増大させている。すなわち冷却効果をもつエアロゾル（硫酸塩、有機炭素、海塩エアロゾル）はより冷却効果を強め、加熱効果をもつエアロゾル（黒色炭素）はより加熱効果を強めている。

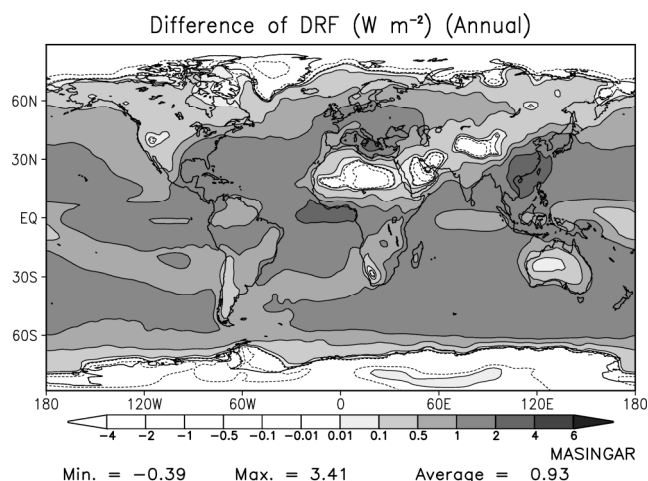


図 4. エアロゾルの放射に対して相対湿度による粒径成長の効果がない場合とある場合の大気上端における放射収支の差の分布（5年平均、単位は W m^{-2} ）。相対湿度の効果がある場合に冷却が強まる部分を灰色の濃度で表している。

表 2. (1) 相対湿度を 0 とした場合(RH = 0%)、(2) 相対湿度上限を 50%としたとき、(3) 相対湿度上限を 90%にしたとき、(4)モデルによって計算される相対湿度によってエアロゾルの光学的特性を変化させた場合 (RH 上限 100%) の放射収支への影響の全球平均値。単位は $W m^{-2}$ 。誤差は 1 標準偏差。

	(1)RH=0%	(2)RH<50%	(3)RH<90%	(4)RH<100%
Sulfate	-0.20±0.00	-0.31±0.00	-0.46±0.01	-0.51±0.01
Black carbon	+0.35±0.01	+0.43±0.01	+0.47±0.01	+0.46±0.01
Organic carbon	-0.16±0.00	-0.25±0.01	-0.33±0.01	-0.34±0.01
Sea salt	-0.22±0.01	-0.28±0.00	-0.63±0.01	-0.75±0.01
Total	-0.54±0.04	-0.75±0.03	-1.31±0.05	-1.48±0.01

(2) エアロゾル沈着が積雪アルベドに及ぼす影響

①放射収支と地表面気温への影響

図5はエアロゾルによる積雪面のアルベド変化を取り入れた場合と、エアロゾル沈着がないと仮定した場合の大気上端における放射収支の差を示したものである。図5では雲の影響を除外した場合 (clear sky condition, a, c, e) と、雲の影響を含めた場合 (whole sky condition: b, d, f) とを示している。積雪の影響を反映して、エアロゾル沈着による積雪アルベド低下の放射収支への影響はユーラシア大陸上で大きな加熱となっている。特にヒマラヤ山脈上の雪とシベリア北部など、高緯度ないし標高の高い地域では夏期の積雪の違いによる影響が顕著に示されている。Clear sky と Whole sky を比較すると、Whole sky では海洋上でも放射収支の差が示されている。これは積雪アルベド変化の結果、大気の大循環が変化して雲の分布や高度に変化が生じたとも考えられる。

表3に黒色炭素と鉱物ダストの積雪アルベドへの影響の有無による大気上端における放射収支差と、地表付近気温への影響の全球平均値を示す。エアロゾル沈着による年平均の全球放射収支への影響はclear sky では $+1.04 \pm 0.20 W m^{-2}$ 、whole skyでは $+0.42 \pm 0.35 W m^{-2}$ となっている。この値はエアロゾルの直接・間接効果による放射強制力の値にも匹敵するものであり、積雪へのエアロゾル沈着の影響が無視できない大きさであることを示している。全球平均の地表気温への影響は $+0.16 \pm 0.04 K$ となっている。

表 3. 黒色炭素と鉱物ダストの積雪アルベドへの影響の有無による大気上端における放射収支差と、地表付近気温への影響の全球平均値。単位は $W m^{-2}$ 。誤差は 1 標準偏差。

	(1)Clear sky ($W m^{-2}$)	(2)Whole sky ($W m^{-2}$)	Temperature Difference (K)
Black carbon + Dust	+1.04±0.20	+0.42±0.35	+0.16±0.04
Black carbon	+0.19±0.17	+0.09±0.27	+0.01±0.03
Dust	+0.08±0.13	+0.04±0.30	0.00±0.03

黒色炭素と鉱物ダストエアロゾルのそれぞれの沈着による影響は、それぞれclear skyでは $+0.19 \pm 0.17 W m^{-2}$ と $+0.08 \pm 0.13 W m^{-2}$ 、whole sky では $+0.09 \pm 0.27 W m^{-2}$ と $+0.04 \pm 0.30 W m^{-2}$ となり、若干の加熱効果を示し、黒色炭素の影響の方が大きくなっている。しかしどちらも値は小さく、年々変動の標準偏差の幅の方が大きくなっている。黒色炭素、鉱物ダストそれぞれの影

響の大きさを単純に加算しても、両方の沈着がある場合の影響と同じにはならない。これは積雪アルベドの正のフィードバック効果のためと考えられる。

Radiative forcing at TOA

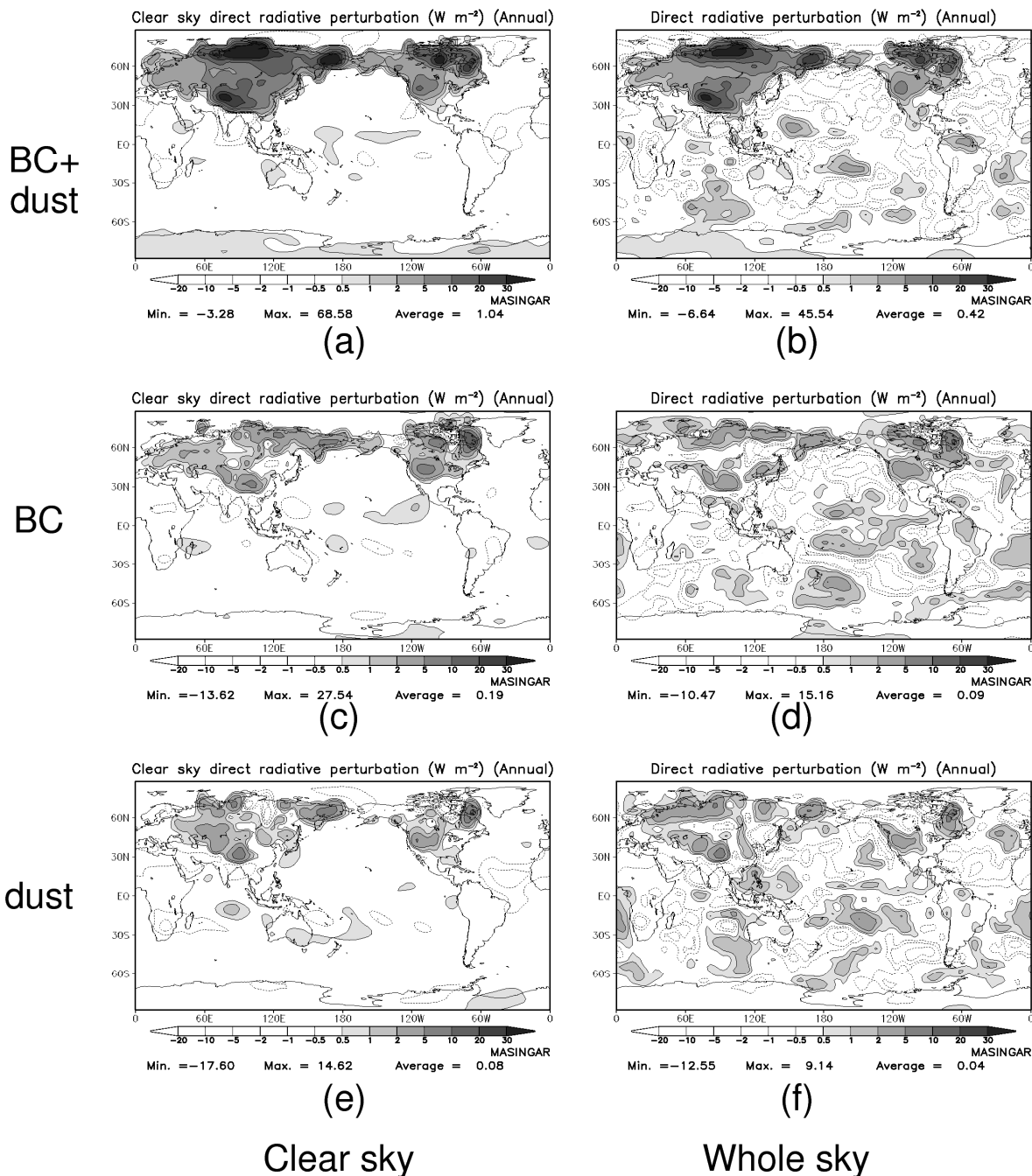


図 5. 積雪アルベドへの黒色炭素および鉱物ダストの影響の有無による放射収支への影響。(a), (b) は黒色炭素と鉱物ダスト両方の影響、(c), (d) は黒色炭素のみの影響、(e), (f) は鉱物ダストのみの影響。(a), (c), (e) は雲の影響を除いた場合、(b), (d), (f) は雲の影響を含めた場合である。15 年間の平均分布で単位は $W m^{-2}$ 。加熱の部分は灰色の濃度で表している、冷却の部分は破線による等値線で示している。

5. 本研究により得られた成果

本研究では、全球エアロゾル輸送モデルMASINGARを用いてエアロゾルの放射収支への影響に対する湿度の影響と、エアロゾル沈着による積雪アルベド変化の放射収支への影響を調べる数値実験を行った。エアロゾルの光学的特性に対する相対湿度の影響は、冷却効果をもつエアロゾル（硫酸塩、有機炭素、海塩エアロゾル）はより冷却効果を強め、加熱効果をもつエアロゾル（黒色炭素）はより加熱効果を強める効果をもつことが示された。エアロゾルの吸湿特性の有無による放射強制力の評価値の差は海洋上で大きい。また東アジア地域では海塩エアロゾルの他に硫酸塩や炭素系エアロゾルも多いため、特に影響が大きくなる。

エアロゾルの沈着による積雪アルベド変化の影響は融雪期、夏期における積雪量に影響が大きく、特に高緯度地方、高山地帯において影響が大きい。数値実験ではエアロゾル沈着による積雪アルベド変化の全球平均・年平均の放射収支への影響は $+0.42 \text{ W m}^{-2}$ と、エアロゾルの直接・間接効果と同じオーダーの大きさになる可能性があることが示された。黒色炭素、鉱物ダストエアロゾルの個別の影響は、それぞれ $+0.09 \pm 0.27 \text{ W m}^{-2}$, $+0.04 \pm 0.30 \text{ W m}^{-2}$ と比較的小さい値であり、黒色炭素とダストが同時に影響するときの値は、個別の放射強制力の値を合計したものよりも大きくなる。エアロゾルの沈着による積雪アルベド変化の影響は年々変動が大きい。

この2つの実験の両方に影響する黒色炭素エアロゾルの全球平均の放射への影響は、大気中における直接効果が約 $+0.46 \text{ W m}^{-2}$ 弱、積雪面上に沈着した後は約 $+0.09 \text{ W m}^{-2}$ 弱程度、合計すると約 $+0.55 \text{ W m}^{-2}$ 弱の加熱効果となる。この値はIPCC第4次報告書に記載される黒色炭素エアロゾルの効果とほぼ同程度である。IPCC第4次報告書では二酸化炭素による温室効果は $+1.66 \text{ W m}^{-2}$ 程度と推定されているため、この黒色炭素エアロゾルの効果は二酸化炭素のおよそ3分の1に匹敵する。黒色炭素は二酸化炭素と比較すると寿命も短く、排気フィルターなどの比較的有効な放出量削減技術も存在することから、温室効果による地球温暖化を鈍化させるためには黒色炭素の排出を削減することは有効な手段になると考えられる。

6. 引用文献

- 1). IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 2). Dentener, F. J., G. R. Carmichael, Y. Zhang, J. Lelieveld and P. J. Crutzen, 1996: Role of mineral dust aerosol as a reactive surface in the global troposphere. *J. Geophys. Res.* **101**, 22869-22889.
- 3). Warren, S. G. and W. J. Wiscombe, 1980: A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2734-2745.
- 4). Martin, J. H. and S. E. Fitzwater, 1988: Iron-deficiency limits phytoplankton growth in the northeast Pacific subarctic. *Nature* **331**, 341-343.
- 5). Hansen, J., and L. Nazarenko, 2004: Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **101**, 423-428, doi:10.1073/pnas.2237157100.
- 6). Tanaka, T. Y., K. Orito, T. T. Sekiyama, K. Shibata, M. Chiba, and H. Tanaka, 2003: MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98

- GCM: Model description, *Papers in Meteorology and Geophysics*, **53**(4), 119-138.
- 7). Tanaka, T. Y., and Chiba, M., 2005: Global simulation of dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR. *J. Meteor. Soc. Japan* **83A**, 255-278.
 - 8). Shibata, K., H. Yoshimura, M. Ohizumi, M. Hosaka, and M. Sugi, 1999: A simulation of troposphere, stratosphere and mesosphere with an MRI/JMA98 GCM. *Papers in Meteorology and Geophysics* **50**, 15-53.
 - 9). Van Aardenne, J.A., Dentener, F.J., Olivier, J.G.J., Klein Goldewijk, C.G.M. and J. Lelieveld, 2001: A High Resolution Dataset of Historical Anthropogenic Trace Gas Emissions for the Period 1890-1990. *Global Biogeochemical Cycles*, **15**(4), 909-928.
 - 10). Cooke W.F. and J.J.N. Wilson, 1996: A global black carbon aerosol model. *J. Geophys. Res.*, **101**(14), 19395-19409.
 - 11). Chin, M., P. Ginoux, S. Kinne, O. Torres, B. N. Holben, B. N. Duncan, R. V. Martin, J. A. Logan, A. Higurashi and T. Nakajima, 2002: Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements. *J. Atmos. Sci.* **59**, 461-483.
 - 12). Aoki, Te., T. Y. Tanaka, A. Uchiyama, M. Chiba, M. Mikami, and J. R. Key, 2005: Sensitivity experiments of direct radiative forcing by mineral dust using spectrally detailed radiative transfer model, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **83A**, 315-331.
 - 13). T. Y. Tanaka, Te. Aoki, H. Takahashi, K. Shibata, A. Uchiyama and M. Mikami, 2007: Study of the sensitivity of optical properties of mineral dust to the direct aerosol radiative perturbation using a global aerosol transport model, *SOLA*, **3**, 33-36, doi:10.2151/sola.2007-009.
 - 14). Kiehl, J. T., T. L. Schneider, P. J. Rasch, and M. C. Barth, and J. Wong, 2000: Radiative forcing due to sulfate aerosols from simulations with the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3., *J. Geophys. Res.* **105** (D1), 1441-1457.
 - 15). Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**(D14), 4407, doi:10.1029/2002JD002670. <http://dss.ucar.edu/datasets/ds277.3/>

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① 青木輝夫、田中泰宙、天気、**55**, (2008) (印刷中)
「大気エアロゾルの沈着が積雪アルベドに与える影響」

(2) 口頭発表

- ① T. Y. Tanaka, Te. Aoki, and M. Hosaka: Third China-Korea-Japan Joint Conference

on Meteorology, China, (2007)

“Climate role of dust aerosol deposition on snow surface”

- ② 青木輝夫、田中泰宙、内山明博、保坂征宏、田中悦子、朽木勝幸、本吉弘岐、兒玉裕二：
日本地球惑星科学連合 2007 年度合同大会 (2007)
「大気エアロゾルの積雪面への沈着と気候への影響」
- ③ 青木輝夫、田中悦子、朽木勝幸、田中泰宙、本吉弘岐、兒玉裕二、安成哲平：日本気象
学会 2007 年度春季大会 (2007)
「積雪に含まれる黒色炭素・ダストとアルベドの観測」
- ④ Te. Aoki, T. Tanaka, A. Uchiyama, M. Hosaka, E. Tanaka, and K. Kuchiki：
International Union of Geodesy and Geophysics, 2-13 July 2007, Perugia, Italy,
(2007)
“Climate forcing due to black carbon and dust depositions on snow surface”
- ⑤ 青木輝夫、田中悦子、朽木勝幸、田中泰宙、本吉弘岐：日本雪氷学会 2007 年度全国大会
(2007)
「積雪アルベド物理モデルの精度に与える積雪不純物特性の効果」
- ⑥ 杉浦幸之助、青木輝夫、本吉弘岐、兒玉裕二、安成哲平：日本雪氷学会 2007 年度全国大
会 (2007)
「2003/04-2006/07 年冬期の札幌における積雪循環曲線」
- ⑦ 青木輝夫、田中悦子、朽木勝幸、田中泰宙、本吉弘岐：日本気象学会 2007 年度秋季大会
(2007)
「積雪アルベド物理モデルの地上観測データによる検証」
- ⑧ 山崎明宏、内山明博、古林絵里子、工藤玲、青木輝夫、田中泰宙：日本気象学会 2007
年度秋季大会 (2007)
「エアロゾル散乱係数の湿度特性の測定」
- ⑨ Te. Aoki, T. Tanaka, E. Tanaka, K. Kuchiki, H. Motoyoshi, and T. Tanikawa: 5th EARSeL
Workshop, 11-13 February 2008, Bern, Switzerland, (2008)
“Physically based snow albedo model and satellite retrieved snow parameters,”
- ⑩ 田中泰宙、青木輝夫、保坂征宏：日本気象学会 2006 年度秋季大会 (2006)
「エアロゾル沈着による雪氷面アルベド変化の感度実験」
- ⑪ 青木輝夫、田中泰宙、保坂征宏、田中悦子、朽木勝幸：日本気象学会 2006 年度秋季大会
(2006)
「積雪粒径と不純物濃度の関数として変化する積雪アルベド物理モデルの開発」
- ⑫ 田中泰宙、青木輝夫、高橋宙、柴田清孝、内山明博、三上正男：日本気象学会 2006 年度
春季大会 (2005)
「鉱物ダストが放射収支に及ぼす直接効果の光学特性による違い」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし