

課題名	エアロゾルによる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		
担当研究機関	国土交通省気象庁気象研究所		
研究期間	平成17-19年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	53,756千円 (うち19年度 18,048千円)
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) 地表面での放射とエアロゾル特性の観測 (国土交通省気象庁気象研究所)</p> <p>(2) エアロゾル-雪氷相互作用に関する観測 (国土交通省気象庁気象研究所)</p> <p>(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)</p>		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>地球の気候は、太陽からの日射がどれだけ入射し、地球からの熱放射がどれだけ放出するかの釣り合いで決定される。</p> <p>この入射エネルギーと放出エネルギーの釣り合い (地球放射収支) に影響を与えるものの一つとして、エアロゾル (大気中に浮遊している微小な粒子) がある。エアロゾルが、日射エネルギーを多く反射する場合に地球は冷却され、逆に多く吸収する場合に地球は暖められる。この日射エネルギーを、どれくらい反射したり吸収したりするかは、エアロゾルの個々の性質によって変化する。</p> <p>このようなことから、地球温暖化の予測精度向上を図る上で、エアロゾルの実態把握と、その役割を明らかにすることは重要な課題であり、これまで多くの研究がなされてきた。しかしながら、IPCC第4評価報告書 (2007) の指摘どおり、エアロゾルが関わって地球放射収支をどれくらい変化させるか (放射強制力: エアロゾルがある場合と無い場合の差) の見積もりの信頼度は必ずしも高くない。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では、日射の反射と吸収に重要な役割を果たすエアロゾル粒子 (0.05~10<math>\mu</math>m程度の粒子) を対象とし、従来の研究では考慮されていない、</p> <p>(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</p> <p>(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</p> <p>を、観測を行ってパラメータ化し、それを数値モデル (大気大循環モデル+エアロゾルモデル) に組み込むことによって、放射強制力への影響評価を行う。</p> <p>これを行うことによって、放射強制力の実態を現状より高い信頼度で明らかにし、地球温暖化の予測精度向上に資する。</p> <p>これらの目的を達成するため、エアロゾルの特性が違う地点を日本近辺及び中国国内より数点選び、気温・湿度、エアロゾルの散乱・吸収率、大きさ毎のエアロゾル個数の測定、日射量の観測を地上で行い、エアロゾルの日射に対する性質 (光学特性) と湿度の関係 (雲粒への変化を含む) を数値モデルに組み込めるようにパラメータ化する。</p> <p>また、雪氷面上における放射・エアロゾル・積雪観測により、雪氷面の日射に対する反射特性を把握すると共に、大気中と積雪内の不純物 (積雪不純物: 主に吸収性大気エアロゾル起源の不溶性粒子) の成分毎の濃度分布を解析し、複数の積雪不純物の光学特性をパラメータ化する。さらに、放射伝達モデルを用いた理論計算と観測値との比較から、不純物を含む積雪面の反射特性を数値モデルに組み込めるよう物理モデル化する。</p> <p>さらに、大気中に浮遊する各種エアロゾルの分布を再現するために、各種エアロゾル (鉱物性、海塩性、硫酸エアロゾル、すすなど) の放出量データの整備を行い、数値モデルにより分布を再現する。</p>		

また、大気中のエアロゾルの光学特性、エアロゾルで覆われた積雪面での反射率の変化については(1)及び(2)に関連した研究を通して得られるパラメータ化を用いて、本研究で新たに考慮したエアロゾルの効果が放射強制力に与える影響及びエアロゾル-雪氷相互作用に伴う大気循環の変化に関する感度を評価する。

### 3. 研究の内容・成果

#### (1) 地表面での放射とエアロゾル特性の観測

平成17~18年度にかけエアロゾルの光学特性測定システムの開発を行い、平成19年度は更なるシステム改良を行った。加湿器にナフィオンを採用することで乾燥状態から湿度上昇時にスムーズに測定が行えるようにシステム改良することができた。

湿度特性の測定データの蓄積を行った。また、観測点毎に測定期間の後方流跡線解析を実施することで測定時の空気塊の起源を推定し、蓄積したデータの整理を行った。

エアロゾル散乱係数の湿度特性の指標となる相対湿度  $RH=80\%$  時の growth factor  $f(80\%)$  に着目し、測定結果とエアロゾルモデルの海塩 (SS) モデルとダスト (ADEC-2) モデルとの比較を行った。過去のエアロゾル全球シミュレーションで使用されていた粒径  $r$  を基準とした growth factor  $r_e/r_{e,dry}(80\%)$  において海塩 (SS) モデルの値は  $r_e/r_{e,dry}(80\%)=2.0$  である。この値と比較すると南鳥島の測定結果を反映させた SS モデルでは  $r_e/r_{e,dry}(80\%)=1.38, 1.37$  と小さい結果であった。

後方流跡線解析から海洋性エアロゾルの測定結果であると考えられる2006年8月26日の南鳥島の測定値と黄砂飛来時2007年3月31日の北京での測定値から growth factor  $f(RH)$  のモデル化を行った。モデル化した growth factor  $f(RH)$  の結果を海塩 (SS) モデルとダスト (ADEC-2) モデルに反映させ粒径  $r$  を基準とした growth factor  $r_e/r_{e,dry}$  のモデル化を行い、全球エアロゾル輸送モデル Model of aerosol species in the global atmosphere (MASINGAR) に組み込めるようにした。

#### (2) エアロゾル-雪氷相互作用に関する研究

平成17-18年度の研究期間では札幌における放射収支と積雪観測結果を解析し、大気エアロゾルが雪氷面に沈着する過程を粒径毎に調べ、すすやダストといった不純物がアルベド低下を引き起こしている効果を定量的に見積もった。また、それらのデータを用いて、全球エアロゾル輸送モデルMASINGARに組み込むための積雪アルベド物理モデルを開発した。

平成19年度は気候モデルの中で用いることのできる積雪アルベド物理モデルを高度化し、札幌における2003/2004年冬期の積雪断面観測データ、積雪サンプルから求めた積雪不純物（鉍物性ダスト、黒色炭素、有機性炭素）濃度データ、放射収支観測データを用いてモデルの精度を検証し、積雪不純物による放射強制力を求めた。

積雪アルベド物理モデルは積雪粒径、不純物濃度、太陽天頂角、日射量直達散乱比から可視域及び近赤外域のアルベドを計算するモデルである。このモデルに対して、積雪中不純物の吸湿性（湿度依存性）の導入、及びダスト光学パラメータの改良を行った。改良後のモデルの精度を検証するため、札幌における積雪断面観測による積雪粒径、積雪サンプルから求めたダスト、黒色炭素、有機性炭素濃度データを用いてアルベドを計算し、放射収支観測から求めた実測値と比較した。その結果、アルベド計算値は可視域ではやや過大評価、短波長域では良く一致、近赤外域ではやや過小評価となった。観測値と計算値の相関係数は可視域で0.926、近赤外域で0.756であった。

上記積雪アルベド物理モデルを用いて、積雪不純物の有無によるアルベドの違いを計算した結果、積雪不純物によるアルベド低下量は可視域の方が近赤外域よりも数倍大きく、12-3月の4ヶ月間の平均アルベド低下量は、可視域が-0.111、近赤外域が-0.033、短波長全体では-0.085であった。この短波長域のアルベド低下量と毎日の日積算日射量から、積雪不純物による期間全体の局所的な放射強制力を計算した結果、 $10 \text{ W m}^{-2}$  の加熱であった。

#### (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

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。

エアロゾルの吸湿性が放射強制力に及ぼす影響の実験では、硫酸塩、黒色炭素、有機炭素、海塩、鉍物ダストの各種エアロゾルを扱った。硫酸塩エアロゾルの湿度依存性は Kiehl et al. (2001) 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) の値を用いる。鉍物ダストエアロゾルの光学特性にはADEC-2モデル (Aoki et al., 2005)

を用いる。このモデルを用い、5年の数値実験を行った。実験では相対湿度の上限を0%、50%、90%とした場合と、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 $-0.54 \text{ W m}^{-2}$ 、光学特性が変化する場合 $-1.48 \text{ W m}^{-2}$ 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。

表 1. (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  $\text{W m}^{-2}$ 。誤差は 1 標準偏差。

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

エアロゾルの雪氷面への沈着による雪氷アルベド変化の放射強制力への影響を調べる実験では、MASINGARの大気大循環モデル部分の陸面過程モデルに吸収性エアロゾル（黒色炭素及び鉱物ダスト）の沈着量と積雪粒径、太陽天頂角によって積雪アルベドを求める物理的モデルを取り入れ、吸収性エアロゾルの有無による積雪アルベドの変化が放射強制力に与える影響を数値実験によって定量的に評価した。数値実験は15年間の積分結果を解析した。実験では、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た。

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求めた結果、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Whole skyで $+0.42 \pm 0.35 \text{ W m}^{-2}$ 、clear skyでは $+1.04 \pm 0.20 \text{ W m}^{-2}$ となった。これ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。

表 2. 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  $\text{W m}^{-2}$ 。誤差は 1 標準偏差。

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

#### 4. 考察

##### (1) 地表面での放射とエアロゾル特性の観測

相対湿度RH=80%時のgrowth factor  $f(80\%)$ の測定結果と海塩 (SS) モデルとダスト (ADEC-2) モデルをそれぞれaccumulation model (ACC) とcoagulation model (COA) において計算した粒径 $r$ を基準としたgrowth factor  $r_e/r_{e,dry}$ との比較を行った。南鳥島では $f(80\%)=1.85$ であり、この時のSS-ACCとSS-COAの $r_e/r_{e,dry}(80\%)$ はそれぞれ1.38, 1.37である。これらの値は過去にエアロゾル全球シミュレーションで使用されていた海塩 (SS) モデルによる $r_e/r_{e,dry}(80\%)=2.0$ と比べ値が小さい結果であった。宮古島では、中国大陸 (中国北東部を経由) からの空気塊による測定結果より中国北東部と日本を経由した空気塊による測定結果の $f(80\%)$ 、 $r_e/r_{e,dry}(80\%)$ が大きくなる傾向があり、空気塊の違いによる差がみられた。黄砂飛来時の測定例では、北京において $f(80\%)=1.25$ 、ADEC-2-ACC、ADEC-2-COA

ではそれぞれ  $r_e/r_{e,dry}(80\%)=1.11$ ,  $1.10$ であった。また、黄砂飛来時のつくばでは  $f(80\%)=1.24$ 、ADEC-2-ACC、ADEC-2-COAではそれぞれ  $r_e/r_{e,dry}(80\%)=1.11$ ,  $1.10$ の事例と  $f(80\%)=1.04$ 、ADEC-2-ACC、ADEC-2-COAはともに  $r_e/r_{e,dry}(80\%)=1.02$ の事例があり吸湿性が若干異なる結果が得られた。このことは組成の違いにより値に差があるのではないかと考えられる。

後方流跡線解析から海洋性エアロゾルの測定結果であると考えられる南鳥島での測定値と黄砂飛来時の北京での測定値から growth factor  $f(RH)$  のモデル化を行い、その結果を海塩 (SS) とダスト (ADEC-2) モデルに反映させ粒径  $r$  を基準とした growth factor  $r_e/r_{e,dry}$  のモデル化を行った。この結果は、従来使用されている海塩 (SS) モデルと比べ湿度依存性の低いモデルとなった。今後、モデル化された湿度特性を全球エアロゾル輸送モデル MASINGAR に組み込み、従来の海塩 (SS) モデルと今回開発したモデルとの湿度依存性による放射強制力への影響評価を行う必要がある。

## (2) エアロゾル-雪氷相互作用に関する研究

平成17-18年度に開発した積雪アルベド物理モデルを組み込んだ全球エアロゾル数値モデル MASINGARによる気候影響評価では積雪面に沈着した大気エアロゾルの効果が大気エアロゾルの放射強制力に匹敵する大きさであるとの結果が見積られた。このため平成19年度は積雪アルベド物理モデルを現場データによって検証し、さらに精度向上のための改良を行った。

積雪アルベド物理モデルによるアルベド計算値と実測値の比較結果は、可視域でやや過大評価、近赤外域ではやや過小評価したものの、短波長域では結果的に良く一致した。積雪アルベド物理モデルが積雪1層モデルで、実際には積雪層は鉛直方向に不均一であることを考えると、良く一致していると言える。可視域のアルベドは不純物濃度に大きく依存し、近赤外域では積雪粒径に大きく依存することが理論的に分かっていることから、可視域におけるモデルの過大評価は不純物成分の光学パラメータにおける問題、近赤外域における過小評価は積雪粒径の観測方法における問題を検討する必要がある。

札幌における積雪アルベド物理モデルを用いた積雪不純物による放射強制力の計算結果は、12-3月の4ヶ月間の平均値で  $10 \text{ W m}^{-2}$  の加熱 (アルベド低下量:  $-0.085$ ) と大きく、積雪不純物が積雪面放射収支に大きな影響を与えているといえる。アルベド低下への積雪不純物の各成分別の寄与では、12-2月は黒色炭素による寄与が高く、黄砂のあった3月はダストによる寄与が大きいことが分かった。

## (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

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。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。

エアロゾルの沈着による積雪アルベド変化の影響の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  $+0.42 \pm 0.35 \text{ W m}^{-2}$  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。

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、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。この値は、二酸化炭素による  $+1.6 \text{ W m}^{-2}$  程度の加熱効果のおよそ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、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。