

地球一括計上

課題名	吸収性エアロゾルが大気・雪氷面放射過程に与える影響のモニタリングに関する研究		
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21－25年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	113,307千円 (うち25年度 20,920千円)
研究体制	<p>(1) 東アジア域における大気中のエアロゾルの地上観測によるモニタリング (国土交通省気象庁気象研究所)</p> <p>(2) 積雪不純物濃度及びアルベドの地上観測及び衛星リモートセンシングによるモニタリング (国土交通省気象庁気象研究所、一部北海道大学低温科学研究所へ研究委託)</p> <p>(3) 全球エアロゾル輸送モデルによる吸収性エアロゾルと雪氷面アルベド変動のシミュレーション (国土交通省気象庁気象研究所)</p>		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>光を吸収する性質を持つ「吸収性エアロゾル」(鉱物ダストや黒色炭素)は温室効果ガスと同様に大気を加熱し、また、雪氷面に沈着してアルベド(反射率)を下げることで地球温暖化を加速させる方向に働くため、気候システムにとって重要な要素である。本課題では地球上で最も吸収性エアロゾルの発生量が多い東アジア域に地上観測点を配置し、吸収性エアロゾルの空間・時間変動をモニタリングする。さらに、それらが雪氷面へ沈着する実態とそれによるアルベド(反射率)変動を、地上観測と衛星リモートセンシングによりモニタリングする。これらの観測値を用いてエアロゾル輸送モデルを検証・高度化し、同モデルの計算結果を用いて観測できない時間帯や空間へ地点観測をスケールアップし全球のエアロゾル沈着量、雪氷面アルベドのモニタリングを行う。</p> <p>地球観測の推進戦略(平成16年12月)では、地球温暖化にかかわる事象の全球かつ包括的な把握のため、気候変動に影響を与えるエアロゾルの物理・化学特性の観測や気候変動に脆弱な雪氷圏等の地域での温暖化影響の観測の必要性が指摘されており、本研究はこれに応える監視システム構築のための研究である。大気中の吸収性エアロゾル量や雪氷圏における積雪汚染とアルベドの実態把握を行うためには中長期的な観測を行う必要があり、また、今後の吸収性エアロゾルの排出規制につながる研究課題である。更に、吸収性エアロゾルによる積雪アルベド低下の気候変動への影響は、人類の活動の寄与が大きい可能性があるにもかかわらず定量的にはほとんど明らかになっていない。このため、雪氷面アルベドの物理的モデルを気候モデルに組み込み、シミュレーションによって定量的にこの効果を評価することは重要な課題である。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究の目的は、地球温暖化を加速する効果を持つ吸収性エアロゾルの分布、雪氷面への沈着量、それによって引き起こされる雪氷面アルベド変動をモニタリング(監視)すること及びエアロゾル輸送モデルによって気候への影響評価を行うことである。</p> <p>これらの目的を達成するため、中国、日本の特徴ある地点に放射計及び光学特性測定装置(重点地点のみ)に配置して連続観測を実施し、吸収性エアロゾルに着目してエアロゾルの空間・時間分布の実態を明らかにする。同時に下向き放射量を測定しエアロゾルの放射量への影響を監視する。また、吸収性エアロゾルが雪氷面へ沈着する実態とそれによるアルベド変動を、地上観測と衛星リモートセンシングにより監視する。その結果を利用して、積雪アルベドを物理的に計算するための積雪物理モデルを高度化し、さらに積雪変態過程を計算できる積雪変態・アルベドプロセスモデルを開発する。また、衛星リモートセンシングによって広域の積雪不純物濃度とアルベドの監視を行う。</p> <p>一方、吸収性エアロゾルによる積雪アルベド低下の気候変動への影響は、人類の活動の寄与が大きい可能性があるにもかかわらず定量的にはほとんど明らかになっていない。このため、雪氷面アルベドの物理的モデルを気候モデルに組み込み、シミュレーションによって定量的にこの効果を評価する。</p>		

### 3. 研究の内容・成果

前項にて述べた目的を果たすため、3つのサブ課題に分けて研究を実施進めて成果を得た。詳細は以下の通り。

#### (1) 東アジア域における大気中のエアロゾルの地上観測によるモニタリング

精度が高く、且つ、均質な放射計観測データを得るためには、放射計の検定を定期的に行う必要がある。このため、直達分光日射計の Langley 検定用データの取得が比較的容易なハワイにあるマウナ・ロア観測所 (NOAA) において準器の検定観測を、毎年 11 月頃に実施した。検定後の準器を用いて、各地 (北京、青島、福岡、つくば、宮古島、南鳥島) に展開したスカイラジオメータとの間で比較検定を行った。また、直達日射計、全天日射計、赤外放射計についても同様に行った。

北京、青島、福岡、つくばに設置しているスカイラジオメータのデータ解析を行い、エアロゾルの光学的厚さ、オングストローム指数、一次散乱アルベドの時系列を調査した。特に、連続観測が行われた宮古島、福岡とつくばについては、明瞭な季節変動を確認した。

福岡と北京に設置しているエアロゾル散乱係数と吸収係数測定装置は、ほぼ連続測定を実施することができ、データ解析を行った。北京と青島についてのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数は明瞭な季節変化を得られなかったが、一次散乱アルベドは夏季にやや大きい傾向があることが分かった。

本課題によって地上でのエアロゾル光学特性推定のためのスカイラジオメータ、エアロゾル散乱係数、吸収係数測定装置の検定法、精度維持法が確立された。これによりエアロゾルの光学特性の地域特性、長期変動を監視できるようになった。

#### (2) 積雪不純物濃度及びアルベドの地上観測及び衛星リモートセンシングによるモニタリング

積雪中の吸収性エアロゾル (積雪不純物) はアルベドを低下させることにより、融雪を早める効果を持つことから、正のフィードバックが働くことにより地球温暖化を増幅する効果をもっている。このため、①積雪不純物濃度、②その長期的な変動傾向、③アルベド変化や融雪に対する寄与、という3つの点を明らかにする必要がある。このため、(1) 札幌と芽室 (北海道) における黒色炭素 (black carbon: BC) やダスト等の積雪不純物濃度の監視、(2) 積雪アルベド物理モデルの高度化、(3) 積雪変質・アルベドプロセスモデル (Snow Metamorphism and Albedo Process model: SMAP) の開発、(4) グリーンランドにおける積雪物理量の衛星リモートセンシングを行った。

(1) では、2007-2013年の札幌における積雪中元素状炭素 (~BCと見なす)、有機炭素、ダスト濃度を長期解析した結果、12-2月の涵養期には比較的低濃度、3-4月の融雪期には高濃度という季節変化が観測された。一方、この6冬期間に札幌では顕著な経年変化のトレンドは見られなかった (図1)。(2) では既存の積雪アルベドモデルを完全物理モデル化し、積雪粒径や不純物濃度等の任意の積雪構造に対して、可視・近赤外域のアルベド及び積雪中短波放射加熱量を計算できるようにした。このモデルを

(1) の観測データで検証した結果、各波長域のアルベド計算値が高精度であることが確認された。(3) で開発したSMAPは積雪層構造を計算するための鉛直一次元の積雪変質モデルで、(2) の積雪アルベド物理モデルを組み込んである。このモデルは圧密、融解・再凍結、水分移動、積雪変態などの積雪物理過程を考慮して、積雪の熱収支・質量収支を計算することができる。このモデルを(1) の札幌の観測データで検証した結果、積雪粒径、積雪深、雪質等の物理量をよく再現できることが確認された。また、積雪不純物の効果を調べるための感度実験から、札幌の融雪が積雪不純物によって2週間以上早められていることが分かった。(4) では、北西グリーンランド氷床上における地上検証観測データを用いて、Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) データから抽出した積雪粒径と積雪中BC濃度の精度を検証したところ、良好な結果が得られた。これを受け、2000-2013年のTerra衛星/MODISデータを用いて、グリーンランド全域における積雪物理量の長期変動を求めた結果、表層積雪粒径は近年 (2009-2012年) の増加が顕著であることが分かった。一方、積雪中BC濃度は衛星から検知できるほど高いものではなかった。その結果、グリーンランドにおいてアルベドを支配しているのは気温変動に伴う積雪粒径であることが示唆された。

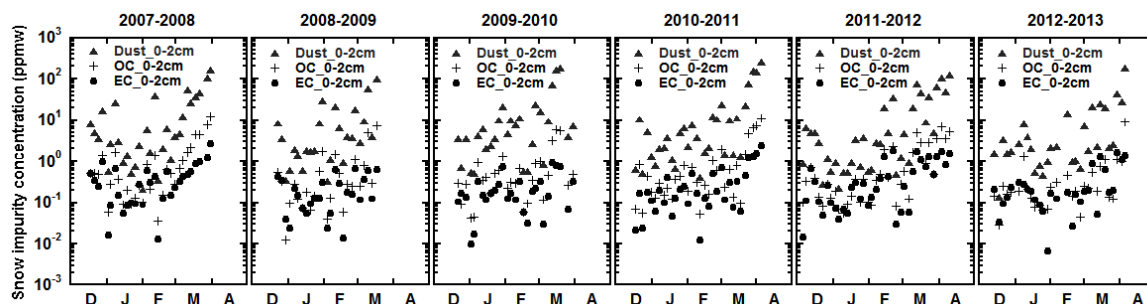


図1 札幌における2007年から2013年の6冬期（12月-4月）における積雪表層（0-2 cm）の元素炭素（黒丸）、有機炭素（プラス）、ダスト濃度（三角）。

(3) 全球エアロゾル輸送モデルによる吸収性エアロゾルと雪氷面アルベド変動のシミュレーション

本サブ課題では光吸収性エアロゾル成分が気候に与える影響を数値モデルによって評価するため、気象研究所の気候モデルを用いた数値シミュレーションによる研究を行った。本研究で用いた全球気候モデルMRI-CGCM3は、気象研究所で開発されている地球システムモデルMRI-ESM1のサブセットであり、大気大循環モデルMRI-AGCM3と、全球エアロゾルモデルMASINGAR mk-2、および海洋大循環モデルMRI.COMが結合されたモデルである（図2）。MASINGAR mk-2は主要な大気中エアロゾル成分として硫酸塩、黑色炭素、有機炭素、海塩、鉱物ダストを扱い、大気大循環モデルMRI-AGCM3によって計算される大気と陸上の状態と、人間の活動によるエアロゾル前駆物質の大気中への放出量データベースから、各エアロゾルの大気中濃度と沈着量を計算する。大気大循環モデルMRI-AGCM3はMASINGAR mk-2によって計算されたエアロゾル濃度から、その大気放射への影響を計算し、大気場の計算に採り入れている。また、新規に開発された陸面過程モデルHALの積雪過程には、本研究課題のサブ課題2で開発された積雪アルベド物理モデルPBSAMを組み込んだ積雪変態・アルベドプロセスモデルSMAPが導入された。この陸面過程モデルHALに全球エアロゾルモデルMASINGAR mk-2で計算された吸収性エアロゾルの沈着量が陸面・海氷上の積雪アルベドに反映させるように全球モデルの改良を行った。これによってエアロゾルモデルによって計算される吸収性エアロゾル沈着と物理的積雪アルベドモデルの直接的な結合が可能となった。

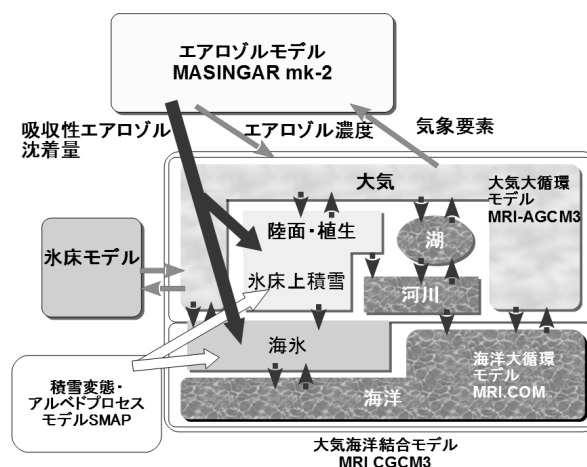


図2 全球気候モデルMRI-CGCM3の模式図。

吸収性エアロゾル成分による気候への影響を調べるため、代表的な吸収性エアロゾル成分である黑色炭素の有無による気候応答を調べる数値実験を実施した。この実験では、①黑色炭素エアロゾルの存在によって特に熱帯の積雲対流活動が強化され、その結果降水量などが世界的に変化すること、②積雲対流活動の変化によって大気大循環場も影響を受けることを示唆する結果が得られた。このような変化の傾向は先行研究による報告とおおよそ整合的である。また、黑色炭素と鉱物ダストの積雪アルベドへの効果を調べる数値実験を行った。黑色炭素と鉱物ダストの両方の影響を同時に考慮した場合、各々の単独の場合を単純に足した効果よりもアルベド変化が大きい。黑色炭素と鉱物ダストの積雪アルベドへの影響は、地表面温度・水循環・海面表層温度などが変化する大気・水・熱循環全体の

変化の効果が顕著であるため、地表面気温に対する影響が積雪のない地域にまで及ぶことが示唆された。本研究で得られた結果は、数値実験に用いる気候モデルに大きく依存する可能性があるものの、光吸収性エアロゾルに対する大気大循環場の応答は局所的なもののみでなく、大気循環全体に影響を与えるものであることを示唆している。

#### 4. 考察

##### (1) 東アジア域における大気中のエアロゾルの地上観測によるモニタリング

マウナ・ロア観測所で直達分光日射計の検定データを取得することにより、非常に安定に且つ精度良く1%以下のバラツキで検定定数を決定できた。しかし、準器の2009年と2012年の検定定数では、340～400nmで約19～41%、500～1020nmで約0.6～5%程度とレンズ劣化の影響により短波長側で大きな経年変化を確認した。このため、精度の良い観測を継続するには、1年に1度程度の定期的な検定定数の決定と比較転写が必要であることが分かった。

スカイラジオメータのデータ解析を気象研究所版最尤法コードMRI-MLMで行い、エアロゾルの光学的厚さ、オングストローム指数、一次散乱アルベドの時系列から次の結果を得た。光学的厚さは、宮古島で夏季に薄く、春季に厚い、福岡とつくばでは冬季に薄く、夏季に厚くなる傾向が見られた。オングストローム指数は、宮古島で夏季に小さい、福岡で春季に小さく、夏季に大きい、つくばにおいては春季に小さくなる傾向を得た。福岡とつくばでは春季にオングストローム指数が小さくなることがあった。これは黄砂による影響と考えられる。一次散乱アルベドは、北京、青島で夏季に大きくなり、宮古島において夏季に小さくなる傾向が見られた。また、福岡とつくばでは一次散乱アルベドが冬季に小さく、夏季に大きくなっていった。

つくばでの光学特性の直接測定データの解析から、2002年以降エアロゾルの消散係数は小さくなり、一次散乱アルベドが増加する傾向が見られた。このことは、吸収性エアロゾルが減少傾向にあることを示唆している。また、吸収係数のオングストローム指数が増加傾向にあることから、吸収性エアロゾルのうち相対的に燃料の燃焼起源のBCで時間が経っていないものが減り、バイオマス燃焼起源や時間経過したBCが増加していることが示唆される。

##### (2) 積雪不純物濃度及びアルベドの地上観測及び衛星リモートセンシングによるモニタリング

2007年から2013年の札幌と芽室における現地観測（積雪分析と全天分光日射計による遠隔測定）から元素状炭素（～BCと見なす）、有機炭素、ダスト濃度の3種類の光吸収性エアロゾルの監視を行った。その結果、札幌では長期変動は見られなかった。また、札幌と芽室の積雪中BCからは、積雪粒子とBCの混合状態が場所や季節によって異なることが示唆された。このことは積雪不純物がアルベドに与える効果をモデル化する際に重要な要素である。

次に、積雪不純物がアルベドに与える効果を定量的に見積もるため、積雪不純物及び積雪粒径の層構造から、アルベドを高精度で計算するための積雪アルベド物理モデルを開発し、太陽光が積雪中のどの深さで吸収されるかという点について調べた。その結果、長波長側（波長 $>1.4\ \mu\text{m}$ ）の放射量の大半が表面付近の積雪によって吸収され、それより短波長側ではより深い層で吸収されるが、その程度は積雪粒径や不純物濃度によって大きく異なることが分かった。このことは融雪期に積雪粒径が短時間で増加し、全層が効果的に融解する事実と関係していると考えられる。積雪アルベド物理モデルを組み込んだ積雪変質モデルSMAPによって、積雪不純物が融雪に与える効果に関する感度実験を行った。2007-2009年の2冬期間の札幌において、積雪中のBCとダスト濃度を入力して計算した積雪深（SMAP CTL）と不純物なしで計算した積雪深（SMAP PURE）の時間変化を図2に示す。札幌では積雪不純物によってこれら2冬期間の積雪期間は、それぞれ19日、16日早められていたことが分かった。比較的寒かった2007-2008年冬期は主に融解期における不純物効果が大きく、暖冬だった2007-2008年冬期は1月から不純物効果が顕在化していた。

衛星リモートセンシングによって近年融解が顕著なグリーンランドにおける積雪物理量の変化を調べた。始めに北西グリーンランド氷床上における地上観測データを用いて、MODISセンサーデータから抽出した積雪粒径と積雪中BC濃度を検証した。その結果、Terra/MODISセンサーの感度劣化によって積雪中BC濃度は過大評価されているものの、その他の積雪物理量については概ね良好な精度で抽出されていることが確認された。これを受け、2000-2013年の表層積雪粒径と積雪中BC濃度を抽出し、長期変動を解析した結果、近年に積雪粒径の増加が顕著で、特に表面融解を記録した2012年にはグリーンランド全域で大きな値を記録した。また、アルベドとの関連を調べた結果、アルベド変動には積雪中のBCは大きく寄与しておらず、気温変化に伴う積雪粒径変化が大きく関与していることが示唆された。

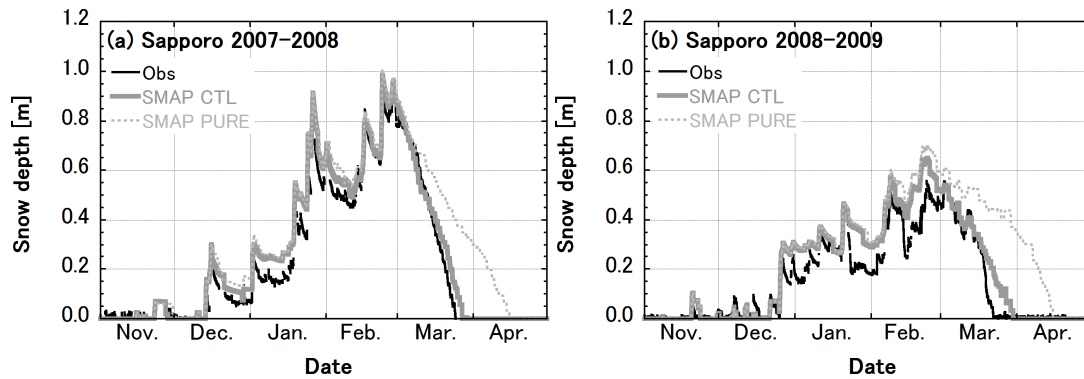


図2 札幌における (a) 2007-2008年冬期、(b) 2008-2009年冬期間の積雪深の変化（黒色実線）及び、SMAPによって計算した不純物あり（CTL、灰色太実線）と不純物なし（PURE、灰色点線）の条件に対する積雪深の変化。

(3) 全球エアロゾル輸送モデルによる吸収性エアロゾルと雪氷面アルベド変動のシミュレーション  
本研究による黒色炭素エアロゾルの有無による気候応答数値実験では、大気中のBCエアロゾルによる気候への影響は熱帯域の対流活動を通じて大気場全体に及んでいる可能性を示唆している。このような変化の傾向は先行研究による報告とおおよそ整合的ではあるが、大気大循環場の応答は数値実験に用いる気候モデルに大きく依存する可能性がある。

また、この数値モデル実験結果には様々な不確実性が含まれていることを考慮する必要がある。まず、BCの放出量および大気中濃度には未だに多くの不確実性が含まれる。Bond et al. (2013)では現在使用されている放出量インヴェントリを3倍程度多くする必要があると報告されている。また、BCエアロゾルの光学的特性は、その形状や、吸湿性をもつ他のエアロゾル成分との混合によって変化することが知られているが、全球数値モデルではそれらを扱うことは出来ていない。さらに、エアロゾルの間接効果、特に氷晶雲としての作用は、その微物理的なプロセスや数値モデルでの表現に非常に大きな不確実性がある。本実験結果ではBCエアロゾルは積雲対流活動に大きな影響を与えていることが示唆されているが、積雲対流のパラメタリゼーションは大気大循環モデルによって差異が大きいことが知られている。このため、BCエアロゾルの有無に対する積雲対流活動の応答も、異なる気候モデルによっては大きな違いが生じる可能性がある。BCエアロゾル以外のエアロゾルによる気候モデルの応答や、直接・間接効果のプロセスを分離して評価するなど、より詳細な感度実験を行うことによって、吸収性エアロゾルの気候への影響評価における不確実性を低減させていく必要がある。

光吸収性エアロゾルの沈着による積雪アルベド変化を通じた気候影響評価の感度実験では、BCと鉱物ダストの両方の影響を同時に考慮した場合、おのおのの単独の場合を単純に足した効果よりもアルベド変化が大きい。これはこれまでに用いていた積雪アルベド2層モデルと同じ傾向を示しており、積雪中の不純物量と積雪アルベドの非線形的な関係によるものと考えられる。また、BCと鉱物ダストの積雪アルベドへの影響は、積雪アルベドの変化が地表面温度・水循環・海面表層温度などの変化をもたらし、それが積雪アルベドに変化を与えるフィードバックの効果が顕著であるため、積雪のない地域の地表面気温の影響が及ぶことが示唆された。気候へのフィードバック効果を考える場合には海洋表層温度や海水の効果も重要になるため、地球システムモデルに海洋大循環モデルを結合させた状態で実験を行うことが今後の課題である。本研究で用いられた全球気候モデルは、次期の気候モデル比較実験CMIP5で用いられており、これは吸収性エアロゾル沈着の積雪アルベドへの効果を取り入れた全球モデルとして他の多くの気候モデルに先駆けているといえる。

## 5. 波及効果

- ・本課題で確立したスカイラジオメータの校正法で値付けしたスカイラジオメータをGOSAT(いぶき)の検証サイトに設置し、エアロゾルの光学特性のデータを提供した。データはコラムCO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>の推定精度改善に役立った。

- ・積雪アルベド物理モデルとSMAPは気象研究所の地球システムモデルへ組み込まれ、IPCC AR5のための気候シミュレーションにおいて使用された。

- ・SMAPは北海道農業研究センター芽室拠点で行われている、融雪期に耕作を早く行うための融雪剤散布の定量的効果の研究(数値実験)にも採用されることになった。

- ・札幌と芽室における全天分光日射計観測データは、宇宙航空研究開発機構との共同研究であるGCOM-C衛星/SGLIセンサーによる積雪物理量の衛星リモートセンシングの改良及び検証のために使用された。また、本研究で開発されたアルゴリズムは同センサーの次期雪氷プロダクト用アルゴリズム

でも用いられる予定である。

・気候変動に関する政府間パネル（IPCC）における第5次結合モデル比較実験 CMIP5 への気象庁から参加モデルである地球温暖化地球システムモデル MRI-ESM1 のエアロゾルモデルの開発と気候モデルの数値実験およびその解析を行うことによって、温暖化予測モデルの高度化に貢献している。MRI-AGCM3 と全球エアロゾルモデル MASINGAR mk-2 は、気象庁による黄砂情報提供業務における黄砂予測モデルとして平成26年度中に業務運用される予定である。