

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

(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

気象庁気象研究所

環境・応用気象研究部 第1研究室

田中泰宙

平成21～25年度合計予算額 113,307千円 (全課題分)
 (うち、平成25年度当初予算額 20,920千円 (全課題分))

[要旨]

光吸収性エアロゾルが地球の気候に及ぼす影響を数値実験によって評価するため、気象研究所気候モデルMRI-CGCM3のエアロゾルに関わるプロセスの開発・改良と、数値実験による気候応答を調査した。全球気候モデルMRI-CGCM3は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。

数値実験では、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黒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。実験では、黒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全球的に変化することが示唆された。また、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も示唆された。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、黒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。黒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。黒色炭素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を通じて地表面温度・水循環・海面表層温度などが変化するフィードバック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。

[キーワード]

エアロゾル、黒色炭素、鉱物ダスト、放射強制力、気候モデル、化学輸送モデル

1. はじめに

大気エアロゾルは大気汚染物質として知られているが、局所的な環境問題を引き起こすのみでなく、地球の受け取るエネルギー収支に影響を及ぼし、地球全体の気候に大きな影響を与えてい

る。まず、大気エアロゾルは短波および長波の大気放射を散乱・吸収することによって放射エネルギーの収支を直接的に変化させる効果（直接効果）をもつ。また、エアロゾル粒子は雲の凝結核としてはたらく。このためエアロゾル粒子の数が増えると雲粒の数と大きさが変化する。このことは雲の光学的特性を変化させ、また雲粒が雨粒に変化する速度を変化させるため、降水にも影響をもたらす。これらによってエアロゾルは雲を通じて間接的に放射収支を変化させる（間接効果）。

さらに、光を吸収する性質をもつエアロゾルが存在すると、大気鉛直方向の安定性にも変化をもたらす。黒色炭素などの光吸収性のエアロゾル（以下、総称して「吸収性エアロゾル」という。）は大気中で太陽放射を吸収して上空の大気を暖める一方、地表に到達する太陽放射は減少するため、大気下層は冷却される。このため大気の安定性が変化し、雲の生成や大気循環に影響をもたらす。このことはエアロゾルの準直接効果と呼ばれている（e. g., Hansen et al., 2001）¹⁾。このような効果のため、吸収性エアロゾルは大気を加熱し、地球温暖化を促進すると考えられている。その影響はこれまでの研究事例では二酸化炭素に次ぐ大きさであるともされている（e. g., Jacobson, 2002）²⁾。IPCC 第4次報告書³⁾では、黒色炭素による放射強制力は $+0.2 \sim +0.9 \text{ W m}^{-2}$ の範囲にある。しかしながら、最近の Bond et al. (2013)⁴⁾ のレビューでは、現在の数値モデルによる黒色炭素の影響は過小評価されており、観測から得られる推定では影響はその3倍程度大きい、と論じている。

吸収性エアロゾルによる大気放射への影響は地球を加熱する効果をもつが、その作用は温室効果気体とは異なる。温室効果気体は主に長波放射を吸収するのに対して、吸収性エアロゾルは短波放射を吸収および散乱する。このため、吸収性エアロゾルは大気を加熱するとともに地表に届く太陽放射を減少させる。このような加熱・冷却効果のため、吸収性エアロゾルは大気の静的安定度を変化させ、大気の力学的循環や水循環を変化させる可能性があることが近年の研究によって報告されている。Wang (2007)⁵⁾ は大気大循環モデルを用いて、黒色炭素は熱帯の積雲対流の活動が変化させる影響があると論じている。また黒色炭素がインドモンスーンにもたらす影響は近年注目を集めている（e. g., Meehl et al., 2008）⁶⁾。しかし、吸収性エアロゾルとしての黒色炭素による大気循環の応答は用いる数値モデルに依存すると考えられる。そのため、吸収性エアロゾルを扱う気候モデルでは、その放射効果に対するモデルの応答を定量的に調査することが必要である。

また、吸収性エアロゾルが雪氷面上に沈着すると、積雪に不純物として混合し、その光を吸収する性質によって積雪面の反射率（アルベド）を低下させ、積雪面を加熱させる効果をもつ（Wiscombe and Warren, 1980）⁷⁾。加熱された積雪は融解しやすくなり、融解した積雪はさらにアルベドを低下させて加熱作用を加速する、という正のフィードバック効果（アイス・アルベドフィードバック）をもつため、積雪不純物として作用する吸収性エアロゾルの沈着の効果は積雪域では非常に大きな影響をもつと考えられている。Hansen and Nazarenko (2004)⁸⁾ 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 $+0.10 \sim +0.25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ と、無視できないものであると論じている。このような研究を受けて、IPCC 第4次報告書²⁾においては、黒色炭素による積雪アルベドの影響を $+0.1 \pm 0.1 \text{ W m}^{-2}$ と推定している。しかしながら、この推定は積雪アルベドの扱いを非常に単純化したモデルを用いて行われたものである。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。このため、Jacobson (2004)⁹⁾ や Flanner et al. (2009)¹⁰⁾ などの研究では、積雪アルベドへの黒色炭素沈着の影響をより詳細に扱う数値モデルを用いている。しかし、吸収性エアロゾルとして黒色炭素と鉱物ダストを同時に扱う積雪アルベド数値モデルによる研究例は希であり、定量的評価は依然不十分である。そのため、このプロセスを表現でき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

本サブ課題では、吸収性エアロゾルが直接・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態を明らかにすることで、地球温暖化予測の精度向上に資することを目的とする。本サブ課題では、気象研究所においてこれまでに開発された全球エアロゾルモデルと結合された統合的な気候モデルを用いて、エアロゾルの大気放射への影響と積雪汚染による効果を定量的に評価する。この気候モデルは、気象研究所地球システムモデルのサブセットとなる大気・海洋・エアロゾル結合モデル MRI-CGCM3 (Yukimoto et al., 2012)¹¹⁾ (以下、「MRI-CGCM3」という。) である。このモデルを用いて数値シミュレーションを行い、黒色炭素エアロゾルの放射効果に対する気候モデルの応答を評価する。

3. 研究方法

本サブ課題では、気象研究所の地球システムモデル MRI-ESM1¹²⁾ (以下、「MRI-ESM1」という。) のサブセットである MRI-CGCM3 を用いて、吸収性エアロゾルの大気放射と積雪汚染によるアルベド低減効果による放射収支への影響を評価する。全球エアロゾルモデルによる吸収性エアロゾルの空間分布・沈着分布をより現実近づけるためのモデルの改良を行い、大気中の吸収性エアロゾルの放射への効果と沈着による積雪アルベドへの影響の評価を MRI-CGCM3 を用いて気候応答を調査する実験を行った。

(1) 数値モデルの概要

気象研究所は地球温暖化予測のための全球気候モデルである MRI-ESM1 を開発している。このモデルは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 に参加し、数値シミュレーションによる温暖化変動予測に貢献している。MRI-ESM1 は、温室効果気体やエアロゾルの排出シナリオから直接温暖化予測を行うことを可能とするため、炭素循環モデル、オゾン・エアロゾルなどの

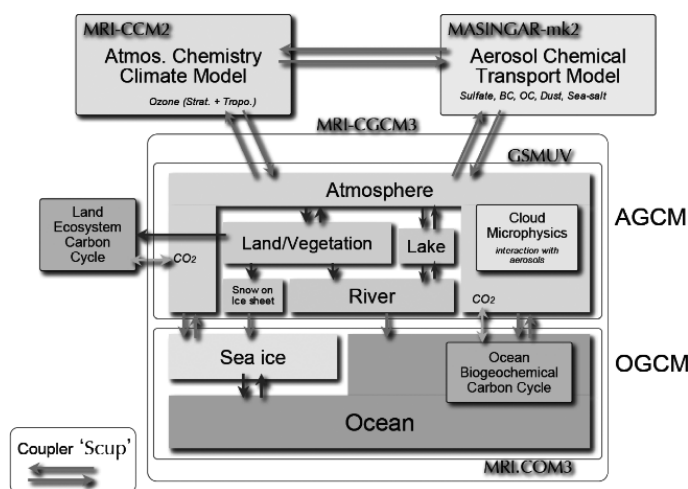


図 1. 地球システムモデル MRI-ESM1 の概要図

化学輸送モデルを大気・海洋結合全球気候モデルと結合することにより、地球の気候システムを構成する気候要素（大気・海洋・陸面・雪氷・生態）間の物質交換と輸送を取り扱うことを目指したモデルである(Yukimoto et al., 2011; Adachi et al. 2013)¹²⁾¹³⁾。モデルの構成要素は、気象研究所で開発されたカップラーScup (Yoshimura and Yukimoto, 2008)¹⁴⁾を用いて結合されている(図1)。このカップラーの利点は、各モデルが並列に動作し効率良く計算できること、使用目的によって結合の組み合わせを柔軟に変更できることが挙げられる。本研究では、MRI-ESM1のサブセットとして、大気大循環モデルMRI-AGCM3(以下、「MRI-AGCM3」という。)と全球エアロゾルモデルMASINGAR mk-2(以下、「MASINGAR mk-2」という。)を結合させたモデルと、さらに海洋大循環モデルMRI.COMを結合させたMRI-CGCM3(Yukimoto et al. 2012)¹¹⁾を用いた。MRI-AGCM3は、エアロゾルモデルMASINGARで計算された大気中エアロゾル分布と吸収性エアロゾルの沈着フラックスを用いて、大気放射過程においてエアロゾルの放射収支への直接的な影響、および雲物理過程において低層雲・氷晶雲に凝結核・氷晶核として作用する間接効果を大気放射伝達過程に、また陸面過程モデルHALにおいて光吸収性エアロゾルの沈着を積雪面のアルベド過程に用いる。

本研究で用いるMASINGAR mk-2は、気象研究所で開発を進めてきた全球エアロゾル輸送モデルModel of aerosol species in the global atmosphere (MASINGAR)¹⁵⁾¹⁶⁾をベースとして、MRI-ESM1の一部として大気大循環モデルと結合し、相互作用するように改良を加えたものである。このモデルでは、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(BC)、有機炭素(OC)、海塩、鉱物ダストが含まれている。黒色炭素および有機炭素と硫酸塩の前駆気体(SO₂)の大気への排出量はIPCC第5次報告書におけるシナリオ用の排出源データベースRCP(Lamarque et al., 2010)¹⁷⁾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を用い、気象条件に基づいて放出量を計算する。

MASINGAR mk-2によって計算される各種エアロゾルの大気中濃度は大気大循環モデルにカップラーScupを通じて受け渡され、大気放射の計算と凝結核・氷晶核としての雲過程のパラメタリゼーションに用いられる。また、全球大気モデルによって計算される積雪アルベドの不純物濃度として、黒色炭素と鉱物ダストの乾性および湿性沈着量を大気大循環モデルに受け渡す。大気大循環モデルに含まれる陸面過程モデルHALには、吸収性エアロゾルの沈着が積雪不純物として積雪アルベドを変化させる効果が導入されている。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(Aoki et al. 2011)¹⁸⁾を組み込んだ積雪変態・アルベドプロセスモデルSMAP(Niwano et al., 2012)¹⁹⁾が導入されている。このHALに対して、MASINGAR mk-2でシミュレートされる吸収性エアロゾル(モデル中では、黒色炭素および鉱物ダスト)の沈着フラックスが受け渡されることによって、エアロゾルモデルによってシミュレートされた吸収性エアロゾル沈着の積雪アルベドへの直接的な結合が実現されている。

本研究では、MRI-CGCM3においてエアロゾルによる直接効果と積雪アルベド汚染による影響を評価するための数値モデル開発を行った。MRI-CGCM3の放射過程において、硫酸塩、黒色炭素、有機炭素、海塩、鉱物ダストエアロゾルが存在する大気と、あるエアロゾル種が存在しない大気での放射伝達過程を計算し、それぞれの放射収支を計算することによって、エアロゾル直接効果

の計算が可能となるようにモデルを改良した。本研究では、これによって吸収性エアロゾルによる直接効果の大きさを評価した。

(2) 数値シミュレーションの設定

① 大気中黒色炭素エアロゾルの大気放射への影響

大気中の黒色エアロゾルの気候への影響を求めため、本研究ではエアロゾルおよびその前駆物質の放出量を 2005 年の現在気候に固定した数値実験（標準実験）と、黒色炭素が大気中に存在しないと仮定した仮想的な大気での実験（noBC 実験）の対照実験を行い、それぞれの差を求めることによって、大気中の黒色炭素エアロゾルの気候への影響を評価した。現在気候における温室効果気体濃度および大気微量成分の排出量は RCP インベントリ (Lamarque et al., 2010)¹⁷⁾ に基づいている。このインベントリでは、黒色炭素の全球での 1 年間の放出量は 8.3 Tg yr^{-1} であり、このうち 5.7 Tg yr^{-1} が人為起源、 2.6 Tg yr^{-1} がバイオマス燃焼による放出である。MRI-CGCM3 では、モデルの解像度を大気大循環モデルは約 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ (320×160 格子)、エアロゾルモデルは約 $1.8^\circ \times 1.8^\circ$ (192×96 格子)、海洋大循環モデルは $1^\circ \times 0.5^\circ$ と設定し、大気モデル及びエアロゾルモデルは地表から 0.01 hPa までの高度を 48 層に分割した。

② 吸収性エアロゾル沈着による積雪アルベド低下の影響

本実験では、吸収性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ため、(1) 黒色炭素および鉱物ダストエアロゾル沈着の積雪アルベドへの効果を考慮した場合（標準実験）と、(2) 黒色炭素の沈着が全くないと仮定した場合（no BC沈着実験）、(3) 鉱物ダストの沈着が全くないと仮定した場合（no Dust沈着実験）、および(4) 黒色炭素・鉱物ダストとも沈着しないと仮定した実験（no aerosol 沈着実験）を行う。シミュレーションは 13 年間分の積分をそれぞれの条件に対して行い、3 年分をスピニアップとして 10 年間分を解析対象とした。実験 1 と 2 の差から黒色炭素エアロゾル沈着の影響、実験 1 と 3 の差から鉱物ダストの影響、実験 1 と 4 の差から黒色炭素および鉱物ダストの影響を求め。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。また、本実験では海面水温の変化を考慮するため、海面水温はスラブ海洋モデルによってモデル内で計算を行った。

4. 結果・考察

(1) 大気中黒色炭素エアロゾルの大気放射への影響

図 2 は標準実験における黒色炭素エアロゾルによる大気上端および地表面における放射への影響の年平均分布である。大気上端における放射への影響は全域において地球を加熱する方向に作用しているのに対し、地表面においては短波放射の吸収と散乱による減衰のため全域で冷却となっている。全球平均での大気上端の放射への影響は $+0.3 \text{ W m}^{-2}$ となっている。この値は Bond et al. (2013)⁴⁾ による最近の推定値 ($+1.1 \text{ W m}^{-2}$) よりは小さな値であるものの、IPCC 第 4 次評価報告書 (IPCC, 2007)³⁾ での多数のシミュレーション結果の範囲に入るものである。地表面における全球平均の放射への影響は -0.45 W m^{-2} となり、大気上端における加熱の効果よりも絶対値は大きな値となっている。

図 3 は大気上端における上向き長波放射 (Outgoing longwave radiation; OLR) の標準実験と

noBC 実験での差を示している。OLR が小さい値を示す場合は地球外から観た場合の赤外放射輝度が小さい、すなわち雲頂の高度が高いことを示している。標準実験と noBC 実験の差が負の偏差をもつ場合、BC の存在によって雲頂高度がより高くなることを示唆している。図 3 では、BC が存在する場合には東南アジアからインド、インド洋、アフリカ赤道域において雲頂高度が増加、すなわち対流活動が活発化することが示唆されている。また、ユーラシア大陸の中緯度や欧州の領域

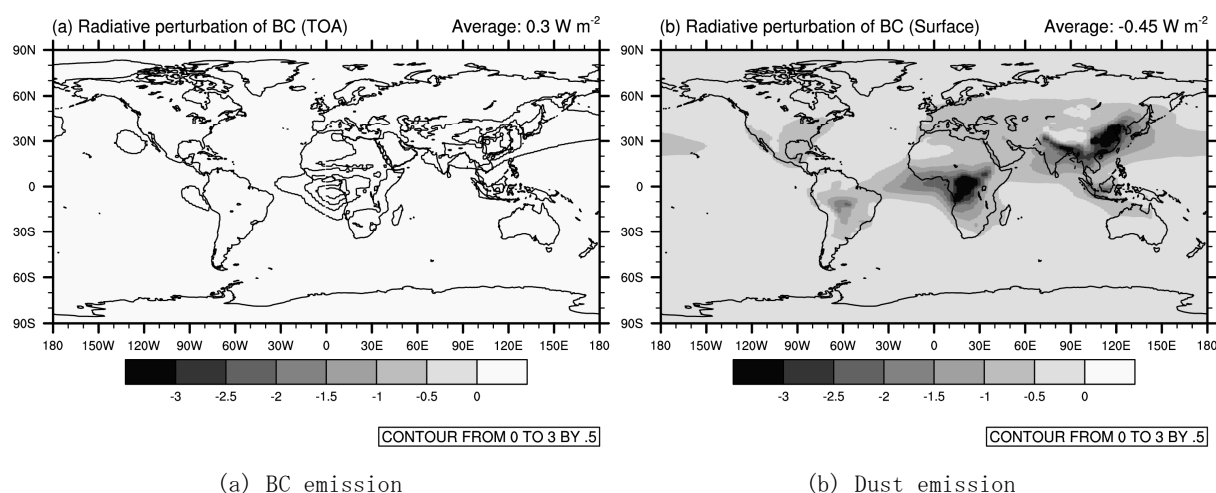


図 2. 標準実験での (a) 大気上端、(b) 地表における黒色炭素による放射への直接効果。等高線は地球を暖める方向、グレースケールは冷却する方向である。

では OLR は増加しており、雲頂高度が低くなっていることが示唆されている。

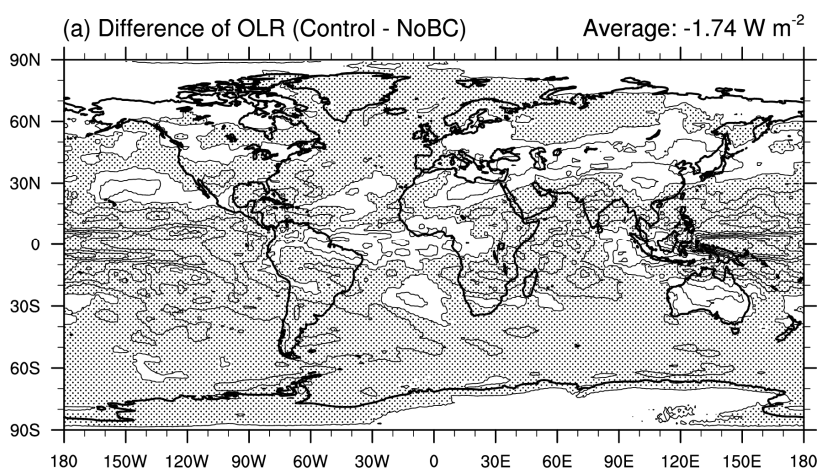


図 3. 標準実験と noBC 実験での上向き長波放射の差分の年平均分布。網掛けの領域は上向き長波放射が負の偏差の部分を表している。

図 4 は標準実験と noBC 実験での降水量の差を示している。黒色炭素エアロゾルの影響は熱帯域の対流雲による降水で強く表れており、黒色炭素エアロゾルが対流雲に影響を与えていることを示唆しており、Wang (2007)⁵⁾ など先行研究の結果を支持している。特に太平洋西部の熱帯域の

積雲による降水は減少傾向となっている。また、熱帯収束帯(ITCZ)における降水量が変化し、高緯度側で降水量は減少、低緯度側で降水量は増大しており、ITCZがシフトしていることが示されている。黒色炭素エアロゾルによる ITCZ の変化は先行研究でも報告されているが、Roberts and Jones (2004)²⁰⁾ は ITCZ が北に移動すると述べており、この実験結果とはやや異なっている。黒色炭素によって地表面は冷却されて蒸発量は減少するため、僅かではあるが全球平均での降水量は減少している。

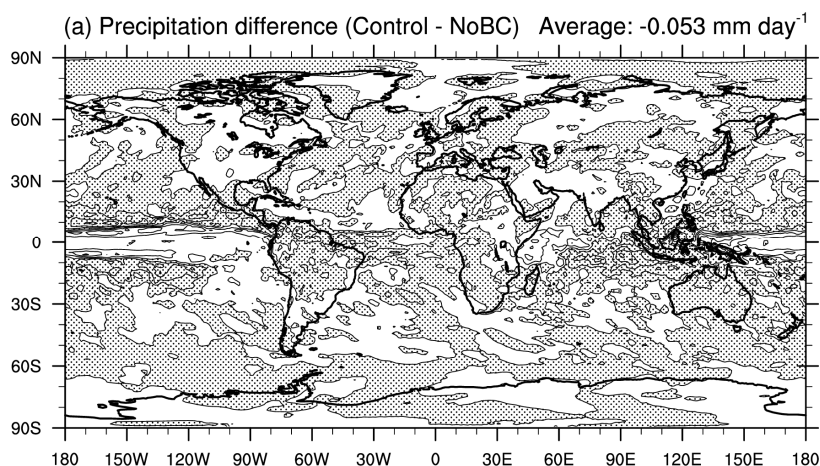


図4. 標準実験と noBC 実験での降水量の差分の年平均分布。網掛けは BC の存在によって降水量が減少する領域を表している。

黒色炭素エアロゾルの有無による帯状平均の経度方向の風速の差を図5に示す。黒色炭素の存在によって、北半球亜熱帯域(10° N~40° N)、および南極周辺の帯状平均の経度方向の風速は減速され、逆に 60° S~20° S および 40° N~北極域の成層圏から対流圏上層では加速されている。この傾向によって成層圏ジェット気流の位置は北側にシフトしている。黒色炭素エアロゾルによる成層圏ジェット気流の変化は Allen et al. (2012)²⁰⁾でも示されており、この実験結果はその報告と整合的である。

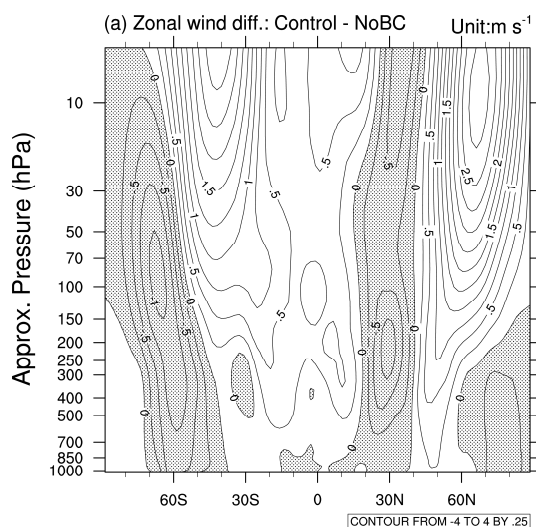


図5. 標準実験と noBC 実験での年平均の帯状平均の経度方向風速の差分の分布。網掛けは BC の存在によって風

速が減少する領域を表している。

本実験結果の解析からは、黒色炭素エアロゾルの存在によって地球の大気大循環場全体が影響を受けていることが示唆されている。黒色炭素エアロゾルによって地表面は冷却されるものの、黒色炭素エアロゾルは主に大気境界層付近のような対流圏下層に多いため、短波放射の吸収による大気加熱によって対流圏下層が加熱され、結果として対流活動が強化されると考えられる。特に熱帯域では年間を通して太陽放射による加熱が強いため、熱帯域の対流活動が強化される方向に影響し、ハドレー循環の強化によって中・高緯度にまで大気大循環場が影響を受けていると考えられる。本実験では大気中の黒色炭素エアロゾルの直接効果および間接効果による気候モデルの応答を調査しているが、特に間接効果は大気大循環モデル内のエアロゾルから雲粒を診断する部分やエアロゾルの氷晶核としての役割などに不確実な部分が多い。また、吸収性エアロゾルとしては鉱物ダストに関しても大気大循環に及ぼす影響を評価する必要がある。今後の実験では、直接効果と間接効果の影響を分離し、さらにエアロゾル成分毎に大気大循環に及ぼす影響を評価する必要がある。

(2) 吸収性エアロゾル沈着による積雪アルベド低下の影響

図6は現在気候における黒色炭素と鉱物ダストの沈着による地表面アルベドの変化の年平均値を示している。エアロゾル沈着によるアルベド変化は北極圏とヒマラヤ山脈で顕著であり、また鉱物ダストよりも黒色炭素の方がアルベド変化は大きい。黒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(図3c)、おのおのの単独の場合の変化(図3aおよび3b)を加えたものよりもアルベド変化が大きい。これはこれまでの実験で得られた場合と同じように、積雪中の不純物濃度と積雪アルベドの変化の非線形的な関係によるものと考えられる。

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地表気温の変化を図4に示す。この評価では積雪アルベドの変化を通じて地表面温度・水循環・海面表層温度などが変化するフィードバックの効果が顕著であるため、積雪のない地域においても地表面気温の変化が生じている。図7では、シベリア東部からアラスカにかけての北極圏、グリーンランド東部、インドネシアからミクロネシア諸島にかけての太平洋赤道付近の西部、チリ沖合、ニュージーランドの南洋、南米ドレーク海峡付近から南極半島にかけてなど、積雪中不純物の種類にかかわらず、積雪アルベド変化によって影響を受けやすい地域のパターンが形成されている。

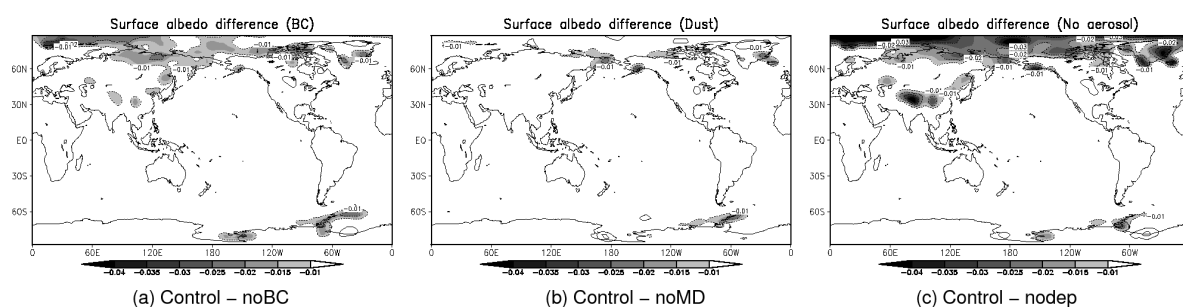


図 6. 鉱物ダストと黒色炭素の沈着による年平均の地表面アルベドの変化。(陰の部分はエアロゾル沈着によってアルベドが減少する効果を示している)

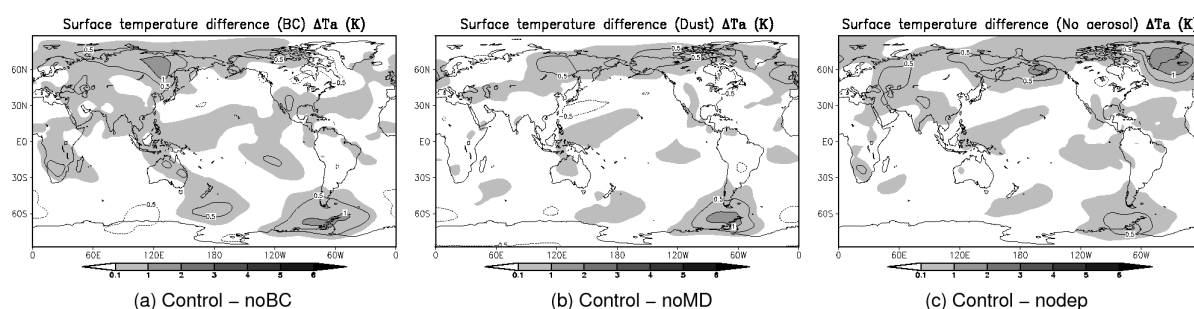


図 7. (a) 黒色炭素、(b) 鉱物ダスト、(c) 黒色炭素および鉱物ダストのエアロゾルの沈着による地表付近気温の変化 (全球平均・年平均値) (陰のついている部分は温度変化が正の部分、破線の等高線は温度変化が負の部分)

5. 本研究により得られた成果

光を吸収するエアロゾルの気候への影響を調べるため、気候モデルを用いて、エアロゾルに関わる過程の開発・改良と、数値シミュレーションによる気候応答実験を行った。気候モデルとしては、気象研究所によって開発されている MRI-CGCM3 (Yukimoto et al., 2012)¹¹⁾ を用いた。MRI-CGCM3 では、MRI-AGCM3 と MASINGAR mk-2、海洋大循環モデル MRI.COM が結合され、エアロゾルモデルによってシミュレートされる各種エアロゾルの濃度はカップラーを通じて MRI-CGCM3 の大気放射過程と陸面過程モデルで扱われる。新規に開発された陸面過程モデル HAL では、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 (Aoki et al. 2011)¹⁸⁾ を組み込んだ積雪変態・アルベドプロセスモデル SMAP (Niwano et al., 2012)¹⁹⁾ が導入され、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を用いて積雪アルベドが物理的モデルに基づいて計算される。

本サブ課題では、吸収性エアロゾルの気候への影響を調べるため、気象研究所気候モデル MRI-CGCM3 を用い、現在気候を仮定した状態での黒色炭素エアロゾルの有無による気候モデルの応答を調査した。実験結果からは、黒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が示唆された。また、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、成層圏ジェット気流が北方へ移動することも示唆さ

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はあるが、このような大気大循環場の応答は用いる気候モデルに大きく依存する可能性がある。

また、吸収性エアロゾルの沈着フラックスが陸面・海氷上の積雪のアルベドに与える影響を調べるため、MRI-ESM1 を用いた予備実験を行った。MRI-ESM1 では、新規に開発された陸面過程モデル HAL に 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。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 が導入されており、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。

この改良された全球気候モデルを用いて、黒色炭素とダストの積雪アルベドへの効果を調べる予備実験を行った。黒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、おのお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。黒色炭素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を通じて地表面温度・水循環・海面表層温度などが変化す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。

本研究で用いられた全球気候モデル MRI-CGCM3 は、IPCC の第 5 次報告書における気候モデル比較実験 CMIP5 への気象研究所からの参加モデルとして用いられており、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。また、MRI-AGCM3 と 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。今後、モデルでのエアロゾルのプロセスと積雪アルベドモデルによる影響のさらなる改良を継続し、定量的な評価を行う必要がある。

6. 引用文献

- 1). Hansen, J., M. Sato, and R. Ruedy, 1997: Radiative forcing and climate response, *J. Geophys. Res.*, **102**(D6), 6831–6864.
- 2). Jacobson, M. Z., 2002: Control of fossil-fuel particulate black carbon plus organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming, *J. Geophys. Res.*, **107**, (D19), 4410, doi:10.1029/2001JD001376.
- 3). IPCC, 2007: Climate Change 2007, Cambridge University Press, NY, USA.
- 4). Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Karcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G., Zender, C. S., 2013: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/jgrd.50171.
- 5). Wang, C., 2007: Impact of direct radiative forcing of black carbon aerosols on tropical convective precipitation, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L05709, doi:10.1029/2006GL028416.

- 6). Meehl, G. A., J. M. Arblaster, and W. D. Collins, 2008: Effects of black carbon aerosols on the Indian monsoon. *J. Climate*, **21**, 2869–2882.
- 7). Wiscombe, W. J., and S. G. Warren, 1980: A Model for the Spectral Albedo of Snow. I: Pure Snow. *J. Atmos. Sci.*, **37**(12), 2712–2733.
- 8). 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.
- 9). Jacobson, M. Z., 2004: Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity, *J. Geophys. Res.*, **109**, D21201, doi:10.1029/2004JD004945.
- 10). Flanner, M. G., C. S. Zender, P. G. Hess, N. M. Mahowald, T. H. Painter, V. Ramanathan, and P. J. Rasch, 2009: Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 2481–2497.
- 11). Yukimoto, S., Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, E. Shindo, H. Tsujino, M. Deushi, R. Mizuta, S. Yabu, A. Obata, H. Nakano, T. Koshiro, T. Ose, and A. Kitoh, 2012: A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 —Model Description and Basic Performance—. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **90A**, 23–64.
- 12). Yukimoto, S., H. Yoshimura, M. Hosaka, T. Sakami, H. Tsujino, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, Y. Adachi, E. Shindo, S. Yabu, T. Ose, and A. Kitoh, 2011: Meteorological Research Institute–Earth System Model v1 (MRI-ESM1) – Model Description –, *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, No. 64, ISSN 0386-4049, Meteorological Research Institute, Japan.
- 13). Adachi, Y., S. Yukimoto, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, T. Y. Tanaka, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, E. Shindo, H. Tsujino, R. Mizuta, S. Yabu, T. Koshiro, T. Ose, A. Kitoh, 2013: Basic performance of a new Earth System Model of the Meteorological Research Institute (MRI-ESM1), *Pap. Meteor. Geophys.*, **64**, 1–19.
- 14). Yoshimura, H and Yukimoto, S, 2008: Development of a Simple Coupler (Scup) for Earth System Modeling . *Pap. Met. Geophys.*, **59**, 19–29.
- 15). 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.
- 16). 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.
- 17). Lamarque, J.-F., Bond, T. C., Eyring, V., Granier, C., Heil, A., Klimont, Z., Lee, D., Liousse, C., Mieville, A., Owen, B., Schultz, M. G., Shindell, D., Smith, S. J., Stehfest, E., Van Aardenne, J., Cooper, O. R., Kainuma, M., Mahowald, N., McConnell, J. R., Naik, V., Riahi, K., and van Vuuren, D. P., 2010: Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application, *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 7017–7039, doi:10.5194/acp-10-7017-2010.

- 18). Aoki, Te., K. Kuchiki, M. Niwano, Y. Kodama, M. Hosaka, and T. Tanaka, 2011: Physically based snow albedo model for calculating broadband albedos and the solar heating profile in snowpack for GCMs, *J. Geophys. Res.*, **116**, doi:10.1029/2010JD015507.
- 19). Niwano, M., T. Aoki, K. Kuchiki, M. Hosaka, and Y. Kodama, 2012: Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan, *J. Geophys. Res.*, **117**, F03008, doi:10.1029/2011JF002239.
- 20). Roberts, D. L., and A. Jones, 2004: Climate sensitivity to black carbon aerosol from fossil fuel combustion, *J. Geophys. Res.*, **109**, D16202, doi:10.1029/2004JD004676.
- 21). Allen, R. J., S. C. Sherwood, J. R. Norris, and C. S. Zender, 2012: Recent Northern Hemisphere tropical expansion primarily driven by black carbon and tropospheric ozone, *Nature*, **485**, 350–354, doi:10.1038/nature11097.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Te. Aoki, K. Kuchiki, M. Niwano, Y. Kodama, M. Hosaka, and T. Tanaka: *Journal of Geophysical Research*, **116**, D11114, doi: 10.1029/2010JD015507 (2011)
“Physically based snow albedo model for calculating broadband albedos and the solar heating profile in snowpack for general circulation models”
- ② 青木輝夫, 田中泰宙: 気象研究ノート第 222 号「北極の気象と海洋」(共著) 7 章, 日本気象学会, 95–106 (2011)
「雪氷中の光吸収性エアロゾル」
- ③ Y. Shao, K-H. Wyrwoll, A. Chappell, J. Huang, Z. Lin, G. H. McTainsh, M. Mikami, T. Y. Tanaka, X. Wang, and S. Yoon: *Aeolian Research*, **2**(4), 181–204, doi: 10.1016/j.aeolia.2011.02.001 (2011)
“Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science”
- ④ S. Yukimoto, Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, T. Y. Tanaka, E. Shindo, H. Tsujino, M. Deushi, R. Mizuta, S. Yabu, A. Obata, H. Nakano, T. Koshiro, T. Ose, and A. Kitoh: *J. Meteorol. Soc. Japan*, **90A**, 23–64, 2012
“A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 —Model Description and Basic Performance —”
- ⑤ Y. Adachi, S. Yukimoto, M. Deushi, A. Obata, H. Nakano, T. Y. Tanaka, M. Hosaka, T. Sakami, H. Yoshimura, M. Hirabara, E. Shindo, H. Tsujino, R. Mizuta, S. Yabu, T. Koshiro, T. Ose, A. Kitoh: *Pap. Meteor. Geophys.*, **64**, 1–19, 2013
“Basic performance of a new Earth System Model of the Meteorological Research Institute (MRI-ESM1).”

(2) 口頭発表

- ① Aoki, Te. and T. Tanaka, 2009: International Workshop “Frontiers of Black Carbon Studies”, University of Tokyo, Jan. 25, 2010, Tokyo (2010)

- “Effect of BC in snowpack on radiation budget in Sapporo, Japan”
- ② Taichu Y Tanaka, Teruo Aoki, Masahiro Hosaka, Yukimasa Adachi, 2009: 2009 AGU Fall Meeting, 14 December 2009, San Francisco, USA (2009)
 “Simulation of the effect of mineral dust and black carbon deposition on snow surface”
- ③ 田中泰宙, 青木輝夫, 保坂征宏, 足立恭将, 2009: 日本気象学会2009年秋季大会 (講演予稿集), 2009年11月, 福岡, p. 385 (2009)
 「鉱物ダストおよび黒色炭素エアロゾル沈着を考慮した雪氷面アルベド2層モデルの開発」
- ④ Taichu Y. Tanaka, and MRI Earth System Modelling Group, 2010: Development of an Aerosol Model in the Earth System Model of Meteorological Research Institute of Japan Meteorological Agency, AeroCom 2010 workshop, Oxford University, U. K.
- ⑤ T. Y. Tanaka: Sino-German Science Center Symposium “Dust Cycle and Climate Change: Past, Present and Future”, University of Cologne, 21 September 2011
 “Representation of Dust Cycle in Earth System Models”
- ⑥ 田中泰宙: 北極域における積雪汚染と雪氷微生物が温暖化に及ぼす影響に関する第2回ワークショップ, 2012年3月14-16日, 札幌市
 「気象研究所気候モデルによる歴史気候実験でのBC積雪汚染について」
- ⑦ 田中泰宙, 青木輝夫, 坂見智法, 保坂征宏, 足立恭将, 行本誠史, 地球システムモデル開発グループ: 日本気象学会 2012 年度春季大会, 2012 年 5 月 26-29 日, つくば, P222 (2012)
 「気候モデルによる黒色炭素エアロゾル削減の有効性評価のための感度実験」
- ⑧ 田中泰宙, 青木輝夫, 坂見智法, 保坂征宏, 足立恭将, 行本誠史, 地球システムモデル開発グループ: 日本気象学会2012年度秋季大会, 2012年10月3-5日, 札幌, D365 (2012)
 「20世紀再現実験による吸収性エアロゾルによる積雪汚染」
- ⑨ 田中泰宙: 「風送ダストに関する最近の話題と今後の展望」(砂漠学会分科会/風送ダスト研究会), 2013年1月17日, 福岡県春日市,
 「全球シミュレーションによるダスト変動」
- ⑩ 田中泰宙: The 3rd SIGMA workshop, 2013年3月, 秋田県仙北市
 「Simulation of BC and dust deposition over Greenland」
- ⑪ 田中泰宙, 青木輝夫, 保坂征宏, 足立恭将: 第30回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2013年8月27-29日, 京都
 「気候モデルによる光吸収性エアロゾルの影響評価: 大気の加熱と積雪汚染」
- (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

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への気象庁からの参加モデルである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。