

【受賞解説】

北海道における大気エアロゾル輸送及び積雪影響に関する研究

－日本気象学会北海道支部令和3年度「北海道支部賞」受賞－

北海道大学 北極域研究センター

(北海道大学 広域複合災害研究センター兼務)

安成 哲平

1. はじめに

この度は、日本気象学会北海道支部より大変栄誉ある「北海道支部賞」をいただきまして、大変光栄に思い、身が引き締まる気持ちです。私は、大学院時代、[北海道大学](#)（今後、北大と呼ぶ）の[環境科学院](#)（修士課程の時は、旧地球環境科学研究科）に所属をしており、主に大学院の自身の研究としましては、アラスカのアイスコア（円柱状に氷河などから掘削したサンプル）の中の砂漠などから発生するダストエアロゾル粒子と成層圏の物質との気象場の関係の研究などを博士課程まで行っておりました（Yasunari et al., 2007; Yasunari and Yamazaki, 2009）。研究室としては、[低温科学研究所](#)（今後、低温研と呼ぶ）の現在の[氷河・氷床グループ](#)におりました。しかし、その傍ら、冬季には当時、気象研究所におられた[青木輝夫](#)氏（現在、国立極地研究所国際北極環境研究センター副センター長・特任教授）が低温科学研究所との共同研究で主導されていた週2回の積雪断面観測（エアロゾル分析のための積雪サンプリング含む）に、積極的かつ頻繁に参加させていただいておりました。私の北海道における積雪と大気エアロゾルに関する研究の発端はここからだと思っております。大学院時代は、断面観測以外にも暇さえあれば、とにかく一人で雪を測ったり、採ったりと札幌の雪を誰より観測していた一人ではないかと思っております。この時の知見や青木氏のグループによる観測データがのちの学位取得後、2009年5月に米国の[NASA Goddard Space Flight Center](#)（今後、NASA/GSFCと呼ぶ）で働き始めてから、NASAの全球モデル陸面に大気エアロゾルによる積雪汚染効果（snow-darkening effect: SDE）を導入する際に大いに役立ったこと（Yasunari et al., 2011, 2014）が大変感慨深いものでした。2015年に米国から北大に戻ってきてからは、森林火災とその大気

汚染（エアロゾルやPM_{2.5}）や、春の北海道への黄砂の研究など、北海道における大気エアロゾルに関連する様々な研究を現在まで力を入れて進めております。このように、その時々、研究対象とする手法やテーマの詳細は違うものの、北海道における大気エアロゾルと関連する研究に現在まで携わってきました。今日は、主に北海道に関連した研究を中心に大気エアロゾルの観点から、これまで私に関わってきた研究について受賞論文などと絡めて、受賞解説としてご紹介したいと思います。

2. 大学院時代の北海道における積雪・エアロゾル観測

私は、北大の大学院地球環境科学研究科（当時）の修士課程（博士課程から大学院環境科学院となりました）に2003年4月から大学院生として所属し、低温研の現在の[氷河・氷床グループ](#)に席を置かせていただきました。アイスコアや雪に憧れ低温研に大学院から行きたいと思っており、ちょうど修士になった当時、前述の青木氏が低温研との共同研究で積雪のアルベド（反射率）と積雪不純物（大気エアロゾルなどによる雪の汚れへの影響）の研究を開始された頃でした。そのため、冬季の積雪断面観測を大気エアロゾルや気象観測と合わせて行うということで、積極的にその積雪断面観測やその他の研究のお手伝いなどをしながら共同研究に参加させていただいておりました。これが、おそらく私の大気エアロゾルと積雪の観測的な研究への参加は初めてだったと思います。その参加させていただいた初期の低温研における大気エアロゾルと積雪アルベド研究では、春（3月上旬）に黄砂が札幌に飛来した直後に、積雪不純物濃度が急上昇し、積雪のアルベドが低下する現象を観測することができました（Aoki et al., 2006）。大気中のエアロゾルが積雪物理量を変化させるということを身近に知ることができたのは、その後のNASAでの研究など私の研究にも大きな影響を与えるきっかけとなったと思います。大学院中には、毎年のようにこの積雪断面観測と大気エアロゾルに関する共同研究に参加させていただいたり、他の論文でも共同研究者として貢献させていただいたり（Aoki et al., 2007a）、また、道東での同様な観測プロジェクト（衛星データの地上検証など）のフィールド観測にも参加させていただくことで（Hori et al., 2006; Aoki et al., 2007b）、積雪物理量の知識や観測スキルをつけられたことは、私にとって貴重かつその後の研究にも大事な経験となりました。何より、雪氷と大気エアロゾルの観測やその関係を知ることの楽しさを教えていただく機会になったと思っています。

3. 米国 NASA/GSFC での全球モデル GEOS-5 への積雪汚染モデルの導入

学位を 2008 年 3 月に北海道大学環境科学院からいただいた後、1 年間京都の [総合地球環境学研究所](#) (地球研) で、当時プロジェクトリーダーもされており、私の大学院の時の副査でもあった北大低温研の [白岩孝行](#) 准教授の元で 1 年間アイスコア装置の立ち上げと分析のポストドクをしておりました。その後、[京都大学理学研究科地球惑星科学専攻](#)の [故里村雄彦](#) 教授 (余田, 2014) のところに少しの間お世話になり、2009 年 5 月から、米国メリーランド州にある NASA/GSFC に勤務することになりました。NASA は一部の政府雇用の人を除き、多くの人が外部に所属機関があり、私の場合は、2009 年 5 月から 2011 年 5 月までは [Goddard Earth Sciences and Technology Center \(GEST\)](#), [University of Maryland Baltimore County \(UMBC\)](#), 2011 年 5 月から 2015 年 6 月までは [Goddard Earth Sciences Technology and Research \(GESTAR\)](#), [Universities Space Research Association \(USRA\)](#) に所属していました。当時の NASA のボスである [William K.-M. Lau](#) 博士 (今後、通称である Bill と呼ぶ; 現在, [Earth System Science Interdisciplinary Center, ESSIC, University of Maryland, UMD](#)) が主導されていましたヒマラヤ域の大気エアロゾルとモンスーンに関するプロジェクト (Joint Aerosol-Monsoon Experiment, JAMEX: Lau et al., 2008) に関わることになりました。当時、Bill が雪氷とエアロゾルのことをできる人材を探していたこともあり、まずは [NASA Postdoc Program \(NPP\)](#) に応募することを提案され、英語の申請書を書いて応募しました。日本の学振の NASA 版のような制度です。海外の公募への応募経験はありましたが、英語で研究の申請書をしっかりと書くのは、この時が初めてでした。努力はしたものの結果は残念ながら不採用でした。しかしながら、そこで諦めずに、Bill に他に方法は無いかとさらに伺ったところ、最終的には Bill の研究費で 1-2 年雇ってくださる提案をいただき、NASA に行くことになりました。Bill に直接聞いたことはありませんが、NPP に申請書を書いて応募するという行動を自らしていなければ、もう一声の採用はなかったと今でも思っています (Bill は、おそらく私が本当に自身で行動して研究ができる人なのか NPP の応募を通じて見ていたのではないかと考えています)。

さて、NASA で手始めに行った研究としては、上記 JAMEX に関連する研究で、ヒマラヤ域南部での大気中のブラックカーボン (BC; 黒色炭素とも言う) が氷河に沈着した際に、どれくらい積雪のアルベドを下げ、氷河融解に影響を与えるかについて研究を行いました (Yasunari et al., 2010)。当時ヒマラヤ域南側で

はほとんどこのような研究が行われていなかったため、イタリアとフランスのグループが関わっていた Nepal Climate Observatory – Pyramid (NCO-P) という 5079 m の大気汚染観測サイト (Bonasoni et al., 2008, 2010) の大気中の BC 濃度や気象観測データを上記の論文で利用させていただきました。その後の研究では、この NCO-P サイトの観測データを使って、エアロゾルの乾性沈着モデルを使った BC 沈着計算や大気大循環モデルからのアウトプットなどを使って、より詳細な乾季であるプレモンスーンの時期に BC 沈着によって、積雪アルベドが氷河上でどれくらい下がりうるか見積もる研究へと発展させました (Yasunari et al., 2013)。

この大気エアロゾルによる積雪アルベドの減少の効果を、NASA/GSFC の [Global Modeling and Assimilation Office \(GMAO\)](#) で開発されている [Goddard Earth Observing System Model, Version 5 \(GEOS-5\)](#) という全球モデル (General Circulation Model; 通称 GCM) の Catchment モデルと呼ばれる陸面モデル (Koster et al.,

2000; Ducharme et al., 2000) 内に導入してくれないか? というのが、当時の Bill からの依頼でした。これが、NASA/GSFC での私のその後の主な仕事となります。

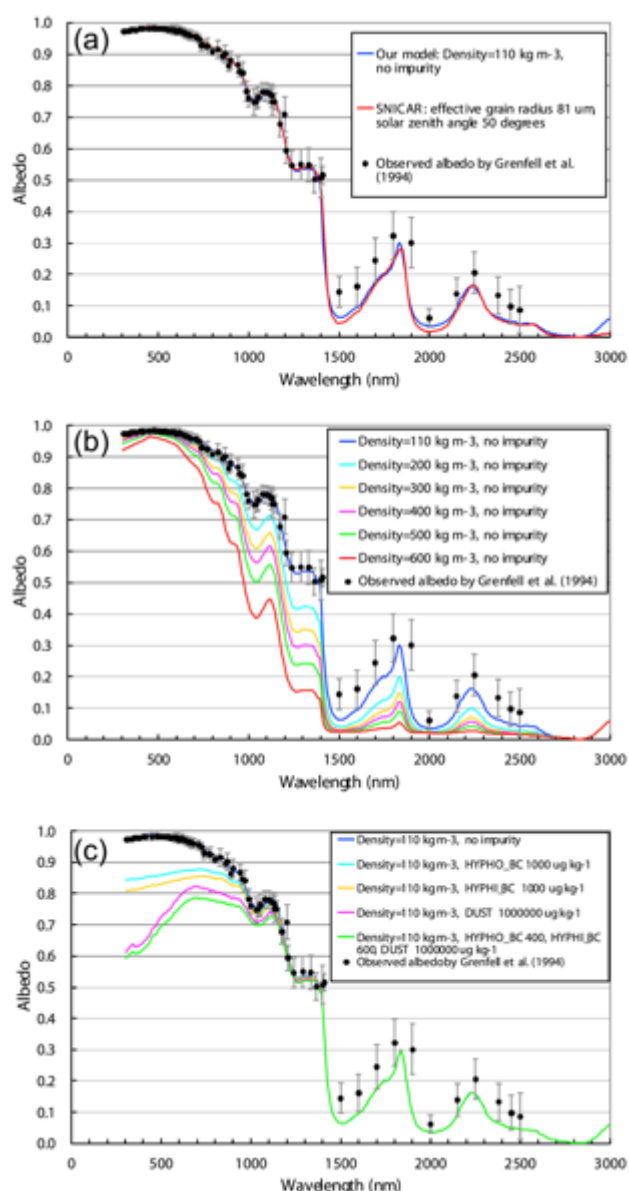


図 1. Yasunari et al. (2011) の Figure 1 より。 GEOS-5 用に取り入れた近藤ら (1988), 山崎ら (1991), Yamazaki et al. (1993) をベースに改良した積雪アルベドモデルによる波長ごとのアルベドの計算値及び感度実験や観測値 (Grenfell et al., 1994) との比較。 (a) Flanner et al. (2007)による別の積雪アルベドモデル (SNICAR: <http://snow.engin.umich.edu/>) との比較; (b) 積雪不純物なしで積雪密度 (積雪比表面積と関連) を変えた感度実験; (c) 積雪不純物 (ダスト, 親水性 BC, 非親水性 BC) 濃度を変化させた場合の感度実験。

GCM の G も知らない私が全球モデルを開発をすることもあり、全て一から上記の NASA の GEOS-5 モデルについて学びました。ある意味、余計な前知識もなかったことで、GEOS-5 という NASA の全球モデルの詳細を少しずつ理解することにつながっていきました。ここで、どのような積雪アルベドモデルを導入するかということをもまず検討しました。最終的には、日本の積雪アルベド（積雪層を多重の氷と空気の層と仮定して、多重散乱を考慮する物理的な積雪アルベドモデル：近藤ら, 1988; 山崎ら, 1991; Yamazaki et al., 1993）を改良して、そこへ、エアロゾルによる太陽光の吸収効果を入れることにしました。まず第一段階として、積雪不純物として、ダスト、親水性 BC、非親水性 BC の 3 つの積雪不純物濃度に応じた太陽光吸収効果を考慮できるようにしました（各積雪不純物濃度とその質量吸収係数の積の和で不純物による吸収効果を考慮）（Yasunari et al., 2011）。積雪粒子の大きさの効果に対応するものとしては、成田（1971）の観測に基づいたものを山崎ら（1991）、Yamazaki et al.（1993）が定式化し、氷粒子の比表面積と積雪密度が関連づけられています。図 1 に示しますが、このモデルによって計算された波長ごとのアルベドは、他の積雪アルベドモデル（Flanner et al., 2007）で計算されたものとも整合的で（図 1a）、積雪密度が増加すると可視域から近赤外波長域でアルベドが全体として大きく下がり（図 1b）、また積雪不純物濃度が増えると可視域のアルベドが下がるのが（図 1c）計算されています。これらの知見は、それまでの研究と整合的です（例えば、Wiscombe and Warren, 1980; Warren and Wiscombe, 1980; Flanner et al., 2007; 青木と田中, 2008）。この積雪アルベドモデルを GEOS-5 の陸面モデル（Koster et al., 2000; Ducharme et al., 2000）の積雪モデル（Lynch-Stieglitz, 1994; Stieglitz et al., 2001）に導入することで、時系列で上記の積雪アルベドの変動を考慮できるようになります。ただし、この積雪アルベドモデルを陸面モデルで時系列として計算をするためには、時系列としての積雪不純物の濃度変動のデータがないと計算することができません。そこで、大きく役立ったのが、先に述べました北大・低温研で参加させていただいていた週 2 回断面観測の時の積雪不純物データ（青木と田中, 2008）でした。この週 2 回積雪不純物データと積雪モデル（Lynch-Stieglitz, 1994; Stieglitz et al., 2001）が 3 層のモデルだったので、アルベドを時系列で計算できるようにするには、3 層の時系列の積雪不純物データを input として用意しないと行けません。そのため、Yasunari et al.（2011）では、かなり多くの仮定が必要でしたが、気象データなども考慮し、内挿補間などを行い 3 層の積雪不純物濃度の時系列

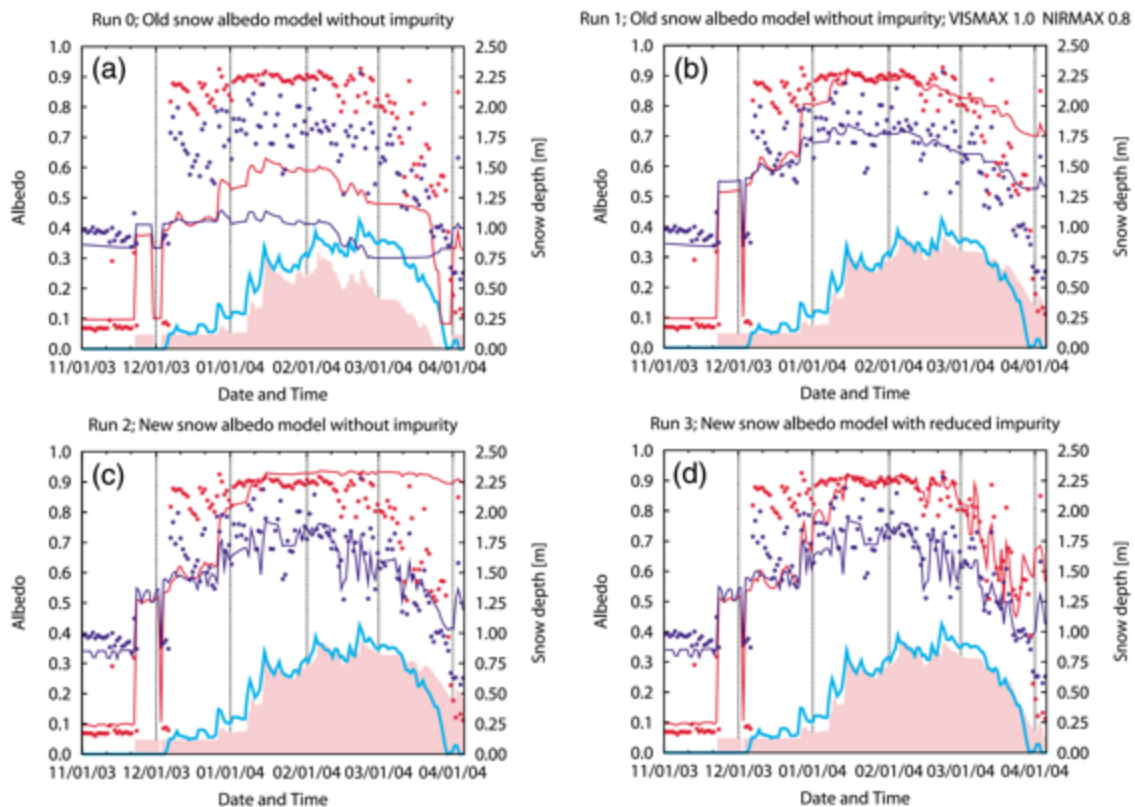


図 2. Yasunari et al. (2011) の Figure 5 より. GEOS-5 の陸面モデルで札幌の一冬 (2003/2004 冬季) で積雪物理量のオフライン計算値 (実線; 広域可視域アルベド「赤」; 広域近赤外域アルベド「青」; 積雪深度「ピンク」) を観測値 (アルベドは丸印で計算値の各アルベドと同じ色で対応; 積雪深は低温研裏の観測で実線「水色」). (a) GEOS-5 オリジナルの積雪アルベドモデル (最大値アルベドも初期値のまま); (b) (a) の設定で可視域 1.0, 近赤外 0.8 の最大値アルベドに変更したもの; (c) 導入した積雪アルベドモデルで積雪不純物をなしにした場合; (d) 導入した積雪アルベドモデルで積雪不純物も考慮した場合.

データを構築して, それを陸面モデルと積雪アルベドの時系列計算の感度実験に用いました. 上記観測結果を元に構築した時系列の積雪不純物濃度と札幌の気象データを合わせて, 陸面モデルを走らせることで, 初めて一冬分の積雪深度, 可視域・近赤外域の積雪アルベドの計算をオフライン数値実験で得ることができました (図 2). 大規模なモデルの開発などしたことのなかった私には, これはなかなか感動的でした. 図 2 を見ていただくとわかりますが, 元々の積雪モデルでは積雪不純物は考慮されておらず最大値アルベド (可視域・近赤外域) が固定されており (例えば, Stieglitz et al., 2001), 最大値アルベドを超えないように, 時間と共に下がっている非常に単純なアルベドモデルで, オリジナルの設定でも (図 2a), 最大値アルベドを変更しても (図 2b) 時系列の変動の詳細は捉えられませんでした. 一方で, Yasunari et al. (2011) で導入した積雪アルベドモデルを使うと, 仮定の多い積雪不純物時系列データではあったものの, 可視域・近赤外アルベド共に非常に良く再現できることがわかり, 積雪深も 4 つの感度

実験の中で最も観測値に近い時系列変動でした (図 2d). 積雪不純物濃度をなしにすると, 可視光の積雪アルベドが下がらず高い値で一定になり, 融雪期の積雪深もなかなか減りませんでした (図 2c). また, モデルの導入の際に近藤ら (1988) で提案された, 雪が融解などで濡れた際に雪の比表面積が濡れていない場合の 60%になるという効果も考

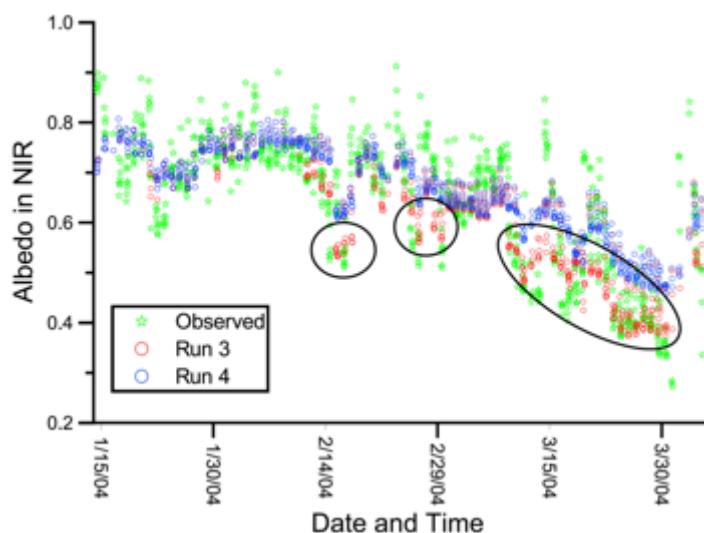


図 3. Yasunari et al. (2011)の Figure 6 より. 積雪が融解などで濡れた際に比表面積が元の値の 60%になる効果 (近藤ら, 1988) を考慮した場合 (Run3) と考慮しない場合 (Run4) の近赤外アルベドの時系列の比較.

慮しました. この効果を考慮することで, 近赤外域の積雪アルベドの観測値を非常によく説明できることも確認できました (図 3). ここでのポイントは, NASA の陸面モデル (Koster et al., 2000; Ducharme et al., 2000) に上記の積雪不純物や比表面積変化によるアルベド効果を計算できるようにし, さらにその導入したモデルを大学院時代お世話になった札幌の積雪断面観測の一冬の積雪物理量・不純物データを使って検証ができたということです.

しかしながら, NASA の陸面モデル (Koster et al., 2000; Ducharme et al., 2000) や大気も含めた全球モデルである GEOS-5 (Rienecker et al., 2008) でこの導入した上記の積雪アルベドモデルを動かすには更に開発が必要でした. Yasunari et al. (2011) では, 積雪不純物濃度を時系列データとして与えなければモデルが走りませんが, 実際には, 大気中にある太陽光吸収性のエアロゾルが雪面に沈着するその沈着量の時系列からその積雪中の不純物濃度 (質量濃度) を時間ステップごとに計算する必要があります. また, そのエアロゾルが雨や融解水で上の積雪層から下の積雪層へ流水と共に流れる効果も以前より報告されていたため (Conway et al., 1996; Flanner et al., 2007; Oleson et al., 2010), 考慮することが大事と考え入れることにしました. さらには, Yasunari et al. (2011) で考慮されていた太陽光吸収性エアロゾルであるダストと BC に加え, Flanner et al. (2009) や Aoki et al. (2011) で考慮することの重要性が指摘されていたオーガニックカーボン (OC; 有機炭素とも言う) も考慮することにしました. GEOS-5 では, 大

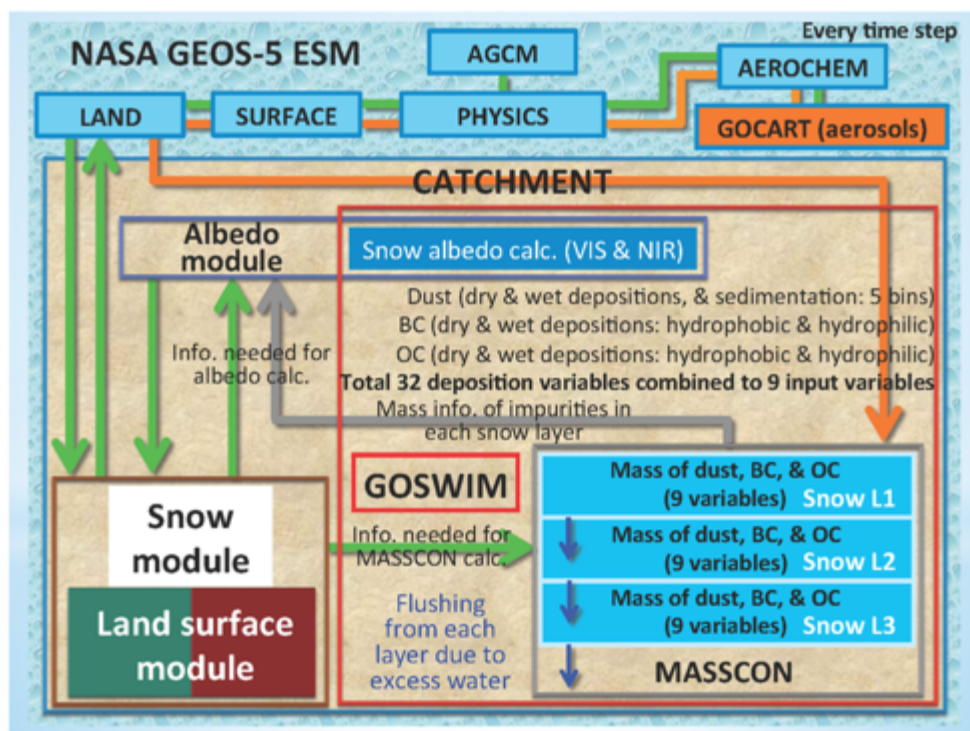


図4. Yasunari et al. (2014) の Figure 1 より. NASA GEOS-5 に導入された Yasunari et al. (2011) を発展させ、積雪不純物濃度（ダスト、BC、OC；融解水による流出効果も含む）と、その積雪不純物濃度から積雪アルベドを計算する Goddard SnoW Impurity Module (GOSWIM)の概要.

気エアロゾルは、GOCART (Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport) と呼ばれる大気化学・エアロゾルのための放射・輸送モジュールで計算されますが (Chin et al. 2000, 2002; Ginoux et al. 2001; Colarco et al. 2010), その GOCART からのエアロゾルを Catchment 陸面モデル (Koster et al., 2000; Ducharne et al., 2000) で直接利用できるようにし、その後は、積雪モデル (Lynch-Stieglitz, 1994; Stieglitz et al., 2001) 内で、上記の積雪汚染モジュールが動くようにするという流れで構成しました (図4). この NASA GEOS-5 用に開発した図4の積雪汚染モジュールを、Goddard SnoW Impurity Module (GOSWIM)と名付けました (Yasunari et al., 2014). Yasunari et al. (2014) で、札幌の一冬 (2007/2008) で気象データと GOCART からのダスト、BC、OC 沈着量データでオフライン実験を行ったところ、概ね良好なアルベド、積雪深の季節進行が計算されました (図5a). ただし、積雪不純物濃度を見たところ、ダストやBC質量濃度は観測値と比較してかなり過小でした (図5c). その後、札幌のダストの沈着量 (Osada et al., 2011) と大気BCの限られた観測データ (Yasunari et al., 2014, の共著者であった当時北海道大学大学院工学研究院の村尾直人氏より提供) を元に、与えるダストとBCの沈着量を補正したところ、非常に観測値と合うアルベドと積雪深 (図5b) 及び積雪不純物

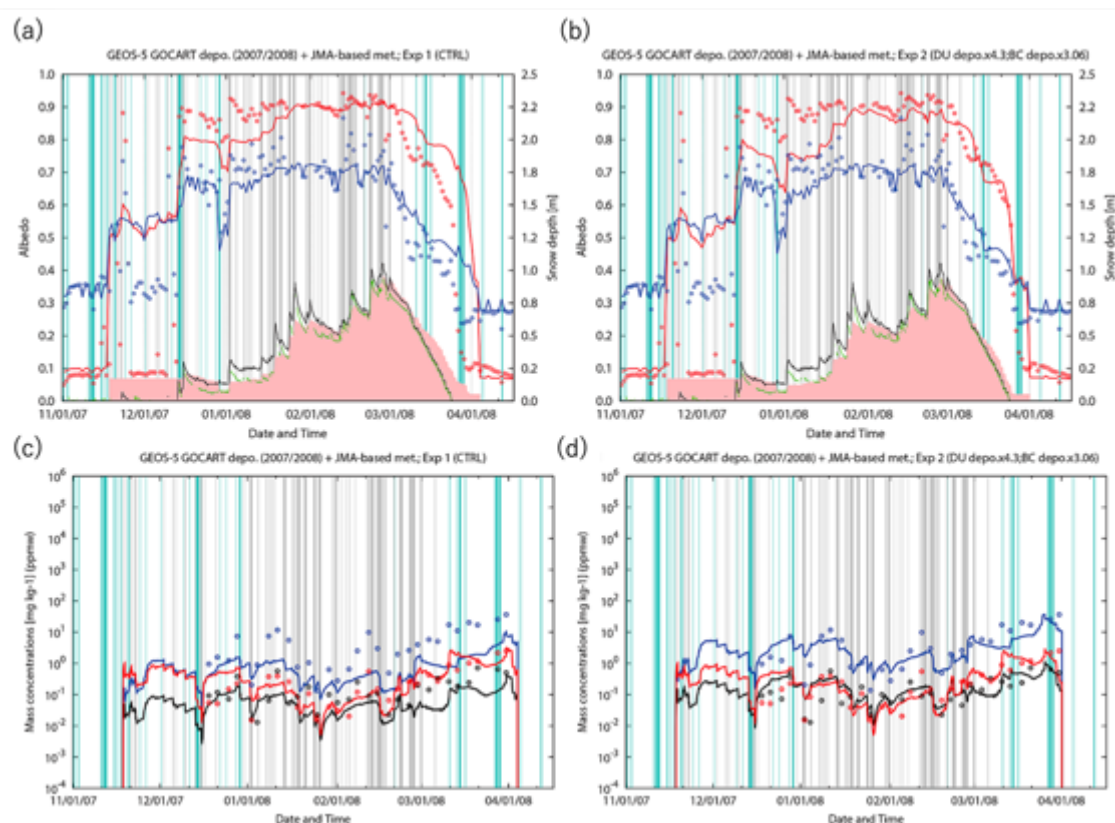


図 5. Yasunari et al. (2014) の Figures 2 と 3 の一部を抜粋して結合・改変。2007/2008 の冬季札幌で、気象データと GOCART によるエアロゾル沈着量 (ダスト, BC, OC) を使ってモデル計算した (a,b) 積雪アルベド (赤色: 広域可視域; 青色: 広域近赤外域) と積雪深 (黒: 札幌管区気象台のデータ; 緑: 北大低温研裏露場のデータ; ピンク: 計算) の観測値 (気象庁札幌管区気象台及び Aoki et al., 2011); (c, d) モデルの積雪層第一層 (トップ層) で計算された積雪不純物濃度 (質量濃度) の観測値との比較 (青: ダスト; 黒: BC; 赤: OC; 丸が観測値で実線が計算値)。ターコイズと灰色の鉛直線は、それぞれ降雨と降雪のタイミング。

濃度 (質量濃度) (図 5d) の結果が得られました。図 5d を見ていただくと、モデルの積雪層第一層の積雪不純物濃度の時系列が概ね良く再現出来ていることがわかります。特徴として、雨や雪が降った直後には積雪不純物濃度が下がることも計算されています。ただし、これらは地点で気象データや補正エアロゾルデータを与えた場合で、GEOS-5 で全球計算を行った例では札幌を含むグリッドがかなり大きいため、大雑把な傾向は捉えているものの、細かい札幌の変動までは再現は出来ませんでした (Yasunari et al., 2014 の Figures 2d と 3d を参照)。Yasunari et al. (2014) では、図 5b,d の感度実験から BC 沈着量だけを除いた感度実験も行いました (つまり、札幌の大気からもし BC がなくなったらどれくらい積雪に影響が出るか? という感度実験です)。この結果、札幌では、BC の積雪汚染効果がなければ 4 日積雪期間が延びる (2007/2008 の状況の元で) 程度の影響があることがわかりました (Yasunari et al., 2014)。札幌は、通常は比較的クリーンなイメージがありましたが、その札幌においても BC を大気から取り除くとこの程度

の積雪期間延長効果があることは驚きでした。このように GOSWSIM (Yasunari et al., 2014) の開発によって、太陽光吸収性エアロゾルによる積雪汚染効果を全球やオフライン陸面モデルシミュレーションで計算ができるようになりました。

NASA で開発を始めてからかなりの年数がかかりましたが、GCM をそれまで触ったことがない私が、全球モデルで積雪汚染効果を陸面モデルに導入できるまでになったことが私の NASA での最も大きな仕事になりました。その後、この GOSWIM を組み込んだ GEOS-5 で、ダスト、BC、OC による積雪汚染効果が北半球の春の気候においてどのような役割を果たしているのかについて議論した論文が NASA GEOS-5 による積雪汚染研究の集大成論文となりました (Yasunari et al., 2015)。この論文によって、上記の太陽光吸収性エアロゾルによる積雪汚染によって北半球春には、東アジアでは水循環が強化され、ヨーロッパから中央アジアにかけては乾燥を強化するという役割があることがわかりました。この論文内容を [NASA Science Visualization Studio \(SVS\)](#) が [YouTube の動画](#) として、とてもわかりやすくまとめてくれました。Yasunari et al. (2015) の成果は、その後、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の「海洋・雪氷圏特別報告書」(IPCC, 2019) や第 6 次評価報告書 (IPCC, 2021) でも引用された論文となっています。この積雪汚染モデルを通じた研究を通して、積雪汚染に関する知見を世界中の積雪汚染の専門家と包括的にまとめた総説論文にも参加する機会をいただくこともできました (Qian et al., 2015)。また、私も共著者となり、Yasunari et al. (2015) の GEOS-5 全球積雪汚染数値シミュレーションのアウトプットを使って、さらに解析を進めた研究では、ユーラシア大陸で春季の積雪汚染効果により融雪が早まると、Wet-First-Dry-Later (WFDL; 湿潤先行・乾燥後行) フィードバックを起こし、雪解け直後は土壌は湿潤になるが、その後夏にかけての温暖・乾燥効果を長期化してもたらしうることも明らかとなってきました (Lau et al., 2018)。上記の論文で提案された WFDL フィードバックは、積雪汚染でなくとも、融雪が早まれば (加速すれば)、同様な物理的なメカニズムとしては起こりうる現象と考えられますので、次の章の森林火災の話にも関連してきますが、Westerling et al. (2006) や Yasunari et al. (2018) でも言われている早期の融雪によるその後の森林火災発生への影響の話にも直接繋がってくるメカニズムとなるかと思えます。

4. 北海道での森林火災と大気汚染研究

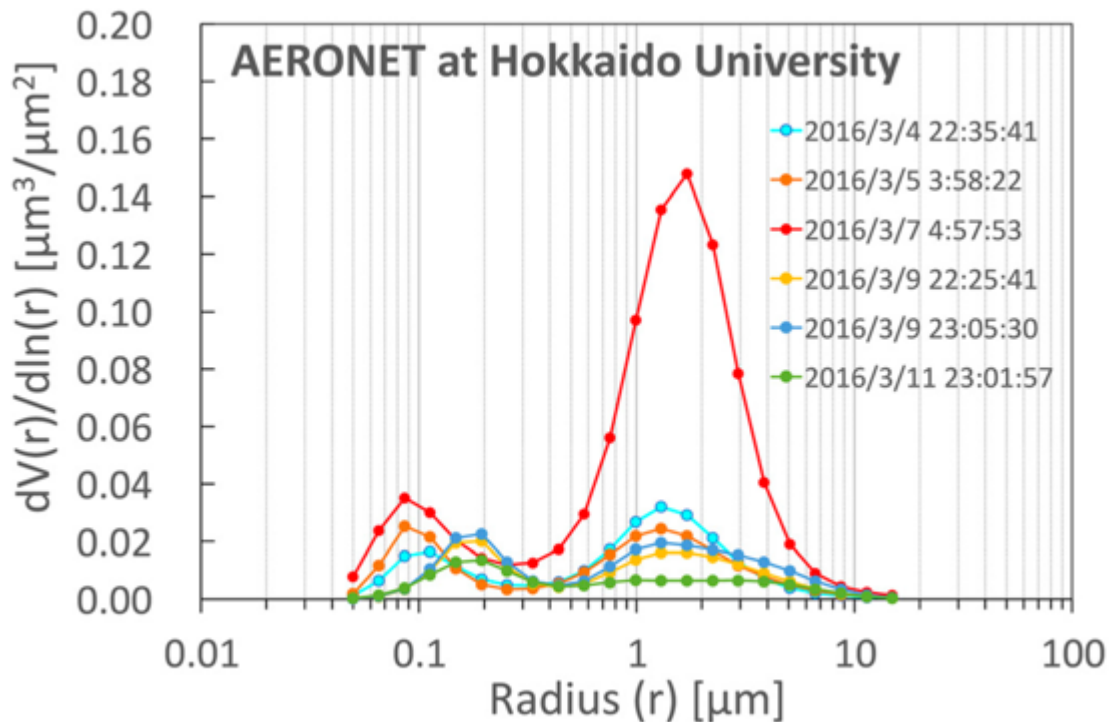


図 6. Yasunari et al. (2017) の Figure 6 より. 2016 年 3 月 7 日 (黄砂が札幌へ飛来したと論文内で判断された日) 及びその前後に北大工学部に設置された NASA AERONET によって光学的に観測されたエアロゾルの粒径分布.

米国 NASA における 6 年強の研究生活を経て、大学院の古巣である北海道大学に 2015 年 7 月から助教として、大学院工学研究院に着任しました。その様なか、ちょうど NASA/GSFC から帰国する直前に、NASA/GSFC が世界中に展開する大気エアロゾルの光学的観測ネットワークである [AERONET](#) (Aerosol Robotic Network) を展開するリーダーの [Brent Holben](#) 氏から、北海道に AERONET の観測サイトを設置展開する場所を議論しているという話がありました。当時、帰国後は大気エアロゾルなどの観測にも関わりたいと思っていたため、これはちょうど良い機会と思い、北大工学研究院と相談して工学部の屋上に北海道唯一の AERONET サイトを設置することにしました。この設置に関して、NASA と当時の工学研究院で簡易的な [agreement](#) を結んで、北大での [AERONET 観測が 2015 年 10 月 22 日から開始](#)されました。この頃でしょうか、この AERONET も含めて、北大を北日本の大気汚染観測のスーパーサイトにいずれにしたい、と思うようになっておりました。スーパーサイトというのは、その目的に特化した観測機器が集まり、常時観測をしているような場所という意味です。ちょうど、当時、北大内で別の観測を開始しており、エアロゾルセンサーのデータが得られていたことや、気象研が継続して行なっている低温研裏のパーティクルカウンター

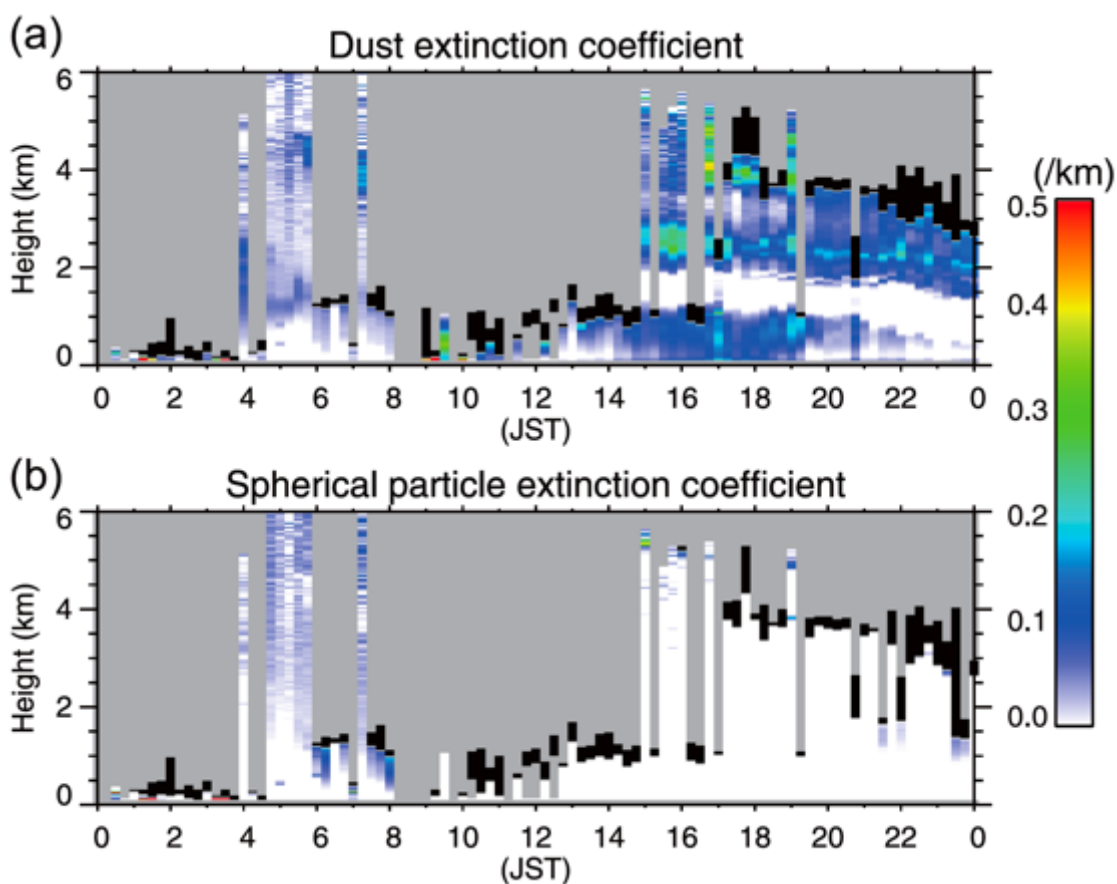


図 7. Yasunari et al. (2017) の Figure 5 より. 2016 年 3 月 7 日の北海道滝川市で観測された国環研ライダーの波長 532 nm のデータを元に算出された (a) ダスト粒子の消散係数と (b) 球形粒子の消散係数. 灰色の部分には、雲などによって観測データが取得できない高度. この日は、球形のエアロゾル粒子が少なく、多くがダスト粒子であることがわかる.

によるエアロゾル粒子数濃度を利用させていただき、また当時滝川市で稼働していた地上から雲のある高度までのエアロゾルの鉛直方向の情報を得ることができる [国立環境研究所](#) (国環研と呼ぶ) のライダーのデータなどを解析していました. これらの総合的なデータ解析から、2016 年 3 月 7 日に気象庁では、[札幌で煙霧の観測はあったものの黄砂の報告はなかった事例](#)について、上記の観測データを総合的に判断することで、黄砂が北海道へ輸送された事例と判断できる分析を行うことができました (Yasunari et al., 2017 ; [北大によるプレスリリース](#)も参照). このように、様々な大気観測機器が同時に存在することで、見えてくる観測事実もあるのです. この論文では、札幌に輸送されたこの時の黄砂の粒子は半径 $1\ \mu\text{m}$ (直径 $2\ \mu\text{m}$) より大きい粗大粒子であったことが、上記の北大の NASA AERONET による観測からも明らかにすることができました (図 6). また、Yasunari et al. (2017) では、当時、滝川市に設置されていた国環研ライダーのデータから、地上付近に非球形のダスト粒子が卓越していたことを示

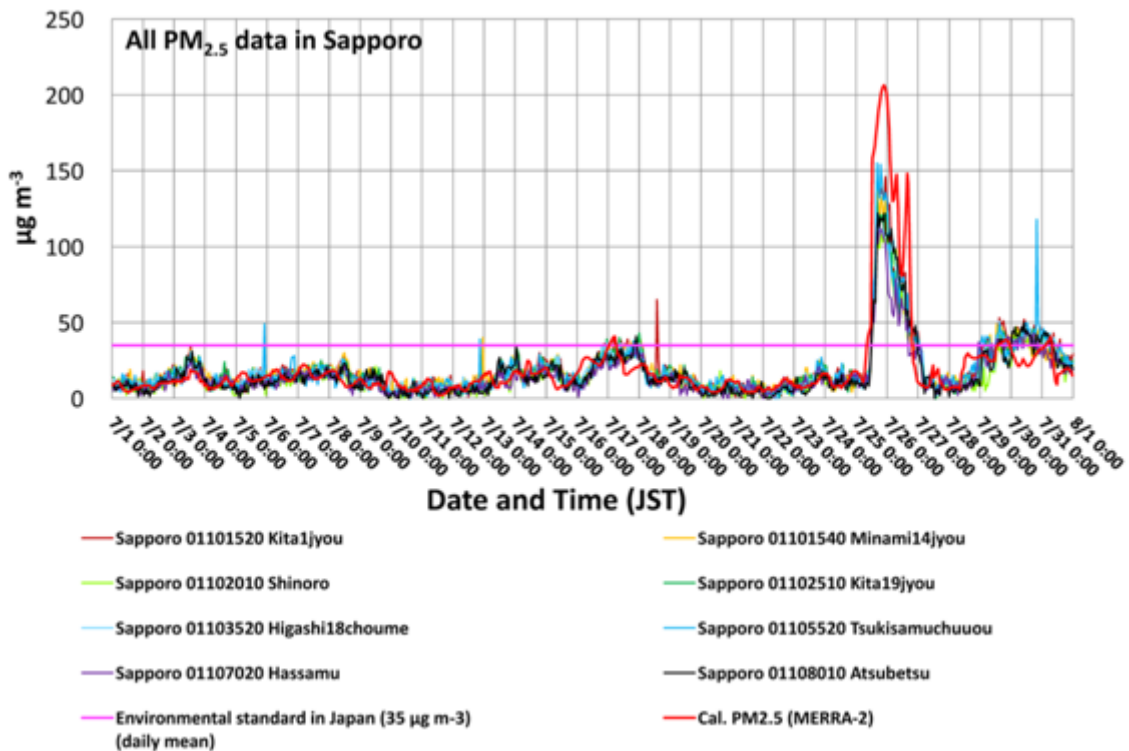


図 8. Yasunari et al. (2018) の Figure 2 より. 2014 年 7 月の札幌市内の環境省による PM_{2.5} 濃度の 1 時間値 (各種色線; 非常に極端に大きな値及び負の値は除去して利用) と再解析データ MERRA-2 を Buchard et al. (2016) の方法を使って算出した PM_{2.5} の 1 時間平均値 (赤線). ピンクの線は参考のための環境省による PM_{2.5} 日平均値の環境基準値 (<http://www.env.go.jp/air/osen/pm/info.html#STANDARD>) である 35 µg m⁻³ の線.

すデータも観測できたことも報告しました (図 7). ライダーでは, このように球形と非球形のエアロゾル情報の判別が高度ごとに可能で, これを利用して環境省の黄砂情報提供にも使われています. この国環研ライダーも, その後北大の工学部へ移設される運びとなり, 2017 年 4 月 20 日から本格的に稼働を開始しました. これにより, 北海道唯一の NASA AERONET と国環研ライダーが北大内で同時に稼働をし, 先に述べた北大に大気観測機器を集結させて多様な観測を行うスーパーサイト化へもさらに一步近づくことになりました.

さて, 少しずつ北大内の大気エアロゾルや大気汚染関連の観測機器も充実してきましたが, 北海道はそもそも大気汚染はあるのでしょうか? Yasunari et al. (2017) では, 気象庁のデータから北海道の黄砂の日数を 1967–2015 年で調べていますが, 2000 年頃からそれ以前より少し観測日数は増えているものの (2002 年は最も観測日数が多かった), 全国の観測日数と比べると黄砂がそれほど多い地域ではありません. 北海道の札幌市内で, 環境省による PM_{2.5} が測定開始以来初めて札幌により PM_{2.5} の注意喚起が出される事例が 2014 年の 7 月 26 日にありました. 上記, 札幌市の PM_{2.5} 注意喚起の資料にはシベリア域の森林火災の関与

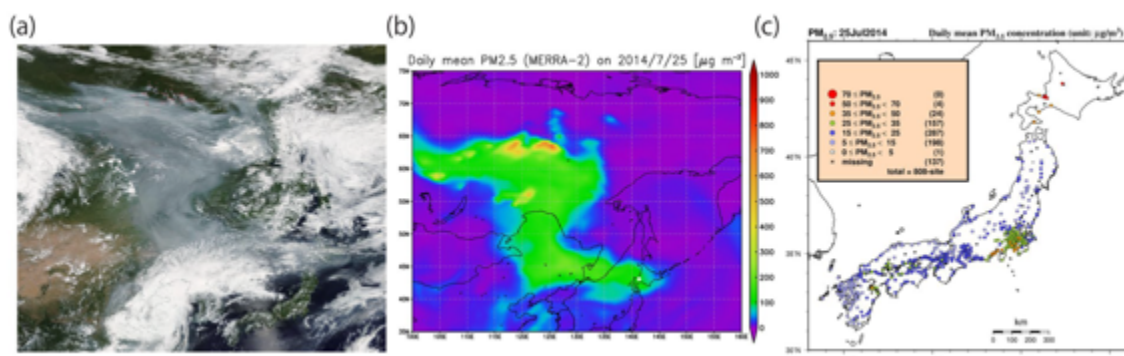


図9. Yasunari et al. (2018) の Figure 1 より. 2014年7月25日のサハ共和国からの森林火災時の越境大気汚染を捉えた(a) Aqua MODIS True Color 画像 (赤丸は日夜の Fire and Thermal Anomalies), (b) MERRA-2 を使用して Buchard et al. (2016) の方法で算出した $PM_{2.5}$ の日平均値 ($\mu\text{g m}^{-3}$), (c) 環境省の $PM_{2.5}$ の日平均値 ($\mu\text{g m}^{-3}$). その他データの詳細は, 論文を参照.

について記載がありました. この事例以外にも, 2003年5月と2008年4月には, 北海道の利尻で観測されている $PM_{2.5}$ においても顕著な増加が確認されており, バイカル湖東側の森林火災の寄与が報告されていました (Ikeda and Tanimoto, 2015). そこで, これらの北海道に越境大気汚染をもたらした3事例の森林火災のケースについて, 大気汚染とその発生要因や大気循環場なども合わせて理解するために [NASA の MERRA-2 という再解析データ](#) を主に使って事例解析を行いました (Yasunari et al., 2018). MERRA-2 では, 衛星データなどの大気エアロゾルの観測データを数値モデルの結果にデータ同化をしており (観測データをモデルの結果にできる限りうまく反映する作業とってください) (Randles et al., 2017), この観測データをできるだけ反映した大気エアロゾルデータを使って Buchard et al. (2016) の方法で $PM_{2.5}$ が算出できるため, $PM_{2.5}$ の議論もできる再解析データとなっています. 先ほどの札幌市の注意喚起が行われた事例も含む7月の札幌市内の1時間ごとの $PM_{2.5}$ の観測データ (確定値; [環境数値データベース](#)) の変動も MERRA-2 によって算出された $PM_{2.5}$ の1時間平均値は非常によく時系列変動を再現しているのがわかります (図8). 図8を見ると, 市内の地点ごとの非常に狭い地域での $PM_{2.5}$ 変動はあるものの, 札幌市内程度の広域範囲での $PM_{2.5}$ 変動は観測地点によらず, 大きな変動としては良く連動していることもわかります. 余談ですが, 札幌市の $PM_{2.5}$ については, 現在まで過去1週間分の $PM_{2.5}$ のデータ (1時間値; 速報値) は, 「[札幌市大気環境観測データ速報システム](#)」からも見るすることができます. 上記のように, 札幌市内では非常に高濃度の $PM_{2.5}$ が観測されていましたが, Yasunari et al. (2018) の他の図を見ると, 実際には北海道の他の地域でも高濃度の $PM_{2.5}$ が観測され (図9c), 何よりロシアの森林火災発生域 (サハ共和国) から北海道に至るまでの広範囲において火災の煙

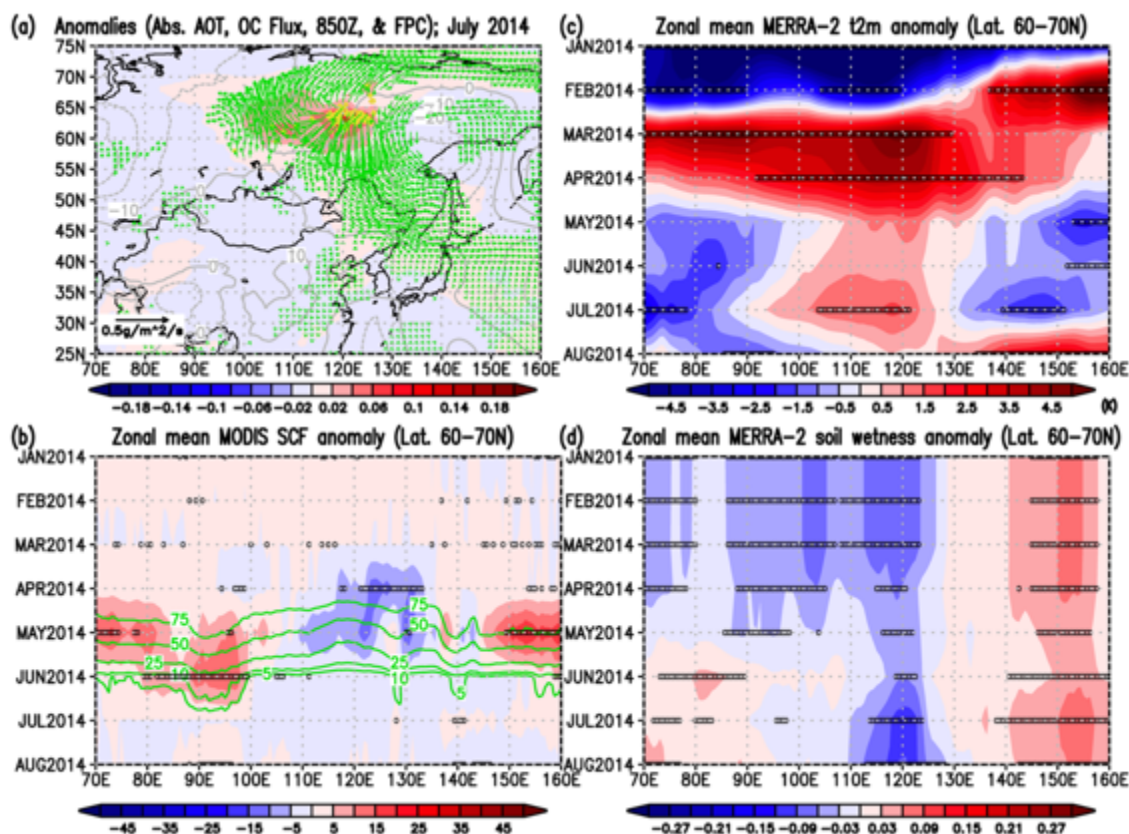


図 10. Yasunari et al. (2018) の Figure 6 より. 2014 年 7 月大規模森林火災に関する火災件数, エアロゾル, 積雪・気象・陸面変数の気候値 (2003–2015) からの偏差. (a) 波長 550 nm における吸収性エアロゾルの光学的深さ (Abs. AOT: 色付きコンター; 単位なし), 火災件数 (黄色コンター; count/grid), 850 hPa のジオポテンシャル高度 (灰色コンター; m), OC (POM) カラム質量フラックス (緑のベクトル; 矢羽単位は図を参照; 矢羽のプロット方法の詳細は論文参照); (b) MODIS による積雪被覆率の北緯 60–70° 帯状平均の気候値 (%; 緑コンター) と気候値からの偏差 (%; 色付きコンター) の時系列; (c) MERRA-2 の 2 m 気温の北緯 60–70° 帯状平均の気候値からの偏差 (K; 色付きコンター) の時系列; (d) (c) と同様であるが, MERRA-2 の表面土壌水分 (単位なし). 0 マークは, 値が Mean Standard Error (MSE) の 3.055 倍より大きい時 (詳細は, Yasunari et al, 2018 参照).

が見られ (図 9a), それに対応する場所で非常に高濃度の PM_{2.5} (MERRA-2 の算出値だと環境省の日平均環境基準を超えるような高濃度) が見られていました (図 9b). 一旦大規模な森林火災が起こると, このように, 非常に広範囲かつ場合によっては風下の遠隔地にまで高濃度の越境大気汚染 (PM_{2.5} や BC・OC エアロゾルなど: Yasunari et al. (2018) の Figure 3 も参照) がもたらされることがあるのがお分かりになるかと思います. つまり, 森林火災は, 発生域とその周辺だけでなく, 他の風下地域なども含めた広範囲への影響が起こり得る現象なのです.

では, Yasunari et al. (2018) の 3 つの事例は, どのような気候的・環境的な状況から発生したものでしょうか? ここでは論文の 3 つの事例のうち 1 つを紹介

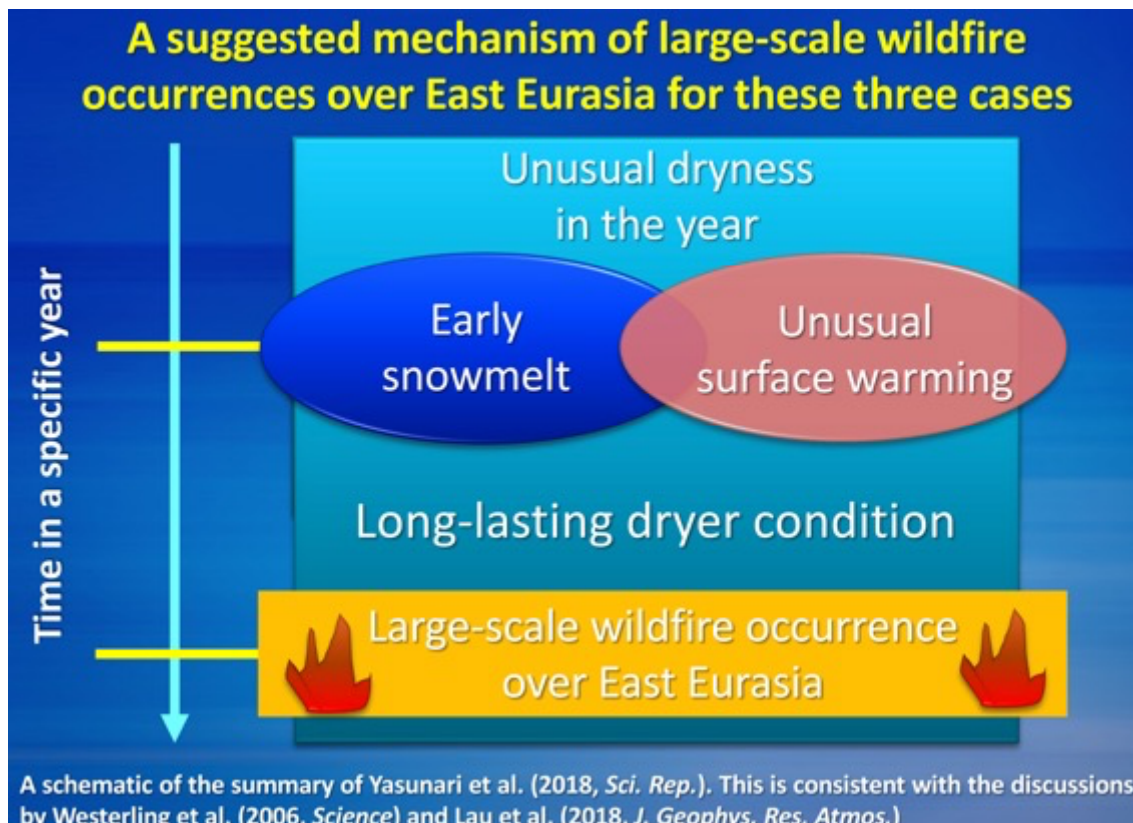


図 11. Yasunari et al. (2018) の 3 つの東ユーラシア域の大規模森林火災発生の気候・環境的状況のまとめの概略図（日本語版は，この論文の北大からのプレスリリースに掲載：https://www.hokudai.ac.jp/news/180426_pr.pdf）。Westerling et al. (2006) や Lau et al. (2018) の WFDL フィードバックの議論とも整合的。

してから，3 つの事例に共通した状況についてまとめたものを紹介します。先に紹介した 2014 年 7 月のシベリア域サハ共和国で発生した森林火災ですが（図 10a），実は，その年の始め頃から周辺の土壌が平年より乾燥しておりました（図 10d）。そして，ポイントは，火災が起こる数ヶ月前に，雪が平年より少なく（雪解けが平年より早いことを示唆）（図 10b），同時期に地上付近が平年より昇温していました（図 10d）。この論文の他の 2 事例（2003 年 5 月と 2008 年 4 月）も同様な現象が起こっており，これから考えられることは，その年の始めから平年より乾燥状態が存在しており，それに加え火災数ヶ月前に平年より温暖かつ融雪が早く，その結果，その後の乾燥の長期化が火災月まで継続したことで，一旦着火すれば（着火原因に関わらず），一気に森林火災が燃え広がるというストーリーで説明がつけました（図 11）。この話を聞いて，気付いた方もおられるかもしれませんが，前の章で話に出しました積雪汚染によって融雪が早まった（加速した）時に，その後見られる WFDL（湿潤先行・乾燥後行）フィードバック（Lau et al., 2018）の話と繋がるのです。アメリカ北西部の森林火災研究においても，

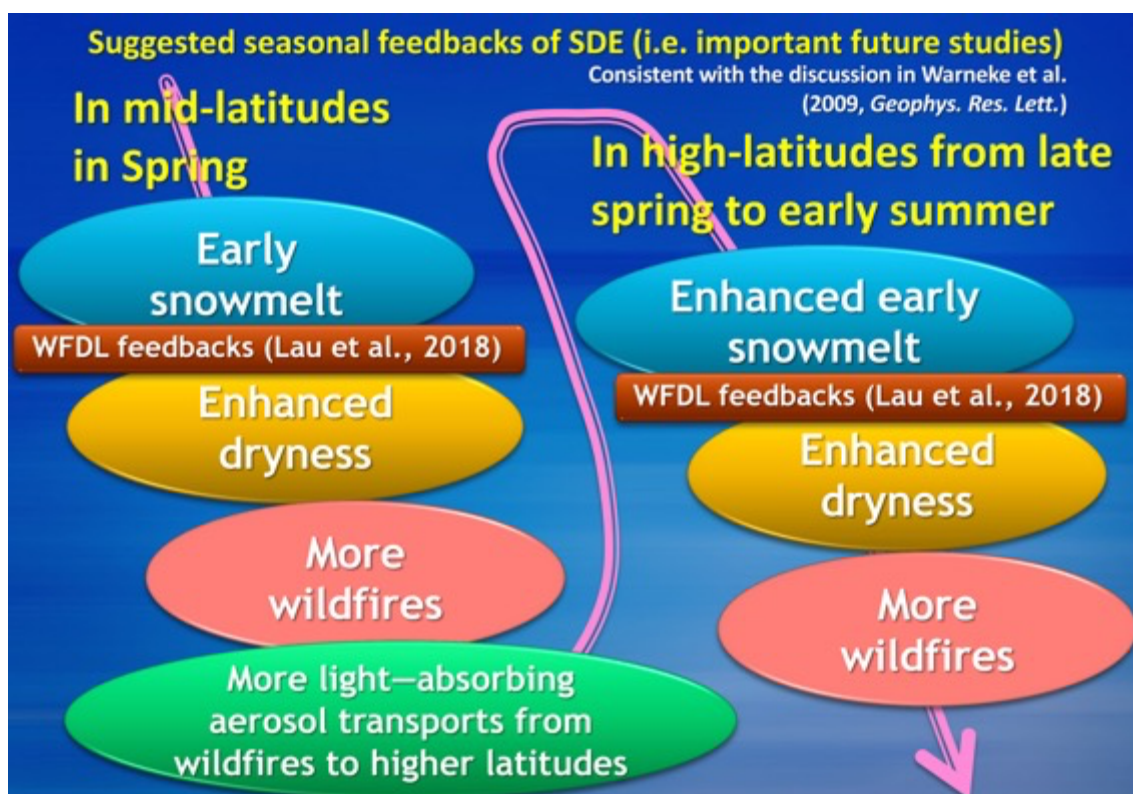


図 12. 今後の地球温暖化と共に予測されている季節積雪の早期融雪開始や火災天候の増加 (e.g., IPCC, 2021) に伴って起こると考えられる SDE や WFDL フィードバック (Lau et al., 2018) も含めた北半球中緯度から高緯度へ季節進行と共に考えられる季節的な大気陸面相互作用による複合的なフィードバック。火災時期が早まったり、火災時期初期に高緯度 (北極域) に火災由来の太陽光吸収性の大気エアロゾルが輸送・沈着して高緯度の雪氷融解を加速する SDE に関する議論は, Warneke et al. (2009)でも言及されている。

春の早期雪解けがその後の森林火災を活発にすると報告されています (Westerling et al., 2006)。さらには、将来的に地球温暖化が進行すると、その度合いに応じて特に北半球の中高緯度において森林火災及びそれに伴う大気汚染の排出も高まると言われています (Veira et al., 2016)。最新の IPCC による第 6 次評価報告書によると、将来的に”fire weather” (火災の天候) が増える地域がいくつもあることが予測されています (中から高程度の信頼度) (IPCC, 2021)。この第 6 次の IPCC 評価報告書では、さらなる温暖化が季節的な積雪を失うことや早期の融雪開始 (高程度の信頼度) の予測も報告されています (IPCC, 2021)。これらを踏まえると、今後早期の融雪開始 (積雪融解の加速) による物理的な効果としての WFDL フィードバック (Lau et al., 2018) が将来的に強化されるだろうと考えられ、その結果として、図 11 のような長期の乾燥化を通じた大規模な森林火災の活発化が懸念されます。この観点から、今後ますます森林火災とそれに伴う大気汚染の研究が重要になってくると考えています。

5. おわりに

今回、日本気象学会北海道支部より北海道支部賞をいただいた機会に、北海道における大気汚染（エアロゾルやPM_{2.5}）と積雪汚染に関連したこれまでの研究に関する解説を書く機会をいただきました。前の章の最後の話まで読んでいただくと、大学院の頃から関わってきた積雪・大気エアロゾルという研究対象が違った視点ではあるものの私のこれまでの様々な研究で繋がっていることがわかっていただけたかと思えます。特に、4章の最後で書きましたように、今後、森林火災と大気汚染の研究はますます地球温暖化の進行と共に大事になってくると考えています。今後、地球温暖化で季節積雪の融雪開始時期が早まると（IPCC, 2021）、Yasunari et al. (2018) のような大規模森林火災の事例が春先に増えることが容易に考えられ、そこから排出された積雪汚染の要因にもなるBCやOCといった太陽光吸収性の大気エアロゾル（e.g., Warren and Wiscombe, 1980; Flanner et al. 2009; Yasunari et al., 2015）が大気汚染として中緯度で増えることも想像できます。Yasunari et al. (2018) のような北海道へ森林火災による越境大気汚染が今後どうなっていくのかも継続して目を向けていきたいと考えております。また、その森林火災による大気汚染がさらに高緯度に運ばれ、高緯度の融解をSDEによって加速したり、融雪開始を早めたりすると（Warneke et al., 2009 の議論と整合的）、WFDL フィードバック（Lau et al., 2018）が中緯度から高緯度に季節進行と共に順々に加速するフィードバックの連鎖が起こることも考えられます（図12）。これらのフィードバックと、将来の温暖化そのものによりIPCC (2021) や Veira et al. (2016) など言われている火災の増加が活発化するのではないかと危惧しています。これらを踏まえ、今後、私はさらに研究を進めて、森林火災の発生要因、その後の大気汚染の発生と積雪汚染などへの影響、さらには大気汚染としての火災及び周辺・風下域の人々の健康影響などに関わる研究を進めていきたいと思っています。また、今後の地球温暖化と共に北極の海氷が減少すると言われており（IPCC, 2021）、今後パナマ運河の利用から北極海航路利用への船舶の航路転換により北極域の人為的BC排出も懸念されています（Comer et al., 2017）。これらの個別・複合プロセスの研究が今後の北極域研究の大気分野を中心とした研究課題の長期構想としても重要であることを、[北極環境研究コンソーシアム \(JCAR\)](#) で準備中の「北極環境研究の長期構想 2024」にも記載しようと思っています（安成, 2022, submitted）。また、現在進めている[科研費研究課題](#)や、[北極域研究加速プロジェクト \(ArCS II\)](#) 及び今後の大型北極プロ

ジェクトなどにおいても上記の今後の重要な研究課題を念頭におきつつ、柔軟に大気エアロゾルと雪氷に絡むような研究を進めていければと考えております。

地球環境科学は、様々なことが絡んでいるところが現象解明の難しいところでもあり、サイエンスとしても非常に興味深いところでもあります。また、この解説記事でも紹介した大気汚染のように国を越えて多くの地域で影響を受ける場合もありますので、様々な国と協力しながらその研究対象に関して議論を一緒にしながら共同研究を行い、新たな知見を得たり、問題解決に進んで行ったりすることが極めて大事な学問でもあります。さらには人が住んでいる場所では、人にも様々な影響を与える場合もあり、人にも関わる学問です。科学には国境はありませんが、「環境と人」両者に関わりながら国を超えて様々な分野の方々と問題とする事象に対して一緒に共同研究することができるのが地球環境科学の醍醐味であり、意義なのです。

この解説記事を読んでいただく方々に、私のこれまでの研究の流れや研究内容を楽しんでいただきつつ、少しでも地球環境科学分野の面白さ、社会との関わり、今後の北極も含めた地球環境科学分野の重要性を感じていただければ幸いです。また、今後地球環境科学分野の研究者を目指す方々が少しでもこの記事を引きかけに増えたなら、それほど嬉しいものではありません。本解説記事でもご紹介しました研究テーマのきっかけ(大学院)やNASAや最近の研究については、中高生向けに内閣府の事業で(河合塾・みらいぶっくの協力)の「[こんな研究をして世界を変えよう～大学の研究室を訪問してみた](#)」でもまとめていますので、そちらも是非ご覧ください。

謝辞

大学院から現在に至るまでの研究は多くの方々に支えられて行ってこられたものですが、スペースの関係でお世話になった全ての方々ととても記載できません。この場をお借りして、これまでの研究を進めるに当たり協力していただいたすべての方々に感謝いたします。その中で、特に下記の方々には大変お世話になりました(一部の方々は今でも大変お世話になっております):北海道大学で研究指導をしていただいた本堂武夫名誉教授、山崎孝治名誉教授、白岩孝行准教授;雪氷と大気エアロゾルの観測の楽しさを学ぶ機会を与えていただいた青木輝夫博士(現在・国立極地研究所);NASA Goddard Space Flight Center (GSFC)でのボスであり、研究を可能にして様々な新しい研究経験とプロジェクト研究に

携わる機会を与えていただいた William K. M. Lau 博士 (現在 Earth System Science Interdisciplinary Center, University of Maryland) と Bill の研究チームで大変お世話になった Kyu-Myong Kim 博士 (NASA/GSFC), Randal D. Koster 博士 (NASA/GSFC), Arlindo M. da Silva 博士 (NASA/GSFC), NASA/GSFC の事務の Cathy L. Newman 氏 (Science Systems & Applications, Inc.), Marion C. August 氏 (X3M Systems, LLC), NASA/GSFC の同僚・友人の皆様, NASA/GSFC で初めて書いた論文の英文校閲をととても時間をかけてサポートしてくれた事務アシスタントの故 Jan Angevine 氏 (当時: ASRC Resource Technology Services), 北大での AERONET 設置の機会を与えてくださった Brent N. Holben 氏 (NASA/GSFC); アメリカ渡航前に滞在する国内の居場所を提供してくださった故里村雄彦教授 (当時: 京都大学大学院理学研究科); 地上ライダーの設置と運用で今もお世話になっています国立環境研究所の清水厚主幹研究員; 現在の所属先である深町康センター長, 大塚夏彦副センター長をはじめとする北極域研究センターの素晴らしい同僚の皆様.

また, この解説でも紹介しました NASA の MERRA-2 再解析データは, NASA/GSFC の Global Modelling and Assimilation Office (GMAO)によって作成されています. また衛星データ (積雪や火災など) は, NASA の MODIS チームや FEER プロジェクトによって作成されました. NASA Center for Climate Simulation (NCCS)の環境も GEOS-5 の開発などで利用させていただきました. 北大に設置の AERONET とライダーによる大気エアロゾルの観測は, NASA 及び国立環境研究所との協働設置で運用されています.

これまでの研究は, 日本学術振興会 (JSPS) の科研費・基盤研究 (C:16K06551)・基盤研究 (B: 特設分野研究; 17KT0066)・基盤研究 (B: 一般研究; 19H01976) , 文部科学省 Arctic Challenge for Sustainability プロジェクト (ArCS; 北極域研究推進プロジェクト: JPMXD1300000000) とその後継プロジェクト (ArCSII; 北極域研究加速プロジェクト: JPMXD1420318865) による研究費や, 多くの共同研究・共同利用の研究支援の元に行っております. 詳細は, 私の研究者情報をまとめています [researchmap](#) を参照ください.

参考文献

- 青木輝夫, 田中泰宙 (2008), 大気エアロゾルの沈着が積雪アルベドに与える影響, *天気*, 55(7), 538–546.
https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2008/2008_07_0006.pdf
- 近藤純正, 沼田洋一, 山崎剛 (1988), 積雪面アルベドのパラメータ化, *雪氷*, 50, 216–224. <https://doi.org/10.5331/seppyo.50.216>
- 成田英器 (1971), 積雪非常面積の測定 II, *低温科学 物理篇*, 29, 69–79.
- 山崎剛, 櫻岡崇, 中村亘, 近藤純正 (1991), *雪氷*, 53, 115–123.
<https://doi.org/10.5331/seppyo.53.115>
- 余田成男 (2014), 里村雄彦会員のご逝去を悼む, *天気*, 61(6), 497–498.
https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2014/2014_06_0061.pdf
- 安成哲平 (2022), 大気陸面相互作用と森林火災と大気汚染, *JCAR 『北極域研究の長期構想 2024』 (仮)*, submitted.
- Aoki, T., H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, K. Sugiura, and H. Kobayashi (2006), Atmospheric aerosol deposition on snow surfaces and its effect on albedo, *SOLA*, 2, 13–16. <https://doi.org/10.2151/sola.2006-004>
- Aoki, T., H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, and K. Sugiura (2007a), Variations of the snow physical parameters and their effects on albedo in Sapporo, Japan. *Ann. Glaciol.*, 46, 1, 375–381. <https://doi.org/10.3189/172756407782871747>
- Aoki, T., M. Hori, H. Motoyoshi, T. Tanikawa, A. Hachikubo, K. Sugiura, T. J. Yasunari, R. Stordvold, H. A. Eide, K. Stamnes, W. Li, J. Nieve, Y. Nakajima, and F. Takahashi (2007b), ADEOS-II/GLI snow/ice products – Part II: Validation results using GLI and MODIS data, *Remote Sens. Environ.*, 111, 274–290.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.035>
- Aoki, T., 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 general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 116, D11114, doi:10.1029/2010JD015507. <https://doi.org/10.1029/2010JD015507>
- Bonasoni, P., P. Laj, F. Angelini, J. Arduini, U. Bonafè, F. Calzolari, P. Cristofanelli, S. Decesari, M. C. Facchini, S. Fuzzi, G. P. Gobbi, M. Maione, A. Marinoni, A. Petzold, F. Roccato, J. C. Roger, K. Sellegri, M. Sprenger, H. Venzac, G. P. Verza, P. Villani, and E. Vuillermoz (2008), The ABC-Pyramid Atmospheric Research Observatory in Himalaya for aerosol, ozone and halocarbon measurements, *Sci.*

- Total Environ.*, 391(2–3), 252–261, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.024>
- Bonasoni, P., P. Laj, A. Marinoni, M. Sprenger, F. Angelini, J. Arduini, U. Bonafè, F. Calzolari, T. Colombo, S. Decesari, C. Di Biagio, A. G. di Sarra, F. Evangelisti, R. Duchi, M. C. Facchini, S. Fuzzi, G. P. Gobbi, M. Maione, A. Panday, F. Roccato, K. Sellegri, H. Venzac, G. P. Verza, P. Villani, E. Vuillermoz, and P. Cristofanelli (2010), Atmospheric Brown Clouds in the Himalayas: first two years of continuous observations at the Nepal Climate Observatory-Pyramid (5079 m), *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 7515–7531. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7515-2010>
- Buchard, V., A. M. da Silva, C. A. Randles, P. Colarco, R. Ferrare, J. Hair, C. Hostetler, J. Tackett, and D. Winker (2016), Evaluation of the surface PM_{2.5} in Version 1 of the NASA MERRA Aerosol Reanalysis over the United States, *Atmos. Environ.*, 125, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.004>
- Chin, M., R. B. Rood, S.-J. Lin, J. F. Muller, and A. M. Thomson (2000), Atmospheric sulfur cycle in the global model GOCART: Model description and global properties, *J. Geophys. Res.*, 105, 24,671–24,687. <https://doi.org/10.1029/2000JD900384>
- Chin, M., P. Ginoux, S. Kinne, 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 sunphotometer measurements, *J. Atmos. Sci.*, 59, 461–483. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059%3C0461:TAOTFT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059%3C0461:TAOTFT%3E2.0.CO;2)
- Colarco, P., A. da Silva, M. Chin, and T. Diehl (2010), Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth, *J. Geophys. Res.*, 115, D14207. <https://doi.org/10.1029/2009JD012820>
- Comer, B., N. Olmer, X. Mao, B. Roy, and D. Rutherford (2017). Prevalence of heavy fuel oil and black carbon in Arctic shipping, 2015 to 2025, International Council on Clean Transportation, 68 pp. <https://theicct.org/publication/prevalence-of-heavy-fuel-oil-and-black-carbon-in-arctic-shipping-2015-to-2025/>
- Conway, H., A. Gades, and C. F. Raymond (1996), Albedo of dirty snow during conditions of melt, *Water Resour. Res.*, 32(6), 1,713–1,718. <https://doi.org/10.1029/96WR00712>
- Ducharne, A., R. D. Koster, M. J. Suarez, M. Stieglitz, and P. Kumar (2000), A

- catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model: 2. Parameter estimation and model demonstration, *J. Geophys. Res.*, 105(D20), 24,823–24,838. <https://doi.org/10.1029/2000JD900328>
- Flanner, M. G., C. S. Zender, J. T. Randerson, and P. J. Rasch (2007), Present-day climate forcing and response from black carbon in snow, *J. Geophys. Res.*, 112, D11202. <https://doi.org/10.1029/2006JD008003>
- 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(7), 2,481–2,497. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2481-2009>
- Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen, J. Prospero, B. Holben, O. Dubovik, and S.-J. Lin (2001), Sources and global distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model, *J. Geophys. Res.*, 106, 20,255–20,273. <https://doi.org/10.1029/2000JD000053>
- Grenfell, T. C., S. G. Warren, and P. C. Mullen (1994), Reflection of solar radiation by the Antarctic snow surface at ultraviolet, visible, and near-infrared wavelengths, *J. Geophys. Res.*, 99(D9), 18,669–18,684. <https://doi.org/10.1029/94JD01484>
- Hori, M., T. Aoki, T. Tanikawa, H. Motoyoshi, A. Hachikubo, K. Sugiura, T. J. Yasunari, H. Eide, R. Storvold, Y. Nakajima, F. Takahashi (2006), In-situ measured spectral directional emissivity of snow and ice in the 8–14 μm atmospheric window, *Remote Sens. Environ.*, 100, 486–502. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.001>
- Ikeda, K., and H. Tanimoto (2015), Exceedances of air quality standard level of PM_{2.5} in Japan caused by Siberian wildfires, *Environ. Res. Lett.*, 10, 105001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/10/105001>
- IPCC (2019), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner, H.-O., D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, and N. M. Weyer (eds.)]. In press. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- IPCC (2021), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu,

- and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Koster, R. D., M. J. Suarez, A. Ducharme, M. Stieglitz, and P. Kumar (2000), A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model: 1. Model structure, *J. Geophys. Res.*, 105(D20), 24,809–24,822.
<https://doi.org/10.1029/2000JD900327>
- Lau, K.-M., V. Ramanathan, G.-X. Wu, Z. Li, S. C. Tsay, C. Hsu, R. Sikka, B. Holben, D. Lu, G. Tartari, M. Chin, P. Koudelova, H. Chen, Y. Ma, J. Huang, K. Taniguchi, and R. Zhang (2008), The Joint Aerosol–Monsoon Experiment: A new challenge for monsoon climate research, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 89, 369–384.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-369>
- Lau, W. K. M., J. Sang, M. K. Kim, K. M. Kim, R. D. Koster, and T. J. Yasunari (2018). Impacts of snow darkening by deposition of light-absorbing aerosols on hydroclimate of Eurasia during boreal spring and summer. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 123, 8,441–8,461. <https://doi.org/10.1029/2018JD028557>
- Lynch-Stieglitz, M. (1994), The development and validation of a simple snow model for the GISS GCM, *J. Clim.*, 7, 1,842–1,855. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007%3C1842:TDAVOA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007%3C1842:TDAVOA%3E2.0.CO;2)
- Oleson, K. W., D. M. Lawrence, G. B. Bonan, M. G. Flanner, E. Kluzek, P. J. Lawrence, S. Levis, S. C. Swenson, P. E. Thornton, A. Dai, M. Decker, R. Dickinson, J. Feddema, C. L. Heald, F. Hoffman, J.-F. Lamarque, N. Mahowald, G.-Y. Niu, T. Qian, J. Randerson, S. Running, K. Sakaguchi, A. Slater, R. Stockli, A. Wang, Z.-L. Yang, X. Zeng, and X. Zeng (2010), Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM) (No. NCAR/TN-478+STR). University Corporation for Atmospheric Research. <http://dx.doi.org/10.5065/D6FB50WZ>
- Osada, K., S. Ura, M. Kagawa, M. Mikami, T. Y. Tanaka, S. Matoba, K. Aoki, M. Shinoda, Y. Kurosaki, M. Hayashi, A. Shimizu, M. Uematsu (2011), Temporal and spatial variations of wet deposition flux of mineral dust in Japan, *SOLA*, 7, 49–52, doi:10.2151/sola.2011-013. <https://doi.org/10.2151/sola.2011-013>
- Qian, Y., T. J. Yasunari, S. J. Doherty, M. G. Flanner, W. K. M. Lau, J. Ming, H. Wang, M. Wang, S. G. Warren, and R. Zhang (2015), Light-absorbing particles in snow and ice: measurement and modeling of climatic and hydrological impact, *Adv. Atmos. Sci.*, 32, 64–91. <https://doi.org/10.1007/s00376-014-0010-0>

- Randles, C. A., A. M. da Silva, V. Buchard, P. R. Colarco, A. Darmenov, R. Govindaraju, A. Smirnov, B. Holben, R. Ferrare, J. Hair, Y. Shinozuka, and C. J. Flynn (2017), The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation, *J. Clim.*, 30, 6,823–6,850. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0609.1>
- Rienecker, M. M., M. J. Suarez, R. Todling, J. Bacmeister, L. Takacs, H.-C. Liu, W. Gu, M. Sienkiewicz, R.D. Koster, R. Gelaro, I. Stajner, and J. E. Nielsen (2008), The GEOS-5 Data Assimilation System—Documentation of versions 5.0.1, 5.1.0, and 5.2.0, *Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*, 27, 118 pp. <https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Rienecker369.pdf>
- Stieglitz, M., A. Ducharne, R. D. Koster, and M. J. Suarez (2001), The impact of detailed snow physics on the simulation of snow cover and subsurface thermodynamics at continental scales, *J. Hydromet.*, 2, 228–242. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002%3C0228:TIODSP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002%3C0228:TIODSP%3E2.0.CO;2)
- Veira, A., G. Lasslop, and S. Kloster (2016), Wildfires in a warmer climate: Emission fluxes, emission heights, and black carbon concentrations in 2090–2099, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 3,195–3,223. <https://doi.org/10.1002/2015JD024142>
- Warneke, C., R. Bahreini, J. Brioude, C. A. Brock, J. A. de Gouw, D. W. Fahey, K. D. Froyd, J. S. Holloway, A. Middlebrook, L. Miller, S. Montzka, D. M. Murphy, J. Peischl, T. B. Ryerson, J. P. Schwarz, J. R. Spackman, and P. Veres (2009), Biomass burning in Siberia and Kazakhstan as an important source for haze over the Alaskan Arctic in April 2008, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02813. <https://doi.org/10.1029/2008GL036194>
- 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(12), 2,734–2,745. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037%3C2734:AMFTSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037%3C2734:AMFTSA%3E2.0.CO;2)
- Westerling, A. L., H. G. Hidalgo, and T. W. Swetnam (2006), Warming and earlier spring increase Western U.S. forest wildfire activity, *Science*, 313, 940–943. <https://doi.org/10.1126/science.1128834>
- Wiscombe, W. J., and S. G. Warren (1980), A model for the spectral albedo of snow, I: Pure snow, *J. Atmos. Sci.*, 37(12), 2,712–2,733. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037%3C2712:AMFTSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037%3C2712:AMFTSA%3E2.0.CO;2)

- Yamazaki, T., J. Kondo, T. Sakuraoka, and T. Nakamura (1993), A one-dimensional model of the evolution of snow-cover characteristics, *Ann. Glaciol.*, 18, 22–26. <https://doi.org/10.3189/S0260305500011204>
- Yasunari, T. J. and K. Yamazaki (2009), Impacts of Asian dust storm associated with the stratosphere-to-troposphere transport in the spring of 2001 and 2002 on dust and tritium variations in Mount Wrangell ice core, Alaska, *Atmos. Environ.*, 43, 16, 2,582–2,590. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.025>
- Yasunari, T. J., T. Shiraiwa, S. Kanamori, Y. Fujii, M. Igarashi, K. Yamazaki, C. S. Benson, and T. Hondoh (2007), Intra-annual variations in atmospheric dust and tritium in the North Pacific region detected from an ice core from Mount Wrangell, Alaska, *J. Geophys. Res.*, 112, D10208. <https://doi.org/10.1029/2006JD008121>
- Yasunari, T. J., P. Bonasoni, P. Laj, K. Fujita, E. Vuillermoz, A. Marinoni, P. Cristofanelli, R. Duchi, G. Tartari, and K.-M. Lau (2010), Estimated impact of black carbon deposition during pre-monsoon season from Nepal Climate Observatory - Pyramid data and snow albedo changes over Himalayan glaciers, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 6,603–6,615. <https://doi.org/10.5194/acp-10-6603-2010>
- Yasunari, T. J., R. D. Koster, K.-M. Lau, T. Aoki, Y. C. Sud, T. Yamazaki, H. Motoyoshi, and Y. Kodama (2011), Influence of dust and black carbon on the snow albedo in the NASA Goddard Earth Observing System version 5 land surface model, *J. Geophys. Res.*, 116, D02210. <https://doi.org/10.1029/2010JD014861>
- Yasunari, T. J., Q. Tan, K.-M. Lau, P. Bonasoni, A. Marinoni, P. Laj, M. Ménégoz, T. Takemura, and M. Chin (2013), Estimated range of black carbon dry deposition and the related snow albedo reduction over Himalayan glaciers during dry pre-monsoon periods, *Atmos. Environ.*, 78, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.031>
- Yasunari, T. J., K.-M. Lau, S. P. P. Mahanama, P. R. Colarco, A. M. da Silva, T. Aoki, K. Aoki, N. Murao, S. Yamagata, and Y. Kodama (2014), The GODDARD SNOW Impurity Module (GOSWIM) for the NASA GEOS-5 Earth System Model: Preliminary comparisons with observations in Sapporo, Japan, *SOLA*, 10, 50–56. <https://doi.org/10.2151/sola.2014-011>
- Yasunari, T. J., Koster, R. D., Lau, W. K. M., and Kim, K.-M. (2015), Impact of snow darkening via dust, black carbon, and organic carbon on boreal spring climate in

the Earth system. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 5,485–5,503.
<https://doi.org/10.1002/2014JD022977>

Yasunari, T. J., M. Niwano, Y. Fujiyoshi, A. Shimizu, M. Hayasaki, T. Aoki, A. M. da Silva, B. N. Holben, S. Matoba, N. Muraio, S. Yamagata, and K.-M. Kim (2017), An unreported Asian dust (Kosa) event in Hokkaido, Japan: A case study of 7 March 2016, *SOLA*, 13, 96–101. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-018>

Yasunari, T. J., K.-M. Kim, A. M. da Silva, M. Hayasaki, M. Akiyama, and N. Muraio (2018), Extreme air pollution events in Hokkaido, Japan, traced back to early snowmelt and large-scale wildfires over East Eurasia: Case studies, *Sci. Rep.*, 8, 6413. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24335-w>