

1 地球環境保全等試験研究費〔地球環境保全試験研究費（地球一括計上）〕

研究課題	日本域に沈着する光吸収性不純物に起因する雪氷面放射強制力の時空間変動監視と気候システムへの影響解明
研究期間	令和4年度～令和8年度（5年計画第3年度）
担当者	[気象予報研究部] ○庭野匡思、大河原望、谷川朋範 [全球大気海洋研究部] 梶野瑞王、足立光司、大島 長 [気象観測研究部] 工藤 玲 [火山研究部] 石元裕史
目的	大気中から雪氷面に沈着するブラックカーボン（以下、BCと略）やダストといった光吸収性不純物（Light Absorbing Particles; 以下、LAPと略）は、雪氷面における短波放射加熱を助長することから、雪氷融解の強力なトリガーとなり得る。ひとたび雪氷圏の融解が始まり面積の縮小が始まると、正のフィードバック機構である積雪－アルベドフィードバックが誘起され、雪氷圏の損失が加速度的に進む可能性がある。1980年代以降、観測技術と数値モデルの進展によって、雪氷中に存在するLAPに関する知見は確実に増えてきているが、主に現地観測が依然として足りておらず、観測事実を基にしたモデルの高度化が十分進んでおらず、世界的にも定量的な不確定性は非常に大きい。本研究課題では、我々が持つ現地観測、衛星リモートセンシング、及び数値モデリングの技術と知見を融合させ、1) 国内の積雪中LAPに起因する放射強制力の詳細な時空間変動を初めて提示すること、2) 単独の観測地点での融雪時期の変化に限定されない従来よりも多角的かつ広範な影響評価を実施することを目的とする。
目標	本研究では、(1) モニタリング、(2) プロセス研究、及び(3) 数値モデリングの3つのサブテーマを設定する。  (1) モニタリング 地上現地観測では、札幌、長岡、北見の連続観測地点でそれぞれ積雪中LAPの連続測定を行うことにより、国内の冬季LAP（主に、BC、ダスト、及び有機炭素OC）の監視を実施する。札幌では、積雪中LAP分析と並行して、大気の連続サンプリングを実施し、大気と雪氷中のLAP変化の同時測定を世界で初めて実現させる。更に、全天分光放射計による積雪物理量・LAP濃度遠隔推定、地上の放射観測データから大気中のLAP変動を推定する解析、CALIPSO衛星に搭載されたライダーによって測定された情報から大気粒子の鉛直分布の情報を抽出する解析、また、電子顕微鏡観察を用いたLAP組成・混合状態に関する情報を組み合わせて、LAPの詳細な時間変化の全貌を浮かび上がらせる。特に、札幌における観測は、IPCC 第6次報告書策定のために実施された積雪モデル国際相互比較プロジェクトESM-SnowMIPへの貢献を通して、世界的に高い知名度を持つ観測拠点となっており、今後もその価値を維持する取り組みを続ける。また、同様の国際プロジェクトが実施される場合は、積極的に参加し貢献する。また、積雪の時空間変動に関する知見が絶対的に不足している本州中部山岳域に新たな気象・放射・雪氷モニタリングサイトを構築し、関係する気象・放射・雪氷物理量の自動モニタリングを実現させる。以上の取り組みを補足するものとして、これまで我々が着目してきていなかった国内の他地域における積雪中LAP機動観測を1冬期につき1回実施する。また、国内の観測の比較対象として、人為起源物質の発生源域と遠方域のBCを定量的に分離することができる北極域における大気中BC観測や雪氷中LAP分析も実施する。この北極域での観測は、地球規模で進行する雪氷融解の理解にも貢献する。  (2) プロセス研究 積雪内部LAP混合状態の時間変化プロセスと、大気・雪氷中におけるLAP除去過程について、重点的に研究を進める。特に前者については、我々が札幌・長岡・北見で定常的に取得している積雪サンプルから、積雪内部LAP混合状態に関する情報を抽出するための革新的な技術的開発に挑戦する。いずれのプロセスについても、札幌で取得される各種データ（サブテーマ1）を多角的に組み合わせて、従来よりも精緻なパラメタリゼーションを構築する。  (3) 数値モデリング 領域気象化学モデルNHM-Chemと積雪変質モデルSMAPを面的にフルカップルさせ、直

	<p>近10年間でターゲットとした精密大気-積雪数値シミュレーションを実施する。その結果を元に、日本の積雪変化に対するLAPの定量的寄与を放射強制力、積雪面積、及び積雪水量の観点で評価する。NHM-Chem-SMAPモデルシステムは、最新のコンピューターにおいても計算コストが依然として大きいため、長期気候計算は気象研究所地球システムモデルMRI-ESMを用いて実施する。MRI-ESMをSMAPと組み合わせることで、1900年から2100年にかけての日本の積雪変化に対するLAPの定量的寄与を、複数の将来気候変化シナリオごとに提示する。</p>
<p>研究の概要</p>	<p>(1) モニタリング</p> <p>(1. 1) 定常観測</p> <p>地上現地観測では、札幌（北海道大学低温科学研究所/気象研究所）、長岡（防災科学研究所雪氷防災研究センター）、北見（北見工業大学）の連続観測地点でそれぞれ積雪中LAPの連続測定を行うことにより、国内の冬季LAP（主に、BC、ダスト、及び有機炭素OC）の監視を実施する。測定に際しては、表面10 cm程度の積雪サンプルを現地で直接採取し、気象研究所に冷凍状態で送付して実験室で融解させフィルター上に濾過した後、それを熱光学式カーボン分析装置で分析し更に重量測定することで、積雪中BC・OC・ダスト濃度を定量する。各サイトにおける積雪サンプルの取得頻度は週2回を予定している。また札幌においては、全天分光日射計を用いて、リモートセンシングの原理により、積雪表面付近のLAP変動を監視する。また、OPCを用いて10ナノメートルから数十マイクロメートルのエアロゾル粒径の測定を連続的に行い、得られる濃度と粒径分布から高い時間分解能による起源推定、粒子成長過程等をモニタリングする。更に、札幌において大気中の連続サンプリングを実施し、雪氷サンプルの分析と同様の手法を用いて大気中LAP変動を明らかにする。大気中LAP変動については、並行して、地上の放射観測データから大気中のLAP変動を推定する手法を用いて、大気サンプリングの結果と相補的な解析・評価を実施する。</p> <p>大気・積雪中に存在するLAPの個別粒子分析を、気象研究所走査型及び透過型電子顕微鏡観察によって実施し、その形態と成分の実態解明を行う。また、波長依存性を持つLAPの一種であるブラウンカーボンなどの形状と成分分析も行い、大気中の挙動や積雪沈着時の影響についても検討を行う。</p> <p>札幌・長岡・北見においては、各観測グループが保有している自動気象観測装置を用いて、LAPの定量的影響を評価する際に必要となる気象・雪氷物理量の変動の把握を実施する。各観測サイトにおいては、現地の共同研究者に積雪断面観測を委託し、積雪内部の物理量プロファイル（粒径、密度、温度、含水量、雪質）の情報を取得する。</p> <p>我々が予備的に実施している国内での面的な大気-雪氷数値シミュレーション結果（サブテーマ3）によると、山岳域における積雪の再現精度が平地に比べて劣ることが示されている。一方で、山岳域では、モデル検証に利用可能なデータの数が絶対的に不足していることから、その点に起因する不確定性もある。そこで、本州中部山岳域（新潟県を予定；防災科学研究所雪氷防災研究センターと協力予定）に新たな気象・放射・雪氷モニタリングサイトを構築し、関係する気象・放射・雪氷物理量の自動モニタリングを実現させる。このサイトには、1冬期の間は何度か訪れ、札幌と同様の積雪サンプリングを実施し、積雪中LAPを把握する。LAPの分析には、札幌・長岡・北見で用いる手法と同様とする。ただし、サンプリングの頻度がそれらのサイトよりも低くなるため、積雪下層まで鉛直高解像度にサンプリングする。</p> <p>更に、人為起源物質の発生源域と遠方域のBCを定量的に分離するためには人為発生源から離れた地点での観測が必須であり、これまでに継続的に観測を行ってきた北極域（ニーオルスン・グリーンランドなど）における大気中BC観測や雪氷中LAP分析も同時並行で実施する。これらの極域でのデータは、地球規模でのLAP物質輸送評価に重要であり、後述の地球システムモデル（サブテーマ3）の検証データとしても必要である。</p> <p>(1. 2) 機動観測</p> <p>国内の積雪中LAP分布を従来よりも更に詳細に把握するために、上記以外の地域（東北地方、北陸地方西部、及び西日本の高山地域）の複数地点において機動観測を1冬期につき1回実施する。ここでも、LAPの分析手法は、札幌・長岡・北見で用いる手法と同様とする。具体的な機動観測実施場所の選定に当たっては、LAP感度が高い特に注目すべきエリアを絞るために、後述の領域気象化学-積雪モデルNHM-Chem-SMAP計算結果（サブテーマ3）を参照する。</p>

### (1. 3) 衛星リモートセンシング

最新の気象衛星ひまわり8号の観測結果から推定される積雪域の変化を監視の対象とする。その結果と後述の数値モデルシミュレーション結果（サブテーマ3）を組み合わせ、冬季の国内におけるLAP変動とそれに起因する積雪変化を明らかにする。

CALIPSO衛星に搭載されたライダーによって測定された結果から大気粒子の鉛直分布の情報を我々が開発した手法に従って抽出する。この結果を札幌における大気・雪氷中LAP変動と組み合わせ、3次元的な時空間変動の理解を深化させる。本データも、数値モデルシミュレーションデータと相互比較して、両者の整合性を議論する。

### (2) プロセス研究

#### (2. 1) 積雪内部LAP混合状態の変化は何によって引き起こされるのか？

我々が札幌・長岡・北見で定常的に取得している積雪サンプルから、積雪内部LAP混合状態の情報を抽出するための革新的技術的開発を行う。積雪サンプルを気象研究所に冷凍状態で送付して実験室で融解させフィルター上に濾過する前に、外部混合しているLAPと内部混合しているLAPを分離する手法を開発する。その新しい分析手法の妥当性を確認するために、走査型及び透過型電子顕微鏡を用いて積雪サンプルを分析し、積雪内部LAP混合状態解明に資する実環境からのLAPに関する基礎情報を集積する。札幌の積雪サンプルからLAP混合状態が確認できた日については、全天分光日射計による積雪表層LAP抽出において考慮される混合モデルを分析によって確認された混合状態に対応させ、推定されるLAP濃度が熱光学式カーボン分析装置の結果と整合するかどうかを調べる。併せて、現地観測（サブテーマ1）で得られたいくつかの観測条件の下で、精密積雪粒子モデル（Ishimoto et al., 2018）を用いたLAP混合粒子モデルを開発し、その粒子に対する光散乱特性の理論計算結果に基づく積雪散乱シミュレーションを実施する。以上で得られる知見と、サブテーマ1で取得される気象・放射・雪氷データと総合して組み合わせ、混合状態変動を推定するためのパラメタリゼーションを構築する。この成果は、積雪変質モデルSMAPの最新版（Niwano et al., 2014, 2015）に導入する。

#### (2. 2) 大気・雪氷中におけるLAP除去過程の理解の深化

我々が札幌において取得する多種多様な大気・積雪中LAP濃度観測データを最大限活用して、雲底におけるLAP除去に関する知見を深化させる。この結果に基づいて、従来よりも現実的なパラメタリゼーションを構築し、サブテーマ3で説明する領域気象化学モデルNHM-ChemとMRI-ESMに組み込む。

積雪については、長岡の雪氷防災研究センターの低温実験室において、理想的な条件下における室内実験を、LAPサイズ・種類、積雪粒径、融解水量を個別に変更させながら複数のパターンについて実施し、計算手法高度化に資する知見を集積する。この結果に基づいて、従来よりも現実的なパラメタリゼーションを構築し、積雪変質モデルSMAPの最新版に組み込む。

### (3) 数値モデリング

#### (3. 1) NHM-Chem-SMAP

気象庁本庁と開発中の面的計算が可能な次世代版SMAPとNHM-Chemを組み合わせ、国内における積雪中LAPの面的な評価を実現させる。現在、その面的計算可能なSMAPでは、先行研究による新潟県内での積雪中LAP濃度評価結果に基づいて、長岡で観測された積雪中LAP濃度の季節変化を気候値と仮定して一様に与えている。その部分を本提案研究ではNHM-Chemによって与える方法に高度化する。その上で、LAPのon/off実験を行い、日本の積雪変化に対するLAPの定量的寄与を放射強制力、積雪面積、及び積雪水量の観点で評価する。

上記の研究と同時並行で、サブテーマ2で開発される積雪内部LAP混合状態推定パラメタリゼーションと大気・雪氷中LAP除去過程計算パラメタリゼーションをSMAPとNHM-Chemに組み込み、それらの評価を札幌・長岡・北見で取得されるデータ（サブテーマ1）を用いて行う。評価対象期間は、直近10年間とする。そのため、NHM-Chemを駆動する大気情報には気象庁の最新の再解析データJRA-55を利用する。更に、BCについて

	<p>は、人為起源及びバイオマス燃焼起源の切り分けと、日本の積雪に対するそれぞれの影響評価を本モデルによって行う。</p> <p>(3. 2) ESM-SMAP</p> <p>NHM-Chemは精緻な化学過程を考慮しているものの、計算コストが大きいため、現状、長期気候計算には適さない。そこで、本提案研究では、気候計算を実施するために気象研究所開発地球システムモデルMRI-ESM2を用いる。本モデルは、気象庁の全球天気予報用現業モデルGSM をベースにして気候モデル用に改変した大気モデルに、海洋モデル、エアロゾルモデルMASINGAR (the Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere)、大気化学モデル、炭素循環などが結合されて開発されたものである。本提案研究では、NHM-Chem-SMAPと同様に、MRI-ESMとSMAPを面的に結合させて気候計算を実施し、複数の将来気候変化シナリオによって、日本の積雪変化に対するLAPの定量的寄与がどのように変化するのかを明らかにする。本提案研究の解析対象期間は1900年から2100年とする。NHM-Chemと同様に、BCについては、人為起源及びバイオマス燃焼起源の切り分けを実施する。</p>
<p>研究の有効性</p>	<p>本研究課題は、「地球観測の推進戦略」が掲げる「気候変動対策の効果把握」の方向性に沿う。また、将来のBC排出量規制に資する情報を提供できる点は、本提案研究の成果が社会的、経済的、あるいは行政的な価値をも持ち得ることを意味する。更に、BCについては、人為起源及びバイオマス燃焼起源の切り分けを行うことなどを通して、「人為的な地球環境の変動の把握」（「地球観測の推進戦略」）に資する定性的・定量的情報を示す。また、関連する数値モデリング技術の高度化にも引き続き取り組むことから、「気候変動の予測精度向上」（「地球観測の推進戦略」）にも大いに貢献する。更に、本研究課題で開発・高度化する次世代の領域気象化学－雪氷モデルは、気象庁で公表している解析積雪深・降雪量プロダクト、及びそれらを活用して発表される各種防災情報の更なる高度化に貢献することが期待できる。</p>
<p>令和6年度実施計画</p>	<p>(1) モニタリング</p> <p>札幌、長岡、北見等の連続観測地点で積雪と大気中のBC、OC、鉍物性ダスト等 LAP 成分の連続測定を継続する。それらの観測点では、地上気象・放射観測も継続する。妙高笹ヶ峰では、豪雪地帯の気象・放射・積雪に着目した連続観測を継続する。CALIPSO衛星に搭載されたライダーによって測定された結果から大気中 LAP 粒子の鉛直分布の情報を抽出する。この結果を札幌における大気・雪氷中 LAP 直接観測結果と組み合わせる。また、北極域での現地観測も実施し、電子顕微鏡分析用エアロゾル粒子試料及び積雪中 LAP 濃度分析用試料を採取・解析する。</p> <p>(2) プロセス研究</p> <p>積雪サンプルから、積雪内部 LAP 混合状態の情報を抽出するための技術開発を継続する。各観測点で得られる積雪サンプル中に存在する LAP の個別粒子分析を気象研究所走査型及び透過型電子顕微鏡観察によって実施し、その形態と成分の実態解明を行う。大気・雪氷中における LAP 除去過程の検討のための基礎データをサブテーマ1で得られる観測データから抽出・整理する。</p> <p>(3) 数値モデリング</p> <p>面的結合されたMRI-ESM-SMAPとNHM-Chem-SMAPによる近年を対象としたモデル計算結果を、上記(1)などで取得した観測データにより検証するとともに、雪氷面でのLAPによる放射強制力を評価する。必要に応じてモデルの改良を行う。産業革命前から現在及び将来シナリオにもとづく気候モデル計算を実施する。</p>