

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

アジア起源の短寿命気候汚染物質が北極域の環境・気候に 及ぼす影響に関する研究 (2-1505)

平成27年度～平成29年度

Impacts of Short-Lived Climate Pollutants from Asia on the Arctic Climate and Environment

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人海洋研究開発機構

平成30年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 人為起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析 （国立研究開発法人国立環境研究所）	12
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 自然起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析 （国立研究開発法人海洋研究開発機構）	43
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	67

I. 成果の概要

課題名 2-1505 アジア起源の短寿命気候汚染物質が北極域の環境・気候に及ぼす影響に関する研究

課題代表者名 谷本 浩志（国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター
地球大気化学室 室長）

研究実施期間 平成27～29年度

累計予算額 95,930千円（うち平成29年度：30,351千円）

予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 北極、気候、大気汚染、短寿命気候汚染物質、ブラックカーボン、林野火災、モデル

研究体制

- (1) 人為起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (2) 自然起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析(国立研究開発法人海洋研究開発機構)

1. はじめに(研究背景等)

近年の北極圏における環境・気候変化には世界的に懸念が高まっており、一方で温暖化により北極海航路が開け、海底資源が探査できるなど大きな社会経済的利便性も指摘されている。このような状況で、わが国は平成25年に北極評議会へのオブザーバー資格を獲得し、北極圏における国際的枠組みづくりに環境分野で貢献していくための戦略と科学的知見による裏付けが早急に必要とされていた。科学技術面では、北極評議会の中のAMAP(Arctic Monitoring and Assessment Programme, 北極監視評価プログラム)でブラックカーボンとメタン(CH₄)のタスクフォースが立ち上がるなど、北極圏における気候および環境変化に関する学際的国際研究が欧米主導で提案され、実施される中、アジアからの研究提案は何もなされておらず、アジアと北極圏の環境・気候に関する研究を行うための早急なアクションが必要であった。また、こうした北極圏の環境や気候に関する知見は国際政治とも深く関係しており、いわゆる「北極外交」への貢献として、全府省的な関心が寄せられていた。

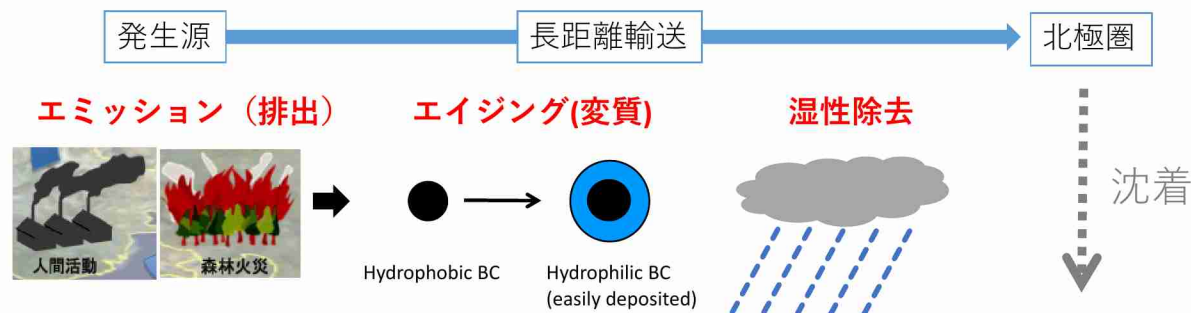
そこで本研究では、アジア起源のSLCP(Short-Lived Climate Pollutants, 短寿命気候汚染物質と訳し、地域的な放射収支に影響を及ぼしやすい大気汚染物質)のうち、特にブラックカーボンに注目し、北極圏の大気質・気候変動に関連して、我が国の北極圏に関する環境面での国際貢献の一助とすべく研究をおこなった。

2. 研究開発目的

海水の急激な減少に代表される近年の北極圏における環境変化は新聞やテレビ等でも報道され、世界的に関心が高まっている。北極圏の生態系への影響に加えて、北極海航路や海底資源など社会経済活動にも大きな影響があることから各国政府の関心も高まっている。このような状況で、わが国は平成25年に北極評議会へのオブザーバー資格を獲得するなど、北極圏の国際的な議論への関与を増しつつある。一方、SLCP(Short-Lived Climate Pollutants, 短寿命気候汚染物質と訳し、地域的な放射収支に影響を及ぼしやすい大気汚染物質)に分類されるブラックカーボンなどが北極圏に運ばれて沈着し、積雪のアルベドを変化させることで北極圏における海水の融解に寄与しているとの報告もあり、北極評議会の中のAMAP(Arctic Monitoring and Assessment Programme, 北極監視評価プログラム)でブラックカーボンとメタンのタスクフォースが立ち上がるなど、北極圏における気候および環境変化に関する学際的研究が国際的に立ち上がりつつあった。しかしながら、欧米各国を中心とした研究プロジェクトが多く、アジアを中心とした北極圏の環境・気候に関する研究は提案されていなかった。そこで本研究では、アジア起源のSLCP、特にブラックカーボンとその関連物質に注目し、アジアから北極圏へのBCの輸送実態の把握とそのメカニズムの解明、アジアが北極圏の環境・気候に及ぼす影響の定量的評価、人為起源と自然起源の相対的な寄与率の導出、およびアジアと欧米の寄与率の相違を明らかにすることで、ブラックカーボンが北極圏の環境・気候に及ぼす影響の理解を深め、我が国の北極圏に関する科学技術面および環境面での国際貢献の一つとすることを目的とする。

3. 研究開発の方法

本研究では、SLCPのうち特にブラックカーボン（BC）に注目し、アジアにおける人間活動起源および自然起源のBCが北極圏の環境や気候に及ぼす影響を定量的に評価した。具体的には、（サブテーマ1で）中国など東アジアの人間活動から、（サブテーマ2で）シベリア森林火災など自然起源発生源から大気中に放出されたBCやその他大気汚染物質がどのようなメカニズムで、どのような経路をどの程度の頻度・強度で北極まで長距離輸送され、北極の環境と気候にどの程度の影響を及ぼしているかを定量的に評価した（図I-1）。また、人為起源と自然起源の相対的寄与率を求めるとともに、アジアの寄与を欧州や北米の寄与と比較した。以下、サブテーマごとに詳細を述べる。



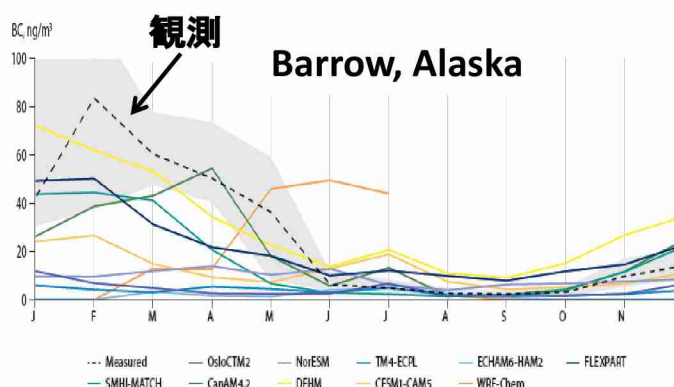
図I-1. 中緯度から排出されたブラックカーボンが北極圏に輸送されるまでの過程

(1) 人為起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析

オイラー型全球化学輸送モデルの開発とタグトレーサーシミュレーション

SLCPの主要成分の一つであるBCに注目した三次元大気化学輸送モデルによるシミュレーションを行った。BCは太陽光を吸収することで大気を加熱する効果を持つだけでなく、雪氷面へ沈着し融解を促進することが懸念されており、北極圏の環境・気候に影響を及ぼすSLCPの中でも特に重要な物質として注目されている。そこで、BCに特化したモデルの改良を試みた。用いたモデルはGEOS-Chem全球化学輸送モデルであり、これは対流圏の詳細な気体及びエアロゾル化学過程を含み、NASA/GMAO (Global Modeling and Assimilation Office) が提供する気象場データGEOS (Goddard Earth Observing System) によって駆動されるオフラインの全球化学輸送モデル (CTM)である。本研究ではGEOS-Chem version 9-02、気象場にはGEOS-5を用い、水平解像度 $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、鉛直方向には地上から0.01 hPaまでを47層に分割して計算した。BCの長距離輸送にとって重要な過程についてGEOS-Chemでの取り扱いについて検討し、北極圏のBC観測値の再現性が向上するように改良を行った。GEOS-ChemモデルによるBCの再現性検証には、北極圏での地上観測データを使用した。

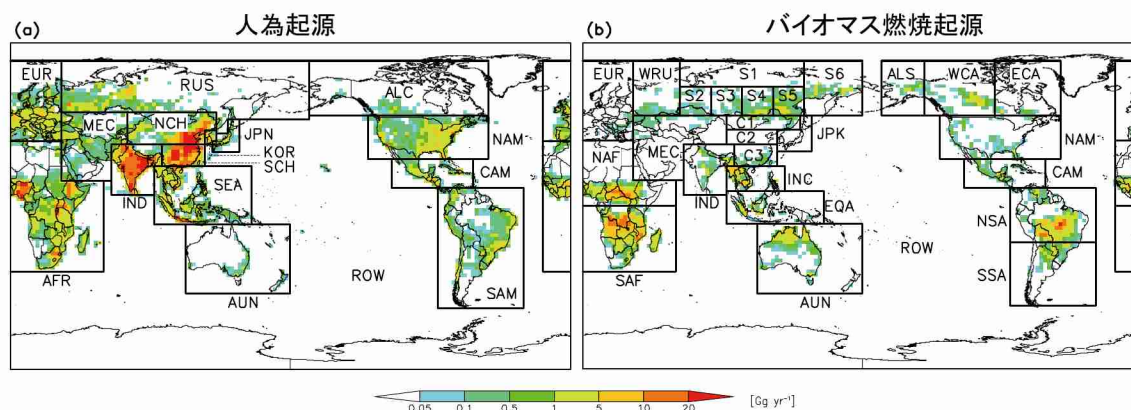
これまでのCTMによる相互比較実験では、北極圏でBC濃度が上昇する冬季から春季において10倍以上過小評価するなど、季節変化が再現できていないモデルが多く、モデル間のばらつきも非常に大きいことが報告されている。最新のモデルにおいても、北極圏でのBCの再現性は向上しつつあるものの、濃度がピークとなる冬・春季において5割程度の負のバイアスが見られるなど、モデルで表現されるプロセスの不確定要素は依然大きいと考えられている（図I-2）。CTMによるBCの再現性が十分ではない原因として、



図I-2. アラスカ・バローにおけるブラックカーボンの観測と全世界10のグループによるモデル結果の比較 (AMAP, 2015)。

モデルで使用する排出量データや、疎水性粒子として排出されたBCが他の水溶性エアロゾルと内部混合して親水性粒子へと変質する過程、湿性除去過程の不確実性が挙げられる。そこで、「排出」に伴う不確実性の把握及び、北極圏への長距離輸送にとって特に重要なBCの「変質」、「湿性除去」の各プロセスについて、モデルの精緻化を行った。具体的には、複数の人為起源の排出インベントリを用いた実験により、排出量データの違いが北極圏でのBC濃度に及ぼす不確実性を調べた。さらに、BCが他のエアロゾル成分に被覆されることによって疎水性エアロゾルから親水性エアロゾルへ変質する過程について、新たなパラメタリゼーションをGEOS-Chemに導入しBCシミュレーションの精緻化を進めた。また、BCの降水による湿性除去率についても感度実験を行い、北極圏の濃度に及ぼす影響を調べた。

また、北極圏におけるBCの人為起源と自然起源の相対的寄与および、アジアや欧米からの寄与を定量的に評価するための「タグ付きBCシミュレーション」が行えるようモデルの改良を行った。タグ付きBCシミュレーションでは、発生源毎のBCを別個のトレーサー（「タグトレーサー」）として計算することによって、それぞれのタグBCの濃度から各発生源の寄与の定量的評価が可能となる。本研究では発生源「領域」で区別するだけでなく、人為起源発生源と自然起源発生源からのBCをそれぞれ別のタグトレーサーとして扱い、発生源の「種類」でも区別することによって相対的寄与を評価できるようにした。タグ付き計算のための人為起源発生源領域の区分は、主要な発生源であるアジアの各地域、北米、ヨーロッパ、ロシアなど、16領域を設定した（図I-3a）。特にアジアは、従来の研究では一つの発生源として扱われることも多かったが、本研究では東南アジアや南アジアを区別するとともに、日本と韓国、中国北部・南部を分けて東アジア域内の内訳も詳しく評価できるようにした。バイオマス燃焼起源BCのタグ領域については、北極圏に近いロシアやカナダを細かく分けるようにし、27領域を設定した（図I-3b）。特にロシアについては、サブテーマ2で用いられるシベリアでの植生別のサブ地域の区別と共通となるように領域を設定し（計7領域）、シベリア森林火災起源BCの北極圏への寄与をより詳細に評価できるようにした。また中国や東南アジアについても植生や燃焼源の違いに基づきより詳細にタグ領域を設定した。GEOS-Chemに新たに導入したタグ付きBCシミュレーションを用いて2007-2011年を対象に各発生源から北極圏のBC濃度、沈着量への寄与を定量的に評価した。



図I-3. 全球化学輸送モデルGEOS-Chemによるタグ付きBCシミュレーションの (a)人為起源の発生源領域（計16領域）及び、(b)バイオマス燃焼起源の発生源領域（計27領域）区分の設定。

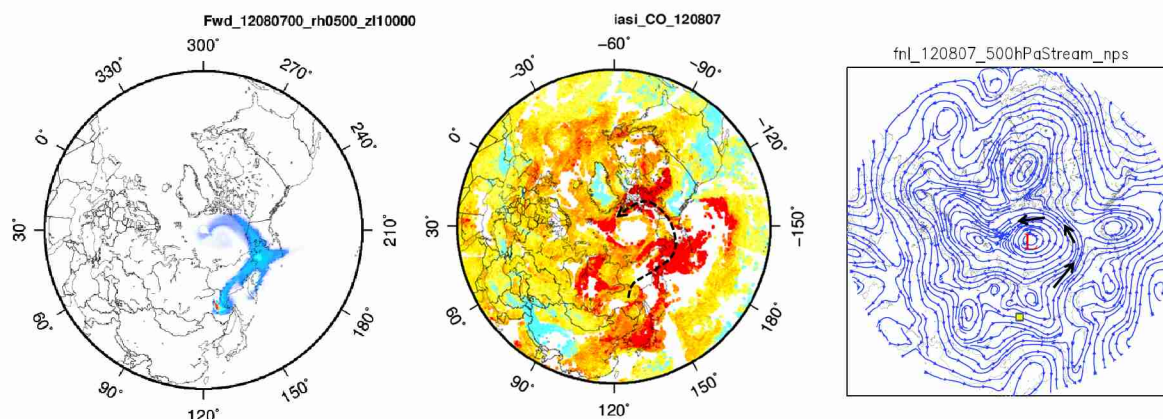
(2) 自然起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析

ラグランジュ型粒子拡散モデルの開発とフットプリント解析

大規模な北方ユーラシア林野火災から排出された大気物質が北極方面へ長距離輸送される経路や、北極圏におけるBCの発生源を評価するために、ラグランジュ型粒子拡散モデルであるFLEXPART version 9.0.2 (FLEXible PARTicle dispersion model, <https://www.flexpart.eu/>)を整備して用いた。入力気象データには全球再解析データであるFNL(NCEP Final, <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>)を用いた。

まず、北極の海氷面積が最小を記録した2012年の夏季を対象に、東シベリア・ヤクーツク近郊の林野火災からアラスカ・北極方面へ汚染物質が輸送された経路やメカニズムをForward計算から解析した。粒子の放出位置は、GFED4sのCO排出量分布を参考に60° N, 130° Eとし、地上から1 kmまでの高度範囲から、一カ月間、ラン

ダムに粒子70万個を放出するように設定した。Flexpartモデルを用いた2012年8月のforward計算における、8月7日のスナップショットを図I-4に示す。東シベリアでの林野火災から発生したBC等の汚染物質は北東方向のアラスカを經由し、北極海上空へ流れ込んでいる様子が示された。この粒子輸送経路は、同日にIASI衛星で計測されたCOの高濃度範囲とよく一致しており、実際にシベリアでの林野火災で発生した汚染物質が北極海へ到達したことが検証された。同日の500hPa面での気流場からは、北極海上で発達した低気圧へ向かって反時計回りに汚染気塊が流入したメカニズムが確認でき、北極低気圧が大気汚染を中緯度から北極へ運ぶ重要な要因となっていることが示唆された。



図I-4. (左)2012年8月7日のFlexpartモデルforwardランによる粒子追跡計算例。同日のIASI衛星センサによるCO計測(中央)で輸送経路が検証されている。右は500hPa面での同日の流線で、発達した北極海上の低気圧(L)へ向かって反時計回りに汚染気塊が流入した様子がわかる。

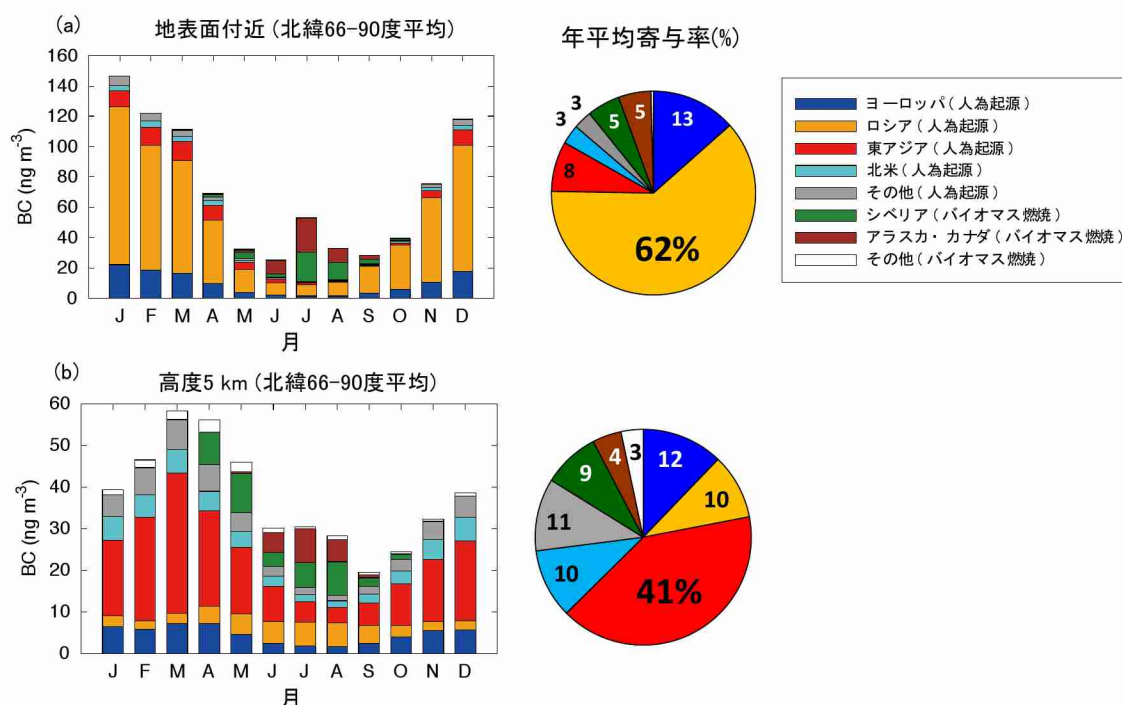
次にBackward計算により、北極圏に影響をもたらした発生源や輸送メカニズムについて解析した。その後、Backward計算によるフットプリント解析とインベントリとを組み合わせた定量的な発生源解析を進めた。粒子放出エリア(後方計算のためレセプターエリアとなる)は、65-75° Nと75-90° Nの2エリアを、東西方向に東経0° から10° 刻みで36分割した合計72エリアとして計算を行ったが、ここでは40-50° E, 65-75° Nの範囲を放出エリアとした結果について議論した。その上で、最新のFlexpart version 10.1を利用した計算を行った。ECMWFのERA-Interim 気象データ(空間解像度1° × 1°、時間分解能3時間、垂直方向61層)を利用するためにコードの開発と修正に取り組み、逆(Backward)方向の計算で雲内洗浄と雲底下洗浄を区別しながら、BCの湿性除去を表現できるようにした。Flexpart v10による計算から得られたフットプリントに、林野火災や人為起源発生源インベントリをかけて、2010年各月北極圏に到達したBCなどの汚染物質の発源地域と寄与率を算定した。その際、発源地域の区別はサブテーマ(1)での計算と同じように設定し、モデル間でBCの発生源寄与評価を比較できるようにした。北極圏地表付近のBCの発生源を計算するため、66° N以北の地域で地上から500 mまでの高度範囲から毎月一カ月間ランダムにBC粒子100万個を放出するように設定した。そこから60日間backward計算を実行し、各グリッドでBCの滞在時間(s)を見出した。この場合はBCの最大大気寿命を20日間に設定した。また、北極圏上空5000 mにおけるBCの発生源を解析するための計算では、4750-5250 mの高度範囲から一カ月間ランダムにBC粒子100万個を放出する設定を用いた。林野火災および人為起源発生源インベントリには、サブテーマ(1)での計算と同様に、それぞれGFED3とHTAP2を用いた。また、ロシア地域ではGas FlaringからのBC排出量がHTAP2と比較して約2.5倍大きいことが報告されているため、ロシア地域の人為起源BC排出量のみ、最新のインベントリに置き換えた。なお、北極地域の計算を行う前に、中国大陸からの吹き出しの影響を受ける長崎県・福江島でのBCシミュレーションを行い、観測データと比較することで、排出量やフットプリント解析の妥当性を検証した。

4. 結果及び考察

(1) 人為起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析

まず、世界各地のBC発生源が北極圏のBC濃度や沈着量に及ぼす寄与を評価した。図I-5に地表付近及び高度5 kmにおける北極圏全体(66-90° N)で平均した各発生源からの寄与の季節変化を示した。地表付近では、口

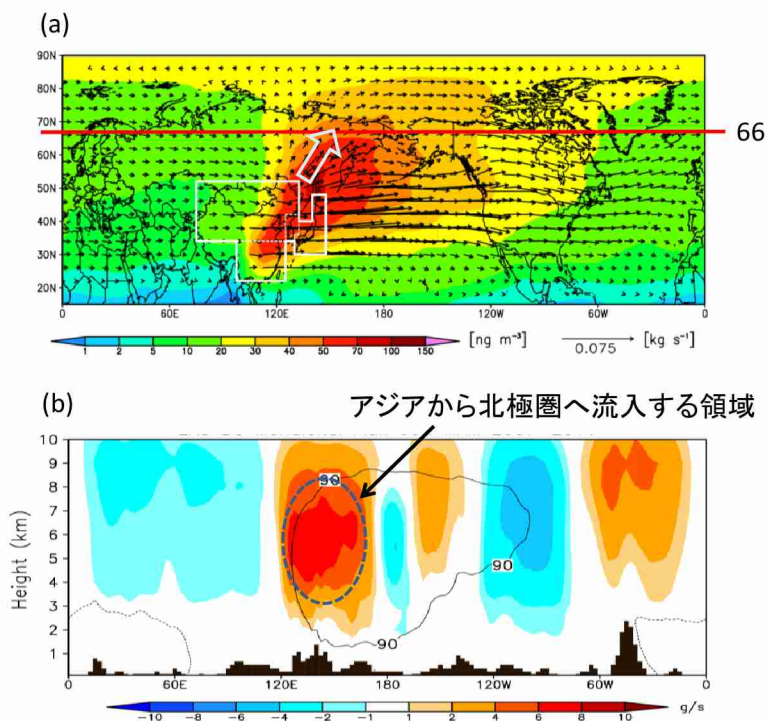
シアのBCが主要な発生源であり、冬・春・秋季に月平均値で40-70%の寄与を占め、ヨーロッパ(10-20%)、東アジア(5-15%)がそれに続く。夏季を除くと人為起源の発生源の寄与がバイオマス燃焼起源よりも大幅に上回っている。シベリアやアラスカ・カナダのバイオマス燃焼起源のBCは夏季にそれぞれ10-40%、30-40%の重要な寄与を占め、夏はバイオマス燃焼起源BCの寄与が人為起源の発生源よりも大きい。高度5 kmでは、東アジア起源のBCが最も重要であり、冬・春・秋季に月平均値で30-60%の寄与を占め、ヨーロッパ(10-20%)、北米(10-15%)、ロシア(5-20%)、その他的人為起源(10-15%)が続いている。シベリアとアラスカ・カナダのバイオマス燃焼起源の寄与は春と夏季に重要となり、春季はシベリアが15-20%の寄与を持ち、夏季はシベリアが15-20%、アラスカ・カナダが15-20%の寄与をそれぞれ占める。高度5 kmにおいては、夏季のバイオマス燃焼起源の寄与は人為起源の寄与と同程度であった。



図I-5. 北極圏(北緯66-90度)で平均した(a)地表面付近及び、(b)高度5 kmにおける月平均BC濃度に対する各発生源からの寄与の季節変化および、年平均濃度に対する寄与率。

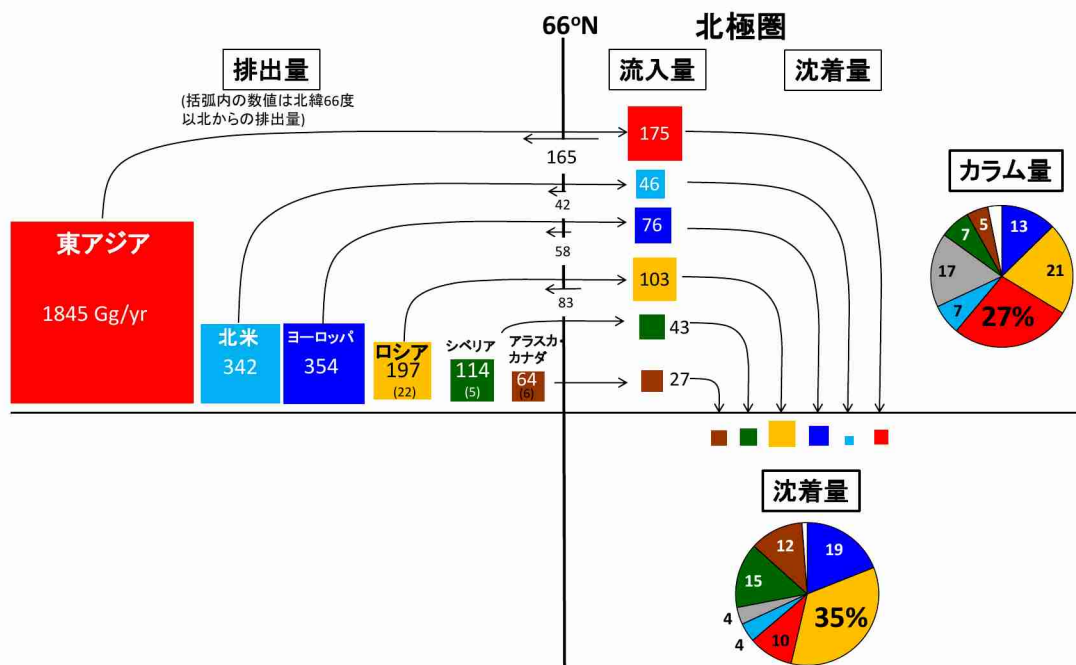
東アジアから北極への輸送について詳しく見てみる。図I-6に春季、高度5 kmにおける東アジア起源BCの水平分布及び、北緯66度を通過する量(南北フラックス)の経度-高度面を示す。東アジア起源のBCは主にオホーツク海や東シベリアの上空を通過して北極圏へ輸送されていた。北極圏へ運ばれた後は、北極海上をさらに東へ輸送されていた。また、東アジアから北極圏への流入が発生する重要な領域が東経130-180度、高度3-8 kmにあることが明らかになった。このことは、東アジア起源BCの北極圏への輸送は主にシベリア上空の中部対流圏で起こっており、対流圏下層からの輸送は弱いことを示している。

主要な発生源からのBCの収支(BCの排出量および北極圏への流入量、沈着量)をまとめた(図I-7)。東アジアから北緯66°を通過して北極圏へ流入するフラックスの合計値(南北風速が $v > 0$ である期間について積算したフラックス量)は、175.4 Gg/年と見積もられ、排出量(1844.9Gg/年)の約10%に相当する。北極圏(66-90°N)における東アジアのBCの沈着量は12.3 Gg/年であり、これは排出量の約1%に相当する。すなわち、東アジアから北極圏へ輸送されたBCの大半は、北極圏内で沈着することなく、北極圏外へと出て行くことがわかる。東アジアから排出されるBCの内、北極圏へ輸送される割合は、高い湿性除去率によって他の人為起源発生源(ヨーロッパ、ロシア、北米)よりも小さいにもかかわらず、北極圏への流入量はこれら4つの主要発生源の中で最も大きい。これ



図I-6. (a) 春季 (3-5月) における高度5 kmでの東アジア起源BCの濃度を色で、水平フラックスをベクトルで示す。(b) 北緯66度における東アジア起源BCの南北フラックスの経度-高度断面。暖色系は北極圏への流入を、寒色系は北極圏からの流出を示す。

は、東アジアからの排出量が他の発生源地域を大きく上回っていることによる。一方、ロシアの排出量(196.8 Gg/年)は、主要な人為起源発生源の中では比較的小さいにもかかわらず、北極圏への流入量については東アジアに次いで二番目に大きい(103.0 Gg/年)。これは、ロシア起源のBCが特に冬・春季には湿性除去が少なく、北極圏へ効率良く輸送されるためである。北極圏で鉛直積算した量(カラム量)について見ると、東アジアの人為起源BCの寄与が最も大きく27%を占め、ロシアの人為起源の寄与が21%で続いている。東アジア起源のBCは、他の重要な発源地域(ヨーロッパやロシア)からのBCと比べて、北極圏に到達するまでに降水によって除去される割合が大きいにもかかわらず、北極圏の大気中のBCに対して重要な寄与を持っており、これは東アジアのBC排出量が非常に大きいことが原因である。北極圏での沈着量に対しては、ロシアの人為起源BCが35%と最も大きな寄与を占め、ヨーロッパ起源の寄与が19%で続いております、沈着量については、人為起源のBC



図I-7. 主要な発生源毎のBCの収支を示す。数値の単位はGg/年。四角形の大きさは相対的な量的関係を表す。

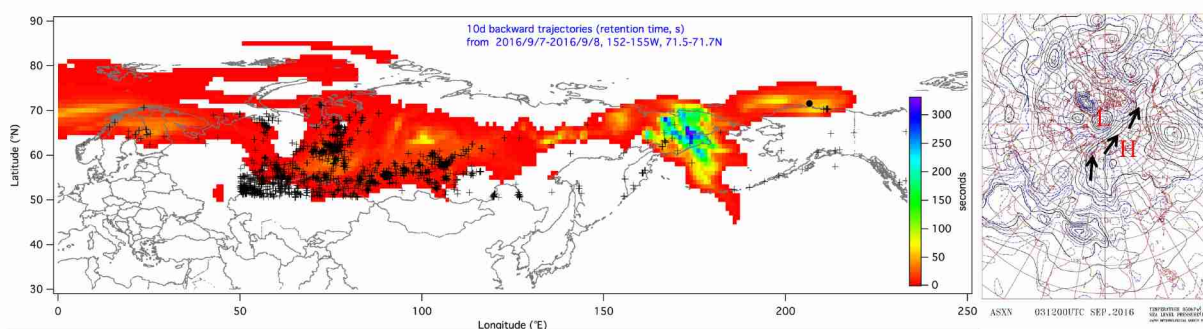
だけでなく、シベリアやアラスカ・カナダの森林火災起源のBCも重要な寄与(12-15%)を持つことがわかった。

(2) 自然起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析

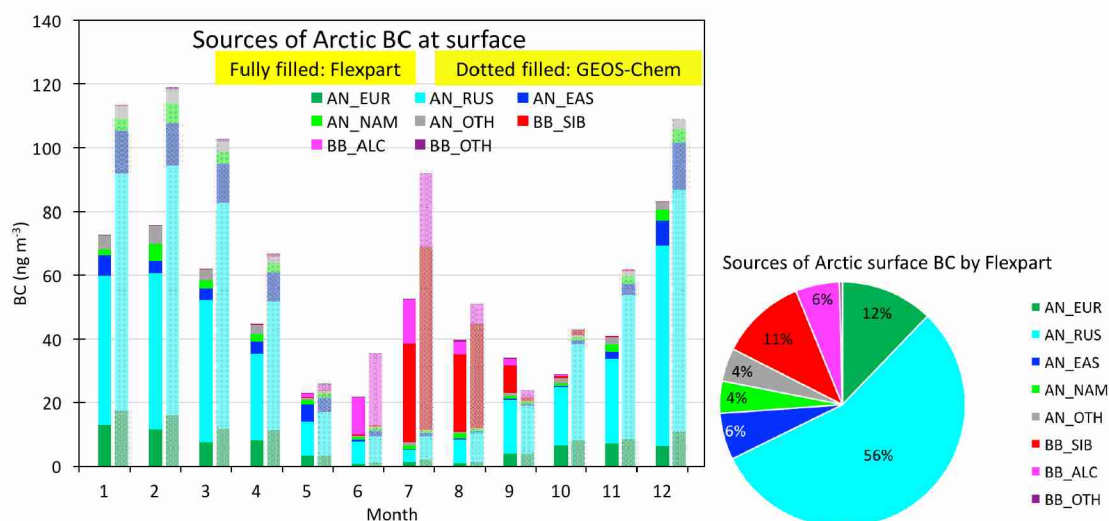
北極海船舶観測で認められたBC濃度上昇の要因解析の結果を示す。「みらい」での海洋大気BC観測に関して、2016年9月7日に北極海(アラスカ北部)で高いBC濃度が観測された際には、フットプリントがバイカル湖の北西部から中央シベリアまで広域にひろがっていた(図I-8左)。VIIRSからは、同時期にカザフスタン北部からバイカル湖付近まで森林火災が広範囲で発生していたことが示された。特に、バイカル湖北西部の火災は9月2日から7日まで継続し、フットプリントとの重なりから、北極海で観測されたBCの起源地域であることが推定された。同時期の気圧配置では、北極中心部に低気圧が発達する一方、ロシア極東地域は高気圧に覆われていた。図I-8右に、9月3日の気圧配置を例として示す。この場合、シベリア中部からの汚染物質がまず北上してから高気圧性の循環によって大気境界層内を東方向へ輸送され、北極海へ到達されたことが示された。この経路は、低気圧性循環が卓越し、高高度へ輸送された上記の2012年8月の事例とは異なるメカニズムと考えられた。発生源から検出地点までは約5000 km離れており、気塊の追跡にはFlexpartのような拡散を考慮するラグランジュ型のモデルシミュレーションを用いることが必要である。

次に、北極圏(66° N以北全域)地表付近のBC濃度を同じ手法で計算し、発生源を解析した結果を示す。2010年BC年平均濃度は48 ng m⁻³であり、そのうちロシアの人為起源の寄与が高く、56%を占めた(図I-9)。ロシアの石油精製施設によるgas flaringが北極圏の大気環境・気候変動へ大きな影響を及ぼす可能性を示した。季節変動パターンとしては、人為起源発生源のBCが12-2月に極大、6-8月に極小を示した。年平均で見ると、北極圏地表付近のBCの17%が自然起源だったが、6-8月には56-86%が自然起源となり、夏季には林野火災が、北極圏地表付近に存在するBCの重要な発生源であることが示唆された。ラグランジュ型大気輸送モデルFlexpartから得た結果を、サブテーマ(1)においてオイラー型のGEOS-Chemモデルで得たものと比較した。北極圏地表付近のBC濃度について、Geos-Chemでの年平均濃度70 ng m⁻³より31%低かったが、各地域・発生源の寄与率や季節変動については非常によく一致した。

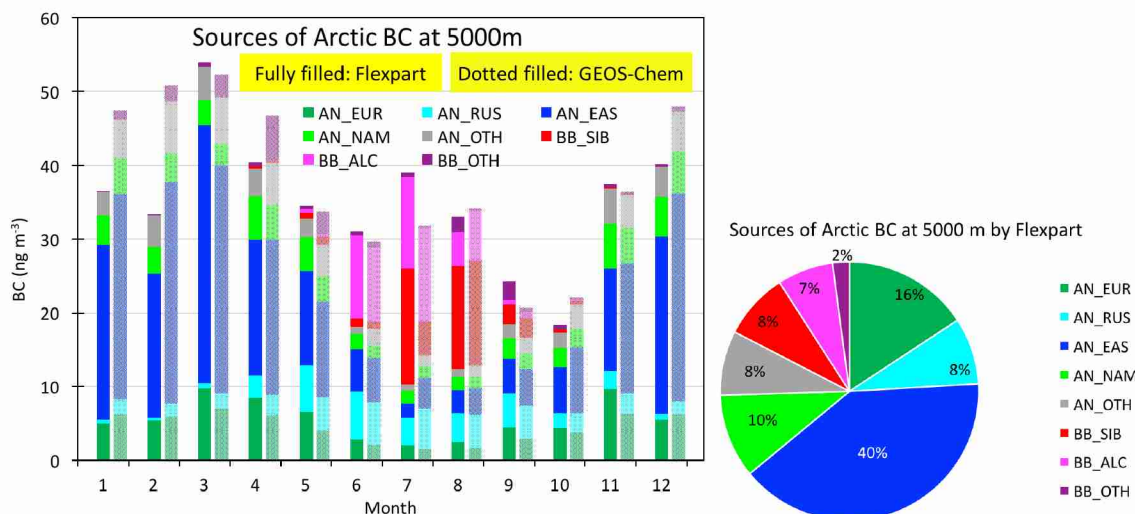
また、2010年における北極圏上空高度5000 m付近のBC年平均濃度は35 ng m⁻³と算出され、そのうち東アジアの人為起源が40%の寄与をもつと推定された。特に10-4月に東アジアの人為起源の寄与が大きかった(34-65%)(図I-10)。この結果についても、サブテーマ(1)(BC年平均濃度38 ng m⁻³、東アジアの人為起源の寄与43%)とよく一致した結果を得られ、北極圏BC発生源の寄与率に関する信頼性を向上させることができた。



図I-8. (左)2016年9月7日に北極海上の「みらい」(71.5-71.7° N, 152-155° W、黒丸)にて比較的高いBC濃度が検出された事例に対する過去10日間(2016年8月28日0時から2016年9月8日0時まで)のフットプリント(空気滞在時間:単位はs)。同期間に検出されたVIIRS火災Hot Spotを合わせて示す(+)。右は北極を中心とした9月3日の地上天気図で、北極中心付近の低気圧(L)やロシア極東地域の高気圧(H)の影響で、汚染気塊がシベリアから北極まで運ばれた。



図I-9. Flexpartモデルによる2010年北極圏地表付近のBC濃度及び地域・発生源ごとの寄与率（各月、左棒）。サブテーマ(1)のGEOS-Chemモデルによる結果（各月、右棒）とよく一致した。



図I-10. Flexpartモデルによる2010年北極圏高度5000 m付近のBC濃度及び地域・発生源ごとの寄与率（各月、左棒）。サブテーマ(1)のGEOS-Chemモデルによる結果（各月、右棒）とよく一致した。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

世界で最も広く用いられているオイラー型グローバル化学輸送モデルの一つであるGEOS-Chemについて、アジアのBCに特化した改良を独自に行い、タグ付きBCシミュレーションが行えるようにした。これにより、各発生源の寄与の定量的評価が可能となり、北極圏におけるBCに占めるアジアや欧米からの寄与を定量的に評価することが可能になった。また、発生源「領域」に加えて、発生源の「種類」でも区別することで人為起源と自然起源の相対的寄与を評価できるようになり、これも特筆すべき技術的進歩である。これにより、東アジアは、中部・上部対流圏のBCに対して最も重要な発生源であることが初めて明らかになった。これらの知見はBCが北極圏の温暖化に及ぼす影響の理解を深めることにつながっている。

また、ラグランジュ型の大気トレーサ輸送モデルFlexpartの最新版v10にて、逆方向計算に湿性除去過程の組み込み、フットプリント解析で湿性除去を加味できるようになった。オイラー型モデルから得た結果を裏付ける知見を、ラグランジュ型モデルから得ることに成功した。ラグランジュ型モデルは、輸送の表現がグリッド設

定によらない点、長距離輸送・拡散の数値表現に優れる点が特徴であり、オイラー型モデルと相補的である。両モデルによって、北極圏のBCの発生源の定量評価に関する信頼性を向上させた。この結果は、多くの化学輸送モデルが北極圏でのBC濃度を過小評価し、モデル間の差も大きいことが指摘されている国際相互比較実験において、今後大きな貢献が期待できる。

こうしたモデリングにおいて、現状で最も広く使われている排出データベースであるGFEDv4において、農地での焼失面積や汚染物質排出がわずか0.3-3.3%しか捉えられていないことを明らかにし、2桁程度の上方向修正が必要であることを指摘した点は、発生源ごとの寄与見積もりを今後正確に行う上で重要な成果となる。

(2)環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

3年間を通じて、環境省を通じて政府による北極政策の策定や議論に多く貢献してきた。

- ・「北極海に係る諸問題に対する関係省庁連絡会議」には、本研究課題の成果や知見、情報の提供を行った。
- ・「北極のフロンティアについて考える議員連盟」においては、環境省による北極研究推進施策として説明された。
- ・課題代表者の谷本とサブ課題代表者の金谷は、政策研究大学院大学「北極圏問題についての我が国の総合戦略研究会」委員を務め、より広く全府省的な政府の施策に貢献した。
- ・本課題は総合海洋政策本部で策定される「我が国の北極政策」に環境省による北極研究推進施策として登録されている。
- ・谷本がAMAP BCM Expert GroupにChairのDr. Kaarle Kupiainenより招待され、本研究課題の成果について共有した(2017年6月、カナダ)
- ・外務省・北極担当大使である井出大使に情報提供を行った。(北極関係省庁の意見を反映し、我が国の北極に関するあらゆるステークホルダーズの動きを北極担当大使が掌握するための情報提供依頼に協力した)
- ・ハルコネン・フィンランド北極担当大使への研究成果のブリーフィングを行った。(2016年12月)
- ・Future EarthのコアプロジェクトであるIGAC (International Global Atmospheric Chemistry, 国際地球大気化学協同計画)とIASC (International Arctic Science Committee, 国際北極科学委員会)の合同による国際的な北極研究プロジェクトであるPACES (air Pollution in the Arctic: Climate, Environment and Societies, <http://www.igacproject.org/PACES>)において知見をインプットし貢献した(谷本、金谷)。
- ・サブ課題代表の金谷はIPCC AR6 WG1 chapter 6. SLCFのReview Editorに選ばれ、報告書作成において本課題からの知見についても適切に取り扱う予定である。

<行政が活用することが見込まれる成果>

北極評議会における日本の取り組みへの活用について、以下の2点が見込まれる。(詳細は、政策決定者向けサマリーを参照のこと)

- ・北極圏のBC濃度および気候・環境に及ぼす地域・国別の寄与率:改良したグローバルモデルにより、北極圏の地表面付近では、ロシアからのBCが62%の寄与を占め、最も重要な発生源であることが分かった。一方、自由対流圏では東アジア起源が41%の寄与を占め、最も大きな影響を及ぼすことが分かった。これは、放射強制力にはアジアからの排出が、氷の溶解にはロシアからの排出が大きな影響を有することを示しており、気候変動対策を推進する上で重要な情報である。北極における温暖化の緩和にとってアジアのBC排出削減が緊急の課題であると言え、北極評議会において日本発の知見として強くアピールできるとともに、アジア途上国のBC排出削減対策に取り組む重要性を指摘した。
- ・我が国を含む東アジア諸国のBC排出量:2015年開始の「BC及びメタンの排出削減強化に関する行動のための枠組」(排出量を報告したオブザーバー国は、北極圏国と対等な地位で国際的な対策の議論や枠組み作りに参加できる)に関して、我が国は、2015年はCH₄排出量についてUNFCCC 提出値を報告したが、BC 排出量は未報告である。2017年はCCAC提出済のインベントリに基づくBC排出量を報告したが、本課題では、研究レベルの高い信頼性で日本からのBC 排出量を観測データから0.027Tg/y と推計し、インベントリと統合的な結果を得た。排出量を報告したオブザーバー国は北極圏国と対等な地位でExpert Group に参加し、対策の議

論に参加することができるため、今後、本手法の精度を向上させ、日本からのBC 排出量とともに北極圏諸国や第三国(中・韓・ロ)の値も算出することにより、中立・客観的な報告値としてAMAPから期待されており、独自の貢献が期待できる。また、2017年10月の北極評議会高級北極実務者会合では「義務はないが、BC排出量について日本は今後可能な範囲で報告していく」と宣言されており、本課題の成果により、日本の関与を強められる。「北極のフロンティアについて考える議員連盟」へ定常的な貢献ができる他、「北極に関する日中韓ハイレベル対話」で協調・リーダーシップにより国際的プレゼンスの向上も期待できる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Tanimoto, H., K. Ikeda, K. F. Boersma, R. J. van de A, S. Garivait, Interannual variability of nitrogen oxides emissions from boreal fires in Siberia and Alaska during 1996–2011 as observed from space, *Environ. Res. Lett.*, 10, 065004, doi:10.1088/1748-9326/10/6/065004, 2015.
- 2) Tanimoto, H., R. M. Zbinden, V. Thouret, and P. Nédélec, Consistency of tropospheric ozone observations made by different platforms and techniques in the global databases, *Tellus B*, 67, 27073, doi: 10.3402/tellusb.v67.27073, 2015.
- 3) Ikeda, K., and H. Tanimoto, Exceedances of air quality standard level of PM_{2.5} in Japan caused by Siberian wildfires, *Environ. Res. Lett.*, 10, 105001, doi:10.1088/1748-9326/10/10/105001, 2015.
- 4) Arnold, S. R., K. S. Law, C. A. Brock, J. L. Thomas, S. M. Starkweather, K. von Salzen, A. Stohl, S. Sharma, M. T. Lund, M. G. Flanner, T. Petäjä, H. Tanimoto, J. Gamble, J. E. Dibb, M. Melamed, N. Johnson, M. Fidel, V.-P. Tynkkynen, A. Baklanov, S. Eckhardt, S.A. Monks, J. Browse, H. Bozem, Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 4, 000104, doi: 10.12952/journal.elementa.000104, 2016.
- 5) Ikeda, K., H. Tanimoto, T. Sugita, H. Akiyoshi, Y. Kanaya, C. Zhu, and F. Taketani, Tagged tracer simulations of black carbon in the Arctic: Transport, source contributions, and budget, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10515–10533, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10515-2017>, 2017.
- 6) Kanaya, Y., X. Pan, T. Miyakawa, Y. Komazaki, F. Taketani, I. Uno, and Y. Kondo. Long-term observations of black carbon mass concentrations at Fukue Island, western Japan, during 2009–2015: Constraining wet removal rates and emission strengths from East Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 10689–10705, doi:10.5194/acp-16-10689-2016, 2016.
- 7) Zhu C., H., Kobayashi, Y., Kanaya, and M., Saito. Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: Large underestimation in croplands. *Sci. Rep.*, 7, 4181, doi:10.1038/s41598-017-03739-0, 2017.
- 8) Kanaya Y., H. Matsui, F. Taketani, X. Pan, Y. Komazaki, Z. Wang, L. Chang, D. Kang, M. Choi, S-Y. Kim, C-H. Kang, A. Takami, H. Tanimoto, K. Ikeda, and K. Yamaji. Observed and modeled mass concentrations of organic aerosols and PM2.5 at three remote sites around the East China Sea: Roles of chemical aging. *Aerosol Air Quality Res.*, 17, 3091, 2017.

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 池田恒平, 谷本浩志, 金谷有剛, 朱春成, 竹谷文一, タグ付きトレーサーモデルを用いた北極域へのブラックカーボン長距離輸送の解析, 第22回大気化学討論会, 2016.
- 2) Ikeda, K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, C. Zhu, and F. Taketani, Model analysis of long-range transport of black carbon to the Arctic with tagged tracer simulation, EGU General Assembly 2017, 2017.
- 3) Ikeda, K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, C. Zhu, and F. Taketani, Model analysis of long-range transport of black carbon to the Arctic with tagged tracer simulation, IGC8, 2017.
- 4) Tanimoto, H., K. Ikeda, S. Okamoto, Y. Kanaya, C. Zhu, F. Taketani, Global simulations of tagged black

- carbon aerosols: Implications for Asian emissions and long-range transport to the Arctic, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017. (招待講演)
- 5) Tanimoto, H., K. Ikeda, S. Okamoto, T. Sugita, H. Akiyoshi, S. Inomata, Y. Kanaya, C. Zhu, F. Taketani, Export of black carbon and carbon monoxide from Asia: How far can they go?, Third ACAM Workshop, 2017.
 - 6) Ikeda, K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, C. Zhu, and F. Taketani, Model analysis of long-range transport of black carbon to the Arctic with tagged tracer simulation, PACES Workshop, 2017(招待講演)
 - 7) 池田恒平, 谷本浩志, 杉田考史, 秋吉英治, 東アジアから北極域へのブラックカーボンおよび一酸化炭素の長距離輸送イベントの解析, 第23回大気化学討論会, 2017.
 - 8) Tanimoto, H., K. Ikeda, T. Sugita, H. Akiyoshi, Y. Kanaya, C. Zhu, F. Taketani, Model analysis of long-range transport of black carbon and carbon monoxide from Asia to the Arctic, American Geophysical Union Fall Meeting, 2017.
 - 9) 金谷有剛, 宮川拓真, 竹谷文一, 駒崎雄一, Pan Xiaole, 近藤豊, 長崎県福江島での長期連続観測からみたBC/CO比: 起源地域と降水の影響, 第56回大気環境学会年会, 2015.
 - 10) 金谷有剛, Xiaole Pan, 宮川拓真, 駒崎雄一, 竹谷文一, 鶴野伊津志, 近藤豊, 福江島における大気中ブラックカーボン質量濃度の長期観測2009-2015: 湿性除去過程の統計的解析, 日本気象学会2016年度春季大会, 2016.
 - 11) 金谷有剛, Xiaole Pan, 宮川拓真, 駒崎雄一, 竹谷文一, 鶴野伊津志, 近藤豊, 福江島における大気中ブラックカーボン質量濃度の長期観測2009-2015: 東アジアからの排出量と湿性除去速度の解析, 日本地球惑星連合大会2016年大会, 2016.
 - 12) 朱春茂, 小林秀樹, 金谷有剛, 齋藤正彦, Validation of MODIS MCD64A1 burned area in boreal Eurasia, 日本地球惑星連合大会2016年大会, 2016.
 - 13) Zhu, C., H. Kobayashi, Y. Kanaya, M. Saito, Assessment of MODIS burned area in Russia using higher resolution satellite products, AOGS 13th annual meeting, 2016.
 - 14) Zhu, C., H. Kobayashi, Y. Kanaya, M. Saito, Accuracy evaluation of MODIS MCD64A1 burned area data product in boreal Eurasia, 2016 IGAC Science conference, 2016.
 - 15) Kanaya, Y., F. Taketani, X. Pan, T. Miyakawa, Y. Komazaki, I. Uno, Y. Kondo, Observations of atmospheric black carbon mass concentrations from East Asia to the open oceans: Constraining emission strengths and wet deposition rates, 2016 IGAC Science conference, 2016.
 - 16) Kanaya Y., X. Pan, T. Miyakawa, Y. Komazaki, F. Taketani, I. Uno, Y. Kondo, H. Matsui, K. Yamaji, C. Zhu, P. Mordovskoi, M. Takigawa, Long-term observations of black carbon at Fukue Island, western Japan, since 2009: constraining emission strengths from East Asia and wet removal rates relevant to long-range transport, 2nd PACES Workshop, 2017.

7. 研究者略歴

研究代表者

谷本 浩志

東京大学理学部化学科卒業、同大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了、博士(理学)。
現在、国立環境研究所地球環境研究センター地球大気化学研究室 室長

研究分担者

金谷 有剛

東京大学理学部化学科卒業、同大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了、博士(理学)。
現在、海洋研究開発機構地球環境観測研究開発センター センター長代理

II. 成果の詳細

II-1 人為起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター	地球大気化学研究室	谷本 浩志
地球環境研究センター	地球大気化学研究室	杉田 考史
地球環境研究センター	気候モデリング・解析研究室	秋吉 英治
環境計測研究センター	反応化学計測研究室	猪俣 敏

<研究協力者> 地球環境研究センター 地球大気化学研究室 池田恒平

平成27(開始年度)～29年度累計予算額：57,365千円（うち平成29年度：18,381千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

北極圏の気候や環境への影響が懸念されるブラックカーボン（BC）粒子について、世界各地の発生源から排出されたBC粒子の排出、輸送、変質、沈着を計算しうる「タグ付き全球化学輸送モデル」を独自に開発し、北極圏のBCがアジア、北米、欧州、ロシアなど主要な人為起源汚染地域、またはシベリアやアラスカなど森林火災からどのくらい運ばれてくるのか、といった発生源別の寄与率の評価、ならびに北極圏のBC濃度の収支や沈着量に及ぼす影響を評価した。

北極圏（北緯66-90度）の地表面のBC濃度に対しては、ロシア及びヨーロッパの人為起源BCによる寄与が支配的であり、年平均濃度では、ロシアの人為起源BCの寄与が62%と最大の寄与を占め、ヨーロッパが13%で続いた。これらは、特に冬季と春季にかけて多く、夏季は人為起源BCの寄与は減少する一方、シベリアやアラスカ・カナダにおける北方森林火災起源のBCの寄与が増加した。一方、中部対流圏にあたる高度5 kmでは、東アジア（日本と朝鮮半島、中国の合計）の人為起源BCの寄与が最大であり、年平均では41%を占めていた。東アジアの寄与は、季節では春季に最大となった。北極圏で鉛直積算した量（カラム量）について見ると、東アジアの人為起源BCの寄与が最も大きく（27%）、ロシアの人為起源の寄与（21%）が続いていた。東アジア起源のBCは、他の重要な発生源地域（ヨーロッパやロシア）からのBCと比べて、北極圏に到達するまでに降水によって除去される割合が大きいにもかかわらず、北極圏の大気中のBCに対して重要な寄与を持っており、これは東アジアのBC排出量が非常に大きいことが原因であると推察された。

北極圏での沈着量に対しては、ロシアの人為起源BCが最も大きな寄与を占め（35%）、ヨーロッパ起源の寄与（19%）が続いた。沈着量については、人為起源のBCだけでなく、シベリアやアラスカ・カナダの森林火災起源のBCも重要な寄与（12-15%）を持つことがわかった。東アジア起源BCの寄与は北極圏の地表面付近では大きくなく、中部・上部対流圏で重要となった一方、地表面付近で主要なロシアからの寄与は高度5 kmでは大きくないといった結果は、同じ北極圏でも高度によって、主要な発生源が異なっていることを示唆しており、アジアから運ばれるBCは大気の加熱に影響しているものの、積雪や海氷面に沈着して融解を促進することにはあまり影響していないことを意味した。また、BC粒子はPM2.5の成分の一つであり、北極圏に住む人々への大気汚染という観点からは、ロシアやヨーロッパの人為起源BCが重要である、とも指摘された。

[キーワード]

ブラックカーボン、一酸化炭素、全球化学輸送モデル、タグトレーサー、北極

1. はじめに

IPCC AR5（第五次報告書）では、CO₂のみならず、「短寿命気候汚染物質SLCP」（Short-lived Climate Pollutants：ブラックカーボン（BC）、メタン（CH₄）、対流圏オゾンなど、大気中寿命の短いガスやエアロゾル）の温暖化寄与も大きいことが明確に示されている。SLCPの削減からは、短期的な（10-30年）温暖化抑制効果や、北極やヒマラヤなど、気候変化に対し脆弱な地域での不可逆的な変化を食い止める効果が期待されており、国際的な議論や対応が始まっている。北極評議会の「ブラックカーボン及びメタン専門家会合（EGBCM: Expert Group on Black Carbon and Methane）」はその最たる例である。しかしながら、SLCPの収支や気候影響には依然として大きな不確実性が残っており、効果的な削減対策を見出すためには科学的理解度の本質的な向上が求められている。

特に近年では、北極圏における急激な環境や気候の変化が世界的な関心事になっている。一方、温暖化が進むと北極海航路が開ける、海底資源が探査できるといった社会経済的な利便性も指摘されている。こうした状況で、平成25年にわが国は北極評議会へのオブザーバー資格を獲得し、北極圏における国際的枠組み作りに環境分野で貢献していくための戦略と科学的知見による裏付けが早急に必要とされている。特に、温暖化が最も速く進んでいる地域である北極圏において、正の放射強制力をもたらすBCによる環境・気候への影響が懸念されており、北極評議会の中に欧米を中心にしたブラックカーボンとメタンのタスクフォースが立ち上がった状況で、BCの巨大発生源であるアジアに注目した研究を早急に行う必要があった。本研究では、人間活動や森林火災など人為および自然起源発生源から放出されるBCに注目し、北極圏へ長距離輸送される経路や頻度、北極圏での沈着量など、環境や気候に関する重要な情報を提供することで、国際貢献に資することを目的とした。

BCは、大気中を浮遊する微小粒子（エアロゾル）の成分の一つで、すす粒子や元素状炭素とも呼ばれており、ディーゼルエンジンの排気ガス、石炭の燃焼、森林火災、薪などバイオマス燃料の燃焼など、炭素を主成分とする燃料が燃焼した際に主に発生する。BCは太陽光を吸収する性質があり、大気を加熱したり、積雪や海水面に沈着して太陽光の反射率を下げ、氷の融解を促進することで、気候変動を加速する可能性が指摘されているが、北極圏は地球上で最も速く温暖化が進行している地域であり、北極圏におけるBCの発生源を理解することは重要かつ緊急の課題である。

そこで、世界中の研究者がグローバル大気化学輸送モデルを用いて観測データを再現し、BCの影響を正確に評価しようと試みているが、濃度レベルやその季節的な変化といった基本的な再現さえ困難な状況が続いている。世界中の科学者が行った化学輸送モデルの国際相互比較実験では、北極圏でBC濃度の季節変化が再現できていないモデルが多く、多くの化学輸送モデルが北極圏でのBC濃度を過小評価し、モデル間の差やばらつきも大きいことが指摘されている。モデルによる再現が困難な原因として、主に発展途上国からの排出が大きいBCの発生源について分布や強度情報（インベントリ）が圧倒的に不足していること、微粒子として大気中を輸送される際の変質過程（疎水性BCが親水性BCへと変質する過程）や除去過程（降水等による湿性除去過程）の不確実性が大きいことが原因として挙げられる。東アジア域は大気汚染物質の主要な排出源であり、北極圏への輸送・除去過程の理解は重要な課題であった。

2. 研究開発目的

本研究では、アジアにおける人間活動起源および自然起源のSLCP（特にBC）が北極圏の環境や気候に及ぼす影響に関して、その基礎的情報となる北極への長距離輸送の実態とメカニズムの理解を深め、人為起源・自然起源発生源の相対的な重要性を検証することを目的とした。具体的には、中国など東アジアの人間活動から、シベリア森林火災など自然起源発生源から大気中に放出されたBCやその他大気汚染物質がどのようなメカニズムで、どのような経路をどの程度の頻度・強度で北極まで長距離輸送され、北極の環境と気候にどの程度の影響を及ぼしているかを定量的に評価した。その後、人為起源と自然起源の相対的寄与率を求めるとともに、アジアの寄与を欧州や北米の寄与と比較した。こうした科学的知見を持って、我が国の北極外交のうち、特に北極圏に関する科学技術面および環境面での国際貢献の一つとすることを目的とした。

3. 研究開発方法

(1) COをトレーサーにしたアジアから北極への長距離輸送の観測的解析

近年の経済発展により中国を中心とする東アジア地域では深刻な大気汚染が大規模に発生しており、その一部は偏西風に乗って日本そして北太平洋や米国にも到達していることが分かっている。こうした大規模大気汚染は北極にも運ばれうるのだろうか。また、運ばれるとすれば、いつ、どの程度の頻度や強度でどのように運ばれるのだろうか。こうした問いに答えるため、本研究ではまず、SLCPのプロキシとして、大気汚染物質の一つであり大気中寿命が比較的長い（1-2ヶ月）一酸化炭素（以下、CO）に注目して、アジアからの排出が北東方向に北太平洋上を輸送され、北極圏まで長距離輸送される実態の詳細について観測データをもとに調べた。具体的には、北極圏におけるCO濃度の日々変動や季節変動といった変動を導出し、対象領域に到達したCO気塊の経路を解析することで、東アジア起源のCOが北極圏に到達する頻度や経路、その特徴を明らかにした。ここでは、過去の研究を参考にして北緯60度以北を北極圏と定義し、東アジア起源の汚染気塊が到達すると予測されるベーリング海以北の領域（北緯60度以北で80度以南、東経160度以東で200度以西。図(1)-1）を解析の対象領域とした。



図(1)-1. 東アジアから北極圏への長距離輸送を調べた対象とした領域。

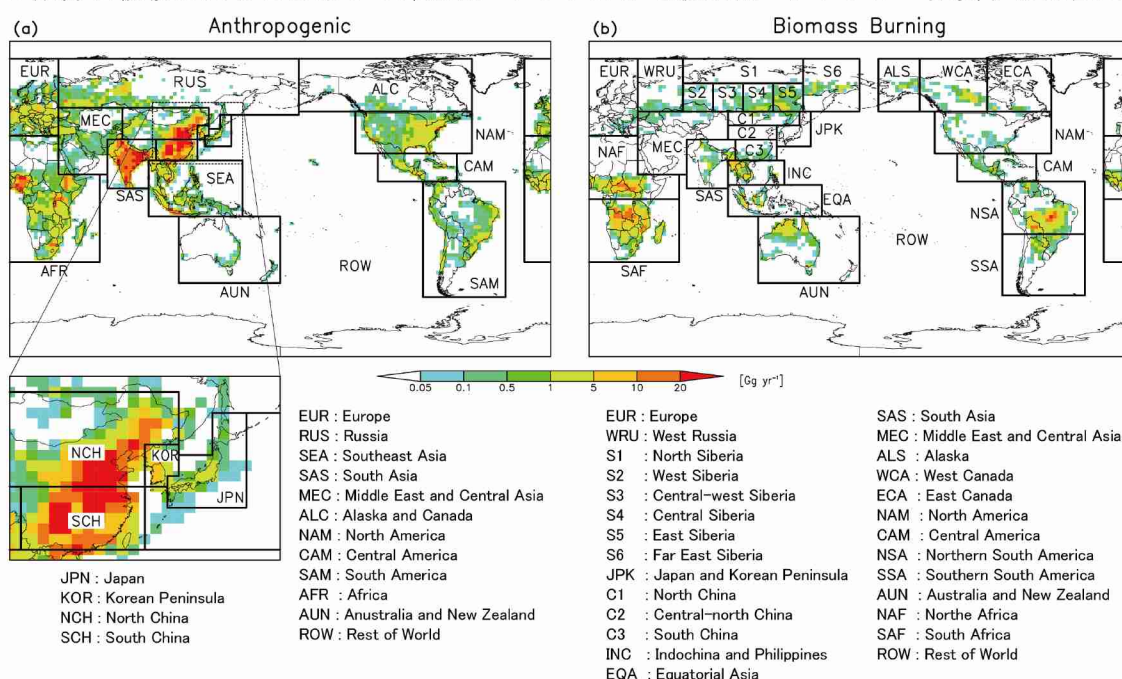
観測データには、MetOP衛星に搭載されたIASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) センサーによって測定された対流圏COカラム量を用いた。2007年10月1日から2014年12月31日にわたって対象領域におけるCOカラム量の日平均値を算出し、約7年間にわたるCOの時系列データを得た。対象領域におけるCOカラム量の日平均値が基準値(2.5×10^{18} molecules cm^{-2})を超えた場合、対象領域内に存在する汚染気塊の移動をIASIの計測画像を用いて12時間毎に遡り、汚染気塊の起源を推定した。東アジア起源と推定された気塊に対しては、後述するGEOS-Chem化学輸送モデルを用いてCO汚染気塊の輸送を再現した。さらに、汚染気塊の到達した緯度経度をもとにNOAAのHYSPLITモデルを用いて後方流跡線を計算するとともに、上層の風の状況を気象庁の北半球500hPa天気図から参照して確認した。

また、対象領域におけるCOの変動とテレコネクションとの関係を考察するため、北半球中緯度から高緯度への輸送に関連することが知られているエルニーニョ・南方振動(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)や北大西洋振動(North Atlantic Oscillation, NAO)等の気候インデックスとの相関関係を調べた。ENSOの指標としてOceanic Niño Index (ONI)を、NAOの指標としてNAO Index (NAOI)を使用した(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>)。

(2) 化学輸送モデルを用いたBCシミュレーションと定量的解析

続いて、SLCPの主要成分の一つであるBCに注目した三次元大気化学輸送モデルによるモデルシミュレーションを行った。BCは太陽光を吸収することで大気を加熱する効果を持つだけでなく、雪氷面へ沈着し融解を促進することが懸念されており、北極圏の環境・気候に影響及ぼすSLCPの中でも特に重要な物質として注目されている。そこで、BCに特化したモデルの改良を試みた。用いたモデルはGEOS-Chem化学輸送モデルであり、これは対流圏の詳細な気体及びエアロゾル化学過程を含み¹⁾、NASA/GMAO (Global Modeling and Assimilation Office) が提供する気象場データGEOS (Goddard Earth Observing System) によって駆動されるオフラインの全球化学輸送モデル (CTM) である。本研究ではGEOS-Chem version 9-02、気象場にはGEOS-5を用い、水平解像度 $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、鉛直方向には地上から0.01hPaまでを47層に分割して計算した。現在まで、BCの長距離輸送にとって重要な過程についてGEOS-Chemでの取り扱いについて検討し、北極圏のBC観測値の再現性が向上するように改良を行った。さらに、人為起源と自然起源の相対的寄与や、アジアと北米、欧州の寄与を定量的に比較するために「タグ付きBCシミュレーション」が行えるようモデルの改良を行った。GEOS-ChemモデルによるBCの再現性検証には、北極圏での地上観測データを使用した。また、サブテーマ2から提供された長崎県・福江島でのBC観測値とも比較を行い、アジアの主要な発生源からの流出域でのモデル検証も行った。

これまでのCTMによる相互比較実験では、北極圏でBC濃度が上昇する冬季から春季において10倍以上過小評価するなど、季節変化が再現できていないモデルが多く、モデル間のばらつきも非常に大きいことが報告されている²⁾。最新のモデルにおいても、北極圏でのBCの再現性は向上しつつあるものの、濃度がピークとなる冬・春季において5割程度の負のバイアスが見られるなど、モデルで表現されるプロセスの不確定要素は依然大きいと考えられている³⁾。CTMによるBCの再現性が十分ではない原因として、モデルで使用する排出量データや、疎水性粒子として排出されたBCが他の水溶性エアロゾルと内部混合して親水性粒子へと変質する過程、湿性除去過程の不確実性が挙げられる。そこで、「排出」に伴う不確実性の把握及び、北極圏への長距離輸送にとって特に重要なBCの「変質」、「湿性除去」の各プロセスについて、モデルの精緻化を行った。具体的には、複数的人為起源の排出インベントリを用いた実験により、排出量データの違いが北極圏でのBC濃度に及ぼす不確実性を調べた。さらに、BCが他のエアロゾル成分に被覆されることによって疎水性エアロゾルから親水性エアロゾルへ変質する過程につい



図(1)-2. 全球化学輸送モデルGEOS-Chemによるタグ付きBCシミュレーションの (a)人為起源の発生源領域 (計16領域) 及び、(b)バイオマス燃焼起源の発生源領域 (計27領域) 区分の設定。

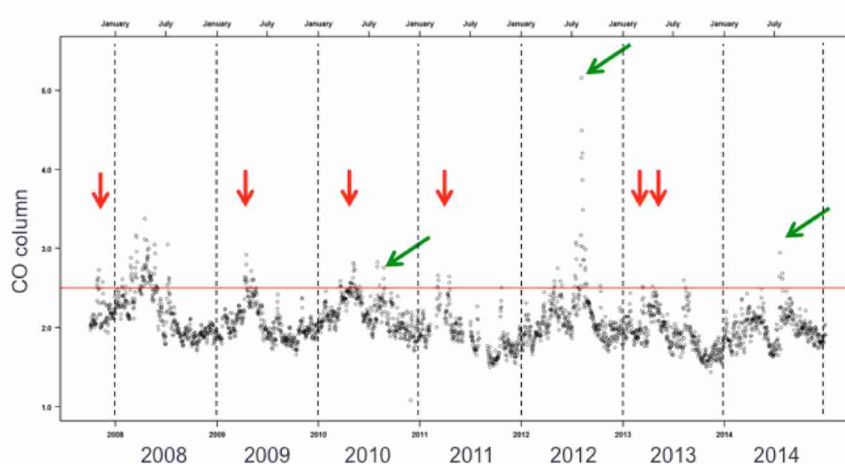
て、新たなパラメタリゼーションをGEOS-Chemに導入しBCシミュレーションの精緻化を進めた。また、BCの降水による湿性除去率についても感度実験を行い、北極圏の濃度に及ぼす影響を調べた。

北極圏におけるBCの人為起源と自然起源の相対的寄与および、アジアや欧米からの寄与を定量的に評価するための「タグ付きBCシミュレーション」が行えるようGEOS-Chemの改良を行った。タグ付きBCシミュレーションでは、発生源毎のBCを別個のトレーサー（“タグトレーサー”）として計算することによって、それぞれのタグBCの濃度から各発生源の寄与の定量的評価が可能となる。本研究では発生源「領域」で区別するだけでなく、人為起源発生源と自然起源発生源からのBCをそれぞれ別のタグトレーサーとして扱い、発生源の「種類」でも区別することによって相対的寄与を評価できるようにした。タグ付き計算のため的人為起源発生源領域の区分は、主要な発生源であるアジアの各地域、北米、ヨーロッパ、ロシアなど、16領域を設定した（図(1)-2a）。特にアジアは、従来の研究では一つの発生源として扱われることも多かったが、本研究では東南アジアや南アジアを区別するとともに、日本と韓国、中国北部・南部を分けて東アジア域内の内訳も詳しく評価できるようにした。バイオマス燃焼起源BCのタグ領域については、北極圏に近いロシアやカナダを細かく分けるようにし、27領域を設定した（図(1)-2b）。特にロシアについては、サブテーマ2で用いられるシベリアでの植生別のサブ地域の区別と共通となるように領域を設定し（計7領域）、シベリア森林火災起源BCの北極圏への寄与をより詳細に評価できるようにした。また中国や東南アジアについても植生や燃焼源の違いに基づきより詳細にタグ領域を設定した。GEOS-Chemに新たに導入したタグ付きBCシミュレーションを用いて2007-2011年を対象に各発生源から北極圏のBC濃度、沈着量への寄与を定量的に評価した。

4. 結果及び考察

(1) COをトレーサーにしたアジアから北極への長距離輸送の観測的解析

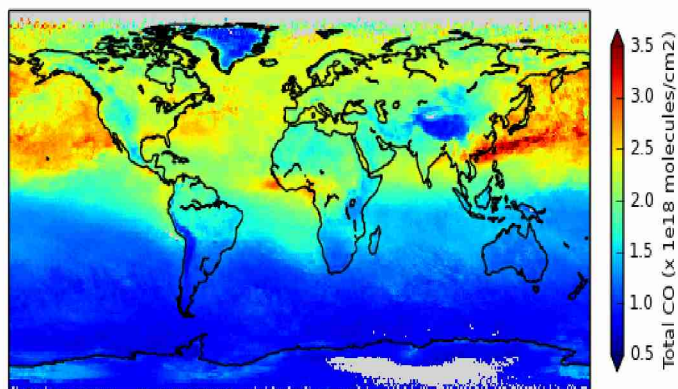
図(1)-3に2008年から2014年にかけての対象領域におけるCO濃度の時系列変化を示す。冬季から春季にかけて極大となり、夏季から秋季にかけて極小となる季節変化が見られた。こうしたベースライン的な季節変化に加わる形で数日から1週間程度のピークが見られるが、これはCOが輸送されてきた比較的大規模なイベントだと解釈できる。また、2010年、2012年、2014年などに特徴的に見られるように、季節変化の形が変わるほどのCO濃度の増大が夏季に見られる場合があった。これまでの研究によって、北米およびアジア起源の汚染物質によって、北極圏の汚染物質が冬から春にかけて増大することが報告されており、本研究で解析されたCO濃度の季節変化は整合的である。また、シベリアの森林火災で排出さ



図(1)-3. IASIから導出された対象領域における対流圏COカラム量 (10^{18} molecules cm^{-2})の時間変動（2007年10月1日から2014年12月31日）。赤線は輸送イベントを決定する閾値 (2.5×10^{18} molecules cm^{-2})を示している。矢印は東アジアからの輸送イベント（赤）、森林火災からの輸送イベント（緑）。

れる物質が北極圏へ到達し、COなど汚染濃度の増大を引き起こすことが知られており、夏季のCO濃度の増大は森林火災が起源であると推定される。従って、本研究の対象領域は、主に夏季にシベリア森林火災の影響を受けるものの、冬から春にかけてはアジアからの長距離輸送の影響を受けている可能性が高いと考えられた。

次に、対象領域における汚染イベントの目安として設定した閾値を超えた日数を数えると過去7年間で合計163日となった。IASIによる日ごとのCO分布を画像解析するとともに、NOAA

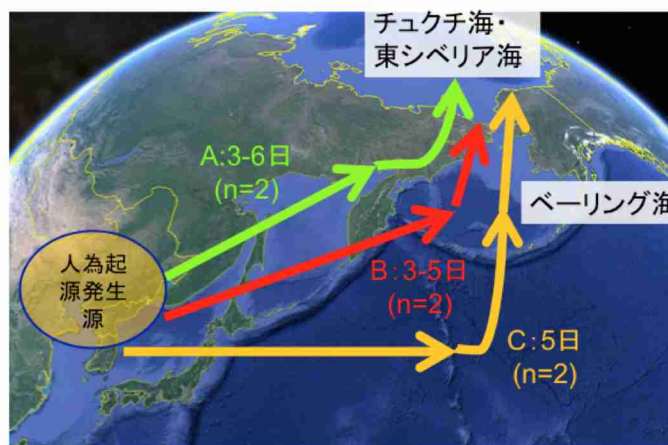


図(1)-4. IASIにより捉えられた東アジアから北太平洋を經由して北極圏に輸送されるCOの様子(2013年4月)。

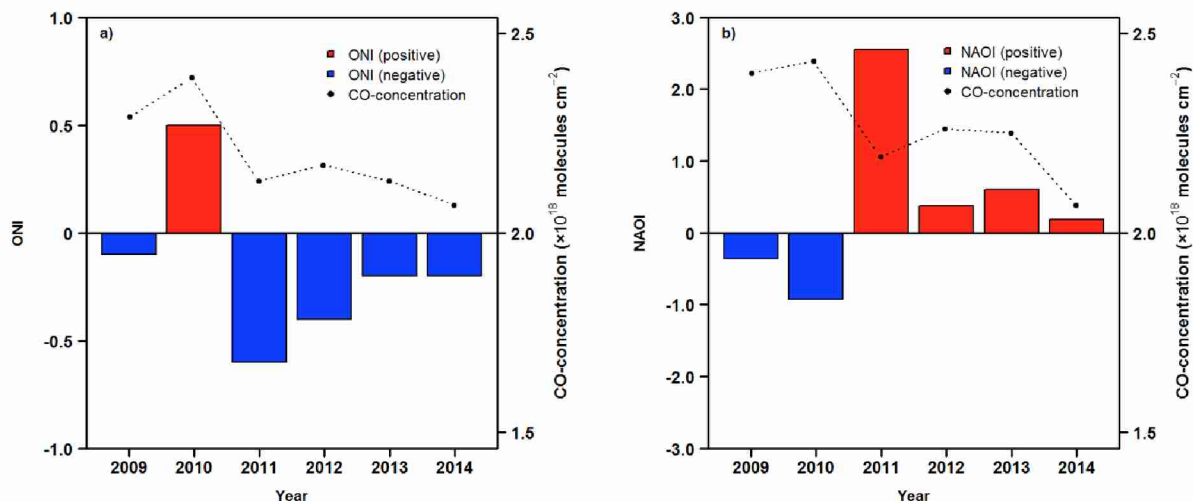
表(1)-1. 2007-2014年にかけて東アジアから北極圏へCOの長距離輸送が同定されたイベントの詳細

イベント	年月日	発生源	経路	要した日数	到達時の平均対流圏カラム量 $\times 10^{18}$ (molecules cm^{-2})
1	2007/10/27	中国北東部	A	3	2.54
2	2009/04/15	中国北東部	C	3	2.80
3	2010/05/04	中国北東部	B	5	2.56
4	2011/03/05	中国中東部	B	5	2.51
5	2013/03/13	中国中東部	C	4	2.50
6	2013/04/18	中国北東部	A	6	2.52

HYSPLITモデルによる後方流跡線の計算結果と照らし合わせると、東アジアの影響が顕著と考えられる日数は163日のうち26日であり、また、26日以外はロシアやヨーロッパ起源の人為汚染、または森林火災の影響が顕著であったと考えられた。さらに正確を期すため、大規模な輸送イベントに絞って解析を行い、IASIのCO分布イメージ、NOAA HYSPLITモデルによる後方流跡線に加えて、GEOS-Chemモデル計算によるCOプルームの再現を照らし合わせ、3者の結果が比較的良く一致するイベントを6つ同定し、東アジアから北極圏へ大気汚染物質が長距離輸送されたイベントとした(図(1)-4)。6つのイベントにおいてCO濃度の閾値を超過した日は、2007年10月27日、2009年4月15日、2010年5月4日、2011年3月5日、2013年3月13日、2013年4月18日であり、北極圏に到達するのに要した時間は3から6日と推定された(表(1)-1)。これら6つのイベントの発生源は、中国北東部(4イベント)と中国華東部(2イベント)であり、図(1)-5に示すように、アジアから北極圏まで輸送される経路に3パターンあることが分かった。一つは中国から北北東に極東シベリア上空を輸送されて東シベリア海・チュクチ海に入る経路、2つ目が北東にサハリンやカムチャッカ半島上空を輸送されてベーリング海を經由する経路、3つ目が東北東に北太平洋上空を輸送されてベーリング海を經由して入る経路である。北極圏に到達する日数は、経路にはよらずイベントにより3~6日であった。いずれの



図(1)-5. 東アジアから北極圏への長距離輸送のパターンの概念図。



図(1)-6. CO濃度とテレコネクションインデックスの年間変動。(左) ONIとCO濃度の年間変動(3・4・5月の3ヶ月移動平均)、(右) NAOIとCO濃度の年間変動(4月の1ヶ月平均)。

イベントにおいても、CO気塊は東アジアの発生源から北極圏まで北半球500 hPa天気図のほぼ同じ等高線上に存在し、北極を中心とした風の蛇行(偏西風)に沿った形でCO気塊は北極圏に到達したと推定された。そのため、偏西風がCO気塊を東アジアから北極圏まで輸送する駆動力であり、CO等の汚染気塊の経路を決定する重要な要因の一つであると考えられた。

さて、対象とした北極圏において、COの季節変化傾向は明瞭ではあるが、その春季極大値の大きさは年によって大きく異なることや、イベント的なCOのピークの強度や数も年によって異なっていた。こうした年々変動を駆動する要因を明らかにするため、中緯度から高緯度への汚染物質の輸送にも関連することが知られているテレコネクションとの関係を調べた。本研究では、対象領域の春季におけるCO濃度の変動とエルニーニョ・南方振動(ENSO)や北大西洋振動(NAO)インデックスとの関連を2009年度から2014年度まで調べた(図(1)-6)。ONIは3ヶ月移動平均であるため、CO濃度とONIの3月・4月・5月の3ヶ月移動平均を対象に回帰分析によって関連性を調べた。その結果、ONIとCO濃度の間に比較的良好な関連性がみられた($R^2=0.63$, $P<0.1$)。ENSOの指標であるONIがポジティブの場合はベーリング海上の低気圧が強まるため南風は強くなり、ONIがネガティブの場合はベーリング海上の低気圧が弱まるため南風は弱まる。そのため、ONIはベーリング海付近を通過する東アジア起源汚染物質が北極圏内部に到達する際の重要な要因の一つであると考えられる。一方、NAOIとCO濃度の間には関連性は見られなかった($R^2=0.31$, $P>0.1$)。NAOIは北大西洋上空の低気圧の強弱に関わることで、ヨーロッパから北極圏への汚染物質の輸送に関わっていると指摘されているが、アジア側の北極圏では汚染物質の輸送に関わる要因としての重要性は低いと考えられた。

(2) 化学輸送モデルを用いたBCシミュレーションと定量的解析

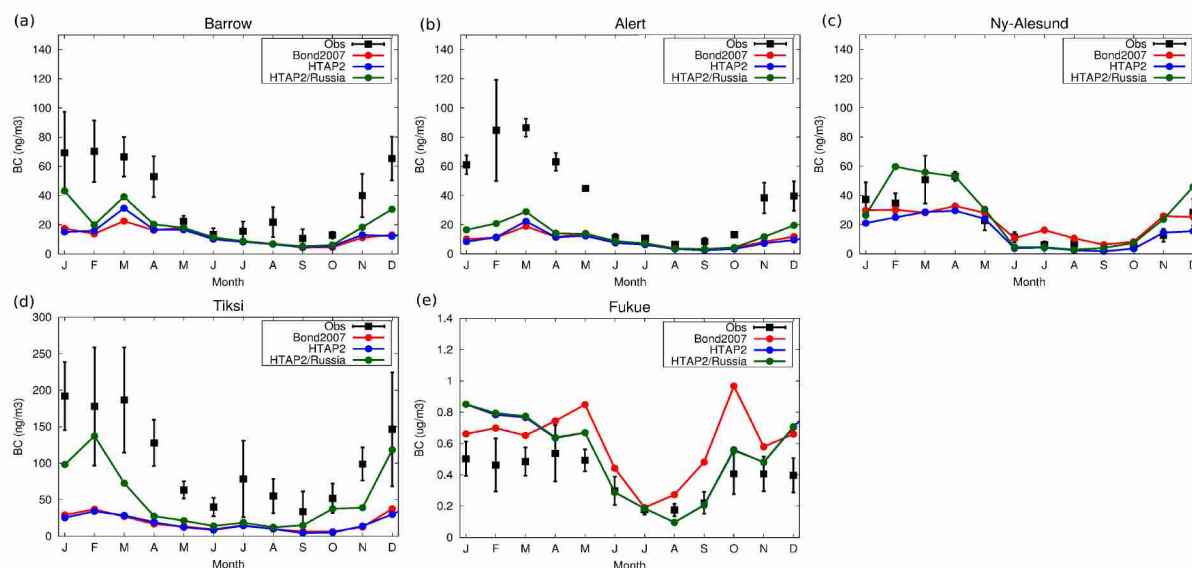
1) モデルの検証

人為起源のBC排出量データの不確実性が北極圏のBC濃度に及ぼす影響を調べるために、複数のエミッションインベントリ用いてGEOS-Chemによる実験を行った(図(1)-7)。GEOS-Chemの検証には、北極圏においてBC濃度の地上観測が行われているアラスカ・バロー(Barrow, 71.32°N, 156.61°W)、カナダ・アラート(Alert, 82.47°N, 62.5°W)、ノルウェー・ニーオルスン(Ny-Alesund, 78.91°N, 11.89°E)、ロシア・ティクシ(Tiksi, 71.58°N, 128.92°E)での観測値を使用した。また、サブテーマ2から提供された長崎県・福江島(32.75°N, 128.68°E)での観測データもモデルの検証に用いた。なお、以下のいずれのモデル計算においてもバイオマス燃焼起源BCの排出量にはGFEDv3.1の月平均データ⁴⁾を使用した。

オリジナルのGEOS-Chemでは人為起源BCの排出量としてBond et al. (2007)⁵⁾のインベントリが用いられている。Bond et al. (2007)⁵⁾は2000年を推計対象年としており、近年の中国などアジアでの経済発展に伴う排出量の増加が反映されておらず、アジア起源のBCが過小評価となるおそれがある。そこでモデルで用いるBCのエミッションとして、国際的な大陸規模越境大気汚染のタスクフォースであるHTAP (Hemispheric Transport of Air Pollution) の化学輸送モデル実験用に開発された最新の排出インベントリ⁶⁾ (以下HTAP2と略す) を導入した。HTAP2のエミッションは、全球の排出インベントリであるEDGARv4.3をベースとして、一部の地域には地域規模のインベントリも使用されており、アジア域(中国以外)についてはREASv2.1⁷⁾ (Regional Emission inventory in ASia) が用いられている。また、HTAP2のインベントリは2010年を推計年としている。全球でのBC排出量は、Bond et al. (2007)⁵⁾及びHTAP2において、それぞれ4.5、5.5 Tg/yearと推計されており、地域ごとに比べるとHTAP2の排出量データでは、中国やインドで増加する一方、アメリカやヨーロッパ、日本などでは減少となっている。

ニーオルスンにおいては、Bond et al. (2007)⁵⁾による結果と比べるとHTAP2実験ではBC濃度は冬・春季(12-4月)、夏季(6-8月)にそれぞれ20%、60%減少した(図(1)-7c)。これは、地理的に近いヨーロッパからのBC排出量の減少が原因と考えられる。他の北極圏の観測点(バロー、アラート、ティクシ)では、エミッションの違いによる影響は±10%以内で小さかった(図(1)-7a, b, d)。福江では、HTAP2の排出量を用いた実験では、冬季にやや増加、夏季は減少し、季節変動の振幅が増した(図(1)-7e)。これは、Bond et al. (2007)⁵⁾では排出量は年間を通じて一定であるのに対して、HTAP2ではBC排出量の季節変化(冬季に増加し、夏季に減少する)が考慮されているためと考えられる。結果として、福江ではHTAP2の導入によって夏～秋季の過大評価が改善されるが、冬季はやや過大評価となった。

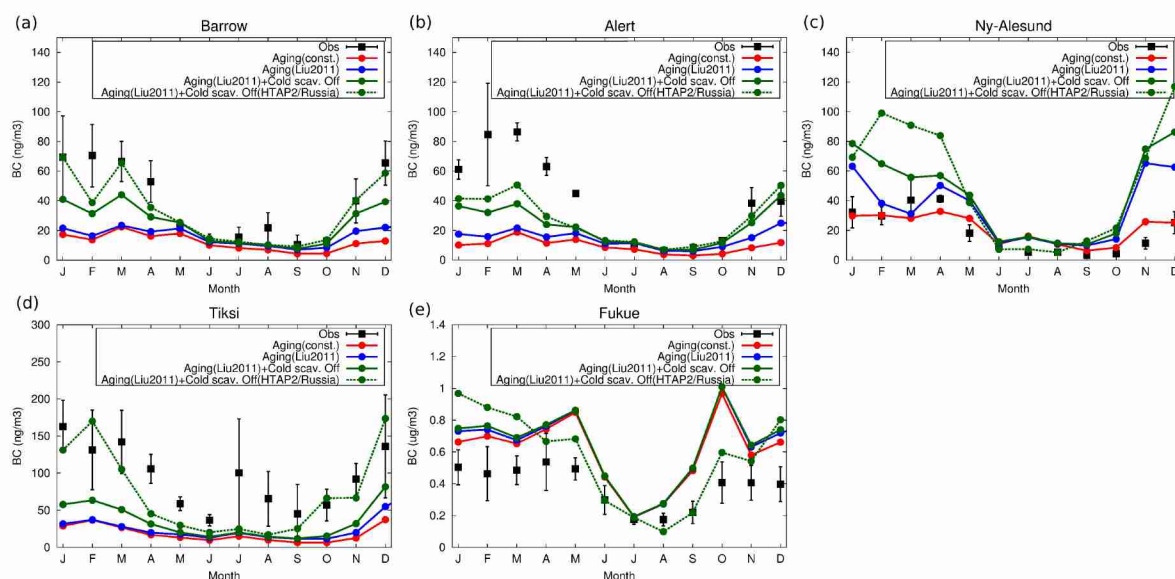
人為起源BCの主要な発生源であるアジア大陸からの影響を強く受ける福江においては、モデルは季節変化及び濃度レベルを概ねよく再現することができていた。一方北極圏では、モデルは冬季から春季



図(1)-7. アラスカ・バロー (a)、カナダ・アラート (b)、ノルウェー・ニーオルスン (c)、ロシア・ティクシ (d) 及び長崎県・福江島 (e) におけるブラックカーボン (BC) の月平均値 (単位は ng/m^3 もしくは $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。黒点は観測値を示し、平均期間はそれぞれバロー2010-2014年、アラート2011-2012年、ニーオルスン2007-2010年、ティクシ2010-2014年、福江2009-2016年である。エラーバーは月平均値の標準偏差を示す。人為起源のBC排出量にBond et al., (2007)⁵⁾のインベントリを用いたGEOS-Chemの結果を赤線 (Bond2007)、HTAP2の排出インベントリ⁶⁾の結果を青線 (HTAP2)、ロシアでの排出量にHuang et al., (2015)⁸⁾のインベントリを使用し、その他の地域にはHTAP2のエミッションを用いた結果を緑線 (HTAP2/Russia) で示す。GEOS-Chemについては2006年の計算結果を示している。

に上昇し夏季に減少する季節変化は再現するものの、ピーク時（冬・春季）の観測値を過小評価しており、季節変動の振幅が小さかった。近年、北極圏でのBC濃度のモデルと観測の不一致の原因の一つとして、高緯度域のBC排出量が過小評価されている可能性が指摘されている⁸⁾。具体的には、gas flaringのように従来のエミッションインベントリ（EDGARを含む）に含まれていない発生源の影響や、他の北極周辺国と比べて排出量推計の不確実性が高いとされるロシアでの過小評価や見落とされている発生源の存在が挙げられる。観測からもロシアのティクシでは、北極圏の他の三地点と比べて、BC濃度は2倍以上高くなっておりロシア国内のBC発生源の影響が示唆される（図(1)-7）。そこで、ロシアにおけるgas flaringを含むBC排出量を推計したHuang et al. (2015)⁸⁾のインベントリを使用した計算を行い、BC濃度への影響を調べた。ロシア以外の地域にはHTAP2のインベントリを使用した。Huang et al. (2015)のインベントリでは、ロシアの人為起源BC排出量は224 Gg/yearと推計されており、HTAP2 (89 Gg/year) よりも約2.5倍多くなっている。ロシアのエミッションを変更することによって、バローとアラート、ニーオルスンのBC濃度はHTAP2を用いた計算よりも冬・春季（12-4月）においておよそ60%から2倍増加した（図(1)-7）。最も影響が大きかったのはロシア・ティクシで、濃度は約3倍に上昇しておりロシア国内からの寄与が大きいことが示された。北極圏のいずれの地点でも観測値の再現性は向上し、ロシアの人為起源排出量の不確実性がモデルと観測の不一致の原因の一つとなっている可能性が示唆された。ただし、ニーオルスン以外では夏季を除いてモデルの過小評価は依然として大きく、排出量の問題以外にも原因があることが示された。

次に、北極圏への長距離輸送を扱う上で重要となるBCの変質及び湿性除去過程についてGEOS-Chemの改良を進めた。尚、下記の計算においては、人為起源とバイオマス燃焼起源のエミッションには、それぞれBond et al. (2007)⁵⁾のインベントリ及びGFEDv3.1を用いている。GEOS-Chemでは、BCは疎水性BCと親水性BCが区別して計算される。発生源から排出された時点では大半のBCは疎水性粒子であるが、その後大気中で他の水溶性のエアロゾル成分に被覆されることによって徐々に疎水性粒子から親水性粒子へと変化し（エイジング）、降水によって除去されやすくなる。オリジナルのGEOS-Chemでは、全球一



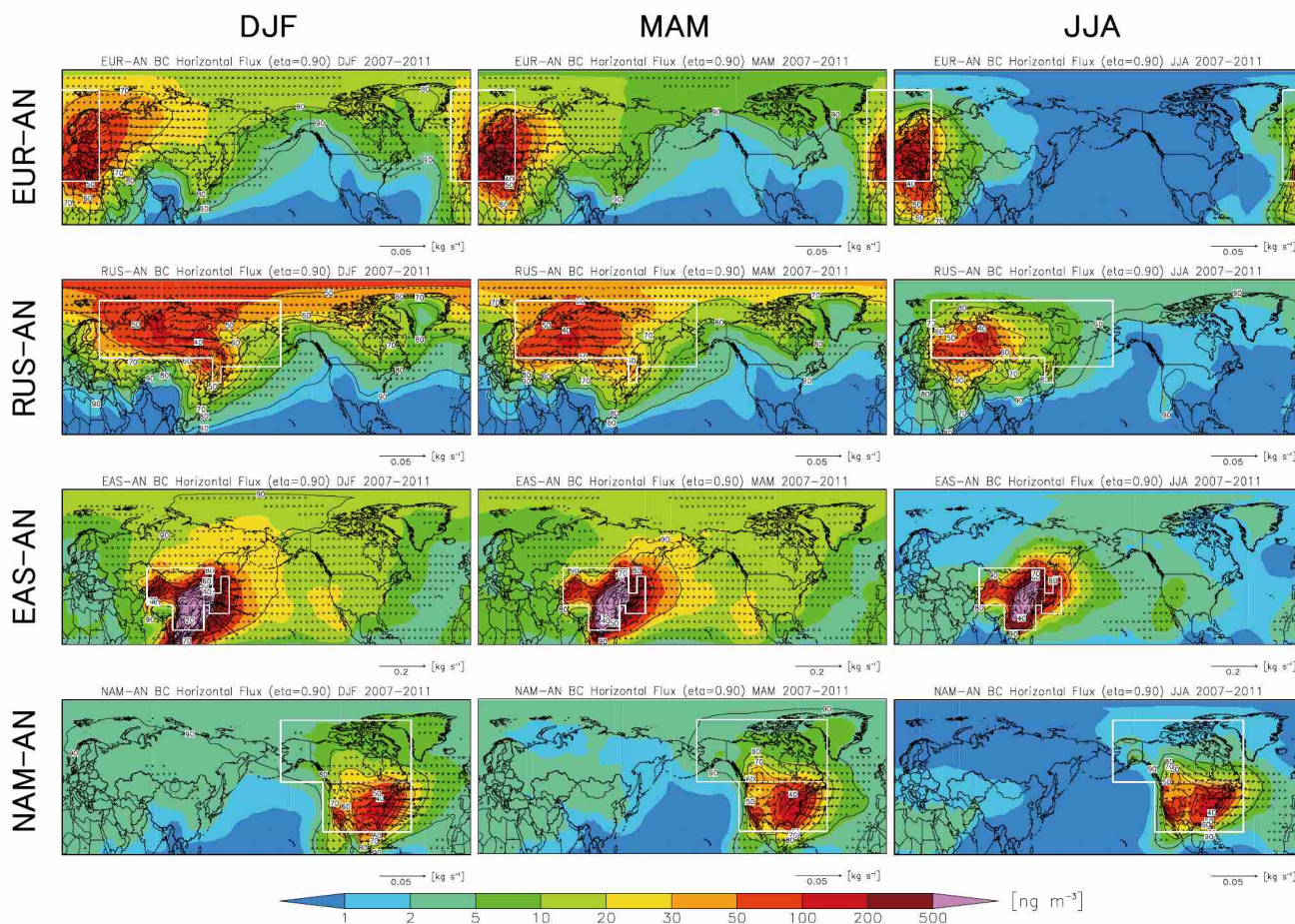
図(1)-8. 観測値は図(1)-7と同様。全球一様なBCエイジングの時定数（1.15日）を用いたGEOS-Chemの結果を赤線、Liu et al. (2011)¹⁰⁾によるエイジングのパラメタリゼーションを用いた結果を青線、このパラメタリゼーションに加えて低温域（ $T < 258$ K）でのBCの雲内除去をオフにした実験結果を緑線で示す。緑点線は、BCのエイジング過程および湿性除去過程の改良に加えて、排出量データにHTAP2及びHuang et al. (2015)⁸⁾によるロシアのインベントリを用いた結果を示す。GEOS-Chemについては2006年の計算結果を示している。

様の時定数 (1.15日) で疎水性BCから親水性BCへエイジングすることが仮定されている。ただしこの値は汚染大気の流れ域での観測を基に推定されたものであり⁹⁾、全球に対して適用すると、BCに被覆する成分の地域による違いを区別できないため、清浄大気では適当でない可能性がある。近年、全球一律な時定数を使用するのではなく、全球モデルにも使用できるような計算負荷の少ないBCエイジングのパラメタリゼーションが考案されている¹⁰⁾。本研究では、OHラジカルの濃度によって変質の時定数を決定するパラメタリゼーション¹⁰⁾を新たにGEOS-Chemに導入した。このパラメタリゼーションでは、BCのエイジングの時定数 τ (s) は、 $1/\tau = \beta \times [\text{OH}] + \delta$ として近似される。ここで、 $[\text{OH}]$ はOHの数濃度 (molecules/cm³)、 $\beta = 4.6 \times 10^{-12}$ (cm³/molecules/s)、 $\delta = 5.8 \times 10^{-7}$ (s⁻¹)である。このパラメタリゼーションによる春季のエイジングの時定数は、発生源が存在する中緯度域では、およそ1-2.5日、北極圏を含む大気汚染物質の少ない清浄な遠隔地域では7-14日と算出された。すなわち、高緯度域では全球で一定値の時定数を用いた場合よりもエイジングが遅くなることによってBCの大気中の寿命が長くなることが予想される。このパラメタリゼーションを用いた計算では、北極圏における冬・春季のBC濃度は20-70%増加し、再現性が向上することがわかった (図(1)-8)。尚、発生源に近い福江ではパラメタリゼーションによって計算されるエイジングの速度は、元の仮定された時定数 (1.15日) とあまり変わらないことから、このパラメタリゼーションの導入による影響は小さかった (図(1)-8e)。

GEOS-Chemの雲内での除去過程 (rainout) は、気温によって雲凝結核あるいは氷晶核としてのエアロゾルの除去が区別して行われる¹¹⁾。暖かい雲 ($T \geq 258$ K) においては、親水性エアロゾル (親水性BCを含む) の雲粒への取り込みが仮定されている。一方低温の雲内 ($T < 258$ K) では、疎水性BCと土壌ダストが氷晶核として働き除去されることが仮定されている。しかし、BCの氷晶核としての性質については不確実性が大きく¹²⁾、オリジナルのGEOS-Chemでは低温域におけるBCの湿性除去率が過大評価となっている可能性がある。そこで、上述のBCエイジングのパラメタリゼーションに加えて、冷たい雲内 ($T < 258$ K) でのBCの湿性除去をオフにした感度実験を行った。感度実験の結果、北極圏のBC濃度は特に冬・春季において大幅に上昇し、モデルの再現性が向上した (図(1)-8)。さらに、BCのエイジング過程および湿性除去過程を改良した上で、HTAP2の排出量及びHuang et al. (2015)⁸⁾のロシアのエミッションを使用した実験を行ったところ、モデルは北極圏のBC濃度レベルと季節変化を概ね再現できることが示された (図(1)-8の緑点線)。モデルによって北極圏のBC濃度の季節変動や濃度レベルを再現する上で、排出量データや疎水性粒子から親水性粒子へのエイジング、湿性除去過程の取り扱いに関わる重要性がそれぞれ示された。

2) 人為起源の発生源から北極へのBCの輸送

改良したGEOS-Chemを用いてタグ付きBCシミュレーションを2007-2011年5年間について行い、主要な発生源からの季節ごとの輸送過程や、BC濃度や沈着量に対する発生源別の寄与、各BCトレーサーの収支を調べた。まず、主要な人為起源発生源 (AN) である、ヨーロッパ (EUR-AN)、ロシア (RUS-AN)、北米 (NAM-AN)、東アジア (EAS-AN) からの季節ごとの輸送パターンについて述べる。ここで東アジアは日本、朝鮮半島、中国北部・南部の合計として定義した。また、北米はアメリカとカナダの合計として定義した。対流圏下層での各発生源からの長距離輸送を明らかにするために、高度1 kmにおける季節ごとのBC濃度とフラックスの水平分布を示す (図(1)-9)。ロシア起源のBC (RUS-AN) は冬季に北極全域に広がっており、30-100 ng/m³の大きな寄与を示した。ロシア起源BCの寄与は、gas flaringの発生源がある中央シベリアで最大となっている (図(1)-9)。冬季のロシア起源BCの北極圏への輸送には、シベリア高気圧に伴ってロシア西部や中央シベリアで卓越する北東向きの風が重要な役割を果たしていると考えられる (後述の図(1)-11に図示)。また、ロシアでは寒候期に降水量が少なく、湿性除去が起こりにくくなっていることも、北極圏への効率的な輸送にとって重要である (後述の図(1)-11には冬季のロシアの大部分で、降水量が1 mm/day以下であることが示されている)。図(1)-9には、湿性除去率の分布も示しているが、ロシア起源のBCの湿性除去率が特に冬季において、他の発生源よりも小さくなっている。ロシアの寒候期の気象条件は、低温な地表面による安定成層と少ない降水量で特徴付けられ、

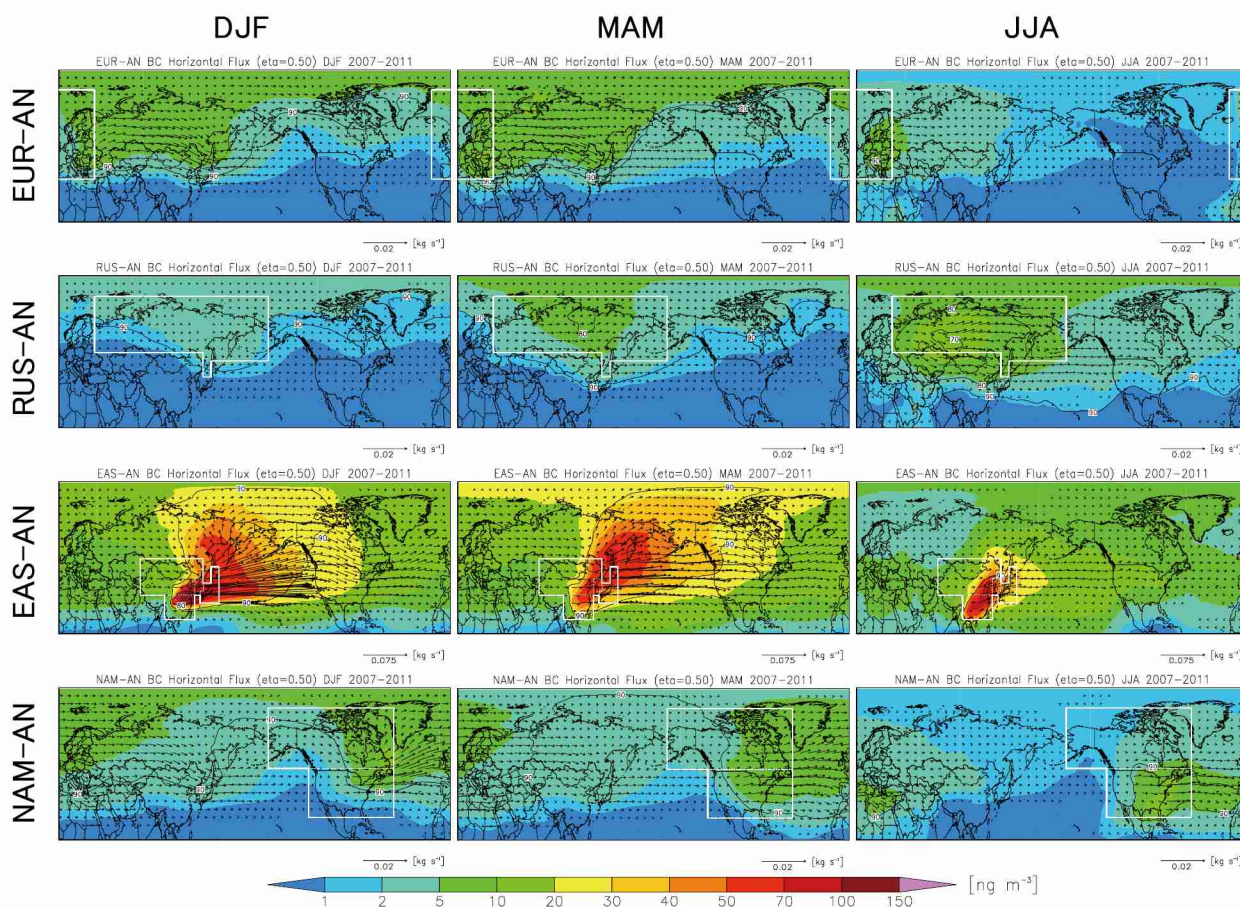


図(1)-9. 高度1 kmにおける冬季 (DJF: 12, 1, 2月)、春季 (MAM: 3, 4, 5月)、夏季 (JJA: 6, 7, 8月) のタグBCトレーサーの季節平均濃度 (色) 及び水平フラックス (矢印) を人為起源のヨーロッパ (EUR-AN) とロシア (RUS-AN)、東アジア (EAS-AN)、北米 (NAM-AN) について示す。湿性除去率を黒実線で示す。白実線は各BCトレーサーの発生源領域を示している。

それがロシアから北極圏への効率的な輸送につながっている。夏季は、ロシアから北極圏への輸送は冬・春季と比べて非常に小さくなる (図(1)-9)。これはロシアでの降水量が夏季に増加し (1-4 mm/day)、湿性除去が増すことと、冬季に発達していたシベリア高気圧が夏は低気圧にとって代わり、循環パターンが南西方向の風に変わることによる (図(1)-11に詳細)。ヨーロッパ起源のBC (EUR-AN) も高度1 kmで冬・春季に北東方向へと輸送されており、主にヨーロッパ側の北極圏で寄与が大きくなっている (20-50 ng/m³)。ヨーロッパから北極圏への輸送も寒候期にヨーロッパ北部で吹く北東向きの風が重要な役割を果たしている (図(1)-11に詳細)。こうした結果は、北極圏の地表BC対しては高緯度のユーラシア (ロシアやヨーロッパ) が主要な発生源であることを示した先行研究と一致する^{13), 14)}。

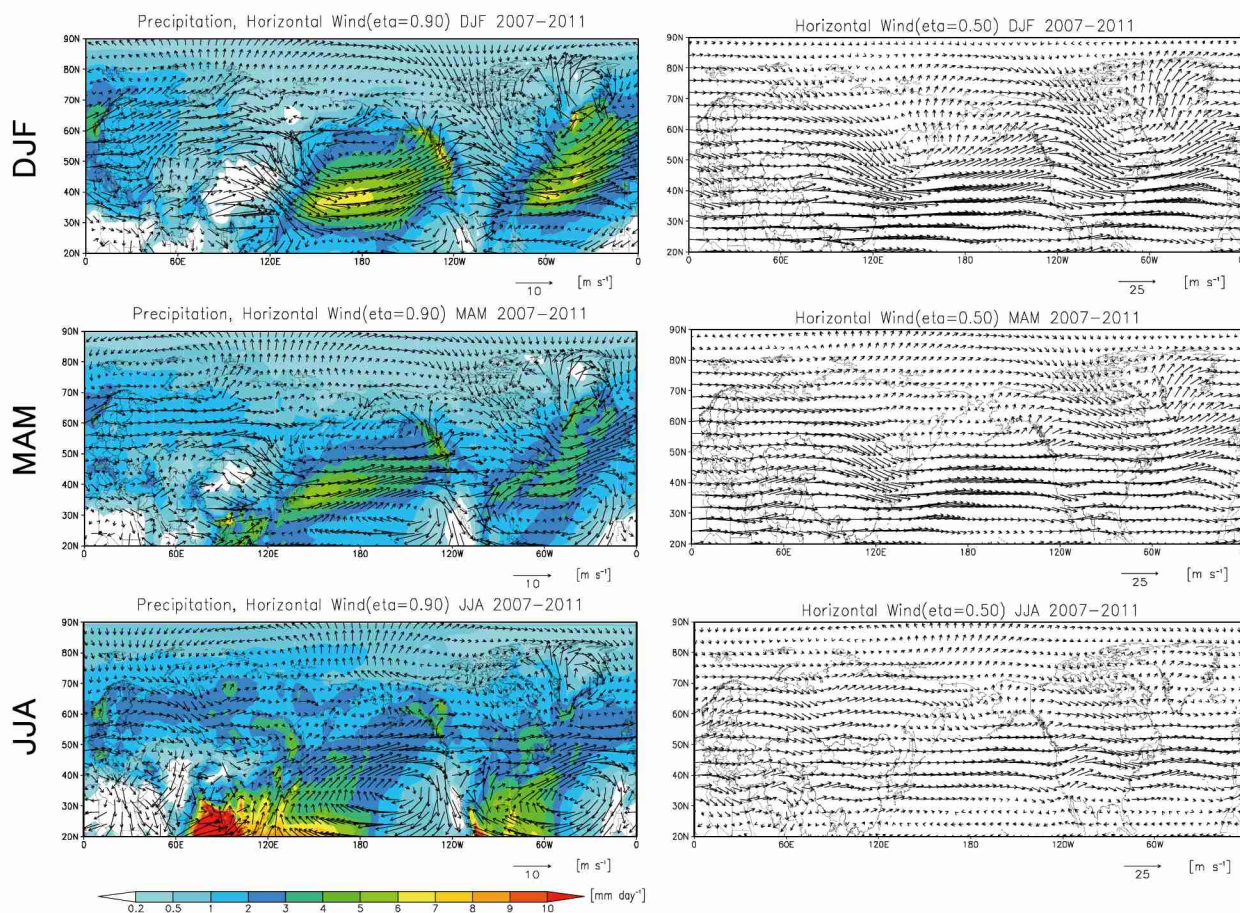
一方、対流圏下層における東アジア起源のBC (EAS-AN) や北米起源のBC (NAM-AN) の水平フラックスは、これらの地域から北極圏への輸送は効率的ではないことを示している (図(1)-9)。冬季は東アジア起源のBCは、中国北部や日本、北西太平洋で卓越する冬季モンスーン循環に伴う北西風 (図(1)-11) によって主に南東方向へ輸送される。東アジア起源のBCは、対流圏下層ではユーラシア・北米側の北極圏で冬・春季に10-20 ng/m³の寄与を持つ程度である。北米起源のBCについては、北米側の北極圏で5-10 ng/m³の寄与がある。東アジアや北米起源のBCについても夏季は発生源域付近での降水量が増加するため (図(1)-11)、他の季節と比べると輸送は弱くなっている。

次に、対流圏中層でのBCの長距離輸送を明らかにするために、高度5 kmにおける各発生源のBC濃度とフラックスの水平分布を図(1)-10に示す。東アジア起源のBC (EAS-AN) は、対流圏中層において冬・春



図(1)-10. 高度5 kmにおける冬季 (DJF)、春季 (MAM)、夏季 (JJA) のタグBCトレーサーの季節平均濃度 (色) 及び水平フラックス (矢印) を人為起源のヨーロッパ (EUR-AN) とロシア (RUS-AN)、東アジア (EAS-AN)、北米 (NAM-AN) について示す。湿性除去率を黒実線で示す。白実線は各BCトレーサーの発生源領域を示している。

季に東向き及び北東方向へ輸送される。東向きの輸送経路では、東アジア起源のBCは太平洋を越えて北米へ到達していることがわかる。東アジアから北東方向へ広がるBCは、オホーツク海や東シベリア上空を通過して北極圏に達する。北極圏へ到達後は、北極海上をさらに東向きへと輸送される。東アジア起源BCの寄与は、冬・春季にユーラシア側の北極圏で20-40 ng/m³を示す。冬季はオホーツク海や東シベリア、ベーリング海上で吹いている北向きの風が東アジア起源BCの極向きの輸送に重要な役割を果たしていると考えられる (図(1)-11)。春季は、季節平均の北向きの風は冬季よりも弱くなるが、北極圏への寄与は春のほうが大きくなっている。春季の東アジア起源BCの寄与の増大は、季節平均の風速場だけでは十分説明ができず、より短いタイムスケールでの擾乱が北極への輸送に重要であることを示唆している。水平フラックスのパターンから、東アジア起源BCは主にオホーツク海や東シベリアの上空から北極海へ輸送されることが示唆される。この輸送経路は、衛星データ (CALIPSO) を用いて東アジアから北極圏への輸送イベントを調べた先行研究と整合的である¹⁵⁾。湿性除去率の分布は、東アジア起源のBCは北極圏に到達する前に約90%が大気中から除去されていることを示している。夏季の東アジアからのBCの輸送は、冬・春季と比べて非常に小さくなる。北米起源のBC (NAM-AN) は、東アジア起源BCと同様に対流圏中層において冬・春季に東向き及び北東方向へ輸送される。北大西洋を渡ってヨーロッパへ到る東向きの輸送に加え、米国東部からグリーンランドの上空から北極圏へ輸送される様子がわかる。対流圏中層におけるロシア起源BC (RUS-AN) の寄与は、特に冬季において対流圏下層と比べると非常に小さい。これは地表付近の低温による安定成層がBCの上方への輸送を妨げるためである。ヨーロッパ起源BC (EUR-AN) も同様に高度5 kmの寄与は、高度1 kmよりも小さくなっている。

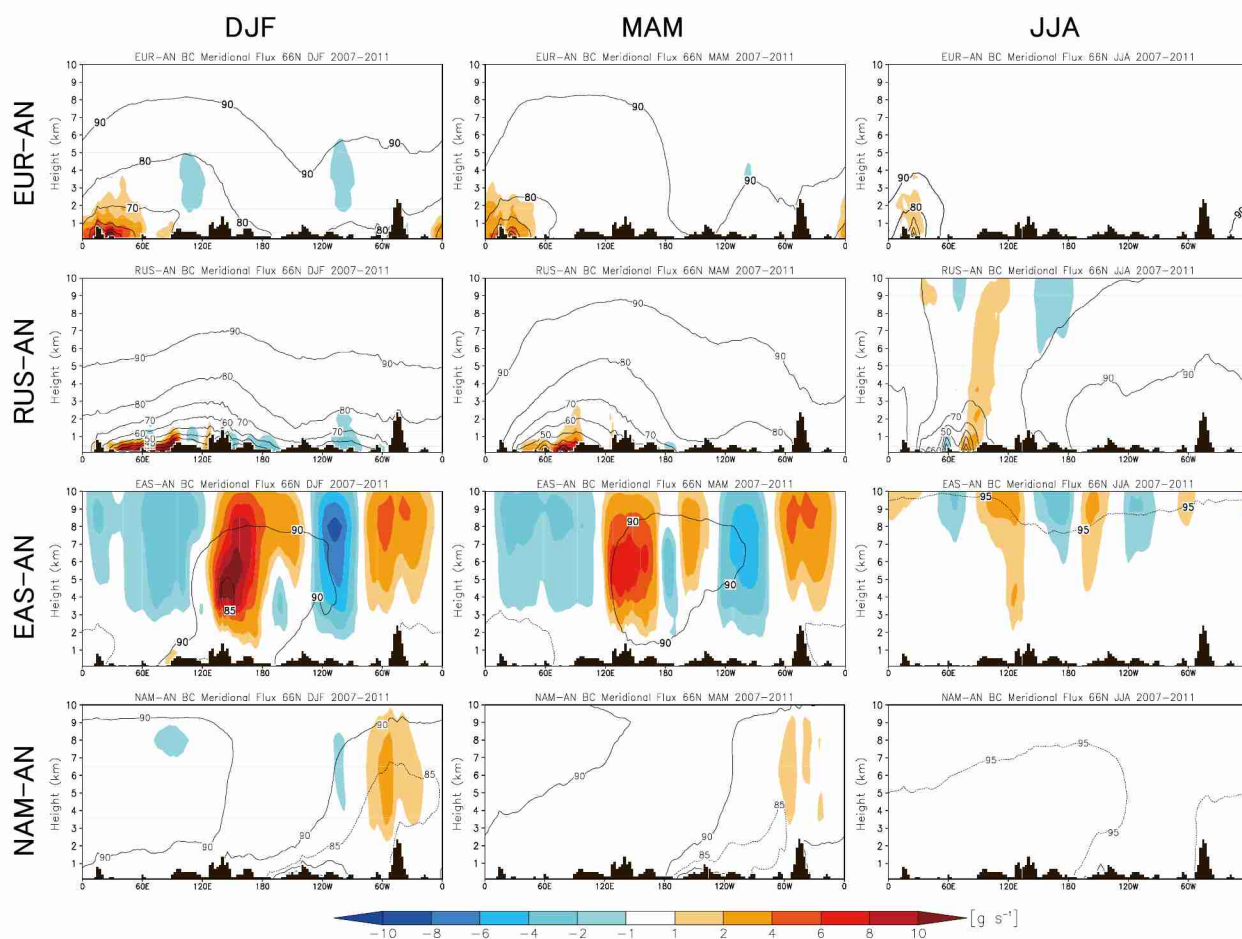


図(1)-11. 冬季と春季、夏季の季節平均のGEOS-5の気象場。降水量（色）及び高度1 km（左）と高度5 km（右）における水平風の分布（矢印）を示す。

各発生源BCの北極圏への輸送が発生する重要な地域を特定するために、北緯66°を通過する南北フラックスの経度-高度断面図を図(1)-12に示す。冬・春季のヨーロッパから北極圏へのBCの流入は、主に高度2 km以下の0-60°Eで生じている。ロシアから北極圏への輸送は、主に対流圏下層における30-90°Eで起こることがわかる。冬季のロシアにおける安定成層な条件によって、北極圏への流入は高度1 km以下に集中している。対照的に、東アジアから北極圏への輸送は対流圏中層から上層で見られ、対流圏下層からの輸送はヨーロッパ・ロシアと比べ弱くなっている。これは、東アジア起源のBCが温位の緯度勾配によって、北極圏への長距離輸送中に上方輸送されるためである¹⁶⁾。冬季の東アジアから北極圏への輸送は、高度3-8 kmの130-180°Eで生じている。春季においても冬季と同様の領域から流入が起こっている。寒候期の北極圏の対流圏下層は、ポーラードーム (polar dome) と呼ばれる低温位の閉じた領域として孤立しており、周辺域の気塊との混合が起こりにくく、寒帯前線 (polar front) の外側から北極圏への汚染物質の輸送が妨げられる¹⁷⁾。東アジアはポーラードームの南側に位置しており、BCはより温位の高い地域から排出されるため、対流圏下層からの北極圏への輸送は弱く、対流圏中層・上層において流入が起こる^{13), 16)}。夏季は、対流圏中層での東アジアから北極圏への輸送は弱くなり、対流圏上層からの弱い流入に限られている。北米から北極圏へのBCの輸送も東アジアと同様に対流圏中層・上層で起こり、下層からの流入は弱い。これは、北米のBCもより高温位の地域から排出され、ポーラードームより高い高度から北極圏への輸送が起こるためである。東アジアや北米から流出する汚染物質は、境界層から自由対流圏の上方輸送を受け最終的に主に中・上部対流圏から北極圏へと輸送される。

北緯66°における湿性除去率の経度-高度分布を見ると、東アジア起源のBCの約90%が北極圏へ長距離輸送される途中で大気から除去されることを示している (図(1)-12)。この値は、北米側の北極圏における春の航空機観測によって、BC/ Δ COから推定されたアジアからの輸送効率 (すなわち、輸送中に除

去されなかったBCの割合)の値(13%)と整合的である¹⁸⁾。北米起源のBCの湿性除去率は東アジアの値と同程度である(85-90%)。一方、ロシア起源のBCが北極圏へ流入が起こる領域(30-90°E、高度1 km以下)での湿性除去率は30-50%と見積もられている。すなわち、ロシアからのBCの湿性除去は東アジアや北米よりも大幅に小さく、北極圏へ効率的に輸送されていることがわかる。寒候期の高緯度のユーラシア大陸は降水量の少ない地域であることから、湿性除去が抑制されBCの大気中の寿命がより長くなっている。ヨーロッパ起源のBCの66°Nの流入域(0-60°E、高度2 km以下)における湿性除去率は40-80%と算出され、ロシアの値よりは大きい、東アジアや北米よりは低い値となっている。



図(1)-12. 北緯66°における冬季と春季、夏季の季節平均した南北フラックスの経度-高度分布。ヨーロッパ(EUR-AN)とロシア(RUS-AN)、東アジア(EAS-AN)、北米(NAM-AN)の人為起源発生源のBCトレーサーについて示す。黒実線で湿性除去率を示す。

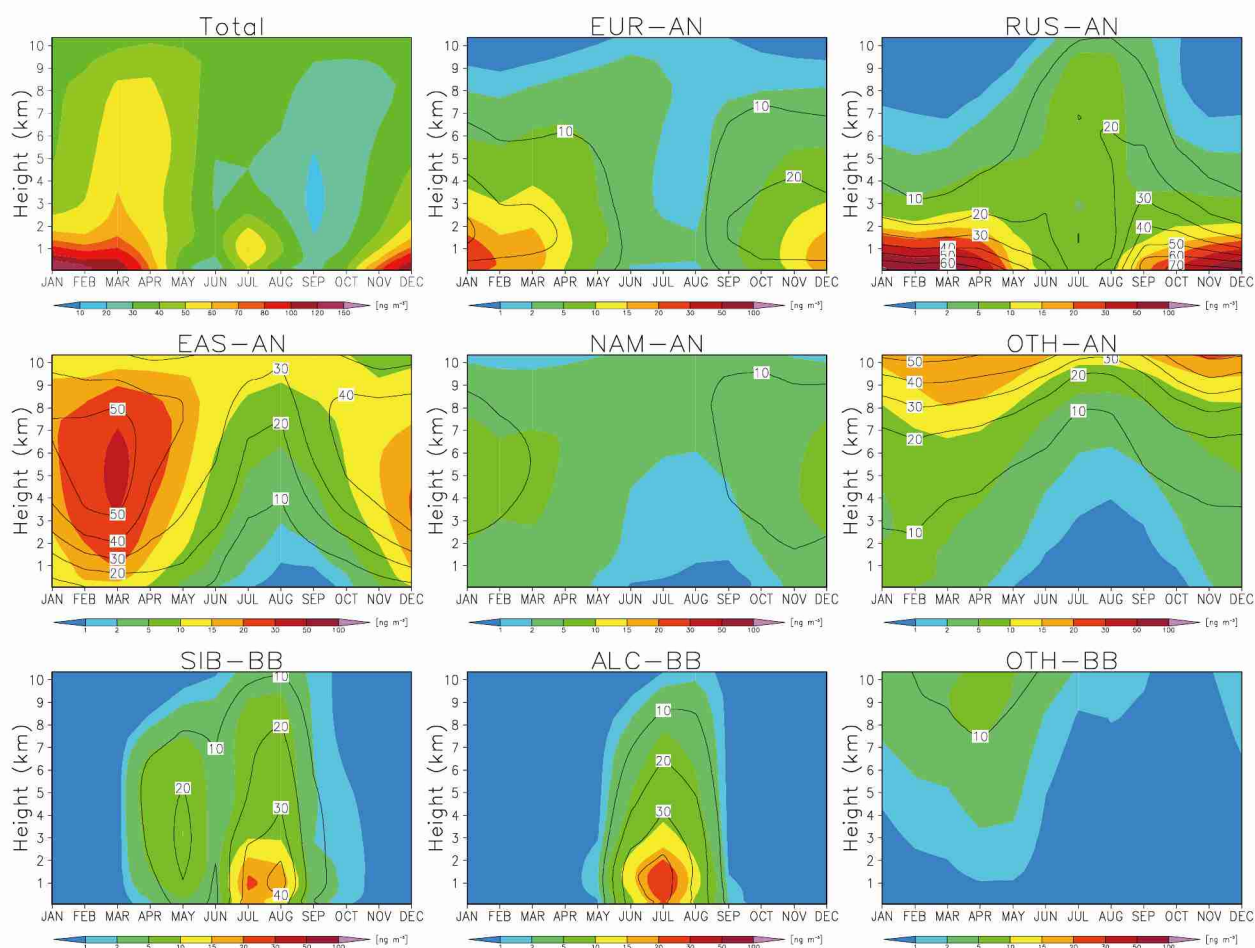
3) 人為起源及びバイオマス燃焼起源からの相対的寄与

北極圏全体(北緯66-90°)で平均した地表から高度10 kmまでの各発生源から寄与の季節変化を図(1)-13に示す。4つの主要な発生源(ヨーロッパEUR-AN、ロシアRUS-AN、東アジアEAS-AN、北米NAM-AN)を除く人為起源の発生源の合計を「その他の人為起源(OHT-AN)」として合計して定義した。バイオマス燃焼の発生源については、ロシア・シベリアの7つの領域をSIB-BB、アラスカとカナダの3領域をALC-BBとして、それぞれ統合して示している。SIB-BBとALC-BB以外のバイオマス燃焼の発生源の合計は「その他のバイオマス燃焼(OTH-BB)」として定義した。

下部対流圏での効率的な輸送によって、ロシア(RUS-AN)からの寄与は主に高度2 km以下で、晩秋から早春にかけて増加する。ロシアの寄与は地表付近で最大となり高度と共に減少するが(図(1)-13)、この高度分布は寒候期の低温な地表面による熱的な安定成層を反映している。ロシア起源のBCは、夏季

を除き高度1 km以下において40-70%の寄与を示した。ヨーロッパ (EUR-AN) の寄与も高度2 km以下において冬から早春に増加し、北極圏BCの10-20%を占める。東アジア起源のBC (EAS-AN) は地表から高度と共に増加し、主に中部対流圏で起こる流入によって、高度約5 kmで寄与が最大となる (図(1)-12、図(1)-13)。東アジア起源のBCの季節変化を見ると、早春 (3月) に最大となり夏季に最小となる。東アジア起源BCの相対的な寄与率は対流圏中層と上層で冬・春季に30-50%と算出された。北米 (NAM-AN) の寄与は、冬季に高度約5 kmで最大となる。相対的に低緯度側に位置する東アジアや北米起源のBCは、より高温位の地域から排出されるため、北極圏への長距離輸送中に上方輸送されることによって中部対流圏において寄与が大きくなる。主に北半球の低緯度や南半球の人為起源発生源から成る、その他の人為起源 (OTH-AN) は高度8 km以上の上部対流圏で寄与が大きくなる。人為起源の発生源とは対照的に、シベリア (SIB-BB) やアラスカ・カナダ (ALC-BB) のバイオマス燃焼起源のBCの寄与は夏季に増加する。これは、シベリアや北米の北方森林における火災が晩春から秋季にかけて発生するためである。シベリア (SIB-BB) とアラスカ・カナダ (ALC-BB) のバイオマス燃焼起源の相対的寄与率は、夏季の下部対流圏でそれぞれ、20-40%、30-40%と算出された。

Arctic BC (66-90N)

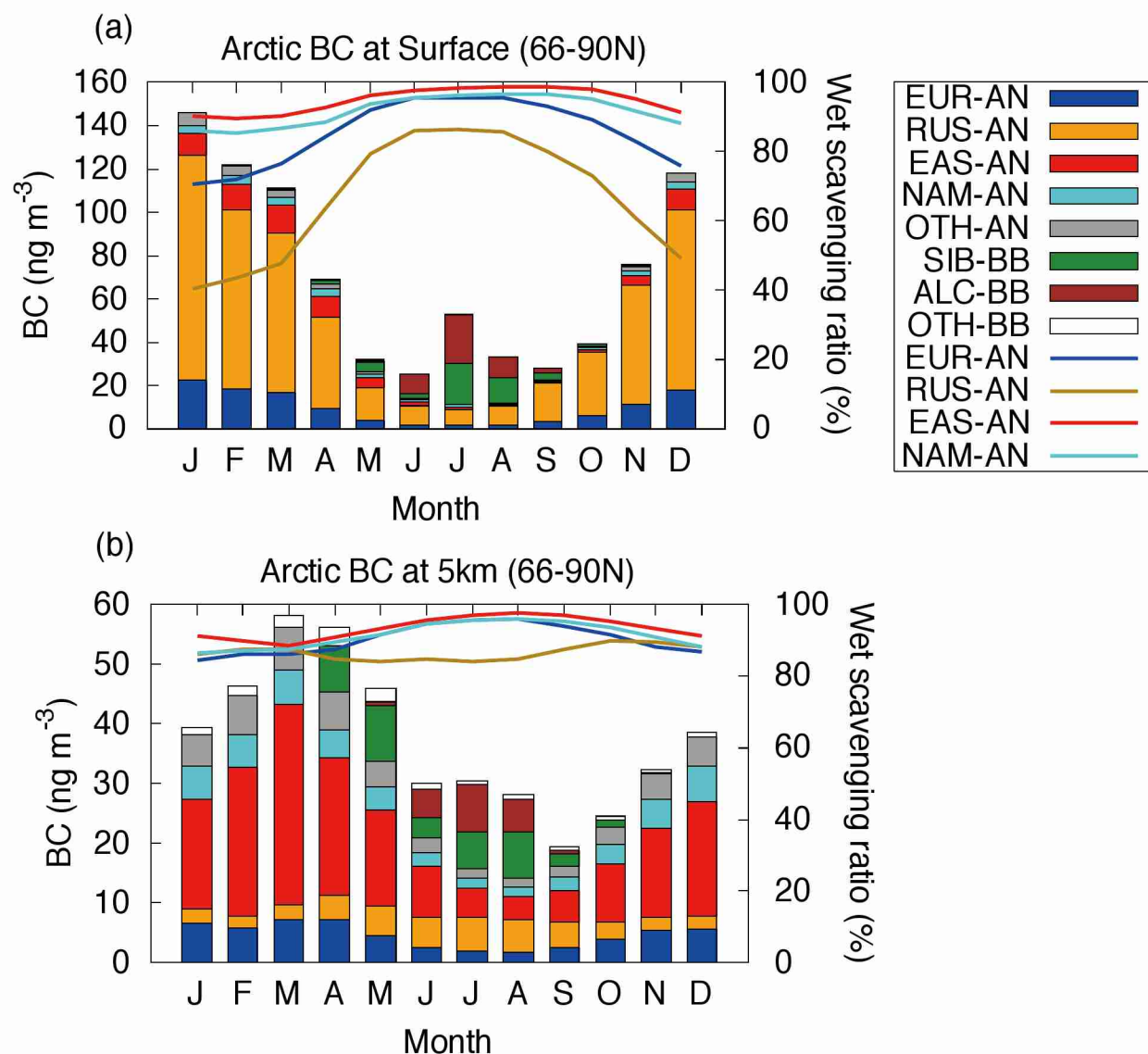


図(1)-13. 北極圏全域 (66-90°N) で平均した各発生源のBC濃度の月-高度分布。相対的寄与率を実線で示す。

図(1)-14に地表付近及び高度5 kmにおける北極圏全体 (66-90°N) で平均した各発生源からの寄与の季節変化を示した。北極圏BCの季節変化に対する湿性除去の役割を明らかにするため、人為起源発生源 (ヨーロッパ、ロシア、東アジア、北米) の湿性除去率も示した。地表付近では、ロシアのBCが主要な発生源であり、冬・春・秋季に月平均値で40-70%の寄与を占め、ヨーロッパ (10-20%)、東アジア (5-

15%) がそれに続く。夏季を除くと人為起源の発生源の寄与がバイオマス燃焼起源よりも大幅に上回っている。シベリア (SIB-BB) やアラスカ・カナダ (ALC-BB) のバイオマス燃焼起源のBCは夏季にそれぞれ10-40%、30-40%の重要な寄与を占め、夏はバイオマス燃焼起源BCの寄与が人為起源の発生源よりも大きい。高度5 kmでは、東アジア起源のBCが最も重要であり、冬・春・秋季に月平均値で30-60%の寄与を占め、ヨーロッパ (10-20%)、北米 (10-15%)、ロシア (5-20%)、その他の人為起源 (10-15%) が続いている。シベリア (SIB-BB) とアラスカ・カナダ (ALC-BB) のバイオマス燃焼起源の寄与は春と夏季に重要となり、春季はシベリアが15-20%の寄与を持ち、夏季はシベリアが15-20%、アラスカ・カナダが15-20%の寄与をそれぞれ占める。高度5 kmにおいては、夏季のバイオマス燃焼起源の寄与は人為起源の寄与と同程度であった。

地表付近でロシアの寄与は、冬季に最大 (約100 ng/m³)、夏季に最小 (約10 ng/m³) となる大きな季節変化を示す (図(1)-14)。ロシア起源のBCは北極圏のBCに最も重要であることから、北極圏のBC全体の濃度の季節変化にも大きな影響を及ぼしている。ロシアのBCの月平均の湿性除去率を見ると、冬季の20%から夏季の70%まで大きな季節変動を示している。人為起源4つの発生源 (ヨーロッパ、ロシア、東アジア、北米) の湿性除去率は全て冬季に減少し、夏季に増加するが、季節変動の振幅はロシアの湿性除去率が最も大きい。また、ロシアの湿性除去率はすべての季節において他の人為起源発生源の



図(1)-14. 北極圏における各発生源の月平均BC濃度の季節変動を地表付近 (a) と高度5 km (b) について示す (左軸)。主要な人為起源発生源の湿性除去率を実線 (右軸) で示す。

値よりも小さいことも、北極圏BCに対する重要な寄与つながっていることがわかった。地表におけるヨーロッパ起源のBCもロシアと同様の季節変化を示す(図(1)-13、図(1)-14)。ヨーロッパのBCの寄与も北極圏において冬季に最大となり、約20 ng/m³となる。主要な人為起源発生源の中で湿性除去率の値が最も高いのは、東アジア起源のBCであり、地表では全ての季節で90%を超えることがわかった。

対流圏中層(高度約5 km)において、東アジア起源のBCは春季に増加し、夏季に減少する季節変化を示す(図(1)-14)。東アジア起源BCの大きい寄与によって、全BC濃度も春季に最大となり、地表とは異なる季節変化(冬季に最大)であることがわかる。東アジア起源BCの湿性除去率は主要な人為起源発生源の中で最も高いにもかかわらず、夏季を除き中部対流圏で最も寄与が大きい。これは下記に述べるように東アジアの排出量が他の発生源を大きく上回っているためである。東アジア起源BCは長距離輸送中に上方輸送されるため、地表よりも中部対流圏で寄与が大きくなっている。北米起源のBCの湿性除去率は東アジアの値と比べると少し低いが、北米からの寄与は最大でも10 ng/m³程度であり東アジアからの寄与よりも小さい。高度5 kmにおけるロシアの寄与は地表と比べると非常に小さくなっており、その差は特に冬季において顕著である(図(1)-13、図(1)-14)。これは、寒候期のロシアにおける熱的に安定な条件が対流圏中層への輸送を妨げられるためである。中部対流圏におけるヨーロッパの寄与も地表付近と比べると小さくなっている。

4) 北極BCへの発生源寄与と収支

各BCトレーサーの2007-2011年における収支について表(1)-2及び図(1)-15にまとめた。東アジア(EAS-AN)から北緯66°を通過して北極圏へ流入するフラックスの合計値(南北風速が $v > 0$ である期間について積算したフラックス量)は、175.4 Gg/年と見積もられ、排出量(1844.9 Gg/年)の約10%に相当する。北極圏(66-90°N)における東アジアのBCの沈着量は12.3 Gg/年であり、これは排出量の約1%に相当する。すなわち、東アジアから北極圏へ輸送されたBCの大半は、北極圏内で沈着することなく、北極圏外へと出て行くことがわかる。東アジアから排出されるBCの内、北極圏へ輸送される割合は、高い湿性除去率によって他の人為起源発生源(ヨーロッパ、ロシア、北米)よりも小さいにもかかわらず、北極圏への流入量はこれら4つの主要発生源の中で最も大きい。これは、東アジアからの排出量が他の発源地域を大きく上回っていることによる(表(1)-2)。一方、ロシアの排出量(RUS-AN; 196.8 Gg/年)は、主要な人為起源発生源の中では比較的小さいにもかかわらず、北極圏への流入量については東アジアに次いで二番目に大きい(103.0 Gg/年)。これは、ロシア起源のBCが特に冬・春季には湿性除去が少なく、北極圏へ効率良く輸送されるためである(図(1)-9、図(1)-13)。

各BCトレーサーの大気中に存在する寿命(カラム量を全沈着量で割ったとして定義される)は、5.7-9.1日と見積もられた(表(1)-2)。平均寿命は7.3日であり、この値はACCMIPプロジェクトのモデル間相互比較におけるモデル平均値の値(7.4日)と一致する¹⁹⁾。また、他の先行研究において報告された値とも近い(例えば、Koch and Hansen, 2005²⁰⁾による7.3日やWang et al., 2011¹¹⁾による5.9日)。北極圏内(66-90°N)での各BCトレーサーの大気中の寿命は8.6-92.7日と見積もられた。東アジア起源のBCの北極圏内での寿命(57.5日)は、ヨーロッパ(14.2日)やロシア起源(12.9日)と比べて長くなっているが、これは東アジアのBCが主に対流圏中層以上に分布しており(図1-13)、北極圏での沈着量もヨーロッパやロシアと比べると小さいためである。北極圏内での平均寿命は21.3日であり、AMAP(Arctic Monitoring and Assessment Programme)に参画したモデル平均値(20.0日)と近づいている²¹⁾。

北極圏(66-90°N)におけるBC濃度、カラム量、沈着量に対する各発生源からの年平均の相対的寄与率を表(1)-3にまとめた。タグBCトレーサーは5つの人為起源発生源と3つのバイオマス燃焼起源発生源に統合して示している。図1-13や図1-14から予想されるように、ロシア(RUS-AN)が地表でのBC濃度に対する最も重要な発生源であり、年平均61.8%を占める。ヨーロッパ(EUR-AN)の寄与が地表では二番目に大きく13.4%を占めた。東アジア(EAS-AN)からの相対的寄与は8.0%となっている。この結果は、北方ユーラシア(ヨーロッパやロシア)が北極圏の地上での主要な発生源であり、東アジアからの寄与は小さいことを示した先行研究と同様である^{2), 14), 22), 23)}。また、ロシアの寄与がヨーロッパよりも

大きいことを示した本研究の結果は、gas flaringを含む新しい排出量データを用いた最近の研究と整合的である^{8), 24)}。シベリア (SIB-BB) やアラスカ・カナダ (ALC-BB) のバイオマス燃焼起源の寄与は地表で約5%と見積もられた。したがって、人為起源発生源の寄与が北極圏の地表BC濃度に対しては卓越しており、合計すると年平均で90%を占めることがわかった。

表(1)-2. 各発生源のBCトレーサーの収支。

トレーサー ^a	排出量 ^c (Gg / 年)	北緯66°での極向きフラックス (r>0) (Gg/年)	北極圏でのカラム量 (Gg)	北極圏への沈着量 (Gg/年)		大気中の寿命 (日)	
				湿性	乾性	全球	北極
EUR-AN	353.7 (2.6)	76.1	0.9	18.2	4.8	6.4	14.2
RUS-AN	196.8 (22.2)	103.0	1.5	26.7	15.2	9.1	12.9
EAS-AN ^b	1844.9 (0.0)	175.4	1.9	10.4	1.9	6.4	57.5
NAM-AN ^b	342.2 (0.6)	45.5	0.5	4.5	0.8	5.7	34.1
OTH-AN ^b	2946.9 (0.1)	110.5	1.2	4.0	0.7	7.6	92.7
SIB-BB ^b	114.2 (4.9)	42.5	0.5	15.5	2.3	7.9	10.1
ALC-BB ^b	64.0 (5.6)	27.0	0.4	12.6	2.1	6.3	8.6
OTH-BB ^b	1718.3 (0.0)	21.9	0.2	1.3	0.1	8.0	57.9
Total	7580.9 (35.9)	601.8	7.1	93.1	27.9	7.3	21.3

^aANとBBはそれぞれ人為起源とバイオマス燃焼起源の発生源であることを示す。

^bEAS-AN (東アジア) は日本 (JPN-AN) と朝鮮半島 (KOR-AN) 、中国北部 (CHN-AN) 、中国南部 (CHS-AN) の合計。NAM-AN (北米) はアメリカ (NAM-AN) とアラスカ・カナダ (ALC-AN) の合計。OTH-AN (その他の人為起源) はヨーロッパ (EUR-AN) とロシア (RUS-AN) 、東アジア (EAS-AN) 、北米 (NAM-AN) 以外の人為起源発生源の合計。SIB-BB (シベリアバイオマス燃焼) は、ロシア西部 (WRU-BB) とシベリア6地域 (S1-BB, S2-BB, S3-BB, S4-BB, S5-BB, S6-BB) の合計。ALC-BB (アラスカ・カナダバイオマス燃焼) はアラスカ (ALS-BB) とカナダ西部 (WCA-BB) 、カナダ東部 (ECA-BB) の合計。OTH-BB (その他のバイオマス燃焼) はシベリア (SIB-BB) とアラスカ・カナダ (ALC-BB) 以外のバイオマス燃焼起源の発生源の合計。

^c括弧内の値は北緯66度以北からの排出量を示す。

対流圏中層 (高度5 km) では、東アジアが最も大きい寄与を持ち、40.6%を占めた。東アジア域内の発生源の中で最も寄与が大きいのは、中国北部 (NCH-AN) であり29.4%の寄与を示した。東アジアの寄与が中部対流圏で卓越する結果は先行研究とも整合的である^{11), 23)}。ロシアの相対的寄与率は高度5 kmでは、9.8%となっており地表での値 (62%) よりもかなり小さくなっている。したがって、北極圏のBCに対する主要な発生源は、高度によって異なることがわかった。これは、上述のようにそれぞれの発生源から北極圏への輸送経路が異なるためである (図(1)-9、図(1)-10)。東アジア起源のBCは北極圏への長距離輸送中に上方輸送され、主に中部対流圏から流入する (図1-10、図1-12)。一方、ロシアのBCは寒候期に安定成層条件下で主に下部対流圏で北極圏へ輸送される (図1-9、図1-12)。北極圏における大気汚染という観点からは、ロシアやヨーロッパ起源のBCが北極へイズの季節に地表付近で大きな寄与を持っており、より重要である。また、下部対流圏におけるBCは北極圏の地表面を温める効果が大きい²⁵⁾。一方、中部対流圏におけるBCは大気上端での放射強制力に対してより重要であり、また対流圏下層や中層の大気を加熱する効果も持っている²⁵⁾。BCの存在する高度によって、北極の気候への影響の及ぼし方は異なるため、北極圏のBCの主要な発生源を高度ごとに理解することが重要となる。

北極圏のBCカラム量に対しては、東アジアの寄与が最も重要であり、27.4%を占める。東アジアに次いで寄与が大きいのはロシアの21.0%である。これは、北極のBCカラム量に対して東アジア・南アジアとロシアが重要であることを示したAMAP (2015)²⁶⁾のレポートと整合的な結果である。Wang et al. (2014)²³⁾も東アジアと主にロシアから成る「北方アジア」が北極BCカラム量に対して最大 (23.4%) と

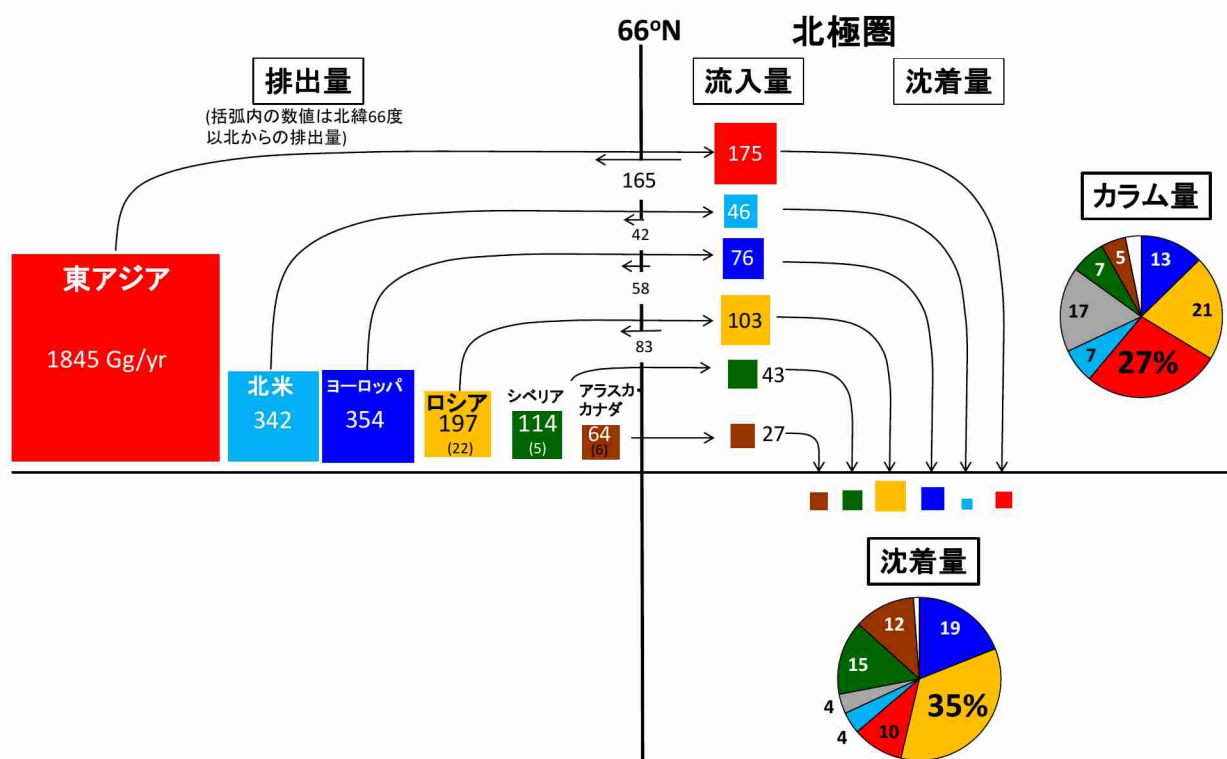
二番目に大きい (22.6%) 寄与を持つことを示しており、本研究の結果と一致する。Bourgeois and Bey (2011)²⁷⁾はシベリアとアジア、ヨーロッパがそれぞれ同等の寄与を持つと推定している。本研究では、その他の人為起源 (OHT-AN) の発生源もカラム量に対して17.0%の重要な寄与を持っていた。その他の人為起源の中では、南アジア (SAS-AN) の寄与が最も大きく、8.7%を占めた。

表(1)-3. 北極圏 (北緯66-90°) における地表面と高度5 kmの年平均BC濃度、カラム量、沈着量に対する各発生源の相対的寄与率 (%)。

トレーサー ^a	地表面	5 km	カラム量	沈着量
EUR-AN	13.4	12.2	12.6	19.0
RUS-AN	61.8	9.8	21.0	34.7
EAS-AN ^b	8.0	40.6	27.4	10.1
NAM-AN ^b	3.1	10.4	6.9	4.3
OTH-AN ^b	2.9	10.9	17.0	3.9
SIB-BB ^b	5.2	8.5	7.0	14.7
ALC-BB ^b	5.2	4.3	4.9	12.1
OTH-BB ^b	0.4	3.3	3.2	1.2

^aANとBBはそれぞれ人為起源とバイオマス燃焼起源の発生源であることを示す。

^bEAS-AN (東アジア) は日本 (JPN-AN) と朝鮮半島 (KOR-AN)、中国北部 (CHN-AN)、中国南部 (CHS-AN) の合計。NAM-AN (北米) はアメリカ (NAM-AN) とアラスカ・カナダ (ALC-AN) の合計。OTH-AN (その他の人為起源) はヨーロッパ (EUR-AN) とロシア (RUS-AN)、東アジア (EAS-AN)、北米 (NAM-AN) 以外の人為起源発生源の合計。SIB-BB (シベリアバイオマス燃焼) は、ロシア西部 (WRU-BB) とシベリア6地域 (S1-BB, S2-BB, S3-BB, S4-BB, S5-BB, S6-BB) の合計。ALC-BB (アラスカ・カナダバイオマス燃焼) はアラスカ (ALS-BB) とカナダ西部 (WCA-BB)、カナダ東部 (ECA-BB) の合計。OTH-BB (その他のバイオマス燃焼) はシベリア (SIB-BB) とアラスカ・カナダ (ALC-BB) 以外のバイオマス燃焼起源の発生源の合計。



図(1)-15. 主要な発生源毎のBCの収支を示す。数値の単位はGg/年。四角形の大きさは相対的な量的関係を表す。

北極圏におけるBC沈着量についても各発生源の相対的寄与率を評価した（表(1)-3）。BC沈着量に対して最も寄与が大きいのは、ロシアで34.7%を占める。ヨーロッパが二番目に大きい寄与（19.0%）を持っていた。すなわち、BC沈着量に対する寄与が大きい発生源は、地表でのBC濃度に対する寄与が卓越する発生源と同じであることがわかった。カラム量に対して最も大きい寄与を持つ東アジアは、沈着量に対しての寄与は、10.1%とそれほど大きくない。ロシアとヨーロッパの二つがBC沈着量に対して最も大きい持つ発生源であるという結果は、先行研究と同様である^{22), 23), 27), 28)}。ただし、その一部には本研究と異なり、ロシアよりもヨーロッパの寄与の方が大きいと推定する研究も存在する^{22), 23), 28)}。BC沈着量に対しては、シベリア（SIB-BB）やアラスカ・カナダ（ALC-BB）のバイオマス燃焼起源の発生源も重要であり、それぞれ14.7%と12.1%の寄与を持っている。これらのバイオマス燃焼起源の発生源の沈着量に対する寄与は、地表におけるBC濃度に対する寄与率（約5%）よりも大きくなっている。これは、BCの沈着は降水量の増える夏季に増加するため、夏にはシベリアやアラスカ・カナダのバイオマス燃焼起源のBC濃度に対する寄与が大きくなるためである（図(1)-13）。

5) 東アジアから北極へのBCの長距離輸送イベント

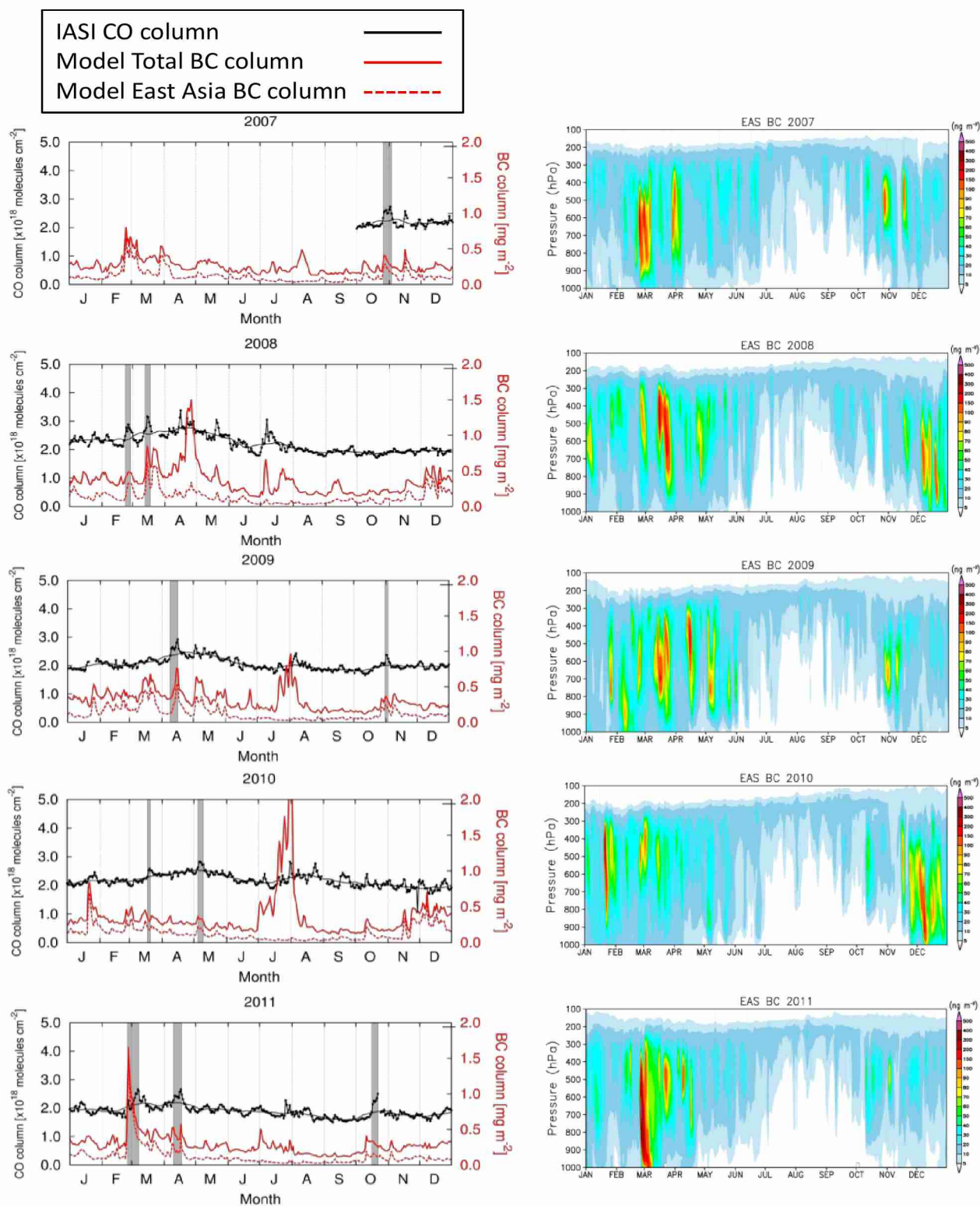
東アジアから北極へのBCの長距離輸送について、季節平均よりも短い時間スケールでの輸送経路や気象場を明らかにするために、2007-2011年の5年間行ったタグ付きBCシミュレーションの日々変動を解析して、個々の輸送イベントについて調べた。まず、東アジアから北極圏への長距離イベントを特定するために、太平洋側の北極圏（160-200°E; 60-80°N）で平均したIASI（Infrared Atmospheric Sounding Interferometer）のCOカラム量の日変動を調べた（図(1)-16）。この領域は、東アジアから北極圏へ輸送される際の入口にあたる地域として、本研究のタグBCシミュレーション（図(1)-10）及び先行研究に基づき設定した。IASIで観測された日平均COカラム量を見ると、平均的な濃度は春季に増加し夏季に減少する季節変化を示し、バックグラウンド値から濃度が上昇するイベントが月に1、2度の頻度で発生していることがわかる（図(1)-16）。

同じ領域で平均したタグ付きシミュレーションによるBCの全カラム量もCOカラム量の上昇と同期して、濃度増加を示している。東アジア起源BCのカラム濃度を見ると、夏季を除く多くの濃度上昇イベントが東アジアからの長距離輸送によって発生していることがわかった。一方、夏季のイベントや一部の春のイベント（2008年4、5月）では、東アジア起源のBCの明確な濃度上昇は見られず、これらのイベントはシベリアやアラスカ・カナダのバイオマス燃焼によって発生していたことが示唆された。本研究では、COカラム量が30日移動平均値より 2×10^{17} molec/cm²以上上昇した期間が3日以上連続して観測され、モデルの東アジア起源BCの増加も見られた期間について、東アジアから北極圏への長距離輸送イベントとして定義した。その結果、2007-2011年の5年間に11の主要なイベントが特定された。季節としては春季に6回、秋季に3回、冬季に2回発生していた。

図(1)-16の右には、東アジア起源BCの日平均濃度の時間-高度分布も示している。東アジアから北極圏への輸送イベント時の濃度上昇は、500 hPa付近を中心に300-800 hPaで多く見られることがわかる。東アジアから北極圏への到達時には中部対流圏から輸送される傾向があり、下部対流圏での濃度上昇はあまり見られないが、2011年3月のイベントのように地表付近を含めて濃度が上昇するケースもあった。

主要な11イベントについて個々のイベントの輸送過程や気象場を調べると、東アジアから北極圏への長距離輸送には、大きく分けて2つの輸送経路とメカニズムがあることがわかった。一つは、中国北部からオホーツク海やシベリア上空を通過して北極海へ到る主に大陸上を輸送される経路（シベリアルート）で、このルートは11回の内6回あった。もう一つは、アジア大陸から太平洋上へ東向きに輸送され、その後北上してベーリング海上を通過して北極海へ到る経路（太平洋ルート）で、残りの5回はこのルートをとることがわかった。

シベリアルートをとるイベントの一つとして、2009年4月10-16日のケースについて、下部対流圏（850 hPa面）及び中部対流圏（500 hPa面）での輸送と地上の気象場を調べた（図(1)-17）。まず、BCは対流圏下層において4月12-14日にかけて、中国北部からオホーツク海へ北東方向に輸送され、高濃度

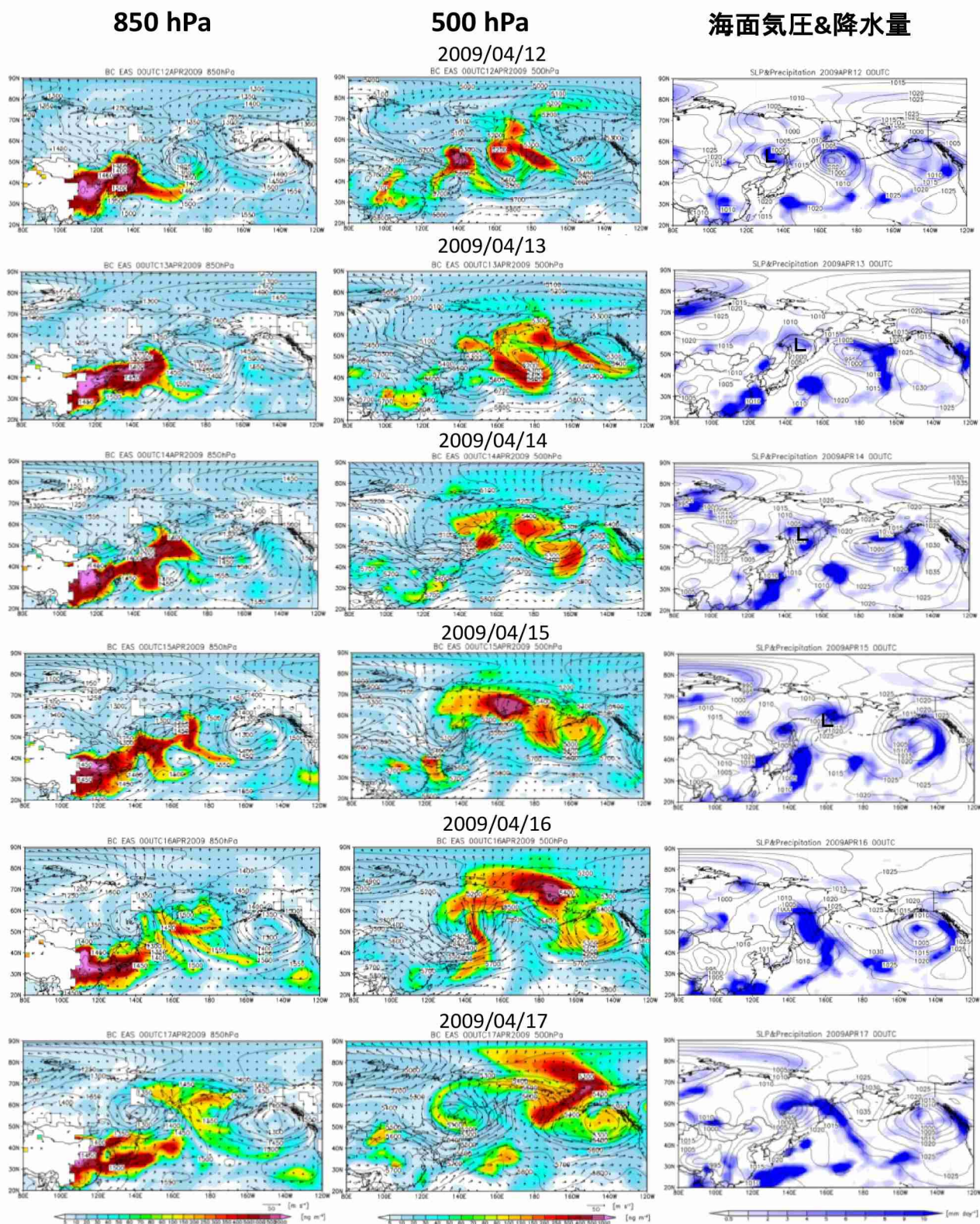


図(1)-16. (左) 太平洋側の北極圏 (160–200°E; 60–80°N) で領域平均したIASIによるCOカラム量の時間変動 (黒実線)。細実線は30日移動平均値を示す。赤実線は同じ領域で平均したGEOS-Chemによる全BCのカラム量、赤点線は東アジア起源BCのカラム量を示す。灰色の影は東アジアから北極へのイベントの期間を示す。(右) 160–200°E、60–80°Nで領域平均したタグBCシミュレーションによる東アジア起源BCの時間-高度分布を示す。

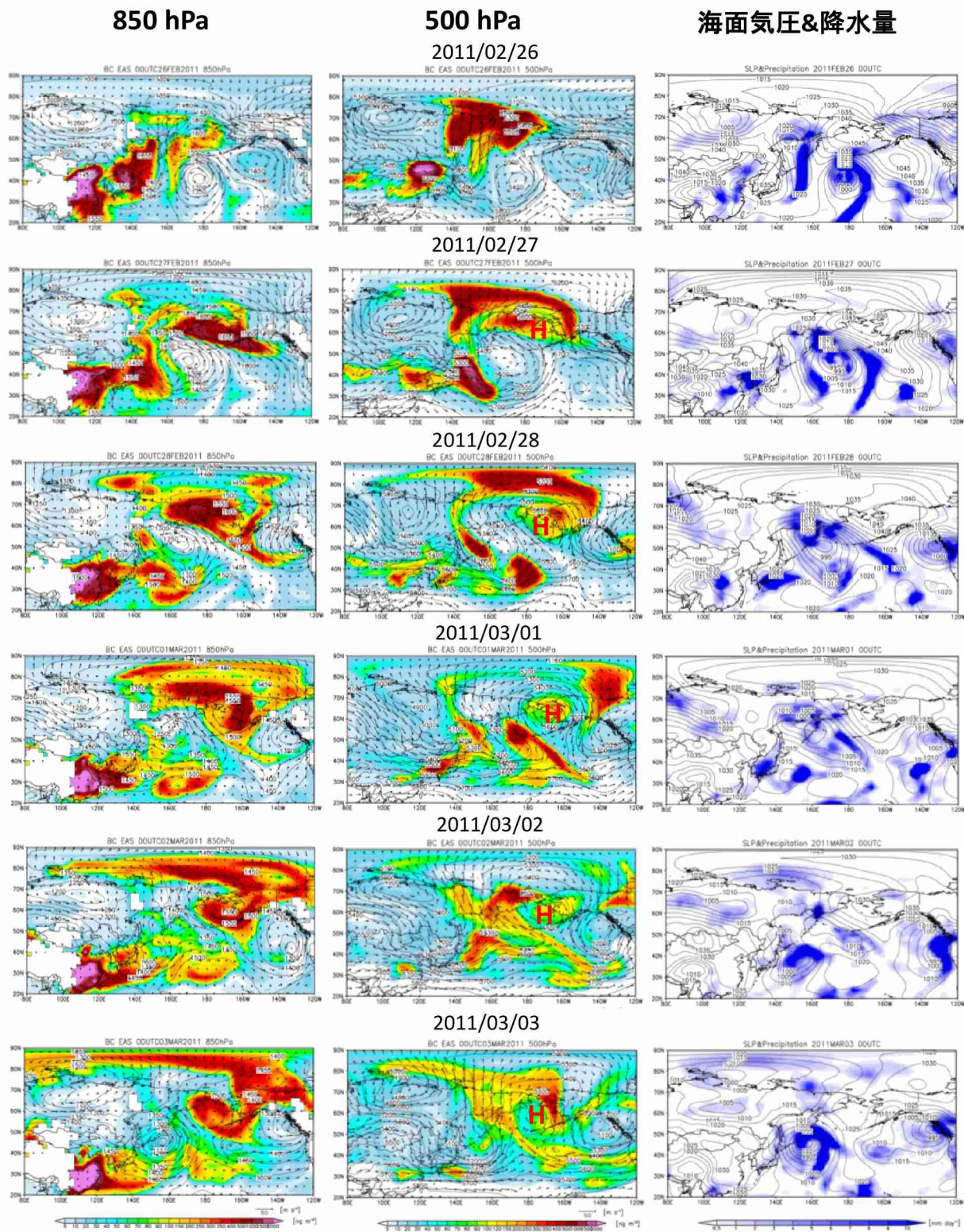
気塊が帯のように広がっていることがわかる。4月12日から15日かけて、低気圧が東シベリア (135°N、55°N) からオホーツク海を通過してカムチャッカ半島の付け根 (160°N、60°N) まで北東方向に進んでおり、対流圏下層での輸送はこの低気圧の南側で吹く北東向きの風によって起こっている。この低気圧

は東アジアにおける典型的な温帯低気圧よりも高緯度の経路をとっており、他のシベリアルートイベントでも同様の経路の低気圧が重要な役割を果たしていた。中部対流圏への上方輸送は、4月14日に北緯55°付近のオホーツク海上で見られ、高濃度気塊は東シベリア上空を北東へ運ばれ、二日後の4月16日には北極圏へ到達する。500 hPa面のジオポテンシャル高度を見ると、東アジア起源のBCは気圧の谷の前面で吹く北東向きの風によって輸送されている。北極圏へ到達後は、北極海上をさらに東向きへ輸送される。東アジアから北極圏までの輸送時間はおよそ5日であった。

次に、太平洋ルートイベントの例として、2011年2月26日-3月3日のケースについて調べた(図(1)-18)。500 hPa面のBCを見ると、2月26日に中国北部(125°E、45°N)にある高濃度気塊は、28日にかけて日本上空を通過してさらに太平洋の中央(180°E、35°N)まで偏西風によって東向きに輸送されている。そこから汚染気塊はおよそ2日かけて太平洋上を北上し、ベーリング海上を通過して3月2日ごろに北極圏に到達する。500 hPa面のジオポテンシャル高度を見ると、2月27日から3月3日までベーリング海付近(190°E、65°N)を中心に高気圧が同じ場所に停滞していることがわかる(ブロッキング高気圧)。このブロッキング高気圧の周りでは、時計回りの高気圧循環が形成され、高気圧の西側では偏西風が分岐して北向きの風が卓越している。東アジアから太平洋上へ運ばれてきた高濃度BC気塊は、この北向きの風によって極向きに輸送されており、ブロッキング高気圧が太平洋ルート長距離輸送イベントに重要な役割を果たしていることがわかった。太平洋ルートの場合も東アジアから北極圏までの輸送時間はおよそ5日であった。



図(1)-17. (左) 850 hPa面における東アジア起源BCの濃度 (色) 及びジオポテンシャル高度 (実線、単位m)、水平風速 (矢印) の水平分布。(中央) 500 hPa面における東アジア起源BCの濃度 (色) 及びジオポテンシャル高度 (実線)、水平風速 (矢印) の水平分布。(右) 海面気圧 (実線、単位hPa)、降水量の水平分布。Lは低気圧の中心を示す。2009年4月12-17日を一日ごとに示す。



図(1)-18. (左) 850 hPa面における東アジア起源BCの濃度 (色) 及びジオポテンシャル高度 (実線、単位m)、水平風速 (矢印) の水平分布。(中央) 500 hPa面における東アジア起源BCの濃度 (色) 及びジオポテンシャル高度 (実線)、水平風速 (矢印) の水平分布。Hは高気圧の中心を示す。(右) 海面気圧 (実線、単位hPa)、降水量の水平分布。2011年2月26-3月3日を一日ごとに示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

世界で最も広く用いられている化学輸送モデルの一つであるGEOS-Chemについて、アジアのBCに特化した改良を独自に行い、タグ付きBCシミュレーションが行えるようにした。これにより、各発生源の寄与の定量的評価が可能となり、北極圏におけるBCに占めるアジアや欧米からの寄与を定量的に評価することが可能になった。また、発生源「領域」に加えて、発生源の「種類」でも区別することで人為起源と自然起源の相対的寄与を評価できるようになり、これも特筆すべき技術的進歩である。この「タグ付き全球化学輸送モデル」を用いて、アジアの人間活動や森林火災から発せられるBCが実際に北極圏へと輸送されることや、地表付近と中上部対流圏とで主要な起源がロシアと東アジアに別れることを見出し、BC濃度と沈着に関して発生源別の寄与や収支を示した。具体的には、北極圏のBCは、地表面ではロシアの人為起源が62%と最大の寄与を占めることを明らかにした。北極圏で沈着するBCに対しても、ロシアの人為起源が35%を占め、最大であった。一方、東アジアの人為起源BCは中部対流圏に運ばれるため、北極圏では地表ではなく高度5 kmで最大の寄与となり41%を占めていた。これにより、東アジアは、中部・上部対流圏のBCに対して最も重要な発生源であることが初めて明らかになった。これらの知見はBCが北極圏の温暖化に及ぼす影響の理解を深めることにつながっている。

東アジア起源BCの寄与は北極圏の地表面付近では大きくないものの、中部・上部対流圏で重要となった。一方、地表面付近で主要なロシアからの寄与は高度5 kmでは大きくなかった。これらの結果は、同じ北極圏でも高度によって、主要な発生源が異なっていることを示唆しており、アジアから運ばれるBCは大気加熱に影響しているものの、積雪や海氷面に沈着して融解を促進することにはあまり影響していないことを意味していた。

今後、本研究で培ったモデリング技術開発を踏まえ、対象SLCPとしてBCだけでなく新たに成分を加える足がかりができたと考えられる。また、アジア排出量推計の精緻化を進めるとともに、削減感度の評価を重点化し社会経済的な分析を加えることで施策へと結び付けてゆく道筋も見えてきた。本研究では、既存の衛星データを用いたが、今後は欧州や日本を含むアジアで最新の衛星観測センサー（TROPOMI, GOSAT-2, GEMS等）が打ち上がるので、こうしたデータを有効活用することにも繋がる。

発生源寄与の解析結果では、オイラー型とラグランジュ型モデルでよく一致し、見積りの信頼度を高めることができた。この結果は、多くの化学輸送モデルが北極圏でのBC濃度を過小評価し、モデル間の差も大きいことが指摘されている国際相互比較実験において、今後大きな貢献が期待できる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

具体的な実績として、環境省を通じて政府による北極政策の策定や議論に多く貢献してきた。

- ・「北極海に係る諸問題に対する関係省庁連絡会議」には、本研究課題の成果や知見、情報の提供を行った。
- ・「北極のフロンティアについて考える議員連盟」においては、環境省による北極研究推進施策として説明された。
- ・課題代表者の谷本とサブ課題代表者の金谷は、政策研究大学院大学「北極圏問題についての我が国の総合戦略研究会」委員を務め、より広く全府省的な政府の施策に貢献した。
- ・本課題は総合海洋政策本部で策定される「我が国の北極政策」に環境省による北極研究推進施策として登録されている。
- ・AMAP BCM Expert GroupにChairのDr. Kaarle Kupiainenより招待され谷本が参加、本研究課題の成果について共有した（2017年6月、カナダ）
- ・外務省・北極担当大使の井出大使への情報提供（北極関係省庁の意見を反映し、我が国の北極に

関するあらゆるステークホルダーズの動きを北極担当大使が掌握するための情報提供依頼に協力した)

- ・ハルコネン・フィンランド北極担当大使への研究成果のブリーフィング (2016年12月)
- ・Future EarthのコアプロジェクトであるIGAC (International Global Atmospheric Chemistry, 国際地球大気化学協同計画) とIASC (International Arctic Science Committee, 国際北極科学委員会)の合同による国際的な北極研究プロジェクトであるPACES (air Pollution in the Arctic: Climate, Environment and Societies, <http://www.igacproject.org/PACES>)において知見をインプットし貢献した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

北極圏のBC濃度に及ぼす地域・国別の寄与率：改良したグローバルモデルにより、北極圏の地表付近では、東アジア（日本と韓国、中国北部・南部）の人為起源排出がトータルBC濃度の約20%を占めるが、ロシアからのBCが30%以上の寄与を占め、最も重要な発生源であることが分かった。一方、自由対流圏では東アジア起源が30-70%の寄与を占め、最も大きな影響を及ぼすことが分かった。これは、自由対流圏における放射強制力（温暖化）と、地表における沈着（氷の溶解）に関して、影響の大きい発生源地域が異なることを示している。また、北極圏全域における沈着量としての寄与は、アジア20%（中国19%）、北米6%、欧州30%、ロシア35%と主要地域がそれぞれ同程度であったが、アジア側北極圏ではアジアからの寄与が卓越しており、今後の環境管理の上で地域性を考慮する必要が示唆された。こうした、北極圏におけるBCの濃度や沈着に世界各地の排出源がそれぞれの程度の寄与率を占めているか、といった知見は、温暖化の緩和策として効果的な削減対策を打つ上で重要であり、北極評議会において日本の環境面での取り組み、国際社会における役割分担の一つとして、今後、強くアピールしていけるものである。

6. 国際共同研究等の状況

Future EarthのコアプロジェクトであるIGAC (International Global Atmospheric Chemistry, 国際地球大気化学協同計画) とIASC (International Arctic Science Committee, 国際北極科学委員会)の合同による国際的な北極研究プロジェクトであるPACES (air Pollution in the Arctic: Climate, Environment and Societies, <http://www.igacproject.org/PACES>)において、課題代表者の谷本浩志が研究推進メンバーとして加わっている（合計12人おりアジアからは一人）。欧州、北米、アジアやロシアから北極への大気汚染の輸送と気候、環境、社会への影響を評価する国際的な大気化学者のチームであり、本課題の目的や成果をインプットするとともに、最新の国際的動向を情報共有し、意見を交換している。また、谷本と、サブ課題代表者の金谷有剛はPACES working group on Observations to Improve Predictive Capabilitiesのメンバーとして、中緯度から北極への長距離輸送の再現性を向上させるための観測計画に関する議論に参加している。主なカウンターパートは、Steve Arnold (University of Leeds, UK), Chuck Brock (NOAA/ESRL/CSD, USA), Kathy Law (LATMOS, France)である。

これまでの成果が査読付き論文として公表された。

Arnold, S. R., K. S. Law, C. A. Brock, J. L. Thomas, S. M. Starkweather, K. von Salzen, A. Stohl, S. Sharma, M. T. Lund, M. G. Flanner, T. Petäjä, H. Tanimoto, J. Gamble, J. E. Dibb, M. Melamed, N. Johnson, M. Fidel, V.-P. Tynkkynen, A. Baklanov, S. Eckhardt, S.A. Monks, J. Browse, H. Bozem, Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2016.

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Inomata, S., H. Tanimoto, X. Pan, F. Taketani, Y. Komazaki, T. Miyakawa, Y. Kanaya, Z. Wang, Laboratory measurements of emission factors of nonmethane volatile organic

- compounds from burning of Chinese crop residues, *J. Geophys. Res.*, 120, 5237–5252, doi:10.1002/2014JD022761, 2015.
- 2) Tanimoto, H., K. Ikeda, K. F. Boersma, R. J. van de A, S. Garivait, Interannual variability of nitrogen oxides emissions from boreal fires in Siberia and Alaska during 1996-2011 as observed from space, *Environ. Res. Lett.*, 10, 065004, doi:10.1088/1748-9326/10/6/065004, 2015.
 - 3) Tanimoto, H., R. M. Zbinden, V. Thouret, and P. Nédélec, Consistency of tropospheric ozone observations made by different platforms and techniques in the global databases, *Tellus B*, 67, 27073, doi: 10.3402/tellusb.v67.27073, 2015.
 - 4) Ikeda, K., and H. Tanimoto, Exceedances of air quality standard level of PM_{2.5} in Japan caused by Siberian wildfires, *Environ. Res. Lett.*, 10, 105001, doi:10.1088/1748-9326/10/10/105001, 2015.
 - 5) Arnold, S. R., K. S. Law, C. A. Brock, J. L. Thomas, S. M. Starkweather, K. von Salzen, A. Stohl, S. Sharma, M. T. Lund, M. G. Flanner, T. Petäjä, H. Tanimoto, J. Gamble, J. E. Dibb, M. Melamed, N. Johnson, M. Fidel, V.-P. Tynkkynen, A. Baklanov, S. Eckhardt, S.A. Monks, J. Browse, H. Bozem, Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 4, 000104, doi: 10.12952/journal.elementa.000104, 2016.
 - 6) Ikeda, K., H. Tanimoto, T. Sugita, H. Akiyoshi, Y. Kanaya, C. Zhu, and F. Taketani, Tagged tracer simulations of black carbon in the Arctic: Transport, source contributions, and budget, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10515–10533, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10515-2017>, 2017.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 池田恒平, 谷本浩志, PM_{2.5}の原因は黄砂以外にも, 地球環境研究センターニュース, 26(9), 201512_301001, 2015.
- 2) 谷本浩志, 「低環環境の科学事典」(河村公隆他編), No. 32 対流圏オゾン, 朝倉書店, 東京, pp. 432, ISBN: 978-4-254-16128-1, 2016.
- 3) 谷本浩志, 環境研究総合推進費の研究紹介「北極のブラックカーボンはどこからどのくらいやってくる?」, 地球環境研究センターニュース, 28(8), 201711_323003, 2017.

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Ikeda, K., H. Tanimoto, H. Nara, H. Mukai, Y. Nojiri, Y. Tohjima, Multi-model comparison of O₃, CO, PM_{2.5}, and BC with cargo ship observations in Asia and Oceania, 7th International GEOS-Chem Meeting, 2015.
- 2) 池田恒平, 谷本浩志, シベリア森林火災が日本のPM_{2.5}汚染に及ぼす影響, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015.
- 3) 原和崇, 谷本浩志, IASI衛星観測データを用いた東アジアから北極域への汚染気塊の輸送解析, 第21回大気化学討論会, 2015.
- 4) 池田恒平, 谷本浩志, 奈良英樹, 向井人史, 野尻幸宏, 遠嶋康徳, 森野悠, 永島達也, 定期貨物船によるアジア・オセアニア域でのO₃, CO, PM_{2.5}, BC観測と全球・領域化学輸送モデルの比較, 第21回大気化学討論会, 2015.
- 5) Ikeda, K., H. Tanimoto, T. Nagashima, H. Nara, H. Mukai., Y. Nojiri, Y. Tohjima, L. K. Emmons, J. Flemming, J. S. Fu, S. Ghude, D. K. Henze, J. E. Jonson, M. T. Lund, R. J. Park, B. R. Pierce, K. Sudo, Multi-model comparison of marine boundary layer ozone in HTAP2 simulations in Asia-Pacific, 2016 IGAC Science Conference, 2016.

- 6) Tanimoto, H., K. Ikeda, S. Okamoto, V. Thouret, L. K. Emmons, S. Tilmes, J.-F. Lamarque, Recent changes in the free tropospheric ozone over East Asian Pacific rim, 2016 IGAC Science Conference, 2016.
- 7) 池田恒平, 谷本浩志, 金谷有剛, 朱春成, 竹谷文一, タグ付きトレーサーモデルを用いた北極域へのブラックカーボン長距離輸送の解析, 第22回大気化学討論会, 2016.
- 8) Ikeda, K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, C. Zhu, and F. Taketani, Model analysis of long-range transport of black carbon to the Arctic with tagged tracer simulation, EGU General Assembly 2017, 2017.
- 9) Ikeda, K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, C. Zhu, and F. Taketani, Model analysis of long-range transport of black carbon to the Arctic with tagged tracer simulation, IGC8, 2017.
- 10) Tanimoto, H., K. Ikeda, S. Okamoto, Y. Kanaya, C. Zhu, F. Taketani, Global simulations of tagged black carbon aerosols: Implications for Asian emissions and long-range transport to the Arctic, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017. (招待講演)
- 11) Tanimoto, H., K. Ikeda, S. Okamoto, T. Sugita, H. Akiyoshi, S. Inomata, Y. Kanaya, C. Zhu, F. Taketani, Export of black carbon and carbon monoxide from Asia: How far can they go?, Third ACAM Workshop, 2017.
- 12) Ikeda, K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, C. Zhu, and F. Taketani, Model analysis of long-range transport of black carbon to the Arctic with tagged tracer simulation, PACES Workshop, 2017 (招待講演)
- 13) Tanimoto, H., K. Ikeda, S. Okamoto, T. Sugita, H. Akiyoshi, S. Inomata, Y. Kanaya, C. Zhu, F. Taketani, Export of black carbon and carbon monoxide from Asia: How far can they go?, PACES Workshop, 2017.
- 14) 池田恒平, 谷本浩志, 杉田考史, 秋吉英治, 東アジアから北極域へのブラックカーボンおよび一酸化炭素の長距離輸送イベントの解析, 第23回大気化学討論会, 2017.
- 15) Tanimoto, H., K. Ikeda, T. Sugita, H. Akiyoshi, Y. Kanaya, C. Zhu, F. Taketani, Model analysis of long-range transport of black carbon and carbon monoxide from Asia to the Arctic, American Geophysical Union Fall Meeting, 2017.
- 16) 【予定】Ikeda, K., H. Tanimoto, T. Sugita, H. Akiyoshi, Long-range transport of carbon monoxide and black carbon from East Asia to the Arctic, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 2018.
- 17) 【予定】Ikeda, K., H. Tanimoto, T. Sugita, H. Akiyoshi, Y. Kanaya, C. Zhu, F. Taketani, Impacts of East Asian black carbon emissions on the Arctic climate and air quality: Contributions from anthropogenic and biomass burning sources, 2018 joint iCACGP Quadrennial Symposium/IGAC Science Conference 2018, 2018.

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 国立環境研究所公開シンポジウム「私たちの安心・安全な環境づくりとは—持続可能性とその課題」(主催: 国立環境研究所、2017年6月16日・びわ湖ホール、2017年6月23日・メルパルクホール)にてポスター発表。「北極域のブラックカーボンはどこから運ばれるのか?」
- 2) 国立環境研究所・春の環境講座(科学技術週間に伴う一般公開)(主催: 国立環境研究所、2018年4月21日・国立環境研究所本部キャンパス)にて成果展示。「北極域では今」

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表（2015年11月20日、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ同時配付、「シベリアの森林火災によるPM2.5環境基準濃度レベルの超過について」。国立環境研究所プレスリリース：<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2015/20151120/20151120.html>）
- 2) 成果の記者発表（2017年9月25日、筑波研究学園都市記者会、環境省記者クラブ同時配付、「北極に運ばれるブラックカーボンはどこからくる？～地上ではロシアから、上空ではアジアからが多いことが判明～」。国立環境研究所プレスリリース：<http://www.nies.go.jp/whatsnew/20170925/20170925.html>）
- 3) 読売新聞（夕刊）（2017年10月13日、全国版、第3面に「温暖化物質 東アジア発 北極圏上空に4割飛来」記事掲載）
- 4) JSTサイエンスクリップ（2017年11月21日。「温暖化の原因物質「ブラックカーボン」の起源を独自のシステムで調査」http://scienceportal.jst.go.jp/clip/20171121_01.html）

(6) その他

- 1) 谷本浩志，日本地球惑星科学連合第2回地球惑星科学振興西田賞，「対流圏オゾンおよび海洋性硫酸エアロゾルの生成過程の研究」，2017年5月22日，幕張。

8. 引用文献

- 1) Bey, I., Jacob, D. J., Yantosca, R. M., et al.: Global modelling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation, *J. Geophys. Res.*, 106, 23073-23095, 2001.
- 2) Shindell, D. T., Chin, M., Dentener, F., Doherty, R. M., Faluvegi, G., Fiore, A. M., Hess, P., Koch, D. M., MacKenzie, I. A., Sanderson, M. G., Schultz, M. G., Schulz, M., Stevenson, D. S., Teich, H., Textor, C., Wild, O., Bergmann, D. J., Bey, I., Bian, H., Cuvelier, C., Duncan, B. N., Folberth, G., Horowitz, L. W., Jonson, J., Kaminski, J. W., Marmer, E., Park, R., Pringle, K. J., Schroeder, S., Szopa, S., Takemura, T., Zeng, G., Keating, T. J., and Zuber, A.: A multi-model assessment of pollution transport to the Arctic, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 5353-5372, doi:10.5194/acp-8-5353-2008, 2008.
- 3) Eckhardt, S., Quennehen, B., Olivié, D. J. L., Berntsen, T. K., Cherian, R., Christensen, J. H., Collins, W., Crepinsek, S., Daskalakis, N., Flanner, M., Herber, A., Heyes, C., Hodnebrog, Ø., Huang, L., Kanakidou, M., Klimont, Z., Langner, J., Law, K. S., Lund, M. T., Mahmood, R., Massling, A., Myriokefalitakis, S., Nielsen, I. E., Nøjgaard, J. K., Quaas, J., Quinn, P. K., Raut, J.-C., Rumbold, S. T., Schulz, M., Sharma, S., Skeie, R. B., Skov, H., Uttal, T., von Salzen, K., and Stohl, A.: Current model capabilities for simulating black carbon and sulfate concentrations in the Arctic atmosphere: a multi-model evaluation using a comprehensive measurement data set, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 9413-9433, doi:10.5194/acp-15-9413-2015, 2015.
- 4) van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, M. Mu, P. S. Kasibhatla, D. C. Morton, R. S. DeFries, Y. Jin, and T. T. van Leeuwen: Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009), *Atmos. Chem. Phys.*, 10(23), 11,707-11,735, doi:10.5194/acp-10-11707-2010, 2010.
- 5) Bond, T. C., Bhardwaj, E., Dong, R., Jogani, R., Jung, S. K., Roden, C., Streets, D. G., and Trautmann, N. M.: Historical emissions of black and organic carbon aerosol

- from energy-related combustion, 1850-2000, *Glob. Biogeochem. Cy.*, 21, Gb2018, doi:10.1029/2006GB002840, 2007.
- 6) Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Dentener, F., Muntean, M., Pouliot, G., Keating, T., Zhang, Q., Kurokawa, J., Wankmüller, R., Denier van der Gon, H., Kuenen, J. J. P., Klimont, Z., Frost, G., Darras, S., Koffi, B., and Li, M.: HTAP_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 11411-11432, doi:10.5194/acp-15-11411-2015, 2015.
 - 7) Kurokawa, J., Ohara, T., Morikawa, T., Hanayama, S., Janssens-Maenhout, G., Fukui, T., Kawashima, K., and Akimoto, H.: Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11019-11058, doi:10.5194/acp-13-11019-2013, 2013.
 - 8) Huang, K., J. S. Fu, V. Y. Prikhodko, J. M. Storey, A. Romanov, E. L. Hodson, J. Cresko, I. Morozova, Y. Ignatieva, and J. Cabaniss: Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 11,306-11,333, doi:10.1002/2015JD023358, 2015.
 - 9) Park, R. J., Jacob, D. J., Palmer, P. I., Clarke, A. D., Weber, R. J., Zondlo, M. A., Eisele, F. L., Bandy, A. R., Thornton, D. C., Sachse, G.W., and Bond, T. C.: Export efficiency of black carbon aerosol in continental outflow: Global implications, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 110, D11205, doi:10.1029/2004JD005432, 2005.
 - 10) Liu, J. F., Fan, S. M., Horowitz, L. W., and Levy, H.: Evaluation of factors controlling long-range transport of black carbon to the Arctic, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 116, D04307, doi:10.1029/2010jd015145, 2011.
 - 11) Wang, Q., Jacob, D. J., Fisher, J. A., Mao, J., Leibensperger, E. M., Carouge, C. C., Le Sager, P., Kondo, Y., Jimenez, J. L., Cubison, M. J., and Doherty, S. J.: Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: implications for radiative forcing, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12453-12473, doi:10.5194/acp-11-12453-2011, 2011.
 - 12) Kärcher, B., Möhler, O., DeMott, P. J., Pechtl, S., and Yu, F.: Insights into the role of soot aerosols in cirrus cloud formation, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4203-4227, doi:10.5194/acp-7-4203-2007, 2007.
 - 13) Stohl, A.: Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 111, D11306, doi:10.1029/2005JD006888, 2006.
 - 14) Hirdman, D., Sodemann, H., Eckhardt, S., Burkhardt, J. F., Jefferson, A., Mefford, T., Quinn, P. K., Sharma, S., Ström, J., and Stohl, A.: Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 669-693, doi:10.5194/acp-10-669-2010, 2010.
 - 15) Di Pierro, M., Jaeglé, L., and Anderson, T. L.: Satellite observations of aerosol transport from East Asia to the Arctic: Three case studies, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2225-2243, doi:10.5194/acp-11-2225-2011, 2011.
 - 16) Klonecki, A., Hess, P., Emmons, L., Smith, L., Orlando, J., and Blake, D.: Seasonal changes in the transport of pollutants into the Arctic troposphere-model study, *J. Geophys. Res.*, 108(D4), 8367, doi:10.1029/2002JD002199, 2003.
 - 17) Barrie, L. A.: Arctic air pollution: An overview of current knowledge, *Atmos. Environ.*, 20, 643-663, doi:10.1016/0004-6981(86)90180-0, 1986.

- 18) Matsui, H., Kondo, Y., Moteki, N., Takegawa, N., Sahu, L. K., Zhao, Y., Fuelberg, H. E., Sessions, W. R., Diskin, G., Blake, D. R., Wisthaler, A., and Koike, M.: Seasonal variation of the transport of black carbon aerosol from the Asian continent to the Arctic during the ARCTAS aircraft campaign, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 116, D05202, doi:10.1029/2010JD015067, 2011.
- 19) Lee, Y. H., Lamarque, J.-F., Flanner, M. G., Jiao, C., Shindell, D. T., Berntsen, T., Bisiaux, M. M., Cao, J., Collins, W. J., Curran, M., Edwards, R., Faluvegi, G., Ghan, S., Horowitz, L. W., McConnell, J. R., Ming, J., Myhre, G., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S. T., Skeie, R. B., Sudo, K., Takemura, T., Thevenon, F., Xu, B., and Yoon, J.-H.: Evaluation of preindustrial to present-day black carbon and its albedo forcing from Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP), *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 2607-2634, doi:10.5194/acp-13-2607-2013, 2013.
- 20) Koch, D. and Hansen, J.: Distant origins of Arctic black carbon: A Goddard Institute for Space Studies ModelE experiment, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 110, D04204, doi:10.1029/2004JD005296, 2005.
- 21) Mahmood, R., von Salzen, K., Flanner, M., Sand, M., Langner, J., Wang, H., and Huang, L.: Seasonality of global and Arctic black carbon processes in the Arctic Monitoring and Assessment Programme models, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 121, 7100-7116, doi:10.1002/2016JD024849, 2016.
- 22) Sharma, S., Ishizawa, M., Chan, D., Lavoue, D., Andrews, E., Eleftheriadis, K., and Maksyutov, S.: 16-year simulation of Arctic black carbon: Transport, source contribution, and sensitivity analysis on deposition, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 118, 943-964, doi:10.1029/2012jd017774, 2013.
- 23) Wang, H. L., Rasch, P. J., Easter, R. C., Singh, B., Zhang, R. D., Ma, P. L., Qian, Y., Ghan, S. J., and Beagley, N.: Using an explicit emission tagging method in global modeling of source-receptor relationships for black carbon in the Arctic: Variations, sources, and transport pathways, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 119, 12888-12909, doi:10.1002/2014jd022297, 2014.
- 24) Stohl, A., Z. Klimont, S. Eckhardt, K. Kupiainen, V. P. Shevchenko, V. M. Kopeikin, and A. N. Novigatsky: Black carbon in the Arctic: The underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 13(17), 8833-8855, doi:10.5194/acp-13-8833-2013, 2013.
- 25) Flanner, M. G.: Arctic climate sensitivity to local black carbon, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 118, 1840-1851, doi:10.1002/jgrd.50176, 2013.
- 26) AMAP: AMAP Assessment 2015: Black Carbon and Ozone as Arctic Climate Forcers, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, vii + 116 pp, 2015.
- 27) Bourgeois, Q., and Bey, I.: Pollution transport efficiency toward the Arctic: Sensitivity to aerosol scavenging and source regions, *J. Geophys. Res.*, 116, D08213, doi:10.1029/2010JD015096, 2011.
- 28) Huang, L., Gong, S. L., Jia, C. Q., and Lavoue, D.: Importance of deposition processes in simulating the seasonality of the Arctic black carbon aerosol, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 115, D17207, doi:10.1029/2009JD013478, 2010.

II-2 自然起源発生源からの北極へのSLCP輸送経路と影響の解析

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球環境観測研究開発センター

金谷有剛・小林秀樹・朱春茂

齋藤正彦（平成28年度まで）

平成27～29年度累計予算額：38,565千円（うち平成29年度：11,970千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

北方ユーラシア林野火災が北極圏の環境・気候に与える影響を明らかにするため、火災による焼失面積データを検証して、焼失面積の時空間分布や要因を解析し、火災から排出される短寿命気候汚染物質（SLCPs）が北極圏へ輸送されるメカニズムやその寄与を明らかにした。高解像度衛星Landsat 7 ETM+（解像度30 m）及び超高解像度（解像度2-5 m程度）の商用衛星（RapidEye、WorldView-2、GeoEye-1）を用いて全球火災焼失面積データMODIS MCD64A1（解像度500 m）を検証したところ、MCD64A1では100 ha以下の小規模火災の検出能が低く、農地では真値の焼失面積の13%しか検出できず残りの87%は未評価であること、森林を含む全検証地域では、従来の焼失面積を16%程度上方修正する必要があることを初めて明らかにした。火災が発生しやすい6地域（ロシア南西部、カザフスタン、シベリア東部、極東地域等）の林野火災の要因を分析し、焼失面積が、降水や渇水指数（PDSI）と負の相関を、雪解け日と負の相関を示すことを明らかにした。ラグランジュ型大気輸送モデルFlexpartを用いた、東シベリア林野火災からアラスカ・北極方面へ汚染物質が輸送される経路の解析から、北極海上で発達した低気圧へ向かって流入するメカニズムや、シベリア高気圧の縁を回り込み北極海上へ輸送されるメカニズムを明らかにした。2010年について、北極圏に流入するBCの起源地域を、Flexpartによるフットプリント解析と排出インベントリを組み合わせて定量的に解析し、地表付近BCの56%はロシアの人為起源に、上空5000 m付近のBCの40%は東アジアの人為起源に由来していることを示した。また、6-8月に林野火災は北極圏地表付近BCに対し56-86%の寄与を持つことを明らかにした。これらの寄与率は、サブテーマ(1)においてオイラー型モデルから算出した値とよく一致し、北極圏のBC発生源寄与と評価の信頼性を高めることができた。長崎県福江島の現場観測に基づいて推計した日本のBC排出量（0.027Tg y⁻¹）は排出インベントリREASv2の値（0.026 Tg y⁻¹）とよく一致した。一方、REASv2による韓国および中国中東部のBC/CO排出量比はそれぞれ2.8倍、1.3倍過大評価していることを示した。

[キーワード]

林野火災、焼失面積、ラグランジュ型大気輸送モデル、ブラックカーボン、北極

1. はじめに

北極圏の急速な気候・環境変動は、わが国がオブザーバー国として参加している北極評議会など国際協議体での大きな関心事となっており、科学的なメカニズムの理解は急務である。その中で、ブラックカーボン(BC)などの地球温暖化を促す短寿命気候汚染物質（Short-Lived Climate Pollutants, SLCPs）の動態や影響についても解明が求められている。林野火災はBCの主要発生源の1つと考えられ、全球排出量への寄与率は約3割ともいわれるが、人為起源との相対的な寄与割合は不確かである。また、地球温暖化とともに、今後、林野火災の発生頻度が増すことがIPCC第5次評価報告書などで指摘されており、林野火災と地球温暖化との間の正のフィードバック効果によって、気候や環境への影響がより顕著となることも指摘されている。たとえば北方ユーラシアでは、温暖化後に伴い21世紀末に林野火災からのBC排出量は6～10倍に達する可能性もある¹⁾。そのため、北方ユーラシアの林野火災およびSLCPs排出の実態やその変動要因、北極圏への輸送のメカニズムを明らかにして、現状の分析と将来予測の精度を高めることが必要である。

2. 研究開発目的

北方ユーラシア林野火災から大気中に放出された大気汚染物質が北極の環境と気候へ与える影響について科学的理解を向上させるために、焼失面積とその年々変動、物質輸送のメカニズムや寄与率を明らかにすることを本課題の全体目標とした。第一に、北方林野火災からの排出量を規定する「火災の焼失面積」を精密評価することを目的とした。これまで林野火災からの排出量把握の基本となってきたのは、米国NASAの中解像度MODIS衛星センサによる全球火災焼失面積データ (MCD64A1) であり、大気汚染物質の排出量データベースGFED (Global Fire Emissions Database)もこうした焼失面積データに基づいて整備され、地球温暖化モデルシミュレーションなどにも取り入れられるのが一般的だった。しかしながら解像度が500 mと粗いため、小規模火災を見落とししている可能性が指摘されてきたが未検証のままだった。そこで商用衛星等の高解像度衛星に基づいてMCD64A1焼失面積を検証評価することを目的とした。第二に、MCD64A1焼失面積の時空間変動（とくに年々変動）を解析し、気象要素、植生指数や気候インデックスとの関係を把握することを目的とした。第三に、ラグランジアン大気輸送モデル Flexpartを用いて、北極への長距離輸送とその経路・メカニズムを解析し、排出量分布と合わせて定量的に汚染物質の動態を明らかにし、サブテーマ(1)におけるオイラー型モデルとの比較を行うことを目的とした。最後に、現場観測データを用いて日本やアジア地域からのBC排出量を見積り、北極評議会へ報告するボトムアップ型の排出量を評価検証することを目的とした。

3. 研究開発方法

(1) 林野火災排出データベースGFEDv4で用いられている焼失面積の検証

グローバル林野火災排出データベース (GFEDv4) で用いられている火災焼失面積データを解像度の高い衛星データ等を利用して検証した。大気化学輸送モデルのインプットデータとして広く用いられるGFEDv4では、焼失面積データとしてTerra/Aqua衛星搭載のMODISセンサによる焼失面積プロダクトMCD64A1 (解像度500 m) を用いており、その解像度よりも小規模な火災を見落とししている可能性などが指摘されるが、これまで不確かさは十分に把握されてこなかった。

焼失面積の検証サイトとしては、2012年に発生した火災の前後で晴天視野画像が得られた、西ロシア・カザフスタンから東シベリアまで6種の植生タイプ (農地 (耕作地)、(イネ科) 草原、混合林、落葉針葉樹林地、荒地 (灌木草原)) に分類される計12エリアを選定した (図(2)-1のa~l、表(2)-1)。それらの地域で、解像度が十分に高いLandsat 7 ETM+ (解像度30 m) および商用衛星のデータ (Worldview-2: 同2 m, Rapideye: 同6.5 m, Geoeye: 同1.6 m) を入手して真値を推定し、MCD64A1を検証した。MCD64A1焼失面積データ (Collection 5.1) は、University of Marylandより入手した (<ftp://fuoco.geog.umd.edu/db/MCD64A1>)。Landsat 7 ETM+ surface reflectance 参照画像は United States Geological Survey より入手した (<http://earthexplorer.usgs.gov>)。一枚のLandsat 7 ETM+ surface reflectance 参照画像の面積は31,110 km² (170 km N-S, 183 km E-W) だった。また、入手した二組のRapidEye 参照画像の面積は500 km² (図(2)-1のi) と1032 km² (同j) だった。また、シベリア中央部GeoEye-1 (同k、面積は約125 km²) 画像一組、シベリア東部のWorldView-2 (同l、約113 km²) 画像一組を参照した。全ての商用衛星のデータは宇宙技術開発株式会社より入手した。高解像度画像に対する焼失面積の算出にはOliva and Schroeder (2015)²⁾のアルゴリズムおよび植生タイプ毎の最適閾値を適用した (表(2)-2)。商用衛星の場合は、火災前後の植生指数 (NDVI) の変化を加え、Oliva and Schroeder (2015)²⁾のアルゴリズムを修正して焼失面積を計算した。

MCD64A1の評価指標としては、火災検出率 (参照データの火災発生数・面積のうちMCD64A1で検出できた割合)、コミッションエラー (commission error, 火災が発生していないにもかかわらずMCD64A1で焼失域と推定された割合) やオMISSIONエラー (omission error, MCD64A1で正しく焼失域と推定できなかった割合) を用いた (図(2)-2)。また、これらの2種のエラーについては、参照データとMCD64A1で一部でも重なりが見られた場合 (related) とそうでない場合 (independent) に分類して結果を示すこととした。

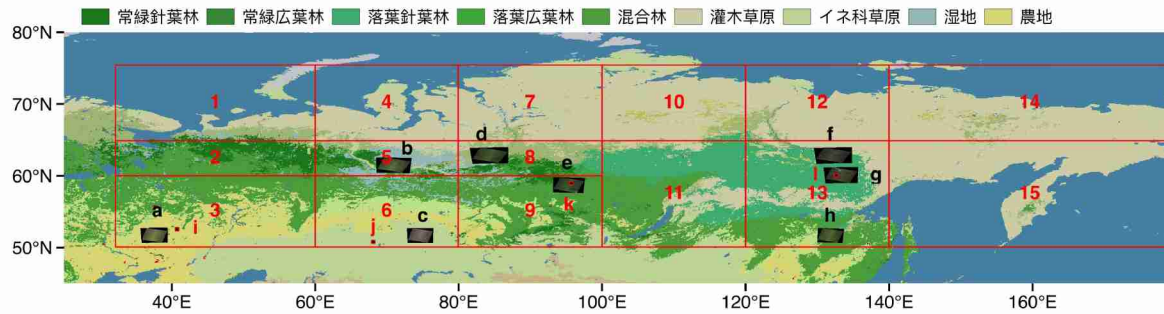


図 (2)-1. MODISの植生タイプを考慮して区分した北方ユーラシアサブ地域（計15地域、赤文字）及びMCD64A1データプロダクト検証サイト（計12エリア、a~l）の分布。検証エリア番号a-hでは、Landsat 7 ETM+を焼失域精度検証データとして利用した。検証エリア番号i-lでは、高解像度商用衛星を入手して精度検証を実施した。

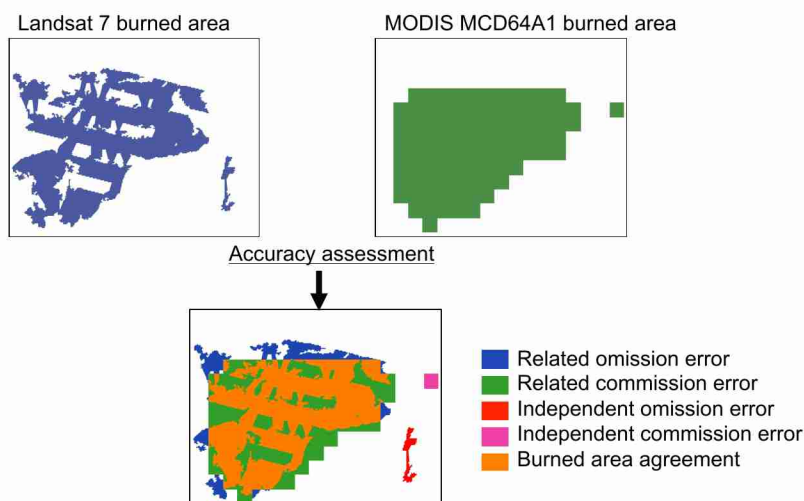
表 (2)-1. MCD64A1焼失面積検証に用いられた参照衛星画像の基本情報、対応地域の植生タイプ、火災前後画像の撮影日及び対応するMODISタイル。

id	植生タイプ	地域	参照衛星センサ	解像度(m)	規模(km ²)*	Path/Row	火災前撮影日	火災後撮影日	火災前後期間	MODIS タイル
a	農地	ロシア南西部	Landsat 7 ETM+	30	31,110	177/24	7/14/12	7/30/12	16	h20v03
i	農地	ロシア南西部	RapidEye	5	500	-	7/10/12	7/30/12	20	h20v03
c	草地	カザフスタン	Landsat 7 ETM+	30	31,110	153/24	6/20/12	8/7/12	48	h22v03
j	草地	カザフスタン	RapidEye	5	1032	-	5/19/12	7/14/12	56	h22v03
e	混合林	シベリア中央部	Landsat 7 ETM+	30	31,110	142/19	6/7/12	8/26/12	80	h22v03, h23v03
h	混合林	シベリア南西部	Landsat 7 ETM+	30	31,110	116/24	6/1/12	8/20/12	80	h25v03, h26v03
k	混合林	シベリア中央部	GeoEye-1	2	125	-	7/23/12	8/25/12	33	h22v03
g	落葉針葉林	シベリア東部	Landsat 7 ETM+	30	31,110	120/16	6/13/12	9/17/12	96	h23v02, h24v02
f	落葉針葉林	シベリア東部	Landsat 7 ETM+	30	31,110	118/18	5/30/12	9/3/12	96	h24v02, h24v03
l	落葉針葉林	シベリア東部	WorldView-2	2	113	-	6/4/12	9/2/12	90	h24v02, h24v03
b	湿地	シベリア西部	Landsat 7 ETM+	30	31,110	159/17	6/30/12	7/16/12	16	h21v02
d	荒地	シベリア西部	Landsat 7 ETM+	30	31,110	151/16	6/6/12	8/25/12	80	h21v02, h22v02

*Landsat 7 ETM+ 画像の規模は概ね南北方向に 170 km と東西方向に 183 km の大きさを評価した。

表(2)-2. 高解像度衛星画像で焼失面積真値を算出するために用いた植生タイプ毎の最適閾値。

id	地域	参照衛星センサ	Water mask	NIR post <	dNIR >	dNBR <	dNDVI <
a	農地	Landsat 7 ETM+	0.050	0.10	0.05	0.2	-
i	農地	RapidEye	0.050	0.10	0.05	-	0.400
c	草地	Landsat 7 ETM+	0.030	0.15	0.01	0.2	-
j	草地	RapidEye	0.050	0.15	0.01	-	0.120
e	混合林	Landsat 7 ETM+	0.030	0.12	0.05	0.2	-
h	混合林	Landsat 7 ETM+	0.030	0.15	0.01	0.2	-
k	混合林	GeoEye-1	0.030	0.12	0.05	-	0.100
g	落葉針葉林	Landsat 7 ETM+	0.030	0.10	0.05	0.2	-
f	落葉針葉林	Landsat 7 ETM+	0.030	0.14	0.03	0.2	-
l	落葉針葉林	WorldView-2	0.002	0.02	0.03	-	0.286
b	湿地	Landsat 7 ETM+	0.030	0.10	0.05	0.2	-
d	荒地	Landsat 7 ETM+	0.030	0.10	0.05	0.2	-



図(2)-2. Landsat 7 などの高解像度衛星を用いた、MODIS MCD64A1データプロダクトの検証手法の概念図。図(2)-1のeエリアの一部に関する解析の実例。

(2) 北方ユーラシア林野火災の時空間変動及び要因解析

次に、シベリア林野火災の年々変動の傾向や要因を解析するため、植生タイプや高低気圧パターンを参考に、まず北方ユーラシア地域全体(50-75°N, 30-180°E)を15のサブ地域に区別した(図(2)-1、赤文字1-15)。GFEDv4で用いられている焼失面積のMCD64A1を全球的にマッピングし、2005~2014年北方ユーラシア地域それぞれのサブ地域レベルでの焼失面積の時空間変動を解析した。その上で、各サブ地域の焼失面積と気象要素や気候インデックスの変動との間の相関関係を調べた。気象要素としては気温、降水、渇水指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、気候インデックスとしてONI、NINO.3海面水温値(El Niñoの指標)、Pacific Decadal Oscillation (PDO)、Arctic Oscillation (AO)、North Pacific Index (NPI)を使用し、主に2005~2014年の夏期に関する年々変動を解析した。気温、降水やPDSIはUniversity of East Angliaの再解析データ(CRU TS3.24、解像度0.5°)を用いた。気候

インデックスはNOAAのデータを用いた。また、焼失面積と雪解け日の関係を調べた。雪解け日はNOAA Northern Hemisphere Snow Cover Extentのデータを用いた。この解析では林野火災の焼失面積のデータとしてGFEDv4を用いたが、その相対的な時間変動に関する不確かさの程度を把握するために、異なるデータベースFINN (Fire INventory from NCAR)で報告されている値と比較した。FINNでは、GFEDv4と異なり、焼失面積の算出に、衛星観測によるホットスポット（高温点）の情報を用いている。

また、森林生態系変動の視点から、大規模森林火災発生前後の地表面状態、特に森林植生の生育条件と火災発生の関係に対応づけるための衛星データ解析を行った。本解析にはSPOT-VEGETATION衛星の10日間コンポジットデータ(S10)を利用した。本研究では、正規化植生指数 ($NDVI = (\text{近赤外} - \text{赤}) / (\text{近赤外} + \text{赤})$) と正規化水分状態指数 ($NDWI = (\text{近赤外} - \text{中間赤外}) / (\text{近赤外} + \text{中間赤外})$) を用いて、雪解け後から初秋（8月下旬）に至るまでの植生変化の特徴を、大規模火災発生前と火災の発生しなかった年で比較した。まず、ロシア・ヤクーツク近郊 (60–65°N, 130–135°E) を対象地域とし、この地域で大規模火災が発生した2012年と火災が発生しなかった2013年を比較した。そして、2005～2014年北方ユーラシア各サブ地域で焼失面積とNDVI及びNDWIの相関関係を調べた。

(3) 北方ユーラシア林野火災発生源によるSLCPsの北極への長距離輸送の解析

大規模な北方ユーラシア林野火災から排出された大気物質が北極方面へ長距離輸送される経路や、北極圏におけるBCの発生源を評価するために、ラグランジュ型粒子拡散モデルであるFLEXPART version 9.0.2 (FLEXible PARTicle dispersion model, <https://www.flexpart.eu/>) を整備して用いた。入力気象データには全球再解析データであるFNL (NCEP Final, <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>) を用いた。

まず、北極の海氷面積が最小を記録した2012年の夏季を対象に、東シベリア・ヤクーツク近郊の林野火災からアラスカ・北極方面へ汚染物質が輸送された経路やメカニズムをForward計算から解析した。粒子の放出位置は、GFED4sのCO排出量分布を参考に60° N, 130° Eとし、地上から1 kmまでの高度範囲から、一カ月間、ランダムに粒子70万個を放出するように設定した。

次にBackward計算により、北極圏に影響をもたらした発生源や輸送メカニズムについて解析した。まず、船舶観測で認められたBC濃度上昇の要因を解析した。2016年8–10月に、海洋研究開発機構の海洋地球観測船「みらい」を用いた北極航海MR16-06が実施され、海洋大気中のBC濃度が高感度で測定された。「みらい」は八戸を起点とし、北太平洋・ベーリング海を経て、9月2–19日の間、北極海での観測を行ったのち、10月5日にむつに入港した。この間の航跡に沿って、FLEXPARTのBackward計算を用いたフットプリント解析を行った。北極海上でのBC平均濃度は過去の年の観測も含め、0.8–1.0 ng m⁻³であったが、9月7日0–3時 (UTC) に平均8.9 ng m⁻³ (0–23時 (UTC) を平均すると5.3 ng m⁻³) のBC濃度上昇が観測された。また、9月17日にも同程度の濃度上昇がみられ、これらの事例について重点的に解析した。9月7日のイベントについては、7日0時– 8日0時 (UTC) の期間に、71.5–71.7° N, 152–155° Wの地域、高さ1000 mから粒子を放出し、Backward計算を行ってフットプリントを計算した。8月28日から9月7日合計10日間で、地表から高さ2000 mまでの範囲での粒子滞在時間 (s) を計算した。また、発生源としての林野火災の評価には、同時期に得られた、解像度375 mのVIIRS衛星によるHot Spotデータを用いた。また気象庁の北半球地上天気図ASXNを使って、発生地域から汚染物質の輸送経路やメカニズムを解析した。

次に、Backward計算によるフットプリント解析とインベントリとを組み合わせた、定量的な発生源解析を進めた。まず、予備計算として、2010年8月に北極の広域からの発生源解析を行った。この場合、70万個の粒子を一カ月間に亘り放出し追跡した。粒子放出エリア（後方計算のためレセプターエリアとなる）は、65–75°Nと75–90°Nの2エリアを、東西方向に東経0°から10°刻みで36分割した合計72エリアとして計算を行ったが、ここでは40–50°E, 65–75°Nの範囲を放出エリアとした結果について議論する（後述の図(2)-15, ピンク色の線で囲まれた領域）。その上で、最新のFlexpart version 10.1^{3,4)}を利用した計算を行った。ECMWFのERA-Interim 気象データ（空間解像度1° × 1°、時間分解能3時間、垂直方向61層）を利用するためにコードの開発と修正に取り組み、逆 (Backward) 方向の計算で雲内洗浄と

雲底下洗浄を区別しながら、BCの湿性除去を表現できるようにした（JAMSTEC・滝川雅之博士から全面的なサポートをいただいた）。Flexpart v10による計算から得られたフットプリントに、林野火災や人為起源発生源インベントリをかけて、2010年各月北極圏に到達したBCなどの汚染物質の発源地域と寄与率を算定した。その際、発源地域の区別はサブテーマ(1)での計算と同じように設定し、モデル間でBCの発生源寄与評価を比較できるようにした。北極圏地表付近のBCの発生源を計算するため、66° N以北の地域で地上から500 mまでの高度範囲から毎月一カ月間ランダムにBC粒子100万個を放出するように設定した。そこから60日間Backward計算を実行し、各グリッドでBCの滞在時間 (s) を見出した。この場合はBCの最大大気寿命を20日間に設定した。また、北極圏上空5000 mにおけるBCの発生源を解析するための計算では、4750-5250 mの高度範囲から一カ月間ランダムにBC粒子100万個を放出する設定を用いた。林野火災および人為起源発生源インベントリには、サブテーマ(1)での計算と同様に、それぞれGFED3とHTAP2を用いた。また、ロシア地域ではgas flaringからのBC排出量がHTAP2と比較して約2.5倍大きいことが報告されているため、ロシア地域の人為起源BC排出量のみ、最新のインベントリに置き換えた⁵⁾。なお、北極地域の計算を行う前に、中国大陸からの吹き出しの影響を受ける長崎県・福江島(32.75°N, 128.68°E)でのBCシミュレーションを行い、観測データと比較することで、排出量やフットプリント解析の妥当性を検証した。

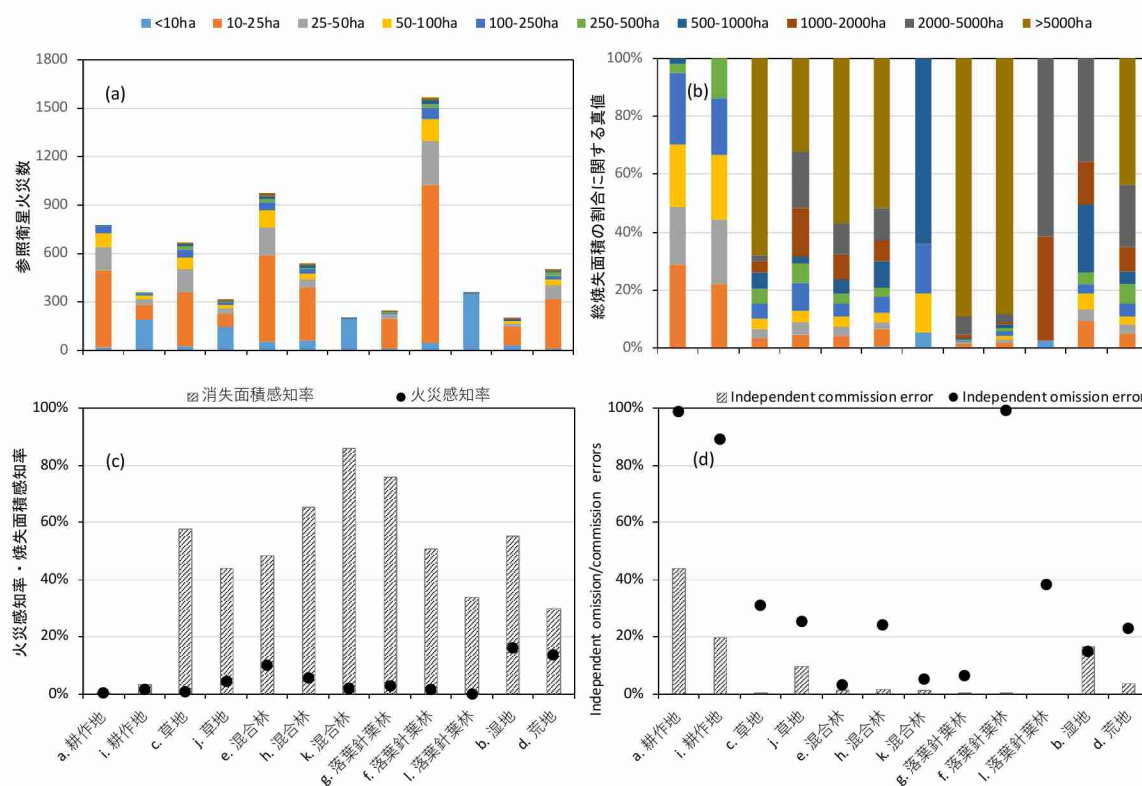
(4) 現場観測の継続と解析：日本からのBC排出量の見積りなど

本課題では、関連する現場観測の継続とそのデータ解析についても実施した。モスクワの西方約50kmのズベニゴロド観測所(55.70°N, 36.78°E)における地上リモート観測(MAX-DOAS)から得られた、森林火災の指標となるホルムアルデヒド(HCHO)濃度データを整備し、欧州の衛星センサOMIによる計測データを評価し、林野火災の影響の解析に補助的に用いた。また、上述した福江島において、ブラックカーボンモニター3130(日本カノマックス)を用いて2009年から長期継続しているBC計測に関するデータを整備し、サブテーマ(1)でのモデル検証に提供するとともに、観測データから東アジア発生源強度に関する情報を取得した。具体的にはHYSPLIT後方流跡線によって区分された気塊の起源地域(中国中東部、韓国、日本)ごとに、降水を経験していない気塊に対して計測された $\Delta BC/\Delta CO$ 比の平均値に、各地域のCO排出量推計値を乗じることでBC排出量を推定した。

4. 結果及び考察

(1) 林野火災排出データベースGFEDv4で用いられている焼失面積の検証

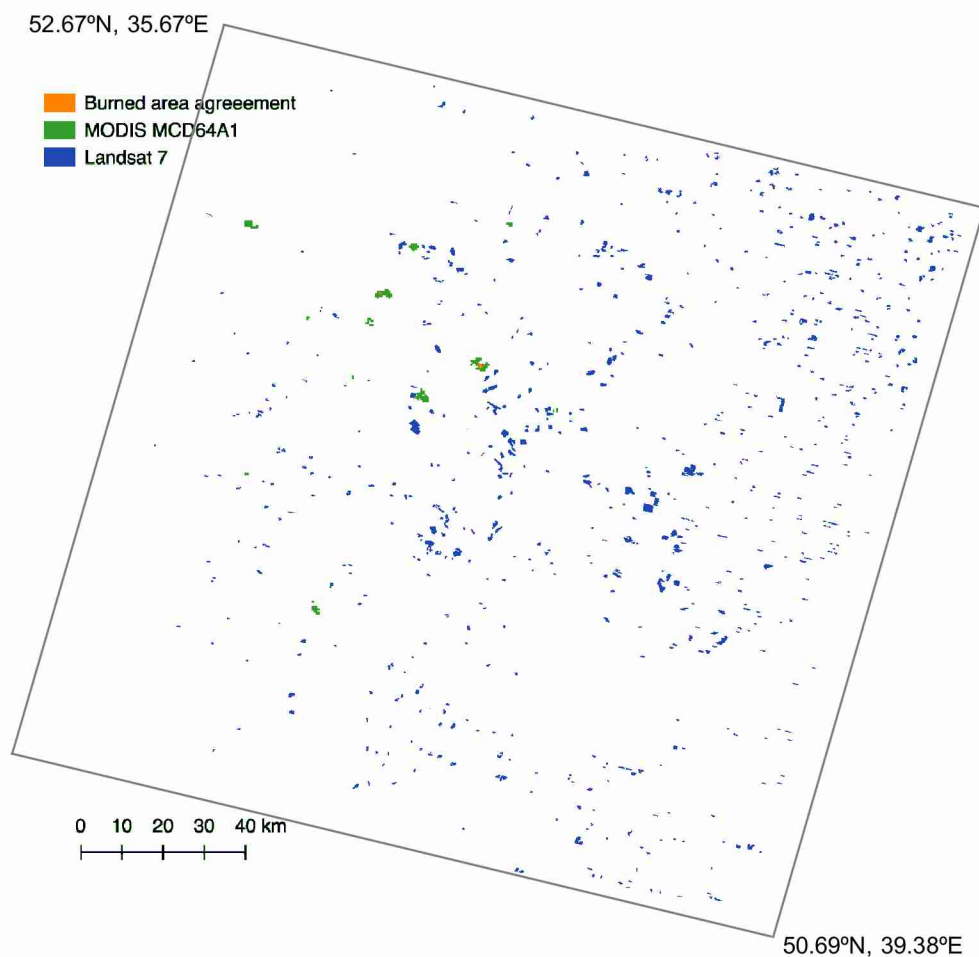
まず、12の検証エリア(図(2)-1)での火災発生数と焼失面積の真値の特徴を、空間解像度が30 m以下と十分に高いLandsat 7及び商用衛星のデータに基づいて整理した結果について、図(2)-3a, bに示す(植生タイプ毎に結果を並べ替えて示す)。農地の2エリア(Cropland, aとi)では1123箇所の火災が検出され、100 ha以下の規模のものが火災数で全体の95%を、焼失面積でも全体の70%を占めた。落葉針葉林の3エリア(Deciduous forest, f, gとl)では合わせて2168箇所の火災が検出され、火災数では100 ha以下の規模のものが93%を占めたが、焼失面積での寄与はわずか4.1%であった。一方、2000 ha以上の規模の火災が30箇所あり、全焼失面積の91.7%を占めた。混合林の3エリア(mixed



図(2)-3. Landsat 7等の参照衛星に基づく12の検証エリアでの (a) 林野火災の発生数、(b) 総焼失面積の割合に関する真値。(c) MODIS MCD64A1プロダクトの火災検知率と焼失面積検知率、及び(d) independent omission/commission errors。植生タイプ毎に結果を並べ替えて示す。

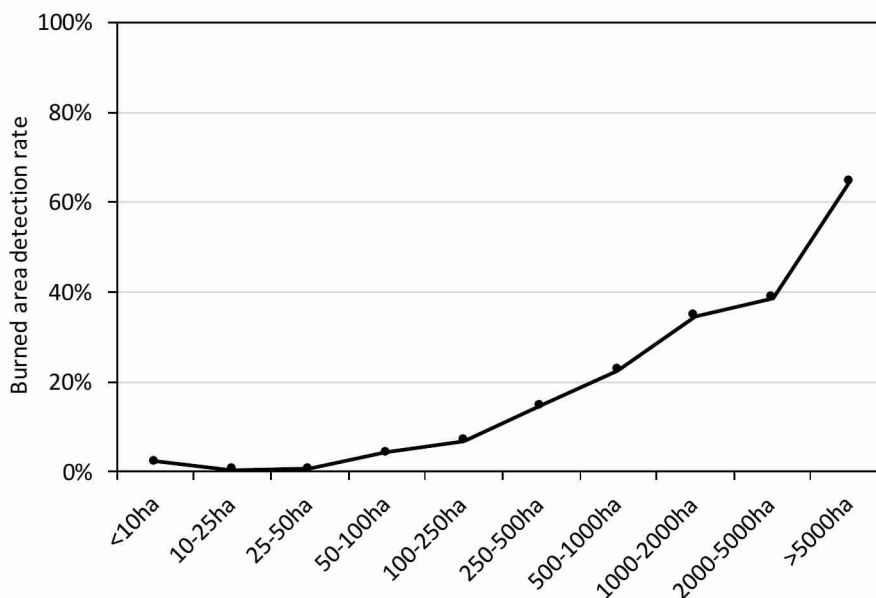
forest, e, hとk)では1710箇所の火災が検出され、そのうち90.1%は100 ha以下の規模のものであり、焼失面積での寄与は11.6%であった。一方、2000 ha以上の規模の火災が19箇所あり、全焼失面積の65.6%を占めた。草原の2エリア(Grassland, cとj)では100 ha以下の規模の火災の焼失面積は10.8%であり、2000 ha以上の規模の火災が5箇所あり全焼失面積の67%を占めた。また、湿地(Wetland, b)では、全194箇所の火災のうち、100 ha以下の規模のものが93%あったが、500 ha以上の規模の火災も9箇所あり、全焼失面積の73%を占めた。灌木草原(Shrublands, d)では100ha以下の規模の火災の焼失面積への寄与は11.3%であり、2000 ha以上の規模の火災が10箇所で全焼失面積の65%を占めた。各植生タイプで、MCD64A1での解像度から見落とす可能性のある25 ha以下の小規模の火災が多く発生していたことが明らかとなったが、農地以外の各植生タイプでは2000 ha以上(湿地の場合は500 ha)の大規模火災が存在するため、焼失面積でみた場合の相対的な重要性は低かった。

次に、これらの高解像度データを真値として、GFEDv4が基にしているMODIS MCD64A1による焼失面積を検証した（図(2)-3c, d）。まず、どの植生タイプでも全般的に、MCD64A1では焼失面積を過小評価していることがわかった（図(2)-3cの棒グラフ）。検出率は0.3~86%の範囲であり、林野火災からの汚染物質排出の影響を評価する際には、林野火災焼失面積の過小評価分に関して、2~100倍程度補正してから評価する必要があることが初めて明らかとなった。特に検出率が低かったのは農地で、検証に用いた2エリア(a, i)では、MCD64A1では全火災数の0.4%と1.7%、焼失面積全体の0.3%と3.3%しか検出できてい



図(2)-4. 中解像度MODIS衛星センサ及び高解像度衛星Landsat 7号によってとらえられた農地火災の焼失面積の比較例。本図はロシア南西部、図(2)-1中の地域aの一部に相当する。高解像度衛星Landsat 7号による火災の焼失地域の一部しか中解像度MODIS衛星センサは検出できなかったことが示されている。

ないこと（図(2)-3c、図(2)-4）、independent omission errorが、99%と89%と高く、焼失面積の一部すら検出できていないことがわかった（図(2)-3d）。その過小評価の主な原因としては、100ha以下の小規模火災が多い点が挙げられたが、農地固有の問題も指摘された。つまり、農地では植生タイプと反射率に関する小規模な空間変動が大きく、中解像度のMODISセンサでは閾値を適切に設けて火災発生地域を正確に推定するのが困難である点である。



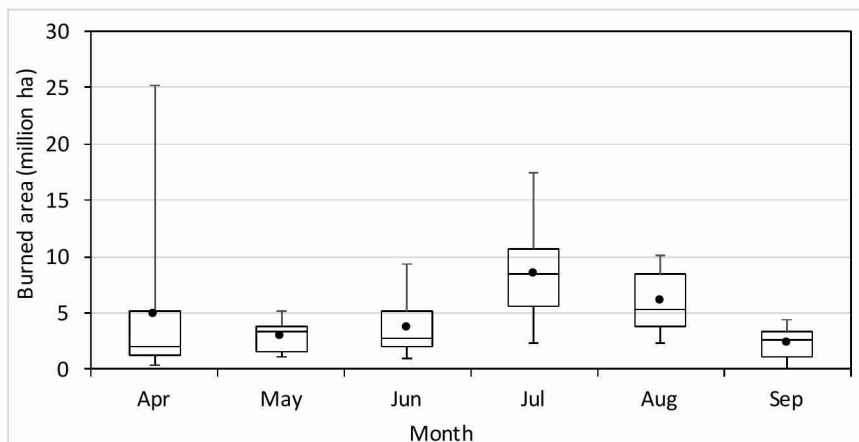
図(2)-5. 火災規模ごとのMODIS MCD64A1プロダクトの焼失面積検知率。

農地以外の植生タイプでは、MCD64A1は火災数の0.9–16.5%しかできなかったが、焼失面積全体の30–86%を検出し、農地よりは検出率が高かった(図(2)-3c)。そのうち、落葉針葉林と混合林での検出能力は49–86%であり、湿地では55%、灌木草原では30%であった。また、焼失面積の規模が大きくなることとともに、MCD64A1の検出率が上がっている傾向が示した(図(2)-5)。他方、MCD64A1には過大評価も見られた点にも注意が必要である。たとえば、independent commission errorは農地2地点においてそれぞれ22%と20%であり(図(2)-3d)、火災が発生しなかった場所でもMCD64A1が誤検出しており改善が必要であることが明らかとなった。MODISとLandsat等とともに検出できた火災(焼失地域)に関するrelated omission/commission errorについては、植生タイプにより大きな違いが見られなかった。火災規模が大きくなるに伴い、related omission errorとrelated commission errorとも減少し、焼失面積の一致度(burned area agreement)が高まる傾向が見出され、MCD64A1では小規模火災の検出が主な課題であることが再び指摘された。

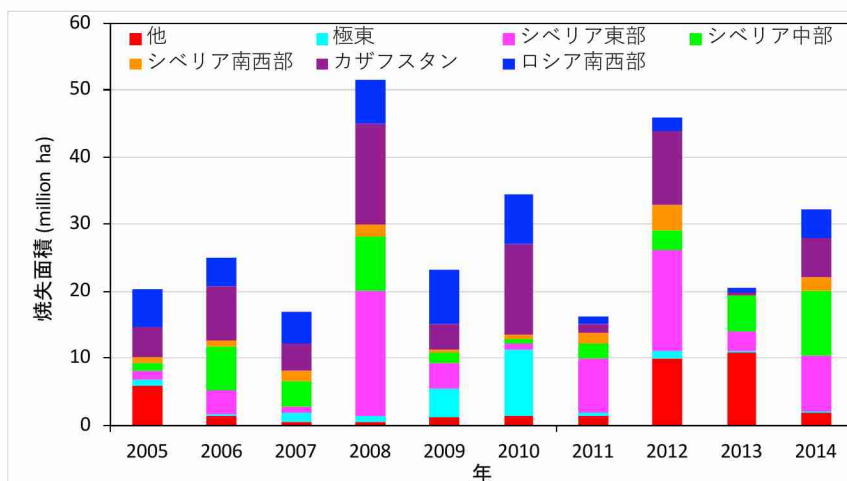
(2) 北方ユーラシア林野火災の時空間変動と要因の解析

1) 北方ユーラシア林野火災の時空間変動

北方ユーラシア大陸を15に区切ったサブ地域全般での長期的な傾向では、2008年、2010年、2012年



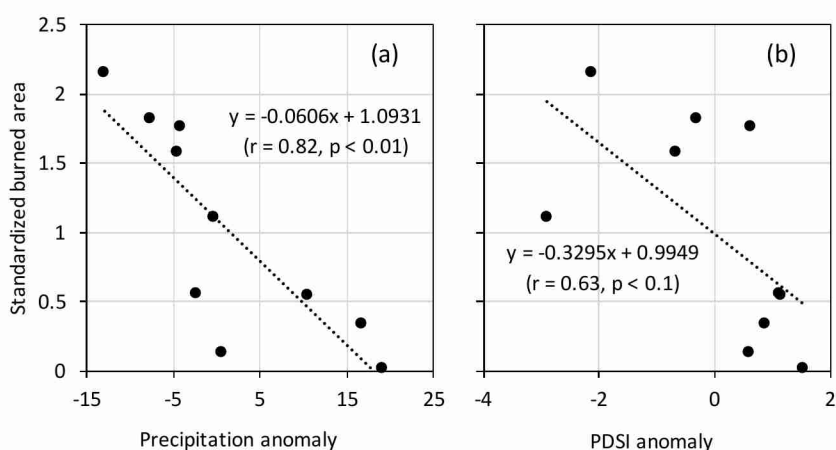
図(2)-6. 2005–2014年北方ユーラシアMCD64A1による焼失面積の月変化。季節的には4月から火災が多くなるため、4–9月のデータのみを示している。



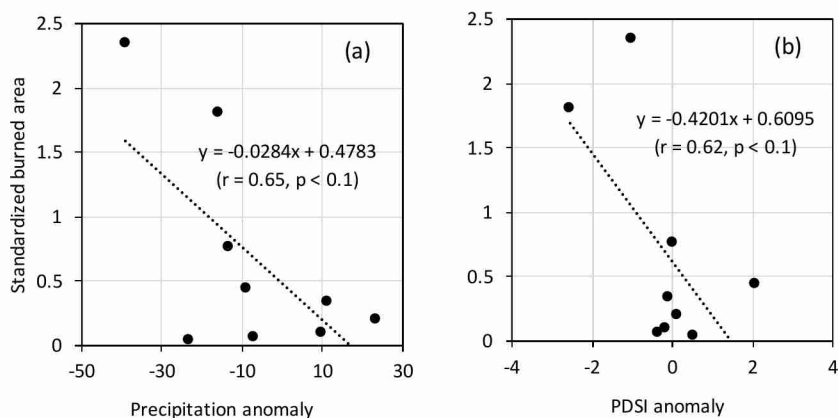
図(2)-7. 2005-2014年北方ユーラシア・サブ地域ごとの焼失面積（MCD64A1による）。

や2014年は火災発生が大きかった。季節的には4月から火災が多くなり、7-8月に焼失面積が最大値となった（図(2)-6）。サブ地域別にみると、ロシア南西部（図(2)-1の地図の3）、カザフスタン（同6）、シベリア東部（同13）、シベリア中部（同11）、シベリア南西部（同9）及び極東（同14）が火災の発生しやすい地域とわかった（図(2)-7）。夏半年（4-9月）を例として、上記6サブ地域の焼失面積の変動を調べた。

ロシア南西部は農地が主な植生であり、2005年、2007年、2008年、2009年や2010年の4-9月に、500万ha以上の焼失があり、平均年間焼失面積が448万haであった（図(2)-7）。シベリア東部では2008年に1864万ha、2012年に1499万ha、2014年に834万haが焼失し、平均年間焼失面積が636万haになり、北方ユーラシア大陸の中で大規模森林火災が非常に発生しやすい地域であった。カザフスタンでは2006年に794万ha、2008年に1517万ha、2010年に1361万ha、2012年に1098万ha、2014年に579万haが焼失し、平均年間焼失面積は675万haで、本研究で焼失面積が最も大きいサブ地域であった。シベリア中部では2006年、2008年や2014年に500万ha以上の焼失があった。2010年には極東地域の火災が多く発生し、焼失面積は988万haに上った。



図(2)-8. カザフスタン地域における2005-2014年8月のMCD64A1による焼失面積と降水（アノマリ）及び渇水指数（PDSIアノマリ）との散布図。



図(2)-9. シベリア東部地域における2005-2014年8月のMCD64A1による焼失面積と降水（アノマリー）及び渇水指数（PDSIアノマリー）との散布図。

2) 北方ユーラシア林野火災の時空間変動と気象要素及び気候インデックスとの関係解析

2005-2014年、カザフスタンの焼失面積の年々変動は降水 ($r=0.82$, $p < 0.01$) 及びPDSI ($r=0.63$, $p < 0.1$) と負の相関を示した (図(2)-8)。また、シベリア東部の焼失面積は降水 ($r=0.65$, $p < 0.1$) 及びPDSI ($r=0.62$, $p < 0.1$) と負の相関を示した (図(2)-9)。極東地域の焼失面積はPDSIとも弱い負の相関を示した ($r=0.40$, $p = 0.289$)。降水の減少、渇水度の増加 (PDSIが負へ低下) により、火災が発生し易くなっていたことが検証された。

一方、極東地域の焼失面積の年々変動はONIと負の相関を示した ($r=0.61$, $p < 0.1$)。前述の通り、ONIが負の場合は極東地域に近いベーリング海では南風が弱まることで、極東地域に輸送された湿った空気が少なくなるため、火災発生がし易くなると推定された。また、極東地域の焼失面積はNPIと正の相関を示した ($r=0.58$, $p < 0.1$)。NPIは北太平洋 (30°N-65°N, 160°E-140°W) の海表面平均気圧を示しており、気圧が高くなると極東地域における乾燥度が増すと推定でき、火災発生に正の影響を与えたと考えられた。前述のとおり、極東地域の焼失面積はPDSIと弱い負の相関を示しており ($r=0.40$, $p = 0.289$)、上記の結果と一致した。極東地域の焼失面積はPDO, A0, NINO.3と有意な相関を示さなかった。

さらに、2005-2014年4-9月について、上記6サブ地域の焼失面積と気象状況及び気候インデックスの相関関係を、タイムラグの有無も含めて系統的に解析した。ほとんどの地域では焼失面積が降水とPDSIと負の相関を示した (表(2)-3)。また、ロシア南西部、カザフスタンやシベリア南西部では焼失面積が気温と正の相関を示した。さらに、1ヶ月または2ヶ月のタイムラグを考慮した場合、相関関係は弱くなる場合が多かった。すなわち、1ヶ月以内の短い時間スケールで、降水減少、乾燥、高温が北方ユーラシア林野火災を誘発することを初めて明らかにした。他方、カザフスタンや北方ユーラシア全地域の焼失面積はNPIと有意な正の相関を示した (それぞれ $r=0.28$, $p < 0.05$; $r=0.32$, $p < 0.05$) (表(2)-4)。北太平洋の気圧が高くなると、やや長い時間スケール (10年) で北方ユーラシアの火災発生に影響が及ぶためと考えられた。また、北方ユーラシア全地域の焼失面積はPDO及びONIと有意な負の相関を示した (それぞれ $r=0.33$, $p < 0.01$; $r=0.30$, $p < 0.05$)。このことから、北方ユーラシア大陸の林野火災は、大陸スケールで見た場合に、北太平洋起源の湿った空気の流入の影響を受けている可能性があると考えられた。林野火災とこれらの全球的な気候インデックスとの相関関係においても、タイムラグの影響は見られなかった。

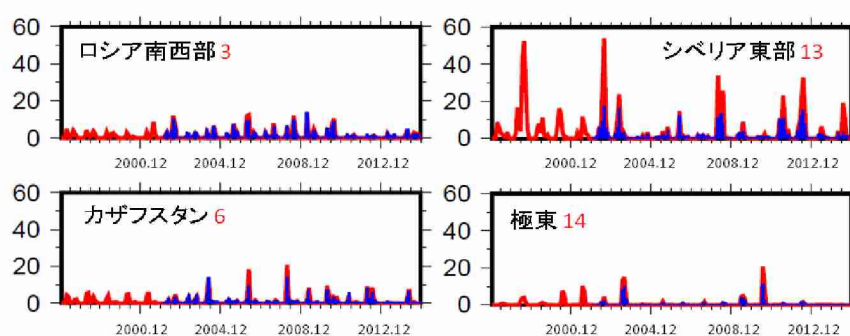
これらの結果から、北方ユーラシアの林野火災は、地域の気象状況や全球的な気候パターン変動との対応関係を示すことがわかり、気象・気候変動予測に基づいて、これらの地域での林野火災の発生と大気汚染物質の排出に関する予測がある程度可能であることが示された。

本解析では、林野火災の時間変動にGFEDv4での値を用いたが、その不確かさを検証するため、主なサブ地域について、月別のBC排出量の時間変動をFINNによる変動と比較した結果を図(2)-10に示す。サブ地域によっては、GFEDv4のほうが2~4倍高い傾向にあるが、相対的な年々変動や季節変動については比較的一致した傾向があることがわかった。

表(2)-3. 2005-2014年4-9月北方ユーラシア火災地域の焼失面積と気象要素の相関係数。

	ロシア 南西部	カザフス タン	シベリア南 西部	シベリア 中部	シベリア 東部	極東	北方ユー ラシア
タイムラグなし							
気温	0.29*	0.31*	0.33*	0.12	0.25	0.12	0.02
降水	- 0.52***	-0.48***	-0.40***	-0.28*	-0.39**	-0.35	-0.19
PDSI	-0.40**	-0.50***	-0.61***	-0.49***	-0.45***	- 0.46*	-0.02
タイムラグ1ヶ月							
気温	-0.05	0.04	0.25	-0.01	0.06	0.23	0.06
降水	-0.16	-0.25	-0.46**	-0.31*	-0.06	-0.15	-0.16
PDSI	-0.19	-0.34*	-0.60***	-0.48***	-0.29*	- 0.39*	-0.17
タイムラグ2ヶ月							
気温	-0.18	0.09	0.15	0.05	-0.02	0.23	-0.03
降水	-0.01	-0.34*	-0.15	-0.29	-0.19	-0.01	-0.04
PDSI	-0.05	-0.28	-0.45**	-0.33*	-0.26	-0.36	-0.05

注：*, p<0.05; **, p<0.01; ***, p<0.001



図(2)-10. BC排出量の月変化 (GFED4s: 赤線 FINN: 青線)。横軸の1目盛は1997年1月から6カ月毎、縦軸はBC排出量 [Gg/month]。赤色の数字は図(2)-1におけるサブ地域番号との対応を表す。

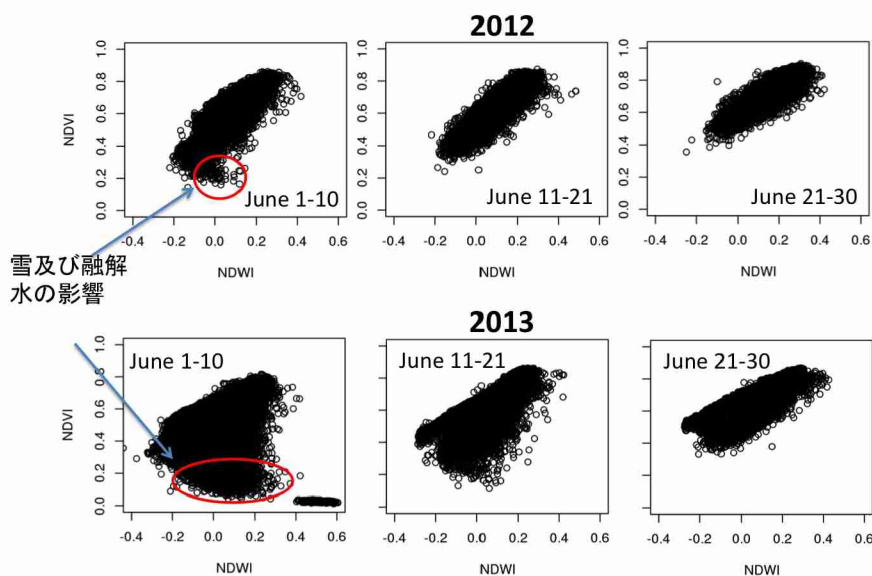
表(2)-4. 2005-2014年4-9月北方ユーラシア火災地域の焼失面積と気候インデックスの相関係数。

	ロシア南西 部	カザフスタ ン	シベリア南 西部	シベリア中 部	シベリア東 部	極東	北方ユーラ シア
タイムラグなし							
NINO3	0.01	0.02	0.04	-0.13	0.07	- 0.18	-0.07
AO	0.08	0.03	-0.03	0.04	-0.03	- 0.12	-0.04
NPI	0.17	0.28*	-0.13	0.06	0.07	0.13	0.32*
PDO	0.003	-0.12	-0.22	0.06	-0.23	- 0.24	-0.33**
ONI	-0.03	-0.17	-0.1	-0.13	-0.09	- 0.29	-0.30*
NAO	-0.17	-0.29*	-0.09	0.14	0.02	- 0.24	-0.2
タイムラグ1ヶ月							
NINO3	0.16	-0.06	0.03	-0.09	0.07	- 0.17	-0.04
AO	-0.17	-0.1	-0.07	0.12	-0.07	0.28	-0.02
NPI	0.14	0.15	0.07	0.21	0.09	0.17	0.31
PDO	0.08	-0.06	-0.28	0.27	-0.21	- 0.24	-0.2
ONI	0.13	-0.18	-0.18	-0.09	-0.23	- 0.19	-0.29
NAO	-0.16	-0.33*	-0.18	0.13	-0.09	0.04	-0.21
タイムラグ2ヶ月							
NINO3	0.21	-0.05	0.01	-0.06	0.17	- 0.05	0.01
AO	-0.26	-0.16	0.04	0.28	-0.23	- 0.08	-0.21
NPI	0.13	0.09	0.11	0.11	0.27	0.1	0.16
PDO	0.16	0	-0.25	0.36*	-0.13	- 0.15	0.04
ONI	0.24	-0.11	-0.24	-0.01	-0.32*	- 0.01	-0.13
NAO	-0.2	-0.31	-0.31	0.18	-0.24	- 0.15	-0.33*

注：*, p<0.05; **, p<0.01

3) 北方ユーラシア林野火災の時空間変動と植生指数及び雪解け日の関係解析

森林植生の生育条件と火災との関連性の解析では、まず、対象地域を R1~R4 の4つのサブ領域(R1 60-62.5°N, 130-132.5°E; R2 60-62.5°N, 132.5-135°E; R3 62.5-65°N, 130-132.5°E; R4 62.5-65°N, 132.5-135°E)に分割し、それぞれのサブ領域における火災の発生状況を GFEDv4 の burned area fraction から見積もった。その結果、対象地域では2012年7月を中心に火災が発生しており、各サブ領域の焼失面積の大きさはR2, R4, R3, R1の順であった。図(2)-11は、森林火災の影響が最も大きかったサブ領域R2における、6月上旬、中旬、下旬のNDVIとNDWIの散布図である(2012年では火災が起こる約1カ月前に相当する)。2012年と2013年における6月上旬の図を比較すると、2013年は「NDVIが0.2以下で低くNDWIが0より高い領域」(図(2)-11の赤丸部)に多くのデータが見られるのに対し、2012年は同領域のデータが少ない。この領域には根雪及び融解水が影響すると考えられ、6月上旬の散布図の両年の比較から、2012年は、2013年より早く雪及び融解水が消失し、その結果、2013年よりも森林の展葉が早かったと言える。この結果、2012年は植生量(葉面積)が6月下旬にはすでに夏季の最大値に達しており、散布図を比較すると、2012年の方が2013年よりもNDVI及びNDWIの高い領域にデータが分布していることが明らかとなった。春先の雪解け及び展葉時期の早期化は、夏場の乾燥化を招くことが観測及びモデル研究から示唆されており⁶⁾、ヤクーツク周辺で2012年7月に発生した大規模森林火災は、この地表面の乾燥に起因して大規模化した可能性が指摘された。なお、6月中旬~下旬にかけては火災の発生した2012年のほうが2013年より先にNDWIが上昇し、一見、乾燥状態と矛盾するような状況ともとられるが、この理由としては2012年の方が6月下旬の森林の葉面積が多く、その結果、葉内の水分総量が多かったことで説明できる可能性がある。以上の解析から、「NDVIが0.2以下で低くNDWIが0より高い領域」のデータの多寡によって落葉針葉樹林地域での「大規模火災の起こりやすさ」が前もって判定できる可能性が指摘された。



図(2)-11. サブ領域R2(60-62.5°N, 132.5-135°E)における各ピクセルの衛星観測値から算出したNDVIとNDWIの散布図。大規模火災の起きた2012年と、火災が殆ど見られなかった2013年における6月上・中・下旬の図。

表(2)-5. 2005-2014年4-9月北方ユーラシア主な火災地域の焼失面積と植生指数の相関係数。

	ロシア南西部	カザフスタン	シベリア南西部	シベリア中部	シベリア東部	極東	北方ユーラシア
<u>NDVI</u>							
D1-20	0.50***	0.03	-0.08	-0.21	-0.01	0.19	0.25
D11-30	<u>0.45**</u>	0.02	-0.06	-0.18	0.03	0.21	0.32*
D21-10	0.33*	0.05	-0.1	-0.19	0.06	0.24	0.38*
<u>NDWI</u>							
D1-20	0.33*	-0.27	0.02	0.16	-0.05	-	-0.33*
D11-30	<u>0.48***</u>	-0.1	0.01	0.27	-0.01	-	-0.30*
D21-10	0.33*	0.01	-0.07	0.33*	0.09	-	-0.2

注：1. *, p<0.05; **, p<0.01; ***, p<0.001

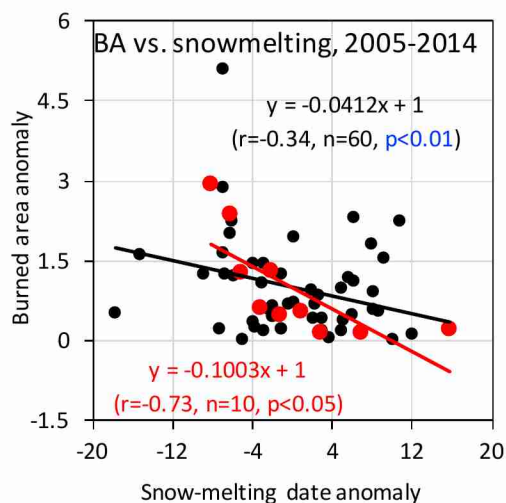
2. D1-20, 各月の焼失面積比とその前月1-20日の平均NDVI及びNDWIの相関関係

3. D11-30, 各月の焼失面積比とその前月11-30日（または31日）の平均NDVI及びNDWI相関関係

4. D21-10, 各月の焼失面積比とその前月21日から当月10日の平均NDVI及びNDWI相関関係

次に、2005-2013年4-9月、上記6サブ地域の焼失面積とNDVI及びNDWIの相関関係をタイムラグの有無に分けて調べた。具体的には、焼失面積の指標として、それぞれのサブ地域の焼失面積を全地域面積で規格化した比の値（略記：焼失面積比）を用いた。そして、各月の焼失面積比とその前月の1-20日、11-30（または31）日及び21日から当月10日の平均NDVI及びNDWIとの相関関係を調べた。その結果、ロシア南西部では焼失面積比がNDVIおよびNDWIと有意な正の相関を示し、前月11-30日の値と最も高い相関係数を示した（表(2)-5）。すなわち、植生の生育状況が10-20日間後の林野火災に影響を及ぼす可能性が示唆された。

さらに、上記6サブ地域の焼失面積とその年の雪解け日の相関関係を調べた。2005-2014年、毎年各サブ地域で雪が完全に解けた日付のアノマリーを算出し、年毎の焼失面積のアノマリーとの関係を解析した。その結果、シベリア東部では焼失面積のアノマリーは雪解け日のアノマリーと有意な負の相関を示した（ $r=0.73$, $p < 0.05$ ）（図(2)-12）。6サブ地域全体で見た場合でも、焼失面積のアノマリーは雪解け日のアノマリーと有意な負の相関を示した（ $r=0.34$, $p < 0.01$ ）。早い雪解けが植物の展葉時期の早期化や夏場の乾燥化と結びつき、森林火災を起りやすい傾向とつながることが考えられた。

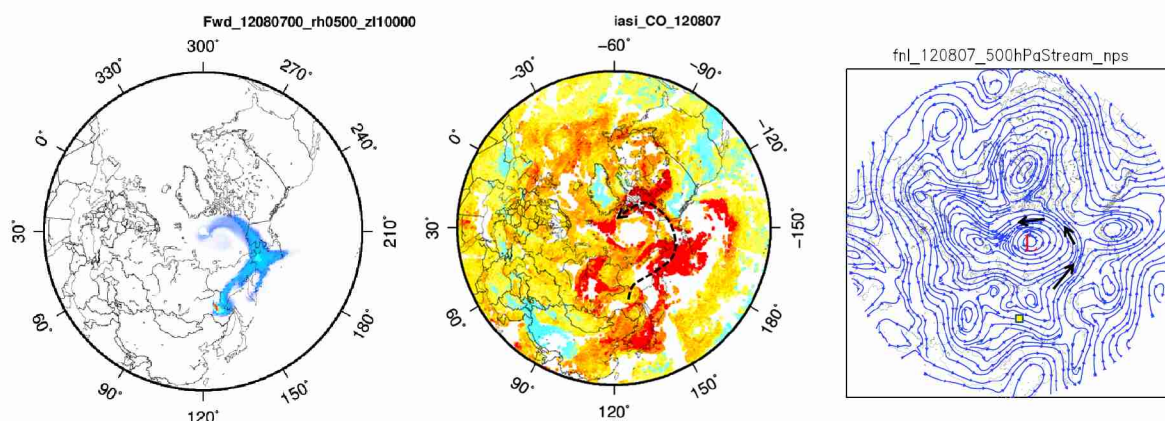


図(2)-12. 2005-2014年6サブ地域全体での焼失面積のアノマリーと雪解け日のアノマリーの散布図。赤い丸はシベリア東部地域を示す。

(3) 北方ユーラシア林野火災発生源によるSLCPsの北極への長距離輸送の解析

1) Forward計算における北方ユーラシア林野火災発生源から北極への輸送事例の解析

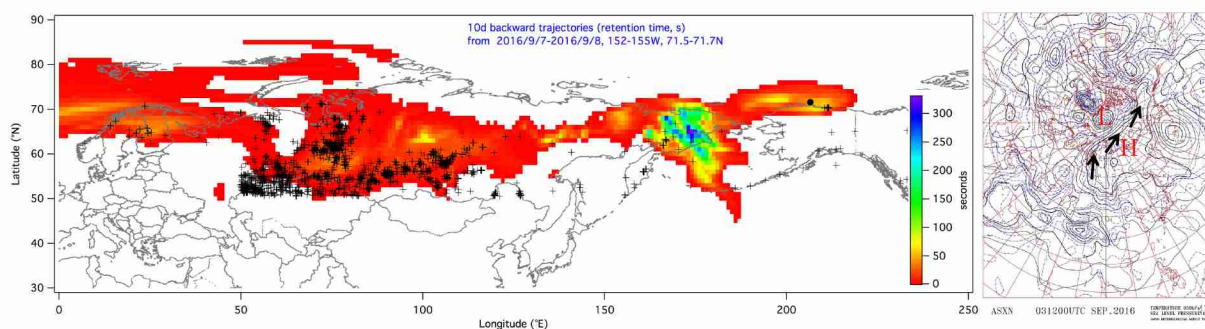
Flexpartモデルを用いた2012年8月のForward計算における、8月7日のスナップショットを図(2)-13に示す。東シベリアでの林野火災から発生したBC等の汚染物質は北東方向のアラスカを經由し、北極海上空へ流れ込んでいる様子が示される。この粒子輸送経路は、同日にIASI衛星で計測されたCOの高濃度範囲(図(2)-13中央)とよく一致しており、実際にシベリアでの林野火災で発生した汚染物質が北極海へ到達したことが検証された。同日の500hPa面での気流場(図(2)-13右)からは、北極海上で発達した低気圧へ向かって反時計回りに汚染気塊が流入したメカニズムが確認でき、北極低気圧が大気汚染を中緯度から北極へ運ぶ重要な要因となっていることが示唆された。



図(2)-13. (左)2012年8月7日のFlexpartモデルForwardランによる粒子追跡計算例。同日のIASI衛星センサによるCO計測(中央)で輸送経路が検証されている。右は500hPa面での同日の流線で、発達した北極海上の低気圧(L)へ向かって反時計回りに汚染気塊が流入した様子がわかる。

2) Backward計算による北極への輸送事例の解析

次に、北極海船舶観測で認められたBC濃度上昇の要因解析の結果を示す。「みらい」での海洋大気BC観測に関して、2016年9月7日に北極海(アラスカ北部)で高いBC濃度が観測された際には、フットプリントがバイカル湖の北西部から中央シベリアまで広域にひろがっていた(図(2)-14左)。VIIRSからは、同時期にカザフスタン北部からバイカル湖付近まで森林火災が広範囲で発生していたことが示され



図(2)-14. (左)2016年9月7日に北極海上の「みらい」(71.5-71.7° N, 152-155° W、黒丸)にて比較的高いBC濃度が検出された事例に対する過去10日間(2016年8月28日0時から2016年9月8日0時まで)のフットプリント(空気滞在時間:単位はs)。同期間に検出されたVIIRS火災Hot Spotを合わせて示す(+)。右は北極を中心とした9月3日の地上天気図で、北極中心付近の低気圧(L)やロシア極東地域の高気圧(H)の影響で、汚染気塊がシベリアから北極まで運ばれた。

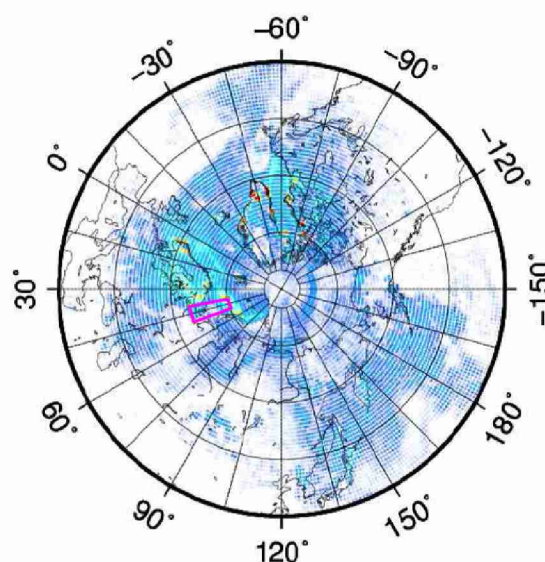
た。特に、バイカル湖北西部の火災は9月2日から7日まで継続し、フットプリントとの重なりから、北極海で観測されたBCの起源地域であることが推定された。同時期の気圧配置では、北極中心部に低気圧が発達する一方、ロシア極東地域は高気圧に覆われていた。図(2)-14右に、9月3日の気圧配置を例として示す。この場合、シベリア中部からの汚染物質がまず北上してから高気圧性の循環によって大気境界層内を東方向へ輸送され、北極海へ到達されたことが示された。この経路は、低気圧性循環が卓越し、高高度へ輸送された上記の2012年8月の事例とは異なるメカニズムと考えられた。発生源から検出地点までは約5000 km離れており、気塊の追跡にはFlexpartのような拡散を考慮するラグランジュ型のモデルシミュレーションを用いることが必要である。

3) Backward計算における北極のフットプリント及びBC発生源解析

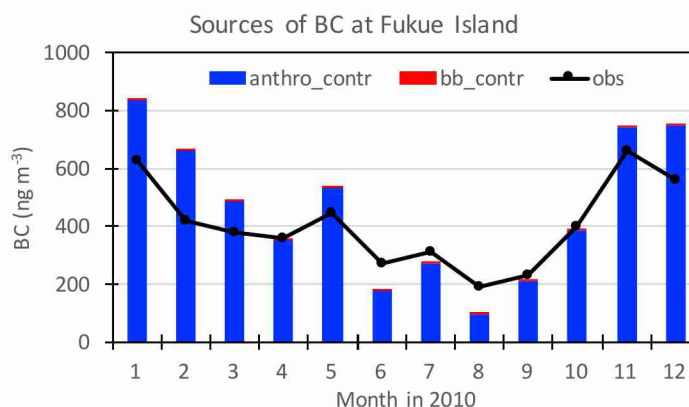
2010年8月のBackward計算におけるスナップショット例を図(2)-15に示す。ピンクの実線で囲まれた地域から一か月に亘って放出された粒子は、長距離輸送によって半球規模で広がるものの、この期間の気象場の特性に応じて滞在地域に偏りが見られた。この粒子の拡がり、各地域を発生源と見立てた際の感度（フットプリント）と見なすことができる。このようにして得られたフットプリントに、林野火災等の発生源強度分布をかけてその総和を算出することによって、レセプター地域に到達した汚染物質の発源地域と寄与率を算定することができる。

まず、この方法で2010年福江島のBC濃度を算定して観測データと比較した結果、モデルで得られたBCの濃度レベルや季節変動は観測値とよく一致し ($r = 0.95$, $RMSE = 115.13 \text{ ng m}^{-3}$)、ほとんどのBCが人為起源発生源 (99.5%) 由来であることが示唆された (図(2)-16)。

次に、北極圏 (66°N以北全域) 地表付近のBC濃度を同じ手法で計算し、発生源を解析した結果を示す。2010年BC年平均濃度は 48 ng m^{-3} であり、そのうちロシアの人為起源の寄与が高く、56%を占めた (図(2)-17)。ロシアの石油精製施設によるgas flaringが北極圏の大気環境・気候変動へ大きな影響を及ぼす可能性を示した。季節変動パターンとしては、人為起源発生源のBCが12-2月に極大、6-8月に極小を示した。年平均で見ると、北極圏地表付近のBCの17%が自然起源だったが、6-8月には56-86%が自然起源となり、夏季には林野火災が、北極圏地表付近に存在するBCの重要な発生源であるこ

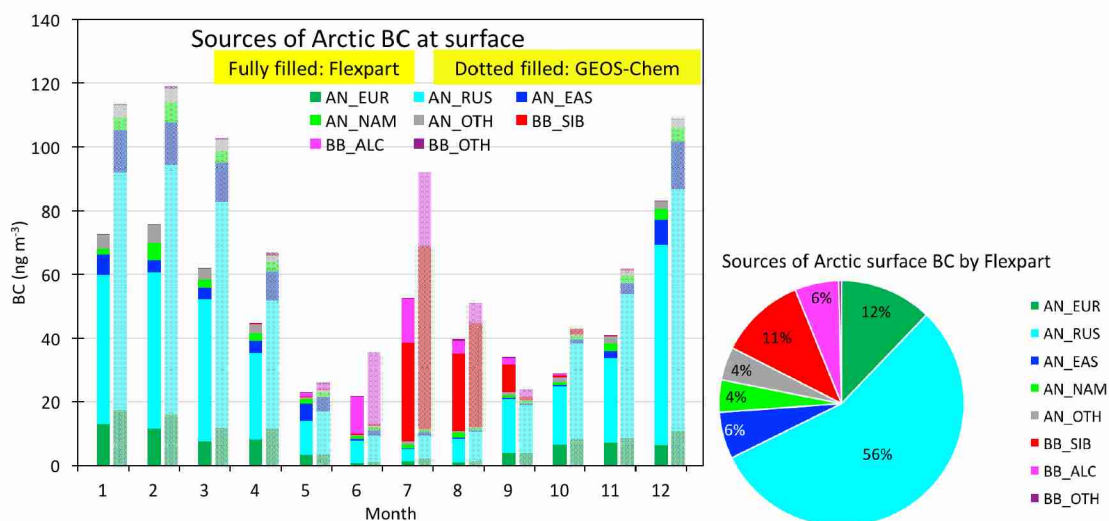


図(2)-15. Flexpartモデルによる粒子追跡計算のスナップショット例。ピンクの実線で囲まれた領域 (40-50°E, 65-75°N) から粒子を放出したケースで、2010年8月1日 (粒子放出開始から30日後) の結果。



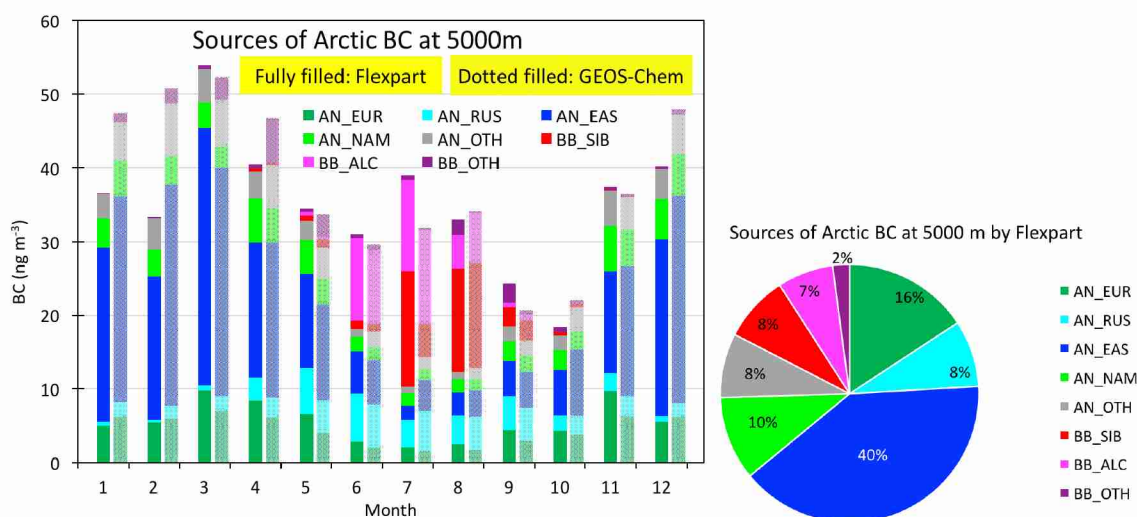
図(2)-16. Flexpartモデルによる2010年福江島のBC濃度及び観測値との比較。

とが示唆された。ラグランジュ型大気輸送モデルFlexpartから得た結果を、サブテーマ(1)においてオイラー型のGEOS-Chemモデルで得たものと比較した。北極圏地表付近のBC濃度について、Geos-Chemでの年平均濃度 70 ng m^{-3} より31%低かったが、各地域・発生源の寄与率や季節変動については非常によく一致した。



図(2)-17. Flexpartモデルによる2010年北極圏地表付近のBC濃度及び地域・発生源ごとの寄与率（各月、左棒）。サブテーマ(1)のGEOS-Chemモデルによる結果（各月、右棒）とよく一致した。

また、2010年における北極圏上空高度5000 m付近のBC年平均濃度は 35 ng m^{-3} と算出され、そのうち東アジアの人為起源が40%の寄与をもつと推定された。特に10-4月に東アジアの人為起源の寄与が大きかった（34-65%）（図(2)-18）。この結果についても、サブテーマ(1)（BC年平均濃度 38 ng m^{-3} 、東アジアの人為起源の寄与43%）とよく一致した結果を得られ、北極圏BC発生源の寄与率に関する信頼性を向上させることができた。



図(2)-18. Flexpartモデルによる2010年北極圏高度5000 m付近のBC濃度及び地域・発生源ごとの寄与率（各月、左棒）。サブテーマ(1)のGEOS-Chemモデルによる結果（各月、右棒）とよく一致した。

(4) 現場観測の継続と解析：日本からのBC排出量の見積りなど

モスクワ郊外ズベニコロドでのホルムアルデヒド対流圏カラム濃度に関する衛星データと地上検証データとの比較では、日ごとの値や変動についての一致度は十分とはいえないものの、2009-2011年の4-10月における月平均濃度レベルでの比較では不確かさの範囲($\pm 30\sim 40\%$)で一致度が十分に高いことがわかり ($[OMI\text{衛星データ}] = 0.80 \times [\text{地上検証値}] + 1.0 \times 10^{15}$ (単位は molec cm^{-2} , $R^2 = 0.74$))、2010年のモスクワ郊外の森林火災の影響評価などに衛星データを補助的に活用した。

福江島でのBC観測データ(2009-2015年)の解析から、中国中東部・韓国・日本から到来した気塊で、降水の影響を受けていない場合の $\Delta BC / \Delta CO$ 比の平均値 (BC濃度が上位25%, 輸送途中の最大相対湿度が下位25%, 輸送時間が下位25%の全てに当てはまる場合) はそれぞれ $6.0\sim 7.6$, 8.4 , $6.7 \text{ ng m}^{-3} \text{ ppb}^{-1}$ と算出された (表(2)-6(A))。アジアの排出量インベントリ REAS version2⁷⁾でのBC/CO排出量比は、それぞれの地域で $8.3\sim 9.9$, 23 , $6.5 \text{ ng m}^{-3} \text{ ppb}^{-1}$ となっており、排出量比について、韓国および中国中東部に関して少なくとも 2.8 , 1.3 倍の過大評価となっており、修正する必要があることを指摘した。一方日本では REASv2でのBC/CO排出量比は妥当であることが指摘された。中国からのCO排出量見積りには大きな不確かさの幅があるが、Tohjima et al. (2014)⁸⁾および Yumimoto et al. (2014)⁹⁾のトップダウン推定や Kurokawa et al. (2013)⁷⁾のボトムアップ推定を基にして $160\sim 202 \text{ Tg y}^{-1}$ の範囲を採用すると、中国主要部でのBC排出量は $0.90\sim 1.1 \text{ Tg y}^{-1}$ と推定された (表(2)-6(C))。この値は、REASv2での 1.59 Tg y^{-1} 、Zhang et al. (2009)¹⁰⁾での 1.71 Tg y^{-1} などと比較して低い値であり、福江での観測からは捉えにくい内陸発生源の影響等を過小評価している可能性はあるものの、中国からのBC排出量の真値が統計値より低い可能性があることを示唆した。韓国については、REASv2のCO排出量 0.69 Tg y^{-1} を採用すると、BC排出量は 0.0046 Tg y^{-1} (不確かさは $\pm 131\%$)と推定され、排出量比と同じだけBC排出量が過大評価されている可能性が考えられた。日本でのCO排出量 5.0 Tg y^{-1} (REAS v2)を仮定すると、BC排出量は 0.027 Tg y^{-1} (表(2)-6(C))と推計され (不確かさは $\pm 131\%$)、REASv2での値 (0.026 Tg y^{-1})とよく一致する結果となった。日本での排出量の検証は、「北極評議会」における「BC&メタンに関するFramework for Action」へ、北極評議会オブザーバー国として「BC排出量の国家レポート」を提出するために重要である。実際、2017年度には、排出量の国家レポート提出へ向けたドラフトが環境省にて準備された。2017年9月にCCAC(Climate and Clean Air Coalition)へ提出した推計値で、EAGrid2000の2010, 2012年への年次更新値に含まれる、1次排出PM_{2.5}の一部としてのBC排出統計値が記載される見込みである。2010年の推計値は約 $22,000 \text{ ton/year}$ (0.022 Tg y^{-1})であり、我々の推計値との差は23%に収まっている。今後、より精度を高めるために、CO排出量についても衛星データ同化での検証を進めることが重要である。

表(2)-6. (A) 福江島で計測された大気の原因別BC/CO比と(C)推計されたBC排出量。

起源	(A) BC/CO比 の観測値 ($\text{ng m}^{-3} \text{ ppb}^{-1}$) ¹⁾	(B) 仮定し たCO排出量 (Tg y^{-1})	(C) = (A) × (B) 推 計されたBC排出 量(Tg y^{-1})	比較対象：BC排 出量統計値 (REASv2, Tg y^{-1})
日本	6.7	5.0	0.027	0.026
韓国	8.4	0.69	0.0046	0.013
中国中東部	$6.0\sim 7.6$	160-202	$0.90\sim 1.1$	1.59

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

北極圏の気候環境影響などで注目されるBCの起源のうち、自然起源発生源に着目し、林野火災からの大気汚染物質の排出量を規定する焼失面積を、解像度が非常に高いLandsat衛星や商用衛星のデータを用いて初めて評価した。その結果、GFEDv4で用いられているMODISセンサ(水平解像度500m)による焼失域プロダクト(MCD64A1)では不十分であり、過小評価となっていることを、シベリア～北部ユーラシ

ア広域での林野火災に対して初めて系統的に明らかにした。特に、植生タイプによらず小規模火災を見落としている可能性に加えて、農地で特有の困難さがある点を指摘した。今後、MODISなどの陸面観測衛星による検出アルゴリズムを改良してゆくための重要な基礎的知見が得られた。現状において最も広く使われている排出データベースであるGFEDv4において、農地での焼失面積や汚染物質排出がわずかに0.3-3.3%しか捉えられていないことを明らかにし、2桁程度の上方向修正が必要であることを指摘した点は、発生源ごとの寄与見積もりを今後正確に行う上で重要な成果となる。

北方ユーラシアの林野火災の実態や要因を解析した。ロシア南西部、カザフスタン、シベリア東部、シベリア中部、シベリア南西部及び極東地域は火災が発生しやすい地域であり、焼失面積が、降水量や渇水指数(PDSI)と負の相関を、植生指数NDVIやNDWIと正の相関を、雪解け日と負の相関を示した。乾燥だけでなく、植生の高密度化、雪解けの早期化が林野火災の発生を誘発することを示唆し、林野火災の予測に有意な情報を提供した。

シベリア森林火災から北極方面への輸送には、北極低気圧の存在が重要となるケースに加えて、高気圧性の循環が支配的な場合には、時計回りの軌跡を描きながら境界層内を長距離輸送されうること示した。

大気トレーサ輸送モデルFlexpartの最新版v10にて、逆(Backward)方向計算に湿性除去過程の組み込み、フットプリント解析で湿性除去を加味できるようになった。北極圏地表付近および高度5 kmでのBC起源について、サブテーマ(1)でオイラー型モデルから得た結果を裏付ける知見を、ラグランジュ型モデルから得ることに成功した。ラグランジュ型モデルは、輸送の表現がグリッド設定によらない点、長距離輸送・拡散の数値表現に優れる点が特徴であり、オイラー型モデルと相補的である。両モデルによって、北極圏のBCの発生源の定量評価に関する信頼性を向上させた。

長崎県福江島の現場観測により中国、韓国や日本のBC排出量を見積もる方法論を確立した。空気塊の起源地域別に、降水の影響のない場合に計測された $\Delta BC/\Delta CO$ 比の平均値を求め、地域ごとのCO排出量を乗じてBC排出量を推計した。その結果、日本のBC排出量は 0.027 Tg y^{-1} と推計され、現有アジア地域の排出量インベントリREASv2での値(0.026 Tg y^{-1})とよく一致する結果となったが、REASv2による韓国および中国中東部のBC/CO排出量比はそれぞれ2.8倍、1.3倍過大評価されていることを明らかにし、修正する必要があることを指摘した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- ・政策研究大学院大学「北極圏問題についての我が国の総合戦略研究会」委員を務め、より広く政府の施策に貢献した。
- ・北極評議会へ報告する我が国のブラックカーボン排出量を、観測をもとにトップダウン推計した。社会経済情報をもとにボトムアップ法で推計されたBC排出量を検証して信頼性を向上させることができた。「北極評議会」では2015年5月に「BC及びメタンの排出削減強化に関する行動のための枠組」が採択され、我が国もオブザーバー国として、BCの排出量報告値を準備しつつあるタイミングで、独立な検証データを提供することができた。排出量を報告したオブザーバー国は、非北極圏国であっても北極圏国と対等な地位でExpert Groupに参加して、今後の対策につき議論に参加することができるため、日本の関与を強めることにも結び付いた。
- ・Future EarthのコアプロジェクトであるIGAC (International Global Atmospheric Chemistry, 国際地球大気化学協同計画) とIASC (International Arctic Science Committee, 国際北極科学委員会) の合同による国際的な北極研究プロジェクトであるPACES (air Pollution in the Arctic: Climate, Environment and Societies, <http://www.igacproject.org/PACES>) において知見をインプットし貢献した。
- ・サブ課題代表の金谷はIPCC AR6 WG1 chapter 6. SLCFのReview Editorに選ばれ、報告書作成において本課題からの知見についても適切に取り扱う予定である。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・北方ユーラシアの林野火災発生源を評価し、北極へのSLCP輸送の実態に関する理解が深まったことについて、北極評議会だけでなくCCAC、IPCCなどにおいても日本の環境面での取り組み、国際社会における役割分担の一つとして、今後、成果を強くアピールしていけると考えられる。
- ・北極圏のBC濃度に及ぼす地域・国別の寄与率については、ラグランジアン大気輸送モデルにより得られた寄与率はサブテーマ(1)の全球モデルの結果とよく一致した。北極圏の地表面付近ではロシアからのBCが50%以上の寄与を持つこと、自由対流圏では東アジア起源が40%の寄与をもつことがわかった。北極評議会へ、オブザーバー国として比較的中立な立場から、寄与率に関する信頼性の高い成果を発信してゆくことは、国際的な場での合意や課題解決を促す重要なステップとなる。

6. 国際共同研究等の状況

ノルウェーのNILU(Norwegian Institute for Air Research)で開発が進むFlexpartに関し、Ignacio Pizzo氏らと共同で研究開発を進めた。ロシアでの共同観測は、ロシア科学アカデミー大気物理研究所のOleg Postylyakov氏らと実施した。PACESでの航空機観測計画に関する議論に参加し、PIのChuck Brock氏(NOAA/ESRL/CSD, USA)らと共同研究提案を行っている。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Inomata, S., H. Tanimoto, X. Pan, F. Taketani, Y. Komazaki, T. Miyakawa, Y. Kanaya, and Z. Wang. Laboratory measurements of emission factors of nonmethane volatile organic compounds from burning of Chinese crop residues, *J. Geophys. Res.*, 120, 5237-5252, doi:10.1002/2014JD022761, 2015.
- 2) Kanaya, Y., X. Pan, T. Miyakawa, Y. Komazaki, F. Taketani, I. Uno, and Y. Kondo. Long-term observations of black carbon mass concentrations at Fukue Island, western Japan, during 2009-2015: Constraining wet removal rates and emission strengths from East Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 10689-10705, doi:10.5194/acp-16-10689-2016, 2016.
- 3) Zhu C., H., Kobayashi, Y., Kanaya, and M., Saito. Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: Large underestimation in croplands. *Sci. Rep.*, 7, 4181, doi:10.1038/s41598-017-03739-0, 2017.
- 4) Ikeda K., H., Tanimoto, T., Sugita, H., Akiyoshi, Y., Kanaya, C., Zhu, and F., Taketani. Tagged tracer simulations of black carbon in the Arctic: Transport, source contributions, and budget. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10515-10533, 2017.
- 5) Kanaya Y., H. Matsui, F. Taketani, X. Pan, Y. Komazaki, Z. Wang, L. Chang, D. Kang, M. Choi, S-Y. Kim, C-H. Kang, A. Takami, H. Tanimoto, K. Ikeda, and K. Yamaji. Observed and modeled mass concentrations of organic aerosols and PM_{2.5} at three remote sites around the East China Sea: Roles of chemical aging. *Aerosol Air Quality Res.*, 17, 3091, 2017.

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Kanaya, Y., H. Irie, H. Takashima, H. Iwabuchi, H. Akimoto, K. Sudo, M. Gu, J. Chong, Y. J. Kim, H. Lee, A. Li, F. Si, J. Xu, P.-H. Xie, W.-Q. Liu, A. Dzholia, O. Postylyakov, V. Ivanov, E. Grechko, S. Terpugova, M. Panchenko, Long-term MAX-DOAS

- network observations of tropospheric NO₂ in Russia and Asia (MADRAS) since 2007: Comparisons with satellite observations and climatology, 7th International DOAS workshop, 2015.
- 2) Borovski, A., S. Barodka, A. Elokhov, V. Ivanov, Y. Kanaya, O. Postylyakov, Measurements of formaldehyde integral content in troposphere at Moscow Region, 7th International DOAS workshop, 2015.
 - 3) 金谷有剛、宮川拓真、竹谷文一、駒崎雄一、Pan Xiaole, 近藤豊, 長崎県福江島での長期連続観測からみた BC/CO 比: 起源地域と降水の影響, 第 56 回大気環境学会年会, 2015.
 - 4) 朱春茂、小林秀樹、金谷有剛、齋藤正彦, Validation of MODIS MCD64A1 burned area in boreal Eurasia, 第 24 回東京大学生産技術研究所フォーラム, 2016.
 - 5) 金谷有剛、Xiaole Pan, 宮川拓真、駒崎雄一、竹谷文一、鶴野伊津志、近藤豊, 福江島における大気中ブラックカーボン質量濃度の長期観測2009-2015: 湿性除去過程の統計的解析, 日本気象学会2016年度春季大会, 2016.
 - 6) 金谷有剛、Xiaole Pan, 宮川拓真、駒崎雄一、竹谷文一、鶴野伊津志、近藤豊, 日本地球惑星連合大会2016年大会, 2016.
 - 7) 朱春茂、小林秀樹、金谷有剛、齋藤正彦, Validation of MODIS MCD64A1 burned area in boreal Eurasia, 日本地球惑星連合大会2016年大会, 2016.
 - 8) Zhu, C., H. Kobayashi, Y. Kanaya, M. Saito, Assessment of MODIS burned area in Russia using higher resolution satellite products, AOGS 13th annual meeting, Beijing, 2016.
 - 9) Zhu, C., H. Kobayashi, Y. Kanaya, M. Saito, Accuracy evaluation of MODIS MCD64A1 burned area data product in boreal Eurasia, 2016 IGAC Science conference, 2016.
 - 10) Kanaya, Y., F. Taketani, X. Pan, T. Miyakawa, Y. Komazaki, I. Uno, Y. Kondo, Observations of atmospheric black carbon mass concentrations from East Asia to the open oceans: Constraining emission strengths and wet deposition rates, 2016 IGAC Science conference, 2016.
 - 11) Kanaya Y., X. Pan, T. Miyakawa, Y. Komazaki, F. Taketani, I. Uno, Y. Kondo, H. Matsui, K. Yamaji, C. Zhu, P. Mordovskoi, M. Takigawa, Long-term observations of black carbon at Fukue Island, western Japan, since 2009: constraining emission strengths from East Asia and wet removal rates relevant to long-range transport, 2nd PACES Workshop, Victoria, Canada, 2017.
 - 12) Ikeda K., H. Tanimoto, Y. Kanaya, C. Zhu, F. Taketani, Model analysis of long-range transport of black carbon to the Arctic with tagged tracer simulation, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2017.
 - 13) 金谷有剛, 海洋性大気中での汚染物質計測と数値モデル解析: アジアから北極まで, 第87回(平成29年) マリンエンジニアリング学術講演 シンポジウムIII: 「船舶と生物多様性」、東京都江東区, 2017.
 - 14) 小林秀樹, 「温室効果ガス観測衛星の環境科学への貢献と将来の展望」: 生態系リモートセンシングの視点から, 第64回日本生態学会 シンポジウム「温室効果ガス観測衛星の環境科学への貢献と将来展望」, 2017.
 - 15) 金谷有剛, 極域・外洋域の大気化学: ブラックカーボン起源などの未解明問題に迫る, 第39回低温研セミナー、札幌市, 2018.
 - 16) Kanaya, Y., F. Taketani, T. Miyakawa, Y. Komazaki, X. Pan, I. Uno, Y. Kondo, Observations of atmospheric black carbon mass concentrations from East Asia to the Arctic: Constraining emission strengths and wet deposition rates, Symposium-Frontiers of Atmospheric Aerosol Studies: Toward the Understanding of the Health and Climatic Effects, Nagoya, 2018.

- 17) Kanaya, Y., Japan's perspectives in future atmospheric chemistry studies, Scientists' meeting for future collaboration in atmospheric chemistry in China, Japan and Korea, Seoul, 2018.
- 18) Zhu C., Organic components of particulates in the atmosphere and ocean - Current progress and future directions, Special seminar, Nanjing University of Information Sciences and Technology, Nanjing, China, 2018.
- 19) 【予定】 Zhu C., Y. Kanaya, M. Takigawa, K. Ikeda, H. Tanimoto, F. Taketani, T. Miyakawa, H. Kobayashi, I. Pissò, Sources of Arctic black carbon simulated by Flexpart v10: comparison with GEOS-Chem results, 15th AOGS Annual Meeting, Honolulu, USA, 2018.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 本多牧生、竹谷文一、松本和彦、Eko Siswanto、朱春茂：海洋開発研究機構横須賀本部一般公開、2016年5月、PM_{2.5}に関する成果紹介
- 2) 本多牧生、竹谷文一、松本和彦、Eko Siswanto、関谷高志、金谷有剛、朱春茂：海洋開発研究機構横須賀本部一般公開、2017年5月、「PM_{2.5}ってなに？」とした展示発表
- 3) 竹谷文一、金谷有剛、関谷高志、朱春茂：海洋開発研究機構横浜研究所一般公開、2017年11月、PM_{2.5}に関する成果紹介

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朱春茂、小林秀樹ほか、海洋研究開発機構プレスリリース「北方ユーラシア林野火災による気候や環境への影響は想定以上か—耕作地の焼失面積は87%が未評価—」、2017年7月5日、
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20170705/
 - 2) 日刊工業新聞（2017年7月6日、朝刊3面、「ロシア・カザフ林野火災 地球温暖化への影響深刻」）
 - 3) 環境展望台（2017年7月5日、「林野火災に伴う耕作地の消失面積が過小評価されている可能性を指摘」）
- JSTサイエンスポータル（2017年7月10日、「林野火災の焼失面積は、これまで過小評価だった」）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Veira, A., Lasslop, G. and Kloster, S. Wild fires in a warmer climate: Emission fluxes, emission heights, and black carbon concentrations in 2090-2099. *J. Geophys. Res. - Atmos.*, 121, 3195-3223, doi:10.1002/2015JD024142, 2016.
- 2) Oliva, P. and Schroeder, W.: Assessment of VIIRS 375m active re detection product for direct burned area mapping. *Remote Sens. Environ.*, 160, 144-155, 2015.
- 3) Stohl, A., Hittenberger, M., and Wotawa, G.: Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiment data, *Atmos. Environ.*, 32, 4245-4264, 1998.
- 4) Grythe, H., Kristiansen, N. I., Groot Zwaafink, C. D., Eckhardt, S., Ström, J., Tunved, P., Krejci, R., and Stohl, A.: A new aerosol wet removal scheme for the

- Lagrangian particle model FLEXPART v10, *Geosci. Model Dev.*, 10, 1447-1466, doi:10.5194/gmd-10-1447-2017, 2017.
- 5) Huang, K., Fu, S. J., Prikhodko, Y. V., Storey, M. J., Romanov, A., Hodson, L. E., Cresko, J., Morozova, I., Ignatieva, Y., and Cabaniss, J.: Russian anthropogenic black carbon: emission reconstruction and Arctic black carbon simulation, *J. Geophys. Res. - Atmos.*, 120, 11306-11333, doi:10.1002/2015JD023358, 2015.
 - 6) Angert, A., Biraud, S., Bonfils, C., Henning, C. C., Buermann, W., Pinzon, J., Tucker, C. J. and Fung, I.: Drier summers cancel out the CO₂ uptake enhancement induced by warmer springs. *PNAS*, 102(31), 10823-10827, 2005.
 - 7) Kurokawa, J., Ohara, T., Morikawa, T., Hanayama, S., Janssens-Maenhout, G., Fukui, T., Kawashima, K., and Akimoto, H.: Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11019-11058, doi:10.5194/acp-13-11019-2013, 2013.
 - 8) Tohjima, Y., Kubo, M., Minejima, C., Mukai, H., Tanimoto, H., Ganshin, A., Maksyutov, S., Katsumata, K., Machida, T., and Kita, K.: Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄/CO₂ and CO/CO₂ correlations observed at Hateruma Island, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 1663-1677, doi:10.5194/acp-14-1663-2014, 2014.
 - 9) Yumimoto, K., Uno I., and Itahashi S.: Long-term inverse modeling of Chinese CO emission from satellite observations. *Environ. Pollut.*, 195, 208-318, doi:10.1016/j.envpol.2014.07.026, 2014.
 - 10) Zhang, Q., Streets, D. G., Carmichael, G. R., He, K. B., Huo, H., Kannari, A., Klimont, Z., Park, I. S., Reddy, S., Fu, J. S., Chen, D., Duan, L., Lei, Y., Wang, L. T., and Yao, Z. L.: Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5131-5153, doi:10.5194/acp-9-5131-2009, 2009.

III. 英文Abstract

Impacts of Short-Lived Climate Pollutants from Asia on the Arctic Climate and Environment

Principal Investigator: Hiroshi TANIMOTO

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN
Tel: +81-29-850-2930 / Fax: +81-29-850-2579
E-mail: tanimoto@nies.go.jp

Cooperated by: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

[Abstract]

Key Words: Arctic, Climate, Air pollution, SLCP, Black carbon

Black carbon (BC) is one of key air pollutants that have great impacts on the climate and environment in the Arctic, where temperatures have increased more rapidly than the global average during the recent decades. East Asia is considered to be a major source region of anthropogenic pollutants with its BC emissions having a dominant contribution of 36 % in the northern hemisphere. We examined pathways and efficiency of transport of BC from various anthropogenic and biomass burning emission sources to the Arctic as well as quantified the source contributions, by Asia-specific tagged tracer simulations implemented in a global chemistry-transport model. We found that BC emitted from East Asia was transported mainly in the middle troposphere (~5 km) into the Arctic due to uplifting during the poleward transport. The East Asian contribution was dominant for BC in the middle troposphere (41 %) and the BC burden over the Arctic (27 %) because of its large emissions. This suggested that East Asia BC is important for radiative forcing at the top of the atmosphere. In contrast, BC emitted from Europe and Russia was transported to the Arctic mainly in the lower troposphere during winter and spring, i.e., the Arctic haze season. In particular, Russia BC had a dominant contribution of 62 % to the Arctic BC near the surface and 35 % to the deposition as annual mean. This suggested that BC from Russia and Europe is more important for surface air pollution and warming in the Arctic. We also made statistical analysis of the observations of BC and carbon monoxide (CO) at Fukue Island to estimate the BC emissions from the source regions in East Asia. The BC/CO ratios estimated for the emissions sources in central Eastern China and Korea were significantly smaller than the BC/CO emission ratios used in the bottom-up emission inventory Regional Emission inventory in Asia (REAS) version 2, by factors of 1.3 and 2.8, respectively. This strongly pointed to the necessity of revising the emission database. The BC emission rates from individual regions were estimated by multiplying the observed $\Delta BC/\Delta CO$ ratios by reliable estimates of the CO emission rate. The estimated rates from China, Korea, and Japan were 0.90–1.1, 0.0046, and 0.027 Tg y⁻¹, respectively. The amount for Japan was comparable to a bottom-up estimate from REAS version 2, 0.026 Tg y⁻¹.