

東京大学新領域創成科学研究科

環境学研究系自然環境学専攻

地球環境モデリング学分野

平成 28 年度 修士論文

西シベリア・北極域におけるブラックカーボン

航空機観測のためのモデルデータ解析

Analysis of model data for the aircraft observation of black carbon
over west Siberia and Arctic region

2017 年 1 月 19 日提出

2016 年度 3 月修了

指導教員 今須良一 准教授

47-156608 太田一世

目次

第1章 序論.....	2
1.1 ブラックカーボン (BC)	3
1.2 数値シミュレーション	4
1.3 ロシアにおける BC 発生と航空機観測	5
1.4 本研究の目的	7
第2章 手法と使用データ	8
2.1 研究フロー	8
2.2 本研究に用いたエアロゾルシミュレーションモデル	9
2.2.1 NICAM-Chem	9
2.3.2 SPRINTARS	9
2.2.3 CHASER	10
2.2.4 NICAM-Chem の精度検証	10
2.2.5 実験設定	11
2.3 対象地域 (西シベリア)	13
第3章 モデルデータ解析結果.....	14
3.1 ブラックカーボン濃度分布	14
3.2 西シベリアから北極域へのブラックカーボンの輸送量評価	18
3.3 西シベリア域周辺の輸送フラックス	21
3.3.1 高度水平輸送フラックスの算出	21
3.3.2 水平輸送フラックスの詳細分析	22
3.4 境界面輸送解析	26
3.4.1 東経 30 度境界面における東西輸送解析	26
3.4.2 北緯 50 度境界面における南北輸送解析	28
3.4.3 北緯 75 度境界面における南北輸送解析	29
3.5 モデルデータ解析結果まとめ	31
第4章 航空機観測に関する考察.....	32
4.1 モスクワにおける航空機観測.....	32
4.2 航空機観測シミュレーション	34
4.3 航空機観測計画策定についての考察.....	36
第5章 結論.....	37
参考文献	39
謝辞.....	42

第1章 序論

近年の地球温暖化をはじめとした気候変動は、主に人間活動に伴う環境の変化によって引き起こされる。特に、放射収支変化に影響を与える大きな要因の一つとして、エアロゾルが挙げられる。エアロゾルとは、空気中に浮遊した微粒子を指し、形態は液体・個体または両者の混合である（笠原, 2007, エアロゾルの大気環境影響）。また、二酸化炭素などの温室効果ガスとは異なり、その粒径は数 nm の微小粒子から数 μm の粗大粒子まで幅広く存在し、化学組成としても自然起源のダスト・海塩・鉱物、人為起源が主なブラックカーボン、有機エアロゾル、硫酸塩エアロゾルなど多様である。

エアロゾルは気候影響・健康影響・生態影響などといった様々な影響を地球にもたらす。中でも気候変動において重要な二つの作用が、エアロゾルの直接効果と間接効果である。直接効果というのは、エアロゾルの光学特性、すなわち、エアロゾルがどの程度太陽の光を吸収あるいは散乱するかで地球の放射収支に影響を及ぼすことである。硫酸塩や有機物のエアロゾルはほぼ透明で光を反射・散乱させるので、大気や地表面は冷却される。一方、ブラックカーボンは黒色であり光を吸収し、大気を加熱させる。間接効果とは、エアロゾルが雲凝結核としての作用を持ち、その増加が水滴・雲を生成する過程で雲の放射収支や降水のパターンを変化させ、間接的に気候影響を及ぼすことをいう（図 1.1）。

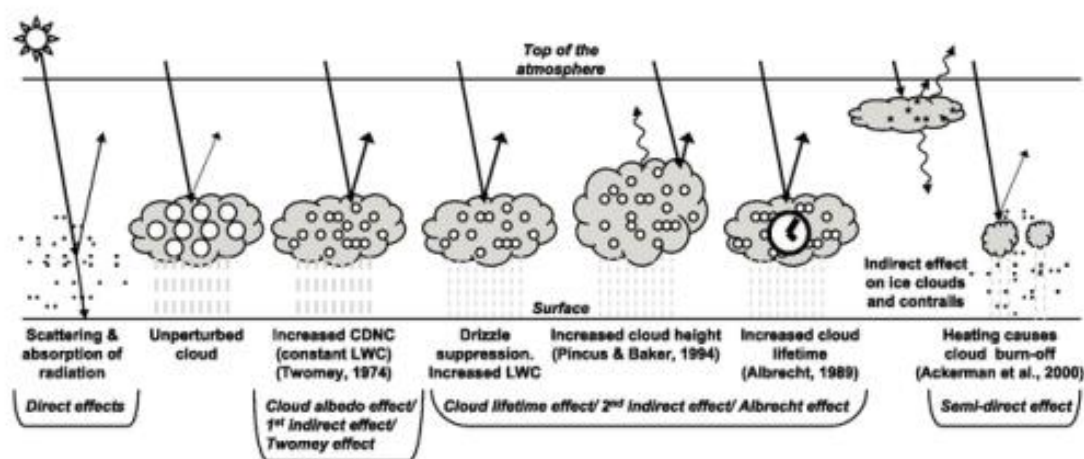


図 1.1: エアロゾルの気候影響に関する定性的図説（IPCC:2007, Fig2.10 より）

以上のように、エアロゾルは多様な形態と、様々な化学的性質・影響を持つ微細な物質である。そのため、エアロゾルの大気環境影響に対する不確実性は大きく（図 1.2）、その空間分布や関連する現象の解明は気候変動を定量的に評価するうえで極めて重要である。



図 1.2：気候変動をもたらす主な駆動要因の 1750 年を基準とした 2011 年における放射強制力の推定値と要因ごとに集計された不確実性（IPCC AR5, 2013, 政策決定者向け要約）

1.1 ブラックカーボン（BC）

ブラックカーボン（黒色炭素、以下 BC と略す）はエアロゾル微小粒子（PM_{2.5}）のうち、およそ 1~5%の重量を占める黒色の微量物質で、一般的には「すす」として知られている（JAMSTEC とブラックカーボン研究, 2015）。BC は石炭の燃焼、バイオマスバーニング、ディーゼルエンジンの排気ガスなど、炭素の不完全燃焼によって発生する。前述のように、硫酸塩などの多くのエアロゾル物質は太陽放射を反射することで負の放射強制力を持つが、BC は可視光・赤外線などを吸収するために正の放射強制力をもつとされている。IPCC-AR5 によると、地球温暖化全体への影響のうち二酸化炭素の割合は 43%、メタンガスが 27%、次いで第 3 位が BC で、12%の影響力を持っているともいわれている。また、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC）第 5 次報告書においても、エアロゾルによる雲調整を含む大気中の全エアロゾル効果の 1750 年に対する 2011 年の放射強制力の推定値は $-0.9 [-1.9 \sim -0.1] \text{ W m}^{-2}$ であり、これはほとんどのエアロゾルの負の強制力および BC による太陽放射の吸収による正の放射強制力の寄与の結果で

あるとされている（図 1.2）。一方で、エアロゾルおよびその雲との相互作用は、全放射強制力の最大の不確実性に寄与しているとも考えられている（IPCC AR5, 2013）。

更に、BC は大気中での太陽放射の吸収による温室効果以外にも、雪氷面に付着することで太陽放射に対するアルベドを低下させ、氷河の融解を促進する性質がある（Aoki et al., 1998; Hansen et al., 2005）。また、氷河の融解によって更にアルベドは低下し、負のフィードバックを引き起こす（図 1.3）。ゆえに BC は、極域、特に人為的発生源が近くにある北極圏においては大きな環境変動要因となるため、BC の高緯度帯での動態を明らかにすることは重要である。このように気候変動に対して大きな影響力が懸念されている BC だが、その挙動に関しては基礎的な部分を含め、未解明な部分が多い（北極域環境変動総合研究センター, 2015）。

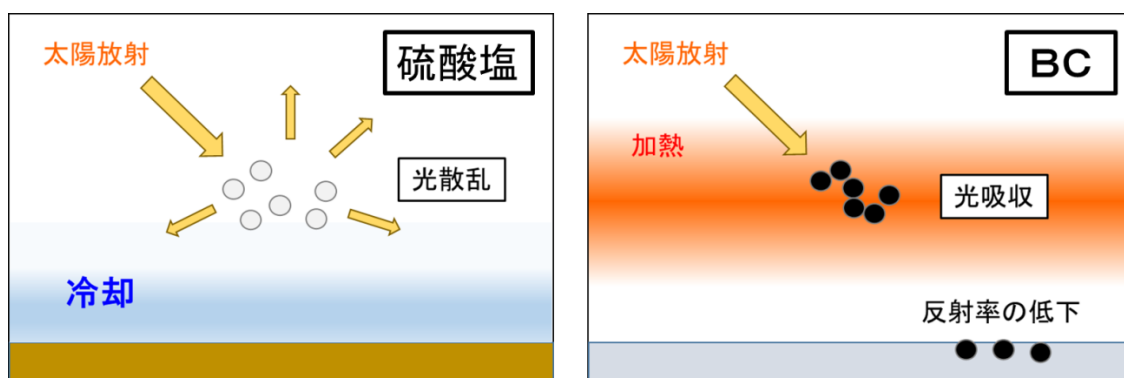


図 1.3：ブラックカーボンの温暖化影響模式図

（左）硫酸塩エアロゾルによる太陽放射の反射と冷却効果

（右）BC による太陽放射の吸収と雪氷面におけるアルベドの低下

1.2 数値シミュレーション

エアロゾルに限らず、大気中の物質を調査するためには直接観測による状況の把握は必要不可欠である。しかし、エアロゾルは上記のように複雑な形態と多様な性質を持つのに加え、対流圏での寿命が短く、時空間の変動性が非常に大きい。また、衛星観測などのリモートセンシング技術によってエアロゾルを広域的に観測することは可能であるが、種類別ではなく混合された状態で捉えてしまう。よって直接的な観測事実のみによる全球・定量的な濃度分布・輸送経路・輸送量の推定は非常に難しく、広範囲の気候影響を考察するためには観測と数値モデルによるシミュレーションを相互に利用することが極めて有効である。

数値モデルによるシミュレーションとは、発生源からの汚染物質の輸送と変質をシミュレートして汚染状況を推定することである。発生源から排出されたエアロゾルは、風下方向に移流しながら風の乱れによって水平および鉛直方向に拡散する。エアロゾルは大気中

において物理・化学的に変質し、様々にその形態を変化させる。最終的にエアロゾルは、降水などによって沈着したり（湿性沈着）、風によって、または重力によって地表へと運ばれる（乾性沈着）。このように、エアロゾルは、排出、移流・拡散、生成・変質、除去というプロセスを経て輸送される。エアロゾルのモデルシミュレーションにおいては、こういった各プロセスの時空間変化が微分方程式で表現され、その式を解くことによって大気中のエアロゾル濃度を計算している（環境省, 2007, 微小粒子状物質健康影響評価検討会）。

現在、エアロゾルの詳細な挙動を研究するためのモデルとしては、非定常数値型の3次元オイラー型モデル（グリッドモデル）が用いられることが多い。こういったモデルは世界中で開発されており、観測結果との比較を通して常に改良され急速に精緻化されている（Ghan and Schwartz, 2007）。

1.3 ロシアにおける BC 発生と航空機観測

1.1 節で述べたように BC の温暖化作用は雪氷面、つまり極域において大きいといえる。南極域においては、氷河の融解による海面上昇という致命的な気候変動が危惧されること、そもそも観測基地が複数存在し、連続観測が可能なことなどから、エアロゾルの研究は豊富である。しかし、南極大陸は地理的に人間活動・大規模な燃焼活動等から隔離されており、南極圏内の BC ソースは基地での人間活動や航空機・船舶活動などに限定され、その絶対量は小さい（Hara et al., 2010）。一方で北極域に関しては、人間活動・燃焼活動の影響を強く受ける場所に位置しており、BC をはじめとした温室効果物質が比較的多量に存在している。それにも関わらず、その実態解明は進んでいるとはいえない。こうしたことの原因の一つとして、ロシアの観測における諸問題が挙げられる。以下にその背景を示す。

ロシアはその国土の北辺の大部分が北極域に面しており、北極域への BC 輸送の寄与率は非常に大きいと考えられる。ロシア西部においては、近年の急速な経済発展により、人間活動が活発になっているほか、夏季には頻繁に大規模な森林火災が発生している。森林火災はバイオマスの燃焼によって大量の BC を排出するが、[Forest Fires in Europe 2009, EC Report No.10]によると、ロシアの 1980~2009 年までの平均森林火災面積は 100 万 ha 以上であり、これはアメリカ、カナダと並んで世界最大級の規模である。特に、シベリアの壊滅的な森林火災による PM_{2.5} の大気汚染は、北日本にまで及んでおり（Ikeda et al., 2015）、日本よりも距離の近い北極域への影響は非常に大きいと考えられる。また、ロシアは世界有数の天然ガス生産国であり、日本ガス協会によれば 2014 年の生産量はアメリカに次いで世界第 2 位の 5787 億 m³ である。天然ガスは flaring の過程において BC やメタンを発生させるため、これも重要な排出源となる。

このようにロシアにおける BC およびエアロゾルの発生は深刻であるにも関わらず、その観測網は不十分である。例えば、NASA による全球的なエアロゾルの地上観測ネットワー

クである AERONET (AErosol RObotic NETwork) の観測サイトは 2016 年現在、ロシア国内に 6 つしかなく、観測の空白域が顕著である。特にロシア中部における連続観測情報は大きく不足している (図 1.4)。

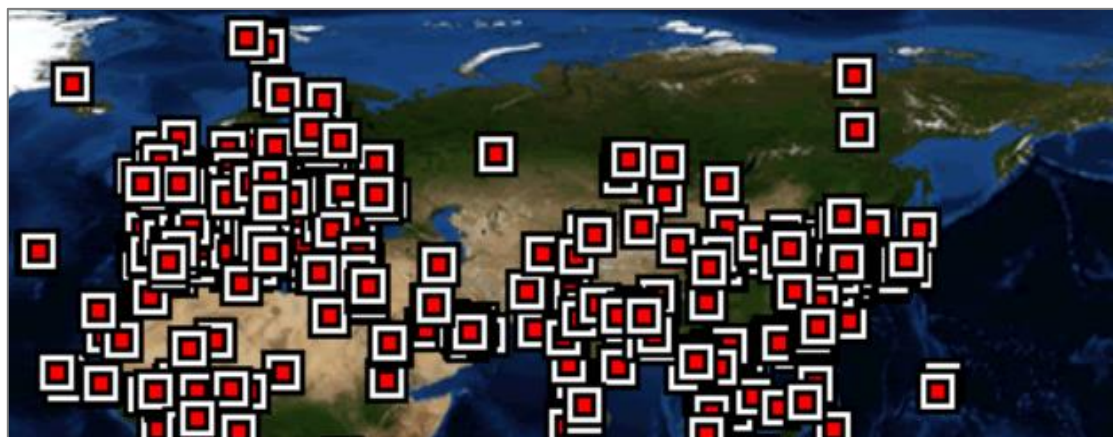


図 1.4 : AERONET サイトの分布 (NASA, AERONET ホームページより)

観測空白域への対策として、新たに地上観測網を密に設置することは、国土が広大なことも相まって費用や維持管理といった面で困難である。そこで有効な手段の一つとして挙げられるのが、一度に広範囲を観測できる航空機観測である。衛星観測によっても全球を効率的に観測できるが、前述したように大気の高さ方向の積分量でしか測定できない。それに対し、航空機観測の利点はエアロゾルの粒径分布や化学組成といった、微物理量とその高度分布を直接測定できることにある。また、こうした航空機による広範囲の精密な観測データはモデルデータ、地上観測データ、衛星データを比較検証する際にも有用である。しかし、政治的背景からロシア国内で飛行可能な航空機は非常に限られており、他国の調査団による飛行が困難であった (日本気象学会, 航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進研究計画書, 2015)。そのため、ロシア周辺域における大気環境の航空機観測は今まで積極的に行われてこなかった。

そうした中、2013 年にロシア天然資源・環境省に所属するロシア水文気象環境監視局 (ROSHYDROMET) の中央高層大気観測所 (CAO) は、対流圏観測用の主力航空機として「Yak-42D」を導入し、観測を開始した。Yak-42D は様々な観測機器を搭載しており、ブラックカーボン単一粒子測定装置 (SP2) というセンサーによって BC の観測も行われる。そしてこれを受け、その運用に関する研究課題として「衛星と航空機による欧州から西シベリア・北極域と輸送される大気汚染物質の解析」が東京大学大気海洋研究所 (AORI) との共同プロジェクトとして採択された。そして、この枠組みと東大 AORI—CAO/ROSHYDROMET 間の研究協力協定に基づき、飛行経路や日時を指定する観測要求を提案することが可能となった (Imasu et al., 2014)。この計画は 2014~2033 年 (計 20

年間）にわたる長期プロジェクトであり、ロシア国内の観測空白域を補い、北極域への BC 輸送実態解明について有用な観測情報を得ることが期待できる。



図 1.5 : Yak-42D 図 観測ルートの一例

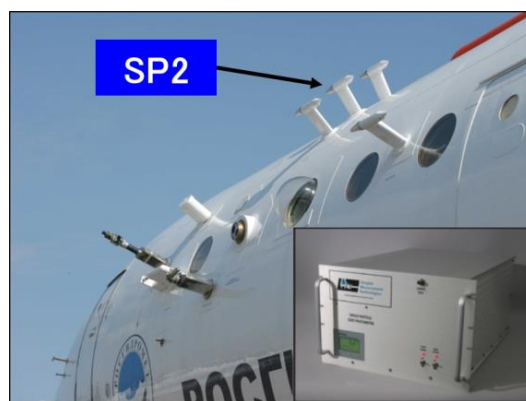


図 1.6 : BC 観測装置 Single Particle Soot Photometer (SP2)

上記のような背景に加え、航空機観測は一度の観測に多額の費用がかかること、政情的不安から観測頻度が保証されないことなども考慮すると、ロシア（西シベリア）の航空機観測において効率的なフライトプランを提案することは、プロジェクトの成功、ひいては BC の環境影響評価という観点から極めて重要である。

1.4 本研究の目的

本研究では、数値モデルを用いたシミュレーションデータの解析を通して、ロシア、特に西シベリアの航空機観測が行われる地域での BC の濃度分布や輸送経路の時空間変動を明らかにする。更に、BC の北極域への流入について分析し、その流入量や季節変化、高度依存性といった特徴的な現象の解析を行う。それにより、短期的にはロシアの航空機観測のルート策定に知見を与えるとともに、長期的には BC の環境影響評価に貢献することを本研究の目的とする。更に、本研究は AORI-CAO によるロシア航空機観測プロジェクトの初期段階に位置し、その発展に有用な基礎的情報を提供することを目標とする。

第2章 手法と使用データ

本研究では、NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) -Chem のエアロゾルシミュレーションデータを用いた。なお、このモデル計算の実行は国立環境研究所主任研究員の五藤大輔氏に行って頂いた。本データをもとに西シベリアおよびその周辺域における BC 濃度分布、水平輸送フラックス等を計算し、解析を行った。以下に研究フローと対象地域、使用データの詳細を示す。

2.1 研究フロー

本研究では、NICAM-Chem の 2006 年のデータを解析することで BC の時空間変動を明らかにする。この出力データには、BC・含炭素エアロゾル、硝酸塩、海塩、ダストといった各エアロゾルの濃度と光学的厚さ、気温や風速、降水フラックス等の気象情報などが含まれており、各種データのコンポジット解析を行うことで BC の時空間変動を明らかにする。

また、モデルシミュレーション内において疑似的に航空機観測を行う航空機観測シミュレーションプログラムを作成し、その結果に基づいた航空機観測ルートの考察を行う。図 2.1 は研究の流れをフローチャートにまとめたものである。

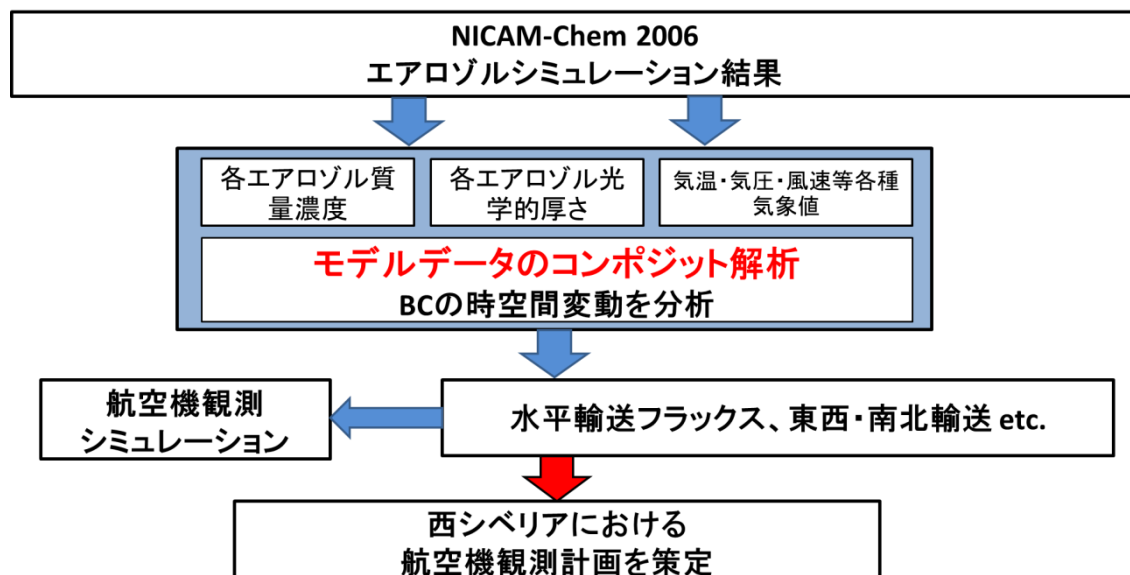


図 2.1：研究のフローチャート

2.2 本研究に用いたエアロゾルシミュレーションモデル

2.2.1 NICAM-Chem

NICAM-Chem とは、全球非静力正 20 面体大気モデル(NICAM)に、エアロゾル全球放射輸送モデル (SPRINTARS) と全球大気化学モデル (CHASER) を結合させた比較的新しい化学輸送モデルである。以下にそれぞれのモデルの概略とその長所を示す。

NACAM とは、富田浩文・佐藤正樹氏によって開発が始められ、現在では東京大学大気海洋研究所 (AORI)、海洋研究開発機構 (JAMSTEC)、理化学研究所計算科学研究機構 (RIKEN/AICS) を中心として共同開発が進められている非静力学正 20 面体格子大気モデルである (Tomita and Satoh., 2004, Satoh et al., 2008)。NICAM は正二十面体の一面 (三角形) を 4 分割してグリッドを生成するため (図 2.2)、解像度を上げてても格子が集中することが無く、超高分解能の計算が可能となった。また、それにより従来の大気大循環モデルでは不可能であった積雲の解像がなされており、不確実性を含んでいるといわれる積雲パラメタリゼーションを用いない計算を実現している。その解像度は正二十面体からの分割回数で定められており、glevel-0 から glevel-11 までの 12 段階の分割が可能で、5 回分割した glevel-5 での水平解像度は格子間隔約 240km となる。本研究においては、高緯度であっても精度を保つことができるという点が有用である。

また、NICAM は格子点を一点に集めることで局所的な高解像度計算 (ストレッチ法) が可能であり、領域モデルとして扱うことができる。こうした NICAM の柔軟性は他モデルと比べて有利であり、今後の研究の拡張性という観点からも有効なモデルである。

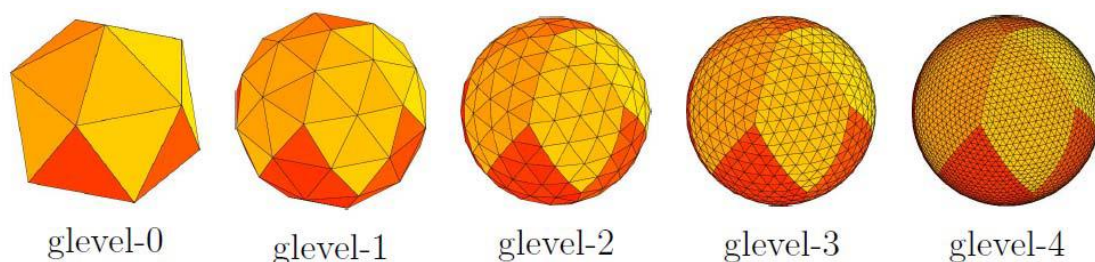


図 2.2: NICAM の格子構造と格子分割による解像度の変化

2.3.2 SPRINTARS

SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) とは、九州大学応用力学研究所気候変動科学分野が中心となって開発した数値モデルで、エアロゾルの輸送過程 (発生・移流・拡散・硫黄化学反応・湿性沈着・乾性沈着・重力落下) や直接効果 (太陽放射・赤外放射の散乱・吸収)・間接効果 (雲凝結核・氷晶核の機能を通じた雲・降水特性の変化) を計算することができる (Takemura et al., 2005)。東京大学大気海洋研

究所（気候システム研究系）・国立環境研究所・海洋研究開発機構が開発している大気海洋結合モデル MIROC をベースとして開発されてきたが、現在では NICAM にも実装されている。本モデルは、IPCC AR4（2007 年）のエアロゾルによる気候への影響評価において、アジアから唯一貢献した国際的に認められたエアロゾルモデルである（九州大学応用力学研究所 SPRINTARS ホームページより）。

2.2.3 CHASER

CHASER (CHemical AGCM for Studies of atmospheric Environment and Radiative forcing) とは、名古屋大学、JAMSTEC、地球環境フロンティア研究センター (FRCGC) が中心となって開発した化学・気候結合の化学輸送モデル (Chemistry Coupled Climate Model) である。対流圏・成層圏における大気光化学過程を全球的に計算し、その気候への影響を評価することができる（名古屋大学 CHASER ホームページより）。対流圏の化学反応過程はエアロゾル粒子の生成に影響するため、エアロゾルの計算精度の向上が期待され、本研究では SPRINTARS に加え、CHASER も結合させた NICAM-Chem を用いた。

2.2.4 NICAM-Chem の精度検証

NICAM-Chem は全球規模のエアロゾル分布のシミュレーションに適しており、良い精度を示すことが先行研究で明らかになっている。[Dai et al., 2014]では NICAM-Chem の精度を検証するため、エアロゾル光学的厚さ (AOD)、Ångström Exponent (AE)、Single scattering Albedo (SSA) について、2006～2008 年のシミュレーション結果と 196 の AERONET 地上観測結果を比較している（図 2.3）。

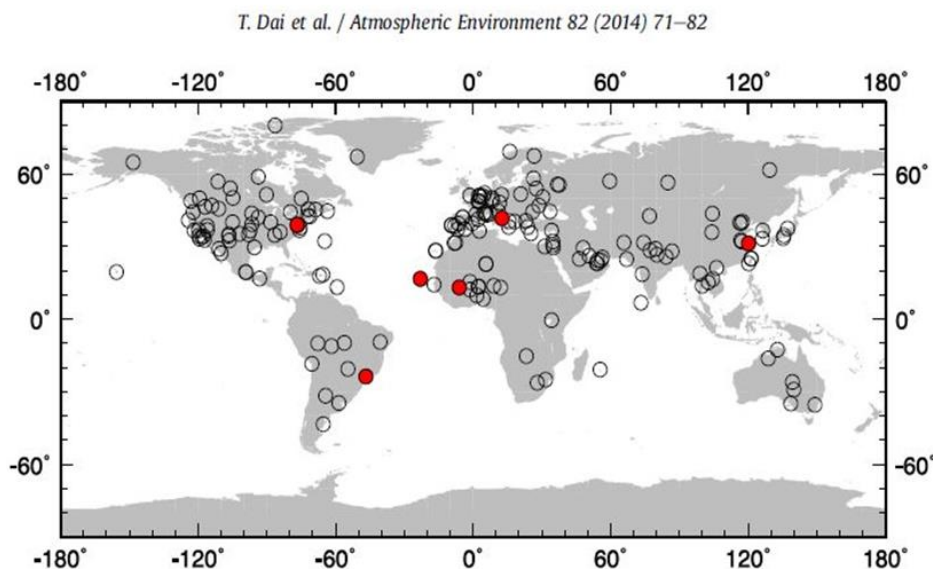


図 2.3：比較対象とした 196 の AERONET サイト（Dai et al., 2014 より）
赤点は[Dai et al., 2014]で詳細解析を行った地点

その結果として、AOD および AE の時間空間分布は、AERONET のものとよく一致したことが報告されている。また、3 年間の全球平均した AOD と AE は、モデルと AERONET との間で相関係数がそれぞれ 0.753 と 0.735 であり、モデルの AOD 値の 82.1% が AERONET の AOD 値の 2 倍以内で一致することを示している。これらの結果は、このモデルが、地球規模の気候影響に関連したエアロゾルの時間空間変動の解析研究に使用するのに適していることを示している。

2.2.5 実験設定

・排出インベントリと物理スキーム設定

本研究では、気象場をナッジングした 2006 年の NICAM-Chem シミュレーションデータを用いる。NICAM のエアロゾル計算でこうしたナッジングを行っているデータは少ない。気象場の初期値としては NCEP-FNL を与え、風のナッジングは NCEP-FNL、海面水温 (SST) と海氷は NCEP-FNL の気候値月平均値を与えている。また、水平解像度は glevel-5 (格子間隔約 240km) であり、これは積雲を解像できるほどの分解能ではないため、積雲パラメタリゼーションが必要である。本研究では、積雲対流パラメタリゼーションは (Arakawa and Schubert, 1974; Emori et al., 2001) のものが用いられている。また、その他の物理スキームとして、層雲スキームは大規模凝結 (Le Treut and Li, 1991)、放射スキームは MSTRNX (Sekiguchi and Nakajima, 2008)、乱流スキームは MYNN2 (Meller and Yamada, 1974; Nakanishi and Niino, 2004; 2009)、地表面スキームは MATSIRO (Takata et al., 2003) を用いている。

また、排出インベントリは基本的には Takemura et al. (2005, JGR) で使用したものを用いており、国連食糧農業機関 (FAO)、Global Emissions Initiative (GEIA)、A.S.L & Associates のデータベースを参照している。但し、BC と SO₂ のアジア領域においては INTEX-B (Zhang et al., 2009, ACP) を用いている。

・時空間解像度設定

水平解像度は glevel-5 (約 240km) で鉛直層は 40 層 (約 0~40000m)、計算結果の出力の時間解像度は 1 日平均である。

・実験設定まとめ

本研究で用いる NICAM-Chem エアロゾルシミュレーションの実験設定を表 2.1、出力データを表 2.2 にまとめた。

表 2.1 : NICAM-Chem 実験設定

水平解像度	Glev1-5 (格子間距離約 240km)
鉛直層	40 層 (約 0~40000m)
時間解像度	1 日 (平均値)
気象場初期値	NCEP-FNL
ナッジング データ	風は NCEP-FNL SST と海氷は NCEP-FNL の気候値月平均値
排出 インベントリ	Takemura et al. (2005, JGR) INTEX-B (Zhang et al., 2009, ACP)
層雲	大規模凝結 (Le Treut and Li, 1991)
積雲	積雲パラメタリゼーション (Arakawa and Schubert, 1974; Emori et al., 2001)
放射	MSTRNX (Sekiguchi and Nakajima, 2008)
エアロゾル	SPRINTARS (Takemura et al., 2005)
乱流	MYNN2 (Meller and Yamada, 1974; Nakanishi and Niino, 2004; 2009)
地表面	MATSIRO (Takata et al., 2003)

表 2.2 : 主な出力データ一覧

出力データ	単位
Concentration of black carbon (BC)	kg/m ³
Pressure	Pa
Relative humidity (RH)	—
Air density	kg/m ³
Air temperature	kg/m ³
U-wind	m/s
V-wind	m/s
W-wind	m/s
Cloud water path (Column amount)	kg/m ²
Mixing ration of water vapor at 2-m height	kg/kg
Surface pressure	Pa
Aerosol optical thickness of carbonaceous aerosols including OC and BC	—
Precipitation flux	kg/m ² /s

2.3 対象地域（西シベリア）

研究対象地域として北緯 50～75 度、東経 30～80 度を「西シベリア」として設定し（図 2.4）、境界面や領域内、周辺域の解析を行った。対象地域の範囲は以下の理由から設定した。

- 1) ロシア領セヴェルヌイ島では北緯 75 度以北に氷河がみられ、BC の輸送による雪氷面への影響を評価する地域として適している
- 2) 東経 30 度はロシアとヨーロッパの境界であり、ヨーロッパから飛来する汚染物質の評価に適している
- 3) ロシアの主要都市群を含んでいる
- 4) シベリアでは BC の主要な排出源である大規模な森林火災が頻繁に発生している
- 5) ロシア国内において貴重なエアロゾル地上観測サイトが存在し観測意義が大きい

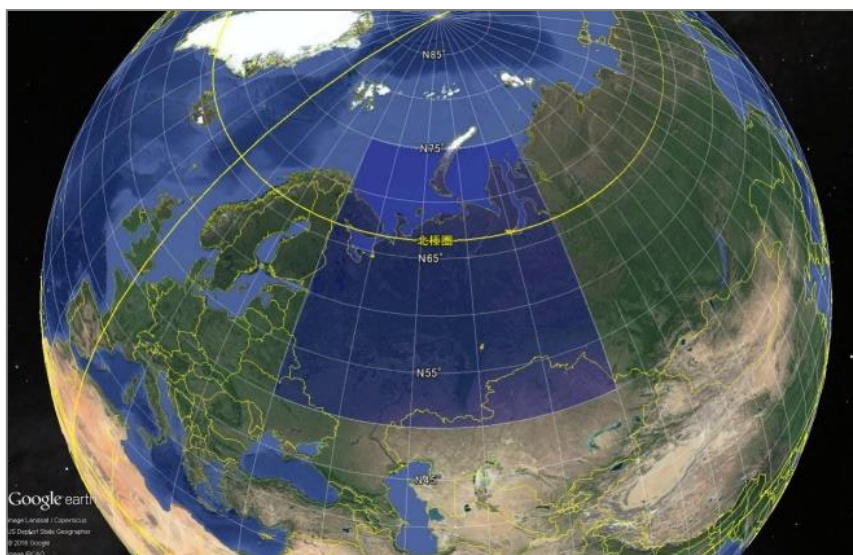


図 2.4：設定した西シベリア域の範囲（青枠内が対象地域）

第3章 モデルデータ解析結果

NICAM-Chem のモデルデータ解析を通して BC の挙動の分析を行った。3.1 節では基本的な BC 濃度分布、地上から上空 10km までの平均 BC 濃度の水平分布および緯度・経度断面方向の高度分布を示す。次に 3.2 節において、ロシア域から北極域への BC 輸送の影響を評価するために、BC の輸送量とその時間変動、領域内気柱量の比較などを行った。3.3 節では、BC の一定高度までの水平輸送フラックスを分析した結果を示す。そして 3.4 節では、BC の領域内外における流出入を調べるために、BC の東西・南北輸送について各断面における高度依存性とその季節変化についてまとめた。

なお、以下における解析結果では 1 月（1~31[Julian Day]）のデータは除いている。これは、計算結果が通常に比べて明らかに異常な値を示していたためであり、その理由としては計算におけるスピナップ期間の不足が原因であると考えられるからである。

3.1 ブラックカーボン濃度分布

BC の基本的な情報として濃度分布の分析を行った。図 3.1 は北半球の年間鉛直平均 BC 濃度分布を自然対数スケールで表したものである。北半球では中国、アフリカ中部、メキシコ中部に高濃度帯が存在し、次いでインド、中東地域、アメリカ中部で濃度が高い。高緯度帯はこれらの地域に比べて絶対的な濃度は低いが、人間活動や燃焼活動の盛んなヨーロッパおよびロシア西部において比較的濃度の高い一連の地帯が存在する。

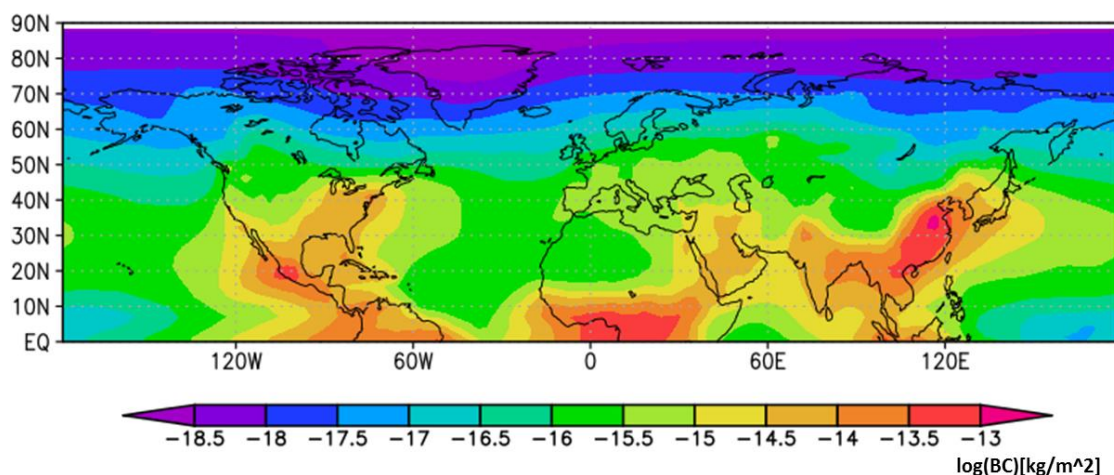


図 3.1：北半球の年平均 BC 濃度分布（自然対数スケール）

西シベリア域の詳細な濃度分布をみるために、地上から高度 10km までの高度平均の月平均濃度分布図を作成した（図 3.2）。どの月においても中東とインド付近の高濃度帯が見られるが、全体的な濃度は大きく時間変化している。2～4 月、10～12 月は一様に濃度が低く、5～8 月にかけて濃度は高くなり、7 月において最も高緯度まで高濃度帯が広がる（図 3.3）。この時期は中東域やモスクワ周辺で濃度の上昇が見られるほか、北緯 60 度、東経 60 度周辺に高濃度域が発生する。この理由としてはまず森林火災による BC 発生が考えられる。このウラル中部域では頻繁に森林火災が発生しており（日本気象学会, 第 13 回統合的陸域圏研究連絡会, 2012）、その頻度は特に夏季において高い。また、この地域はロシア有数のアルミ工場があるクラスノトゥリンスクが存在するなど、工業活動の盛んな地域であり、シミュレーションによる日変動を見ても常に一定の BC 発生が見られる。

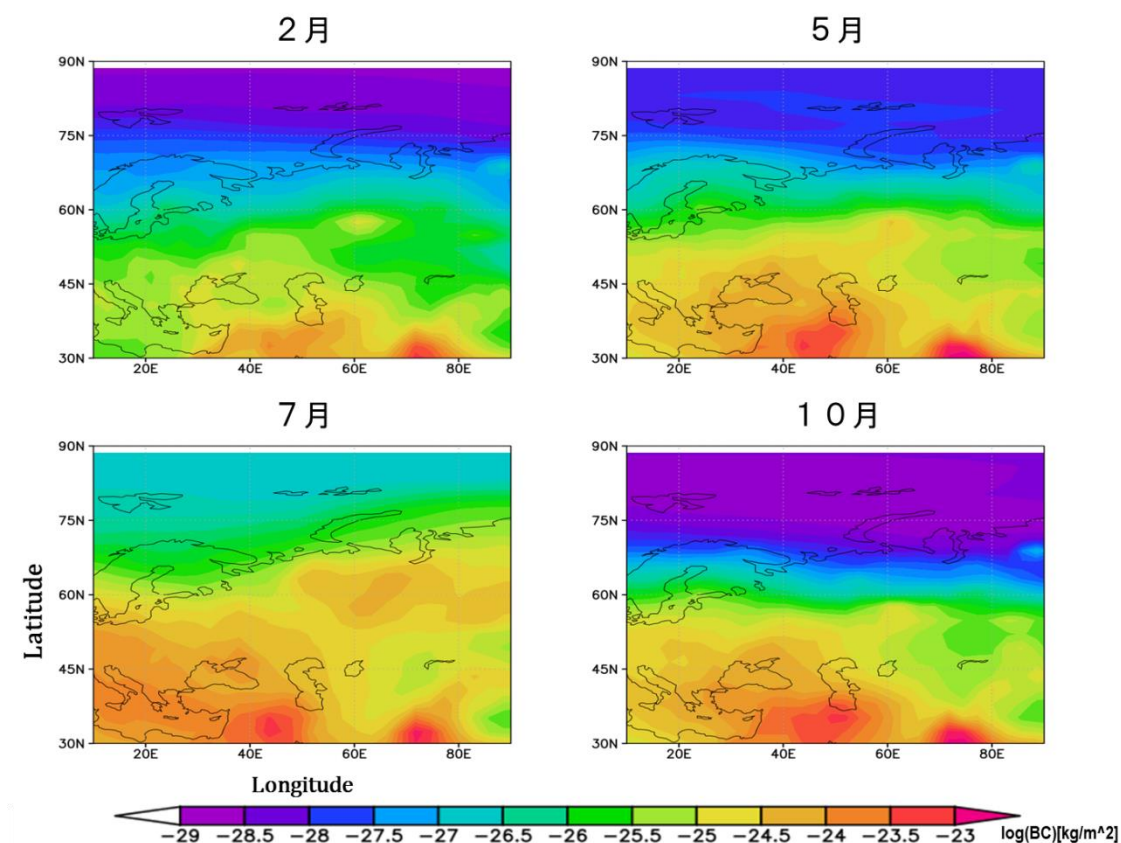


図 3.2： 計算された 2 月、5 月、7 月、10 月における
地上から 10km までの平均 BC 濃度分布（自然対数スケール）

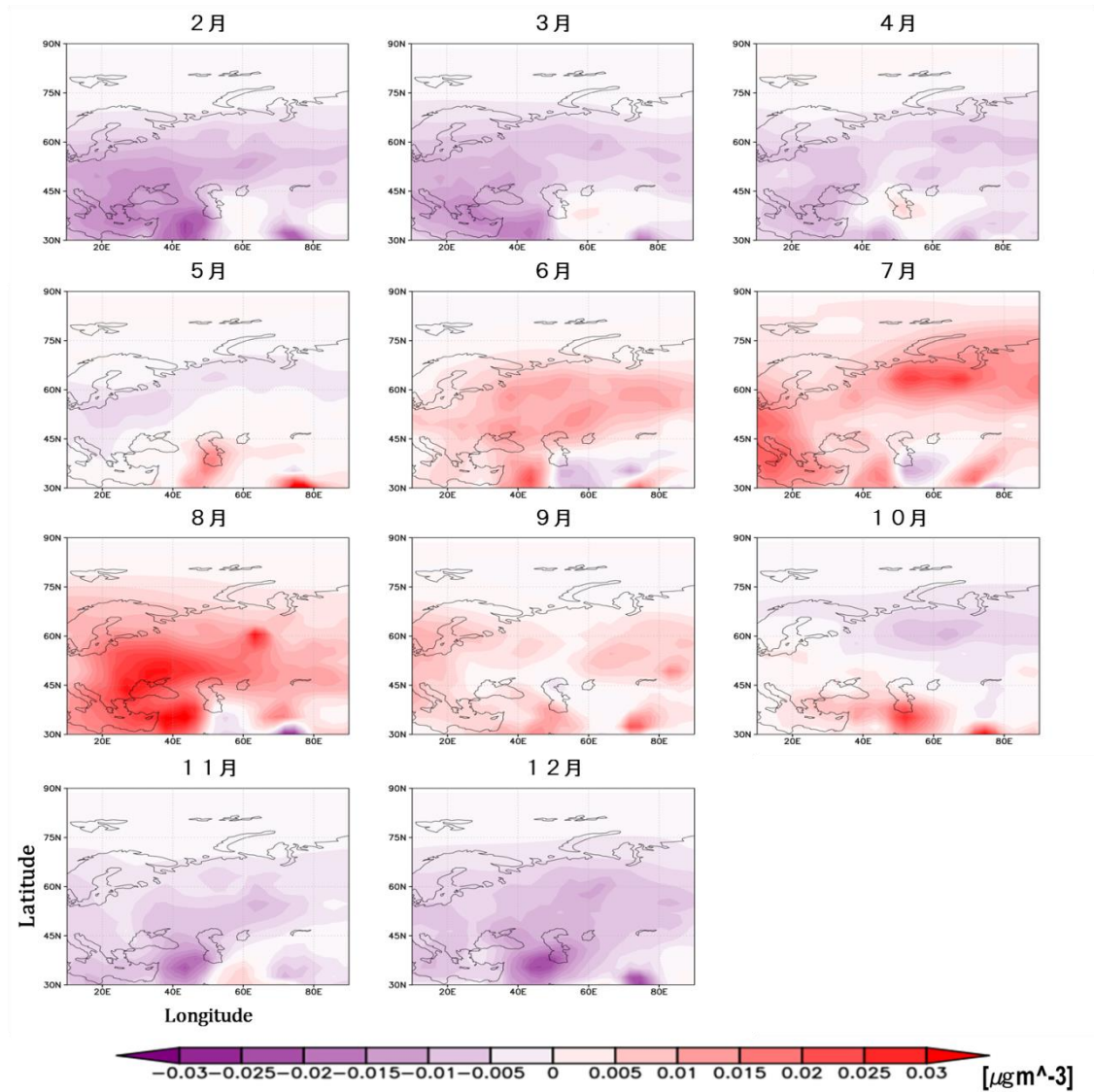


図 3.3： 各月の BC 濃度の年平均からの偏差（月平均－年平均）
赤が平均より上、青が平均より下であることを示している

次にどの程度の高度まで BC が分布しているのかを知るために、図 3.4 に高度別の BC 年平均濃度を、図 3.5 には年平均した西シベリア域の領域平均 BC 濃度の高度分布を示す。なお、図 3.5 において低高度が非常に小さな値となっているのは、山岳などの地形によってある高度までのモデル計算値が 0 となっている地域を含むためである。これを見ると地上付近が最も濃度が高く、上空に行くにつれて減少していき、高度 4000m 付近では西シベリア域にはほぼ分布していないことがわかる。一方、中東域などの高濃度帯では 6000m 程度まではある程度の濃度で分布しており、BC は高濃度の発生源付近では高高度まで上昇し、その後 3000m 以内で分布するものと考えられる。

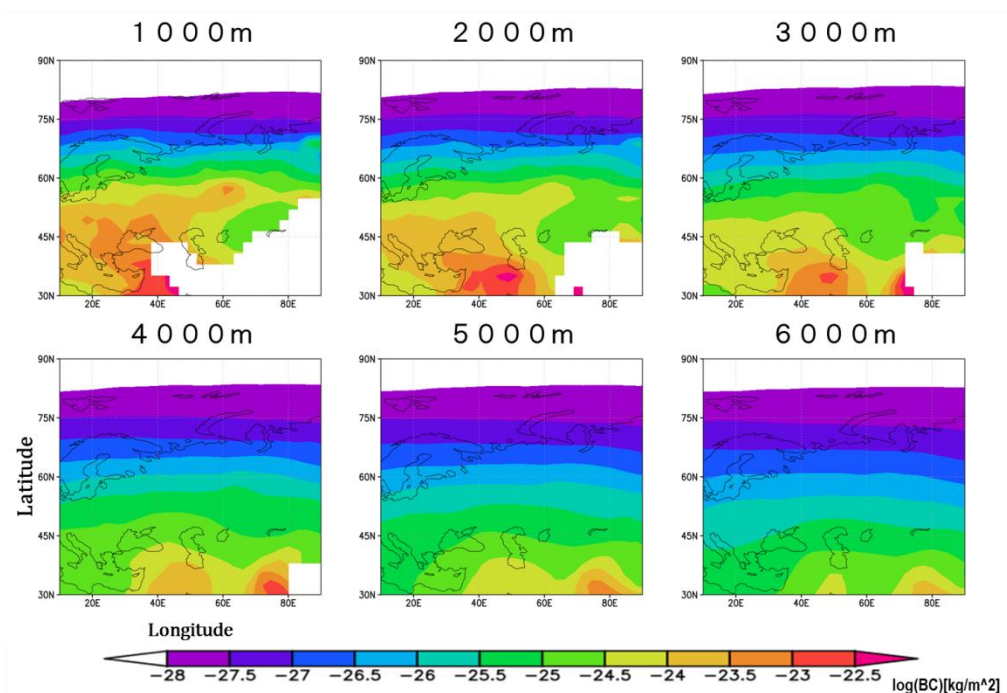


図 3.4：各高度における BC 年平均濃度分布（自然対数スケール）

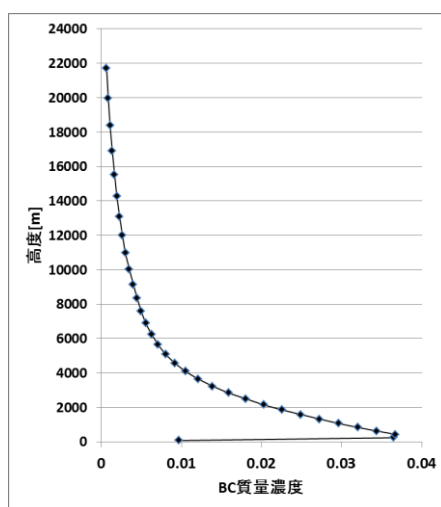


図 3.5：西シベリア領域平均 BC 質量濃度[μg/m³]の高度分布（年平均）

3.2 西シベリアから北極域へのブラックカーボンの輸送量評価

本節では、ロシアの北極域に対する影響の寄与率を評価するために、北極域周辺の各地域における BC 領域内合計気柱量と、ロシア及び西シベリア域から北極域へと運ばれる BC の輸送量を調べた。後者については緯度断面における BC の通過量を指標として、北極周辺全域（西経 180 度～東経 180 度）、ロシア域（東経 30～170 度）、西シベリア域（東経 30～80 度）についての解析結果を示す。また、その時間変動についても解析を行った。

まず図 3.6 に北極周辺域（北緯 50～75 度の地域）の BC 年平均領域内合計気柱量の分布について示す。ここでの領域内合計気柱量は、一定範囲内の BC 濃度を高度の重みを考慮して積算したものである。結果として北極周辺域全域の気柱量は 5950t であり、ロシア全体では 2820t（全領域に対して 47.3%）、西シベリア域では 1230t（全領域に対して 20.6%）であった。これは、北極周辺域での BC 総量の約半分をロシア域が占めていることとなる。

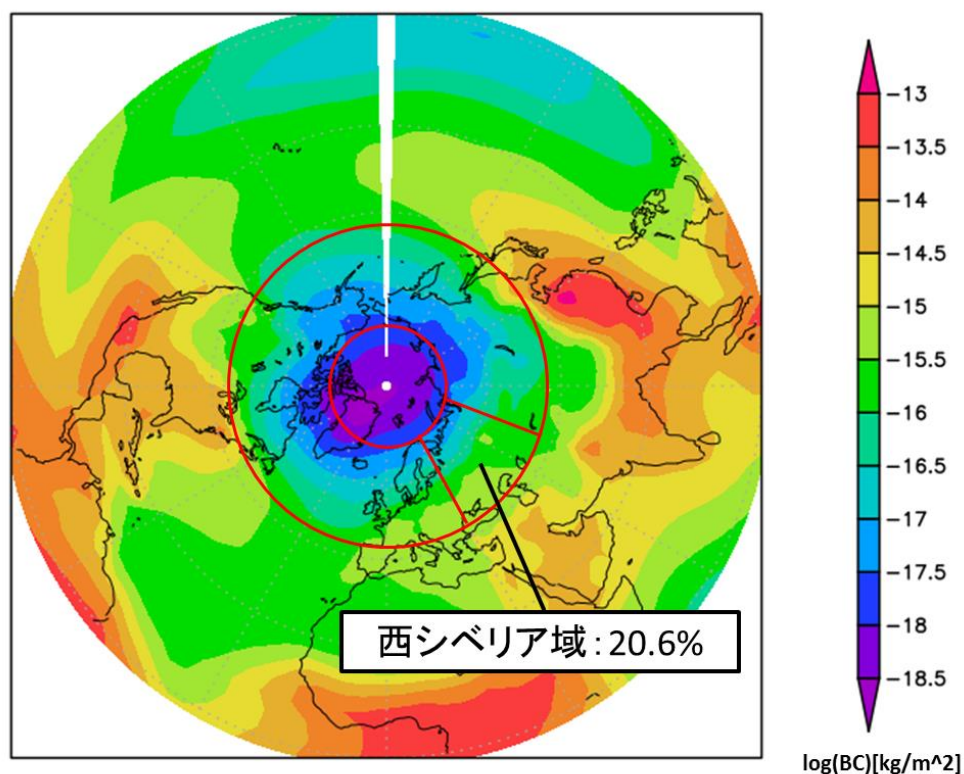


図 3.6：北極周辺域の BC 気柱量分布
赤枠内が西経 180 度～東経 180 度の範囲
カラーは BC の気柱量の自然対数をとったもの

図 3.7 は北緯 75 度における高度断面の BC の年平均南北輸送量の図であり、単位面積あたりに通過する BC 量を BC 濃度 $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ ×風速 $[\text{m}/\text{s}]$ として計算したものである。赤が北方向への輸送、すなわち北極域への輸送を表し、青が南方向への輸送を表す。この図から北緯 75 度における経度断面では、南方向への輸送は西経 90 度付近に見られるがごく僅かであること、全体として北方向への輸送が卓越していることが分かり、高度 4000m 以内の対流圏中層以下で顕著である。特に人間活動の盛んな地域からの輸送が大きく、西経 150~120 度はアラスカ周辺からの輸送で、石油開発や森林火災による影響とみられ、東経 0~30 度付近はヨーロッパ地域からの工業活動などによって排出された BC の輸送であると考えられる。ロシア域のみで見ても全体として BC は北方向へ運ばれており、東経 60~120 度、高度 6000m 以下で大きな輸送がある。濃度分布に比べ、高高度まで輸送が大きいのは風速の影響が大きいと考えられる。

次に、西シベリア域とロシア域の北極域への BC 輸送に関する寄与を評価するために、各領域からの BC の年間輸送量を求めた。これは、前述の経度－高度面での BC 通過量を年間で積算した量である。その結果、北緯 75 度断面全域からの北極域への BC 年間輸送量は約 164.7kg であり、ロシア域からの輸送量は約 66.4kg、西シベリア域からは約 23.6kg であった。これらから、全体に対する各領域の輸送量の比率はロシア域が 40.3%、西シベリア域が 14.3%であり、両領域からの北極域への BC 輸送は大きく、その影響調査が重要であることを示唆していると言える。

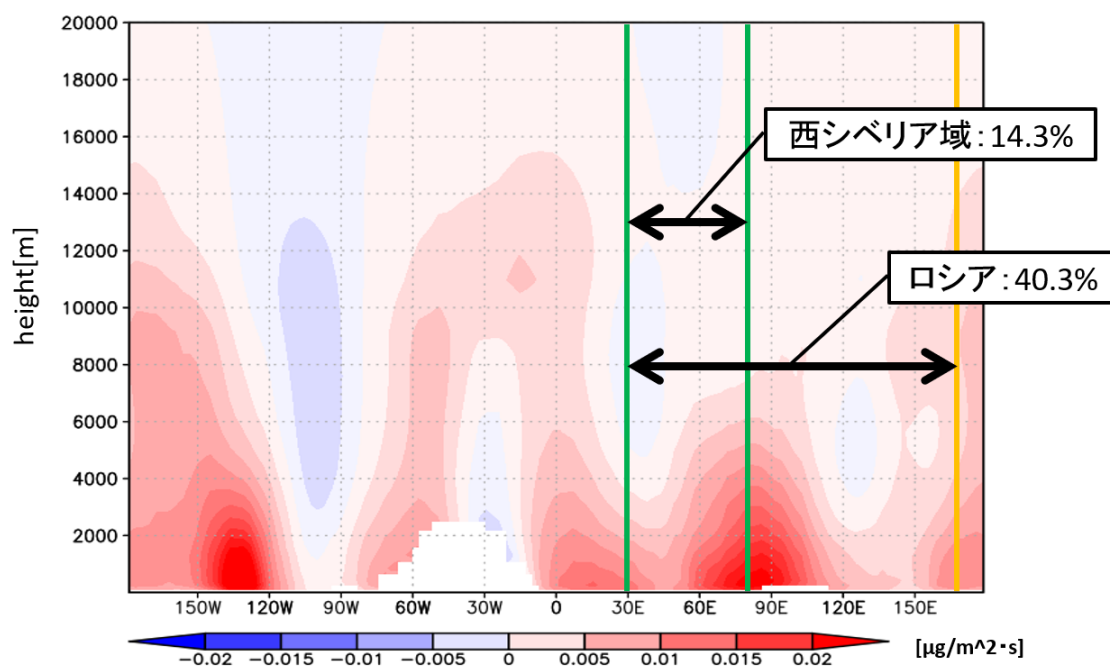


図 3.7: 北緯 75 度高度断面の BC 年平均南北輸送
カラーの赤が北極域（北方向）への、青が南方向への BC 輸送を表す

また、図 3.8 は北極域への全 BC 輸送量と西シベリア域からの輸送量の時間変動を解析したものであり、各領域高度 20000m までの範囲における輸送量の日変動を示す。これを見ると全経度帯、西シベリア域ともに 6 月から 7 月下旬にかけて輸送量の最大値が確認できる。更に、日によっては西シベリアからの輸送量が全輸送量を上回る日もあり、夏季において西シベリアからの輸送の全体に対する寄与率は大きい。一方、8 月から 11 月にかけては全体では大きな輸送があるのに対し、西シベリアからの流入は小さく、一部南側への輸送（北極域からの BC 流出）が見られる。逆にアラスカ西端やヨーロッパ域では、この時期に北極域への大きな流入が起こっている。

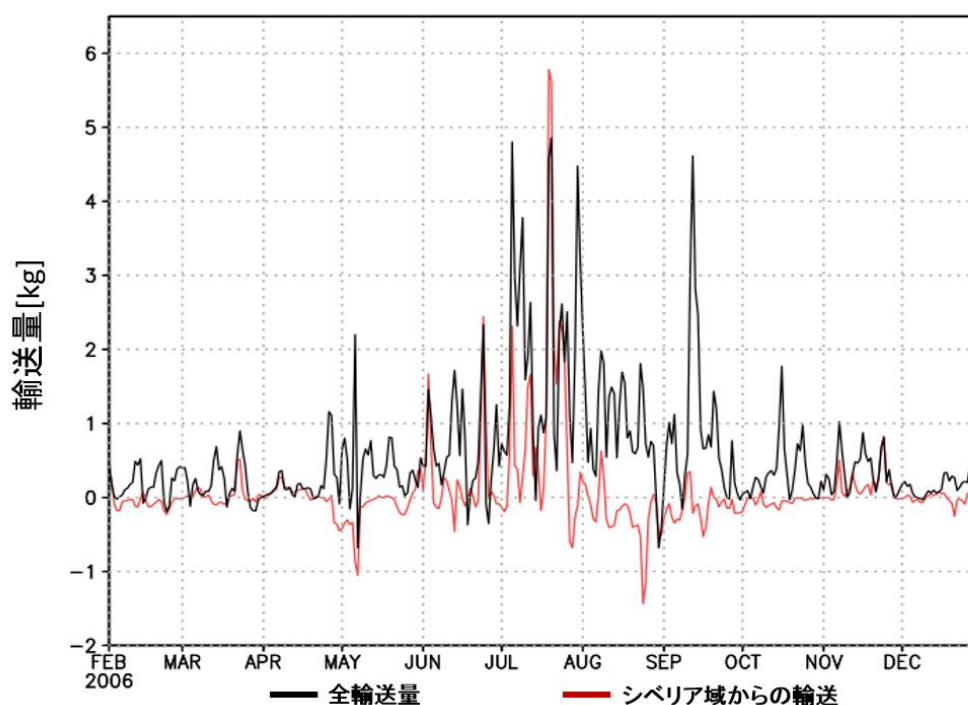


図 3.8：北緯 75 度における経度断面での BC 南北輸送量の日変化
黒線が全経度帯からの流出入を表し、赤線が西シベリア域からの流出入を表す

3.3 西シベリア域周辺の輸送フラックス

西シベリア域及びその周辺域の BC 挙動と、それがどのように北極域へと輸送されているのかを調べるために高度平均水平輸送フラックスの分析を行った。図 3.9 および図 3.10 に高度 40000m までと高度 2000m までの高度平均水平輸送フラックスを示す。

3.3.1 高度水平輸送フラックスの算出

まず、高度水平輸送フラックスの計算方法について述べる。なお以下の計算は[エアロゾルの大気環境影響, 笠原, 2007]を参考にした。東西・南北方向のフラックスをそれぞれ HFX_x 、 HFX_y として、その絶対値 $HFX[\mu g m^{-2} s^{-1}]$ は、

$$HFX_x = \frac{1}{T} \int^T u \times \rho dt$$
$$HFX_y = \frac{1}{T} \int^T v \times \rho dt$$
$$HFX = \sqrt{(HFX_x)^2 + (HFX_y)^2}$$

を用いて算出される。なお、 u と v はそれぞれ東西・南北方向の風速 $[ms^{-1}]$ 、 ρ はエアロゾル濃度 $[\mu g m^{-3}]$ 、 T は時間 $[s]$ である。そして高度平均水平輸送フラックス $AHFX$ は、高度毎の重みを考慮した上で鉛直方向に積算・平均し、以下の式で求められる。

$$AHFX = \frac{\left\{ \left(\frac{Z_2 + Z_1}{2} \right) + \sum_{i=2}^n \left(\frac{Z_{i+2} - Z_i}{2} \right) \right\}}{height} \times HFX$$

ただし、ここで Z_i はモデルの各層 Z (全 40 層) ごとの高度 $[m]$ 、 $height$ は計算する最上層の上端の高度 $[m]$ である。高度平均水平輸送フラックス図はコンター線が BC の平均濃度 $[\mu g m^{-3}]$ を表し、カラーは $AHFX$ の水平面分布を示している。また、ベクトルは $AHFX$ の大きさと輸送方向を表現している。

水平輸送フラックス図を見ると、全体的に濃度場が発生源情報とよく対応していることがわかる。3.1 節で記述した中東やモスクワ、ウラル中部などの高濃度帯ではそれが顕著に表れており、季節によって様々な方向に輸送されていることがわかる。また時期によっては高度による輸送の差異があることなどが伺える。以下、その詳細について考察を行った。

3.3.2 水平輸送フラックスの詳細分析

図 3.9 は、同月の各高度の水平輸送フラックスを積算上限別に横に並べて比較した図であり、左側には高度 2000m までの平均された水平輸送フラックス分布を、右側にはモデルの鉛直方向の全領域（高度 0~40000m まで）において平均された水平輸送フラックス分布を示している。

これを見ると、全体としては濃度分布と同様に 6~7 月にかけて AHFX は極大期を迎えている。また、中東・インド北部に加え、モスクワ周辺、ウラル地方中部(60N, 60E)付近、黒海北部、地中海およびエーゲ海などにおいて卓越したフラックスの値を示している。ヨーロッパは全域的に大きなフラックスを示しており、それが東へと伸びていることから、ヨーロッパから発生した BC は平均的には東方向へと輸送されていることがわかる。また、全体的な輸送は北緯 55 度付近に収束していく傾向がみられる。

次に、各月ごとの特徴と、高度による水平輸送フラックスの違いについて述べる。2・3 月において BC は平均的に東方向へと流れており、東経 80 度線上にあるウラル山脈による地形的な輸送方向の変化はあるものの、高度による大きな輸送方向の違いはみられない。しかし、4 月以降になると様々な方向への輸送が見られはじめ、北緯 50 度以南においては高度ごとの輸送方向にも違いが生じ始める。4~6 月にかけては高度 2000m 以下の平均値では黒海付近で左回りに渦巻くような流れが生じ、東経 35 度以西において南方向への輸送が起こっている。逆に西シベリア域南端では右方向に渦巻くような流れが生じており、東経 50~55 度付近を境に西側で南方向への輸送が見られる。一方、高度 40000m 以下の平均値では南北方向の蛇行はみられるものの、最終的には東方向へと輸送されている。7 月になると 2000m 以下ではウラル地方中部で発生した BC も一部南方向へと流れているが、西シベリア東部からの北極域への輸送が大きくなっていることがわかる。40000m 以下でも同様に北極域への大きな BC 流入が確認できる。8 月には、2000m 以下では BC 発生が非常に活発になると同時に、その輸送はより複雑になる。40000m 以下では非常に大きなヨーロッパからの BC 輸送があり、蛇行しながら西シベリア域を東へ抜けてゆく。一方、北極域への輸送はいずれの高度でも小さくなり、ほとんど見られなくなる。9・10 月になると全体的な輸送量が減少すると同時に、2000m 以下の輸送の複雑さも解消され始める。11・12 月になると未だ 2000m 以下では黒海付近で渦上の輸送が起こっているが、北緯 50 度以北では 2 月期と似た輸送になり、BC は平均的に東方向へと流れている。

以上のことから、西シベリア域周辺の BC 輸送においては、「境界層から自由対流圏下部（高度 2000m 以下）での複雑な輸送」と、「自由対流圏中上部でのヨーロッパ起源を中心とした東方向への輸送」の二つの輸送経路を持つことが示唆された。また、高度 2000m 以下では季節によっては渦上の輸送が発生し、地形による擾乱が起こるなど複雑な輸送が見られた。一方、40000m 以下では時期によっては南北の蛇行が見られるものの、平均的に東方向への流れが卓越していた。

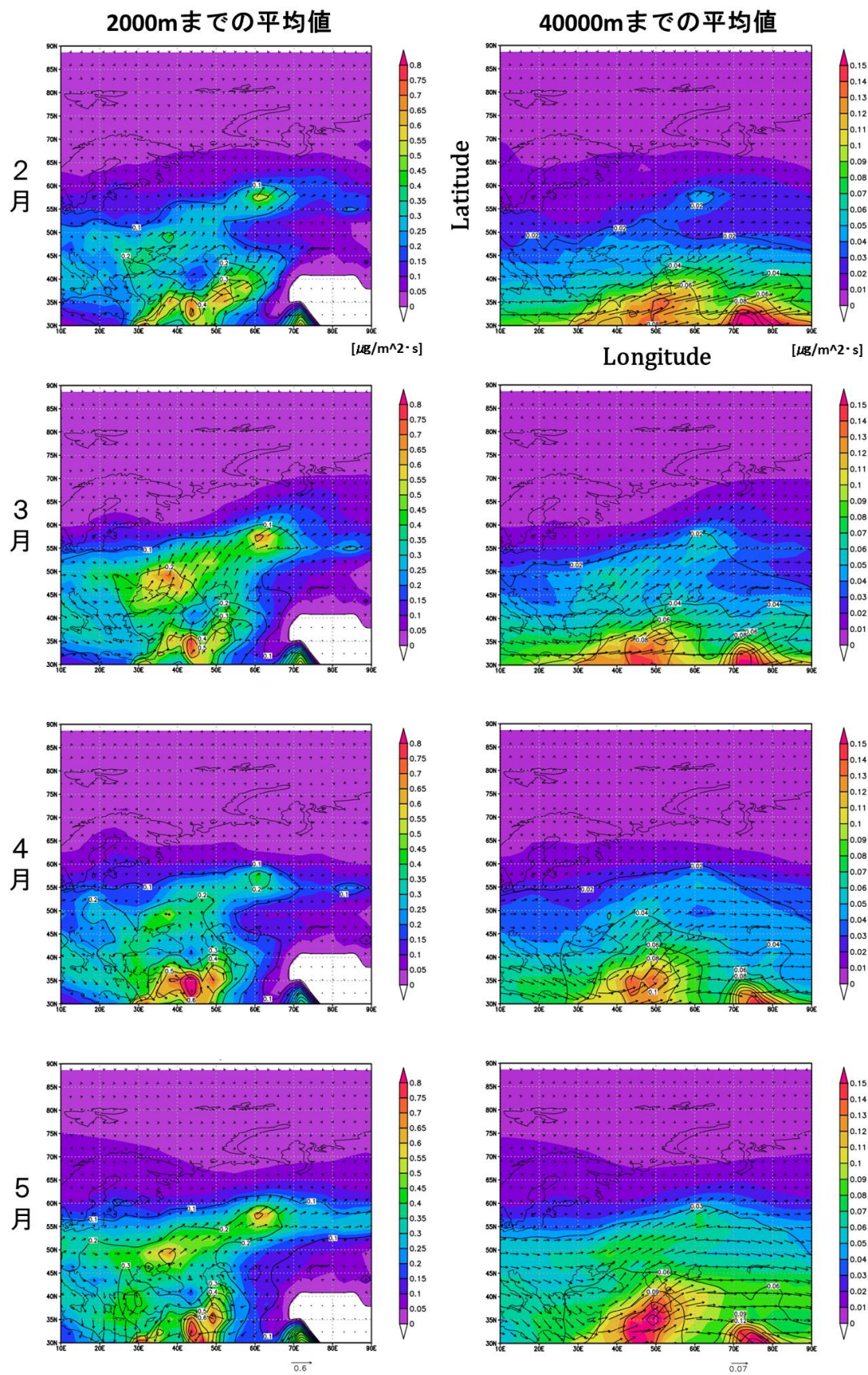


図 3.9: 2~5 月までの各高度の水平輸送フラックスとその比較

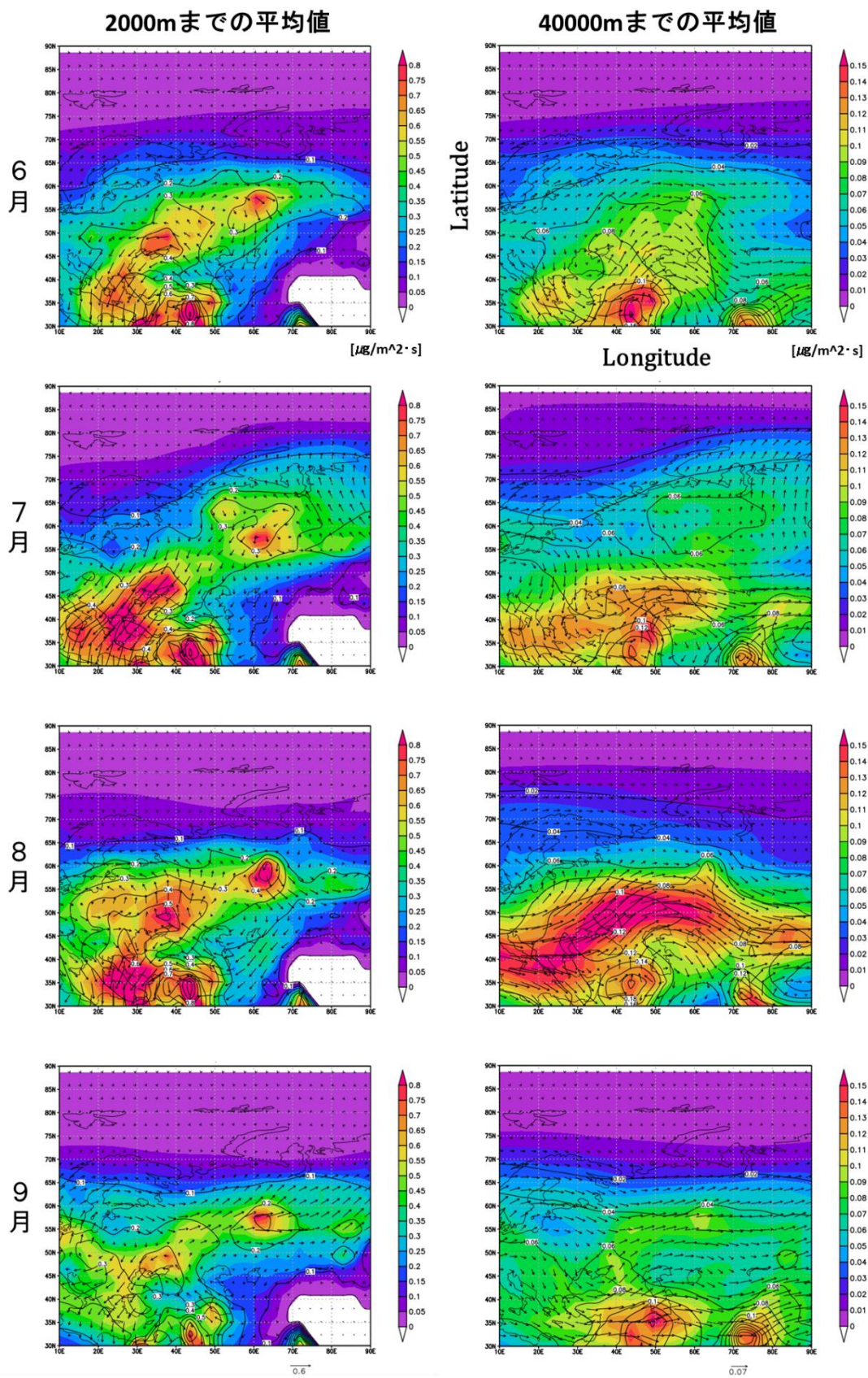


図 3.9 (続き) : 6~9 月までの各高度の水平輸送フラックスとその比較

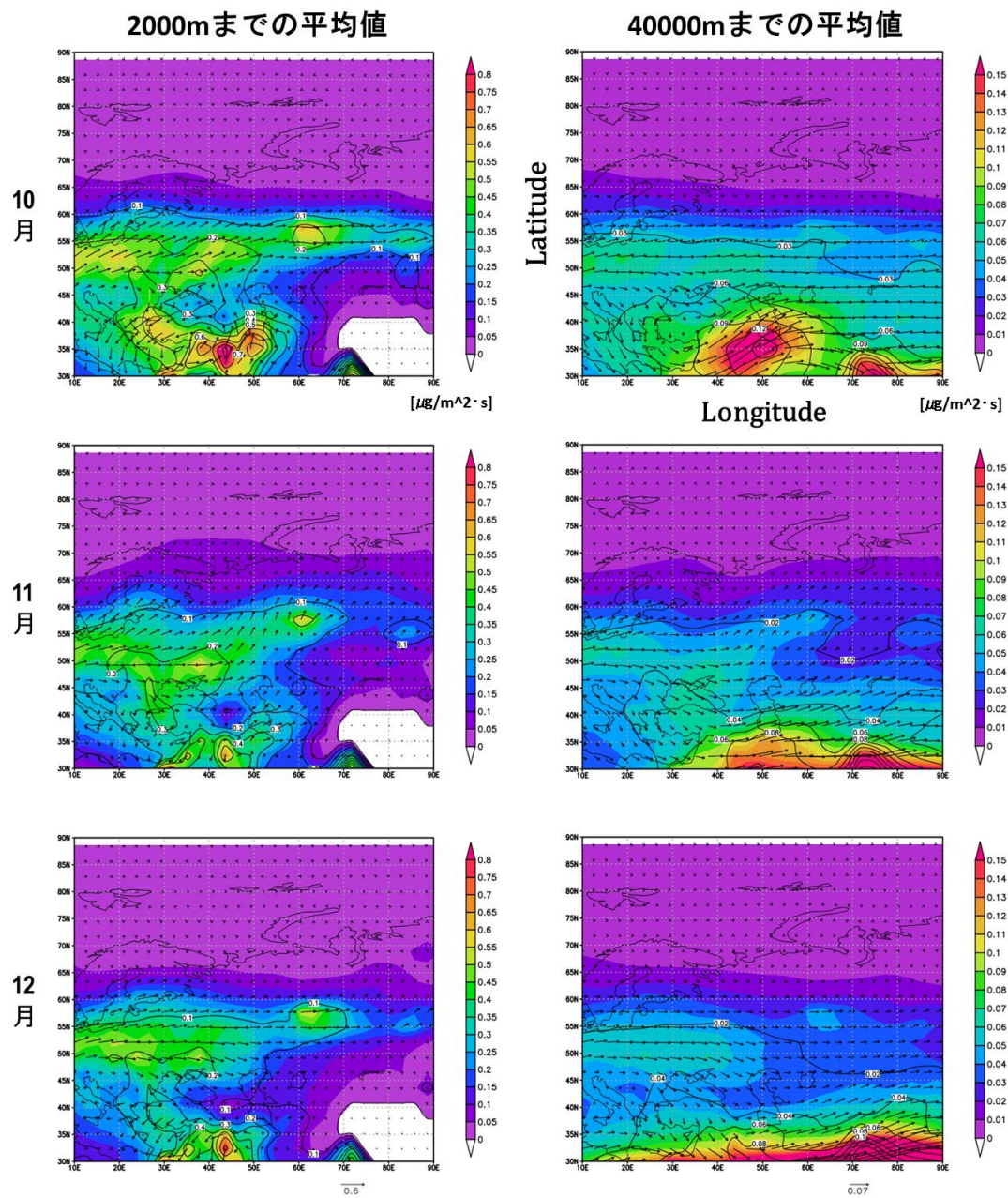


図 3.9 (続き) : 10~12 月までの各高度の水平輸送フラックスとその比較

3.4 境界面輸送解析

高度平均水平輸送フラックスから示唆された西シベリア域周辺での BC 挙動、北極域への BC 輸送について、三次元的な特徴を捉えるために、西シベリア域境界面での輸送解析を行った。解析した境界面は図 3.10 に示したように、主にヨーロッパからの西からの輸送を見る境界（赤：北緯 50~75 度、東経 30 度）、南側からの輸送を見る境界（黄：北緯 50 度、東経 30~80 度）、北極域への輸送を見る境界（黒：北緯 75 度、東経 30~80 度）の 3 つである。

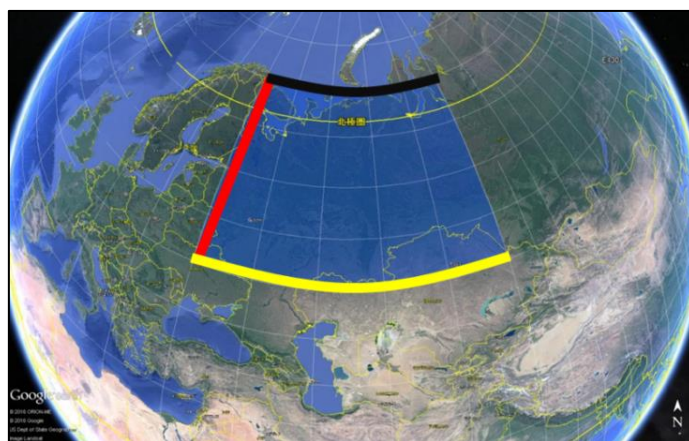


図 3.10：解析した西シベリア域の 3 つの境界面

境界面での解析のためにその面を通過する BC の量を求める。つまり単位時間あたりに単位面積を通過する BC の質量を求める。これを F とすると、 F はある場所における BC の密度 ρ と、その場所における垂平方向の風速 V との積により得られる。

$$F = \rho \times V [\mu\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

計算された BC 濃度及び風速を利用して F を算出し、その年平均値の緯度－高度、経度－高度断面図を各境界面において作成した。

3.4.1 東経 30 度境界面における東西輸送解析

西からの輸送を見る境界面（北緯 50~75 度、東経 30 度）について分析する。図 3.11 は高度 15000m までの境界面における F の年平均分布を示したものである。なお、赤が東への輸送（西シベリア域への流入）、青が西への輸送（西シベリア域からの流出）を表す。これを見ると、西側からは流入が卓越しており、北緯 50~65 度付近で大きい。また、高度で見ると、地上付近と 10000m 付近にそのピークがある。これは 3.3.2 節で述べた「自由対流圏中上部でのヨーロッパ起源を中心とした東方向への BC 輸送」が高度 10000m 付近で起きていることを示唆するものである。高度 10000m 付近は対流圏界面であり、直下にジェット気流が生じているため、その強い風によって南北に蛇行（偏西風蛇行）しながら BC が東方向へと運ばれていると考えられる。

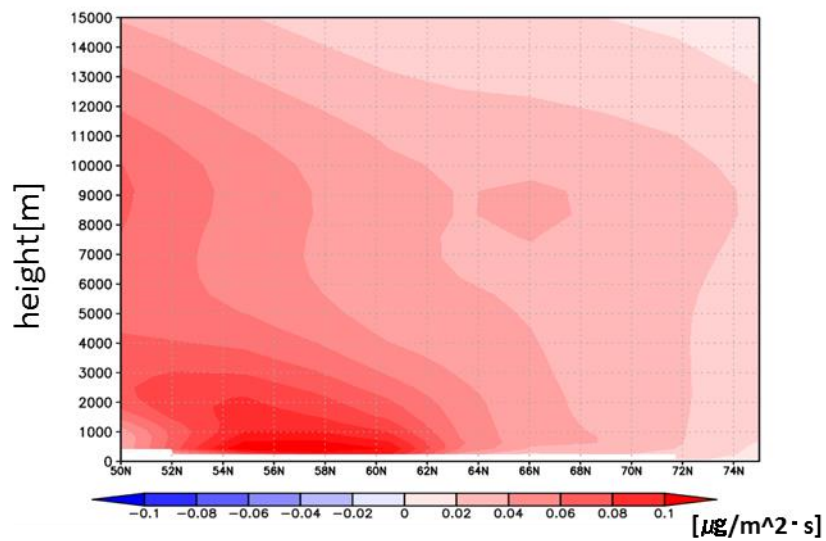


図 3.11：東経 30 度境界面の年平均 BC 輸送 $[\mu g m^{-2} s^{-1}]$

赤が東、青が西への輸送を表す

次に、各高度での輸送の寄与（高度依存性）と、その季節変化を調べるために、境界面の BC 輸送分布を各月ごとに緯度方向に平均したものを図 3.12 に示す。

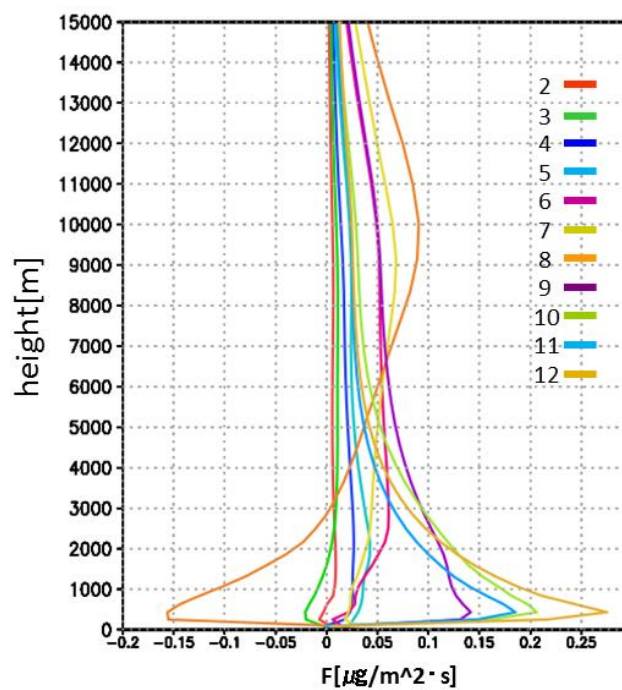


図 3.12：東経 30 度境界面での BC 輸送高度依存性の月変化

図 3.14 から、8 月以外の月ではほぼ高度 2000m 以内から西シベリア域に BC が流入している様子があり、その傾向は冬季において大きく、1 2 月において最大になる。一方 8 月においては、10000m からの流入が年間で最も多いのに対し、2000m 以下では唯一大きな流出（西向きの流れ）が見られる。

3.4.2 北緯 50 度境界面における南北輸送解析

次に、西シベリア域において南側からの流入を調べるために、北緯 50 度境界面（西シベリア域南端）における南北輸送について分析する。図 3.13、図 3.14 はともに 3.4.1 節と同様の方法で作成されたものである。なお、南北輸送においては、赤が北への輸送（ここでは西シベリア域への流入）、青が南への輸送（西シベリア域からの流出）を表す。

図 3.13 からは、東経 55 度を境に左右対称の輸送が起きていることがわかる。これは、3.3.2 節において、西シベリア域南端で発生していた右回りの渦状の流れによるものである。この輸送においては地上付近にピークがあり、上空に行くにつれてその量は少なくなっている。図 3.14 の月ごとの高度依存性を見てもその傾向は顕著であり、北緯 50 度境界面における南北輸送においては、南北に蛇行するジェット気流による影響は少ないことがわかる。また、図 3.14 を見ると基本的に流入の総量は小さく、南北の輸送は釣り合っていると考えられるが、3 月において流入が、7 月において流出が比較的大きくなっている。

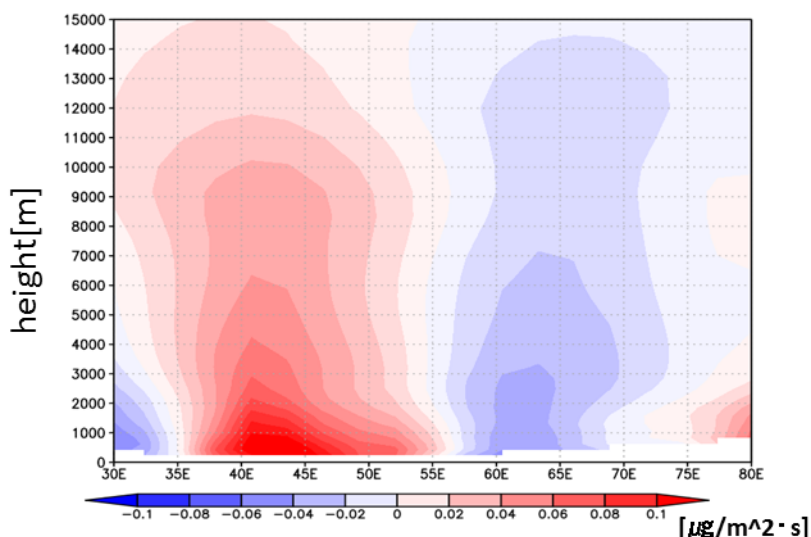


図 3.13：北緯 50 度境界面の年平均 BC 輸送 $[\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$

赤が北、青が南への輸送を表す

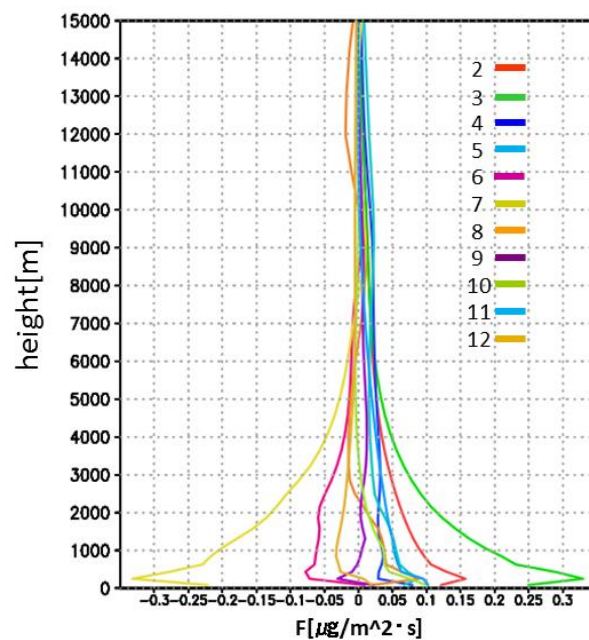


図 3.14：北緯 50 度境界面での BC 輸送高度依存性の月変化

3.4.3 北緯 75 度境界面における南北輸送解析

前節までと同様の方法で、西シベリア域から北極域への輸送の詳細を調べるために、北緯 75 度境界面（西シベリア域北端）における南北輸送について分析した。図 3.15 では赤が北への輸送（北極域への流出）を表す。これを見ると年間では平均して流出が卓越していることがわかる。また、その分布は東経 50 度より東で最も大きく、高度 6000m 程度まで分布するが、東経 50 度より西では 2000m 以下でわずかにみられるのみである。また、北緯 50 度断面と比較すると、南方向への輸送や、東経 55 度を中心とした対称性は見られない。これは、西シベリア域北端においては南端からの流出入の影響は小さいことを示唆していると言える。

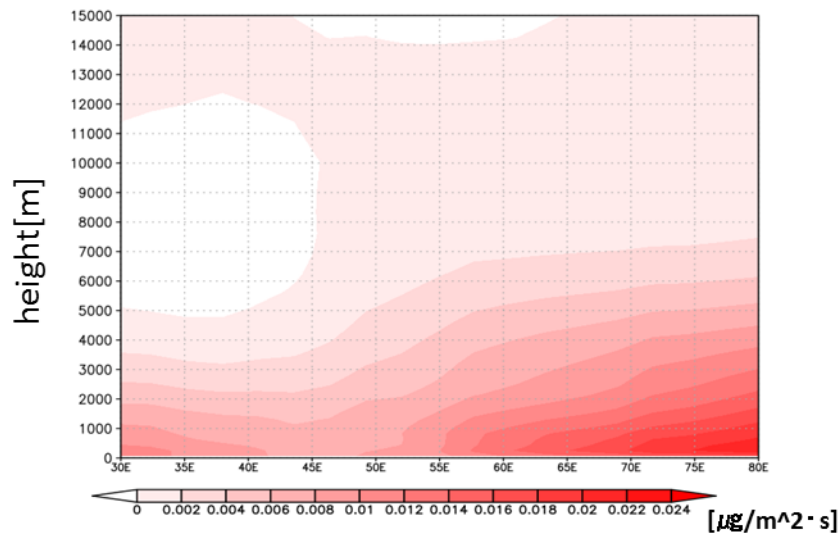


図 3.15：北緯 75 度境界面の年平均 BC 輸送 $[\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ （赤が北への輸送を表す）

図 3.16 の月ごとの高度依存性を見ると、3.3.2 節でも述べたように、5、6 月と流出は大きくなっていき、7 月で最も大きな流出が起きる。7 月においては地上から 10000m 付近まで平均して大きな流出が起こっている。その他の流出の多い月についても、他の断面より高高度まで流出が起きているという特徴がみられる。また、8 月になると急激に流出は減少し、逆に高高度で西シベリア域へのわずかな BC 流入が見られる。

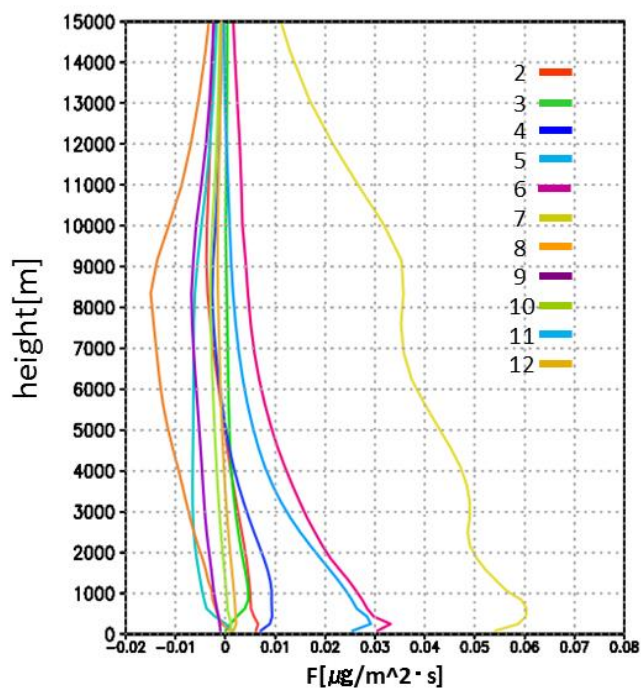


図 3.16：北緯 75 度境界面での BC 輸送高度依存性の月変化

3.5 モデルデータ解析結果まとめ

3.1 節では様々なスケールでの BC 濃度分布の解析を行った。その結果、北半球の BC 濃度の水平分布と西シベリア域周辺におけ BC の高濃度帯、またその高度分布を明らかにした。3.2 節では西シベリアから北極域へのブラックカーボンの輸送量の評価を行った。結果として、BC の領域内合計気柱量は北極周辺域全域で 5950t、ロシア全体では 2820t、シベリア領域では 1230t であった。また、北緯 75 度断面において西シベリア域から北極域への BC 輸送の寄与率は 14.3% であった。これらから、西シベリア域に比較的高濃度の BC が存在しており、その輸送量も大きく、該当地域における影響調査が重要であることを示した。3.3 節では西シベリア域周辺の水平輸送フラックスについて解析した。ここでは、BC の水平面における輸送の時空間変化を明らかにするとともに、BC が地上付近と高高度において二つの輸送経路を持つことが示唆された。3.4 節では西シベリア域各境界面における輸送解析を行った。その結果、BC が主に輸送されるのは高度 2000m と 10000m であることが分かった。また、各境界面における BC 輸送の高度依存性とその季節変化を明らかにした。これにより、西シベリア域への流入についてはヨーロッパ域からの流入が主であり、北極域への流出については南端からの流出入の影響は小さく、領域西部において卓越していることが分かった。

第4章 航空機観測に関する考察

本章ではロシアの航空機観測の計画策定に知見を与えることを目的として、実際の航空機観測の結果の解析と、モデル内での簡易的な航空機観測のシミュレートを行い、観測の日時やルートの違いによる観測結果の差異を考察した。

4.1 モスクワにおける航空機観測

本節では、ロシアにおける航空機観測の一例として、実際に2014年6月26日に行われたモスクワ周辺の航空機観測結果の一部を示す。これは東大AORI-CAO間の共同プロジェクトにおいて行われたものである。図4.1に観測ルートの概要を、図4.2に緯度経度方向における飛行経路の高度変化を示す。本観測はモスクワから南東へ流れ出る高濃度の汚染物質の観測を目的としたものであり、飛行経路をみると、汚染プルームを横切るような飛行を繰り返していることが確認できる。また、モスクワ周辺を大きく囲むように飛行しているのは周囲の大気の定常状態となる値を得るためである。観測としては、急上昇、急降下によるBCの鉛直濃度分布の計測、一定高度における連続観測、各高度を観測しながら上昇するスパイラル観測を行っている。

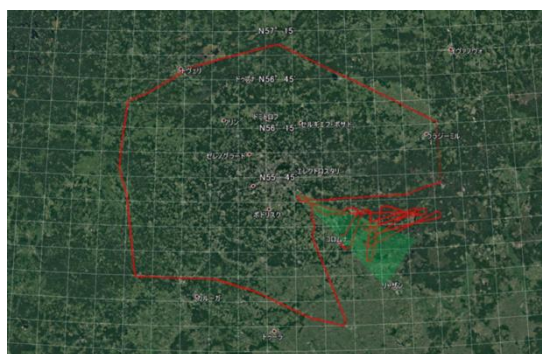


図 4.1: 実際のモスクワ周辺の航空機観測ルート（薄緑が汚染物質のプルーム）

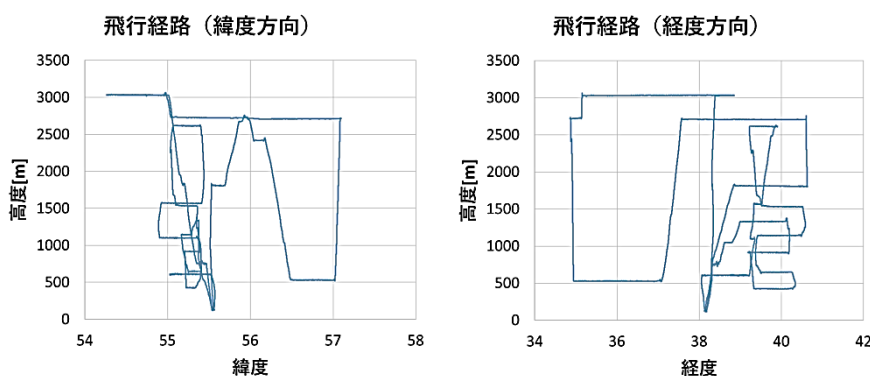


図 4.2: （左）緯度方向、（右）経度方向における飛行経路の高度変化

図 4.3 に観測開始直後（時刻 14:40~15:00）の上昇過程において、ラメンスコエ空港上空の BC 濃度鉛直分布観測を行った結果について示す。図 4.3 の左図は横軸に緯度、縦軸に観測高度（青線）と BC 濃度（橙線）を、右図は横軸に濃度、縦軸に高度を示している。この航路では汚染プルーム内を横切るように観測を行っており、20 分程度で高度 3000m まで急激に上昇する。ここでは BC 濃度の高度 800m 付近での大きな減少と 1000~1400m にかけての増加など、詳細な高度分布が確認できる。

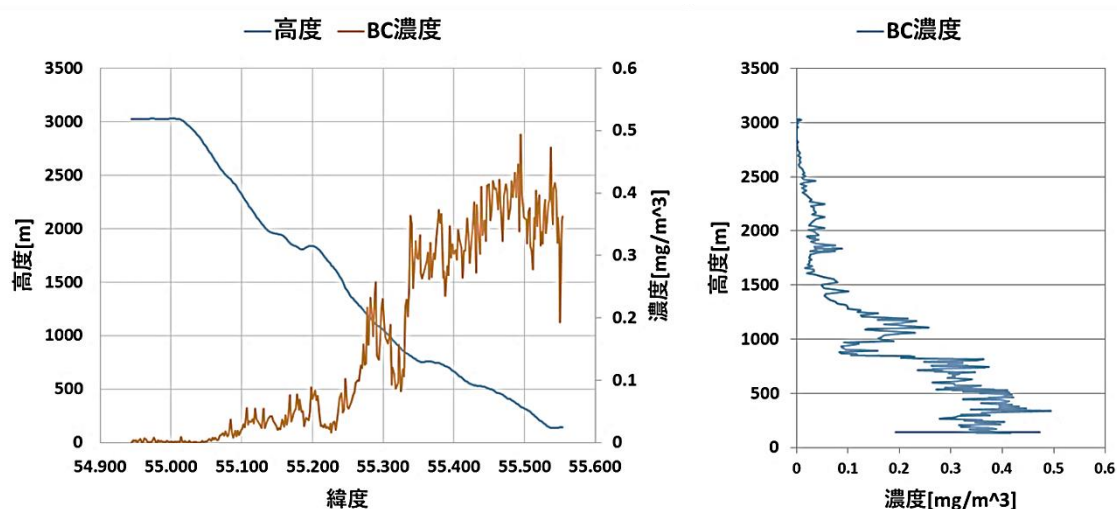


図 4.3：ラメンスコエ空港上空の BC 濃度鉛直分布
 （左）縦軸に観測高度（青線）、BC 濃度（橙線）をとる
 （右）縦軸に高度、横軸に BC 濃度をとる

次に、別時刻にラメンスコエ空港上空で行われた、一定高度での連続観測の結果を示す。図 4.4 は高度 1080m、840m、640m、310m において約 10 分間連続観測した BC 濃度分布を示している。これをみると全ての高度で BC 濃度は 0.1mg/m^3 前後を $0.05\sim 0.1\text{mg/m}^3$ 程度の大きさに推移しており、本研究のモデルで示したようなスケールに比べて変動幅が大きい。また、前述の鉛直濃度分布と照らし合わせると、低高度では異なる濃度の値が観測されている。これは、小規模な BC 濃度分布においてはその変動が大きいこと、また、観測時間帯や飛行の仕方によって同地点でも異なる情報が得られることを意味しており、対象地域の実態把握には的確な日時・飛行経路の設定が必要であると言える。

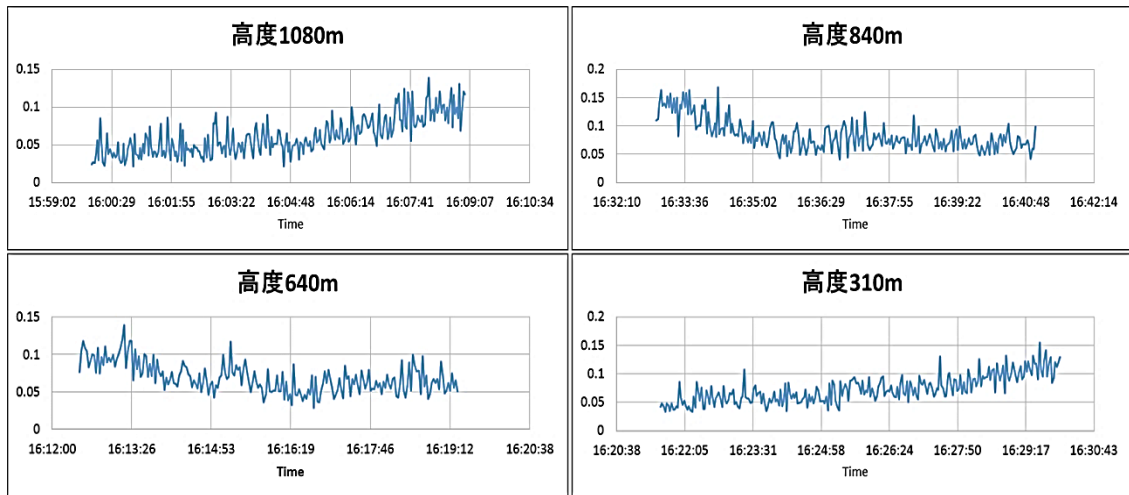


図 4.4：ラメンスコエ空港上空における各高度での BC 濃度[mg/m^3]連続観測の結果
縦軸に BC 濃度、横軸に観測時刻をとる

4.2 航空機観測シミュレーション

今後、実際の航空機観測とモデルシミュレーション結果の比較をより理解しやすくし、シミュレーションによる観測計画の策定に示唆を与えるために航空機観測シミュレーションプログラムを作成した。これは、モデルシミュレーション内において、出発日時、航空ルート、航空速度を決定すれば、その進行方向に対する時空間解像度を定め、一定間隔で内挿されたモデルデータを出力するものである。つまり、飛行ルートに沿って一定時間ごとに観測結果を記録していく実際の航空機観測を疑似的にモデルシミュレーション内で再現するツールの作成を目的としている。以下、そのデータ内挿の計算方法について述べる。

時間内挿においては、ある時間 t_i のモデル値を、前後の時間 t と $t+1$ の間を線形内挿することによって求める。空間内挿においては、ある二点の緯度経度 (s^{\rightarrow} , e^{\rightarrow}) の距離 D を、距離[m]に変換して求める (ヒュベニの公式)。次に、二点を結ぶベクトルの単位方向ベクトル $d^{\rightarrow} = (e^{\rightarrow} - s^{\rightarrow}) / D$ として、解像度 1 の方向ベクトル m^{\rightarrow} を $|d^{\rightarrow} \times k| = 1$ となる k を用いて $m^{\rightarrow} = k \times d^{\rightarrow}$ として求める。それによって内挿点の座標は $(P_i)^{\rightarrow} = s^{\rightarrow} + m^{\rightarrow}$ で求められる。そして $(P_i)^{\rightarrow}$ の近傍 8 点の (時間内挿された) 格子点の値を距離を重みとして加重平均し、尚且つ進行方向の前後の点 (P_{i+n} , P_{i-n}) との移動平均をとることで、内挿点 P_i の値を求める。

このプログラムを使って観測結果の変化の特徴を調べるため、簡易的な航空機観測シミュレーションを行った。NICAM-Chem のモデルシミュレーション内で西シベリア域を横断するように観測ルートを設定し、観測日時と観測高度を変えて BC 濃度の仮想的な観測を行った結果を示す。今回はモデルの解像度の問題から、局所的なシミュレート of 考察が困難

であったため、比較的大規模な輸送を観測する飛行について設定した。飛行経路は高濃度域を横切るように（緯度，経度）として、（52N, 40E）－（57N, 60E）－（68N, 78E）というルートを設定した。図 4.5 は設定した観測ルート（赤線）であり、背景のカラーは 2006 年 6 月 26 日の高度 10km までの平均 BC 濃度を示している。

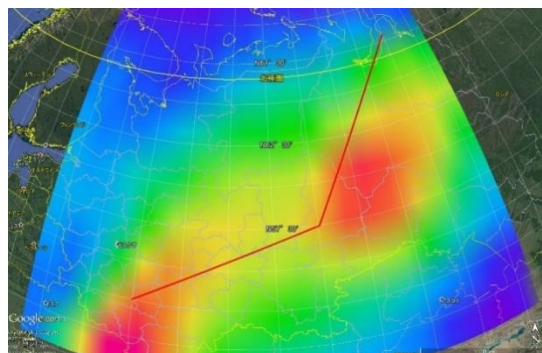


図 4.5：設定した観測ルート（赤線）

背景のカラーは 2006 年 6 月 26 日の高度 10km までの平均 BC 濃度

まず、6 月 26 日から 7 月 5 日までの 10 日間、図 4.5 に示した観測ルート上を高度 1000m で毎日観測を行ったとしてシミュレートした結果（日にち別の BC 濃度の経度方向の変化）を図 4.6 に示す。これを見ると、BC 濃度は 6 月 26 日～30 日間では多少の増減はあるものの、東に行くにつれて右肩下がりになっていく経度方向の分布の特徴は大きく変わらない。しかし、7 月 1 日になると東経 55～65 度付近をピークとした分布になり、その特徴は大きく変化する。更に、7 月 4 日になると全体的に BC 濃度は大きく減少し、東に行くにつれて濃度が上昇するような分布になる。

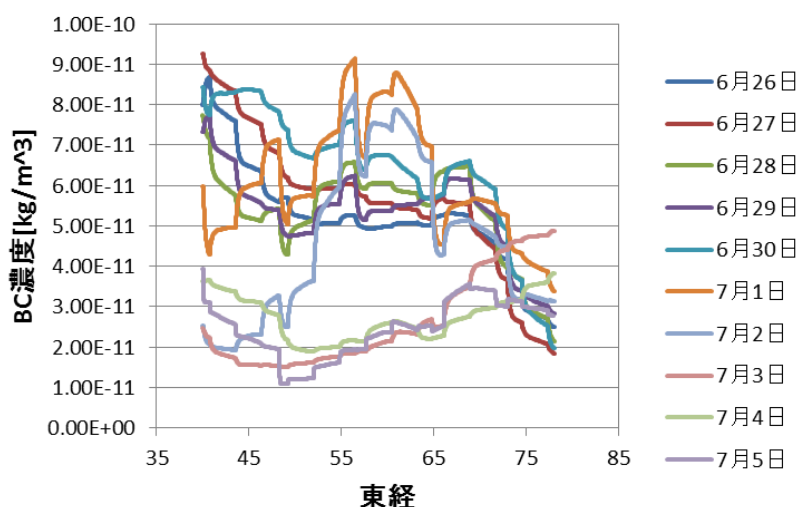


図 4.6：日にち別の BC 濃度の経度方向の変化

次に、6月26日において、図4.5に示した観測ルート上を、高度を様々に変えてシミュレートした結果（高度別のBC濃度の経度方向の変化）を図4.7に示す。これを見ると、高度が高くなるにつれて全域的にBC濃度が減少する様子が見られる。しかし、東経55~65度付近においては高度1000mまでにおいては濃度の高い領域が見られるのに対し、1500m以上ではそれが確認できなくなっている。

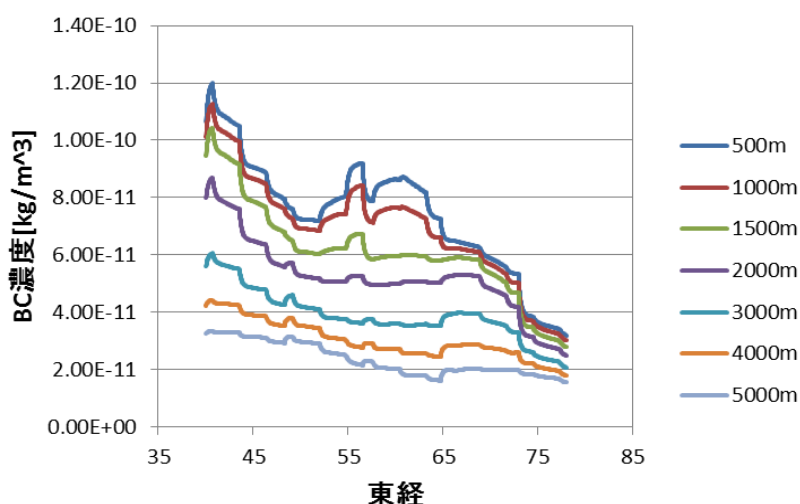


図 4.7： 高度別の BC 濃度の経度方向の変化

4.3 航空機観測計画策定についての考察

小規模な高濃度汚染塊の観測においては、短時間でその濃度が変化するため、一度のフライト中に同地点を複数回観測することや、周囲の定常状態を把握することが重要である。また、さらに大きな規模についても、数日のうちに大局的な濃度分布は大きく変化する。BC濃度の高度分布については基本的には高高度に行くにつれて平均的な減少がみられるが、一部地域に一定高度までの局所的な高濃度の気塊が存在している。つまり、ある高度のみの観測ではBCの空間分布を捉えきれない可能性があり、少なくとも往復間で別高度の観測を行う必要がある。ゆえに、特に大規模な航空機観測においては、数日規模の連続的な同ルート、複数高度の観測が必要である。また、こうした大規模なBC観測においては、本研究で示したようなBC濃度分布や水平輸送フラックス等の様々な時空間スケールでの変動データは、ルート策定および測定した現象の大局的な理解に有用であると言える。

第 5 章 結論

本研究では、NICAM-Chem によるシミュレーションデータの解析を通して、ロシアおよび西シベリア周辺地域での BC の濃度分布や輸送経路の時空間変動を調べた。そして、それにより航空機観測プロジェクトの発展に有用な基礎的情報を提供することを目的とした。

シミュレーションデータに基づく BC 濃度分布の解析においては特徴的な高濃度域と高度分布を明らかにした。その結果、ロシア域の BC は発生源付近では高高度まで上昇するものの、その後 3000m 以下の高度に分布している傾向があることが分かった。

西シベリアから北極域への BC の輸送量評価では、西シベリアからの BC 輸送の重要性を示した。北極域周辺の領域別の合計気柱量を解析した結果、約 20%が西シベリアに分布し、北極域への BC 輸送についても全経度帯からの総輸送量に対して 14%の寄与があることが示された。特に、6 月から 7 月下旬にかけて輸送量は非常に大きいことが分かった。

BC の水平輸送フラックス解析においては、西シベリア域周辺での季節的な輸送の特徴を明らかにするとともに、「境界層から自由対流圏下部での複雑な輸送」と、「自由対流圏中上部でのヨーロッパ起源を中心とした東方向への輸送」という、二つの大局的な輸送経路の存在が示唆された。また、高度 2000m 以下の複雑な輸送と、4000m 以下での、平均的に東方向への輸送されている傾向があることも示した。

西シベリア域境界面における輸送の特性を解析した結果、ヨーロッパからの BC 輸送に関しては流入が殆どで、特に高度 2000m 以下と 10000m 付近で卓越していることが分かった。これは、BC 濃度鉛直分布と合わせて考えると、BC は高高度と地上付近から輸送され、地上付近で滞留しているものと考えられる。また、南端からの輸送に関しては、東経 55 度を境に流入と流出が左右対称にみられ、輸送量の高度依存性については、流出入ともに地上付近にピークがあり、上空に行くにつれてその量は少なくなっていた。そして、北極域との境界面においては、年間平均して流出（北極域への輸送）が卓越しており、その分布は東経 50 度より東で最も大きく、高度 6000m 程度まで分布することが分かった。また、同境界面では 7 月で最も大きな北極域への流出が起きていて、その他の流出の多い月を含め、他の断面より高高度まで流出が起きているという特徴がみられた。また、8 月になると急激に流出は減少し、逆に高高度で西シベリア域へのわずかな BC 流入が起きていることが分かった。

また、実際の航空機観測の結果の解析と、モデル内での簡易的な航空機観測のシミュレーションを行い、日時やルートの違いによる観測結果の差異を考察した。その結果、小規模な高濃度汚染塊については、短時間でその濃度が変化していたため、一度のフライト中に同地点を複数回観測することや、周囲の定常状態を把握することの重要性が示唆された。また、大規模な航空機観測においては、複数高度を観測するルートを数日規模で連続観測す

ることが重要であると考えられた。

以上、本研究では、大局的な BC の時空間変動を明らかにし、航空機観測の計画策定に有用な基礎的情報を得た。しかし、将来的に BC およびエアロゾルのより詳細な挙動を把握し、不確定性を低減するためには、シミュレーションデータと観測結果の比較を繰り返してモデルを更に精緻化し、高精度なシミュレーションを可能にする必要がある。現状では、計算機の進歩に比べ、観測データの整備は不足しており、高精度な航空機観測、および広範囲の観測が可能なリモートセンシング技術の発展とその総合的な運用が要望されている。こうしたモデルと観測の相互的な向上が進み、最終的にエアロゾルのような短寿命気候汚染因子の抑制が可能となれば、気候変動問題の解決に大きな貢献がなされるものと期待される。

参考文献

- A. S. Kuz'michev, T. I. Babukhina, A. V. Gan'shin, A. N. Luk'yanov, R. M. Markov, A. M. Romanovskii, V. U. Khattatov, D. V. Kirin, E. P. Malinina (2016) : Remote and in situ measurements of aerosol concentration in the Arctic troposphere from the Yak-42D "Roshydromet" research aircraft, *Russian Meteorology and Hydrology*, Volume 41, Issue 5, pp 365–372, doi:10.3103/S1068373916050083.
- Aoki, Te., Ta. Aoki, M.Fukabori, Y.Tachibana, Y.Zaizen, F.Nishio and, T.Oishi, (1998) : Spectral albedo observation on the snowfield at Barrow, Alaska. *Polar Meteor. Glaciol.*, 12, 1-9.
- European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability (2009) : Forest Fires in Europe 2009, EC Report No.10, Office of the European Union, 64-71.
- Hansen, J.,M.Sato, R.Ruedy, L.Nazarenko, A.Lacis, G.A.Schmidt, G.Russell, I.Aleinov, M.Bauer, S.Bauer, N.Bell, .Cairns, V.Canuto, M.Chandler, Y.Cheng, A.DelGenio, G.Faluvegi, E.Fleming, A.Friend, T.Hall, C.Jackman, M.Kelley, N.Kiang, D.Koch, J.Lean, J.Lerner, K.Lo, S.Menon, R.Miller, P.Minnis, T.Novakov, V.Oinas, Ja.Perlwitz, Ju.Perlwitz, D.Rind, A.Romanou, D.Shindell, P.Stone, S.Sun, N.Tausnev, D.Thresher, B.Wielicki, T.Wong,M.Yao and S.Zhang (2005) : Efficacy of climate forcings. *J.Geophys. Res.*, 110, D18104, doi : 10.1029/2005JD005776.
- 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 (2015), Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, doi:10.1002/2015JD023358.
- IPCC (2007) : Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2013) : Climate Change 2013: The Physical Science Basis Chapter 7 - Clouds and Aerosols, Copies of the printed report are available from Cambridge University Press, IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 概要 気象庁訳.
- N. Y. Chubarova, A. A. Poliukhov, and I. D. Gorlova (2015) : Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO₂ correction, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 313–334, doi:10.5194/amt-9-313-2016.

- Satoh M, Matsuno T, Tomita H, Miura H, Nasuno T, Iga S (2008) : Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J Comput Phys* 2008, 227: 3486–3514.
- Steven J. Ghan and Stephen E. Schwartz (2007) : *Aerosol Properties and Processes: A Path from Field and Laboratory Measurements to Global Climate Models*, AMS Journals online, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-88-7-1059>.
- T. Dai, D. Goto, N.A.J. Schutgens, X. Dong, G. Shia, T. Nakajima(2014), Simulated aerosol key optical properties over global scale using an aerosol transport model coupled with a new type of dynamic core, *Atmospheric Environment* Volume 82, January 2014, 71–82.
- Tomita H, Satoh M (2004) : A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn Res* 2004, 34: 357–400.
- Toshihiko Takemura, Toru Nozawa, Seita Emori, Takashi Y. Nakajima, and Teruyuki Nakajima (2005) : Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, Volume 110, DOI: 10.1029/2004JD005029.
- 今須良一, 青木周司, 町田敏暢, 松枝秀和, 澤庸介, 丹羽洋介, 村山昌平, Yu Borisov, B Danelyan, B Fomin, V Hattatov(2014), ロシア水文気象環境監視局の航空機による気体、粒子状物質の検証観測, 日本気象学会 2014 年秋季大会講演予講集, 154, 2014-09-30.
- 笠原三紀夫, 東野達 (2007) : エアロゾルの大気環境影響, 289-292, 京都大学学術出版会.
- 原圭一郎, 長田和雄, 矢吹正教, 林 政彦, 山内 恭, 塩原匡貴, 和田 誠 (2010) : 南極沿岸域でのブラックカーボン—季節変化と輸送過程—, *National Institute of Polar Research*, vol. 54, 特集号, 562-592.
- 竹村俊彦 (2009) : 大気エアロゾル予測システムの開発, *Tenki*, *Tenki* 56(6), 455-461, 2009-06-30.
- 安生哲也 (2008) : 大気中におけるメタンの化学輸送シミュレーションに関する研究, 東京大学 新領域創成科学研究科 環境学研究系 自然環境学専攻 修士論文, <http://hdl.handle.net/2261/20305>.
- 日本気象学会 学術委員会 第 38 期 航空機観測に関する検討部会 (2015) : 航空機観測による気候・地球システム科学研究の推進研究計画書, <http://www.metsoc.jp/default/wp-content/uploads/2015/10/1eb0dc5d7ff364599db9d8d921296ccc.pdf>, 37-48.
- JAMSTEC (2015) : JAMSTEC とブラックカーボン研究, <https://ebcrpa.jamstec.go.jp/egcr/j/column/pdf/20150213.pdf>.
- JAMSTEC (2015) : 北極域環境変動総合研究センター IACE パンフレット,

http://www.jamstec.go.jp/j/pr/pamphlet/pdf/iace_j.pdf.

環境省（2008）：微小粒子状物質健康影響評価検討会 報告書 第 7 章，

<http://www.env.go.jp/air/report/h20-01/mat07.pdf>.

日本気象学会（2012）：第 13 回 統合的陸域圏研究連絡会「気候変動下での森林火災について - アラスカ，シベリア，インドネシアなどでの火災動向」，

http://seib-dgvm.com/liku/history/2012_2.html.

謝辞

本研究で使用した NICAM-Chem の計算実行は国立環境研究所主任研究員の五藤大輔氏に行って頂きました。厚く感謝申し上げます。

まず、本研究を進めるにあたり2年間ご指導いただいた、東京大学 今須良一 准教授に心から感謝申し上げます。今須先生には入学以前から終始丁寧にご指導していただきました。研究が思うように進まない私に対して常に真摯に向き合ってください、学術的な内容だけでなく、ものの捉え方や考え方に至るまで教えていただきました。また、学生生活においては、普通ではできないような様々な体験をさせて頂き、多くの新しい価値観に触れ、視野を広げる機会をご提供くださいました。自身の至らなさから沢山のご迷惑をおかけし、悔やむこともありましたが、先生の下での二年間がなければ、今の私はありません。心から感謝しています。本当にありがとうございました。

同研究室の皆様にも大変お世話になりました。秘書の原田さんには、事務処理で大変お世話になっただけでなく、いつも優しくお声がけしていただきました。また、時折いただくお土産がとてもありがたく、嬉しかったです。本当にありがとうございました。特任研究員である染谷さんには、今須研の学生が不自由なく研究する環境を常に整えて頂きました。個人的にも時に厳しくご指導して頂きました。厚く感謝申し上げます。ありがとうございました。博士の岩崎さんには学生生活全般で大変お世話になりました。研究での悩みを長時間に渡り親身に聞いてくださり、優しいアドバイスに幾度も助けられました。また、旅行や行事、ゼミなどでも本来私がやるべき仕事を度々手伝っていただきました。常に周囲に気を配り、お声がけしている姿勢をととても尊敬しています。本当にありがとうございました。また、後輩のチェンくん、リンリンさん、シリアリくんには、学生生活においてとても楽しい時間を過ごさせていただきました。特にチェンくんは入学前から交流があり、同輩のように接させていただきました。ありがとうございました。同期の伊藤くんとは、研究だけでなく、就職活動や学生生活の苦しい部分をいつも共有することができ、大変感謝しています。友人として気楽に話せるだけでなく、会話の中で時折みせる鋭い洞察に問題解決のヒントをもらうことが多々ありました。一緒に研究室生活を送ることができ、とても楽しかったです。本当にありがとうございました。また、今須研 OB の方々にもお世話になりました。少ない機会でしたが社会人としての貴重なお話を聞くことができ、感謝しております。

研究室以外では大気海洋研究所の皆様、自然環境学専攻の皆様にも大変お世話になりました。特に専攻の友人には、棟が違い頻繁に接することがないにも関わらず、週に一度のコースゼミなどでは大変仲良くしていただきました。とても楽しかったです。ありがとうございました。

また、大学の外では、この二年間で特別な友人達と出会うことができました。研究で悩む私をいつも気にかけてくださり、励ましてくれました。心から感謝しています。本当にありがとうございました。

そして、これまでの人生を支えてくれた両親、家族の皆には特別な感謝伝えたいと思います。

最後に改めて、研究室の皆さんと今須先生に心から感謝しております。今須研の名に恥じぬよう、精一杯精進してまいります。2年間本当にありがとうございました。