

平成24年度

北極海航路における船舶からの黒煙
(ブラックカーボン)に関する調査研究
報 告 書

平成25年3月

海 洋 政 策 研 究 財 団
(財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)

はじめに

本報告書は、ポートルースの交付金による日本財団の平成 24 年度助成事業「北極海航路における船舶からの黒煙（ブラックカーボン）に関する調査研究」の成果をとりまとめたものです。

CO₂の排出が地球温暖化の大きな原因の一つであることは、すでに人々の共通認識として定着しております。しかし、北極域の温暖化を一層加速させる原因物質として黒煙（ブラックカーボン）が重要とされていることについては、まだ多くの人々に理解されていないようです。

一般に、不完全燃焼によって大気中に排出されるブラックカーボンは、太陽光を効率良く吸収する性質を持っており、大気中にある際には大気を加熱し、雪氷面に沈着した際には雪氷の融解を促進して、温暖化の促進につながる重要な影響を持つ物質と認識されています。今後、北極海の海氷が減少していくことで、さらに北極海航路を航行する船舶の増加が予測されますが、これはブラックカーボンの排出増加にもつながり、北極圏において局所的に急激な温暖化の起こる可能性が示唆されております。

すでに、国際海事機関 (IMO; International Maritime Organization)では、2011 年 7 月に開催された第 62 回海洋環境保護委員会 (MEPC62; 62nd session of Marine Environment Protection Committee)で、国際海運から排出されるブラックカーボンが北極圏に及ぼす影響について調査を行い、規制の必要性について検討すべきであることが合意されており、ブラックカーボンの定義、計測方法及び制御方法等について具体的な技術的検討を進めております。

このような状況に鑑み、当財団では、本年度から船舶からの黒煙の排出実態やシミュレーションなどを実施し、将来における北極域での黒煙に関する規制の必要性及び実用的対策の調査研究を行うことにより、地球環境問題の解決に寄与することを目的として本事業を実施いたしました。

本年度は 2 年計画の初年度として、船舶が排出するブラックカーボンの実測を行うとともに、船舶の活動量を調査して北極海航路におけるブラックカーボンの排出位置や排出量を求めました。そして、これらの排出源データを入力値としたブラックカーボンが大気中でどのように輸送され拡散していくのかを求める輸送シミュレーションモデル、並びにブラックカーボンが輸送され大気中にある時、あるいは地表に沈着した後はどう気候に影響するのかを求める大気放射シミュレーションモデルの構築を行いました。また、その妥当性を見るため、これらのモデルによる計算結果と先行研究における結果との比較を行いました。その結果、これらのモデルの再現性は概ね妥当であるものの課題のあることもわかりました。その他、本年度は、ブラックカーボンの排出量、大気中濃度、沈着量、放射強制力の 4 項目に着目して同地域のブラックカーボンによる環境影響の現状及びその評価手法に関する調査も行いました。

これらから次年度に向けて、モデルのさらなる改善を図り、北極海航路における船舶からのブラックカーボンの影響を定量化し、環境影響の最小化に向けた対策や規制について検討を進めていきたいと考えております。

本事業を進めるにあたりましては、高崎講二九州大学大学院総合理工学研究院教授を委員長とする「北極海航路における船舶からのブラックカーボンに関する調査研究委員会」各委員の方々による熱心なるご審議とご指導を賜りました。また、国土交通省海事局の皆様をはじめとするオブザーバーの方々には委員会において有益なご発言を賜るとともに、特に実船試験においては多大なるご協力を賜りました。これらの皆様に、心から厚くお礼を申し上げます。

平成 25 年 3 月
海洋政策研究財団
理事長 今 義 男

北極海航路における船舶からのブラックカーボンに関する委員会委員名簿

(順不同、敬称略)

委員長	高崎 講二	九州大学大学院 総合理工学研究院 環境エネルギー工学専攻 教授
委員	前田 和幸	独立行政法人水産大学校 海洋機械工学科 教授
	青木 輝夫	気象庁 気象研究所 物理気象研究部 第三研究室 室長
	大島 長	気象庁 気象研究所 環境・応用気象研究部 第1研究室 研究官
	兼保 直樹	独立行政法人産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 大気環境評価研究グループ 主任研究員
	速水 洋	一般財団法人電力中央研究所 環境科学研究部 大気海洋研究領域 上席研究員
	佐瀬 裕之	一般財団法人日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター 生態影響研究部 研究部長
	津野 良治	一般社団法人日本船主協会 海務部 係長 (河本賢一郎 一般社団法人日本船主協会 海務部 係長) (小松 弘行 一般社団法人日本船主協会 海務部 副部長 (委員代理出席))
	華山 伸一	海洋政策研究財団 海技研究グループ 主任研究員

() 内は前任者

北極海航路における船舶からのブラックカーボンに関する委員会委員会出席者名簿

(順不同、敬称略)

オブザーバー

丸田 晋一	国土交通省 総合政策局 海洋政策課 海洋政策渉外官
松井 淳	国土交通省 海事局 安全基準課 環境基準室長
大西 泰史	国土交通省 海事局 安全基準課 専門官
松本 友宏	国土交通省 海事局 安全基準課 専門官
柚井 智洋	国土交通省 海事局 安全基準課 主査
及川 武司	日本内航海運組合総連合会 審議役
小林 正和	株式会社商船三井 海上安全部 安全グループ兼グループ事業部 安全担当グループ マネージャー
井上 清次	川崎汽船株式会社 環境推進室
陣内 幸児	日本郵船株式会社 技術本部 技術グループ兼環境グループ 調査役
廣田 洋之	第一中央汽船株式会社 船舶グループ 技術チーム長
村上 裕昇	第一中央汽船株式会社 船舶グループ 技術チーム
能代 俊亮	日本ガイシ株式会社 産業プロセス事業部 営業部 東京営業所

関係者

櫻井 達也	日本エヌ・ユー・エス株式会社	環境解析ユニット	コンサルタント
佐竹 晋輔	同上	安全・環境解析ユニット	コンサルタント
岩崎 一晴	同上	安全・環境解析ユニット	

事務局

岡寄 修平	海洋政策研究財団	常務理事	
加藤 隆一	同上	海技研究グループ	グループ長
三木憲次郎	同上	海技研究グループ	グループ長
森 勝美	同上	海技研究グループ	グループ長代理
南島るりこ	同上	海技研究グループ	海事研究チーム チーム長

目 次

調査の概要

1. 調査の目的	0-1
2. 委員会開催日	0-1
3. 調査の内容	0-2
1 北極海航路における船舶からのブラックカーボン排出の影響	1-1
1.1 本事業の目的	1-3
1.2 本事業におけるブラックカーボンの考え方	1-3
1.3 北極海航路を対象としたブラックカーボンの影響に係る議論の状況	1-5
1.4 北極海航路においてブラックカーボンの環境影響を示すための評価項目	1-7
1.4.1 北極圏に対する地球温暖化の影響と同地域における気候変動の 影響などとの関係整理	1-7
1.4.2 北極圏で懸念されるブラックカーボンの生態系影響	1-7
1.4.3 北極圏で懸念されるブラックカーボンの人体健康影響	1-8
1.5 本年度事業における解析内容	1-9
2 船舶から排出されるブラックカーボンの粒径分布の定量を目的とした実測	2-1
2.1 実測の目的	2-2
2.2 実測の概要	2-3
2.2.1 実施した測定	2-3
2.2.2 実施期間	2-3
2.2.3 調査対象船	2-4
2.2.4 調査スケジュール	2-4
2.3 調査方法	2-5
2.3.1 測定系 1（うち、アンダーセンスタックサンプリャによるブラックカーボン採取）	2-5
2.3.2 測定系 1（うち、水分採取）	2-10
2.3.3 測定系 1（うち、ガス状物質及び排ガス温度計測）	2-11
2.3.4 測定系 2（フィルタホルダによるブラックカーボン採取）	2-13
2.3.5 排ガス流速の実測	2-16
2.3.6 測定系 3（使用燃料の一般性状の測定）	2-16
2.3.7 運転記録	2-16
2.4 調査結果	2-17
2.4.1 通常航行時におけるダストの分析結果	2-17
2.4.2 Soot-Blow 時における炭素濃度分析結果	2-20
2.4.3 Soot-Blow 時における粒子画像解析結果	2-23
2.4.4 燃料性状	2-26
2.4.5 運転記録	2-26
2.5 考察	2-27
2.5.1 燃料消費率の検証	2-27

2.5.2	排出ガスの解析	2-27
2.5.3	通常航行時の PM 排出係数の試算	2-31
2.5.4	調査方法の改善に係る検討	2-31
3	北極海航路における船舶からのブラックカーボン排出インベントリの作成	3-1
3.1	ブラックカーボンの排出係数の検討	3-3
3.2	北極海航路を対象とした船舶活動量の作成	3-7
3.2.1	北極海航路における船舶活動量の収集	3-7
3.2.2	北極海航路における船舶活動量の算出	3-8
3.2.3	活動量データの地理的配分	3-9
3.2.4	ブラックカーボン排出インベントリの算出パラメータの検討	3-10
3.3	北極海航路を対象とした船舶からのブラックカーボン排出量の算出結果	3-12
3.3.1	船種別集計	3-12
3.3.2	内航・外航航路別集計	3-13
3.3.3	季節別集計	3-14
3.3.4	国別集計	3-15
3.3.5	他の排出量データとの比較	3-16
3.3.6	排出量の経年変化及び将来予測	3-19
4	北極圏におけるブラックカーボン輸送シミュレーションモデルの構築	4-1
4.1	シミュレーションモデルの構築	4-2
4.1.1	領域化学輸送モデル：WRF-Chem について	4-3
4.1.2	大気放射モデル：Rstar-Mstrn について	4-3
4.1.3	領域化学輸送モデルと大気放射モデルの計算設定条件および計算実行フロー	4-5
4.2	既存のブラックカーボンの陸域起源排出源データの整理	4-11
4.2.1	人為起源排出源データについて	4-11
4.2.2	バイオマスバーニング起源排出源データについて	4-12
4.2.3	船舶起源排出源データについて	4-13
4.3	ブラックカーボン輸送モデル、大気放射モデルの検証	4-14
4.3.1	ARCTAS 集中観測事業におけるシミュレーション結果との比較	4-14
4.3.2	ブラックカーボン大気中濃度の測定値および気象観測データとの比較	4-18
4.3.3	先行研究における放射強制力計算結果との比較	4-55
5	北極圏におけるブラックカーボンの環境影響評価に係る事前解析	5-1
5.1	局地気象・気候影響評価	5-3
5.1.1	船舶起源ブラックカーボンによる放射強制力	5-3
5.1.2	ブラックカーボン沈着による雪氷面反射率減少効果	5-10
5.2	生態系影響評価	5-19
5.2.1	船舶から排出されるブラックカーボンの特性	5-19
5.2.2	粒子状物質の植物への影響	5-22
5.2.3	北極圏で考えられる粒子状物質の生態系影響	5-26
5.2.4	調査した文献の一覧	5-28
6	まとめ	6-1

1. 調査の目的

極域を航行する船舶から排出される黒煙(ブラックカーボン)は、沈着して雪氷面の熱吸収を高め、雪氷の融解を早めて局所的な温暖化を引き起こすと言われている。この局所的な温暖化は急激であり、脆弱な極域の生態系や我が国の気象に与える影響も大きいと言われている。

船舶から排出される黒煙の寄与率は、将来の北極圏での商業航路の発展等によって、大きく増加する恐れがある。このため、国際海事機関(IMO)においては、2012年より2年間で北極域における船舶からの黒煙の規制の必要性について検討作業を進めることになった。

本事業は、船舶からの黒煙の排出実態やシミュレーションなどから、将来における北極域での黒煙に関する規制の必要性及び実用的対策の調査研究を行うことにより、地球環境問題の解決に寄与することを目的として本年度から実施した。

船舶から排出される黒煙の排出実態の解明を目的として、スートブローなどの船舶におけるオペレーションごとの黒煙の排出量とその組成構成・粒径分布などを、文献調査だけでなく外航船を対象にして実測を行い、船舶からの黒煙の排出実態を把握する。

また黒煙による局地気象に対する影響を把握するために上記の排出データ及び現在の航行量をベースに、a.雪表面の反射率変化及びb.対流圏上層における熱の吸収について、船舶黒煙の局地気象に対する影響について WARF-CHEM などを用いてシミュレーションを行う。

更に、黒煙による健康被害及び生態系への影響を把握することを目的として上記のデータ及び現在の航行量をベースに、沈着量などから健康被害及び生態系への影響について解析を行う。

最後に船舶から排出される黒煙の人工排出源に対する寄与率の推定を目的として、粒度組成(PM2.5、PM10、ばいじん)ごとに、人工排出源に対する船舶から排出される黒煙の排出量寄与率の推定を行う。

2. 委員会開催日

本調査の実施にあたって、以下のように委員会を開催し、調査方針及び調査結果についてご審議いただいた。

第1回：2012年 7月23日

第2回：2012年11月 8日

第3回：2013年 2月9日

3. 調査の内容

3.1 船舶から排出されるブラックカーボンの排出実態の解明

3.1.1 排出実態の解明方法について

本事業では、航行（負荷率 75-85%）及び Soot-Blow といった 2 種類のオペレーション時におけるブラックカーボンの排出量とその組成構成・粒径分布などを、文献調査とともに外航船を対象にして実測を行い、船舶からのブラックカーボンの排出実態を把握した。

本調査では、C 重油 2 ストロークディーゼルエンジンの外航大型コンテナ船（最大出力 49,100 kW）の、通常航行時における粒径別のダスト重量分析及び Soot-Blow 時における炭素分析を行い、燃焼ガスの排出過程におけるダスト及び炭素成分の挙動を把握した。

3.1.2 航行時における排ガスの実測方法について

(1) 排ガスの希釈について

排ガス中の PM 計測に対する公定法は「フィルタ重量法」であり、凝縮性ダストを定量することを目的とした「排ガスの清浄空気による希釈」がプロセスとして必要となる。本年はまず、固体粒子として排出されるブラックカーボンの実態把握を主目的とし、未希釈ガスによる固体粒子の計測を実施した。

(2) 適用する測定方法について

本事業では、アンダーセンスタックサンプラー単独によるブラックカーボンの粒径分布及び濃度の計測を実施した。

排出ガス量とダスト濃度の分析結果から試算した通常航行時の PM の排出係数は平均で 0.26 g/kWh であり、GHG 2nd Study (IMO, 2009) で報告された EC、OC の排出係数と比較すると、6 割程度であった。試料採取位置が屈曲しており、乱流影響の可能性も想定される。今回の測定は絶対濃度の把握が目的でない点には留意されたい。

通常航行時における燃焼排ガスの組成に関して、水分量が検出下限以下であり、ほとんど水分が含まれていない乾いたガスであった。また、O₂ 濃度は約 14.9%、CO₂ 濃度は約 4.7%であったことから、十分な酸素供給量下での燃焼過程であったといえる。

3.1.3 Soot-Blow 時における排ガスの実測方法について

Soot-Blow 時を対象とした計測は排ガスエコノマイザの下流において行った。

Soot-Blow 時における燃焼排ガス中の炭素濃度について、二つの検体ともに EC が約 86%、OC が約 14%であった。しかしながら、#9 ブロア作動時の総炭素濃度は 1,397.5 mg/m³、#13 ブ

ロア作動時の総炭素濃度は 789.9 mg/m³ であり、作動ブローの違いによる総炭素量の大きな相違が見られた。

Soot-Blow 時における燃焼排ガス中の捕集粒子について、表面観察の結果、最前面に付着した粒子の最長径の平均径は 0.51～0.60 μm であった。また、粒径別の出現頻度は 0.4～0.5 μm の粒子をピークとして右側に裾野が広がる分布を示しており、観察された最大の粒子径は 1.32 μm、大多数がサブミクロン領域の粒子であった。ただし、ここで算定した粒径分布には、粒子のカウント手法上、Soot-Blow で排出されるクラスタ状の炭素成分をカウントしていないため、実際の排ガス中における粒径分布を示しているものとはならない。電子顕微鏡の画像においても、カウントしていない粒子の背景には大型のクラスタ状粒子が存在していることが判別できた。

3.2 排出係数の設定及び排出インベントリの作成

まず、PM の排出係数を、GL (Germanischer Lloyd) より提供された燃料中の硫黄分 [%] と希釈法における PM 排出係数 [g/kWh] の直線近似式から設定した。

続いて、過去の北極海周辺国の調査データから整備された北極圏における船舶活動量データベースに、上記のように決定した排出係数を乗じて、地理的・季節的な変動を持つ船舶からのブラックカーボン排出インベントリを作成した。

3.3 北極域における黒煙輸送シミュレーションモデルの構築

3.3.1 黒煙の移流・拡散シミュレーション

(1) 領域化学輸送モデルの構築

北極域における黒煙の大気中濃度及び、沈着量を導出するために、領域化学輸送モデルを構築した。

領域化学輸送モデルには、アメリカ大気研究センター (NCAR: The National Center for Atmospheric Research) 及びアメリカ大気海洋庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) が開発を主導する WRF-Chem (The Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry) を利用した。

本事業における黒煙輸送シミュレーションの対象領域は、少なくとも北緯 70 度以北の地域が全て含まれる北極域と設定した。

(2) 領域化学輸送モデル実行のための各種入力データベースの整備

① 陸域排出源データの整備

REAS (年平均/0.5 度/東アジア域)、INTEX-B (月平均/0.5 度/東アジア域)、EDGAR (年平均/0.1 度/全球)、ARCTAS (年平均/1.0 度/全球)、RETRO (月平均/0.5 度/全球)、GFED3 (日平均～月平均/0.5 度/全球) などに代表される、先行研究において作成された陸域起源黒煙排出源データから、利用可能なものを組み合わせ、本事業のシミュレーション領域における陸域起源の黒煙発生源データを作成した。

② 地勢データの整備

本事業におけるシミュレーション領域においては、氷床・雪が被覆している可能性が高く、通常使用されている氷床・積雪被服率データよりも、高い時間的・空間的解像度をもつデータの使用が望ましいと考えた。そこで、アメリカ大気海洋庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) が日毎に提供している空間解像度 25 km の氷床・積雪被服率データを使用した。

③ 初期・境界条件の整備

領域化学輸送モデルによるシミュレーションの実行には、大気汚染物質の初期・境界条件及び各種気象情報が入力データとして必要となる。そこで、本シミュレーションにおける気象の初期・境界条件は、アメリカ大気研究センターが提供する全球データから作成し、また大気汚染物質の初期・境界条件には、既存の全球化学輸送モデルの出力値から作成した。

3.3.2 黒煙の光吸収シミュレーション

(1) 光吸収シミュレーションモデル(大気放射モデル)の構築

黒煙の光学的性質による局地気象への影響をシミュレートする光吸収シミュレーションモデル(大気放射モデル)を構築した。ここで、光吸収シミュレーションモデル(大気放射モデル)とは、太陽放射エネルギー、地球・大気からの赤外エネルギーの大気中での伝播をシミュレートするモデルである。

北極圏を対象としたブラックカーボンの輸送シミュレーションやその大気放射シミュレーションの実施例は限られており、北極圏での局地気象・気候の影響評価に対して、標準化されたモデルは整備されていないのが現状である。そこで、本年度事業においては、北極圏におけるブラックカーボンによる局地気象・気候の影響評価に適用するモデルの整備を行うことを主目

的の一つとし、3次元化学輸送モデル WRF-Chem 及び大気放射モデル Rstar-Mstrn を利用して、ブラックカーボンの輸送シミュレーションモデル・大気放射シミュレーションモデルの構築を行った。本年度の解析対象期間は、北極圏でのブラックカーボンを含む大気エアロゾル観測が比較的高頻度で実施された 2008 年の 1 年間と設定した。WRF-Chem の計算領域は、北緯 82 度、東経 112.5 度を中心とした北極圏全域および北半球中緯度域を含むポーラステレオ座標系で表現される領域(水平解像度: 60km)と設定した。陸域人為起源および船舶起源のブラックカーボン排出量には ARCTAS 集中観測事業において作成された排出源データを、バイオマス燃焼起源のブラックカーボン排出量には GFED (Global Fire Emissions Database) のデータを使用した。Rstar-Mstrn では、WRF-Chem で計算された気象(気温、気圧など)、地勢(反射率、土壌水分量など)、濃度(気体、エアロゾル成分)に係る 1 時間間隔の情報を入力データとして計算を行った。

(2) 黒煙の光学的特性に係る検討

北極域における光学的特性観測に関連する先行研究を対象に、黒煙粒子の光学的特性について文献調査を行い、光吸収シミュレーションモデル(大気放射モデル)内で扱われているものとの比較を行った。また比較をもとに、北極域を代表する黒煙粒子の光学的特性についての検討を行い、得られた結果を光吸収シミュレーションモデルに適用した。

(3) 黒煙沈着による雪氷面反射率(アルベド)減少過程の取り扱いに係る検討

これまでに黒煙沈着による雪氷面の反射率減少過程のモデル化を対象にした研究論文などを中心に文献調査を行い、光吸収シミュレーションモデル(大気放射モデル)に導入する雪氷面反射率減少モデルについて検討した。検討は、(i) 各先行研究において提案された個々のモデルの入力パラメータ、(ii) 対象としている地域・事象、(iii) 観測に対する再現性、などの項目を個々のモデル間で比較して行った。また、その結果に基づき、光吸収シミュレーションモデルに導入する雪氷面反射率減少モデルを選択し、導入を検討した。

「雪氷面に沈着したブラックカーボンが、雪氷面上もしくは、取り込まれた積雪層内で光を吸収し、周囲を加熱することにより、雪氷を融解し、雪氷面の反射率(地表面アルベド)を下げるフィードバック現象」の事前解析として、同過程を扱うモデルについて、文献調査を行い、次年度に本事業において導入するモデルについて検討を行った。まず、文献調査の結果から、同過程が、二酸化炭素と比較して、どの程度北極圏の気候変動に重要であるかを把握した。次に、現在の気候影響研究において、ブラックカーボン沈着による反射率減少過程を扱う主なモデルについて整理した。またモデル入力パラメータ、観測の再現性、モデルの特徴に着目し、モデル間で比較を行い、気象・気候モデルなどでの利用を想定して開発された Aoki et al (2011)のモ

デルは、高速計算用の工夫が施されているだけでなく、観測の再現性も非常に高く、実用性、観測の再現性の観点から、本事業で導入するモデルとして最も適切であると結論付けた。

3.3.3 領域化学輸送モデル・光吸収シミュレーションモデルの検証

北極圏を対象にした先行研究について調査し、すでに解析されている事象に対して、本シミュレーションにおいても確認できるかで、気象モデル・領域化学輸送モデル・光吸収シミュレーションモデルの検証を行った。調査対象とする先行研究は、本事業と同様に北極域を対象とした POLARCAT (Polar Study using Aircraft, Remote Sensing, Surface Measurements and Models, of Climate, Chemistry, Aerosols and Transport) 事業における集中観測 (ARCTAS ; Arctic Research of the Composition of the Troposphere from Aircraft and Satellites) や、大陸間スケールの汚染物質輸送を研究対象としている TF-HTAP (Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollutants) などから引用した。

計算結果の妥当性を検証するため、モデルにより計算されたブラックカーボンの濃度、気象場(風向、風速、気温、湿度)、放射強制力を航空機観測データ、地上観測データ、文献調査から得られた先行研究の結果と比較した。ブラックカーボンの濃度については、バイオマス燃焼起源のブラックカーボン排出量データを月平均値で与えているため、森林火災による高濃度イベントが再現できない場合が散見されたが、この点を除けば、計算されたブラックカーボン濃度の高濃度域の水平分布は、先行研究における計算結果と大差なく、観測値との比較でも概ね季節変動をとらえていると判断された。気象場については、夏季の気温・湿度については観測値をよく再現していたが、風速は1年を通して観測値と比べ過大であった。全体として、極夜が起こる高緯度地域の冬季の気象場の再現性が悪く、今後課題を残した。放射強制力については、対象年が異なることから直接的な比較はできないものの、全体として、放射強制力の計算結果は、先行研究における各地域の計算結果と比較して、概ね一致していると考えられた。

3.3.4 北極域における黒煙の環境影響評価に係る事前調査

本事業では、船舶が排出するブラックカーボンの直接観測を行い、また北極圏のブラックカーボンによる環境影響を評価するシミュレーションモデルの構築を行うと共に、(1) 排出量、(2) 大気中濃度、(3) 沈着量、(4) 放射強制力の4項目に着目して同地域のブラックカーボンによる環境影響の現状及びその評価手法に関する調査を行った。ブラックカーボンは光を強く吸収する物質であり、また、粒子状物質として生態系及び人体健康影響に関与するものと考えられる。このようなブラックカーボンの動態・挙動を議論する際には、その定義に係る明確な共通認識を形成

しておく必要がある。本事業では、粒子状物質に含まれる成分のうち、EC・OM (organic Material)・Ash の合計値をブラックカーボンとみなして排出インベントリ及び輸送シミュレーションモデルの整備を行うこととした。北極海航路におけるブラックカーボンの環境影響として、(i) 北極圏に対する地球温暖化の影響、(ii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの生態系影響、(iii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの人体健康影響、といった3つの視点に着目し、最終的に、本事業では、北極圏に対する地球温暖化の影響及び生態系への直接影響をもって北極海航路における船舶からのブラックカーボン排出の影響を評価することとした。

(1) 極地気象への影響

本年度事業においては、極地気象への影響評価を行う事前解析として、IPCC 第4次報告書(2007)及び第3次報告書(2001)を代表とする先行研究において報告されている全球規模・領域規模における放射強制力の数値についての文献調査を行い、放射強制力の数値を全球・領域・成分・排出源・その他の気候変動因子について整理した。

「大気中を浮遊しているブラックカーボンが太陽光を吸収することで大気を加熱する過程」の事前解析として、本シミュレーション領域における全ての船舶から排出されたブラックカーボンの気候影響評価を行った。ここでは船舶排出起源ブラックカーボンの大気濃度はその排出源分布に対応して中緯度で高く、高緯度で低い傾向にある一方で、その放射強制力は日射量が極端に減少する秋・冬季を除いて、高緯度域でより高くなる傾向にあり、春・夏季の北極圏ではブラックカーボン濃度が薄くてもその加熱効果は中緯度より大きくなる傾向にあることが示された。また本事前解析は全船舶から排出されたブラックカーボンを対象にしたものであり、北極海航路の船舶から排出されたブラックカーボンが北極圏内の気象・気候に与える局所的な影響を評価するためには、北極圏内の船舶排出をゼロとするといった地理別の排出源寄与率解析が必要であることがわかった。

(2) 生態系への影響

北極海航路における船舶排出黒煙の生態系影響評価を行うための事前解析として、船舶排出粒子に含まれる有害大気汚染物質について解析を行った研究を対象に、文献調査を行い、その含有成分について整理した。

生態系影響評価の事前解析として、粒子状物質の含有成分(ブラックカーボンや金属類など)の曝露量と生態系への影響の規模を関連付ける研究について文献調査を行った。その結果、ブラックカーボンの植物への直接的影響については、0.13-0.58 mg m⁻²(葉面積当たり)程度では、樹木の成長やガス交換等の生理活性に影響を与えないが、工業地帯や高速道路の直近を想定したレベ

ルである曝露量 $0.4 - 1.3 \text{ g m}^{-2}$ (葉面積当たり)では、葉温が上昇し、結果として、蒸散量が多くなるといった影響を与えることがわかった。またスギ、熱帯樹木、落葉性カラマツにおいて、年間約 $10\text{-}30 \text{ mg m}^{-2}$ 程度の BC が、葉面に沈着・蓄積することが報告されていることから、実際の森林地域における BC の沈着がその成長に影響を与えている可能性については、今後さらに検討すべきであることが示唆された。

3.3.5 船舶由来のブラックカーボンの人為起源排出量に対する寄与率の推定

整備したブラックカーボンの排出インベントリと陸域排出源データを利用し、北極圏を対象として、ブラックカーボンの人為起源排出量に占める船舶由来分の寄与率を推定した。

また、船舶インベントリを ON/OFF したシミュレーションを実施し、両者の比較から北極圏におけるブラックカーボンの動態に対する船舶寄与分を算定した。

1 北極海航路における船舶からのブラックカーボン排出の影響

本事業では、船舶が排出するブラックカーボンの直接観測を行い、また北極圏のブラックカーボンによる環境影響を評価するシミュレーションモデルの構築を行うと共に、(1) 排出量、(2) 大気中濃度、(3) 沈着量、(4) 放射強制力の4項目に着目して同地域のブラックカーボンによる環境影響の現状及びその評価手法に関する調査を行った。

ブラックカーボンは光を強く吸収する物質であり、また、粒子状物質として生態系及び人体健康影響に関与するものと考えられる。このようなブラックカーボンの動態・挙動を議論する際には、その定義に係る明確な共通認識を形成しておく必要がある。本事業では、粒子状物質に含まれる成分のうち、EC・OM (organic Material)・Ash の合計値をブラックカーボンとみなして排出インベントリ及び輸送シミュレーションモデルの整備を行うこととした。なお、この設定では、ブラウンカーボン (BrC) である OM を保守的にブラックカーボンとして扱うことになる。これとは別に、灰分の一部として検出される重金属類については、生態系への直接的影響が考えられることから、別途そのリスク評価を行った。

北極海航路におけるブラックカーボンの環境影響として、(i) 北極圏に対する気候変動の影響、(ii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの生態系影響、(iii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの人体健康影響、といった3つの視点に着目し、本事業において評価対象とすべき項目を検討した。以下に論点をまとめる；

(i) 北極圏に対する気候変動の影響

定義の統一が取れていない可能性があるものの、全球規模の人工総排出量に占める船舶起源の割合は2%程度であるとされていること、全球規模でのブラックカーボンの排出規制はUNFCCCの枠組みにおいても優先的に取り組まれていないことなどから、船舶から排出されるブラックカーボンが全球規模の温暖化に大きく関与しているとは考えにくい。そのため、地球温暖化に対する船舶起源のブラックカーボンの影響は本事業では扱わない。

これに対し、北緯70度以北に限定すれば、船舶起源の割合は67.2%にまで上昇することが本事業の推定作業(本報告書3.3.5(2)節参照)で判明した。つまり、北極圏及びその周辺海域では、船舶から排出されるブラックカーボンによって局所的な放射強制力の変化がもたらされている可能性があり、また、ブラックカーボンの沈着によって雪氷面が黒色化し、それによって雪氷面の反射率が低下していることも示唆される。

以上より、本事業では北極圏を対象とした輸送シミュレーションモデル及び排出インベントリを整備し、同領域の気温上昇に代表される北極海の気候変動に対する船舶起源のブラックカーボンの関与を放射強制力及び反射率の変化から解析・評価する。

(ii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの生態系影響

ブラックカーボンによる生態系影響は、ブラックカーボンの沈着に起因する「直接的影響」と、ブラックカーボンがもたらす気候変化に起因する「間接的影響」の2つに区分される。

間接的影響の要因となる気候変化は、北極海航路において排出されるブラックカーボンだけによって引き起こされるものではなく、そのブラックカーボンの寄与のみを取り出して評価を行うことは

事実上困難である。また、気候変動は北極圏以外における生態系に対しても大きな影響を与えており、かつ IPCC の第 4 次評価報告書においても、北極圏の生態系が他の生態系に比較して極端に脆弱であるとの認識は示されていない。

以上より、本事業の目的が北極海航路に限定したブラックカーボンの環境影響を調査することであるため、「間接的影響」は解析項目として扱わないこととし、「直接的影響」をもって生態系影響を解析する。

(iii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの人体健康影響

ブラックカーボンは気候変動と大気汚染の同時抑制、いわゆる Co-benefit の観点でも着目されている。しかしながら、ブラックカーボンによる人体健康影響を他の粒子成分による影響から区別して評価することは困難であり、通常は PM_{2.5} のような粒子状物質 (PM: Particulate Matter) を対象として人体健康影響の評価を行う。

船舶からの PM の排出規制は、海洋汚染防止条約 (MARPOL 73/78 条約) 付属書 VI の 2010 年 7 月に発効した改正において既に扱われている。同付属書では PM の人体健康影響も評価項目として扱っているが、同じ PM 曝露量に対する人体健康影響リスクが、北極圏では際立って脆弱であるという科学的根拠は確認されていないため、北極圏における PM の人体健康影響評価も同付属書の枠組みで行うべきものとする。

以上より、本事業の目的が北極海航路に限定したブラックカーボンの環境影響を調査することであるため、人体健康影響評価は解析項目として扱わないこととする。

以上より、本事業では、北極圏に対する地球温暖化の影響及び生態系への直接影響をもって北極海航路における船舶からのブラックカーボン排出の影響を評価することとした。

1.1 本事業の目的

一般に、化石燃料やバイオマスの不完全燃焼によって大気中に排出される黒煙（以下、ブラックカーボン）は、太陽光を効率良く吸収する性質を持ち、大気中に滞留している際、大気を加熱することで温暖化に影響する。また雪氷面に沈着した際には、周囲の雪氷を加熱することにより、雪氷の融解を促進する。この雪氷融解効果は、太陽光の雪氷による反射効果を著しく減少させるため、温暖化の促進につながる重要な影響と認識されている。今後、北極圏の氷床融解がもたらす北極圏航路の開設は更なるブラックカーボンの排出増加につながり、その沈着によって雪氷の被覆率が高い北極圏においては局所的に急激な温暖化が引き起こされる可能性が示唆される。

本事業では、船舶が排出するブラックカーボンの直接観測を行い、また北極圏のブラックカーボンによる環境影響を評価するシミュレーションモデルの構築を行うと共に、(1) 排出量、(2) 大気中濃度、(3) 沈着量、(4) 放射強制力の4項目に対するブラックカーボンの寄与に着目して同地域のブラックカーボンによる環境影響の現状及びその評価手法に関する調査を行った。

1.2 本事業におけるブラックカーボンの考え方

ブラックカーボンは、光吸収断面積 (m^2) を測定する場合には黒色炭素 (BC; Black Carbon) と呼ばれる傾向にあるが、大気中における重量濃度 (g/m^3) を測定する場合には元素状炭素 (EC; Elemental Carbon) とも呼ばれる。そのため、この煤の動態・挙動を議論する際には、その定義に係る明確な共通認識を形成しておく必要がある。

表 1.2-1に示す通り、BCの定義については、国際的な枠組みにおいても十分な共通認識ができていたとは言いがたい。例えば IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) による第4次評価報告書¹では、ブラックカーボンは「不完全燃焼過程で大気中に直接放出される1次エアロゾルであり、太陽放射を強く吸収する。親水性と疎水性があり、様々な成分 (硫酸塩や OC) と混合体をつくる (外部混合、内部混合)」と説明されている。

CLRTAP (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) のグーテンバーグ議定書の改正案²では、ブラックカーボンについて「光を吸収する炭素性の Particulate matter を意味する」と説明されており、更に PM については「大気中の浮遊粒子から成る汚染物質であり、様々な物理特性 (サイズや形状) や化学組成を持つ。ここでは、特に記述がない限り、Particulate matter (PM) は空気動力学径が $10\ \mu\text{m}$ 以下のもの (PM_{10}) を指す。その中には、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下のもの ($\text{PM}_{2.5}$) も含まれる」と説明されている。

¹ IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007
(http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html)

² The 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone
(http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.html)

上記議定書の改正作業に先んじて、CLRTAP の諮問に対して”Ad Hoc Expert Group on Black Carbon” が提出したレポート³では、ブラックカーボンは「燃料の不完全燃焼で生じる炭素質の 1 次エアロゾルであり、光を強く吸収する。様々な汚染物質と混合体をつくる。また、elemental carbon と同義である」と説明されている。

このように、BC の定義については、十分な共通認識ができているとは言いがたく、PM との混同も多く見られる。何れにおいても、ブラックカーボンは光を強く吸収する物質であり、また、粒子状物質として生態系及び人体健康影響に関与するものと考えられる。本事業では、粒子状物質に含まれる成分のうち、EC・OM (organic Material)・Ash の合計値をブラックカーボンとみなして排出インベントリ及び輸送シミュレーションモデルの整備を行うこととした。詳細は 3.1 節を参照されたい。なお、この設定では、ブラウンカーボン (BrC) である OM を保守的にブラックカーボンとして扱うことになる。これとは別に、灰分の一部として検出される重金属類については、生態系への直接的影響が考えられることから、別途そのリスク評価を行った。

表 1.2-1 国際的な枠組みでのブラックカーボンに対する考え方

国際的な枠組み	ブラックカーボンに関する記述
IPCC Fourth Assessment Report ⁽¹⁾	不完全燃焼過程で大気中に直接放出される 1 次エアロゾルであり、太陽放射を強く吸収する。親水性と疎水性があり、様々な成分 (硫酸塩や OC) と混合体をつくる (外部・内部混合)
The 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone ⁽²⁾	光を吸収する炭素性の Particulate Matter(PM)。PM は、大気中の浮遊粒子から成る汚染物質であり、様々な物理特性 (サイズや形状) や化学組成を持つ。ここでは、特に記述がない限り、は空気動力学径が 10 μm 以下のもの (PM ₁₀) を指す。その中には、2.5 μm 以下のもの (PM _{2.5}) も含まれる
Report of the Expert Group on Black Carbon ⁽³⁾	燃料の不完全燃焼で生じる炭素質の 1 次エアロゾルであり、光を強く吸収する。様々な汚染物質と混合体をつくる。また、elemental carbon と同義。

³ Report of the Expert Group on Black Carbon (ECE/EB.AIR/2010/7:
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/ExecutiveBody/welcome.28.html>)

1.3 北極海航路を対象としたブラックカーボンの影響に係る議論の状況

2011年7月に開催された国際海事機関 (IMO; International Maritime Organization) 第62回海洋環境保護委員会 (MEPC62; 62nd session of Marine Environment Protection Committee) では、国際海運から排出されるブラックカーボンが北極圏に及ぼす影響について調査を行い、規制の必要性について検討すべきことが合意された。その合意により、MEPC は、ばら積み液体・気体小委員会 (BLG; Sub-Committee on Bulk Liquids and Gases) に対して、ブラックカーボンの定義、計測方法及び制御方法等について技術的検討を実施し、MEPC65 (2013年) においてその結果を報告するよう指示している。

これを受け、2012年に開催された BLG16 及び 2013年に開催された BLG17 では、ブラックカーボンの定義・測定方法・削減方法についてコレスポンデンスグループ (通信部会) からの報告を基に議論が行われたものの、結論に至らず作業は 2014年の BLG18 まで延長されている。例えば、BLG17 では、ブラックカーボンの政策的定義として「国際海運からの BC とは、炭化水素燃料の不完全燃焼により形成され、集塊して最も効果的に太陽エネルギーを吸収する PM 構成物質」であるといった内容に概ね支持は得られた。他方、技術的定義については、測定方法として FSN 法 (Filter Smoke Number) や希釈法などが提案されたものの、ブラックカーボンと定義すべく共通の測定法を採択するには至らず、上述の通り、引き続きコレスポンデンスグループによる作業の継続が必要であると結論されている。このことから、国際海運からのブラックカーボン排出に係る技術的定義の策定には多くの作業が残されていることが明らかである。

ブラックカーボンの規制の必要性に対する当初提案国のノルウェーは、IMO においてその必要性を主張する際、下記の事項を強調している (MEPC 60/4/24 及び MEPC62/4/3 より引用) ;

- 1) 北極圏の平均気温は過去 100 年間で世界平均の上昇率 (0.7°C/100 年) の 2 倍以上の速さで上昇した。
- 2) 春季における北極点での氷床の融解は 20 世紀半ばに比べて 7 日間も早まっている。
- 3) 北極海の氷床は年々減少傾向にあり、1979 年以降、その減少率は 11.7%/10 年となっている。更には、2007 年以降、その減少率は急激に高まっている。
- 4) グリーンランドにおける氷河流出が加速的に早まっており、これにより海面上昇が危惧される。
- 5) 北極圏における気温上昇は永久凍土の融解を引き起こすことにつながり、これにより、永久凍土中に大量に蓄積されているメタンが放出されることで温暖化を更に加速させることになる。

また、現状において、全球に占めるブラックカーボンの2%は船舶から排出されており、その排出量の85%が北半球に集中していることを報告している。今後、北極圏の氷床融解がもたらす北極圏航路の開設は更なるブラックカーボンの排出増加につながるとしており、それによる北極圏の気温上昇の加速化や粒子状物質による健康影響の増加を指摘している。

なお、全球規模では、前述の通りブラックカーボンの排出は陸域由来が大部分であり、陸上発生源からのブラックカーボンの排出規制は、その削減目的が地球温暖化にある場合、国連気候変動枠組条約 (UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change) において議論されるべき内容となる。実際に、UNFCCC に対して科学的助言を行う「気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 」においてはブラックカーボンの地球温暖化などに対する評価レポートが作成されており、UNFCCC においても京都議定書に定められた6ガスに加えてBCなどを考慮するかの科学的検討は行われている。しかしながら、現状においては、6ガスに追加するかについての正式な議論は開始されていない状況である。これは、ブラックカーボンの全球に対する放射強制力の寄与が他のCO₂を太宗とする6ガスに比較して小さく、CO₂削減をブラックカーボンの削減に優先していること以外にも、ブラックカーボンの定義がこれまで述べてきたように排出源間で統一しにくく、各国内の排出量を算定しにくいためと考えられる。

1.4 北極海航路においてブラックカーボンの環境影響を示すための評価項目

ここでは (i) 北極圏に対する気候変動の影響、(ii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの生態系影響、(iii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの人体健康影響、といった 3 つの視点より、北極海航路においてブラックカーボンの環境影響を考察し、本事業において評価対象とすべき項目を検討する。

1.4.1 北極圏に対する地球温暖化の影響と同地域における気候変動の影響などとの関係整理

地球温暖化とは、地球表面の大気や海洋の平均気温が長期的に上昇する現象であり、北極圏における氷床・氷河の融解をもたらす。地球温暖化の要因としては、人為的な温室効果ガスの放出、なかでも二酸化炭素やメタンの影響が大きいとされている。

地球温暖化の要因には、温室効果ガスに加えてブラックカーボンの影響も指摘されている。ただし、上述の通り、ノルウェーは全球規模の総排出量に占める船舶起源の割合は 2 %程度であると主張していることから、船舶から排出されるブラックカーボンが全球規模の温暖化に大きく関与しているとは考えにくい。そのため、地球温暖化に対する船舶起源のブラックカーボンの影響は本事業では扱わない。

これに対し、北緯 70 度以北に限定すれば、船舶起源の割合は 67.2 %にまで上昇する (本報告書 3.3.5 (2) 節参照)。つまり、北極圏及びその周辺海域では、(i) 船舶から排出されるブラックカーボンによって局所的な放射強制力の変化がもたらされている可能性があり、また、(ii) ブラックカーボンの沈着によって雪氷面が黒色化し、それによって雪氷面の反射率が低下していることも示唆される。

以上より、本事業では北極圏を対象とした輸送シミュレーションモデル及び排出インベントリを整備し、同領域の気温上昇に代表される北極海の気候変動に対する船舶起源のブラックカーボンの関与を放射強制力及び反射率の変化から解析・評価した。

1.4.2 北極圏で懸念されるブラックカーボンの生態系影響

ブラックカーボンによる生態系影響は、ブラックカーボンの沈着に起因する「直接的影響」と、ブラックカーボンがもたらす気候変化に起因する「間接的影響」の 2 つに区分される。

船舶のディーゼル機関から排出されるブラックカーボンには、微量ながら発がん性や変異原性を示す多環芳香族炭化水素 (Polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) が含まれる (5.2.1 節参照)。また、安藤ら (2011)⁴の測定結果にも示されるように金属成分も含まれる。加えて、植生にブラックカーボンが付着することによって光合成が阻害されることにより、気温が低い北極圏において植生の生長に相対的に大きな悪影響を与えることが懸念される。

他方、間接的影響の要因となる気候変化は、北極海航路において排出されるブラックカーボンだけによって引き起こされるものではなく、そのブラックカーボンの寄与のみを取り出して

⁴安藤ら「船用ディーゼルエンジンの排ガス中に含まれる有害物質に関する分析」、海上技術安全研究所報告, 11(2), 2011.

評価を行うことは事実上困難である。また、気候変動は北極圏以外における生態系に対しても大きな影響を与えており、かつ IPCC の第 4 次評価報告書においても、北極圏の生態系が他の生態系に比較して極端に脆弱であるとの認識は示されていない。

以上より、本事業の目的が北極海航路に限定したブラックカーボンの環境影響を調査することであるため、「間接的影響」は解析項目として扱わないこととし、「直接的影響」をもって生態系影響を解析する。解析内容及び結果は本報告書の 5.2 節を参照されたい。

1.4.3 北極圏で懸念されるブラックカーボンの人体健康影響

ブラックカーボンは気候変動と大気汚染の同時抑制、いわゆる Co-benefit の観点でも着目されている。2011 年 3 月に米国 EPA が公表した「Report to Congress on Black Carbon⁵」、並びに長距離越境大気汚染条約グーテンバーグ議定書の改定⁶においても、ブラックカーボンや有機炭素を含む粒子状物質の成分全てが健康への悪影響の原因であるとの議論がなされている。

上述の通り、ブラックカーボンの排出規制は気候変動と大気汚染の同時抑制 (Co-benefit) に資することに疑いはない。しかしながら、ブラックカーボンによる人体健康影響を他の粒子成分による影響から区別して評価することは困難であり、通常は PM_{2.5} のような粒子状物質を対象として人体健康影響の評価を行う。IMO においても、下記に示す通り、ブラックカーボンを含めた粒子状成分(PM)全体の削減が人体健康影響に寄与するものと認識されている (BLG 15/INF. 8 Page2) ;

Controlling emissions of BC will result in health benefits and climate benefits, especially in sensitive regions such as the Arctic. There is a general consensus that mitigation of BC will lead to positive regional impacts by reducing BC deposition in snow- and ice-covered regions, and that reducing primary PM (including BC) will benefit public health;

ブラックカーボンのみを船舶排ガス中から削減することは技術的に困難であるため、ブラックカーボンの排出規制は事実上、粒子状物質に対する排出規制と等しくなる。粒子状物質 (PM: Particulate Matter) の排出規制は、海洋汚染防止条約 (MARPOL 73/78 条約) 付属書 VI の 2010 年 7 月に発効した改正において既に扱われている。同付属書では PM の人体健康影響も評価項目として扱っているが、同じ PM 曝露量に対する人体健康影響リスクが、北極圏では際立って脆弱であるという科学的根拠は確認されていないため、北極圏における PM の人体健康影響評価も同付属書の枠組みで行うべきものとする。

以上より、本事業の目的が北極海航路に限定したブラックカーボンの環境影響を調査することであるため、人体健康影響評価は解析項目として扱わないこととする。

⁵ U.S EPA (2011), Report to Congress on Black Carbon, <http://www.epa.gov/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>

⁶ Economic Commission for Europe (2012), Options for revising the 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, ECE/EB.AIR/2012/1

1.5 本年度事業における解析内容

これまで述べたように、ブラックカーボンは全球規模で気候変動と大気汚染の双方に深く関与しており、気候や生態系に与える影響は様々である。本年度事業では、北極圏を対象領域とした輸送シミュレーションモデル及び排出インベントリを整備し、(1) 排出量、(2) 大気中濃度、(3) 沈着量、(4) 放射強制力の4項目から北極海航路に限定したブラックカーボンの環境影響の調査を試みることを目的とする。

図 1.5-1に本事業の作業フローを示す。また表 1.5-1に、IPCC、IMO への提出文章および CLRTAP の関連文書内の評価で取り上げられた影響をまとめると共に、本年度事業において上記4項目から解析可能であるか否かを併せて示す。

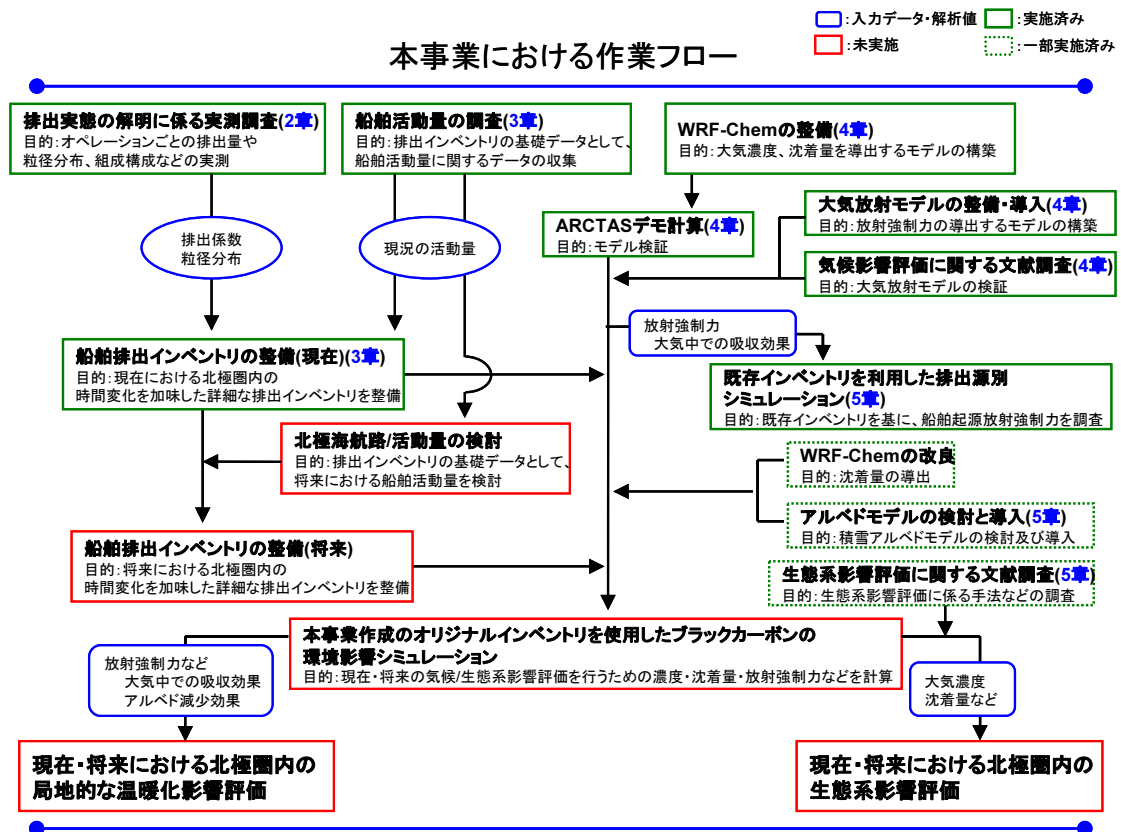


図 1.5-1 本事業の作業フロー

表 1.5-1 ブラックカーボンが北極圏の気候や生態系などに与える影響と本事業の解析対象

北極圏の気候や生態系などに与える影響	解析対象
大気中での太陽光吸収による温暖化効果が気候に与える影響 ¹⁾	○
雪氷面沈着を通じた地表面反射率の低下による温暖化効果が気候に与える影響 ¹⁾	○
地表面反射率減少効果が気象に短期的な影響(雲場の変化など)を与え、さらにその変化が気候に与える影響 ¹⁾	×
沈着によって、粒子に含まれる成分の毒性が生態系に与える影響	○
付着による植生への影響	○
地球温暖化が氷河、海氷、永久凍土の融解などの北極圏の地表面分布(土地利用)に与える影響 ¹⁾	×
地球温暖化が、森林の成長パターン、分布の変化、森林火災の増加などの北極圏の植生に与える影響 ¹⁾	×
地球温暖化が、降雨・降雪パターンの変化や干ばつの増加などの北極圏気象に与える影響 ¹⁾	×
地球温暖化に伴う地表面分布の変化が地表面反射率の変化を通じて2次的に気候に与える影響 ¹⁾	×
地球温暖化に伴う氷河などの融解、淡水流出量・流出パターンの変化による平均海面水位の上昇が、地表面反射率の変化を通じて北極圏内、地球規模の気候に与える影響 ¹⁾	×
地球温暖化に伴う気候、植生、地表面分布の変化、淡水の流量・流出パターンが北極圏の野生生物や、水産資源に与える2次的な影響 ¹⁾	×
地球温暖化に伴う気候や生態系影響、また氷河・凍土帯・森林などの分布の変化が先住民族の生活に与える影響 ¹⁾	×
北極圏内、その近傍からのBC排出による温暖化効果が気候に与える影響	○
他のエアロゾル成分による北極圏内での温暖化効果 ²⁾ が気候に与える影響	×
将来における船舶起源粒子状物質の排出量増加 ³⁾ が気候に与える影響	○

○ : BCの排出量、大気濃度、沈着量、放射強制力によって解析可能

× : BCの排出量、大気濃度、沈着量、放射強制力によって解析できない

1) IPCC (2007): 「Climate Change, The Physical Sciences Basis」

2) IMO (2009): 「Second IMO GHG Study 2009」

3) Lack et al. (2009): 「Particulate emissions from commercial shipping: Chemical, physical, and optical properties.」, J. Geophys. Res., 114, D00F04.

2 船舶から排出されるブラックカーボンの粒径分布の定量を目的とした実測

本調査では、C 重油 2 ストロークディーゼルエンジンの外航大型コンテナ船（最大出力 49,100 kW）の、通常航行時における粒径別のダスト重量分析及び Soot-Blow 時における炭素分析を行い、燃焼ガスの排出過程におけるダスト及び炭素成分の挙動を把握した。

- 1) 通常航行時における燃焼排ガス中のダスト濃度は、重量ベースでは二つの検体ともに $10\mu\text{m}$ を超える粗大粒子が最も高く、全粒径の濃度に占める割合は平均で 20%であった。ただし、 $2.5\mu\text{m}$ 以下の微小粒子の濃度が約 40%を超えており、粒子の個数としては全 PM の大多数を占めていると推察できる。
- 2) 実測値から求めた排ガス流速の試算結果は 19.2 m/s となり、アンダーセンスタックサンプリャは非等速で吸引を行っていたこととなる。この結果については正の誤差影響を与えることが知られており、報告値において実態より過大となっている可能性がある。
- 3) 排出ガス量とダスト濃度の分析結果から試算した通常航行時の PM の排出係数は平均で 0.26 g/kWh であり、GHG 2nd Study (IMO, 2009) で報告された EC、OC の排出係数と比較すると、6 割程度であった。試料採取位置が屈曲しており、乱流影響の可能性も想定される。今回の測定は絶対濃度の把握が目的でない点には留意されたい。
- 4) 通常航行時における燃焼排ガスの組成に関して、水分量が検出下限以下であり、ほとんど水分が含まれていない乾いたガスであった。また、 O_2 濃度は約 14.9%、 CO_2 濃度は約 4.7%であったことから、十分な酸素供給量下での燃焼過程であったといえる。
- 5) Soot-Blow 時における燃焼排ガス中の炭素濃度について、二つの検体ともに EC が約 86%、OC が約 14%であった。しかしながら、#9 ブロア作動時の総炭素濃度は $1,397.5\text{ mg/m}^3$ 、#13 ブロア作動時の総炭素濃度は 789.9 mg/m^3 であり、作動ブロアの違いによる総炭素量の大きな相違が見られた。
- 6) Soot-Blow 時における燃焼排ガス中の捕集粒子について、表面観察の結果、最前面に付着した粒子の最長径の平均径は $0.51\sim 0.60\mu\text{m}$ であった。また、粒径別の出現頻度は $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ の粒子をピークとして右側に裾野が広がる分布を示しており、観察された最大の粒子径は $1.32\mu\text{m}$ 、大多数がサブミクロン領域の粒子であった。ただし、ここで算定した粒径分布には、粒子のカウント手法上、Soot-Blow で排出されるクラスタ状の炭素成分をカウントしていないため、実際の排ガス中における重量ベースでの粒径分布を示しているものとはならない。なお、電子顕微鏡の画像においても、カウントしていない粒子の背景には大型のクラスタ状粒子が存在していることが判別できた。

2.1 実測の目的

NO_x および SO_x・PM の規制が盛り込まれた、2010 年 7 月に発行した海洋汚染防止条約 (MARPOL 73/78) 付属書VIの改正の検討段階において、2006 年 4 月に開催された IMO 第 10 回ばら積み液体・気体小委員会 (BLG; Sub-Committee on Bulk Liquids and Gases) では Correspondence Group A が設置され、船舶ディーゼルエンジンからの PM 排出量を、粒径分布・組成・削減方法を加味しつつ調査することが TOR (付託事項) の 1 つとされた (BLG10/WP.3)。

PM 粒径分布については、2006 年 10 月に開催された BLG-WGWP (BLG Working Group on Air Pollution) において、Lyranen et al. (1999) を引用し「both the existing evidence and the physics of combustion suggest that marine diesels produce particulates that are primarily in the fine (2.5 μ m or less) range」と言及しているが、IMO としての詳細な解析はなされていないといえる (BLG-WGWP 1/2/11)。この背景には、当時 PM の太宗を占めるのは SO₂ 経由の硫酸塩であるとの基本認識があり、この凝縮性ダストあるいは二次粒子は PM_{2.5} であるという暗黙の認識があったこと、このためいわゆる一次粒子である DP の粒径分布については動粘度など燃料特性により大きく影響されるため、工場出荷時の粒径分布情報は、大気環境中へ放出される分布と一致しない可能性があることから、基本情報としてピックアップされなかったことによる。

このような現状より、本事業では粒径分布を定量・設定することを目的とし、外航船を対象とした排ガス中のブラックカーボンを実測した。実測は、航行及び Soot-Blow といった 2 種類のオペレーション時における排ガスを対象として実施した。

通常、排ガスの測定には排気ガスを空気で 50℃程度以下まで冷却することで粒径の成長を促し、一部の凝縮性ダストも捕集できる希釈法の適用が望ましい。しかしながら、オンボードでの実際の航行では動圧の変動が大きく、かつ高硫黄含有燃料で適用が難しいことから、精度良く測定することは難しい。そのため、ブラックカーボンの粒径分布は実測 (Hot Filter 法) の結果より把握したが、排出係数は実測の結果ではなく、3 章で紹介する既存の文献値から設定する。

2.2 実測の概要

2.2.1 実施した測定

図 2.2-1に、実施した実測の概略図を示す。同図に示す通り、本測定では3つの測定を以下に示す目的のもと実施した；

- 測定系1 : 通常航行時の排ガス中に含まれるブラックカーボンの捕集
- 測定系2 : Soot-Blow 時の排ガス中に含まれるブラックカーボンの捕集
- 測定系3 : 使用燃料の一般性状の測定 (C 重油を想定)

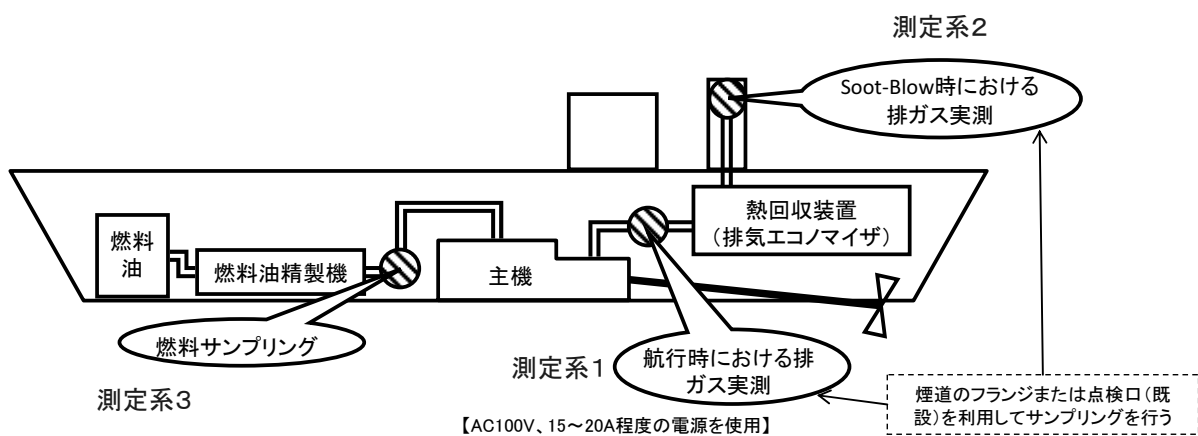


図 2.2-1 実施した実測の概略図

Soot-Blowとは、排管内の煤を蒸気や空気などで飛ばして除去することであり、船舶の場合、排ガスエコノマイザ（ディーゼルエンジンから発生する排気ガスの熱を利用して蒸気を作る装置）による蒸気を利用してSoot-Blowを行う。そのため、Soot-Blow時を対象とした計測は排ガスエコノマイザの下流において行うこととした。

他方、通常航行時を対象とした計測は、排ガスエコノマイザの上流で行うこととした。これは、排ガスエコノマイザの下流では排ガス温度が低く、粒子状物質に粘性が生じていると想定され、排ガスの吸引ノズルに詰まりが生じる恐れがあると考えたためである。なお、Soot-Blowによって排出されるブラックカーボンは排管内に付着していた煤が主であり、その粒径はSPMに比べて非常に大きいと考える。

2.2.2 実施期間

2013年1月28日 8:00～ 2013年1月29日 17:00

2.2.3 調査対象船

外航大型コンテナ船 (4,700TEU)



GENERAL INFORMATION	
Delivery	: 2003
Power output	:49,410 (kW)
Overall length	:294.09 (m)
Overall beam	:32.22 (m)
Deadweight	:63,096 (ton)
Gross tonnage	:53,822 (ton)

図 2.2-2 調査対象船の概要 (出典：<http://www.cargo-vessels-international.at/index.html>)

2.2.4 調査スケジュール

本調査における工程について、準備を含めたタイムテーブルを下表に示す。

表 2.2-1 作業スケジュール

内容	時間	2013年1月28日			2013年1月29日			
		11:00	16:00	17:00	0:00	6:00	14:00	17:00
停泊中	税関手続、作業開始前ミーティング							
	測定要員・作業要員の乗船手続							
	車両・人手による機材搬入							
	作業場所事前確認、安全確保							
	フランジ取付け、機材始動準備							
	作業要員の下船							
東京出港[1/28 17:00]								
航行中	測定系1の実施							
	測定系2の実施							
	機関室における計器の読取り							
	機材の片付け・フランジ盲詮養生							
神戸入港[1/29 17:00]								
停泊中	測定要員の下船							
	※機材は2/2に大井埠頭にて撤収							
	税関手続							

2.3 調査方法

2.3.1 測定系1(うち、アンダーセンスタックサンプラによるブラックカーボン採取)

(1) 測定系統

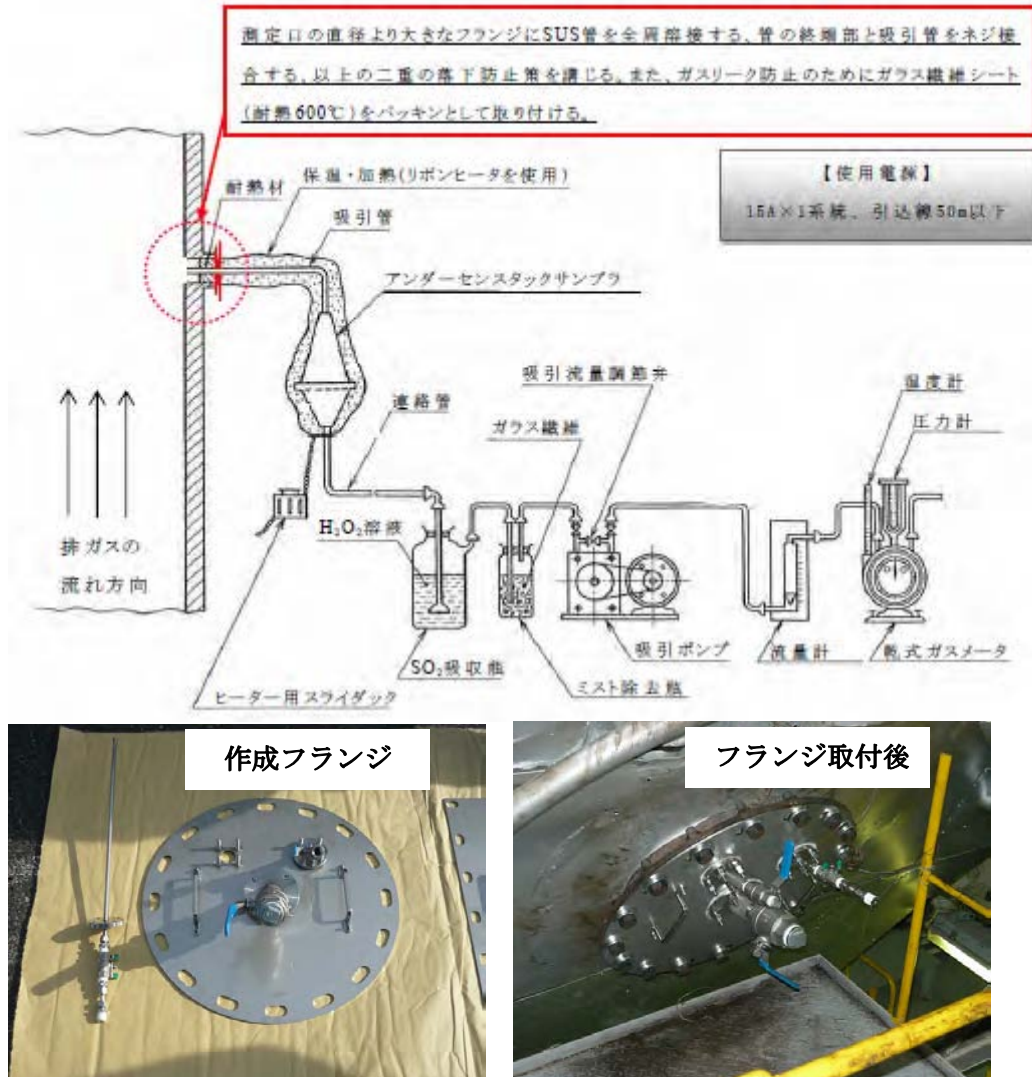


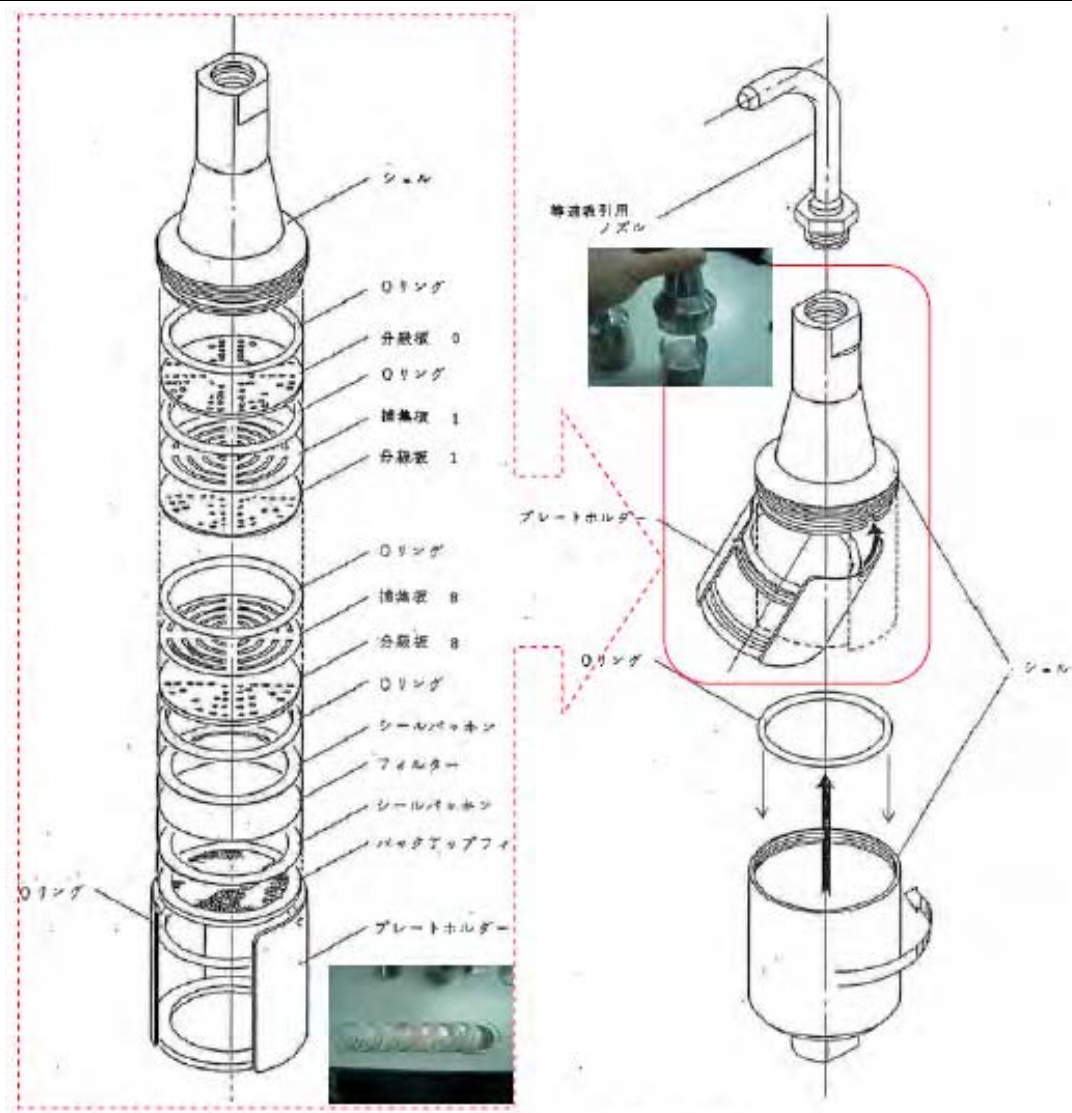
図 2.3-1 アンダーセンスタックサンプラによるブラックカーボン採取系統模式図

(2) アンダーセンスタックサンプラの仕様

本調査で用いたアンダーセンスタックサンプラの仕様を表 2.3-1に示す。

表 2.3-1 アンダーセンスタックサンプラ (AS-500) の諸元

項目	仕様
製造社名	東京ダイレック株式会社
型式	AS-500
規格	JIS Z 8808 準拠
分級範囲	0.36～31μm
吸引流量	最適：20～21LPM、最大範囲：2.8～28LPM ※等速吸引速度から、煙道内の噴流速度への対応範囲は 0.60～37 m/s となる



出典) MODEL AS-500 取扱説明書 (東京ダイレック株式会社)

(3) 実測・分析方法

① 吸引ノズル径の決定

対象船におけるメインエンジンの諸元表より、次の通り試算し、8φとした。

《理論湿り排ガス量の試算》

「ガスタービン・ディーゼル機関大気汚染防止対策ガイドライン」（1989年 環境庁大気保全局大気規制課）に基づき、理論湿り排ガス量を以下の通り試算した。

理論湿り排ガス量 G_0 ($m_N^3/kg-Fuel$)

$$G_0 = \frac{15.75(H_1 - 1100)}{10000} - 2.18$$

運航会社より提供をいただいた調査対象船の主機要目表より、
LCV=42,700kJ/kg-Fuel=10,200kcal/kg-Fuel を代入すると

$$G_0=12.15 (m_N^3/kg-Fuel) \dots \textcircled{1}$$

主機要目表より

F.O. Consumption = 167.9g/kWh 燃費(g-Fuel/h) ÷ 機関出力(kW)

85%負荷率での機関出力は 42,000kW

つまり、負荷率 85%航行時における燃料消費量は

$$167.9g/kWh \times 42,000kW = 7,052kg/h \dots \textcircled{2}$$

①及び②より、時間当たりの理論湿り排ガス量は

$$12.15(m_N^3/kg-Fuel) \times 7,052(kg/h) = 85,682(m_N^3/h) = \underline{23.8(m_N^3/s)}$$

排ガス温度を 400°Cと仮定すると湿り排ガス量は

$$23.8 \times (273 + 400) / 273 = 58.7(m^3/s)$$

排ガス温度を 300°Cと仮定すると湿り排ガス量は

$$23.8 \times (273 + 300) / 273 = 50.0(m^3/s)$$

《ダクト内流速の試算》

排エコに続く円形ダクトの直径は、運航会社より提供をいただいた図面から、約 2.5m と読み取ることができ、これより断面積は $1.25 \times 1.25 \times 3.14 = 4.9m^2$ と計算される。

そのため、例えば

排ガス温度 400°Cの場合の円形ダクト内の流速は $58.7/4.9 = 12.0$ (m/s)

排ガス温度 300°Cの場合の円形ダクト内の流速は $50.0/4.9 = 10.2$ (m/s)

アンダーセンスタックサンプラの取扱説明書によると、ダクト内の流速が 12.0m/s の場合、吸引ノズル径を φ6 とすれば等速吸引に近似し、吸引量も推奨される 20LPM に最も近い 20.4LPM になることとなる。

《結論：吸引ノズル径の決定》

ただし、運航会社への事前ヒアリングでは、負荷率は最高でも 60%程度、かつ観測はダクトの円形部分ではなく、排エコ入口の方形部分で行うことを考えると、ダクト内の流速は更に遅いと考えられ、ノズルのつまりも懸念されるため、ノズル径は遅い流速用の φ8 が妥当とした。

② 吸引時間の決定

アンダーセンスタックサンプラの取扱説明書によると、AS-500では採取総重量20mg程度が一つの望ましい目安とされているが、本測定では実ガスの組成が不明なため、現場において、予備調査によって吸引量・吸引時間を決定することとした；

- 一定時間ごとに試料を採取。（5分単位）
- ステンレスフィルタに捕集されたダストのスポット輪郭がハッキリするまで捕集を繰り返す。
- ステンレスフィルタに捕集されたダストが山型に積み上がる時間を積算。

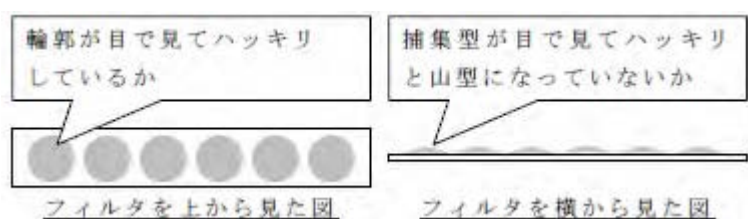


図 2.3-2 最適採取量の判断基準模式図

- b)を満し、c)の状態になるまで試験サンプリングを繰り返した結果に、通常航行時における最高出力が継続される時間を勘案し、試料一検体当たりの吸引時間は 25 分間と決定した。



図 2.3-3 予備調査によるダスト採取状態の確認

③ 試料採取

船員より通常航行時における最高出力（負荷率55%）となった旨通知を受けた後、前述のとおり、二検体を採取した。



図 2.3-4 アンダーセンスタックサンプラによるサンプリング

④ 分析

本調査で得られる検体は粒径別の分布重量を把握することを目的としており、基本的な考え方は「JIS Z 8808:1995 排ガス中のダスト濃度の測定方法」に従うが、フィルタがステンレス製多段式という特殊なサンプラであることから、前処理方法、前秤量方法、採取後の試料の保管・運搬方法、後秤量方法においては、アンダーセンスタックサンプラの取扱説明書を優先し、一般事項についてはJISに準拠した重量分析を行った。

なお、本調査で使用した電子天秤の仕様を下表に示す。

表 2.3-2 電子天秤の諸元

項目	仕様	外観
製造社名	ザルトリウス・ジャパン株式会社	
型式	MSA2.7S-000-DF	
読取限度	0.1μg	
精度	繰り返し性：±0.25μg 以下 直線性偏差：±0.9μg 以下	

出典) メーカー公式 Web サイト (<http://www.sartorius.co.jp/>)

2.3.2 測定系 1 (うち、水分採取)

(1) 測定系統

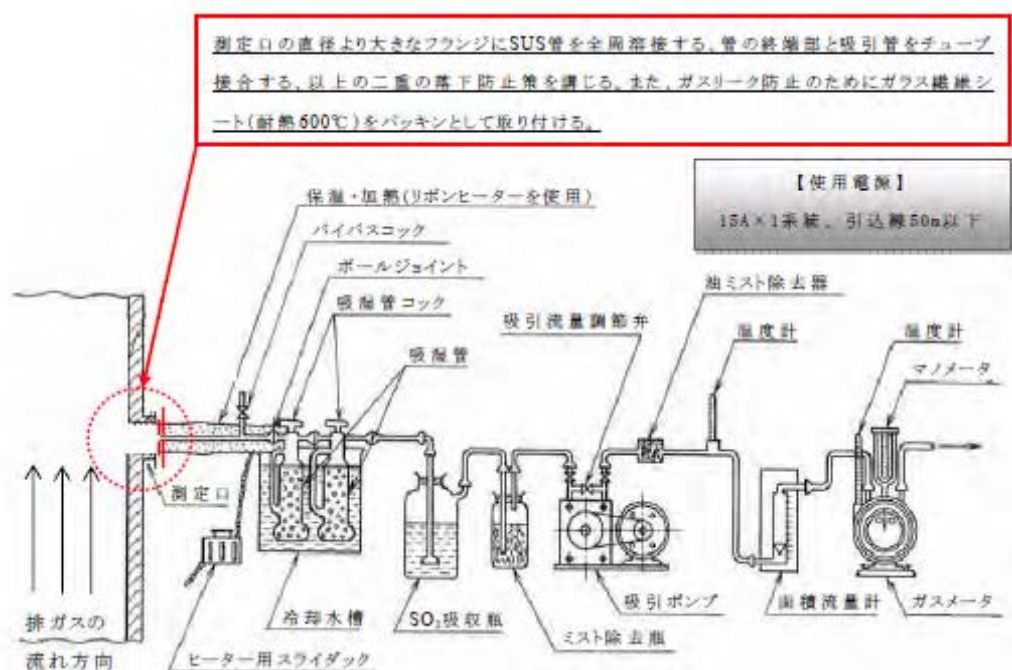


図 2.3-5 水分採取系統模式図

(2) 実測・分析方法

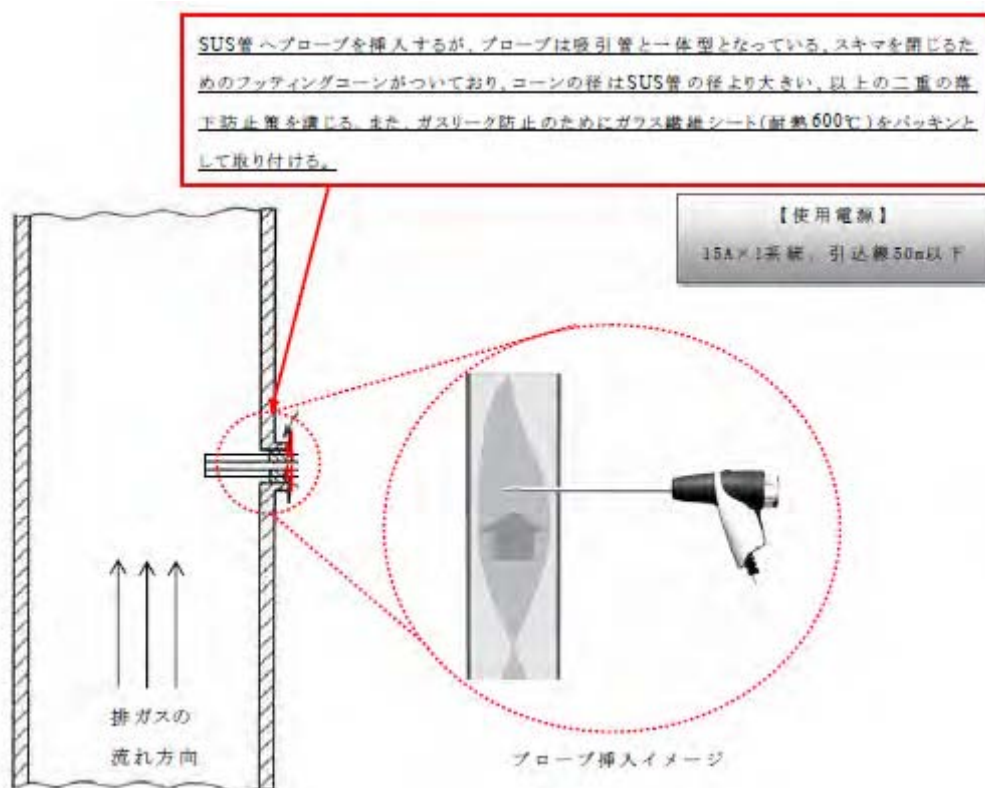
本調査は、ダクト内を流れる排ガスのガス流量を計算するための基礎資料として、ガス中の水分量を把握することを目的としており、JIS Z 8808:1995 排ガス中のダスト濃度の測定方法に従って採取、分析を行った。



図 2.3-6 水分採取方法

2.3.3 測定系 1 (うち、ガス状物質及び排ガス温度計測)

(1) 測定系統



※取り付けしたフランジの実物写真については図2.3-1を参照

図 2.3-7 燃焼排ガス分析計によるガス状物質及び排ガス温度の測定方法

(2) 燃焼排ガス分析計の仕様

本調査で用いた燃焼排ガス分析計の仕様を下表に示す。

表 2.3-3 燃焼排ガス分析計 (Testo-340) の諸元

項目	仕様		
製造社名	株式会社テストー		
型式	testo-340		
項目別仕様	下表のとおり		
	計測範囲	精度	分解能
O ₂	0~25Vol%	±0.2Vol%	0.01Vol%
CO (H ₂ 補償あり)	0~ 10,000ppm	±10ppmまたは計測値の±10% (0~ 200ppm) ±20ppmまたは計測値の±5% (201~ 2,000ppm) 計測値の±10% (2,001~10,000ppm)	1ppm
NO	0~ 3,000ppm	±5ppm (0~99.9ppm) 計測値の±5% (100~1,999ppm) 計測値の±10% (2,000~3,000ppm)	1ppm
NO ₂ *	0~ 500ppm	±10ppm (0~199ppm) 計測値の±5% (その他の範囲)	1ppm
温度 K熱電対 (NiCr-Ni)	-40~ +1,200℃	±0.5℃(0~+99℃) 計測値の±0.5% (その他の範囲)	0.1℃

出典) メーカー公式 Web サイト (<http://www.testo.jp/>)

(3) 実測方法

本調査は、ダクト内を流れる排ガスの組成を把握することを目的としており、メーカーの取扱説明書に従って計測を行った。



図 2.3-8 燃焼排ガス分析計によるガス状物質及び排ガス温度の測定風景

2.3.4 測定系 2 (フィルタホルダによるブラックカーボン採取)

(1) 測定系統

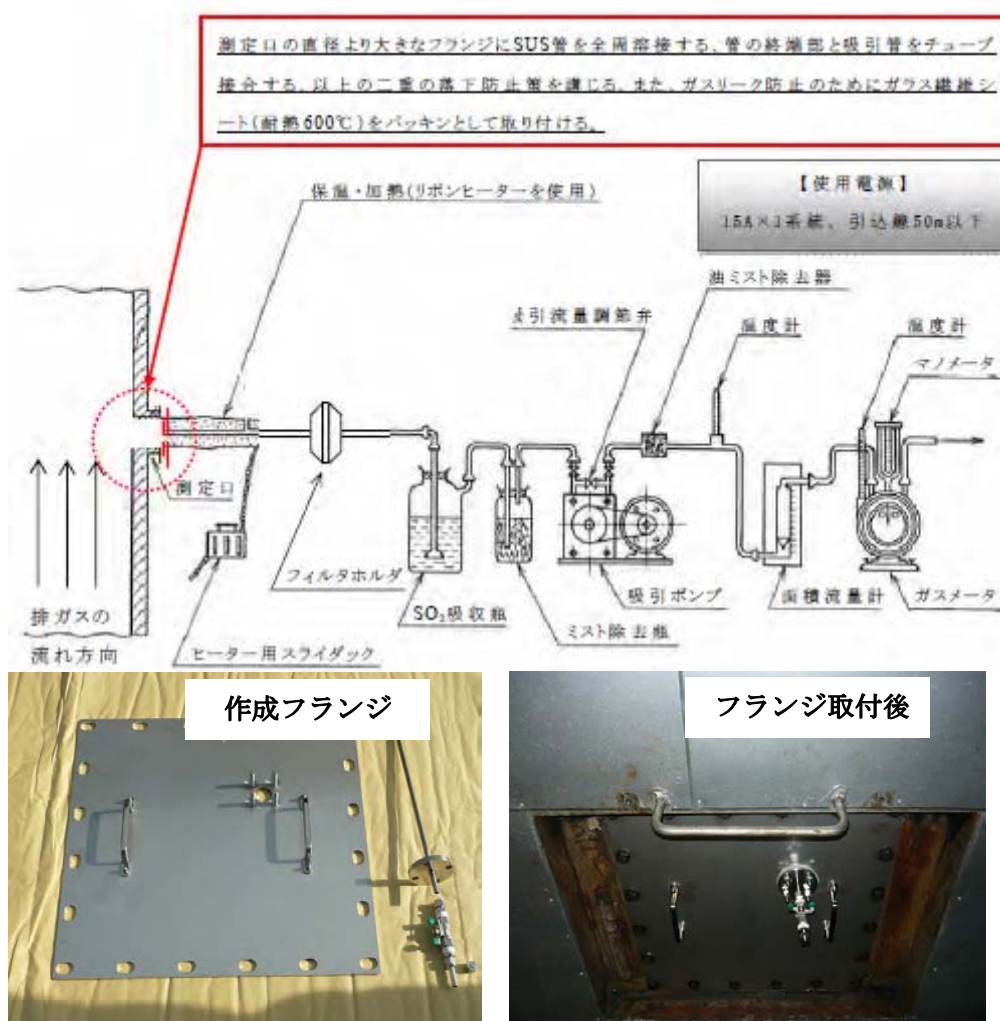


図 2.3-9 フィルタホルダによるブラックカーボン採取系統模式図

(2) 実測・分析方法

① 調査対象ブローの決定

Soot-Blowは、排気エコノマイザ上部のブローを、#1～#16まで順次駆動することによって行われ、外洋の通常航行時、平均的に4時間に一回実施される。なお、各ブローの駆動時間は約30秒程度であり、制御盤によって自動的に進められる。

本調査では、フランジ直下となる#9、#13のブロー時を対象として、それぞれの排気ガスを石英フィルタに採取した。

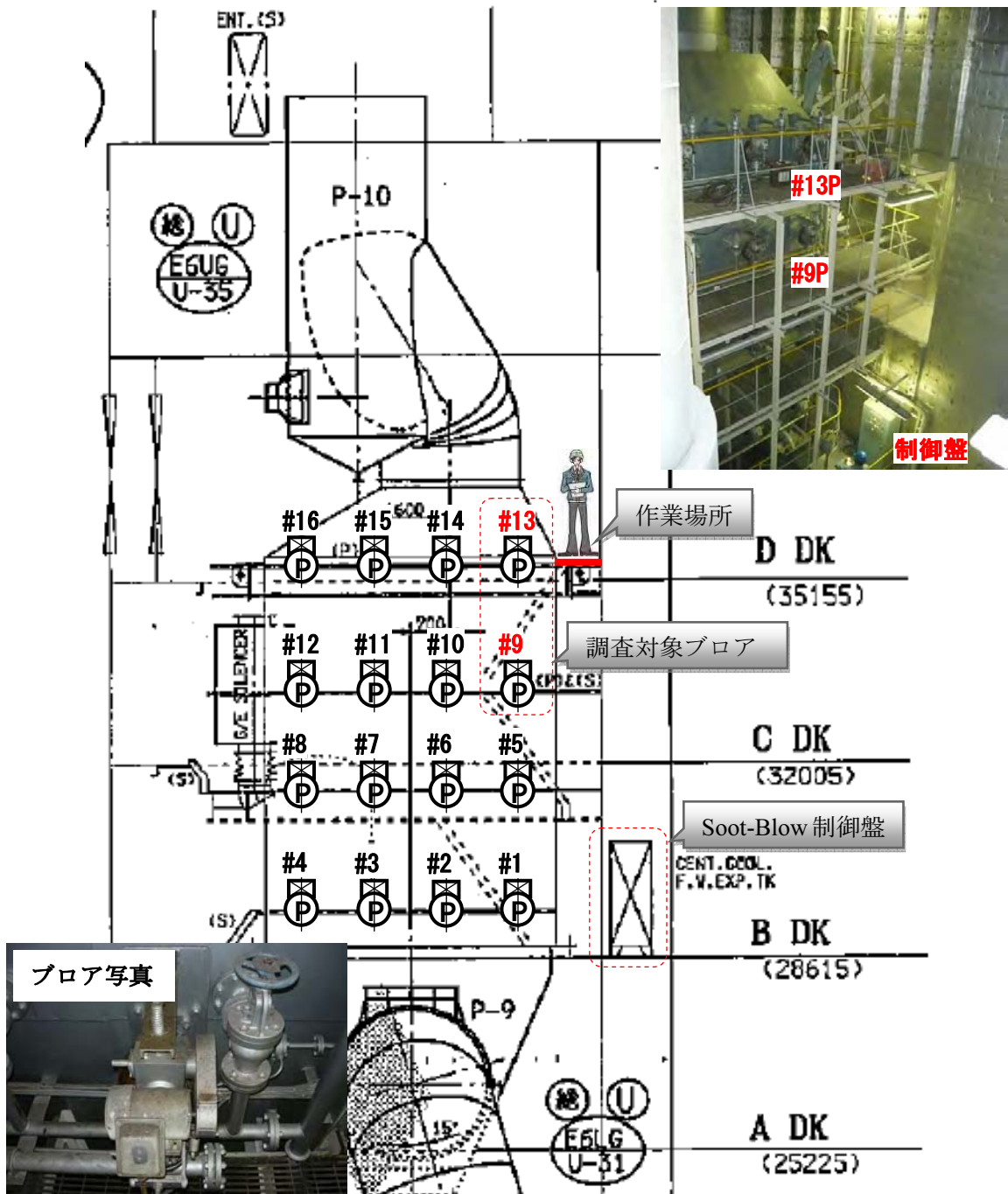


図 2.3-10 調査対象ブローの位置

② 試料採取

Soot-Blow時におけるブラックカーボンの採取条件は、アンダーセン採取時の条件と整合をとるため、吸引速度が6.6 m/sとなるように、吸引ノズルの内径は8φ、吸引流量は20LPMとした。

なお、吸引プローブの向きは、排ガスの流れに正対する形状とし、ブラックカーボンはフィルタホルダ内にセットした石英フィルタでキャッチした。

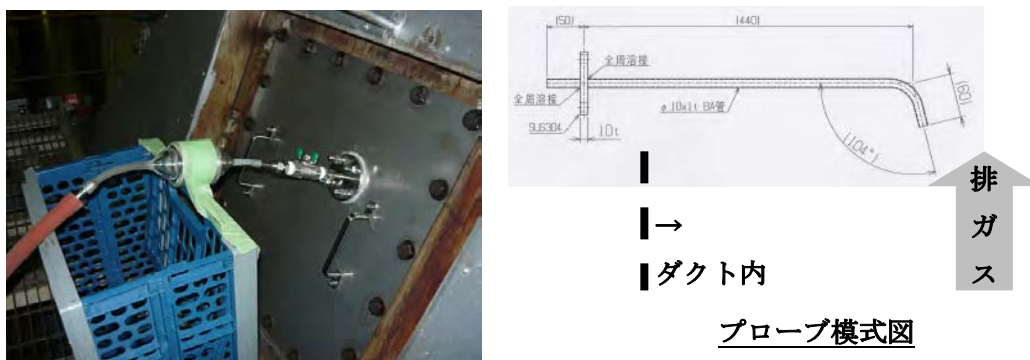


図 2.3-11 測定系 2 の試料採取風景


③ 分析

本調査で得られた検体は、カーボンアナライザを用いたサーマルオプテカル・リフレクタンス法によるEC/OC分析によって、単位面積当たりの重量としてそれぞれ分析するとともに、走査電子顕微鏡による表面観察を行い、粒径別の分布を視覚的に捉えた。

ここで、表面観察においては、撮影された画像を解析ソフトで読み込み、長径を基準とした解析を行い、結果を度数分布で表した。

炭素分析に用いたカーボンアナライザ、及び捕集粒子の表面観察に用いた走査電子顕微鏡の仕様を以下に示す。

表 2.3-4 カーボンアナライザの諸元

項目	仕様	外観
製造社名	Sunset Laboratory Inc.	
型式	Lab OC-EC Aerosol Analyzer	
適用規格	米国 IMPROVE プロジェクト	
検出下限	0.4μg/cm ²	
測定範囲	1.0~105μg/cm ²	

出典) メーカー公式 Web サイト (<http://sunlab.com/>)

※IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments) とは、米国に設置された視程を監視する測定ネットワーク (政府機関)。特に国立公園や未開地といったいわゆるバックグラウンド地域の監視を行っている。

表 2.3-5 走査電子顕微鏡の緒元

項目	仕様																				
製造社名	日本電子株式会社																				
型式	JSM-6490LV																				
項目別仕様	下表のとおり																				
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Resolution</td> <td>High Vacuum mode: 3.0 nm(30kV) Low Vacuum mode: 4.0 nm(30kV)</td> </tr> <tr> <td>Accelerating Voltage</td> <td>0.3 to 30 kV</td> </tr> <tr> <td>Magnification</td> <td>x5 to 300,000</td> </tr> <tr> <td>Filament</td> <td>Pre-centered W hairpin filament (with continuous auto bias)</td> </tr> <tr> <td>Objective Lens</td> <td>Super Conical lens</td> </tr> <tr> <td>Objective Lens Apertures</td> <td>Click-stop type (3-step variable) Fine position controllable in X/Y directions</td> </tr> <tr> <td>Maximum Specimen Size</td> <td>8" coverage, 12" specimen can be loaded</td> </tr> <tr> <td>Specimen Stage</td> <td>5 axis computer controlled Eucentric goniometer X=125mm, Y=100mm, Z=5 to 80mm T= -10 to 90°, R=360° (endless)</td> </tr> <tr> <td>Display LCD</td> <td>20 inch, high resolution FPD</td> </tr> <tr> <td>Vacuum mode changeover</td> <td>Automatic (PC interface controlled)</td> </tr> </tbody> </table>	Resolution	High Vacuum mode: 3.0 nm(30kV) Low Vacuum mode: 4.0 nm(30kV)	Accelerating Voltage	0.3 to 30 kV	Magnification	x5 to 300,000	Filament	Pre-centered W hairpin filament (with continuous auto bias)	Objective Lens	Super Conical lens	Objective Lens Apertures	Click-stop type (3-step variable) Fine position controllable in X/Y directions	Maximum Specimen Size	8" coverage, 12" specimen can be loaded	Specimen Stage	5 axis computer controlled Eucentric goniometer X=125mm, Y=100mm, Z=5 to 80mm T= -10 to 90°, R=360° (endless)	Display LCD	20 inch, high resolution FPD	Vacuum mode changeover	Automatic (PC interface controlled)
Resolution	High Vacuum mode: 3.0 nm(30kV) Low Vacuum mode: 4.0 nm(30kV)																				
Accelerating Voltage	0.3 to 30 kV																				
Magnification	x5 to 300,000																				
Filament	Pre-centered W hairpin filament (with continuous auto bias)																				
Objective Lens	Super Conical lens																				
Objective Lens Apertures	Click-stop type (3-step variable) Fine position controllable in X/Y directions																				
Maximum Specimen Size	8" coverage, 12" specimen can be loaded																				
Specimen Stage	5 axis computer controlled Eucentric goniometer X=125mm, Y=100mm, Z=5 to 80mm T= -10 to 90°, R=360° (endless)																				
Display LCD	20 inch, high resolution FPD																				
Vacuum mode changeover	Automatic (PC interface controlled)																				

出典) メーカー公式 Web サイト (<http://www.jeol.co.jp/>)

2.3.5 排ガス流速の実測

本調査では、JIS Z 8808:1995 排ガス中のダスト濃度の測定方法に従った排ガス流速の調査も予定していたが、ダクト内の圧力が高く、相当量の生ガスの噴き出しが認められたため、プローブ交換時の安全を考慮して測定を中止した。

2.3.6 測定系 3 (使用燃料の一般性状の測定)

調査対象船で使用されている燃料成分については、運航会社へ情報の提供依頼を行い、分析結果のデータシートをいただいた。

2.3.7 運転記録

通常航行時におけるエンジンパラメータの記録について、運航会社へ情報の提供依頼を行い、分析結果のデータシートをいただいた。

2.4 調査結果

2.4.1 通常航行時におけるダストの分析結果

(1) アンダーセンスタックサンプラ採取による粒径別ダスト濃度

① 試料採取量

各検体における試料の採取量は以下のとおりである。

表 2.4-1 各検体における試料採取量

検体No.	試料採取量 (L-dry)	採取時間 (min)	吸引流量 (L-dry/min)	吸引速度 (m/s)
1	643 (32.9℃)	25	25.7	8.5
2	480 (32.8℃)	25	19.2	6.4

② 粒径別ダスト濃度分析結果

各検体における粒径別のダスト重量の捕集割合は以下のとおりである。いずれの検体においても、粒径が最も大きいStage1における捕集重量が大きく、全ステージに占める割合としては、検体No.1では22%、検体No.2では17%であった。

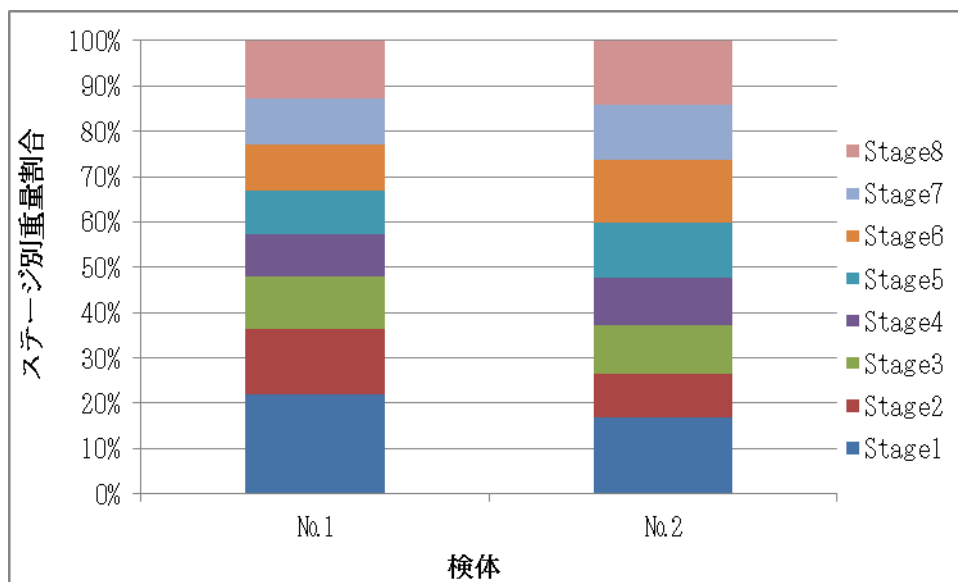


図 2.4-1 通常航行時におけるダスト重量の粒径別捕集割合

また、各検体における粒径別のダスト濃度は以下のとおりである。2.5 μ mを粒径の大小の区分とした場合、2.5 μ m以下の微小粒子は検体No.1では43%、検体No.2では40%であり、捕集個数としては相当数を占めていると推察できる。

表 2.4-2 通常航行時における粒径別ダスト濃度

検体 No.	捕集板 No.	分級粒子径 (μm) ^[注]	ダスト重量 (mg)	吸引ガス量 ($\text{m}^3\text{-dry}$)	ダスト濃度 ($\text{mg}/\text{m}^3\text{-dry}$)
No.1	1	12.5	3.319	0.643	5.16
	2	7.8	2.153		3.35
	3	5.3	1.744		2.71
	4	3.5	1.416		2.20
	5	2.3	1.439		2.24
	6	1.2	1.541		2.40
	7	0.70	1.545		2.40
	8	0.48	1.913		2.98
No.2	1	14.0	1.488	0.480	3.10
	2	9.0	0.826		1.72
	3	6.0	0.942		1.96
	4	4.3	0.932		1.94
	5	2.8	1.056		2.20
	6	1.4	1.219		2.54
	7	0.81	1.069		2.23
	8	0.55	1.237		2.58

注) 分級粒子径は、各検体の吸引流量 (LPM) と排ガス温度 (約 250°C) から、AS-500 取扱説明書 p.20 の図 8 及び p18 の図 9 のグラフを読み取って求めた。

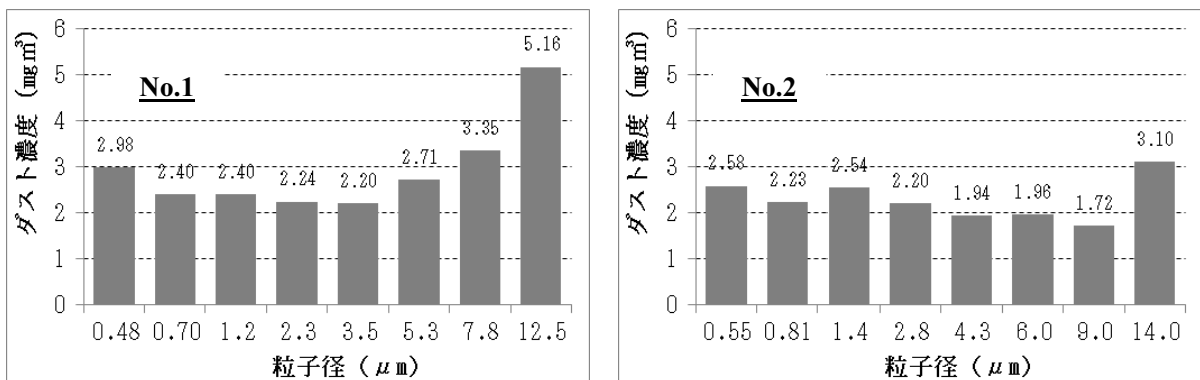


図 2.4-2 通常航行時におけるダスト濃度の粒径分布

(2) 水分量

③ 試料採取量

各検体における試料の採取量は以下のとおりである。

表 2.4-3 各検体における試料採取量

検体No.	試料採取量 (L-dry)	採取時間 (min)	吸引流量 (L-dry /min)	吸引速度 (m/s)
1	16 (32.4℃)	5	3.2	1.1

④ 水分量分析結果

本調査における採取条件では、ガス捕集前後における採取瓶の重量濃度に変化がなく、検出下限以下であった。

(3) 有害ガス濃度

有害ガスについては、燃焼排ガス分析計をプローブに挿入した後、数分間のエージングを行って指示が安定するのを待ち、その濃度を2回読み取った。

表 2.4-4 有害ガス測定結果（乾きガス濃度）

読み取り回数	ガス温度 (℃)	酸素濃度 (%)	CO 濃度 (ppm)	NO 濃度 (ppm)	NO ₂ 濃度 (ppm)	CO ₂ 濃度 (ppm)
1 回目	246.2	14.90	38	1592	131.6	4.6
1 回目	246.5	14.89	38	1607	131.7	4.7



図 2.4-3 有害ガス濃度計測状況

2.4.2 Soot-Blow 時における炭素濃度分析結果

(1) サーマルオプテカル・リフレクタンス法

サーマルオプテカル・リフレクタンス法は、米国でIMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments) やSTN (Speciation Trend Network) などの、環境大気試料の炭素成分分析に広く適用されている熱分離熱分解補正法のひとつである。

《測定原理》

一般に熱分離法では、炭素成分を異なる温度と酸化雰囲気中で粒子状物質試料から遊離させることによってOCとECを分別して測定する。これはHe雰囲気中に置かれた試料から有機物を低温度で揮発分離でき、ECは同時に酸化も分離もされないという仮定に基づいている。実際には加熱分離の過程で有機物が熱分解炭化されるので、測定中の熱分解量を補正する必要がある。ここで示す方法では、OCとECを異なる温度と分析雰囲気（表1.2-1）で選択的に酸化して、それぞれの炭素量を定量するとともに、レーザー光の反射率あるいは透過率の変化をモニターすることによって熱分解量を補正する。

熱分解の寄与を補正するために、分析器の光学部分（He-Neレーザーと光検出器）では、レーザー光を試料に照射し、試料からの反射及び試料を透過するレーザー光強度を連続してモニターする。反射または透過するレーザー光強度は、主に試料上のEC量によって変化する。OCの熱分解が起こりECが増加し始めると、レーザー光の吸収が増加し、反射光も透過光も減少する。逆にECが遊離し始めると、反射光も透過光も増加し始める。測定開始時の反射または透過するレーザー光強度（初期値）から、熱分解によってレーザー光強度が減少した後、分析雰囲気に酸素が加えられると、ECの遊離に伴って増加し始め、再び初期値に戻る時点（分割時間）が見られる。この分割時間までのECの発生分をOCの熱分解量と同等と見なし、ECから差し引くとともにOCに加えて補正する。

《熱分離条件》

炭素フラクション	測定条件	
	設定温度	分析雰囲気
OC1	120°C	He
OC2	240°C	He
OC3	450°C	He
OC4	550°C	He
EC1	550°C	98%He+2%O ₂
EC2	700°C	98%He+2%O ₂
EC3	800°C	98%He+2%O ₂

出典) 環境省公式 Web サイト (<http://www.env.go.jp/>)

(2) 試料採取量

各検体における試料の採取量は以下のとおりである。

表 2.4-5 各検体における試料採取量

検体No.	試料採取量 (L-dry)	採取時間 (s)	吸引流量 (L-dry/min)	吸引速度 (m/s)
1[#9 対象]	12 (31.6°C)	37.3	19.3	6.4
2[#13 対象]	9 (31.6°C)	28.0	19.3	6.4

(3) 炭素濃度分析結果

各検体における炭素重量の分析結果は、以下のとおりである。いずれの検体においても、EC1の割合が最も高く、79%を占めていた。

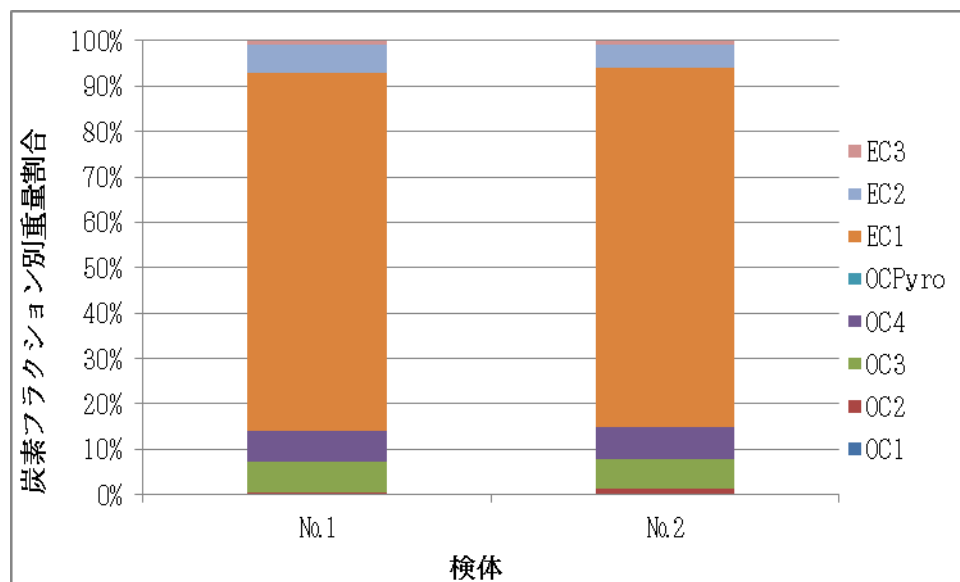


図 2.4-4 炭素フラクション別重量割合

また、各検体における全炭素濃度の内、ECが占める割合は検体No.1では86%、検体No.2では85%であった。

表 2.4-6 Soot-Blow 時における炭素濃度分析結果

フィルタ No.	分析項目	分析結果 (μgC)	吸引ガス量 ($\text{m}^3\text{-dry}$)	炭素濃度 ($\mu\text{gC}/\text{m}^3\text{-dry}$)
No.1	OC1	4.5 未満	0.012	375 未満
	OC2	45.1		3,760
	OC3	556.0		46,300
	OC4	560.0		46,700
	OCPyro	6.0		496
	EC1	6,616.1		551,000
	EC2	544.3		45,400
	EC3	62.2		5,180
	OC	1,168.1		97,300
	EC	7,216.7		601,000
No.2	OC1	4.5 未満	0.009	500 未満
	OC2	39.6		4,400
	OC3	231.7		25,700
	OC4	250.7		27,900
	OCPyro	2.7		300
	EC1	2,814.8		313,000
	EC2	178.8		19,900
	EC3	34.9		3,880
	OC	524.7		58,300
	EC	3,025.9		336,000

OC = OC1+OC2+OC3+OC4+OCPyro

EC = EC1+EC2+EC3-OCPyro

OCPyro : 炭化補正分

2.4.3 Soot-Blow 時における粒子画像解析結果

(1) 解析方法

粒子画像の解析にあたっては、まずフィルタに捕集されたダストに蒸着処理を施し、後、走査電子顕微鏡を用いて低真空モードで付着粒子の表面撮影を行った。

次に、画像解析は解析ソフト (Media Cybernetics : Image-Pro Plus) を用いて、長径を基準とした粒子径の測定を行い、粒径別の出現頻度を把握した。

なお、解析に当たっては、電子顕微鏡像 (反射電子像) から輪郭が確実に読み取れる最前面の粒子のみを対象とし、陰部で粒子の存在が確認できないエリアや、凝集粒子、重なり合う粒子は解析対象から除いた。

(2) 解析結果

画像解析は、各検体で2視野ずつ行った。各画像におけるダストの平均粒子径は以下のとおりである。いずれの検体においても $0.51\sim 0.60\ \mu\text{m}$ という、サブミクロン領域の粒子が多数を占めていた。

表 2.4-7 Soot-Blow 時における捕集粒子の平均径

	画像解析による 平均粒子径(μm)
フィルタ No.1 視野 1	0.60
フィルタ No.1 視野 2	0.56
フィルタ No.2 視野 1	0.51
フィルタ No.2 視野 2	0.57

また、各検体の反射電子像及び解析対象とした粒子、並びに解析対象とした粒子の粒径別度数分布を以下に示す。最前面に捕集されたダストは、いずれの検体においても $0.4\sim 0.5\ \mu\text{m}$ の粒子の出現頻度がピークとなり、右側に裾野が広がる分布を示している。なお、本調査で観察された最大の粒子径は $1.32\ \mu\text{m}$ であった。

ただし、ここで算定した粒径分布には、粒子のカウント手法上、Soot-Blowで排出されるクラスタ状の炭素成分をカウントしていないため、実際の排ガス中における重量ベースでの粒径分布を示しているものとはならない。なお、電子顕微鏡の画像においても、カウントしていない粒子の背景には大型のクラスタ状粒子が存在していることが判別できた。

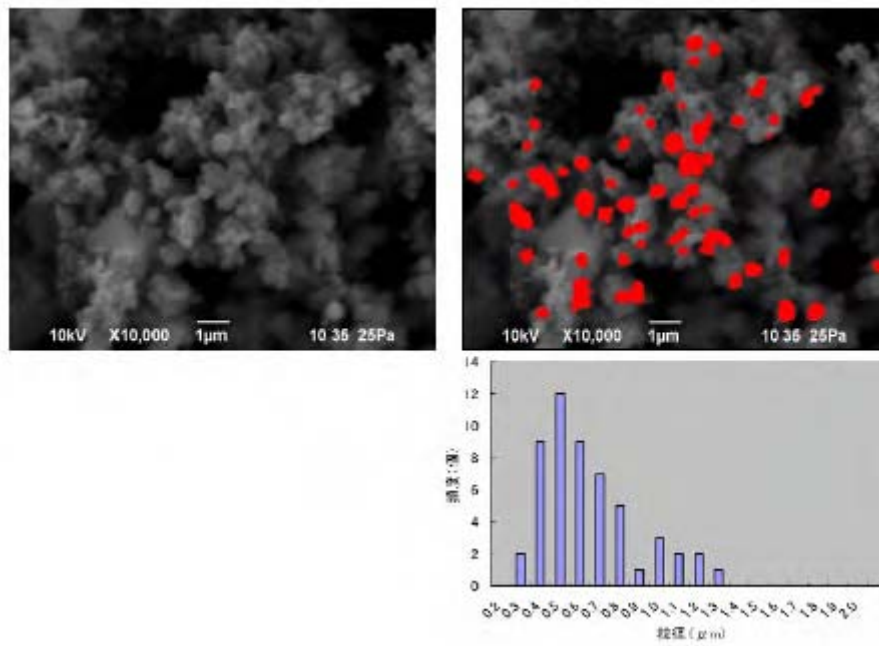


図 2.4-5 Soot-Blow 時における捕集粒子の画像及び粒径分布 [フィルタ No. 1-1]

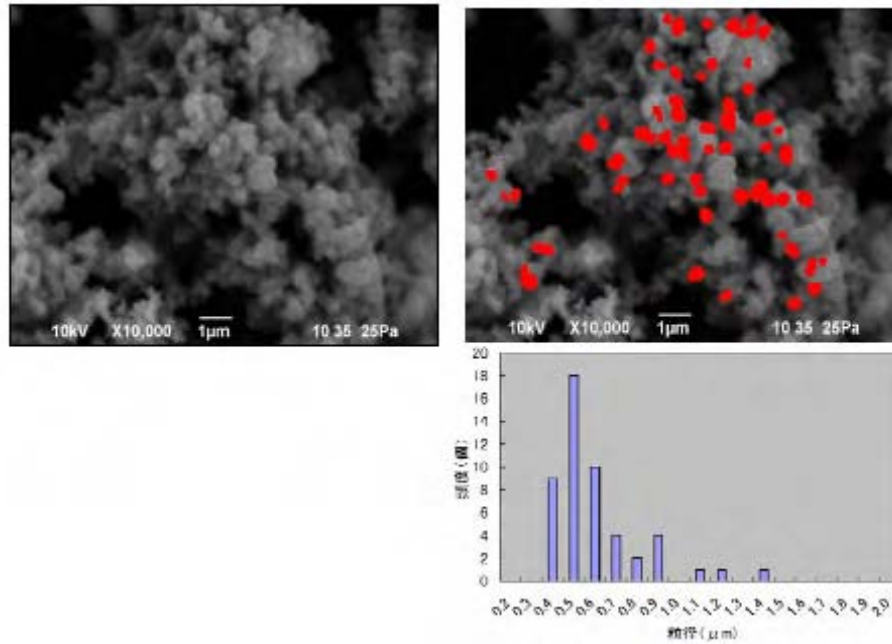


図 2.4-6 Soot-Blow 時における捕集粒子の画像及び粒径分布 [フィルタ No. 1-2]

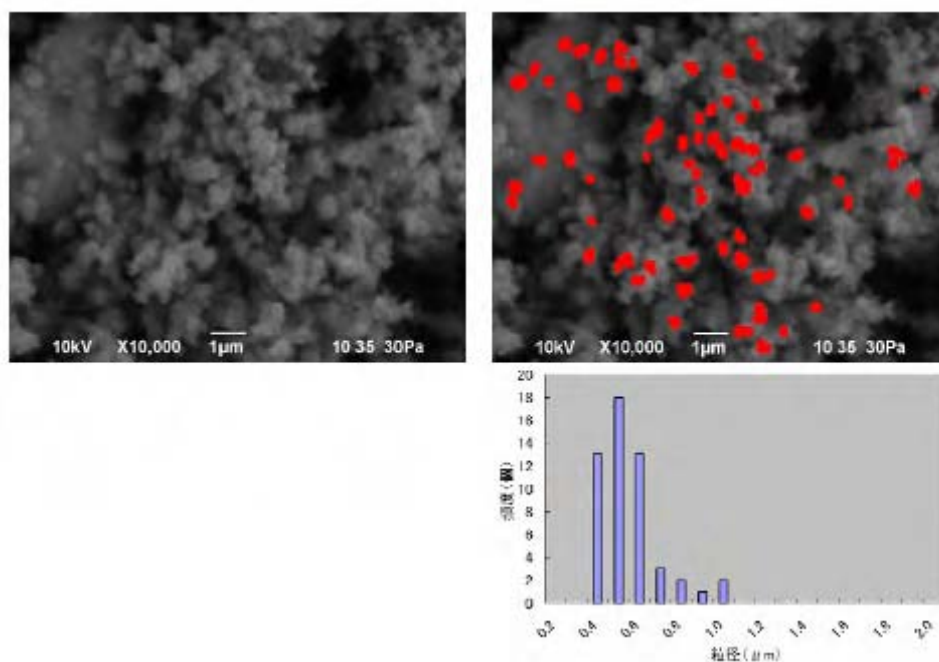


図 2.4-7 Soot-Blow 時における捕集粒子の画像及び粒径分布 [フィルタ No. 2-1]

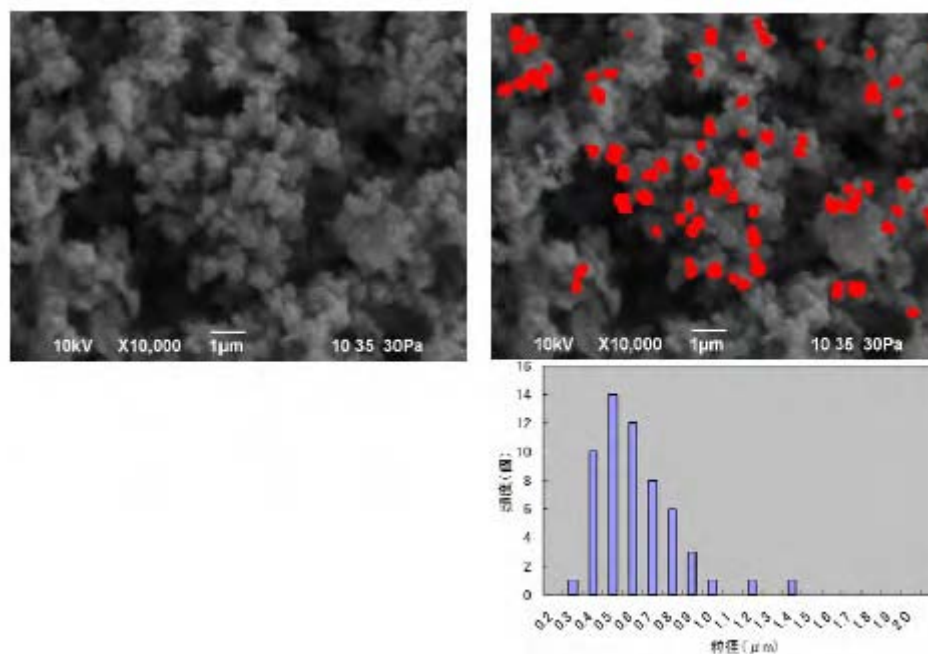


図 2.4-8 Soot-Blow 時における捕集粒子の画像及び粒径分布 [フィルタ No. 2-2]

2.4.4 燃料性状

本調査時において、調査対象船が使用していた燃料の分析結果は、運航会社から提供を受けた。

使用燃料の規格はISO8217:2005(E)に準拠したCategory ISO-F RMK700と呼ばれるものであり、硫黄分の含有量は2.85%、水分の含有量は0.20%であった。

表 2.4-8 燃料性状の一覧 (抜粋)

分析項目	仕様
規格	ISO-F Grade(2005) : RMK700
動粘度 (50°C)	445.1 cSt
密度 (15°C)	995.3 kg/m ³
硫黄分	2.85 % (m/m)
水分量	0.20 % (v/v)

2.4.5 運転記録

通常航行時における調査対象船のエンジンパフォーマンスの情報について、運航会社から提供を受けた。

燃料消費量は4552.121 kg-Fuel/hであり、その消費量から算出した機関出力は36,634 PS ≒26,944 kW、調査対象船の最高出力49,410 kW比で約55%の負荷率であった。

2.5 考察

2.5.1 燃料消費率の検証

エンジンパフォーマンスから燃費について逆算をすると次の通りとなり、運航会社より提供をいただいた調査対象船の主機要目表記載値である167.9 g/kWh (±3%) どおりであった。

$$4552.121 \text{ (kg-Fuel/h)} \div 26,944 \text{ (kW)} = \underline{168.9 \text{ (g/kWh)}}$$

2.5.2 排出ガスの解析

(1) 各種パラメータの導出

① 理論燃焼排ガス量の算出

JIS B 8222:1993 陸用ボイラー熱勘定方式によると、液体燃料における単位燃料当たりの理論燃焼ガス量は、2.4.1章に示す通り低発熱量から次式の通り導かれる。

$$\text{理論湿り排ガス量 } G_{0\text{-wet}} \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)} = \frac{15.75(H_l - 1100)}{10000} - 2.18$$

$$G_{0\text{-wet}} \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)} = \underline{12.15 \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)}}$$

$$\text{理論渴き排ガス量 } G_{0\text{-dry}} \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)} = G_{0\text{-wet}} - \frac{\{1.244(9H + W)\}}{100}$$

$$G_{0\text{-dry}} \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)} = \underline{10.92 \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)}}$$

ここで、投入パラメータは次の通りとした。

H_l = 低発熱量 = 10,200 (kcal/kg-Fuel) … 主機要目表より
H = 燃料中の水素 = 11 (w%) … JIS B 8222:1993よりC重油の値を引用
W = 燃料中の水分 = 0.2 (w%) … 燃料分析結果表より

なお、理論燃焼ガスの水分濃度は、JIS Z 8808:1995 排ガス中のダスト濃度の測定方法に従って計算した結果、10.12 v%となる。

$$\{1 - 10.92 \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)} / 12.15 \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)}\} \times 100 = \underline{10.12 \text{ (v%)}}$$

② 理論空気量の算出

JIS B 8222:1993 陸用ボイラ-熱勘定方式によると、液体燃料における単位燃料当たりの理論空気量は、低発熱量から次式の通り導かれる。

$$\text{理論空気量 } A_0 \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)} = \frac{12.38H_l}{10000} - 1.36$$

$$A_0 \text{ (m}_N^3\text{/kg-Fuel)} = \frac{11.27}{10000} (\text{m}_N^3\text{/kg-Fuel)}$$

ここで、 H_l = 低発熱量 = 10,200 (kcal/kg-Fuel) … 主機要目表より

③ 空気比の算出

JIS B 8222:1993 陸用ボイラ-熱勘定方式によると、空気比を概算する場合の式として、排出ガス中の O_2 濃度から、次式が与えられている。

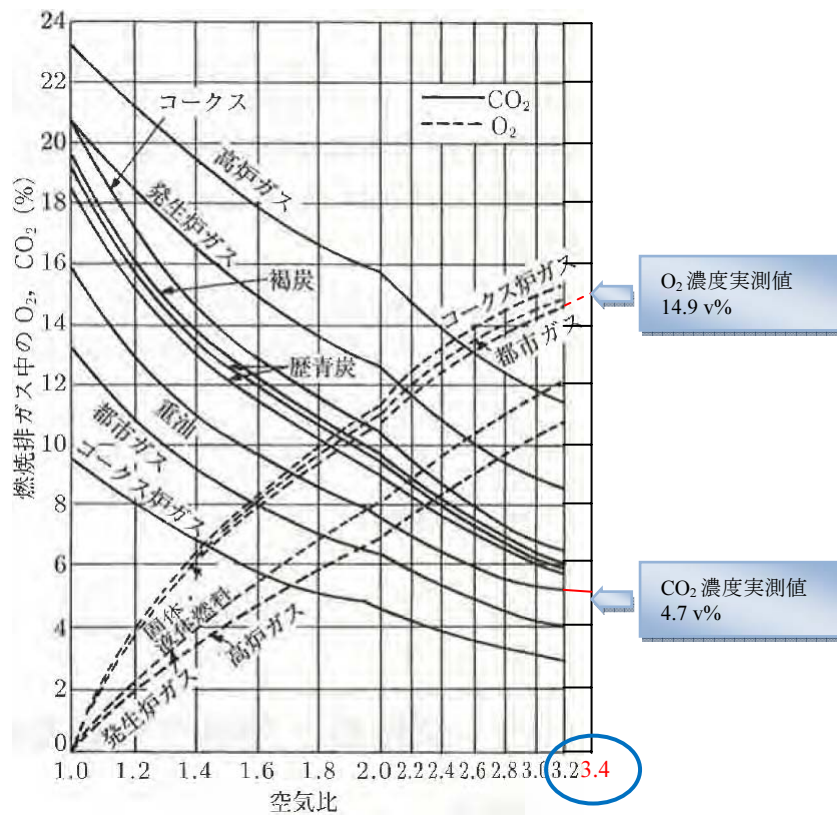
$$\text{空気比 } m = \frac{21}{21 - O_2 \text{ (v\%)}}$$

$$m = 3.4$$

ここで、 O_2 = 排出ガス中の酸素濃度 (dry) = 14.9 (v%) … 実測値より

なお、「船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査報告書」(1998年 財団法人シップ・アンド・オーシャン財団)によると、ディーゼル排ガスの残留酸素濃度として、平均的に13%程度との記載があり、調査対象船の排ガス中の O_2 濃度は、若干、空気過剰傾向であったと言える。

また、「公害防止の技術と法規」(2008年 社団法人産業環境管理協会)に、空気比と燃焼排ガス中の O_2 、 CO_2 濃度の関係図が示されており、本調査で得られた O_2 、 CO_2 の濃度と空気比の関係は、概ね理論通りとなっていることが判る。



出典) 「公害防止の技術と法規」(2008年 社団法人産業環境管理協会)

図 2.5-1 空気比と燃焼排ガス中の O₂、CO₂ 濃度の関係

(2) 排出ガス量の演算

消費した燃料と、理論燃焼ガス量、理論空気量、空気比及び燃焼排ガス分析計によって計測された排ガス温度から、大気汚染防止法に規定される燃焼計算式によって、本調査の通常航行時における時間当たりの排出ガス量を求める。

$$\text{単位燃料当たりの湿り排出ガス量 } G_{1\text{-wet}} \text{ (m}^3\text{/kg-Fuel)} = G_{0\text{-wet}} + A_0(m-1)$$

$$G_{1\text{-wet}} \text{ (m}^3\text{/kg-Fuel)} = 39.20 \text{ (m}^3\text{/kg-Fuel)} \cdots \text{標準状態}$$

態

$$\text{単位燃料当たりの乾き排出ガス量 } G_{1\text{-dry}} \text{ (m}^3\text{/kg-Fuel)} = G_{0\text{-dry}} + A_0(m-1)$$

$$G_{1\text{-dry}} \text{ (m}^3\text{/kg-Fuel)} = 37.97 \text{ (m}^3\text{/kg-Fuel)} \cdots \text{標準状態}$$

態

上記によって求めた、単位燃料当たりの排出ガス量（標準状態）に、燃料消費量を乗算し、温度補正を行った結果は下記の通りである。

$$\begin{aligned} \text{湿り排出ガス量 } G_{\text{wet}} &= 39.20 \text{ (m}_N^3/\text{kg-Fuel)} \times 4552.121 \text{ (kg-Fuel/h)} \times (273+246) / 273 \\ &= 339,238 \text{ (m}^3/\text{h)} = 94.2 \text{ (m}^3/\text{s)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{乾き排出ガス量 } G_{\text{dry}} &= 37.97 \text{ (Nm}^3/\text{kg-Fuel)} \times 4552.121 \text{ (kg-Fuel/h)} \times (273+246) / 273 \\ &= 328,594 \text{ (m}^3/\text{h)} = 91.3 \text{ (m}^3/\text{s)} \end{aligned}$$

なお、排出ガスの水分濃度は、JIS Z 8808:1995 排ガス中のダスト濃度の測定方法に従って計算した結果、3.14 v%となる。

$$\{1 - 328,594 \text{ (m}_N^3/\text{kg-Fuel)} / 339,238 \text{ (m}_N^3/\text{kg-Fuel)}\} \times 100 = \underline{3.14 \text{ (v\%)}}$$

(3) 排出ガス流速の演算

前項で求めた湿り排出ガス量から、断面積4.9 m²のダクト円形部分通過時の流速を試算すると次の通りである。

$$\text{排出ガス流速 } V = 94.2 \text{ (m}^3/\text{s)} \div 4.9 \text{ (m}^2) = \underline{19.2 \text{ m/s}}$$

アンダーセンスタックサンプラによる粒径別のダスト捕集では、試料は排ガス流速と等速で吸引をすることが望ましいが、2.4.1章に示す通り、検体No.1では8.5 m/s、検体No.2では6.4m/sの吸引速度であり、非等速吸引による捕集であったといえる。

なお、排ガス流速と比較して、試料吸引速度が小さい場合は、ダスト捕集にあたって正の誤差を与えることが知られている。実際に試料を捕集したダクト位置は、断面積を計算した円形部分ではなく、排気エコノマイザ入口部分に接合後のかなり大きな方形部分であったことから、前述の演算結果ほど非等速になるものではないが、本調査結果におけるダスト濃度、炭素濃度は、多少なりとも過大に報告されている可能性がある。

2.5.3 通常航行時のPM排出係数の試算

通常航行時のPMの排出係数について、排出ガス量とアンダーセンスタックサンプラによる重量濃度分析結果から試算すると、次の通りとなる。

PM排出係数(g/kWh) = PM総重量濃度(g/m³) × 乾きガス量(m³/h) ÷ 機関出力(kW)

・ 検体No.1 : 0.02344 g/m³ × 328,594 m³/h ÷ 26,944 kW = 0.29 g/kWh

・ 検体No.2 : 0.01827 g/m³ × 328,594 m³/h ÷ 26,944 kW = 0.22 g/kWh

*1 本調査では水分量が検出下限以下であったことから補正を行っていない。

*2 PM総重量濃度には、バックアップフィルタで捕集されたPMは含んでいない。

これらの排出係数の測定値は、3章で後述する本事業でのブラックカーボン排出係数より小さい数値となっている。その理由としては、サンプル採取位置としたダクトは屈曲部であり、流れの乱れによって通過ガスの流心を適切に捉えていなかったことが想定される。また、アンダーセンスタックサンプラは、相対濃度分布の把握を主目的としていることから捕集原理上の限界、すなわち、通過ダスト全量を捕集できていない可能性も考えられる。

一方、非等速吸引による影響により、ダスト濃度の過大検出の可能性も混在しており、その影響度合いの切り分けも把握できないことから、本調査結果で得られた排出係数のみによって、船舶からのブラックカーボンの排出実態を適切に表現しているとは言い難い。

本章の冒頭で述べたとおり、オンボードでの実際の航行では動圧の変動が大きく、かつ高硫黄含有燃料で適用が難しいことから、精度良く測定することは難しい。そのため、ブラックカーボンの粒径分布及び実測(Hot Filter法)の結果より把握したが、排出係数は実測の結果ではなく、3章で紹介する既存の文献値から設定する。

2.5.4 調査方法の改善に係る検討

(1) 測定系1：排気エコノマイザ通過前

調査地点については、出来るだけ排出ガスが整流となっている場所、例えば測定系2を実施したフランジなどを調査地点として選定することが望ましい。今回の実測では排ガス中の水分量が少ないことが判明したため、測定系2を実施した排気エコノマイザ通過後の比較的低温な排ガスを対象としても、粒子状物質の粘性は低く、排ガスの吸引ノズルに詰まりが生じる恐れは低いと考える。

また今回、ガスの噴き出しが原因で測定を断念した流速については、ピトー管よりプローブ径が小さい燃焼排ガス分析計に、差圧測定オプション機能を活用する方法も検討の余地がある。

最後に、サンプラであるが、ダクト外捕集を行うのであれば、エアサンプリングで実績のあるModel-AN200(東京ダイレック)の使用が推奨される。アンダーセンスタックサンプラと比較した利点としては、石英やテフロンフィルタによる捕集によって、重量分析のみならず、全ステージにおいて炭素成分や硫黄分の分析が可能となる。

(2) 測定系 2 : Soot-Blow 調査

調査地点については、今回、調査地点直下の2つのブローを選択したが、両者の値にかなりの差が確認できたことから、ブロー全体を代表する排出量を把握するためには、残り14台のブロー作動時についても考慮したうえで、調査位置、回数、吸引時間等を決定する必要がある。

また、表面観察の結果からは、測定系2においても粒径別に捕集したほうが、炭素分析、画像解析の精度、質がより向上すると想定される。サンブラとしては、測定系1同様、エアサンプリングで実績のあるModel-AN200（東京ダイレック）の使用を推奨する。

3 北極海航路における船舶からのブラックカーボン排出インベントリの作成

本事業では、北極海航路におけるブラックカーボンの影響を輸送シミュレーションから評価するが、その計算の入力データとして必要となるブラックカーボン排出インベントリを、現況及び将来を対象として整備する。現況推計は2004年以降を、将来推計は2020年を対象として実施する計画であるが、本年度はまず現況推計を実施した。

排出係数は、Second IMO GHG Study 2009 において Germanischer Lloyd より提供された燃料中の硫黄分 [%] と希釈法における PM 性分別排出係数 [g/kWh] の直線近似式から、各粒子成分に対する排出係数を設定した。それら粒子成分のうち、本事業では保守的に、Ash 及び EC は黒色炭素（いわゆるブラックカーボン）に加えて、正の放射強制力を持つブラウンカーボン（BrC）が含まれる OM もブラックカーボンと見なし、船舶からの排出インベントリ作成においては Ash・EC・OM の合計値をブラックカーボンの排出係数とした。

国内では、北極海航路における船舶活動量データを収集することは困難である。そのため、本事業では、デンマークの専門機関である LITEHAUZ (<http://www.litehauz.com>) に、(a) 既存の利用可能なデータベースを収集すること、(b) 収集したデータベースより船舶活動量を船種別・船型別・季節別の OD 表 (Origin-Destination) としてまとめること、(c) 主要航路を検討・設定すること、の3つの作業を依頼した。

ここで設定・作成した排出係数及び船舶活動量と併せて、輸送シミュレーション領域における各メッシュ内での船舶隻数及びそれらの存在時間を算定し、メッシュ毎のブラックカーボン排出量を算出した。なお、Domestic Navigation などで主要航路が設定できない場合には、シミュレーション領域において各国の陸域メッシュに接続した海域メッシュに均等に割り付けを行うなどして対応した。

北極海航路を対象として推計した船舶からのブラックカーボン排出量の合計は 286 ton/year となり、船種別では Passenger が最も多い排出量：83.7 ton/year、内外航別では内航航路がより多く 176 ton/year (62%)、季節別では Summer (6-8 月) が最も多い 113 ton/year (39%)、国別ではノルウェーが最も多い 112 ton/year (39%) と推計された。

本事業及び ARCTAS (推計対象年：2008 年) で整備されたブラックカーボン排出量を、緯度帯毎に積算して比較した。なお、本事業で定義したブラックカーボン (Ash+EC+OM) の排出係数は ARCTAS のもの (EC 相当) よりも 3.2 倍大きい。排出量を北緯 70 度以北で積算した場合、本事業は 137 ton/year (2008 年に補正した値) となった。ARCTAS による排出量が 39 ton/year であり、本事業の排出量が 3.5 倍大きい結果となった。他方、北緯 66 度以北では本事業は 214 ton/year (2008 年に補正した値)、ARCTAS は 84ton/year となり、本事業の排出量が 2.5 倍大きい結果となった。

本事業では主に 2004 年の活動量を収集し、ブラックカーボン排出量を推計した。同排出量をもとに、「2nd IMO GHG Study」で報告された 1990～2007 年、並びに 2020 年における燃料消費量の推計値を船舶活動量の変動と想定し、ブラックカーボン排出量の年度補正及び将来推計も合わせて実施した。

本事業では、北極海航路の開設に伴うブラックカーボンの影響を輸送シミュレーションから評価するが、その計算の入力データとして必要となるブラックカーボン排出インベントリを、現況及び将来を対象として整備する。現況推計は 2004 年以降を、将来推計は 2020 年を対象として実施する計画であるが、本年度はまず現況推計を実施した。

大気汚染排出量は、船舶カテゴリごとに、以下の算定式のとおり、活動量×排出係数で算定される。

$$E_s = A \times F_s \quad \text{数式 3.1-1}$$

E_s 対象物質 s の時間あたりの排出量 [kg/h]

A 時間あたりの活動量、例えば [ton-fuel/h]

F_s 対象物質 s の排出係数、例えば [kg/ton-fuel]

活動量 (A) は時間あたりの燃料消費量 [ton-fuel/h] あるいは平均出力 [kWh] で表現される。一方で、排出係数 (F_s) は、大気汚染物質ごとに [kg/ton-fuel] 及び [kg/kWh] で表現される。対象物質の時間あたりの排出量は、両者の積として表される。

本章では、北極海航路における船舶の活動量を算出し、かつ妥当と考えられる排出係数を文献調査より検討してブラックカーボン排出量を算定した。

図 3.1に、ブラックカーボン排出インベントリの作成フローを示す。図中の「BC 粒径分布」の定量は、実際に船舶が排出するブラックカーボンを直接観測して定量したものを採用する。直接観測の詳細は 2 章を参照されたい。

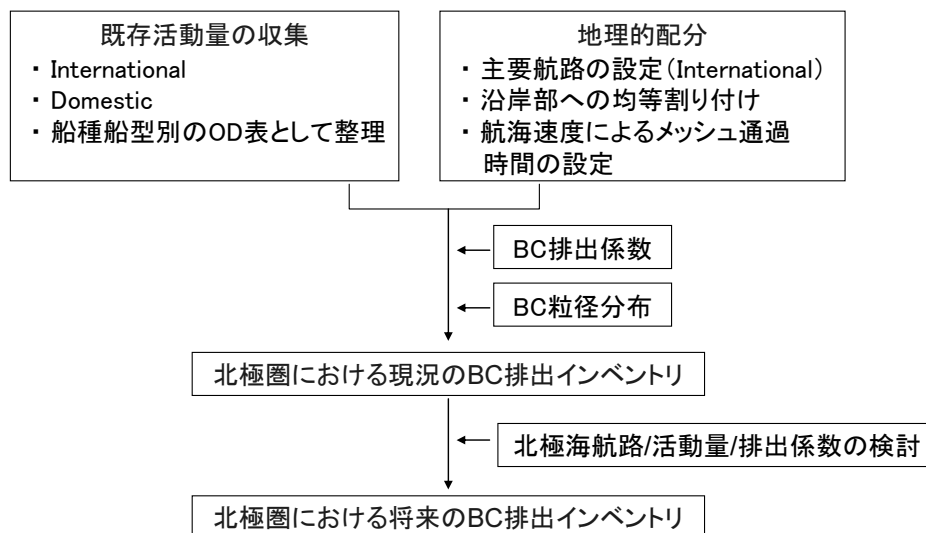


図 3.1 北極海航路におけるブラックカーボン排出インベントリの作成フロー

3.1 ブラックカーボンの排出係数の検討

ブラックカーボンを含む粒子状物質 (Particulate Matter: PM) については、表 3.1-1に示す通り、様々な排出係数がこれまでも報告されている。

例えば S&O (2008) の元出典のデータは希釈法による測定結果を用いており、Sulfate 粒子を含む PM 排出係数となっている。EMEP/CORINAIR の排出係数設定に用いた元出典データの測定方法は、その測定年代から JIS Z 8808 に代表される Hot Filter 法であると推定できるが、S&O (2008) と同程度の排出係数となっている。

EC (2002) については、上記の 2 文献に比べて大きい排出係数となっている。これは、2004 年当時の対象機関が附属書 VI における preTier1 機関 (NOx 規制が適用されていないディーゼル機関) であったため、燃焼状態が規制後の機関と比較して必ずしも良好で無かったことを反映している可能性がある。

本年度は、輸送シミュレーションの検証を目的として、ARCTAS 集中観測プロジェクト¹で整備されたブラックカーボン排出量を入力値としたシミュレーションを実施した。同排出量の推計では、表 3.1-1に示す通り 0.66 (kg-BC/ton-Fuel) という排出量が使われており、同値は他の PM 排出係数と比較すれば小さい値であることがわかる。ARCTAS の詳細及び検証結果は 4 章を参照されたい。

¹ ARCTAS とは米国 NASA が 2008 年の春季と夏季の 2 シーズンにわたって北極圏の対流圏大気を対象に実施した集中野外観測実験。観測を効率的に行うために、化学輸送モデルための入力データとして、ブラックカーボンを含む 10 成分の気体・エアロゾル粒子の排出源データが作成された (4.2 節参照)。

表 3.1-1 PM・BC の排出係数の比較

出典 ⁽¹⁾	排出係数	元出典	備考
EMEP/CORINAIR (2007)	6.7 [kg-PM/ton-fuel]	Cooper and Gustafsson (2004)	Residual fuel
	1.1 [kg-PM/ton-fuel]	Cooper and Gustafsson (2004)	Distillate fuel
GHG 2 nd Study (2009)	6.7 [kg-PM/ton-fuel]	CORINAIR	Residual
	1.1 [kg-PM/ton-fuel]	CORINAIR	MGO
S&O (2008)	1.44~6.45 [g-PM/kg-fuel]		燃料中硫黄分 0.5~2.7 %
EC (2002)	4.4, 4.0, 4.0 ⁽²⁾ [kg-PM/ton-fuel]	mostly IVL and Lloyd's Engineering Service data	港内航行時の MGO。 海上航行時は設定なし。
	4.4, 4.0, 4.0 ⁽²⁾ [kg-PM/ton-fuel]		港内航行時の MDO。 海上航行時は設定なし。
	11.2, 10.3, 10.3 ⁽²⁾ [kg-PM/ton-fuel]		港内航行時の Residual oil。 海上航行時は設定なし。
IPCC2006	-	-	船舶については記載なし
IPCC1996	-	-	船舶については記載なし
ARCTAS (2008)	0.66 [kg-BC/ton-fuel]	Bond et al. (2004)	元出展には以下の EF も併記 PM : 1.80 [kg-PM/ton-fuel] OC : 0.21 [kg-OC/ton-fuel]

(1) 出典

EMEP/CORINAIR (2007) : B842-15 Table 8.1, B842-16 Table 8.4

GHG 2nd Study (2009) : MEPC59/INF10., PREVENTION OF AIR POLLUTION FROM SHIPS

S&O (2008) : 「平成 16 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査報告書」(平成 17 年 3 月、(社) 日本マリンエンジニアリング学会)

EC (2002) : Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community, Final Report Entec UK Limited (July 2002)

IPCC 2006 : 2006 年 IPCC ガイドライン

IPCC1996 : 1996 年改訂 IPCC ガイドライン

ARCTAS (2008) : <http://www.cgrer.uiowa.edu/arctas/arctas.html>

(2) slow speed, medium speed, high speed

表 3.1-1に示す通り、PM 排出係数については様々な値が報告されているが、本事業では PM 中に含まれるブラックカーボンに対して排出係数を設定する必要がある。そこで、本事業では Second IMO GHG Study 2009 において Germanischer Lloyd より提供された、図 3.1-1に示す燃料中の硫黄分 [%] と希釈法における PM 性分別排出係数 [g/kWh] の直線近似式から、各粒子成分に対する排出係数を設定した。

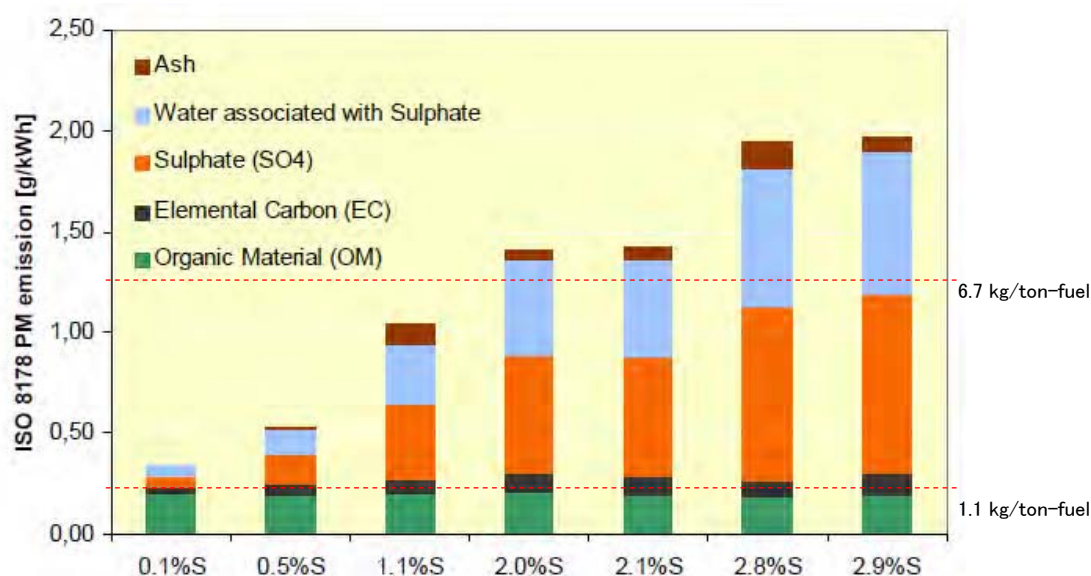


図 3.1-1 燃料中の硫黄分 (%) に対する希釈法で定量された PM 排出係数 (g/kWh)
(Presentation by Germanischer Lloyd at IMO BLG-WGAP 2, Berlin, 2007)

同図では、燃料中の硫黄分が高いほど Sulphate 排出係数が大きくなる一方で、SOF (Soluble Organic Fraction : 可溶性有機成分、図中の OM) と EC (Elemental Carcon : 元素状炭素) は硫黄分の変化に関わらずほぼ一定の値を示していることが見て取れる。

各成分に対する近似式を下記に示す ;

Ash [g/kWh]	=	$0.0340 \times S \text{ 分 } [\%] + 0.0130$	数式 3.1-1
Water associated with Sulphate [g/kWh]	=	$0.235 \times S \text{ 分 } [\%] + 0.0181$	数式 3.1-2
Sulphate [g/kWh]	=	$0.267 \times S \text{ 分 } [\%] - 0.00885$	数式 3.1-3
EC [g/kWh]	=	$0.0222 \times S \text{ 分 } [\%] + 0.0393$	数式 3.1-4
OM [g/kWh]	=	$-0.00642 \times S \text{ 分 } [\%] + 0.207$	数式 3.1-5
PM 合計 [g/kWh]	=	$0.585 \times S \text{ 分 } [\%] + 0.281$	数式 3.1-6

数式 3.1-1～3.1-6 を用いて各粒子成分の排出係数を算出するためには、燃料中の硫黄分を設定する必要がある。ここでは、使用されている燃料は全て C 重油であると想定し、現況の推計対象年である 2004 年での C 重油中の硫黄分の全球平均値：2.70%を適用した (MEPC 53/4)。同硫黄分より算出した各粒子成分の排出係数を表 3.1-2にまとめる。

表 3.1-2 硫黄分が 2.70%の場合の各粒子成分の排出係数

Particle composition	Emission Factor [g/kWh]
OM	0.189
EC	0.0992
Sul	0.712
Water associated with Sulphate	0.653
ash	0.105
PM (sum of above components)	1.86

参考として、図 3.1-1には、表 3.1-1に示した CORINAIR (CORe INventory AIR emissions) による 6.7 (kg/ton-fuel) と 1.1 (kg/ton-fuel) を SFC (Specific Fuel Consumption：燃料消費率) = 185 g-fuel/kWh として変換した値も赤線で示した。SFC については、「Second IMO GHG Study 2009」において船種・船型別の平均値が公開されている。それら値を表 3.2-2にまとめたが、例えば Crude Tanker で見た場合、SFC は船型別に 185～205 g-fuel/kWh となっており、185 g-fuel/kWh は 120,000 DWT 以上の船型において設定されている。

CORINAIR の排出係数は Hot filter 法で定量されたものと推定したが、同法では高温の排ガス中に含まれる粒子状物質を直接フィルター上に捕集するため、図 3.1-1で示した PM 中の成分のうち、Sulphate (SO₄)、Water associated with Sulphate 及び OM 中の炭素成分以外は気体としてフィルターを透過すると考えられる。つまり、1.1 (kg/ton-fuel) という排出係数は、図 3.1-1における Ash・EC・OM 中の炭素成分の合計値になると考えられるが、両者は大きく乖離したものではないことが見て取れる。

更には、2章で紹介した船舶排ガスを対象とした実測では、約 240℃の高温排ガス中に含まれる粒子状物質をアンダーセンサンプラーで捕集した。つまり、同実測においても Ash・EC・OM 中の炭素成分の合計濃度が測定されたものと考えられる。

Ash 及び EC は黒色炭素 (いわゆるブラックカーボン) に、OM は同様に正の放射強制力を持つブラウンカーボン (BrC) が一部含まれたものに相当する。OM 中に含まれる炭素成分の割合は図 3.1-1からは把握できない。そのため、ここでは保守的に図 3.1-1の OM 全てがブラックカーボンであると設定し、船舶からの排出インベントリの作成においては、図 3.1-1で示した Ash・EC・OM の合計値をブラックカーボンの排出係数とすることとした。

3.2 北極海航路を対象とした船舶活動量の作成

3.2.1 北極海航路における船舶活動量の収集

北極海航路における航路情報については、国内ではその船舶活動量データを収集することは困難である。そのため、本事業では、デンマークの専門機関であるLITEHAUZ (<http://www.litehauz.com>) に、(a) 下記 (1) から (3) に示すデータベースを収集すること、(b) 同データベースより船舶活動量を船種別・船型別・季節別のOD表 (Origin-Destination) としてまとめること、(c) 主要航路を検討・設定すること、の3つの作業を依頼した。

(1) AMSA2009 で整備された 2004 年における航行データベースの利用

AMSA2009 (Arctic Marine Shipping Assesment 2009; <http://www.pame.is/about-amsa>) では、2004年を対象として北極圏に国土を持つ国を対象とした航行データベースを整備している。ただし、カナダについては7月から12月のみのデータベースとなっており、通年でのデータが整備されていない。

本事業では同データベースを基に、北極海における船舶データを収集した。例として、図 3.2-1に、AMSA2009が提供するノルウェーでのBulkер航行状況を示す。なお、船舶活動量の地理的配分は、AISに含まれる位置情報ではなくExpert Judgeより設定されたOD間の航路上に配分されている。詳細は3.2.3節を参照されたい。



図 3.2-1 ノルウェーでの Bulkер 航行状況 (AIS データ)

(2) その他最新データの収集

AMSA2009は2004年を対象とした航行データベースであるため、その後に更新されたデータベースの有無を調査し、適宜アップデートを行った。同作業はロシア、カナダ、米国、デンマーク、ノルウェーの5カ国を対象とした。

(3) Domestic (Internal) navigation data の収集

ロシア、カナダ、米国、デンマーク、ノルウェーの5カ国を対象に、北極圏における各国の内航船の航行データを収集した。情報の収集は、公開/灰色文献の調査、並びに専門・関連機関への聞き取り調査を行うことで実施した。

3.2.2 北極海航路における船舶活動量の算出

表 3.2-1に、収集した活動量に含まれる航行距離を船種別に集計した。航行距離の合計値はGeneral Cargoが最も大きく、収集した全航行距離の26.2%となった。他方、Unknown、Tug Barge、OSV (Offshore Support Vessel)、Pleasure Craftによる航行距離の合計値は相対的に小さい値となった。

表 3.2-1 航行距離の船種別集計結果

Ship Type	Total sailed distance (km/year)	No. of ships (ships/year)	average distance (km/ship/year)
General Cargo	1,304,198 (26.2%)	651	2,003
Passenger	786,053 (15.8%)	412	1,908
Bulk Carrier	709,736 (14.2%)	429	1,654
Tanker	596,479 (12.0%)	430	1,387
Government	456,125 (9.2%)	183	2,492
Container	445,887 (8.9%)	143	3,118
Fishing	432,289 (8.7%)	253	1,709
Unknown	136,301 (2.7%)	87	1,567
Tug Barge	65,800 (1.3%)	42	1,567
OSV	49,136 (1.0%)	58	847
Pleasure Craft	2,451 (0.0%)	2	1,226
Total	4,984,455	2,690	-

3.2.3 活動量データの地理的配分

活動量はOD表として整備されるが、ブラックカーボンの排出インベントリを作成するためには、その活動量を航行ルート上に配分する必要がある。船舶航行距離が10,000 km以上となる主要航路については、OD表と共にその地理的配置および季節による航路の有無がLITEHAUZによって調査されている。図 3.2-2に、提供された航行ルートを示す。

本年度は、輸送シミュレーション領域における各メッシュ内での船舶隻数及びそれらの存在時間を算定し、ブラックカーボンの排出係数 (g/kWh) を乗することで、メッシュ毎の排出量を算出した。なお、Domestic Navigationなどで主要航路が設定できない場合には、シミュレーション領域において各国の陸域メッシュに接続した海域メッシュに均等に割り付けを行うなどして対応した。

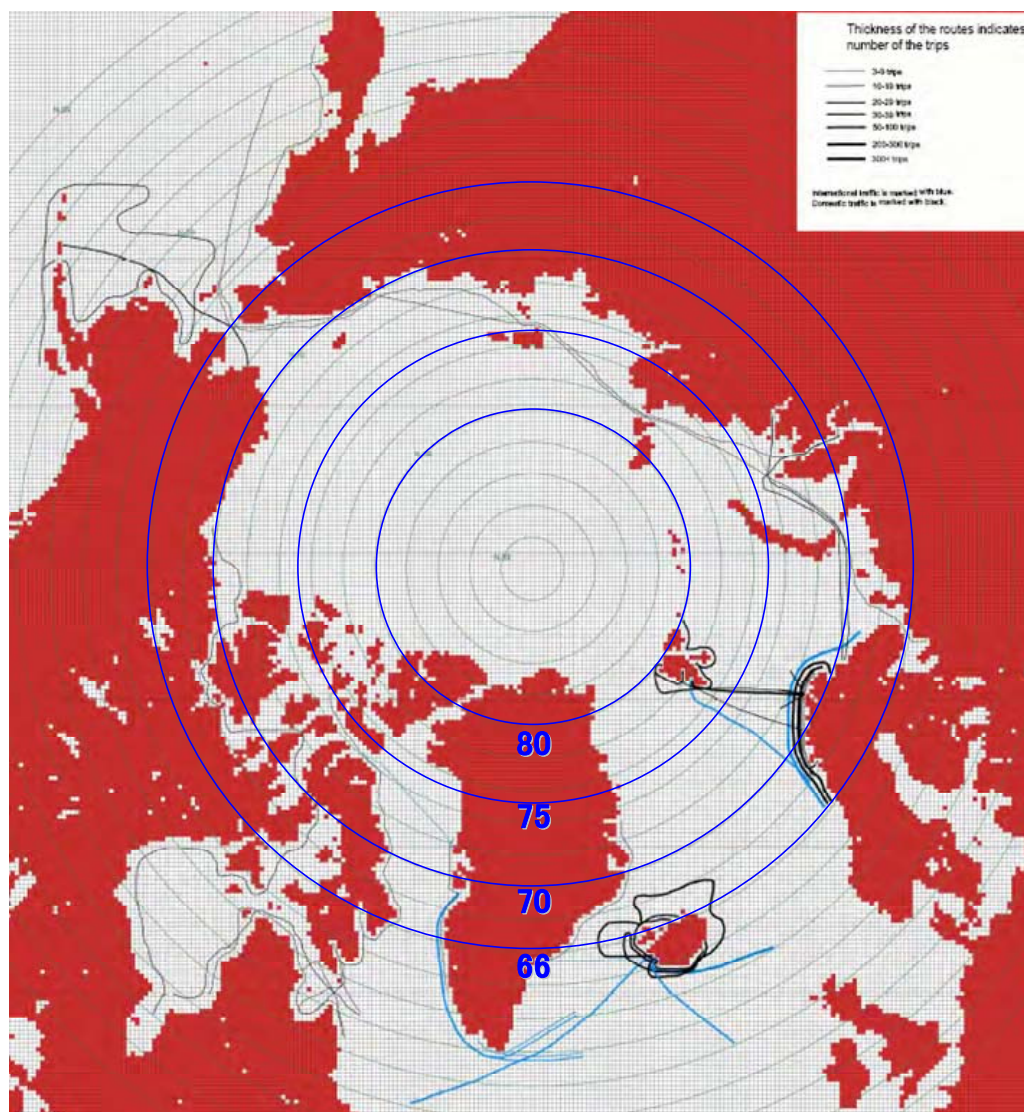


図 3.2-2 北極圏における船舶の航行ルートの検討 (青線は International、黒線は domestic)

3.2.4 ブラックカーボン排出インベントリの算出パラメータの検討

(1) 機関出力などの船舶情報の設定

図 3.1-1に示す通り、本事業で採用したブラックカーボンの排出係数は機関出力当たりの排出量 [g/kWh] となっているため、ブラックカーボン排出量を算出するためには対象となる船舶の機関出力を設定しなければならない。3.2節で述べた通り、本事業では船種区分・船型区分を考慮してOD表を作成した。また、Second IMO GHG Study 2009では、船種区分・船型区分ごとに平均機関出力、平均負荷率、平均SFC、平均船速などの情報が整理されている。さらに、海洋政策研究財団（2011）²では、船舶からの大気汚染物質の発生源データを作成するに当たり、船種・船型別に航海速度等の算出を行っている。

そこで、ここでは作成したOD表の船種区分・船型区分に対応する機関出力及び負荷率を、まずはSecond IMO GHG Study 2009で整理された当該情報を基に適宜設定した。Second IMO GHG Study 2009に含まれていない情報については、海洋政策研究財団（2011）において算出されたデータを適用した。

表 3.2-2に、Second IMO GHG Study 2009から参照した船舶情報をまとめる。

(2) 航海時間の算出

各航行ルートにおけるブラックカーボン排出量を算定するためには、その航海に要する航行時間を定量しなければならない。

作成したOD表には港間の発着時間情報が含まれるが、その航行時間には沖待ち時間なども含まれることから、実際の航行時間を過大評価していることが懸念される。そこでここでは、表 3.2-2に示した、IMO Second GHG Study において船型・船種毎に想定されている航海速度（負荷率85%と想定）及び平均負荷率から海上航行時の船速を算出し、OD表における航行距離をその船速で除すことで航行時間を算出した。

なお、Ice Class船を含んだ船種もSecond IMO Study 2009には含まれているが、ここでは通常の船型・船種別の船速を採用した。これにより、早く航海が終了することよりも、負荷率（速度の3乗に比例）が大きくなることで出力が大きくなり、それに伴いブラックカーボン排出量が多くなるという安全側のインベントリを作成することとした。

なお、EEDI reference lineを算定する際には、Ice Class船が通常線と同じ航行速力を出すためには、1.42倍ほど機関出力が増加すると見積もられている。

²海洋政策研究財団：平成22年度 排出規制海域設定による大気環境改善効果の算定事業報告書（2011），
<http://www.sof.or.jp/report/pdf/ISBN978-4-88404-265-3.pdf>

表 3.2-2 Second IMO GHG Study 2009から参照した船舶情報

Type	IMOGHGsize	Avg gt	MainEngine Avg kW ¹⁾	AuxEngine Avg kW	Avg load	MainEngine SFC [g/kWh]	Avg Speed [knots] ¹⁾
Crude Tanker	A 200,000+ dwt	155,685	24,610	1,034	73%	185	15.4
	B 120 -199,999 dwt	80,711	17,075	1,232	80%	185	15.0
	C 80 -119,999 dwt	56,921	12,726	769	80%	195	14.7
	D 60 -79,999 dwt	39,498	10,529	731	70%	195	14.6
	E 10 -59,999 dwt	24,290	7,889	729	70%	195	14.5
	F -9,999 dwt	2,085	1,865	222	65%	205	12.1
Products Tanker	A 60,000+ dwt	46,775	12,644	780	80%	185	15.3
	B 20 -59,999 dwt	24,262	8,482	736	66%	195	14.8
	C 10 -19,999 dwt	9,723	4,640	535	70%	205	14.1
	D 5 -9,999 dwt	4,264	2,691	291	75%	205	12.8
	E -4,999 dwt	1,056	1,032	123	65%	205	11.0
Chemical Tanker	A 20,000+ dwt	24,917	9,027	837	80%	195	14.7
	B 10 -19,999 dwt	9,357	5,161	623	80%	195	14.5
	C 5 -9,999 dwt	4,651	3,252	416	76%	205	14.5
	D -4,999 dwt	1,331	1,257	216	65%	205	14.5
Bulkier	A 200,000+ dwt	114,519	17,224	794	71%	185	14.4
	B 100 -199,999 dwt	83,619	15,108	697	70%	185	14.4
	C 60 -99,999 dwt	39,568	9,912	549	70%	195	14.4
	D 35 -59,999 dwt	27,596	8,209	533	70%	195	14.4
	E 10 -34,999 dwt	15,351	6,436	458	70%	195	14.3
	F -9,999 dwt	1,942	1,532	237	65%	205	11.0
General Cargo	A 10,000+ dwt	11,382	5,914	414	80%	195	15.4
	B 5,000-9,999 dwt	4,704	2,939	235	80%	205	13.4
	C -4,999 dwt	1,061	868	90	65%	225	11.7
	D 10,000+ dwt, 100+ TEU	15,641	7,882	628	65%	195	15.4
	E 5,000-9,999 dwt, 100+ TEU	5,294	3,720	401	65%	205	13.4
	F -4,999 dwt, 100+ TEU	2,724	1,860	249	65%	205	11.7
Container	A 8,000+ teu	100,082	68,477	3,081	67%	175	25.1
	B 5 -7,999 teu	70,290	55,681	2,433	65%	175	25.3
	C 3 -4,999 teu	45,317	34,934	1,782	65%	185	23.3
	D 2 -2,999 teu	29,363	21,462	1,359	65%	185	20.9
	E 1 -1,999 teu	16,438	12,364	985	65%	195	19.0
	F -999 teu	6,967	5,703	600	65%	195	17.0
Cruise	A 100,000+ gt	119,041	66,523	1,500	65%	175	OPRF (2011) ²⁾
	B 60-99,999 gt	79,541	49,779	3,269	65%	185	
	C 10-59,999 gt	29,559	19,048	1,780	65%	185	
	D 2-9,999 gt	4,851	4,026	702	65%	225	
	E -1,999 gt	664	945	143	65%	205	
Service	Tug	281	1,903	96	40%	215	
	SAR & Patrol	523	2,597	145	28%	180	
Misc	A Fishing	313	687	164	26%	285	
	C Other fishing	1,296	1,388	236	77%	249	

1) 負荷率 85%時におけるデータと想定

2) OPRF (2011) : 海洋政策研究財団「平成 22 年度 排出規制海域設定による大気環境改善効果の算定事業」報告書

3.3 北極海航路を対象とした船舶からのブラックカーボン排出量の算出結果

3.3.1 船種別集計

図 3.3-1に、北極海航路を対象として推計した船舶からのブラックカーボン排出量（Ash+OM+EC）を船種別に示す。図中に示した7つの船種を対象とした場合、ブラックカーボン排出量の合計は286 ton/yearとなった。船種別ではPassengerが最も多い排出量：83.7 ton/yearとなり、全排出量の29.2%であった。表 3.2-1ではGeneral Cargoが最も多い航行距離を示したが、ブラックカーボンの排出量で見ればPassenger（83.7 ton/year）、Bulk Carrier（63.2 ton/year）、Container（44.1 ton/year）、Tanker（42.2 ton/year）に次ぐ5番目の値（40.7 ton/year）となった。

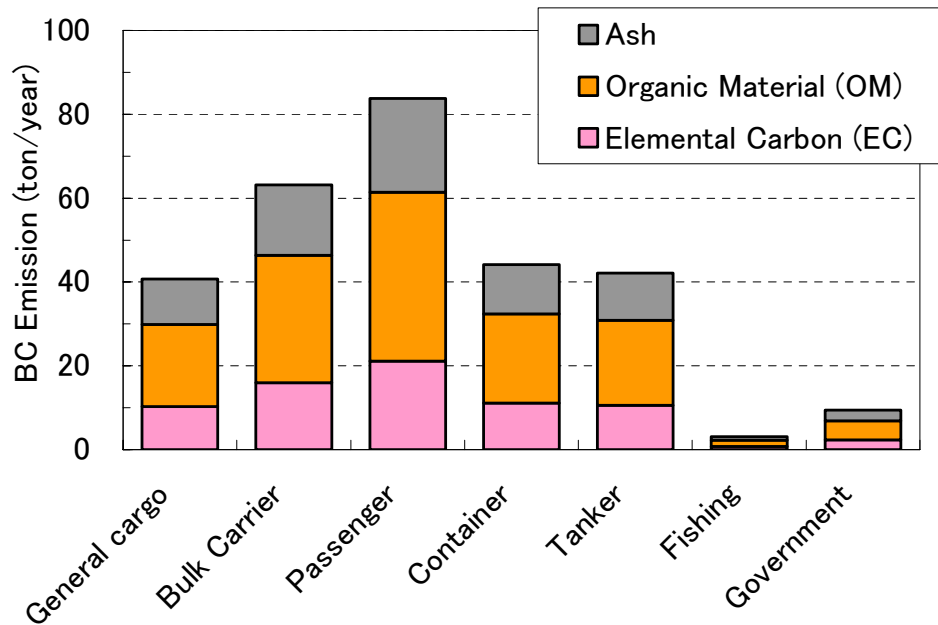


図 3.3-1 北極海航路を対象とした船舶からのブラックカーボン排出量の

船種別集計結果

3.3.2 内航・外航航路別集計

図 3.3-2に、北極海航路を対象として推計した船舶からのブラックカーボン排出量を内航航路・外航航路別に示す。排出量の配分は、内航航路：176 ton/year（62 %）、外航航路：110 ton/year（38 %）となり、Containerのみ外航航路における排出量（30.8 ton/year）が内航航路の値（13.3 ton/year）を上回った。

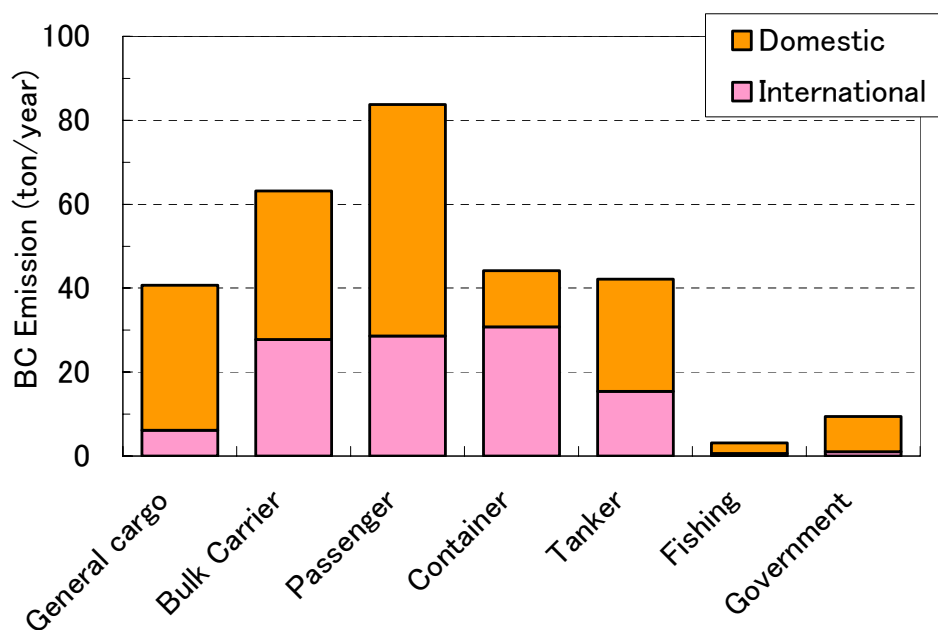


図 3.3-2 北極海航路を対象とした船舶からのブラックカーボン排出量の
内航・外航航路別集計結果

3.3.3 季節別集計

図 3.3-3に、季節別 (Spring/Summer/Fall/Winter) 及び船種別に推計したブラックカーボン排出量を示す。なお、各季節に含まれる月は、Spring : 3~5月、Summer : 6~8月、Fall : 9~11月、Winter : 12~2月とした。

各季節における排出量は、Spring : 49 ton/year (17%)、Summer : 113 ton/year (39%)、Fall : 83 ton/year (29%)、Winter : 45 ton/year (16%) となった。夏季には氷床が融解することで船舶活動量が増加するため、それに伴いブラックカーボン排出量も増加したものとする。特に、Passenger由来のブラックカーボン排出量の増加が顕著であった。

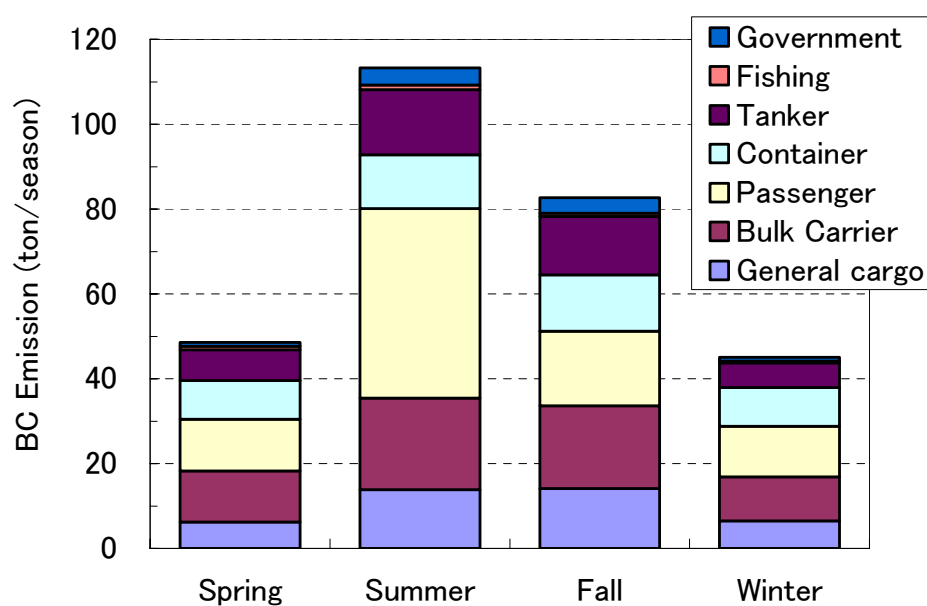


図 3.3-3 北極海航路を対象とした船舶からのブラックカーボン排出量の季節別集計結果

3.3.4 国別集計

図 3.3-4に、北極海航路を対象として推計した船舶からのブラックカーボン排出量をロシア、カナダ、米国、デンマーク、ノルウェーの5カ国に分けて示す。

排出量が多い順にノルウェー：112 ton/year (39%)、デンマーク：61 ton/year (21%)、アイスランド：42 ton/year (14%)、ロシア：37 ton/year (13%)、カナダ：26 ton/year (9%)、米国：7 ton/year (2%) となった。

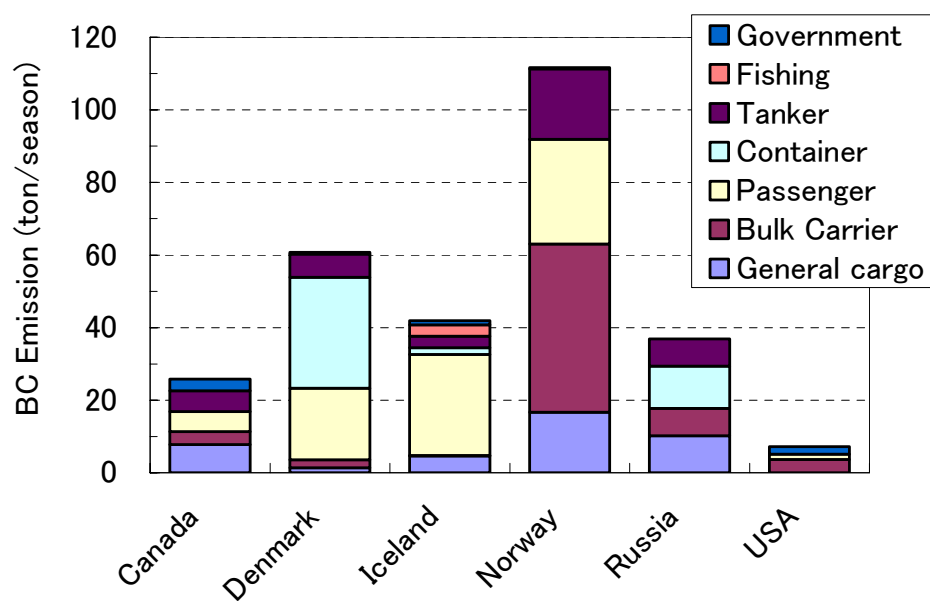


図 3.3-4 北極海航路を対象とした船舶からのブラックカーボン排出量の国別集計結果

3.3.5 他の排出量データとの比較

(1) 排出係数の比較

2012年10月に開催されたBLG17（ばら積み液体・気体小委員会；Sub-Committee on Bulk Liquids and Gases）において、ロンドンに拠点を置くIMarEST（Institute of Marine Engineering, Science and Technology）は表 3.3-1に示すブラックカーボンの排出係数を報告した（BLG 17/INF.2）。同排出係数は、船舶を対象としたブラックカーボンの排出係数に係る文献をレビューし、算出されたものである。

ここでは、(i) 表 3.1-2で示した本事業における排出係数、(ii) 表 3.3-1中に示したCentral EstimateにおけるAt seaのHFOでの排出係数（IMarEST）、(iii) 表 3.1-1で紹介したCORINAIR（CORe INventory AIR emissions）による排出係数：1.1（kg-PM/ton-Fuel）、といった3つの排出係数から排出量を算出し、それぞれの結果を比較した。

なお、燃料消費量当たりの排出係数をベースとした推計では、表 3.2-2に示した船種・船型別の燃料消費率（SFC）を適用した。また、IMarESTの排出係数にはFishing及びGovernmentが含まれていないため、ここでは便宜上、Passenger Boatと同じ排出係数を両者に適用した。

表 3.3-1 IMarEST が BLG17 において報告したブラックカーボンの排出係数 (kg-BC/ton-Fuel) (BLG 17/INF.2 の Table2 を抜粋)

	Central Estimate				High Estimate (95% CI)				Low Estimate (95% CI)			
	At sea		In port		At sea		In port		At sea		In port	
	HFO	MDO	HFO	MDO	HFO	MDO	HFO	MDO	HFO	MDO	HFO	MDO
Tanker	0.38	0.228	0.95	0.57	0.44	0.31	2.18	1.53	0.32	0.16	0.49	0.24
Container	0.8	0.48	2	1.2	0.96	0.67	4.82	3.37	0.64	0.32	0.95	0.48
Cargo carriers	0.4	0.24	1	0.6	0.56	0.39	2.82	1.97	0.24	0.12	0.35	0.18
Bulk carriers	0.38	0.228	0.95	0.57	0.53	0.37	2.64	1.85	0.23	0.12	0.35	0.17
Tugboats		0.97		2.425		1.08		5.38		0.86		1.30
Passenger Boat	0.36	0.216	0.9	0.54	0.46	0.32	2.31	1.62	0.26	0.13	0.39	0.19

図 3.3-5に、各排出係数より算出した粒子成分の排出量を示す。先述の通り、本事業では「Ash+EC+OM」をブラックカーボンと見なして排出量を算出した。IMarESTの排出係数は「ブラックカーボンを対象とした排出係数（kg-BC/ton-Fuel）」となっているが、本事業の算出結果と比較すれば全ての船種区分でECと同程度の値となった。つまり、IMarESTがブラックカーボンとして設定した排出係数は、本事業におけるECのみを指し示しているものと考えられ、本事業でブラックカーボンと定義した「Ash+EC+OM」とは異なったものであると考える。

CORINAIRの排出係数（1.1 kg-PM/ton-Fuel）は、3.1説でも議論したとおり、Hot filter法で定量されたものと推定されるため、本事業の排出係数と同様に「Ash+EC+OM」の排出係数になっているものと考えられる。その排出量は、全ての船種区分で本事業の排出量より少ない値となったものの、IMarESTの排出量よりも多い結果となった。

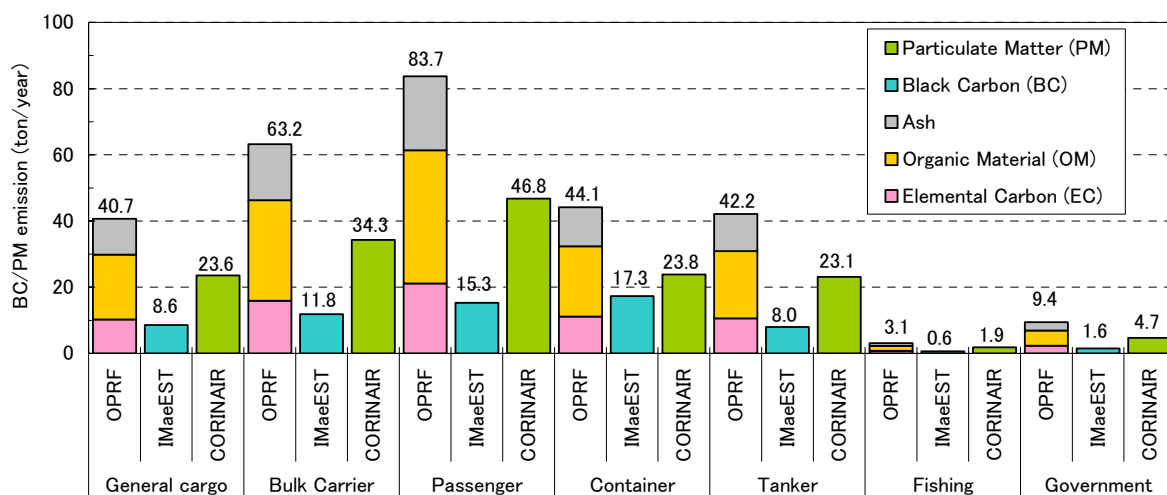


図 3.3-5 本事業 (図中 OPRF) の排出係数 (g/kWh) 、IMaeEST の排出係数 (kg-BC/ton-Fuel) 、CORINAIR の排出係数 (1.1 kg-PM/ton-Fuel)によって算出された粒子成分排出量の比較

以上、3つの排出係数を比較すれば、本事業でブラックカーボンを「Ash+EC+OM」と定義した係数が最も大きく、つまりは最も安全側の排出インベントリを作成したということになる。

(2) ARCTAS 排出量データとの比較

表 3.3-2は、本事業及びARCTASで整備されたブラックカーボン排出量を、緯度帯毎に積算した結果を示したものである。なお、排出量の積算は北緯66度以北とし、本事業では活動量の収集を行っていないバルト海を含めない範囲とした。

表 3.3-2 北極点から各緯度帯までの各排出量 (Gg/year) と船舶起源の割合

Emission Sources		Accumulated area (distance from North Pole [km])			
		90°N-80°N (about 1100km)	90°N-75°N (about 1650km)	90°N-70°N (about 2200km)	90°N-66°N (about 2290km)
Ships	(OPRF)	0 (0%) (-)	0.009 (4.8%) (90.0%)	0.119 (64.0%) (67.2%)	0.186 (100%) (5.7%)
	(ARCTAS)	0.001 (1.2%) (100%)	0.008 (9.5%) (88.9%)	0.039 (46.4%) (40.2%)	0.084 (100%) (2.6%)
Anthrophogenic (ARCTAS)		0	0.001	0.029	1.630
Boreal forest fire (ARCTAS)		0	0	0.029	1.525
Total (Ship:OPRF)		0.000	0.010	0.177	3.341
Total (Ship:ARCTAS)		0.001	0.009	0.097	3.239

- 括弧内の青い%値は 90°N-60°N (最右端セル) の船舶起源に対する割合 [%]

- 括弧内の赤い%値は各合計に対する船舶の割合 [%]

ARCTASの排出係数は表 3.1-1に示した通り0.66 (g-BC/kg-Fuel) であった。これをSFC=185g-Fuel/kWhで換算すれば0.122 g/kWhとなる。これに対し、本事業の排出係数 (Ash+EC+OM) は0.390 g/kWhであり、本事業の排出係数はARCTASのものよりも約3.2倍大きいことになる。

推計対象年はARCTASが2008年、本事業が2004年である。「Second IMO GHG Study」では、船舶による燃料消費量の2004年から2007年への伸びは+15%と見積もられている (3.3.6 節参照)。これを2004年から2008年に対する船舶活動量の伸びと仮定して表 3.3-2で示した本事業の推計値を補正した場合、北緯70度以北では137 ton/yearとなる。ARCTASによる排出量が39 ton/yearであり、本事業の排出量が3.5倍大きい結果となる。

他方、北緯66度以北では本事業は214 ton/year (2008年に補正した値)、ARCTASは84ton/yearとなり、本事業の排出量が2.5倍大きい結果となる。

3.3.6 排出量の経年変化及び将来予測

ここでは、「Second IMO GHG Study」で報告された1990～2007年、並びに2020年における燃料消費量の推計値を船舶活動量の変動と想定し、本事業で推計した2004年におけるブラックカーボン排出量に各年の変化率を乗じることで2000～2007年及び2020年を対象としたブラックカーボン排出量の推計を行った。その結果を図 3.3-6に示す。

なお、「Second IMO GHG Study」には2020年における燃料消費量の値が提供されていなかったため、CO排出量及びその排出係数から逆算した。

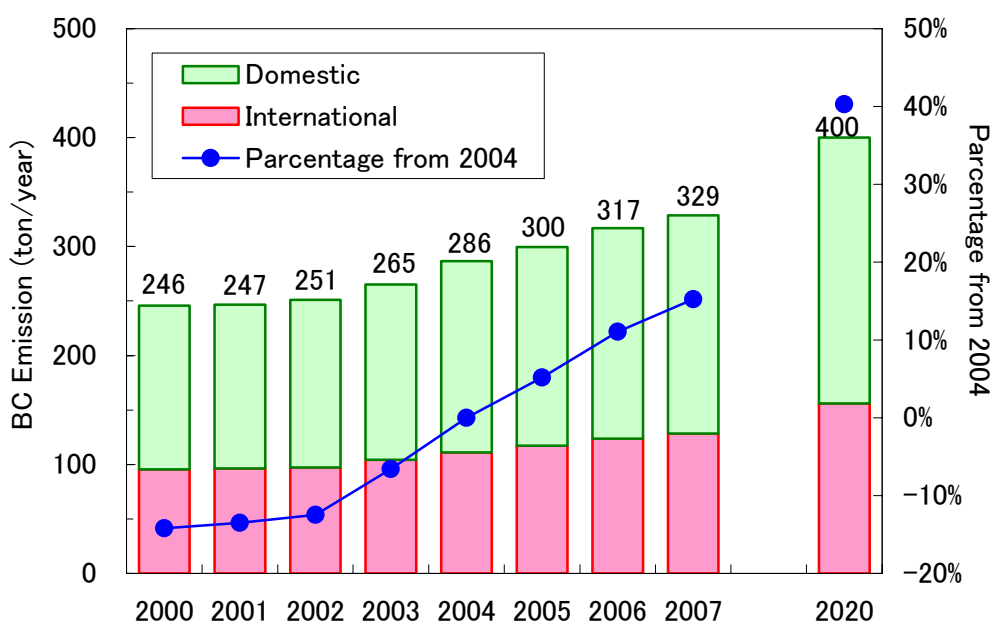


図 3.3-6 船舶起源ブラックカーボン排出量の経年変化及び将来予測

4 北極圏におけるブラックカーボン輸送シミュレーションモデルの構築

ブラックカーボンによる北極圏の局地気象・気候変動に対する影響評価を行うためには、その大気中濃度や沈着量、またそれらに基づいたブラックカーボンの光吸収量などを評価・解析する必要があり、排出源データだけでなく、排出源データを入力値としたブラックカーボンの輸送シミュレーション、また輸送シミュレーションの結果を入力値とした気候影響シミュレーション（大気放射シミュレーション）を行うことが必要不可欠となる。しかしながら、北極圏を対象としたブラックカーボンの輸送シミュレーションやその大気放射シミュレーションの実施例は限られており、北極圏での局地気象・気候変動に対する影響評価に対して、標準化されたモデルは整備されていないのが現状である。そこで、本年度事業においては、北極圏におけるブラックカーボンによる局地気象・気候の影響評価に適用するモデルの整備を行うことを主目的の一つとし、3次元化学輸送モデル WRF-Chem 及び大気放射モデル Rstar-Mstrn を利用して、ブラックカーボンの輸送シミュレーションモデル・大気放射シミュレーションモデルの構築を行った。

本年度の解析対象期間は、北極圏でのブラックカーボンを含む大気エアロゾル観測が比較的高頻度で実施された 2008 年の 1 年間と設定した。WRF-Chem の計算領域は、北緯 82 度、東経 112.5 度を中心とした北極圏全域および北半球中緯度域を含むポーラステレオ座標系で表現される領域（水平解像度: 60km）と設定した。陸域人為起源および船舶起源のブラックカーボン排出量には ARCTAS 集中観測事業において作成された排出源データを、バイオマス燃焼起源のブラックカーボン排出量には GFED（Global Fire Emissions Database）のデータを使用した。Rstar-Mstrn では、WRF-Chem で計算された気象（気温、気圧）、地勢（反射率、土壌水分量）、濃度（気体、エアロゾル成分）に係る 1 時間間隔の情報を入力データとして計算を行った。

計算結果の妥当性を検証するため、モデルにより計算されたブラックカーボンの濃度、気象場（風向、風速、気温、湿度）および放射強制力を、航空機観測データ、地上観測データ、先行研究における計算結果と比較した。ブラックカーボンの濃度については、バイオマス燃焼起源のブラックカーボン排出量データを月平均値で与えているため、森林火災による高濃度イベントが再現できない場合が散見されたが、この点を除けば、計算されたブラックカーボン濃度の高濃度域の水平分布は、先行研究における計算結果と大差なく、観測値との比較でも概ね季節変動をとらえていると判断された。気象場については、夏季の気温・湿度は観測値をよく再現していたが、風速は 1 年を通して観測値と比べ過大であった。全体として、極夜が起こる高緯度地域の冬季の気象場の再現性が悪く、今後課題を残した。放射強制力については、対象年が異なることから直接的な比較はできないものの、全体として、放射強制力の計算結果は、先行研究における各地域の計算結果と比較して、概ね一致していると考えられる。

4.1 シミュレーションモデルの構築

ブラックカーボンによる北極圏の局地気象・気候への影響として、本事業では、以下の2過程を考慮することとした。

- ① 大気中を浮遊しているブラックカーボンが太陽光を吸収することで大気を加熱する過程
- ② 雪氷面に沈着したブラックカーボンが、雪氷面上もしくは、取り込まれた積雪層内で光を吸収し、周囲を加熱することにより、雪氷を融解し、雪氷面の反射率(地表面アルベド)を下げるフィードバック現象

これらの影響評価を行うためには、その大気中濃度や沈着量、またそれらに基づいたブラックカーボンの光吸収量などを評価・解析する必要があり、排出源データだけでなく、排出源データを入力値としたブラックカーボンの輸送シミュレーション、また輸送シミュレーションの結果を入力値とした気候影響シミュレーション(大気放射シミュレーション)を行うことが必要不可欠となる。しかしながら、北極圏を対象とした、ブラックカーボンの輸送シミュレーションやその大気放射シミュレーションの実施例は、国際的にも極めて限られており(たとえば Flanner et al. (2007), Sodemann et al. (2011))、北極圏での局地気象・気候の影響評価に対して、標準化されたモデルは整備されていないのが現状である。そこで、本年度事業においては、北極圏におけるブラックカーボンによる局地気象・気候の影響評価に適用するモデルの整備を行うことを主目的の一つと設定し、ブラックカーボンの輸送シミュレーションモデル・大気放射シミュレーションモデルの構築を行うこととした。なお過程②を扱うモデルについては、本年度ではモデルの検討のみを行い(5章参照のこと)、次年度での導入を予定しているため、本節でのモデル構築には含まれていないことに注意されたい。

本章では、構築したブラックカーボンの輸送シミュレーションモデル、大気放射シミュレーションモデルの概要、シミュレーションの計算実行に係る入力データ及び設定条件についてまとめた。

Flanner, M. G., C. S. Zender, J. T. Randerson, and P. J. Rasch (2007), Present - day climate forcing and response from black carbon in snow, *J. Geophys. Res.*, 112, D11202, doi:10.1029/2006JD008003.

Sodemann, H. et al., (2011), Episodes of cross-polar transport in the Arctic troposphere during July 2008 as seen from models, satellite, and aircraft observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 3631–3651, doi:10.5194/acp-11-3631-2011 2011.

4.1.1 領域化学輸送モデル:WRF-Chem について

ブラックカーボンの大気中の動態をシミュレートする化学輸送モデルには、米国大気研究センター (NCAR: The National Center for Atmospheric Research) 及び米国大気海洋庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) が開発を主導する WRF-Chem (The Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry) を使用した。WRF-Chem とは、実用的な天気予報とそれに関連する研究のために開発された、3次元メソスケール気象モデル (WRF) に大気中の汚染物質の化学輸送計算が組み込まれた次世代の3次元化学輸送モデルである。

WRF-Chemでは大気中の雲や雨粒などの成長(雲・降水過程)、地表付近の乱流の発達(境界層過程)、日射などによる熱の移動(大気放射過程)、地表面(陸面)の状態による大気の変化(陸面過程)など様々な気象変化を支配する物理過程だけでなく、風や乱流による輸送、光化学反応に代表される大気中での化学反応/変換、雲粒・雨滴の取り込み、自重や乱流による大気中からの除去といった汚染物質の大気中での濃度を変化させる各物理・化学過程までもを詳細に取り扱い、気象のシミュレーションとそれに伴う汚染物質の化学輸送シミュレーションを同時に実施可能なモデルとなっている。

WRF-Chemはユーザーが指定した領域のみに限定してシミュレーションを行ういわゆる‘領域’化学輸送モデルであるが、シミュレーション対象領域は数キロメートルから数千キロメートル程度と従来のモデルと比較しても広いという特徴を持つ。これらの特徴のため、世界中の様々な大気汚染現象の解明に広く活用されており、本事業で対象としているような大陸間スケールの汚染物質の輸送研究などにも頻繁に採用されている。

WRF-Chemの開発は2000年に着手されており、現在(2013年2月)の最新版は2012年7月にリリースされたWRF-Chem v3.4.0である。しかし、リリース後には多くの不具合が報告される傾向にあることから、本事業ではわが国でも使用実績が蓄積され、安定した動作が確認されているWRF-Chem v3.1.1を採用した。

4.1.2 大気放射モデル: Rstar-Mstrn について

ブラックカーボンの気候影響を評価するためには、その光学的性質によって、大気中に入射する太陽放射(短波放射)エネルギー、地球・大気から放射される赤外放射(長波放射)エネルギーがどの程度変化するかを計算する必要がある。そのような放射エネルギーの計算を行うために、本事業では、東京大学大気海洋研究所が中心となって開発を進めてきた大気放射モデル Rstar-Mstrn を使用した。ここで、Rstar (Remote-sensing System for Transfer of Atmospheric Radiation) とは、衛星によるリモートセンシング技術開発のため、衛星観測データ解析用に開発された大気放射モデルである。

Rstarは、大気中での気体、雲・エアロゾルによる太陽放射(短波放射)¹及び地球放射

¹日射とも言われ、太陽から放出されている波長の短い放射エネルギー。波長4μm未満の紫外～可視～赤外領域の放射スペクトルを指す。

(長波放射)² の吸収、射出、散乱過程を考慮し、大気中での放射エネルギーの変化を計算する。扱われる波長域は、標準で、短波及び長波放射の主要な波長域を含む 0.2 μm から 200 μm までであり、この波長域をさらに小さな波長区間に分け、個々の波長区間を代表する波長の放射エネルギーの変化を計算することで大気放射シミュレーションを行っている。吸収過程では、粒子による吸収だけでなく、水蒸気や二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、フロンガス、オゾン、酸素による吸収を考慮し、散乱過程では、レイリー散乱³とミー散乱⁴を考慮して、気体と雲・エアロゾル粒子による散乱効果を取り入れている。

本事業で使用した Mstrn は様々な用途に応じて、ユーザーが自由に大気放射計算を行えるように、Rstar の大気放射計算部分を高速計算用に最適化し、大気放射計算において考慮する波長域や物質を自由に設定可能となるように改良したモデルである。

Mstrn は、シミュレーション状況に応じて、取り扱う波長域、波長区間のわけ方などの設定を容易に変更可能であり、考慮する気体・エアロゾル成分などについても、状況に応じて自由に選択可能となっている。またシミュレーションに要する時間が最小となるようにも設計されているため、いくつかの気象モデル・気候モデルでは、大気放射過程計算モジュールとして、本モデルが実装された実績を持っている。

Mstrn の開発は、1995 年に着手され、2007 年には不具合が修正された MstrnX がリリースされている。本事業においては現在 (2013 年 2 月) の最新版である MstrnX を採用した。

²地表や雲・大気から放出されている赤外放射エネルギー。波長が 4 μm 以上の赤外領域の放射スペクトルを指す。

³大気中の粒子による光の散乱過程の一つ。光の波長に対して散乱させる粒子の半径が十分に小さい場合に生じる散乱。例えば、太陽光の気体分子による散乱がレイリー散乱に分類される。

⁴大気中の粒子による光の散乱過程の一つ。光の波長と粒子の半径が同程度の場合に生じる散乱。例えば、ブラックカーボンを含むエアロゾルによる太陽光の散乱がミー散乱に分類される。

4.1.3 領域化学輸送モデルと大気放射モデルの計算設定条件および計算実行フロー

(1) 領域化学輸送モデルと大気放射モデルの計算設定条件

WRF-Chem 化学輸送シミュレーションにおける各種計算設定を表 4.1-1に示した。これら設定条件の検討に際し、国内外の先行研究、特に、本事業と同様に北極圏を対象に実施された ARCTAS 集中観測研究事業におけるシミュレーション設定を参考にした。ARCTAS 集中観測研究事業の詳細については、次節 (4.2 節) を参照されたい。

Rstar-Mstrn 大気放射シミュレーションの計算設定としては、ブラックカーボンの光吸収・光散乱を特徴づける光学的特性 (各波長に対する光散乱・吸収効率など) の設定を行った。これらの設定の検討に際し、北極圏におけるブラックカーボンの光学的特性についての先行研究を調査した結果、ブラックカーボンの光学的特性は研究者間でもばらつきがあり、その光学的特性には地域固有の特徴はみられないことがわかった。たとえば Sharma et al. (2006) や McNaughton et al. (2011) は、元素状炭素濃度観測とフィルター捕集した粒子の光学観測もしくは大気光学観測の同時測定によって推計したブラックカーボンの吸収係数の値に研究者間で広いばらつきが見られていることを報告している。McNaughton et al. (2011)は、このばらつきが、観測対象となるイベントの発生源・輸送経路が各観測間で異なること、またその結果として、光学観測の対象となる粒子の内部混合状態(たとえば、他成分との内部混合や被覆などの内部混合形態)が各観測間で異なることが原因の一部であると述べている。同様の傾向は、彼らの報告以外にも多く見られることから(たとえば、Bond and Bergstrom (2006))、本シミュレーションにおけるブラックカーボンの光学的特性については、従来の気候変動モデル (たとえば、Jacobson, M. Z. (2004) や Takemura et al. (2005)) において標準的に使用されている Deepak and Gerbers (1983) 及び World Meteorological Organization (1986)の値を使用するように設定した。なお、ブラックカーボンと同様に、他のエアロゾル成分の光学的特性についても、Deepak and Gerbers (1983) 及び World Meteorological Organization (1986)の値を利用して、大気放射シミュレーションを行うように設定している。

Sharma, S. et al: Variations and sources of the equivalent black carbon in the high Arctic revealed by long-term observations at Alert and Barrow: 1989–2003, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 111(D14), 1–15, D14208, doi:10.1029/2005JD006581, 2006.

McNaughton, C. S. et al: Absorbing aerosol in the troposphere of the Western Arctic during the 2008 ARCTAS/ARCPAC airborne field campaigns, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 7561–7582,doi:10.5194/acp-11-7561-2011, 2011.

Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *Journal of Geophysical Research*, 110, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.

Jacobson, M. Z. (2004), Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity, *J. Geophys. Res.*, 109, D21201, doi:10.1029/2004JD004945.

Bond, T. C., and R. W. Bergstrom (2006), Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review, *Aerosol Sci. Technol.*, 40, 27–67, doi:10.1080/02786820500421521.Brandt, R. E., and S. G. Warren (1993), Solar heating rates and temperature

A. Deepak and H. E. Gerbers, eds., “Report of the experts’ meeting on aerosols and their climatic effects,” WCP-55 ~World Climate Research Program, Geneva, 1983.

World Meteorological Organization, “A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation,” WCP-112 ~World Climate Research Program, CAS, Radiation Commission of IAMAP, Boulder, Colo., 1986.

表 4.1-1 WRF-Chem 化学輸送シミュレーションの計算設定条件

モデル	WRF-Chem Ver. 3.1.1
投影法	ポーラーステレオ座標
計算領域中心 標準緯度	東経 112.5 度, 北緯 82 度 標準緯度: 北緯 75 度
水平格子数(解像度)	246×246 (60km)
鉛直層	27 層 (地表から上空約 16km まで), 最下層の層厚: 約 20m
境界(初期)条件	NCEP/NCAR-FNL (気象) NOAA 氷床積雪被覆データ (地表面情報) 全球化学輸送モデル MOZART (汚染物質の濃度)
積雲対流モデル (積雲の発達・減衰、それに伴う対 流による上昇・下降気流など)	Grell 3D モデル
雲微物理モデル (雲粒・雨粒、雪などの成長)	WSM5 モデル
短波・長波放射モデル (太陽・地 球放射によるエネルギーの変化)	Goddard/RRTM モデル
大気境界層モデル (大気境界層内 の乱流の生成・衰退など)	YUS モデル
接地境界層モデル(地表面による大 気下端への影響(熱の輸送など))	MM5 Similarity
陸面モデル (陸面の状態、陸面の大気への影響)	Noah LSM モデル*
海面温度更新	あり
排出源データ	人為(陸域・船舶)起源: ARCTAS バイオマス燃焼起源: GFED3
気相反応モデル (気相化学反応)	RADM2 モデル
エアロゾルモデル (移流・拡散、乾性沈着、重力沈降、 衝突による粒子径の成長など)	MADE/SORGAM モデル
排出高度の取り扱い	人為起源: 最下層(約 20m) 森林火災起源: 境界層高さ
ネスティング	本シミュレーションでは実施していない。

(2) 計算領域設定

本シミュレーションにおける計算領域を図 4.1-1に示す。本シミュレーションの計算領域は、北緯 82 度、東経 112.5 度を中心としたポーラステレオ座標系で表現される領域と設定した。鉛直方向には、全ての領域に対して対流圏を含む上空約 16km までを 27 層で分割するように設定している。ここで、ポーラステレオ座標系を用いたのは、高緯度帯での投影による歪みを少なくするためである。また図 4.1-1に示すように、シミュレーション領域を中緯度まで含めた理由は、北極圏で観測されたエアロゾル層の多くが、主に、中・高緯度帯における植物燃焼由来の汚染物質や、ヨーロッパや北米、東アジア域を含む中緯度の都市域や工業地帯から長距離輸送された汚染物質によって構成されているとの報告があることから (たとえば、矢吹ら,2010) 、北極圏の化学輸送シミュレーションを実施する上で、それら排出源域からの長距離輸送を無視できないと判断したためである。

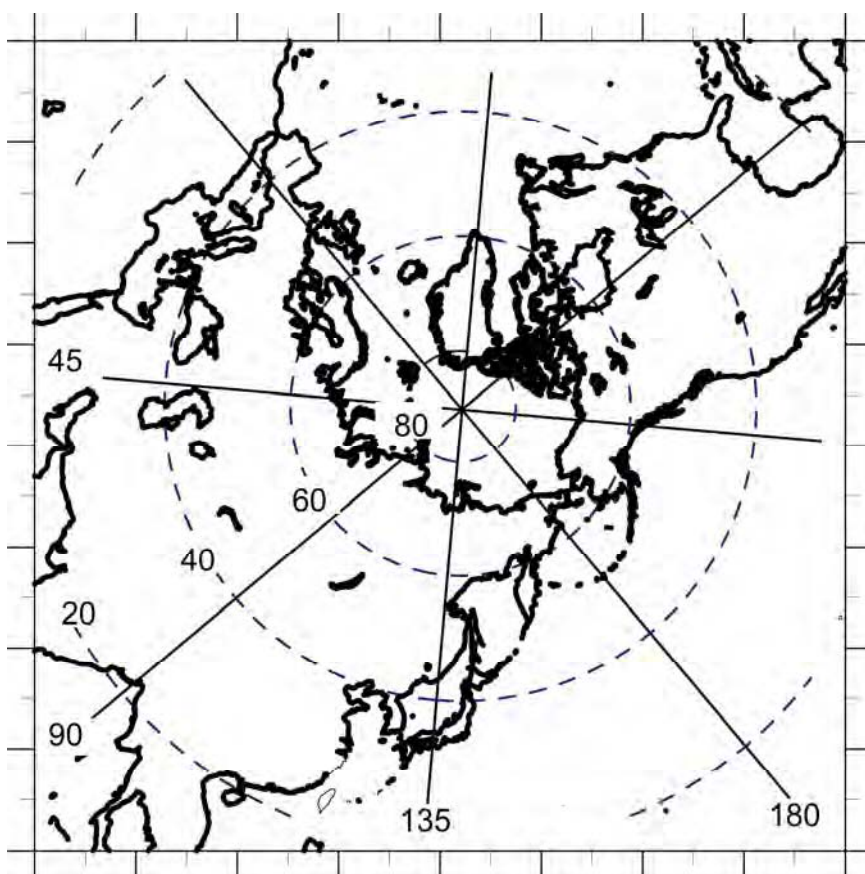


図 4.1-1 WRF-Chem 化学輸送シミュレーションの計算領域

(3) 初期・境界条件設定

WRF-Chemによるシミュレーションの実行には、入力データとして、気象・各種汚染物質濃度の初期・境界条件、また各種汚染物質の排出源データが必要となる。本事業において、気象の初期・境界条件には、米国環境予測センター (NCEP) /米国大気研究センター (NCAR) が無償で配布している空間解像度1度及び、6時間間隔の全球客観解析データを利用した。各種汚染物質濃度の初期・境界条件については、同じくNCARが提供する全球化学輸送モデル (MOZART-4) のシミュレーション結果 (空間解像度2.8度、6時間間隔) を利用している。本年度シミュレーションにおいて使用した各種汚染物質の排出源データについては、次節で述べることとする。

これら気象・汚染物質濃度の初期・境界条件に加え、本シミュレーションにおいては、地表面情報に係る入力データとして、米国大気海洋庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) が提供している衛星観測に基づいた氷床・積雪被覆率データ (空間解像度24km、1日間隔) を利用した。これは、氷床・積雪の有無による地表面反射率の差が、気象場に大きな影響を与える可能性があることから、通常モデル内で使用されているものよりも、現実の状況を反映したより空間解像度の高いデータを利用することが重要と判断したためである。図4.1-2に本シミュレーションに導入した氷床・積雪被覆率データを示した。

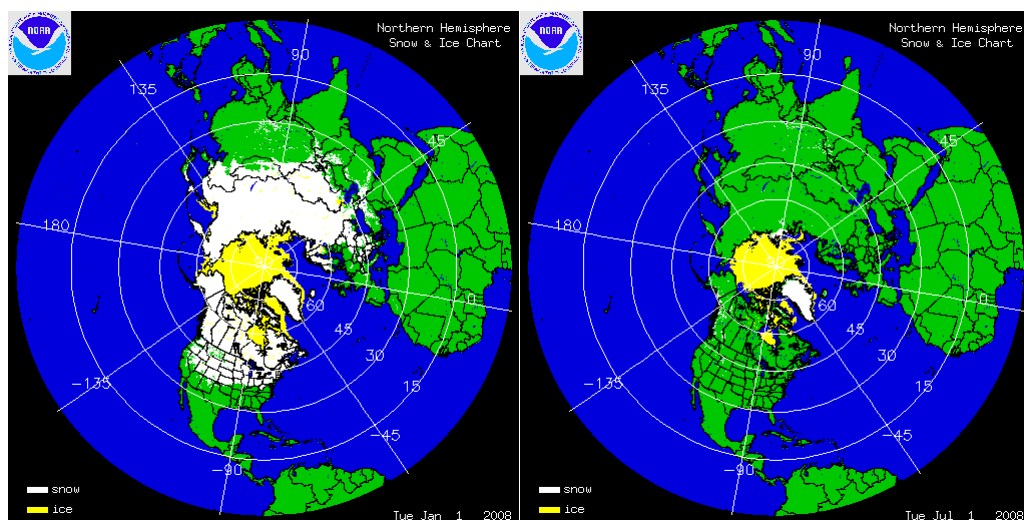


図 4.1-2 本シミュレーションに導入した氷床・積雪被覆率データ

(4) 計算実行フロー

図 4.1-3に、本年度シミュレーションの実行フローを示す。本年度シミュレーションの実行フローとしては、最初にWRF-Chemによる化学輸送シミュレーションを実施し、その後、WRF-Chemの出力結果を入力値として利用し、Rstar-Mstrnによる大気放射シミュレーションを実施することとした。

WRF-Chem で計算された気象や濃度の情報は、大気放射モデル Rstar-Mstrn の入力値として使用される。ここで、Rstar-Mstrn では、入力データとして、気象 (気温、気圧)、地勢 (反射率、土壌水分量)、濃度 (気体、エアロゾル成分) に係る情報が必要となる。本シミュレーションにおいては、気象・地勢に係る情報と、水蒸気、エアロゾル成分 (ブラックカーボン、硫酸塩、有機炭素) の濃度の情報については、WRF-Chem の出力結果 (1 時間間隔) を入力データとして使用した。また水蒸気を除く気体成分濃度 (二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、フロンガス、オゾン、酸素) については、今回の WRF-Chem シミュレーションでは扱っていないため、Rstar-Mstrn のモデル値を使用している。なお WRF-Chem の出力結果は 1 時間間隔のものを与えていることから、大気放射シミュレーションも 1 時間毎に実施している。

本年度の領域化学輸送シミュレーション及び大気放射シミュレーションにおける解析対象期間は、北極圏でのブラックカーボンを含む大気エアロゾル観測が比較的高頻度で実施された 2008 年の 1 年間と設定した。そのため、WRF-Chem によるシミュレーション実行期間は 2008 年を含む 2007 年 12 月から 2009 年 1 月までとし、モデルが安定に動作するための準備期間を前に、1 ヶ月間設けてシミュレーションを実施している。

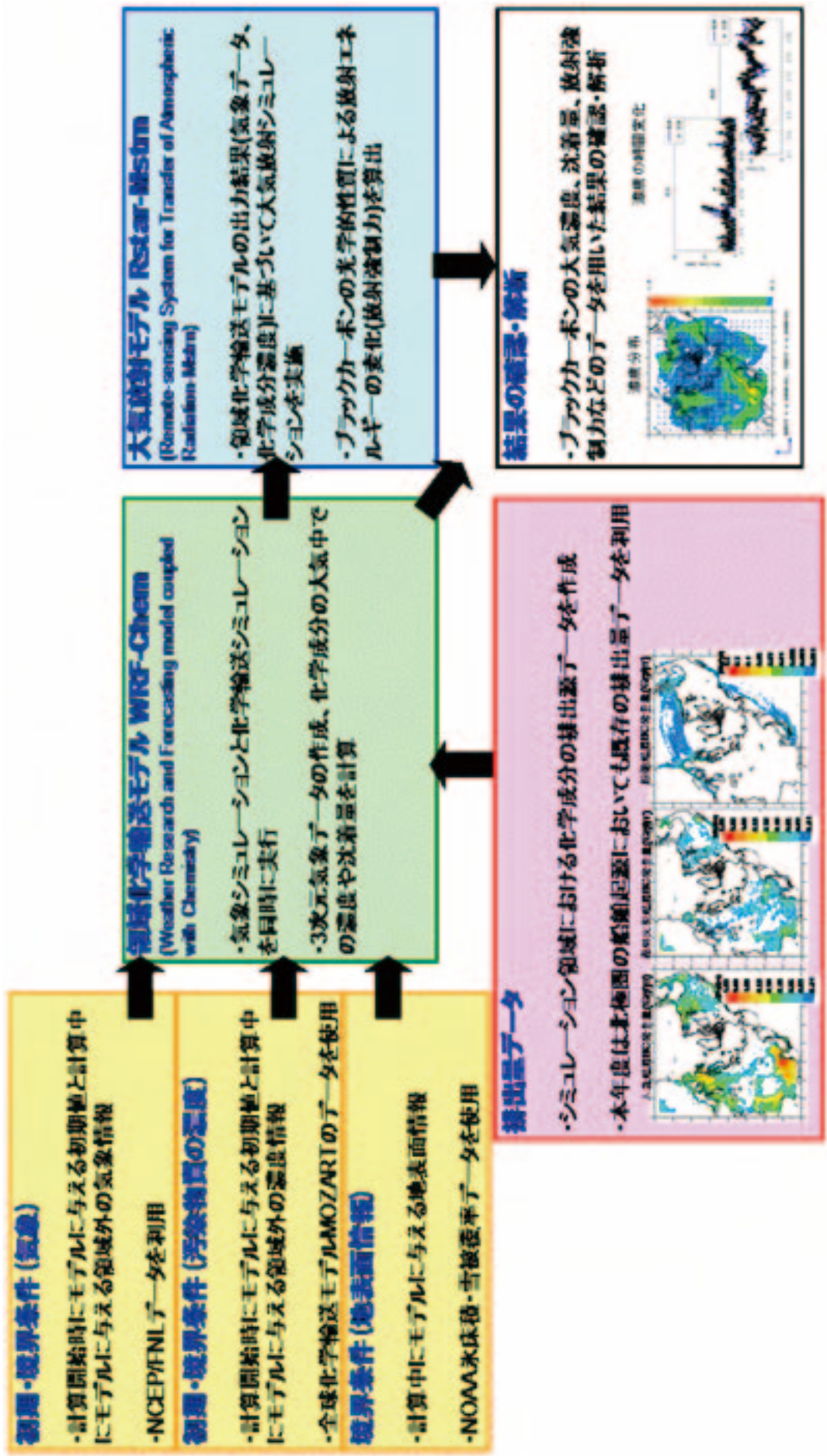


図 4.1-3 本年度シミュレーションの実行フロー

4.2 既存のブラックカーボンの陸域起源排出源データの整理

4.2.1 人為起源排出源データについて

本シミュレーション領域における陸域人為起源の排出量には、ARCTAS 集中観測事業において作成された排出源データを使用した。ここで、ARCTAS とは米国 NASA が 2008 年の春季と夏季の 2 シーズンにわたって北極圏の対流圏大気を対象に実施した集中野外観測実験である。ARCTAS では、観測を効率的に行うために、化学輸送モデルを予報モードで運用することを計画しており、そのための入力データとして、ブラックカーボンを含む 10 成分の気体・エアロゾル粒子の排出源データが作成された。その作成は、当時利用可能であった排出源データを統合することで行われ、比較的最新の知見を反映した排出源データとなっている。ブラックカーボンの排出源データは Bond et al. (2004) の全球データと Zhang et al. (2009) の東アジア域のデータから作成されたものとなっており、全球 1.0 度解像度のデータが ARCTAS 集中観測事業のホームページ (<http://www.cgrer.uiowa.edu/arctas/arctas.html>) から無償で入手可能である。本シミュレーションでは、ARCTAS 集中観測後の事後解析用として、作成された現在(2013年2月)の最新版となる ver1.2 を利用した。

図 4.2-1 に、本シミュレーション領域のモデルグリッド解像度 (60km) に変換した ARCTAS 陸域人為起源ブラックカーボンの年間排出量の水平面分布図を示す。

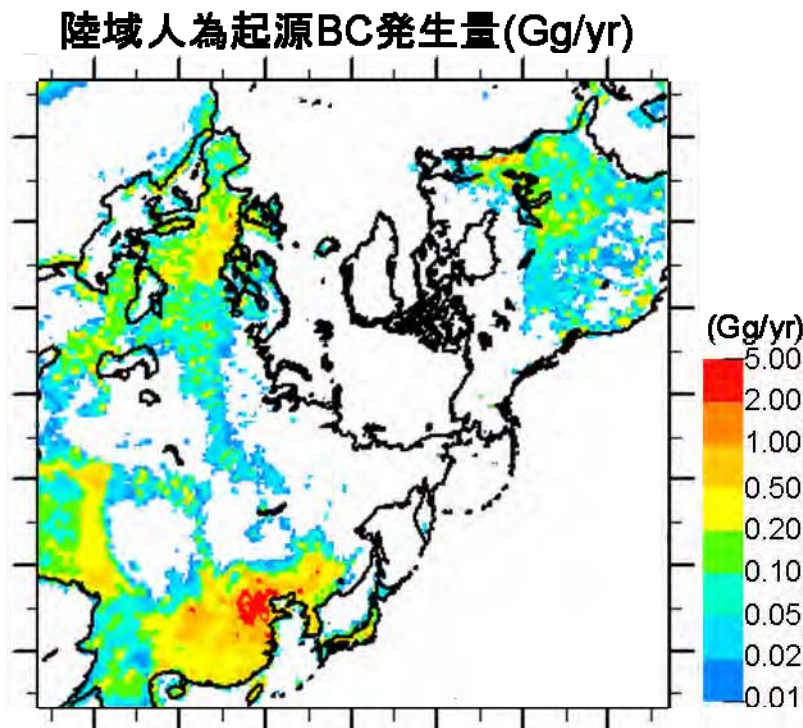


図 4.2-1 計算領域(60km 格子)における陸域人為起源ブラックカーボンの年間排出量(Gg/yr)

4.2.2 バイオマスバーニング起源排出源データについて

本シミュレーション領域におけるバイオマス燃焼起源の排出量には、GFED (Global Fire Emissions Database) のデータを利用した。GFED は、1997 年 1 月から、現在では 2011 年 12 月までにわたる全球スケールのバイオマス燃焼起源による排出量の推計を行っている排出インベントリである。GFED は、ブラックカーボンを含む 32 成分の気体・エアロゾル粒子による排出量データを全球 0.5 度解像度で提供している。GFED のバージョンによって、年、月別、日別、3 時間毎のデータが提供されているが、本シミュレーションでは、比較的、標準的に使用されている、月別の排出量データを利用した。より詳細な GFED データの記述に関しては、van der Werf et al. (2010) を参照されたい。

図 4.2-2 に、本シミュレーション領域のモデルグリッド解像度 (60km) に変換した GFED バイオマス燃焼起源ブラックカーボンの年間排出量の水平面分布図を示す。

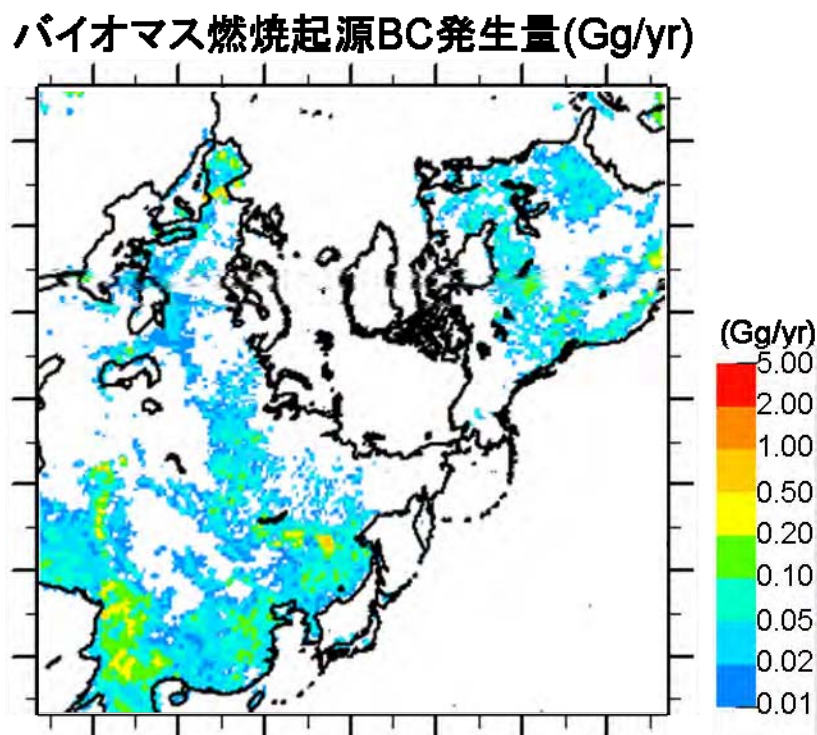


図 4.2-2 計算領域 (60km 格子) におけるバイオマス燃焼起源ブラックカーボンの年間排出量 (Gg/yr)

4.2.3 船舶起源排出源データについて

本シミュレーション領域における船舶起源の排出量は、ARCTAS 排出源データを利用した。なお、北極圏における船舶起源ブラックカーボン排出源データにおいては、本年度事業において作成作業が進められている（本報告書 3 章）。しかし、本年度シミュレーションに、同データを適用することは時間的に困難であったことから、北極圏内の排出源データについても、本年度シミュレーションにおいては、ARCTAS のブラックカーボン船舶起源排出源データを利用することとした。

図 4.2-3に、本シミュレーション領域のモデルグリッド解像度（60km）に変換した ARCTAS 船舶起源ブラックカーボンの年間排出量の水平面分布図を示す。

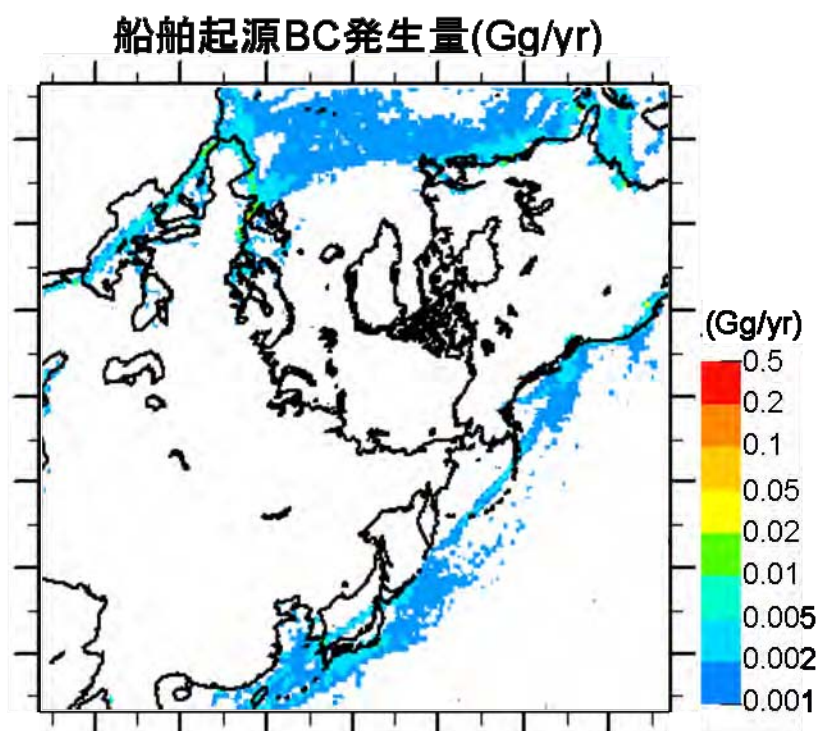


図 4.2-3 計算領域（60km 格子）における船舶起源ブラックカーボンの年間排出量（Gg/yr）

4.3 ブラックカーボン輸送モデル、大気放射モデルの検証

4.3.1 ARCTAS 集中観測事業におけるシミュレーション結果との比較

(1) ARCTAS 集中観測事業について

ARCTAS (Arctic Research of the Composition of Troposphere from Aircraft and Satellites) は、以下の理解を目的として、NASA によって 2008 年 4 月 (ARCTAS-A) および 6~7 月 (ARCTAS-B) に、アラスカおよびカナダ西部で実施された航空機および衛星観測を用いた北極圏の対流圏大気の集中観測研究である。

- 1) 中緯度からの北極圏への大気汚染物質の長距離輸送
- 2) 森林火災の北極圏大気および気候への影響
- 3) エアロゾルによる北極圏の気候への影響
- 4) 北極圏におけるオゾンやエアロゾル、ハロゲン等の挙動

(2) ARCTAS におけるシミュレーションとの比較

ARCTAS では、観測計画立案のために WRF/STEM による CO, SO₂, BC 等の拡散予測計算を行っており、その結果が (<http://www.cgrer.uiowa.edu/ARCTAS/arctas-hist.html>) で公開されている。計算設定条件は表 4.3-1 の通りである。

計算の妥当性を検証するために、春季および夏季について、本事業で行った WRF-Chem の計算結果との比較を行った。比較結果の一部を図 4.3-1 および図 4.3-2 に示す。

図 4.3-2 の WRF/STEM の計算結果では、北緯 60° から 70°、東経 120° から 160° にかけての領域で、WRF-Chem の計算結果では確認できない 0.7 μg/m³ を超える高濃度域が存在する。同じ日の衛星による吸収性エアロゾル観測 (図 4.3-3) でも、同じ位置に吸収性エアロゾルの高濃度域が観測されている。これは地理的な位置から森林火災によるものと考えられる。WRF-Chem ではバイオマス燃焼起源の BC 排出量データを月別値で与えているが、WRF/STEM では日別値で与えており、この BC 排出量データの与え方の違いが森林火災による高濃度イベントの再現性の違いとなって表れていると考えられる。

WRF/STEM による計算は予測計算であり、客観解析データを境界条件として行った本計算とは気象場の計算精度が異なるため、直接的な比較はできないが、全体として、WRF-Chem の計算結果の方がやや濃度が低いものの、オーダーに大差はなく、西ヨーロッパ、北米東海岸、東アジア域において比較的高い BC 濃度が確認できる点については、両モデル間で一致している。

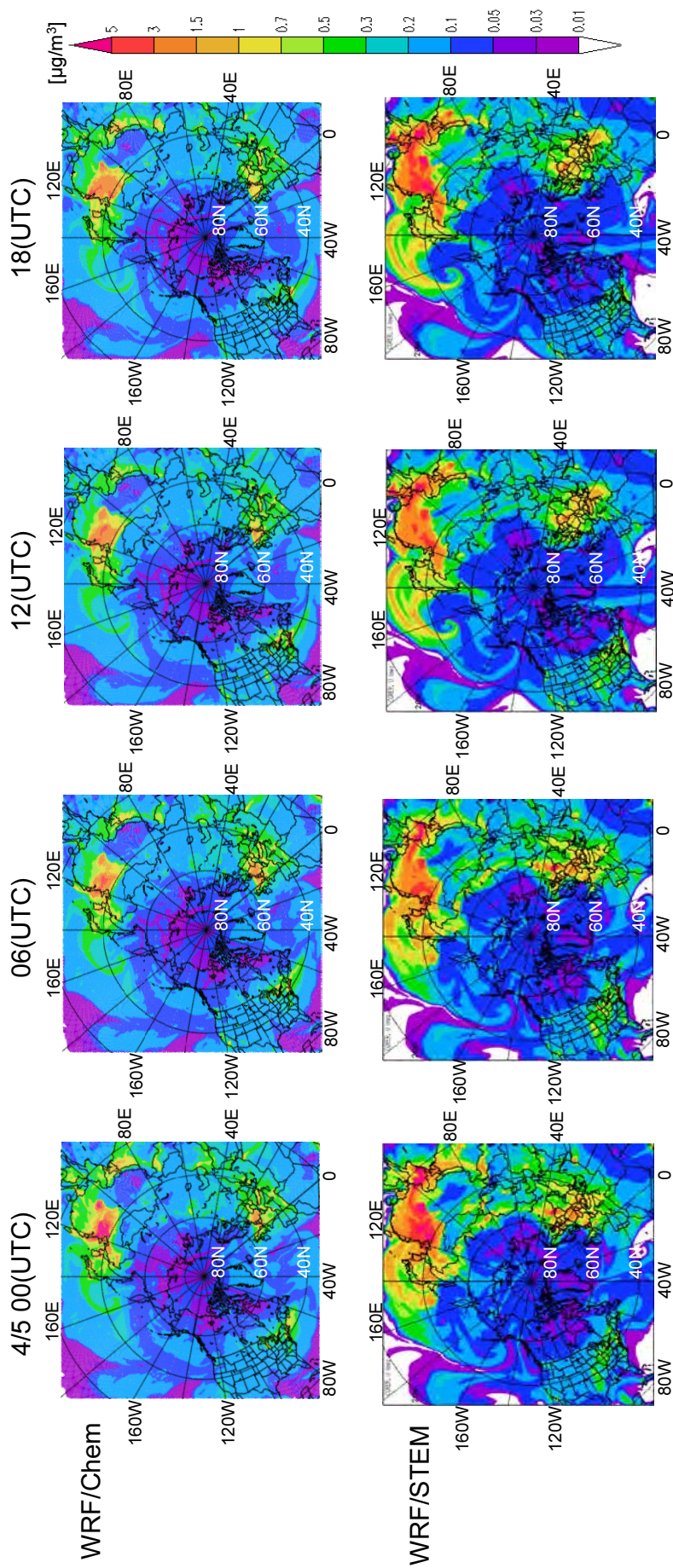


図 4.3-1 WRF-Chem および WRF/STEM 計算結果の比較 (春季)

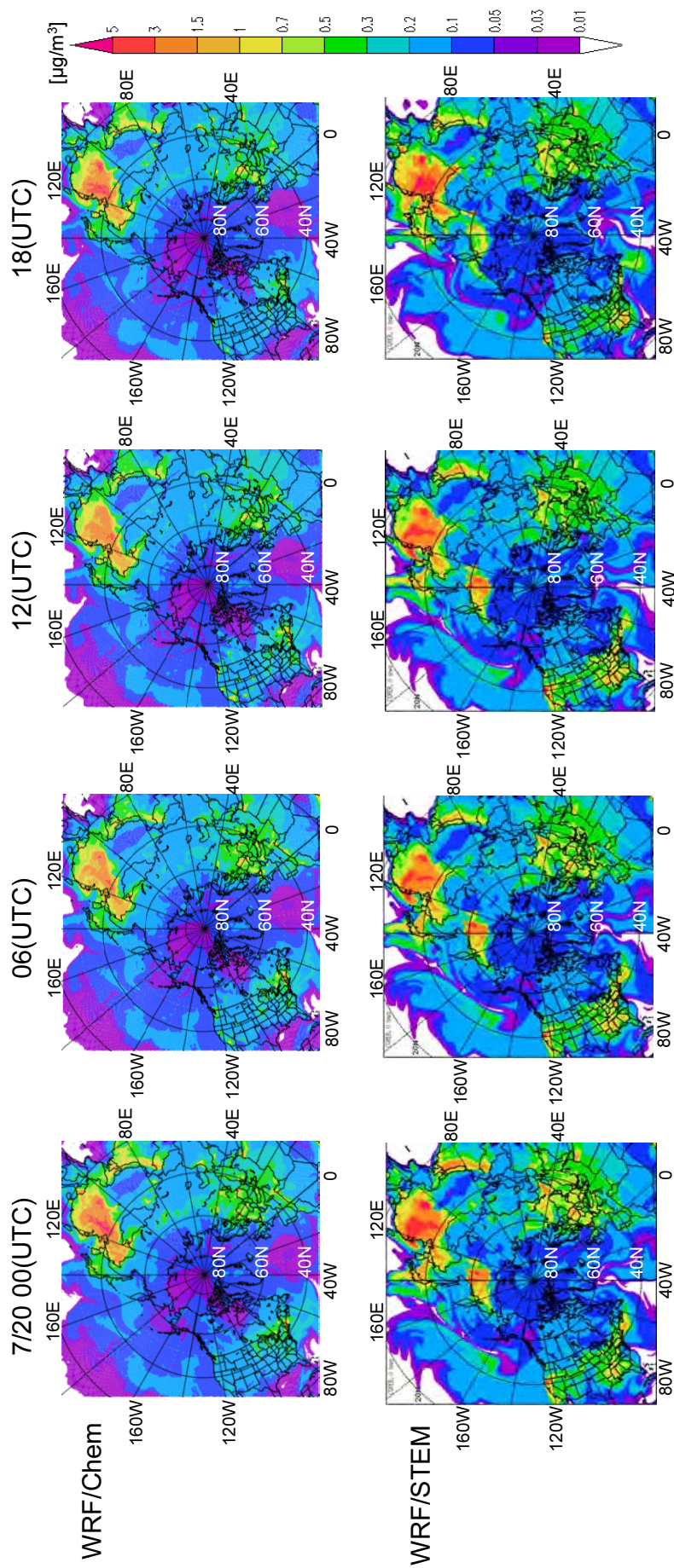


図 4.3-2 WRF-Chem および WRF/STEM 計算結果の比較 (夏季)

表 4.3-1 WRF/STEM の計算条件設定

モデル	ARCTAS WRF/STEM ⁽¹⁾
投影法	ポーラーステレオ座標
計算(投影)中心 標準緯度	非公開, 北緯90度 標準緯度: 非公開
水平格子数(解像度)	非公開 (60km)
鉛直層	30層 (WRF) 18層 (STEM)
境界条件	GFS+ one time step SST (気象) RAQMS real time (濃度)
積雲対流モデル (積雲の発達・減衰、それに伴う対流による上昇・下降気流など)	非公開
雲微物理モデル (雲粒・雨粒、雪などの成長)	WSM5モデル
短波・長波放射モデル (太陽・地球放射による熱の変動)	Goddard/RRTMモデル
大気境界層モデル (大気境界層内の乱流の生成・衰退など)	YUSモデル
接地境界層モデル (地表面による大気下端への影響(熱の輸送など))	Monin-Obukhov similiary
陸面モデル (陸面の状態、陸面の大気への影響)	Noah LSMモデル ⁽²⁾
海面温度更新	あり
気相反応モデル (気相化学反応)	SAPRC99モデル
エアロゾルモデル (移流・拡散、乾性沈着、重力沈降、 衝突による粒子径の成長など)	Four-bin aerosol モデル
排出高度の取り扱い	人為起源: 非公開 森林火災起源: RAQMS
ネスティング	なし

(1) WRFはVer.2.2.1、STEMはSTEM-2K3を使用

(2) 入力データとして米国地質調査所 (USGS; U. S. Geological Survey) の土地利用データを利用している。

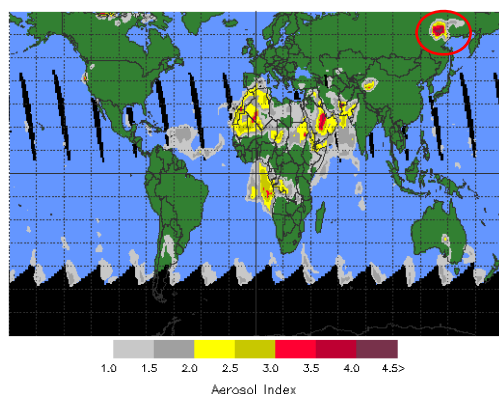


図 4.3-3 2008年7月20日の吸収性エアロゾル濃度の衛星観測の結果 (TOMS) (赤色の○で囲まれた領域が WRF/STEM で高濃度域となった領域)

4.3.2 ブラックカーボン大気中濃度の測定値および気象観測データとの比較

(1) 気象場の再現性確認

気象場の再現性確認は、地上気象観測値 (Obs) の 6 時間値および 6 時間値から計算した 1 か月平均値を、WRF-Chem の計算結果 (Cal) と比較することで行った。データは気象業務支援センターで販売されている気象庁月報 CD-ROM 収録の世界気象資料を利用した。比較する気象要素は、地上気温、地上湿度、地上風向、地上風速の 4 項目とした。比較対象とした気象観測点は、図 4.3-4 に示す 7 地点である。比較結果は図 4.3-5～図 4.3-6 (月平均値)、図 4.3-7～図 4.3-34 (時別値および風配図) にまとめた。

気温と湿度に関しては、時別値および風配図の比較の場合、冬季において観測値との間に差異が見られる。これは特に高緯度に位置する観測点 (BJORNOYA, JOKIOINEN, GULKANA/INTL.FLD.) において顕著である。ただし、図 4.3-5～図 4.3-6 に示した月平均値でみると、冬季の気温を除き、観測値およびその季節変動を概ねよく再現できている。風速については、月平均値、時別値ともに、WRF-Chem の計算結果の方が観測値よりも過大になっている。特に図 4.3-5 の BJORNOYA については、観測値よりも 2 倍以上の値となっている。これはモデルの水平解像度が 60km と高くないために、観測地点に相当する計算グリッドの土地利用が地表面粗度の小さい海域 (水域) になっており、風速の減衰が少なく計算されてしまっているためであると考えられる。

全体として、冬季の気象場の再現性が低い傾向にあった。高緯度地域では、冬季の数ヶ月にわたって日射が少ない極夜が起こるが、その影響がモデル中で表現されていない可能性が考えられる。

また中・低緯度からのブラックカーボンは比較的北極圏の大気上層に輸送される傾向にあることから (Flanner et al., 2012) 、そのような長距離輸送の検証のためにも、今後、気象場の鉛直分布などの検証も考慮すべきと考える。



図 4.3-4 比較対象気象観測地点

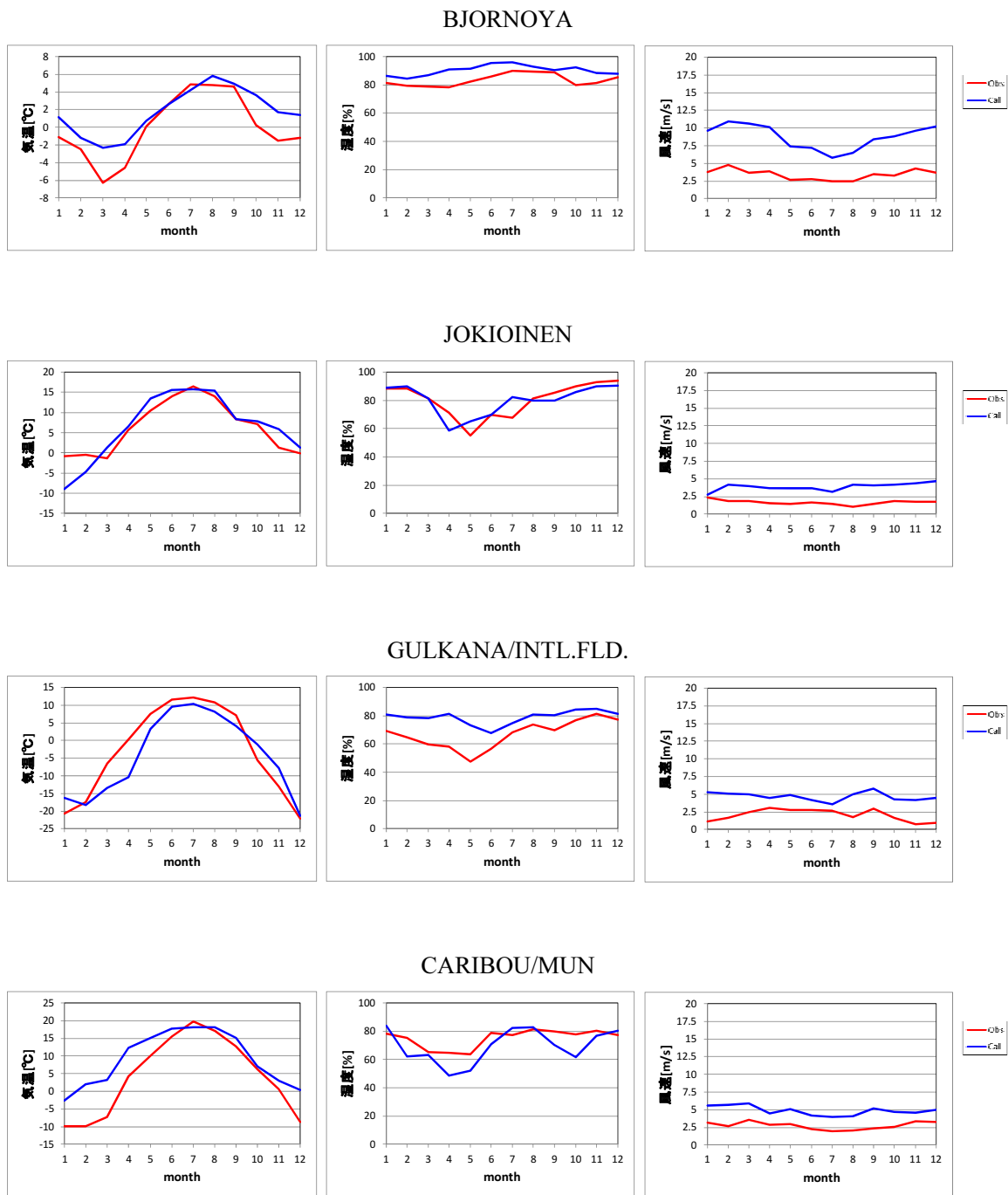
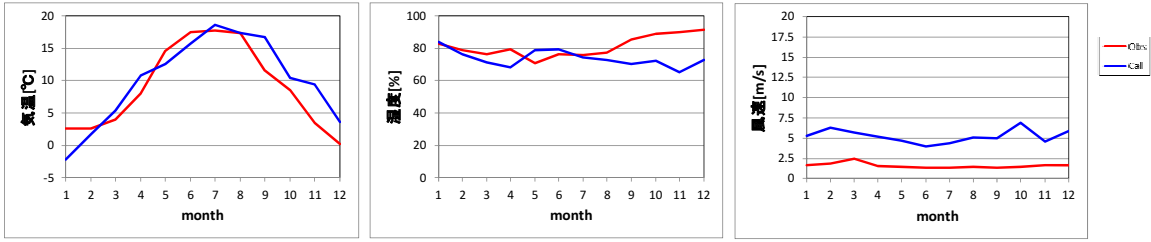
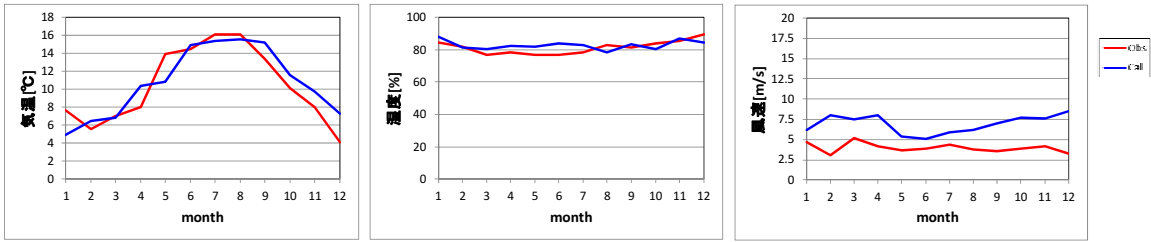


図 4.3-5 地上観測地点における気象場の比較(1) (月平均値)

AUGSBURG



YEOVILTON



SEATTLE

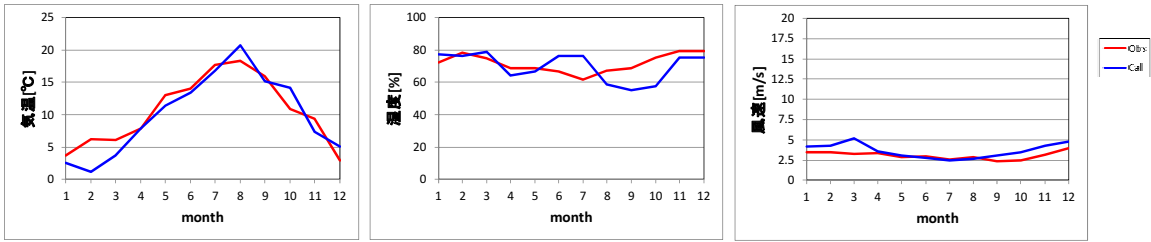


図 4.3-6 地上観測地点における気象場の比較(2) (月平均値)

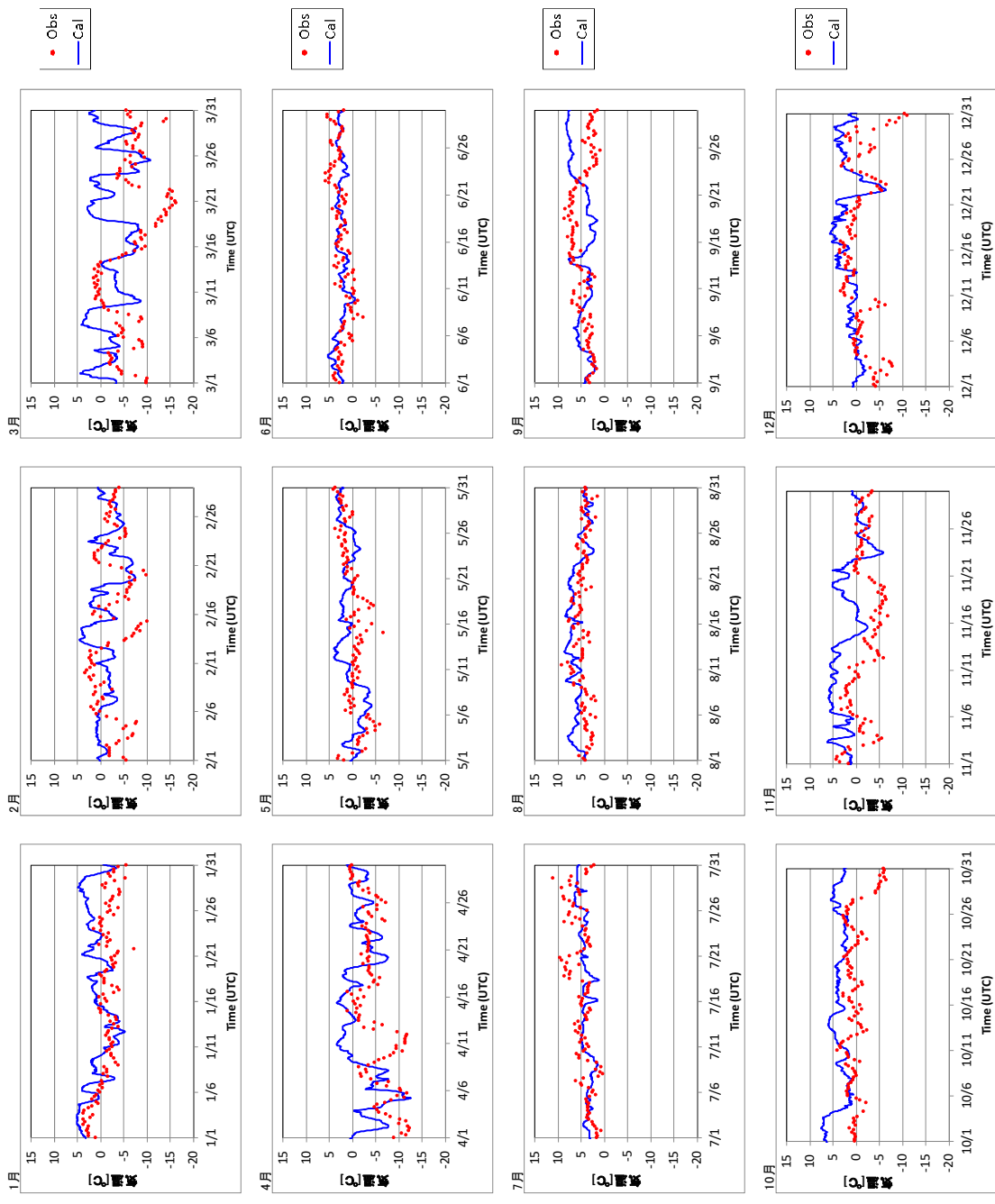


図 4.3-7 BJORNOYA における気温の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

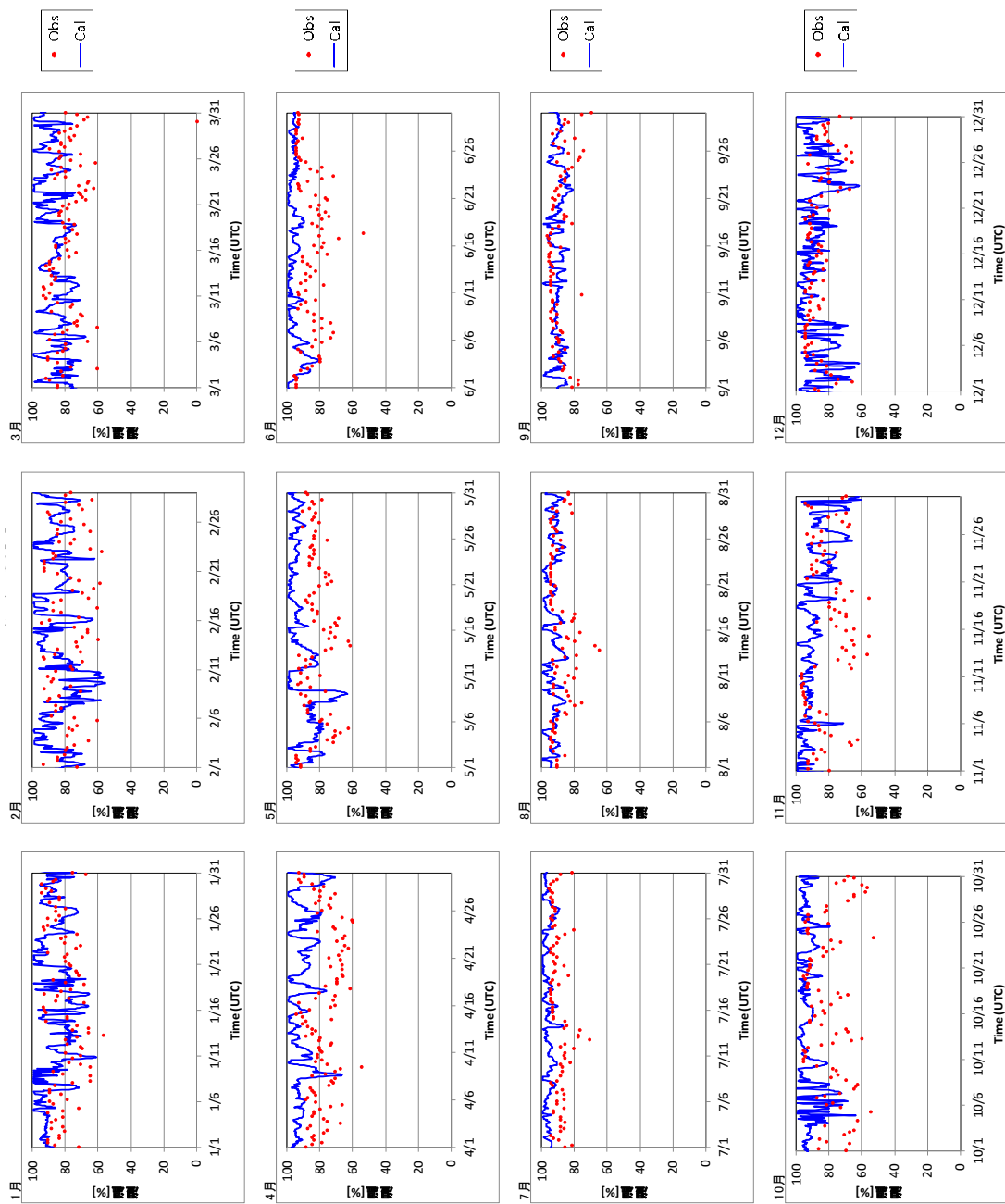


図 4.3-8 BJORNOYA における湿度の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

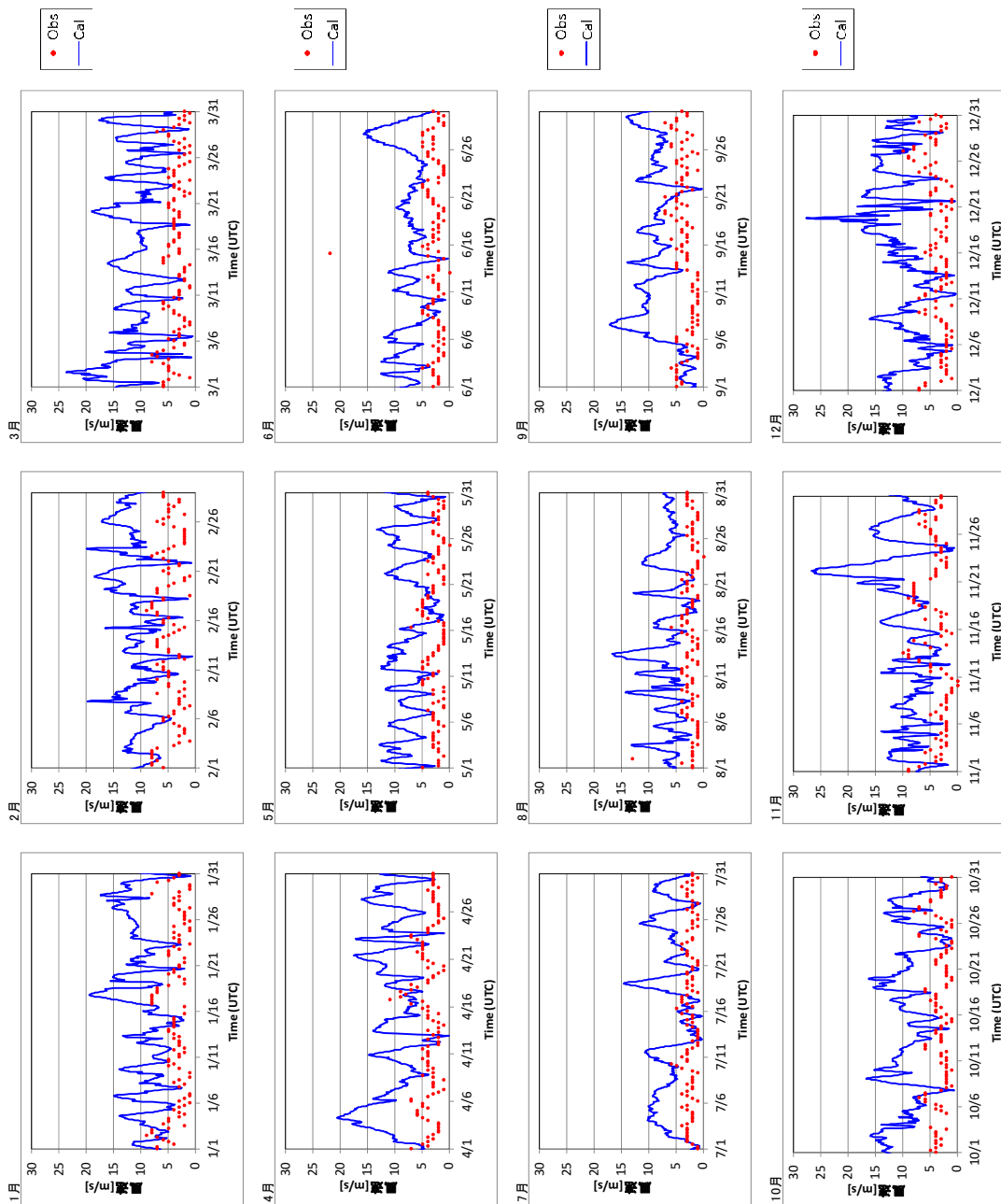


図 4.3-9 BJORNOYA における風速の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

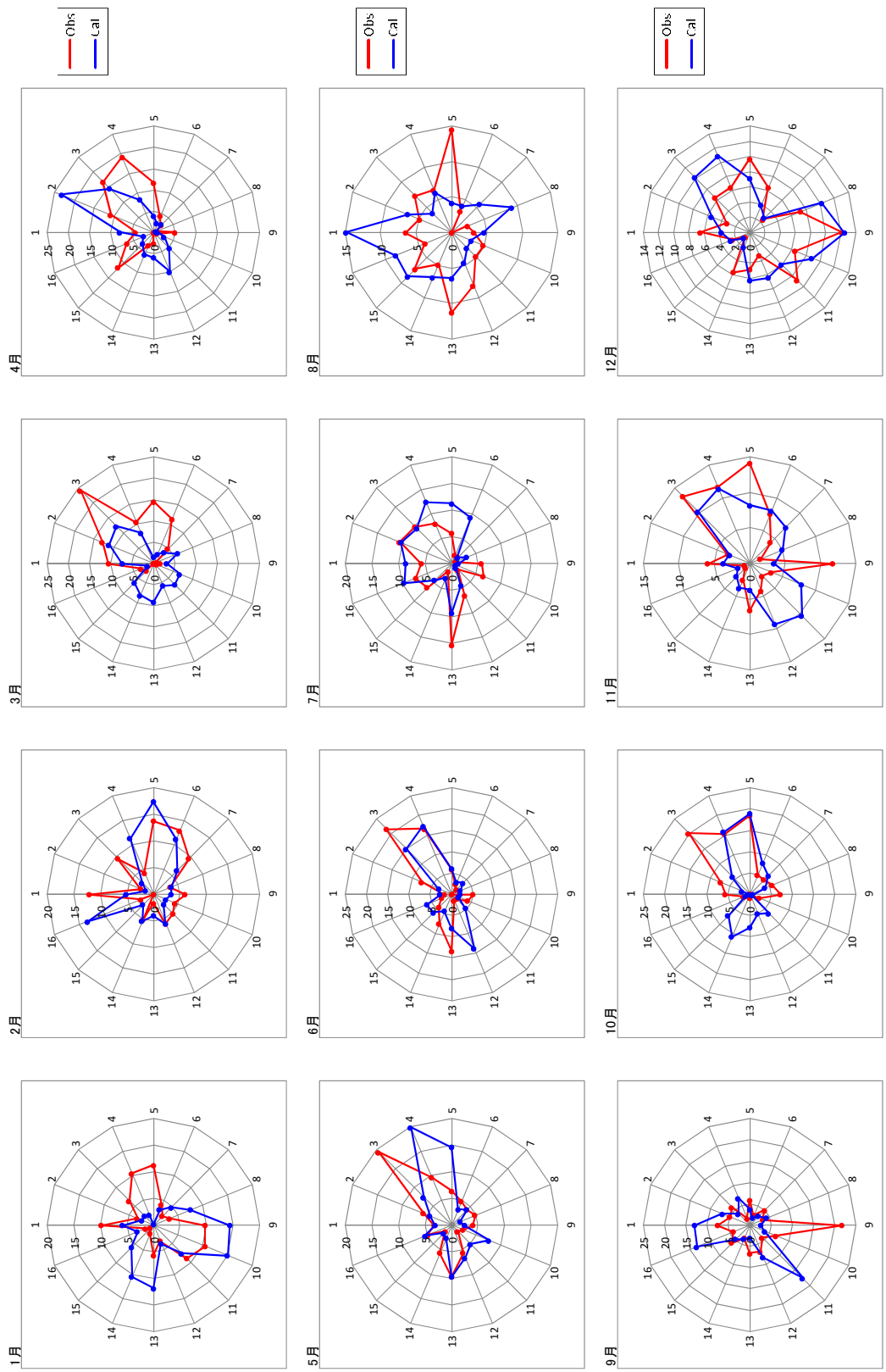


図 4.3-10 BJORNOYA における風向の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

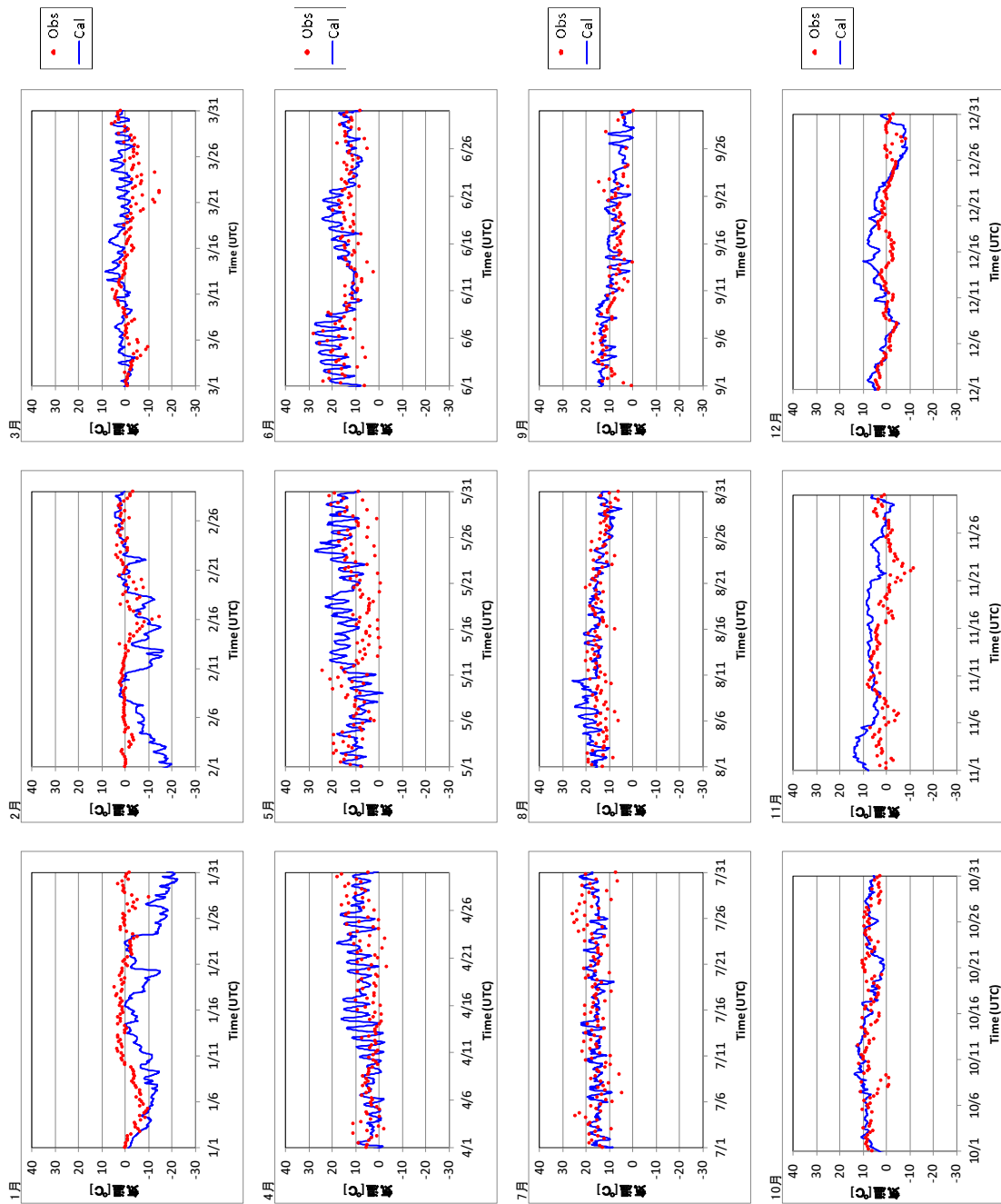


図 4.3-11 JOKIOINEN における気温の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

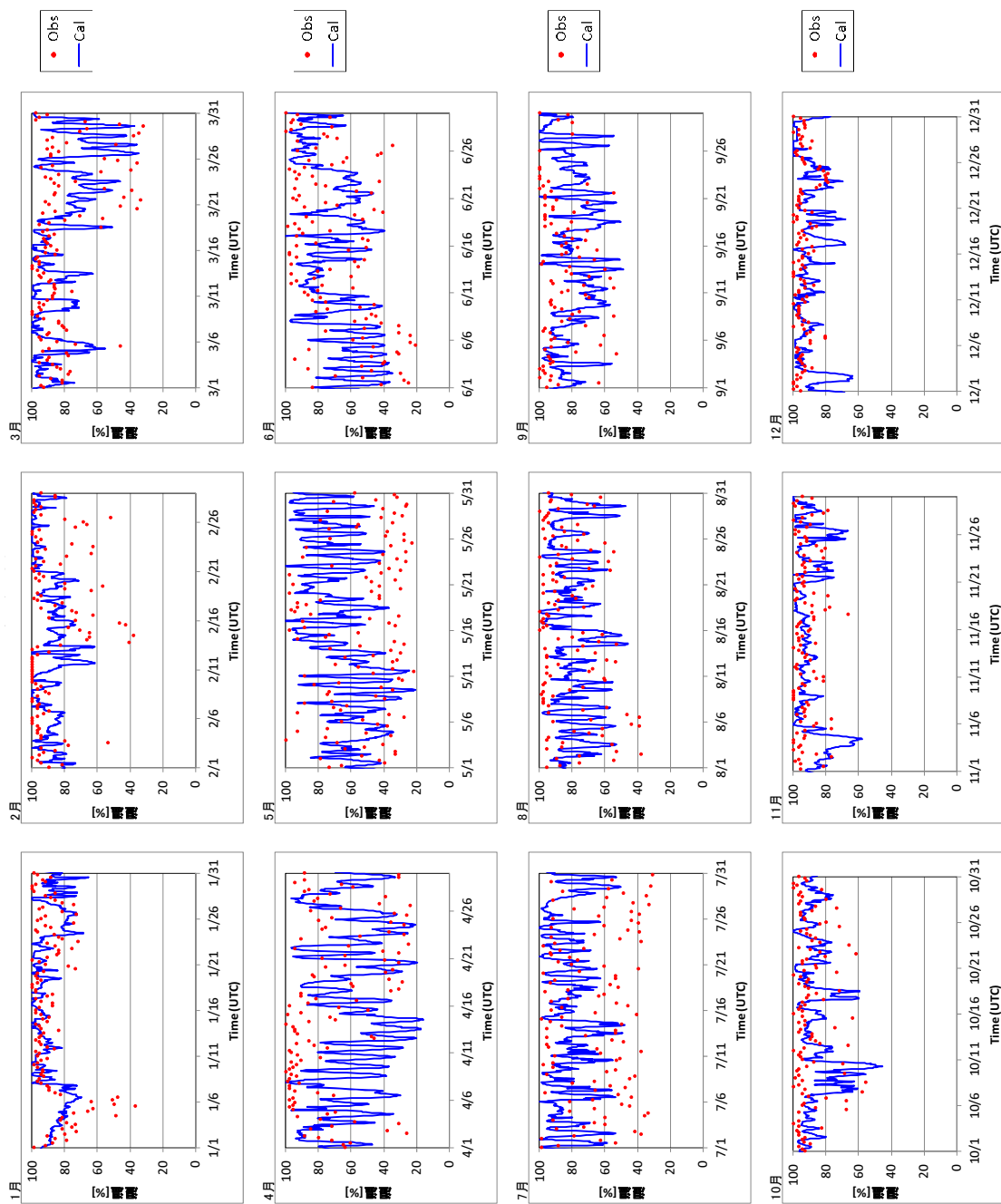


図 4.3-12 JOKIOINEN における湿度の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

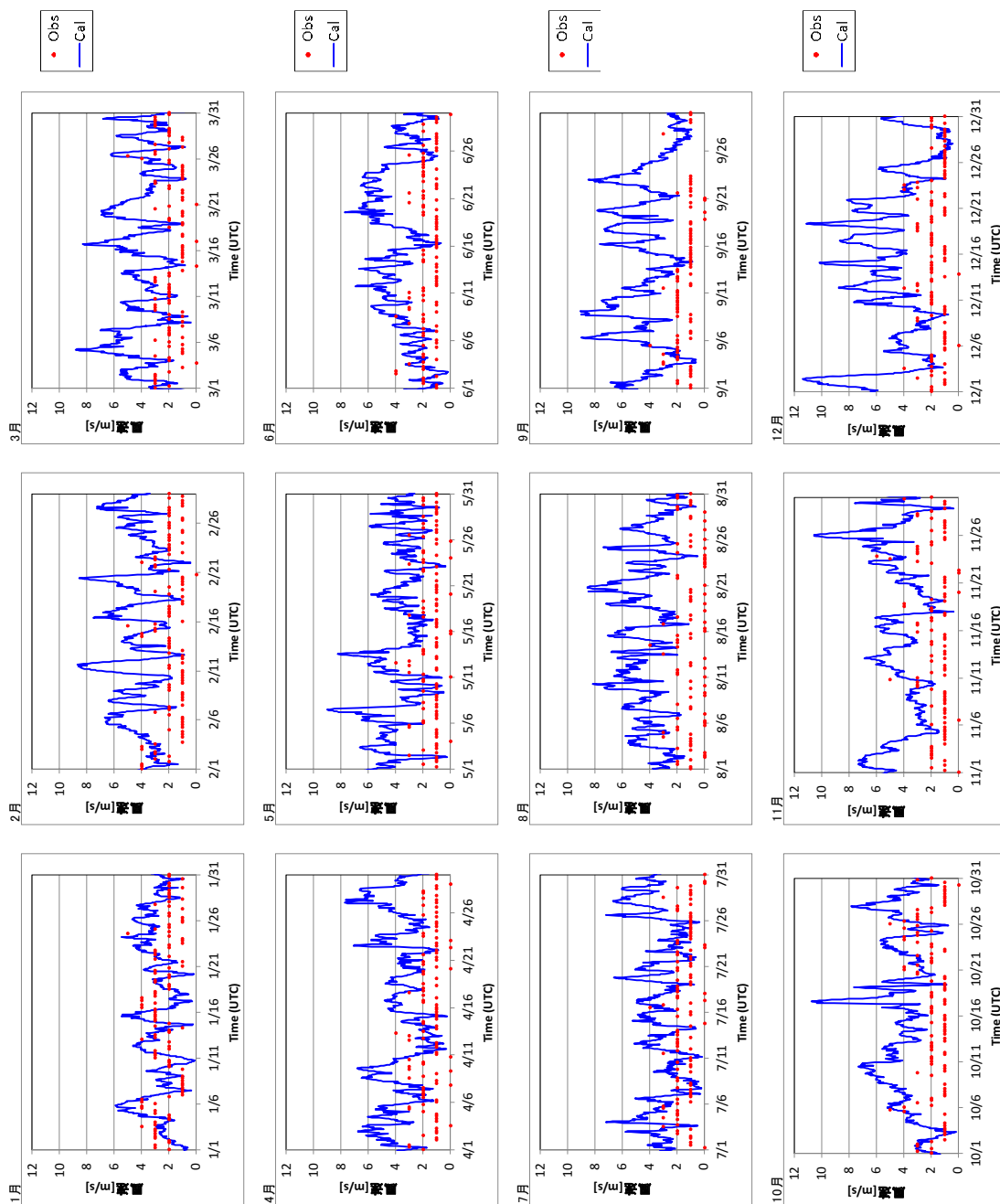


図 4.3-13 JOKIOINEN における風速の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

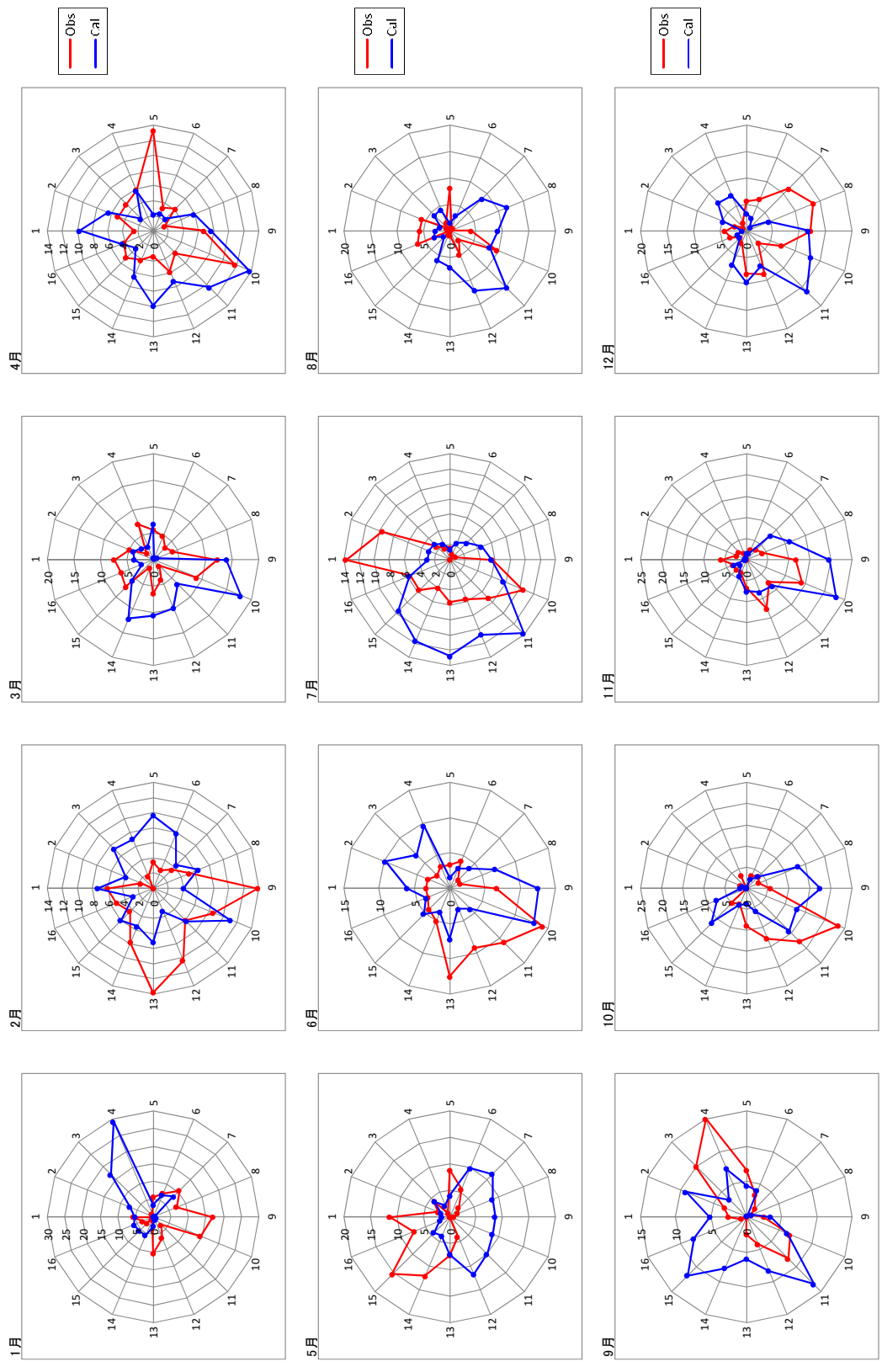


図 4.3-14 JOKIOINEN における風向の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

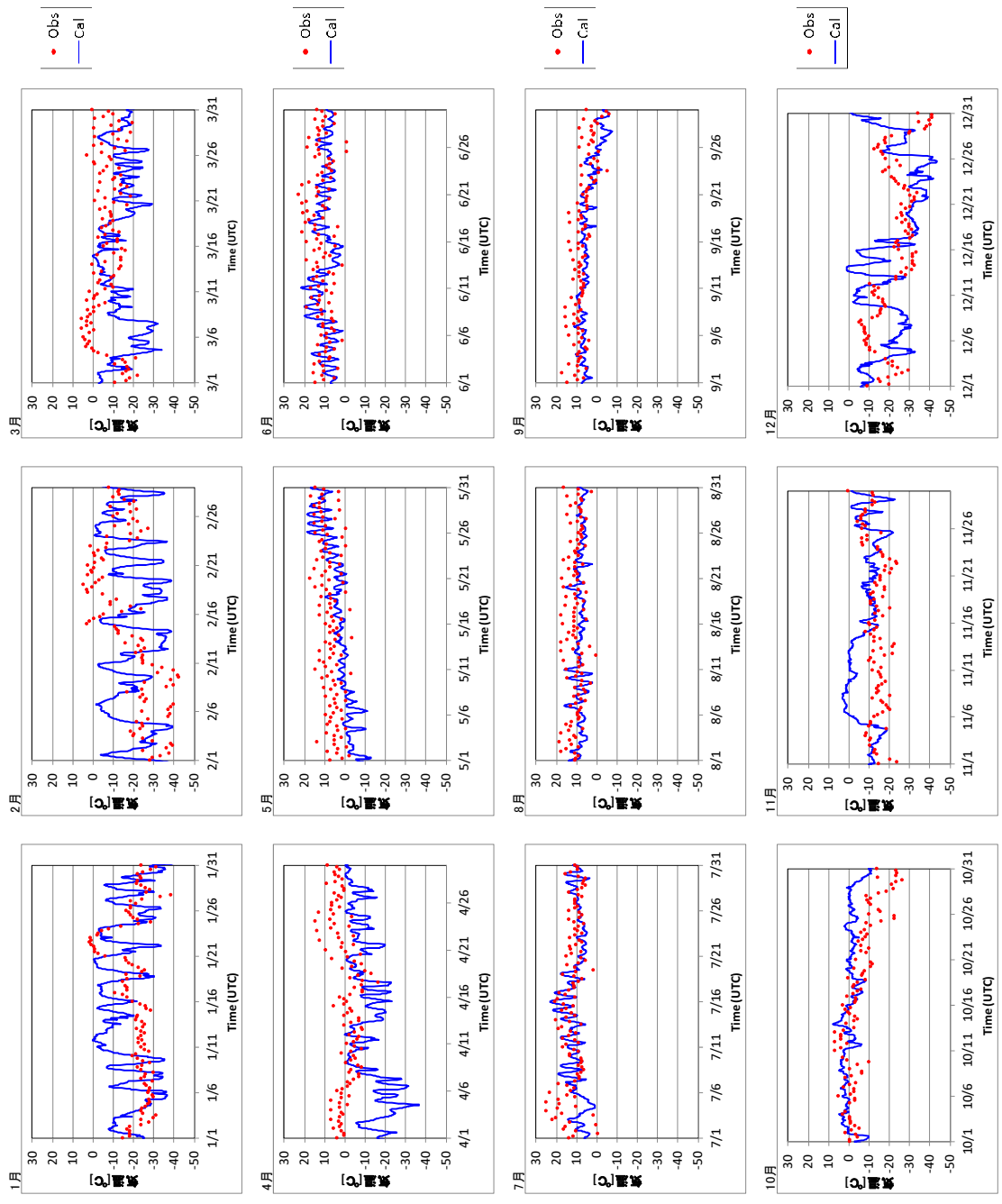


図 4.3-15 GULKANA/INTL.FLD. における気温の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

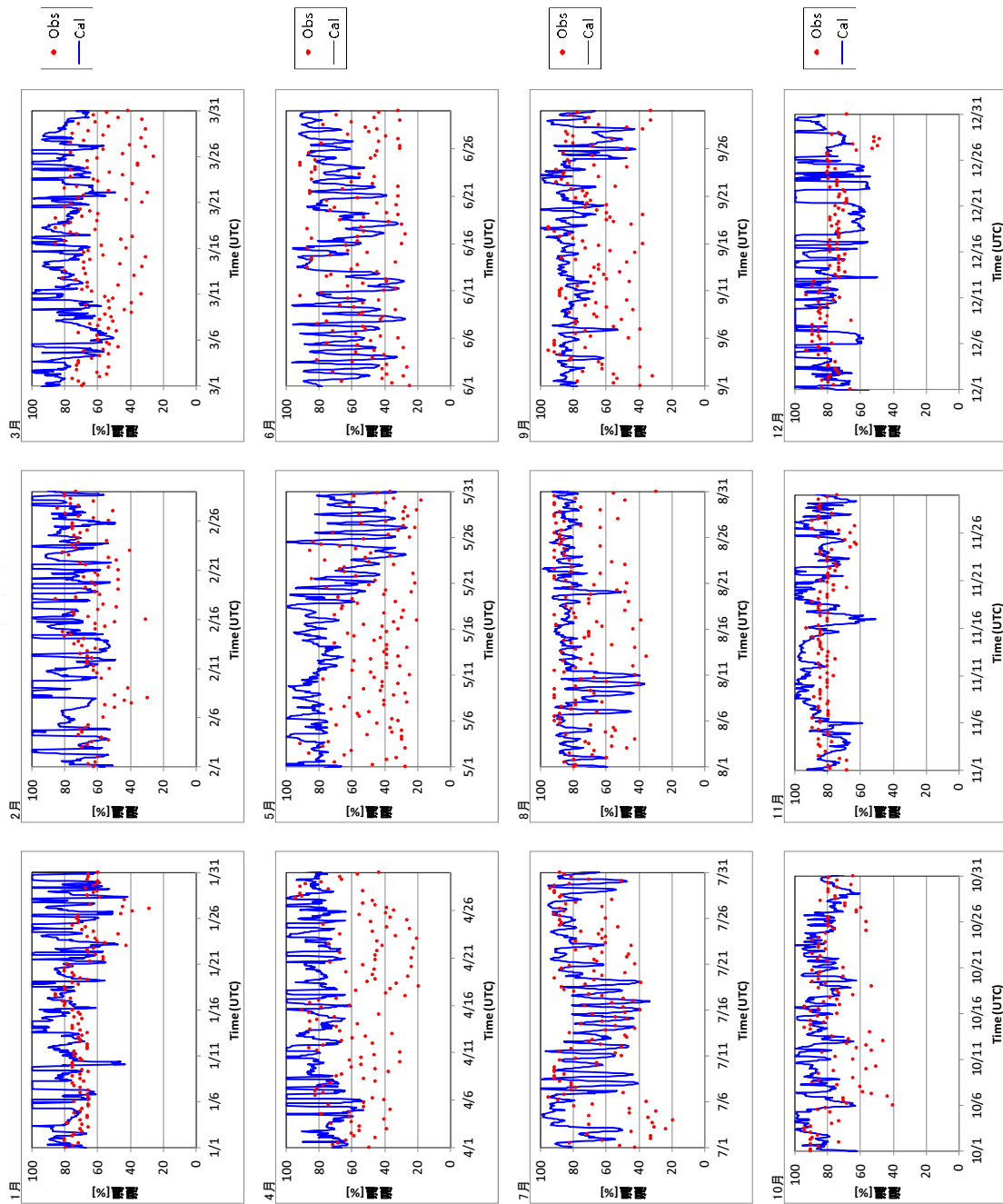


図 4.3-16 GULKANA/INTL.FLD. における湿度の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

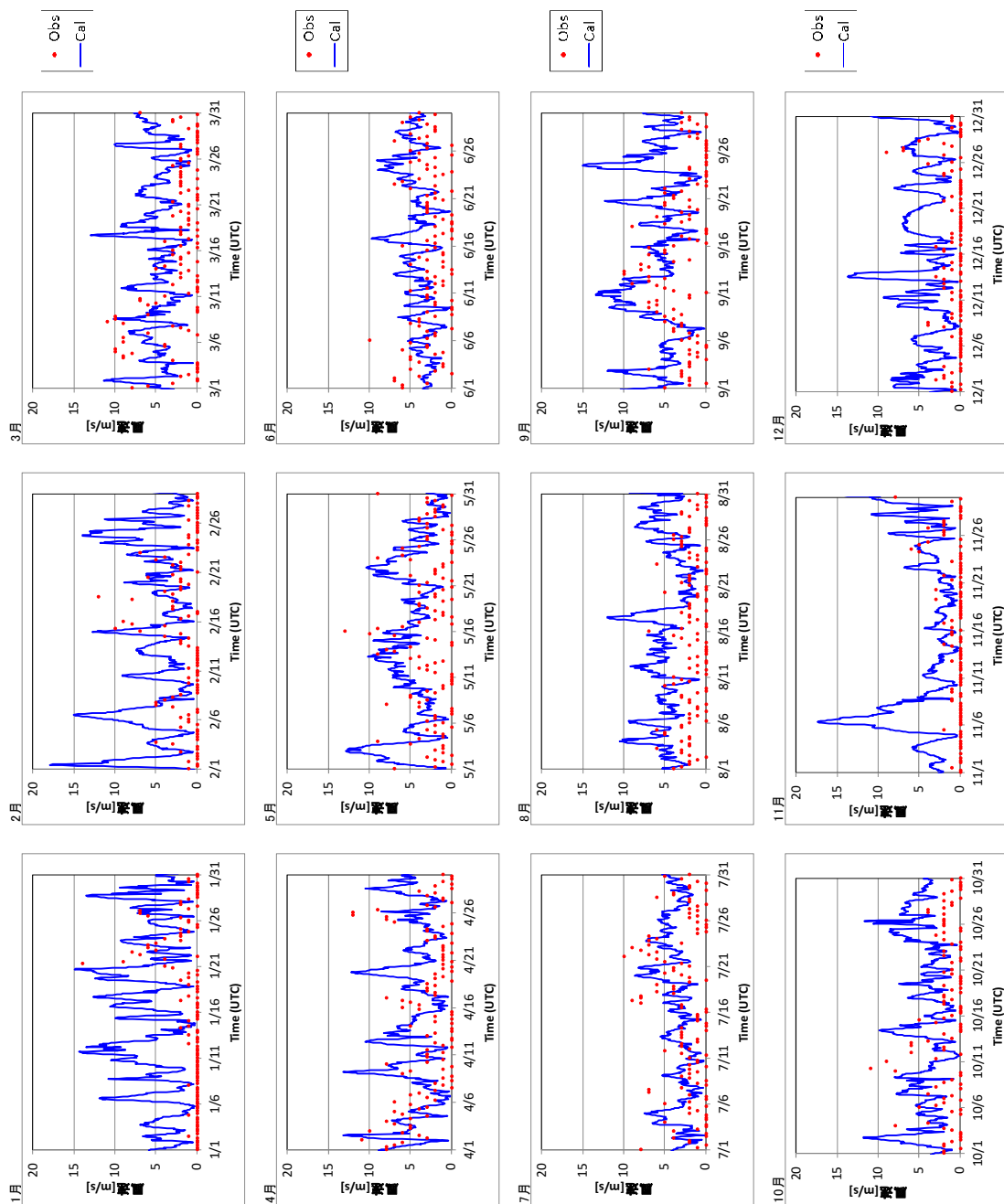


図 4.3-17 GULKANA/INTL.FLD. における風速の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

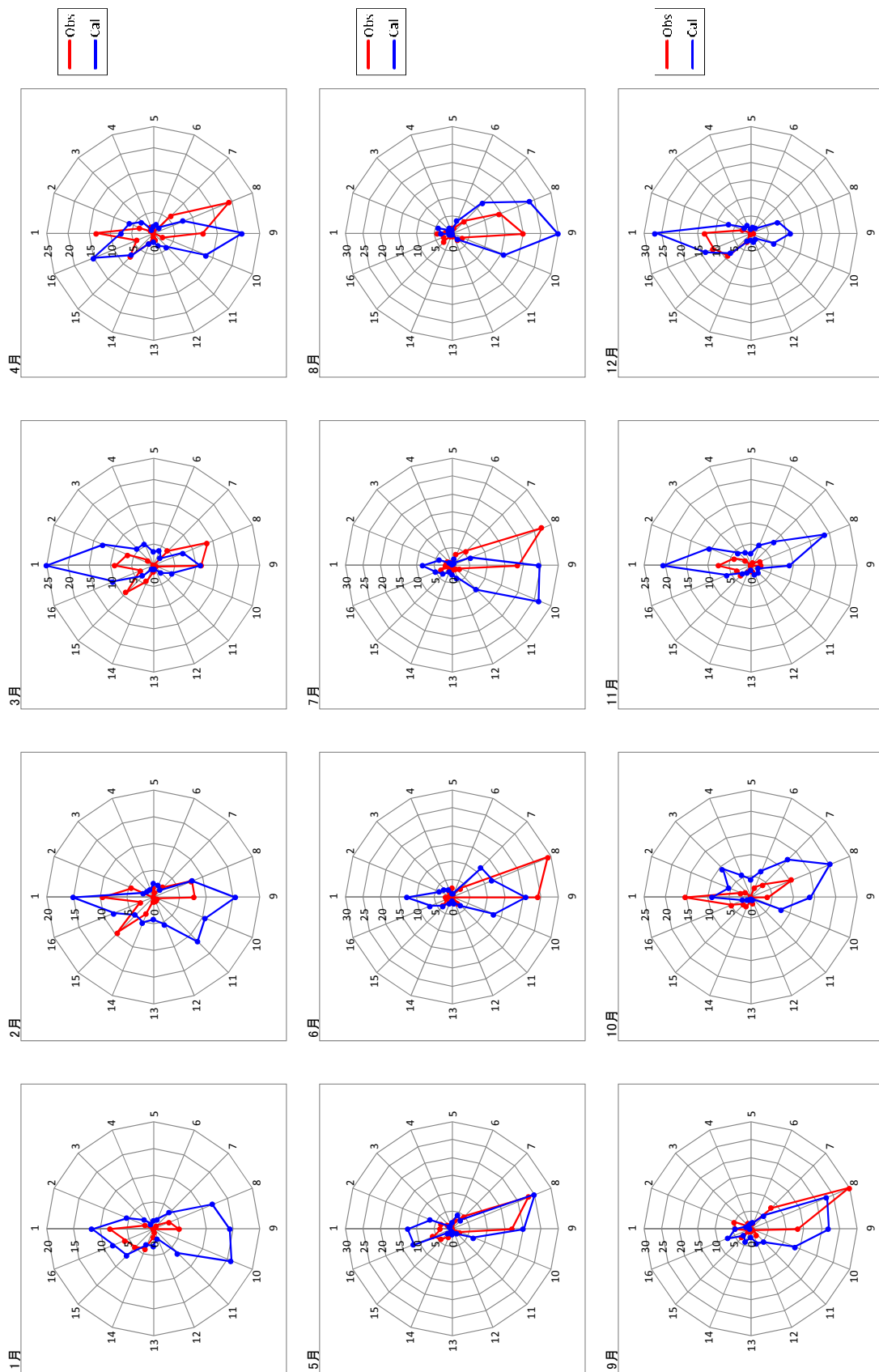


図 4.3-18 GULKANA/INTL.FLD. における風向の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

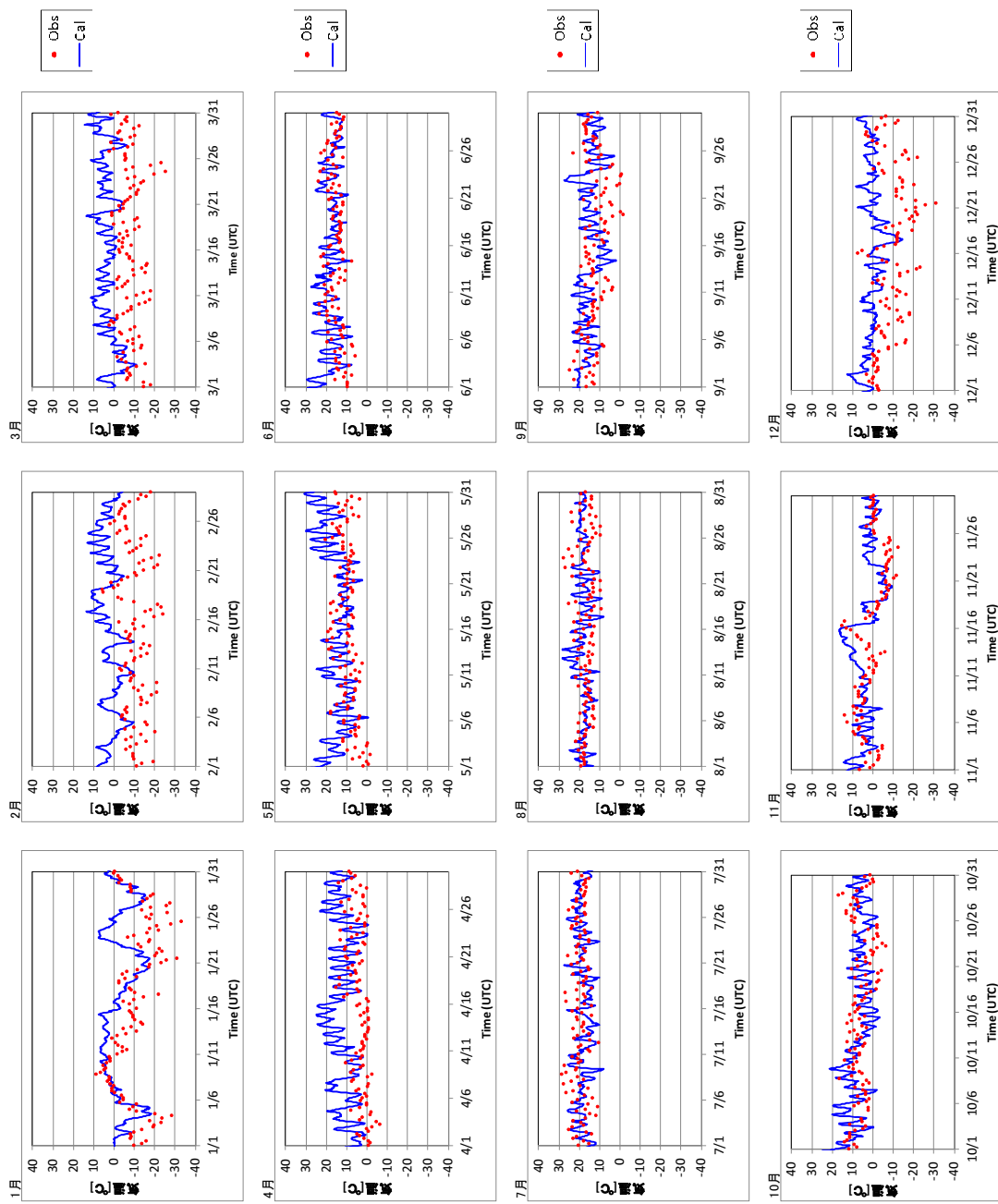


図 4.3-19 CARIBOU/MUN における気温の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

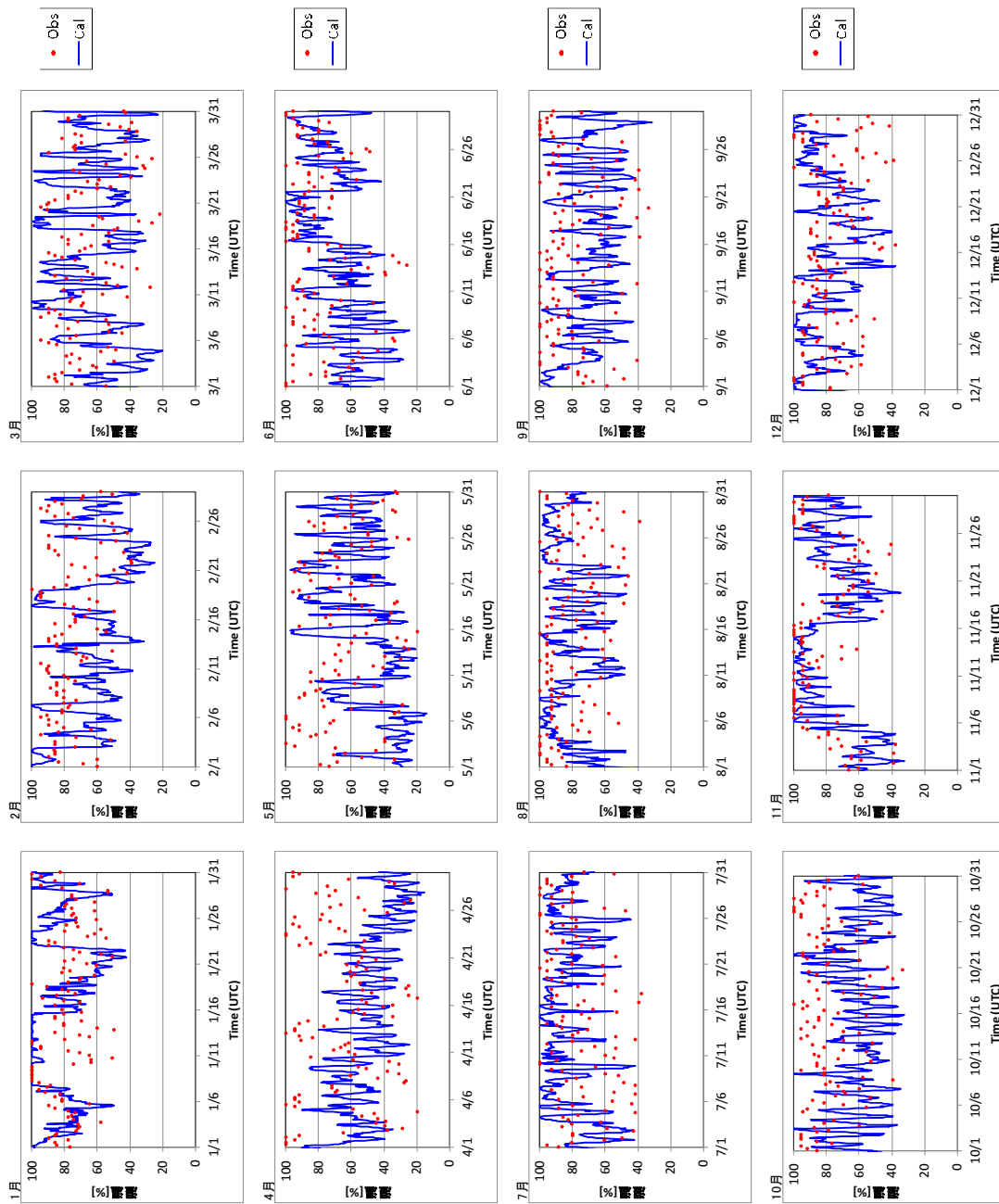


図 4.3-20 CARIBOU/MUN における湿度の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

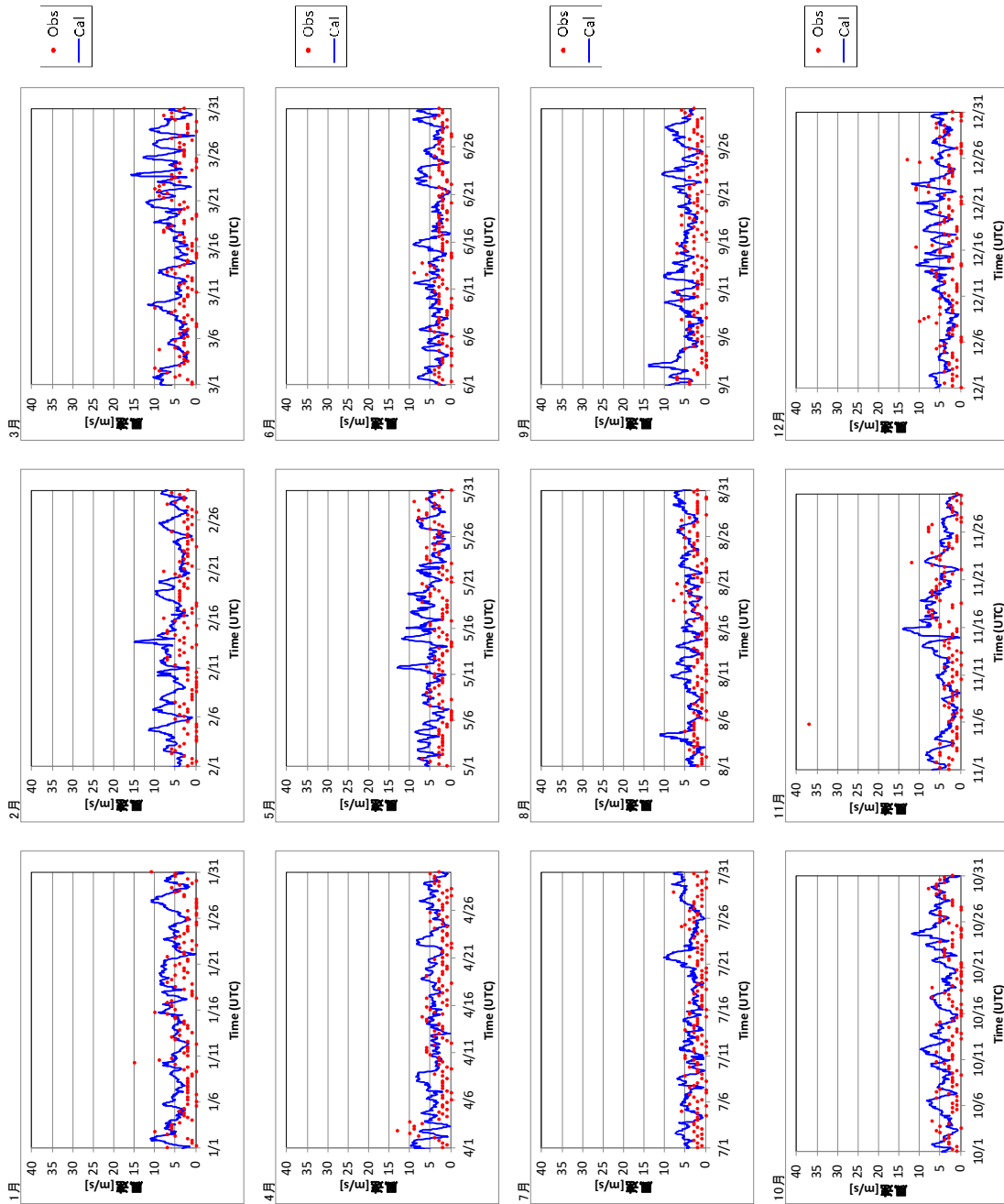


図 4.3-21 CARIBOU/MUN における風速の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

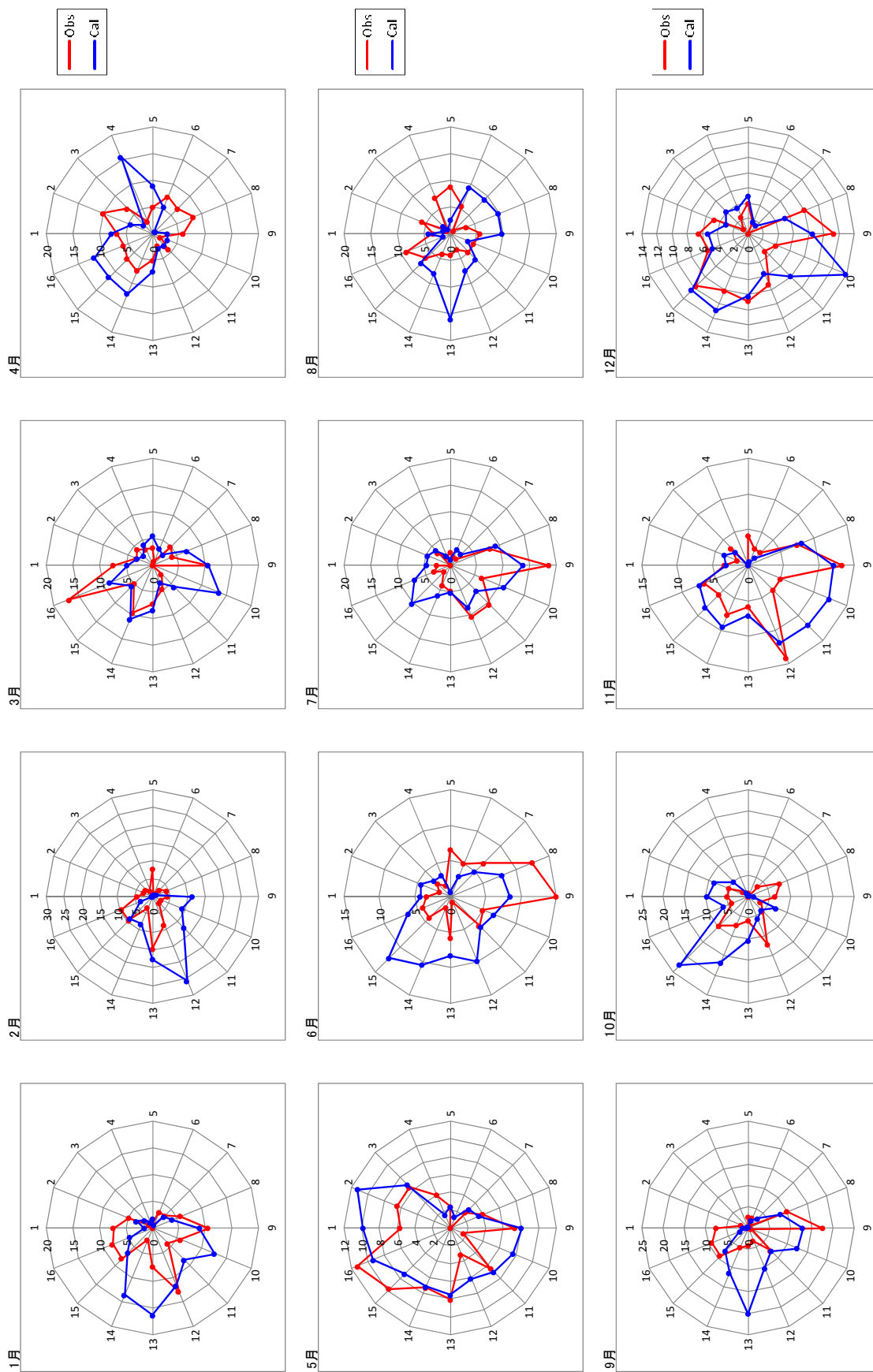


図 4.3-22 CARIBOU/MUN における風向の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

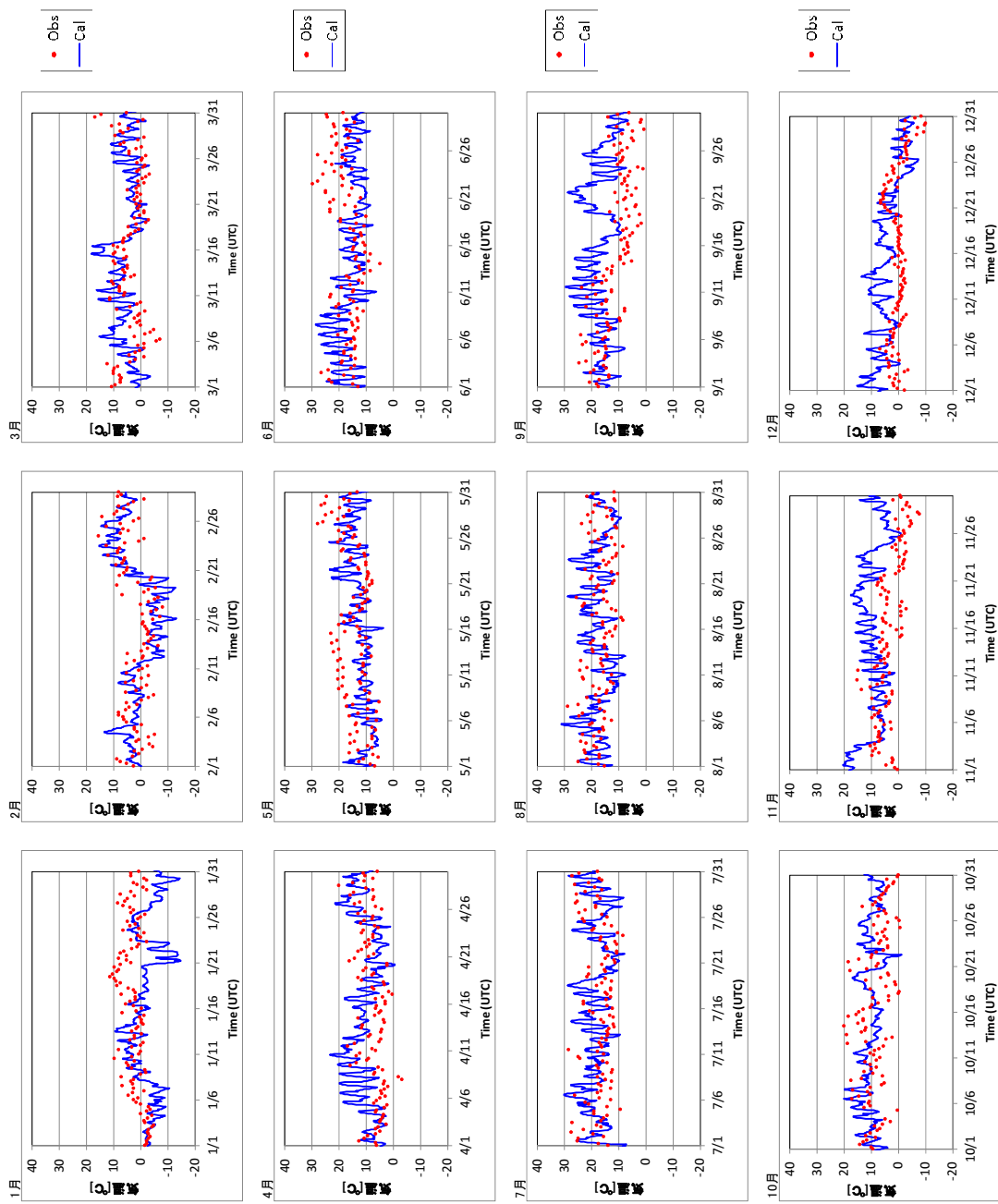


図 4.3-23 AUGSBURG における気温の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

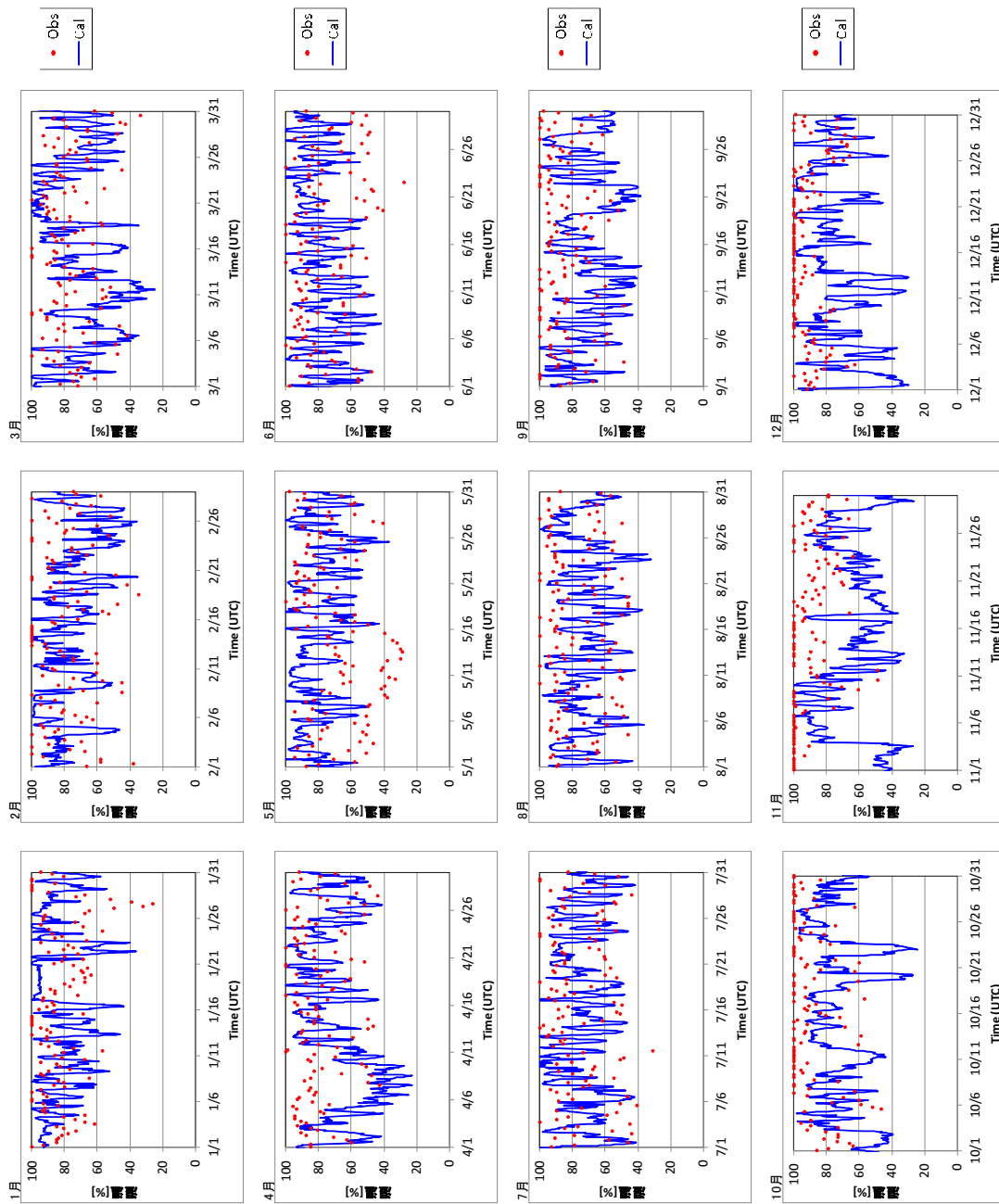


図 4.3-24 AUGSBURG における湿度の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

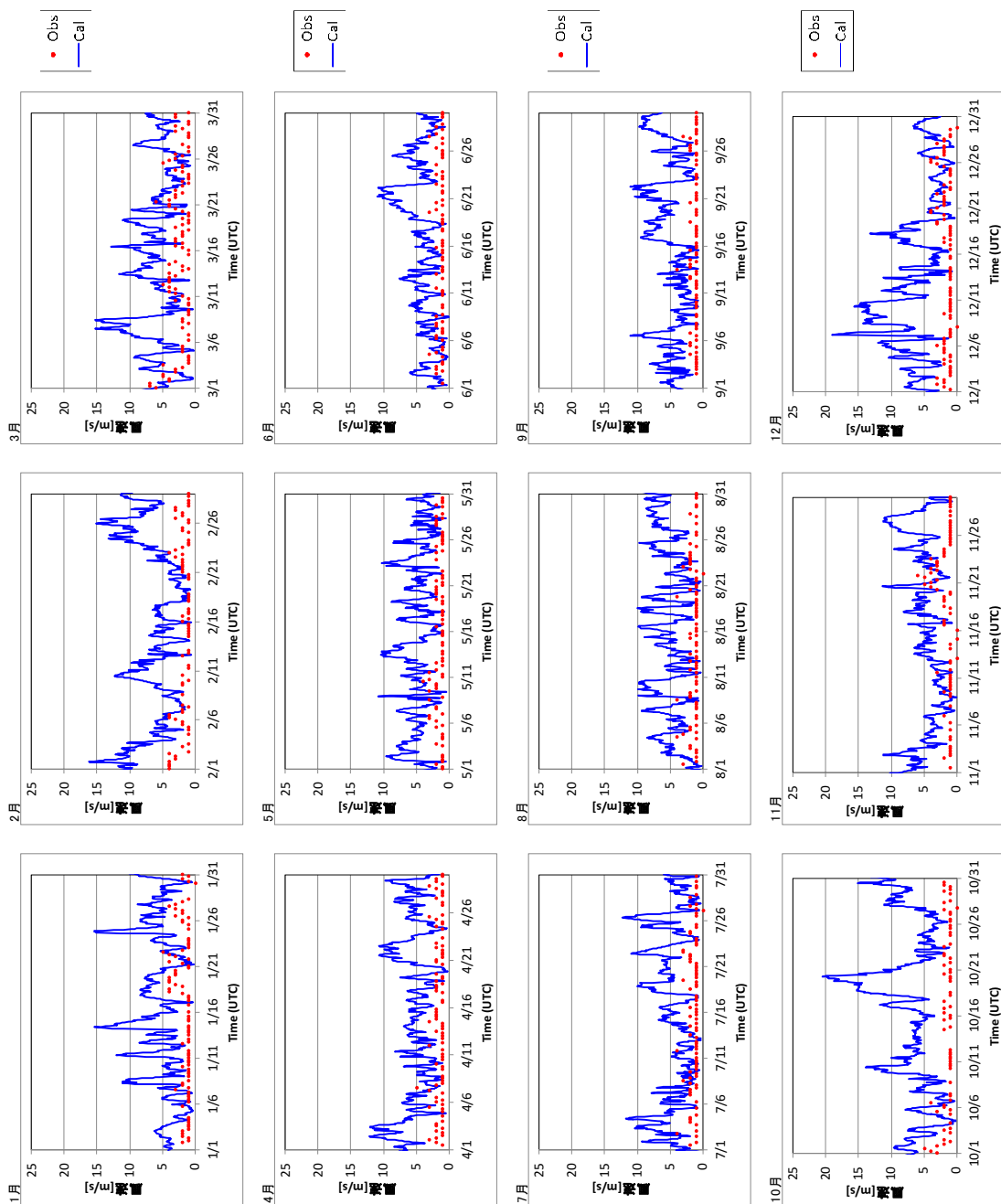


図 4.3-25 AUGSBURG における風速の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

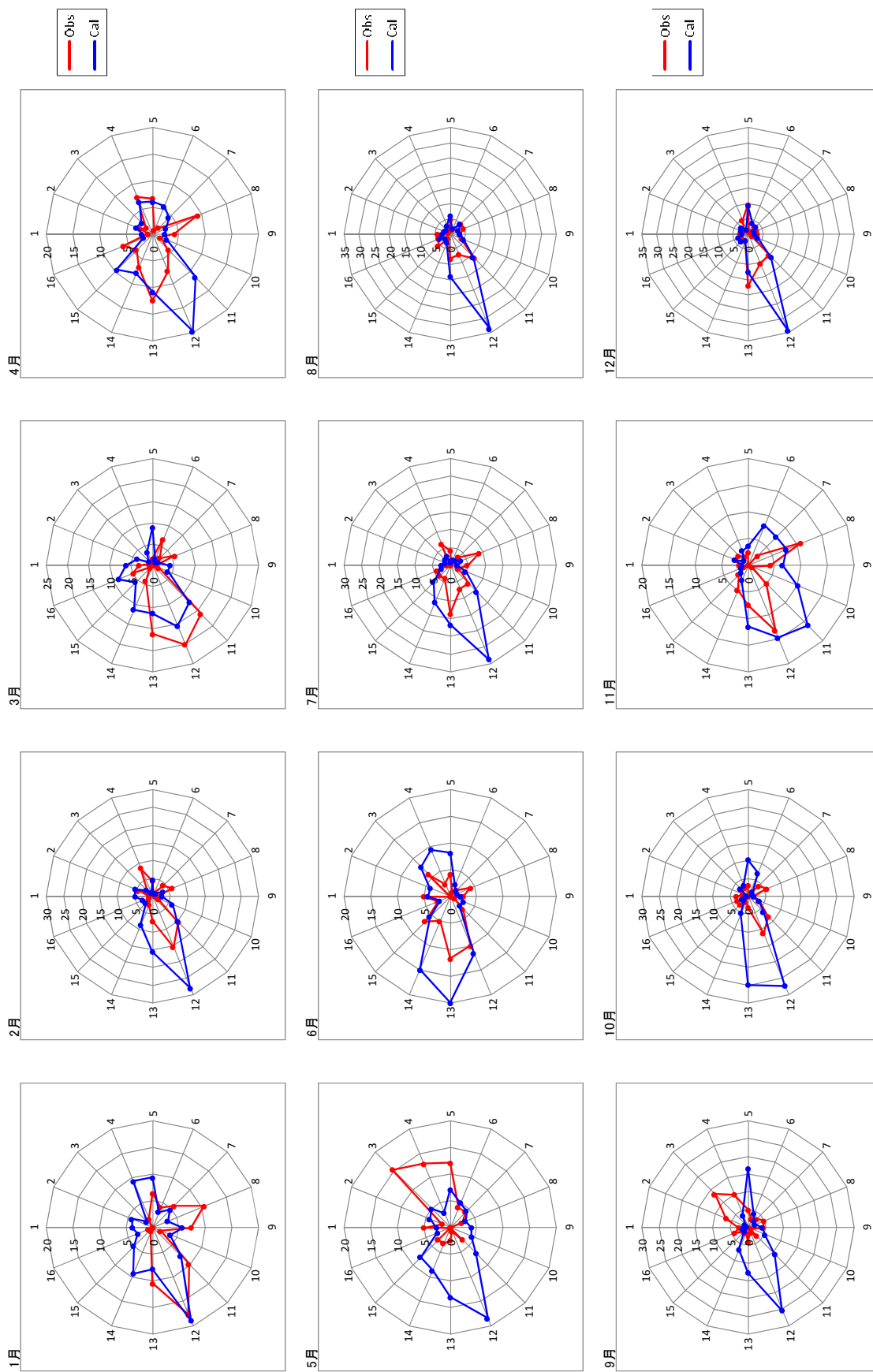


図 4.3-26 AUGSBURG における風向の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

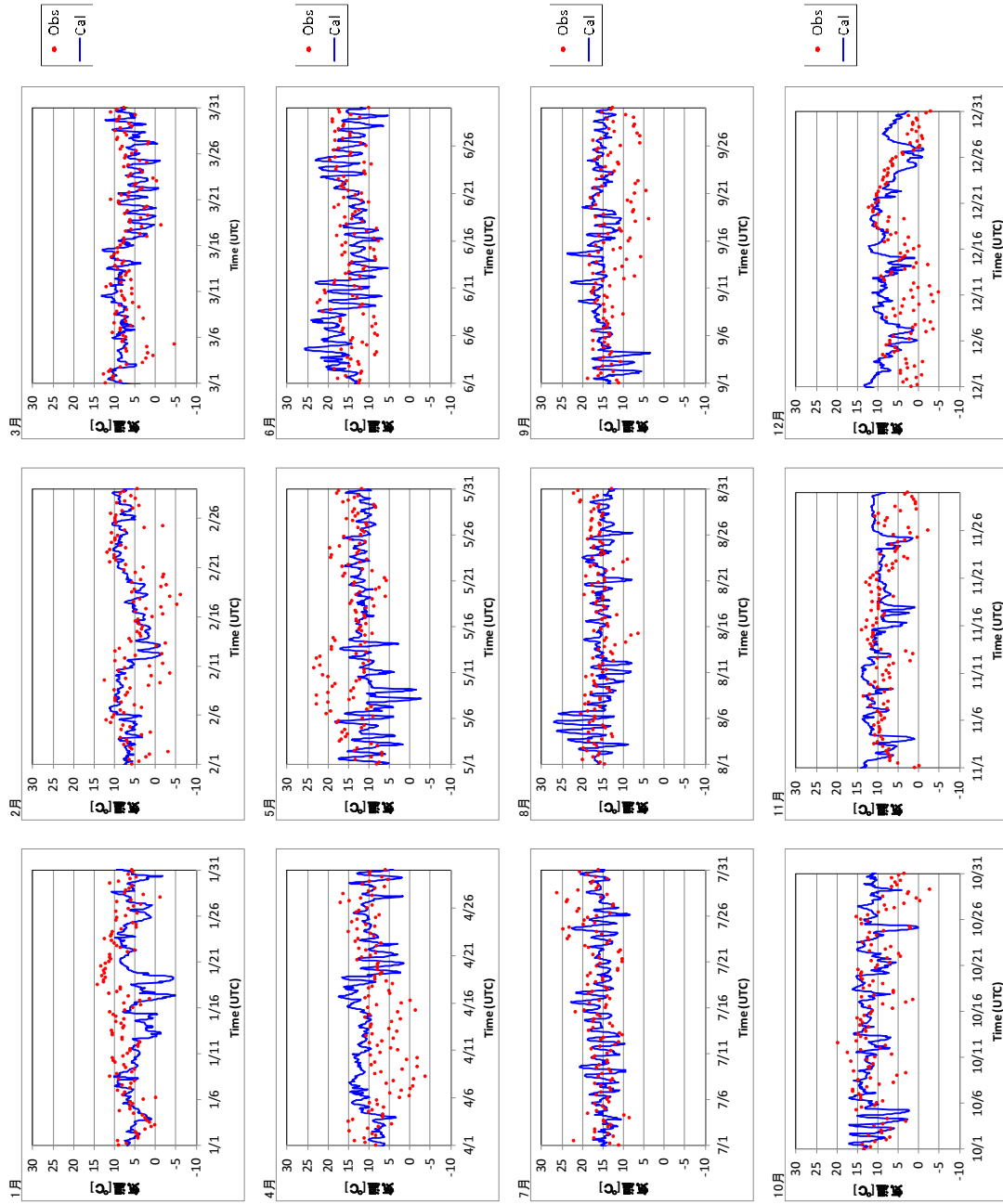


図 4.3-27 YEOVILTON における気温の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

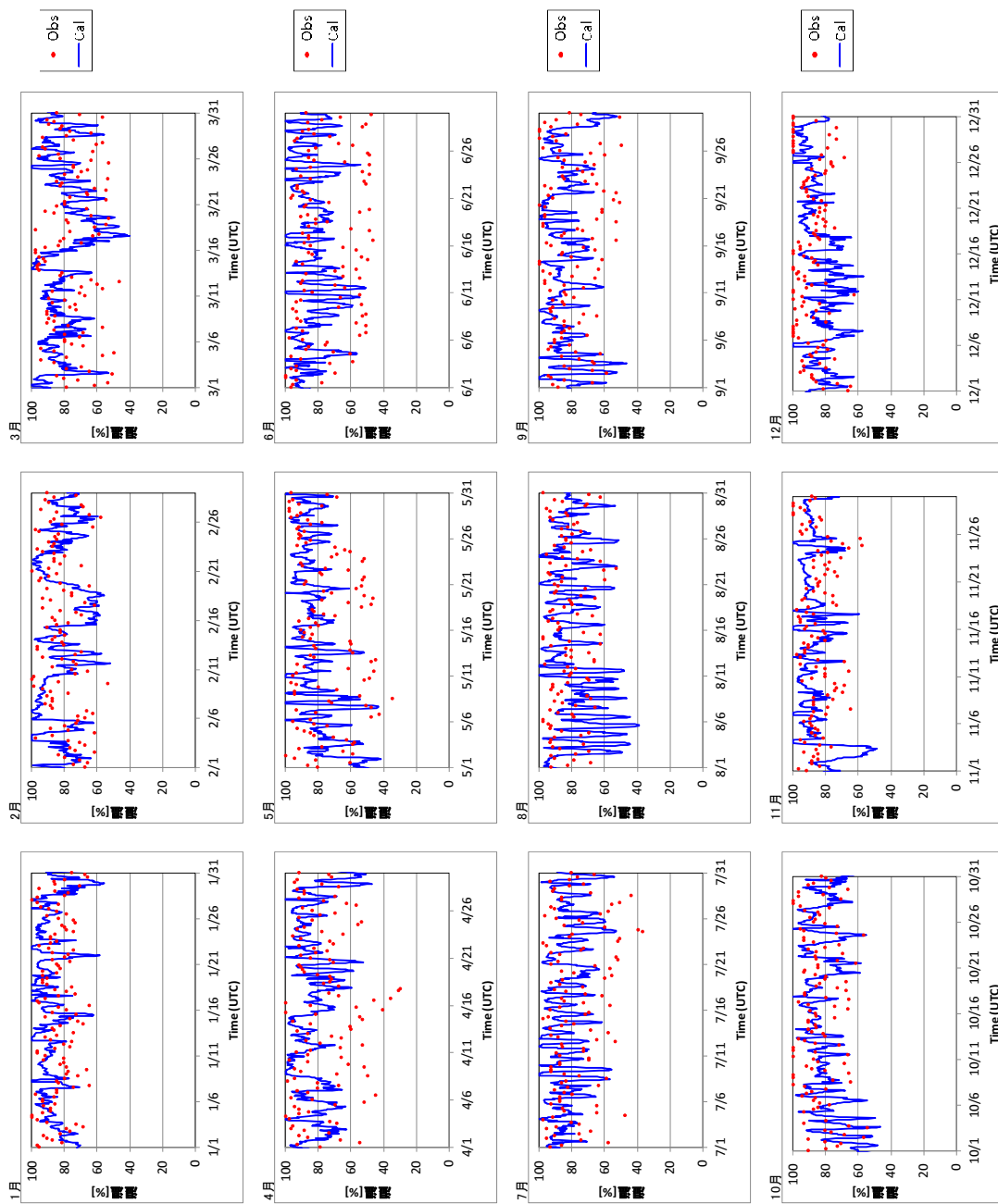


図 4.3-28 YEOVILTON における湿度の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

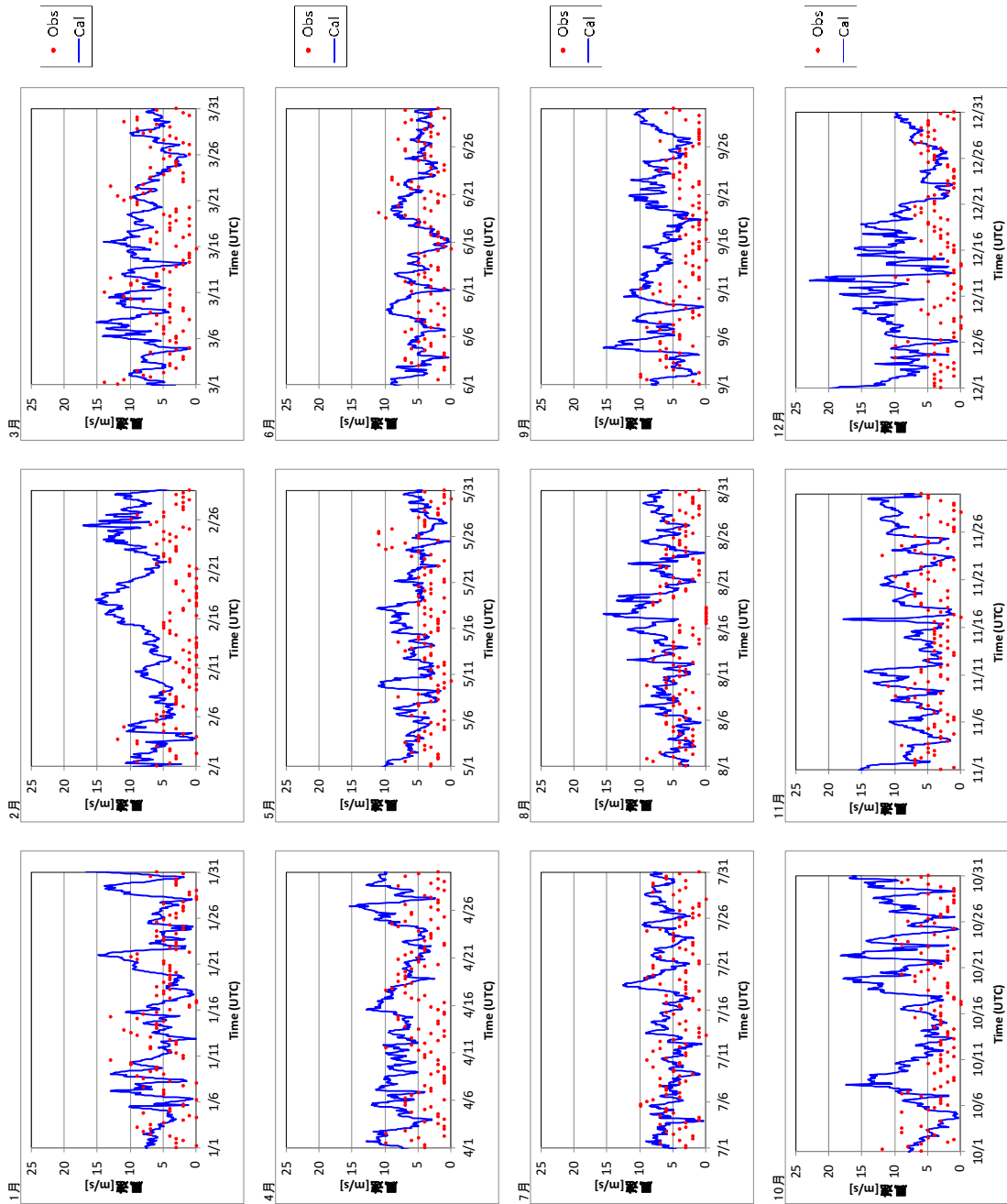


図 4.3-29 YEOVILTON における風速の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

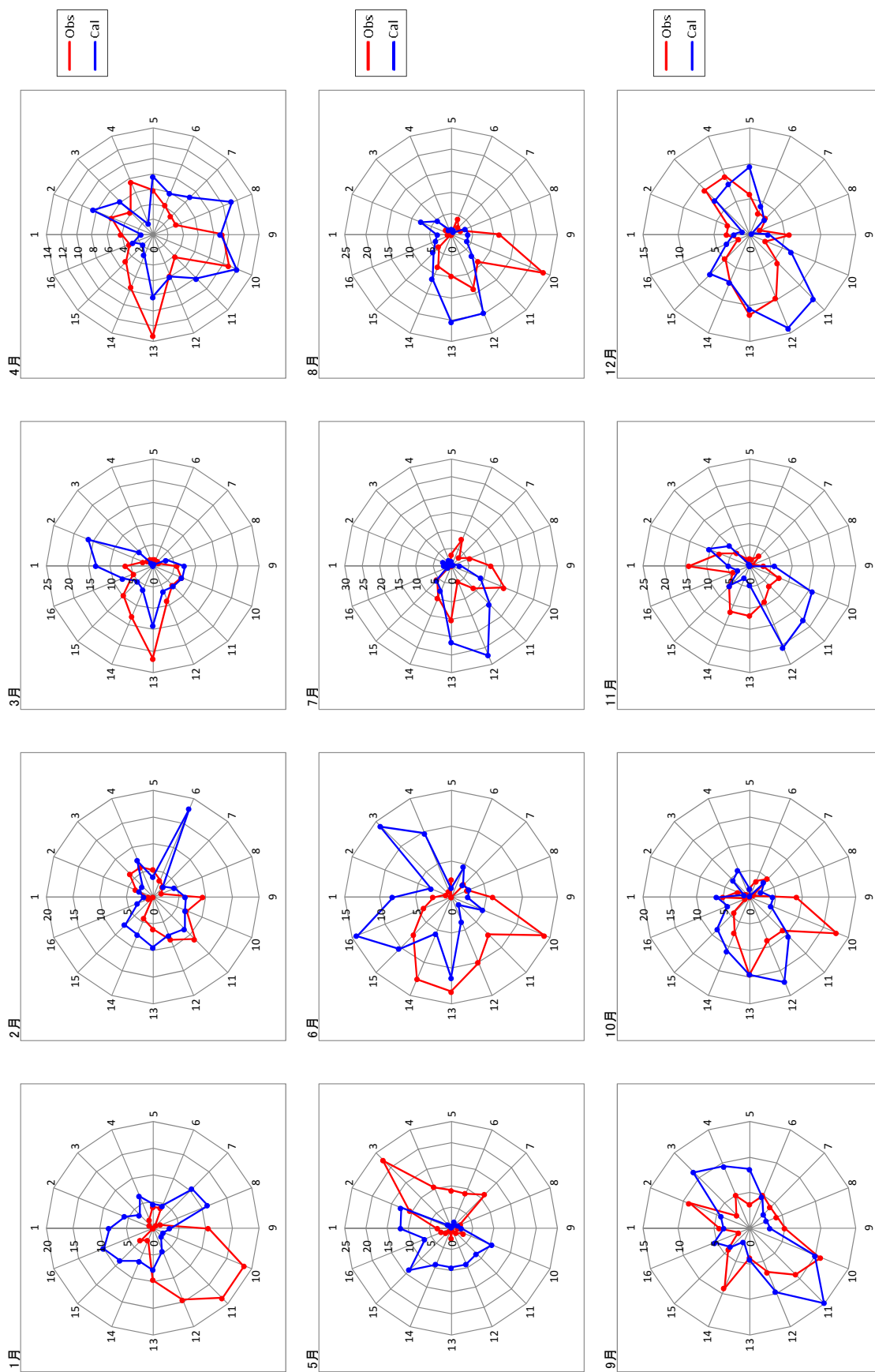


図 4.3-30 YEOVILTON における風向の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

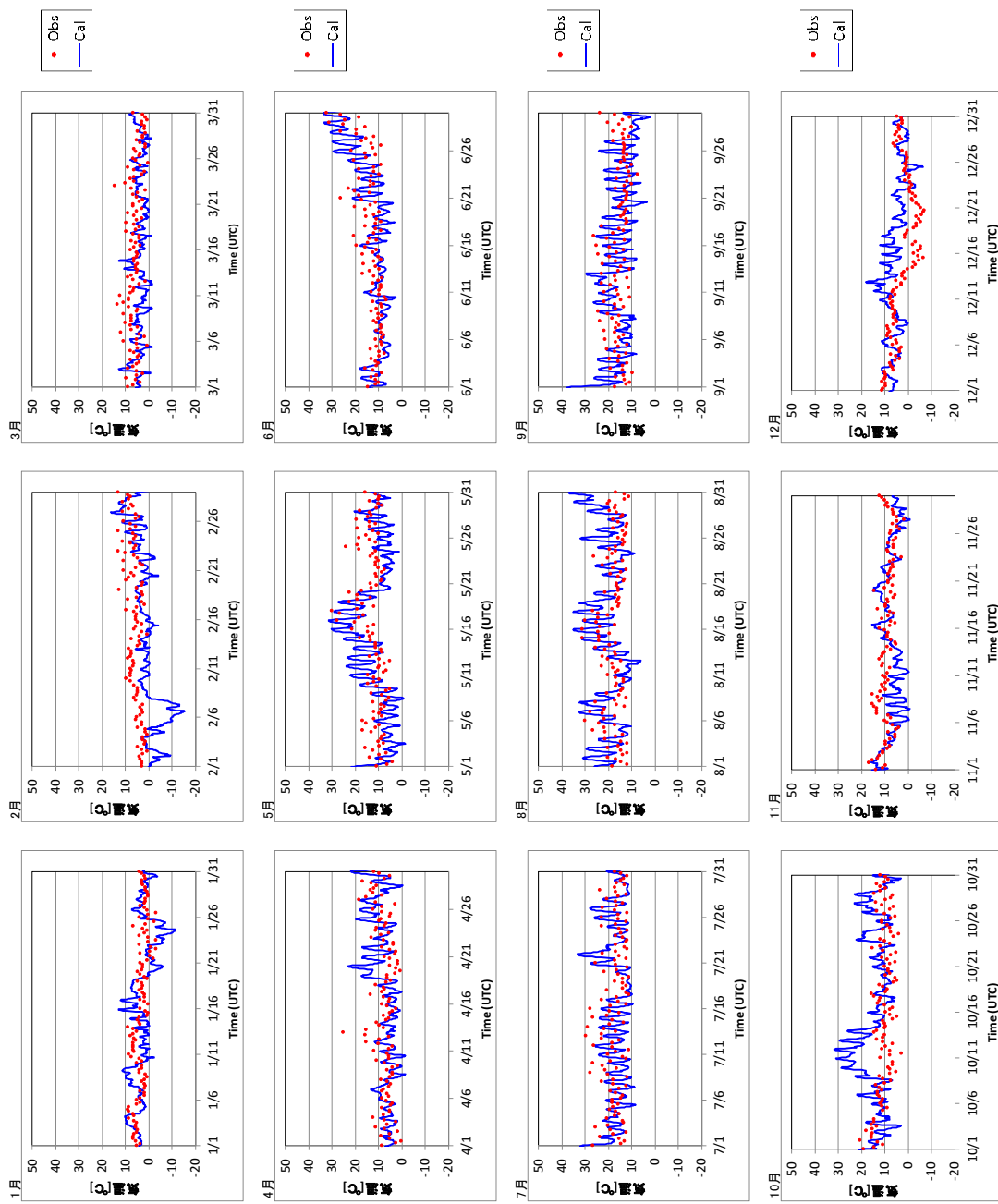


図 4.3-31 SEATTLE における気温の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

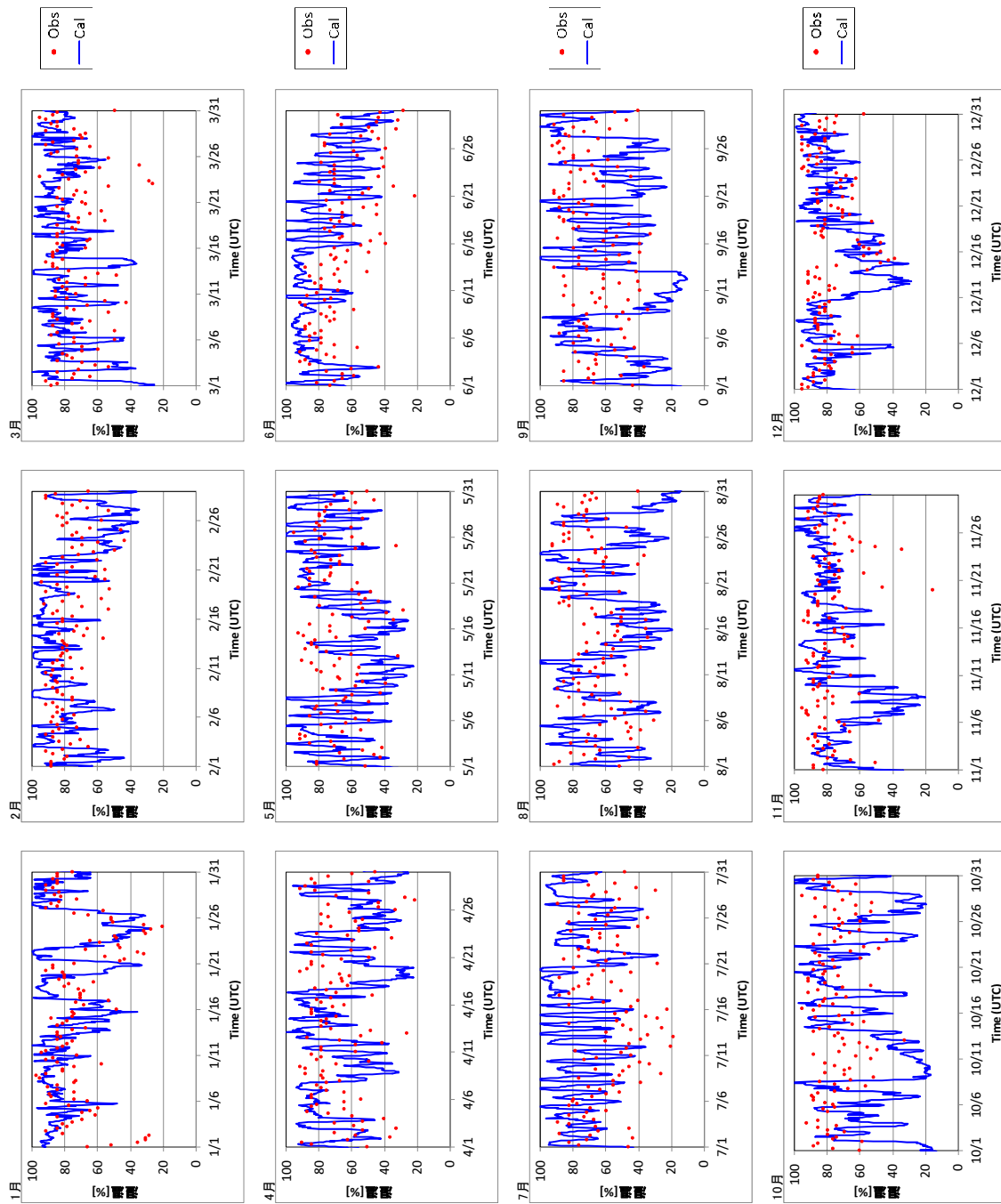


図 4.3-32 SEATTLE における湿度の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

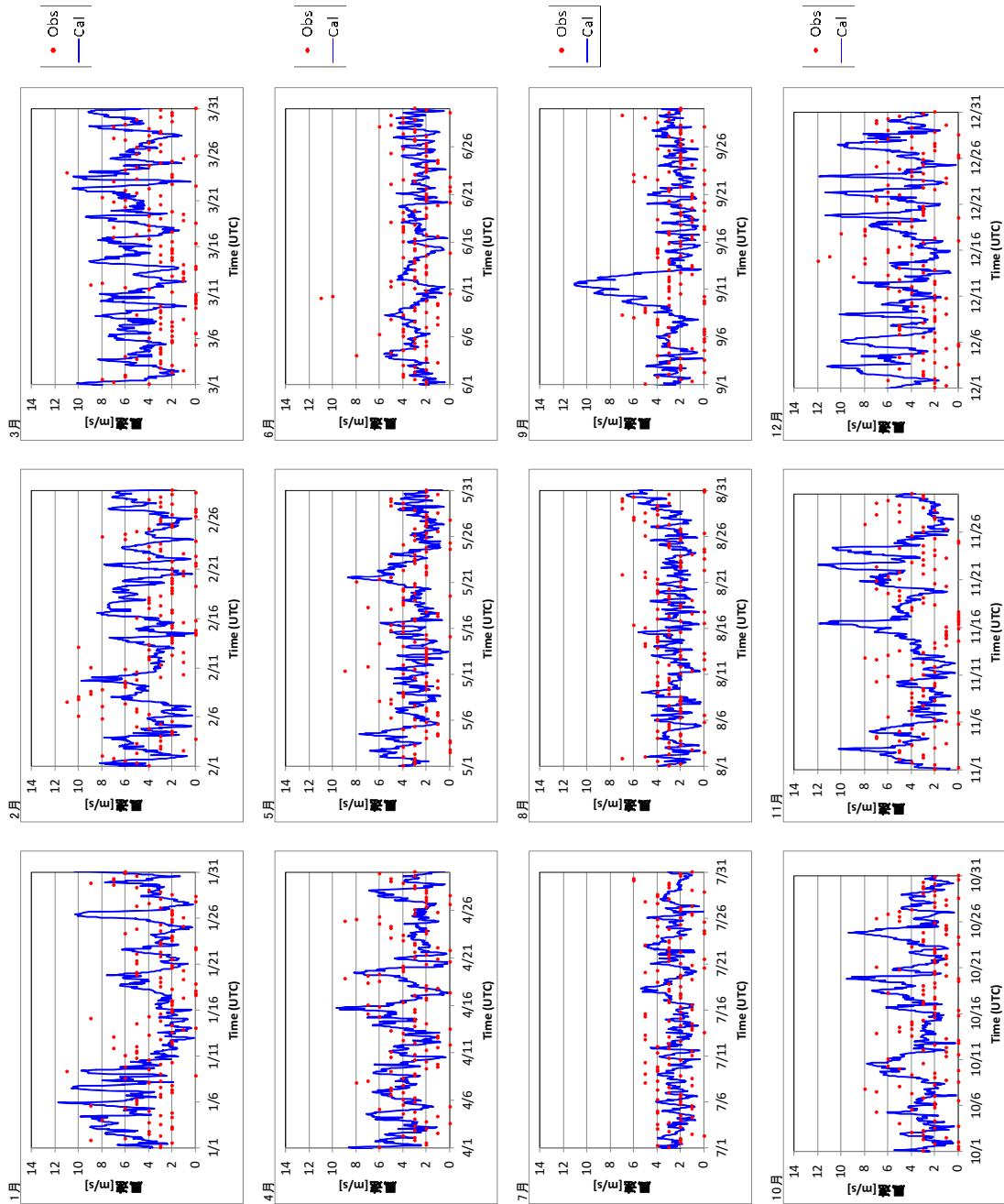


図 4.3-33 SEATTLE における風速の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

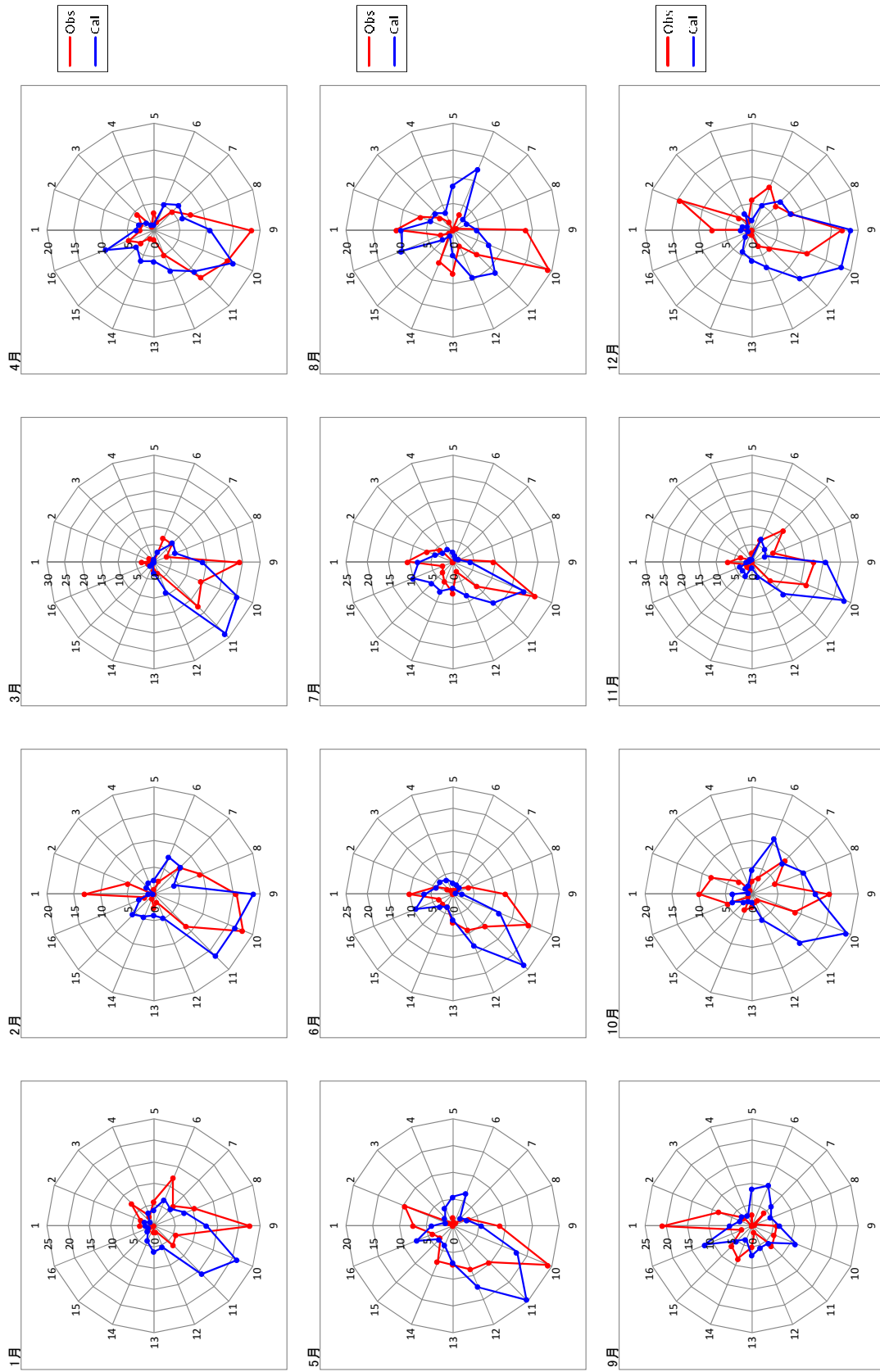


図 4.3-34 SEATTLE における風向の比較 (Obs: 6 時間値 Cal: 1 時間値)

(2) ブラックカーボン大気中濃度の航空機観測との比較

WRF-Chem で計算した BC 濃度の鉛直方向の再現性を確認するために、航空機観測で測定された BC 濃度との比較を行った。航空機観測データは、NOAA により、2008 年 3 月から 4 月にかけてアラスカのフェアバンクス周辺で実施された北極圏大気の集中観測研究 ARCPAC (Aerosol, Radiation, and Cloud Processes affecting Arctic Climate) の観測結果を利用した。

比較対象とした航空機観測の航跡図を図 4.3-35に示す。

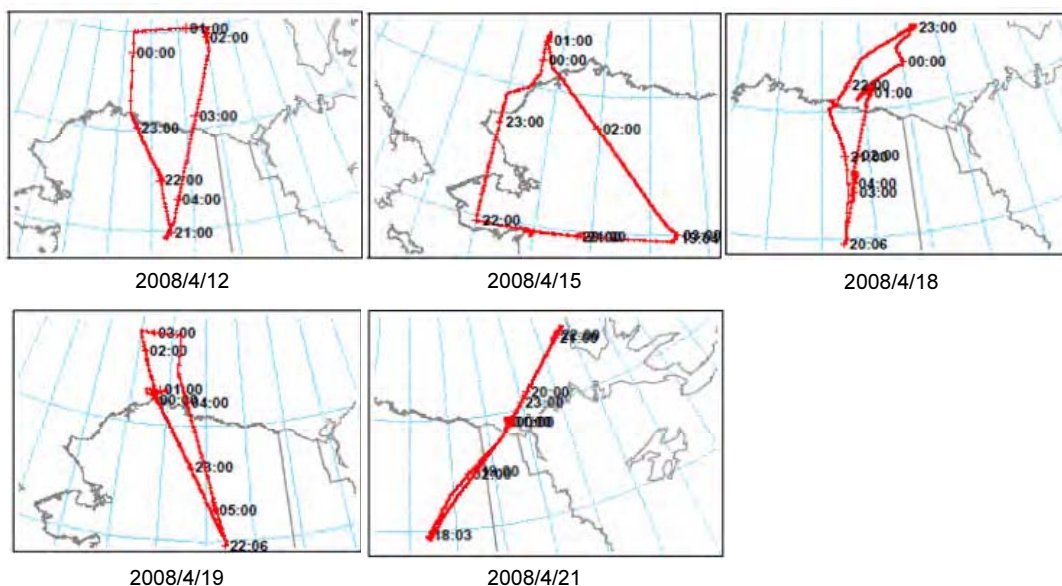


図 4.3-35 ARCPAC 航空機観測の航跡図 (Brock et al., 2011)

表 4.3-2に示す期間の航空機観測の結果および WRF-Chem の計算結果から得られた鉛直プロファイルと鉛直積算値による比較を行った。結果を図 4.3-36および図 4.3-37に示す。

4/15、4/19 など Brock et al. (2011) で報告されている大規模な森林火災による高濃度イベント時には、観測値と WRF-Chem による計算値との間に差異がみられるが、このような高濃度イベントを除くと、シミュレーション結果は航空機観測の結果をよく再現している。

表 4.3-2 比較対象とした観測期間

フライト	観測期間
2008/4/12	2008/4/13 2:00～4:00
2008/4/15	2008/4/16 2:00～3:00
2008/4/18	2008/4/18 22:00～4/19 0:00
2008/4/19	2008/4/19 23:00～4/20 1:00
2008/4/21	2008/4/22 1:00～3:00

Brock et al.: Characteristics, sources, and transport of aerosols measured in spring 2008 during the aerosol, radiation, and cloud processes affecting Arctic Climate (ARCPAC) Project, Atmos. Chem. Phys., 11, 2423–2453, doi:10.5194/acp-11-2423-2011

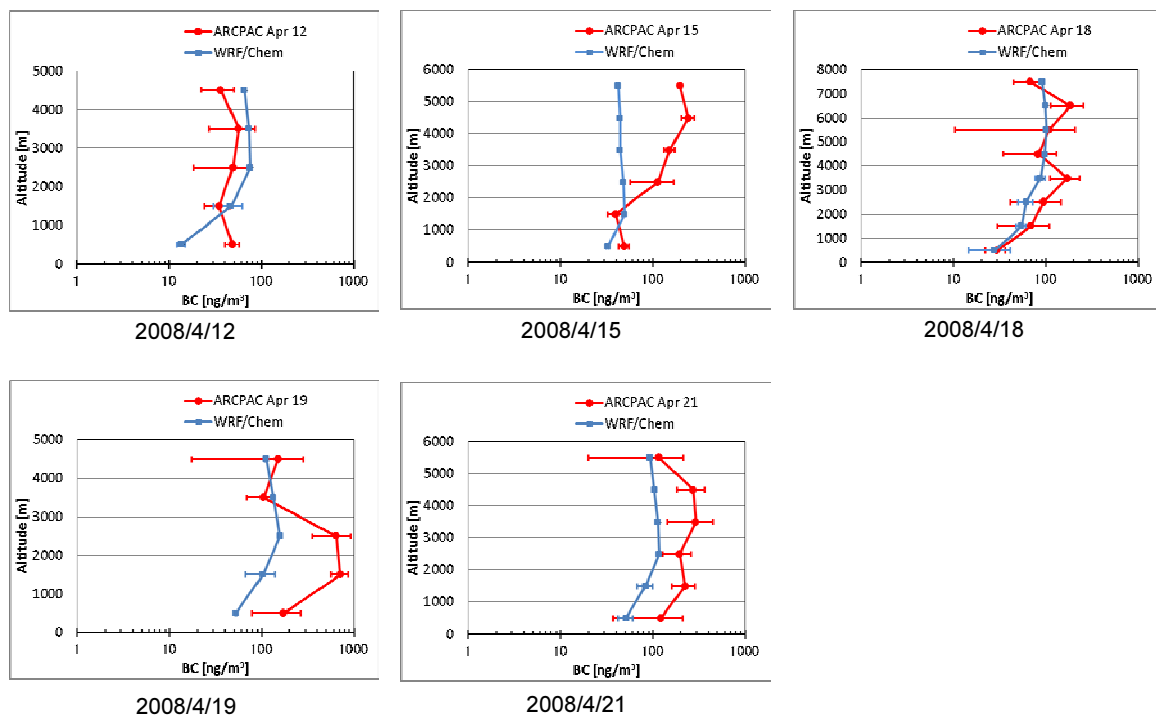


図 4.3-36 BC 濃度の鉛直プロファイルによる比較 (横軸は対数目盛、水平方向のバーは標準偏差の 1σ の範囲を表す)

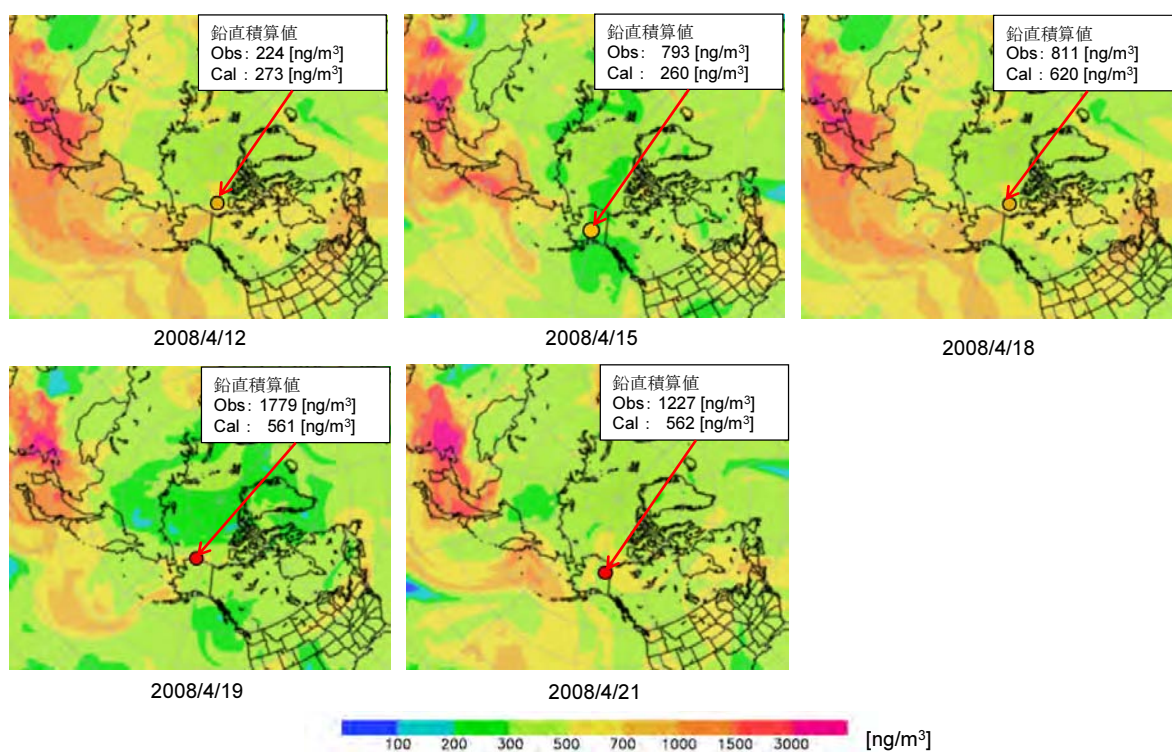


図 4.3-37 BC 濃度の鉛直積算値による比較 (○は航空機観測の BC 濃度の積算値を表す)

(3) ブラックカーボン大気中濃度の地上観測値との比較

WRF-Chemで計算したBC濃度(Cal)の地上付近における再現性を確認するために、2008年1年間について、地上観測(Obs)との比較を行った。比較対象地上観測地点を図4.3-38に、地上観測地点の諸元を表4.3-3に示す。北極圏への汚染物質の流入経路は図4.3-39の通りである。

日平均値の冬季から春季に見られるBC濃度のピークはモデルでは再現できていない。これは、WRF-Chemの計算で与えているBC濃度は月平均値であり、日毎に変化する排出量データを与えていないため、森林火災などの高濃度イベントを再現できないことが原因であると考えられる。月平均値で見た場合、図4.3-40のHyytiäläおよび図4.3-41のHohenpeissenberg, Herwellについては観測値をよく再現できている。

全体として、WRF-Chemによる計算結果は、観測値に見られるBC濃度の季節変化をよくとらえていると考えられる。ただし、シミュレーション結果をより適切に評価するためには、沈着量なども観測値と比較する必要がある。

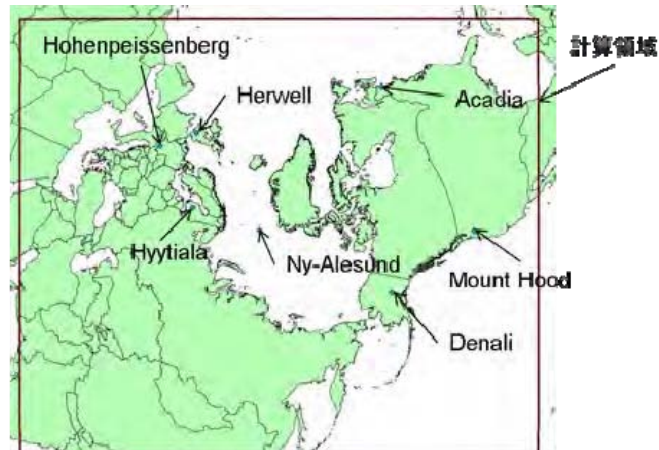


図 4.3-38 比較対象地上観測地点

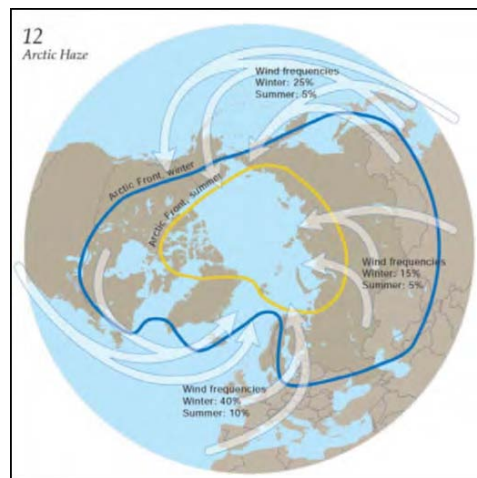


図 4.3-39 北極圏への汚染物質の流入経路 (ARCPAC Science and Implementation Plan)

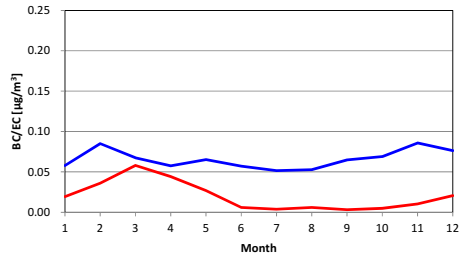
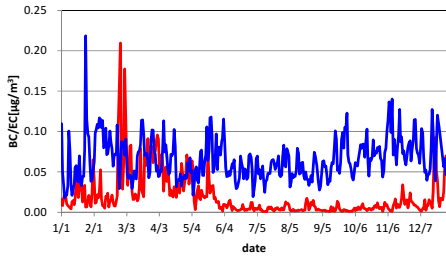
表 4.3-3地上観測地点の諸元

観測地点名	観測項目	データの 時間解像度	観測方法	出展
Ny-Alesund	BC	30分	aethalometer	EBAS http://ebas.nilu.no/
Hyytiälä	BC	5分		
Hohenpeissenberg	BC	1時間	MAAP	
Herwell	EC	1日	lvs single	
Denali	EC	3日	Thermal Optical Reflectance	IMPROVE http://vista.cira.colostate.edu/improve/Data/data.htm
Acadia	EC	3日		
Mount Hood	EC	3日		

日平均値

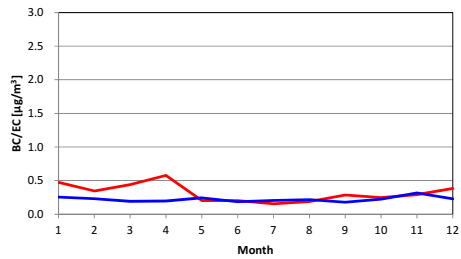
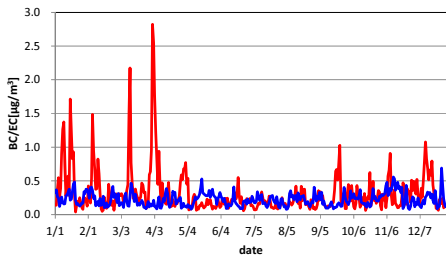
月平均値

Ny-Alesund



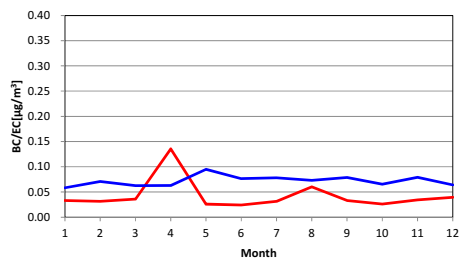
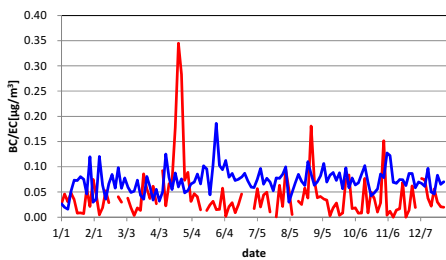
obs
cal

Hyytiala



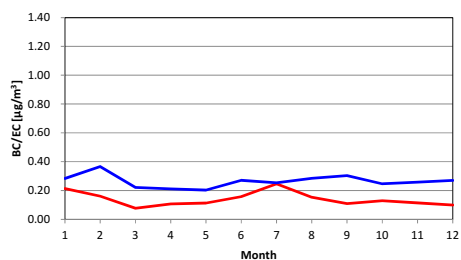
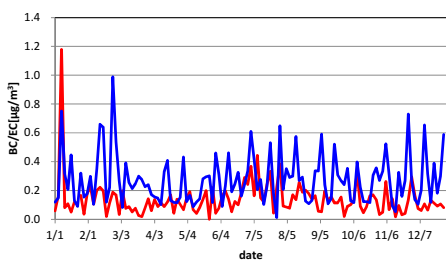
obs
cal

Denali



obs
cal

Acadia



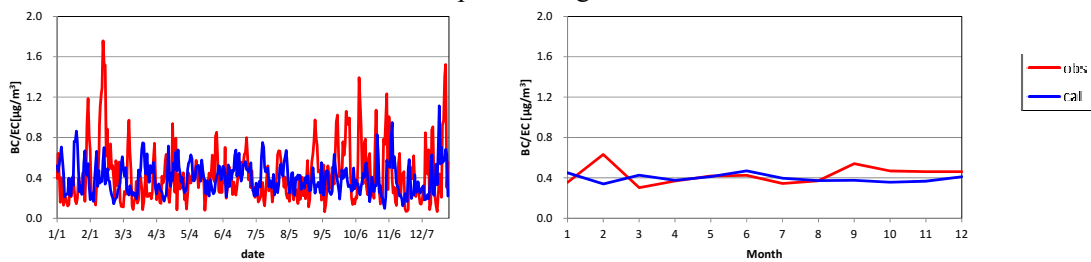
obs
cal

図 4.3-40 地上観測地点における BC/EC 濃度の比較 (1)

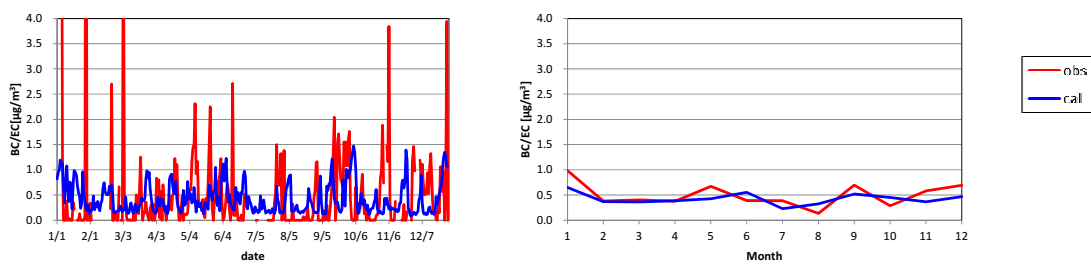
日平均値

月平均値

Hohenpeissenberg



Herwell



Mount Hood

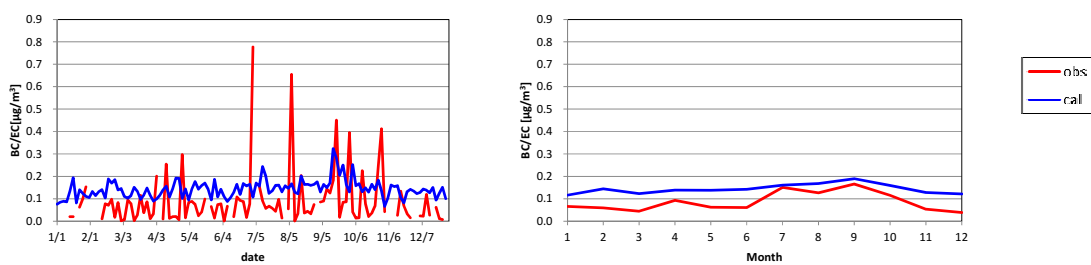


図 4.3-41 地上観測地点における BC/EC 濃度の比較 (2)

4.3.3 先行研究における放射強制力計算結果との比較

表 4.3-4に本シミュレーションにブラックカーボンの放射強制力の年平均値および本シミュレーションによる放射強制力と先行研究との比較結果を示す。また図 4.3-42にブラックカーボンの放射強制力の分布図を示した。なお放射強制力の計算結果及び解析結果は5.1.1節に記載している。

東アジアおよび中国南東部、日本海における放射強制力の計算結果は、先行研究と比較して差異が見られるが、北半球および中国北東部、中国北部においては、IPCC (2007) で掲載されているモデル (Takemura et al. 2002) や、Han and Zhang (2012) と比較して、ほぼ一致している。

対象年が異なることから直接的な比較はできないものの、全体として、放射強制力の計算結果は、先行研究における各地域の計算結果と比較して、概ね一致していると考えられる。

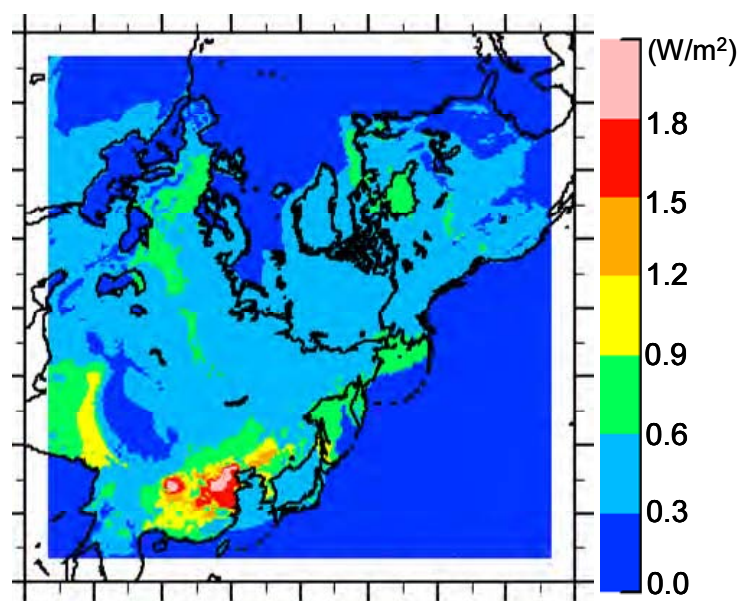


図 4.3-42 ブラックカーボン放射強制力の年平均値 (W/m^2)

表 4.3.4 先行研究におけるブラックカーボンの放射強制力の年平均値 (W/m^2)

対象領域	本事業のシミュレーション結果			先行研究の結果			参考文献
	放射強制力 (W/m^2)	対象高度	対象年	放射強制力 (W/m^2)	対象高度	対象年	
全球	-	-	-	0.21	対流圏界面	2000 年	Takemura et al. (2002)
北半球	0.35			0.32			
東アジア	0.42			0.19	対流圏界面	2001 年	Conant et al. (2003)
中国北東部	0.71		2008 年	0.67			
中国北部	1.10			1.18			
中国南東部	0.86			1.32			
日本海(朝鮮半島、日本の内陸部を含む)	0.40	大気上端 (約 16km)		0.84	大気上端	2005 年	Han and Zhang (2012)

5 北極圏におけるブラックカーボンの環境影響評価に係る事前解析

北極圏におけるブラックカーボンの環境影響評価として、本事業では局地気象・気候への影響及び生態系影響に着目しており、本章ではこれらの環境影響評価に係る事前解析を行った。

局地気象・気候への影響として、本事業では次の過程・現象を考慮しており、

- ① 大気中を浮遊しているブラックカーボンが太陽光を吸収することで大気を加熱する過程
- ② 雪氷面に沈着したブラックカーボンが、雪氷面上もしくは、取り込まれた積雪層内で光を吸収し、周囲を加熱することにより、雪氷を融解し、雪氷面の反射率（地表面アルベド）を下げるフィードバック現象

これら①、②による局地気象・気候変動に関する影響評価に係る事前解析として、次の解析を行った。

①の事前解析として、既存の排出量データを使用し、本シミュレーション領域における全ての船舶から排出されたブラックカーボンの気候影響評価を行った。また②の事前解析として、同過程を扱う既存モデルについて、文献調査を行い、次年度に本事業において導入するモデルについて検討を行った。

①の事前解析から、船舶排出起源ブラックカーボンの大気濃度はその排出源分布に対応して中緯度で高く、高緯度で低い傾向にある。しかし一方では、その放射強制力は日射量が極端に減少する秋・冬季を除いて、高緯度域でより高くなる傾向にあり、特に春・夏季の北極圏においてはブラックカーボン濃度が薄くてもその加熱効果は中緯度より大きくなる傾向にあることが示された。これは、反射率の高い雪や海氷が高緯度に集中して分布しているためであり、雪・氷に被覆される頻度が高いといった北極圏の特徴は、同地域における春・夏季の大気中ブラックカーボンの局地気象・気候影響において重要であることがわかった。

また本事前解析は全船舶から排出されたブラックカーボンを対象にしたものであり、北極海航路の船舶から排出されたブラックカーボンが北極圏内の気象・気候に与える局所的な影響を評価するためには、北極圏内の船舶排出をゼロとするといった地理別の排出源寄与率解析が必要である。さらに、ブラックカーボンの大気中での加熱効果による局地気象・気候への影響の定量化についても、ブラックカーボンが大気上層、もしくは下層に位置するかでその効果が異なることから、大気上端の放射強制力だけでなく、高度別の放射強制力の解析を行うことが、より適切な影響評価を行う上で必要であることがわかった。

②の事前解析では、現在の気候影響研究において、ブラックカーボン沈着による反射率減少過程を扱う主なモデルについて整理した。またモデル入力パラメータ、観測の再現性、モデルの特徴に着目し、モデル間で比較を行い、気象・気候モデルなどでの利用を想定して開発された Aoki et al (2011) のモデルは、高速計算用の工夫が施されているだけでなく、観測の再現性も非常に高く、実用性、観測の再現性の観点から、本事業で次年度に導入するモデルとして最も適切であると結論付けた。

生態系影響評価の事前解析としては、粒子状物質の含有成分（ブラックカーボンや金属類など）の曝露量と生態系への影響の規模を関連付ける研究について文献調査を行った。その結果、ブラックカーボンの植物への直接的影響については、 $0.13\text{--}0.58\text{ mg m}^{-2}$ （葉面積当たり）程度では、樹木の成長やガス交換等の生理活性に影響を与えないが、工業地帯や高速道路の直近を想定したレベルである曝露量 $0.4\text{--}1.3\text{ g m}^{-2}$ （葉面積当たり）では、葉温が上昇し、結果として、蒸散量が多くなるといった影響を

与えることがわかった。またスギ、熱帯樹木、落葉性カラマツにおいて、年間約 $10\text{--}30\text{ mg m}^{-2}$ 程度の BC が、葉面に沈着・蓄積することが報告されていることから、実際の森林地域における BC の沈着がその成長に影響を与えている可能性については、今後さらに検討すべきであることが示唆された。

5.1 局地気象・気候影響評価

北極海航路における船舶から排出されたブラックカーボンの局地気象・気候への影響として、本事業では、次の過程・現象を考慮している。

- ① 大気中を浮遊しているブラックカーボンが太陽光を吸収することで大気を加熱する過程
- ② 雪氷面に沈着したブラックカーボンが、雪氷面上もしくは、取り込まれた積雪層内で光を吸収し、周囲を加熱することにより、雪氷を融解し、雪氷面の反射率(地表面アルベド)を下げるフィードバック現象

上記①、②による局地気象・気候影響評価に係る事前解析として、本節では次の解析を行った。

①の事前解析として、既存の排出量データ(ARCTAS 排出量データ; 4章を参照のこと)を使用し、本シミュレーション領域における全ての船舶から排出されたブラックカーボンの気候影響評価を行った。②の事前解析として、同現象を扱うモデルについて、文献調査を行い、次年度に本事業において導入するモデルについて検討を行った。

5.1.1 船舶起源ブラックカーボンによる放射強制力

本年度シミュレーションに使用している ARCTAS 排出源データでは、船舶起源と陸上起源別に排出源データを分けて提供していることから、船舶起源もしくは陸上起源に排出を限定したシミュレーションを行うことが可能である。そこで、本節では、排出起源を陸上と船舶の両起源に設定したシミュレーションと、陸上起源のみに限定したシミュレーションを行い、その差分から得られたブラックカーボン濃度と放射強制力を用いて、船舶起源ブラックカーボンの気候影響評価を行った。なお気候影響評価は大気上端の放射強制力を解析することで行った。ここで、ブラックカーボンの大気上端の放射強制力とは、ブラックカーボンが大気中に放出し、大気中で熱を吸収することで、大気全体がどれだけ温まるかを示した指標であり、ブラックカーボンによる大気上端の放射収支の変化量で定義される。以下では、ブラックカーボン濃度の鉛直・年平均値と大気上端の放射強制力の年平均値を用いて行った船舶起源ブラックカーボンによる気候影響の評価結果を示す。

図 5.1-1 に船舶起源ブラックカーボンの鉛直・年平均濃度、図 5.1-2 に船舶起源ブラックカーボンの放射強制力の年平均値を示した。また図 5.1-3 には、1 月、4 月、7 月、10 月における船舶起源ブラックカーボンの鉛直・月平均濃度を、図 5.1-4 には 1 月、4 月、7 月、10 月における船舶起源ブラックカーボンの放射強制力の月平均値を、図 5.1-5 には、1 月、4 月、7 月、10 月の船舶起源ブラックカーボン鉛直・年平均濃度(図 5.1-3)に対するその放射強制力(図 5.1-4)の割合を示した。

船舶排出起源ブラックカーボン濃度分布図(図 5.1-1)と、船舶起源ブラックカーボンの

排出源分布図 (4章図 4.2-3) を比較すると、大気中のブラックカーボン濃度の高い地域は、排出源のある太平洋航路、大西洋航路、あるいは航行密度の高い地中海などと重なっており、船舶から排出されたブラックカーボンが地理的に遠くまで拡散していないことがわかる。他方で、ロシアの内陸から北極海にかけては船舶起源ブラックカーボンの排出源がほとんどないにもかかわらず、比較的中程度の濃度領域が広がっており、北極海における船舶起源ブラックカーボンの影響を削減するためには、「排出規制は北極圏だけでなく北半球を対象に実施すべき」との BLG17 における米国の主張と相反する結果ではないことがわかる。

船舶排出起源ブラックカーボンの放射強制力は、先述した高濃度領域とは異なり、中緯度の海上よりも、比較的低濃度レベルの低い陸域や高緯度域において高い値を示す傾向にあった。これは、他の地域と比較して、中緯度の海洋表面の反射率は低く、海洋上にブラックカーボンが飛来したとしても、大気上端の放射収支は大きく変化しないためであり、ブラックカーボン濃度と放射強制力の関係が線形ではないことを示している。

放射強制力の海上の値に着目すると、中緯度よりも、高緯度域のオホーツク海やベーリング海、北極海などにおいてその値は高くなり、高緯度域では中緯度よりブラックカーボンの絶対濃度が薄くてもその温暖化効果は大きくなる傾向にあった。これは、高緯度域において反射率の高い海水が被覆しているためである。その確認として、放射強制力の月平均値 (図 5.1-4) や濃度に対する放射強制力の割合 (図 5.1-5) の4月と7月の分布をそれぞれ比較すると、7月には海水に覆われる面積が少なくなるため、オホーツク海やベーリング海において値は低くなり、全体として、4月よりも海上で高い値を示している地域の面積が減少していることがわかる。一方、4月や7月の春・夏季とは異なり、10月や1月の秋・冬季において、北極圏はより海水に覆われる傾向にあるが、放射強制力 (図 5.1-4) やその濃度に対する割合 (図 5.1-5) は小さな値を示している。これは、秋・冬季において、北極圏では日射量が少なくなるためである。そのため、高緯度域において、海水の被覆によりブラックカーボンの濃度が薄くても温暖化効果は大きくなるという傾向は、日射量が少なくなる秋・冬季には当てはまらず、春・夏季の温暖な時期に限定した傾向であることがわかる。海上ほど顕著ではないが、同様の傾向は積雪に覆われた陸域においても見られることから、積雪・雪氷に被覆される頻度が高いといった北極圏の特徴は、春季や夏季の北極圏における大気中ブラックカーボンの局地気象・気候影響においても重要であることがわかる。

計算領域における全排出起源 (陸域+船舶) の放射強制力は $0.354 \text{ (W/m}^2\text{)}$ であり、それに対して、船舶起源の放射強制力は $0.001 \text{ (W/m}^2\text{)}$ であった。

本年度においては、陸域起源からの排出を全ての計算領域に対してゼロと設定することでシミュレーションを行ったが、北極海航路の船舶から排出されたブラックカーボンが北極圏内の気象・気候に与える局所的な影響を評価するためには、北極圏の内側だけの排出をゼロと設定するといった地理別の排出源寄与率解析が必要である。

また大気中のブラックカーボンによる局地気象・気候への影響評価においては、大気上端の放射強制力だけでなく、各高度レベルでの放射強制力の解析を行う必要がある。これ

は、ブラックカーボンが大気上層や下層に位置することで、局地気象・気候に与える影響の規模が異なるためである。たとえば、大気下層の地表付近での加熱効果は、雪氷の融解にも影響する。そのため、どの高さでどの程度の加熱効果があったかを把握することが重要となる。特に、中・低緯度からのブラックカーボンは比較的北極圏の大気上層に輸送される傾向にあり、また北極圏内で発生したものは比較的大気下層に位置する傾向にあるという報告 (Flanner et al., 2012) があることから、北極海航路の船舶から排出された大気中のブラックカーボンによる局地気象・気候への影響をより適切に評価するためには、地理別の排出源寄与率解析に加えて、大気下層での放射強制力に着目した解析が必要である。

Flanner M. G. et al., (2012), Session of Dust and Black Carbon in the Cryosphere in AGU, AGU, Fall Meet. Suppl., C53C at the Fall Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco CA, December 7, 2012.

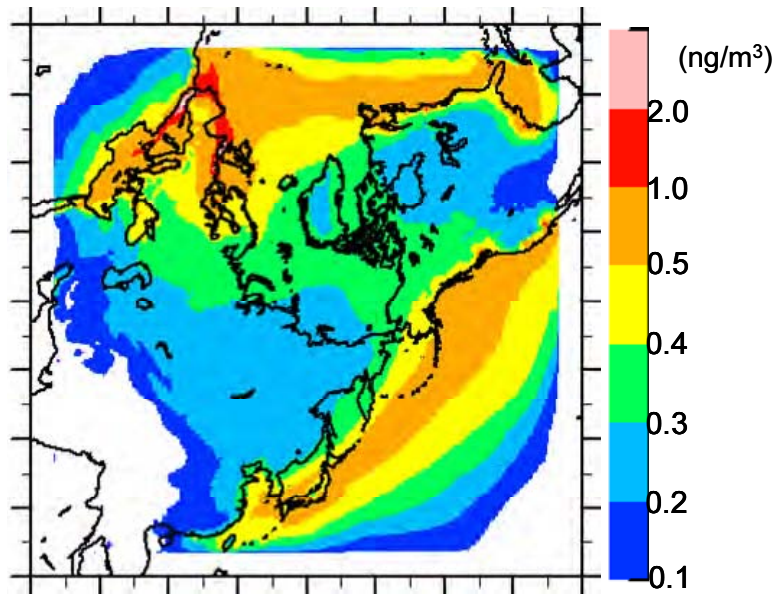


図 5.1-1 全鉛直層にわたって平均した船舶起源ブラックカーボン濃度の年平均値 (ng/m³)

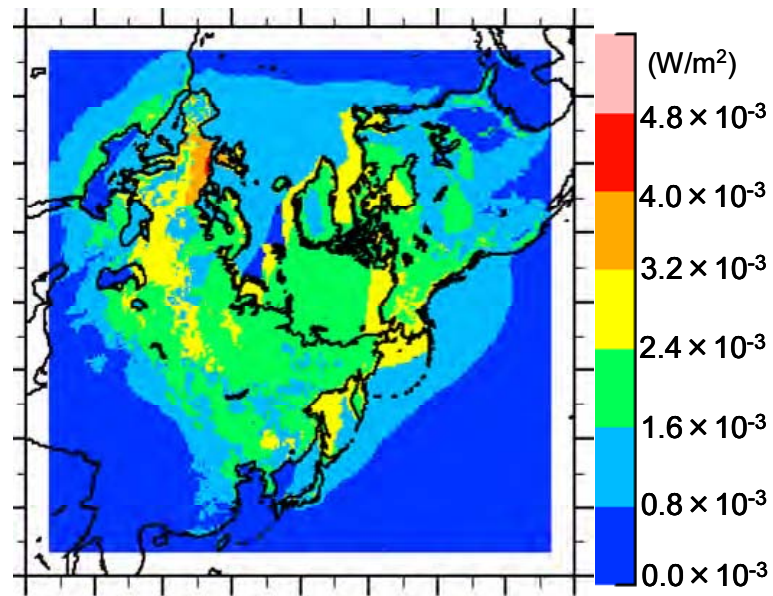


図 5.1-2 船舶起源ブラックカーボン放射強制力の年平均値 (W/m²)

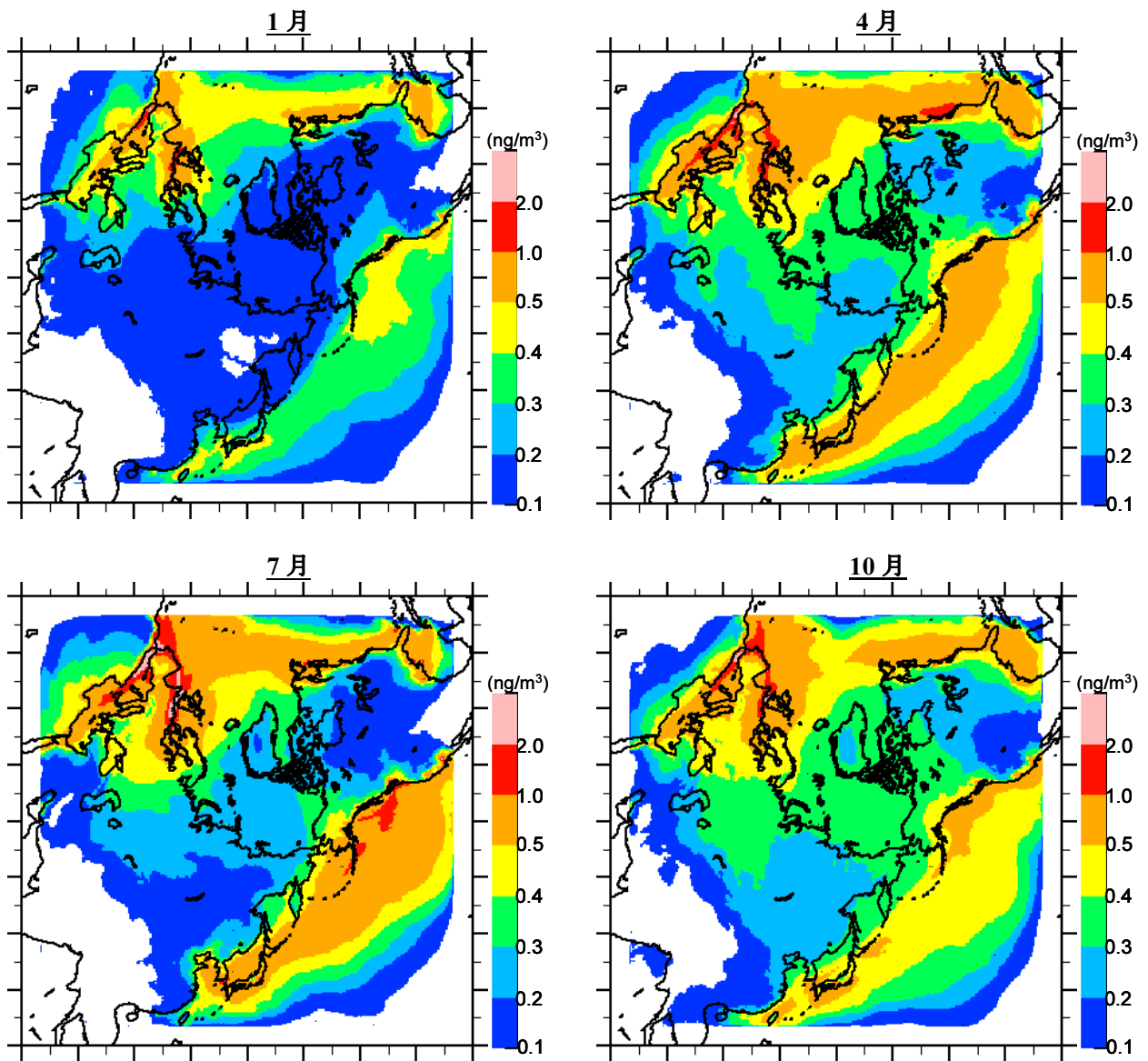


図 5.1-3 全鉛直層にわたって平均した船舶起源ブラックカーボンの月平均濃度 (ng/m^3)
 (左上段：1月,右上段 4月, 左下段：7月,右下段 10月)

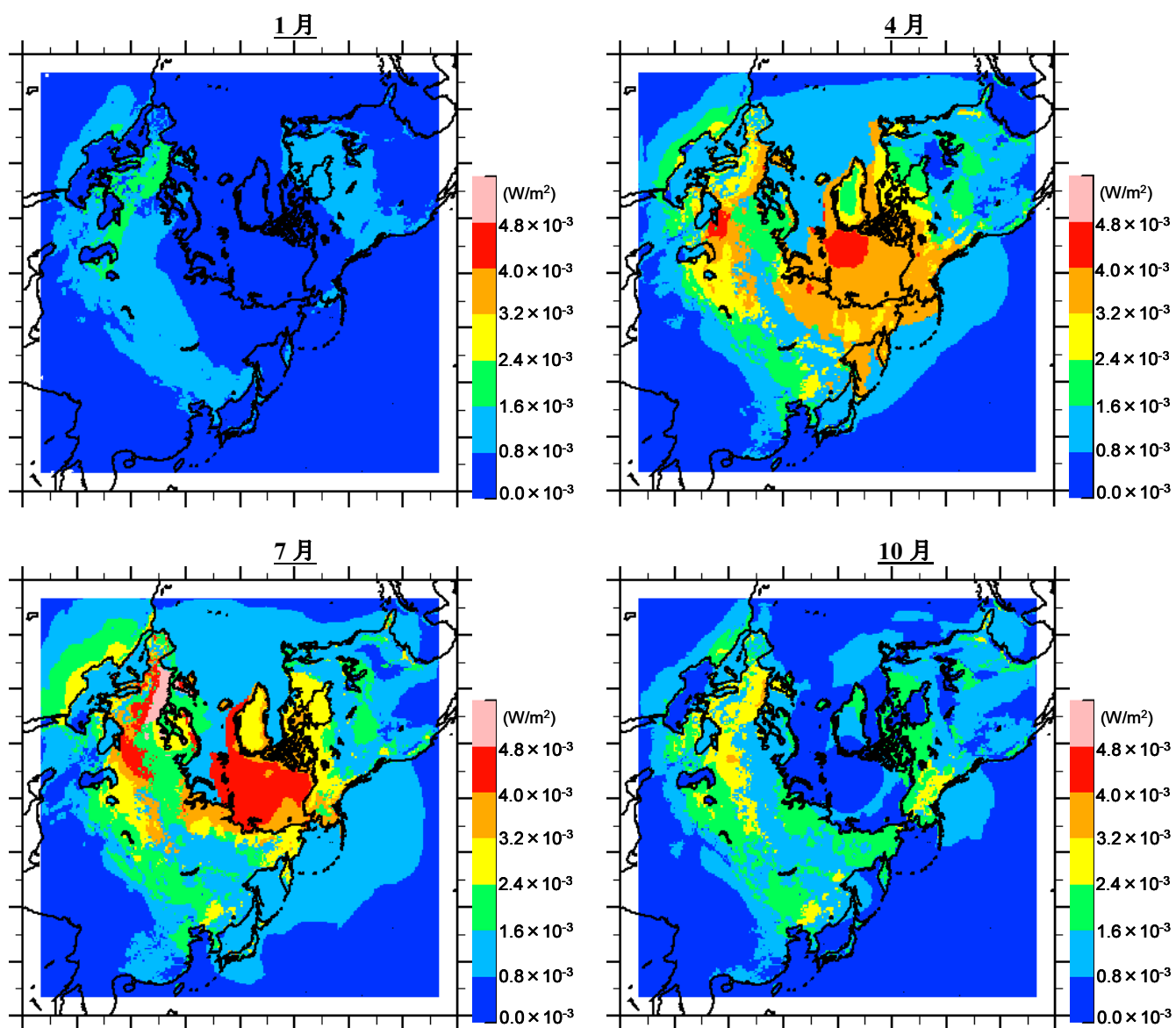


図 5.1-4 船舶起源ブラックカーボンの放射強制力の月平均値 (W/m^2)

(左上段：1月,右上段 4月, 左下段：7月,右下段 10月)

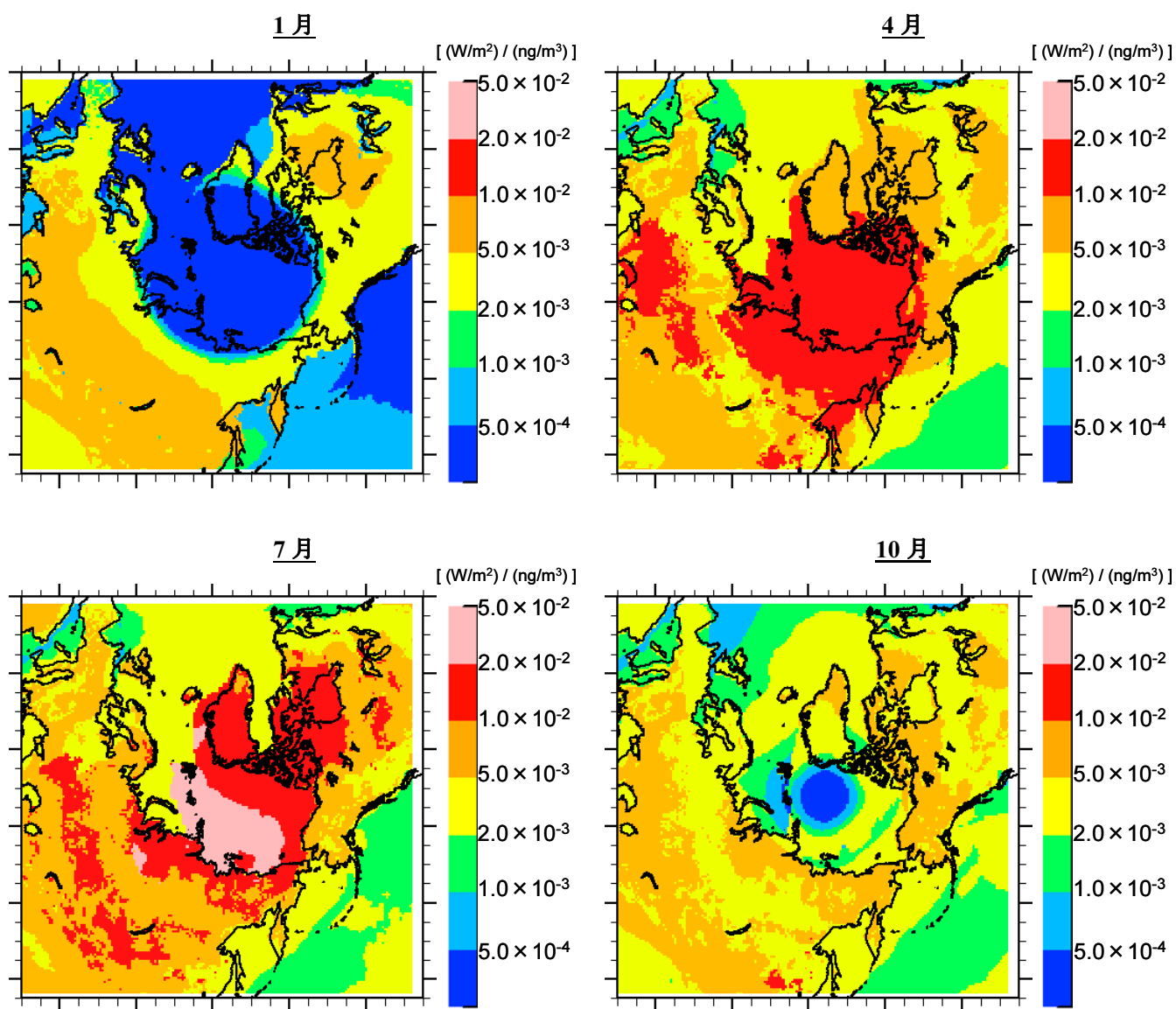


図 5.1-5 船舶起源ブラックカーボン濃度 (鉛直・月平均値, ng/m^3) に対する放射強制力 (月平均値, W/m^2) の割合 $[(\text{W}/\text{m}^2)/(\text{ng}/\text{m}^3)]$

(左上段：1月,右上段4月, 左下段：7月,右下段10月、北極圏及びその近傍領域の拡大図)

5.1.2 ブラックカーボン沈着による雪氷面反射率減少効果

本節では、ブラックカーボン沈着による雪氷面の反射率変化に係る一連のメカニズムを数値モデルに導入することを踏まえて、同メカニズムを扱うモデルについて、文献調査を行い、本事業において導入するモデルについて検討した。まず、現在、同メカニズムを導入している気象・気候モデルの文献を中心に行い、そのモデル化手法について整理した。

(1) ブラックカーボンの沈着効果を取り入れた反射率モデルについての整理

近年北極域の雪氷中に含まれる BC 濃度が無視できない値である可能性が指摘されるようになり (青木ら (2010))、IPCC 第 4 次評価報告書 (2007) においても、全球スケールの気候に影響を与える要因として、積雪中のブラックカーボンによる反射率低下の効果が新たに追加され、その放射強制力は、全球年平均値で $+0.1 \pm 0.1$ (W/m^2) と評価された。これは二酸化炭素による放射強制力が 1.66 ± 0.17 (W/m^2) に比べると 1 桁小さい。しかし、二酸化炭素が全球・通年で温暖化に寄与することに対し、雪氷面上 BC による反射率低下は主に、日射のある北半球の雪氷域に働く効果であり、たとえば春季の北極圏などの領域を限定して評価すれば、より強い影響を持つと考えられる (青木ら (2010))。

IPCC 第 4 次報告書 (2007) の評価計算は Hansen and Nazarenko (2004) と Hansen et al. (2005) によるものであり、彼らは Warren and Wiscombe (1980) の積雪反射率モデルを用いて、ブラックカーボンの雪氷面反射率減少による気候影響の計算を実施した。Warren and Wiscombe (1980) の積雪反射率モデルでは、積雪中のブラックカーボン粒子を、雪粒子 (氷粒子) とブラックカーボン粒子の混在状態として表現し、さらにそれらの混合状態を外部混合と仮定し、大気放射計算と同様の放射計算を積雪層に対して行うことで、ブラックカーボンによる反射率減少を取り扱っている。この積雪中のブラックカーボン粒子を、雪粒子 (氷粒子) とブラックカーボン粒子の混在状態として表現し、さらにその混合状態を仮定し、放射計算によって反射率を導出する手法は以降の積雪反射率モデルにおいても頻繁に適用され、単に雪表面上に沈着したブラックカーボンだけでなく、積雪中に含まれるブラックカーボン全体として、反射率の変化に影響するという考え方は、これ以降の積雪反射率モデルの基礎となっている。

大気中でブラックカーボン粒子に他のエアロゾル成分 (たとえば硫酸ミスト) などが被覆することで、それがレンズのような役割を果たして光を収集し、中のブラックカーボンに吸収されることから、他のエアロゾル成分に被覆されたブラックカーボン粒子の方が、被覆されていないものよりも光の吸収能が高くなると指摘されている (たとえば、Chung et al. (2011))。この概念に基づき、Chylek et al. (1983) では、積雪層内において、ブラックカーボン粒子に被覆している雪粒子中においても同様のレンズ効果が起こると考え、Warren and Wiscombe (1980) のモデルをブラックカーボン粒子と雪粒子の混合状態が内部混合となるように改造を行い、Warren and Wiscombe (1980) にみられた反射率の過大評価傾向が改善されたと報告した。

Warren and Wiscombe (1980) と Chylek et al. (1983) のモデルは 1980 年代前半までに開発されたモデルであるが、現在でもいくつかの気候モデルに実装されており、たとえば、冒頭で述べた Hansen and Nazarenko (2004)、Hansen et al. (2005) がその例である。またこれに加え、

Jacobson (2004)、Koch et al. (2009)、Qian et al. (2009)においても、彼らの積雪反射率モデルと同様の計算手法を適用し、ブラックカーボン沈着による反射率減少効果の評価を行った。

積雪層内では新雪が上層にあり、古い雪が比較的下層にあることから、Warren and Wiscombe (1980) の雪の粒径などが鉛直方向に均一であるという扱いは非現実的であるとの考えに基づき、Warren and Wiscombe (1980) の計算手法に、さらに層構造の概念を導入したのが、Aoki et al. (2011) や Flanner et al. (2007) である。彼らは、積雪中のブラックカーボンの濃度や雪の粒径が異なる積雪層をモデルに導入し、積雪内での不均一性を表現した。さらに Flanner et al. (2007) では、積雪物理モデルを組み込み、積雪状態の変化（雪粒径の変化や融解）においてもモデル化を行っている。これに加えて、Aoki et al. (2011) や Flanner et al. (2007) のモデルの特徴は、親水性と疎水性のブラックカーボン粒子両方を取り扱っている点にある。発生直後のブラックカーボンは疎水性であるが、他のエアロゾル成分と混合することにより、親水性になると考えられている (Bond and Bergstrom, 2006) 。また親水性のブラックカーボンは、他の水溶性エアロゾル成分に被覆される可能性が高く、結果として疎水性よりも高い光吸収能をもつと考えられる。そのため、北極圏のような発生源から離れた地域におけるブラックカーボン粒子は長距離輸送中に他のエアロゾル成分と混合し親水性となり、その結果として、他のエアロゾル成分に被覆されている可能性が高く、光吸収能も高くなっていると考えられるため、疎水性・親水性の取り扱い、北極圏のブラックカーボン沈着による反射率減少効果のモデル化においても重要であると考えられる。

最後に、Yasunari et al (2011) では、Warren and Wiscombe (1980) が積雪中のブラックカーボンを、雪粒子とブラックカーボン粒子が混在している状態として考えていることに対して、積雪中のブラックカーボンを、ブラックカーボンが一様に分布している氷板と考えて放射計算を単純化しており、Warren and Wiscombe (1980) とは異なる概念の積雪反射率モデルを開発している。彼らのモデルでは、3層構想の積雪層を考慮しており、疎水性・親水性ブラックカーボンも取り扱っている。さらに、Flanner et al. (2007) 同様に、積雪物理モデルと結合しているため、積雪状態の変化についてもモデル計算されている。

以上、上述の積雪反射率モデルを整理すると、Yasunari et al. (2011) を除く、全てのモデルが Warren and Wiscombe (1980) のモデル、もしくは彼らのモデルと同様の計算手法を用いて計算を行っている。Chylek et al. (1983) では、彼らのモデルの雪粒子とブラックカーボン粒子の混合状態の取り扱いについて改良を行い（内部混合）、また Aoki et al. (2011) や Flanner et al. (2007) は彼らと同様の計算手法を適用し、さらに層構造と疎水性・親水性ブラックカーボンの扱いを導入した。一方、Yasunari et al (2011)では、積雪中のブラックカーボンをブラックカーボンが一様に分布している氷板と単純化して考えてモデル化を行い、層構造や親水性・疎水性ブラックカーボンの取り扱いを加味している。また Flanner et al. (2007) と Yasunari et al (2011) は積雪物理モデルとの結合により、積雪自身の変化についてもモデル計算を行っている。

(2) ブラックカーボンの沈着効果を取り入れた反射率モデルのモデル間比較

ここでは、前節で整理した積雪反射率モデルのモデル間比較を行った。モデル間比較は、

観測の再現性、モデル実行に必要な入力パラメータについて行うこととした。表 5.1-1に Warren and Wiscombe (1980)、Chylek et al. (1983)、Flanner et al. (2007)、Yasunari et al. (2011)、Aoki et al. (2011) のモデル間比較の結果を示す。なお Flanner et al. (2007) については、反射率観測との比較結果が報告されていないため、今回のモデル間比較の議論には含めないこととした。

モデル入力パラメータについて比較した結果、どのモデルも同じ入力パラメータが必要とされている。ただし、Aoki et al. (2011)、Yasunari et al. (2011) では、層構造を導入しているので、考慮している層数に応じて計算に必要となる積雪物理量のパラメータは増加する。Aoki et al. (2011) と比較すると、Yasunari et al. (2011) は積雪物理モデルと結合していることから、積雪物理量で与えるパラメータは積雪層に含まれるブラックカーボンの質量混合比だけである。また物性値に関しても、積雪中におけるブラックカーボンの扱い方が異なるため、少なくなっている。

表 5.1-1 ブラックカーボンの沈着効果を取り入れた反射率モデルの間比較

	Warren & Wiscombe (1980)	Chylek et al. (1983)	Flanner et al. (2007)	Yasunari et al. (2011)	Aoki et al. (2011)
モデル特徴	<ul style="list-style-type: none"> 積雪中のBCを雪粒子とBC粒子の混在状態として表現 雪粒子とBCの外部混合を仮定 	<ul style="list-style-type: none"> 積雪中のBCを雪粒子とBC粒子の混在状態として表現 雪粒子とBCの内部混合を仮定 	<ul style="list-style-type: none"> 積雪中のBCを雪粒子とBC粒子の混在状態として表現 雪粒子とBCの外部・内部混合を考慮 層構造を導入 (層数: 5層) 親水性・疎水性BCを扱う 波長域を5波長 (可視1、近赤外: 4) にわけ、各波長の反射率を計算 氷に被覆されたBC粒子の吸収を加味 融解水によるBCの積雪層移動を加味 	<ul style="list-style-type: none"> 積雪中のBCを、BC粒子を含む氷板と空気層の重なり表現 層構造を導入 (層数: 3層) 親水性・疎水性BCを扱う 	<ul style="list-style-type: none"> 積雪中のBCを雪粒子とBC粒子の混在状態として表現 雪粒子とBCの外部混合を仮定 層構造を導入 (層数: 可変。論文中では1-5層) 親水性・疎水性BCを扱う 波長域をいくつかの波長バンドにわけ、バンドを代表する幾つかの波長(フチャンネル)の反射率を計算 (バンド数: 可変。論文中では、可視域、近赤外域で1バンドから5バンドまで)
物性値	<ul style="list-style-type: none"> 氷の密度 (文献値) 氷の複素屈折率 (文献値) BCの密度 (文献値) BCの複素屈折率 (文献値) BCの粒径分布 (観測値) 雪の平均粒径 (観測から算出) 積雪(水当)量 (観測値) - - BCの質量混合比 (観測値) 	<ul style="list-style-type: none"> 氷の密度 (文献値) 氷の複素屈折率 (文献値) BCの密度 (文献値) BCの複素屈折率 (文献値) BCの粒径分布 (単純な分布を仮定) 雪の粒径 (経験式から算出。雪粒成長も考慮) 積雪(水当)量 (積雪物理モデルで算出) 積雪層温度 (積雪物理モデルで算出) 融解水フラックス (積雪物理モデルで算出) 外部/内部混合BCの質量混合比 (輸送モデルの乾性/湿性沈着から) 太陽天頂角 直達・散乱比 日射量 積雪層下の反射率 	<ul style="list-style-type: none"> 氷の密度 (文献値) 氷の複素屈折率 (文献値) BCの質量吸収係数 (文献値から算出) - 乾燥積雪密度 (積雪物理モデルで算出) 積雪深 (積雪物理モデルで算出) - - BCの質量混合比 (観測値) 太陽天頂角 直達・散乱比 日射量 積雪層下の反射率 	<ul style="list-style-type: none"> 氷の密度 (文献値) 氷の複素屈折率 (文献値) BCの密度 (文献値) BCの複素屈折率 (文献値) BCの粒径分布 (単純な分布を仮定) 雪の有効粒径 (観測値) 積雪(水当)量 (観測値) 積雪層温度 (観測値) - BCの質量混合比 (観測値) 太陽天頂角 直達・散乱比 日射量 積雪層下の反射率 	<ul style="list-style-type: none"> 氷の密度 (文献値) 氷の複素屈折率 (文献値) BCの密度 (文献値) BCの複素屈折率 (文献値) BCの粒径分布 (単純な分布を仮定) 雪の有効粒径 (観測値) 積雪(水当)量 (観測値) 積雪層温度 (観測値) - BCの質量混合比 (観測値) 太陽天頂角 直達・散乱比 日射量 積雪層下の反射率
積雪物理量	-	-	-	-	-
放射条件	太陽天頂角 直達・散乱比 日射量 積雪層下の反射率	太陽天頂角 直達・散乱比 日射量 積雪層下の反射率	太陽天頂角 直達・散乱比 日射量 積雪層下の反射率	太陽天頂角 直達・散乱比 日射量 積雪層下の反射率	太陽天頂角 直達・散乱比 日射量 積雪層下の反射率
観測対象	北極 (Arctic Ice Island T3)、南極観測基地	米国ワシントン州カスケード山脈、北極 (Arctic Ice Island T3)、南極観測基地	南極観測基地	2003年-2004年の冬季、札幌	2007年-2009年の冬季、札幌
放射率観測との比較結果	<ul style="list-style-type: none"> 複素屈折率の波長依存性未考慮のため、放射率のスペクトルカーブの形に対して観測との不一致が見られる。 放射率過大評価傾向を報告 	<ul style="list-style-type: none"> BCを含まない場合の比較は観測データをよく再現 BCを含んだ場合の比較は論文中には示されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> BCを含まない場合の比較は観測データをよく再現 積雪物理モデル入力カーボンの誤差などにより融雪期に不一致が見られる。 RMSEは0.6程度 (全短波に対して) 	<ul style="list-style-type: none"> 時間変化をよく再現 モデル入力データの誤差、モデル境界の取り方によって観測との不一致が(主に可視域)。 RMSEは0.6以下 (短波に対して) 相関係数は0.92以上 (短波に対して) 	<ul style="list-style-type: none"> 時間変化をよく再現 モデル境界の取り方によって観測との不一致が(主に可視域)。 RMSEは0.6以下 (短波に対して) 相関係数は0.92以上 (短波に対して)

図 5.1-6から図 5.1-9は、それぞれ Warren and Wiscombe (1980) 、Chylek et al. (1983) 、Aoki et al. (2011)、Yasunari et al. (2011) の反射率観測との比較結果をそれぞれ抜粋したものである。また各モデルの観測比較結果の詳細については表 5.1-1にまとめた。

再現性の観点からは、どのモデルも観測の再現性は良いように見える。しかし前述した様に Warren and Wiscombe (1980) のモデルは、観測された反射率を過大評価する傾向にあることが報告されており、Chylek et al. (1983) の内部混合状態の改良によって、改善が見られたとの報告がある。

Warren and Wiscombe (1980) や Chylek et al. (1983) の観測比較は、数日の事例に対して行われていることに対して、Aoki et al. (2011)、Yasunari et al. (2011) では、冬季間の比較結果を示しており、両モデルとも、時間変化をよく再現している。特に Aoki et al. (2011) では反射率の急激な増減を再現しており、観測とモデルの相関係数も高い (表 5.1-1)。

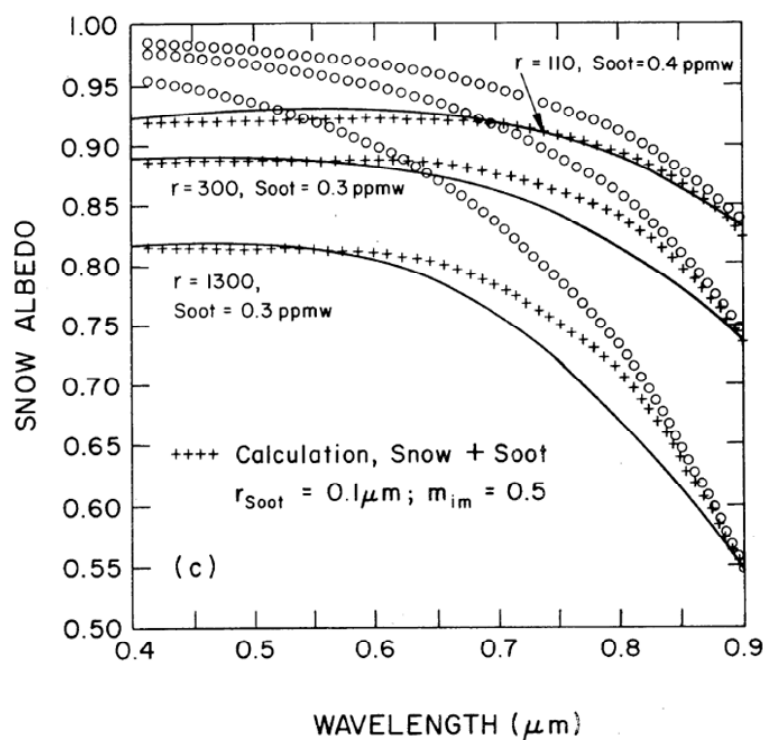


図 5.1-6 Arctic Ice Island T-3における異なる積雪状態 (雪粒径=110-1300 μm と BC濃度=0.3-0.4ppmw) での反射率観測値 (実線) と反射率計算値 (BC を含む積雪層: 十字、BC を含まない積雪層: ○) Warren and Wiscombe(1980)から抜粋。

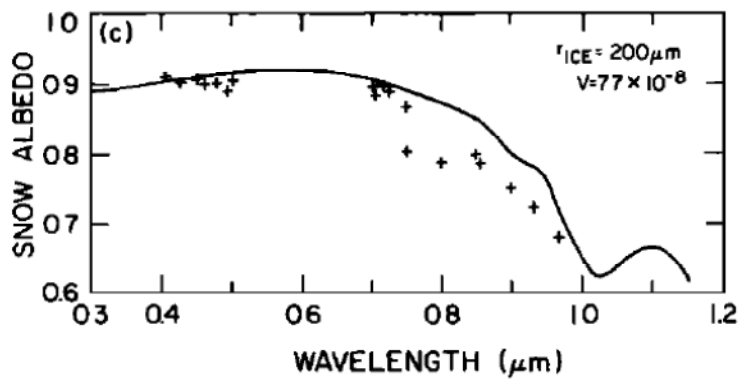


図 5.1-7 米国カスケード山脈、湿雪時の反射率観測値 (十字) と反射率計算値 (実線) (ブラックカーボンの体積濃度 $=7.7 \times 10^{-8}$ 、雪粒径 $=200 \mu\text{m}$) Chylek et al. (1983) から抜粋。

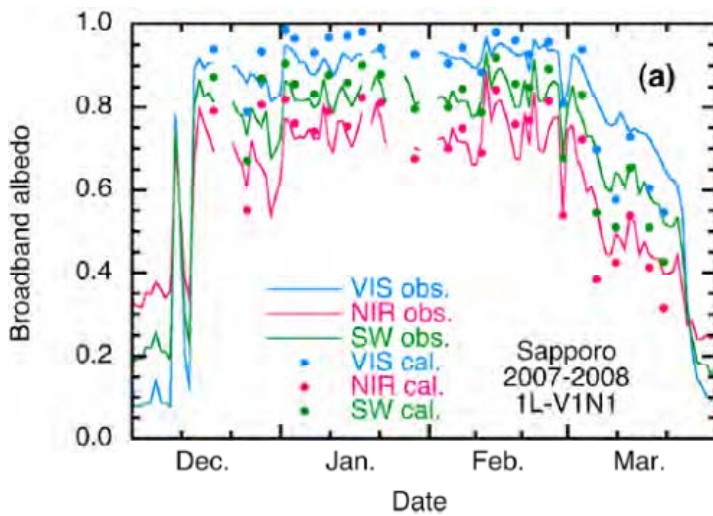


図 5.1-8 冬季札幌の反射率観測値 (赤実線：可視、青実線：近赤外、緑実線：可視+近赤外) と、反射率計算値 (赤点：可視、青点：近赤外、緑点：可視+近赤外) Aoki et al. (2011) から抜粋

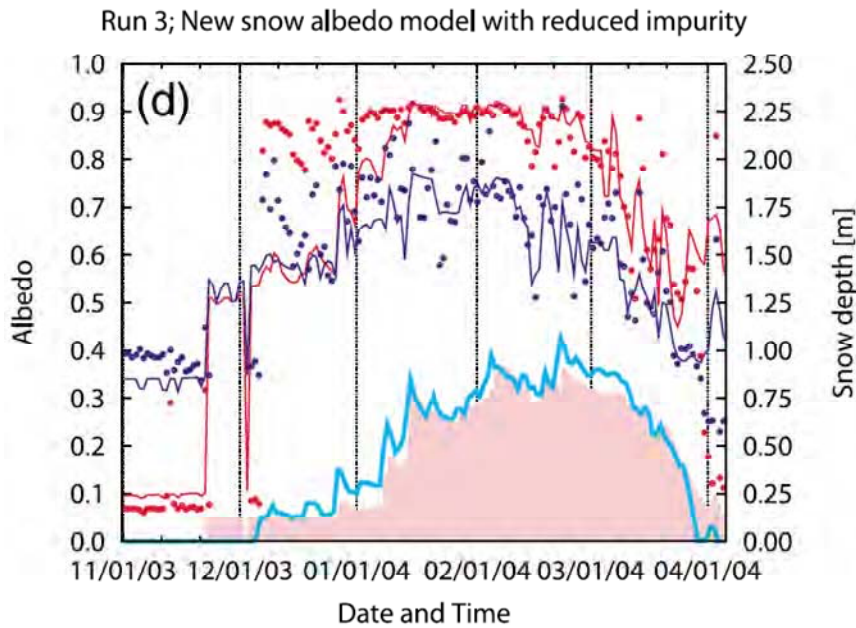


図 5.1-9 冬季札幌の反射率観測値 (赤点：可視、青点：近赤外) 及び積雪深 (水色の実線) と、反射率計算値 (赤線：可視、青線：近赤外) 及び積雪深計算値 (桃色の領域) ただし、比較対象期間は1月14日以降 (積雪がないため) Yasunari et al. (2011) から抜粋

(3) 適用するモデルの検討

前節でのブラックカーボンの沈着効果を取り入れた反射率モデルのモデル間比較結果を受けて、本節では、本事業において導入する反射率モデルの検討を行った。

前節でのモデル間比較においてあげられたモデルにおいて、入力パラメータの観点から検討すると、Yasunari et al. (2011) のモデルでは、モデル実行についての入力パラメータの種類が少ないことが特徴として挙げられ、また結合している積雪物理モデルの入力パラメータについても一般的な気象モデルの出力となっている気象要素 (気温、降雪量、下向き短波長放射・長波長放射、風速、相対湿度) であることから、モデル導入を行う上では、より扱いやすいように考えられる。しかし、観測の再現性の観点から考えると、Aoki et al. (2011) のモデルの反射率の時間変化や絶対量の再現性は非常に高く、導入するモデルとして、適切であると考えられる。これに加えて、Aoki et al. (2011) では、全球気象・気候モデルなどでの利用を想定して開発されており、ルックアップテーブルの利用による計算時間の短縮化を図るだけでなく、モデル計算において、考慮する積雪層数や、放射計算の対象波長領域をいくつかのサブバンドに分けることが可能で、計算時間が最も短い設定となる1層1バンド (可視領域、近赤外領域に対して) の設定においても高い再現性を保っていることから、その実用性も十分に高いと考えられる。

以上のことをふまえると、今回、調査を行ったモデルにおいては、Aoki et al. (2011) のモデルが実用性・再現性の面から、導入するモデルとして最も適切であると考えられる。

しかし、モデル間比較を行ったモデルだけでなく、今回調査したどのモデルにおいても、輸

送モデルによって出力された沈着量を、どのように積雪層中のブラックカーボン濃度として与えるか (配分するか) についての明確な記載がなく、この点本モデルへの導入時の課題となる。

(4) 調査した文献一覧

Aoki, Te., Ta. Aoki, M. Fukabori and A. Uchiyama, 1999: Numerical simulation of the atmospheric effects on snow albedo with a multiple scattering radiative transfer model for the atmosphere-snow system. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 77, 595-614.

Aoki, Te., Ta. Aoki, M. Fukabori, A. Hachikubo, Y. Tachibana and F. Nishio, 2000: Effects of snow physical parameters on spectral albedo and bidirectional reflectance of snow surface. *J. Geophys. Res.*, 105, 10219-10236

Aoki, T., Kuchiki, K., Niwano, M., Kodama, Y., Hosaka, M., and Tanaka, T.: Physically based snow albedo model for calculating broadband albedos and the solar heating profile in snowpack for general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 116, D11114, doi:10.1029/2010JD015507, 2011. 2059, 2077

Bond, T. C., and R. W. Bergstrom (2006), Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review, *Aerosol Sci. Technol.*, 40, 27–67, doi:10.1080/02786820500421521. Brandt, R. E., and S. G. Warren (1993), Solar heating rates and temperature

Chung, C. E. et al. Effect of internal mixture on black carbon radiative forcing. *Tellus B* 2012, 64, 10925, DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.10925

Chylek, P., V. Ramaswamy, and V. Srivastava (1983), Albedo of soot-contaminated snow, *J. Geophys. Res.*, 88, 10,837– 10,843.

Dunkle, R.V. and J.T. Bevens, 1956: An approximate analysis of the solar reflectance and transmittance of a snow cover. *J. Meteor.*, 13, 212-216

Flanner, M. G., C. S. Zender, J. T. Randerson, and P. J. Rasch (2007), Present - day climate forcing and response from black carbon in snow, *J. Geophys. Res.*, 112, D11202, doi:10.1029/2006JD008003.

Hansen, J., and L. Nazarenko (2004), Soot climate forcing via snow and ice albedos, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 101, 423–428, doi:10.1073/pnas.2237157100.

Hansen, J. et al. (2005) : Efficacy of Climate Forcings, *J. Geophys. Res.*, 110, D18104, doi:10.1029/2005JD005776, 2005.

IPCC WGI 2007 Climate Change 2007 The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA.

Jacobson, M. Z. (2004), Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity, *J. Geophys. Res.*, 109, D21201, doi:10.1029/2004JD004945.

Koch, D., S. Menon, A. Del Genio, R. Ruedy, I. Alienov, and G. A. Schmidt (2009), Distinguishing aerosol impacts on climate over the past century, *J. Clim.*, 22(10), 2659–2677, doi:10.1175/2008JCLI2573.1.

Qian, Y., W. I. Gustafson Jr., L. R. Leung, and S. J. Ghan (2009), Effects of soot - induced snow albedo change on snowpack and hydrological cycle in western United States based on Weather Research and Forecasting chemistry and regional climate simulations, *J. Geophys. Res.*, 114, D03108, doi:10.1029/2008JD011039.

Yasunari, T. J., R. D. Koster, K. - M. Lau, T. Aoki, Y. C. Sud, T. Yamazaki, H. Motoyoshi, and Y. Kodama (2011), Influence of dust and black carbon on the snow albedo in the NASA GEOS - 5 land surface model, *J. Geophys. Res.*, 116, D02210, doi:10.1029/2010JD014861.

Warren, S. G., and W. J. Wiscombe (1980), A model for the spectral albedo of snow, II: Snow containing atmospheric aerosols, *J. Atmos. Sci.*, 37, 2734–2745, doi:10.1175/1520-0469(1980)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2.

青木輝夫, 2010: 極域における雪氷中の光吸収性エアロゾルとその光学特性, エアロゾル研究, 25, 240-246.

青木輝夫, 田中泰宙, 2008: 大気エアロゾルの沈着が積雪アルベドに与える影響, 天気, 55, 538-547.

5.2 生態系影響評価

本節では、極海航路における船舶排出黒煙の生態系影響評価を行うための事前解析として、粒子状物質の含有成分（ブラックカーボンや金属類など）の曝露量と生態系への影響の規模を関連付ける研究について文献調査を行った。生態系への影響については、曝露量（主には沈着量）とリスクの関係を中心に整理を行ったが、定量的にそれが示されている事例は限られているため、定性的に影響を示唆しているものも含め、情報を整理した。

5.2.1 船舶から排出されるブラックカーボンの特性

ここでは、船舶から排出されるブラックカーボンの特性について、海洋政策研究財団（2008）による「平成 19 年度 船舶起源の粒子状物質（PM）の環境影響に関する調査研究報告書」から紹介する。

大気中の PM の起源は様々であり、発生源から区分すると、燃料などが燃焼する過程で排出されるばいじんのように人為起源のものと、土壌や海塩粒子のような自然起源のものに分けられる。また、生成機構から区分すると、粒子として大気中に直接排出される一次粒子と、ガス状物質として排出された SO_x、NO_x、VOC から大気中の光化学反応などにより生成される二次粒子に分類される。

本調査の対象となる船舶起源のブラックカーボンについて整理をすると、まず燃料が燃焼する過程から排ガスとして排出される一次粒子として EC、SOF 分さらにサルフェート分が挙げられる。ディーゼル機関では、点火機関の混合気内を火炎が伝播する爆発燃焼に比較して、燃焼速度は緩慢である。特に船用機関においては、高温・高圧空気内に低質で高粘度の燃料を噴射するため、燃焼そのものの不均一性は避けられず、未燃物由来の粒子状物質発生が避けられない。また、燃料中硫黄分起因あるいは潤滑油起因の PM 発生についても、たとえば自動車用高速ディーゼル機関に比較してその影響が大きく、現時点ではその対策は技術的に大きな困難をとまなう。

排出係数の項で述べるように、希釈法などで測定を行った場合、通常二次粒子として扱われる SO_x の一部（最大 8%程度）がテールエンドにおいてもサルフェート化していることが知られている。また、一次粒子におけるサルフェート量は、燃料中硫黄分との相関が大きく、MRPOL73/78 条約附属書 VI において、燃料中硫黄分の制限が PM 排出規制として整理されている。

ディーゼル機関内における粒子発生機構の概略を図 5.2-1 に示した。

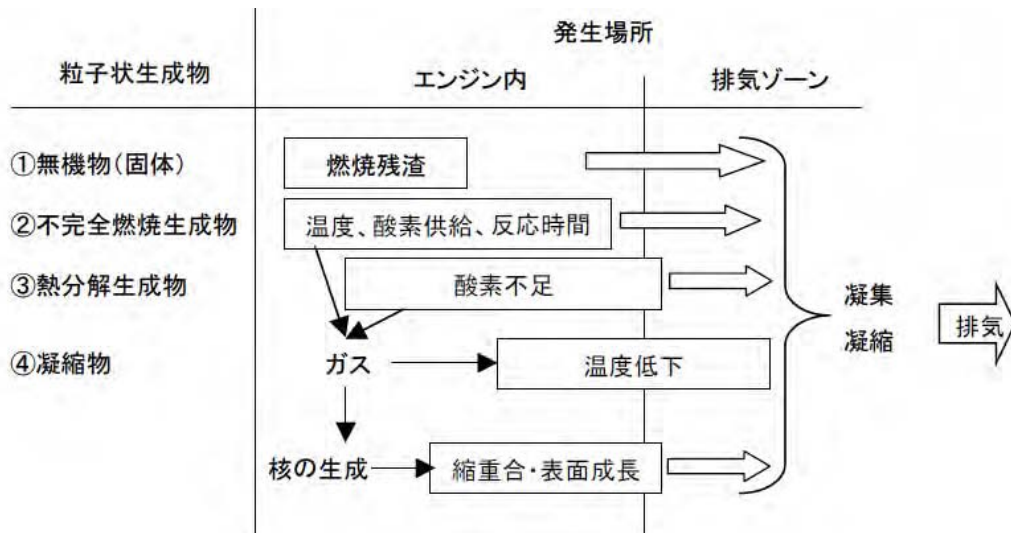


図 5.2-1 ディーゼルエンジンからの粒子発生状況

ここで、図中①の「無機物 (固体)」とは燃料中に含まれる酸化ケイ素、酸化アルミ、その他金属類の無機物および未燃炭素を指す。仮に燃料が理論上の完全燃焼が行われたとしても無機物としての固形 PM は発生する。また、ごく一部の燃料中重質分も十分な酸化反応時間が得られず残渣として残る。

次に、②の不完全燃焼生成物とは、燃焼時、酸素供給が不十分なため、部分的に酸化されたものである。③の熱分解生成物とは、酸化反応の前に他の領域での燃焼による輝炎からの輻射熱により、分解又は重合したもの。重質油のように炭素数の多い炭化水素においては、この過程によりかご状のセノスファー粒子が生じることも知られている。

②および③は反応面からの区別が上記のようにできるが、機関内においてはその区別は困難であり、またこれらの未燃分および熱分解生成物がスワールなどの混合により、酸素と出会い燃焼する経路も考えられている。

④凝縮物としては、高温でガス状であった物質が、エンジンからの排気過程において冷却により、凝縮・粒子化する。またエンジン内の酸素欠乏領域において、ガス状物質が縮重合などの反応により高沸点物質となり、凝縮・粒子化する。船舶のディーゼル機関においては、前者の過程として、SOx のサルフェートと一部ガス化した潤滑油の再液化が考えられている。

最後に、残った SOx 及び NOx が大気中で粒子化する可能性がある。更に、直接の燃焼起源でない排出量としてスートブロー時に排出するブラックカーボンが挙げられる。

以上の考察から、PM 一次粒子中に含まれるサルフェート分は凝縮・粒子化しており、その粒径は小さい範囲内に分布しており、大気中で粒子化する二次粒子と大気中の挙動については同様に扱うことができると考えられる。他方、残りの一次粒子については、重質油の燃焼から生じる場合、かご状のセノスファー粒子が主体となっていることから、比較的粒径の大きい範囲内に分布していると考えられる。

なお、参考として船舶排ガス中の重金属及び PAH の分析結果を、表 5.2-1 及び表 5.2-2 に示す。

表 5.2-1 船舶排ガス中 PM 中の重金属分析結果

項目		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	RFO A 重油	
燃料 性状	種類	RFO	RFO	RFO	RFO	A 重油	A 重油	平均	平均
	硫黄分	2.0	2.0	3.2	2.4	0.6	0.3	2.4	0.45
	密度	0.9845	0.9902	0.9726	1.0086	0.8678	0.8731	0.9890	0.8705
	動粘度	376.4	200	335	441.6	2.359	2.472	338.3	2.4
炭素 成分	有機炭素 OC	22.9	7.4	15.2	16.9	29.8	8.5	15.6	19.1
	元素状炭素 EC	17.1	39.1	16.6	30.8	13.9	30.1	25.9	22.0
	全炭素 TC	40.0	46.5	31.8	47.8	43.7	38.6	41.5	41.2
	元素状炭素/全炭素 EC/TC	42.8	84.0	52.2	64.5	31.9	77.9	62.4	53.5
イオン 成分	硫酸イオン SO ₄ ²⁻	14.9	2.7	42.4	22.2	5.1	20.5	20.6	12.8
	硝酸イオン NO ₃ ⁻	<1.0	0.9	<1.4	<1.0	<0.5	<3.0	1.1	1.8
	塩素イオン Cl ⁻	<0.2	0.1	<0.2	<0.2	<0.1	<0.5	0.2	0.3
	アンモニウムイオン NH ₄ ⁺	<0.1	<0.0	<0.2	<0.1	<0.1	<0.4	0.1	0.2
	ナトリウムイオン Na ⁺	0.4	0.1	0.7	1.0	0.1	2.1	0.5	1.1
	カルシウムイオン Ca ²⁺	<0.7	0.1	<0.9	0.7	0.4	2.0	0.6	1.2
	カリウムイオン K ⁺	<0.2	<0.3	<0.2	<0.9	<1.3	<5.4	0.4	3.4
金属類	ナトリウム Na	0.492	0.022	0.307	0.286	<0.035	0.873	0.277	0.454
	アルミニウム Al	<0.410	<0.060	<0.542	<0.390	<0.216	<1.190	0.350	0.703
	カリウム K	<0.027	<0.004	<0.036	<0.026	<0.014	<0.079	0.023	0.047
	カルシウム Ca	<0.574	0.109	<0.758	0.624	1.802	5.159	0.516	3.481
	バナジウム V	4.645	0.179	3.069	2.471	0.008	0.035	2.591	0.021
	マンガン Mn	0.004	0.001	0.005	0.004	<0.001	0.004	0.003	0.002
	鉄 Fe	0.519	0.052	0.993	0.403	<0.048	0.306	0.492	0.177
	ニッケル Ni	1.776	0.091	1.101	0.949	<0.037	<0.202	0.979	0.120
	亜鉛 Zn	0.033	0.004	0.031	0.027	0.151	0.131	0.024	0.141
	ヒ素 As	0.001	0.000	0.001	0.001	<0.000	<0.001	0.001	0.000
	セレン Se	0.005	0.000	0.001	0.002	<0.000	<0.000	0.002	0.000
	タングステン W	<0.003	<0.000	<0.003	<0.002	<0.001	<0.008	0.002	0.004

表 5.2-2 船舶排ガス中 PM 中の PAH 分析結果

成分	No.2	No.3	No.4	No.5
ナフタレン	<0.1	<0.7	<0.5	<0.3
アセナフチレン	0.2	<1.4	<1.0	<0.6
アセナフテン	0.4	<0.7	0.5	0.9
フルオレン	3.8	4.1	3.2	4.1
フェナントレン	3.1	3.3	<0.5	61
アントラセン	0.6	<1.4	<1.0	3.0
フルオランテン	3.5	6.0	<1.0	30
ピレン	5.5	3.6	<1.0	40
ベンズ[a]アントラセン	6.3	2.9	<2.1	9.1
クリセン	8.8	5.5	2.3	9.4
ベンゾ[b]フルオランテン	8.6	3.4	2.4	4.7
ベンゾ[k]フルオランテン	3.0	1.1	0.7	1.6
ベンゾ[a]ピレン	4.1	1.4	<0.5	1.1
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	7.4	2.9	<2.1	2.8
ジベンズ[a,h]アントラセン	3.4	<2.2	<1.6	<0.9
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	10	3.4	<1.0	2.7

注) 1. No.2~No.4 は RFO 使用船、No.5 は A 重油使用船である。

2. 値は PM 中の PAHs 濃度を示す。

5.2.2 粒子状物質の植物への影響

樹木や栽培植物の葉面に粒子状物質が付着していることは、走査型電子顕微鏡による観察などから指摘されており、同時に観察されるクチクラ表層ワックスの構造の物理的破壊(摩滅)や変質、図 5.2-2に示すような気孔の閉塞や機能不全等の原因として議論されてきた(例えば、Smith 1977; Grill and Golob 1983; Crossley and Fowler 1986; Sase et al. 1998; Burkhardt 2010)。

クチクラ表層ワックスは、葉面からの水分損失、外部からの病原菌の侵入、有害な紫外線等を防ぐ防御壁として重要な役割を果たしており、その構造の破壊・変質や流亡は、植物の生理活性に悪影響を与えることが指摘されている(Turnen and Hutunnen 1990)。

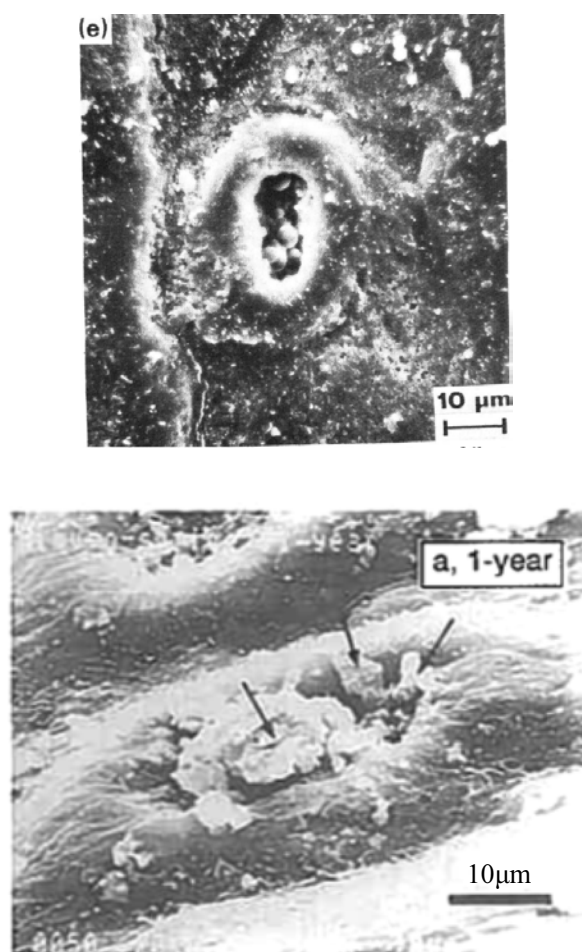


図 5.2-2 英国ウェスト・ヨークシャーで採取したスコットランドマツの2-3年葉(上: Crossley and Fowler 1986)、及び埼玉県内で採取したスギ1年葉(下: Sase et al. 1998)の気孔に詰まった粒子状物質の走査型電子顕微鏡観察像

Sase et al. (1998) は、クチクラ表層ワックスの量が少ないほどクチクラ蒸散速度は増大し、スギ枯損が見られる埼玉県平野部のクチクラ蒸散速度が他の地域より大きいことから、ワックスの変質や気孔の障害等を示唆している (図 5.2-3)。また、粒子状物質による気孔の閉塞は、気孔が完全に閉じないことにより、水分損失の増大を促進させることが指摘されている (Crossley & Fowler 1986; Takamatsu et al., 2001a)。

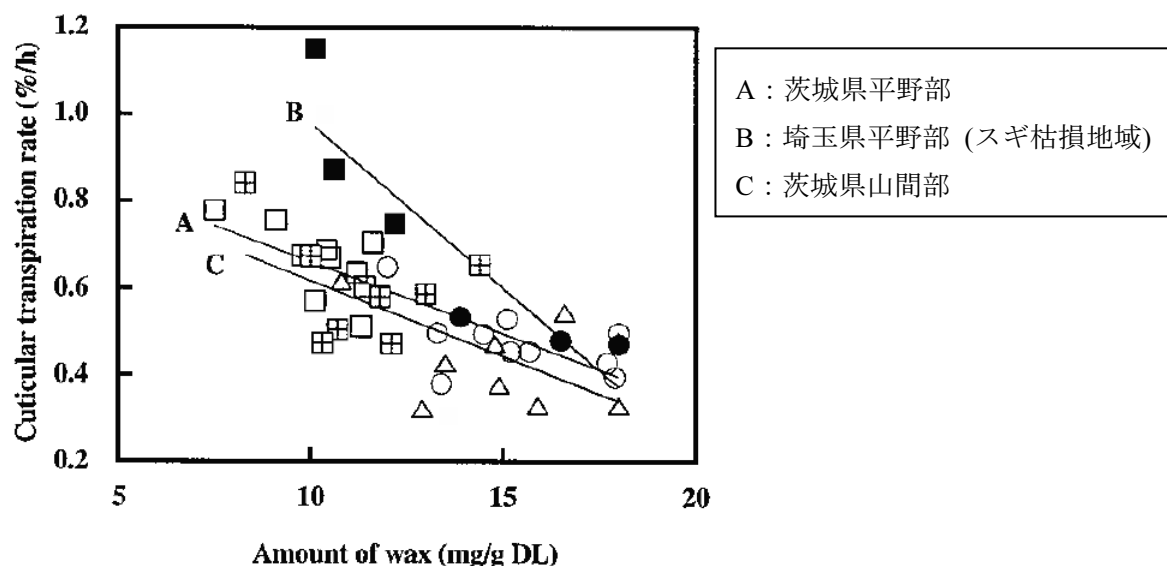


図 5.2-3 関東地方のスギ葉のクチクラ表層ワックス量とクチクラ蒸散速度との関係 (Sase et al. 1998)

ここまでで紹介した、走査型電子顕微鏡による観察などで指摘された粒子状物質の影響は、ほとんどの場合、粒径や成分についてはなくバルクの粒子状物質として論じられている。粒径あるいは成分と植物への影響について、明確な関係を示した事例は限られているが、以下にその主要なものについて情報を整理した。

① ブラックカーボン

ブラックカーボンの植物への直接的影響については唯一、Hirano et al. (1995) によって報告されている事例のみと考えられる。ソラマメを用いたブラックカーボン ($0.03 - 0.20 \mu\text{m}$) の曝露実験によると、ブラックカーボンの沈着量が多いほど葉温が上昇し、光合成に用いられる光子量 (光合成光量子束密度 : photosynthetic photon flux density, PPFD) が多いほど、その影響が大きくなることを示し、結果として、蒸散量が多くなることを報告している。

明色の土壌粒子は、葉温にはほとんど影響しなかった。一方で、Hirano et al. (1995) は、土壌粒子を大量に曝露した場合においては、日陰効果 (shading effect) で光合成量が低下することも併せて報告しており、その効果は粒径が小さい粒子ほど影響が強いとしている。

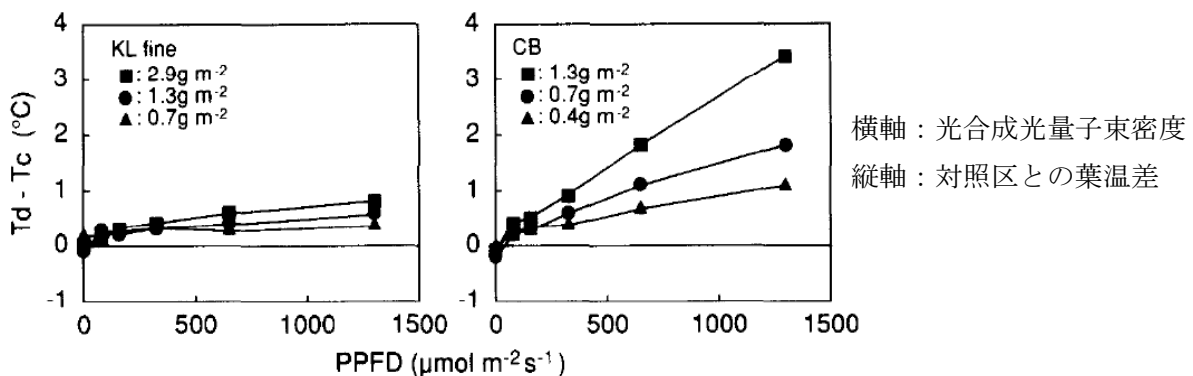


図 5.2-4 ソラマメの関東ローム土壌粒子 (KL fine) 及びブラックカーボン (CB) の曝露による葉温の上昇 (Hirano et al. 1995)。

上記の Hirano et al. (1995) による実験でのブラックカーボンの曝露量は $0.4 - 1.3 \text{ g m}^{-2}$ (葉面積当たり) であり、文献中では工業地帯や高速道路の直近を想定したレベルとされている。近年、環境大気レベルでのブラックカーボン曝露実験も進められており、Yamaguchi et al. (2012) によると、ブナ、スダジイ、カラマツ、スギへの2成長期の長期曝露により、それぞれ $0.13, 0.69, 0.32$ 及び 0.58 mg m^{-2} のブラックカーボン沈着量が確認されたが、このレベルの沈着量では、樹木の成長やガス交換等の生理活性に影響を与えなかったことが報告されている。

一方で、Sase et al. (2012) によると、1年間当たりスギでは約 27 mg m^{-2} 、熱帯樹木では約 10 mg m^{-2} の BC が、また Fukazawa et al. (2012) によると、落葉性であるカラマツでも秋季に 10 mg m^{-2} 程度の BC が、葉面に沈着・蓄積することが報告されていることから、実際の森林地域では、Hirano et al. (1995) の曝露量ほどではないものの、Yamaguchi et al. (2012) の曝露量よりもかなり多くの BC が沈着・蓄積していることが示唆された。

② 重金属類

関東地方の平野部では、1960年代からスギの先端枯損が見られるようになり、その原因究明を進めていた Takamatsu et al. (2001a) は、特に枯損の著しい埼玉県平野部のスギでは、気孔が閉まるはずの条件下でも完全に閉まらない等の機能不全が生じていることを発見し、不健全な気孔の割合と葉面付着粒子中のアンチモン (Sb) 濃度との間に有意な相関関係が見られたことを報告している (図 5.2-5)。

表 5.2-1にも示すように、船舶 PM 中の重金属としてアンチモンは検出されておらず、船舶から排出されたものによる影響と結び付けて考慮することはできないが、この有意な相関関係は 1970 年代から示唆されて来た気孔の閉塞による機能不全 (Smith 1977; Grill & Golob 1983; Crossley & Fowler 1986) を裏付けるものと考えられる。さらに、Takamatsu et al. (2001b)は、関東地方のスギ葉のクチクラ蒸散速度が、クチクラ表層ワックス量と不健全な気孔の割合で説明される関数 F と有意な相関関係があることを示し (図 5.2-5b)、Sase et al. (1998) で示唆されたワックス量減少や気孔機能不全による水分損失の増大の可能性を裏付けた。

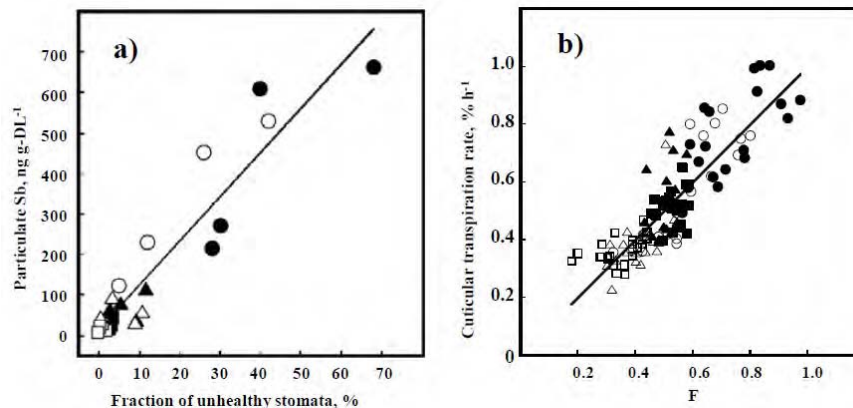


図 5.2-5 関東地方のスギ葉における不健全な気孔の割合と葉面付着 Sb 濃度の関係 (左図 a) 及びワックス量と不健全な気孔で説明される関数 F とクチクラ蒸散速度の関係 (右図 b) (Sase & Takamatsu 2009; Takamatsu et al. 2001a; b)

Sase et al. (1998)、Takamatsu et al. (2001a;b)、Sase and Takamatsu (2009)は、関東平野部は気温の上昇と降水量の低下が続き、相対湿度も 1960 年代から極端に低下しており、このような水分条件の悪化と粒子状物質の沈着による水分損失の増大が複合的に作用し、スギ枯損を引き起こしたと結論づけている。

③ 潮解性のある微小粒子 (H₂SO₄ など)

H₂SO₄等の微小粒子は、相対湿度が70%以上になると周囲の水蒸気を吸収し潮解し、葉面に薄い水の膜 (thin water film) を生じさせることが指摘されている (Burkhardt and Eiden, 1994)。このような現象は、例えば大気中の相対湿度が低くても、葉面の気孔周辺では常時生じるため、これにより気孔からの蒸散が促進される可能性が指摘されている (Burkhardt 1995)。また、Burkhardt (2010) は、この thin water film が気孔の内壁面に沿って、気孔の内部に入り込むことにより、気孔の内側 (湿度 100%) から外側への水の流れが生じ、気孔を介した水分損失が増大されると指摘し、このような水分損失が欧州の森林衰退の一因であることを示唆している。

Pariyar et al. (2012) による栽培植物を用いた室内実験では、大気中の粒子をフィルター除去することによって、蒸散量が減少することが確認されており、気孔を通じて水溶液が内部に侵入・吸収されることも実験的に確認されていることから (Burkhardt 2012)、気孔の内側から外側への水の流れが実際に起こり得る可能性が指摘されている。

さらに thin water film による葉面の濡れ性の増大は、ガス状物質の沈着促進 (Cape, 1996) や葉面でのイオン交換 (N の吸収・カチオンの溶出等) の促進等を引き起こすことが示唆されている (Sase et al. 2008; Adriaenssens et al. 2011)。

5.2.3 北極圏で考えられる粒子状物質の生態系影響

ここまでで紹介した事例を、生じ得る現象を中心に表 5.2-3まとめた。すでに述べたように、いずれの粒子状物質においても、詳細なメカニズムは異なるものの、粒子状物質の葉面への沈着により葉面状態が変質することにより、水分損失の増大が生じる可能性が示されている。

葉面の物理的摩滅による水分損失の可能性については、高山や極地の森林限界や高木限界 (tree line, timberline) で見られる冬季の脱水・干ばつによる枯死等の原因として、生態学的にも論じられている。Hadley and Smith (1986) は、ロッキー山脈の高木限界付近で見られる針葉の枯損の原因として、冬季に氷の結晶による葉面の摩滅が生じワックスが流亡することにより、冬季強風時に水分欠乏が生じることが一因であることを報告している。一方、Grace (1990) は、スコットランドの高木限界付近において、冬季の干ばつによる枯死との直接的な関連性は否定しているものの、低標高の樹木に比べ高標高の樹木は水分を失いやすく、土壌粒子や氷の結晶による機械的摩滅によるクチクラ層のダメージや気孔の機能不全がその原因であることを認めている。

北極圏において、ブラックカーボンを含む粒子状物質の影響を明らかにする知見は不十分であるが、すでに自然条件下でも強風等による水分損失のリスクが高いことから、今後注意深く監視すべき地域であると考えられる。

表 5.2-3 粒子状物質に起因する植生への影響の事例調査 (文献調査のまとめ)

生じ得る現象	粒子状物質 (成分等)	メカニズム	生じ得る植物への影響	対象植物・生態系	対象地域	代表性・汎用性	背景	主な関連文献
水分損失の増大	潮解性粒子	気孔内壁に沿った水の通導経路の形成	気孔を介した蒸散の増大 クチクラ蒸散の増大	針葉樹林 (実験は栽培植物)	欧州	栽培植物等で検証	欧州における森林衰退	Burkhardt 2010; 2012
	重金属 (Sb 等)	気孔の閉塞・機能不全 葉面ワックスの物理的摩擦・流亡		スギ林	東日本 (主に関東)	類似のメカニズムは70年代から示唆	関東地方平野部のスギ枯損	Sase et al. 1998; Takamatsu et al. 2001a; b.
濡れ性増大	潮解性粒子	薄い水の膜 (thin water film) 形成	葉面でのイオン交換促進 ガス状物質の沈着促進 病原微生物の感染促進	針葉樹林	欧州の針葉樹林	類似のメカニズムは80年代から示唆	欧州における森林衰退	Burkhardt 1995
	重金属 (Sb 等)	葉面ワックスの物理的摩擦・流亡		スギ林	東日本 (主に関東)	80年代から示唆	関東地方平野部のスギ枯損	Takamatsu et al. 2001b; Sase et al.
遮光	土壌粒子	粒子による日陰効果	光合成速度低下	栽培植物	工業地帯や高速道路の直近を想定	暴露量が多い	粒子影響のメカニズム解明	Hirano et al. 1995
葉温の上昇	ブラックカーボン	BCによる熱吸収	気孔を介した蒸散の増大					

5.2.4 調査した文献の一覧

- Adriaenssens, S., Staelens, J. Wuyts, K., de Schrijver, A., Van Wittenberghe, S., Wuytack, T., Kardel, F., Verheyen, K., Samson, R., Boeckx, P. 2011. Foliar nitrogen uptake from wet deposition and the relation with leaf wettability and water storage capacity. *Water, Air and Soil Pollution* 219, 43–57.
- Burkhardt, J. 1995. Hygroscopic salts on the leaf surface as a possible cause of forest decline symptoms. *Water Air and Soil Pollution* 85, 1245–1250.
- Burkhardt, J. 2010. Hygroscopic particles on leaves: nutrients or desiccants? *Ecological Monographs* 80, 369-399.
- Burkhardt, J., Basi, S., Pariyar, S., Hunsche, M. 2012. Stomatal penetration by aqueous solutions – an update involving leaf surface particles. *New Phytologist*, in press
- Burkhardt, J., Eiden, R. 1994. Thin water films on coniferous needles. *Atmospheric Environment* 28, 2001–2011.
- Cape, J.N. 1996. Surface wetness and pollutant deposition. In: *Plant Cuticles*. Kerstiens, G., Ed. Bios Publishers, Oxford. pp. 238–300.
- Crossley, A., Fowler, D. 1986. The weathering of Scots pine epicuticular wax in polluted and clean air. *New Phytologist* 103, 207- 218.
- Fukazawa, T., Murao, N., Sato, H., Takahashi, M., Akiyama, M., Yamaguchi, T., Noguchi, I., Takahashi, H., Kozuka, C., Sakai, R., Takagi, K., Fujinuma, Y., Saigusa, N. and Matsuda, K. 2012. Deposition of Aerosols on Leaves in a Cool-temperate Larch Forest in Northern Hokkaido, Japan. *Asian Journal of Atmospheric Environment* 6, 281-287.
- Grace, J. 1990. Cuticular water loss unlikely to explain tree-line in Scotland. *Oecologia*
- Grill, D., and Golob, P. 1983. SEM-investigations of different dust depositions on the surface of coniferous needles, and the effect on the needle-wax. *Aquilo Ser. Bot.* 19: 255–261.
- Hadley, J.L., Smith, W.K. 1986. Wind effects on needles of timberline conifers: seasonal influence on mortality. *Ecology*, 67, 12-19.
- Hirano, T., Kiyota M., Aiga, I. 1995. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. *Environmental Pollution*, 89, 255-261.

ICP Vegetation 2011. Air pollution and vegetation, ICP Vegetation Annual Report 2010/2011.
Center for Ecology and Hydrology, UK.

海洋政策研究財団 (2008) : 平成 19 年度 船舶起源の粒子状物質 (PM) の環境影響に関する調査研究報告書, http://www.sof.or.jp/report/pdf/200806_ISBN978-4-88404-213-4.pdf

Pariyar, S., Eichert, T., Goldbach, H.E., Hunsche, M., Burkhardt, J. 2012. The exclusion of ambient aerosols changes the water relations of sunflower (*Helianthus annuus*) and bean (*Vicia faba*) plants. *Environmental and Experimental Botany*, in press.

Sase, H., Matsuda, K., Visaratana, T., Garivait, H., Yamashita, N., Kietvuttinon, B., Hongthong, B., Luangjame, J., Khummongkol, P., Shindo, J., Endo, T., Sato, K., Uchiyama, S., Miyazawa, M., Nakata, M. and Lenggoro, I. W. 2012. Deposition process of sulfate and elemental carbon in Japanese and Thai forests. *Asian Journal of Atmospheric Environment* 6, 246-258.

Sase, H., Takamatsu, T., Yoshida, T., Inubushi, K. 1998. Changes in properties of epicuticular wax and the related water loss in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) affected by anthropogenic environmental factors. *Canadian Journal of Forest Research* 28, 546- 556.

Sase, H., Takahashi, A., Sato, M., Kobayashi, H., Nakata, M., Totsuka, T. 2008. Seasonal variation in the atmospheric deposition of inorganic constituents and canopy interactions in a Japanese cedar forest. *Environmental Pollution* 152, 1- 10.

Sase, H., Takamatsu, T. 2009. Atmospheric deposition and its leaf surface interactions in Japanese cedar forests. In: *Forest Canopies: Forest Production, Ecosystem Health and Climate Conditions* by J.D. Creighton and P.J. Roney (eds.). Nova Science Publishers. pp. 127-141

Smith, W.H., 1977. Removal of Atmospheric Particulates by Urban Vegetation: Implications for Human and Vegetative Health.

Takamatsu, T., Sase, H., Takada, J. 2001a. Some physiological properties of *Cryptomeria japonica* leaves from Kanto, Japan: potential factors causing tree decline. *Canadian Journal of Forest Research* 31, 663- 672.

Takamatsu, T., Sase, H., Takada, J., Matsushita, R. 2001b. Annual changes in some physiological properties of *Cryptomeria japonica* leaves from Kanto. *Water, Air and Soil Pollution* 130, 941- 946.

Turunen, M., Huttunen, S. 1990. A review of the response of epicuticular wax of conifer needles to air pollution. *Journal of Environmental Quality* 19, 35- 45.

Yamaguchi, M., Otani, Y., Takeda, K., Lenggoro, W., Ishida, A., Yazaki, K., Noguchi, K., Sase, H., Murao, N., Nakaba, S., Yamane, K., Kuroda, K., Sano, Y., Funada, R., Izuta, T. 2012. Effects of long-term exposure of black carbon particles on growth and gas exchange rates of *Fagus crenata*, *Castanopsis sieboldii*, *Larix kaempferi* and *Cryptomeria japonica* seedlings. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 6, 259-267.

6. まとめ

本事業では、船舶が排出するブラックカーボンの直接観測を行い、また北極圏のブラックカーボンによる環境影響を評価するシミュレーションモデルの構築を行うと共に、(1) 排出量、(2) 大気中濃度、(3) 沈着量、(4) 放射強制力の4項目に着目して同地域のブラックカーボンによる環境影響の現状及びその評価手法に関する調査を行った。ブラックカーボンは光を強く吸収する物質であり、また、粒子状物質として生態系及び人体健康影響に関与するものと考えられる。このようなブラックカーボンの動態・挙動を議論する際には、その定義に係る明確な共通認識を形成しておく必要がある。本事業では、粒子状物質に含まれる成分のうち、EC・OM (organic Material) ・Ashの合計値をブラックカーボンとみなして排出インベントリ及び輸送シミュレーションモデルの整備を行うこととした。北極海航路におけるブラックカーボンの環境影響として、(i) 北極圏に対する気候変動の影響、(ii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの生態系影響、(iii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの人体健康影響、といった3つの視点に着目し、本事業においては、北極圏に対する気候変動の影響及び生態系への直接影響をもって北極海航路における船舶からのブラックカーボン排出の影響を評価することとした。

船舶ブラックカーボンの直接観測においては、ブラックカーボンの粒径分布の定量を目的とし、C重油2ストロークディーゼルエンジンの外航大型コンテナ船を対象に、通常航行時における粒径別のダスト重量分析及びSoot-Blow時における炭素分析を行い、燃焼ガスの排出過程におけるダスト及び炭素成分の挙動を把握した。その結果、通常航行時における燃焼排ガス中のダスト濃度は、重量ベースでは $10\mu\text{m}$ を超える粗大粒子が最も高く、全粒径の濃度に占める割合は平均で20%という結果であった。ただし、 $2.5\mu\text{m}$ 以下の微小粒子の濃度が全体の約40%を超えており、粒子の個数としては全PMの大多数を占めていると推察できる結果であった。一方、Soot-Blow時における燃焼排ガス中の捕集粒子の表面観察の結果、最前面に付着した粒子の最長径の平均径は $0.51\sim 0.60\mu\text{m}$ であり、粒径別の出現頻度は $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ の粒子をピークとして右側(粒径の大きい側)に裾野が広がる分布を示していた。また観察された最大の粒子径は $1.32\mu\text{m}$ で、大多数がサブミクロン領域の粒子であった。ただし、本結果はクラスタ状の炭素成分をカウントしていないため、実際の排ガス中における重量ベースでの粒径分布を示しているものとはならないと言える。

北極海航路の開設に伴うブラックカーボンの影響を評価するために必要となるブラックカーボン排出インベントリを、現況及び将来を対象として整備した。現況推計は2004年以降を、将来推計は2020年を対象として実施する計画であるが、本年度はまず現況推計を実施し、推計はまず、排出係数を設定することから行った。排出係数は、本事業ではSecond IMO GHG Study 2009においてGermanischer Lloydより提供された燃料中の硫黄分[%]と希釈法におけるPM性分別排出係数[g/kWh]の直線近似式から、各粒子成分に対する排出係数を設定した。それら粒子成分のうち、船舶からの排出インベントリ作成においてはAsh・EC・OMの合計値をブラックカーボンの排出係数とした。また国内では、北極海航路における船舶活動量データを収集することは困難であるため、本事業では、デンマークの専門機関である

LITEHAUZ (<http://www.litehauz.com>) に、(a) 既存の利用可能なデータベースを収集すること、(b) 収集したデータベースより船舶活動量を船種別・船型別・季節別の OD 表 (Origin-Destination) としてまとめること、(c) 主要航路を検討・設定すること、の3つの作業を依頼した。これらによって設定・作成された排出係数及び船舶活動量と併せて、船舶隻数及びそれらの存在時間を算定し、船舶からのブラックカーボン排出インベントリを作成した。

北極圏を対象としたブラックカーボンの輸送シミュレーションやその大気放射シミュレーションの実施例は限られており、北極圏での局地気象・気候の影響評価に対して、標準化されたモデルは整備されていないのが現状である。そこで、本年度事業においては、北極圏におけるブラックカーボンによる局地気象・気候の影響評価に適用するモデルの整備を行うことを主目的の一つと設定し、3次元化学輸送モデル WRF-Chem 及び大気放射モデル Rstar-Mstrn を利用して、ブラックカーボンの輸送シミュレーションモデル・大気放射シミュレーションモデルの構築を行った。本年度の解析対象期間は、北極圏でのブラックカーボンを含む大気エアロゾル観測が比較的高頻度で実施された 2008 年の 1 年間と設定した。WRF-Chem の計算領域は、北緯 82 度、東経 112.5 度を中心とした北極圏全域および北半球中緯度域を含むポーラステレオ座標系で表現される領域(水平解像度: 60km)と設定した。陸域人為起源および船舶起源のブラックカーボン排出量には ARCTAS 集中観測事業において作成された排出源データを、バイオマス燃焼起源のブラックカーボン排出量には GFED (Global Fire Emissions Database) のデータを使用した。また地勢データにはアメリカ大気海洋庁が提供する氷床・積雪被服率データを、境界条件には気象場に対してアメリカ大気研究センターが提供する全球データを、ブラックカーボン濃度に対しては、全球デルの結果を利用した。Rstar-Mstrn では、WRF-Chem で計算された気象 (気温、気圧など)、地勢 (反射率、土壌水分量など)、濃度 (気体、エアロゾル成分) に係る 1 時間間隔の情報を入力データとして計算を行った。

計算結果の妥当性を検証するため、モデルにより計算されたブラックカーボンの濃度、気象場 (風向、風速、気温、湿度)、放射強制力を航空機観測データ、地上観測データ、文献調査から得られた先行研究の結果と比較した。ブラックカーボンの濃度については、バイオマス燃焼起源の排出量を月平均値で与えているため、森林火災による高濃度イベントが再現できない場合が散見されたが、これを除けば、計算されたブラックカーボン濃度の高濃度域の水平分布は、先行研究における計算結果と大差なく、観測値との比較でも概ね季節変動をとらえていると判断された。一方、気象場については、夏季の気温・湿度については観測値をよく再現していたが、全体として、極夜が起こる高緯度地域の冬季の気象場の再現性が悪く、今後課題を残した。また放射強制力については、対象年が異なることから直接的な比較はできないものの、全体として、先行研究における計算結果と概ね一致していると考えられた。

北極圏におけるブラックカーボンの環境影響評価として、極地気象・気候への影響及び生態系影響に着目し、事前解析を行った。極地気象・気候への影響として、本事業では「大気中を浮遊しているブラックカーボンが太陽光を吸収することで大気を加熱する過程」及び「雪氷面に沈着したブラックカーボンが、雪氷面上もしくは、取り込まれた積雪層内で光を吸収し、周囲を加熱することにより、雪氷を融解し、雪氷面の反射率 (地表面アルベド) を下げる

フィードバック現象」を考慮した。

「大気中を浮遊しているブラックカーボンが太陽光を吸収することで大気を加熱する過程」の事前解析として、既存の排出量データを使用し、船舶排出起源ブラックカーボンの気候影響評価を行った。ここでは船舶排出起源ブラックカーボンの大気濃度はその排出源分布に対応して中緯度で高く、高緯度で低い傾向にある一方で、その放射強制力は日射量が極端に減少する秋・冬季を除いて、高緯度域でより高くなる傾向にあり、春・夏季の北極圏ではブラックカーボン濃度が薄くてもその加熱効果は中緯度より大きくなる傾向にあることが示された。また本事前解析は全船舶から排出されたブラックカーボンを対象にしたものであり、北極海航路の船舶から排出されたブラックカーボンが北極圏内の気象・気候に与える局所的な影響を評価するためには、北極圏内の船舶排出をゼロとするといった地理別の排出源寄与率解析が必要であり、さらに、ブラックカーボンの大気中での加熱効果による極地気象・気候への影響の規模についても、ブラックカーボンが大気上層、もしくは下層に位置するかで異なることから、大気上端の放射強制力だけでなく、高度別の放射強制力の解析を行うことが、より適切な影響評価を行う上で必要であることがわかった。

「雪氷面に沈着したブラックカーボンが、雪氷面上もしくは、取り込まれた積雪層内で光を吸収し、周囲を加熱することにより、雪氷を融解し、雪氷面の反射率（地表面アルベド）を下げるフィードバック現象」の事前解析として、同過程を扱うモデルについて、文献調査を行い、次年度に本事業で導入するモデルについて検討を行った。まず、文献調査の結果から、同過程が、二酸化炭素と比較して、どの程度北極圏の気候変動に重要であるかを把握した。次に、ブラックカーボン沈着による反射率減少過程を扱う主なモデルについて整理し、モデル入力パラメータ、観測の再現性、モデルの特徴についてモデル間で比較を行った。その結果、気象・気候モデルなどでの利用を想定して開発された Aoki et al (2011) のモデルが、実用性、観測の再現性の観点から、本事業で導入するモデルとして最も適切であると結論付けた。

生態系影響評価の事前解析として、粒子状物質の含有成分（ブラックカーボンや金属類など）の曝露量と生態系への影響の規模を関連付ける研究について文献調査を行った。その結果、ブラックカーボンの植物への直接的影響については、樹木の成長やガス交換等の生理活性に影響を与えないが、工業地帯や高速道路の直近を想定したレベルである曝露量では、葉温が上昇し、結果として、蒸散量が多くなるといった影響を与えることがわかった。またスギ、熱帯樹木、落葉性カラマツの葉面沈着・蓄積量から、実際の森林地域における BC の沈着がその成長に影響を与えている可能性については、今後さらに検討すべきであることが示唆された。

この報告書は、ポートレースの交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました。

平成24年度 北極海航路における船舶からの黒煙（ブラックカーボン）
に関する調査研究報告書

平成25年3月発行

発行 海洋政策研究財団（財団法人シップ・アント・オーシャン財団）

〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-4-10 虎ノ門35森ビル
TEL 03-5404-6828 FAX 03-5404-6800
<http://www.sof.or.jp>

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。 ISBN978-4-88404-300-1