

## 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 BGL17 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.

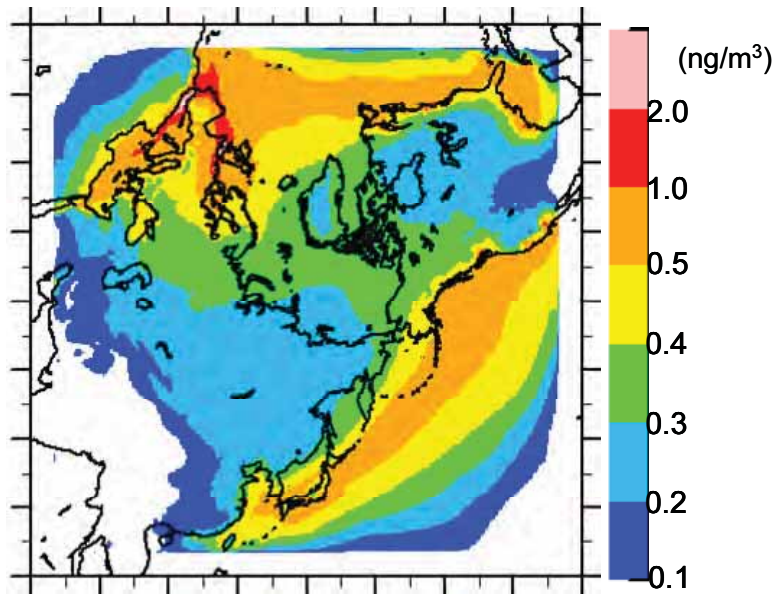


図 5.1-1 全鉛直層にわたって平均した船舶起源ブラックカーボン濃度の年平均値 (ng/m<sup>3</sup>)

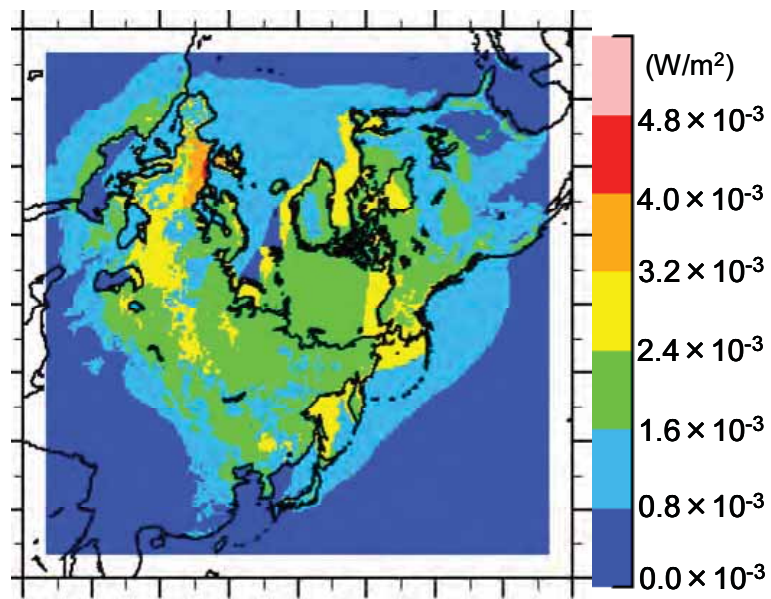


図 5.1-2 船舶起源ブラックカーボン放射強制力の年平均値 (W/m<sup>2</sup>)



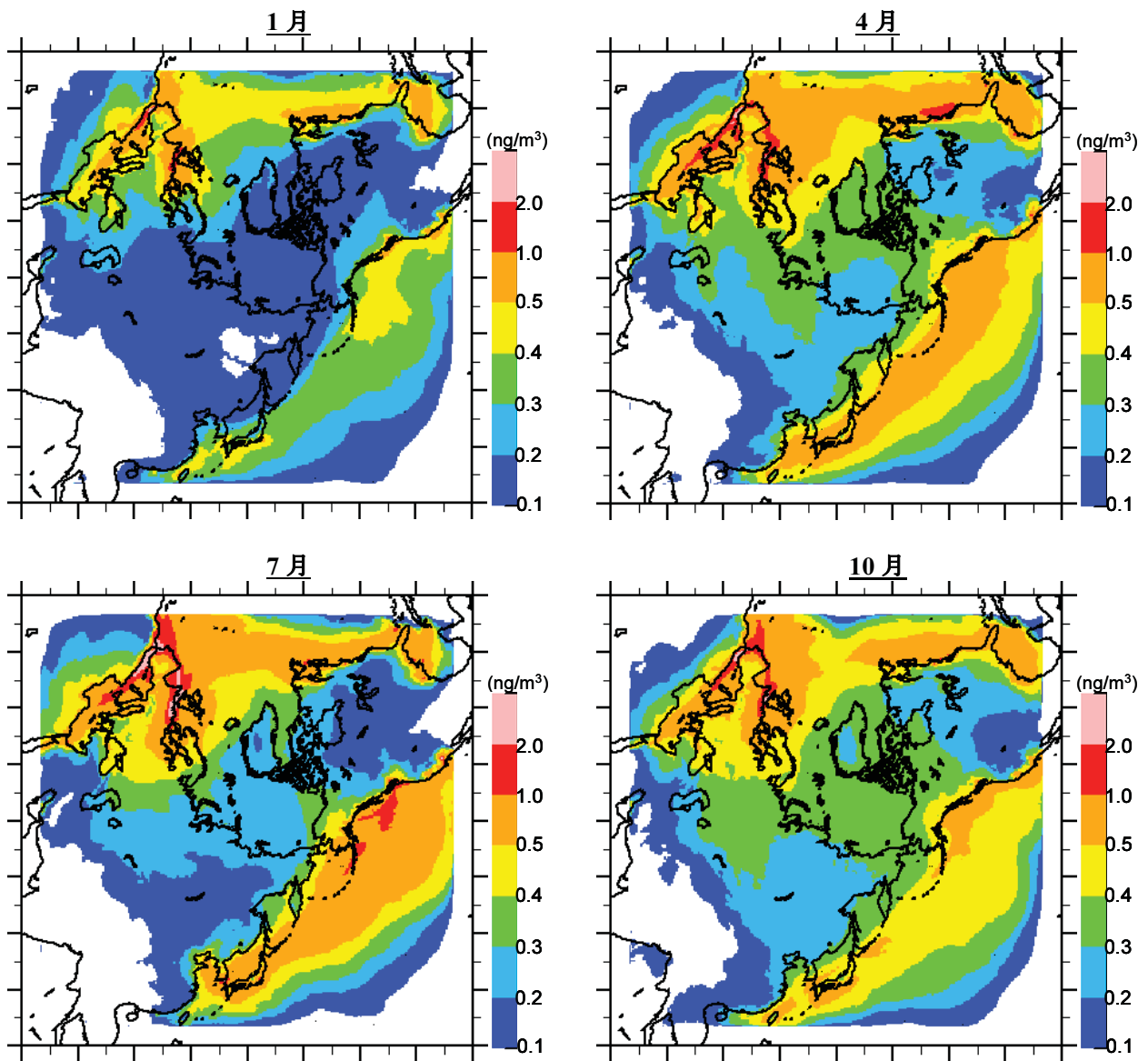


図 5.1-3 全鉛直層にわたって平均した船舶起源ブラックカーボンの月平均濃度 ( $\text{ng}/\text{m}^3$ )  
 (左上段：1月,右上段 4月, 左下段：7月,右下段 10月)

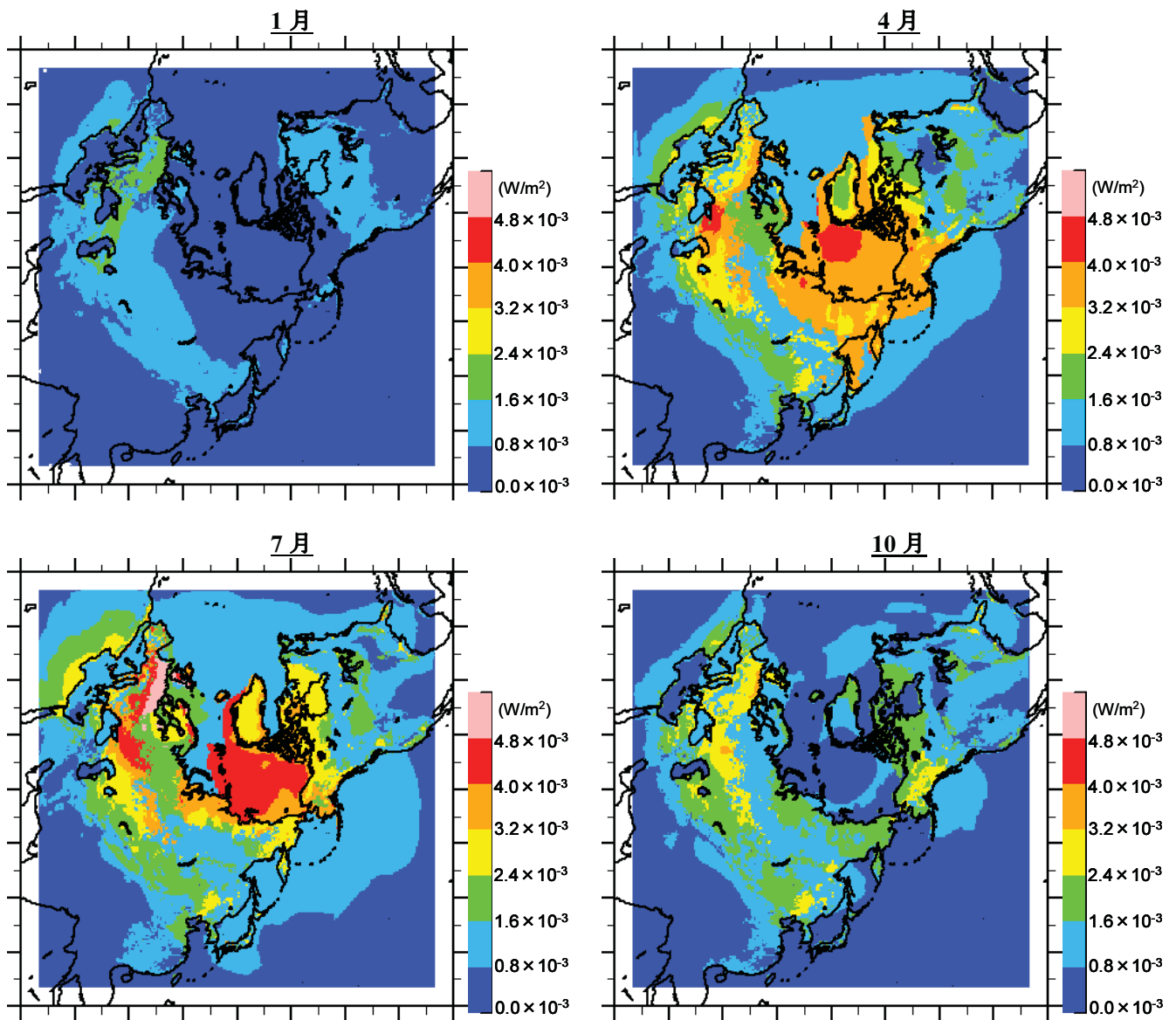


図 5.1-4 船舶起源ブラックカーボンの放射強制力の月平均値 ( $\text{W/m}^2$ )

(左上段：1月,右上段 4月, 左下段：7月,右下段 10月)



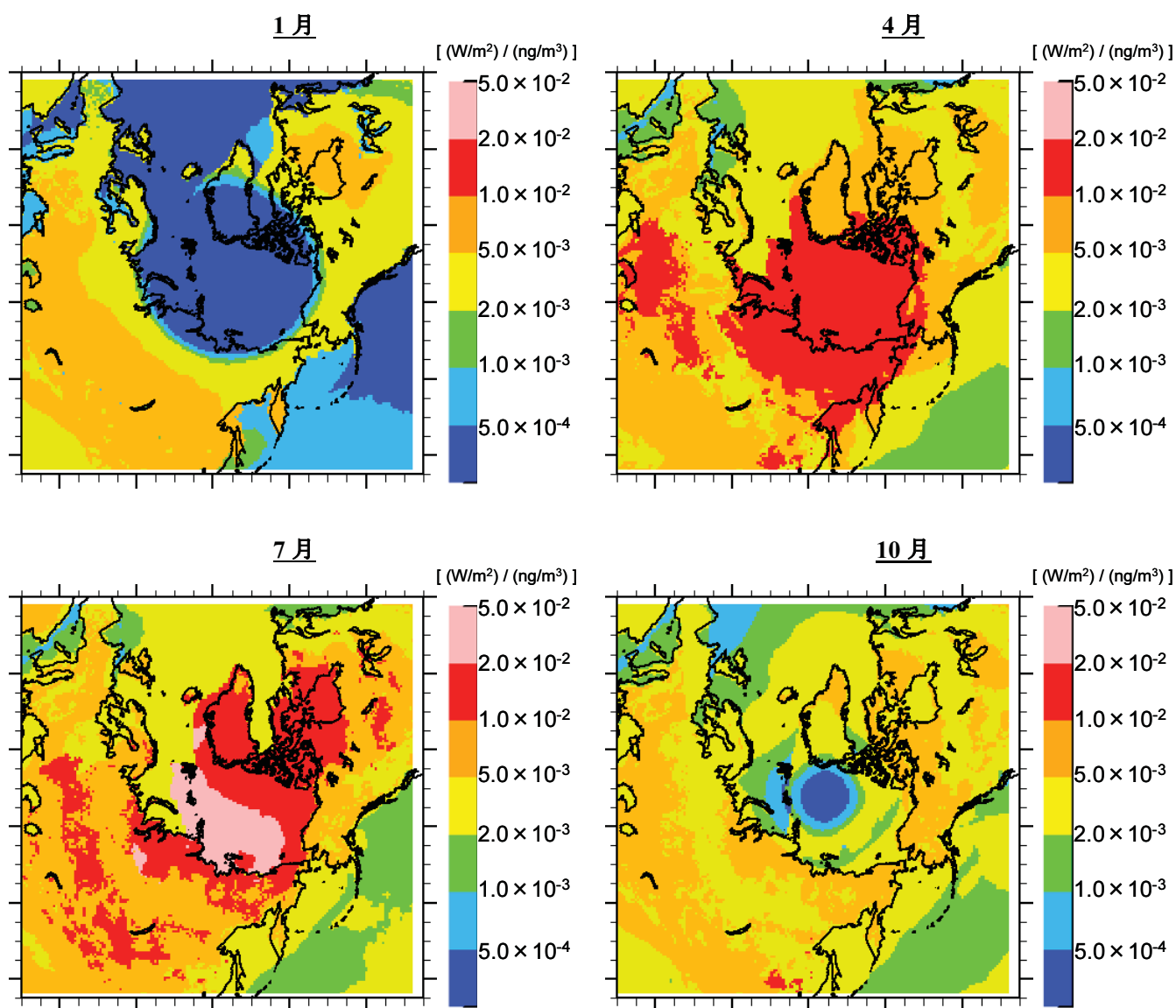


図 5.1-5 船舶起源ブラックカーボン濃度 (鉛直・月平均値,  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) に対する放射強制力 (月平均値,  $\text{W}/\text{m}^2$ ) の割合 $[(\text{W}/\text{m}^2)/(\text{ng}/\text{m}^3)]$

(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  $+0.1 \pm 0.1$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) と評価された。これは二酸化炭素による放射強制力が  $1.66 \pm 0.17$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) 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・親水性の取り扱いは、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 5.1.1-1 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"> <li>積雪中のBCを雪粒子とBC粒子の混在状態として表現</li> <li>雪粒子とBCの外部混合を仮定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>積雪中のBCを雪粒子とBC粒子の混在状態として表現</li> <li>雪粒子とBCの内部混合を仮定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>積雪中のBCを雪粒子とBC粒子の混在状態として表現</li> <li>雪粒子とBCの外部・内部混合を考慮</li> <li>層構造を導入 (層数: 5層)</li> <li>親水性・疎水性BCを扱う</li> <li>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</li> <li>氷に被覆されたBC粒子の吸収を加味</li> <li>融解水によるBCの積雪層移動を加味</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>積雪中のBCを、BC粒子を含む氷板と空気層の重なり表現</li> <li>層構造を導入 (層数: 3層)</li> <li>親水性・疎水性BCを扱う</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>積雪中のBCを雪粒子とBC粒子の混在状態として表現</li> <li>雪粒子とBCの外部混合を仮定</li> <li>層構造を導入 (層数: 可変。論文中では1-5層)</li> <li>親水性・疎水性BCを扱う</li> <li>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)</li> </ul>
物性値	<ul style="list-style-type: none"> <li>氷の密度 (文献値)</li> <li>氷の複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの密度 (文献値)</li> <li>BCの複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの粒径分布 (観測値)</li> <li>雪の平均粒径 (観測から算出)</li> <li>積雪(水当)量 (観測値)</li> <li>-</li> <li>-</li> <li>BCの質量混合比 (観測値)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>氷の密度 (文献値)</li> <li>氷の複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの密度 (文献値)</li> <li>BCの複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの粒径分布 (単純な分布を仮定)</li> <li>雪の粒径 (経験式から算出。雪粒成長も考慮)</li> <li>積雪(水当)量 (積雪物理モデルで算出)</li> <li>積雪層温度 (積雪物理モデルで算出)</li> <li>融解水フラックス (積雪物理モデルで算出)</li> <li>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)</li> <li>太陽天頂角</li> <li>直達・散乱比</li> <li>日射量</li> <li>積雪層下の反射率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>氷の密度 (文献値)</li> <li>氷の複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの密度 (文献値)</li> <li>BCの複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの粒径分布 (単純な分布を仮定)</li> <li>乾燥積雪密度 (積雪物理モデルで算出)</li> <li>積雪深 (積雪物理モデルで算出)</li> <li>-</li> <li>-</li> <li>BCの質量混合比 (観測値)</li> <li>太陽天頂角</li> <li>直達・散乱比</li> <li>日射量</li> <li>積雪層下の反射率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>氷の密度 (文献値)</li> <li>氷の複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの密度 (文献値)</li> <li>BCの複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの粒径分布 (単純な分布を仮定)</li> <li>雪の有効粒径 (観測値)</li> <li>積雪(水当)量 (観測値)</li> <li>積雪層温度 (観測値)</li> <li>-</li> <li>BCの質量混合比 (観測値)</li> <li>太陽天頂角</li> <li>直達・散乱比</li> <li>日射量</li> <li>積雪層下の反射率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>氷の密度 (文献値)</li> <li>氷の複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの密度 (文献値)</li> <li>BCの複素屈折率 (文献値)</li> <li>BCの粒径分布 (単純な分布を仮定)</li> <li>雪の有効粒径 (観測値)</li> <li>積雪(水当)量 (観測値)</li> <li>積雪層温度 (観測値)</li> <li>-</li> <li>BCの質量混合比 (観測値)</li> <li>太陽天頂角</li> <li>直達・散乱比</li> <li>日射量</li> <li>積雪層下の反射率</li> </ul>
積雪物理量	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽天頂角</li> <li>直達・散乱比</li> <li>日射量</li> <li>積雪層下の反射率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽天頂角</li> <li>直達・散乱比</li> <li>日射量</li> <li>積雪層下の反射率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽天頂角</li> <li>直達・散乱比</li> <li>日射量</li> <li>積雪層下の反射率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽天頂角</li> <li>直達・散乱比</li> <li>日射量</li> <li>積雪層下の反射率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>太陽天頂角</li> <li>直達・散乱比</li> <li>日射量</li> <li>積雪層下の反射率</li> </ul>
照射条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>北極 (Arctic Ice Island T3)、南極観測基地</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>南極観測基地</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2003年-2004年の冬季、札幌</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2007年-2009年の冬季、札幌</li> </ul>
観測対象	<ul style="list-style-type: none"> <li>北極 (Arctic Ice Island T3)、南極観測基地</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>南極観測基地</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2003年-2004年の冬季、札幌</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2007年-2009年の冬季、札幌</li> </ul>
反 射 率 観 測 対 象 比 較 結 果	<ul style="list-style-type: none"> <li>複素屈折率の波長依存性未考慮のため、反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。</li> <li>反射率過大評価傾向を報告</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Warren &amp; Wiscombe (1980) で見られた不整合が改善された。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>BCを含まない場合の比較は観測データをよく再現</li> <li>BCを含んだ場合の比較は論文中には示されていない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>時間変化をよく再現</li> <li>積雪物理モデル入力データの誤差などにより融雪期に不一致が見られる。</li> <li>RMSEは0.6程度 (全短波に対して)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>時間変化をよく再現</li> <li>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)。</li> <li>RMSEは0.6以下 (短波に対して)</li> <li>相関係数は0.92以上 (短波に対して)</li> </ul>



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)。

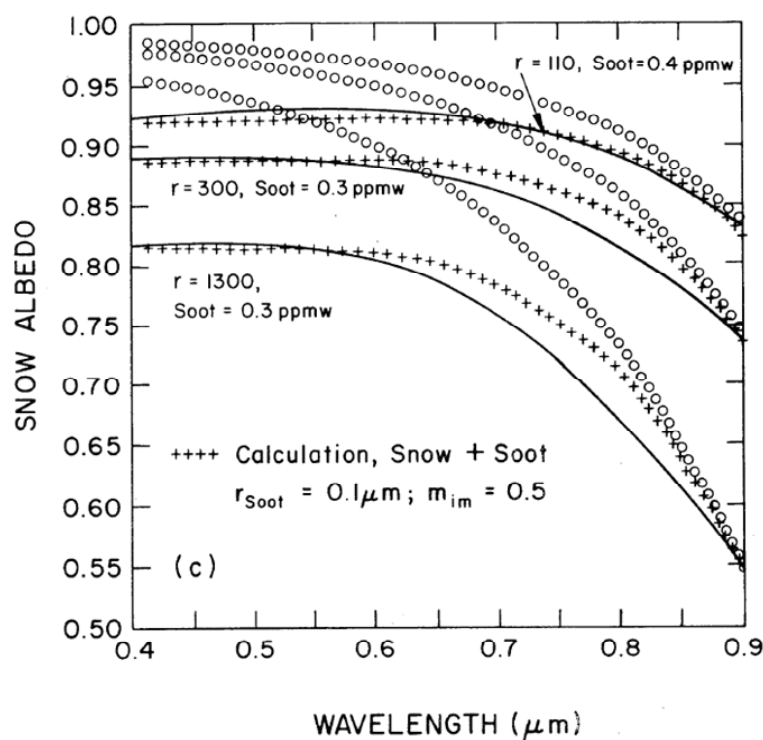


図 5.1-6 Arctic Ice Island T-3 における異なる積雪状態 (雪粒径=110-1300  $\mu\text{m}$  と BC 濃度=0.3-0.4ppmw) での反射率観測値 (実線) と反射率計算値 (BC を含む積雪層: 十字、BC を含まない積雪層: ○) Warren and Wiscombe(1980)から抜粋。



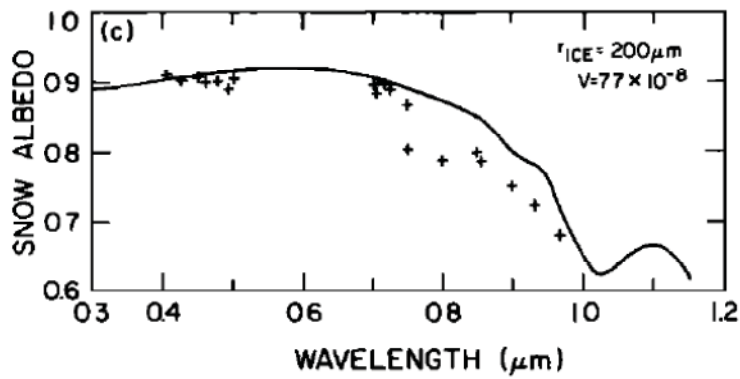


図 5.1.7 米国カスケード山脈、湿雪時の反射率観測値 (十字) と反射率計算値 (実線) (ブラックカーボンの体積濃度 $=7.7 \times 10^{-8}$ 、雪粒径 $=200 \mu\text{m}$ ) Chylek et al. (1983) から抜粋。

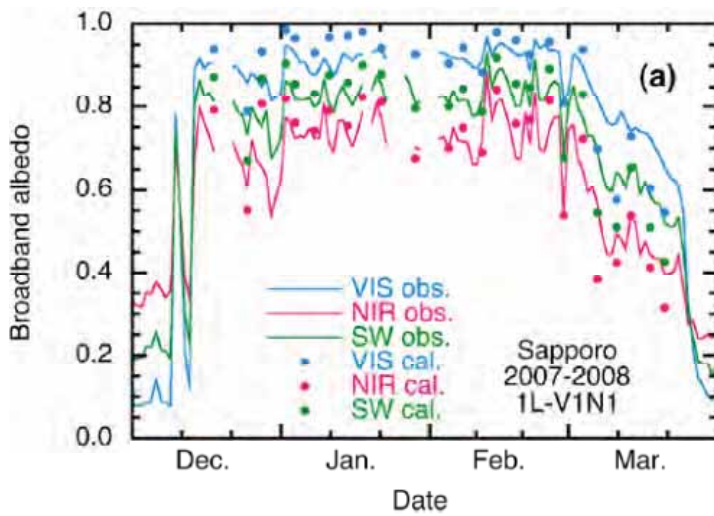


図 5.1.8 冬季札幌の反射率観測値 (赤実線：可視、青実線：近赤外、緑実線：可視+近赤外) と、反射率計算値 (赤点：可視、青点：近赤外、緑点：可視+近赤外) Aoki et al. (2011) から抜粋

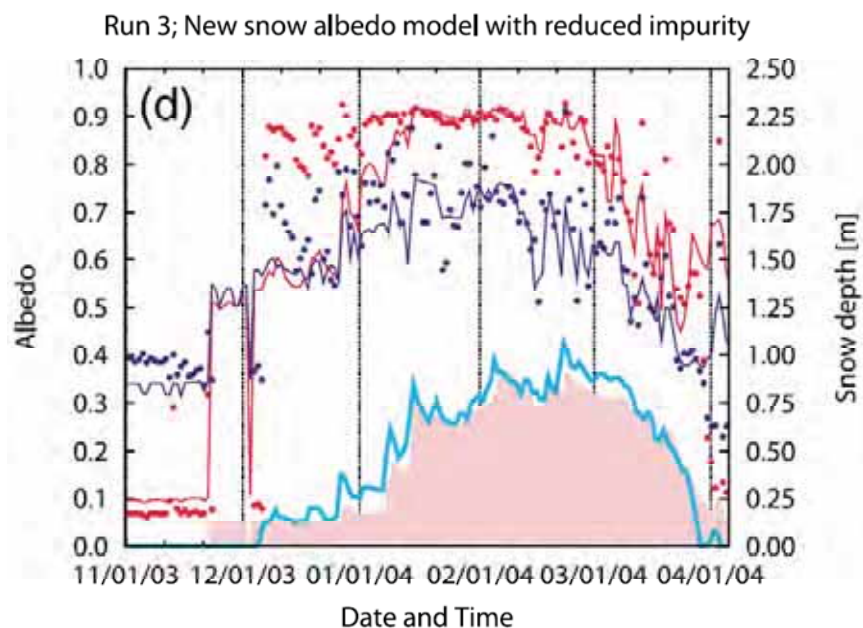


図 5.1-9 冬季札幌の反射率観測値 (赤点：可視、青点：近赤外) 及び積雪深 (水色の実線) と、反射率計算値 (赤線：可視、青線：近赤外) 及び積雪深計算値 (桃色の領域) ただし、比較対象期間は1月14日以降 (積雪がないため) Yasunari et al. (2011) から抜粋

### (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<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、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<sub>x</sub> 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。

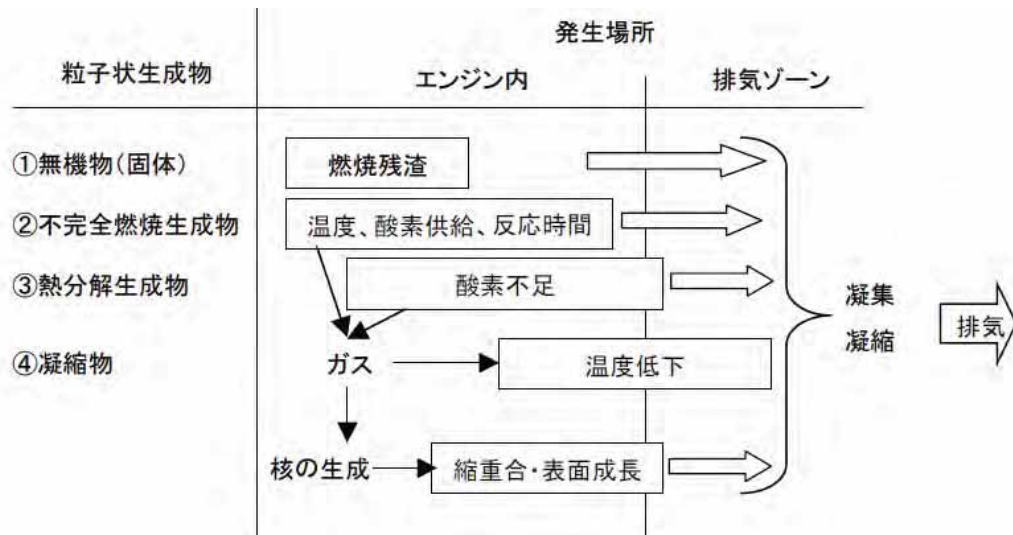


図 5.2-1 ディーゼルエンジンからの粒子発生状況

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 <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	14.9	2.7	42.4	22.2	5.1	20.5	20.6	12.8
	硝酸イオン NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<1.0	0.9	<1.4	<1.0	<0.5	<3.0	1.1	1.8
	塩素イオン Cl <sup>-</sup>	<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 <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<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 <sup>+</sup>	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 <sup>2+</sup>	<0.7	0.1	<0.9	0.7	0.4	2.0	0.6	1.2
	カリウムイオン K <sup>+</sup>	<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
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>4.1</b>	<b>1.4</b>	<b>&lt;0.5</b>	<b>1.1</b>
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)。

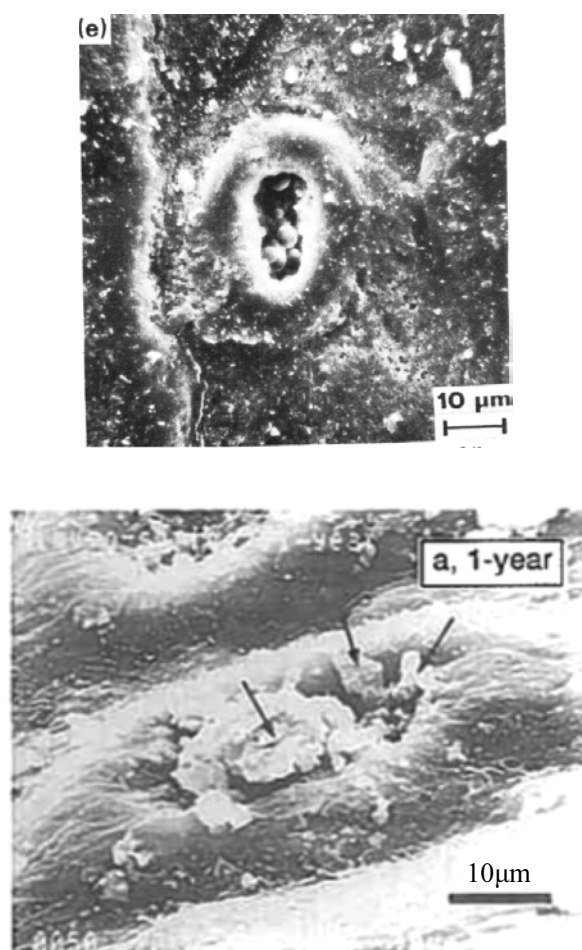


図 5.2-2 英国ウェスト・ヨークシャーで採取したスコットランドマツの2-3年葉(上: Crossley and Fowler 1986)、及び埼玉県内で採取したスギ1年葉(下: Sase et al. 1998)の気孔に詰まった粒子状物質の走査型電子顕微鏡観察像

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)。

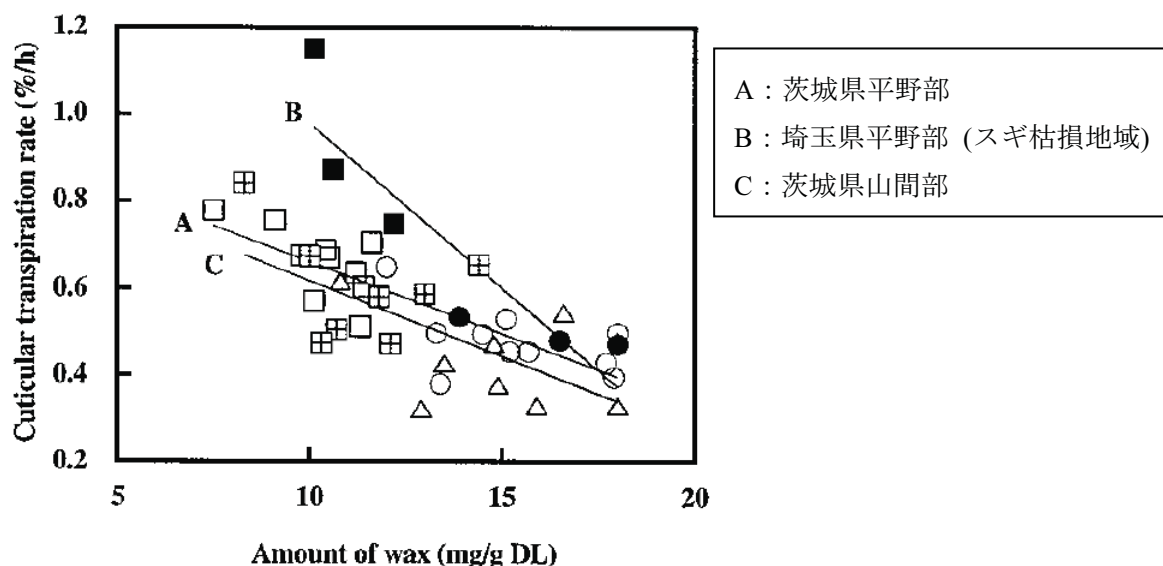


図 5.2-3 関東地方のスギ葉のクチクラ表層ワックス量とクチクラ蒸散速度との関係 (Sase et al. 1998)

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。

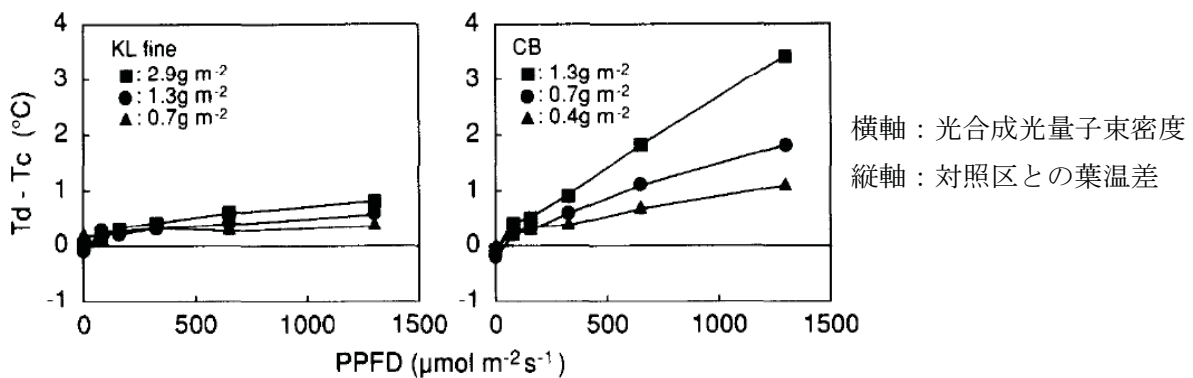


図 5.2-4 ソラマメの関東ローム土壌粒子 (KL fine) 及びブラックカーボン (CB) の曝露による葉温の上昇 (Hirano et al. 1995)。

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  $0.58 \text{ mg m}^{-2}$  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  $27 \text{ mg m}^{-2}$ 、熱帯樹木では約  $10 \text{ mg m}^{-2}$  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  $10 \text{ mg m}^{-2}$  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。

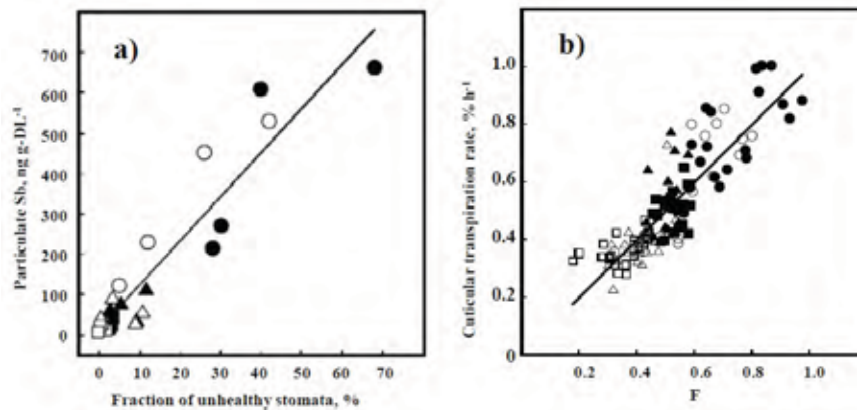


図 5.2-5 関東地方のスギ葉における不健全な気孔の割合と葉面付着 Sb 濃度の関係 (左図 a) 及びワックス量と不健全な気孔で説明される関数  $F$  とクチクラ蒸散速度の関係 (右図 b) (Sase & Takamatsu 2009; Takamatsu et al. 2001a; b)

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 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ など)

$\text{H}_2\text{SO}_4$ 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)  スギ林	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						
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  スギ林	欧州の針葉 樹林  東日本 (主に関東)	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  関東地方 平野部の スギ枯損	Burkhardt 1995  Takamatsu et al. 2001b; Sase et al.
	重金属 (Sb 等)	葉面ワックスの物 理的摩擦・流亡						
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	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

#### 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.
- Burkhart, J. 1995. Hygroscopic salts on the leaf surface as a possible cause of forest decline symptoms. *Water Air and Soil Pollution* 85, 1245–1250.
- Burkhart, 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](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0.51~0.60 $\mu\text{m}$ であり、粒径別の出現頻度は0.4~0.5 $\mu\text{m}$ 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