

5 北極圏における船舶からのブラックカーボンの環境影響評価シミュレーション

5.1 ブラックカーボンの環境影響評価のためのモデルの考え方

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)*¹², *Sodemann et al. (2011)*¹³)、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。

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。

¹² 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.

¹³ 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.

5.1.1 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 (2014 年 7 月) の最新版は WRF-Chem v3.4.1 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 を基本的に採用した。ただし、参考資料に示した将来計算については WRF-Chem v3.4.1 を用いている。

5.1.2 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)¹⁴ 及び地球放射

¹⁴ 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 4 μm 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)¹⁵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¹⁶とミー散乱¹⁷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2013年2月の最新版である MstrnX を採用した。

5.2 計算シナリオの設定

5.2.1 北極圏における船舶からの寄与を算定するためのシナリオの設定

現状ケースは以下に示す3ケース実施する。

【現況 Case1】

計算領域内において船舶及び人工排出源を全て設定 (ベースケース) する。

【現況 Case2】

北極圏内 (北緯 66° 以北) の船舶からの LAC を全て off にした設定とする。

【現況 Case3】

北緯 66° 以北の全船舶のうち、Non Arctic area (45°E-25°W かつ 66°N-80°N) の船舶からの LAC 排出量を off にした設定とする。それ以外の船舶からの LAC 排出源は現況 Case1 と同様とする。

北極圏内船舶からの LAC に対する感度解析を行う。

¹⁵ 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 4μm 以上の赤外領域の放射スペクトルを指す。

¹⁶ 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。

¹⁷ 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。

5.2.2 対策の効果を算定するためのシナリオの設定

対策の効果を算定するためのシナリオは、対象年を2020年とし、感度解析の一部として以下の3セットを実施する。いずれも、船舶以外の人工排出源と森林火災起因のバイオマス排出量及び北緯66°以南の船舶の排出量は変化しないものとする。各ケースのLAC年間排出量は表5.2-1のとおりであり、水平分布図は図5.2-1のとおりである。

なお、シミュレーションは年間を通じて排出量の最も多い7月を対象として実施する。7月における各ケースのLAC排出量水平分布図は図5.2-2のとおりである。

【将来 Case1】

船種が不明、AIS ClassB、または6,000 GT以下の船舶は変化なし
船種不明以外で、AIS ClassAの6,000 GT以上の船舶については、

- Arctic area の活動量 → 現況の3倍
- Non Arctic area の活動量 → 現況の1.5倍

2020年の増加を想定。

【将来 Case2】

船種が不明、AIS ClassB、または6,000 GT以下の船舶は変化なし
船種不明以外で、AIS ClassAの6,000 GT以上の船舶については、

- Arctic area の活動量 → 現況の3倍
- Non Arctic area の活動量 → 現況の1/2

2020年の増加を想定かつ Non Arctic area の国際航行船舶に対策の導入を想定。

【将来 Case3】

船種が不明、AIS ClassB、または6,000 GT以下の船舶については、現況の1/3倍
船種不明以外で、AIS ClassAの6,000 GT以上の船舶については、

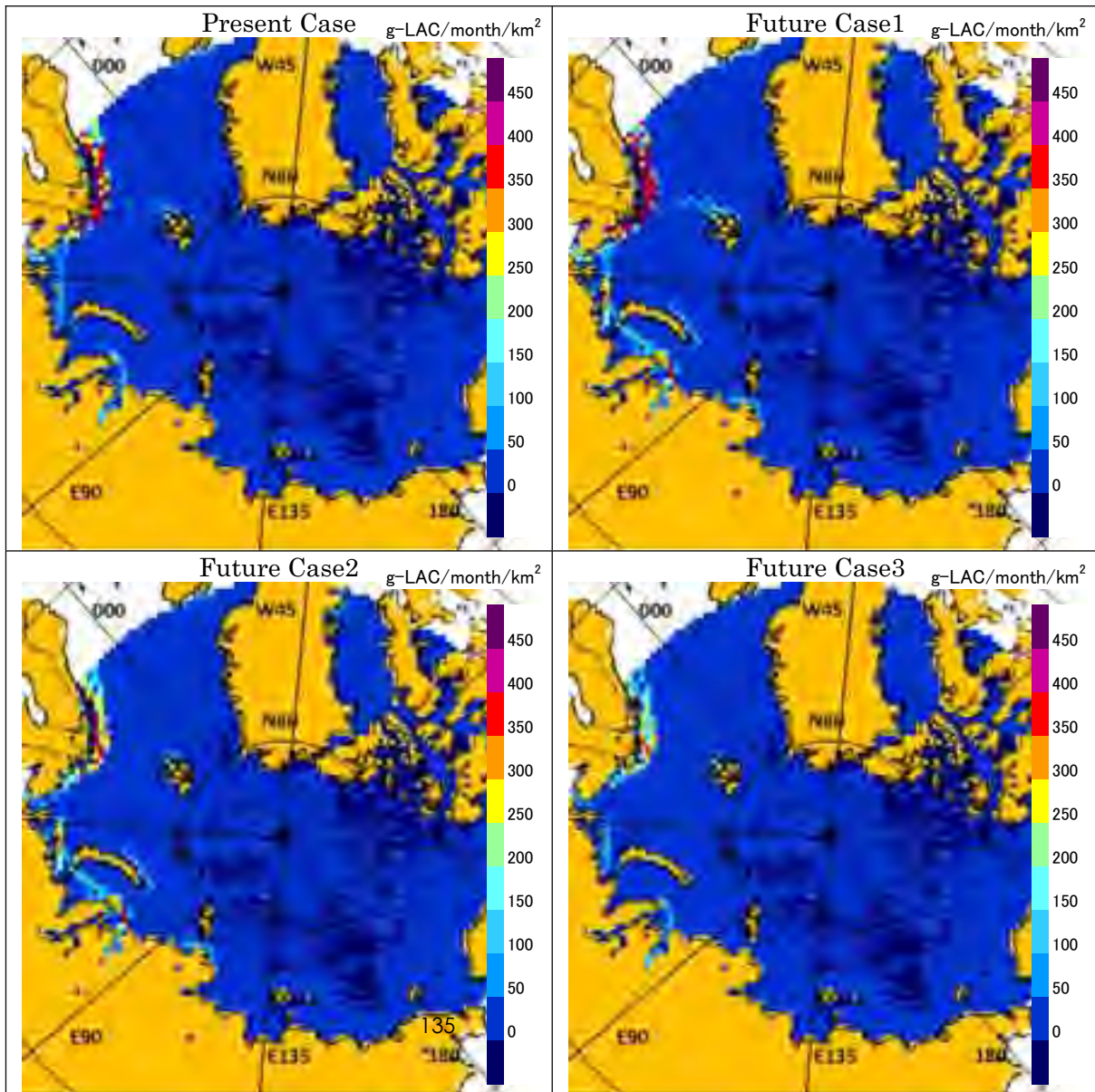
- Arctic area の活動量 → 現況と同じ
- Non Arctic area の活動量 → 現況の1/2

2020年の増加を想定かつ 全船舶に対策の導入を想定。将来 Case1 の1/3。

表 5.2-1 各将来ケースの LAC 排出量 (北緯 66° 以北)

(単位 : Mg/year)

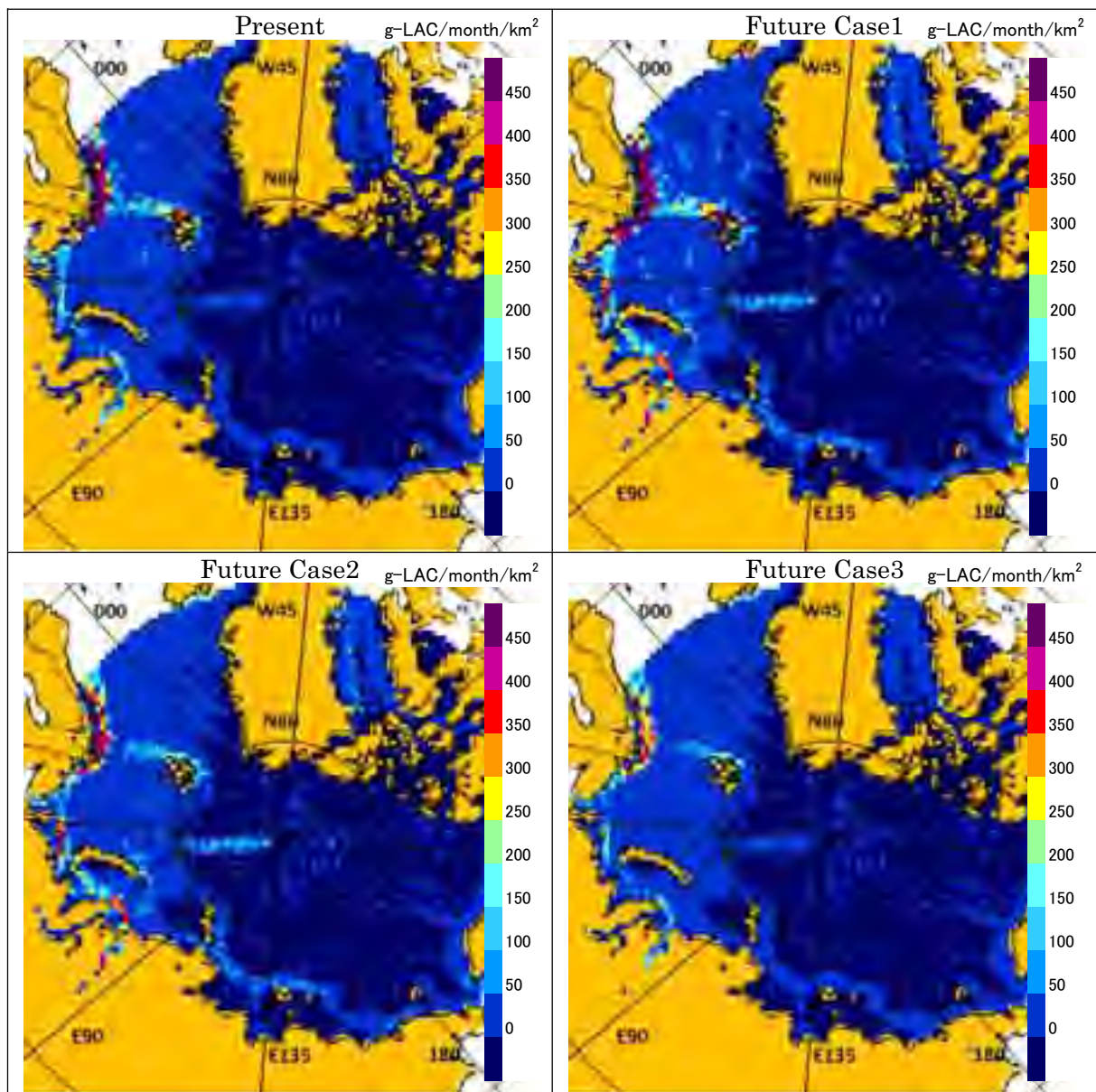
船舶	海域	現況	将来 Case1	将来 Case2	将来 Case3
船種不明、6000GT 未満、 AISClassB	Arctic area	81	81	81	27
	Non Arctic area	766	766	766	255
上記以外	Arctic area	310	931	931	310
	Non Arctic area	1,004	1,506	502	502
合計		2,161	3,284	2,280	1,095



ベージュは陸域、白色は計算対象外を示す。

exactEarth Ltd 提供データより作成

図 5.2-1 北緯 66° 以北における LAC 月排出量の水平分布図 (月平均)



ベージュは陸域、白色は計算対象外を示す。

exactEarth Ltd 提供データより作成

図 5.2-2 北緯 66° 以北における LAC 月排出量の水平分布図 (7 月)

5.3 計算条件及び計算手順

5.3.1 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 5.3-1 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、昨年度報告書 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)¹⁸や McNaughton et al. (2011)¹⁹は、元素状炭素濃度観測とフィルタ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)²⁰、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)²¹や Takemura et al. (2005)²²) において標準的に使用されている Deepak and Gerbers (1983)²³及び World Meteorological Organization (1986)²⁴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。

¹⁸ 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.

¹⁹ 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.

²⁰ 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

²¹ 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.

²² 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.

²³ 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.

²⁴ 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 5.3-1 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	ポーラステレオ座標
計算領域中心 標準緯度	東経 112.5° , 北緯 82° 標準緯度: 北緯 75°
水平格子数 (解像度)	246×246 (60km)
鉛直層	27 層 (地表から上空約 16 km まで), 最下層の層厚: 約 20 m
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 20 m) 森林火災起因: 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。

5.3.2 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 5.3-1 に示す。本シミュレーションの計算領域は、北緯 82°、東経 112.5° 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 16 km 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 5.3-1 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 2010²⁵)、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。

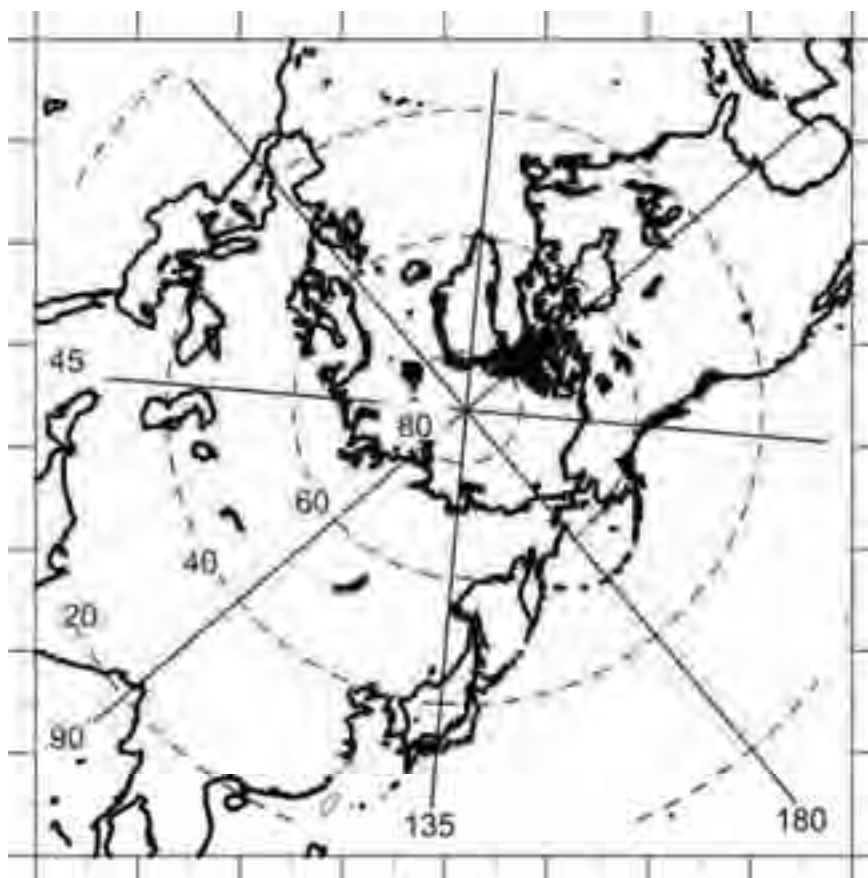


図 5.3-1 WRF-Chem 化学輸送シミュレーションの計算領域

²⁵ 矢吹正教, 「極域対流圏の雲とエアロゾル」, エアロゾル研究, 25 (3), 234-239, 2010.

5.3.3 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 2008 年の氷床・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 5.3-2 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。

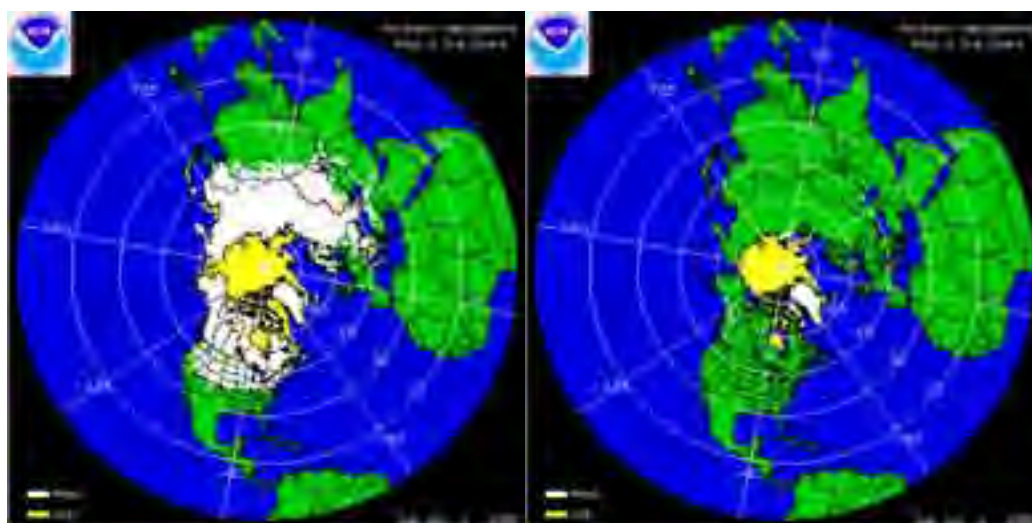


図 5.3-2 本シミュレーションに導入した氷床・積雪被覆率データ

5.3.4 北極海を航行する船舶以外の排出量の設定

(1) 陸域人為起源排出量の設定

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.cgcrer.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 5.3-3 に、本シミュレーション領域のモデルグリッド解像度 (60 km) 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。

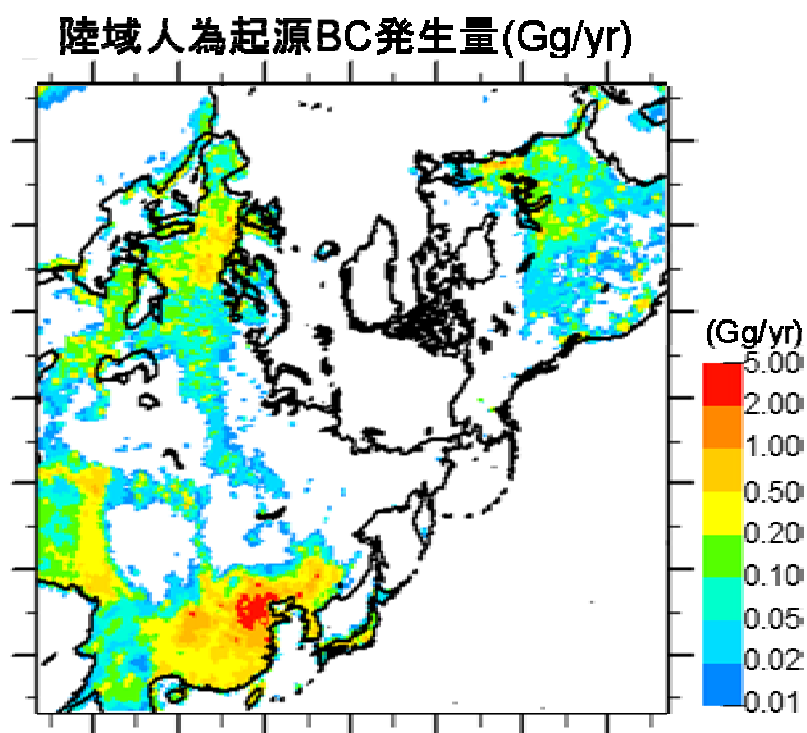


図 5.3-3 計算領域(60km 格子)における陸域人為起源ブラックカーボンの年間排出量(Gg/yr)

(2) バイオマスバーニング起源排出量の設定

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 5.3-4 に、本シミュレーション領域のモデルグリッド解像度 (60 km) 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。

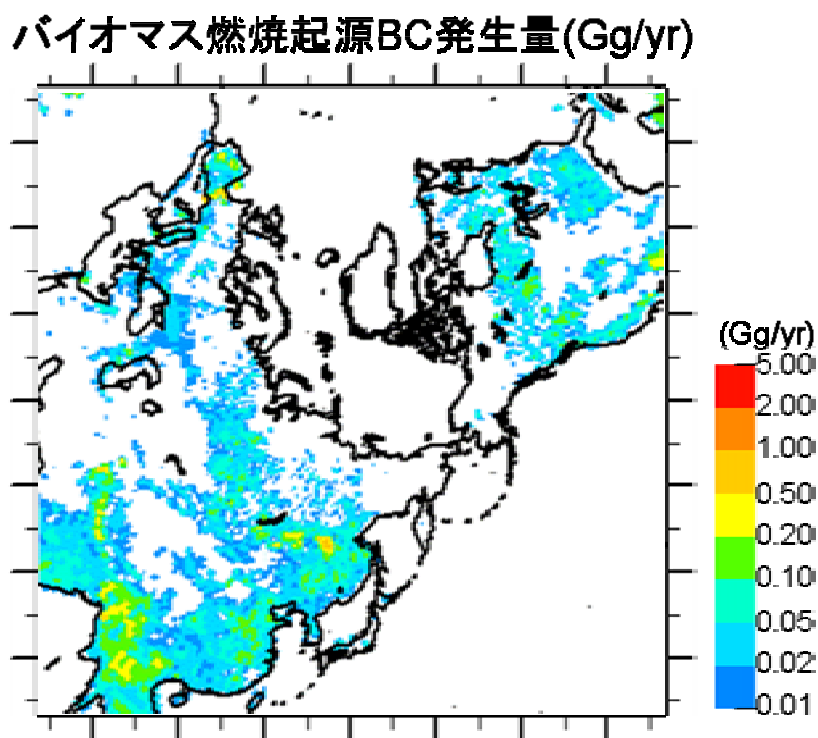


図 5.3-4 計算領域 (60km 格子) におけるバイオマス燃焼起源ブラックカーボンの年間排出量 (Gg/yr)

van der Werf, G. R. et al: Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009), Atmos. Chem. Phys., 10, 11707-11735, doi:10.5194/acp-10-11707-2010, 2010.

(3) 北緯 66° 以南の船舶起源排出量の設定

本シミュレーション領域のうち、66° 以北における船舶起源ブラックカーボン排出源データは、本年度事業において作成したデータを用いている（本報告書 4 章）。他方、66° 以南の船舶データについては、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。ARCTAS の基づく 66° 以南の排出量は 2008 年ベース、66° 以北の排出量は 2013 年から 2014 年の最新のデータで時間的な乖離があることには留意されたい。ただし、今回の船舶の寄与は 66° 以北のみで評価しており、66° 以南についてはある種の境界条件として取り扱うことが可能であると考ええる。

図 5.3-5 に、本シミュレーション領域のモデルグリッド解像度 (60 km) 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(北緯 66° 以南)を示し、図 5.3-6 に、本年度作成した北緯 66° 以北における船舶起源ブラックカーボン年間排出量を示す。

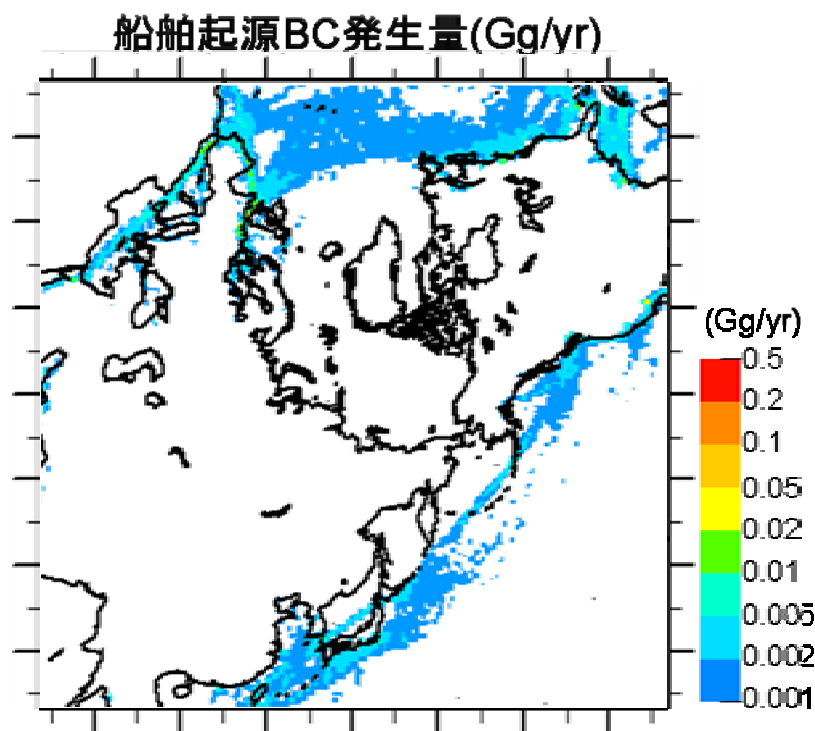


図 5.3-5 北緯 66° 以南における船舶起源 EC の年間排出量 (Gg/year)

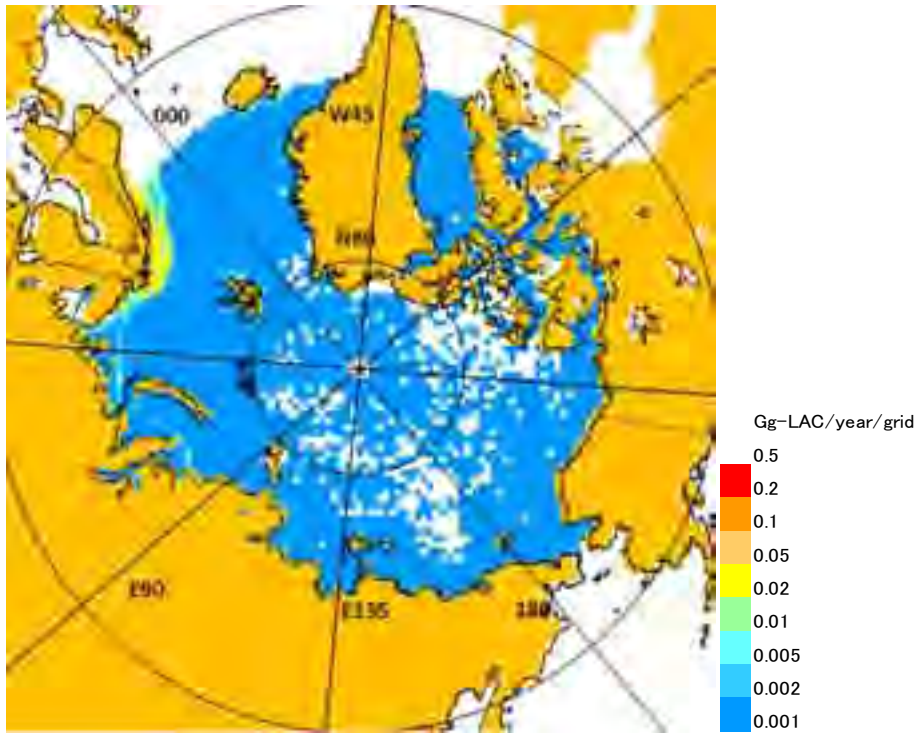


図 5.3-6 北緯 66° 以北における船舶起源 LAC の年間排出量(Gg/year)

5.3.5 計算実行フローと実測値との再現性の確認

図 5.3-7 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に、1 ヶ月間の準備期間を対象期間前に設けて本計算を実施している。

なお、本年度実施した計算環境は表 5.3-2 に示すとおりである。1 ヶ月分の前処理計算に要した時間は 25 分(非並列)であり、1 年分の本計算に要した時間は約 4.5 時間(512 並列)であった。

本シミュレーションの再現性については、昨年度事業において風向風速などの気象、航空機観測によって得られた大気中 EC 濃度、地上 EC 観測濃度値および先行研究における放射強制力計算との比較で検討を行っており、いずれも気象についてはよい再現性が得られており、EC 濃度と放射強制力についても概ね一致することを確認している。このため、本年度は再現性の検討作業は行っていない。

表 5.3-2 使用計算機の仕様

名称	大型計算機システム 大規模並列計算機
機種	SGI ICE X
CPU	Intel Xeon E5-2670 8core 2.6GHz
OS	SUSE Linux Enterprise Server11SP1 + SGI Performance Suite
コンパイラ	Intel Fortran/C/C++

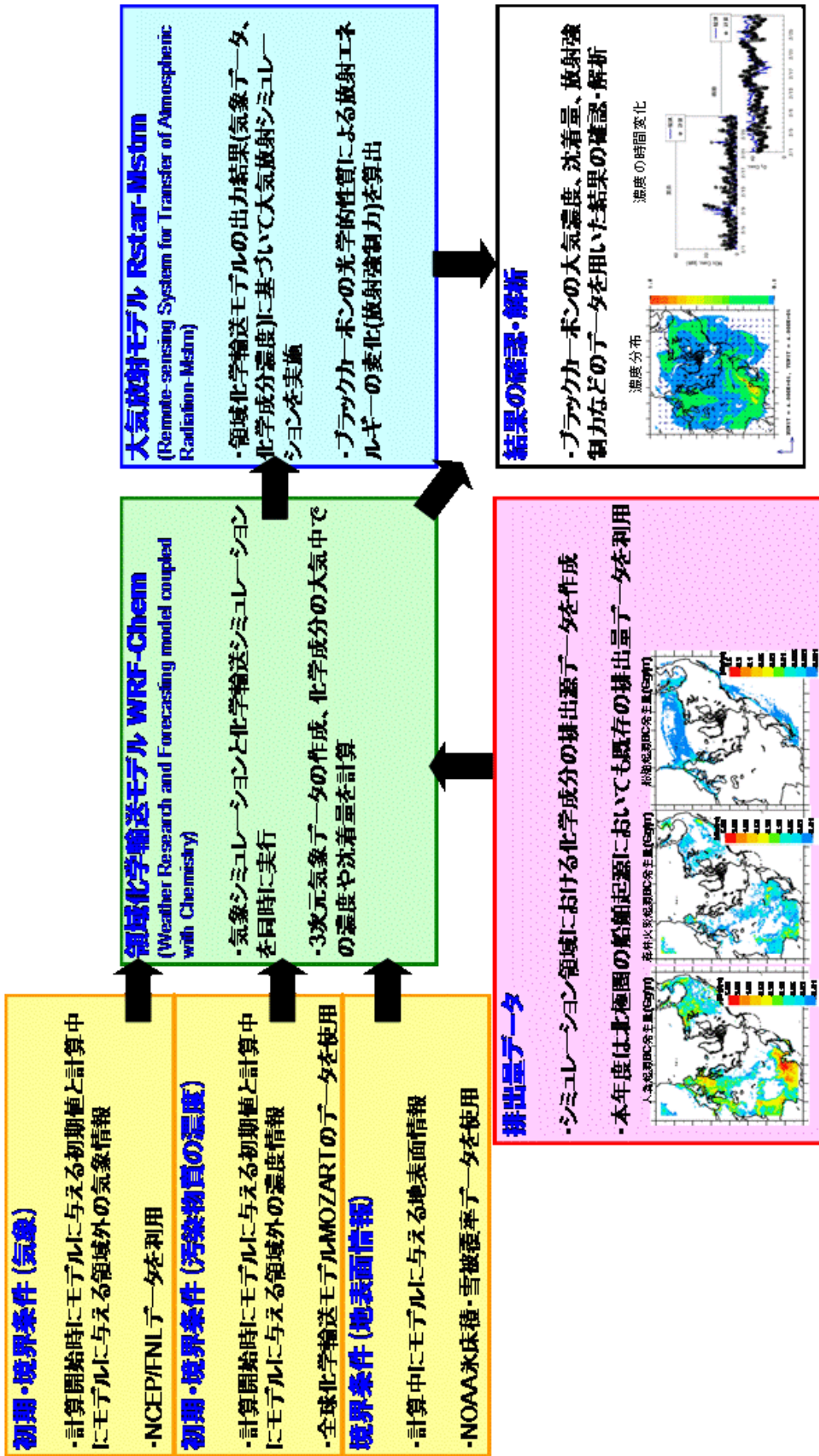


図 5.3-7 シミュレーションの実行フロー

5.4 シミュレーション結果と解析

5.4.1 船舶の寄与を算定するためのシミュレーション結果と解析

(1) 最下層 EC 濃度分布図

図 5.4-1～図 5.4-3 に現況(Case1)における最下層 EC 濃度分布を示し、図 5.4-4～図 5.4-6 と図 5.4-7～図 5.4-9 に、それぞれ現況 Case1 と Case2(66°以北の全船舶なし)、現況 Case1 と Case3(66°以北のうち Non Arctic area の船舶なし)の差分を示す。すなわち、Case1 と Case2 の差分では 66°以北の全船舶による寄与が、Case1 と Case2 の差分では 66°以北のうち Arctic area における船舶による寄与が、抽出されることになる。

まず、現況 Case1 において海上の大気中のブラックカーボン濃度の高い地域は、ヨーロッパ大陸中央部、北米東岸部および東アジアに集中しており、図 5.3-3 に示す陸上の人為的陸上排出源からの排出量分布に一致する。つまり、一般に陸上から排出されたブラックカーボンが、長距離を移流・拡散することは希であることがわかる。他方、太平洋航路、大西洋航路、あるいは航行密度の高い地中海については航路帯と重なった EC 濃度の高い領域は計算されていない。

次に、船舶排出起源ブラックカーボン濃度分布図(Case1 と Case2 の差分)(図 5.4-4～図 5.4-6) と、船舶起源ブラックカーボンの排出源分布図(図 4.2-4 および図 4.2-5)を比較する。たとえば、図 4.2-4 の 1 月において排出量ではスカンジナビア半島北部沿岸部においてのみ高い排出強度が計算されているのに対して、図 5.4-4 の 1 月の濃度分布ではスカンジナビア半島から離れて高緯度域に存在するスピッツベルゲン諸島付近の Non Arctic area 周辺まで 1.0-5.0 ng/m³ の濃度領域が広がっており、また白海周辺の一部などについても同濃度範囲がひろがっていることがわかる。特に 5 月から 8 月には高い排出強度エリアが増加することに伴い、1.0-5.0 ng/m³ の濃度範囲の領域が広がる。つまり、東西方向への移流拡散だけでなく、高緯度域へのそれも予想される結果となった。ただし、3 章で図 3.2-2 で紹介した 2013 年 9 月の海氷の広がりと比較すると大きな重なりは見られないため、夏季の船舶からの高濃度 EC は主に海表面あるいは陸地に乾性沈着していることが予想される。

次に、北極圏における EC 濃度範囲は、Case1 において 50-70 ng/m³ に対して Case1—Case2 において 5-10 ng/m³ となり Arctic area と Non Arctic area を併せて全体の人口排出源に対して 1/10 程度の寄与があることが想定される。この値は、6.1 で検討する排出量ベースで推定される船舶/総 EC 量比率(7.4%)と大きく変化しない。

最後に、図 5.4-7～図 5.4-9 に示した Case1 と Case3 との差分で見ると、スカンジナビア半島沿岸の高排出地域からの影響は特に同半島の陸上だけでなく、一部白海の周辺まで及んでおり、同海域からの影響は Arctic area にまで及んでいることがわかる。これを確認するため、Case2 と Case3 の 7 月における差分を、図 5.4-10 に示した。Arctic area からの排出のみで見た場合、地表面の EC 濃度への最大寄与は、1 月、7 月ともに、カラ海からユーズニ島付近に観測される。ただし、その絶対濃度は、Case1 において 50-70 ng/m³ に対して最大で 5 ng/m³ 程度であり濃度レベルで 1/10 以下の寄与であると評価できる。この値は、6.1 で検討する Arctic area からの排出量ベースで推定される船舶/総 EC 量比率(1.7%)と比較してやや大きい。

ただし、今回のシミュレーションは排出強度、計算格子ともに 60km メッシュで行われており、海峡や港湾周辺などのメッシュより小さいスケールでの高濃度は再現できないことには留意する必要がある。

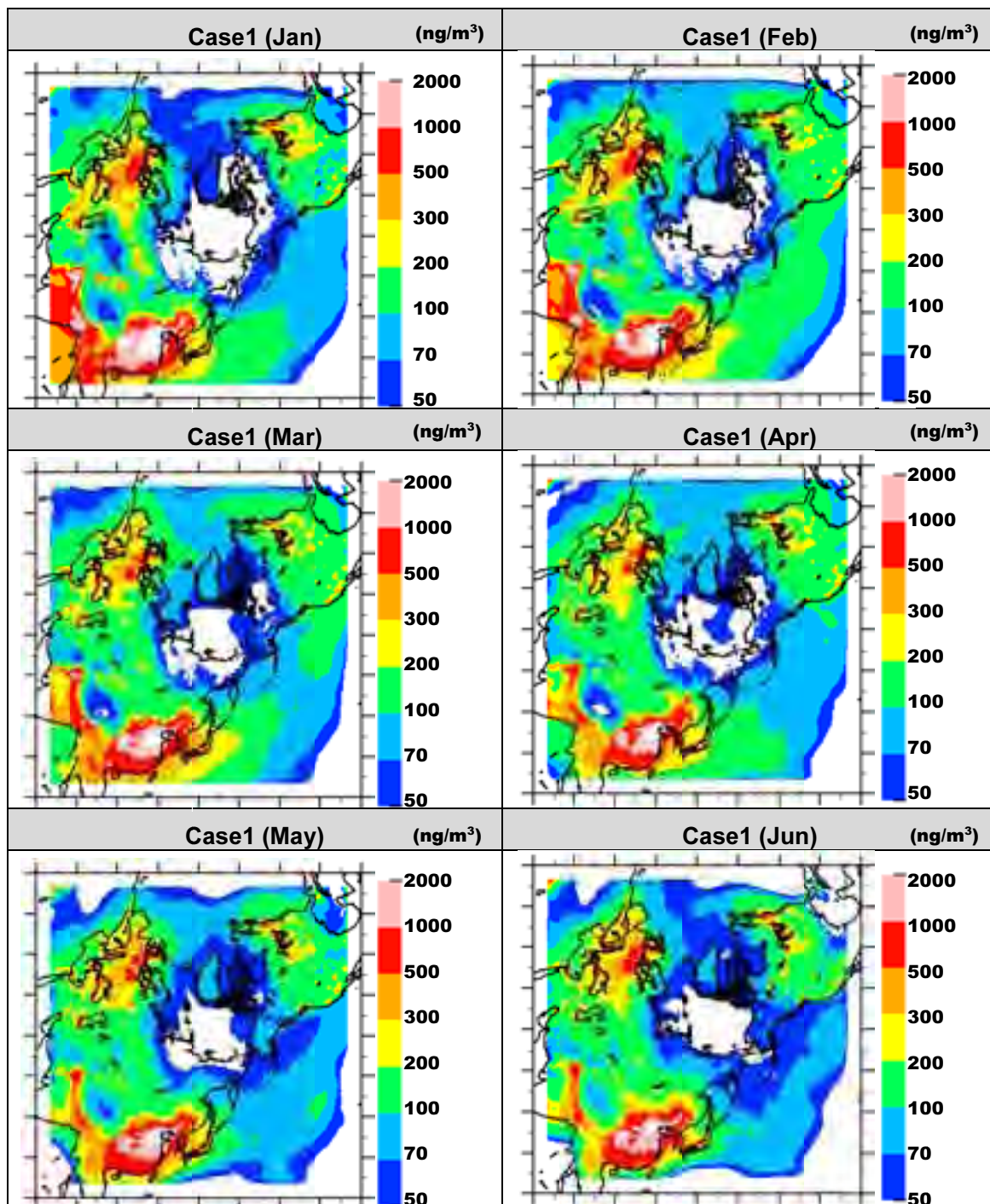


図 5.4-1 現況 Case1 における最下層 EC 濃度分布図 (月平均) 1~6 月

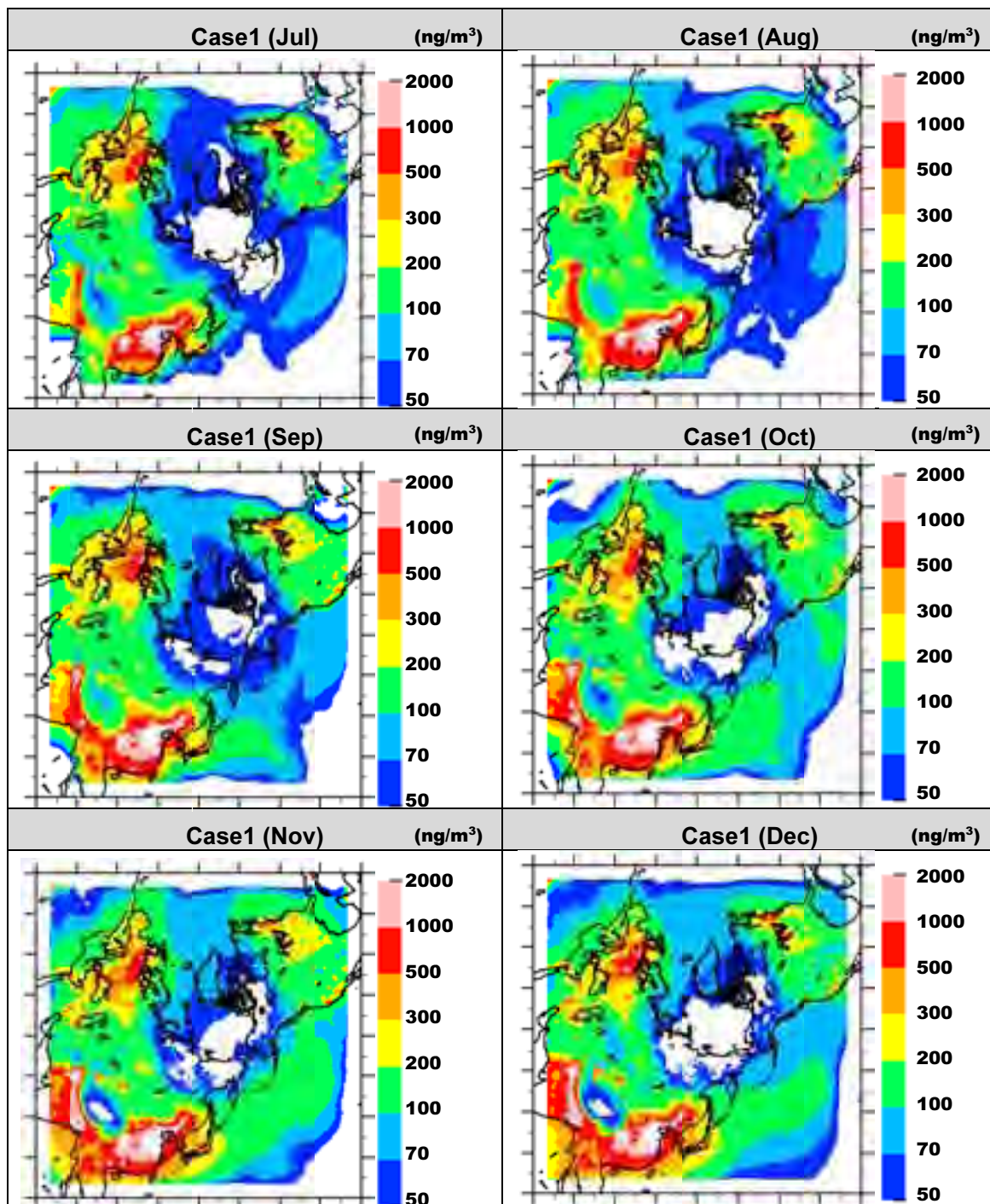


図 5.4-2 現況 Case1 における最下層 EC 濃度分布図 (月平均) 7~12 月

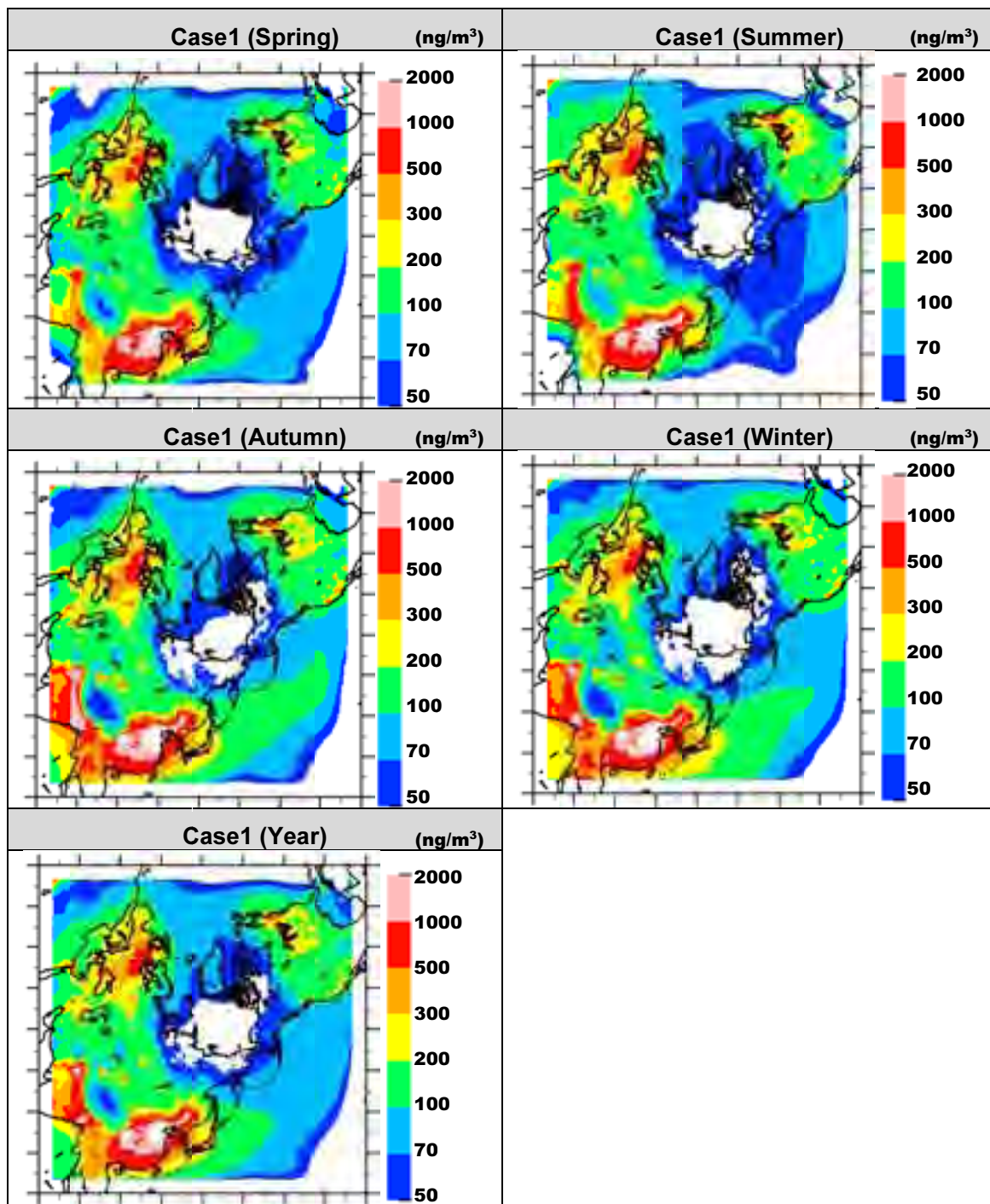


図 5.4-3 現況 Case1 における最下層 EC 濃度分布図 (季平均値と年平均値)

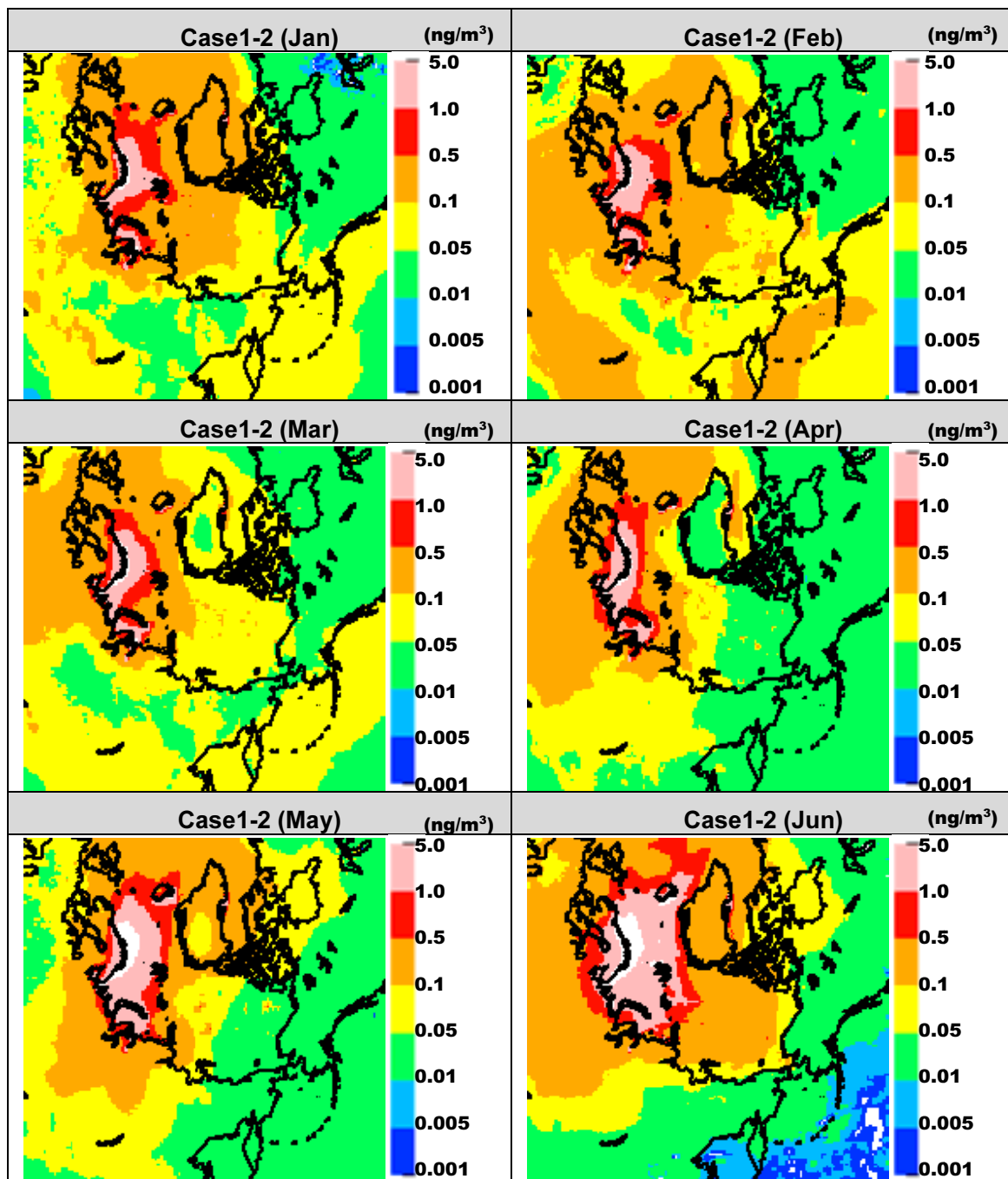


図 5.4-4 現況 Case1 と現況 Case2 の最下層 EC 差分濃度分布図 (月平均) 1~6 月

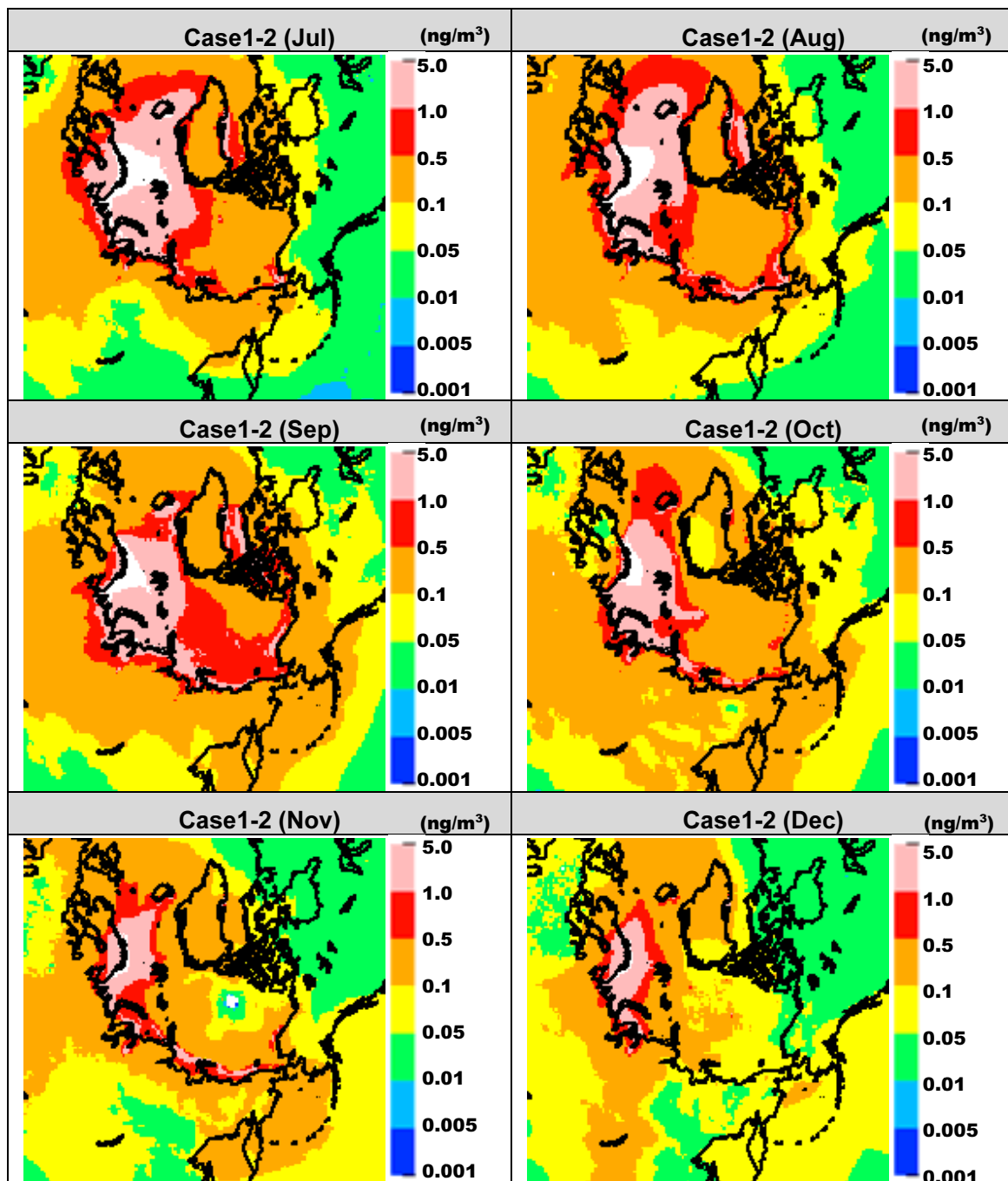


図 5.4-5 現況 Case1 と現況 Case2 の最下層 EC 差分濃度分布図 (月平均) 7~12 月

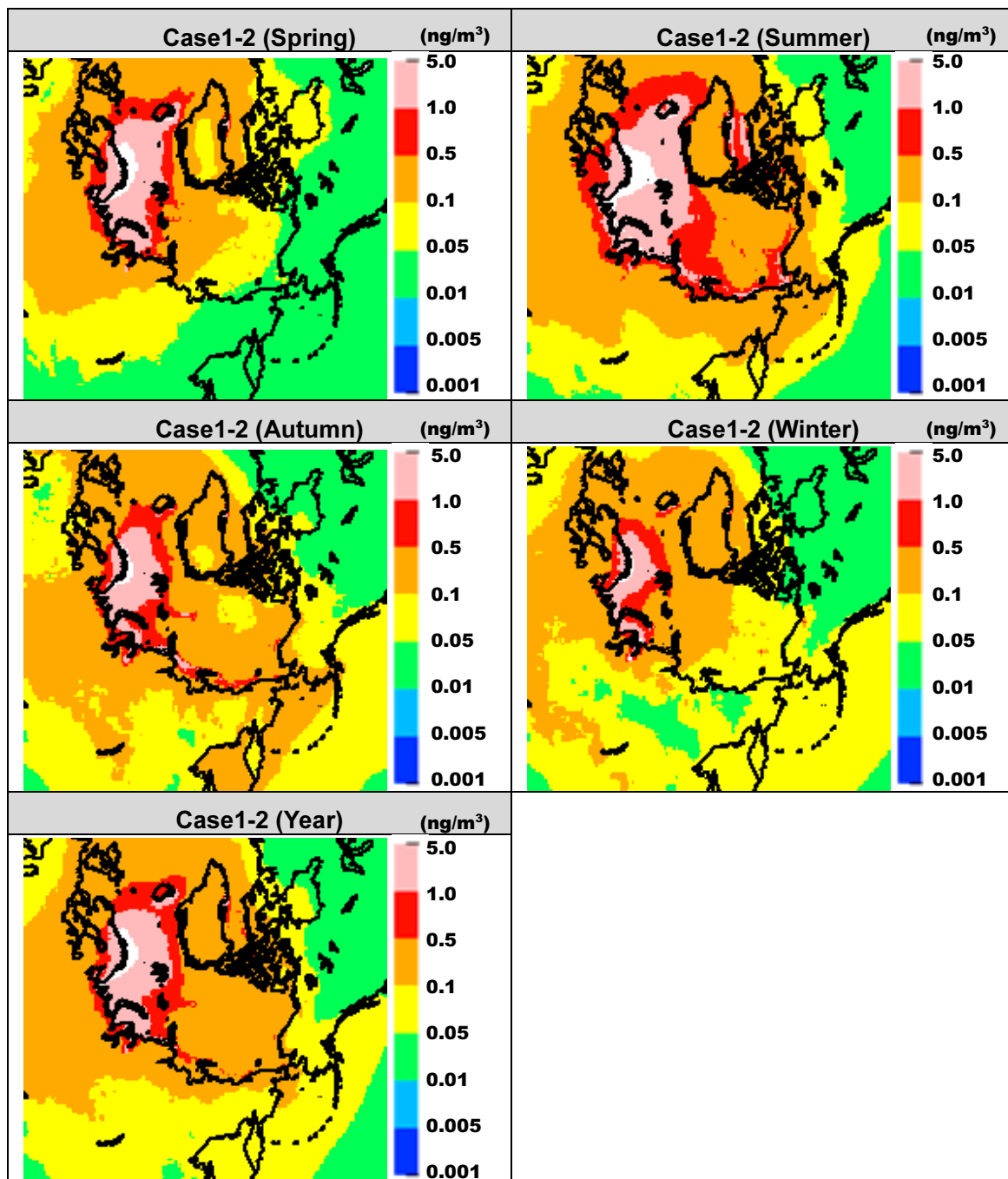


図 5.4-6 現況 Case1 と現況 Case2 の最下層 EC 差分濃度分布図 (季平均値と年平均値)

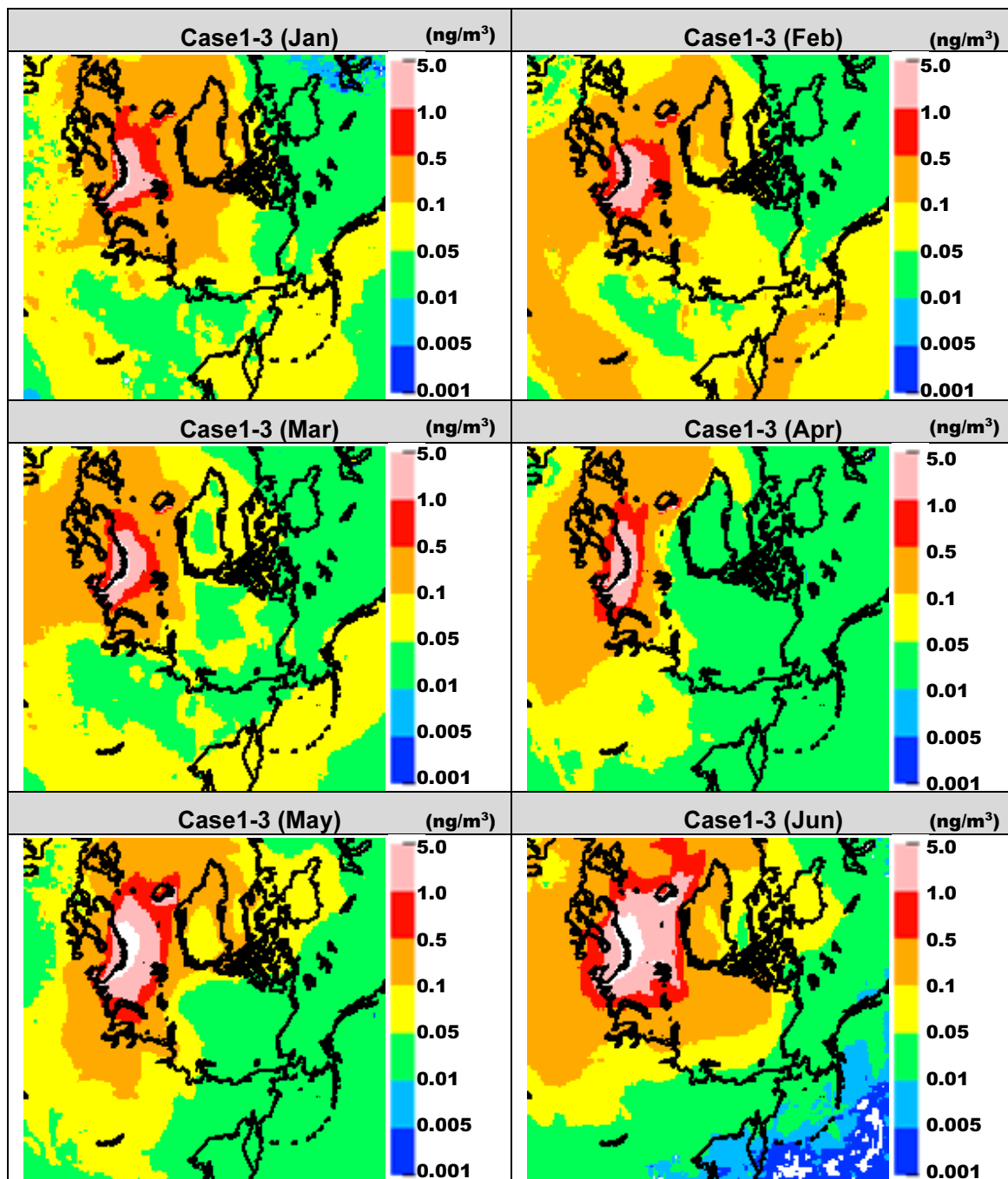


図 5.4-7 現況 Case1 と現況 Case3 の最下層 EC 差分濃度分布図 (月平均) 1~6 月

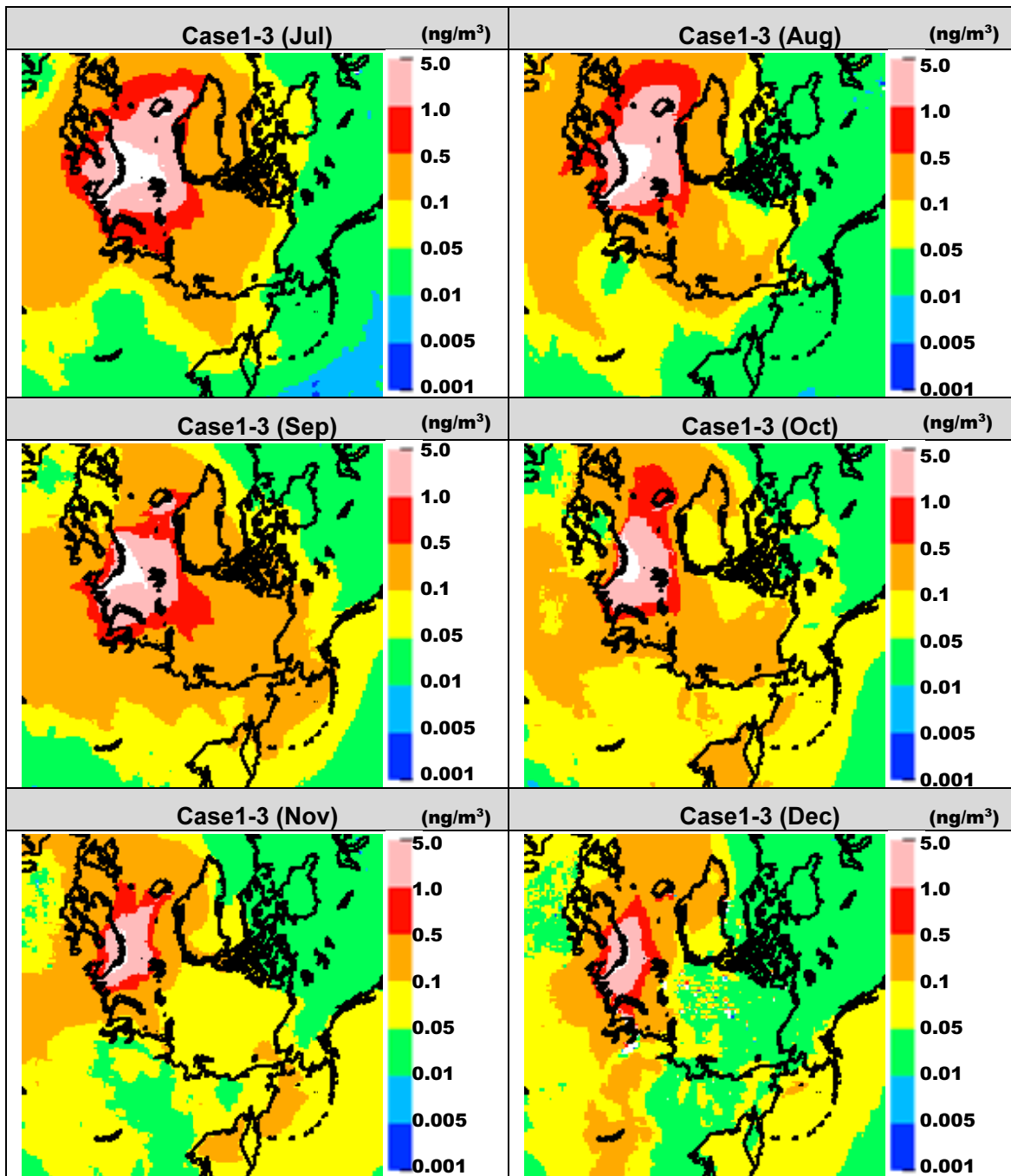


図 5.4-8 現況 Case1 と現況 Case3 の最下層 EC 差分濃度分布図 (月平均) 7~12 月

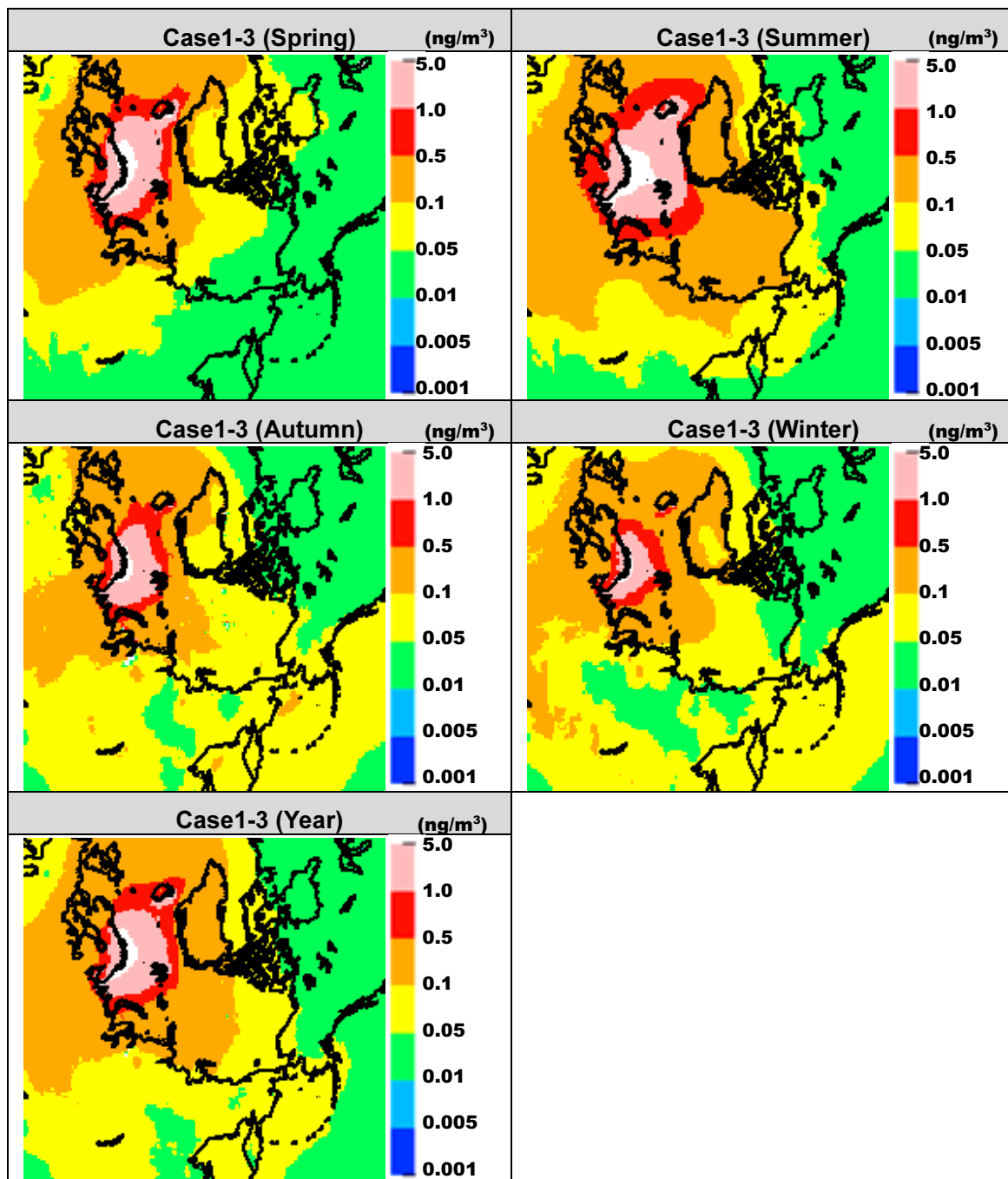


図 5.4-9 現況 Case1 と現況 Case3 の最下層 EC 差分濃度分布図 (季平均値と年平均値)

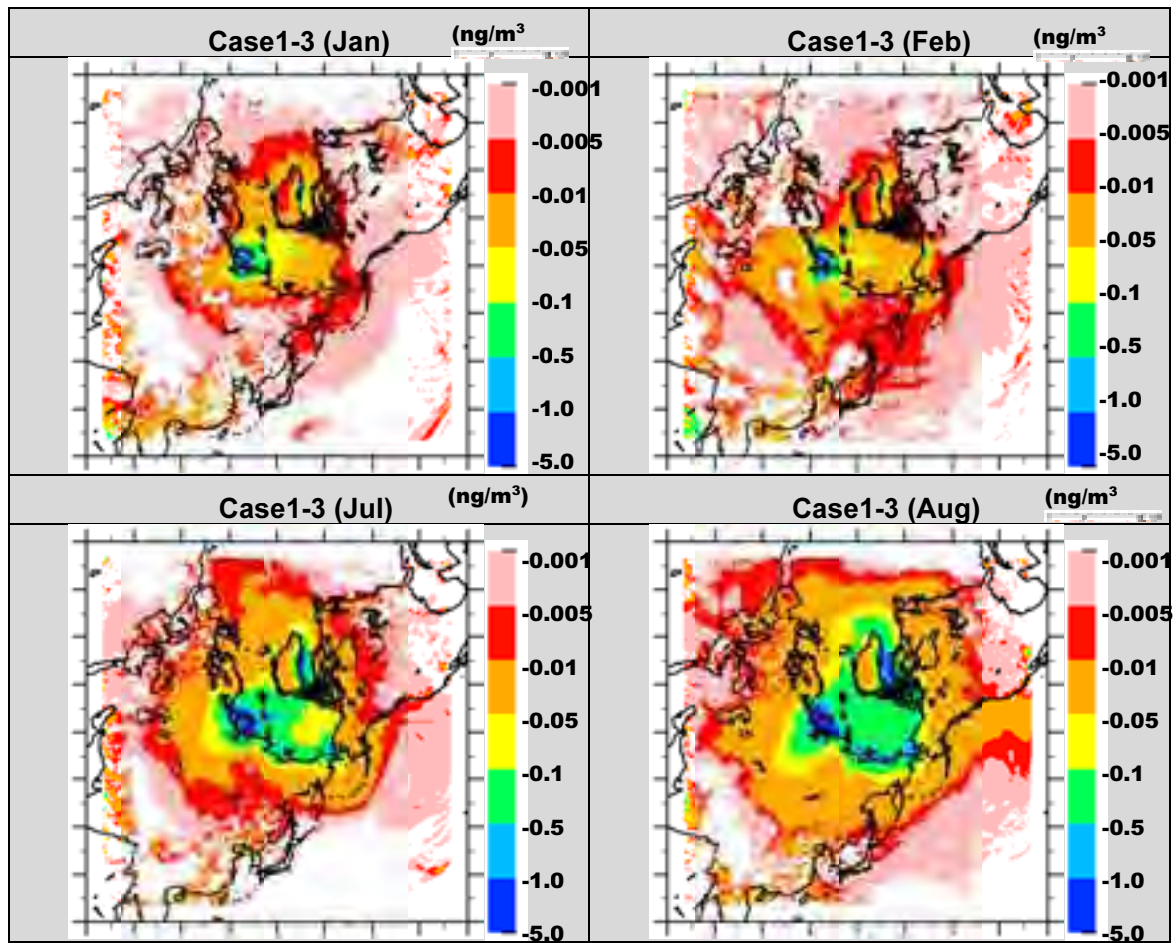


図 5.4-10 現況 Case2 と現況 Case3 の最下層 EC 差分濃度分布図(1、2、7 および 8 月)

(2) 気柱 EC 総量分布図

図 5.4-11～図 5.4-13 に現況 Case1 における気柱 EC 総量の分布を示し、図 5.4-14～図 5.4-16 と図 5.4-17～図 5.4-19 に、それぞれ現況 Case1 と Case2(66°以北の全船舶なし)、現況 Case1 と Case3(66°以北のうち Non Arctic area の船舶なし)の差分を示す。すなわち、Case1 と Case2 の差分では 66°以北の全船舶による寄与が、Case1 と Case2 の差分では 66°以北のうち Arctic area における船舶による寄与が、抽出されることになる。(3)で計算される放射強制力に影響する主たるパラメータの一つがここで示す気柱 EC 総量であり、太陽光が地表面まで到達するまでに拡散・吸収される量は本総量に対応すると考えてよい。

気柱 EC 総量でみた傾向は、(1)で検討した最下層の EC 濃度とほぼ変わらない。

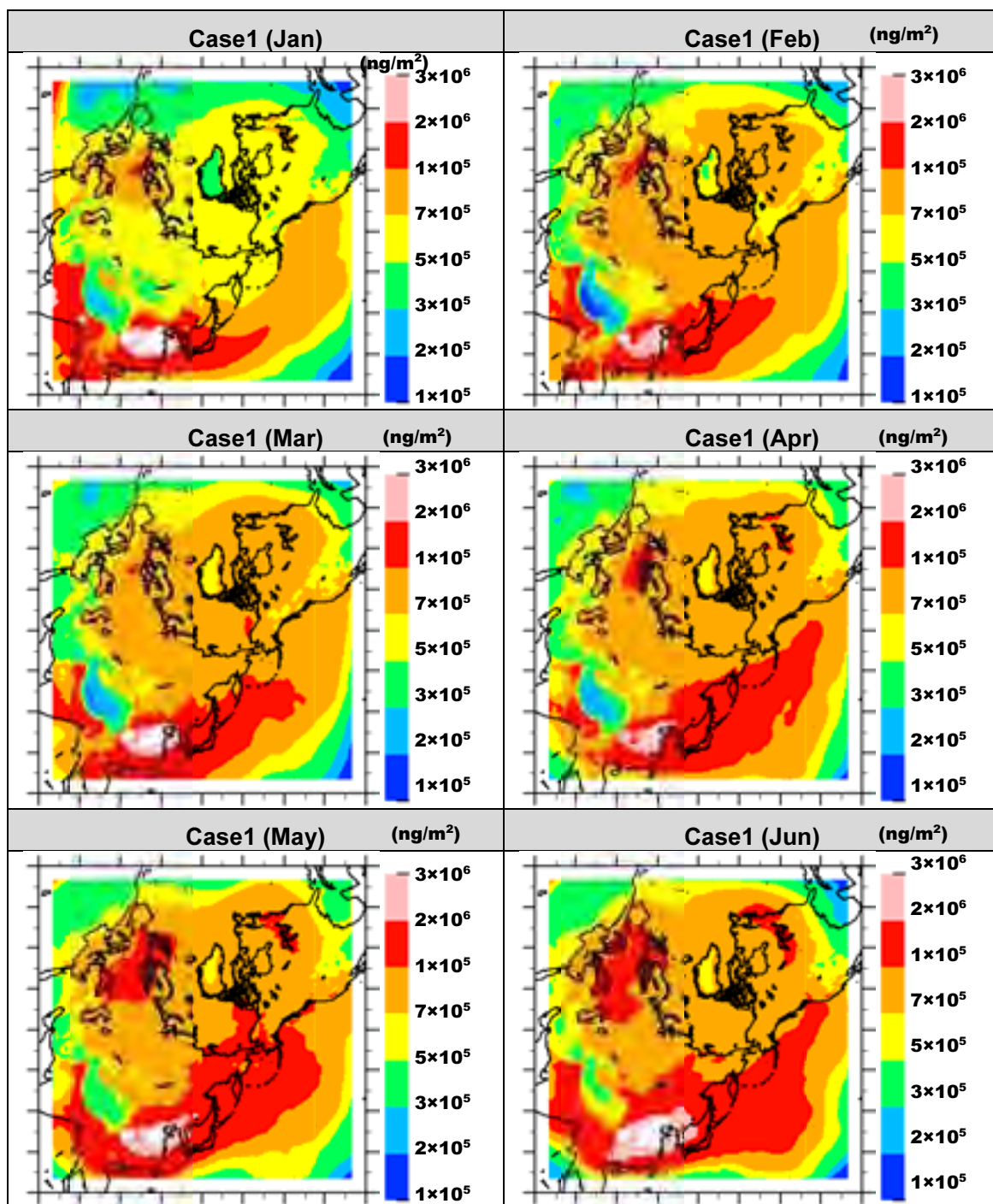


図 5.4-11 現況 Case1 における気柱 EC 総量分布図 (月平均) 1~6 月

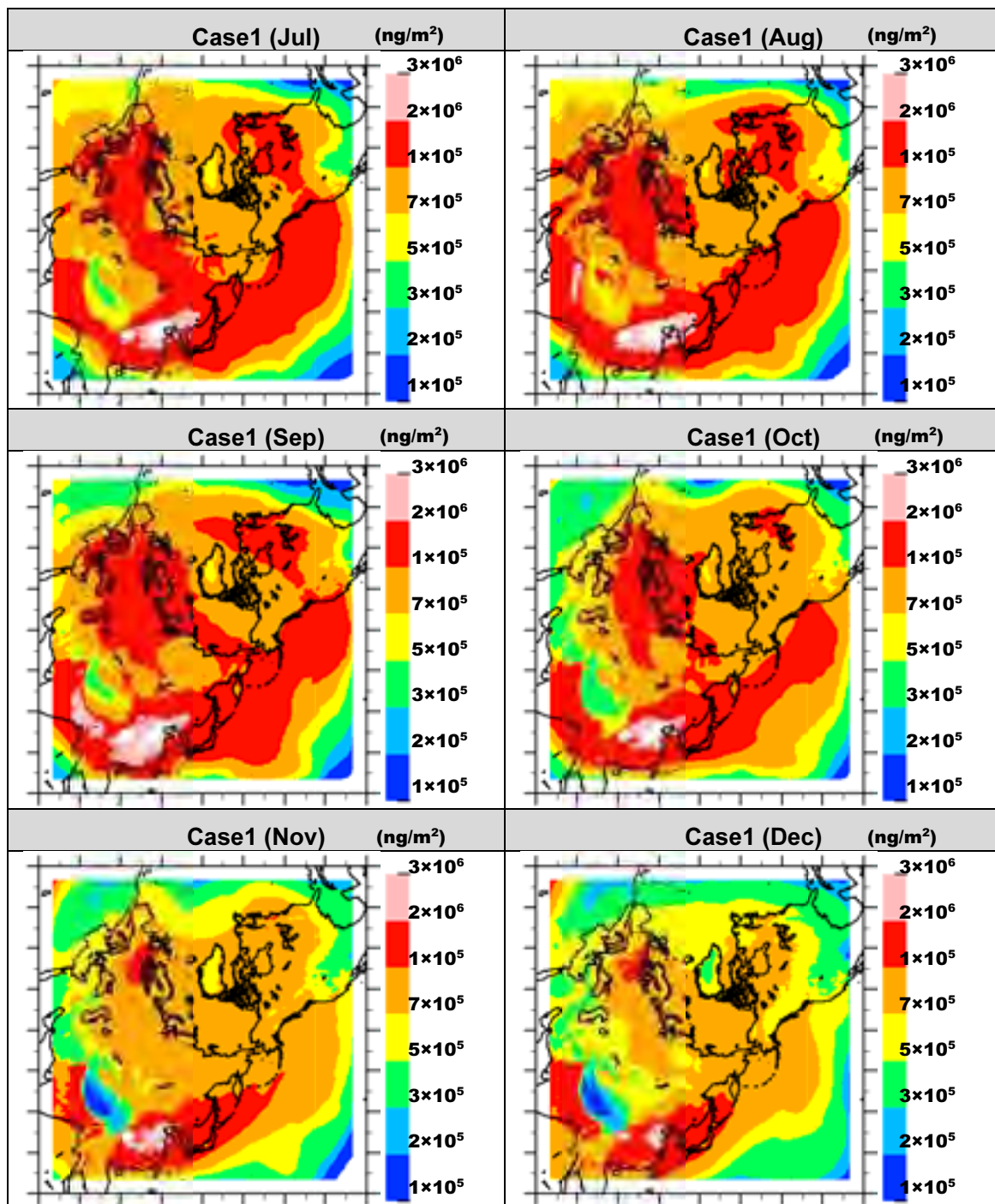


図 5.4-12 現況 Case1 における気柱 EC 総量分布図 (月平均) 7~12 月

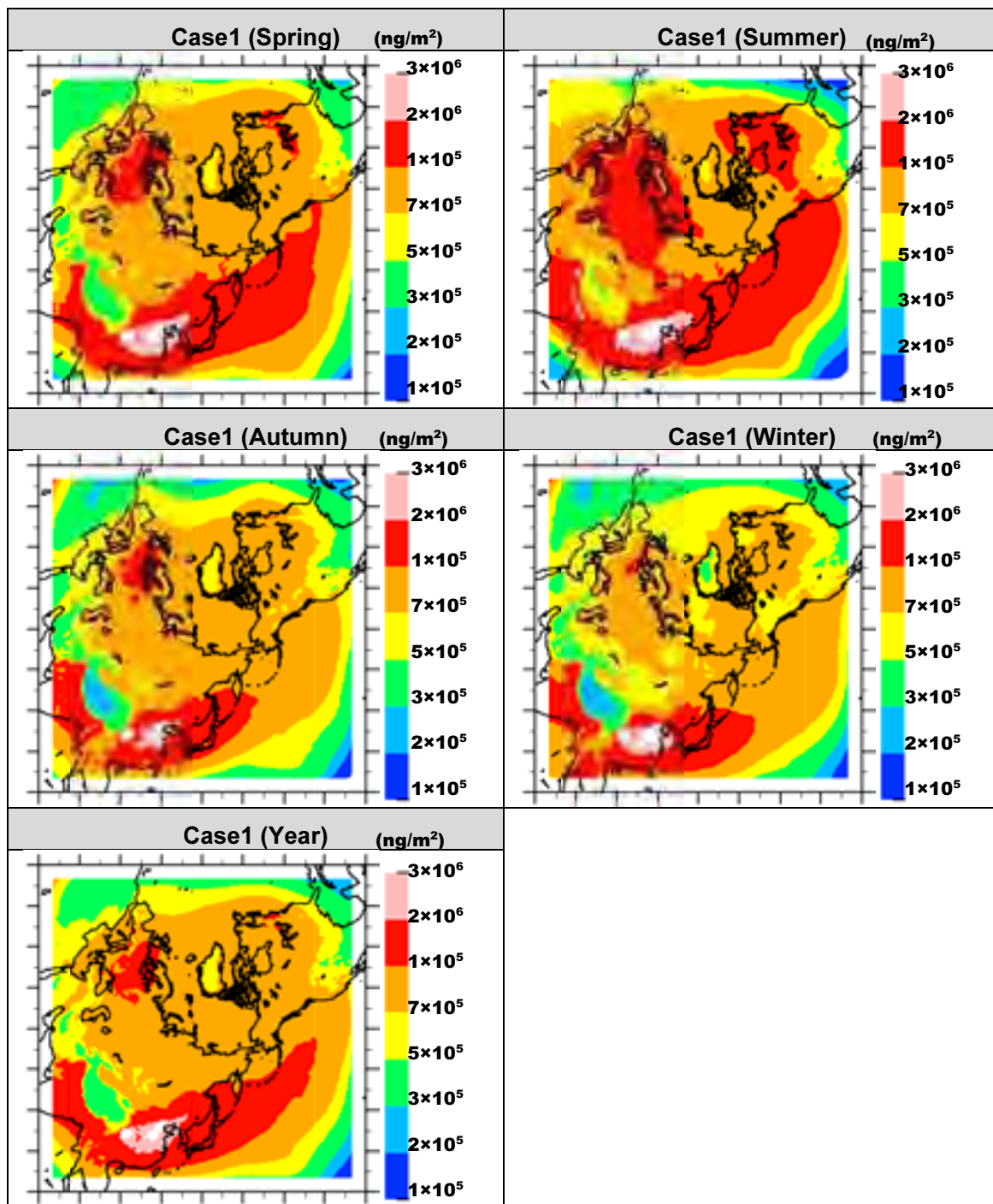


図 5.4-13 現況 Case1 における気柱 EC 総量の分布図 (季平均と年平均)

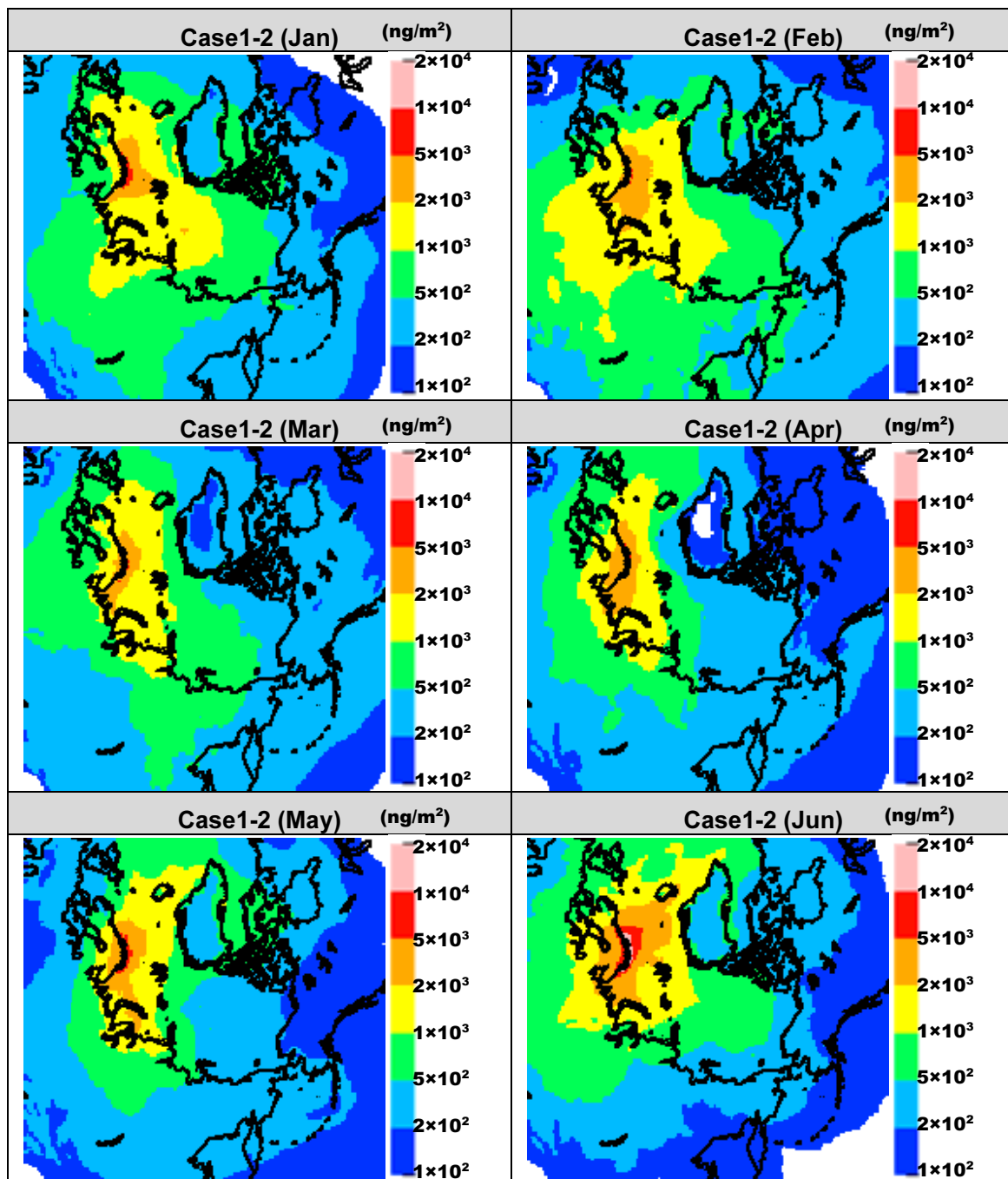


図 5.4-14 現況 Case1 と 現況 Case2 の気柱 EC 総量差分の分布図 (月平均) 1~6 月

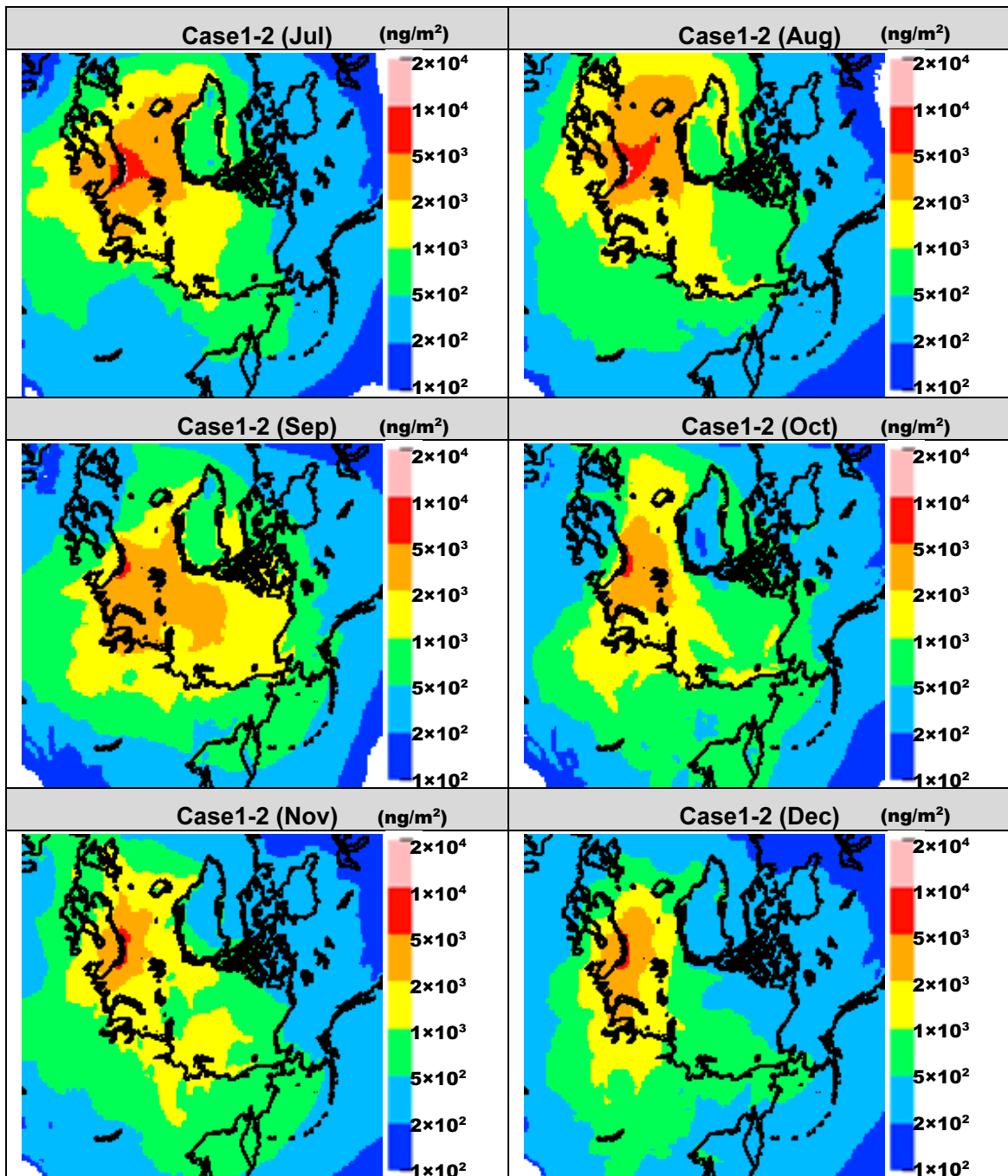


図 5.4-15 現況 Case1 と 現況 Case2 の気柱 EC 総量差分の分布図 (月平均) 7~12 月

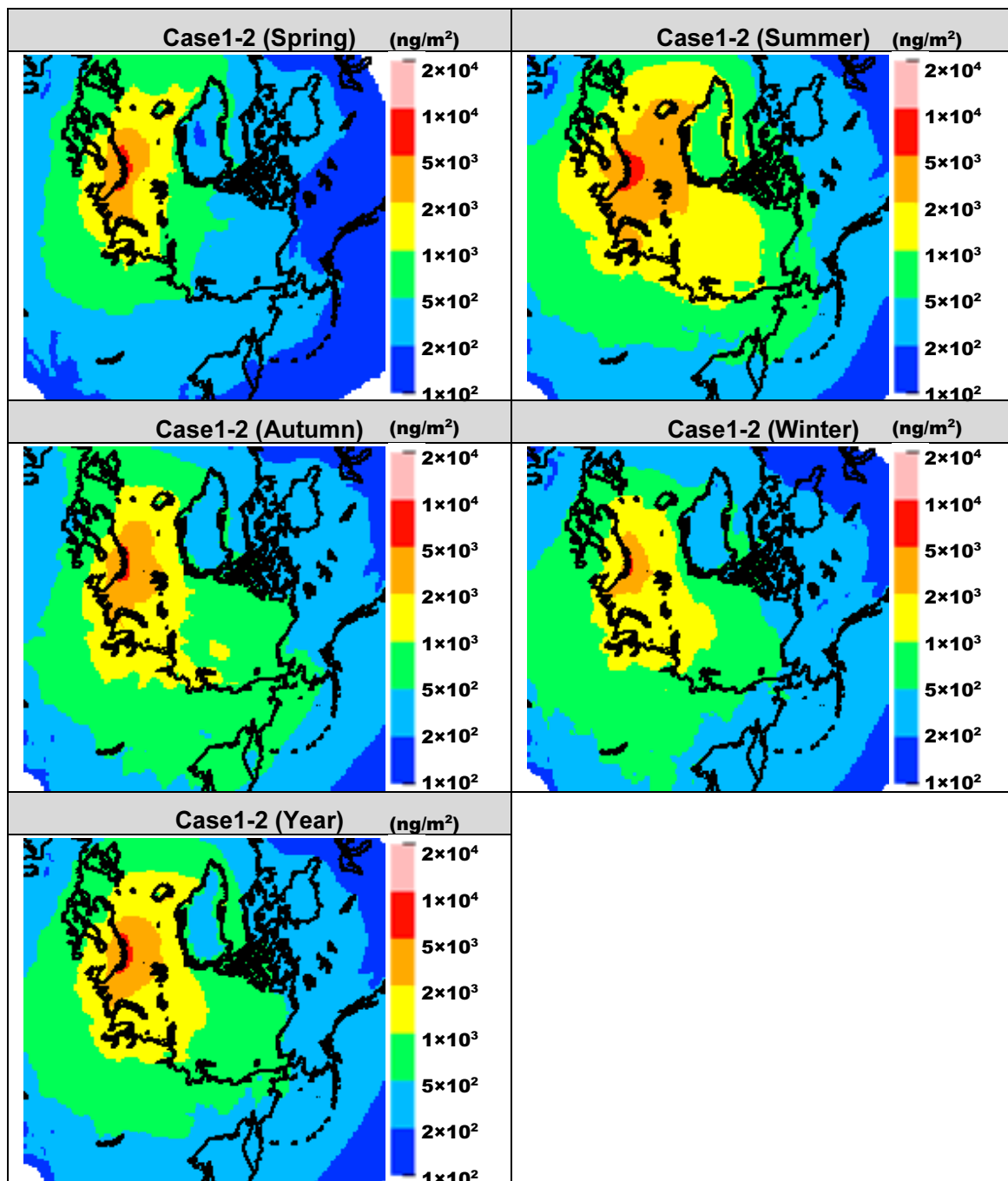


図 5.4-16 現況 Case1 と 現況 Case2 の気柱 EC 総量差分の分布図 (季平均と年平均)

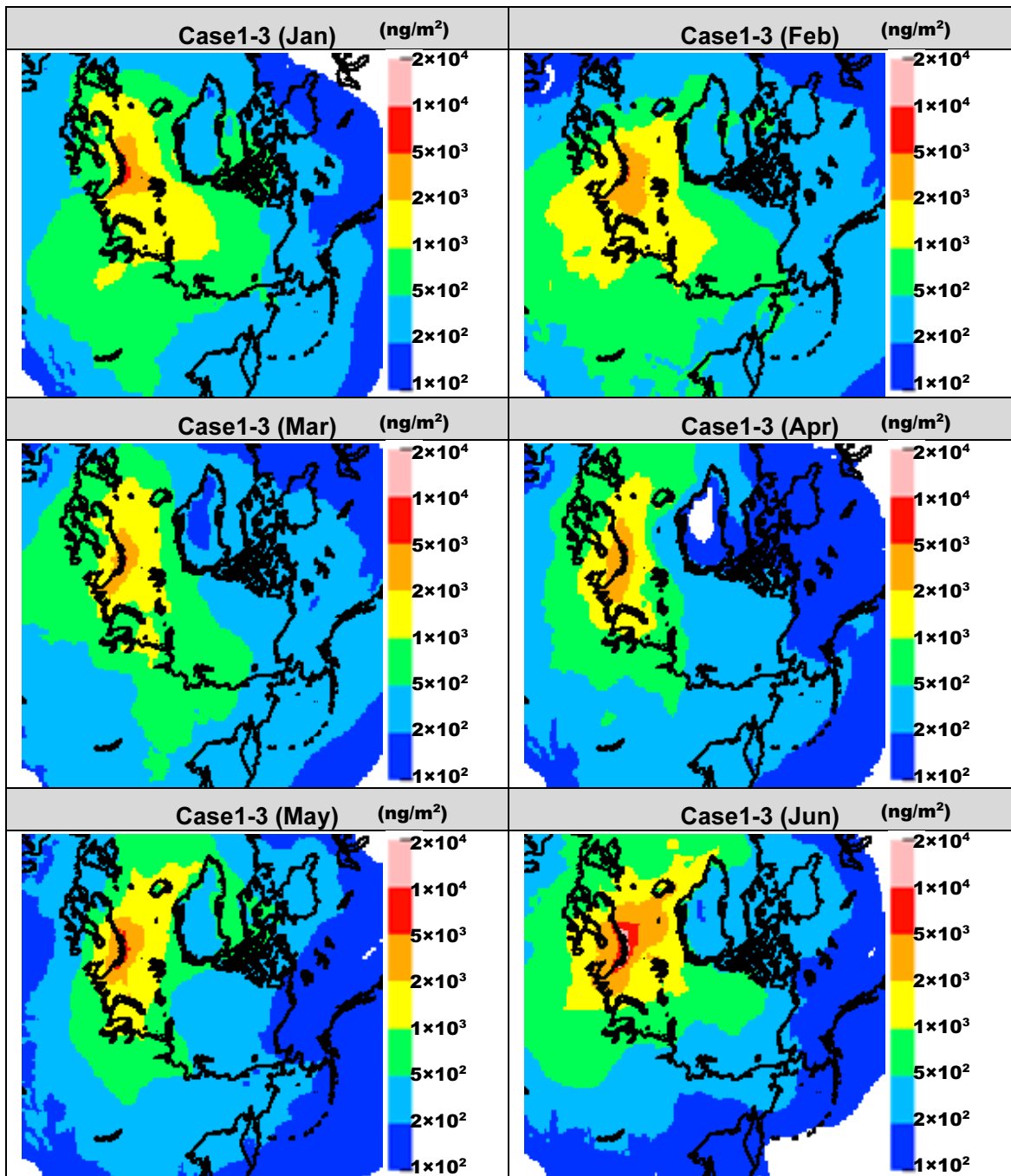


図 5.4-17 現況 Case1 と 現況 Case3 の気柱 EC 総量差分の分布図 (月平均) 1~6 月

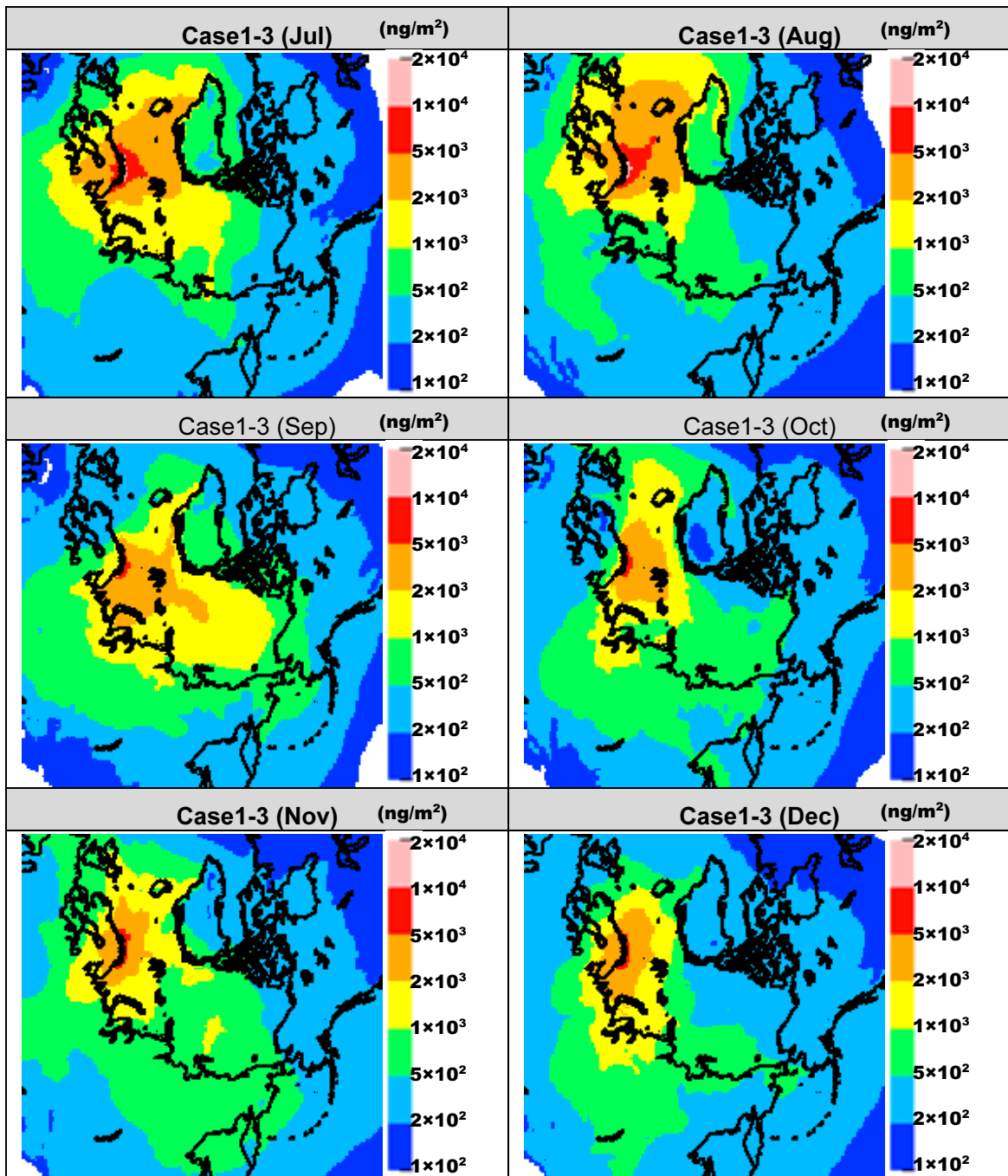


図 5.4-18 現況 Case1 と 現況 Case3 の気柱 EC 総量差分の分布図 (月平均)7~12 月

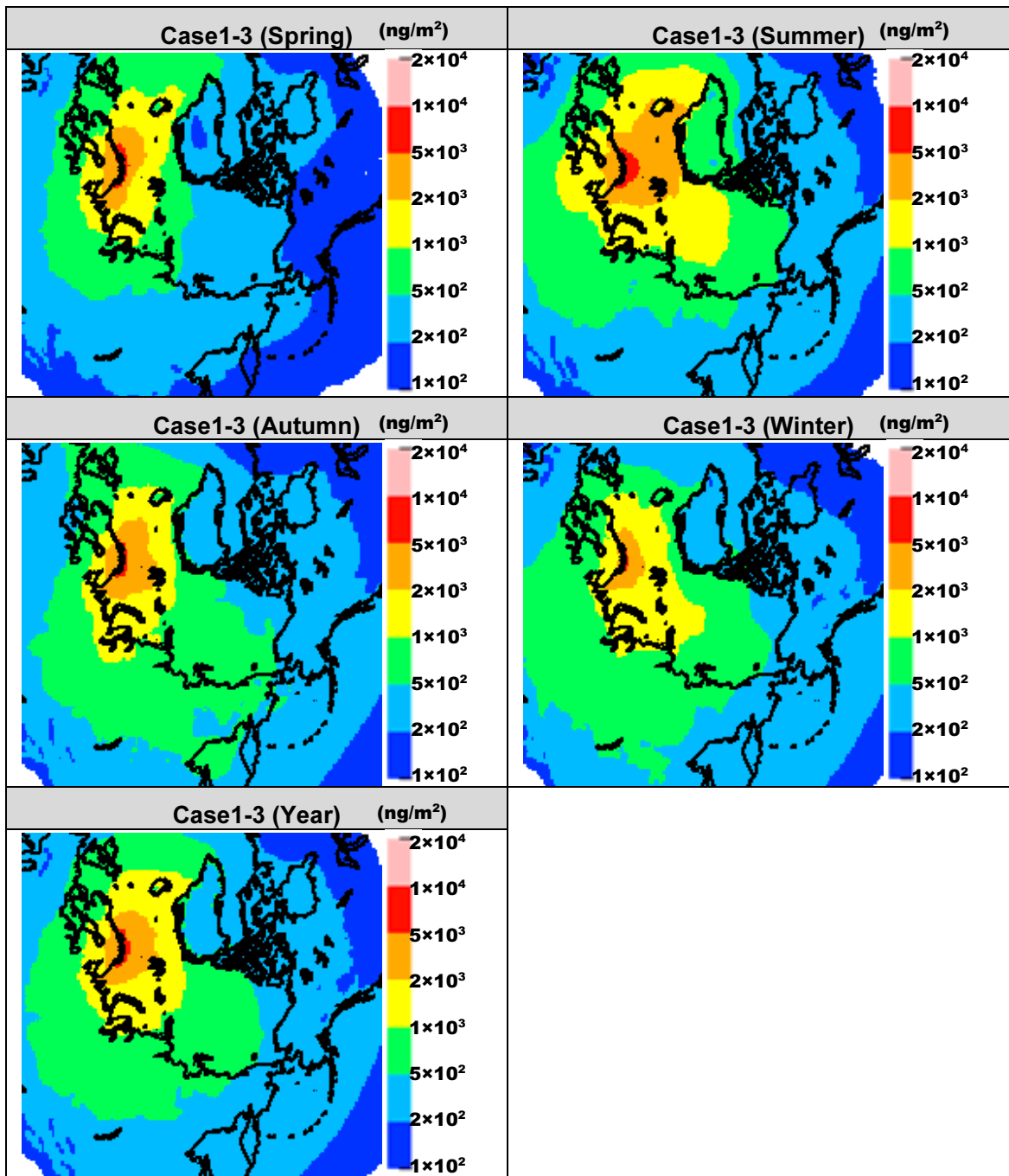


図 5.4-19 現況 Case1 と 現況 Case3 の気柱 EC 総量差分の分布図 (季平均と年平均)

(3) 気柱 EC 総量/排出量分布図

図 5.4-20～図 5.4-22 に現況 Case1 における気柱 EC 総量を LAC 排出量で除した値の分布を示した。図 5.4-23～図 5.4-25 と図 5.4-26～図 5.4-28 に、それぞれ現況 Case1 と Case2(66°以北の全船舶なし)、現況 Case1 と Case3(66°以北のうち Non Arctic area の船舶なし)の差分を示す。すなわち、Case1 と Case2 の差分では 66°以北の全船舶による寄与が、Case1 と Case2 の差分では 66°以北のうち Arctic area における船舶による寄与が、抽出されることになる。気柱 EC 総量/排出量は、各グリッドにおいて大気圏内に存在している EC がグリッドから排出されたものか、他のグリッドから移流したものかを判断する一つの指標になり得ると考えた。すなわち、値が大きいほど、グリッド内の排出が影響している割合が大きく、小さいほど他のグリッドに移流してしまうか、あるいは沈着しやすいことを示していると考えられる。

Case1 において、一般に海上の値は低緯度帯を含めて、陸上のそれに比較して大きく絶対値としても 1 より大きい。つまり、海上では局地的な排出源の影響よりも他のグリッドから流れ込む EC の影響が大きいことがわかる。他方、欧州、東アジアなど産業が活発な地域においては、青色の 1 より小さい値をもつ領域が広がっており、海上とは逆に他の地域へ移流するか、同じグリッド内を含めて沈着している可能性を示している。一般に、海上は陸上に比較して、表面粗度が小さく同じ地表面濃度と気象条件であれば乾性沈着速度が遅いと言われている。

Case1 と Case2 の差分(図 5.4-23～図 5.4-25)と Case1 と Case3 差分(図 5.4-26～図 5.4-28)を比較した場合、比率は 5.0 ng/ng 以下であり、大きな差異は見られない。

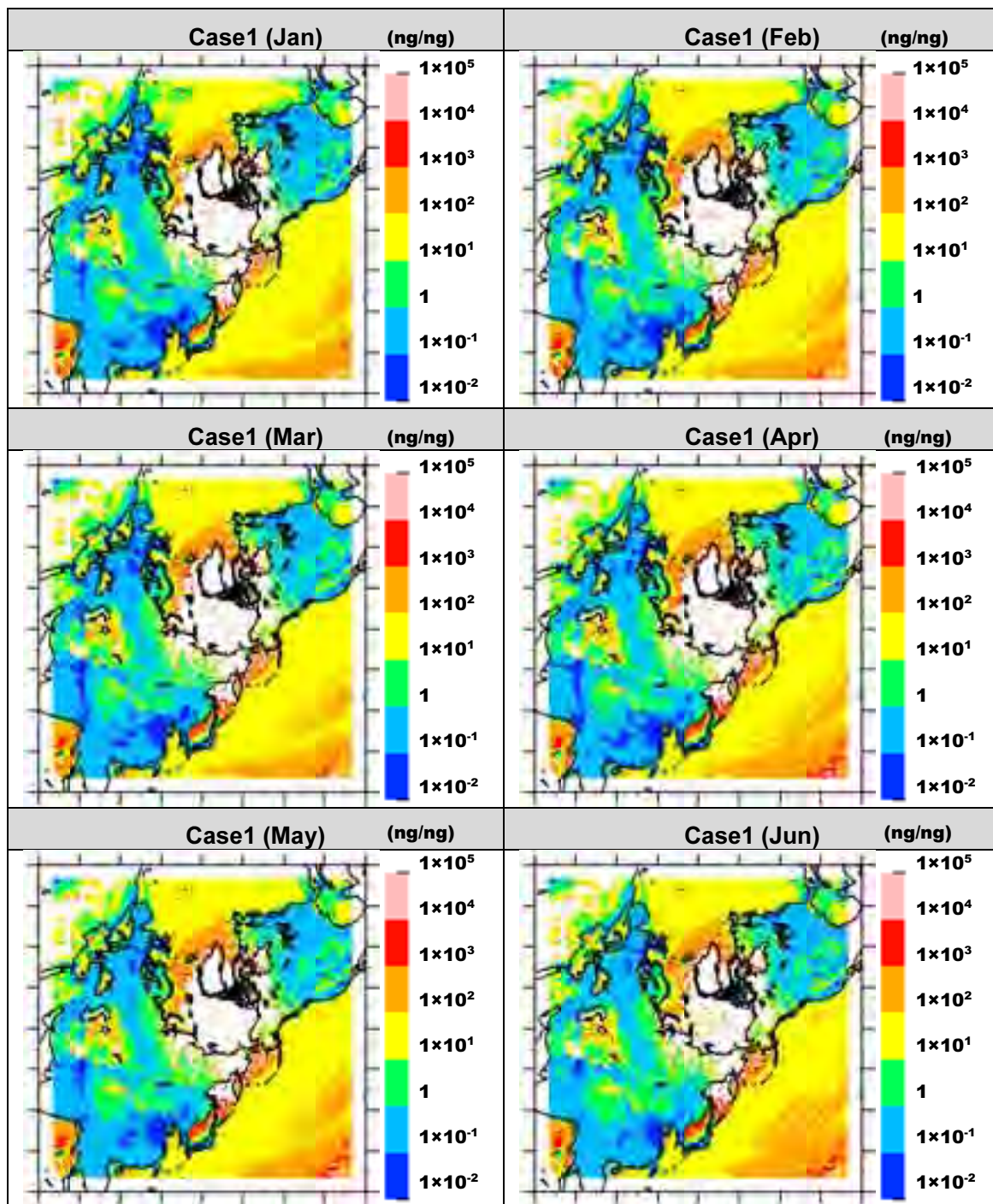


図 5.4-20 現況 Case1 における EC 気柱総量/排出量分布図 (月平均) 1~6 月

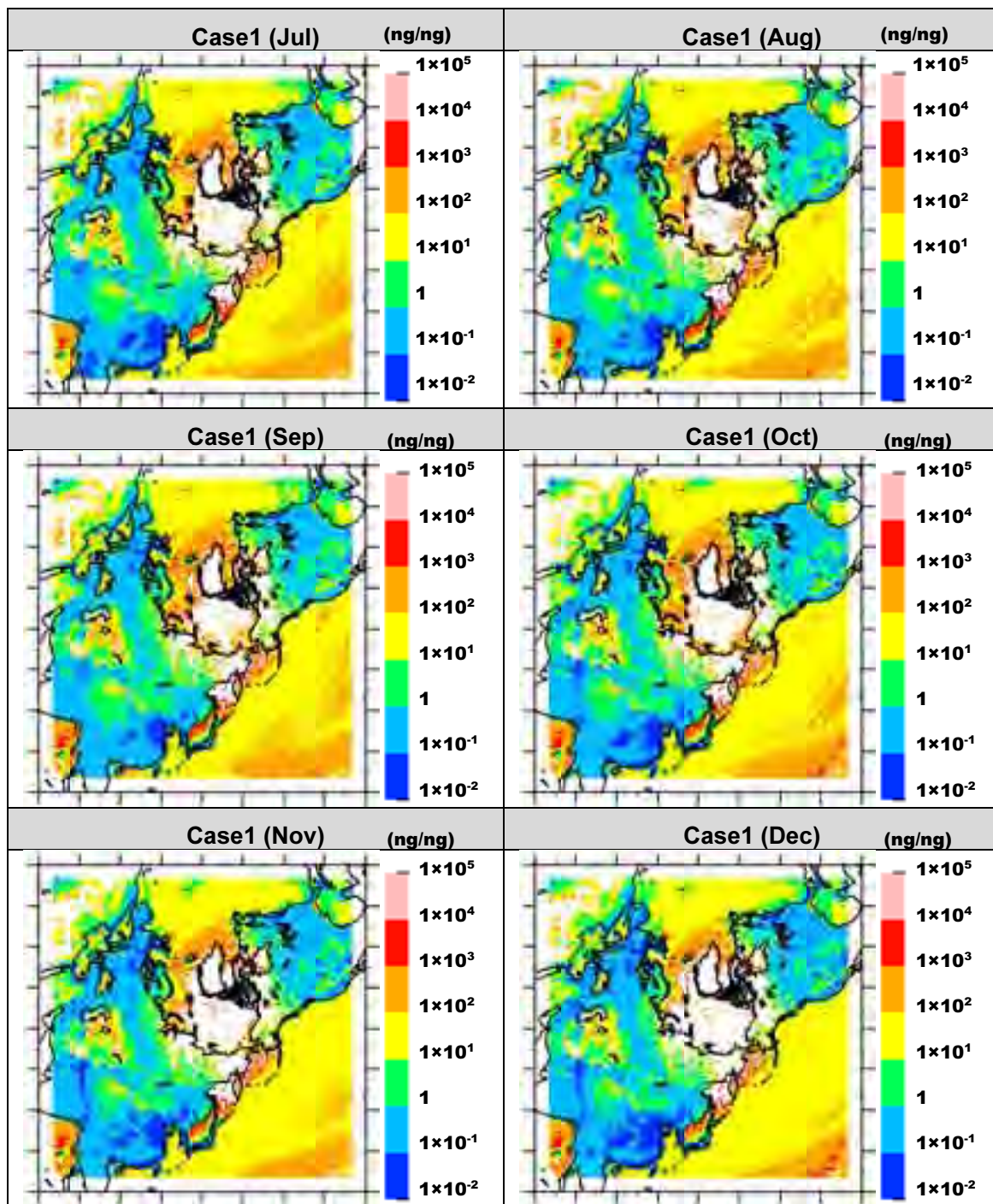


図 5.4-21 現況 Case1 における EC 気柱総量/排出量分布図 (月平均) 7~12 月

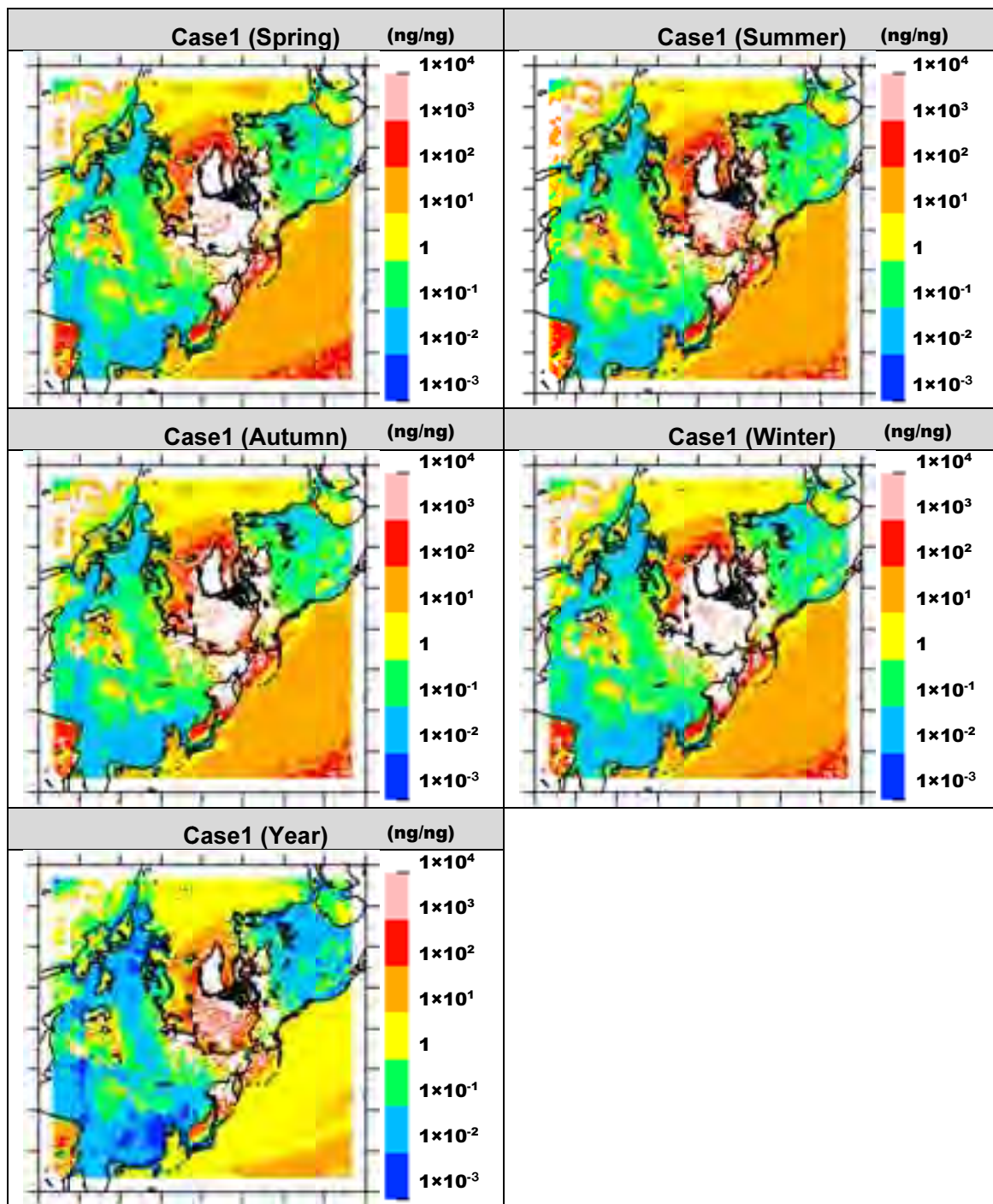


図 5.4-22 現況 Case1 における EC 気柱総量/排出量分布図 (季平均及び年平均値)

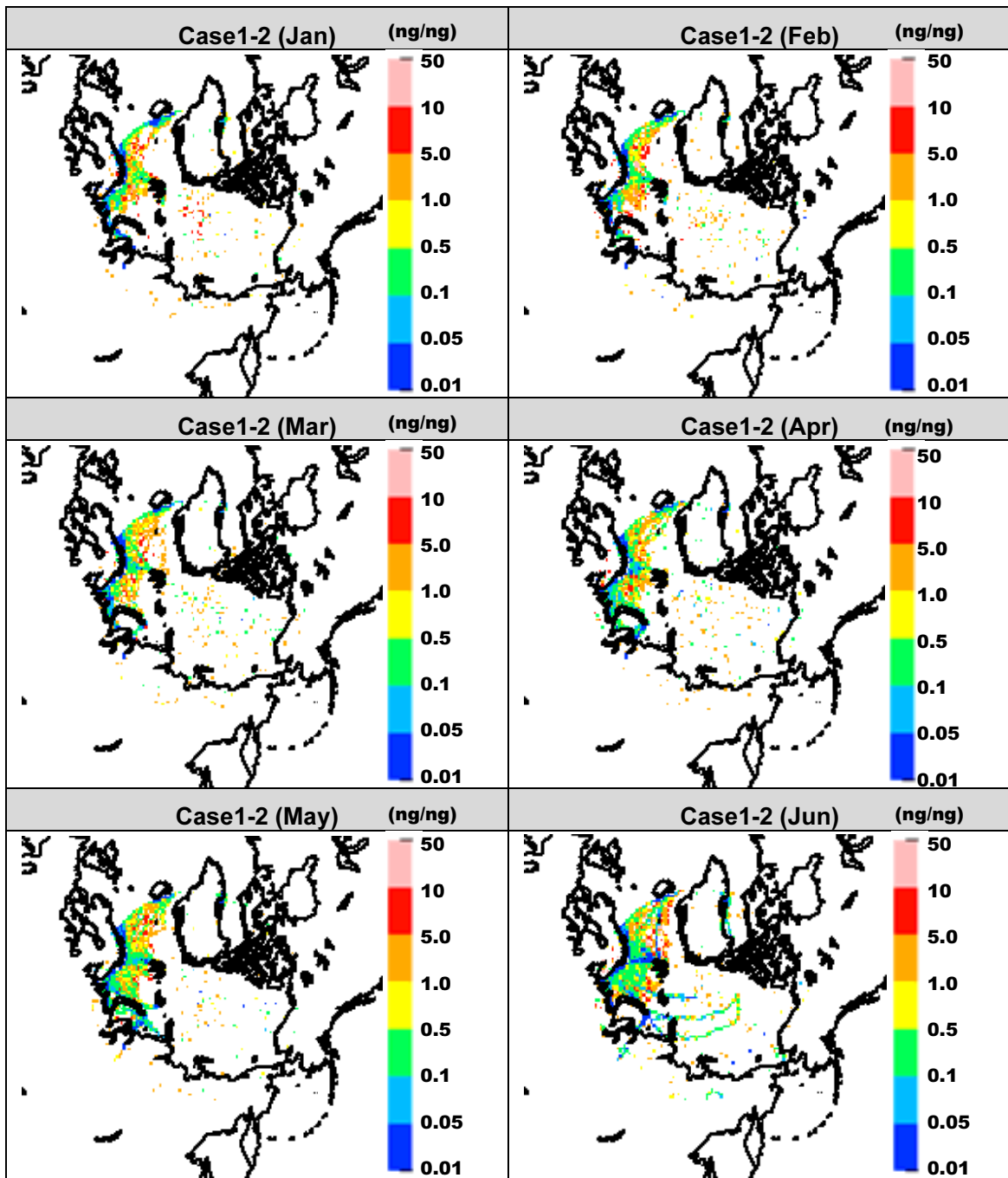


図 5.4-23 現況 Case1 と現況 Case2 の差分における EC 気柱総量/排出量分布図 (月平均) 1~6 月

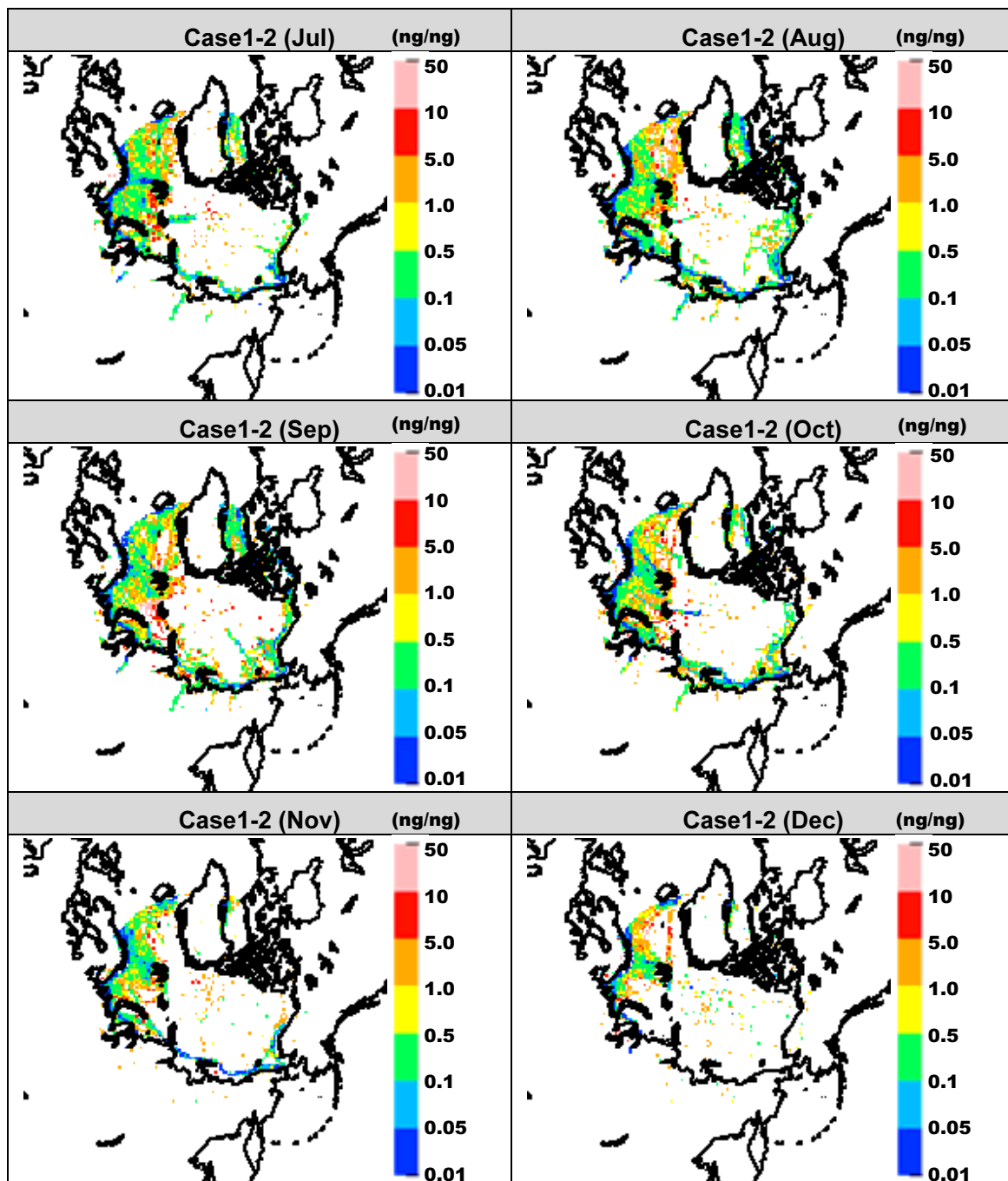


図 5.4-24 現況 Case1 と現況 Case2 の差分における EC 気柱総量/排出量分布図(月平均)7~12 月

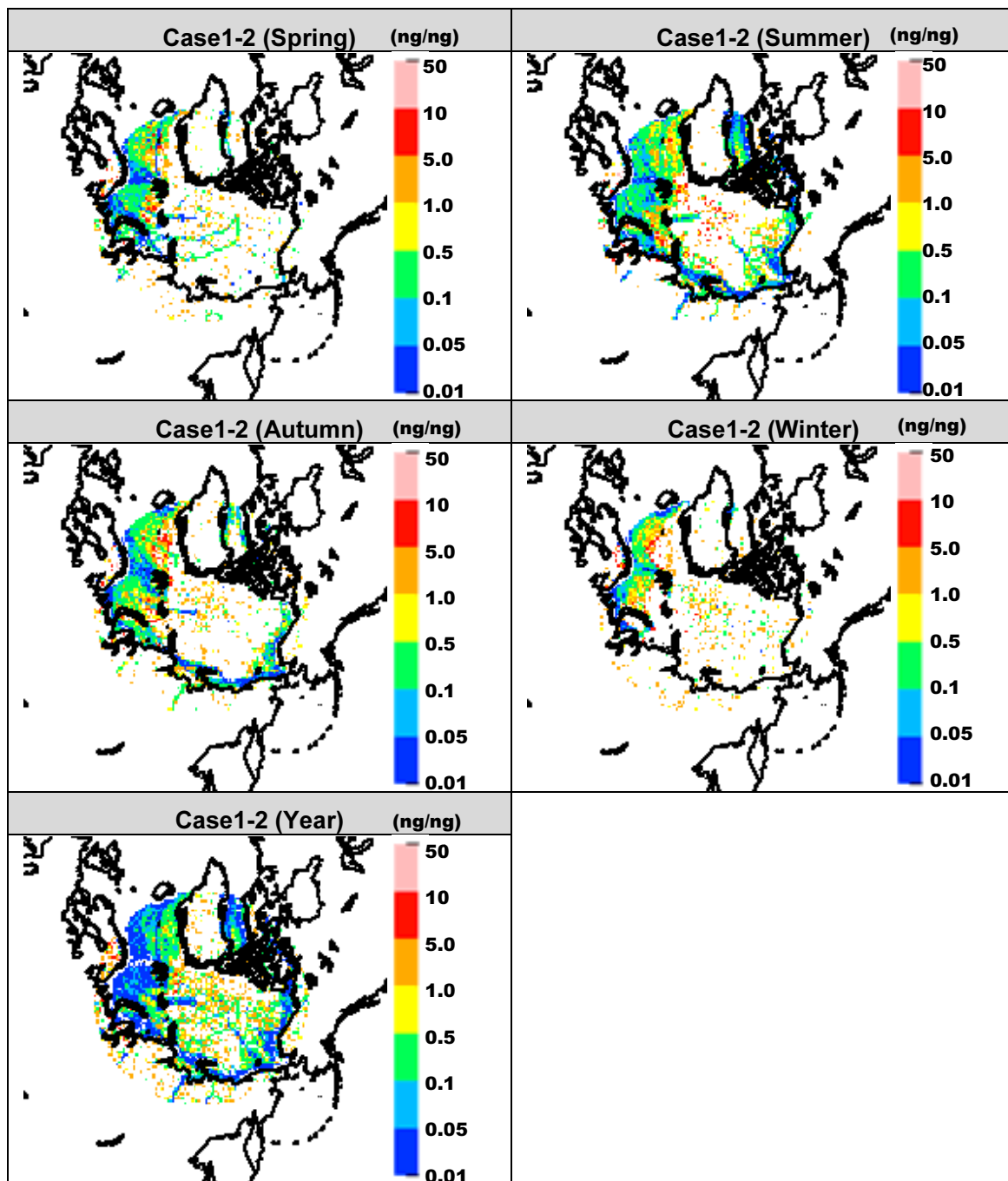


図 5.4-25 現況 Case1 と現況 Case2 の差分における EC 気柱総量/排出量分布図
(季平均及び年平均値)

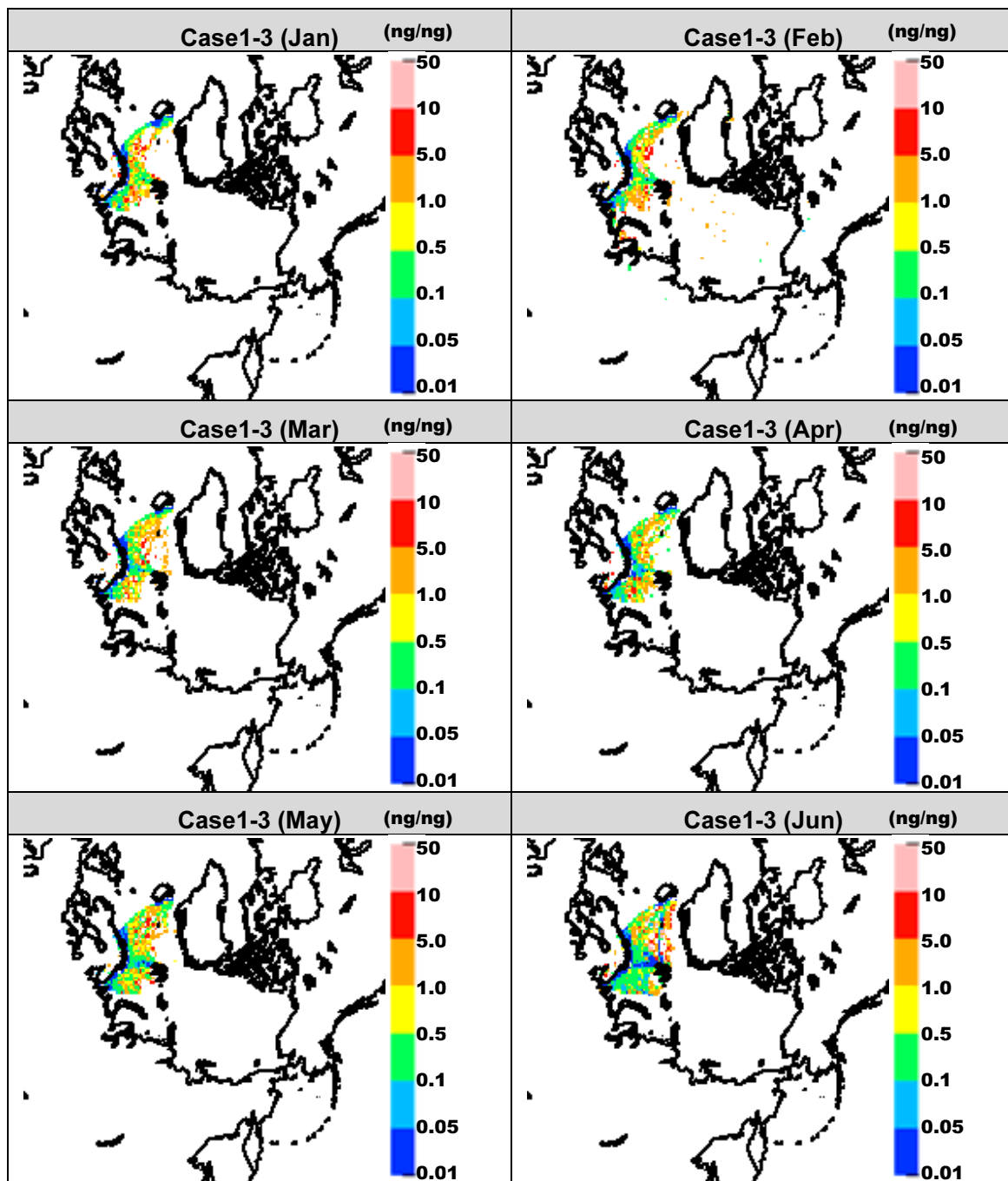


図 5.4-26 現況 Case1 と現況 Case3 の差分における EC 気柱総量/排出量分布図 (月平均) 1~6 月

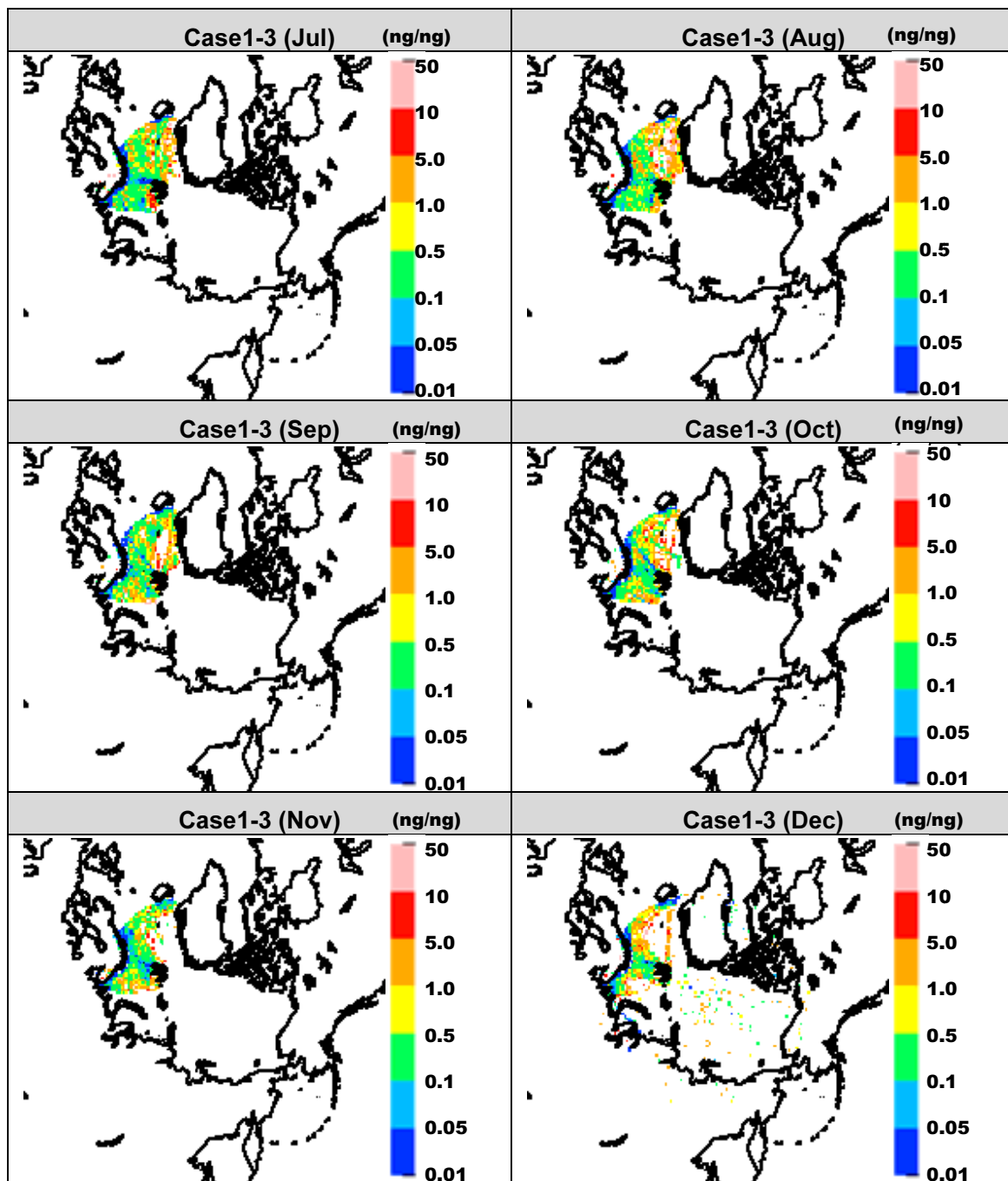


図 5.4-27 現況 Case1 と現況 Case3 の差分における EC 気柱総量/排出量分布図(月平均)7~12 月

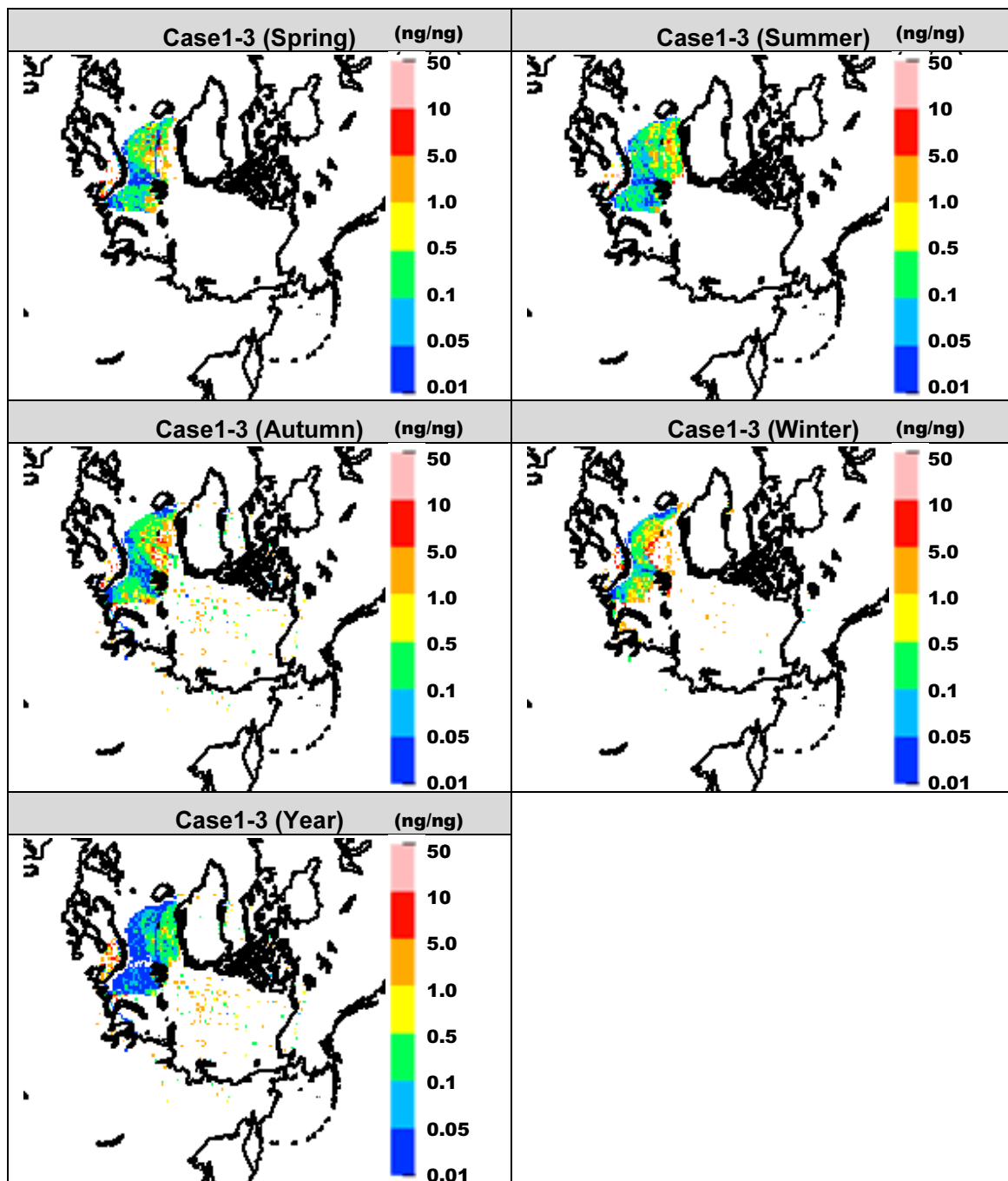


図 5.4-28 現況 Case1 と現況 Case3 の差分における EC 気柱総量/排出量分布図
(季平均及び年平均値)

(4) 放射強制力分布図

本節では、排出起源を陸上と Arctic area 及び Non Arctic area の両方の船舶を含めて設定したシミュレーション(Case1)と、陸上起源のみに限定したシミュレーション(Case2 および Case3)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、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放射強制力とは、ブラックカーボンが大気中に存在する場合と存在しない場合を比較することで、ブラックカーボン濃度の変化が引き起こす大気上端もしくは地表面における放射収支の変化量として定義され、ブラックカーボンによる大気加熱の効果を示す指標である。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 5.4-29～図 5.4-31 に現況 Case1 における EC の気柱総量から算出した放射強制力を示し、図 5.4-32～図 5.4-34 と図 5.4-35～図 5.4-37 に、それぞれ現況 Case1 と Case2(66°以北の全船舶なし)、現況 Case1 と Case3(66°以北のうち Non Arctic area の船舶なし)の差分を示す。すなわち、Case1 と Case2 の差分では 66°以北の全船舶による寄与が、Case1 と Case2 の差分では 66°以北のうち Arctic area における船舶による寄与が、抽出されることになる。

Case1 では、北極圏における年平均放射強制力は、おおよそ $0.32\text{-}0.48\text{ W/m}^2$ の範囲にあり、これは IPCC の AR5 で示された全球における人工排出源からのブラックカーボンによる放射強制力は $+0.4 (+0.05\text{ to }+0.8)\text{ W m}^{-2}$ に対して大きな差異はない。ところが、季節変化は非常に大きく、これは(1)あるいは(2)で見えてきた EC の最下層濃度や気柱総量濃度の変化より大きい。このことには、北極海における地表面の季節変化によって説明できる。つまり、海面は海氷に比較して反射率が低いため、海氷の消失によって同じ EC 濃度が存在していても放射強制力が小さく計算されることになる。

次に、Case1 と Case2 の差分、年平均値ではほぼ全ての地域で $0.16\text{-}0.20 \times 10^{-3}\text{ W/m}^2$ の範囲にあり、北極海における全船舶の寄与は、その増加分は最大 2%程度に留まっている。最も影響が大きいと考えられる 7 月においても北極海上空における増加分は最大 2%程度に留まると考えられる。Case1 と Case2 の差分と Case1 と Case3 の差分ではグリーンランド上空で前者の値がやや大きく計算される傾向があるものの、北極海全体として大きな違いは見られなかった。

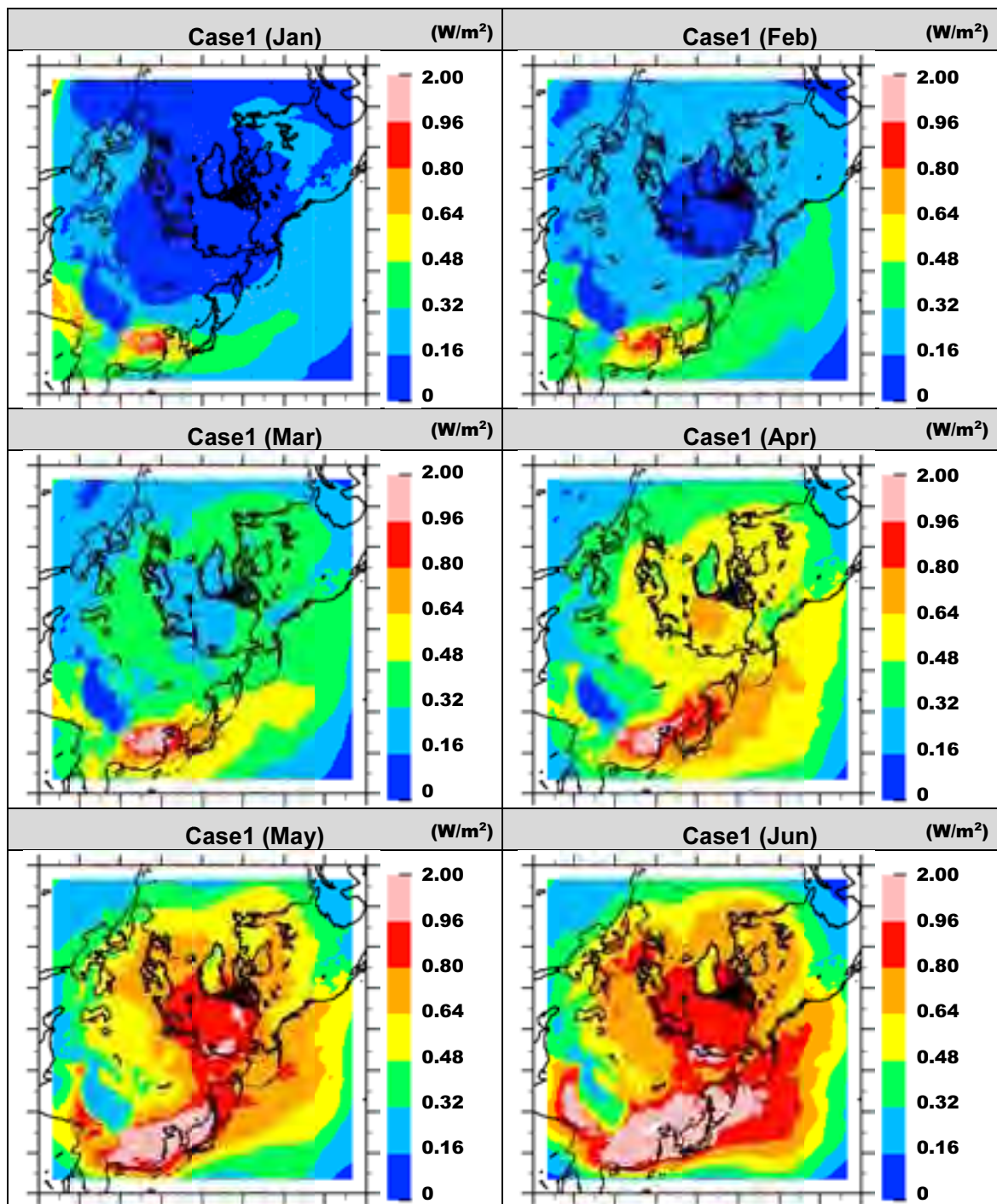


図 5.4-29 現況 Case1 における放射強制力分布図 (月平均) 1~6 月

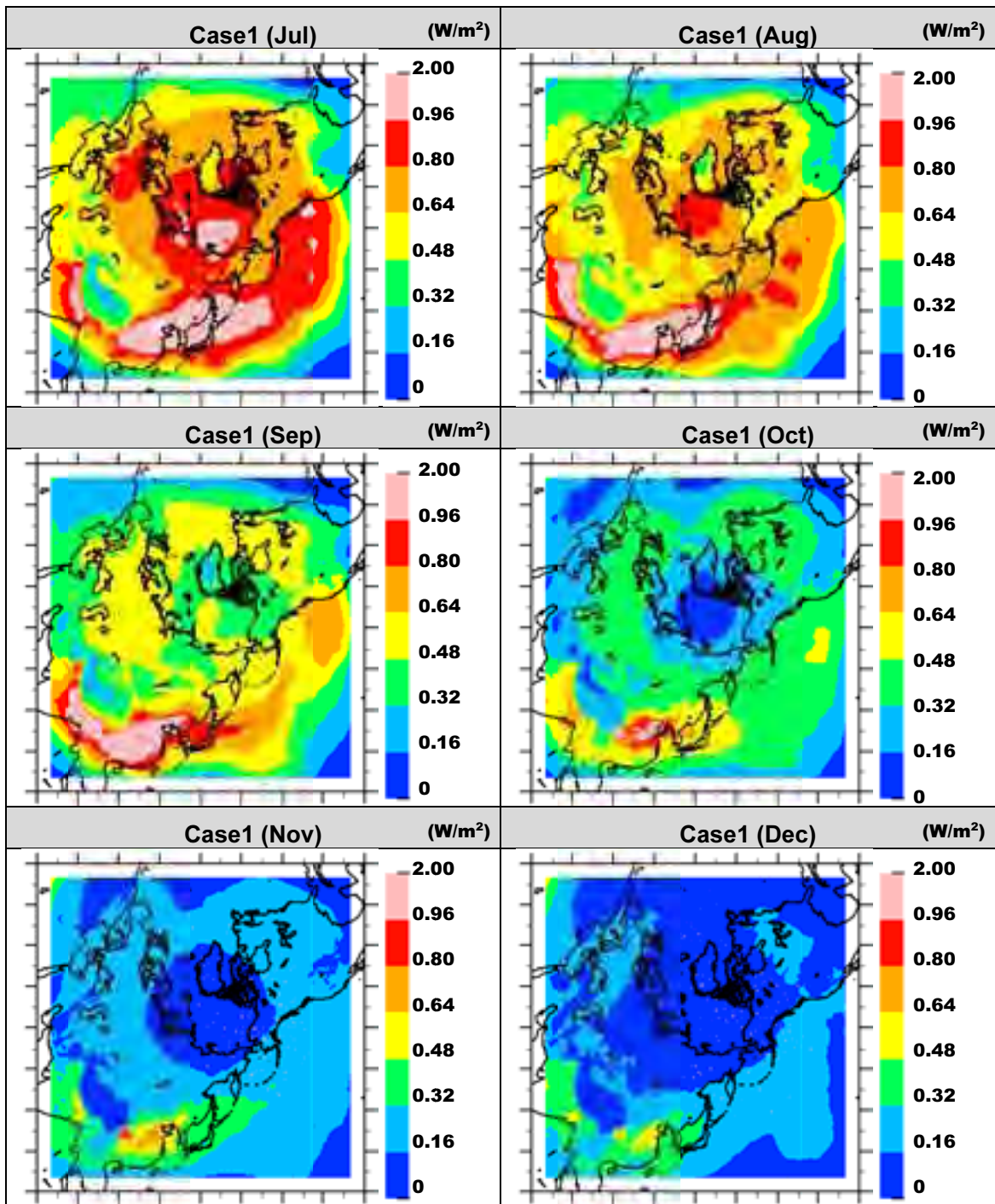


図 5.4-30 現況 Case1 における放射強制力分布図 (月平均) 7~12 月

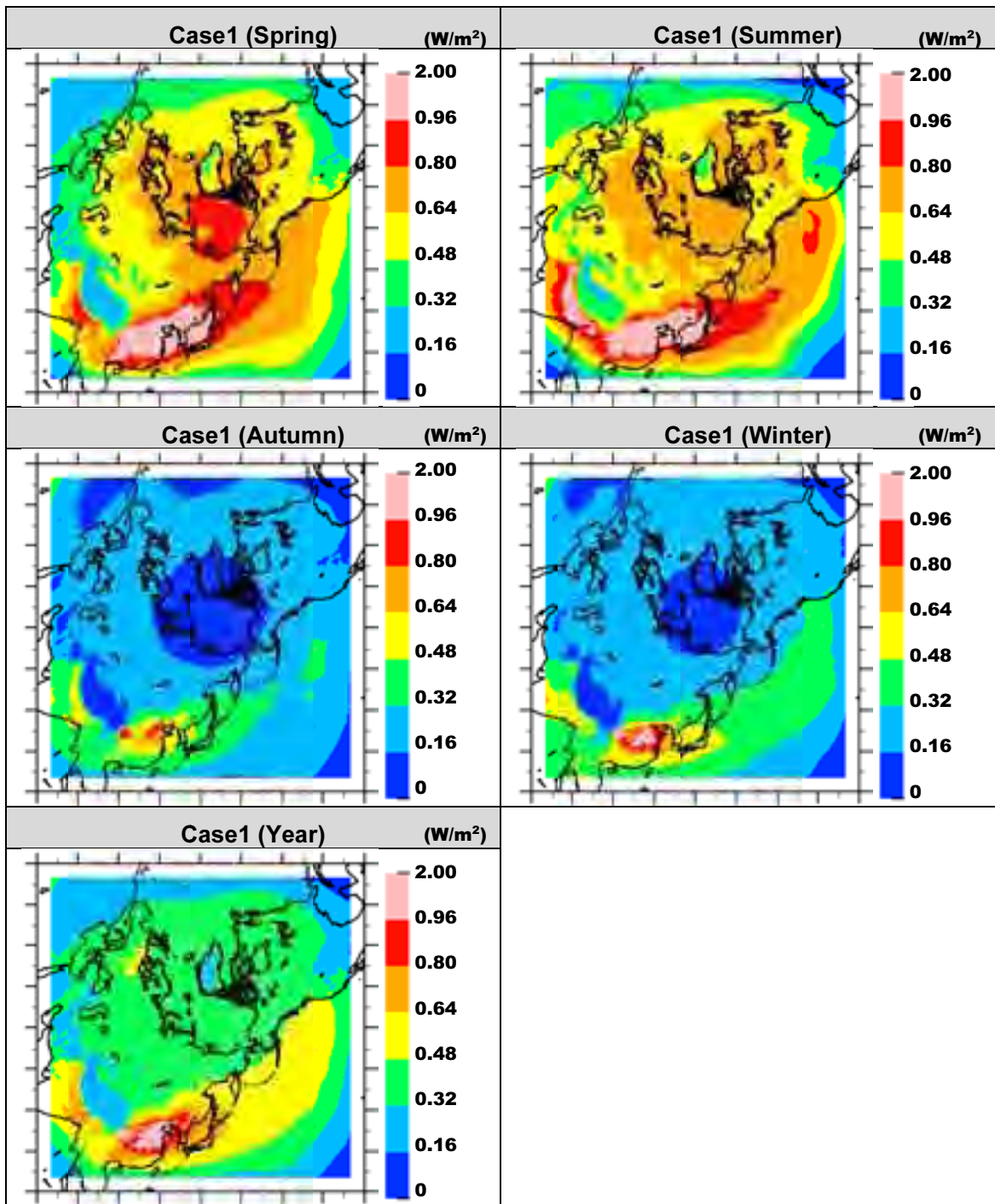


図 5.4-31 現況 Case1 における放射強制力分布図 (季節別、年平均)

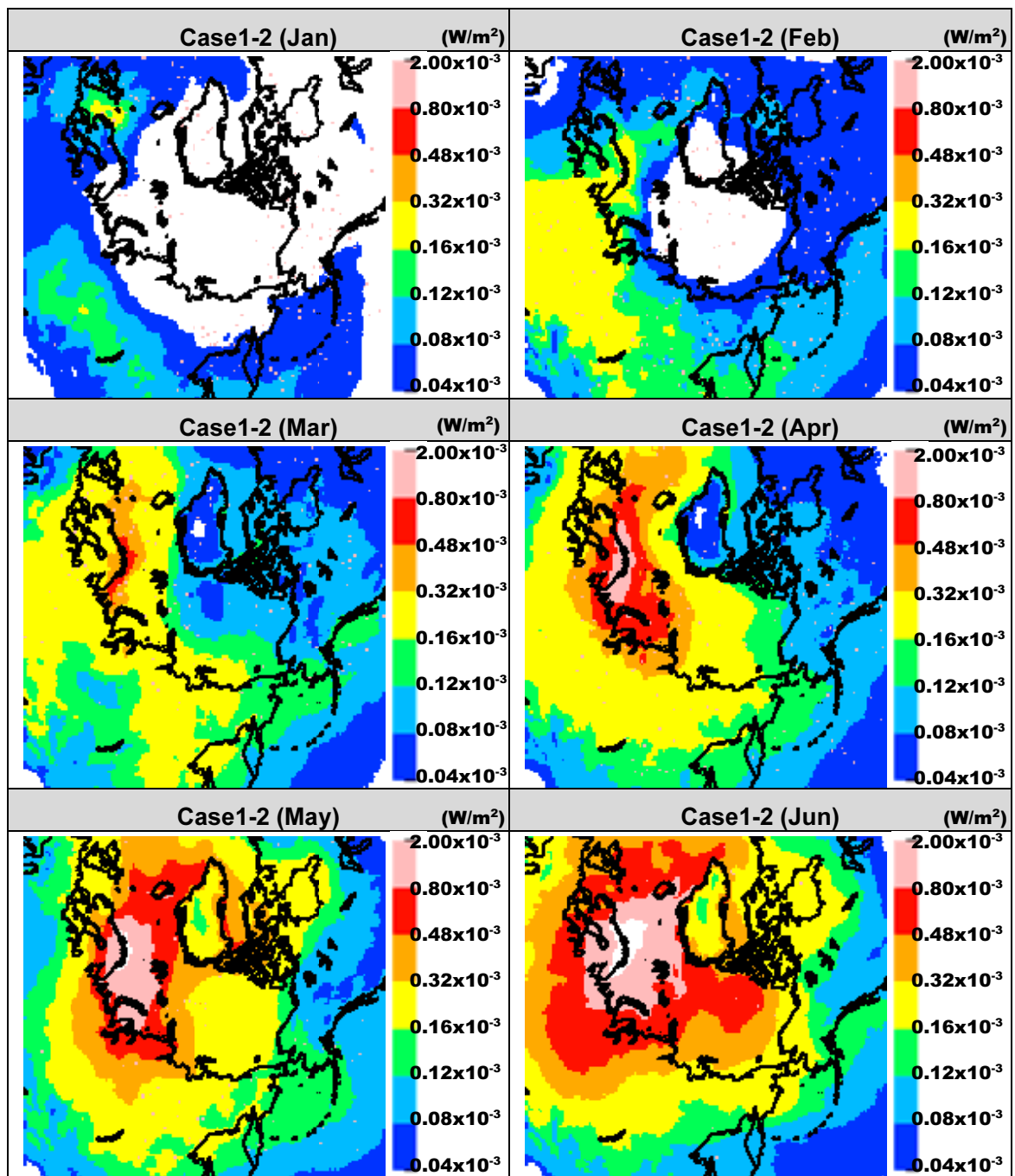


図 5.4-32 現況 Case1 と現況 Case2 の放射強制力差分分布図 (月平均) 1~6 月

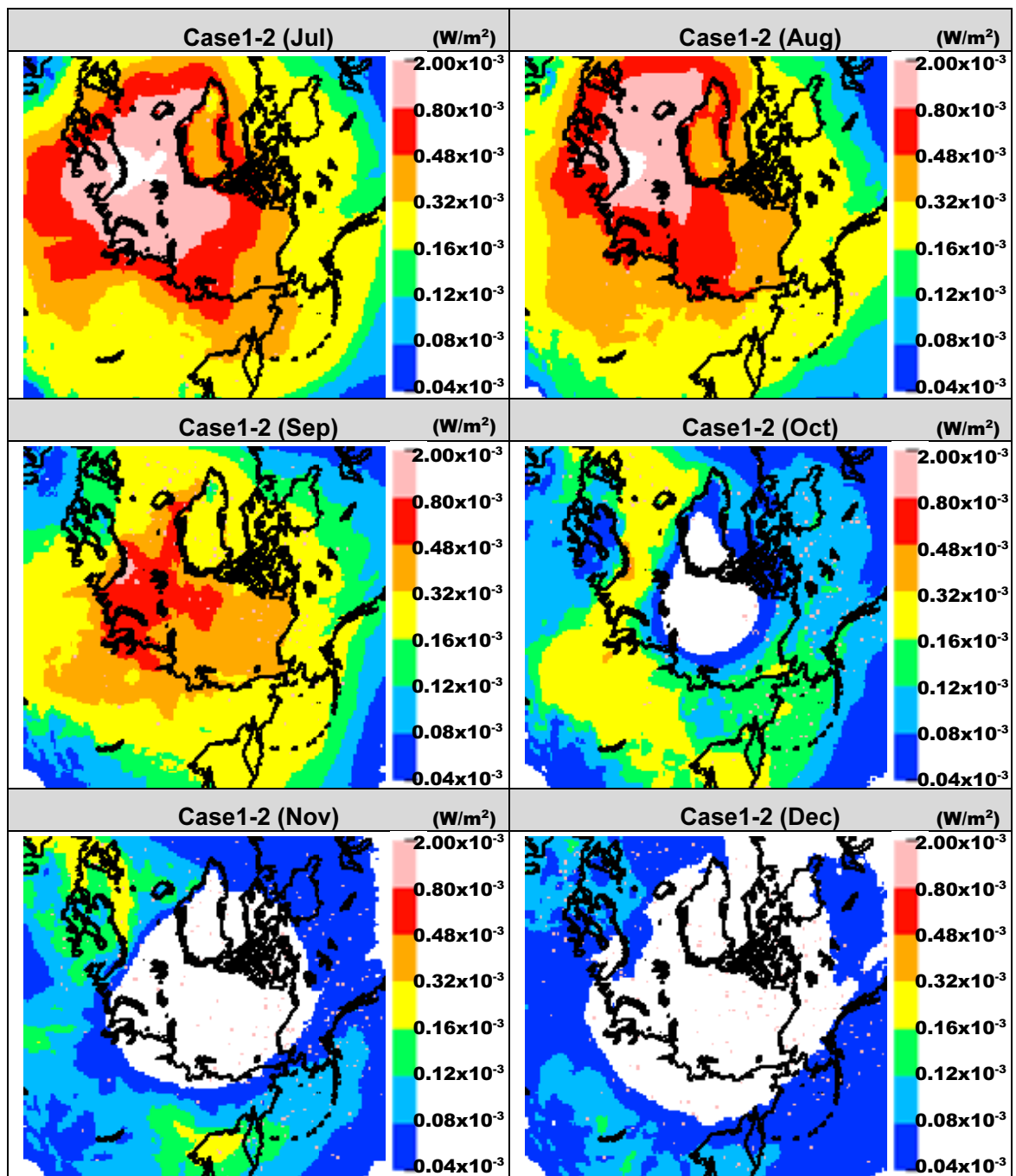


図 5.4-33 現況 Case1 と現況 Case2 の放射強制力差分分布図 (月平均)7~12 月

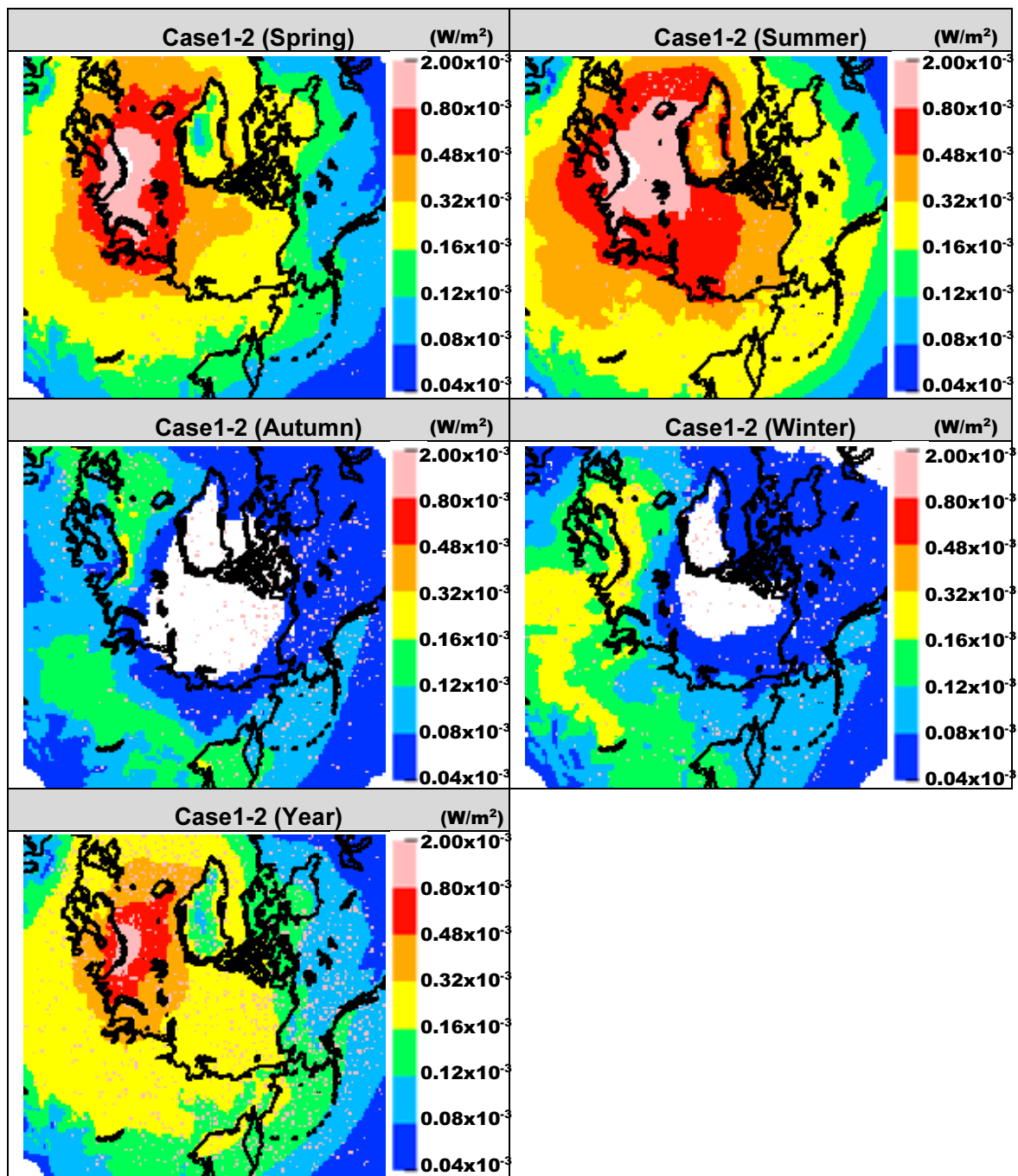


図 5.4-34 現況 Case1 と現況 Case2 の放射強制力差分分布図 (季節別、年平均)

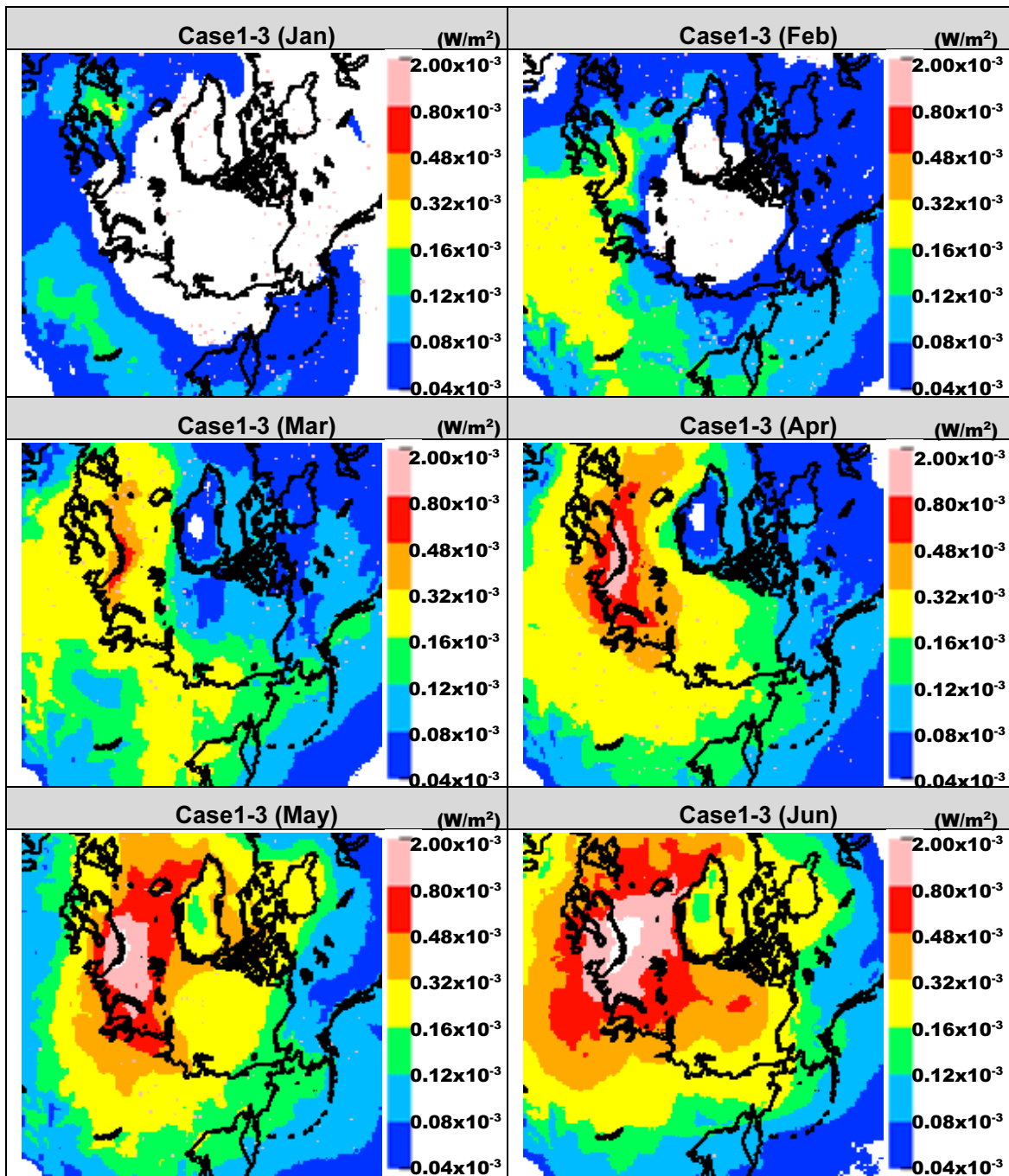


図 5.4-35 現況 Case1 と現況 Case3 の放射強制力差分分布図 (月平均) 1~6 月

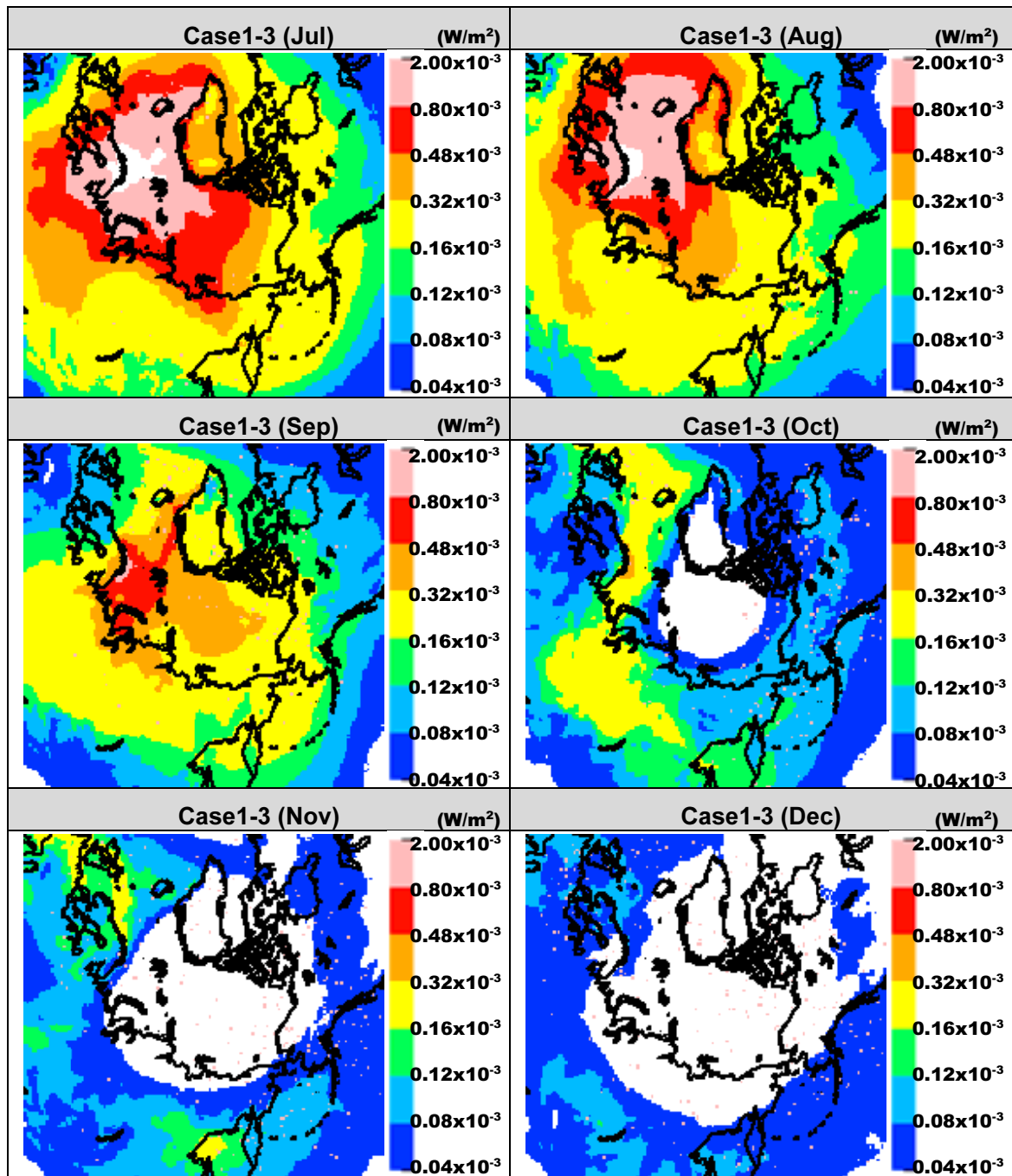


図 5.4-36 現況 Case1 と現況 Case3 の放射強制力差分分布図 (月平均)7~12 月

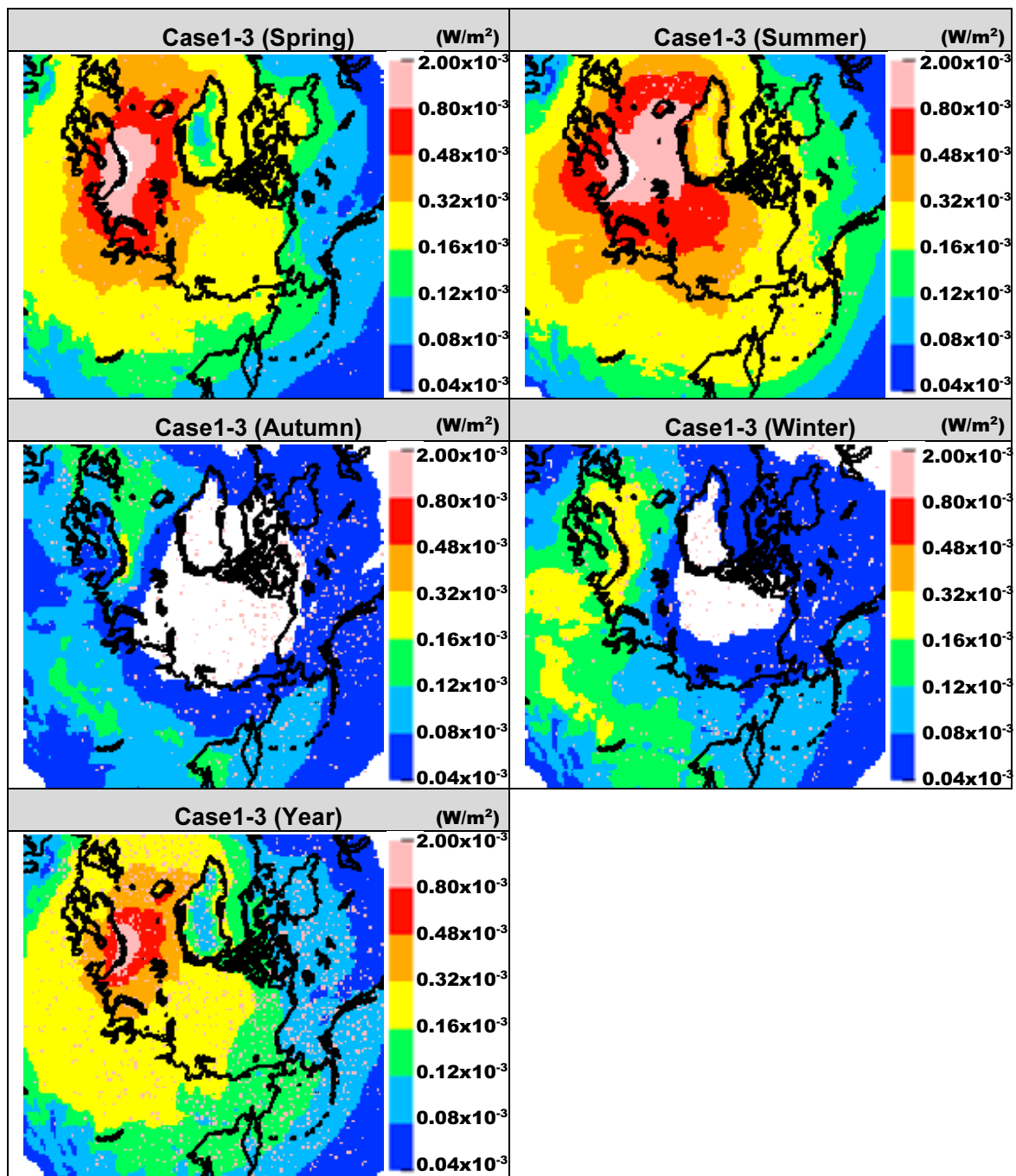


図 5.4-37 現況 Case1 と現況 Case3 の放射強制力差分分布図 (季節別、年平均)

6 北極圏における船舶のブラックカーボン排出に対する対策の必要性の検討

北極圏における船舶からのブラックカーボン排出に対する対策の必要性について、内航船や漁船が活発に活動するスカンジナビア半島やアイスランド沖合の“Non Arctic area”とそれ以外の北極圏海域である“Arctic area”に分けて検討、整理した。

(1) 排出量寄与の観点からの対策の必要性

“Arctic area”において船舶からの排出寄与は2%程度であり、将来の伸びを考慮しても全球平均とほぼ同レベル程度と想定されるため、“Non Arctic area”での対策が優先されるべきと考えられる。“Non Arctic area”における船舶からの排出寄与は29%程度あり、対策の必要性は否定できない。

(2) 北極圏に対する極地的な気候変動への影響の観点からの対策の必要性

“Non Arctic area”と“Arctic area”ともに濃度レベルでの寄与率は排出量寄与率とほぼ同程度であり、放射強制力に対しての影響も大きくない。ただし、局地的な高濃度が再現できていないことには留意する必要がある。

(3) 北極圏で懸念される生態系影響の観点からの対策の必要性

“Non Arctic area”と“Arctic area”ともに沈着量から判断して臨界負荷量に達している可能性は低い。地衣類に対する臨界負荷率については今後さらなる精査が必要である。

(4) 北極圏で懸念される人体健康影響の観点からの対策の必要性

現況のPM_{2.5}の大気中濃度及び周辺の人口密度から判断して、“Arctic area”においては対策の必要性は小さい。“Non Arctic area”においては、対策の必要性はあるが、ブラックカーボン対策よりも燃料中硫黄分の減少による硫酸塩とその不随水の低減を優先させるべきと考えられる。

6.1 排出量寄与の観点からの対策の必要性の検討

6.1.1 陸上排出源からの LAC 排出量との比較

表 6.1-1 は、昨年度の事業 (OPRF-H24) 及び今年度事業 (OPRF-H25) 並びに ARCTAS²⁶ で整備された LAC 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° 以北としている。

推計対象年は ARCTAS が 2008 年、OPRF-H24 が 2004 年、OPRF-H25 が概ね 2013 年としている。「Second IMO GHG Study」による船舶の燃料消費量の 2004 年から 2007 年への伸び率+15%を踏まえると、OPRF-H24 は ARCTAS による排出量の、北緯 70° 以北は約 3.5 倍、北緯 66° 以北では約 2.5 倍となることがわかった。

2004 年から 2007 年の伸び率+15%が 2013 年まで継続するものと仮定すると、2004 年から 2013 年までの伸び率は+52%となり、2013 年における北緯 70° 以北の排出量は、OPRF-H24 で約 181 ton/year、ARCTAS で約 59 ton/year になるものと推定され、北緯 66° 以北の排出量は、OPRF-H24 で約 283 ton/year、ARCTAS で約 128 ton/year と推定される。

したがって、今年度事業で推計した排出量の算定結果 OPRF-H25 は、北緯 70° 以北では、年度補正を行っても OPRF-H24 の約 6 倍、ARCTAS の約 18 倍、北緯 66° 以北で OPRF-H24 の約 8 倍、ARCTAS の約 17 倍大きい結果となる。これはこれまでに述べてきたように、最新の活動量を用いていることもあるが、ブラックカーボン²⁶を LAC と定義したことにより、排出係数は 3 倍程度大きくなっていることによる。次に、本年度事業 OPRF-H25 で算定した北緯 66° 以北を対象とした場合、また、本事業で定義する北極海 (Arctic area、図 3.2-9 参照) の範囲とした場合の LAC の排出量と船舶起源の割合は表 6.1-3 に示すとおりであり、EC に関しては表 6.1-4 に示すとおりである。

地理的に見た場合、北緯 66° 以北の北極海のうち、スカンジナビア半島やアイスランド付近の Non Arctic area で全体の LAC 排出量 2.161 Gg/year のうち 1.770 Gg/year (82%) を占める。残りの NSR やカナダ側航路等の Arctic area における LAC 排出寄与割合は 0.391 Gg/year (18%) にすぎない。この結果、森林火災起因を含む人工排出源からの LAC 排出総量に占める寄与は、Non Arctic area で 29%に達するのに対して、Arctic area では 2%に過ぎない。北緯 66 度以北全体では 7%程度であり、全球での NOx や SOx など大気汚染物質の寄与率 (いずれも 10%程度) と比較しても大きく乖離しない。

表 6.1-5 から面積当たりの排出強度 (kg/year/km²) で見た場合では、Arctic area の全平均値は 0.010 であり、スカンジナビア半島及びアイスランド付近の Non Arctic area の全平均値は 0.502 と 50 倍程度と大きくなる。

前者におけるグリッド最大値は 1.55、後者は 11.29 である。後者の値は、日本国の領海内 (12NM) の平均面積当たり排出量 17 にほぼ匹敵するが、東京湾の 244 よりは遥かに少ない。

つまり、スカンジナビア半島やアイスランド付近における面積強度は、最大でも日本国

²⁶ 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、化学輸送モデルのための入力条件として、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。

12 マイルのそれと同等以下であると言える。それ以外の北極圏海域における面積強度は最大でも日本国距岸 12 海里のその 1/10 以下である。

以上のことから、両海域に対する対策の必要性を同じ尺度で検討することは適切でないと考える。

表 6.1-1 北極点から各緯度帯までの LAC 排出量 (Gg/year)

Emission Sources		Accumulated area (distance from North Pole [km])			
		90°N -80°N (abt 1100 km)	90°N -75°N (abt 1650 km)	90°N -70°N (abt 2200 km)	90°N -66°N (abt 2290 km)
Ships	(OPRF-H24) @2004	0 (0%)	0.009 (4.8%)	0.119 (64.0%)	0.186 (100%)
	(OPRF-H25) @2013	0.018 (0.8%)	0.178 (8.2%)	1.083 (50.1%)	2.161 (100%)
	(ARCTAS) @2008	0.001 (1.2%)	0.008 (9.5%)	0.039 (46.4%)	0.084 (100%)

・括弧内の青い%値は 90°N -66°N (最右端セル) の船舶起源に対する割合[%]

表 6.1-2 北極点から各緯度帯までの LAC 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 (abt 1100 km)	90°N -75°N (abt 1650 km)	90°N -70°N (abt 2200 km)	90°N -66°N (abt 2290 km)
Ships @2013	0.018 (0.8%) (100%)	0.178 (4.8%) (98.3%)	1.083 (50.1%) (67.1%)	2.161 (100%) (7.4%)	
Anthropogenic (ARCTAS)	0 (0.0%) (0.0%)	0.003 (0.1%) (1.7%)	0.074 (1.9%) (4.6%)	3.952 (100%) (13.5%)	
Boreal forest fire (ARCTAS)	0 (0.0%) (0.0%)	0 (0.0%) (0.0%)	0.456 (2.0%) (28.3%)	23.176 (100%) (79.1%)	
Total (Ship:ARCTAC)	0.018 (100%)	0.181 (100%)	1.613 (100%)	29.289 (100%)	

・括弧内の青い%値は 90°N -66°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[%]

表 6.1-3 北極点から各緯度帯までの LAC 排出量 (Gg/year) と船舶起源の割合
(北緯 66° 以北と本事業で定義する北極圏内)

Emission Sources		Accumulated area (distance from North Pole [km])			
		90°N -80°N (abt 1100 km)	90°N -75°N (abt 1650 km)	90°N -70°N (abt 2200 km)	90°N -66°N (abt 2700 km)
Ships	Non arctic area	0.000 (0.0%) -	0.090 (7.7%) (96.5%)	0.815 (46.0%) (92.9%)	1.770 (100%) (29.1%)
	Arctic area	0.018 (4.6%) (100%)	0.088 (22.5%) (100%)	0.268 (68.5%) (36.5%)	0.391 (100%) (1.7%)

- ・括弧内の青い%値は 90°N -66°N (最右端セル) の船舶起源に対する割合[%]
- ・括弧内の赤い%値は各地域の森林火災起因を含む人工排出総量に対する船舶の割合[%]

表 6.1-4 北極点から各緯度帯までの EC 排出量 (Gg/year) と船舶起源の割合
(北緯 66° 以北と本事業で定義する北極圏内)

Emission Sources		Accumulated area (distance from North Pole [km])			
		90°N -80°N (abt 1100 km)	90°N -75°N (abt 1650 km)	90°N -70°N (abt 2200 km)	90°N -66°N (abt 2700 km)
Ships	Non arctic area	0.006 (2.8%) (100%)	0.011 (5.2%) (76.9%)	0.098 (46.2%) (62.1%)	0.212 (100%) (6.8%)
	Arctic	0.002 (4.3%) (100%)	0.011 (23.4%) (100%)	0.032 (68.1%) (69.2%)	0.047 (100%) (4.3%)

- ・括弧内の青い%値は 90°N -66°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[%]

表 6.1-5 北極域と日本沿岸域における面積当たりの LAC 排出強度 (kg/year/km²) の比較

	面積 (km ²)	LAC 排出量 (kg/year)	排出強度 (kg/year/km ²)
北極海 Arctic area 全平均値	40,831,200	0.391 × 10 ⁶	0.010
Non Arctic area 全平均値	3,524,400	1.770 × 10 ⁶	0.502
北極海 Arctic area 内の グリッド最大値	3,600	5,596	1.55
Non Arctic area 内の グリッド最大値	3,600	40,628	11.29
日本国距岸 12NM 内 (領海)	430,000	7,225,381	17
日本国東京湾	1,320	322,495	244

6.1.2 排出量寄与からの対策の必要性の検討

北極海を航行する LAC 排出量の寄与の観点から見た場合、北極海における BC 対策の必要性は下記のように評価される。

2012 年 11 月から 2013 年 10 月までの、北緯 66° 以北で航行した全ての船舶からの LAC 排出データを、衛星 AIS の一つである exactAIS のデータを用いてまとめた。北緯 66° 以北の LAC 総排出量は 2,161 ton/year と評価される。これは、既存のデータ、たとえば昨年度の本事業の報告値に比較しても数倍程度大きい。衛星 AIS の補足率をあげたことにより、船舶活動を正確に把握できたためと評価できる。この結果、北緯 90-66° 帯における船舶からの LAC 排出量の森林火災起因と陸上の全人工発生源を含めた LAC 排出総量に対する寄与率は 7%程度であり、全球での他の大気汚染物質の寄与率と比較しても大きく乖離しない。

最大の寄与は一般貨物船であるものの、漁船と客船で 25%の寄与があり、貨物船の活動量に比較してこれらの船種の活動量が大きいことは、この海域の特徴であると考えられる。特に客船については、平均航行時間、平均航行速度ともに他の船種に比較して大きくなっており、比較的大きな主機の負荷率で長時間航行している実態が明らかになった。

地理的に見た場合、スカンジナビア半島及びアイスランド付近と、それ以外の海域では、活動量も排出量も大きく異なる。これは、それぞれ Non Arctic area と Arctic area として把握することができる。後者の Arctic area における排出寄与割合は全体の排出量 2,164 ton/year の 24%にすぎず、Non Arctic area は 76%を占める。仮に Arctic area の LAC だけを考慮した場合、森林火災起因と全人工発生源を含めた LAC 排出量に対する寄与率は 2%程度と算定される。これに対して、スカンジナビア半島及びアイスランド付近の Non Arctic area における排出量の寄与率は 29%程度と算定される。

面積当たりの排出強度 (kg/km²/year) で見た場合、スカンジナビア半島及びアイスランド付近の Non Arctic area におけるグリッド最大値は 11.29 (kg/km²/year) 、Arctic area のグリッド最大値は 1.56 (kg/km²/year) である。前者の値は、日本国の領海内 (12NM) の平均面積当たり排出量 17 (kg/km²/year) にほぼ匹敵する。つまり、「スカンジナビア半島及びアイスランド付近海域」における面積強度は、最大でも日本国 12 マイル内の平均値の同等以下であると結論できる。「それ以外の海域」における面積強度は最大でも日本国 12 マイルの平均値の 1/10 以下である。

後者の海域の大半には polar code が適用されないことから、非 ICE クラスの船舶が航行できる。このため、同海域には特に夏季において他の海域からの非 ICE クラスの船舶の往来が増加していることが考えられる。

以上の実態から、対策の必要性や枠組みの検討においては、両者を別に考えることが適当であると考えられる。

つまり、Non Arctic area の船舶については、29%の寄与率あるいは船舶活動量の集中から考えて、相当の影響を、同海域を中心に与えているものと考えられる。他方、Arctic area

の船舶寄与は、2%程度と想定される全球平均²⁷よりも小さく、将来の活動量の伸びを考慮しても全球における平均的な寄与程度にしか達しないと予想される。

ただし、緯度を90°から70°までに限定した場合は、Non Arctic area、Arctic areaの両海域共に船舶の寄与は60%を超える。したがって、陸地面積が相対的に少なくなる70°以上の高緯度海域においては、船舶が最も大きな排出寄与を占める人工排出源であると言える。このように、船舶と陸上との排出量の寄与割合は、陸地/海洋面積の比率に大きく影響されるため、最終的にはシミュレーション結果などによる低緯度帯から移流効果や1 kgの排出が放射強制力に与える影響の差異について検討を加えた上で最終的に判断することが肝要である。以上の考察から、Non Arctic areaのLAC対策はArctic areaのLAC対策より優先されるべきと考えられる。このような、船舶活動量や船舶の寄与割合などによって地域規制を行う考え方は、既にMARPOL 73/78条約附属書VIなどにおいて特別海域の設定(附属書VIにおいては排出規制海域)として導入されている。

²⁷ IMO GHG study updatingのdraftによれば、2012年における全世界のPM排出量は1,400 ktであり、AR5におけるPM排出量18,000 ktの7.7%にあたる。

6.2 北極圏に対する局地的な気候変動への影響の観点からの対策の必要性の検討

6.2.1 EC 濃度および放射強制力に対する影響の観点からの対策の必要性

北極圏の EC の最下層濃度および気柱総量に対する船舶からの寄与は、局地的な気候変動が最も懸念される北極海上空及びその周辺において全体として $50-70 \text{ ng/m}^3$ の範囲にあるのに対して Case1—Case2 において $5-10 \text{ ng/m}^3$ となり Arctic area と Non Arctic area を併せて全体の人口排出源に対して 1/10 程度の寄与があることが想定される。この値は、6.1 で検討する排出量ベースで推定される船舶/総 EC 量比率(7.4%)と大きく変化しない。次に、“Arctic area”では、全体の $0-70 \text{ ng/m}^3$ に対して、最大で 5 ng/m^3 程度であり濃度レベルで 1/10 以下の寄与であると評価できる。ただし、6.1 で検討する Arctic area からの排出量ベースで推定される船舶/総 EC 量比率(1.7%)と比較してやや大きい。これは、“Arctic area”においては、“Non Arctic area”に対して、陸上からの排出量に比較して、より沿岸に沿って分布しており、北極海への影響が大きいこと、あるいは季節的な排出量の変動に影響されていると考えられる。このため、

北極圏における年平均放射強制力は、おおよそ $0.32-0.48 \text{ W/m}^2$ の範囲にあり、北極海における全船舶の寄与は、その増加分は最大 2%程度に留まっている。最も影響が大きいと考えられる 7 月においても北極海上空における増加分は最大 2%程度に留まると考えられる。Case1 と Case2 の差分と Case1 と Case3 の差分ではグリーンランド上空で前者の値がやや大きく計算される傾向があるものの、北極海全体として大きな違いは見られなかった。

これら値の変化は、船舶から排出された EC は主に海上において放射強制力を持ち、質量当たりの放射強制力に対して海表面の季節変化分が大きく影響していること等によると考えられる。

放射強制力は、大気中における EC 気柱総量およびその地域における地表の平均的な反射率に大きく左右される。このため、北極海やその周辺地域など雪氷に覆われた地域の放射強制力については、最新の雪氷の被覆度の季節変化を取り込むことが重要であるが、今回のシミュレーションではこれらを入力することができなかつたため、2008 年当時の値を入力値として用いている。このため、やや過小評価となっている可能性がある点については留意されたい。このため、特に“Non Arctic area”において、地表面の反射率や放射強制力の実測などモニターを進める必要性が示唆された。

今回のシミュレーションにおいては、空間解像度は約 60km メッシュで行っており、これより物理的に小さい局所的な排出影響は把握できていない点については留意する必要がある。

6.2.2 雪表面の反射率に対する影響の観点からの対策の必要性

近年北極域の雪氷中に含まれるブラックカーボン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) 及び第 5 次評価報告書(2014)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 $+0.1 \pm 0.1 \text{ (W/m}^2)$ と評価されている。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、雪氷面上のブラックカーボン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、上記の全球年平均値と比較して、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、長期にわたって沈着し積雪層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。

昨年度の検討において複数の積雪反射率モデル間の比較を行った結果、観測の再現性の観点から考えると、Aoki et al. (2011) のモデルにおいて反射率の時間変化や絶対量に関する実測値と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た。

本年度はシミュレーションにより得られた北極海を航行する船舶からの LAC 濃度が雪表面に乾性沈着した場合に、同モデルではどの程度の反射率の変化が期待されるか、一定の気象条件や雪表面の状態を仮定して試算を試みた。

図 6.2-1 には全人口発生源からの EC 排出量から計算された乾性沈着量を、図 6.2-2 には北極海を航行する船舶からの LAC 排出から計算された乾性沈着量を7月(夏季の代表月)の積算値として示した。なお、乾性沈着量は WRF-CHEM からの出力であり、気象条件および地表面情報(土地利用および地面粗度)を考慮したものである。ここで、7月は船舶活動量が1年で最も高くかつ海氷の面積が少なく観測されている季節であり、雪表面の沈着および反射率への影響が大きいことが危惧される。

次に湿性沈着量については、同モデル内では湿性沈着による大気中の粒子の除去過程(wash out および rain out)が考慮されているが、この除去された総量をグリッド毎の湿性沈着量として取り出すためにはモデルのソースを変更することから、水平分布を得ることは困難であった。他方で、同地域の7月の降水・降雪量は<20mm程度であることから、一般論として同地域の夏季においては乾性沈着量の方が支配的であると考えられる。

図 6.2-1 でみると低緯度域たとえば日本周辺では、 1×10^7 ng/m²/month の乾性沈着量に対して、北極海周辺では 1×10^5 ng/m²/month 程度と 1/100 となっており総乾性沈着量の絶対値が小さい。また、船舶からの寄与を図 6.2-2 でみると、Non-Arctic のみ(図)と Non-Arctic と Arctic と併せた場合でもグリーンランド上で 1×10^3 ng/m²/month arctic、北極海の高緯度域で

は $5 \times 10^3 \text{ ng/m}^2/\text{month}$ 、Non Arctic 周辺では一部で $5 \times 10^4 \text{ ng/m}^2/\text{month}$ に達しているが、いずれも総量の 1/10 から 1/100 程度の寄与となっている。

上記の乾性沈着量の最大値 ($5.0 \times 10^4 \text{ ng/m}^2/\text{month}$) に対して、LAC 粒子の直径：1 μm 、密度：2 g/cm^3 と設定した場合、すべての LAC が表面に 1 ヶ月間保持され、かつ隙間なく敷き詰められると仮定しても、LAC による被服の割合は $3.75 \times 10^{-5} (\text{m}^2/\text{m}^2)$ にしかならない。これはつまり、船舶排出源に起因するブラックカーボンによって $3.75 \times 10^{-3}\%$ の雪面が黒色に変化させられると近似することが可能である。

積雪水当量(SWE:Snow Water Equivalency)を 1-10 の範囲で感度解析させた場合、上記の沈着量最大値によって生じる雪表面内の BC concentration は 0.005-0.05 ppmw と計算される。この雪中 BC 濃度は Aoki et al. (2011) のモデルにおいては、アルベドの変化が可視光で 0.98 からほとんど低下しないと計算されている。この程度の反射率の変化は、同じ図 5 において計算されている SWE そのものの変化による反射率の変化と同等であると評価できる。つまり、7 月の一ヶ月分の船舶からの沈着量は、新雪の雪表面が気象条件や圧雪など経年変化によってある程度ザラメ化した範囲内と同等であると評価できる。総人工排出源からの排出を考慮しても、同じく 0.97 程度までの低下と評価され、同期間の沈着が短期的に反射率に変化を与え、結果として放射強制力に影響を与える可能性は小さいと考える。

ただし、年間を通しての長期的な沈着(湿性沈着を含む)を評価する場合には、既に述べたように雪表面だけでなく数季前に積雪しある程度圧雪されてザラメ化したことにより透明度が上がった深層における反射率の変化も考慮しなければいけないことには留意する必要がある。従って、今後は冒頭に述べたように特に春期から夏期にかけて、特に沈着量が多いと考えられる Non Arctic area 付近の雪表面において、深層の反射率の変化や沈着量をモニターすることが重要になると考える。

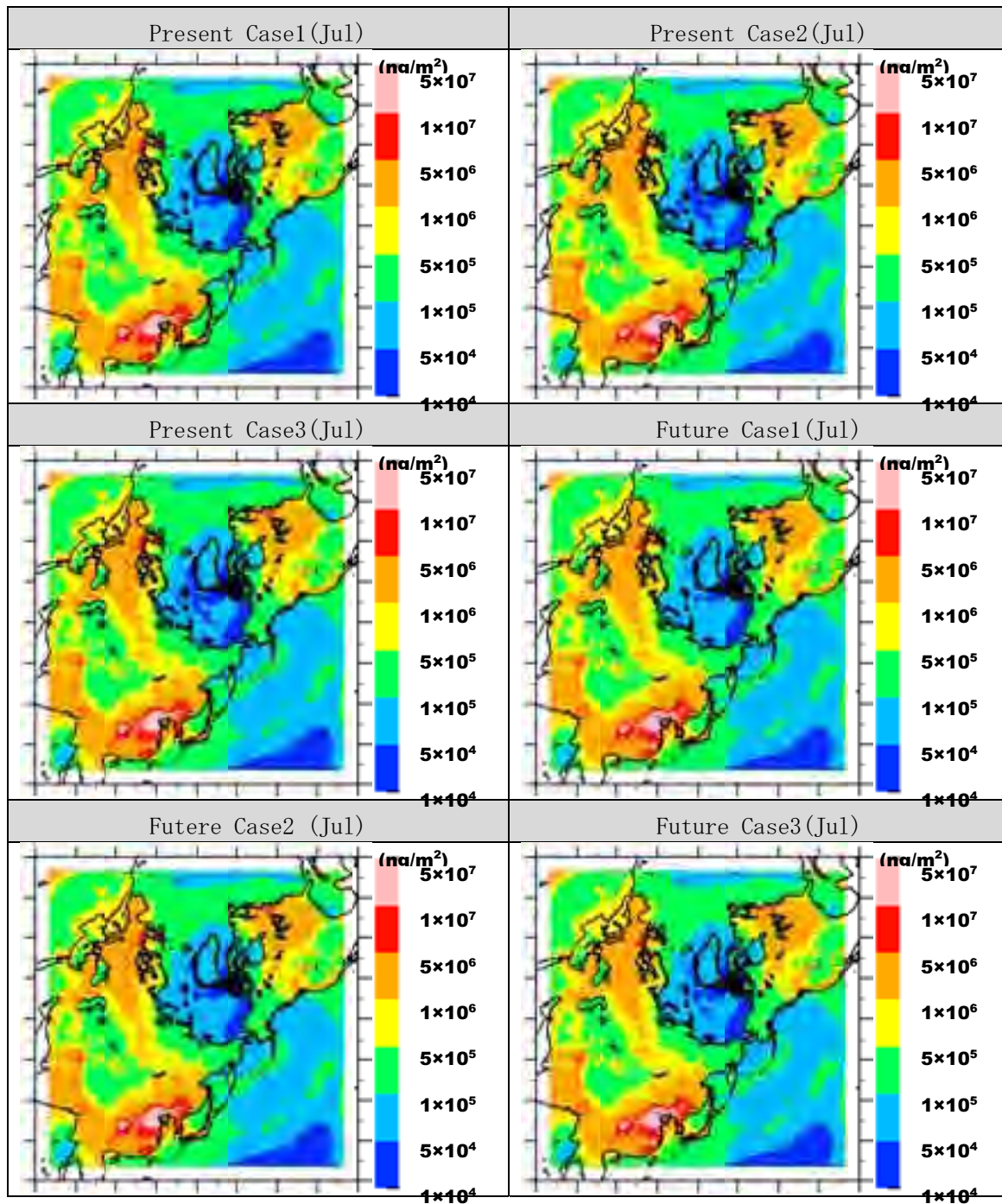


図 6.2-1 乾性沈着量の水平分布図

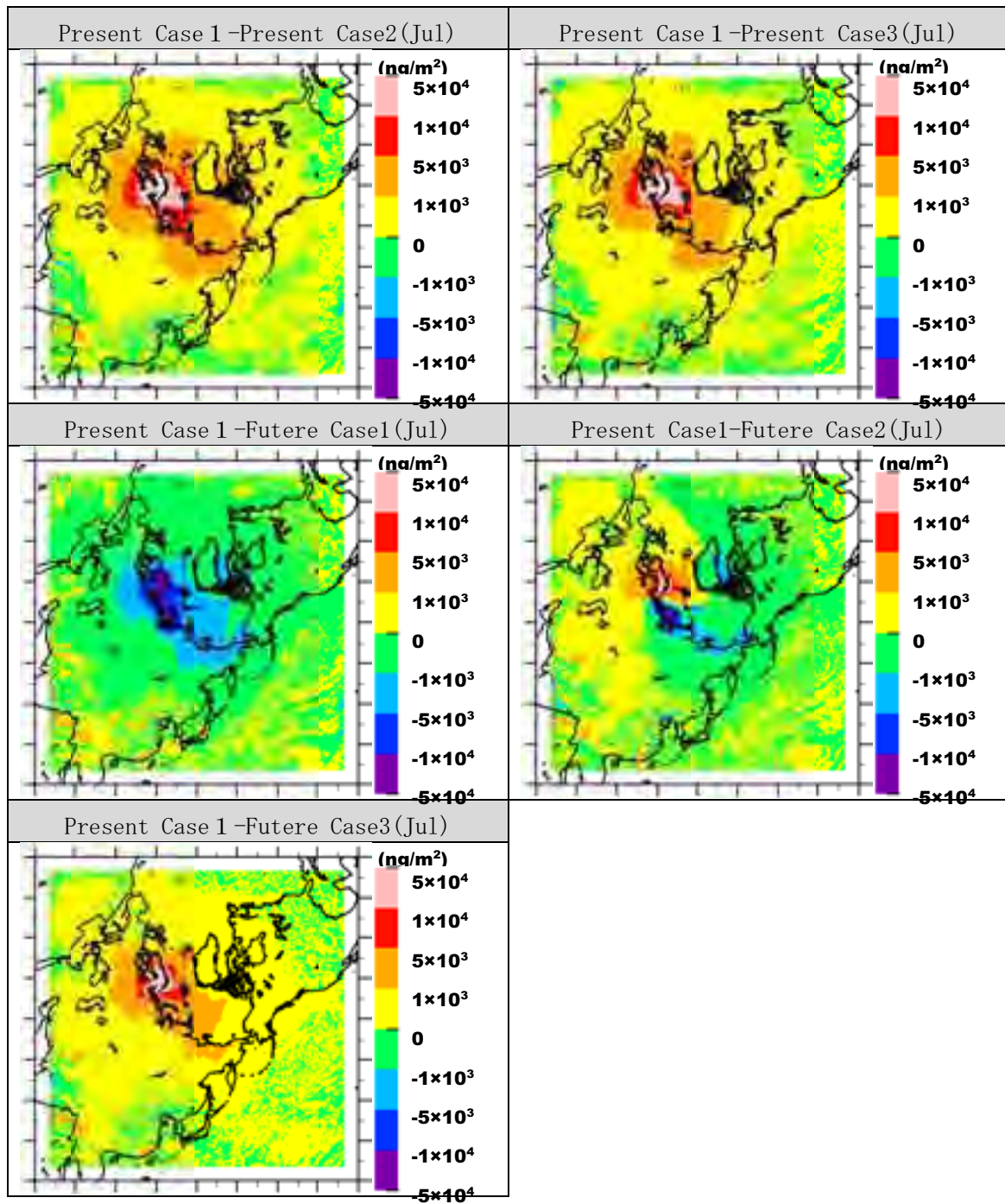


図 6.2-2 乾性沈着量の水平分布図（現況ケース 1 との差分）

6.3 北極圏で懸念される生態系影響の観点からの対策の必要性の検討

シミュレーションより BC 沈着速度を計算し、以下のとおり解析結果をまとめた。

- (1) 生態系影響を評価するエンドポイントとして地衣類を選択し評価を行った。地衣類は植物とは異なり、根のような栄養素や水を吸収する器官がなく、降水から直接栄養分を得ている。また、葉面を守るクチクラ層やガス交換のための気孔がないため、地衣体と呼ばれる本体が大気に直接暴露されている。そのため、大気汚染物質の影響により種組成や被覆率が変化することが知られており、様々な汚染物質の環境指標生物として多くの活用事例が報告されている。
- (2) エストニアのオイルシェール発電所付近では、同発電所から排出されていると推定される Ca を多く含む粒子状物質の沈着により、全く地衣類の生息が確認できない地衣砂漠とも言われるような地域が形成される等、大気汚染物質の沈着による地衣類の生態系に対する明らかな影響が顕在化している。
- (3) 粒子状物質だけでなく窒素沈着でも地衣類は生態系内の種組成や被覆率が大きく変化することが報告されており、この変化量を活用した臨界負荷量の設定の議論も進んでいる。既報によると、地衣類を考慮した窒素の臨界負荷量は、 $5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 未満（例えば $2 - 4 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）に設定するのが妥当であり、北極域にも適用は可能と考えられる。ツンドラのような樹冠による遮りがない状況においては、林外の湿性沈着として $1 - 3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ が目安となる。ただし、今回推定している LAC には窒素は多く含まれていないため、LAC 沈着により直接窒素沈着量の臨界負荷量に達することはない。
- (4) ブラックカーボンによる地衣類への直接的な影響を示す科学的な報告事例は少ないが、その光吸収特性から、「日陰効果」や「葉温上昇効果」等により、植物の光合成低下や蒸散促進を引き起こす可能性が示唆されている。地衣類は植物のように落葉せず長期に同じ場所で生息していることから、このような光吸収性の BC 粒子の長期的な沈着の影響を、より直接的に受ける可能性もある。地衣類に適用すべきブラックカーボン沈着量の閾値としては、我が国の代表的な樹種において日陰効果により 10% 程度の光合成阻害を引き起こす、葉面積当たり $3 - 40 \text{ mg C/m}^2$ の BC 付着量が一つの目安となる。今回の LAC 沈着量と地衣類の被覆率から考えると、同臨界負荷量に達する可能性は低い。
- (5) 南東アラスカのクロンダイク・ゴールドラッシュ国立歴史公園付近では、窒素沈着あるいは硫黄沈着による地衣体中の元素濃度変化や種組成の変化等が生じており、すでに船舶（主に観光シーズンのクルーズシップ）由来の大気汚染物質による地衣類への影響が顕在化しつつあると報告されている。このような事例があることから、局所的な影響を更に精密に評価するためにも、地衣類を指標生物として BC を含めた大気汚染物質の沈着量に対する影響を引き続きモニターする必要があると考えられる。

6.4 北極圏で懸念される人体健康影響の観点からの対策の必要性の検討

6.4.1 疫学研究に基づく粒子状物質の健康影響評価

本年度に実施した船上観測より、船舶排ガス中に含まれるブラックカーボンは、概ね空気力学径が $2.5\ \mu\text{m}$ 以下の微小粒子 ($\text{PM}_{2.5}$) として存在していることが確認された(第2章船舶から排出されるダストの排出実態の解明 参照)。わが国では、平成25年に入ってから中国において広い地域で高濃度の $\text{PM}_{2.5}$ が報告されたこと、また、西日本を中心にわが国の環境基準(一日平均 $35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) を越える濃度が頻発したことから、 $\text{PM}_{2.5}$ に対する関心が急速な高まりを見せている。

大気汚染に係る環境基準は、公害対策基本法の第9条において「大気の汚染(中略)に係る環境上の条件について、それぞれ、人の健康を保護し、及び生活環境を保全する上で維持されることが望ましい基準」と定義されている。これに従い、2009年9月に公示された $\text{PM}_{2.5}$ に対する環境基準は、その当時における最新の疫学的な知見に関する検討作業を踏まえた上で設定されたものとなっている。さらに環境省は、 $\text{PM}_{2.5}$ 高濃度時に対する暫定的な行動指針を2013年2月に定めている。その内容は、「1日の平均濃度が、これまでの基準値の2倍に当たる1立方メートル当たり $70\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えると予測された場合は、健康に影響を及ぼす可能性が高くなるとして、都道府県などが外出や屋外での長時間の激しい運動、それに部屋の換気を控えるよう注意を呼びかける」といった内容である。実際には、1時間平均値が当日の早い時間帯(5~7時)において $85\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた場合に、その日の日平均値が $70\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える可能性が高いと判断して、都道府県等が注意喚起を行うこととなっている。

以上より、 $\text{PM}_{2.5}$ をはじめとする大気汚染物質と人体健康影響には強い相関があることは疑いなく、その定量性は疫学研究より明らかにされてきた。大気汚染に係る疫学研究では、大気汚染の時間・空間的に異なる曝露レベルにより、どのような健康影響の違いが生じるのかが分析される。例えば、最も有名な疫学研究の一つである「ハーバード6都市研究²⁸⁾」では、米国東部の6都市において無作為に選定された25~74歳の白人約8,111人を、1974年以降の14~16年間(111,076人・年)追跡したコホート研究²⁹⁾が行われた。同研究では、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度が最も低い都市(ウィスコンシン州 Portage: $11.0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) と最も高い都市(オハイオ州 Steubenville: $29.6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) における $\text{PM}_{2.5}$ 濃度と死亡率比は、全死亡で1.26(+26%)、心肺疾患死亡で1.37(+36%) と有意な増加であったことが報告されている。

²⁸⁾ Krewski et al. : Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality, A Special Report of the Institute's Particle Epidemiology Reanalysis Project, Health Effects Institute, Cambridge (2000)

²⁹⁾ 分析疫学における手法の一つであり、特定の要因に曝露した集団と曝露していない集団を一定期間追跡し、研究対象となる疾病の発生率を比較することで、要因と疾病発生の関連を調べる観察的研究。研究期間が長くなるゆえ、多くの経費や労力を要するなどの問題点がある。

大気汚染物質に係る健康影響は、「長期曝露による慢性影響」と「短期曝露による急性影響」の2つに分類される。PM_{2.5}に対して設定されている環境基準には、日平均値 (35 µg/m³) と年平均値 (15 µg/m³) の組み合わせが設定されているが、これは短期及び長期曝露に伴う健康影響からの保護を目的としたことが理由である。長期曝露における慢性影響には徐々に進行する癌や動脈硬化などが、短期曝露による急性影響には喘息や心筋梗塞の発作などが挙げられる。これら健康影響は「エンドポイント」と呼ばれ、疫学研究では様々なエンドポイントを対象に観察及び追跡調査が行われることになる。例えばハーバード6都市研究では、前述の全死亡や心肺疾患死亡に加え、肺癌死亡や呼吸器疾患などもエンドポイントに加えられた。

PM_{2.5}のような粒子状物質は、多種多様な化学物質で構成されている。例えば、わが国都市部における2004～2008年度のPM_{2.5}重量濃度の平均値は22.6 µg/m³であり、そのうちBCに該当する元素状炭素成分 (EC) は11%、硫酸塩 (SO₄²⁻) は25%、硝酸塩 (NO₃) は13%を占める³⁰。発生源対策を講じるうえでは、これら成分濃度の把握は必須となる。他方、疫学研究においては、これら成分はいずれも有害な健康影響の原因になり得るとの考えから、個々の成分に対してではなく、粒子状物質の重量濃度を対象として追跡調査がなされている。したがって、BCあるいはLACのみの暴露に対する人体健康影響リスク評価は行うことができない。

6.4.2 健康影響の定量評価モデル

欧米では、大気汚染物質の環境基準設定の際には、疫学研究の証拠から直接的に基準値を導き出しているが、その一方で様々な基準値の組み合わせにより、公衆衛生上のインパクトがどの程度低減できるかについても定量的な評価を行っている。具体的には、環境基準達成時に得られる社会的インパクトの減少 (死亡人数や入院患者の減少) について定量的な解析結果が求められ、それを金銭的価値に換算した数値 (外部コスト) と、基準達成のために必要なコスト (内部コスト) との比較解析が行われ、対策や規制のコスト効率が検討されている。

例えば米国では、人体健康便益評価モデルの BenMAP (Benefits Mapping and Analysis Program) を行政ツールとして開発し、健康影響の定量評価を実施している。同モデルでは、以下のような対数線形型の濃度・応答関数が採用されている。

$$\Delta Mortality = -[y_0 \times (e^{-\beta \times \Delta C} - 1) \times population] \quad (式 1)$$

$\Delta Mortality$: 大気汚染に起因する死者数の変化

y_0 : ベースライン死亡率

ΔC : 大気汚染濃度の変化量

β : エンドポイントの発生率と大気汚染濃度との関係を示す係数

$population$: 曝露人口

³⁰ 環境省: 微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書 (2008)

上式におけるパラメータのうち、 β は疫学研究より得られるものであり、BenMAP では $PM_{2.5}$ に対して長期曝露に関する値のみが与えられている。

ベースライン死亡率は、ベースラインとなる大気汚染物質の濃度レベルに対応した死亡率であり、通常は各エンドポイントにおける死亡者数の統計値が使用される。このベースライン死亡率は人種や年齢によって差があるものと考えられるが、本事業で着目している北極圏及びその周辺に住んでいる人種が、日本国や米国に居住する人口と比較して $PM_{2.5}$ に対してとりわけ脆弱であるとは考えにくい。つまりは、北極海航路を対象とした対策に係る $\Delta Mortality$ の変化量は、 ΔC 及び曝露人口の大きさに依存することになる。このうち ΔC の算出は、ベースライン (現状) における $PM_{2.5}$ 濃度が十分に低い場合、例えば環境基準以下のような場合にはそもそも行う必要がないものとする。そこで次節では、 $PM_{2.5}$ 濃度及び人口分布から、北極圏近傍における健康影響を考察する。

6.4.3 北極圏近傍における健康影響評価

(1) $PM_{2.5}$ 濃度と環境基準の比較を用いた評価

表 6.4-1 に、 $PM_{2.5}$ に対するわが国の環境基準、欧州の ECD に基づく環境基準、米国連邦環境基準、WHO 指針値をまとめた。WHO 指針は他の環境基準よりも厳しいものとなっている。これは、各国が定める環境基準は、各国ごとに法的枠組みに従って、場合によっては技術面や経済面等を考慮したうえで各国が遵守すべき目標として制定されたためであり、WHO 指針とは意味合いが異なるものとするべきである。別の言い方をすれば、WHO の指針値を下回っていれば、世界のどの地域であっても、十分に許容可能なリスクの範囲内にあると言える。

表 6.4-1 代表的な $PM_{2.5}$ に係る環境基準

	日本	米国 ⁽¹⁾	欧州 ⁽²⁾	WHO ⁽³⁾
$PM_{2.5}$	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h)	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h)		25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h)
	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1yr)	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1yr)	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1yr)	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1yr)

(1) National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)

(2) Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe

(3) WHO (2006), Air quality guidelines, Global update 2005.

北極圏周辺における $PM_{2.5}$ 濃度を評価するに当たり、ここでは、(i) BenMAP では $PM_{2.5}$ に対して長期曝露影響のみを解析対象としていること、(ii) 欧州では日平均を対象とした環境基準が設定されていないこと、(iii) 短期影響評価を行うための高時間解像度のデータが困難であったことなどから、年平均値を対象にその濃度レベルを評価する。

図 6.4-1 及び米国環境保護局 (U.S. Environmental Protection Agency; U.S. EPA)³¹及び欧州監視評価計画 (European Monitoring Evaluation Program; EMEP)³²によって測定された PM_{2.5} 年平均濃度の範囲を示した。年平均値は、EMEP より入手できたデータのなかで直近となる 2007 年のものであり、凡例は、表 6.4-1 における WHO/米国/日本/欧州での指針ないし環境基準で区分したものとなっている。

今回、北緯 66° 以北の北極圏における測定結果を示すことはできなかったが、アラスカ州、アイルランド、英国北部、スカンジナビア半島といった北極圏に近い地域では PM_{2.5} 濃度が WHO の指針値である 10 µg/m³ よりも十分に低いことが確認できた。これより更に高緯度帯では PM_{2.5} の年平均値は更に低くなっていることが期待できる。

なお、先述のとおり、わが国都市部における 2004～2008 年度の PM_{2.5} 重量濃度の平均値は 22.6 µg/m³ であり³⁰、対象年は異なるものの、北極圏に近い地域よりも PM_{2.5} 濃度は高い状況にあることがわかる。

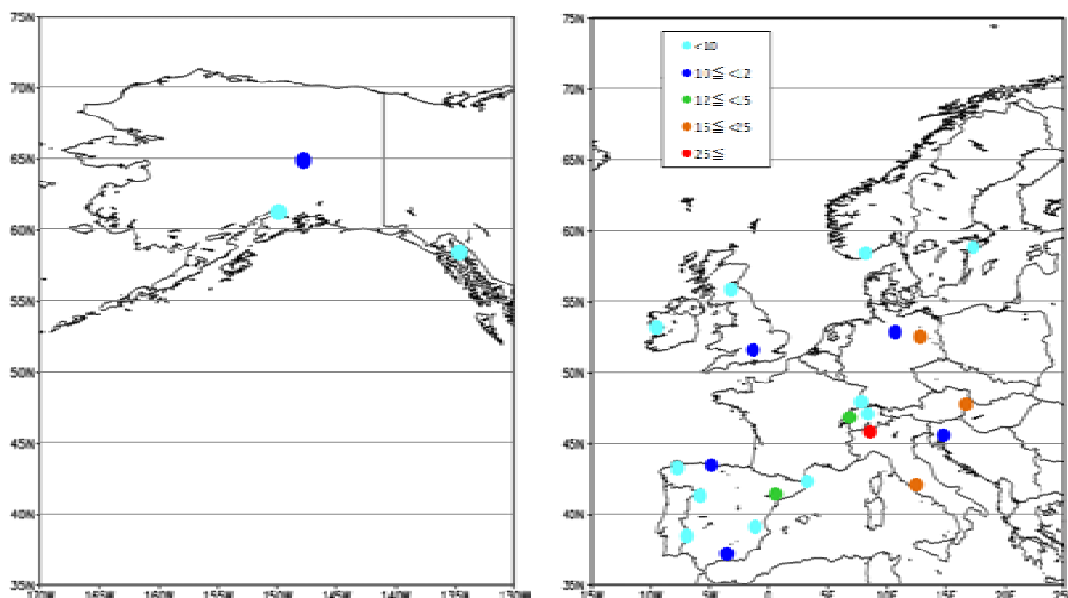


図 6.4-1 米国環境保護局 (U.S. EPA) 及び欧州監視評価計画 (EMEP) で測定された 2007 年における PM_{2.5} 年平均濃度

(2) 損失人口の計算に基づく評価

大気汚染による人体健康影響は、欧米においてはその物質に対する暴露によって疾病の発病数あるいはそれによる死亡数の増加によって評価される場合が多い。ここでは、PM_{2.5} による長期的な暴露により発病した呼吸器および循環器疾病により死亡することが推定される毎年的人数(損失人口)が対策を実施することによってどの程度減少する、結果として人の損失が少なくなることが期待できるのか、モデルの考え方にに基づき検討する。

³¹ http://www.epa.gov/airquality/airdata/ad_rep_con.html

³² <http://www.nilu.no/projects/ccc/emepdata.html>

(式 1) における Δ Mortality (大気汚染に起因する死者数の変化) は、対象となる population (曝露人口) が多いほど大きく計算される。図 6.4-2 は、NASA の SEDAC (the Socioeconomic Data and Applications Center)³³ が公開している世界の人口密度分のうち、北極圏周辺及び関東地方のものを取りまとめたものである。なお、人口密度データは 2000 年の推計値となっている。

関東地域と北極圏周辺地域を比較した場合、健康影響評価の対象となる曝露人口には大きな差がある事が見て取れる。前項で示した $PM_{2.5}$ 濃度も併せて考えた場合、北極圏及びその周辺地域における健康リスクは、現状においてわが国におけるものよりも相対的に小さいものと考えられることができる。

既に述べた船舶の排出寄与あるいは、シミュレーションから推定される EC 濃度への寄与を考えると、人体健康影響リスクの低減を目的として BC あるいは LAC 排出量を低減する根拠は小さいと言える。

なお、現行の MARPOL 73/78 条約附属書 VI の PM 規制においては、燃料中の硫黄分の削減をうたっており、これによって硫酸塩とその付随水の排出低減から PM 排出量が大幅に減少することをその前提としている。人体健康影響に対するリスク低減を目的とする場合、BC と硫酸塩とその付随水の間にはリスク低減に対する違いはないことから、まずは燃料中硫黄分の削減による硫酸塩とその付随水の排出低減をはかることが優先されるべきと考える。

³³ <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v3>

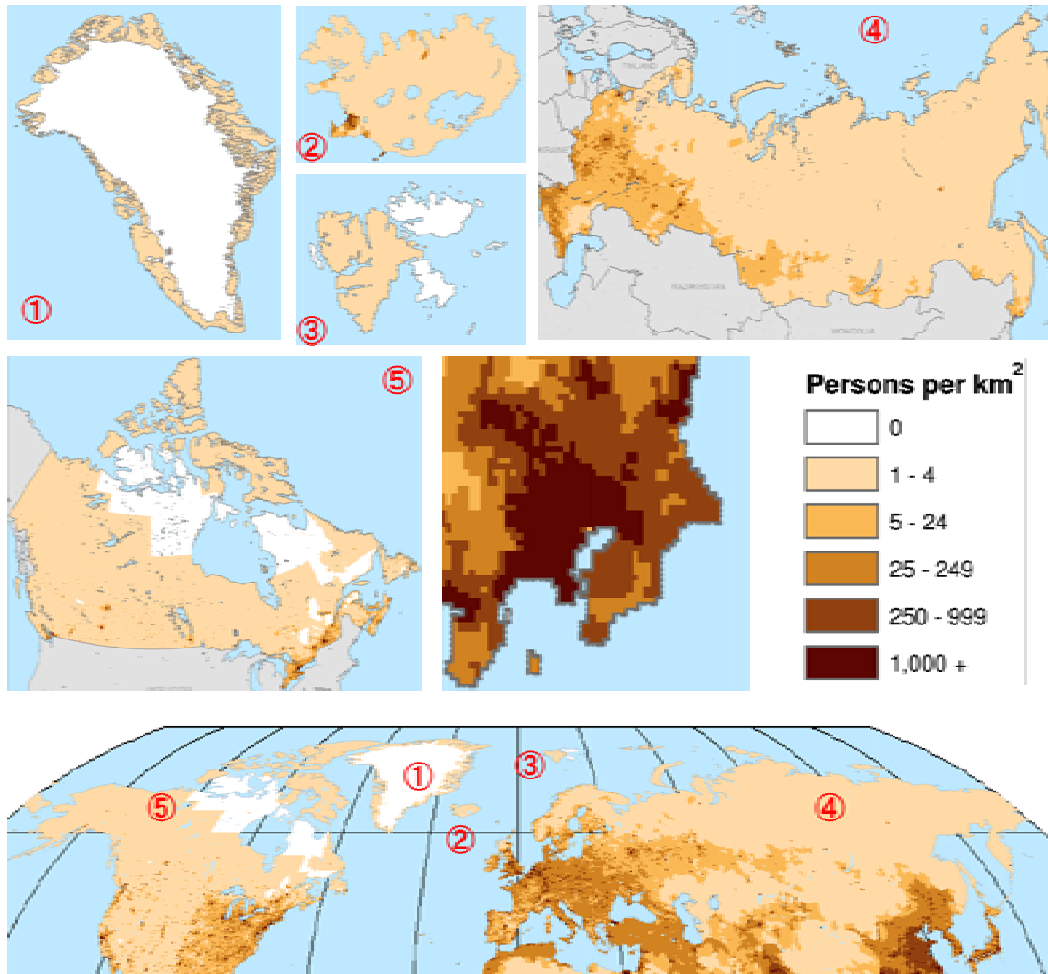


図 6.4-2 北極圏周辺及び関東地方における 2000 年の人口密度分布³³

6.5 北極圏における船舶のブラックカーボン排出に対する対策の必要性のまとめ

これまで検討してきたように、①排出量寄与割合、②シミュレーション、③生態系及び④人体健康影響を評価軸として、Non Arctic area 及び Arctic area における船舶からの LAC 排出に対する対策の必要性は下記のように整理される。

どの評価軸を優先して総合的な判断するかは、対象周辺国の施策や陸上発生源との規制の整合性などに影響されるため、ここでは踏み込まないが、全般に Arctic area における対策の必要性は Non Arctic area におけるそれに比較して小さいと結論できる。Non Arctic area においては船舶の排出寄与が世界的に見ても 29%程度と非常に大きな地域の一つであり、同海域の対策を優先することも一つの考え方としてあり得る。

その一方で、Arctic area においては船舶活動量の大幅な伸びが将来において期待されており、実活動量については衛星 AIS などを活用して、引き続きモニターする必要がある。

表 6.5-1 Non Arctic area と Arctic area に分けた対策の必要性のまとめ

	Non Arctic area	Arctic area
排出量 寄与割合	船舶からの排出寄与は 29%程度あり、対策の必要性は否定できない。	船舶からの排出寄与は 2%程度あり、かつ将来の伸びを考慮しても、全球平均とほぼ同レベル程度であると想定されるため、Non Arctic area における対策が優先されると考えられる。
シミュレ ーション	濃度レベルでの寄与率は上記の排出量寄与率とほぼ同程度。 北極海における年間の放射強制力に与える増加分は最大で 1%程度。 また、放射強制力に対する感度は Arctic area と差異は少ない。	濃度レベルでの寄与率は上記の排出量寄与率とほぼ同程度。 北極海における年間の放射強制力に与える増加分は最大で 1%程度。 また、放射強制力に対する感度は Non Arctic area と差異は少ない。
生態系	現時点では沈着量から判断して、臨界負荷量に達している可能性は低い。ただし、地衣類に対する臨界負荷量については今後更なる精査が必要。	現時点では沈着量から判断して、臨界負荷量に達している可能性は低い。ただし、地衣類に対する臨界負荷量については今後更なる精査が必要。
人体健康 影響	現況の PM _{2.5} の大気中濃度及び周辺の人口密度から判断して、対策の必要性はあるが、BC 対策よりも燃料中硫黄分の減少による硫酸塩とその不随水の低減を優先させるべきと考えられる。	現況の PM _{2.5} の大気中濃度及び周辺の人口密度から判断して対策の必要性は小さい。

今後、北極海におけるブラックカーボンに対する対策の必要性を検討し合意していくためには、以下のデータを関連学会や国際社会などに対して示し、共通認識を持った上で議論を行うことが重要である。

- ブラックカーボンの定義と既存の枠組みとの整理

局地的な気候変動に対する影響を考慮した場合、ブラックカーボンの定義としては光学的特性を持つ LAC として定義することが望ましい。

今回本事業においては、LAC として、EC+OM+Ash とし、かつその光学的特性は自動車ディーゼル粒子と同等とした。これは、環境への影響としては安全側の評価を取ったものであるが、今後、定量的な規制値を定めていくためには、船舶からのブラックカーボンに関する光学的特性に関する情報を更に収集する必要がある。

ただし、船上の測定法として十分に利用されているとは言えない状況であり、その場合、今回使用したダスト測定法 及び FSN (フィルタースモークナンバー法) などを補助的に用いることも必要であると考えられる。

- 希釈法による PM2.5 とブラックカーボンの関係

希釈法を用いた PM2.5 では、現状多くの硫酸塩とその付随水が全体の 7 割程度と多く含まれている。人体健康影響を考慮して、PM2.5 の排出総量を下げたい場合には、現行の MARPOL 附属書 VI の枠組みを利用して、硫酸塩の発生に結びつく燃料中の硫黄分を下げるのがまず優先される。これによって期待される削減量は、LAC あるいはブラックカーボンのみを対象にした対策(たとえば DPF)などによって期待される削減量よりもはるかに大きい。従って、ブラックカーボンの対策の必要性の議論において、人体健康影響をコベネフィットとして取り上げるのは適切ではない。

ブラックカーボンに対する対策の必要性を検討するためには、まず局地的気候変動を優先して評価すべきである。この際、放射強制力と雪表面の反射率の変化をエンドポイントとして把握するべきである。

なお、生態系影響については、Arctic 周辺の地衣類を中心とした生態系は低緯度域における他の陸上植生生態系に比較してブラックカーボンなどに対して脆弱である可能性があることから、評価すべきエンドポイントに含めるべきである。

- Arctic における船舶からのブラックカーボン排出量

カナダの exactEarth Ltd が提供する衛星 AIS データを活用して、世界的に見ても精度の高い船舶活動量及び排出量データを作成した。

北極海における船舶の活動量及び LAC 排出量データを整備するにあたっては、北緯 66° 以北の海域のうち、西経 25° ~ 東経 45°、かつ、北緯 66° ~ 80° の海域を“Non Arctic area”とし、それ以外の北緯 66° 以北の海域を“Arctic area”と定義した。

ブラックカーボン排出量の地理的分布をみると、スカンジナビア半島沖に集中しており、北緯 66° 以北における LAC 年間総排出量 2,161 Mg/year のうち、約 82% の 1,770 Mg/year が本事業で定義する“Non Arctic area”内で発生し、シベリア側やカナダ側の“Arctic”内では約 18% の 391 Mg/year であった。

- Arctic における船舶からのブラックカーボン排出量の排出寄与割合

Arctic area の LAC を、森林火災起因と全人工発生源を含めた LAC 排出量に対する寄与率は 2%程度と算定される。これに対して、スカンジナビア半島及びアイスランド付近の Non Arctic area における排出量の寄与率は 29%程度と算定される。

従って、以上の実態から、対策の必要性や枠組みの検討においては、両者を別に考えることが適当であると考えられる。

- Arctic における船舶からのブラックカーボンの局地的気候変動に与える影響

北極圏の EC の最下層濃度および気柱総量に対する船舶からの寄与は、シミュレーションの結果、局地的な気候変動が最も懸念される北極海上空及びその周辺において全体として 50-70 ng/m³ の範囲にあるのに対して 5-10 ng/m³ となり Arctic area と Non Arctic area を併せて全体の人口排出源に対して 1/10 程度の寄与があることが想定される。次に、“Arctic area” では、全体の 0-70 ng/m³ に対して、最大で 5 ng/m³ 程度であり濃度レベルで 1/10 以下の寄与であると評価できる。

北極圏における年平均放射強制力は、おおよそ 0.32-0.48 W/m² の範囲にあり、北極海における全船舶の寄与は、その増加分は最大 2%程度に留まっている。最も影響が大きいと考えられる 7 月においても北極海上空における増加分は最大 2%程度に留まると考えられる。

7 月の一ヶ月分の船舶からのブラックカーボン沈着量は、新雪の雪表面が気象条件や圧雪など経年変化によってある程度ザラメ化した範囲内と同等であると評価できる。総人工排出源からの排出を考慮しても、同じく 0.97 程度までの低下と評価された。

- 船舶のブラックカーボンに対する対策の必要性

①排出量寄与割合、②シミュレーションによる局地的気候変動、及び ③生態系評価軸として、評価するべきである。

どの評価軸を優先して総合的な判断するかは、対象周辺国の施策や陸上発生源との規制の整合性などに影響されるため、ここでは踏み込まないが、全般に Arctic area における対策の必要性は Non Arctic area におけるそれに比較して小さいと結論できる。Non Arctic area においては船舶の排出寄与が世界的に見ても 29%程度と非常に大きな地域の一つであり、同海域の対策を優先することも一つの考え方としてあり得る。

その一方で、Arctic area においては船舶活動量の大幅な伸びが将来において期待されており、実活動量については衛星 AIS などを活用して引き続きモニターする必要がある。