

12. 北極圏の大気汚染への発生源寄与に関するモデル評価

A Modeling study to estimate emission source contributions to the Arctic air pollution

○村尾直人、佐藤和弥、山形 定、太田幸雄

Naoto MURAO, Kazuya SATOH, Sadamu YAMAGATA, and Sachio OHTA

ABSTRACT ; An Eulerian hemispheric model is used to investigate emission source contributions to the Arctic air pollution such as the Arctic haze and black carbon (BC) accumulation. Four cities, including Tiksi (71° 38' N, 128° 52' E), Barrow (71° 18' N, 156° 44' W), Alert (82° 28' N, 62° 30' W), and Spitsbergen (77° 55' N, 11° 56' E), are selected to evaluate the estimations. The results indicate that more than half of the wintertime sulfur deposition comes from emission sources in north America, and the contributions do not differ greatly with those in summer. The results from the calculations for BC suggests that three major emission sources, namely open burning, biofuel, and fossil fuel, equally contribute to BC levels in the arctic cities.

KEY WORDS: Arctic pollution, Sulfur deposition, Black carbon, Eulerian model

1. はじめに

大気中に排出された汚染物質は排出源付近の局所的な汚染を引き起こすだけでなく、長距離輸送によって越境汚染、ひいては排出源の無い地域にさえ影響を与える。その例として、地球上の各地域で排出された汚染物質が北極圏まで輸送されていることが近年の観測で明らかになっている。北極圏ではこれらの輸送によって、環境汚染のみならず、氷雪面の減少を引き起こす気候影響や生態系への影響も懸念されている。

本研究では大気汚染と気候影響の両面から重要である SO_2 やそれに付随して生じる硫酸塩および黒色純炭素(BC)の北極への輸送に焦点を当て、各発生源の北極圏大気汚染への寄与を推定した。

2. モデル概要

2-1. モデルの基礎方程式

汚染物質の輸送・沈着計算にはオイラー型の格子モデルを使用した。モデルの基礎式は以下の通りである。

$$\rho \frac{\partial C_i}{\partial t} = -\rho u \frac{\partial C_i}{\partial x} - \rho v \frac{\partial C_i}{\partial y} - \rho w \frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_{zz} \frac{\partial C_i}{\partial z} \right] + R_i(C_i, x, y, t) + S_i(x, y) + \text{Dep}(C_i)$$

ここで C_i は各化学種の濃度、 ρ は空気密度、 x, y はそれぞれ x, y 方向の位置、 z は高度、 u, v, w はそれぞれ x, y 方向、高さ方向の風速、 K_{zz} は鉛直方向の拡散係数である。また、 R_i は反応による変化、 S_i は発生源からの発生、 Dep は乾性沈着や湿性沈着による除去である。

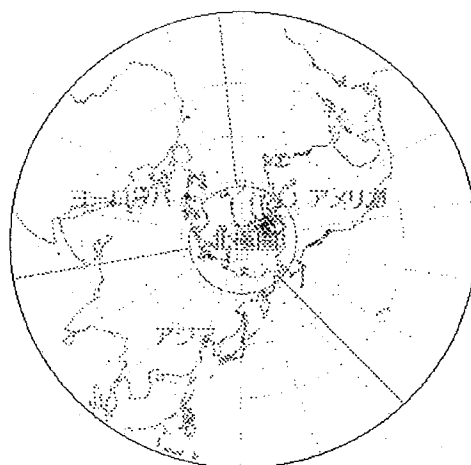
* 北海道大学大学院工学研究科

2-2. 計算条件

計算対象領域は北極点を中心とする北半球で、水平方向は $200\text{km} \times 200\text{km}$ (126 個 $\times$ 126 個)、鉛直方向は等圧力面 11 層の 3 次元格子で計算を行った。

1) SO_2 、硫酸塩

発生源地域を右図のようにヨーロッパ、アジア、アメリカ、北極圏に分けることにより各発生源地域の北極圏汚染への寄与を推定した。また、1990、1995、2000 年の SO_2 発生源データ¹⁾ を使用し、発生源の経年変化による影響について評価を行った。



2) 黒色純炭素 (BC: Black Carbon)

fossil fuel、biofuel の燃焼、open burning によって排出される BC の各発生源データ²⁾ を用いて北極に達する BC の濃度、沈着量の計算を行い、北極汚染への寄与を推定した。ここで、BC は硫酸塩と同様の沈着速度を持つと仮定した。ただし、これら発生源には季節性を与えていないため、1 年を通して排出量は一定としている。

3. 水平風の修正

本モデルの移流計算で使用する風の場合は、気象庁の全球客観解析データによるもので、格子点に合わせた内外挿を行った後、質量保存則を満足するように水平方向の風を修正した。すなわち、風のデータから計算領域内の格子点における風を内挿して暫定的な風場を求めた後、連続の式を満足するように変分法を用いて風場を修正し、その修正量の総計を最小にするような 3 次元の風速成分を計算した。

4. 結果と考察

4-1. SO_2 、硫酸塩

図 1 に北極圏の月平均地表面 SO_2 濃度計算例を示す。北極圏には Norlisk を除いて大きな発生源はなく、このような濃度分布は各大陸の発生源から輸送された汚染物質によって生じると考えられる。図 2 に 1 月(冬季)の北極圏諸都市における SO_2 濃度への各発源地域からの寄与(1990 年の発生源データを使用)を示す。北極圏の代表的な工業都市であり局所的な汚染が卓越する Norlisk を除き、各地点で様々な大陸別寄与が見られるが、全体にアメリカの寄与が大きく、ヨーロッパやアジアの寄与は低い結果になった。輸送ポテンシャルを算出した研究³⁾ ではヨーロッパの発生源の強い寄与が示唆されているが、本モデル計算において、北極の大気汚染へのそれ

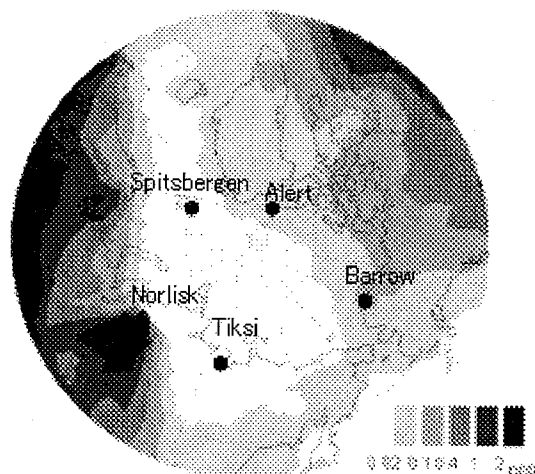


図 1 1990 年 1 月の月平均地表面 SO_2 濃度

らの寄与は比較的小さい。この原因としては、ヨーロッパから排出される汚染物質が輸送中に降雨によって大気中から除かれることが考えられる。また、冬季(1月)と夏季(7月)で計算を行っているが濃度、沈着量で季節差はあるものの、寄与率は大きく変わらなかった。

表1に三大酸性雨地域であるアメリカ北東部、東欧、中国を代表する都市における汚染物質濃度、沈着量の経年変化を示した。プラハ、デトロイトでは1990年から2000年に濃度、沈着量ともに大きく減少しているが、重慶では1990年から1995年に大きく増加し、2000年は1995年と同程度になっている。ただし、近年のSO₂排出量推定では中国で2000年以降排出量が増加(2005年で2000年の27%増)しているため⁴⁾、北極圏の汚染への寄与の計算結果と照らし合わせてみると、今後はアジアからの寄与が相対的に高くなっていくことが予想される。

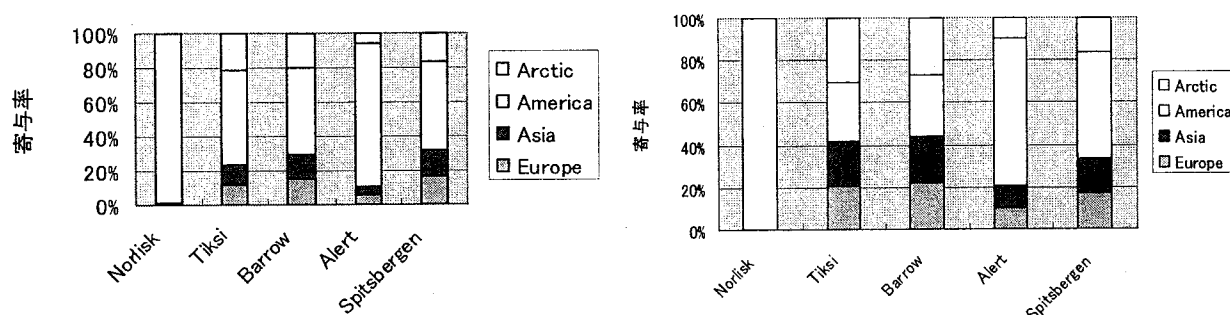


図2 北極圏諸都市の硫黄沈着量への各発生源の寄与(左は1月、右は7月)

表1 主要発生源付近の濃度、沈着量経年変化

冬季(1月)	プラハ(チェコ)			デトロイト(アメリカ)			重慶(中国)		
	1990年	1995年	2000年	1990年	1995年	2000年	1990年	1995年	2000年
月平均SO ₂ 濃度(ppb)	20.8	13.2	9.9	10.0	7.9	7.5	5.5	7.5	7.4
月平均硫酸塩濃度(ppb)	1.8	1.2	0.9	1.6	1.3	1.2	0.7	0.9	0.9
SO ₂ 沈着量(kg-S/km ²)	460.1	316.3	251.2	132.5	108.7	107.2	157.6	221.2	216.2
硫酸塩乾性沈着量(kg-S/km ²)	10.7	7.3	5.4	8.3	6.6	6.2	5.1	7.0	6.8
硫酸塩湿性沈着量(kg-S/km ²)	78.0	53.2	41.0	51.0	41.2	39.4	94.2	126.2	122.8
全硫黄沈着量(kg-S/km ²)	548.8	376.8	297.6	191.8	156.6	152.8	256.9	354.3	345.8
夏季(7月)	プラハ(チェコ)			デトロイト(アメリカ)			重慶(中国)		
	1990年	1995年	2000年	1990年	1995年	2000年	1990年	1995年	2000年
月平均SO ₂ 濃度(ppb)	17.4	11.2	8.4	7.8	6.1	5.9	4.5	6.3	6.1
月平均硫酸塩濃度(ppb)	1.2	0.8	0.6	1.4	1.1	1.0	0.3	0.4	0.4
SO ₂ 沈着量(kg-S/km ²)	447.5	310.1	249.4	183.1	150.2	149.7	129.7	183.1	179.4
硫酸塩乾性沈着量(kg-S/km ²)	14.0	9.5	7.5	8.7	6.9	6.6	4.3	6.0	5.9
硫酸塩湿性沈着量(kg-S/km ²)	347.5	236.9	182.3	120.5	95.1	90.9	122.2	170.2	166.4
全硫黄沈着量(kg-S/km ²)	809.1	556.5	439.3	312.4	252.2	247.3	256.2	359.3	351.7

注) 濃度や沈着量は各都市における値ではなく、その都市を含む200km×200km格子の平均値である

4-2. 黒色純炭素 (BC: Black Carbon)

図3に1月(冬季)について計算した北極圏諸都市のBC濃度への各発生源からの寄与を示す。各都市においてopen burningと化石燃料の寄与が高くなっているが、この結果は排出の季節変動を考慮しておらず、open burningによる排出およびその寄与は、森林火災の多発する夏季により高く、冬季にはより低くなるものと推定される。また、夏季の計算結果においても寄与率は同程度で、化

石燃料の燃焼による人為的な排出だけでなく森林火災も北極圏の BC 濃度に大きく寄与していることが明らかになった。

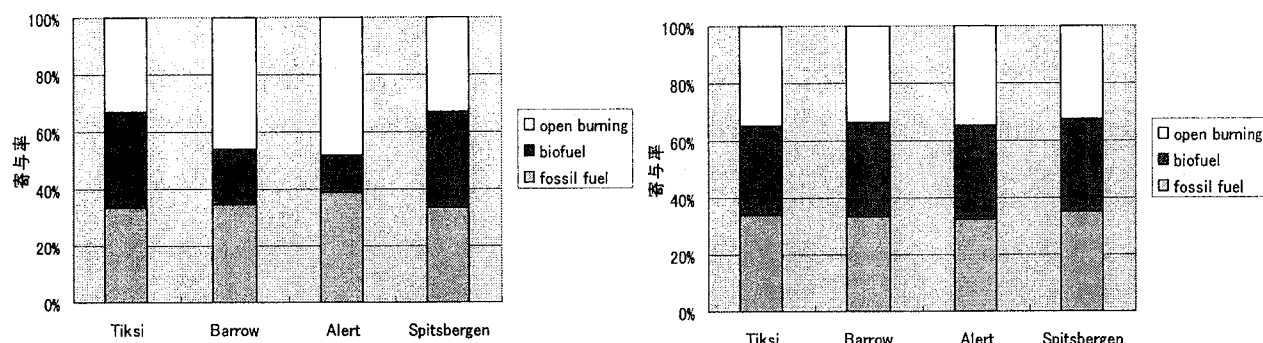


図 3 北極圏諸都市の BC 濃度への各発生源寄与 (左は 1 月、右は 7 月)

参考文献

- 1) EDGAR データベース [<http://www.mnp.nl/edgar/model/>]から入手
- 2) Tami C. Bond, David G. Streets, Kristen F. Yarber, Sibyl M. Nelson, Jung-Hun Woo, and Zbigniew Klimont: A technology-based global inventory of black carbon and organic carbon emissions from combustion, *J. Geophysical Res.*, Vol.109, D14203, pp.1-43 (2004)
- 3) A. Stohl: Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere, *J. Geophysical Res.*, Vol.111, 1-17 (2006)
- 4) 中国環境保護総局