

93, 9510-9524.

荻谷奈緒, 遊馬芳雄, 菊地勝弘, 和田 誠, 1997: スピッツベルゲン島における降水の季節変動. 日本気象学会 1997年春季大会講演予稿集, 158.

Oort, A. H., 1974: Year-to-year variations in the energy balance of the arctic atmosphere, J. Geophys. Res., 79, 1253-1260.

Overland, J. E., P. Turet and A. H. Oort, 1996:

Regional variations of moist static energy flux into the Arctic, J. Climate, 9, 54-65.

Wada, M., H. Konishi and T. Yamanouchi, 1996: Variation of monthly precipitation and frequency of radar echo existence at some altitudes in Ny-Alesund, Svalbard, Arctic. Mem. Nat'l Inst. Polar Res., 51, 241-248.

204: 402 (エアロゾル; 大気汚染)

2. 北極圏の大気環境汚染

太田 幸雄*

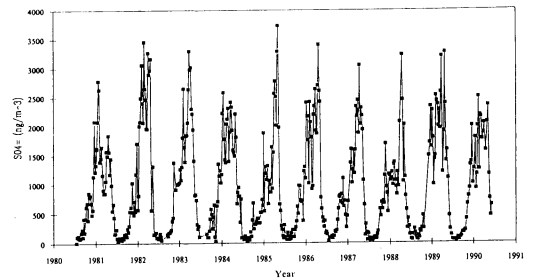
1. はじめに

かつて北極は、人間活動による汚染の及ばない、地球上でもっとも清浄な地域のひとつと考えられていた。しかしこの北極において、1950年代から、冬～春季に arctic haze と呼ばれる煙霧層が出現するようになってきている。この北極圏における大気環境汚染問題について概説し、さらに筆者等が実施してきたシベリア北極圏における大気環境汚染の調査結果について紹介する。

2. Arctic haze (北極煙霧層)

Arctic haze については、1980年代からこれまで、アラスカ、カナダ、ノルウェー、スウェーデンおよび旧西ドイツ等の研究者を中心として観測が行われてきており (Shaw and Khalil, 1989; Shaw, 1995; Sturges, 1991; Atmospheric Environment, 1981, 1985, 1989), その結果、以下の事柄が明らかとなってきた。

Arctic haze は、(1) 晩冬から早春にかけて最も濃密に発達する。(2) 5月中旬までに消滅し、夏季には存在しない。(3) 北極海域に広範囲に存在し、また地表から高度 2～3 km の気層内に濃密に存在する。(4) Arctic



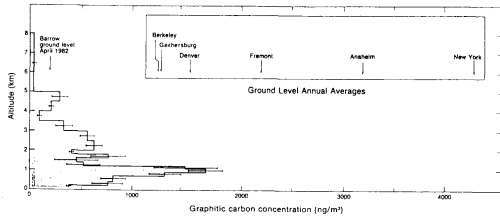
第1図 カナダ北極圏のアラートにおいて測定された地表大気中の硫酸イオン(SO₄²⁻)濃度 (単位: ng/m³) (Shaw, 1995).

haze を構成するエアロゾルは粒径が2 μm 以下の微小粒子であり、主として煤粒子 (黒色純炭素粒子と有機物粒子) と硫酸 (塩) 粒子から構成されている。(5) Arctic haze を構成する汚染物質の発生源は、ユーラシア大陸の北西部 (中部ヨーロッパとヨーロッパロシア) である。

Arctic haze の観測例として、第1図にカナダ北極圏のアラート (第3図にAで示す) において測定されている大気中の硫酸イオンエアロゾル (SO₄²⁻) 濃度の季節変動を示す (Shaw, 1995)。大気中濃度が冬～春季に3 μg/m³程度にまで増加、夏～秋季には0.1 μg/m³にまで減少しており、この濃度変動が規則正しく繰り返

* 北海道大学大学院工学研究科。

© 1998 日本気象学会

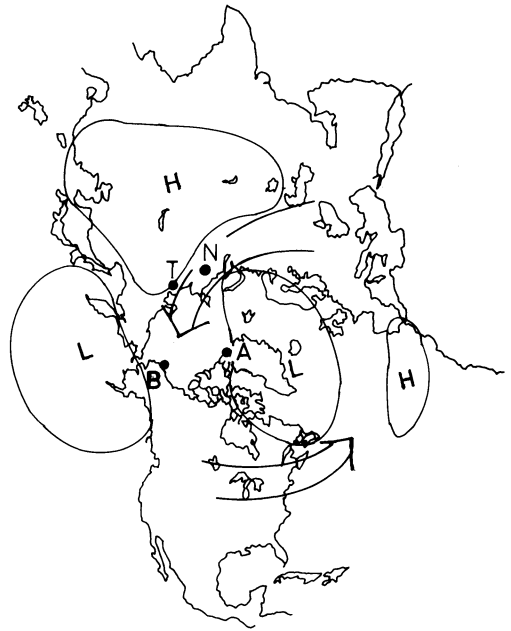


第2図 北緯74度西経25度の北極海上において1983年3月31日に測定された、大気中の黒色純炭素 (graphitic carbon) 粒子濃度の鉛直分布 (Shaw and Khalil, 1989).

されている。ちなみに、東京や札幌等における大気中の SO_4^{2-} 粒子濃度は $5 \sim 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、冬～春季のアラートでは日本の大都市域の大気中濃度と同程度の高濃度となっている。また、第2図に北緯74度西経25度の北極海上において1983年の3月31日に測定された大気中の黒色純炭素 (graphitic carbon) 粒子濃度の鉛直分布を示す (Shaw and Khalil, 1989)。上空1～2 kmでの黒色純炭素粒子濃度が $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ もあり、コロラド州 Denver 等と同程度の高濃度となっていることがわかる。

これらの硫酸成分や煤成分は、自然状態で生成されたものではなく燃焼等の人間活動によって排出されたものであることは明らかである。しかし、大工業地帯の存在しない北極海域においてなぜこのような燃焼由来の粒子が高濃度でしかも広範囲に存在しているのだろうか。第3図に、北半球の1月の平均地表気圧配置を示す。冬季の北半球においては、シベリア高気圧と、グリーンランド・北欧域の低気圧が存在するため、図に示すように中部ヨーロッパ及びヨーロッパロシアから北極海に向かう気流が形成されやすい。また冬季の北極海域においては降水量が非常に少ない(例えば、冬季のパローの月平均降水量は5 mm程度、一方東京では45～60 mm)。このため中部ヨーロッパ及びヨーロッパロシアで排出された大気汚染物質は北極海域まで輸送され、降水により除去されることなく冬季間北極海域に滞留し、arctic haze を形成するのではないかとされている。

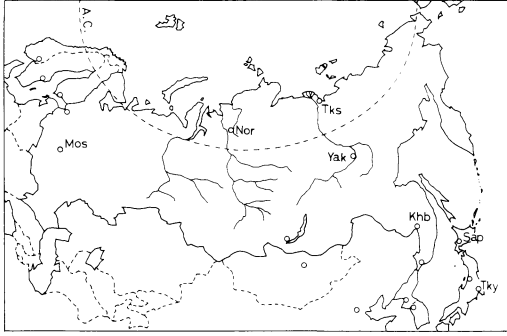
この arctic haze について、Blanchet (1987, 1989) は、haze モデルを作成し、放射伝達計算および大気大循環モデル計算を行って、気候影響の評価を行った。その結果 arctic haze の出現により、北極域の対流圏下層において $0.1 \sim 0.3 \text{ K}/\text{day}$ の放射加熱が生じること、そのために、北極域において放射冷却作用が弱ま



第3図 北半球の1月の平均地表気圧配置。図中のAはアラート、Bはパロー、Tはチクシー、Nはノリリスクを示す。

り、極循環、Ferrel 循環が弱まって地表面気圧が低下し、雲量および降水量が増加する可能性があることを示した。また、arctic haze は黒い煤粒子を多量に含んでおり、これらの煤粒子が雪氷面に沈着することにより雪氷面の反射率が低下して氷床・氷河等の融解を早め、北極圏における水循環過程に大きな影響を及ぼすことも指摘している。近年、重大な問題となっている地球温暖化においては、北極圏において最も気温の上昇が大きいといわれているが、上述のように、arctic haze はこの北極圏の温暖化をさらに加速する恐れがある。

ところで、これまで arctic haze に関しては、アラスカ、カナダおよび北欧において精力的に研究が進められてきたが、北極圏の約3分の1を占めるロシア・シベリア地域においては全く調査・研究が行われて来なかった。さらに、ベレストロイカ以降、旧ソ連および東欧地域において大気汚染・水質汚濁等の環境汚染の激化が伝えられている。上述したように、arctic haze は、それらの地域の大気汚染物質が長距離輸送された結果発生するものと考えられることから、発生源地域における大気環境調査もまた重要な研究課題となる。以上の観点から筆者等は、1992年以降、ロシア連邦の



第4図 シベリア調査地域図。Khbはハバロフスク、Yakはヤクーツク、Tksはチクシー、Norはノリリスクを示す。

シベリア地域において、大気環境汚染調査を実施しており、以下にその概要を述べる。

3. シベリア北極圏における大気環境汚染調査

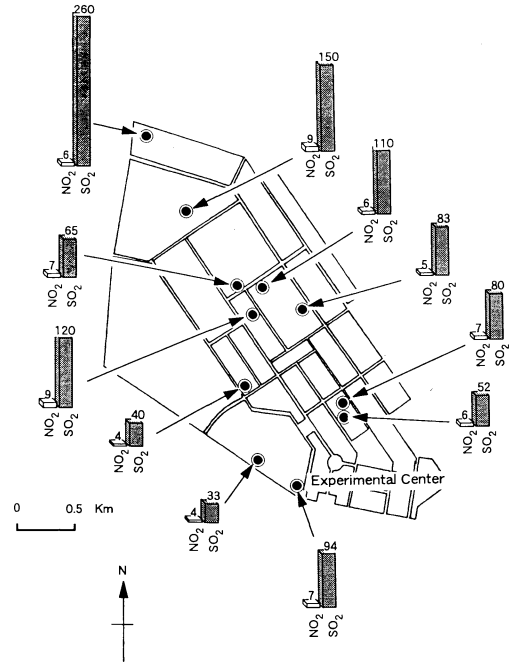
3.1 調査地域

第4図に、調査地域を示す。これまで主としてヤクーツク、チクシーおよびノリリスクにおいて、大気エアロゾル成分とSO₂、HNO₃ガス成分の連続測定、および夏季のSO₂、NO₂の濃度分布測定を行ってきた。

ヤクーツク市はロシア連邦サハ共和国の首都であり、レナ川中流の北緯62度東経130度に位置する人口20万人の農業・牧畜都市である。このヤクーツク市南端の永久凍土研究所において、大気エアロゾルおよびSO₂、HNO₃ガス成分濃度の連続測定を行っている。

チクシー市は同じレナ川の河口のデルタ地帯東端の北緯72度東経129度に位置し、北極海に繋がるラプテフ海に面した港町である。人口は7000人で国防軍の駐屯地および巨大なレーダー基地がある。このチクシー市の中心部から内陸に7km程入った郊外の宇宙物理観測所において、やはり、エアロゾルおよびSO₂、HNO₃ガスの連続測定を行っている。

一方ノリリスク市は、北極海に突き出たタイミール半島の下部、エニセイ川の河口に近い北緯69度東経89度に位置する人口29万人の鉱業都市である。ニッケル、コバルト、銅、白金等の採鉱、選鉱、精錬を行っており、ニッケル、コバルトに関しては全ロシアの生産量の70%、白金にいたっては90%の生産量を誇っている。ただし、その操業に伴って大量に発生する排煙の処理が全く行われていないため、年間200万トンものSO₂が排出されている。ちなみに日本全体のSO₂の年間排出量は88万トンであり、このノリリスクだけで日本全



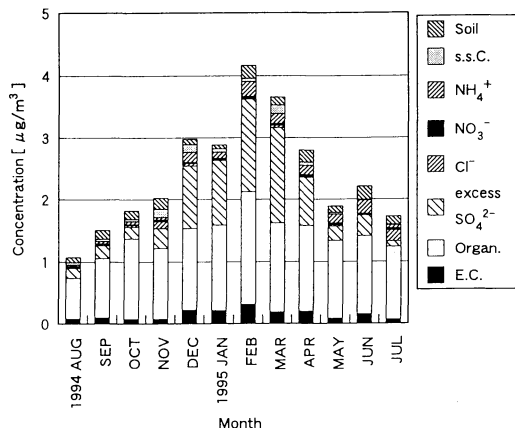
第5図 1995年7月31日～8月4日に測定されたノリリスク市内のSO₂およびNO₂濃度分布 (単位: ppbv)。

体からの2倍以上もの大量のSO₂が排出されている。このノリリスク市内のノリリスク・ニッケル公社調査センターの2階において、1993年から1996年まで大気エアロゾルおよびSO₂、HNO₃ガス濃度の連続測定を行った。

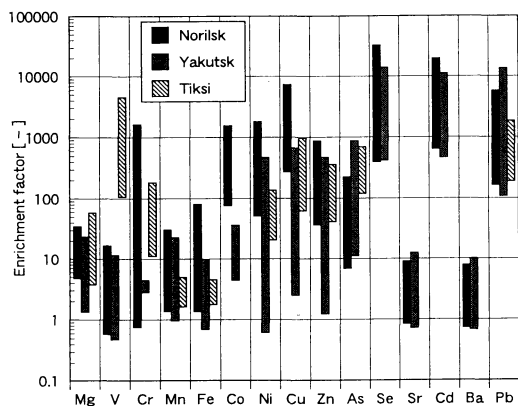
3.2 都市域におけるSO₂濃度

1993年と1995年の夏季に、ハバロフスク、ヤクーツクおよびノリリスク市内において分子拡散サンプラー(試薬を含浸させたろ紙に多孔性で撥水性のフィルターをかぶせ、プラスチック容器に収納したもの)を5～10日間大気中に暴露し、SO₂およびNO₂濃度分布の測定を行った。NO₂濃度はいずれの都市においても数ppbv-10ppbvで札幌の郊外程度の濃度であったが、SO₂濃度については、特にノリリスク市内において、第5図に示すように1995年7月31日～8月4日に数10～260ppbvの非常な高濃度を示した。ちなみに日本の大都市におけるSO₂濃度は10～20ppbv以下である。

また、ノリリスク・ニッケル公社調査センターにおいて半月毎に大気を連続吸引し、大気中のSO₂濃度の測定を行った結果、やはり1995年の7月後半および12

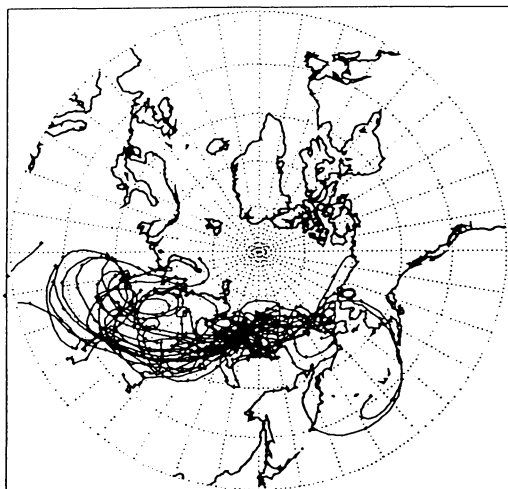


第 6 図 チクシー市郊外において測定された大気エアロゾル組成分析結果.

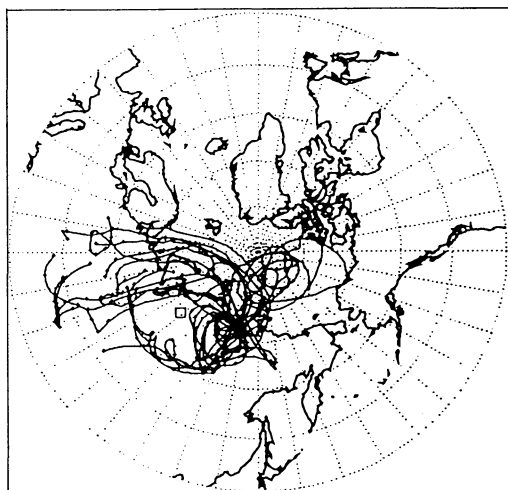


第 7 図 ノリリスク、ヤクーツクおよびチクシーにおける大気エアロゾル中の各金属成分の濃縮係数.

(a)



(b)



第 8 図 2月(a)および12月(b)のチクシーにおける10日間の後方流跡線解析 (Fukazawa et al., 1997).

月前半に半月平均で各々110 ppbv および140 ppbv の非常に高濃度を示した。

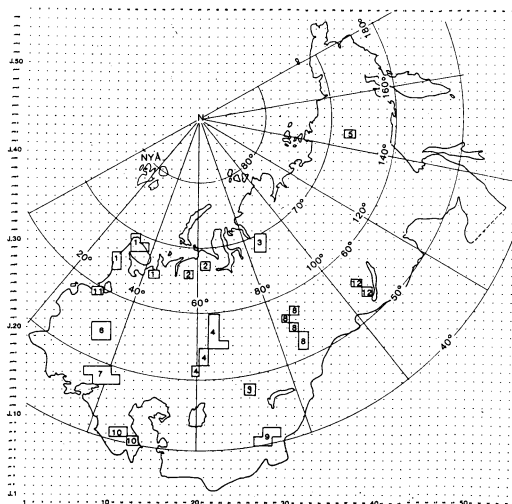
このような大量のSO₂の排出に伴い、ノリリスク周辺においては、樹木の立ち枯れおよび枯死が多く見られた。すなわち、温帯地域において酸性雨の植物被害として知られている状況が北極圏のノリリスクにおいても発現しており、今後の発生源対策が急務である。

3.3 チクシーにおける大気エアロゾルの組成と吸収特性

第 6 図に、チクシーにおいて測定された大気エアロゾルの組成分析結果を示す。非海塩硫酸イオン(excess SO₄²⁻)と有機物(Organ.)の組成割合が多い。この両成分と黒色純炭素(E.C.)成分の濃度が冬～春季に増加しており、arctic haze がチクシーにまで流入してき

ていることが推察される。

この組成分析結果を基に、各成分の複素屈折率および粒径分布を与えて、体積消散係数と体積散乱係数、およびそれらの比である単一散乱アルベドを算出した。大気中に存在する黒色純炭素と硫酸イオンの半分が混合核を形成していると仮定して計算を行った結果、arctic haze の出現している12～4月のチクシーにおける大気エアロゾルの単一散乱アルベドは0.86～0.90であった。



第9図 ロシアにおける主要な大気汚染物質の発生源 (Pacyna *et al.*, 1985). 図中の各番号の地域は次の通り. (1) The Kola Peninsula, (2) The Pechora basin, (3) The Norilsk area, (4) The Urals, (5) The Yakutsk area, (6) The Moscow area, (7) The Donetsk area, (8) The Kuznetsk area, (9) The Fergana area, (10) Caucasus, (11) The Leningrad area and (12) The Baikal area.

3.4 大気エアロゾル成分の濃縮係数

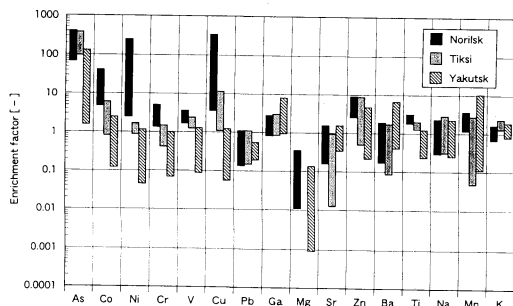
第7図に, ノリリスク, ヤクーツクおよびチクシーにおいて測定された大気エアロゾル中の金属成分の濃縮係数を示す. ここで濃縮係数とは, エアロゾル中のある元素 i の濃度 X_i を, アルミニウムを指標として, アルミニウムの濃度 X_{Al} で割ったもの $[X_i/X_{Al}]_{aer}$ と, 平均的な土壤中に含まれる元素 i の濃度 X_i をアルミニウムの濃度 X_{Al} で割ったもの $[X_i/X_{Al}]_{soil}$ との比

$$EF_i = [X_i/X_{Al}]_{aer} / [X_i/X_{Al}]_{soil}$$

で定義されるもので, 金属成分 i の大気中濃度が, 自然起源に比べてどれだけの高濃度であるかを示すものである. ノリリスクは鉱業都市であるためほとんどの金属成分の濃縮係数が高いが, パナジウムについてはチクシーが最も高く, クロムについてもチクシーの値がヤクーツクに比べて高い. パナジウムは原油や重油の燃焼により特に多量に排出される成分であり, またクロムは製鉄・製鋼等において特に多量に排出される成分であるが, チクシー市内においてはこれらの発生源は見当たらない. すなわち, これらの人為起源成分は, 他の地域からチクシーまで長距離輸送されてきたことが予想される. そこで次に, チクシーおよびノリ

第1表 ロシア北部の主要工業地帯からの各種金属成分の年間排出量 (単位: トン/年).

Region and source	As	Cd	Cr	Mn	Ni	Pb	Sb	Se	V	Zn
1. The Kola Peninsula										
1.1. Copper-nickel production	154	15	2	2	535	412	14.0	16.0		61
1.2. Fossil fuel combustion	2	1	34	30	40	34	2.0	4.0		10
1.3. Steel and iron	3	1	47	37	44	13	2.3	1.5		19
1.4. Phosphate fertilizer	—	10	—	—	21	3	—	2.4		80
1.5. Wood processing	6	2	39	37	5	26	4.8	1.7		10
1.6. Gasoline combustion	—	—	—	—	—	237	—	—		—
Total	165	29	122	106	645	745	23.1	25.6	122	180
2. The Pechora basin										
2.1. Coal mining and combustion	8.5	2.1	60	55	62	27	7	17.5	49	40
2.2. Wood processing	3	1	21	19	11	13	4.8	4.7	17	16
2.3. Gasoline combustion	—	—	—	—	—	—	158	—	—	—
Total	11.5	3.5	81	74	73	198	11.8	22.2	66	56
3. The Norilsk area										
3.1. Copper-nickel production	242	24	3	2.5	900	650	22	24.9		235
3.2. Fossil fuel combustion	1	0.5	8	7.0	11	27	1	3	113	8
3.3. Wood processing	3	1.0	20	18.5	24	13	2.4	4.7	17	19
3.4. Gasoline combustion	—	—	—	—	—	53	—	—	—	—
Total	246	25.5	31	28	935	742	25.4	32.6	130	262
4. The Urals										
4.1. Copper-nickel production	462	70	5	5	585	1220	41.5	47		444
4.2. Fossil fuel combustion	42	33	150	130	790	173	13.6	57	2730	180
4.3. Steel and iron	47	42	1230	998	240	500	38.5	76	267	3300
4.4. Gasoline combustion	—	—	—	—	—	7630	—	—	—	—
Total	551	145	1386	1158	1615	9530	94	180	3000	3920



第10図 ノリリスク, チクシーおよびヤクーツクの周辺土壤中に含まれる各金属成分の濃縮係数.

リスクについて流跡線解析を行った.

3.5 流跡線解析

1994年の ECMWF データを用い, 00UTC および12 UTC を出発時間として, モンゴメリーの流跡関数を用いた等温位面流跡線解析法により, チクシーおよびノリリスクに関する10日間の後方および前方流跡線解析を行った (Fukazawa *et al.*, 1997). 第8図にチクシーについての2月および12月の後方流跡線解析結果を示す. また, 第9図および第1表には, ロシアにおける主要な大気汚染物質の発生源と金属成分の年間排出量を示す (Pacyna *et al.*, 1985). 第8図より, 2月にはウラル工業地帯からシベリア内部を経てチクシーに至る流線が卓越しており, 一方12月にはウラル工業地帯から一旦北極海に運ばれ, その後チクシーに至る流線が卓越している. 第9図および第1表より, 特にパナジウムおよびクロムについてはウラル工業地帯からの発生量が非常に多く, このため, チクシーにおける大気エアロゾル中のパナジウムおよびクロムの濃縮

係数が高くなっているものと思われる。

3.6 大気汚染物質の沈着蓄積効果

東シベリアや、アラスカおよびカナダのツンドラ地帯は、厚さが200~500 mにも及ぶ永久凍土層から成っているが、この永久凍土層は夏(6~8月)にその表面が30~50 cm融けるだけで、9月にはまた凍ってしまう。そのため、ツンドラ土壤に沈着した汚染物質は、温帯地域のように土壤中の溶液(土壤水)によって流出されることはなく、ほとんど大部分の沈着成分は、厚さ50 cm足らずのツンドラ土壤表層に止まり、年々蓄積されていく。

第10図に、ノリリスク、チクシーおよびヤクーツクの周辺土壤中に含まれる金属成分について、ケイ素を指標として求めた濃縮係数を示す。ノリリスクの周辺土壤中の濃縮係数は多くの成分について当然高い値を示しているが、大気エアロゾル中においてヤクーツクに比べてチクシーの方が濃縮係数の高かったバナジウムおよびクロムについて見てみると、やはり土壤中においてもチクシーの方がヤクーツクよりも高い値を示しており、これらの汚染成分がチクシーの土壤表層内に蓄積されている可能性が考えられる。

4. おわりに

Arctic hazeは、春~夏季にかけて、層雲に取り込まれ(rain out)、あるいは降水により(wash out)、大気中から除去される。これまでarctic hazeについては、春季の発生時に、多くの観測および気候影響の評価が行われてきた。しかし、夏季にかけてのarctic hazeの消滅過程に伴う気候および環境への影響に関する調査・研究は、未だ不十分である。このarctic hazeの消滅は、hazeの雲への取り込みによる雲の光学的特性の変化や、沈着による雪氷面の反射率の低下とそれに伴う氷河・氷床の融解促進等を通して、さらなる気候影響を引き起こす。

上述したように、arctic haze中には硫酸イオン、煤成分や、バナジウム、クロム、ヒ素等の重金属が高濃

度で含まれており、さらにPCB、ダイオキシン等の有機塩素化合物も含まれている。これらの有害物質は、沈着し、蓄積されていくことにより、ツンドラ地域の土壤汚染・水域汚染を引き起し、動植物生態系に悪影響を与え、さらには北極圏に暮らす人々の健康に対しても重大な影響を及ぼすことが懸念されている。

今後、このような北極圏における大気汚染物質の長距離輸送・沈着・蓄積過程と、それに伴う環境影響に関する研究も、重要な課題となってくるであろう。

参考文献

- Atmospheric Environment, 1981: Special Issue on Arctic Air Chemistry, **15**, 1345-1516.
- Atmospheric Environment, 1985: Special Issue on Arctic Air Chemistry, **19**, 1987-2208.
- Atmospheric Environment, 1989: Special Issue on Arctic Air Chemistry, **23**, 2345-2638.
- Blanchet, J. P., 1987: On radiative effect of anthropogenic aerosol components in Arctic haze and snow, *Tellus*, **39B**, 293-317.
- Blanchet, J. P., 1989: Toward estimation of climatic effects due to Arctic aerosols, *Atmos. Environ.*, **23**, 2609-2625.
- Fukazawa, T., S. Ohta, N. Murao, S. Yamagata and V. N. Makarov, 1997: Aerosol observations in the Siberian arctic, *Proc. NIPR Symposium on Polar Meteor. and Glaci.*, (11) 150-160.
- Pacyna, J. M., B. Ottar, U. Tomza and W. Maenhaut, 1985: Long-range transport of trace elements to Ny Alesund, Spitsbergen, *Atmos. Environ.*, **19**, 857-865.
- Shaw, G. E. and M. A. K. Khalil, 1989: Arctic Haze, *The Handbook of Environmental Chemistry*, 4 (Part B) Springer-Verlag, 70-111.
- Shaw, G. E., 1995: The arctic haze phenomenon, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **76**, 2403-2413.
- Sturges, W. T., 1991: Pollution of the Arctic Atmosphere, *Environmental Management Series*, Elsevier Science Publishers, pp. 334.