

Atmospheric Circulation and Material Transport in the Arctic Region —the 1997 Autumn Assembly of the Meteorological Society of Japan—

Masato Shiotani

(Corresponding author) Graduate School of Environmental Earth Science
Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan.

(Received 8 June 1998 ; Accepted 10 July 1998)

Contents

1. Yoshio Asuma : Structure of Disturbances and Transport of Water in the Arctic Region.
2. Sachio Ohta : Environmental Pollution of the Arctic Atmosphere.
3. Kouji Yamazaki : Large-Scale Material Transport and Water Circulation in the Troposphere.
4. Hiroshi Kanzawa : Observations of the Arctic Stratosphere by the Satellite Sensor (ILAS).

1042 : 106 (総観規模の降水；極気象)

1. 北極圏の擾乱の構造と水輸送

遊馬 芳雄*

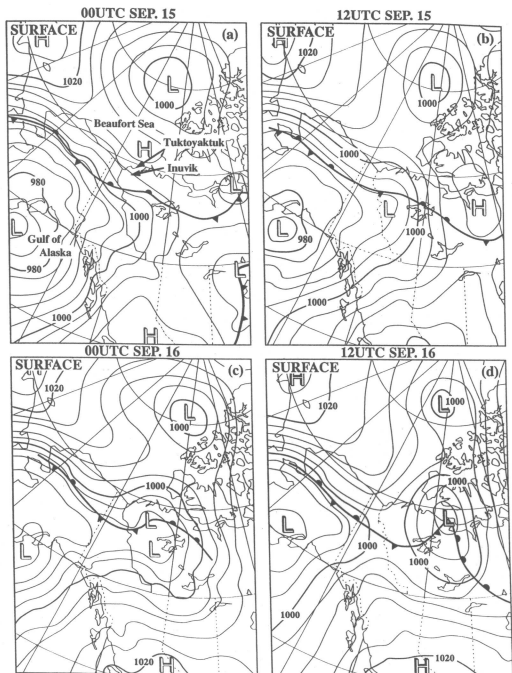
1. はじめに

北極圏の擾乱や水循環・物質循環を考えることは、全地球規模でのエネルギーや水、物質の循環過程を理解することばかりではなく、我々の住む中緯度帯との相互作用を考える上でも重要な課題である。北極圏のエネルギー収支の解析は Oort (1974) や Nakamura and Oort (1988), Overland *et al.* (1996) 等によって行われている。北緯70°以北の北極圏全体で放射冷却で奪われるエネルギーの約2/3が中緯度からの熱輸送

により補われ、約1/3が海表面や地表面に潜熱として蓄積される。そうして、中緯度からの熱輸送には、定期的あるいは過渡的な渦輸送が大きな役割を果たし、大西洋北極域ではエネルギーフラックスの通り道と擾乱の通り道が一致していることが述べられている。しかしながら、極域の擾乱のメソスケール、総観規模的研究は極域における観測設備や通常観測網の欠如もあって、中・低緯度に較べるとほとんど行われていないのが現状である。

本講演では文部省国際学術研究「中緯度の気象・気候に与える極気団の形成と活動に関する研究」(研究代表者：木村龍治東京大学教授)の一環として、1994年

* 北海道大学大学院理学研究科。

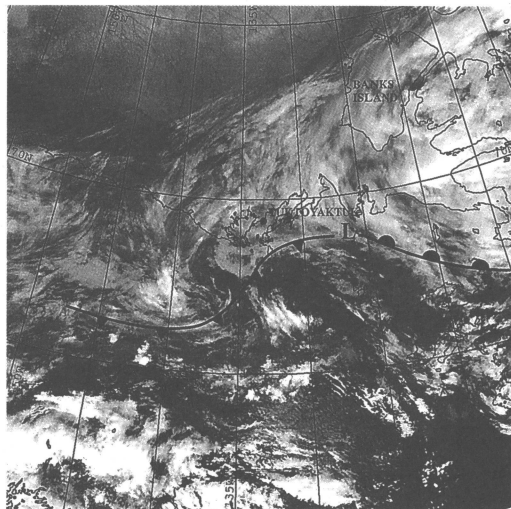


第1図 “Pacific Origin”タイプの擾乱の地上解析図。

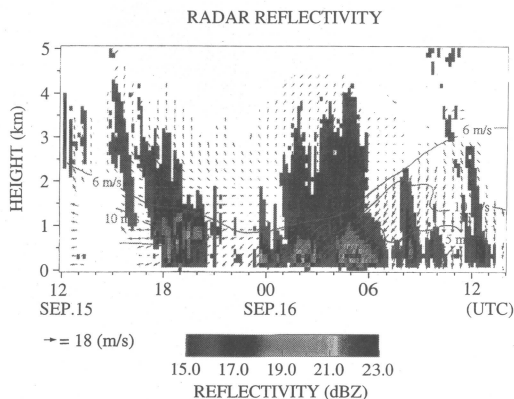
秋期カナダ北極圏で行われた BASE (Beaufort and Arctic Storms Experiment) でのドップラーレーダー観測結果と、同じ領域で1995~1996年冬期に行われた「冬期の北極域における水蒸気、エアロゾルの輸送過程と多結晶雪結晶に関する研究 (WANTS (Water, Aerosol, Nuclei Transportation and Snow) Arctic Experiments)」(研究代表者：菊地勝弘北海道大学教授)での鉛直ドップラーレーダーの観測結果を中心に北極圏の擾乱の構造と水輸送について紹介する。

2. BASE (Beaufort and Arctic Storms Experiment)

1994年秋期カナダ西部北極圏 Inuvik, Tuktoyaktuk 周辺での擾乱の構造や降水のメカニズム、水循環を調べる目的で BASE が行われた。BASE 研究観測はカナダの大気気象局 (Atmospheric Environment Service) や大学が中心となって計画されたカナダ北極圏初の国際プロジェクトで、日本以外にもアメリカやロシアからの研究者の参加があった。我々は北海道大学大学院理学研究科の偏波ドップラーレーダーを北極海の Beaufort 海に面する Tuktoyaktuk の海岸に設置し観測を行った。この領域は Beaufort 海が完全に海氷



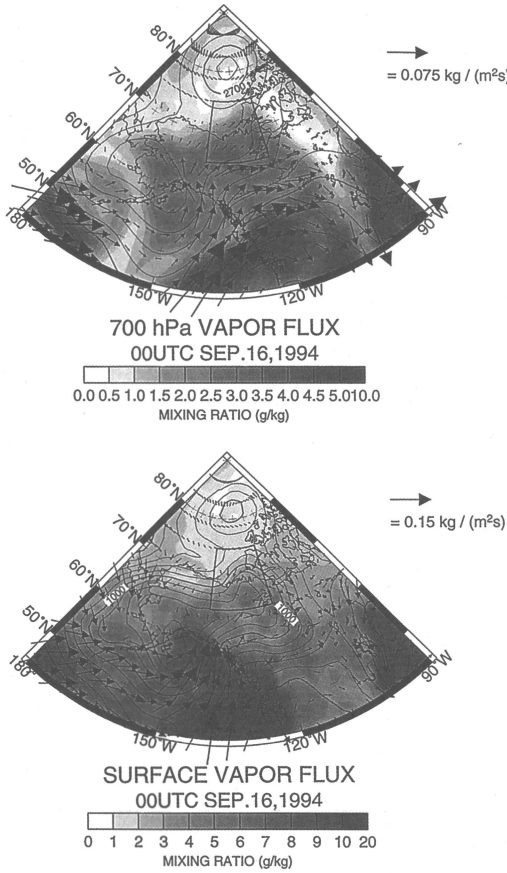
第2図 NOAA AVHRR 赤外画像。9月16日00 UTC の前線と Lee Cyclogenesis による低圧部 (L) の位置を重ねて表示してある。



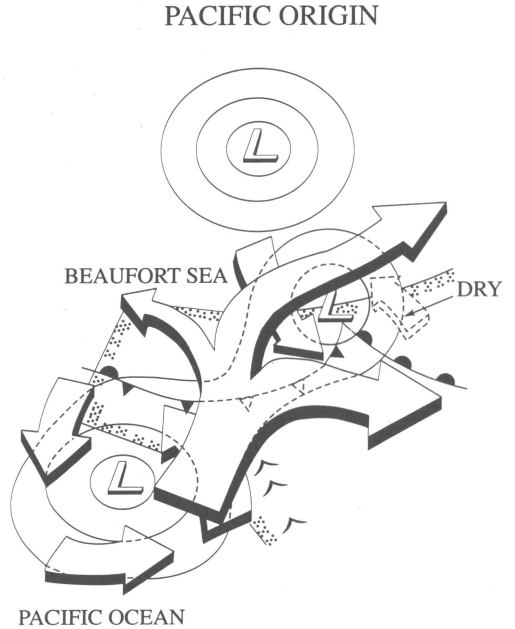
第3図 レーダー反射因子と水平風の時間高度断面図。

で覆われてしまう直前の晩秋から初冬にかけて数多くの擾乱が発達し、通過することが知られている (Hudak *et al.*, 1995)。これらの擾乱の種類はだまかに “Pacific Origin” タイプの擾乱と “Storm Track” タイプの擾乱の2種類に分けられ、全擾乱の80%以上を占めていることから、この擾乱の構造と発達過程、水輸送について紹介する。

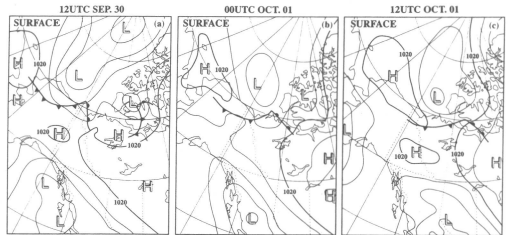
第1図に “Pacific Origin” タイプの擾乱の地上解析図を示した。アラスカ湾と北部 Beaufort 海に強い低気圧が定常的に存在していて北極前線が両者の間に解析されている。北アメリカ大陸西海岸にはロッキー山脈に続く山岳地帯があって、アラスカ湾上の低気圧は



第4図 客観解析データ(GANAL)による, 地上と700 hPa面の気圧(コンター), 水蒸気混合比(濃淡), 水蒸気フラックス(矢印).



第5図 “Pacific Origin”タイプの擾乱の概念図.

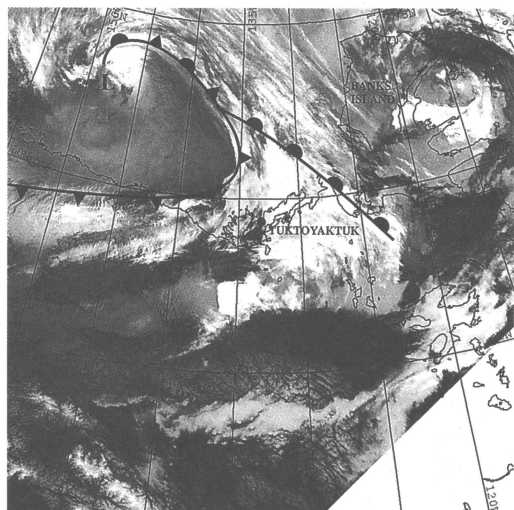


第6図 “Storm Track”タイプの擾乱の地上天気図.

ブロッキングされている。Lee Cyclogenesis が起こり、2 次的な低圧部がアラスカ湾上の低気圧から発生している (9月15日00 UTC)。この低圧部は東進し、北極前線上で急激に発達した (9月16日00 UTC)。この2 次的に発生した低圧部の東進に伴ってもたらされた擾乱が “Pacific Origin” タイプである。この2 次的な低圧部は非常に浅い構造をしていて500 hPa の解析図には見られない。9月16日0449 UTC の NOAA AVHRR 赤外画像を第2図に示した。海水と open water 上に存在する低層雲が海岸線に沿って北極前線後面に進入し、上層には幅の広いバンド状の雲が見られる。

この期間中に観測された仰角10°の PPI 画像から求めたレーダー反射因子と水平風の時間高度断面図を第3図に示した。水平風は VAD 法 (Velocity Azimuth

Display Method) より求めた。降水エコーはまず高度2~3 km 付近から出現し、はじめの内は地上に達していないが、後半地上に達するようになった。図中の高度1~2 km の風速 6 ms^{-1} の等値線付近を境にして、はっきりとした2層構造が見られる。この境界より上層では弱い南風が吹き降水強度が弱い。下層では風が強く初めは東風で内陸から風が吹き降水が地上に達していないが、風向が北よりの Beaufort 海から風が吹き始めると降水が地上にも到達している。この下層の風は Lee Cyclogenesis による2 次的な低圧部によって駆動され、この低圧部が東進するにしたがってレーダーサイトの Tuktoyaktuk 下層に結氷前の Beaufort 海からの湿った空気が進入し、上層で作られた弱い降水が地上にまで達していた。この様子を気象庁の客観

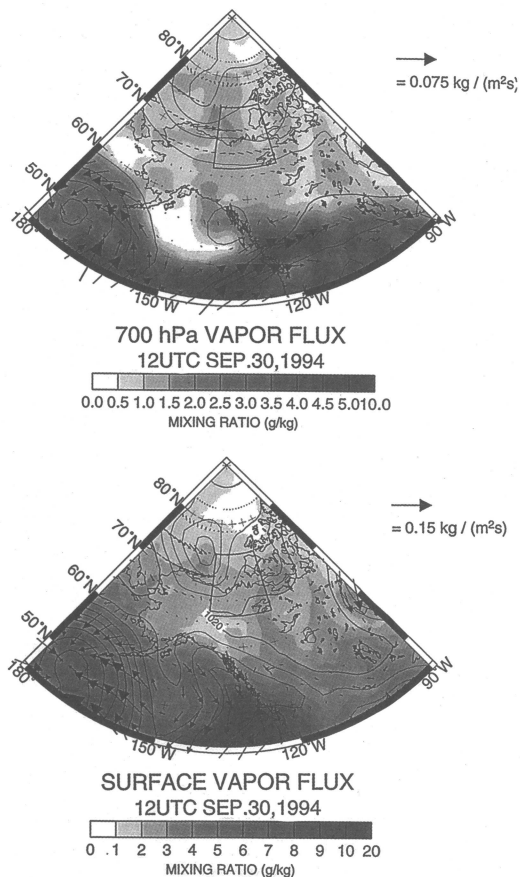


第7図 “NOAA AVHRR 赤外面像。前線と低気圧 (L) の位置を重ねて表示してある。

解析データ (GANAL) で調べたのが第4図である。1996年9月16日00 UTCの地表と700 hPa面の気圧、水蒸気混合比と水蒸気フラックスの図である。700 hPaの図から太平洋上空の水蒸気がロッキー山脈を越えて北極圏に進入している。地上の図より結氷前の Beaufort 海から水蒸気が進入している様子が見える。これらの観測解析結果から得られる “Pacific Origin” タイプの擾乱の概念図を示したのが第5図である。

次に “Storm Track” タイプの擾乱時の地上天気図を第6図に示した。9月30日から10月1日にかけて Beaufort 海の Ice Edge に沿って低気圧が東進した。この低気圧にははっきりとした温暖前線と寒冷前線が解析されている。9月30日1901 UTCの NOAA AVHRR 赤外面像を第7図に示した。寒冷前線に伴う対流性の比較的低い雲と温暖前線に伴う比較的高い層状の雲の広がりが見られ、この層状雲は閉塞前線の前面を通過して低気圧の中心に巻き込んでいる。また、寒冷前線と閉塞前線の後縁がはっきりとしていて、後方には海面付近の低層雲だけが見られる。

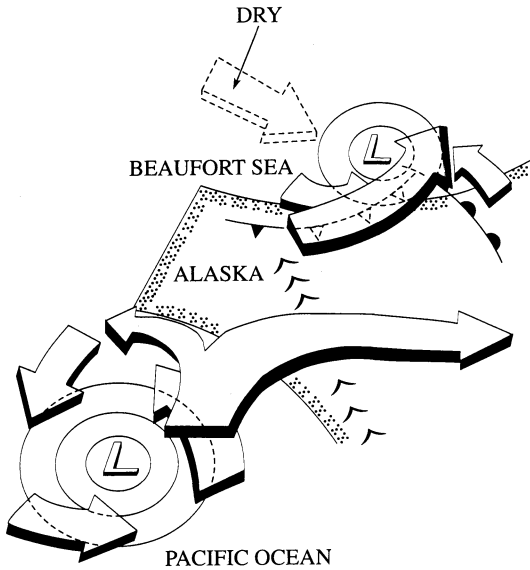
Tuktoyaktuk でのレーダー観測によると断続的に温暖前線に伴った層状性の降水エコーと寒冷前線に伴った対流性の降水エコーが観測された。レーダーサイトでの高層データから寒冷前線通過後、対流圏上部からの気塊の沈み込みによる乾燥空気の使用が確認された。第8図に気象庁による客観解析データ



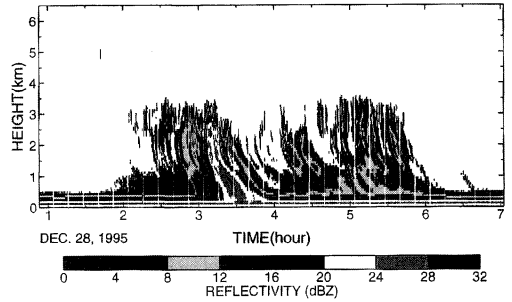
第8図 客観解析データ (GANAL) による、地上と700 hPa面の気圧 (コンター)、水蒸気混合比 (濃淡)、水蒸気フラックス (矢印)。

(GANAL) から1994年9月30日1200 UTCの地表及び700 hPa面の気圧、水蒸気混合比及び水蒸気フラックスの分布図を示した。寒冷前線に伴う水蒸気量の増加と温暖前線に伴う水蒸気の増加が見られ、寒冷前線後面では乾燥空気の上層からの進入が見られる。これらの構造は、Browning and Monk (1982), Browning (1990) 等で報告されているイギリス周辺での中緯度の低気圧の構造によく似ていて、それぞれ、 “Warm Conveyor Belt”, “Cold Conveyor Belt”, “Dry Intrusion” に対応している。寒冷前線前面の “Warm Conveyor Belt” は Bering 海付近からアラスカ北部上空を通過して水蒸気を東方に輸送し、下層には結氷前の Beaufort 海からの水蒸気の供給が見られる。この様子を模式的に示したのが第9図である。

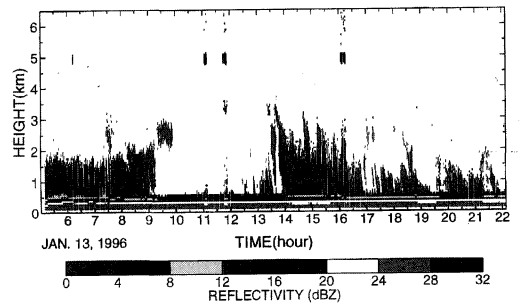
STORM TRACK



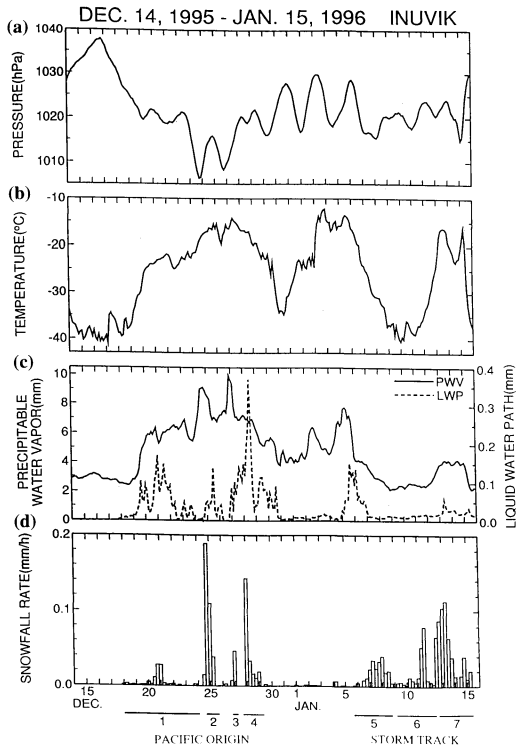
第9図 “Storm Track”タイプの擾乱の概念図。



第11図 “Pacific Origin”タイプの鉛直レーダーの時間高度断面図。



第12図 “Storm Track”タイプの鉛直レーダーの時間高度断面図。

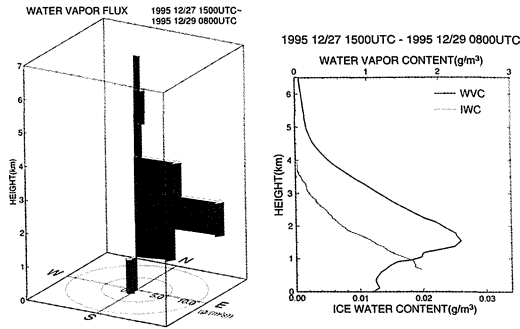


第10図 WANTS Arctic Experiments 期間中の、(a) 地上気圧、(b) 気温、(c) 可降水量 (実線) と積算雲水量 (破線)、(d) 降水強度の時系列。

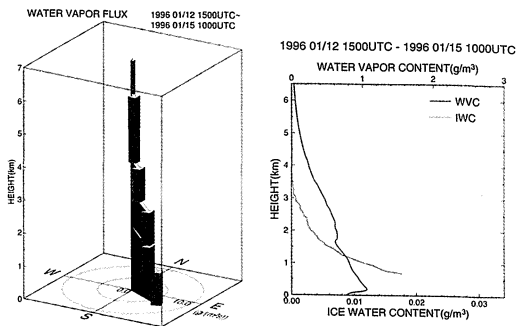
3. WANTS (Water, Aerosol, Nuclei Transportation and Snow) Arctic Experiments

北極圏における水蒸気・エアロゾルの輸送過程と雪結晶に関する研究の一環として、1995年12月14日から1996年1月15日にかけて Inuvik (第1図 a を参照) に北海道大学大学院理学研究科の鉛直ドップラーレーダーを設置し、降水粒子の詳細な観測を行った。対象期間は北極圏の冬期間であるが対象領域は BASE 領域とほぼ同じである。冬期間においても “Pacific Origin” タイプの擾乱と “Storm Track” タイプの擾乱が主に観測され、地上で測定されたマイクロ波放射計による可降水量や積算雲水量、降水粒子にはっきりとした違いが見られた。

第10図に WANTS Arctic Experiments 期間中の地上気圧、気温、マイクロ波放射計からの可降水量、積算雲水量、降水強度を示した。降水量を基に降水イベントをグラフの下に示したが、12月18日から30日にかけて “Pacific Origin” タイプの擾乱、1月5日から15日にかけては “Storm Track” タイプの擾乱が観測された。“Pacific Origin” タイプの擾乱では気温が高く可降水量、積算雲水量ともに多く、降水は短時間で終



第13図 “Pacific Origin”タイプの降水イベントを通じての水蒸気フラックス(左図), 水蒸気量(右図太線), 氷水量(右図細線)の平均値の高度分布。



第14図 “Storm Track”タイプの降水イベントを通じての水蒸気フラックス(左図), 水蒸気量(右図太線), 氷水量(右図細線)の平均値の高度分布。

Track”タイプに分けてそれぞれ第13, 14図に示した。“Pacific Origin”タイプの擾乱では, ロッキー山脈を越えた太平洋起源の水蒸気が高度2~3 kmに進入し, 水蒸気混合比は高度1~2 kmで最大となっていた。この水蒸気は0°C以下の気温であるが, 対流によって雲水が作られ霰や雲粒付雪結晶となって地上に落下する。“Storm Track”タイプの擾乱では水蒸気は Beaufort 海方向から輸送され水蒸気フラックスは下層で大きくなっている。気柱の水蒸気量は気温が低いので値は小さいが下層で大きく低温で成長する交差角板や砲弾集合が昇華凝結成長し, 雲粒はほとんどついていないことが観測された。

4. まとめ

北極圏での擾乱の構造と水輸送について秋期と冬期に行われたカナダ北極圏での観測を基に紹介した。したがって, 北極圏の水循環を考える上で水蒸気源となる海洋の open water の分布が重要となってくる。北極圏に位置しながら冬期間でも海面が広く広がっているノルウェー海周辺領域は北極圏の水循環を考える上で非常に興味深い。国立極地研究所ではスピッツベルゲン島ニーオルセンに設置した鉛直レーダーで降水や擾乱を年間を通してモニターしている (Wada *et al.*, 1996; 荻谷ほか, 1997)。また, 今年度の冬期間には WANTS Arctic Experiments の一環としてノルウェー海を挟んでスウェーデンの北極圏 Kiruna に鉛直ドップラーレーダーを設置する計画である。今後, 北極圏の擾乱の構造や水輸送過程や循環がますます明らかになるものと期待される。

参考文献

- Browning, K. A., 1990: Organization of clouds and precipitation in extratropical cyclones. *Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume*. C. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 129-153.
- Browning, K. A. and G. A. Monk, 1982: A simple model for the synoptic analysis of cold fronts, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 435-452.
- Hudak, D. R., R. E. Stewart, G. W. K. Moore and E. T. Hudson, 1995: Synoptic conditions of storms in the Southern Beaufort Sea. -Expectations for BASE-, *Proc. 4th Conf. Polar Meteor. Oceanogr.*, 234-237.
- Nakamura, N. and A. H. Oort, 1988: Atmospheric heat budgets of the polar regions, *J. Geophys. Res.*,

わる傾向にあるが最大降水強度が大きい。“Storm Track”タイプの擾乱では気温が低く, 可降水量も少なく, 積算雲水量はほとんど観測されない。降水時間は長い最大降水強度は小さいのが特徴である。“Pacific Origin”タイプの擾乱の場合と “Storm Track”タイプの擾乱の場合の鉛直ドップラーレーダーのレーダーエコー時間高度断面図を第11, 12図に示した。“Pacific Origin”タイプの場合は対流性のレーダーエコーで濃密雲粒付樹枝状六花や立体樹枝, 霰等が観測された。一方, “Storm Track”タイプの擾乱では層状性のレーダーエコーで交差角板, 砲弾集合等の比較的低温で成長する雪結晶が観測され, ほとんど雲粒はついていなかった。

ラジオゾンデとレーダーから1つの降水イベントを通じての水蒸気フラックス, 水蒸気量, 氷水量の高度分布の平均値を “Pacific Origin”タイプと “Storm

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*

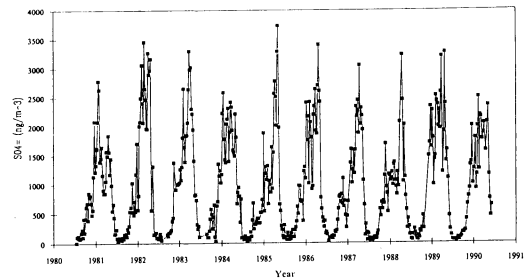
1. はじめに

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