

## 環北極気候比較におけるスバルバルの気候特性

山内 恭\*

Climate characteristics of Svalbard based on  
circumpolar climate comparison

Takashi Yamanouchi\*

**Abstract:** The climate characteristics of Svalbard are reviewed, based on a circum-polar climate comparison. From the Data Report by the Norwegian Meteorological Institute, climate characteristics of Ny-Ålesund, Svalbard, the Japanese where National Institute of Polar Research has an established observation station, are shown. Its climate is characterized by a smaller annual range of air temperature, large annual precipitation, and as maritime Arctic. From the long range variation of temperature since 1910s, a temperature rise in 1910s and 1920s is clear; however, that in the last 30 years has been only minor. In order to explain these characteristics, the distribution of climate parameters is examined. The Svalbard region is characterized by entrance and exit of atmosphere and ocean fluxes, and as the center of the stratospheric polar vortex. Also, recent climate changes in the Arctic including the air temperature rise and Arctic Oscillation (AO) are introduced.

**要旨:** 北極海を巡る各地点での気象・気候条件を比較しつつ、スバルバルの気候特性を明かにすべくレビューを行った。ノルウエー気象研究所によるデータ集から、国立極地研究所も観測拠点を設けているニーオルスン国際共同観測基地の気候条件を示した。夏冬の気温の年較差が小さく、年間降水量が多く、海洋の影響を強く受けていることが特徴である。また、1910年代以来の長年の気温の変化から、1910年代から1920年代にかけての昇温は明瞭であるが、最近30年間の気温上昇はわずかである。これらの特徴を明らかにするために、北極全域における気候要素の分布を示した。スバルバル地域は、大気、海洋いずれにおいても北極海への出入口になっていると共に、成層圏の極渦の中心近くに位置している。さらに、1990年代に入って顕著になってきた北極域の気候変化について、気温上昇から北極振動 (AO) の議論まで紹介した。

## 1. はじめに

1990年代以降、北極域の気候の変動が顕著になってきたのではないかと、“Changing the Arctic”と言われ、大きな問題として取り上げられるようになってきた (Morison *et al.*, 1998a)。それまでも、気候の数値モデルによると、二酸化炭素濃度増大による地球温暖化で北

---

\*国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

極域は気温上昇が増幅して現れると言われてきた (Randall *et al.*, 1998)。ここにきて、現実にもモデル予測と同じような現象が現れてきたのではないかということである。北極域における気候研究の重要性の所以である。一方、同じく 1980 年代末から 1990 年代に向け、冷戦構造の崩壊に伴い自由な北極研究が始められようとしていた。国際北極科学委員会 (IASC) が創立されたのもこの頃であり、そのイニシアティブの下、様々な国際協同研究が始められた (Rogne, 1996)。ところが、冷戦構造の崩壊はソ連/ロシア経済の悪化と共に、北極研究の低下を伴い、それまで長く高い水準を保っていたソ連北極観測体制の終焉をもたらす結果にもなってしまった。しかし、秘密だったデータが公開されたこととも合わせ、長年蓄積された貴重なデータの離散を恐れ、データセットを作成・公開する国際的な共同作業が進展し、多くのデータが入手可能となったことはかえって幸いであった。これらのデータを使った研究が数多くなされている。

このような背景の下、国立極地研究所では、北極圏環境研究センターが設立され、この 10 年間で、スバルバル、ニーオルスンに観測拠点を置き、北極域の気候・環境研究を続けてきた (Yamanouchi *et al.*, 1996; Wada *et al.*, 1996; Morimoto *et al.*, 2001)。最近では、スバルバルを核にした航空機や船舶を利用した大掛かりな広域の観測も行われるようになってきている (Aoki *et al.*, 1996a; Shiobara *et al.*, 1999; Yamanouchi and Herber, 2001)。スバルバルは、北極域の中でも歴史的に特異な場所である。第 1 次世界大戦後に結ばれたスバルバル条約により、この地はノルウェーが管理はするものの領土権は持たず、条約加盟国 (戦勝国) が自由に入出入りし、経済的活動を行うことができるとされた。南極と違い、北極の陸地はすべてどこかの国の領土である中、唯一の例外として貴重な場所となっている。このスバルバルの中で、かつて炭鉱であったニーオルスンという村落をノルウェーは国際的な北極観測研究の場所として位置づけたのである。国立極地研究所もノルウェー極地研究所 (NP) と協定を結び、この地で観測活動を始めた (岩坂, 2000)。

それでは、このスバルバル、ニーオルスンはどのような自然条件にある場所なのであろうか。ここではノルウェー気象研究所 (DNMI) によりまとめられたデータ集 (Føland *et al.*, 1997) を中心に、気象・気候条件のレビューを試みた。DNMI では 1990 年にデータ集が出版されており (Hanssen-Bauer *et al.*, 1990)、我が国でも新しく観測に参加することで大いに引用されたが、ようやく近年のデータを追加して待望の最新のデータ集が出版されたものである。スバルバルは同じ北極と言っても、大西洋からの熱や水蒸気の影響を強く受けている海洋性北極の代表点と考えられる。それでは、他の北極域はどのような気候条件にあるのだろうか、北極各地域を代表する地点の比較対照を行った (図 1)。グリーンランドからの寒気の影響か、冬期低い気温で特徴付けられるカナダ多島海のアラート、シベリア沿岸のラプテフ海にあるコテルニー、そしてアラスカ北端のバローについて、気象・気候を調べた。今後、新しい北極観測を展開していこうという時、参考になることを期待すると共に、近年の北極気候・環境変動を

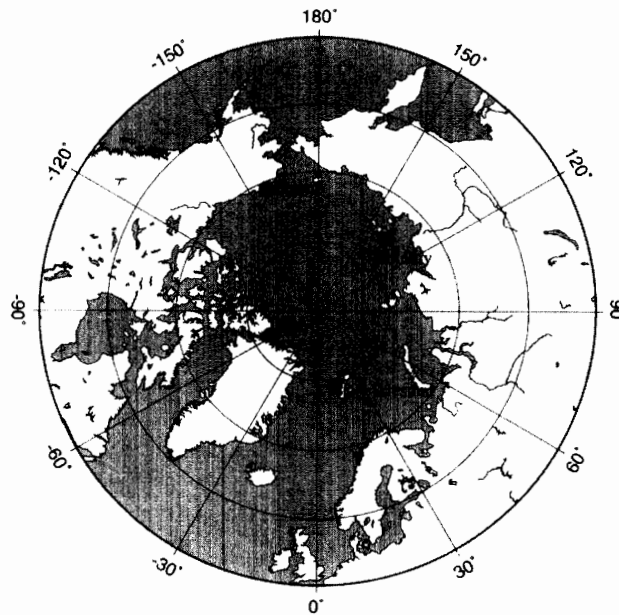


図1 北極域の代表的観測地点

Fig. 1. Observation stations in the Arctic.

研究する上で、基本的な気候状態、分布を知っておくことが重要と考えて本レビューをまとめた。近年、国際的にも新しいプロジェクト観測・研究が盛んに行われているが (ACSYS; FIRE; SHEBA 等), まだ解析途上であり, ここでは基本的な事項の紹介にとどめた。その他, 「Changing the Arctic」として大いに議論が進んでいる最近の北極域の気候変化についても概観した。

## 2. ステーション・データから見た各拠点の気候

### 2.1. スバルバル諸島ニーオルスン (78°55'N, 11°56'E)

ノルウェー北極と言われる領域にはスバルバル諸島 (スピッツベルゲン, ビヨールナヤ (ベアーアイランド), ホッペンからなる) とヤンメイヤンがある (図2)。この地域の気象観測は探検隊によって始められたが, これは1年程度しか続いていない。定常的な気象観測は1911年, 西スピッツベルゲンのグリーン・ハーバで始まり, その後次第に数を増していった (図2)。現在, スピッツベルゲンに5カ所 (Hornsund, Sveagruva, Barentsburg, スバルバル空港, ニーオルスン) と他の小さい島の3カ所 (Bjørnøya, Hopen, Jan Mayen) の観測所で観測が継続されている。この内, Hornsund はポーランド, Barentsburg はロシアによっている。ここでは, 国際共同観測基地として整備されたニーオルスンの気候を中心に示す。この地点では, わが国の極地研究所も観測拠点を設け, 1992年以來ノルウェー極地研究所の支援の下, 観測を継続してきた。地上気象観測は極地研究所も実施してきているが (Aoki *et al.*, 1996b, c; Morimoto *et al.*, 2000), ここではノルウェー気象研究所 (DNMI) によりまとめられたデータ集 (Føland



図2 スバルバル諸島における気象観測地点

Fig. 2. Location of meteorological stations in Svalbard Islands (Føland et al., 1997).

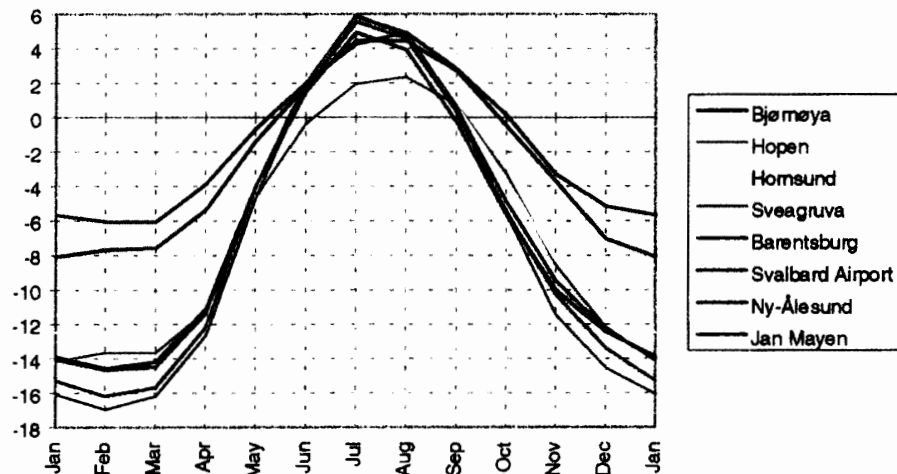


図3 スバルバルにおける気温年変化

Fig. 3. Standard normals (1961-1990) of air temperature (Føland et al., 1997).

et al., 1997) から引用する。DNMI では 1990 年にデータ集が出版されており、我が国でも新しく観測に参加することで大いに引用された。上記の通り、1911 年以來の長年の記録があり、そのトレンドを示したものは貴重な結果である。

表1 スバルバル, ニーオルスンの気候表 (1975-1996)  
 Table 1. Monthly summaries of surface synoptic data at Ny-Ålesund, Svalbard, 1975-1996 (Føland et al., 1997).

| Item      | Jan.   | Feb.   | Mar.   | Apr.   | May    | Jun.   | Jul.   | Aug.   | Sep.   | Oct.   | Nov.   | Dec.   | Year   |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Psl (hPa) | 1004.5 | 1006.5 | 1008.2 | 1013.2 | 1016.4 | 1012.5 | 1011.0 | 1011.1 | 1008.7 | 1008.7 | 1005.6 | 1004.6 | 1009.2 |
| T (°C)*   | -13.9  | -14.6  | -14.2  | -11.1  | -4.0   | 1.5    | 4.9    | 3.9    | -0.3   | -5.7   | -10.0  | -12.5  | -6.3   |
| Std (°C)* | 4.5    | 3.4    | 3.7    | 2.8    | 1.3    | 0.9    | 0.8    | 0.6    | 1.7    | 2.5    | 3.2    | 4.1    | 1.4    |
| Txx (°C)  | 5.1    | 4.7    | 5.0    | 5.5    | 8.0    | 11.2   | 17.0   | 13.6   | 12.3   | 7.5    | 7.4    | 5.8    | 17.0   |
| Tmm (°C)  | -36.6  | -41.1  | -42.2  | -34.0  | -19.1  | -8.5   | -0.5   | -5.5   | -15.1  | -20.6  | -27.2  | -34.3  | -42.2  |
| N (1/8)   | 4.1    | 4.8    | 4.9    | 4.6    | 5.2    | 6.2    | 6.3    | 6.4    | 6.1    | 5.7    | 4.7    | 4.0    | 52     |
| Rain day  | 0      | 0.1    | 0.2    | 0.2    | 0.5    | 3.6    | 9.5    | 11.1   | 4.8    | 1.0    | 0.4    | 0.3    | 31.7   |
| Snow day  | 10.3   | 11.3   | 10.8   | 9.6    | 6.9    | 1.8    | 0.0    | 0.9    | 5.5    | 10.5   | 9.5    | 9.0    | 86.1   |
| Prec (mm) | 32.2   | 42.8   | 50.0   | 26.3   | 18.3   | 17.2   | 24.1   | 41.5   | 47.1   | 29.0   | 38.4   | 36.0   | 402.9  |

Psl 海面気圧, T 平均気温, Std 同標準偏差, Txx 最高気温極地, Tmm 最低気温極地, N 雲量, Rain day 降雨日数, Snow day 降雪日数, Prec 降水量. 但し, \*1961-1990年の平均

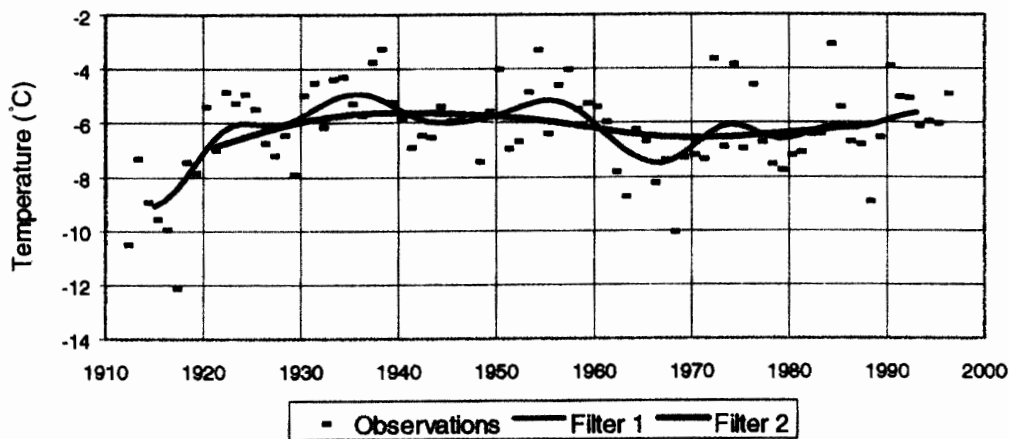


図4 スバルバルにおける気温の年々変動, 年平均およびローパスフィルター (フィルター1: 3年, 2: 9年; Føland et al. (1997) 参照)

Fig. 4. Interannual temperature change at Svalbard airport, annual average 1912-1996 and low pass filters 1 (3 years) and 2 (9 years) applied to annual averages (Føland et al., 1997).

まず年間の気温の推移が図3である。1961-1990年の30年間の平均である(表1)。2月が最低で $-14.6^{\circ}\text{C}$ 、7月が最高で $4.9^{\circ}\text{C}$ 、年平均 $-6.3^{\circ}\text{C}$ となっており、夏冬の年較差が $20^{\circ}\text{C}$ 内と小さく、冬の平均気温が高いことが特徴である。また変動幅は冬に大きく、夏に小さい。冬は気圧パターン次第で、北極海からの冷気に覆われる時と、大西洋からの暖気に覆われるときで大きく異なる (Hisdal, 1975)。一方、最も長期の記録があるスバルバル空港で年々の変動を見たものが図4である。年々の変化は特に冬に強調されているが、1910年代から1920年代にかけて著しい上昇の傾向にあり、1930年代を最高にしてその後下降、再び1970年代半ばより上昇に転じるが、その上昇はわずかである。この100年の気温変動で言われている (Stott et al., 2000)、1920年代の自然変動による上昇は顕著に見られるが、人為的影響によると思われる最近

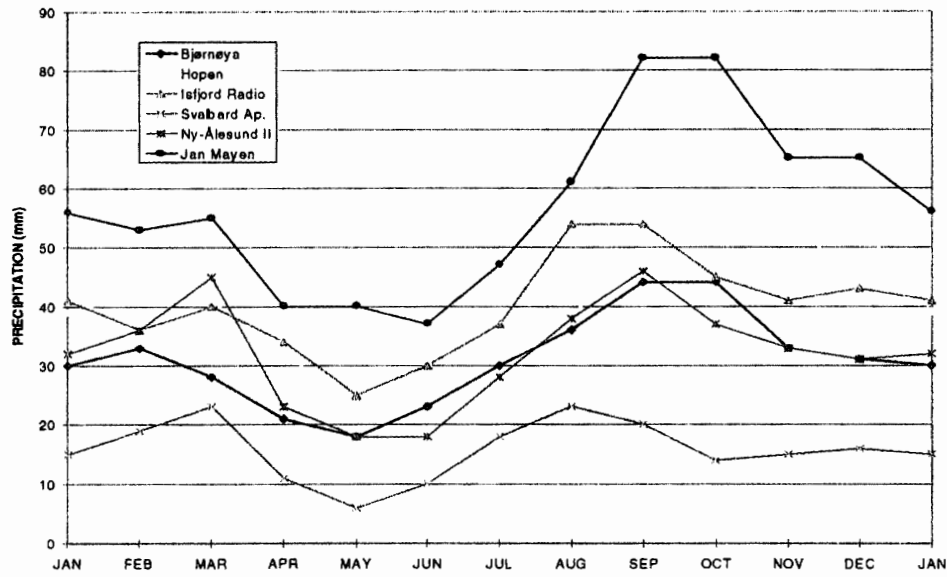


図5 スバルバルにおける降水量の年変化

Fig. 5. Standard normals (1961-1990) of monthly precipitation (Føland et al., 1997).

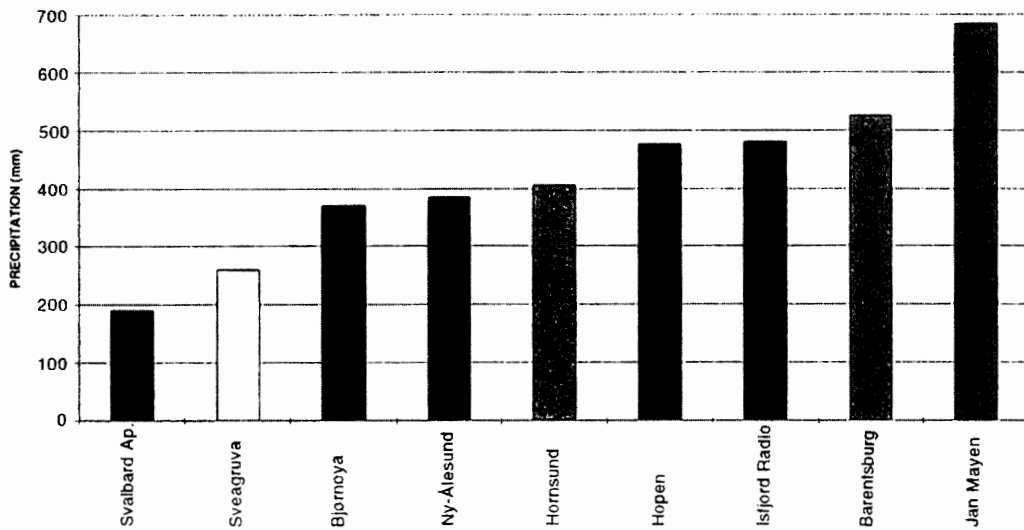


図6 スバルバルにおける年間降水量の地域比較

Fig. 6. Comparison of standard normals (1961-1990) of annual precipitation at stations in Svalbard (Føland et al., 1997).

30年間の気温上昇はほとんど見られず、北極域の他の地域とは異なっていると考えられる。4章であらためて議論される。

降水量の推移を図5に示した。3月と9月に極大があり45 mm程度、4-6月が20 mm程度と少ない。この地域の他の観測点でも、季節変化は類似であるものの、量的には違いが大きく、年間降水量は図6のように200 mm以下で最小のスバルバル空港と35 kmの距離にあるバレンツブルグでも500 mm近くと3倍近い開きがある。低気圧活動の寄与の違い、地形の影響

によると考えられる。

## 2.2. アラート (82°27'N, 62°31'N)

カナダ多島海の北端、エルズミヤー島にあり、グリーンランドに 60 km と近接する 82°N に位置する。カナダ軍の基地としてダンベル湾からアラート入り江の西側の尾根に広がっている。基地の南端、尾根の下に気象観測所は存在するため、風向風速はこの尾根の影響を受けている。基地主要部は 100 から 200 人の軍人と民間人からなる。一方、モニタリング観測所 (MSC/EC) は基地主要部から 6 km ほど南南西の台地の上であり、この台地は南東端には標高 2000 m を越えるアガシー氷帽につながるハザン高原の北端をなしている。1951 年から 1995 年の平均の気温の年変化を図 7 に示したが、北極海に面した各陸上沿岸基地の中では、冬の気温が最も低く  $-35^{\circ}\text{C}$  近くまで下がり、夏はわずかなプラスの気温と、夏冬の温度差が大きくなっている。降水量は、11 月から 4 月は 10 mm 以下、7-9 月が多く 20 mm 以上となっている (Atmospheric Environment Service, 1999)。

アラートの 950 hPa 高度へ到達する空気塊の流れてくる方向、出発点を統計的に求めた結果

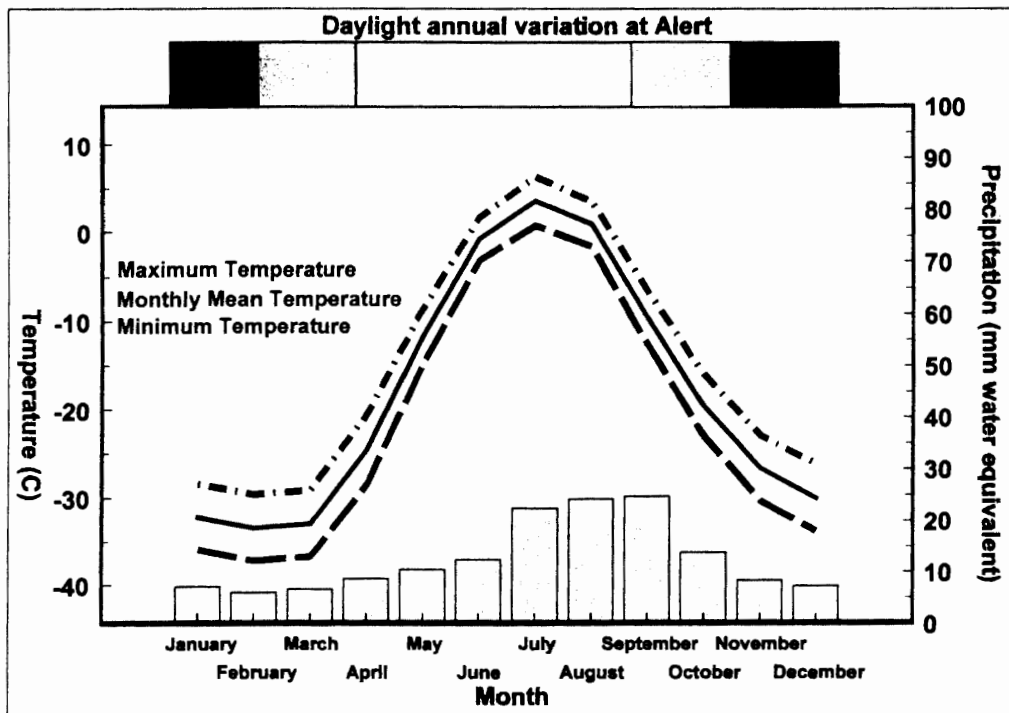


図 7 アラートにおける月平均気温、平均最低気温、平均最高気温、平均降水量と昼の長さ (暗夜, 黒; 薄明, 灰色; 白夜, 白)

Fig. 7. Monthly mean temperature, monthly mean minimum and maximum temperature, monthly mean precipitation in water equivalent, and variation in daylight over a 1-year cycle. Alert, 1951-1995. The top bar shows the periods of total darkness (black), twilight (gray) and 24-hour daylight (white) (Atmospheric Environment Service, 1999).

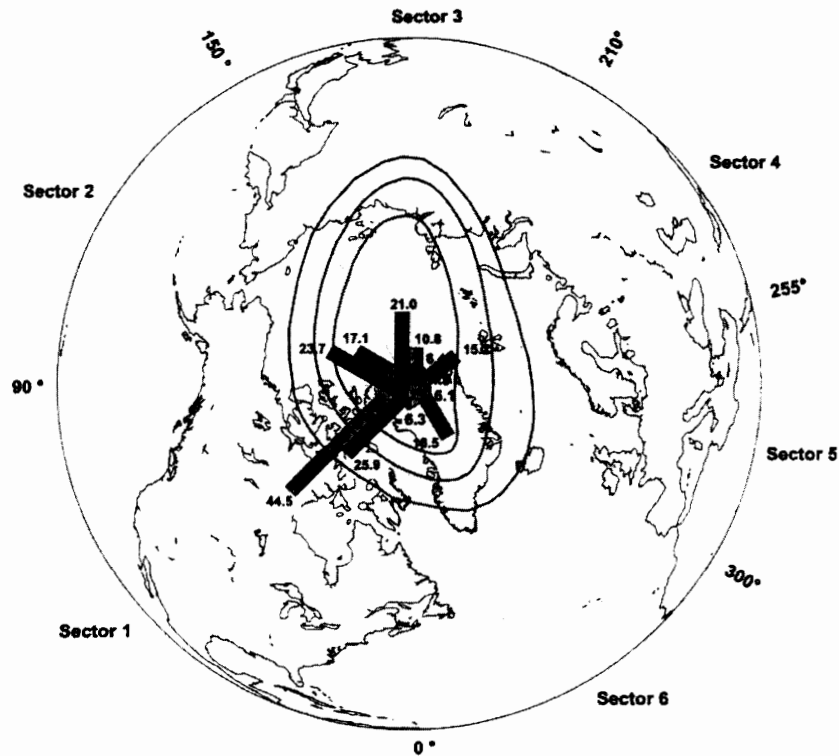


図8 アラートへ到達する空気塊の流れてくる方向, 出発点の統計, 各セクターから到達する割合を1日と5日さかのぼった場合, コンターはバックトラジェクトリーの5日前の位置が25, 50, 75% 入る範囲.

Fig. 8. Alert trajectory sectors associated with different source regions. The bars indicate the percent frequency of occurrence of air parcel origin by sector for 1-day (gray bars) and 5-days (black bars) back in time for the period 1988-1997. Also included are contours of 25%, 50% and 75% distances traveled by 5-day back trajectories (Atmospheric Environment Service, 1999).

が図8である。図中の各セクターから到達するものの割合 (%) を1日さかのぼった場合と5日さかのぼった場合で棒線で記されている。また, 5日さかのぼった出発点の距離のコンターが25%, 50%, 75%の事例で示されている。この図からは, 南側, アメリカ大陸側からの流れの比率が高いが, ベーリング海峡側や西シベリア方面からもある程度の比率があることがわかる。

### 2.3. バロー (71.32°N, 156.61°W; 8 m)

アラスカ北端, 西にチャクチ海, 東にボーフォート海を分けるバロー岬のもと, 72°N, 157°Eに位置する。アメリカ大気海洋庁 (NOAA) の気候モニタリング・診断研究所 (CMDL; 旧GMCC) のバロー観測所が1973年以来維持され, 大気モニタリング観測を中心とした広範囲の観測プログラムを進めている (Hofmann *et al.*, 1998)。同研究所が世界に展開した4カ所の基本観測所の一つである。同じくアメリカ気象サービス (NWS) の観測所で基本的な気象観



表2 アラスカ, バローの気候表 (1977-1999)

Table 2. Monthly summaries of surface synoptic data at Barrow, Alaska, 1977-1999 (National Weather Service: <http://www.cmdl.noaa.gov/obop/met>).

| Item         | Jan.   | Feb.   | Mar.   | Apr.   | May    | Jun.   | Jul.   | Aug.   | Sep.   | Oct.   | Nov.   | Dec.   | Year   |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pst (hPa)    | 1016.0 | 1017.8 | 1018.3 | 1017.1 | 1016.0 | 1012.7 | 1012.5 | 1010.0 | 1010.5 | 1011.6 | 1013.1 | 1014.4 | 1014.1 |
| T (°C)       | -25.6  | -26.4  | -25.6  | -18.2  | -6.9   | 0.5    | 3.4    | 3.3    | -0.7   | -9.5   | -18.3  | -23.6  | -12.2  |
| Txx (°C)     | -1     | 1      | -1     | 3      | 8      | 23     | 21     | 22     | 16     | 6      | 1      | -1     | 23     |
| Tmm (°C)     | -48    | -50    | -44    | -42    | -32    | -12    | -5     | -6     | -17    | -32    | -38    | -44    | -50    |
| V (m/s)      | 6.6    | 6.0    | 5.5    | 5.7    | 5.8    | 5.0    | 5.4    | 5.9    | 6.2    | 6.7    | 6.5    | 6.4    | 6.0    |
| Prev win dir | ENE    | ENE    | ENE    | ENE    | ENE    | E      | E      | E      | ENE    | ENE    | ENE    | ENE    | ENE    |
| N (1/8)      | 4.1    | 4.8    | 4.9    | 4.6    | 5.2    | 6.2    | 6.3    | 6.4    | 6.1    | 5.7    | 4.7    | 4.0    | 5.2    |
| Prec (mm)    | 0      | 2      | 0      | 0      | 1      | 5      | 19     | 21     | 9      | 1      | 0      | 0      | 59     |

表1と同様, 但し, Pst 地上気圧, V 風速, Prev win dir 卓越風向

測が継続されており, またエネルギー省 (DOE) の大気放射観測プロジェクト (ARM) の CART サイトが近くに設置されている. 1977年から1999年までの平均の月平均値が表2に示されている. 気温は, 2月の-26°Cから7月の+3°Cまで変化し, 年平均は-12.2°Cとなっている. 降水量は59mmと少ない.

2.4. ノボシビルスク島, コテルニー (76°00'N, 137°54'E; 10 m)

上記3カ所が国際的にも認められた北極域の代表的な観測拠点であるのに対し, 広大な領域を占めるシベリア側では, そのような代表点はどこであろうか. かつては多くの観測拠点があったところだが, 現在では多くが廃止され, 観測を継続している所は少なくなってしまった. これまで, 拠点のあった場所として, ディクソン, セベルナヤ・ゼムリヤ諸島ドマシュニ島, スレドゥニー, チェルスキー岬, ティクシ等が知られている. ここでは, スバルバルとバローの中間として, また北極海により代表性あるだろう場所ということで, ラプテフ海と東シベリア海の間, ティクシの北東沖合のノボシビルスク島にある, 北極南極研究所 (AARI) の基地である (少なくとも1999年6月までは) コテルニーをとりあげよう. この基地では, 大気混濁度も長年にわたり観測されてきている (Radionov and Marshunova, 1992). 気候値を表3に示したが, 年平均気温-14.2°C, 月平均気温が最高+2.3°C, 最低-29.6°Cとなっており, 北極海のある種の代表であろう (Vowinckel and Orvig, 1970). 降水量は105mmである.

表3 ノボシビルスク島, コテルニーの気候表 (4年間)

Table 3. Monthly summaries of surface synoptic data at Kotelny, Novo Sibirskie Island (Vowinckel and Orvig, 1970).

| Item      | Jan.  | Feb.  | Mar.  | Apr.  | May   | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Oct.  | Nov.  | Dec.  | Year  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Pst (hPa) | 1012  | 1018  | 1024  | 1015  | 1015  | 1014 | 1013 | 1015 | 1009 | 1011  | 1019  | 1023  | 1016  |
| T (°C)    | -29.3 | -29.6 | -28.9 | -20.6 | -9.1  | -0.2 | 2.8  | 2.3  | -1.2 | -9.6  | -20.9 | -26.4 | -14.2 |
| Txx (°C)  | -9.4  | -12.8 | -11.1 | -3.9  | 4.4   | 20.6 | 18.9 | 17.7 | 6.1  | 0.0   | -8.3  | -5.6  | 20.6  |
| Tmm (°C)  | -43.3 | -42.2 | -41.7 | -37.2 | -27.8 | -7.2 | -2.8 | -3.9 | -8.9 | -20.6 | -31.1 | -40.6 | -43.3 |
| N (1/10)  | 3.0   | 4.5   | 3.4   | 6.2   | 7.1   | 8.5  | 8.4  | 9.5  | 9.0  | 8.1   | 6.6   | 4.4   | 6.6   |
| Prec (mm) | 2.5   | 5.5   | 2.5   | 1.2   | 5.1   | 10.2 | 30.5 | 25.4 | 12.7 | 5.1   | 2.5   | 5.1   | 105.3 |

表1, 2に同様

### 3. 北極域の気候分布

まず基本的な地上気温の分布をみたものが図9である (Tao *et al.*, 1996). 冬はグリーンランドの寒極の他, 北極点を中心にわずかに気温極小領域が広がり, さらにより温度の低い寒極がシベリア東部を中心に広く大陸上に分布している. この結果, スバルバル付近でグリーンランド海から北極海にかけて温度勾配が急である以外は北極海内全域であまり大きな温度勾配は見られない. そして, 最低気温領域が北極点を含む北極中心部になく, 周辺部にあることが特徴になっている. 北極を巡る大気の循環場が, 比較的中心部に最低気温域が分布する南極ほど単純にならない理由の一つで, かなり本質的なことと考えている. 一方, 夏には, グリーンランドが引き続き寒極である他は, 最低気温領域は北極海中心部に存在する. しかし, 北極海内部の温度傾度は極めて小さくほぼ全域に  $0^{\circ}\text{C}$  近くの温度が広がっている. 周辺の大陸上は冬とは違って著しい高温になり, 大陸沿岸部で温度傾度が大きくなっている.

海水分布の季節変動域が図10に示されている (Barry *et al.*, 1993). 海水域面積が最小から最大で5倍もの違いを示す南極域ほどの大きい季節変動を示さない. 最小と最大で5割増し程度である. 最大期の南端はオホーツク海であり, 最小期の北端はスバルバル付近で,  $80^{\circ}\text{N}$  である. 2章でみた4カ所の拠点のうちアラートを除く3カ所では, 夏期には海水が消え, 開水面に囲まれる (平均像). ちなみに, スバルバル西方のフラム海峡では, 夏冬の海水張り出しの違いが少なく, 冬の最大期でも氷縁はスバルバル西にあり, スバルバルは通年氷縁近く

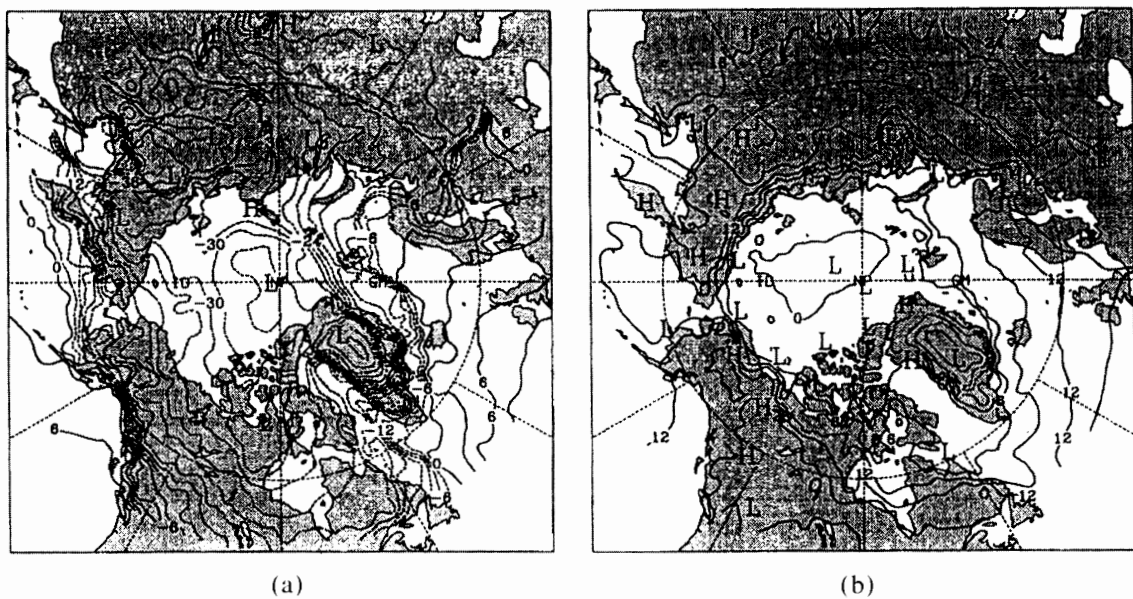


図9 1979-1988年の10年間の月平均地上気温. (a) 1月, (b) 7月

Fig. 9. The 10-year (1979-1988) monthly mean surface air temperature for (a) January and (b) July of the revised monthly climatology (Tao *et al.*, 1996).



図10 海水域張出 (海水密度度 12% 以上) の最大と最小

Fig. 10. Average seasonal minimum and maximum sea ice extent (>12% ice concentration) (Barry et al., 1993).

に存在することとなる。従って、開水面の影響が強く、2章で述べた小さい気温の年較差を特徴付けている。北極海は海氷がびっしり覆い、定着氷が広がっているかのように想像されることもあるが、実際はすべて流れをもった流水からなっている。その平均的流れのパターンは図11に示されたごとく、西半球側で大きな高気圧性渦（ポーフォートジャイア）をなし、北極点から東半球側を速い流れがグリーンランドとスバルバルの間のフラム海峡に及んでいる。フラム海峡での氷の流速は20 cm/sを越える速さで、ここが北極海からの氷（および表面海水）の実質的な唯一の出口となっている。

大気状態の変動を見るのに総観気象場、高・低気圧の分布が重要である。夏は余り特徴的な分布を示さないが、冬は顕著な特徴を示す (Serreze et al., 1993)。即ち、高気圧の分布はシベリア域に極度に偏在し第1の存在度の高いピークがあり、第2はアラスカからカナダ北西部、第3がグリーンランドにピークがある。これに対し、低気圧はアイスランド周辺に第1のピークがあり、あとはグリーンランド海からスバルバル、バレンツ海、カラ海に連なる存在度の高い領域が広がっている。これらの中で、低気圧の平均的移動ベクトルを示したものが図12である。グリーンランド西、アイスランドからグリーンランド海、スバルバル、バレンツ海、

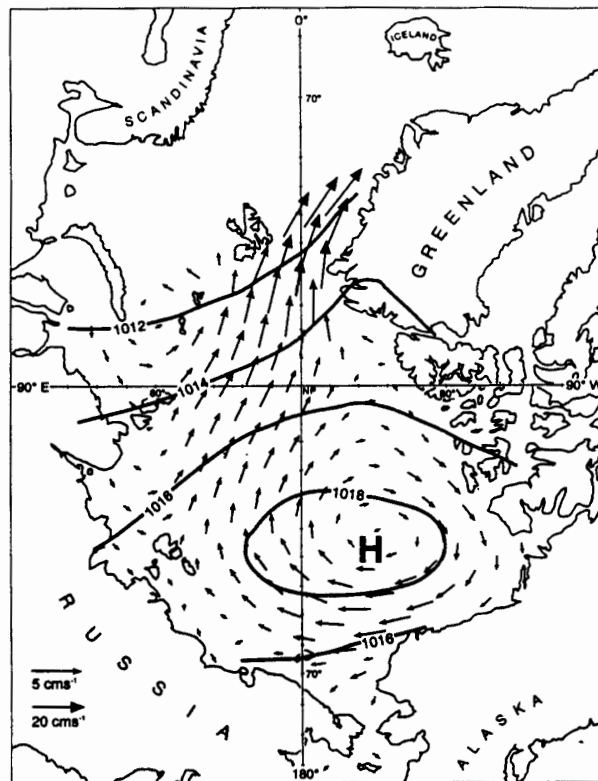


図 11 漂流ブイや有人・無人基地による年間海氷漂流ベクトルと年平均海表面気圧  
 Fig. 11. Mean annual ice drift, based on drifting buoys, manned and unmanned camps, and mean annual surface pressure (Barry et al., 1993).

カラ海への一連の流れが特徴的である。

一方、水蒸気の流れがどのようになっているかは、北極域の水循環の一要素として大変関心が持たれ、多くの解析例がある。1974年から1991年の高層ゾンデ観測データ（北極レーウインゾンデ・歴史的アーカイブ; Kahl et al., 1992）から算出された Serreze et al. (1995) によると、70°N以北の平均可降水量（水蒸気気柱量のこと）は最小は2月の2.9 mm、最大は7月の16.2 mmとなっている。同領域の年積算降水量-蒸発量（P-E）は163 mmであり（最近のECMWFあるいはNCEP客観解析再解析データでは $189 \pm 23$  mm; Cullather et al., 2000）、これは河川からの流入量（340 mmという評価あり; Barry et al., 1996）と合わせ北極海への淡水流入量となり、フラム海峡等からの流出量とほぼ釣り合う必要がある。これらのもとになる70°N線を通した大気中での水蒸気輸送量は、図13に示すように経度方向での違いが大きく、10°Wから20°Eのノルウェー海が最大、即ち、スバルバルの南が最大となっている。先の海氷流出の多い場所という意味も含め、スバルバル周辺域は海および大気のいずれにおいても北極海の出入口となっていると言える。ちなみに、水蒸気輸送は多くの領域で北向きであるのに対し、100°W周辺、カナダ多島海は唯一南向きとなっている。

雲は放射収支を通じ地表面の熱収支に大きな影響を与え、北極域では特に海氷の成長、融解

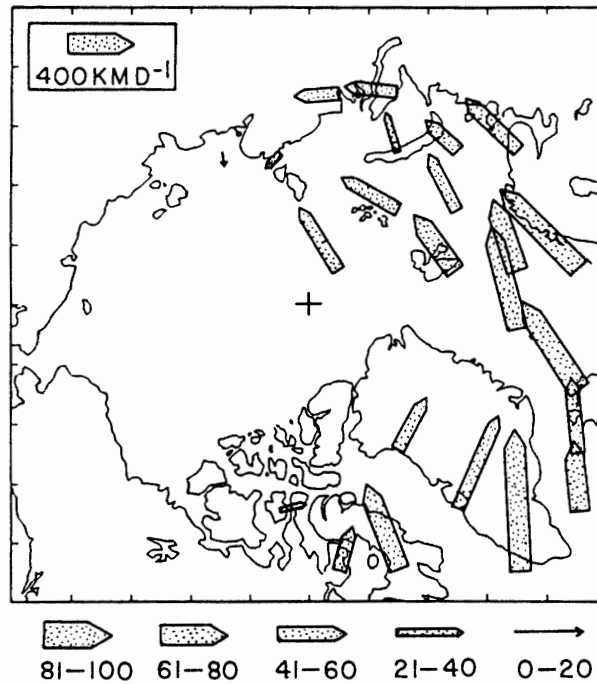


図 12 1975/76-1988/89 年の冬の低気圧の平均移動ベクトル。矢印の長さがベクトルの大きさ、幅は移動方向の一致度合 (%)

Fig. 12. Mean cyclone motion vectors for winter, 1975/76-1988/89. The length of each arrow is the mean vector magnitude, with the width proportional to the index of motion constancy (number in %) (Serreze et al., 1993).

を左右することで重要な気候要素である。しかし、長い極夜の存在で地上からの目視観測が難しいこと、衛星からの観測でも、雪氷上の雲は地表面の高い反射率（アルベード）および低温のため、可視光でも赤外光でも見分け難いという問題から、極域の雲の分布はいまだ本当に信頼に足るものは得られていない。図 14 は地上および船舶からの観測結果をもとに得られた雲量分布で (Barry et al., 1993; Schweiger and Key, 1992; Warren et al., 1989), 概ね正しかろうと評価されているものである。夏冬の分布の違いが興味あるところで、夏は北極海からグリーンランド海にかけて一様に雲量の高い値が広がっている。ところが、冬は北極海の大部分は雲量が低めになっているのに対し、カラ海、バレンツ海、グリーンランド海にかけては高い雲量となっている。上で述べた低気圧分布に呼応していると共に、2章で述べたスバルバルの冬の気温変動にも関係しており、北極海側の気団に覆われると比較的晴天が多くなり放射冷却で気温が下がるのに対し、南側のグリーンランド海からの気団に覆われると雲が多く放射冷却が抑えられ気温が高くなるという要因を示している (Yamanouchi and Ørbaek, 1995)。

放射収支については、気候を左右する重要なプロセスであり、象徴的である大気外から見た外向き大気放射量 (OLR) を見てみよう。1985 年から 1988 年における人工衛星による「地球放射収支実験」(ERBE) の結果について、南半球での解析 (Yamanouchi and Charlock, 1997) と同様に北極域を調べた。二つの南北子午面断面、スバルバルのある 10-12.5°E およびシベ

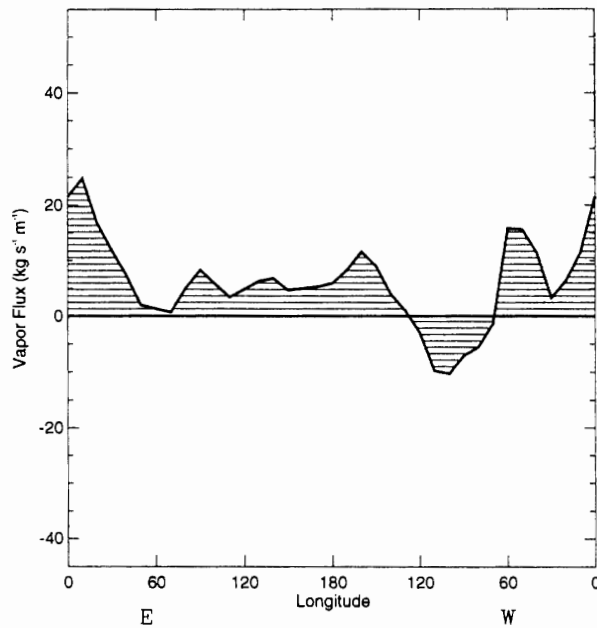


図13 70°Nにおける経度10度ごとの平均年間鉛直積分子午面水蒸気フラックス  
(極向きを正)

Fig. 13. Mean annual vertically integrated meridional vapor flux ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) at  $70^\circ \text{N}$  at every  $10^\circ$  of longitude (poleward values positive) (Serreze et al., 1995).

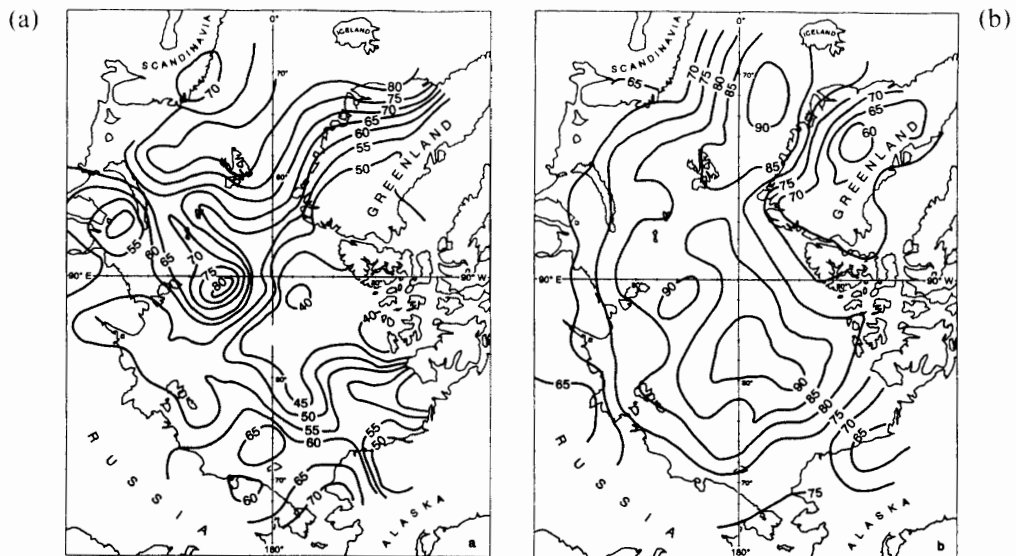


図14 平均雲量分布(%), (a)1月と(b)7月, 地上および船上観測に基づく評価

Fig. 14. Mean cloud cover (in %) for (a) January and (b) July; based on surface and ship observations (Barry et al., 1993; from Schweiger and Key, 1992; based on data from Warren et al., 1989).

リア東部の  $125\text{--}127.5^\circ \text{E}$ , にそった OLR およびその変動の分布を南極の例と比較してみたものが図15である。日々の変動は冬の北極海で小さいのに対し夏, 冬通じグリーンランド海で大きい。季節変動幅は陸上で大きく, 海上で小さい方向だが, 北極海では大きい。冬の北極海は冬

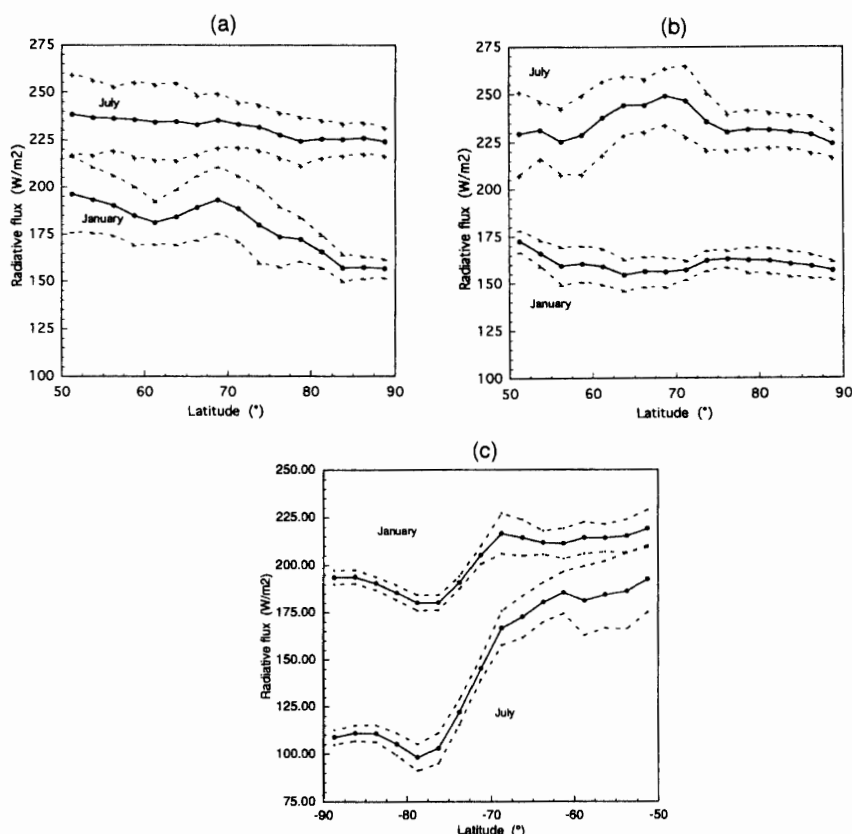


図 15 大気上端における外向き長波長放射量 (OLR) 月平均値の南北子午面断面, (a) 10-12.5°E および (b) 125-127.5°E, (c) 南極 37.5°-40°E (Yamanouchi and Charlock, 1997), ERBE データによる 1987 年 7 月と 1988 年 1 月, 破線は 1 月間の標準偏差の幅を示す。

Fig. 15. Meridional cross section of monthly average outgoing longwave radiation and standard deviation, (a) 10-12.5°E, (b) 125-127.5°E and (c) 37.5°-40°E, the Antarctic (Yamanouchi and Charlock, 1997) in July 1987 and January 1988 from ERBE data.

の南極海氷域よりはるかに小さい OLR を示すのに対し, 海氷の残る夏の北極海が南大洋の開水面より高い OLR を示すことは注目すべきことである。シベリアの断面では, 夏シベリアに温度の高い核があり, 70°N が最高気温 -OLR- になっていること, 冬は逆に 60-70°N 域に最低気温 -OLR- になっており, 上述した気温の分布を反映していることがわかる。

成層圏の特徴についても一つだけ見ておこう。図 16 は成層圏の高度およそ 20 km に相当する 50 hPa 等圧面高度の分布を示したものである。この場合, 緯度円と必ずしも同心円になってはいないが, ヨーロッパ側では 70°N から 55°N, アメリカ側では 80°N から 65°N にコンターの密の領域, 即ち風の強い極夜ジェットの帯が見られる。スバルバルやアラートは極渦の内側に位置し, バローは極渦の縁に位置している。こうしたことから, 春先の成層圏オゾンの減少域 - オゾンホール - もスバルバルやアラートでは顕著に見える可能性があることがわかる (岩坂, 2000)。

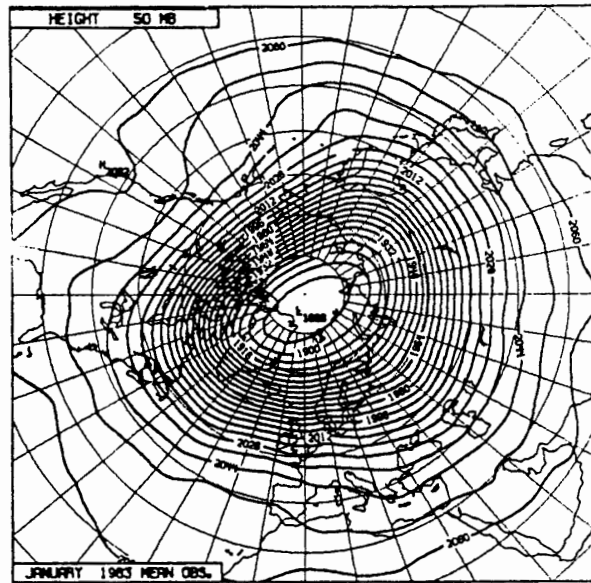


図 16 50 hPa 等圧面高度場, 1983 年 1 月平均  
 Fig. 16. Monthly mean 50 hPa height field, January 1983.

#### 4. 近年の北極変動 Changing the Arctic

今、北極の気候に何が起きているのか？ この 10 年、北極に 10 年規模で大きな変化が起きている、1990 年代に入って“Changing the Arctic”と呼ばれる大きな変化を受けていることが明瞭になってきた。多くの論文として皆の目に触れる形で明らかにされたのは、あるいは北極域の気候変化が顕在化したことが明瞭になったのが、この 5-10 年である。“Dear Colleague”で始まるワシントン大学極域科学センターの J. Morison, K. Aagaard を初めとした北極気候研究者達によるレター (“An Open Letter Describing a Program for a Study of Arctic Change”, 1997 年 7 月) が出され、これを受けた “Study of the Arctic Change Workshop” (NSF, 1997 年 11 月; Morison *et al.*, 1998a) が催され、この中で、次々と起こる北極域の変化が要約されている。さらに最近の気候変化の要点が Serreze *et al.* (2000) によってまとめられている。

ここ 30 年にわたる北極陸域の気温上昇が顕著で、図 17 に観測事実に基づく 40°N 以北の気温のトレンドを示したが、10 年平均最高 1°C までの上昇が見られる (Chapman and Walsh, 1993; Serreze *et al.*, 2000)。カナダ北西部からアラスカにかけてと、シベリアの広域にわたって大きい昇温となっており、一方、カナダ東北部からグリーンランドにかけては気温は下がっているという地域差はある。先に見たスバルパルの長年の気温変動に近年の昇温があまり顕著に見えなかったのもこの関係である。季節的には、冬期が最も昇温大きく、先の年平均を形作っており、春も同様な傾向にあるのに対し、夏と秋は大きい昇温は見られず、秋、シベリア東部を除くとむしろ気温の低下が見える。陸域にとどまらず、北極海でも陸域ほどではないが



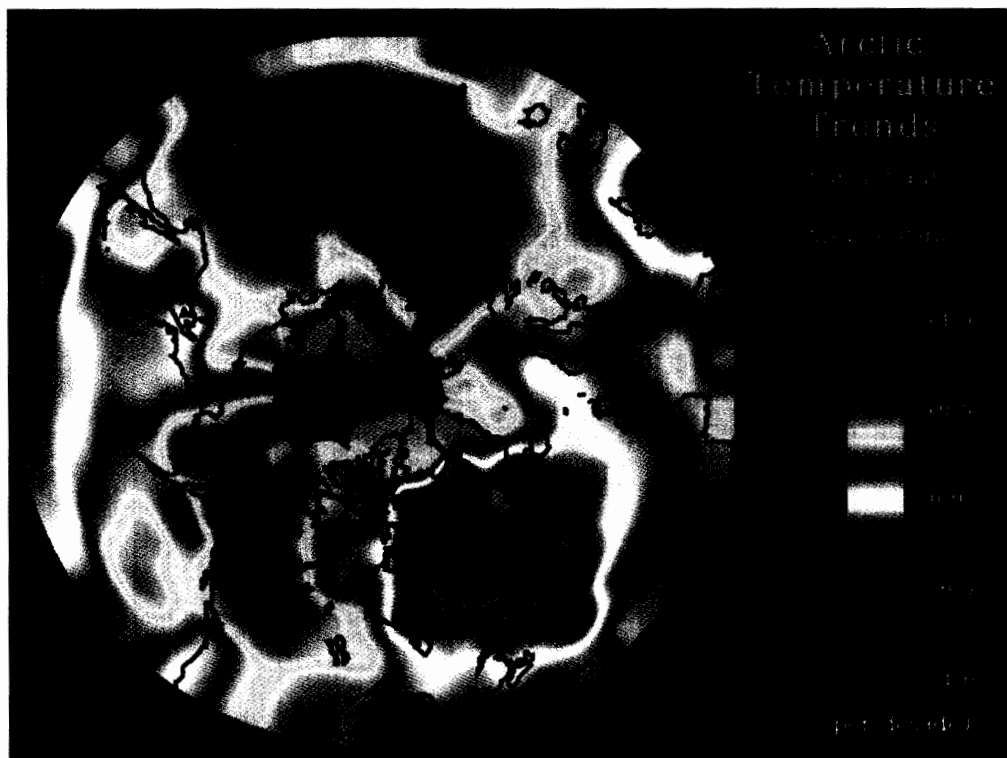


図 17 10 年当たりの年平均地上気温経年変化, 40°N 以北, 1966-1995 年

Fig. 17. Trends in mean annual surface air temperature in °C per decade north of 40°N for the period 1966-1995 (Serreze et al., 2000; updated from Chapman and Walsh, 1993).

気温上昇は明瞭である (Martin et al., 1997)。ロシア (ソ連) が北極海の海氷の上に作った漂流基地 (North Pole Station; 1930 年代から 1991 年まで 31 の基地が運用された) のデータを基に解析したもので、春から夏にかけ、10 年あたり 0.8 から 0.2°C の気温上昇となっている。これらを総合して、北極陸海域で全体的な傾向が Rigor et al. (2000) によって確認されている。

北極海の気温変化に最も関連するのは海氷と考えられる。海氷域面積、夏の極小値が 1990 年までの 30 年間、10 年平均で 3.5% の割合で減少していることが同じく Chapman and Walsh (1993) によって示されている。これは 1973 年以降は U.S. Navy/NOAA National Ice Center 作成の海氷図、それ以前は地域ごとの海氷データに基づいている。一方、近年の衛星マイクロ波観測によっても、1978 年から SMMR データ、1987 年以降 1996 年までは SSM/I データに基づき、図 18 のように海氷域面積の経年変化は  $-2.9\%/yr$  と、海氷域の面積が減少していることが示された (Cavalieri et al., 1997)。衛星マイクロ波データについては、センサーの切り替え前後の連続性に問題があると議論されたが (Johannessen et al., 1995; Parkinson and Cavalieri, 1989)、今や海氷域面積の減少傾向は定説となった (Vinikov et al., 1999)。海氷の厚さが薄くなっているのではないかということは北極海を航行する潜水艦のデータから指摘されていたが (Wadhams, 1990)、この傾向は 1990 年代までの 20 ないし 40 年の間に平均 1 m 以上の減少

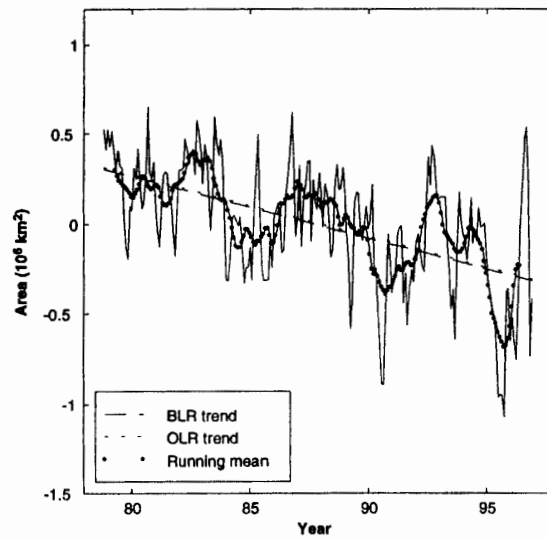


図 18 海氷域面積の月ごとの偏差と 12 カ月移動平均, 直線トレンド

Fig. 18. Monthly deviations in sea ice extent with a 12-month running mean and linear trend (Cavalieri *et al.*, 1997).

として見られ, 領域によっては  $0.1 \text{ m/yr}$  の減少率が 1990 年代も続いていると言われている (Rothrock *et al.*, 1999). しかし, 場所の違いか, 北極点からポーフォート海にかけて, 1990 年代には海氷は薄くなっていないとの報告が最近でも出されており (Winsor, 2001), 空間および時間スケールでの観測密度が限られることから結論は難しい.

海水温そのものでも, 北極海中心部で 1990 年代に顕著な上昇が見られることが報告された (Morison *et al.*, 1998b). 1947 年から 1987 年まで得られた歴史的データ (Joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean; Environmental Working Group, 1997) と 1990 年代に精力的に行われた北極点航海のデータを比較した結果, ロモノソフ海嶺を越えて大西洋水が進入し, 水温が  $1\text{--}2^\circ\text{C}$ , 塩分濃度が  $2.5\text{‰}$  上昇していることが明らかになったというものである.

さらに, 北極海中心部の海面気圧が  $3\text{--}4 \text{ hPa}$  低下し, これに伴う大気循環場の変化, 即ち平均気圧パターンが高気圧性であったところが弱まり, むしろ低気圧性の循環となり, さらには右回りの海水漂流渦ポーフォートジャイア (図 11 参照) が弱められるといった一連の変化が見られた (Walsh *et al.*, 1996). これらの現象相互の関係は整合的であることはモデル研究の結果からも示されているが (Proshutinsky and Johnson, 1997), 温暖化との関係は明白ではなく, トレンドというより二つのレジームの間の変遷と考えられている.

これらの変化が「北大西洋振動 (NAO)」という大気循環場のパターン変動と関連している (Hurrell, 1995), さらには北極海と周辺域の環状パターンでの振動現象「北極振動 (AO)」と対応しているという Thompson and Wallace (1998) 論文が出され大きな話題となった. AO は冬期の月平均海面気圧偏差分布の EOF 第 1 成分を指標としているが, 北極海とその周辺のリング状の部分のシーソーパターンで特徴付けられ,  $50 \text{ hPa}$  高度といった成層圏まで (極渦が強ま

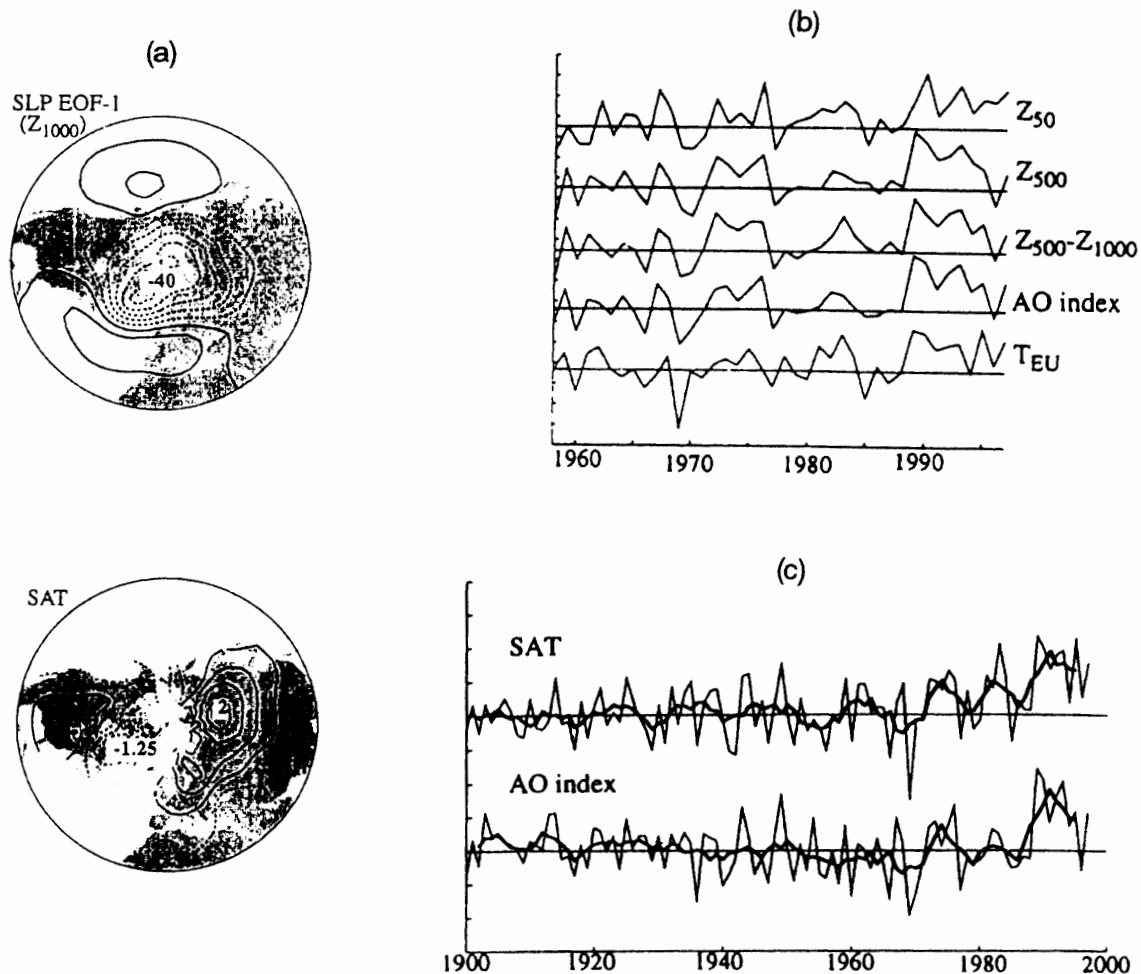


図 19 (a) 冬期 (11-4 月) 月平均海面気圧の偏差の EOF 第 1 成分 (AO 指数) の分布と地上気温 (SAT) 偏差の回帰成分の分布, (b) 正規化した回帰係数の時系列,  $Z_{50}$ : 50 hPa 高度場,  $Z_{500}$ : 500 hPa 高度場,  $Z_{500}-Z_{1000}$ : 層厚, AO 指数, 正規化したユーラシア大陸平均地上気温 (SAT) TEU の偏差, (c) 北極振動指数の年々変動と対応する正規化した地上気温回帰成分の年々変動. 太線は 5 年移動平均.

Fig. 19. (a) Regression maps for surface air temperature (SAT) anomalies, based upon the leading principal component of wintertime (Nov.-Apr.) monthly mean sea level pressure anomalies (the AO index) for 1947-1997. (b) Time series of normalized expansion coefficient for  $Z_{50}$ ,  $Z_{500}$ ,  $Z_{500}-Z_{1000}$ , AO index and normalized Eurasian mean SAT anomalies. (c) Normalized wintertime expansion coefficient time series for SAT and SLP regression maps of (a) for 1900-1997, heavy lines denote five-year running mean (Thompson and Wallace, 1998).

る等) 一様に良く説明がつくというものである (図 19)。この考え方の本質は過去にも提唱されていた概念であったが (Kodera and Yamazaki, 1994; Kodera and Koide, 1997), 「北極振動 (AO)」と名付けたこと, 言葉の威力は絶大なもので, 北極の現象はすべて AO で説明がつくかのような印象を与え, 熱い議論が交わされたものであった。2001 年を迎え, ある程度議論が尽くされたためか, 落ち着いた, 冷静な議論に戻っている (田中ら, 2001)。なお, NAO はアゾ

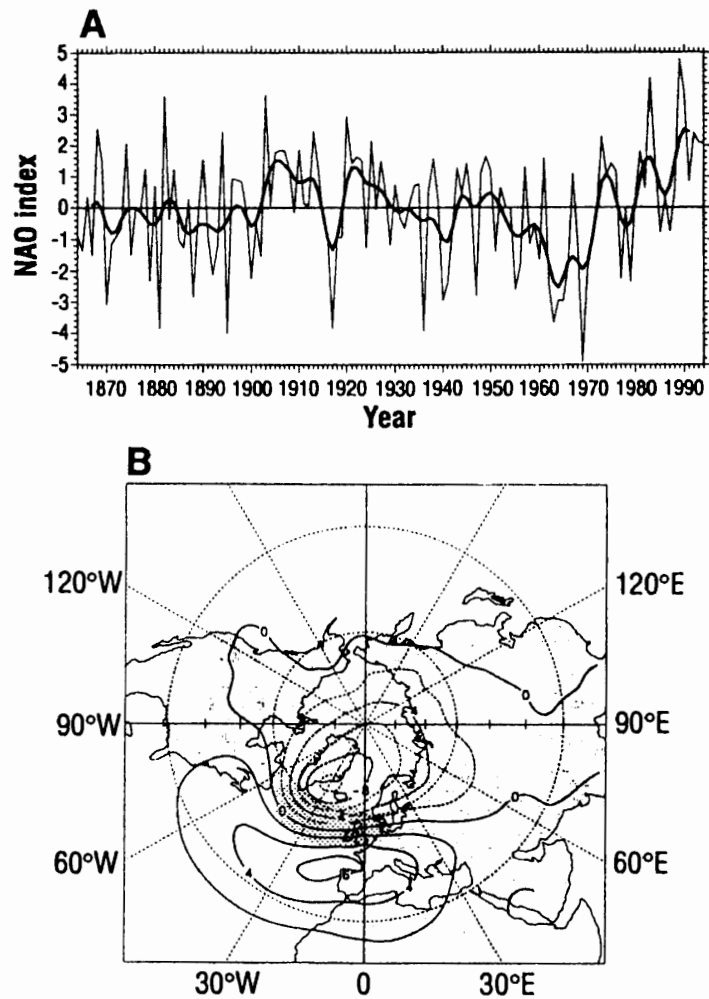


図 20 (A) ポルトガルのリスボンとアイスランドの間の正規化した気圧差を指標とした NAO 指数の冬 (12-3 月) の値, (B) NAO 指数  $> 1.0$  と NAO 指数  $< -1.0$  の場合の海面気圧の差, 1899 以来

Fig. 20. (A) Winter (December to March) index of the NAO based on the difference of normalized pressures between Lisbon, Portugal and Stykkisholmur, Iceland, from 1864 through 1994. (B) Difference in SLP between years with an NAO index  $> 1.0$  and those with an index  $< -1.0$  since 1899 (Hurrell, 1995).

レスないしリスボンとアイスランドとの海面気圧差を指標とし、 $55^{\circ}\text{N}$  を境とした北大西洋の北と南の海面気圧パターンを示している。NAO が (+) の時北極海の気圧は低下、大西洋の西風強化、グリーンランド西で北風強化となる。ここ 10 年間、図 20 の通り、冬の NAO (+) が続いていた。

これらの変動が、氷床コアの変動に (White *et al.*, 1997; Appenzeller *et al.*, 1998)、グリーンランドの降水量変動に (Bromwich *et al.*, 1999)、さらには北極域の雲量変動にも見られるのではないかといった話 (Stone, 1997) まで発展している。NAO が大気循環場の指標になっているため、降水量変動を通じて積雪涵養量、即ち氷床コアにその影響が見られるということである。

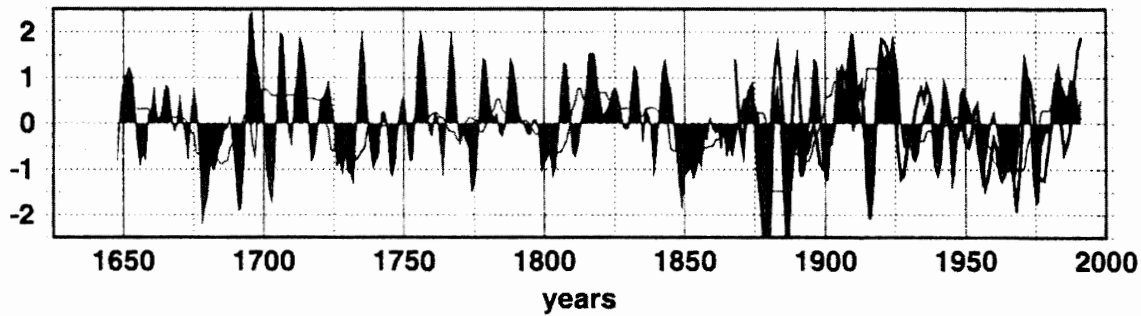


図 21 西グリーンランド積雪涵養量に基づく正規化した NAO 代用指数 (影付き, 涵養量を  $-1$  でスケール) と過去 130 年間の測器観測から得られた NAO 指数 (太線). この間の相関係数は 0.57. さらに, 前者の 15 年間移動平均 (細線)

Fig. 21. Normalized proxy NAO index based on western Greenland ice accumulation rates (shaded) and normalized instrumental NAO index (thick line). Linear trends and high-frequency parts are removed. Also shown is a 15-year running median of the proxy index (thin line) (Appenzeller et al., 1998).

る。NAO が (+) の時, グリーンランドは低温で (White et al., 1997), 降水量が減少し涵養量も少なくなるという負の相関が, 特にグリーンランド西部のコアで顕著である (図 21; Appenzeller et al., 1998). さらに, Bromwich et al. (1999) はグリーンランドの降水量を客観解析データ (ECMWF operational analyses) から算出し, 1985 年から 1995 年の 10 年間に NAO と逆相関で, かつ  $-3\%/yr$  の降水量減少を報告している。Stone (1997) は, 西北極の温暖化の傾向が雲量の増加 (特に冬から春) と良い相関を示し, 大気循環場パターンの変動を媒介に関連してるのではないかと述べている。

## 5. おわりに

ニーオルスンの気候の特徴から, 最近の顕著な北極域気候変化まで駆け足で概観してきた。同じ北極といっても, その気候には地域特性があり, スバルバルは北極海に代表性があるとは言えないが, 北極気候の中で一つの重要な位置付けの地域にあることが明かとなった。即ち, 地球規模の気候システムの要, 深層水の沈み込み領域といわれるグリーンランド海に面し海洋性気候を示すと共に, 北極海の出入り口にあるということである。これに対し, 他の観測点は異なった気候的特性を示すことが分かった。近年, 北極気候研究に関する論文はおびただしい数が発表されており, 地球温暖化問題の深刻化, 北極域での変化の大きさを物語っている。ここに紹介できたのはその内のほんのわずかであるが, 単に気象・気候分野にとどまらず, 広く北極研究を進めておられる方々のお役に立てば幸いである。今後, よりテーマを絞った個々の課題についての深く掘り下げたレビューを期待したい。

## 謝 辞

スバルバル情報の入手に関し Jon Ørbaek 博士の、また一部の図の作製で森本真司博士のお世話になったこと、感謝の次第。本レビューは科学研究費特定領域研究（北極環境）計画研究 B(2) No. 11208201「北極域対流圏・成層圏物質の変動と気候影響」（代表、山内 恭）によった。

## 文 献

- Atmospheric Environment Service (1999): Canadian Baseline Program, Summary of Progress to 1998. Atmospheric Environment Service, Environment Canada, Tronto, Canada.
- Aoki, S., Morimoto, S., Ushio, S., Ito, H., Nakazawa, T., Yamanouchi, T., Ono, N. and Vinje, T. (1996a): Carbon dioxide variations in the Greenland Sea. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 299-306.
- Aoki, S., Nakanishi, Y., Wada, M. and Yamanouchi, T. (1996b): Meteorological data at Japanese Ny-Ålesund observatory, Svalbard in 1992 and 1995. *NIPR Arctic Data Rep.*, **1**, 111 p.
- Aoki, S., Nakanishi, Y., Wada, M. and Yamanouchi, T. (1996c): Meteorological data at Japanese Ny-Ålesund observatory, Svalbard in 1994 and 1993. *NIPR Arctic Data Rep.*, **2**, 179 p.
- Appenzeller, C., Socker, T.F. and Anklin, M. (1998): North Atlantic Oscillation dynamics recorded in Greenland ice cores. *Science*, **282**, 446-449.
- Barry, R.G., Serreze, M.C. and Maslanik, J.A. (1993): The Arctic sea ice - climate system: observations and modeling. *Rev. Geophys.*, **31**, 397-422.
- Barry, R.G., Serreze, M.C. and Walsh, J.E. (1996): Atmospheric components of the hydrological cycle in the Arctic. *Proceedings of the ACSYS Conference on the Dynamics of the Arctic Climate System, 7-10 November 1994. Goteborg, Sweden*, 24-31.
- Bromwich, D.H., Chen, Q., Li, Y. and Cullather, R.I. (1999): Precipitation over Greenland and its relation to the North Atlantic Oscillation. *J. Geophys. Res.*, **104**, 22103-22115.
- Cavalieri, D.J., Gloersen, P., Parkinson, C.L., Comiso, J.C. and Zwally, H.J. (1997): Observed hemispheric asymmetry in global sea ice change. *Science*, **278**, 1104-1106.
- Chapman, W.L. and Walsh, J.E. (1993): Recent variations of sea ice and air temperature in high latitudes. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **74**, 33-47.
- Cullather, R.I. and Bromwich, D.H. (2000): The atmospheric hydrologic cycle over the Arctic Basin from reanalyses. part I: Comparison with observations and previous studies. *J. Climate*, **13**, 923-937.
- Environmental Working Group (EWG) (1997): Joint U.S. - Russian Atlas of the Arctic Ocean, Oceanographic Atlas for the Winter Period. National Ocean Data Center.
- Føland, E.J., Hanssen-Bauer, I. and Nordli, P.Ø. (1997): Climate statistics and longterm series of temperature and precipitation at Svalbard and Jan Mayen. *DNMI-Report*, **21/97 KLIMA**, 72 p.
- Hanssen-Bauer, I., Solås, M.K. and Steffensen, E.L. (1990): The climate of Spitsbergen. *DNMI-Report*, **39/90 KLIMA**, 40 p.
- Hisdal, V. (1975): The weather in Svalbard in 1974. *Nor. Polarinst. Årbok*, **1974**, 195-198.
- Hofmann, D.J., Peterson, J.T. and Rosson, R.M. (1998): Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Summary Report No. 24, 1996-1997. NOAA/ERL, Boulder, Colorado, 166 p.
- Hurrell, J.W. (1995): Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, **269**, 676-679.
- 岩坂泰信編 (2000): 北極圏の大気科学—エアロゾルの挙動と地球環境. 名古屋, 名古屋大学出版会, 229 p.
- Johanessen, O.M., Miles, M.W. and Bjorgo, E. (1995): The Arctic's shrinking sea ice. *Nature*, **376**, 126-127.

- Kahl, J.D., Serreze, M.C., Shiotani, S., Skony, S.M. and Schnell, R.C. (1992): *In-situ* meteorological sounding archives for Arctic studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **73**, 1824-1830.
- Kodera, K. and Koide, H. (1997): Spatial and seasonal characteristics of recent decadal trends in the northern hemisphere troposphere and stratosphere. *J. Geophys. Res.*, **102**, 19433-19447.
- Kodera, K. and Yamazaki, K. (1994): A possible influence of recent polar stratospheric coolings on the troposphere in the Northern Hemisphere winter. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 809-812.
- Martin, S., Munoz, E. and Drucker, R. (1997): Recent observations of a spring-summer surface warming over the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1259-1262.
- Morimoto, S., Aoki, S., Nakanishi, Y., Wada, M. and Yamanouchi, T. (2000): Meteorological data at Japanese Ny-Ålesund observatory, Svalbard from 1996 to 1998. *NIPR Arctic Data Rep.*, **4**, 254 p.
- Morimoto, S., Aoki, S. and Yamanouchi, T. (2001): Temporal variations of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and carbon isotope ratio in Ny-Ålesund, Svalbard. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **54**, 71-80.
- Morison, J., Aagaard, K. and Steele, M. (1998a): Report on Study of the Arctic Change Workshop held November 10-12, 1997, University of Washington, Seattle, Washington. Report No. 8, Polar Science Center, Applied Physics Laboratory, University of Washington, 34 p.
- Morison, J.H., Steele, M. and Andersen, R. (1998b): Hydrography of the upper Arctic Ocean measured from the nuclear submarine USS Pargo. *Deep Sea Res.*, **45**(1), 15-38.
- Parkinson, C.L. and Cavalieri, D.J. (1989): Arctic sea ice 1973-1987: Seasonal, regional, and interannual variability. *J. Geophys. Res.*, **94**, 14499-14523.
- Proshutinsky, A.Y. and Johnson, M.A. (1997): Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, **102**, 12493-12514.
- Radionov, V.F. and Marshunova, M.S. (1992): Long-term variation on the turbidity of the Arctic atmosphere in Russia. *Atmos. Ocean*, **30**, 531-549.
- Randall, D., Curry, J., Battisti, D., Flato, G., Grumbine, R., Hakkinen, S., Martinson, D., Preller, R., Walsh, J. and Weatherly, J. (1998): Status and outlook for large scale modeling of atmosphere-ice-ocean interactions in the Arctic. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **79**, 197-219.
- Rigor, I.G., Colony, R.L. and Martin, S. (2000): Variations in surface air temperature observations in the Arctic, 1979-97. *J. Climate*, **13**, 896-914.
- Rogne, O. (1996): A review of the development of international science cooperation in the Arctic with a focus on IASC activities and its science priority projects. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 1-6.
- Rothrock, D.A., Yu, Y. and Maykut, G.A. (1999): Thinning of the Arctic sea-ice cover. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3469-3472.
- Schweiger, J.A. and Key, J. (1992): Arctic cloudiness: Comparison of ISCCP-C2 and Nimbus-7 satellite derived cloud products with a surface-based cloud climatology. *J. Climate*, **5**, 1514-1527.
- Serreze, M.C., Box, J.E., Barry, R.G. and Walsh, J.E. (1993): Characteristics of Arctic synoptic activity, 1952-1989. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **51**, 147-164.
- Serreze, M.C., Barry, R.G. and Walsh, J.E. (1995): Atmospheric water vapor characteristics at 70°N. *J. Climate*, **8**, 719-731.
- Serreze, M.C., Walsh, J.E., Chapin III, F.S., Osterkamp, T., Dyurgerov, M., Romanovsky, V., Oechel, W. C., Morison, J., Zhang, T. and Barry, R.G. (2000): Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Climate Change*, **46**, 159-207.
- Shiobara, M., Fujii, Y., Morimoto, S., Asuma, Y., Yamagata, S., Sugawara, S., Inomata, Y., Watanabe, M. and Machida, T. (1999): An overview and preliminary results from the Arctic Airborne Measurement Program 1998 campaign. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **13**, 99-110.
- Stone, R.S. (1997): Variations in western Arctic temperature in response to cloud radiative and synoptic-scale influences. *J. Geophys. Res.*, **102**, 21769-21776.
- Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S., Allen, M.R., Mitchell, J.F.B. and Jenkins, G.J. (2000): External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, **290**, 2133-2137.
- 田中 博ら (2001): 極域気候変動に関する第2回和達国際会議の報告. *天気*, **48**, 印刷中.

- Tao, X., Walsh, J.E. and Chapman, W.L. (1996): An assessment of global climate model simulations of Arctic air temperatures. *J. Climate*, **9**, 1060-1076.
- Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M. (1998): The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.
- Vinikov, K.Y., Robock, A., Stouffer, R.J., Walsh, J.E., Parkinson, C.L., Cavalieri, D.J., Mitchel, J.F.B., Garrett, D. and Zakharov, V.F. (1999): Global warming and northern hemisphere sea ice extent. *Science*, **286**, 1934-1937.
- Vowinkel, E. and Orvig, S. (1970): The climate of the north polar basin. *World Survey of Climatology*, 14: *Climates of the Polar Regions*, ed. by S. Orvig. Elsevier, 129-252.
- Wada, M., Konishi, H. and Yamanouchi, T. (1996): Variation of monthly precipitation and frequency of radar echo existence at some altitudes in Ny-Ålesund, Svalbard, Arctic. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 239-246.
- Wadhams, P. (1990): Evidence for thinning of the Arctic ice cover north of Greenland. *Nature*, **345**, 795-797.
- Walsh, J.E., Chapman, W.L. and Shy, T.L. (1996): Recent decrease of sea level pressure in the central Arctic. *J. Climate*, **9**, 480-486.
- Warren, S.G., Hahn, C.J., London, J., Chervin, R.M. and Jenne, R.J. (1989): *Global Distribution of Total Cloud Cover and Cloud Type Amounts Over the Ocean*. NCAR, Boulder, CO., 150 p.
- White, J.W.C., Barlow, L.K., Fisher, D., Grootes, P., Jouzel, J., Johnsen, S.J., Stuiver, M. and Clausen, H. (1997): The climate signal in the stable isotopes of snow from Summit, Greenland: Results of comparison with modern climate observations. *J. Geophys. Res.*, **102**, 26425-26439.
- Winsor, P. (2001): Arctic sea ice thickness remained constant during the 1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1039-1041.
- Yamanouchi, T. and Charlock, T.P. (1997): Effects of clouds, ice sheet and sea ice on the earth radiation budget in the Antarctic. *J. Geophys. Res.*, **102**, 6953-6970.
- Yamanouchi, T. and Herber, A. (2001): Plan of Arctic field campaign ASTAR2000 (Arctic Study of Tropospheric Aerosol and Radiation). *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **54**, 101-106.
- Yamanouchi, T. and Ørbaek, J.B. (1995): Comparative study of the surface radiation budget at Ny-Ålesund, Svalbard and Syowa Station, Antarctica, 1987. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **9**, 118-132.
- Yamanouchi, T., Aoki, S., Morimoto, S. and Wada, M. (1996): Report of atmospheric science observations at Ny-Ålesund, Svalbard. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 153-163.

(2001年9月17日受付; 2001年9月26日改訂稿受理)