

南極域における大気循環と氷床への大気輸送

鈴木香寿恵^{1*}

Atmospheric circulation and the air transport in the Antarctic

Kazue Suzuki^{1*}

(2010年2月16日受付, 2010年5月18日受理)

Abstract: This study investigate the seasonal variations and features of air transport routes to the Japanese stations, “Syowa Station” and “Dome Fuji Station”, which are located on the coastal and in the continental interior, respectively. For backward trajectory calculation, the NIPR trajectory model (NITRAM) and ERA-40 reanalysis were used. At Syowa Station, the difference of air transport between the mid and lower troposphere (500, 850 hPa, respectively) is of interest. We assorted trajectories into four regions by their locations 5-days before, which indicate the origin area of the air parcel. At 500 hPa over Syowa Station, about 80% of air parcels came from the sea, whereas at 850 hPa, half of trajectories came from Antarctica. Generally, air parcels came from west of Syowa Station at 500 hPa (69%). The easterly wind zone covered the station, so air parcels were liable to come from the east and the continental interior at 850 hPa. At 500 hPa over Dome Fuji Station, about 50% of air parcels from the ocean had traveled to the station and there is an annual variation in the origins.

要旨: 日本の観測拠点のうち, 長期間観測データが蓄積されている沿岸部の昭和基地と, 氷床コア掘削地点である内陸部のドームふじ基地を例にとり, それぞれに到達する大気輸送経路の特徴を調べた。大気輸送経路の算出にはNIPR 流跡線モデルを用い, ERA-40 再解析データを入力データとした。昭和基地については対流圏中層と下層による違いについても調べた。

5日前の空気塊の位置を起源とし, その季節変化を調べた。昭和基地対流圏中層に到達する空気塊は, 年間を通じて海起源が約8割を占め, 陸起源は2割にとどまっていた。海起源の中では, 大西洋起源が約7割となっていた。昭和基地対流圏下層へ到達する空気塊は, 海起源と陸起源の比率がほぼ等しく, 中層よりもインド洋側・内陸側から西向きの大気輸送が卓越していた。ドームふじ基地へ到達する空気塊の, 海・陸起源の比率は昭和基地対流圏下層と同様に半々であるが, 一年周期の季節変化がみられた。

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

* E-mail: suzuki@nipr.ac.jp

1. 南極域の大気循環と季節変化

地球が太陽から受け取るエネルギーの赤道域と極域の差は、赤道域から極域への大気と海洋によるエネルギー輸送の原動力となっている。すなわち、赤道域を熱源、極域を冷源とした地球熱機関が形成され、太陽からのエネルギーの再配分が行われ、地球の気候システムが現在の平衡状態を保っている。このエネルギーの再配分は、主に子午面循環によるものであり、赤道から両極側へ大気が循環されている。南極氷床は、赤外放射の射出率が完全黒体に近く、放射冷却によって低温化しやすい雪氷面に覆われた広大な高アルベド地帯となっており、地球上の大きな冷源として大気循環に大きな役割を担っている。

低中緯度において人間活動による影響を受けた大気が、大気大循環により南極氷床まで輸送されている。南極氷床は他の大陸から閉ざされた環境であり、人為的影響が少ない場所である。したがって、南極氷床は地球全体の環境変動をモニタリングする上で最適な場所である。近年、地球環境変動について南極観測から様々な研究成果が報告され、世界的な地球環境保全への動きが見られる。例えば、昭和基地では世界に先駆けてオゾンホールが発見され (Chubachi, 1984; Farman *et al.*, 1985)、オゾンを破壊するフロンの使用が禁止された。また、二酸化炭素の長期観測 (Morimoto *et al.*, 2003; Nakazawa, 1991) により地球温暖化の現状が明らかにされている。

日本の南極観測が開始されたのは IGY (International Geophysical Year) の 1957 年である。世界各国は南極氷床上での地上気象観測・雪氷観測などを実施した。1970 年代以降、衛星気象データの利用が可能になったことで南半球の大気循環場の研究が盛んになった (van Loon, 1971; Mo and van Loon, 1984; Yasunari and Kodama, 1993)。1978-1979 年には First GARP Global Experiment (FGGE) が行われ、全球規模での気象観測データを取り入れた四次元同化客観解析気象データが各国の気象データセンターを中心に作られるようになった。また、大循環モデル (General Circulation Model: GCM) が開発され、全球格子気象データが配布されるようになった。これらのデータを利用した流跡線解析により、南半球の対流圏と成層圏における大気粒子の移流の特徴なども調べられている (Kida, 1983; Yamazaki, 1986)。

衛星測器の改良およびデータ品質の向上により、1990 年代にはより精度の高い客観解析気象データの利用が可能となり、南極域におけるストームトラックの再統計がされ、circumpolar trough (周極トラフ) の季節変化が捉えられている (Trenberth, 1991; Jones and Simmonds, 1993)。昭和基地周辺は多くの低気圧が大西洋側から通過する、総観規模擾乱の影響を受けやすい場所であると考えられる。冬季には成層圏において極渦が発達するが、対流圏では偏西風帯が 40°-60°S の辺りを中心に発達している (Hartmann and Lo, 1998)。偏西風域には総観規模擾乱が発生しやすく、その擾乱が氷床に接近した際に降雪を氷床沿岸部にもたらす。南極氷床の標高は、沿岸部では急勾配、内陸部では高度 4000 m を超えて

いるため、内陸部まで背の低い総観規模擾乱が侵入する状況は少ない。しかしながら、偏西風帯をロスビー波が伝搬することによって、南極内陸部に降雪をもたらす中低緯度から総観規模擾乱の流入が生じることが明らかになっている (Renwick and Revell, 1999; Hirasawa *et al.*, 2000)。

昭和基地周辺の地上気象観測は、先に述べた 1957 年から一時閉鎖期間を除いて現在まで継続して行われており、約 50 年間の気象データが蓄積されている。van Loon (1971), van Loon and Rogers (1984) と同様に、Sato and Hirasawa (2007) は昭和基地における気圧の季節変動に、夏と真冬の 6 月に極大があり、半年振動があると指摘している。この半年振動は日本付近では見られず、南半球の中高緯度における大気循環場の特徴である。また、南半球環状モード (Antarctic Annular Mode, Southern Atmospheric Oscillation) は極渦の強度を示す指標として知られているが、昭和基地における地上気圧はこの大規模な現象の影響を受け、上記のような季節変動を示していると考えられている (Sato and Hirasawa, 2007)。

一方、内陸部における連続気象観測は世界的にほぼ皆無であるが、ドームふじ基地における越冬観測によって、気温などの地上気象観測が 1995-1997 年および 2003 年に行われた。この観測によって得られた気温の季節変化は、4-9 月にかけて多少の変化はあるものの、ほぼ横ばいとなり、昭和基地において観測されている 9 月付近に最小となる 1 年周期の季節変化とは異なっていた。このように、南極大陸では対流圏大気の状態を沿岸域と内陸域を部分的に比較しても異なる季節変化がみられ、地形や高度などの環境も両者において大きく異なることから、大気中微量物質の輸送もそれぞれ違う様相を示すことが予測できる。それぞれの観測基地におけるエアロゾルなどの大気微量物質の濃度変化から、季節内変動や年々変動が得られているが、それらの輸送過程はまだ解明されていない。南極氷床全域においてどのような大気輸送がなされているのかを明らかにし、その特徴を得ることは、大気中微量物質の輸送過程を理解するだけにとどまらず、氷床コア掘削から得られる古気候の再現においても、輸送過程の推測を通じて古気候における大気循環場の再現性をより高めることを可能とする。

2. 日本の観測基地への大気輸送

図 1 は、南極域におけるストームトラックの分布を示している。昭和基地付近を含む東南極大陸沿岸域は、季節を問わず低気圧が通過しやすい場所である (Jones and Simmonds, 1993)。ストームトラックは、夏季には環状モードが卓越するのに対し、冬季にはより極方向へ移動した環南極低気圧帯の他に中緯度域にも支流が発達し、ダブルジェットと呼ばれる。また、冬季においてウェッデル海上に強度の高い領域がみられることから、昭和基地周辺を通過する低気圧は夏季と冬季とで経路が異なる可能性が示唆されている。南極

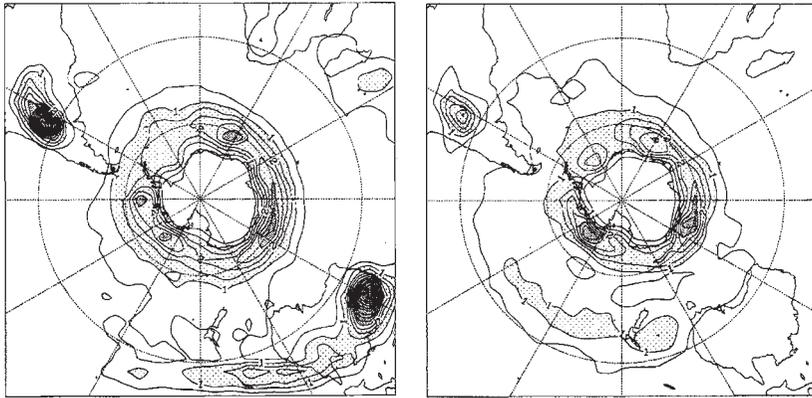


図1 Cyclone system density を季節ごとに示している。左が夏、右が冬である。コンター間隔は 0.5×10^{-3} cyclones (deg.lat.)⁻²。1.0, 3.0 以上の領域をそれぞれ薄い / 濃い網掛けで示している。(James and Simmonds, 1993 より引用)

Fig. 1. (Left) the density of cyclogenesis for summer and (right) for winter. The contour interval is 1.0×10^{-4} cyclones. day⁻¹ (deg.lat.)⁻². Light and heavy stippling denotes area above 2.0 and 4.0 respectively. (Jones and Simmonds, 1993).

氷床への大気輸送を明らかにする上で、移流をもたらす低気圧経路や大気循環場の季節変化を理解することは重要である。以上から、南極大陸への大気輸送を理解することを目的として、1990-1999年までの10年間における、昭和基地とドームふじ基地に到達する空気塊の輸送経路とその起源について、特に季節変化について着目し、その季節変化や対流圏中層と下層における違いを詳細に調べた。解析手法としては、100-850 hPa までの50 hPaごと16層の基点から、毎日1200 UTCから5日間の後方流跡線解析を行った。用いたモデルは、国立極地研究所粒跡線モデル (Tomikawa and Sato, 2005) で、気象データは1日4回、31層、 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格子間隔のERA-40 reanalysisによる3次元の風と気圧、温度を入力した。また対流圏中層として500 hPa、対流圏下層として850 hPaをそれぞれ基点として選別した(ドームふじ基地においては500 hPaのみを取り扱った)。沿岸部として昭和基地、内陸部としてドームふじ基地への大気輸送を比較することで、南極沿岸部と内陸部に到達する空気塊の輸送のそれぞれの特徴および違いについて調べた。

図2は、南極域を三海と一陸という、四つの領域に区分した図である。昭和基地(69°00' S, 39°35' E)・ドームふじ基地(77°19' S, 39°42' E)は共に40°E付近にあることから、40°Eを境界線と決めた。40°Eからみて、西側にあたる領域を大西洋(以後大西洋と表現する)、東側にあたる領域をインド洋(同インド洋)、最も遠い海の領域を太平洋(同太平洋)とし、これらの海領域に囲まれた内側を、内陸(同 continental interior)とした。ここでは空気塊の5日前の位置を、その空気塊の起源として考える。また、その位置について領域ごとに集計を行い、大気起源の季節変化を導いた。大気中微量物質の輸送経路と起源の推定を今

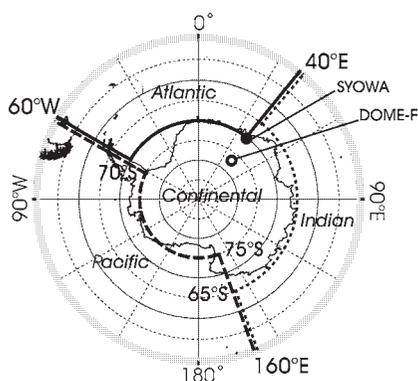


図2 南極域の海領域区分図。海領域で囲まれた部分を内陸 (continental interior) とする。黒丸は昭和基地、白抜き丸はドームふじ基地の位置を示す。

Fig. 2. Map of four regions including the Atlantic ($60^{\circ}\text{W}-40^{\circ}\text{E}$, $<70^{\circ}\text{S}$), Indian ($40^{\circ}\text{E}-160^{\circ}\text{E}$, $<65^{\circ}\text{S}$), and Pacific ($160^{\circ}\text{E}-60^{\circ}\text{W}$, $<75^{\circ}\text{S}$) oceans, and the continental region (remaining part). We used these divisions to define the region of origin of air parcels according to their location five days before their arrival.

後の課題としていることから、外部からの大気の輸送と考えられる海からの大気輸送に重点をおいた。

3. 大気輸送経路の特徴

3.1. 昭和基地への大気輸送

昭和基地上空 500 hPa に到達する空気塊の 5 日前の位置について、図 2 の領域に該当する流跡線を、水平方向は緯度経度 2.5 度、鉛直方向は緯度 2.5 度、高度 10 hPa の格子を仮定し、1 時間ごと 5 日間、すなわち 120 個の粒子の位置を格子ごとに集計した。図 3 はそれぞれ 10 年間、月ごとの各格子における粒子の総数を平均した値を水平分布、鉛直分布ごとに示したものである。丸印は 12 時間ごとの最大値の位置を示している。大西洋起源の空気塊は、中低緯度側から偏西風帯を斜めに横切る形で 60°S 付近から緩やかに上昇しながら到達している。太平洋起源の輸送経路は、大西洋起源と同様に東向き輸送となっているが、高度方向の移動が少なく、偏西風帯が発達する $50^{\circ}-70^{\circ}\text{S}$ の間を通過する傾向がみられる。インド洋起源の空気塊は、偏西風域を東向きに進んでから 90°E 付近で西向きに転換し、沿岸部や、沿岸側の山脈を地形に沿って昭和基地に到達している。インド洋起源の輸送経路は沿岸部に近い海上において急激な傾度で上昇している。内陸起源の空気塊は、ほとんどが上下方向に移動せず、対流圏中層を漂っている大気が到達している。内陸から海上へ出た場合も、高度変化は乏しい。

これらの輸送経路の背景となる大気循環場は、大西洋起源となる場合、等圧面高度は南極大陸を中心に波数 3 型のパターンをもち、昭和基地の西側にトラフが発達していた。偏

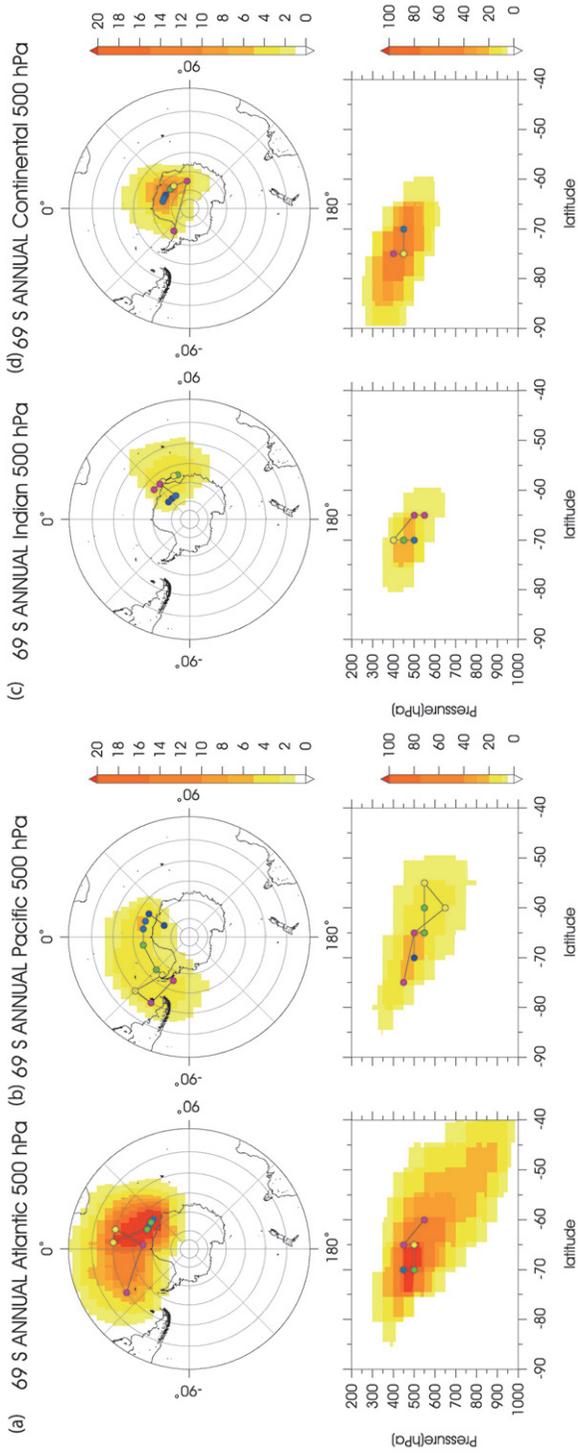


図 3 昭和基地上空 500 hPa に到達する空気塊の輸送経路について、5 日前の位置によって分類を行い、5 日間の輸送についてそれぞれ水平方向に経度緯度 2.5 度グリッド、鉛直方向に緯度 2.5 度高度 50 hPa の格子ごとに頻度を集計し、10 年平均値を得た。それぞれ、(a) 大西洋起源、(b) 太平洋起源、(c) インド洋起源、(d) 内陸起源について、水平・高度分布における、格子ごとの個数の割合を示している。丸印は、12 時間ごとの頻度の最大値の位置を、12・24 時間後は青、36・48 時間後は水色、60・72 時間後は緑、84・96 時間後は黄、108・120 時間後は桃色でそれぞれ示している。

Fig. 3. (a) Spatial frequencies of the 10-year mean trajectories reached at 500 hPa at Syowa Station for 5 days. The upper panel is the frequencies of air parcels on a $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ horizontal grid, the lower panel is the frequencies of air parcels for a $50 \text{ hPa} \times 2.5^\circ$ vertical grid, respectively. Dots are maxima of air parcel numbers, before 12 and 24 hours (blue), 36 and 48 hours (light blue), 60 and 72 hours (green), 84 and 96 hours (yellow), and 108 and 120 hours (pink), respectively. (b) Same as but for Pacific and (c) for Indian Oceans, and (d) for Continental Interior.

西風帯には東向きの極大域，沿岸部周辺には弱い東風領域がみられた。大西洋海上を偏西風によって移流された空気塊が，昭和基地の西側で急速に南東方向へ上昇した後，東風領域に流入して昭和基地へ到達しやすくなる場といえる。太平洋起源となる場合，波数3型の等圧面高度は同様にみられるが，偏西風帯の東向きの極大域が西側にずれ，40°E付近で等圧線が蛇行していた。太平洋起源をもつ空気塊は偏西風帯に沿って移動し，その後，南東方向に方向転換して昭和基地に到達するケースが多くなっていた。インド洋起源となる場合は，昭和基地付近が低圧部に覆われ，偏西風帯の極大域はインド洋上80°E付近に存在する。偏西風帯を東向きに移動してきた大気が南極氷床上空へ流入し，その後，低圧部を西向きに下降する状況が考えられる。内陸から大気が輸送される場合，東南極大陸上空に外部大気の流入をブロックする低圧部の存在により，氷床上を西向きに大気が輸送される状況が形成されていた。

図4は図3と同様に，昭和最地上空850 hPaに到達する空気塊の経路について集計し，起源ごとに輸送経路を示している。大西洋起源・インド洋起源の空気塊の輸送経路の特徴は500 hPaとよく似ている。Suzuki *et al.* (2004)は輸送経路長が高度によって異なり，対流圏下層では全体的に輸送経路は短いため，水平輸送分布の広がりも中層と比較すると小さくなることを示している。大西洋起源の空気塊の輸送経路は，大半が偏西風域の海面近くの下層から南東方向へ移動してきている。空気塊が一旦大陸上に流入してから到達する場合は大きな上昇を伴うが，海上から到達する場合は上下方向の動きが少ない。下層におけるインド洋起源の輸送経路の特徴は，インド洋上から低圧帯に取り込まれ，西向きの移流となる際に，氷床の地形に沿って昭和基地に到達している点である。カタバ風が卓越する大気境界層より上空である対流圏下層においても，内陸部から沿岸部へ向かう流れが存在している。太平洋起源をもつ空気塊の個数自体が乏しく事例は少ないが，輸送経路の特徴を見ると，中層と同様な偏西風に沿った東向きの同心円状の移流による輸送経路と，ロス海側から沿岸部を西向きに輸送され，東南極大陸をインド洋起源と同様な大陸地形に沿って下降流として昭和基地に到達している輸送経路がみられた。内陸起源の空気塊の輸送経路は，内陸側から地形に沿って下降する特徴が見られる。しかしながら，海上へ出た場合は下層を通過している。これは，温位面の急勾配によって，対流圏下層における氷床沿岸域では上昇流が卓越することが反映されたものと予測できる (Suzuki *et al.*, 2004)。対流圏下層における大気輸送経路において，輸送の背景となる大気循環場の特徴は，ほとんどが中層と同様であり，基本的な輸送メカニズムは同じであると考えられた。

3.2. ドームふじ基地への大気輸送

図5は図3と同様に，ドームふじ最地上空500 hPaに到達する空気塊の経路について集計し，海域ごとに輸送経路を示している。大西洋起源の空気塊の輸送経路は，中緯度側か

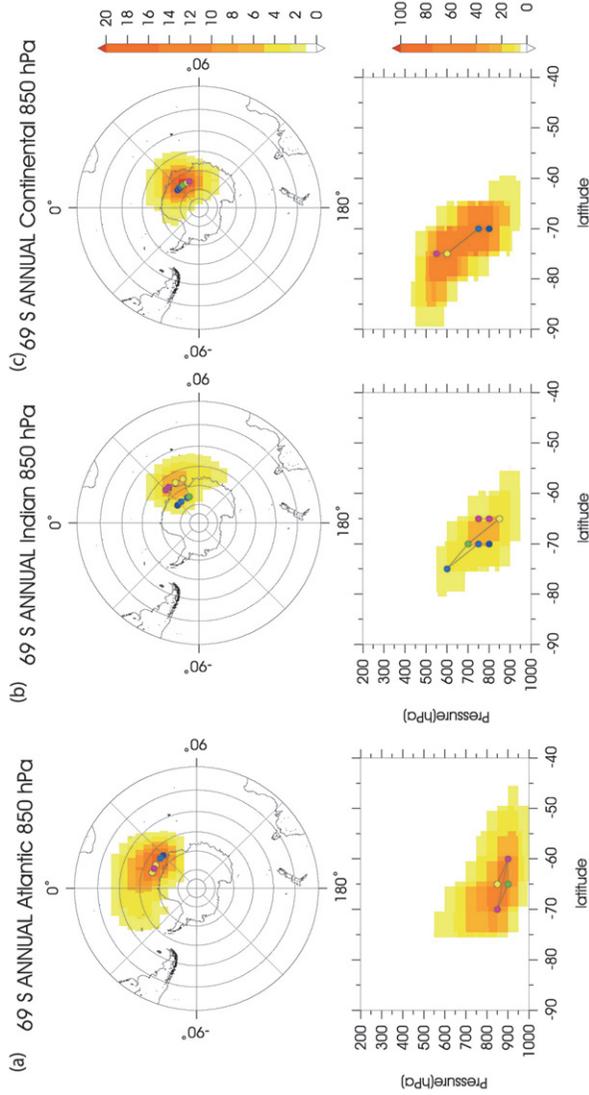


図4 図3と同様に昭和基地上空850 hPaに到達する空気塊の輸送経路について、5日前の位置によって分類を行い、5日間の輸送についてそれぞれ水平方向に経度緯度2.5度グリッド、鉛直方向に緯度2.5度高度50 hPaの格子ごとに頻度を集計し、10年平均値を得た。それぞれ、(a) 大西洋起源、(b) インド洋起源、(c) 内陸起源について、水平・高度分布における格子ごとの個数の割合を示している。丸印は12時間ごとの頻度の最大値の位置を、12・24時間後は青、36・48時間後は水色、60・72時間後は緑、84・96時間後は黄、108・120時間後は桃色でそれぞれ示している。ここでは太平洋起源の空気塊の頻度分布は示していない。

Fig. 4. Same as Fig. 3 but for 850 hPa at Syowa Station.

ら偏西風帯を南南東方向に横切って、偏西風帯の南端近くで上昇している。昭和基地の場合よりも南方向へ大気が移流されているため、総観規模擾乱などの影響を受けた大気が到達していると考えられる。

インド洋起源の空気塊は、昭和基地へはインド洋上から上昇流に伴って大陸へ流入後、沿岸部を下降して到達していたが、ドームふじ基地へ到達する場合は、インド洋上から流入時により急激に上昇して流入した後、大陸上での高度方向の運動はほとんどみられない。空気塊の流入しやすい場所が2地点あり、一つはアメリー棚氷、もう一つは図1で示した、強いストームトラックの極大がある120°E付近である。この領域において低気圧が頻繁に発達し通過していくために、インド洋側から大陸上への大気の流入が起りやすく、流入する場所はプラネタリー波の蛇行の位置と関係していると考えられる。太平洋起源となる輸送経路の特徴は、太平洋側から氷床内陸へ侵入し、極点付近を通り地形に沿って下降しながらドームふじ基地に到達する場合と、南極半島近くの海上を、東向きに高度方向の運動を伴わずに到達する場合がある事である。昭和基地へ到達する場合、空気塊は太平洋から大西洋へ偏西風帯を東向きに移動していたが、ドームふじ基地へ到達する場合は、空気塊が沿岸近く、もしくは南極点側を通過するため、大西洋領域における擾乱に伴う流れに関係しないことがある。内陸起源となる空気塊は、昭和基地500 hPa(図3)と同様、鉛直方向の運動が少なく、大陸上空の対流圏中層に留まっている。Suzuki *et al.* (2004)で示した等温位面の勾配は大陸上では緩やかなため、水平方向の移流が卓越していることが示唆される。

大西洋起源となる場合は、波数3型のプラネタリー波が卓越し、昭和基地の場合と一致している。ドームふじ基地に到達する場合は、波数3型のプラネタリー波が強まり、昭和基地の西側にあるトラフ部分がより鋭角になっている。空気塊は経度0度付近で偏西風帯を横切って大陸上へ流入するため、60°S付近から上昇する機会が多くなっている。太平洋起源の場合は、東沿岸部上に東風領域、内陸部には西風領域がみられ、等圧線が南極半島の付け根辺りから大きく婉曲しており、太平洋上の大気が流入しやすい状況になっている。インド洋起源と内陸起源の場合の大気循環場の特徴は、沿岸部に広範囲に渡る東風領域が現れ、等圧線が120°-140°E付近で大きく婉曲している事である。インド洋上の偏西風帯では気圧勾配が強まっている。インド洋起源の場合、インド洋側の低圧部(東風領域)が海上へ張り出しており、海上にも東風領域が沿岸伝いに広がっているため、強化された偏西風帯域からの大気の流入が起りやすくなっている。内陸起源の場合は、低圧部(東風領域)の海上への張り出しは少なく、東風領域はほとんど大陸上にとどまっており、大陸上の高度は平均して50 m程度低くなっている。南極大陸上空全体を覆った低圧部が発達することで、海上からの大気の流入をブロックしている。偏西風帯の発達域はインド洋上であり、東風領域が東大陸沿岸部に広がる状況は同じだが、海上への低圧部の張り出しによ

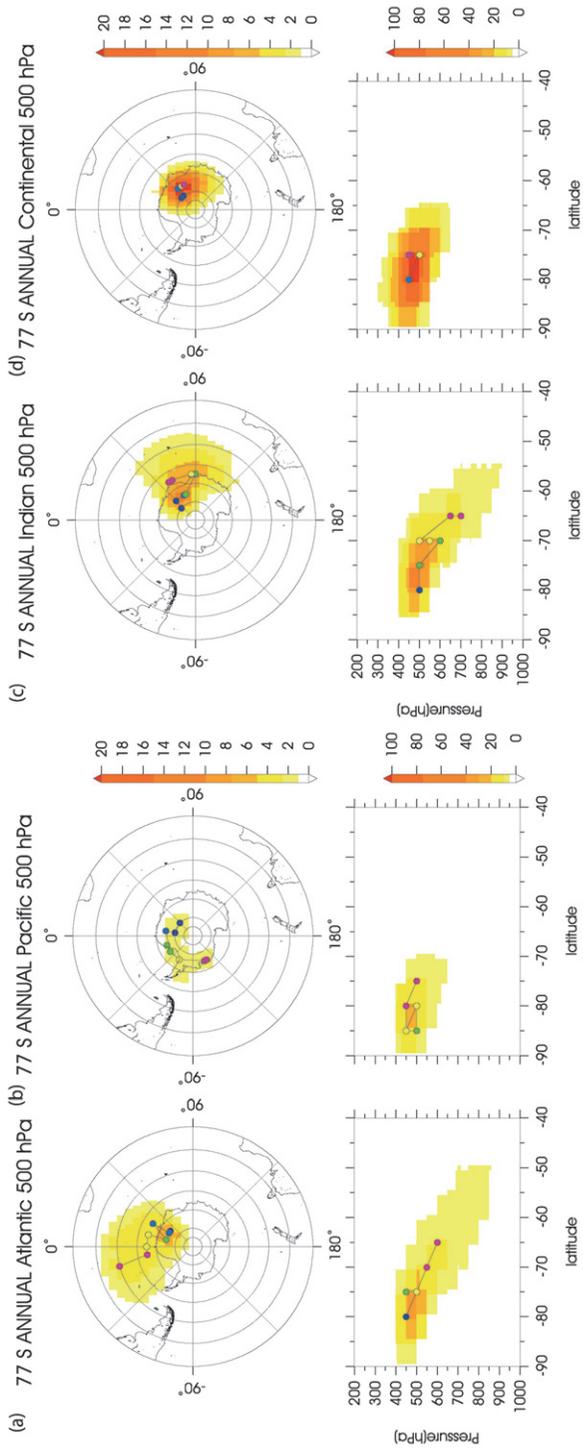


図5 図3と同様にドームふじ基地上空500 hPa に到達する空気塊の輸送経路について、5日前の位置によって分類を行い、5日間の輸送についてそれぞれ水平方向に経度緯度2.5度グリッド、鉛直方向に緯度2.5度高度50 hPaの格子ごとに頻度を集計し、10年平均値を得た。それぞれ、(a) 大西洋起源、(b) 太平洋起源、(c) インド洋起源、(d) 内陸起源について、水平・高度分布における格子ごとの個数の割合を示している。丸印は12時間ごとの頻度の最大値の位置を、12・24時間後は青、36・48時間後は緑、60・72時間後は黄、84・96時間後は黄、108・120時間後は桃色でそれぞれ示している。

Fig. 5. Same as Fig. 3 but for 500 hPa at Dome Fuji Station.

て大気が大陸上へ流入する場合と、海上からの流入をブロックする場合に分かれている。

4. 南極域における大気循環場の季節変化

ここで、大気輸送の基本場となる南極域の大気循環場について、季節変化を中心に説明する。月平均した等圧面高度を利用する。南極域における定常的な気圧配置だけでなく、東西風による総観規模擾乱の活動度についても考慮する。図 6(a) は、1 月と 7 月の 500 hPa における等圧面高度（以後、Z500）と東西風の月平均値である。どちらの月においても、偏西風帯を中心に、中緯度から極域方向に急激に高度が下がっているが、南極大陸上の Z500 の特徴は、両者で異なっている。1 月には、Z500 は沿岸域で低く、内陸部では相対的に高い。沿岸域の昭和基地付近は低圧部に覆われ、弱い東風が吹いているため、空気塊のほとんどは低圧部より北側で東向きに流され、低圧部に沿って極方向へ向きを変え、昭和基地上空に東側から到達している。この低圧部を中心にして 30°E、65°S 付近で円を描く空気塊の輸送経路もみられ、鉛直方向にはほとんど移動していない。一方、アフリカ南部起源の空気塊は、偏西風帯の対流圏下層から昭和基地に到達している。

7 月には、南極大陸上に Z500 における低圧部の中心がみられ、昭和基地は南極大陸を取り囲む偏西風帯の最南端部辺りに位置している。これは、図 1 で示した昭和基地周辺におけるストームトラックの領域が、冬季に極側にシフトすることと一致している。このため、流跡線は大西洋上の周極偏西風帯の中心付近に集中している。各月の Z500 の水平分布と流跡線とを比較した結果、空気塊は周極偏西風帯で発達した総観規模擾乱の影響を受けて、昭和基地へ到達していると考えられる。以上から、7 月に昭和基地上空対流圏中層に到達する空気塊は、大西洋上の周極偏西風帯が起源であるといえる。

図 6(b) に 0°-90°E を平均した Z500 と東西風の緯度-時間断面図を示す。大陸の沿岸部である 60°-70°S の領域において、12 月~1 月に東風の極大がみられる。しかしながら 12 月には、1 月よりも強い東風をもたらす気圧勾配が沿岸域付近にあるため、1 月よりも東から到達する空気塊の数が増加する。2-3 月には、極域の気圧が低くなり、大陸周辺の低圧部がみられなくなる。このような状況になると、昭和基地付近では周極偏西風の影響が強くなり、大西洋側から到達する空気塊が増加する。さらに、6 月を除く 4-8 月にかけては、偏西風域の南端（東風と西風の転向点）がちょうど昭和基地がある 70°S 付近に位置している。よって、この期間には大西洋上の偏西風帯に起源を持つ空気塊の到達が増加することが予想できる。

9-11 月の期間は、極域において Z500 が増加し、南極沿岸域から偏西風が遠ざかる特徴がみられる。この期間の流跡線分布の時間的な変化は、2-3 月にかけての状況の反対ではなく、南極大陸上を通過する流跡線の数が増加することを示している。流跡線の増加は、この期間に中緯度と南極大陸との間に南北風が強まっていることを示唆している。

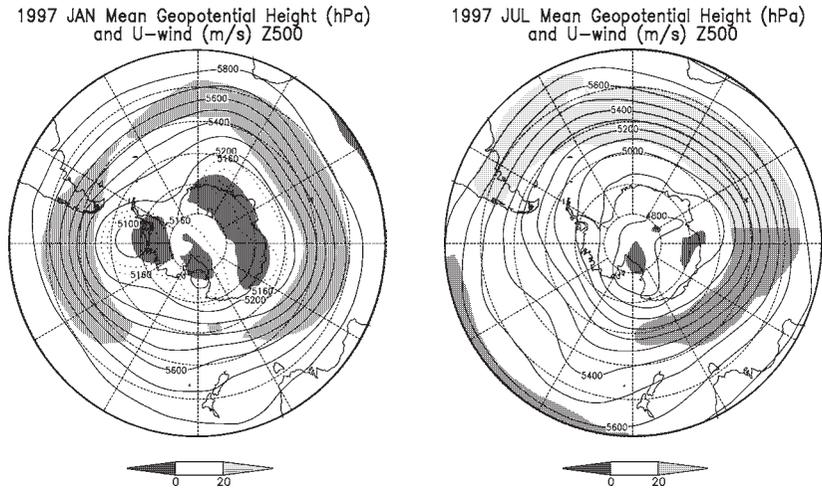


Fig. 6(a)

図 6 (a) 500 hPa 平面におけるジオポテンシャル高度の月平均値と東西風の月平均値を、それぞれコンターと網掛けで示している。左が1月、右が7月の平均値である。コンターの間隔は100 mで、点線は5130 mと5160 mをそれぞれ表している。網掛けの薄灰は西風で、濃灰は東風である。

Fig. 6. (a) Monthly averaged geopotential height (contoured) and zonal wind (shaded) at the 500 hPa level (referred to as Z500) in January and July. The contour interval for the solid lines is 100 m. The lines for 5130 and 5160 m are dotted. Dark shading is easterly wind and light shading is westerly wind.

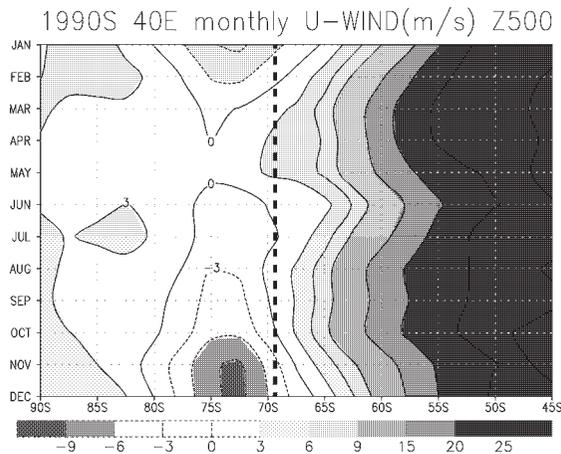


Fig. 6(b)

図 6 (b) 東経40度に沿った、500 hPaにおける東西風の10年間の月平均値を示す。縦軸は月、横軸は緯度、単位はm/sである。昭和基地のある南緯69度を太破線で示している (Suzuki et al., 2004より引用)。

Fig. 6. (b) The 500 hPa level for 40°E in 1990–1999. The contour interval between adjacent solid lines is 100 m and the dotted lines are 50 m from the nearest solid line. Shading is the same as in (a). The bold dotted line shows 69°S (at Syowa Station). (Suzuki et al., 2004).

図7(a)に、1月と7月の850 hPaにおける等圧面高度（以後、Z850）と東西風の月平均値を示す。南極大陸は標高が高く、沿岸部を除いて850 hPa面よりも地表面が高くなるため、大陸上の等圧線は記載していない。1月と7月には、 40° - 60° Sの間に大きな気圧勾配がみられる。どちらの月にも、沿岸部に低圧部が存在している。この、沿岸部に低圧部があり海上に気圧勾配が発達する状況は500 hPaでもみられ、周辺の領域において偏西風帯が強まっていることが示唆される。昭和基地はこの低圧部の南側に位置するために、東風領域になっている。したがって、7月（冬季）には中緯度で西風が卓越し、沿岸部では東風が強まるような気圧勾配が形成されている。

図7(b)に 0° - 90° Eを平均したZ850の緯度-時間断面を示す。年間を通じて 60° - 70° Sの緯度帯に低圧部が存在し、冬は気圧が最も低くなっている。1月はこの低圧帯周辺における等圧面高度の勾配が小さく、昭和基地付近の東風が弱いことを示している。3-6月にかけて低圧部の気圧が下がっていくため、昭和基地周辺の東風は平均的に緩やかに強くなっている。この期間に、平均偏西風帯の最南端部が 65° Sより南側に侵入してくるため気圧勾配が強まり、低圧部が強化されることが関係すると考えられる。冬前半には空気塊が偏西風帯を通して昭和基地へ到達しやすい状況になっている。7月、8月において低圧部の気圧自体はほとんど変化しないが、中緯度側へ低圧部の幅が広がり、低圧部と偏西風帯の間の気圧勾配に増加傾向が見られる。図1においても、冬季に偏西風域の季節による位置の変化に伴って、低気圧経路がより沿岸部に近づき、気圧勾配が強化されている。冬季は夏季よりも cyclone system density は低くなるが、ストームトラックの領域が昭和基地周辺まで南下するため、低気圧は昭和基地周辺を通過しやすくなる。逆に、夏季において、cyclone system density は高くなるが、ストームトラックの中心域が中緯度側にシフトするため、昭和基地周辺を低気圧が通過する頻度が少ない。このような背景をふまえると、冬季後半から春には、沿岸部において中緯度方向へ張り出した低圧部が偏西風域からの大気の流れをブロックしており、大西洋方向から昭和基地に直接到達する空気塊はほとんどないと考えられる。

5. 大気輸送起源の季節変化

図8(a)は、昭和基地上空500 hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図2の領域に該当する個数を数え、10年間の月平均値を海と陸の比較(左図)、海ごとの比較(右図)をそれぞれ示している。1年を通じて海起源が卓越しているが、領域別に見ると大西洋起源が最も卓越している。12月、1月（夏季）には、内陸起源が多少増加しており、海領域別ではインド洋からの輸送が増加している。また、インド洋起源の輸送には3月と10月に極小が見られる。昭和基地に海上から到達する空気塊の輸送経路を、主に昭和基地の西側からと、東側からとに分けると、西側からの輸送は主に大西洋および太平洋起源、東側から

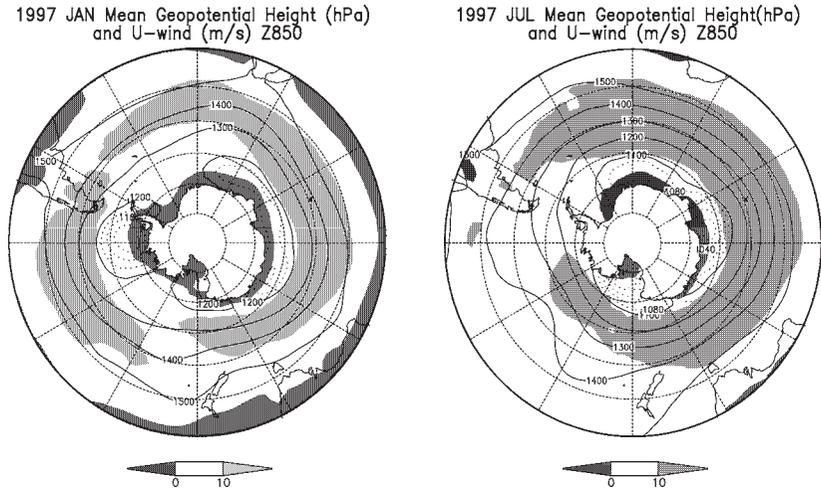


Fig. 7(a)

図7 (a) 850 hPa 平面におけるジオポテンシャル高度の月平均値と東西風の月平均値をそれぞれ、コンターと網掛けで示している。左が1月、右が7月の平均値である。コンターの間隔は100 mで、1月における1200 m以下と7月における1100 m以下は、点線で20 mごとになっている。網掛けの薄灰は西風で、濃灰は東風である。

Fig. 7. (a) Monthly averaged geopotential height (contoured) and zonal wind (shaded) at the 850 hPa level (referred to as Z850) in January and July. For the solid lines, the contour interval is 100 m. Lines under 1200 m in January and under 1100 m in July are dotted and have a contour interval of 20 m. Dark shading is easterly wind and light shading is westerly wind.

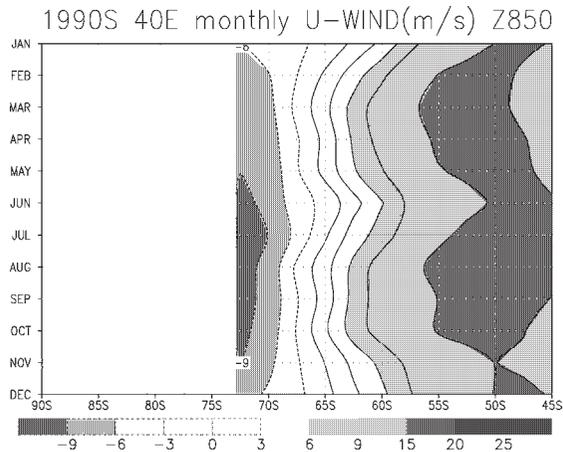


Fig. 7(b)

図7 (b) 東経40度に沿った、850 hPaにおける東西風の10年間の月平均値を示す。縦軸は月、横軸は緯度、単位はm/sである。南極氷床の大部分は850 hPa面より高いため、沿岸域にある南緯71度までのみ表示している (Suzuki et al., 2004 より引用)。

Fig. 7. (b) Time-latitude section of the geopotential height (contoured) and zonal wind (shaded) at the 850 hPa level for 40°E in 1990–1999. The contour interval between adjacent solid lines in 100 m and the dotted lines are 50 m from the nearest solid line. Shading is the same as in (a). (Suzuki et al., 2004).

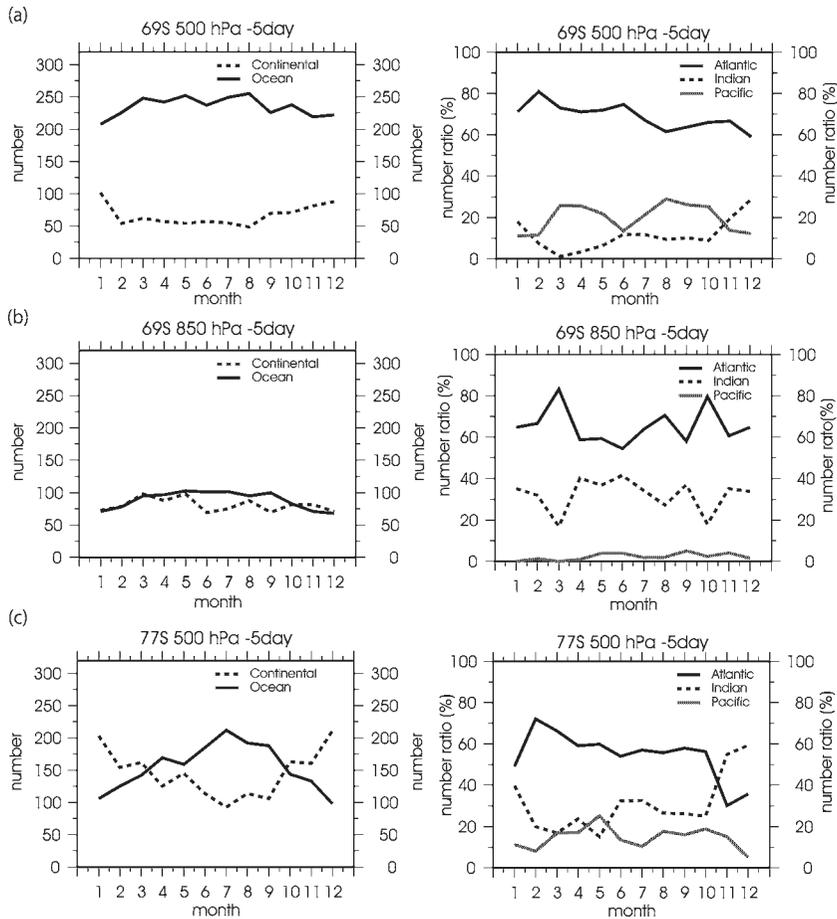


図8 (a) 左: 昭和基地上空 500 hPa に到達する空気塊の 5 日前の位置について、海・陸起源比を 10 年間の月平均値を用いて示す。途中で地面に衝突するなど、5 日前まで追跡できない場合は除いた。右: 図 2 における海領域に含まれている空気塊の海別の個数の割合を月ごとに示す。

(b) (a) と同様に、昭和基地上空 850 hPa に到達する空気塊の 5 日前の位置について、海・陸起源比と、海起源別の比の季節変化を示している。

(c) (a) と同様に、ドームふじ基地上空 500 hPa に到達する空気塊の 5 日前の位置について、海・陸起源比と、海起源別の比の季節変化を示している。

Fig. 8. (a) (Left) 10-year monthly averaged numbers of trajectories to 500 hPa at Syowa Station and the solid (dot) line shows air parcel origin from the ocean (continental interior). (Right) ratios of numbers of trajectories from three oceans, respectively.

(b) Same as (a) but for 850 hPa at Syowa Station.

(c) Same as (a) but for 500 hPa at Dome Fuji Station.

の輸送は主にインド洋起源となる。西側からの輸送が一年を通じて卓越しており、夏季には東側からの輸送が増加している。

昭和基地付近では、3-5月を除くと、弱い東風領域となっている(図7(b))。また、11-1

月にかけては東風が強まっている。昭和基地周辺に西風と東風の転向点が存在することから、西風に乗って移動してきた空気塊が東風に転向し、昭和基地へ到達しやすくなるため、大西洋起源が卓越する。偏西風帯は、3-5月、8-10月にそれぞれ極大を持ち、太平洋からの空気塊の輸送が増える時期と一致している。偏西風帯が昭和基地側に近づくことは、偏西風帯中に発達する擾乱に伴った、より遠くからの大気輸送の機会を増やすと考えられる。逆に、6月、11-1月の時期は、偏西風帯が低緯度側に移動することで、昭和基地付近では東風が優勢となり、上記のような擾乱の直接の影響を受けにくくなる。代わって、より東側の南極域からの大気輸送が卓越する。これがインド洋側・内陸側からの空気塊の輸送が増加する事と関連している。

図8(b)は、昭和基地上空850 hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、海・陸起源の個数と海起源における各海領域の割合を示している。海起源と陸起源の割合はほぼ半数ずつであり、対流圏中層とは大きく異なっている。第3章では、インド洋起源および内陸起源をもつ空気塊は、西向きに大陸沿岸部を下降して到達する傾向がみられた。海起源別の割合は、大西洋起源が年間を通じて優勢となっている。しかしながらインド洋起源は33%となっており、西向きの輸送が増加している。図4-図7で示した通り、下層では全体的に風速が小さく、5日間における空気塊の輸送距離は中層の約半分となるため、太平洋起源の輸送はほとんどない。大西洋起源とインド洋起源の個数の季節変化は逆位相になっており、3月と10月には大西洋起源の極大、インド洋起源の極小が見られる。

ここで、中層における大西洋起源と太平洋起源の輸送経路の特徴が東向きの移流であり、インド洋起源と内陸起源の輸送経路が西向きの移流となることを考慮すると、それぞれを合わせて中層では東向きの輸送が89%だったのに対し、下層では67%となっている。対流圏下層において、昭和基地周辺では低圧部が通年存在しているために、偏西風帯からの大気輸送がブロックされて東向きの輸送が減少し、西向きの輸送が増加すると考えられる。

昭和基地付近は年間を通じて弱い東風が卓越しており、インド洋起源の空気塊が中層よりも増加すると考えられる。中層と同じく50°S付近を中心に西風が強まっているが、全体的に風速は約2分の1になっている(図7(b))。偏西風帯の南端が昭和基地付近まで張り出すことによって、東向きの大気が昭和基地に到達しやすい状況になるとすれば、3月と8-10月にその張り出しの極大がみられ、大西洋起源が極大(インド洋起源が極小)となることを裏付けている。対流圏下層において69°S付近では通年、東風が卓越している。昭和基地に近い大西洋起源の偏西風帯域の空気塊が、低圧部によって転向されて西向きに輸送されることが多いことから、大西洋起源が1年を通じて優勢となっている。

図8(c)は、ドームふじ基地上空500 hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、海・陸起源の個数と海起源における各海領域の割合を示している。夏季には陸起源の大気輸送が卓越し、冬季には海起源の大気輸送が卓越しており、全体での割合はほぼ半々である。

夏季には全体的に風が弱まり、高気圧が南極大陸上空を覆っている。その結果、大陸の外部からの大気の流れが起りにくくなっている。冬季には周極偏西風帯が卓越し、極域一中緯度域間における大気交換が遮断されると予想されがちだが、総観規模擾乱が沿岸部周辺を通過する頻度は高くなっている。結果として、大陸外からの大気の流れが活発になると考えられる (Seko *et al.*, 1992)。

海起源ごとの割合では、11月と12月を除けば大西洋起源が優勢となっている。インド洋起源が卓越する11-12月、および比較的多い1月には、沿岸部から内陸部にかけて東風が極大となっており(図6(b))、東向きの輸送が多くなるといえる。全体の割合としては、大西洋起源が55%、インド洋起源が30%、太平洋起源が15%となっており、大西洋からの輸送が多いものの、様々な方向からドームふじ基地へ大気が輸送されている。沿岸部にある昭和基地では風向は夏季に西向き、冬季に東向きになっているが、丘陵にあるドームふじ基地では風向は定まらず、あらゆる方向から大気が輸送されていると推測された。

6. ま と め

昭和基地における対流圏中層への大気輸送は、偏西風帯の影響を受けた西側からの海起源の輸送が卓越し、対流圏下層へは、周辺にある低圧部の影響から海起源と陸起源の割合は半々で、東側からの輸送が増加していた。対流圏中層・下層共に、昭和基地の西側に低圧部が存在する場合は、海上からの東向きの輸送が卓越し、東側に低圧部が存在する場合は、沿岸部や内陸からの西向きの輸送が卓越する傾向がみられた。ドームふじ基地における、大気輸送経路の海起源と陸起源の割合は半々である。明瞭な季節変化がみられ、夏季は大陸を覆う高気圧に影響を受け内陸起源が優勢となるが、冬季には総観規模擾乱などによる大気の流れの増加により海起源が優勢となっていた。ドームふじ基地周辺が高気圧になり、その西側(東側)に低気圧がある場合に、大西洋側(インド洋側)からの大気が入り込んでいた。また、基地の東側が低圧になり、西側に高圧部がある場合は、ロス海側から南極点を通過して大気が到達しやすく、基地上空が低圧で西側に高圧部がある場合は、東南極大陸上に流入したりッジによる反時計回りの大気輸送が卓越していた。しかしながら、明確な輸送経路の方向性がみられなかった。

沿岸部では、対流圏中層および下層について、それぞれ大気輸送経路の起源や到達する方向が明らかになったが、内陸部でははっきりとした特徴はなく、内陸部へ様々な方向から大気が入り込んでいることが示唆された。大気中微量物質の濃度の季節変化や空間分布を捉える上で、本研究による輸送起源の季節変化や輸送パターンを把握することは必要であると考えられるが、今後は、物質濃度変化をもたらす輸送パターンの変化やその背景となる大気循環場の理解だけでなく、南極氷床全体における大気輸送の概要を理解することが、古気候の再現においても重要な課題である。

文 献

- Chubachi, S. (1984): Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February 1982 to January 1983. Mem. Natl Inst. Polar Res. Spec. Issue, **34**, 13-19.
- Farman, J.C., Gardiner, B.G. and Shanklin, J.D. (1985): Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. Nature, **315**, 207-210.
- Hartmann, D.L. and Lo, F. (1998): Wave-driven zonal flow vacillation in the Southern Hemisphere. J. Atmos. Sci., **55**, 1303-1315.
- Hirasawa, N., Nakamura, H. and Yamanouchi, T. (2000): Abrupt changes in meteorological conditions observed at an inland Antarctic station in association with wintertime blocking. Geophys. Res. Lett., **27**, 1911-1914.
- Jones, D.A. and Simmonds, I. (1993): A climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones. Clim. Dynam., **9**, 131-145.
- Kida, H. (1983): General circulation of air parcels and transport characteristics derived from a Hemispheric GCM part 2: very long-term motions of air parcels in the troposphere and stratosphere. J. Meteorol. Soc. Jpn., **61**, 510-523.
- van Loon, H. (1971): A half-yearly variation of the circumpolar surface drift in the Southern Hemisphere. Tellus, **23**, 511-516.
- van Loon, H. and Rogers, J.C. (1984): Interannual variations in the half-yearly cycle of pressure gradients and zonal wind at sea level on the Southern Hemisphere. Tellus, **36A**, 76-86.
- Mo, K.C., and van Loon, H. (1984): Some aspects of the interannual variation of mean monthly sea level pressure on the Southern Hemisphere. J. Geophys. Res., **89**, 9541-9546.
- Morimoto, S., Nakazawa, T., Aoki, S., Hashida, G. and Yamanouchi, T. (2003): Concentration variations of atmospheric CO_2 observed at Syowa Station, Antarctica from 1984 to 2000. Tellus, **55B**, 170-177.
- Nakazawa, T. (1991): The concentration of atmospheric carbon dioxide at the Japanese Antarctic Station, Syowa. Tellus, **43B**, 126-135.
- Renwick, J.A. and Revell, M.J. (1999): Blocking over the South Pacific and Rossby wave propagation. Mon. Weather. Rev., **127**, 2233-2247.
- Sato, K., and Hirasawa, N. (2007): Statistics of Antarctic surface meteorology based on hourly data in 1957-2007 at Syowa Station. Polar Sci., **1**, 1-15.
- Seko, K. (1991): Preliminary study of katabatic wind by using NOAA AVHRR data. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **5**, 167-173.
- Suzuki, K., Yamanouchi, T., Hirasawa, N. and Yasunari, T. (2004): Seasonal variation of air transport in the Antarctic and atmospheric circulation in 1997. Polar Meteorol. Glaciol., **18**, 96-113.
- Tomikawa, Y. and Sato, K. (2005): Design of the NIPR trajectory model. Polar Meteorol. Glaciol., **19**, 120-137.
- Trenberth, K.E. (1991): Storm tracks in the Southern Hemisphere. J. Atmos. Sci., **48**, 2159-2178.
- Yamazaki, K. (1986): Preliminary calculation of trajectory analysis in the lower stratosphere of the Southern Hemisphere. Geophys. Res. Lett., **13**, 1312-1315.
- Yasunari, T. and Kodama, S. (1993): Intraseasonal variability of katabatic wind over East Antarctica and planetary flow regime in the Southern Hemisphere. J. Geophys. Res., **98** (D7), 13063-13070.